

独创性声明



本人声明,所提交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得武汉理工大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

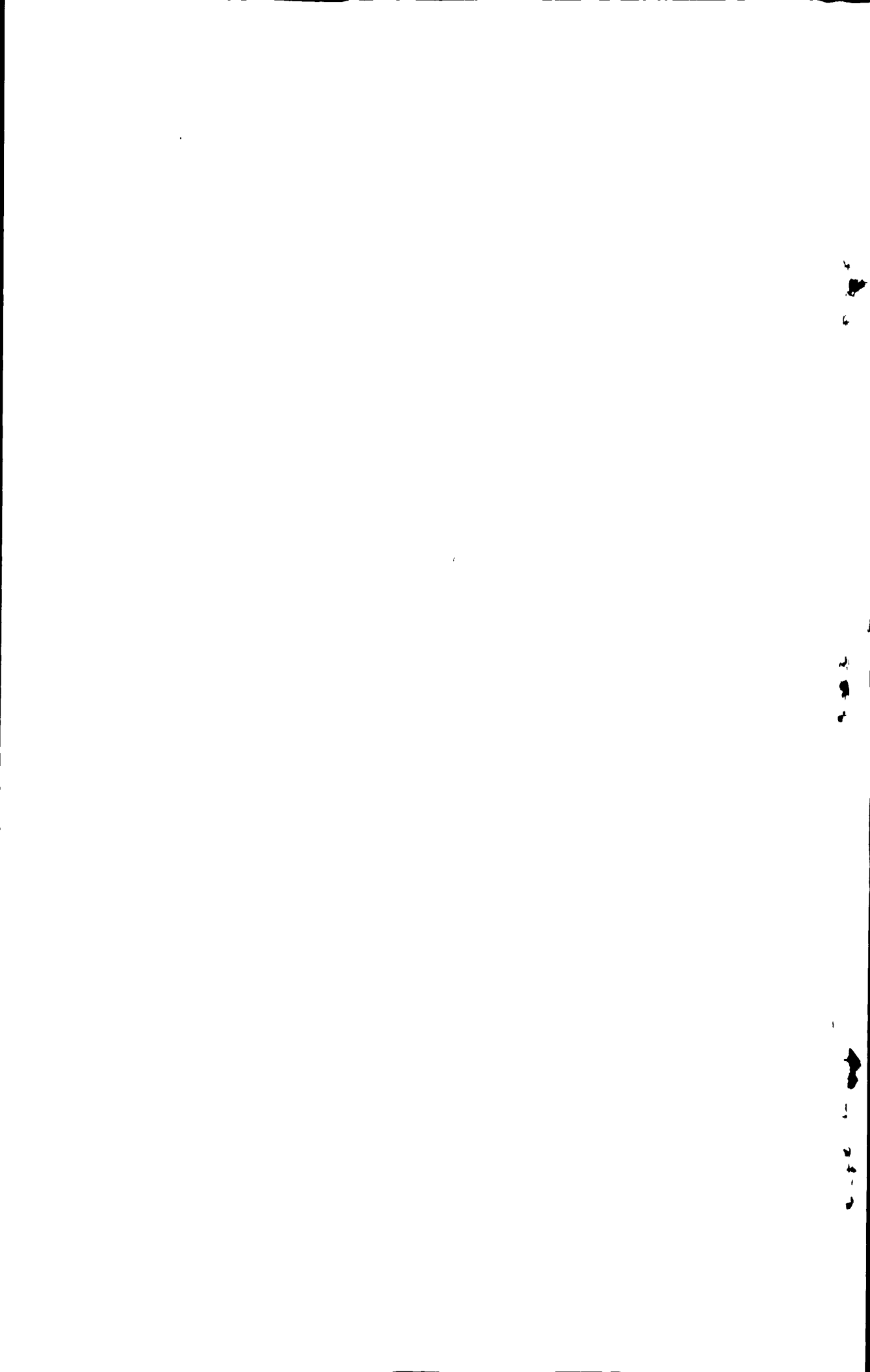
签名: 张本 日期: 2010.5.12

学位论文使用授权书

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定,即:学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。本人授权武汉理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存或汇编本学位论文。同时授权经武汉理工大学认可的国家有关机构或论文数据库使用或收录本学位论文,并向社会公众提供信息服务。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

研究生(签名): 张本 导师(签名): 李兴 日期: 2010.5.12



摘 要

随着城市化进程的加快和城市机动车保有量的快速增加,机动车污染物的排放控制和治理已经成为城市环境可持续发展亟待解决的课题之一。为了了解城市机动车排放规律,研究城市交通管理和控制策略对机动车排放的影响,本文分析和对比国外成熟的机动车排放计算模型并从中国的国情出发,选择了适合于发展中国家的机动车排放计算模型——IVE 模型作为评估和计算车辆排放因子的研究工具,并在原模型的基础上根据武汉市的交通和环境情况进行了大量的调查研究和文献查索,同时利用实测排放数据和模式计算值对比获得了武汉市部分轻型车的地区修正系数,初步完成了模型的本地化研究;此外利用 C 语言对 IVE 模型重新编程和开发接口程序,使之具有更广泛的通用性和可移植性;本文还对商蕾开发的交通微观仿真模型进行改进,在其基础上增加了公交车运行模型、动态路径选择模型以及信号灯配时优化模型等,使模型具有更为真实的仿真能力和准确的分析能力;并将本地化的 IVE 排放模型与其耦合,利用该交通流仿真平台对机动车各种污染物的排放因子进行精确评估。

本文主要完成了以下工作:

1) 在通过对相关单位调研、分析试验数据和查询文献资料的基础上,本文对 IVE 模型输入参数中的天气情况、地理情况、车辆的 I/M 制度、燃油情况、城市路网情况、车队组成情况进行了甄别和选择,以符合武汉市的具体情况;同时运用在线测量的车辆排放数据与 IVE 模型的计算数据进行对比分析,初步获得部分武汉市轻型车的地区修正系数,使 IVE 模型能较准确的计算和评估武汉市的机动车排放情况。

2) 利用 C 语言重新编写 IVE 模型,并添加了接口程序,使之具有更好的通用性和移植性;

3) 改进原有的城市交通微观仿真模型,同时将本地化的 IVE 模型与之耦合,并对部分参数进行了验证;

4) 利用改进的城市交通微观仿真模型研究和分析多种交通管控策略,包括路段限速、信号灯控制策略、交叉口禁左、车队组成以及不同形式公交站点等对机动车排放的影响,并获得了相关的评估结果,得出了一些有益的结论。

关键词: IVE 模型, 排放因子, 交通微观仿真, 交通管理和控制

4
D
6

2
●
2

4
:
2
1
2

Abstract

With the development of urbanization and the holdings of vehicle largely increasing, the control and renovate the pollution from vehicle emission has become one of urgent issues of urban environment sustainable development. In order to understand the vehicle emission laws and study the impact of urban traffic management and control strategy to vehicle emission, the thesis selects the IVE model which was specifically designed for developing nations, from analysis and comparison these foreign mature vehicle emission model, as the tool of the evaluation and calculation of vehicle emission factor, and make it localization according to the traffic and environment of Wuhan city. At the same time the IVE model was reprogrammed and its interface was developed by C language for more versatile and easy to transplant. The thesis has improved the Urban Traffic Microscopic Simulation Model which developed by Dr. Shang Lei, increased bus action model, dynamic route choice model, traffic signal control optimization model and so on to make it has more realistic simulation and accurate analysis ability. Final the vehicle emission factor was calculated based on the average speed and the vehicle drive cycle which result from the simulation of the improved Urban Traffic Microscopic Simulation Model coupled with the localization IVE model.

The main contents are listed as follows:

1) Through the search of Wuhan city traffic and environmental condition, vehicle classify, I/M class, fuel characteristic and emission feature of local vehicle on field based on the investigation of relevant units, analysis of experimental data and literature inquiry the localization IVE model has been completed.

2) The IVE model has been reprogrammed and its interface has been developed by C language, the new model has been more versatile and easy to transplant.

3) The Urban Traffic Microscopic Simulation Model has been improved and been coupled with the localization IVE model; the part of parameters of the simulation model has been verified.

4) The impact to vehicle emission due to multiple traffic management and control strategies have been studied by the improved Urban Traffic Microscopic

Simulation Model, which included traffic signal control strategy, dynamic route choice strategy, different fraction of vehicle technology in the entire fleet, the public traffic system and so on.

Key words: IVE model, vehicle emission factor, traffic microscopic simulation, traffic management and control

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究的背景和意义.....	1
1.2 问题的提出.....	4
1.3 研究的目的和技术路线.....	5
1.4 论文的内容.....	6
第 2 章 国内外研究现状	7
2.1 机动车排放因子的试验测试方法.....	7
2.1.1 工况测试法	7
2.1.2 实际道路测试法	11
2.2 机动车排放因子的模式预测方法.....	13
2.3 小结.....	19
第 3 章 IVE 排放模型与城市交通微观仿真模型耦合研究	21
3.1 IVE 模型简介	21
3.1.1 IVE 模型的计算方法.....	21
3.1.2 IVE 模型的特点.....	23
3.1.3 IVE 模型的使用.....	27
3.1.4 IVE 模型和其他排放模型比较.....	28
3.2 IVE 模型的接口开发	30
3.2.1 IVE 模型的架构.....	30
3.2.2 二次开发 IVE 模型的应用	31
3.2.3 算例	34
3.3 本章小节.....	39
第 4 章 IVE 排放模型本地化研究	40
4.1 武汉市环境的参数.....	40
4.1.1 武汉市温度变化情况	41
4.1.2 武汉市湿度变化情况	41

4.1.3 武汉市海拔高度	43
4.2 武汉市的 I/M 制度	43
4.3 武汉市的燃油情况	45
4.4 武汉市交通路网特征	46
4.5 武汉市的车辆技术分布情况	47
4.6 武汉市车辆排放的地区修正系数	52
4.7 本章小结	64
第 5 章 改进的城市交通微观仿真模型	65
5.1 城市交通微观仿真的研究现状	65
5.1.1 交通仿真模型概述	67
5.1.2 交通微观仿真模型的国内外研究	67
5.2 改进的城市交通微观仿真模型	70
5.2.1 城市交通微观仿真模型框架	70
5.2.2 公交车运行仿真模型	72
5.2.3 路径选择模型	80
5.3 本章小结	90
第 6 章 交通管控措施对机动车排放影响的案例研究	91
6.1 路段限速对车辆排放的影响	92
6.2 公交站点形式对车辆排放的影响	96
6.3 车队组成对机动车排放的影响	99
6.3.1 车队中不同排放标准车辆组成对排放的影响	99
6.3.2 车队中不同行车里程数车辆组成对排放的影响	101
6.3.3 车队中卡车限行对排放的影响	102
6.4 信号灯配时优化对机动车排放的影响	103
6.4.1 优化模型	103
6.4.2 遗传算法	104
6.4.3 优化仿真模型的组成和实现的步骤	105
6.4.4 遗传算法的设计	106
6.4.5 优化实例与分析	107

6.5 交叉口禁左对车辆排放的影响.....	113
6.6 本章小结.....	116
第7章 总结与展望	117
7.1 本文主要工作.....	117
7.2 创新点.....	118
7.3 展望.....	118
致 谢	120
参考文献	121
攻读博士学位期间发表的论文及参加的科研项目.....	127

4
6

4
4
4

4
4
4
4

第1章 引言

1.1 研究的背景和意义

由于世界各国城市化进程的快速发展，越来越多的人口居住城市，这就意味着更多的人和货物在城市或城市之间进行交流和运输，并且需要更多的运输工具参与其中，城市成为人、车、物集中的区域。同时，随着生活水平的提高，人们对环境质量的要求也越来越高，但目前影响城市环境质量的最大污染源之一就是道路交通（工业化城市除外）。

上个世纪 60~70 年代的伦敦，路面机动车产生的 NO_x 曾经占总排放量的 74%，烟尘占 94%；在美国运输部发布的《2005 年运输统计报告》中指出，2003 年美国运输部门温室气体(GHG)排放总量为 18.64 亿吨二氧化碳当量，占当年美国全部温室气体排放量的 27%。在所有运输方式温室气体排放量中，道路运输占 82%，其中小汽车占 43%、轻型卡车 33%，公共汽车 1%，其余 23%为除轻型外的各类卡车；在日本，交通运输部门 2006 年二氧化碳的排放量为 25,400 万吨，其中，道路运输部门（全社会）的排放量为 22,300 万吨，占交通运输部门总排放量的 88%，占日本 2006 年二氧化碳排放总量（127,500 万吨）的 18%^{[1][2]}。

在国内，随着经济的高速发展、人均收入的增加及相关产业政策的制定，人均汽车拥有量大幅度增长。但大量机动车污染物的排放，也使得城市空气质量恶化，近年来我国大城市大气污染的一个重要特征就是由煤烟型污染向机动车排放型污染转变，由表 1.1 可见城市道路机动车排放污染已成为我国大城市空气污染的重要来源。

表 1.1 我国大城市机动车污染物排放和浓度的分担率^[3-7]

城市	年份	一氧化碳 (%)	HC (%)	氮氧化物 (%)
北京	2008	88	49	51
上海（中心区）	2002	87	97	74
广州	2006	86.8	97.4	38.2
重庆	2007	80	54.3	50.4
武汉	2008	63	—	20
杭州	2003	79.72	63	45.72

从我国典型城市机动车污染物排放分担率的结果分析,我国机动车污染物排放有以下特征:1)机动车尾气排放已成为我国城市大气污染的一个重要来源。北京等大城市约80%以上的CO和50%以上的NO_x均来源于机动车排放源,显示中国的大城市空气污染类型正由煤烟型向混合型或机动车污染型转化;2)许多大城市的机动车污染物排放分担率比较接近,反映出目前一批机动车污染较严重城市的普遍情况;同时,这一结果也是我国许多城市今后几年所需要面临的情况;3)CO和HC是发动机低速运行的产物,同时CO又是不完全燃烧的产物,过大的CO和HC分担率说明目前我国城市机动车运行处于不充分燃烧状况,其主要原因是机动车运行速度低,运行工况差,发动机往往处于富燃料状态工作。

表 1.2 我国与美国机动车污染物分担率(%)比较^[8]

污染项目	CO ₂	NO _x	SO ₂	CO	HC
美国	33	56	15	55	30
中国	45	70	—	80	35

表 1.2 是我国与美国机动车污染物分担率比较,从中可以看出,国内大城市机动车保有量虽然比国外大城市少,但由于单车排放的污染物比国外同类机动车高几倍至十几倍,因此机动车排气污染已超过国外一些大城市。究其原因在于:一是机动车制造技术和发动机净化技术的差距;二是排放法规推出和执行上的差距;三是先进的交通控制和管理上的差距。

面对越来越严重的城市交通污染问题,积极有效地控制车辆排放就成为一个亟待解决的重要课题。

机动车排放污染的控制是一个大型系统工程,主要从三个方向入手:

一、控制车辆的排放。它包括先进的车辆设计和制造;加强车辆的维修保养(I/M制度);使用代用燃料。

二、规划合理的道路交通环境,即指通过道路布局、建筑物设置、周边环境及传播条件等的改变,达到减少指定区域的车辆排放污染的目标。机动车排放出的尾气一般是靠空气来自净的,而对于局部区域,大气污染的扩散与稀释即与地理位置和气候条件有关,又与城市的规划有关。

三、加强交通管理,主要是通过管理措施与交通控制实现对车辆排放污染的控制。该方法在特定条件下具有其它两类措施不具有的优点和效果,发达国家的经验证明在许多方面上述两类措施进一步降低排放污染的潜力已经不大,运用交通管理方法越来越受到重视。具体内容如下:

1) 完善法规、优化检测方法、严格执法

随着机动车保有量的不断增加和机动车排放污染的日益严重,世界各国对于机动车的排放从立法到监管再到执行是越来越严格,目前国内已基本形成了车辆排放标准体系,该标准的实施对控制我国车辆排放污染起了重要的作用,但与发达国家相比仍有相当大差距。目前,美国、日本和欧洲的汽车排放法规是当今世界 3 个主要的法规体系,许多其它国家都不同程度地采用了这些法规和标准,我国的排放标准体系就是在全面等效采用欧洲经济委员会技术内容和部分欧洲经济共同体的基础上形成的。

严格的法规带来的是机动车排放污染水平的下降,就占有量最大的汽车轿车而言,如今美国法规规定的 CO、HC、NO_x 排放限值已比控制前分别下降了 96%、96%和 76%,日本分别下降了 95%、96%和 92%;欧盟 CO 下降了 85%,HC+NO_x 下降了 78%。

然而对于不同的国家和地区,由于经济基础、社会状况等具体条件的不同,适宜的排放法规也是不相同的。若排放法规过于严格,会导致初期投资和运行费用急剧增高;若法规过于宽松,则失去了建立法规、保护环境的意义,因此各个国家制定的排放法规也不尽相同。也就是说,经济规模、新技术研制周期、开发费用及政府执行费用等多种因素均会影响到排放标准和测试规程的采用。

2) 优先发展公共交通

研究资料表明采用不同的客运交通方式产生的污染排放量差别很大。由于公共交通载客量大,人均为的机动车排放污染明显比私人机动车少,而且公共交通人均使用的道路面积少,还有利于道路交通的畅通,减少机动车在怠速和低负荷工况下运行,提高行驶速度、减轻污染。实践证明发展公共交通是改善道路交通状况和城市空气质量的重要途径和手段。如果采用公交优先的措施,还可以进一步达到增加公交乘客数,减少排放污染的效果。研究证明,在专用的公共汽车车道上行驶的公共汽车,每小时运载乘客的人数为公共汽车在混合车道上行驶的 2 倍,为小汽车的 40 倍。通过给予公交在行车中的优先权,许多人会因其快速和有效而转向选择公交工具。

3) 发挥智能交通系统的作用^{[9][10]}

智能交通系统是一个全面应用信息技术、自动控制技术的交通系统,是应用信息技术和自动控制技术向道路使用者及交通管理者提供帮助和服务的系统。按照国际标准化组织的定义,智能交通系统包括八个系统,32 项服务功能。交通管理是其中一项重要的研究内容,包括交通规划、需求管理、交通控制、事

故处理等多个方面。通过智能交通系统的交通管理不仅可提高道路交通运输与管理效率，更是一种控制道路交通污染的重要手段。有资料表明，使用城市智能运输系统能减少机动车排放污染 50%。

智能交通系统利用现代监测、通讯、控制技术对道路车辆污染监测，调整交通流与行人的分布，改变车辆污染的分布特性，减少行人与污染物接触的机会、时间与强度，从而降低排放污染的危害。其实现方式如下：

首先是通过研究道路交通流中车辆的运行和排放特点及影响车辆排放性能的制约因素，提供合理的交通管控措施，寻求交通运输的高效化和污染的低排放。其技术关键是交通流排放测量及交通控制优化模型的建立。

其次是向行人和车辆提供咨询，避免交通拥挤。通过报告道路污染状况信息及提供咨询等方式向行人和车辆建议出行的路线选择、交通工具与出行方式，以主动避免交通拥堵和高污染路段，从而减少排放对城市环境的影响。其技术关键是交通诱导。

1.2 问题的提出

目前我国机动车排放对环境影响呈现两个特点，一是机动车保有量迅速增加，平均年增长量达 15%；二是国内机动车污染控制水平却仅相当发达国家上世纪 80 年代的水平，主要反映在交通控制和管理上。这就造成许多大城市道路长时间处于饱和状态，日平均车速较低，车辆加速、减速、怠速等不利工况频繁发生，城市机动车污染特征明显，大气环境质量下降。

实验调查证明机动车排放与车辆的行驶特征紧密相关，较高的速度和稳定的工况可以有效地降低机动车的排放，而在低速不稳定工况下，机动车排放水平显著增加，而且不同污染物排放的变化量也是不一样的。同时，机动车的车型、行驶里程、劣化率、I/M 制度等都直接影响排放水平。现在各国的交通与车辆研究人员从车辆的行驶特征和车辆属性着手，开展对车辆排放因子的研究，进而获得相关的排放清单。

由此可以看出，对于机动车排放的研究，最重要的是单车的基本排放因子和车辆排放特征的影响因素。尤其是车辆排放特征的影响因素，对于不同的国家、地区甚至一个城市的不同区域都各不相同，它将直接影响机动车排放量的多少，同时如果了解和掌握这些因素对排放的影响程度，还可以通过相应的交通管控手段对机动车排放污染进行治理。

因此，获得具有本地化的车辆排放特征的影响因素，计算机动车排放清单，并对交通控制策略进行评估和预测，为交通管理者提供良好的决策支持，就成为研究机动车排放、减少机动车排放污染的一种有效手段。

1.3 研究的目的是和技术路线

本论文研究的目的具体来说有以下三点：

1) 对国外成熟的、适用的机动车排放模型进行本地化处理，尽可能地获得较精确的城市机动车污染物排放清单；

2) 收集相关交通参数，开发城市交通微观仿真模型并得到模拟的机动车行驶特征，在此基础上与本地化的机动车排放模型耦合，并对城市道路、交叉口和城市交通路网的机动车排放进行仿真研究，从而对不同的交通管控策略对机动车排放的影响进行评估和预测；

3) 将机动车排放水平建立在城市交通微观仿真的基础上，获得较为精确的机动车排放清单，为进一步利用大气扩散模型研究城市局部或整体的大气环境提供支持。

本论文的研究框架见图 1.1，包括城市机动车排放模型本地化，城市机动车排放影响因素（包括城市交通参数），城市机动车污染源清单以及控制目标和控制策略等几方面的内容。

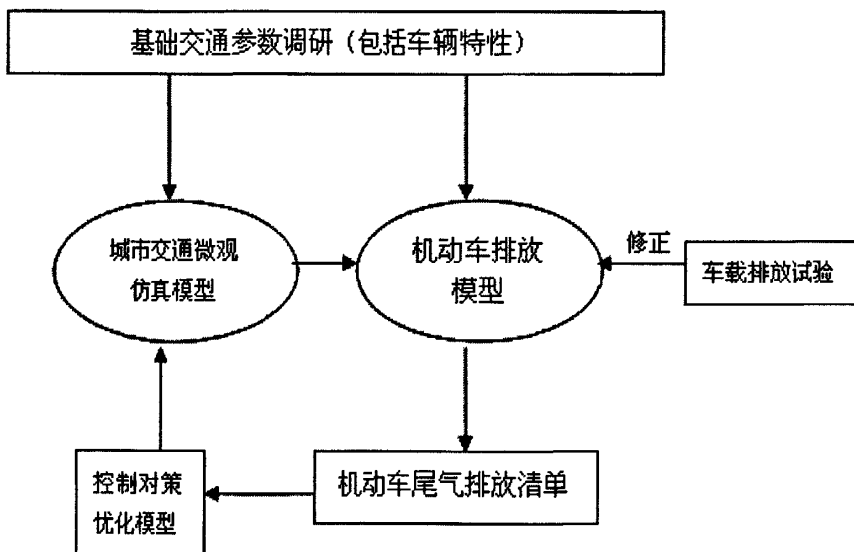


图 1.1 研究框架

1.4 论文的内容

本论文对 IVE 排放模型进行本地化研究，并与改进的城市交通微观仿真模型进行耦合，在此基础上评估和预测多种交通管控措施对机动车排放的影响。

本论文的内容组织如下：

第 1 章 引言

第 2 章 国内外研究现状

第 3 章 IVE 排放模型与城市交通微观仿真模型耦合研究

第 4 章 IVE 排放模型本地化研究

第 5 章 改进的城市交通微观仿真模型

第 6 章 交通管控措施对机动车排放影响的案例研究

第 7 章 总结与展望

第2章 国内外研究现状

机动车发动机在燃烧做功过程中产生的污染物主要有一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)、铅化合物和颗粒物(PM)等。这些排放物对大气的环境构成了污染,严重危害人体的健康,破坏自然界的生态平衡。因此,机动车排放物对大气环境的污染已成为各国研究的重要课题。

影响机动车排放水平的因素相当复杂,有车辆本身的设计、制造特性(如发动机型式及所采用的技术水平,排放控制装置的配置、工作情况),发动机的机械状况及保养频率和水平,所使用的油料、燃油油品及油质,检查维护(Inspection/Maintenance,简称I/M)制度的实施情况及其效果,车队的特点(车队的构成、使用状况、车龄结构)以及车辆的道路运行特性(海拔、温度、湿度状况、道路使用状况、交通状况)^[1]。

衡量机动车排放水平的参数是排放因子。在国标 GB5181-58 中,排放因子称为质量排放量,是指特定车辆的某种污染物在各种因素的影响下的平均排放量。综合排放因子是某一特定区域的机动车排放因子,是特定区域中的各类机动车的排放量的加权和,区域的划定大到整个城市,小可到一条街区^[12]。排放因子是研究机动车污染状况(包括机动车本身的排放特性及其对大气污染的贡献)的关键,是治理机动车污染的最根本的重要数据资料。

2.1 机动车排放因子的试验测试方法

目前研究机动车污染排放因子的试验测试方法主要分为实验室测试和实际道路测试。前者包括工况测试;后者包括隧道实验、遥感测试和车载测试。4种测试具有不同的功能,各有自己的优势,可满足不同的研究需要^[13-21]。

2.1.1 工况测试法

机动车的排放受多种因素的影响,在其它因素完全相同的情况下,行驶工况(Driving Cycle)的改变也会导致排放产生高达100%的变化。上世纪70年代,美国加州率先通过建立排放法规推进汽车工业开发更高燃烧效率和更低排放的发动机,该法规需要一个能够比较不同发动机之间性能差异的测试程序,这种测

试程序被称为行驶工况。美国开创并推动了世界各国的工况研究和开发，发展到现在，由于评价目标和研究对象的不同，形成了种类繁多、用途各不相同的工况。那些工况满足从轻型车到重型车、从汽油车到柴油车等各种系列的车辆性能测试。随着工况研究的深入和完善，行驶工况具有典型的道路实际驾驶特征，能够反映车辆真实的操作工况，可以用于车辆的研究、认证和检查/维护 (I/M)。

目前，世界范围内机动车排放测试用行驶工况可以分成三大体系：美国联邦测试规程(Field Test Procedures, FTP)、欧洲经济委员会(Economic Commission for Europe, ECE)测试规程和日本的测试规程；其中又以美国 FTP 为代表的瞬态工况和以 ECE 为代表的模态工况在其它国家和地区得到了广泛的应用。

通常，轻型车和摩托车的排放测试在底盘测功机上进行，尾气采用定容采样系统(Constant Volume Sampling, CVS)收集检测，而重型车则是在发动机台架上进行模拟工况的排放测试。它们的区别在于采用不同的行驶工况(对整车而言)和操作工况(对发动机而言)。

1) 美国联邦测试规程

1972年，美国环保局(United States Environmental Protection Agency, EPA)从一条具有代表性的上下班汽车路线上解析出来车辆的速度—时间曲线作为认证车辆排放的测试程序(简称 FTP72, 又称 UDDS, Urban Dynamometer Driving Schedule)。按照这种程序来测量车辆排放。1975年在 FTP72 的基础上加上 600 秒的热浸车和热态过渡工况(重复冷态过渡工况)四个阶段构成了 FTP75, 持续时间 2475 秒, 行驶距离为 17.7 km, 平均速度为 31.4km/h(见图 2.1)。按照 FTP75 程序, 整车在底盘测功机上按照预定的速度—时间曲线(运行工况)行驶, 尾气管排气经稀释、冷却后, 用定容采样系统采集。将每个测试阶段排放的污染物和稀释用环境空气分别取样, 进行测量分析并乘以相应的加权系数, 其和即为总结果。

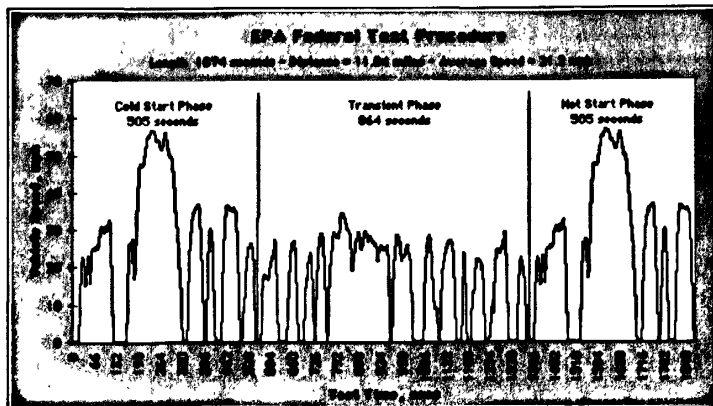


图 2.1 FTP75 工况

由于 FTP75 工况并不能覆盖所有的实际运行工况，而且受测功机所承受负荷限制，不能模拟空调开放时的运行情况。因此美国 EPA 又开发了一种新的测试规程 US06 作为 FTP 的附加工况（见图 2.2），它包括了实际情况中所有的速度和负荷的范围，并且考虑了空调开放时的情况，能够更好地反映实际情况。

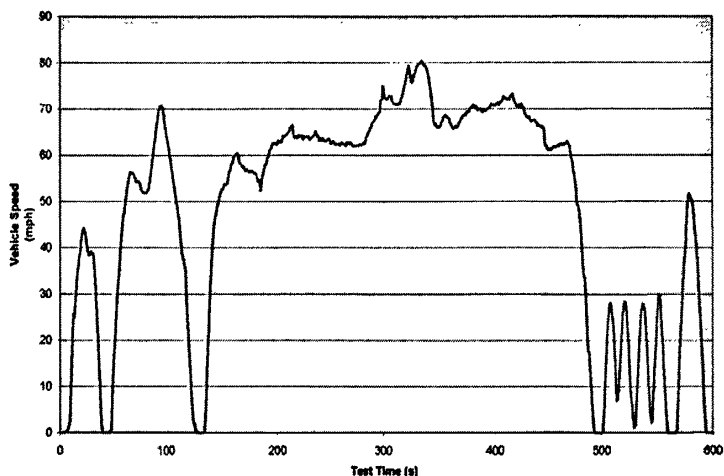


图 2.2 US06 工况

上述工况适用于小汽车和轻型货车，此外还有针对重型车的 BAC 工况以及用于 I/M 制度的 IM240、ASM 和 IG240 工况等。

2) 欧洲经济委员会测试规程

在欧洲，依据道路拥挤程度或流量大小，ECE 分类定义成不同的道路区域(如市区、郊区和高速)并对平均速度、加速度进行多层次归类，人为的开发和合成成具有稳定的速度和加速度段的工况。

用在底盘测功机上认证轻型车辆排放的欧洲行驶工况（European Driving Cycle, EDC），现在已经发展成为新 EDC（New European Driving Cycle, NEDC）。在该循环里局部循环速度是恒定的，是一种稳态工况，包括市内（ECE15）、市郊（EUDC）或市郊低功率车（EUDC_LOW）。ECE15 是一个包括 4 个代表市区驾驶状况的 15 工况循环（怠速、加速、匀速、减速等十五个工况为一个循环）的运转循环，具有低速、低负荷和低排气温度的特性。ECE15 工况行驶 4.052km、运行时间为 780s、平均速度 18.7km/h，最高速度为 50km/h；EUDC 工况行驶 6.955km、运行时为 400s、平均速度为 62.6km/h、最高速度为 120km/h。为了反映车辆在市郊运行的排放水平，1992 年在 ECE15 基础上增加 1 个 EUDC 或 EUDC_LOW，就构成现在的 ECE+EUDC（见图 2.3）。

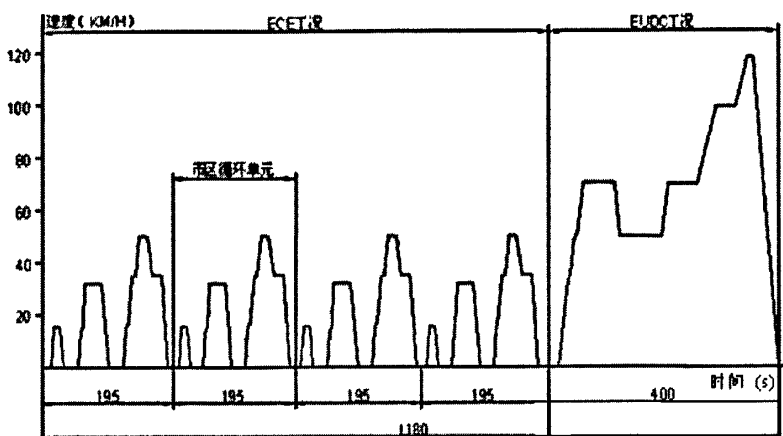


图 2.3 欧洲 ECE15+EUDC 工况

与美国实验规程相比，欧洲的运行工况要简单得多，由匀速、匀加速和匀减速运动组成，这种缺乏真实工况的实验必然导致结果严格性的下降。有关研究表明，欧洲测试规程对排放的估计比实际情况要低 15%~25%。

3) 日本测试规程

日本的测试规程与欧洲相似。在 1991 年之前，日本一直采用 10 工况法来模拟拥挤的城区工况。十工况循环需进行 6 次，对后 5 次进行测量。1991 年 11 月，采用 10-15 工况，由四个 10 工况和一个 15 工况构成。10-15 工况的行驶距离为 4.16km、平均速度为 22.7km/h、运行时间为 660s。

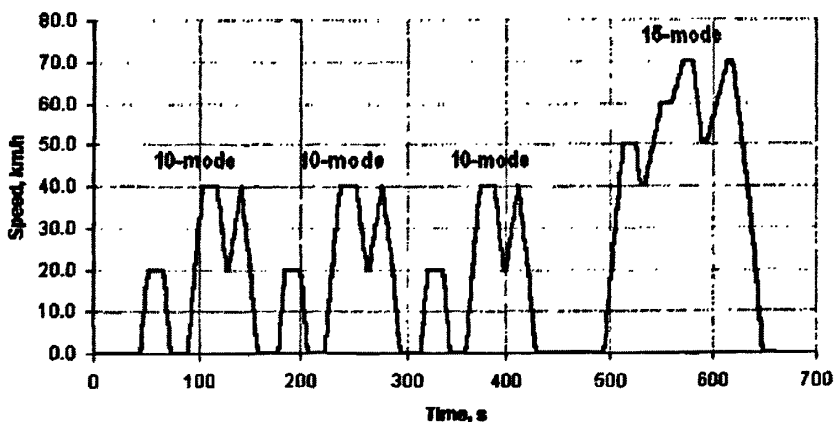


图 2.4 日本 10-15 工况

4) 国内的相关研究^{[22]-[28]}

如前所述，我国目前等效采用欧洲排放法规。我国是 1984 年起开始陆续制定的汽车排放标准，共有 14 项，其中适用于柴油车的有 6 项，汽油车的有 10

项。1999年,参照欧洲汽车排放法体系又制定和颁布了4个新的法规。这四个标准包含了欧洲所有汽车排放控制有关的法规。其中,现行的我国标准 GB/T11642-89《轻型汽车排放污染物测试方法》和 GB/T18368-2001《电动汽车能量消耗率和续驶里程实验方法》都是建立在ECE15工况的基础上。

由于我国道路交通存在着机动车、非机动车以及行人混行的特点,同时车辆结构、城市结构、交通规则甚至是驾驶习惯等与欧洲国家均有很大差异,因此ECE15工况并不能完全反映我国车辆的实际行驶状况。然而与先进发达国家相比,我国在机动车行驶工况方面的研究工作开展得较晚,真正意义上的我国开始开展对汽车行驶工况的研究是主要集中在一些高校、研究所或大城市。如天津大学的赵慧、杨延相,中国环境科学研究院的丁焰、刘希玲,上海市环境科学研究院的陈长虹,清华大学的王岐东、贺克斌,长安大学的邓顺熙、史宝忠、武汉理工大学的吕林、中国汽车技术研究中心的李孟良等。他们的主要工作是:对国内不同地区、不同规模城市的机动车行驶工况进行测试,合成具有当地特性的机动车行驶工况,分析其特点,建立行驶工况与排放之间的对应关系;并在此基础上与欧美日测试规程进行比较。

2.1.2 实际道路测试法^{[26][29-34]}

1) 隧道实验法

隧道实验是国外应用的非常广泛的评估机动车排放因子模型性能的方法。20世纪80年代初,为克服台架测试不能反映车辆组合和路上行驶工况的局限性,Chang等提出了隧道测试法,公路隧道被看作一个控制汽车尾气扩散的特殊设施,其作用相似于用定容采样的方法在实验室内监测。通常隧道实验将采样点设在通风口,且出口与入口之间再无其他的通风口,根据质量守恒定律,通过隧道的机动车的平均排放因子可以用以下公式计算:

$$EF = \frac{C_{out} \cdot V_{out} - C_{in} \cdot V_{in}}{L \cdot N} \quad (2.1)$$

EF 为平均排放因子 (mg/km.辆);

C_{out} 为隧道出口处污染物浓度 (mg/m³);

C_{in} 为入口处环境空气污染物浓度 (mg/m³);

V_{out} 为出口处空气流通体积 (m³);

V_{in} 为入口处空气流通体积 (m³);

L 为隧道长度 (km);

N 为采样期间通过隧道的车辆数目 (辆)

目前国内也有研究者利用隧道实验分析国内的机动车排放水平,西安公路交通大学的邓顺熙等人在西安市、成渝高速公路等地利用交通隧道进行了多次实验,分析了目前我国的机动车的平均排放水平;北京大学环境科学中心的王伯光等人在广州深圳隧道进行了测试;中国环境科学研究院也曾在北京市、深圳至香港高速公路等地进行了隧道测试。

隧道实验法的缺点在于得到的是各种车型综合的平均排放因子,难以进一步区分出分车型的排放因子,虽然可以利用多次实验的数据和分车型的车流量数据进行多元回归得到分车型的排放因子,但是其准确性无法保证。

2) 遥感测试法

近年来,美国、日本等发达国家采用遥感遥测技术进行排放因子的监测。这种方法一般在道路边架设仪器,通过不分光红外分析法(Non-Dispersive Infra-Red, NDIR)和分光或不分光紫外分析法(Non-Dispersive Ultra-Violet, NDUV)等技术,在线动态监测尾气管排放污染物的浓度,进而求出该道路上的机动车排放因子。

1987年美国科罗拉多州丹佛大学首次研制出了监测道路汽车尾气排放的红外线遥感监测设备,利用CO、CO₂和HC能吸收某一特定波长的红外线的原理,可以测量出通过红外光束的机动车尾气中HC/CO₂和CO/CO₂的比值,通过计算可得到HC、CO和CO₂的浓度。遥感监测不需要干预被测车辆的操作,也不需要被测车辆司机的配合,监测结果更真实地反映了道路车辆的实际排放。近年来,该项技术不断完善,在不分光红外分析法的基础上,结合分光或不分光紫外分析法可以得到NO/CO₂比值,从而得到NO的排放状况。在实际的测试,还有研究者利用可调红外激光二极管差分吸收光谱法进行遥感监测,这种方法在得到NO浓度的同时,还可以得到NO₂/NO的比值,从而将得到的NO排放转化为研究中更常用的NO_x排放。

遥感测试法是分析实际道路机动车排放状况和筛选高排放车辆的有效手段,在美国,研究者利用这项技术建立了一套智能交通系统Smart Sign,该套系统通过在道路边建立遥感测试系统,对通过车辆的排放状况进行实时监测,并在之后的显示屏上以好、一般、差三个等级来告知驾驶者其车辆的排放状况。

但是遥感监测不能对多车道道路上机动车排放情况作出准确测定,往往仅能应用于单车道道路或隧道内。虽然其可以对大量的车辆进行测试,但其不能对实际运行工况下排放的变化进行测量,从这个角度考虑遥感遥测也属于静态

的测试技术；而且该方法只能测量出排放气体的浓度，无法得到排放气体的绝对质量，因此也无法用于量化在实际交通网络环境中运行车辆的尾气排放。

3) 车载测试法

车载测试法是利用车载的排放测量仪器得到现实路网中行驶的机动车动态的驾驶工况和排放情况。相对于遥感测试法得到的是实际道路行驶中某一个横断面下多辆车的结果，车载测试法得到的就是实际道路行驶中单辆车在行驶过程中纵断面上的排放情况，它不像遥感遥测法那样仅能给出每辆车某一运行状况下的排放，可以为实际道路机动车排放特征的分析 and 模拟提供可靠的数据支持，将是今后相当长的一段时间内的一个重要发展方向。

车载排放测试作为全新的机动车排放测试方法，越来越引起了相关学者和研究机构的兴趣，目前已经有一些研究者对其进行了研究，开发出了各式各样的车载排放测量系统。美国北卡罗莱纳州立大学的 H.C.Frey 利用 Clean Air Technology 公司开发的集成的车载尾气排放测试系统 OEM 2100TM 进行了实际道路行驶尤其是特定交通场景中车载测量的尝试，得到了许多有启发意义的结论。Clean Air Technology 公司最新开发了可用于测定重型柴油车 NO_x、CO 和 PM 的质量排放的车载测量系统，其测量结果与 IM240、LA505、FET (Federal highway fuel efficiency test)、纽约城市工况 (NYCC) 和 FTP-2 等实验室工况测试结果都显示出较高的相关性。国内天津大学的赵慧，吉林大学的王云鹏，北京交通大学的于雷，中国汽车技术研究中心的李孟良，武汉理工大学的严新平，香港理工大学的张镇顺等人也都曾经进行过这方面的研究^{[23][35][36][37][38][39]}。

车载测试法的不足是测试样本有限，测试结果无法反应整体车队的排放水平。

2.2 机动车排放因子的模式预测方法

模式预测指的是通过模式模拟和运算来确定机动车排放因子的方法。目前模式预测的基本依据仍然主要来自标准测试程序下进行的台架试验，通过对试验结果的回归分析，可以用数学的方法表达各种因素对排放的影响。模型按照适用的尺度范围和功能可分为宏观区域排放模型、中观的运输/排放/空气质量整合模型和微观排放模型。

宏观模型是利用宏观排放因子模型计算得到排放因子，并通过调查的手段或者根据客货运量计算的方法获得当地机动车的年均行驶里程，然后计算得到当地机动车综合排放量，它一般用来建立地区乃至整个国家范围的排放因子估算

和排放清单，做一些控制策略比较，确定排放污染物或其他一些排放物贡献率并计算总量。

中观模型是与运输/排放/空气质量模型紧密结合的，以期在复杂的交通运行状况下达到更准确估计的目的，主要用于某个交通区域的排放模拟。

微观模型是以单车为基础，将机动车瞬时排放与微观交通仿真模型结合，逐秒模拟机动车在交通流中的排放。它主要用于某一特定地点的污染物浓度分布特征和污染物扩散规律的研究和排放模拟。

由于使用的尺度不同，相应的模型结构也会有很大区别，如图 2.5。

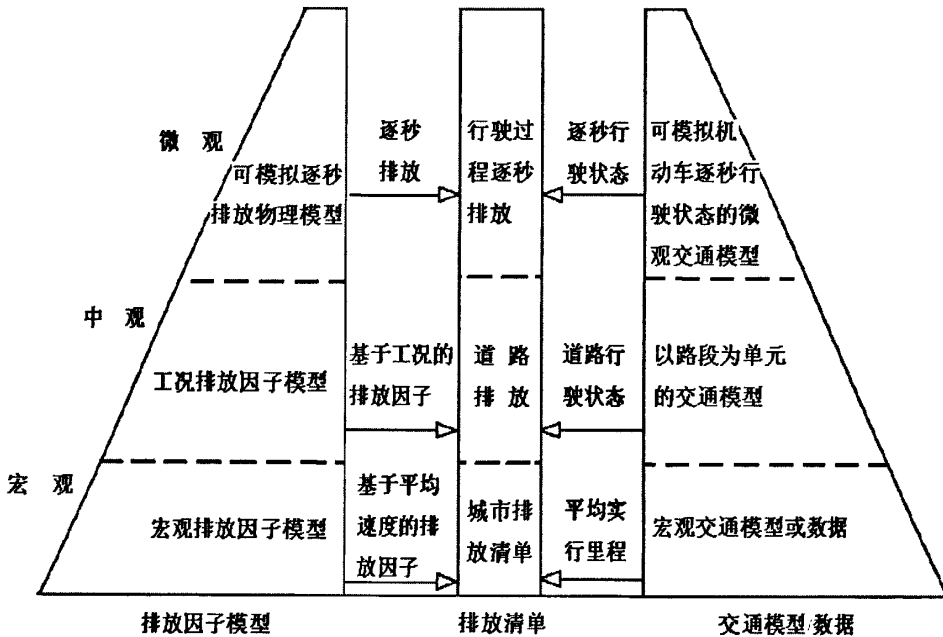


图 2.5 不同尺度排放模型的对比与应用

对于不同地区、不同评价范畴（指宏观/中观/微观评价），适用的尾气排放模型是不同的，以下将介绍几种普遍使用的排放因子模型^[40-50]。

1) MOBILE 模型

MOBILE 模型是美国 EPA 开发并推荐使用的计算机动车宏观平均排放因子模型。MOBILE 系列模型是对基于 FTP 的台架测试结果进行统计回归，综合考虑机动车的车龄分布、行驶里程、新车排放因子、劣化率、行驶速度、检查/维护制度、环境状况、道路条件、车辆的使用工况以及车用油料特性等诸多因素对排放的影响，开发的一种计算机动车尾气排放因子的数学模型。其核心是排放因子为平均速度的函数，而弱化了驾驶特征这一影响机动车排放的重要因素。

MOBILE 模型是目前世界上应用最广泛的排放因子计算模型之一。第一版发布于 1978 年, 最新版为 2002 年发布的 MOBILE6.2。在国外, Sajal S.Pokharel 等利用遥感技术计算了丹佛地区的机动车排放总量, 并和 MOBLIE6 的模拟结果进行了比较; Hesham Rakha 等用 MOBILE5a, MoBILE6, VT—MICRO 模型和 CMEM 模型对稳态下的轻型汽油车的排放排放因子进行了比较; Norman F.Robinson 等采用 MOBLIE4.1 和 MOBLIE5 计算出宾夕法尼亚州和马里兰的机动车排放因子, 并和隧道试验进行了比较。

在国内, 北京清华大学的傅立新、郝吉明、贺克斌等用 MOBILE5 编制过北京、深圳、武汉、澳门等地的机动车排放清单; 上海同济大学用 MOBILE 计算过上海机动车排放因子并应用于空气质量预测当中。

2) EMFAC 模型

由于美国加州采用与美国其他州不同的排放标准, 因此加州空气资源局 (California Air Resources Board, CARB) 开发了 EMFAC 模型。第一版 EMFAC 于 1988 年发布, 目前最新版本是 2001 年发布了 EMFAC 2001。模型的参数来源是美国环保局组织的各种不同的在用车排放水平检测结果, 以及联邦测试程序中测得的排放结果。与 MOBILE 模型相似, EMFAC 模型也是基于平均速度的排放因子模型, 也是一种宏观预测模型, 不能代表实际道路的车辆运行状况和微观排放估计。模型可以计算 1970~2040 年间碳氢化合物 (HC)、一氧化碳 (CO)、氮氧化物 (NO_x)、二氧化碳 (CO₂)、颗粒物(PM)的排放量。

在我国香港曾经使用 EMFAC 模型来估算交通污染, 修正后的模型称为 EMFAC-HK。模型在方法学上与 EMFAC 保持一致, 修正的领域主要在: 机动车种类、排放标准、I/M 和排放控制计划 4 个方面。除了按照当地情况制定的车辆技术种类目录外, EMFAC-HK 还有两个子模型用来计算香港当地摩托车和出租车的排放。

3) COPERT 模型

COPERT 是由欧洲环保局赞助开发的 MSWindows 环境下的应用软件。它是欧洲国家计算道路机动车排放量的重要工具, COPERT 的辅助模型可以计算非道路发动机排放(农用机械等非道路机动车的废气排放)清单。COPERT 模型的算法输出原理图见图 2.6。COPERT 模型输出结果是计算区域内机动车尾气排放污染物总和。

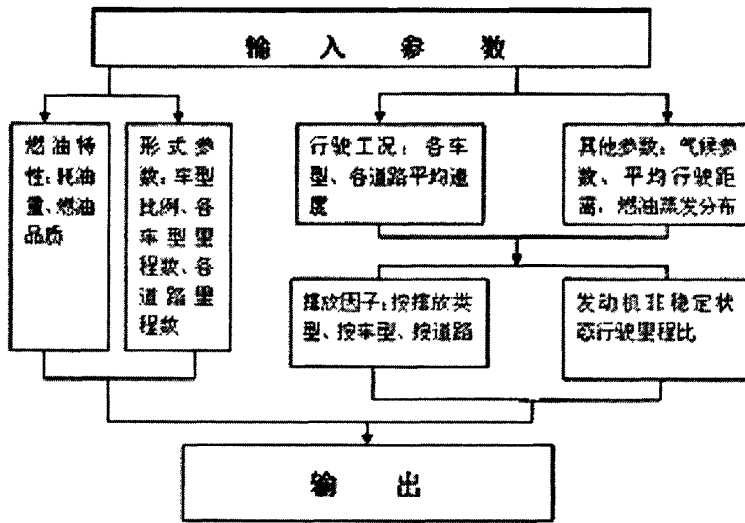


图 2.6 COPERT 模型的算法原理图

COPERT 模型也是一种宏观模型，与 MOBILE 模型相比，它对车型分类更细；评价污染物种类更多，能够计算一些并不常见的污染物（如 N_2O 、 NH_3 、 SO_2 等）的排放量清单。

国内北京大学的谢绍东以 2002 年为基准年，用 COPERTIII 计算了中国机动车的排放因子。该研究将国内机动车分为五类，燃料参数和气候参数来自于相关燃油标准和气象统计资料；平均旅程长度、负载和坡度均采用模型的默认值。并将结果与 MOBILE 和台架测试结果作了比较。

4) MEASURE 模型

MEASURE 模型是由美国 EPA 资助开发的城市和地区性的中观尾气排放评价模型。

模型的输入参数除交通方面的信息外，还包括人口普查信息、土地使用信息等。利用输入参数并根据分类回归树算法得到以下 11 个不同模块的输出参数：小区信息模块、车道信息模块、小区技术组合模块等、主路技术组合模块、发动机起动排放活动范围模块、主路车辆行驶排放活动范围模块、辅路车辆行驶信息模块、发动机起动排放模块、辅路车辆行驶尾气管排放模块、主路车辆行驶尾气管排放模块、网格排放模块。

MEASURE 模型有以下几个显著特点：

模型是用于帮助研究人员建立交通与环境之间的关系，并为研究人员和设计人员提供评估新的机动车排放分布的方法；模型的计算根据发动机排放特征：

机动车的排放具有空间特征，排放量随着位置和发动机状况的不同而改变。图 2.7 说明了不同时间、空间，发动机处于不同工况下的排放趋势；此外，模型基于 GIS 平台：能够提供交通地形特征、路面情况、交通分析区特征、交叉口和其他关于地理位置的具体信息。

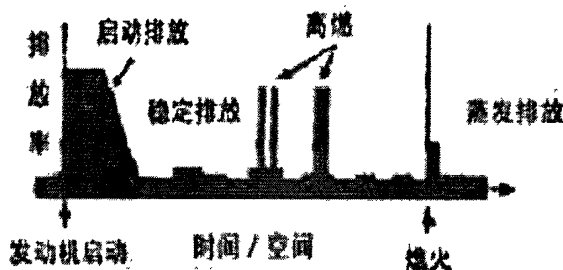


图 2.7 MEASURE 模型中虚拟旅程的 HC 排放分布

5) CMEM 模型

CMEM 是由加州大学河边分校开发、用来计算轻型车在各种运行工况下的燃油消耗和尾气排放。CMEM 是一种微观模型，可以处理以秒为单位的特定速度、加速度下的尾气排放。CMEM 模型算法原理图见图 2.8。

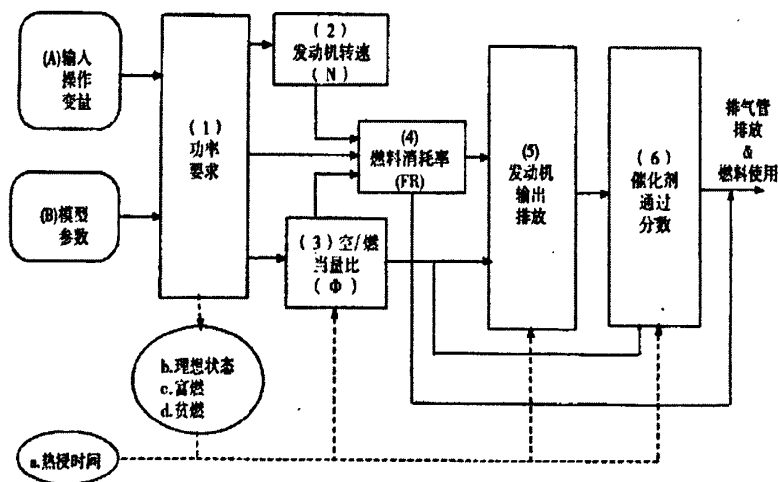


图 2.8 CMEM 模型算法原理图

其中模型的 3 个核心参数是：燃烧率；发动机排放指数；时变催化率。

CMEM 的输出结果是由燃烧率、发动机排放指数、时变催化率相乘得到的尾气管排放量。

CMEM 模型可以处理以秒为单位的特定速度、加速度下的尾气排放，并且

能够与微观交通仿真模型较好的结合。

国内北京工商大学的王歧东于 2004 年用 CMEM 模型计算了北京轻型机动车的排放因子，同时进行车载实验用测算车辆实际排放来验证模型的结果。武汉理工大学的吴超仲等也运用 GPS 和 OEM 收集了武汉市主要道路上的车辆行驶与实时排放数据，得到了武汉市机动车平均排放因子。根据车辆参数信息和行驶信息，运用 CMEM 模型模拟了武汉市机动车微观尾气排放，并与实测数据进行了对比。

6) IVE 模型

IVE 模型是由美国加州大学河边分校 (University of California Riverside, UCR) 开发的，以满足发展中国家的机动车污染排放模型。该模型的核心算法基于 MOBILE 模式，通过对上万套 EPA、CARB 和 UCR 的台架测试数据进行处理，得到基于 FTP 工况的基础排放因子。但是，在处理行驶特征这个重要影响时，IVE 模型抛弃 MOBILE 模型的基于平均速度的校正方法，而采用比功率 (Vehicle Specific Power, VSP) 和发动机负载 (Engine Stress, ES) 两个参数对非 FTP 工况下的机动车排放进行模拟。

墨西哥、智利、哈萨克斯坦、秘鲁、肯尼亚等国家的诸多城市，包括中国的上海、北京先后使用过 IVE 估算过城市机动车排放，方法基本类似。选择具有代表性的中心城区、商业区和收入相对较低的 3 个区域中的主干道、快速道和次干道 3 种共 9 条典型道路，开展机动车技术水平参数、VSP 分布状况、启动状况等调查，得到当地城市机动车的排放清单。

7) 美国环保局新一代模型 MOVES

MOVES 模型的特点是扩大了模型评价的范围，MOVES 能够计算统一数据基础的多观尾气排放，有统一的标准，适用于不同部门对不同类型的尾气排放数据要求；优化了模型软件结构；使用便携式尾气检测系统收集尾气排放数据，能够提供以秒为单位实时的车辆排放数据，能从根本上改变模型的计算精度，增强模型的适用性。

MOVES 模型的输出参数及应用见表 2.1。

表 2.1 MOVES 模型输出结果

模型输出结果	尾气评价应用
广域排放清单	环保部门的要求 温室效应评价 排放法规的制定 城市规划及相应排放标准
狭域排放清单	排放治理效果 排放趋势分析
特定交通状况 排放分析	城市规划及相应排放标准 交通控制系统地评价 缓解交通阻塞!改善空气质量方案
走廊/交叉口 排放	国家环保局环境评价 特定交通点评价

2.3 小结

近几年来,由于国家对机动车的排放要求日益严格,在生产、检测、修理等环节都制定了相应的标准和政策,因此关于城市机动车排放的研究也日益受到关注。如天津大学内燃机研究所对车辆排放做了相应的研究,开发了一套车载排放测量系统,并在实际道路上分别对桑塔纳和华利轿车进行实验,研究了机动车实际道路排放因子的分布特征,分析了速度、加速度等参数对排放因子的影响规律和燃油消耗的研究;东南大学进行了机动车综合排放因子的拟合模型建立,模型中采用机动车运行平均速度为变量,自变量为机动车综合排放因子。模型将车辆按类型划分为八类,即:汽油轿车、微型车、中型车、重型车、重型汽油车、重型柴油车、摩托车和吉普车。同时国内研究人员也借助别国开发的排放因子计算模型在多个城市进行了应用,MOBILE 系列模型引入中国的时间最早,清华大学、中国环科院、北京交通大学、同济大学、东南大学等都对模型的本地化作过研究。其后,COPERT、IVE、CMEM、EMFAC 等越来越多的国外模型被引入国内城市排放因子计算中,突破了模型单一化的情况。例如,上海市环境科学研究院选择上海市中心城区、商业区和收入相对较低区域中的主干道、快速道和次干道 3 种共 9 条典型道路,开展机动车技术水平参数、比功率(VSP)分布状况、启动状况等测试,并在此基础上将 IVE 排放模型本地化,建立上海市机动车源排放清单^{[51]-[55]}。

但相关的研究也有诸多不足：第一是试验测试受经济和试验条件的限制，试验只是针对某一地区的部分车辆，样本太小，同时具有地区的局限性；第二是对于工况试验也是局限于欧美日的标准测试规程，由于我国道路系统的交通运行无论是从设施方面、车辆性能以及交通组成方面还是驾驶员特性方面都具有不同于其他国家的特性，所以等效国外的工况并不适合对我国（特别是具体到各城市）车辆排放水平的分析和应用；第三是由于国内研究起步较晚，相关的交通基础有效数据缺乏，研究人员往往是用国外现成的模型进行研究，本地化修正不够，这样直接导致模型的水土不服；第四是相对于国外的研究，尤其是EPA和ECE，国内的相关研究显得全面性、系统性和持续性不足，往往是针对某个项目或某个目的进行研究，缺乏长远的规划。

因此在学习和借鉴国外现有成果的基础上，探索我国（尤其是具体到各城市）机动车排放水平及相关影响因素，开发针对中国交通特色的城市机动车尾气排放分析系统是一项十分重要而有意义的工作。

第3章 IVE 排放模型与城市交通微观仿真模型耦合研究

为了满足发展中国家控制机动车污染工作和研究的开展,国际可持续发展研究中心(International Sustainable Systems Research Center, ISSRC)和加州大学河边分校(UCR)的研究人员开发了适于发展中国家的机动车污染排放模型——IVE 模型。该模型抛弃 MOBILE 模型的基于平均速度的校正方法,而采用 VSP 和 ES 两个代用参数对非 FTP 工况下的机动车排放进行模拟,具有较高的分辨率;其对车型的分类更适于发展中国家。

3.1 IVE 模型简介

3.1.1 IVE 模型的计算方法^{[50][56-58]}

IVE 模型的计算方法是利用某一技术类型机动车排放污染物的基本排放因子(Base Emission Rate, BER)乘以一系列修正参数从而得到车队该污染物的排放量(参见式 3.1-3.2、表 3.1)。

$$Q_{[t]} = B_{[t]} * K_{(Base)[t]} * K_{(Tmp)[t]} * K_{(Hmd)[t]} * K_{(IM)[t]} * K_{(Fuel)[t]} * K_{(Alt)[t]} * K_{(Cntry)[t]} \quad (3.1)$$

$$Q_{running} = \bar{U}_{FTP} * D / \bar{U}_c * \sum_t \{f_{[t]} * Q_{[t]} * \sum_d [f_{[dt]} * K_{[dt]}]\} \quad (3.2)$$

$$Q_{start} = \sum_t \{f_{[t]} * Q_{[t]} * \sum_d [f_{[dt]} * K_{[dt]}]\}$$

式(3.1)计算出的是某一技术类型车辆的某种排放污染物基本排放因子(BER)经过修正后的调整排放率(Adjusted Emission Rate, AER),修正系数是根据当地的影响因素得来的,包括环境因素、燃油因素、检查和保养制度(IM)等。式(3.2)根据权重车队中不同类型车辆比例的调整排放率(AER)乘以车队运行工况的修正系数再乘上 LA4 工况的平均速度和车队行驶距离(或车队行驶时间乘车队平均速度)得出车队行驶中某种污染物的排放量;对于冷启动的污染物排放量等于权重车队中不同类型车辆比例的调整排放率(AER)乘以冷浸工况的修正系数。

表 3.1 公式 (3.2) 中各种参数的描述

变量	描述
$B_{[t]}$	每种技术类型车辆的基本排放因子 (启动 (g/次) 或运行 (g/km))
$Q_{[t]}$	每种技术类型车辆的调整排放率 (启动, g/次或运行 g/km)
Q	整个车队的平均排放量 (启动, g 或运行, g)
$f_{[t]}$	车队中每种技术类型车辆的比例
$f_{[dt]}$	每种技术类型车辆驾驶工况或冷浸工况的比例
\bar{U}_{FTP}	LA4 工况的平均速度 (常量, kph)
D	车队运行距离 (km)
\bar{U}_C	车队的平均速度 (kph)
$K_{(Base)[t]}$	BER 的调整系数
$K_{(Temp)[t]}$	温度修正系数
$K_{(Hmd)[t]}$	湿度修正系数
$K_{(IM)[t]}$	IM 制度修正系数
$K_{(Fuel)[t]}$	燃油质量修正系数
$K_{(Alt)[t]}$	海拔高度修正系数
$K_{(Cntry)[t]}$	国家 (地区) 修正系数
$K_{[dt]}$	驾驶工况或冷浸类型修正系数

IVE 模型中运行中的 BER 定义和 MOBILE6 一样, 都是车辆在 LA4 工况运行时的污染物排放量。LA4 工况是美国环保署 (EPA) 制定的城市车辆测功器行驶规范 (UDDS)。其循环时间为循环时间是 1372 秒, 行驶距离是 7.5 英里, 平均速度为 19.59 英里/小时, 它代表城市平均行驶模式 (见图 3.1)。LA4 同时也可以看成是一个合成工况, 由热运行工况 505 (HR505) 和美国联邦测试规程 FTP75 工况的 Bag2 组成, 其中 HR505 来自于 FTP75 工况的 Bag1-3, 见式 (3.3)。

$$Running\ LA4\ Emission = (HR505 * (0.206 + 0.273)) + (Bag2 * 0.521) \quad (3.3)$$

和运行的 BER 定义一样, 冷启动的 BER 也是一个合成工况 (参看式 3.4), 其值等于 FTP75 的 Bag1 排放减去 HR505 排放。

$$Start\ Emission = (Bag1 - HR505) * 3.6 \quad (3.4)$$

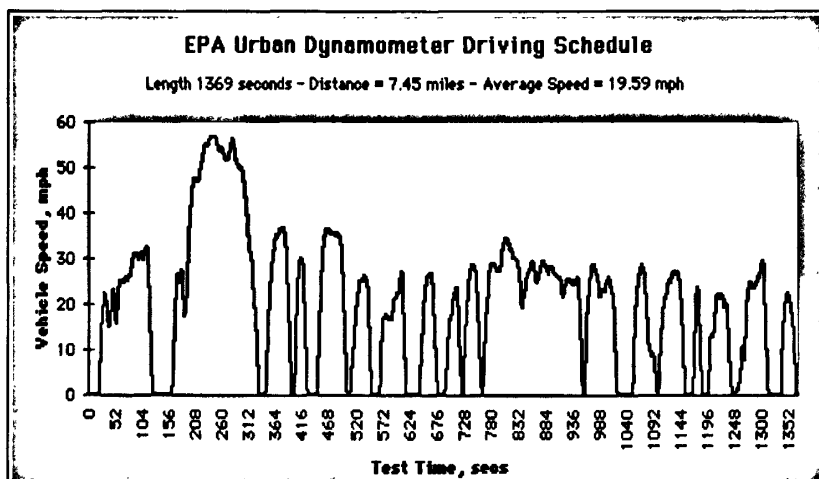


图 3.1 LA4 机动车工况

两者在 HR505 数据无效或不能评估时，用 Bag3 替代。

3.1.2 IVE 模型的特点^{[17][48]}

就其本质而言，IVE 模型仍和 MOBILE 模型一样属于宏观模型，即利用模型内嵌的基于平均速度的基本排放因子乘以一系列修正系数从而得到当地城市每种技术类型机动车的排放因子。它的数据来源大部分是与 MOBILE 保持一致的，对上万套美国环保署（EPA）、加州空气资源局（CARB）和加州大学河边分校（UCR）的台架测试数据进行了处理，修正参数也大多来自于它们的研究。但该模型摒弃了使用单一参数——平均速度来反映车辆运行工况对污染物排放量的影响的做法，引入 VSP 和 ES 两种参数，考虑了瞬时运行工况变化对排放的影响，因而使该模型具有更大的准确性和适应性。

VSP 的物理意义是机动车瞬时输出功率与机动车质量的比值，最初由美国麻省理工大学 José Luis Jiménez Palacios 于 1999 年其博上论文中提出，随后被进一步发展和应用，并成为 EPA 开发新一代机动车排放模型的主要参数之一。下面简单介绍一下 VSP 的物理背景。

机动车瞬时输出的功率产生的驱动力 F_f 主要满足以下几方面的需求：

（一）滚动阻力。滚动阻力 F_f 等于滚动阻力系数 f 和车轮负荷 W 的乘积（见式 3.5）。滚动阻力系数 f 与路面种类、行车速度以及轮胎的构造、材料和气压等有关。

$$F_f = Wf \quad (3.5)$$

(二) 空气阻力。它由压力阻力和摩擦阻力两部分组成。作用在机动车外形表面上的法向压力的合力在行驶方向的分力, 称为压力阻力; 摩擦阻力是由于空气的粘性在车身表面产生的切向力的合力在行驶方向的分力。压力阻力又分为四部分: 形状阻力、干扰阻力、内循环阻力和诱导阻力, 其函数关系如式(3.6):

$$F_w = C_D A \rho u_r^2 \quad (3.6)$$

式中, C_D 为空气阻力系数, 是雷诺数的函数; ρ 为空气密度; A 为迎风面积, 即车辆行驶方向的投影面积 (m^2); u_r 为相对速度, 当无风时即车辆的行驶速度 (m/s)。研究表明: 对于一般轿车, 空气阻力的分布为形状阻力占 58%, 干扰阻力占 14%, 内循环阻力占 12%, 诱导阻力占 7%, 摩擦阻力占 9%。

(三) 坡度阻力

当机动车上坡行驶时, 车辆重力沿坡道的分力表现为坡度阻力, 即

$$F_i = G \sin \alpha \quad (3.7)$$

式中, G 为作用于车辆上的重力, $G = mg$, m 为车辆质量, g 为重力加速度。 α 为道路坡度。

(四) 加速阻力

机动车加速行驶时, 需要克服其质量加速运动时的惯性力, 就是加速阻力 F_j 。车辆的质量分为平移质量和旋转质量两部分。加速时, 不仅平移质量产生惯性力, 旋转质量也要产生惯性力偶矩。

$$F_j = \delta m \frac{du}{dt} \quad (3.8)$$

式中, δ 为机动车旋转质量换算系数, m 为车辆质量 (kg); $\frac{du}{dt}$ 为行驶加速度 (m/s^2)。

δ 主要与飞轮的转动惯量、车轮的转动惯量以及传动系的传动比有关。

由于机动车行驶时发动机功率和行驶的阻力功率总是平衡的, 即, 在机动车行驶的每一瞬间, 发动机发出的功率始终等于机械传动损失功率与全部运动阻力所消耗的功率。因此, 如果忽略传动损失, VSP 表示可以用式 (3.9) 表示:

$$\begin{aligned} VSP &= \frac{F_t * v}{m} = \frac{(F_f + F_i + F_w + F_j) * v}{m} = \frac{(mgf + mg \sin \alpha + C_D A \rho u_r^2 + \delta m \frac{du}{dt}) * v}{m} \\ &= v(a\delta + g \sin \alpha + gf) + \frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} (v + v_w)^2 v \end{aligned} \quad (3.9)$$

式中： m ——机动车质量

v ——机动车速度

a ——机动车加速度

δ ——机动车旋转质量换算系数

α ——坡度

g ——重力加速度

f ——滚动阻力系数

C_D ——空气阻力系数

A ——机动车迎风面积

v_w ——顶头风速

ρ ——空气密度

由此可见 VSP 综合考虑机动车在行驶过程中动能和势能的变化以及克服地面摩擦阻和克服空气阻力所做的功。由于机动车输出功率与燃油消耗和排放之间的对应关系，试验数据及统计分析表明 VSP 与机动车的瞬时排放有很强的相关性，能够更准确的反映瞬时工况与排放的关系。

与此同时，为了更准确的建立发动机的历史工作状态和污染物排放的关系，IVE 模型又引入了无量纲参数 ES。ES 与机动车瞬时速度和发动机前 20s 的历史 VSP 有关，如式 (3.10) 所示。低 ES 值反映前 20s 车辆在低速和低加速的情况运行，同时发动机的转速 RPM 也相对地较低，反之相反。

$$ES = RPMIndex + 0.08 * PreaveragePower \quad (3.10)$$

式 (3.10) 中， $PreaveragePower$ 为机动车前 25s 到前 5s 的 VSP 平均值，kW/t；0.08 为经验系数，单位为 t/kW； $RPMIndex$ 为发动机转速指数，为瞬态速度与速度分割常数的商，速度分割常数的取值由 v 和 VSP 决定。

IVE 模型利用 VSP 和 ES 两个参数将发动机瞬态的工作状态分成 60 个区间 (bin)，如表 3.2 所示。每个 bin 对应一个排放水平，据此建立发动机瞬时工作状态与排放的分段对应关系。根据某一时间区间内 bin 分布以及每个 bin 与排放的对应关系，计算出机动车在一段时间内变化行驶工况下的排放因子。

表 3.2 bin 与 VSP 和 ES 的对应关系

VSP 区间 ($\text{kW}\cdot\text{t}^{-1}$)	ES 低负荷	ES 中负荷	ES 高负荷
	[-1.6, 3.1)	[3.1, 7.8)	[7.8, 12.6)
[-80.0, -44.0)	0	20	40
[-44.0, -39.9)	1	21	41
[-39.9, -35.8)	2	22	42
[-35.8, -31.7)	3	23	43
[-31.7, -27.6)	4	24	44
[-27.6, -23.4)	5	25	45
[-23.4, -19.3)	6	26	46
[-19.3, -15.2)	7	27	47
[-15.2, -11.1)	8	28	48
[-11.1, -7.0)	9	29	49
[-7.0, -2.9)	10	30	50
[-2.9, 1.2)	11	31	51
[1.2, 5.3)	12	32	52
[5.3, 9.4)	13	33	53
[9.4, 13.6)	14	34	54
[13.6, 17.7)	15	35	55
[17.7, 21.8)	16	36	56
[21.8, 25.9)	17	37	57
[25.9, 30)	18	38	58
[30, 1000)	19	39	59

值得注意的是：bin 对应的排放修正系数是建立在五种机动车分组 (group) 的基础上。它们分别是：闭环供油尾气催化汽油车 (closed-loop catalyst equipped gasoline vehicles)；闭环供油无尾气催化汽油车 (closed-loop non-catalyst gasoline vehicles)；化油器供油尾气催化汽油车 (carbureted catalyst equipped gasoline vehicles)；化油器供油无尾气催化汽油车 (carbureted non-catalyst gasoline vehicles)；所有柴油车 (all diesel vehicles)。

3.1.3 IVE 模型的使用^[50]

IVE 模型是用 Java 语言编写的 Windows 版本, 安装时必须使用 Java 虚拟机。与 MOBILE 模型相比界面更为友好, 操作相对简单。IVE 模型包括两个输入界面、一个修正界面和一个输出界面。

1) 当地数据输入界面 (Local Page)

在此界面中可以输入当地的各种影响因素以确定对应的修正系数。具体情况可参看表 3.3。

表 3.3 当地的影响因素 (Location Specific Information)

当地变量	燃油质量因素	车辆行驶特征
周边温度	汽油总体情况	bin 的分布
周边湿度	汽油含硫量	坡度
海拔高度	汽油含铅量	空调随温度变化的使用率
I/M 制度	汽油含苯量	启动分布
国家 (地区) 修正系数	汽油含氧量	
	柴油总体情况	
	柴油含硫量	

2) 车队技术分布界面 (Fleet Page)

IVE 模型根据车辆尺寸、使用的燃油类型、车辆里程数、供油系统、油气蒸发控制系统以及排放控制系统或标准将机动车详细划分为 1372 种技术类型, 每种技术类型都对应相应的 BER。

在此界面中可以根据 IVE 提供的技术类型输入当地车队 (Fleet) 机动车的技术分布信息。此外, 用户还可根据当地的情况, 增加某些技术分类。

3) 基准因子修正界面 (Base Adjustment Page)

IVE 模型使用的 BER 数据大部分来自于在标准条件下基于 FTP 工况的台架测试结果。由于各个国家和地区交通情况和车辆状况并不相同, 因此 IVE 允许通过根据当地机动车工况而获得的 BER 数据去修正模型中的 BER 以评估当地的机动车排放。

4) 输出界面 (Calculation Page)

IVE 模型能够计算机动车污染物包括三大类: 常规污染物 (criteria)、有毒污染物 (toxics) 和温室气体 (global warming), 分别包括 CO、VOC、NO_x、SO₂、

PM、铅、醛以及 CO₂ 等污染物。可以单独计算机动车的热运行阶段的排放或启动排放以及二者的和值。

3.1.4 IVE 模型和其他排放模型比较^{[20][49][53][59]-[61]}

对不同的排放模型进行比较是十分有意义的，因为不同模型的不同计算方法、数据来源及应用范围等都可能造成不同的结果以及评估的偏差。

目前排放模型的数据来源都是基于固定的工况，这些工况反映了某一个国家或地区车辆的行驶情况，是统计意义上的一种合成。然而不同的国家或地区由于发展程度不一样，国情不一样，制定的标准和控制策略也不尽相同，所以这些工况并不一定适合所有的地区。即使是同一个国家和地区，随着时间的推移，车辆技术和交通软硬件设施的发展，其原先代表性的工况也会发生改变。在选用排放模型时，首先应该考虑模型数据的代表性。

IVE 模型是建立在美国 FTP75 工况的基础上，这和 MOBILE 模型一样；EMFAC 模型的测试工况是美国加州 ARB 的 LA92 工况；欧洲环境署 EEP 资助开发的 COPERT 模型则是利用了欧盟 ECE15 工况；CMEM 模型属于微观排放模型，其工作原理和上述模型是不同的，它从发动机负载和污染物形成的物理化学原理去研究各种因素对排放的影响，数据来源于 FTP 工况、US06 高速工况和 MEC01 工况。美国环保署 EPA 曾在相同的环境条件下用相同的工况对 MOBILE 模型、IVE 模型、EMFAC 模型及 CMEM 模型的排放率进行了比较，结果显示：IVE 模型和 MOBILE 模型的排放率最为接近，而其他两种模型与之相比，对于不同技术类型的车辆和不同类型的排放物，其排放率都有一定的差别，EMFAC 模型的评估值总体来看偏高；希腊亚里士多德大学的 Theodoros Zachariadis 为了评估 MOBILE5a 模型和 COPERT 模型之间的差别，曾经对希腊 1990 年的道路交通尾气排放量进行计算，结果显示 COPERT 模型所得的每单位燃油的排放量要高于 MOBILE5a 模型的计算值，而对于 NO_x 的计算值，MOBILE5a 模型的比 COPERT 模型的大很多；北京大学的谢邵东也曾对 COPERT 模型、MOBILE 模型与台架试验结果进行比较，发现总体上 COPERT 模式、MOBILE 模式和台架实验所获得的数据在反映不同车型排放特征的关系上是一致的，除中、重型车辆 NO_x 的排放以外，COPERT 模型的计算结果较 MOBILE 模型更接近于台架实测值；北京工商大学的何春玉利用 CMEM 模型计算与在线车辆排放实测相比较，

得出两者具有较好的一致性，CMEM 模型在 CO₂ 的预测值上偏高；清华大学的姚志良运用 IVE 模型对北京市不同车型车队的排放进行了计算，并比较了 IVE 模型与 MOBILE6 模型的计算结果，得出了 IVE 模型具有较高的时间分辨率，可以更准确地体现出城市机动车污染的变化特征。

其次，模型的可移植性和适用性也是模型比较的一个重要因素。可移植性是指根据当地情况对模型中的参数进行修正的难易程度。它反应了模型映射当地的情况的能力，例如各种影响因素能否尽可能多的被反映到模型中。MOBILE 模型的一个很大的优势在于其开放的程序源代码，使用者可以根据各地情况选择需要修正模型的部分。墨西哥在用 MOBILE 编制国家层面的排放清单时，对模型的基础排放率、燃料特性、浸置参数作了修正，而香港在使用 EMFAC 时除了修正基本排放因子外，也将当地的排放控制计划修正了进去。IVE 模型如 3.1.3 所述，设置了两个输入界面和一个修正界面，用户可以输入 BER 的修正值，对模型内嵌的排放因子进行校正。此外，还可以添加 IVE 模型分类以外车辆技术类型，操作简单。COPERT 普遍使用于欧洲地区，修正经验较少，且源代码不开放。CMEM 系统复杂，参数之间的联系紧密，模型在编写阶段确定后难以再修改，可移植性不强。

模型适用性是指模型在使用过程中尽可能的适应当地情况进行操作的特性。IVE 模型的定位是为发展中国家有效减少排放提供决策依据，因此 IVE 模型被设计成在操作性十分便利的模型。例如，模型对车辆按技术分类成 1372 种，而并非像 MOBILE 模型一样按照美国的模型年 (model year) 分类。将按美国模型年分类的车辆转化成按技术分类的车辆是一件非常麻烦的工作，因为在每个模型年中许多技术类型车辆会随排放标准改变而其控制策略并不改变，因此在中国使用 IVE 模型在车辆信息收集方面相对 MOBILE 模型就简单很多。另外 IVE 模型的需要输入参数也不是很多，只有部分基础数据需要调查获得。从表 3.4 可以看出 IVE 操作简单，参数可获性强，适合数据不确定性比较大的发展中国家和地区。MOBILE、EMFAC 模型由于开发时间和使用时间早，在成熟度上具有较强的优势，而且宏观尺度模拟能力强。CMEM 属于微观排放模型，模拟精度高，并能和不同层次的交通模型耦合，可以用来分析当地的实际工况和速度剖面对排放的影响，也是机动车尾气模型发展的方向之一。

表 3.4 模型适用性比较

模型	模型原理						可移植性	参数个数
	应用范围	表征参数	类型	结果	计算原理	数据来源		
MOBILE	宏观中观	平均速度	排放因子	均值	统计回归	FTP 等	开放的源代码	27
EMFAC	宏观中观	平均速度	排放因子	均值	统计回归	LA92 等	源代码不开放	16
IVE	宏观中观	VSP 平均速度	工况	均值	统计回归	LA4 等	提供操作界面	19
CMEM	宏观中观	发动机功率需求	工况	瞬时	物理原理	FTP 等	源代码不开放	47
COPERT	宏观中观	平均速度	排放因子	均值	统计回归	ECE15 等	源代码不开放	15

3.2 IVE 模型的接口开发

IVE 排放模型是用面向对象的 Java 语言编写的可视化程序。该模型人机交互界面友好、操作比较简单，但没有和其他程序耦合的接口，只能独立使用。为了使 IVE 模型具有更广泛的使用范围，尤其能与对应的交通模型或扩散模型耦合成为其子模型（如图 3.2），使其具有更为强大和完整的功能，对 IVE 模型进行有接口的二次开发就成为必要。

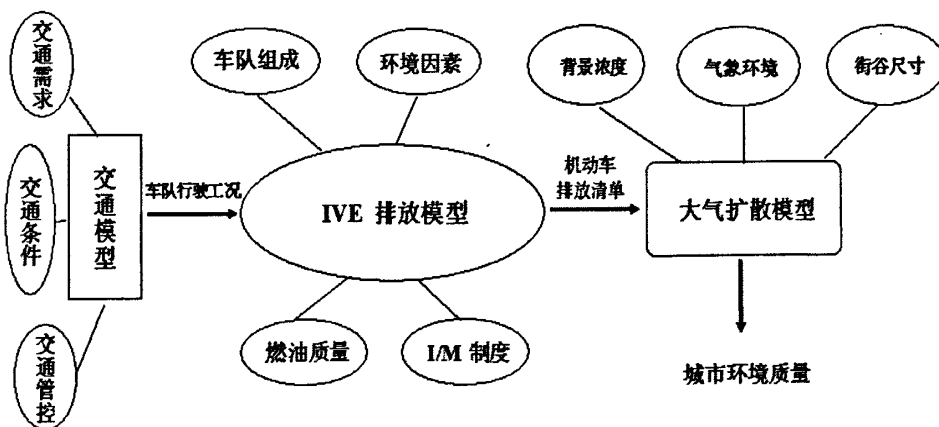


图 3.2 IVE 模型二次开发示意图

3.2.1 IVE 模型的架构

如 3.1.1 所述，IVE 的计算方法是利用基准排放因子 BER 乘以一系列修正参数从而得到当地城市每种技术类型机动车的排放因子。

在使用 IVE 模型时，为了得到准确的机动车排放清单，有三个关键的要素

是需要特别关注的，它们分别是：车辆排放率、车辆驾驶工况和车队组成。其具体关系如图 3.3。

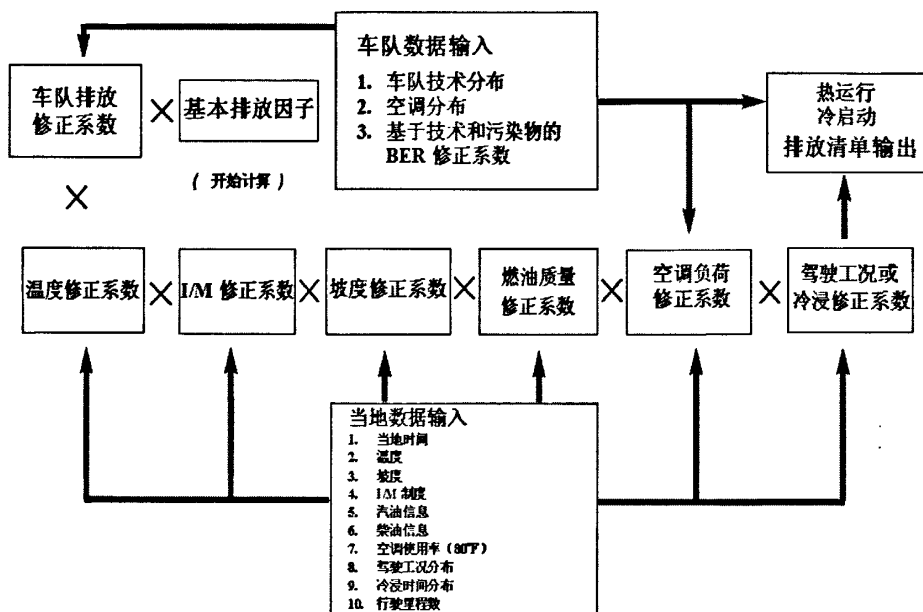


图 3.3 IVE 模型核心架构图

IVE 模型执行文件中带有一个数据包，其中里面有两种文件，一种是*ber.txt，另外一种是*adj.txt。*ber.txt 里面储存的是 1372 种技术车辆不同污染物的 BER，而*adj.txt 则包含对应的各种修正系数。此外，在每种污染物类 (Pollutant Class) 的程序中带有车辆工况的修正系数。通过以上数据和式 (3.2) 就可以计算出当地的机动车排放清单。

3.2.2 二次开发 IVE 模型的应用

由于 IVE 模型相对其他排放模型具有较高的时间和车辆分辨率，同时具有操作简便，输入参数少，参数可获得性强等优点，适合于数据不确定性比较大的发展中国家。本文利用 C 语言和 IVE 模型提供的 BER 及 ADJ 数据库重新编写了 IVE 排放的计算程序，使之可以成为其他城市交通模型的子模型用来计算机动车排放。下面是应用信号控制交叉口理论和二次开发的 IVE 模型评估在低饱和度情况下车辆经过信号交叉口做出的排放贡献。

信号交叉口是城市道路路口的主要形式之一。交叉口处信号控制和车辆到达随机性会引起运行车辆不能以期望速度行驶而产生的时间损失；同时由于机

动车运行工况发生变化, 车辆也会在交叉口产生比在正常行驶时更多的尾气排放和燃油消耗。如果将自由车流的尾气排放量看作正常排放量, 则在交叉口就存在着由于车辆变工况引起的额外污染物排放量。

图 3.4 为车辆在信号灯交叉口工况变化的示意图。

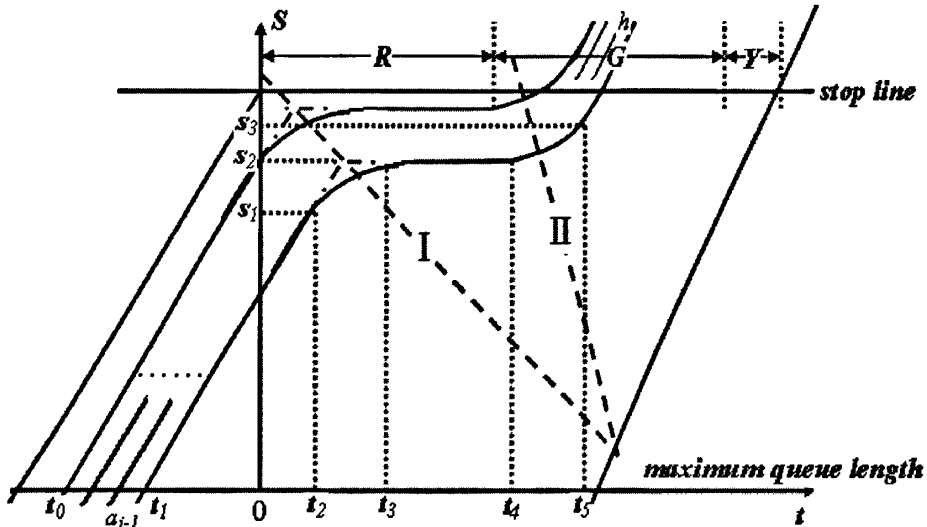


图 3.4 车辆经过信号灯交叉口行驶工况变化情况

车辆通过信号交叉口是个相当复杂的问题, 它与信号周期、配时、交通量及随机因素等有关^{[62]-[65]}。为了了解基本交通参数对车辆经过交叉口行驶工况的影响, 本文做以下假设: 图 3.4 为交通流通过停车线的基本示意图, 设对于任一交叉口进口道的停车线为 stop line, 最大排队长度出现在 maximum queue length; 进口口上游车辆折算为一种车型, 到达服从随机分布, a_i 为车辆到达最大排队长度断面时的车头时距; 车辆离开率为常数, h 为车辆通过停车线的车头时距; R 为显示红灯信号时间(s), G 为显示绿灯信号时间(s), C 为信号周期时间 ($C = R + G$)(s), 绿信比 $\lambda = G/C$; 显然点划线 I、II 分别代表车辆的到达率 q 和离开率 s 。并假设饱和度 X , 即观测最大流量与信号交叉口进口道的通行能力之比 $q/\lambda s$, 远小于 1。同时令最大排队车辆数为 m , 利用 F V Webster 交叉口进口

$$\text{车道延误计算公式取 } m = \frac{sqR}{s - q}。$$

停车线前第 i 辆车通过交叉口的速度变化情况如下：匀速—减速—（或怠速）—加速—匀速。设红灯开始时间为 0，stop line 到 maximum queue length 线的距离为 S ； t_0 为红灯时排在 stop line 前第一辆车经过 maximum queue length 线的时间，由于在它前面一辆车在红灯亮起前顺利通过交叉口，所以 $t_0 \in \left(-\frac{S}{v}, a_1 - \frac{S}{v}\right]$ ， v 为车辆正常行驶时的速度， a_1 是停车线前第一辆车与通过车辆的车头时距； t_1 为第 i 辆车经过 maximum queue length 线的时间， $t_1 = t_0 + \sum_{k=1}^{i-1} (a_k)$ ； t_2 为第 i 辆车

由匀速转为减速的时间点， $t_2 = t_1 + \frac{S - (i-1)(L+l) - \frac{v^2}{2a_-}}{v}$ ； t_3 为第 i 辆车怠速开始

时间点， $t_3 = t_2 + \frac{v}{a_-}$ ； t_4 为第 i 辆车怠速结束加速开始的时间点， $t_4 = R + (i-1)\Delta t$ ；

t_5 为第 i 辆车加速转为匀速的时间， $t_5 = t_4 + \frac{v}{a_+}$ ； S_1 为第 i 辆车在停车线前匀速

行驶的距离， $S_1 = S - (i-1)(L+l) - \frac{v^2}{2a_-}$ ； S_2 为第 i 辆车加速行驶距离，

$S_2 = S - (i-1)(L+l)$ ； S_3 为第 i 辆车加速形式距离， $S_3 = S - (i-1)(L+l) + \frac{v^2}{2a_+}$ ；

其中 L 为车辆长度， l 为怠速停车时车辆安全间隔；加速度为 a_+ ，加速度为 a_- ， Δt 为驾驶员的反应时间。如果 t_3 小于 t_4 ，则存在怠速时间，否则，车辆在经历减速后直接加速离开（见图 3.5）。同样，为了分析的简化，用期望值 $(i-1)E(a_i)$

取代 $\sum_{k=1}^{i-1} a_k$ 。

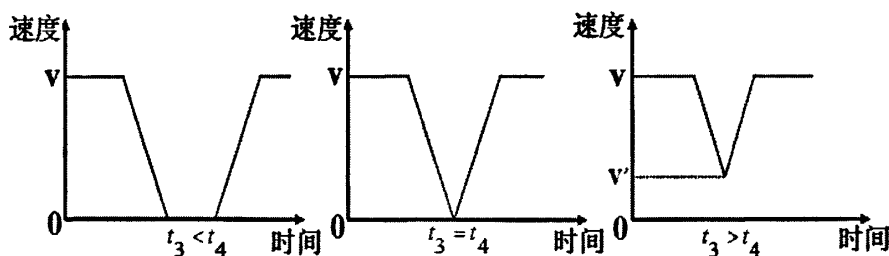


图 3.5 停车线前的车辆变速情况

由上述确定的时间点可以得出第 i 辆车经过 maximum queue length 线后匀速

行驶的时间和距离分别是：

$$t_2 - t_1 = \frac{S - (i-1)(L+l) - \frac{v^2}{2a_-}}{v} \quad (3.11)$$

$$S_1 = S - (i-1)(L+l) - \frac{v^2}{2a_-} \quad (3.12)$$

减速行驶的时间和距离分别是：

$$t_3 - t_2 = \frac{v}{a_-} \quad (3.13)$$

$$S_2 - S_1 = \frac{v^2}{2a_-} \quad (3.14)$$

怠速时间是：

$$t_4 - t_3 = R + (i-1)\Delta t - t_0 - (i-1)E(a_i) - \frac{S - (i-1)(L+l) + \frac{v^2}{2a_-}}{v} \quad (3.15)$$

加速行驶的时间和距离分别是：

$$t_5 - t_4 = \frac{v}{a_+} \quad (3.16)$$

$$S_3 - S_2 = \frac{v^2}{2a_+} \quad (3.17)$$

根据式 (3.11) - (3.17)，结合二次开放的 IVE 排放模型，就可以算出在不同交通条件下车流经过信号灯交叉口各种污染物的排放量。

3.2.3 算例

假设信号灯交叉口进口道车辆的到达是期望为 $E(a_i)$ 的随机到达，离开率为常数 h ；为计算方便，将车辆统一折算为小车，为多点喷射、三元催化轻型轿车，行驶里程小于 79Kkm，车长 3.5m，停车时的安全间距为 1m，正常行驶速度为 15m/s，加减速速度分别为 3m/s^2 、 -3m/s^2 ；驾驶员的反应时间为 0.7s。按照不同的信号周期和红灯时长以及不同的流量饱和度对排放的污染进行计算，并与正常行驶状况下的机动车排放污染进行比较，得出增加的排放量，结果见表 3.5。

表 3.5 不同饱和度的车流通过交叉口污染物排放清单

周期 C /红灯 R (s)	饱和 流量 (辆/s)	到达 率 (辆/s)	饱 和 度	CO ₂ 排放量/增加 排放量 (g)	CO 排放量/增加 排放量 (g)	NO _x 排放量/增加 排放量 (g)	VOC 排放量/增加 排放量 (g)
60/42	0.5	0.075	0.5	568.8/177.5	8.38/4.54	1.96/0.68	0.17/0.07
		0.105	0.7	841.8/262.2	12.27/6.59	2.90/1.01	0.26/0.10
60/24	0.5	0.15	0.5	744.1/164.5	10.5/4.8	2.58/0.69	0.23/0.07
		0.21	0.7	1150.1/291.0	17.54/9.12	4.04/1.23	0.36/0.13
80/56	0.5	0.075	0.5	758.2/272.8	10.65/5.90	2.53/0.95	0.23/0.10
		0.105	0.7	1169.8/401.9	16.32/8.80	3.90/1.39	0.35/0.15
80/32	0.5	0.15	0.5	940.0/266.3	13.94/7.34	3.28/1.07	0.29/0.11
		0.21	0.7	1566.9/437.1	23.72/12.65	5.44/1.75	0.48/0.19
100/68	0.5	0.08	0.5	1125.4/451.7	22.85/16.25	3.82/1.61	0.38/0.21
		0.112	0.7	1593.0/642.7	34.58/25.27	5.37/2.26	0.56/0.31
100/36	0.5	0.16	0.5	1218.8/359.7	17.99/9.57	4.21/1.40	0.37/0.15
		0.224	0.7	1996.9/605.2	31.21/17.58	7.01/2.45	0.62/0.25

根据上表利用方差分析法 (ANalysis Of VAriance, ANOVA) 对一个信号周期的一个进道口车辆增加的排放量和排放量的增加比率进行分析。

方差分析是从观察变量的方差入手, 研究诸多控制变量中哪些变量是对观察变量有显著影响的变量。对观察变量有显著影响的各个控制变量其不同水平以及各个水平的交互搭配是如何影响观察变量的。

方差分析认为控制变量值的变化受到两类因素的影响: 第一类是控制变量不同水平所产生的影响; 第二类是随机因素所产生的影响。这里的随机因素是指那些人为很难控制的因素, 主要是试验过程中的抽样误差。如果控制变量的不同水平对观察变量产生了显著影响, 那么, 它和随机变量共同作用必然使得观察变量有显著变动; 反之, 如果控制变量的不同水平没有对观察变量产生显著影响, 那么, 观察变量的变动就不会明显表现出来, 其变动就可以归结为随机变量影响造成的。

单因素方差分析用来研究一个控制变量的不同水平是否对观察变量产生了显著影响。由于仅研究单个因素对观察变量的影响, 因此称为单因素方差分析。本论文利用 SPSS 软件研究绿信比、到达率和饱和度等控制变量是否对交叉口进

道口车辆的排放量等观察变量产生了显著性影响，结果见表 3.6~3.8。

表 3.6 饱和度的单因素方差分析结果

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
co 增加量	Between Groups	83.266	1	83.266	2.432	0.150
	Within Groups	342.319	10	34.232		
	Total	425.585	11			
co 相对增加量	Between Groups	0.027	1	0.027	0.074	0.791
	Within Groups	3.644	10	0.364		
	Total	3.671	11			
co2 增加量	Between Groups	91,455.480	1	91,455.480	5.186	0.046
	Within Groups	176,355.157	10	17,635.516		
	Total	267,810.637	11			
co2 相对增加量	Between Groups	0.000	1	0.000	0.004	0.951
	Within Groups	0.162	10	0.016		
	Total	0.162	11			
nox 增加量	Between Groups	1.135	1	1.135	4.766	0.054
	Within Groups	2.381	10	0.238		
	Total	3.516	11			
nox 相对增加量	Between Groups	0.000	1	0.000	0.019	0.893
	Within Groups	0.124	10	0.012		
	Total	0.124	11			
voc 增加量	Between Groups	0.015	1	0.015	3.212	0.103
	Within Groups	0.046	10	0.005		
	Total	0.060	11			
voc 相对增加量	Between Groups	0.001	1	0.001	0.014	0.908
	Within Groups	0.615	10	0.061		
	Total	0.616	11			

表 3.7 绿信比的单因素方差分析结果

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
co 增加量	Between Groups	310.692	3	103.564	7.211	0.012
	Within Groups	114.893	8	14.362		
	Total	425.585	11			
co 相对增加量	Between Groups	3.570	3	1.190	94.165	0.000
	Within Groups	0.101	8	0.013		
	Total	3.671	11			
co2 增加量	Between Groups	126,207.264	3	42,069.088	2.377	0.146
	Within Groups	141,603.373	8	17,700.422		
	Total	267,810.637	11			
co2 相对增加量	Between Groups	0.145	3	0.048	23.109	0.000
	Within Groups	0.017	8	0.002		
	Total	0.162	11			
nox 增加量	Between Groups	1.917	3	0.639	3.197	0.084
	Within Groups	1.599	8	0.200		
	Total	3.516	11			
nox 相对增加量	Between Groups	0.111	3	0.037	22.843	0.000
	Within Groups	0.013	8	0.002		
	Total	0.124	11			
voc 增加量	Between Groups	0.040	3	0.013	5.085	0.029
	Within Groups	0.021	8	0.003		
	Total	0.060	11			
voc 相对增加量	Between Groups	0.597	3	0.199	87.236	0.000
	Within Groups	0.018	8	0.002		
	Total	0.616	11			

表 3.8 到达率的单因素方差分析结果

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
co 增加量	Between Groups	412.762	7	58.966	18.394	0.007
	Within Groups	12.823	4	3.206		
	Total	425.585	11			
co 相对增加量	Between Groups	3.633	7	0.519	55.089	0.001
	Within Groups	0.038	4	0.009		
	Total	3.671	11			
co2 增加量	Between Groups	237,657.322	7	33,951.046	4.504	0.082
	Within Groups	30,153.315	4	7,538.329		
	Total	267,810.637	11			
co2 相对增加量	Between Groups	0.147	7	0.021	5.346	0.062
	Within Groups	0.016	4	0.004		
	Total	0.162	11			
nox 增加量	Between Groups	3.200	7	0.457	5.785	0.055
	Within Groups	0.316	4	0.079		
	Total	3.516	11			
nox 相对增加量	Between Groups	0.113	7	0.016	6.146	0.049
	Within Groups	0.011	4	0.003		
	Total	0.124	11			
voc 增加量	Between Groups	0.056	7	0.008	7.464	0.035
	Within Groups	0.004	4	0.001		
	Total	0.060	11			
voc 相对增加量	Between Groups	0.601	7	0.086	23.593	0.004
	Within Groups	0.015	4	0.004		
	Total	0.616	11			

从表 3.6 可以得出饱和度对于 CO、CO₂、NO_x、VOC 等机动车排放增加值和相对增加量（即增加量与正常行驶排放量的比值）的 F 统计量对应的概率 P-值大于显著性水平 α (0.05)，因此可以认为饱和度对上述观察变量没有产生显著影响；从表 3.7-8 可以得出绿信比和到达率对于大部分观察变量的 F 统计量对应的概率 P-值小于显著性水平 α (0.05)，但对于 CO₂ 和 NO_x 的增加量 F 统计量对应

的概率 P -值大于显著性水平 α (0.05), 表明它们没有对 CO_2 和 NO_x 的增加量产生显著性影响。相对于到达率, 绿信比的影响有更明显的作用。

从表 3.5 和 ANOVA 分析, 可以得出一下结论:

1) 除了 CO_2 、 NO_x 的增加量外, 绿信比对污染物排放增加量和相对增加量有显著性影响。这是因为相对过长的红灯时长会导致车辆延误的增加, 更多的车辆行驶工况会发生变化, 从而增加排放量;

2) 与绿信比相近, 进道口车辆到达率对污染物排放增加量和相对排放量有显著性的影响, CO_2 、 NO_x 的增加量和相对增加量除外, 表明 CO_2 、 NO_x 的排放对车辆工况的变化并不敏感;

3) 饱和度对污染物排放增加量和相对增加量没有显著的影响, 与人们的感知有一定的差距, 这是因为饱和度越大, 越容易引起塞堵, 但在交叉口引起车辆工况变化的主要原因仍然是红灯管控。

3.3 本章小节

机动车排放模式法是研究机动车排放的一种有效手段, 尤其在目前国内还没有开发出具有本地特点的排放模型, 借鉴和应用国外成熟的排放模型不失一种有效的选择。本章对 IVE 排放模型的理论基础, 具体实现, 应用范围以及与其他模型的特点对比进行了详细的阐述和分析, 同时对 IVE 模型进行了二次开发, 使其与城市交通微观仿真模型耦合成为可能。本文还根据交通流理论的交叉延误计算模型进行了算例研究, 结果表明交叉口车辆的排放与信号灯的绿信比和车辆的到达率有很大关系。

第4章 IVE 排放模型本地化研究

目前,国外许多成熟的机动车排放计算模型都被引进国内做相关的研究和分析,但由于这些国外模型均基于国外的交通实际情况而建立,其模型中的核心——基本排放因子均来自各自国家和地区的标准工况或测试数据,与我国的实际情况,包括机动车驾驶工况、车队中各种车辆比例分配,燃油情况,天气情况,道路情况以及 I/M 制度等等都有很大的差别。如果研究者在使用相关模型时,不对当地的交通环境和机动车情况做一定的调查研究,盲目的全盘接受和使用,其结果会导致模型计算结果和本地的实际情况产生较大误差,这在一定程度上将影响科学决策。

IVE 排放模型在设计时就充分考虑了不同国家,尤其是发展中国家的实际情况,满足模型本地化的要求^{[66][67]}。为了使数据库更符合发展中国家的情况,IVE 还在中国、秘鲁、墨西哥、肯尼亚、巴西等几个发展中国家使用并收集数据,收集工作还将继续进行,以便不断修正模型数据库,使之更符合发展中国家的情况;同时输入参数也有相应的选项,以满足当地的情况。IVE 模型共有 19 个参数,每个参数都有若干选项以供不同情况的选择。如果本地的相关信息收集不到,可以使用缺省值(default)。

本文以武汉地区为对象对 IVE 模型本地化进行研究,以期较准确地分析本地机动车排放情况。本章中的大部分数据是通过到相关单位调研收集和搜索相关文献及统计数据得到的,部分数据是作者按照 IVE 模型要求进行实地调研得到的。

4.1 武汉市环境的参数

IVE 模型的环境影响因素主要包括温度、湿度、海拔高度等。本文通过收集相关资料以及对收集的数据进行统计分析,较全面地掌握了武汉市的相关环境特征。

武汉市位于长江中游,北纬 $29^{\circ}58' \sim 31^{\circ}22'$,东经 $113^{\circ}42' \sim 115^{\circ}04'$ 海拔高度在 51~75 米范围内。市区地势东高西低,长江与汉江交汇于市中心,境内湖泊众多,这种特殊的地形地貌条件是形成武汉市气候特征的重要因素之一。武汉市处于北亚热带季风气候区,受季风环流的支配,冬夏季风交替明显,形成四季分明、

光照充足、雨量丰富的典型北亚热带季风气候。

4.1.1 武汉市温度变化情况^{[68][69]}

表 4.1 武汉市平均气温统计结果 (1997 年 4 月—2002 年 5 月, °C)

月份 温度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
平均值	4	8	12	18	25	26	28	30	23	20	13	6	18
最大值	10	23	21	30	33	34	39	40	36	30	23	18	28
最小值	-7	0	1	8	18	19	22	24	16	9	2	0	9

表 4.1 给出了武汉市平均气温统计结果。表中显示 8 月份气温最高, 为 29.8°C; 1 月最低, 为 3.8°C; 年平均气温为 17.7°C, 接近常年气温。可以看出, 武汉市冬季气温较低, 夏季气温较高。

一般来说, 温度的变化直接导致汽车空调的使用率, 进而影响比功率 VSP 的变化, 从而对车辆排放产生影响。另外, 温度还对部分排放污染物产生直接影响。表 4.2 为机动车排放随温度变化的敏感性分析, 从表中可以看出可挥发性气体 (VOC) 和 CO 的排放水平随温度的升高而有很大的增加。

表 4.2 机动车排放水平随温度变化的趋势

	污染物	温度升高	污染物	温度升高
排放水平的	VOC	较大增加	NO _x	一般增加
变化趋势	CO	较大增加	PM	基本不变

4.1.2 武汉市湿度变化情况^{[69][70]}

相对湿度是实际空气中的湿度与在同一温度下达到饱和状态的湿度之比值, 是对含湿量十分灵敏的气象要素值。它的日变化很大, 并且其变化随月份和季节的不同而不同。表 4.3 为武汉市不同时段逐月的相对湿度分布情况。

从表 4.3 中可看出: 1) 02 时各月绝大多数的相对湿度在 80% 以上, 而 14 时相对湿度在 80% 以上的概率很小, 反映出武汉市白天干燥, 夜间潮湿的特点; 2) 1 月份 02 时相对湿度分布在 70~100% 的概率较大, 14 时相对湿度在 30~100% 之间的概率基本均衡; 7 月份 02 时几乎所有的相对湿度在 70~100% 之间, 14 时近一半的相对湿度分布在 50~69% 之间, 且最低相对湿度也在 40% 以上, 这表明冬季明显比夏季干燥, 而从 7 月到 12 月大气是由湿变干的。

表 4.3 武汉市不同时段逐月的相对湿度分布情况

时段	月份	相对湿度 (%)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
02 ^h	≤59	8	10	6	4	1	0	0	0	3	2	4	10
	60-69	8	12	9	11	11	3	1	2	6	5	9	9
	70-79	16	20	14	17	16	13	19	21	23	15	19	15
	80-89	28	35	40	32	37	44	44	50	37	38	31	30
	≥90	40	23	31	36	35	40	36	27	31	40	37	36
14 ^h	≤29	6	10	6	3	4	0	0	0	4	5	6	8
	30-39	12	15	7	12	7	3	0	0	7	15	21	15
	40-49	15	13	14	9	18	7	5	5	20	25	21	18
	50-59	6	18	21	20	26	22	30	39	30	20	10	9
	60-69	15	16	14	23	17	30	29	35	17	12	9	10
	70-79	15	8	11	12	11	20	14	12	10	11	13	16
	80-89	15	12	19	13	7	11	12	6	7	5	11	16
	≥90	16	8	8	8	10	7	10	3	5	7	9	8

空气中的水分主要是对机动车 NO_x 的排放产生很大影响，空气湿度越大，机动车排放的 NO_x 相应地就越少。图 4.1 是大气湿度对 NO_x 排出量的影响（格令为英制质量单位，1 格令=64.8mg）。

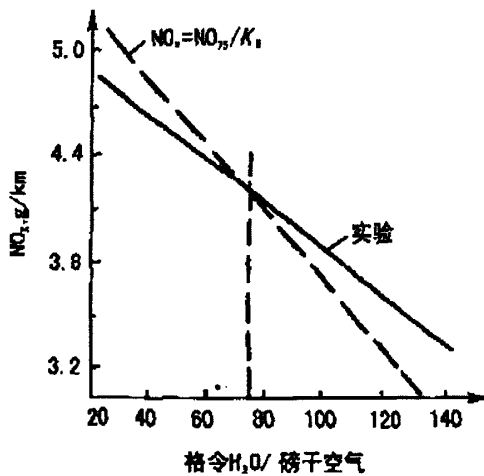


图 4.1 大气湿度和 NO_x 排出量的关系

4.1.3 武汉市海拔高度

武汉市的海拔高度大部分是在 50 米以下。海拔高度主要是对空气中的含氧量有一定的影响，进而对 CO 和 HC 的排放有影响。

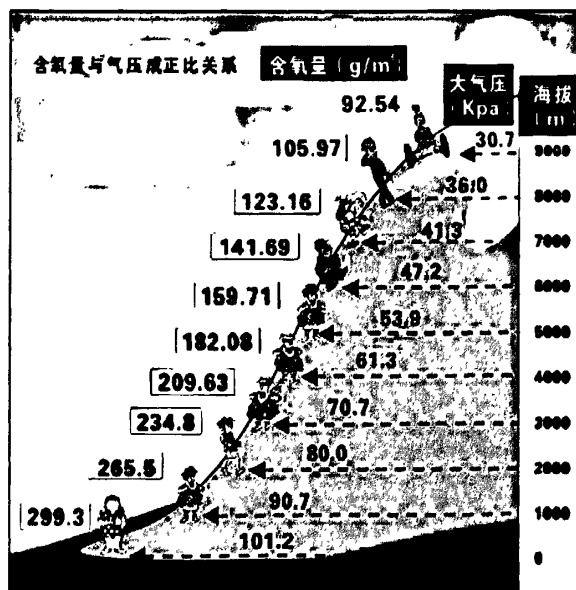


图 4.2 海拔高度与含氧量的关系

4.2 武汉市的 I/M 制度

I/M 制度是英文 Inspection and Maintenance Programs 的缩写，即在用车的检查维护制度。它的含义在国家环保总局、科学技术部、国家机械工业局制定的《机动车排放污染技术指南》中是这样解释的：“在用车检查/维护制度是通过对在用车的排放进行定期检测和随机抽查，促进车辆进行严格的维修、保养，使车辆保持正常的技术状况，努力达到出厂时的排放水平。”它是目前公认的在用车排放治理的最有效的方法。实施 I/M 制度能迅速有效降低机动车的污染排放，同时经过维护保养可提高机动车的燃料经济性。I/M 制度的着眼点是使车辆达到自身最佳排放净化水平，从而带给车辆更好的安全性能；严格和完善的 I/M 制度对 CO、NO_x 等有害气体都有良好的削减效果。例如：美国科罗拉多州在 80 年代初开始了 I/M 制度，EPA（国家环保局）要求达到减少 CO 排放量 31%，实际上在实施 I/M 制度后 CO 排放量减少了 59%。

我国按《道路交通安全法》和《大气污染防治法》的有关规定，对机动车

辆实行强制性的以半年、一年或两年为周期（车辆的使用状况不同，其检验周期也相应变化）的年检制度。执行检验的是具有机动车安全技术检验资质的机构（对检验的结果要承担法律责任），从 2009 年 6 月起，执行的标准是我国首个机动车安全技术检验国家标准（GB21861—2008）《机动车安全技术检验项目和方法》。

汽车检测内容主要包括安全行驶和减少公害两方面，即上线前检测、地沟检测和用专门仪器设备的检测三大部分。具体检验项目尚无统一规定。专用仪器设备一般检测以下 6 项内容：前轮侧滑、制动力、车速表误差、发动机排放污染物、前照灯、喇叭声响。其中对于发动机排放污染物的检测，《机动车安全技术检验项目和方法》仅定性规定机动车尾气排放测量应“按国家环境保护行政主管部门的相关规定进行”，机动车安全技术检验机构应按照 GB18285-2005《点燃式发动机汽车排气污染物排放限值及测量方法（双怠速法及简易工况法）》、GB3847-2005《车用压燃式发动机汽车排气烟度排放限值及测量方法》、GB14621-2002《摩托车和轻便摩托车排气污染物限值及测量方法（怠速法）》、GB18322-2002《农用运输车自由加速烟度排放限值及测量方法》等现行有效的国家标准选择符合规定的方法进行机动车排气污染物测量。而目前我国各个地方常用的机动车排放检测方法有：瞬态工况法、稳态工况法、怠速法和双怠速法等，其中前两项方法为加载法。

在 IVE 模型中关于 I/M 这一输入参数中共有 10 个选项，包括：

- 1) 无（缺省）none
- 2) 怠速法（分散检测，载客车）idle decentralized (passenger veh)
- 3) 怠速法（集中检测，载客车）idle centralized (passenger veh)
- 4) 加载法（集中检测，载客车）loaded centralized (passenger veh)
- 5) 怠速法（分散检测，载客车和两轮/三轮机动车）idle decentralized (passenger veh.&2/3 wheelers)
- 6) 怠速法（集中检测，载客车和两轮/三轮机动车）idle centralized (passenger veh.&2/3 wheelers)
- 7) 加载法（分散检测，载客车和两轮/三轮机动车）loaded centralized (passenger veh.&2/3 wheelers)
- 8) 怠速法（分散检测，所有车辆）idle decentralized (all vehicles)
- 9) 怠速法（集中检测，所有车辆）idle centralized (all vehicles)
- 10) 加载法（集中检测，所有车辆）loaded centralized (all vehicles)

目前,武汉市中心城区现有 10 个机动车安全技术检测站(共 12 条检测线),其中,汉西(2 条检测线)、三角路(2 条检测线)、双墩、新五里和沌口开发区检测站为交管局自有检测站,其他 5 个检测站为交管局租赁的社会检测站;在江夏、蔡甸、黄陂、新洲、汉南等各有一个检测站(设在各区交通大队),只针对本区车辆检测。机动车按《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》第十六条规定:(一)营运载客汽车 5 年以内每年检验 1 次;超过 5 年的,每 6 个月检验 1 次;(二)载货汽车和大型、中型非营运载客汽车 10 年以内每年检验 1 次;超过 10 年的,每 6 个月检验 1 次;(三)小型、微型非营运载客汽车 6 年以内每 2 年检验 1 次;超过 6 年的,每年检验 1 次;超过 15 年的,每 6 个月检验 1 次;(四)摩托车 4 年以内每 2 年检验 1 次;超过 4 年的,每年检验 1 次;(五)拖拉机和其他机动车每年检验 1 次。

根据对蔡甸和硚口交管大队的调查,武汉市机动车尾气排放检测主要采取稳态工况法。

4.3 武汉市的燃油情况

IVE 模型对燃油品质进行了详细的划分,并分别给予了对应的修正系数。表 4.4 是对燃油参数的划分,研究者可以据此对当地的燃油进行适当的参数选择。

表 4.4 不同品质燃油的划分

汽油的整体情况	汽油的含铅量	汽油的含硫量	汽油的含苯量	汽油的含氧添加剂	柴油的整体情况	柴油的含硫量
中性/预混(二冲程)	无	中等(300ppm)	中等(1.5%)	0%	中等	中等(500ppm)
清洁/预混(二冲程)	低	低(50ppm)	低(0.5%)	1%	清洁	低(50ppm)
中性/非预混(二冲程)	高	超低(15ppm)	超低(0.2%)	2%	生物柴油	超低(15ppm)
清洁/非预混(二冲程)	无铅汽油抗爆剂 MMT	高(600ppm)	高(3.0%)	3%	掺水乳化柴油	高(5000ppm)

表 4.4 的第一列汽油整体情况中有四个选项,其中每个选项的后者是针对二冲程小型汽油机;预混是指加油前燃油即被混和好了,而非预混是指车辆操纵者自己混和燃油,预混燃油的质量要好过非预混,因为它的数量和质量都是按

要求匹配的；第二列汽油中铅的含量，缺省值是 0，低含量是 0.07g/L，高含量是 0.2 g/L；汽油中铅的含量直接影响排放中铅的含量，此外，铅还会导致催化装置失效，因此铅的含量对 CO、VOC、苯等的排放有影响，但对 PM 的排放没有影响；第三列汽油中硫的含量，缺省值是中等，即 15ppm；硫的含量影响 SO₂ 的排放量，此外，硫还会对 CO、VOC、NO_x、苯等排放有影响；第四列苯的含量，缺省值是 1.5%；第五列汽油中氧化添加剂的含量，缺省值是 0，它主要对 CO 和 VOC 的排放有影响；第六列是柴油的整体情况，包括一般性的柴油、生物柴油和掺水乳化柴油；研究表明：生物柴油可以减少 50%的 CO，40%的 VOC 和有毒气体 (toxics) 排放，还可以减少 60%的 PM 排放，但会增加 9%的 NO_x 排放；掺水乳化柴油可以减少 15%的 NO_x、3%的 CO、VOC 和有毒气体 (toxics) 排放以及 50%的 PM 排放；第七列柴油的含硫量，缺省值是 500ppm，它主要对 SO_x 的排放有影响，此外，还影响 NO_x 的催化效果，增加 NO_x 的排放。

我国的汽油标准基本上是参照欧洲标准来制定的，随着环保要求越来越高，我国汽油标准加快了研究的步伐，06 年 GB17930-2006《车用汽油标准》发布实施。与老标准汽油有 90#、93#、95#和 97#四个牌号相比，新标准汽油仅有 90#、93#和 97#三个牌号，按国标 II、III 分类。表 4.5 为汽油部分成分含量的标准。

表 4.5 GB17930-2006 车用汽油部分成分含量标准

	国 II	国 III
铅(g/L)不大于	0.005	0.005
硫(%)不大于	0.05	0.015
苯(%)不大于	2.5	1.0
氧含量(%)不大于	2.7	2.7

我国最新车用柴油标准是 GB/T 19147-2003，要求含硫量为不大于 500ppm；柴油机燃料调和用生物柴油 (BD100) 标准 GB/T20828-2007 也已经颁布，按照硫含量要求不同分为 S500 和 S50 两个牌号，分别是不大于 500ppm 不大于 50ppm。武汉市各加油站所售燃油统一按国家标准执行。

4.4 武汉市交通路网特征

IVE 模型对车辆的调查是按照区 (street-section) 和道路等级 (street-type) 分类进行的，其中城市道路分为 residential street、arterial street 和 free street，按

照国内的标准可以分成支路、次干道和主干道。在计算城市机动车排放清单时，按不同道路调查所得排放数据乘以城市中该类道路总长再求和而得。

表 4.6 为武汉市及三镇的城区路网等级结构数据，从中可以发现武汉市的道路交通网络在等级层次上还不够完善，主干道、次干道所占比重明显偏低，尤其是次干道，次干道与支路的比重悬殊过大，干道网络还未完全成形，交通流量被分散到支路上，从而给整个交通网络的通行效率带来影响。

表 4.6 武汉市及中心城区道路交通网络等级结构^[71]

道路等级	中心城区长度 (km)	汉 口			武 昌			汉 阳		
		长度 (km)	结构	密度 (km/km ²)	长度 (km)	结构	密度 (km/km ²)	长度 (km)	结构	密度 (km/km ²)
主干道	354.72	128.72	1.00	0.93	140.98	1.00	0.68	85.02	1.00	1.07
次干道	479.59	211.79	1.65	1.53	186.42	1.32	0.90	81.38	0.96	1.02
支 路	1468.49	261.19	4.36	4.04	657.17	4.66	3.18	250.13	2.94	3.15
合 计	2302.80	901.70	—	—	984.57	—	—	416.53	—	—

4.5 武汉市的车辆技术分布情况

IVE 模型按照车辆使用燃油种类、车型、重量、发动机种类、排放控制技术、累计行程等对机动车细分为 1372 种，具体情况如表 4.7。

表 4.7 IVE 排放模型的车辆技术分类^{[72]-[76]}

分类方法	车辆类型
1、车型	小型车 (Auto/Sml Truck)、卡车/巴士 (Truck/Bus)、小引擎机动车 (Sml Engine)、零排放车 (Zero Emissions Vehicle)、用户自定义车 (User Technology)
2、燃油	汽油 (Petrol)、改装天然气/燃油兼用 (NG Retrofit)、天然气 (Natural Gas)、改装石油液化气/燃油兼用 (Prop Retro)、石油液化气 (Propane)、改装乙醇/燃油兼用 (EthOH Retrofit)、乙醇 (OEM Ethanol)、柴油 (Diesel)、乙醇 (Ethanol)、天然气/石油气 (CNG/LPG)
3、重量	轻型车 (Light, GVWR <5000 lbs)、中型车 (Medium, GVWR >5000 and <6600 lbs)、重型车 (Heavy, GVWR >6600 and <9000 lbs)
4、发动机种类	化油器 (Carburetor)、单点喷射 (Single-Pt FI)、多点喷射 (Multi-Pt FI)、化油器/混和器 (Carb/Mixer)、预燃室式喷射 (Pre-Chamber Inject)、直接喷射 (Direct Injection) 三轮/两轮机动车系列：两缸 (2-Cycle)、两缸喷射 (2-Cycle, FI)、4-Cycle、四缸/化油器 (4-Cycle, Carb)、四缸/喷射 (4-Cycle, FI)
5、排放控制技术	无 (None)、无/废气循环 (none/EGR)、二元催化 (2-Way)、二元催化/废气循环 (2-Way/EGR)、三元催化 (3-Way)、三元催化/废气循环 (3-Way/EGR)、低排放标准 (LEV)、超低排放标准 (ULEV)、高超低排放标准 (SULEV)、欧 I (Euro I)、欧 II (Euro II)、欧 III (Euro III)、欧 IV (Euro IV)、欧 V (Euro V)、混和动力 (Hybrid)、改进型 (Improved)、废气循环+改进型 (EGR+Improv)、颗粒扑捉器 (Particulate)、颗粒扑捉器/NOx 控制装置 (Particulate/NOx) 三轮/两轮机动车系列：高科技 (High Tech)、催化装置 (Catalyst)
6、油箱蒸发技术	曲轴箱强制通风 (PCV)、曲轴箱强制通风/机油透气壶、PCV/Tank
7、行驶里程	<79K km、80-161K km、>161K km、0-25K km、26-50K km、>50K km

经过调研和查阅相关资料，2001~2004 年和 2010 年最新的武汉市保有车辆分布情况如表 4.8 和图 4.3。

表 4.8 武汉市近年车辆分布情况

年份	客车			货车			其他	汽车合计	摩托车	其他	机动车合计
	大客	小客	合计	大货	小货	合计					
2000	14138	76452	90590	26840	32111	58951	5080	154621	171564	28424	354609
2001	10621	110451	121072	28660	35956	64616	3821	189509	213445	44048	470002
2002	16047	129592	145639	33438	39476	72914	4662	223215	234672	48123	506010
2003	25825	159796	185621	37542	45279	80120	5650	271391	237424	51834	560649
2004	28226	194478	222704	44160	48412	92572	19291	334567	251156	37579	623302

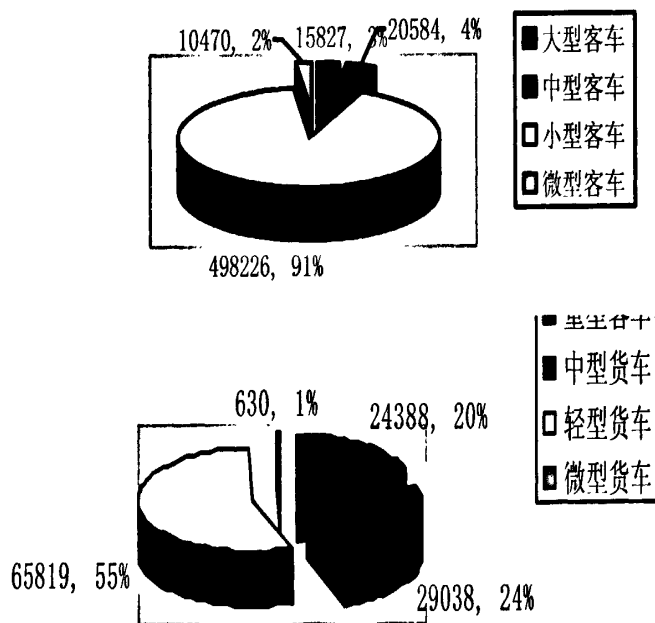


图 4.3 2010 年武汉市客车和货车的分布情况

一个城市的保有车辆分布情况并不能代表在线车辆的分布。例如，一个城市中出租车所占车辆总保有量的比例并不大，由于使用率很高，因此其在在线车辆中的比例就很大。武汉市在线车辆的具体技术分布没有相关的调查，本文在查阅北京、上海和天津相关研究资料的基础上，并对比社会经济发展情况，拟合出武汉市在线车辆的大致分布情况。

表 4.9 是参阅北京、上海、天津和武汉等城市的统计局在 2002~2009 年间公

布的数据整理而来的。从人均可支配收入看 08 年度武汉市的情况相当于北京市的 04-05 年度、上海的 04 年度和天津的 07 年度水平；从人均 GDP (GDP/人口) 看武汉市的情况相当于北京市的 05 年度、上海的 03 年度和天津的 07 年度水平。

表 4.10 是北京、上海和天津三城市在不同年度调查城市在线机动车的分布情况。从表中可以看出，三个城市轻型客车的技术分布比例表明：车辆的行驶里程都不大，尾气处理水平较高，排量都在 3L 以下，说明车辆是随着近年来人们生活水平的提高而大量的走进居民家庭的，这与武汉市近年来私人购买汽车的情况是相似的；对于出租车的情况，发现 04 年北京和上海的技术比例情况相近，尾气处理水平都较高，而天津 06 年仍存在大量化油器供油且无尾气处理的出租车，总体来说，出租车的行车里程都比较大，这与其行业性质有关，武汉市的出租车应该好于 06 年天津市的情况，值得注意的是由于城市环境保护的要求，政府的管理和指导，目前，武汉市“油改气”的出租车占有相当的比例。武汉市出租车大约有 12,100 多台，超过半数进行了“油改气”；三个城市公交车的技术种类分布均匀、种类也较多，但总体情况是技术较为先进。武汉近年来公交车更新较快，技术水平也较高，使用天然气的车辆也日趋增多。有资料表明：武汉有各类公交车 6600 台，其中，液化气、天然气燃料车辆占 38.8%，柴油车占 54%，电车占 2.8%，汽油公交车占 4.4%。此外，武汉市还存在很多中巴和小巴，这些私营巴士技术水平较低，是城市交通污染的一个主要因素；对于卡车，主要以柴油为动力，尾气处理的技术水平相对较低。

通过上面的对比分析，并结合武汉市的具体情况，本文拟合出武汉各类车辆大致的技术分布情况，见表 4.11。

表 4.9 北京、上海、天津和武汉年度社会经济发展部分数据对比

年份	北京市			上海市			天津市			武汉市		
	GDP (亿 元)	人口 (万 人)	人均可 支配收 入(元)	GDP (亿 元)	人口 (万 人)	人均可 支配收 入(元)	GDP (亿 元)	人口 (万 人)	人均收 入(元)	GDP (亿 元)	人口 (万 人)	人均可 支配收 入(元)
2002	4330	1423	12464	5409	1335	13250	2023	1007	9338	1493	764	7820
2003	5024	1456	13883	6251	1342	14867	2387	1011	10313	1662	781	8525
2004	6060	1493	15638	7450	1352	16683	2932	1024	11467	1956	786	9564
2005	6815	1538	17653	9144	1360	18645	3664	1043	12639	2238	858	10850
2006	7720	1581	19978	10297	1368	20668	4338	1075	14283	2590	819	12360
2007	9006	1633	21989	12001	1379	23623	5018	1115	16357	3142	829	14358
2008	10488	1695	24725	13698	1888	26675	6354	1176	19423	3960	833	16712
2009	11866	1755	26738	14901	1921	28838	7500	1228	21430	4561	910	18385

表 4.10 北京、上海和天津三城市在线车辆的技术分布情况

车型分类	北京市 2004 年机动车技术水 平分布		上海市 2004 年机动车技术水 平分布		天津市 2006 年机动车技术水 平分布	
	技术分类 (对应 IVE 模型分类)	比例 (%)	技术分类 (对应 IVE 模型分类)	比例 (%)	技术分类 (对应 IVE 模型分类)	比例 (%)
轻型客车	122	5.2	123	5.31	120	37.92
	121	10.94	121	10.4	117	40.58
	120	42.75	120	50.4	2	5.0
	117	20.33	117	4.62	其他	16.5
	其他	20.78	84	4.97		
			其他	24.3		
合计		100		100		100
备注	123: 大型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量大于 3L, 行驶里程小于 79K km 122: 中型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 3L, 行驶里程大于 161K km 121: 中型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 3L, 行驶里程 79-161K km 120: 中型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 3L, 行驶里程小于 79K km 117: 小型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 1.5L, 行驶里程小于 79K km 84: 中型轻载客车, 汽油, 单点喷射, 三元催化, 排量小于 3L, 行驶里程小于 79K km 2: 小型轻载客车, 汽油, 化油器, 无尾气处理, 排量小于 1.5L, 行驶里程大于 161K km					
出租车	488	14.04	446	23.74	122	8.33
	263	5.26	122	12.95	120	8.33
	184	10.53	86	46.76	119	12.5
	182	26.32	85	4.32	118	18.75
	181	8.77	其他	12.23	117	14.58
	180	7.02			2	33.33
	56	7.02			其他	4.18
	2	8.77				
	其他	12.27				
	合计		100		100	
备注	488: 小型轻载客车, 石油液化气, 喷射供油, 欧 II, 排量小于 1.5L, 行驶里程大于 161K km 446: 中型轻载客车, 石油液化气, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 3L, 行驶里程大于 161K km 263: 小型轻载客车, 天然气, 化油器, 无尾气处理, 排量小于 1.5L, 行驶里程大于 161K km 184: 中型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 欧 II, 排量小于 3L, 行驶里程 79-161K km 182: 小型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 欧 II, 排量小于 1.5L, 行驶里程大于 161K km 181: 小型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 欧 II, 排量小于 1.5L, 行驶里程 79-161K km 180: 小型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 欧 II, 排量小于 1.5L, 行驶里程小于 79K km 122: 中型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 3L, 行驶里程大于 161K km 120: 中型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 3L, 行驶里程小于 79K km 119: 小型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 1.5L, 行驶里程大于 161K km 118: 小型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 1.5L, 行驶里程 79-161K km 117: 小型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 1.5L, 行驶里程小于 79K km 86: 中型轻载客车, 汽油, 单点喷射, 三元催化, 排量小于 3L, 行驶里程大于 161K km 85: 中型轻载客车, 汽油, 单点喷射, 三元催化, 排量小于 3L, 行驶里程 79-161K km 56: 小型轻载客车, 汽油, 单点喷射, 废气循环, 排量小于 1.5L, 行驶里程大于 161K km 2: 小型轻载客车, 汽油, 化油器, 无尾气处理, 排量小于 1.5L, 行驶里程大于 161K km					

续表 4.10 北京、上海和天津三城市在线车辆的技术分布情况

车型分类	北京市 2004 年机动车技术水 平分布		上海市 2004 年机动车技术水 平分布		天津市 2006 年机动车技术水 平分布	
	技术分类 (对应 IVE 模型分类)	比例 (%)	技术分类 (对应 IVE 模型分类)	比例 (%)	技术分类 (对应 IVE 模型分类)	比例 (%)
公交车	1130	10.15	1122	6.84	1088	13.59
	1085	5.99	1120	11.34	1087	10.77
	995	6.32	1119	33.95	1085	55.64
	993	7.15	1083	11.34	836	7.05
	930	4.99	922	4.51	其他	12.95
	914	13.31	921	13.6		
	904	12.65	876	4.51		
	851	4.99	其他	13.91		
	850	6.66				
	833	8.15				
	其他	19.64				
合计		100		100		100
备注	1130: 中型重载客车, 柴油, 喷射供油, 欧 II, 行驶里程大于 161K km 1122: 大型重载客车, 柴油, 喷射供油, 欧 I, 行驶里程小于 79K km 1120: 中型重载客车, 柴油, 喷射供油, 欧 I, 行驶里程 79-161K km 1119: 中型重载客车, 柴油, 喷射供油, 欧 I, 行驶里程小于 79K km 1088: 大型重载客车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程大于 161K km 1087: 大型重载客车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程 79-161K km 1085: 中型重载客车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程大于 161K km 1083: 中型重载客车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程小于 79K km 995: 中型重载客车, 天然气, 喷射供油, 三元催化/废气循环, 行驶里程大于 161K km 993: 中型重载客车, 天然气, 喷射供油, 三元催化/废气循环, 行驶里程小于 79K km 930: 中型重载客车, 汽油, 喷射供油, 欧 II, 行驶里程小于 79K km 922: 中型重载客车, 汽油, 喷射供油, 欧 I, 行驶里程 79-161K km 921: 中型重载客车, 汽油, 喷射供油, 欧 I, 行驶里程小于 79K km 904: 中型重载客车, 汽油, 喷射供油, 三元催化, 行驶里程 79-161K km 876: 中型重载客车, 柴油, 喷射供油, 无尾气处理, 行驶里程小于 79K km 851: 中型重载客车, 汽油, 化油器, 二元催化/废气循环, 行驶里程大于 161K km 850: 中型重载客车, 汽油, 化油器, 二元催化/废气循环, 行驶里程 79-161K km 836: 大型重载客车, 汽油, 化油器, 无尾气处理, 行驶里程大于 161K km 833: 中型重载客车, 汽油, 化油器, 无尾气处理, 行驶里程大于 161K km					
卡车	1128	8.91	1085	22.05	1088	55.81
	1125	4.95	1084	6.3	1087	6.98
	1122	6.93	1082	22.05	1085	4.65
	1085	18.81	1081	6.3	1084	4.65
	1084	8.91	833	9.45	1083	4.65
	1082	12.87	830	9.45	1082	6.98
	1081	4.95	其他	24.4	1080	9.3
	833	10.89			其他	6.98
	830	10.89				
	其他	11.89				
合计		100		100		100
备注	1128: 中型重载卡车, 柴油, 喷射供油, 欧 II, 行驶里程小于 79K km 1125: 小型重载卡车, 柴油, 喷射供油, 欧 II, 行驶里程小于 79K km 1122: 大型重载卡车, 柴油, 喷射供油, 欧 I, 行驶里程小于 79K km 1088: 大型重载卡车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程大于 161K km 1087: 大型重载卡车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程 79-161K km 1085: 中型重载卡车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程大于 161K km 1084: 中型重载卡车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程 79-161K km 1083: 中型重载卡车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程小于 79K km 1082: 小型重载卡车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程大于 161K km 1081: 小型重载卡车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程 79-161K km 833: 中型重载卡车, 汽油, 化油器, 无尾气处理, 行驶里程大于 161K km 830: 小型重载卡车, 汽油, 化油器, 无尾气处理, 行驶里程大于 161K km					

表 4.11 拟合的武汉市机动车技术分布情况

车型	机动车技术水平分布		备注
	技术种类	比例(%)	
轻型客车	117	20	117: 小型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 1.5L, 行驶里程小于 79K km 126: 小型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 三元催化, 排量小于 1.5L, 行驶里程小于 79K km 189: 小型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 欧III, 排量小于 1.5L, 行驶里程小于 79K km
	126	30	
	189	50	
	合计	100	
出租车	181	20	181: 小型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 欧 II, 排量小于 1.5L, 行驶里程 79-161K km 184: 中型轻载客车, 汽油, 多点喷射, 欧 II, 排量小于 3L, 行驶里程 79-161K km 256: 中型轻载客车, 天然气改装, 化油器, 三元催化/废气循环, 行驶里程 79-161K km 257: 中型轻载客车, 天然气改装, 化油器, 三元催化/废气循环, 行驶里程大于 161K km
	184	30	
	256	20	
	257	30	
	合计	100	
公交车	851	5	851: 中型重载客车, 汽油, 化油器, 二元催化/废气循环, 行驶里程大于 161K km 994: 中型重载客车, 天然气, 喷射供油, 三元催化/废气循环, 行驶里程 79-161K km 995: 中型重载客车, 天然气, 喷射供油, 三元催化/废气循环, 行驶里程大于 161K km 1120: 中型重载客车, 柴油, 喷射供油, 欧 I, 行驶里程 79-161K km 1130: 中型重载客车, 柴油, 喷射供油, 欧 II, 行驶里程大于 161K km
	994	20	
	995	20	
	1120	30	
	1130	25	
	合计	100	
卡车	830	15	830: 小型重载卡车, 汽油, 化油器, 无尾气处理, 行驶里程大于 161K km 833: 中型重载卡车, 汽油, 化油器, 无尾气处理, 行驶里程大于 161K km 1081: 小型重载卡车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程 79-161K km 1084: 中型重载卡车, 柴油, 直喷, 有尾气处理, 行驶里程 79-161K km
	833	15	
	1081	35	
	1084	35	
	合计	100	

4.6 武汉市车辆排放的地区修正系数

IVE 模型的车辆基本排放率 (BER) 是建立在美国 FTP 的测试工况基础上的, 可能会与模型使用者的国家或地区的车辆实际行驶工况有很大的不同。为了解决这个问题, IVE 模型中有专门的一项修正系数——国家 (或地区) 修正系数 (country adjustment correction factors), 用来修正由于车辆行驶工况差异带来的排放因子计算误差^{[54][77]}。

具体的实现步骤如下:

- 1) 将在当地测试获得的各种技术类型车辆的平均速度和瞬时驾驶工况驾驶

工况收集并转换为发动机不同工作状态 Bin 的比例；

2) 把上述参数输入 IVE 模型，同时选择在当地测试时各种影响因素所对应的 IVE 模型选项（如温度、湿度、坡度、燃油情况等），获得基于 USFTP 工况下的各种技术类型车辆排放因子；

3) 用在当地测试得到的各种技术类型车辆的排放因子除以用 IVE 模型计算出来的排放因子，其比值就是对应技术类型车辆的国家（或地区）修正系数；

4) 再将获得的各种技术类型车辆的国家（或地区）修正系数插入 IVE 模型中，为计算本地化车辆排放清单做准备。

2006 年 11~12 月，严新平教授所主持的 973 项目“城市生命体承载系统的健康识别和调控理论与方法研究”（项目编号：2005CB724205）在武汉市采用车载排放测试系统——OEM-2100 对在线轻型车进行车辆道路排放试验，获得了部分轻型车的实时道路排放数据和相应的行驶工况数据。

试验所采用的车辆共有 10 台，都是在武汉市区道路上常见的车型。车型包括富康（2 台）、爱丽舍（3 台）、捷达（4 台）、伊兰特（1 台）4 种，这些车辆的对应 IVE 模型的技术类型见表 4.12。

表 4.12 试验车辆技术类型

车 型	生产年份	行驶里程(km)	对应 IVE 模型的技术类型
富 康	2001	109,638	181 (轻型、汽油、1.6L、多点喷射、欧 II)
	2002	116,792	181 (轻型、汽油、1.6L、多点喷射、欧 II)
爱丽舍	2004	90,353	181 (轻型、汽油、1.6L、多点喷射、欧 II)
	2004	123,664	181 (轻型、汽油、1.6L、多点喷射、欧 II)
	2005	42,368	189 (轻型、汽油、1.6L、多点喷射、欧 III)
捷 达	2002	70,010	180 (轻型、汽油、1.6L、多点喷射、欧 II)
	2004	110,782	181 (轻型、汽油、1.6L、多点喷射、欧 II)
	2004	120,851	181 (轻型、汽油、1.6L、多点喷射、欧 II)
	2006	28,500	189 (轻型、汽油、1.6L、多点喷射、欧 III)
伊兰特	2005	49,796	126 (轻型、汽油、1.6L、多点喷射、3-Way/EGR)

为了使采集的数据能够代表武汉市交通状况，分别选取三个区域，每个区域里分别选取三种典型的道路进行较短距离的实验，每段大约 6 公里。具体区域和道路的选择为：

1) 汉阳

快速路: 龙阳大道(王家湾—武汉体育中心)

主干道: 汉阳大道(钟家村—十里铺)

次干道: 拦江路—马沧湖路—归元寺路

2) 武昌

主干道: 中北路—中南路、关山大道(关山超市—万科城市花园)

次干道: 丁字桥路、石牌岭路

3) 汉口

主干道: 解放大道—发展大道—黄浦大街

次干道: 香港路—三眼桥路—江大路—黄孝河路—澳门路

对获得的车辆行驶工况数据进行处理和分析, 得出在武汉市不同道路上车辆的平均速度和各种工况的比例, 如图 4.4~4.5。

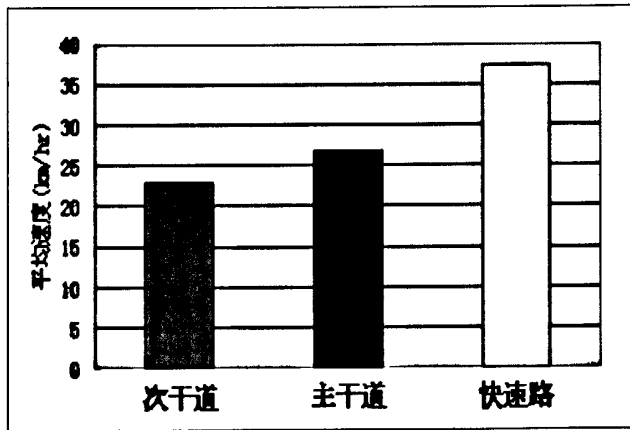


图 4.4 不同道路的平均速度

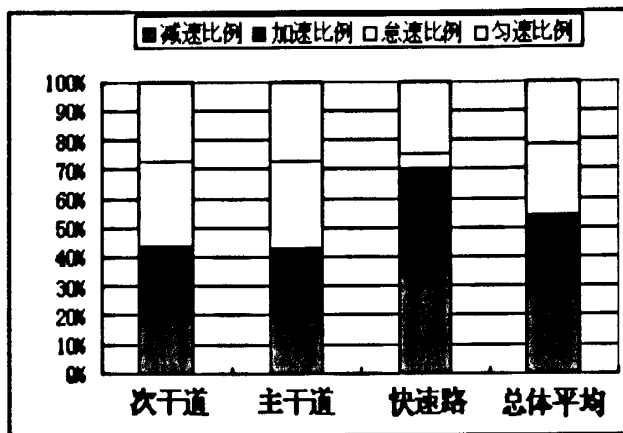


图 4.5 不同道路行驶工况的分布

从图中可很清楚地看出快速路的平均速度要大于主干道和次干道，其原因可从行驶工况比例分布中找到：快速路的怠速比例很小，大约只占 2% 多点，这是因为快速路上红绿灯很少，车辆能以较平稳的工况行驶，并获得较高的车速。

用 VSP 和 ES 将车辆的行驶工况映射为代表发动机瞬时工作状态的 bin 值，可以进一步分析车辆发动机的瞬时负载情况，图 4.6 为车辆在快速路、主干道和次干道行驶时 bin 的分布情况。图中曲线表明车辆发动机在各种道路上都处于 Low Stress 的状态，集中在 bin 值为 11 的附近，即负载较低，速度并不是很高而且没有较大的加速，因此对应的车辆排放相对来说也不会很大；此外，与主干道和次干道相比，快速路上车辆的 bin 在区间[9, 15]之间分布较均匀，说明车辆工况过渡比较平稳，没有较多的启停状态。

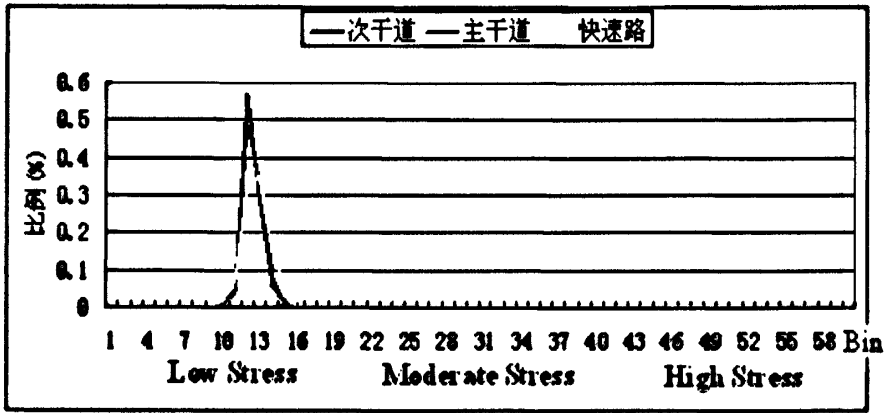


图 4.6 不同道路上车辆 bin 的分布情况

为了更深入了解武汉市本地车辆的行驶工况情况，本文还对此次试验中获得的车辆工况情况与欧美的标准工况进行对比，见表 4.13。

表 4.13 武汉市轻型车工况与欧美标准工况主要特征参数对比

特征参数	武汉市工况	FTP75	ECE+EUDC
平均速度(km/hr)	26.8	31.5	33.4
平均加速度(m/s ²)	0.653	0.561	0.483
平均减速度(m/s ²)	-0.699	-0.672	-0.671
减速比例(%)	25.44	29.52	18.98
加速比例(%)	30.21	35.57	26.69
怠速比例(%)	22.39	19.02	24.83
匀速比例(%)	21.96	15.89	29.49

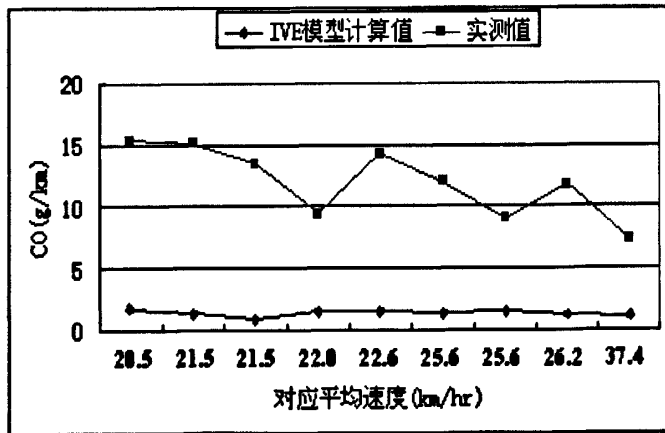
通过对比可以看出：武汉市车辆的平均速度低于欧美的标准工况速度，平均加速度高于相对应的欧美工况，平均减速度相差不大；各种工况的比例介于欧美标准工况之间，造成这种情况的原因主要是武汉市交通负荷大、快速路和主干道占城市道路比例相对较小；同时也说明武汉市轻型车的实际行驶工况与欧美标准工况存在着较大的差异。

由于武汉市轻型车的实际行驶工况与 IVE 模型对应的美国 FTP 工况有很大差别，因此确定武汉市车辆的国家（或地区）修正系数就显得十分必要的。图 4.7~4.10 为不同技术类型车辆实测排放数据与 IVE 模型计算值之间的对比，并能得到以下结论：

1) 武汉市在线实测车辆排放数据与 IVE 模型计算值相对于不同的平均速度具有变化的一致性，但在数值上有较大差异，尤其是 CO 和 NO_x，相对来说，VOC 的模式计算值和实测值拟合程度较好；

2) 在实测排放数据中，CO 和 VOC 对平均速度的变化更为敏感，速度越高，相应的单位距离排放量越小；而模型计算排放数据中，CO 和 NO_x 相对于不同的平均速度有一定的变化，但变化量不是很大；

3) 126 和 189 类型车辆排放实测数据和计算值吻合程度要比 181 和 180 类型车辆更好。



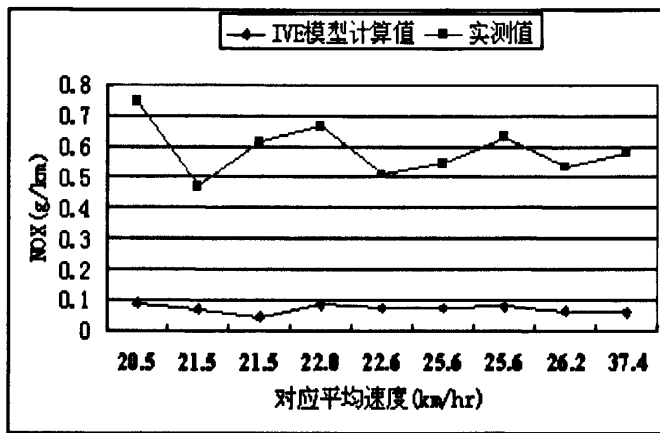
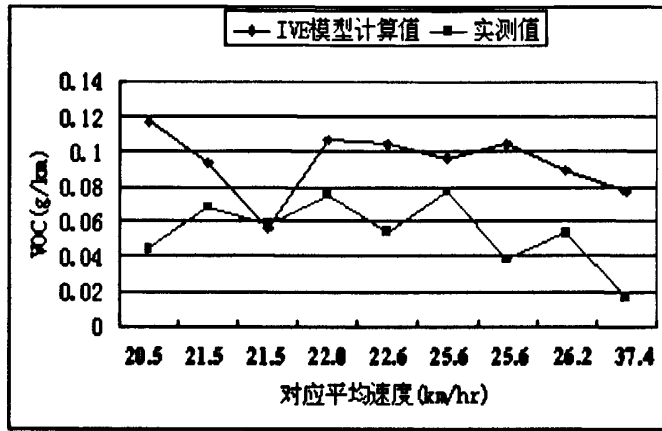
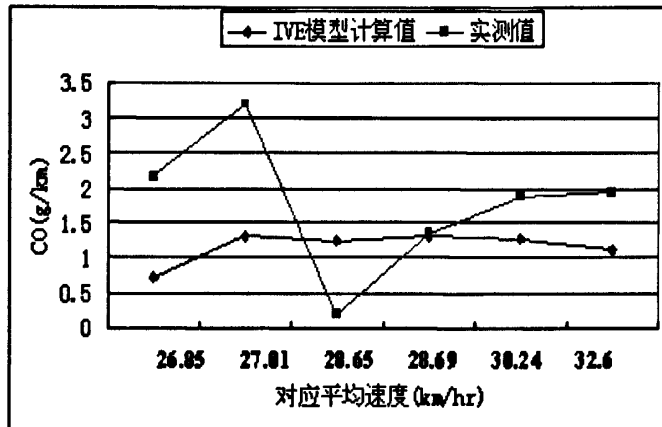


图 4.7 189 技术类型车辆模型计算值与实测值对比



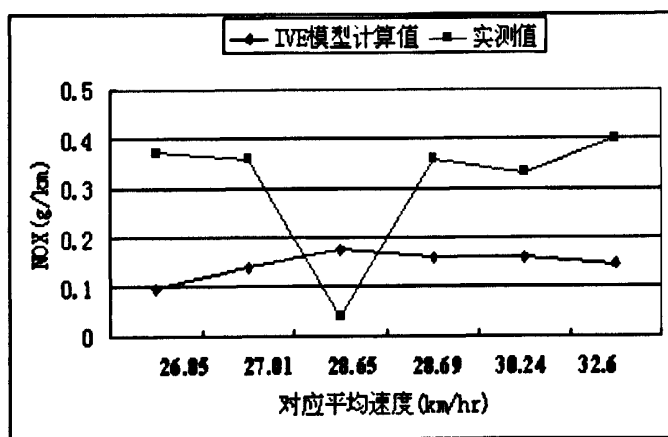
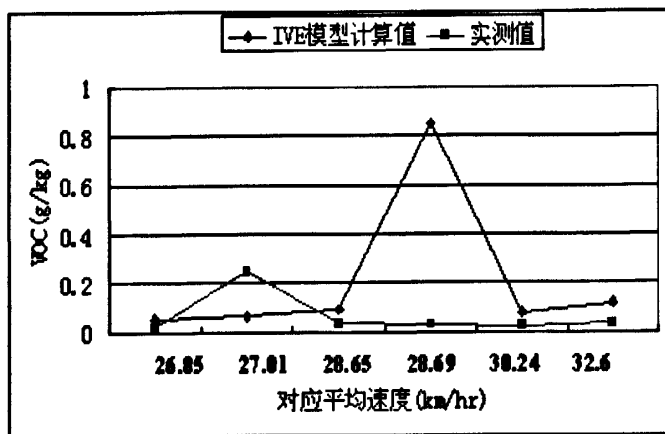
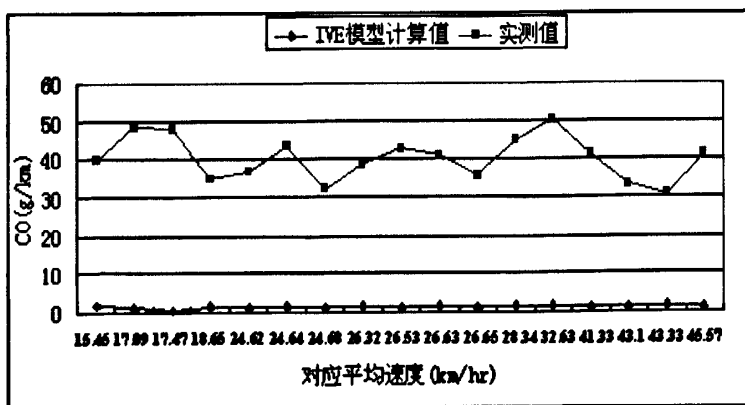


图 4.8 126 技术类型车辆模型计算值与实测值对比



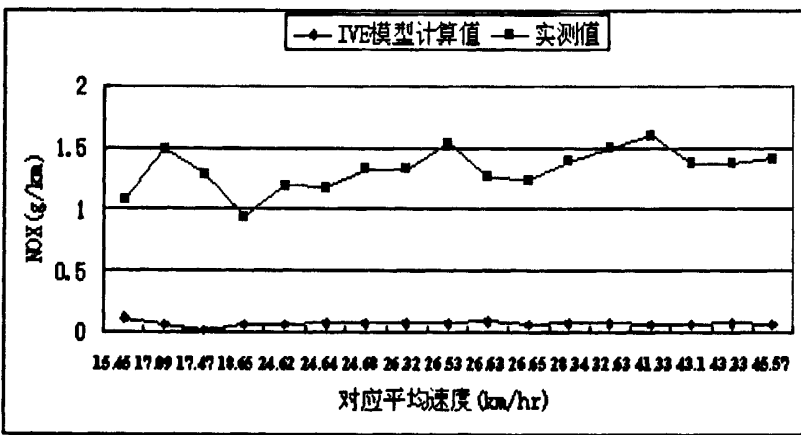
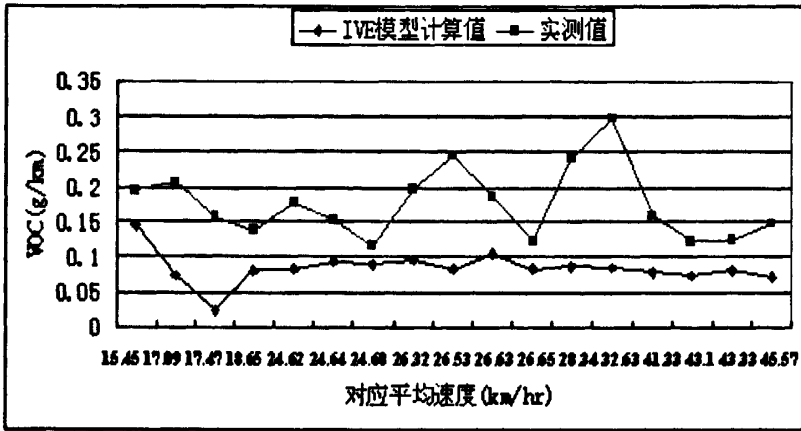
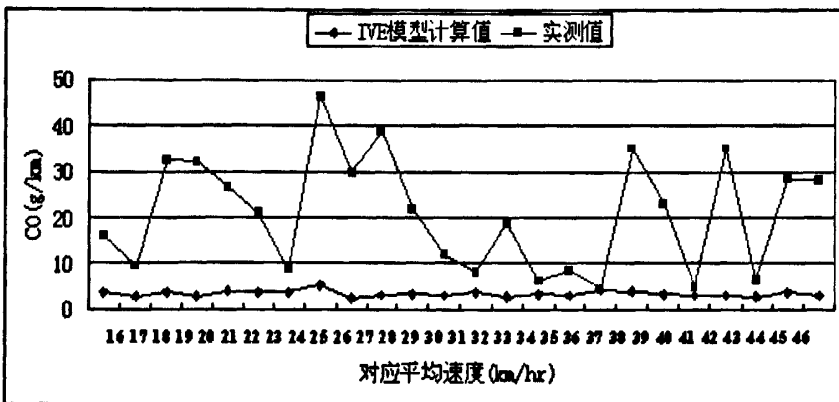


图 4.9 180 技术类型车辆模型计算值与实测值对比



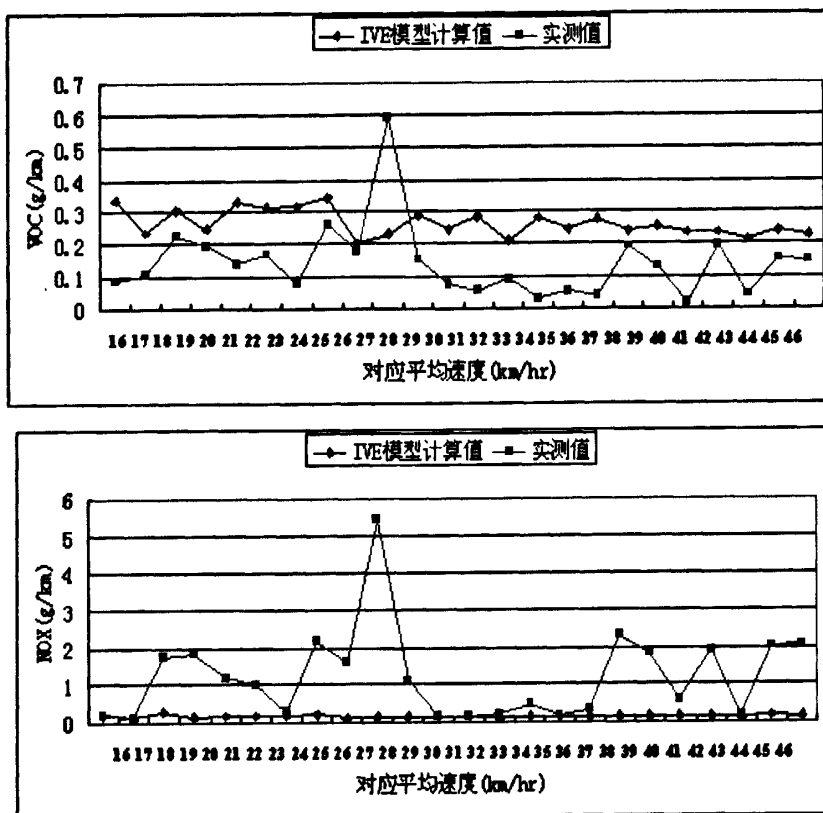


图 4.10 181 技术类型车辆模型计算值与实测值对比

由于每种技术类型车辆的实测值和 IVE 模型计算值是一组数据对, 根据 IVE 模型确定国家 (或地区) 修正系数的方法, 可以得到实测值与计算值比率的数据样本, 需对这些样本进行统计分析, 获得相关的统计量, 并发现样本中的异常值, 使最终获得的国家 (或地区) 修正系数更具有客观性。

下面以 180 技术类型车辆为例, 运用利用 SPSS 软件进行数据分析和统计处理。

表 4.14 180 车辆排放物实测值与模式计算值的数据

CO 排放量			VOC 排放量			NO _x 排放量		
实测值 (g/km)	计算值 (g/km)	实测值/ 计算值	实测值 (g/km)	计算值 (g/km)	实测值/ 计算值	实测值 (g/km)	计算值 (g/km)	实测值/ 计算值
39.93	1.99	20.07	0.20	0.14	1.36	1.07	0.11	9.81
48.39	1.11	43.40	0.21	0.07	2.76	1.48	0.06	24.68
48.09	0.31	157.51	0.16	0.02	6.40	1.29	0.02	73.75
34.81	1.54	22.53	0.14	0.08	1.68	0.94	0.06	15.18
36.73	1.22	30.07	0.18	0.08	2.14	1.19	0.07	18.24

续表 4.14 180 车辆排放物实测值与模式计算值的数据

CO 排放量			VOC 排放量			NO _x 排放量		
实测值 (g/km)	计算值 (g/km)	实测值/ 计算值	实测值 (g/km)	计算值 (g/km)	实测值/ 计算值	实测值 (g/km)	计算值 (g/km)	实测值/ 计算值
43.34	1.44	30.06	0.15	0.09	1.61	1.18	0.08	15.41
32.38	1.28	25.33	0.12	0.09	1.29	1.32	0.07	19.19
38.46	1.42	27.15	0.20	0.10	2.03	1.32	0.08	17.34
42.91	1.31	32.74	0.24	0.08	2.90	1.53	0.07	21.45
41.05	1.64	25.04	0.19	0.11	1.76	1.26	0.09	14.60
35.74	1.21	29.58	0.12	0.08	1.48	1.23	0.06	19.12
44.91	1.37	32.88	0.24	0.09	2.74	1.39	0.07	18.78
50.26	1.39	36.03	0.30	0.09	3.47	1.50	0.08	19.56
41.37	1.24	33.28	0.16	0.08	2.05	1.60	0.07	23.82
33.31	1.16	28.68	0.12	0.07	1.66	1.37	0.06	22.12
30.89	1.35	22.82	0.12	0.08	1.53	1.38	0.07	18.67
41.28	1.15	35.77	0.15	0.07	2.06	1.42	0.06	23.14

表 4.15 180 车辆排放物实测值与计算值比率基本描述统计量

	N	Range	Minimum	Maximum	Mean	Std.Deviation
CO	17	137.44	20.07	157.51	37.2318	31.53165
VOC	17	5.11	1.29	6.40	2.2894	1.22197
NOX	17	63.94	9.81	73.75	22.0506	13.83583

从表 4.15 发现三种污染物的比率基本描述统计量中，最大值与均值之间的差值非常大，这说明数据中有异常值。在这里，假设污染物比率的总体分布为正态分布，那么根据统计学中经典的 3σ 准则，异常值通常为 3 个标准差之外的变量值。为了更有利于对异常值判断，对数据进行标准化处理。标准化的数学定义为：

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S}$$

其中 Z_i 为标准化值， x_i 为变量值， \bar{x} 为样本均值， S 为样本标准差。如果 Z_i 等于 0；则表示该变量值等于变量均值，如果 Z_i 大于或小于 0，则表示该变量值大于或小于变量均值。如果标准化值的绝对值大于 3，则可认为是异常值。表 4.16

为数据标准化处理前后的值。

表 4.16 数据标准化处理后的标准化值

编号	ZCO 比率	ZVOC 比率	ZNO _x 比率
1	-0.54427	-0.76058	-0.8847
2	0.19562	0.38511	0.19004
3	3.81452	3.36389	3.73663
4	-0.46625	-0.49871	-0.49658
5	-0.22713	-0.12227	-0.27541
6	-0.22745	-0.556	-0.47996
7	-0.37745	-0.81787	-0.20675
8	-0.31973	-0.21229	-0.34046
9	-0.14245	0.49967	-0.04341
10	-0.38665	-0.43324	-0.5385
11	-0.24267	-0.66238	-0.21181
12	-0.13801	0.36874	-0.23639
13	-0.03811	0.96613	-0.18001
14	-0.12533	-0.19592	0.12789
15	-0.27121	-0.51508	0.00502
16	-0.45706	-0.62146	-0.24434
17	-0.04636	-0.18774	0.07874

从表中可以看出数据 3 的 Z_i 大于 3, 因此可以认为是异常值。将这个异常值剔除, 重新进行数据分析处理, 获得的统计量见表 4.17, 并由此确定 180 技术类型车辆的国家(或地区)修正系数。

表 4.17 更新后的 180 车辆排放物实测值与计算值比率基本描述统计量

	N	Range	Minimum	Maximum	Mean	Std.Deviation
CO	16	23.33	20.07	43.40	29.7144	5.98268
VOC	16	2.18	1.29	3.47	2.0325	.62921
NOX	16	14.87	9.81	24.68	18.8194	3.85574

表 4.18 为通过上述方法获得武汉市部分轻型车的国家(或地区)修正系数。

表 4.18 武汉市部分轻型车的 IVE 国家（或地区）修正系数

车辆类型	国家（或地区）修正系数		
	CO	VOC	NO _x
126	1.64	0.86	2.3
180	29.7	2	18.8
181	5.89	0.47	6.45
189	6.78	0.58	6.89

从获得的结果看，对于 CO 和 NO_x 而言，所涉及技术类型车辆的国家（或地区）修正系数都大于 1，而 VOC 除了 180 类型外都小于 1，而且差别都不小，说明试验实测值与计算值有较大出入；四种车型中 126 的计算值与实测值最接近，180 的相差最大。

参阅国内相关文献发现利用国外成熟机动车排放模型计算出的车辆污染物排放与试验测试值进行对比都会得到相似的结论：测试值与模式计算值在变化趋势上具有一致性，而二者的吻合程度都不尽人意，如北京大学谢绍东利用 COPERT 模型计算国内机动车排放、上海市环境科学研究院王海鲲利用 IVE 模型计算上海机动车排放、北京交通大学于雷利用 MOBILE 计算大型柴油客车排放以及北京工商大学何春玉利用 CMEM 模型计算北京机动车排放等。结合本文的试验数据分析造成以上结果的原因有以下几个方面：

1) 国外的机动车排放模型都建立在国外的典型工况基础上，与国内实际车辆工况有很大的差距，这就造成通过工况获取的基本排放因子 BER 相差很大，其结果势必导致模式计算的车辆排放清单和试验测试值之间有误差；

2) 试验中车辆的技术类型划分有误差。例如，车辆同是欧 II 的排放标准，但排放技术是有所不同，有时相同的排放技术可以满足不同的排放标准，这在美国车辆根据 model year 进行划分中可以很明显的看出；

3) 国内的 I/M 制度不尽完善。在文献及本次试验中发现新车的测试值往往与模型计算值更吻合，而行车里程长，出厂时间早的车辆两者之间的差值就很大，其中一个很重要的原因是新车的劣化程度小，能保持较好的排放水平；而旧车由于检测和维修不到位，其在排放上的劣化程度远超过国外模型中所标定的，因此造成实测值与计算值差异很大；

4) 对车辆排放进行在线测量时，实验仪器、实验人员造成的误差也是不可忽略的，因此在试验前应对仪器设备进行检查和标定，对实验人员进行培训，

减少由此带来的误差。

因此，国外成熟的排放模型要想成功地在国内进行应用，一个很重要的环节就是对模型进行本地化处理，这既包括本地环境和交通条件等的修正，更重要地是对本地工况下 BER 的调整。

4.7 本章小结

本章查阅大量文献和统计材料，并到武汉市沙湖车管所、蔡甸和硚口交管大队进行调研，获取了武汉市气象地理环境，燃油情况、交通路网特征，机动车检测情况以及机动车技术分布情况的第一手资料，同时利用车辆排放实测数据获得部分轻型车在武汉市的国家（或地区）修正系数。由于实测车辆样本数较少，尚不能得出具有普遍意义的结论，但本文初步的工作已经说明对 IVE 模型进行本地化修正的必要性。

第5章 改进的城市交通微观仿真模型

如前所述,除了机动车平均速度是影响车辆排放因子的重要因素外,行驶工况的变化(车辆的加减速、怠速)也对排放具有重大影响,为了更精确地描述车辆的排放情况,获得详细的车辆行驶工况是必不可少的。

目前获得逐秒(或瞬时)车辆行驶工况数据源主要有以下几种方法,包括在线车载测量法(vehicle onboard measurement)、车辆全球定位系统法(global positioning system)、录像记录法(video recording)、图像处理法(image processing)和微观交通仿真法(microscopic traffic simulation)等。但通过前面几种方法获得车辆行驶工况需要耗费大量的物力和人力资源,同时具有样本量少,不可重复,受交通条件、环境条件等多因素制约的缺点。因此日臻完善的微观交通仿真方法也就成为在不同交通条件和环境条件下研究机动车运动规律的重要手段而受到越来越多研究者的青睐^[78]。

计算机仿真研究作为一门独立学科始于20世纪40年代。70年代以来,随着系统科学以及计算机科学技术的发展,仿真技术已广泛应用于航空、铁路、公路等交通运输系统的规划、设计、运营分析等。

计算机交通仿真就是利用计算机对所研究交通系统的结构、功能、行为以及参与交通控制者——人的思维过程和行为特征进行比较真实的模仿。交通事故、交通分配、路网运行分析、道路通行能力等交通系统的研究领域,都已经用计算机仿真技术进行了广泛研究,并取得了积极的成果。

5.1 城市交通微观仿真的研究现状

目前对交通问题的研究通常采用三种方法:1)经验方法。根据实测数据,建立速度—流量统计模型,估算通行能力;2)理论分析方法。以跟驰理论为基础,理论分析交通问题;3)仿真分析方法。建立交通仿真模型,通过设计仿真实验,研究和解决交通问题。

交通仿真是上世纪60年代以后随着计算机技术的进步而发展起来的,它采用计算机数字模型来反映复杂的交通现象,属于计算机数字仿真范畴。交通仿真是计算机仿真技术在交通工程领域的一个重要应用。

在交通仿真技术出现之前,交通工程师多采用经验方法和理论分析方法来

分析交通现象、解决交通问题。然而，交通系统是一个典型的复杂系统，系统内要素的状态及其相互作用规律受众多随机因素的影响，往往难以用经验模型或数学分析模型来准确的描述。传统交通分析方法的局限性在 20 世纪 60 年代计算机化的交通信号控制系统出现以后显得尤为的突出，当时的交通工程师们希望找到一种更有效的交通分析方法来优化交通控制的信号参数设计，从而开始了交通仿真的研究^[79]。

一般来说，交通仿真模型主要有以下优点：

1) 交通仿真模型具有评估和预测能力。利用仿真模型可以非常明确地了解道路设施、交通控制和管理等对通行能力的影响，通过分析仿真结果，能较准确地反映特定因素对通行能力的影响程度；

2) 交通仿真模型具有可重复性。可以不断地重复特定道路、交通条件下交通流的随机状态，而野外采集工作往往会受到天气、横向干扰等诸多因素的影响，重复性差，很难在众多因素中找出主要影响因素；

3) 交通仿真模型具有开放性和交互性，能进行跨学科的研究和分析；

4) 通过观看交通仿真模型的视景和统计分析仿真数据，可从感性和理性两个方面，分析交通流状态的变化到过程；

5) 运用仿真模型进行研究还具有资金花费少，时间周期短等特点。

尽管交通仿真模型有很多优点，但是其不足也是显而易见的，主要包括：

1) 由于对问题的认知和把握是一个逐渐逼近的过程，交通仿真模型的建立不可能完全反映问题的方方面面，仿真建模常被称为非精确建模，取决于建模人员自身的素质和对问题材料的掌握程度；

2) 交通仿真模型需要大量的输入数据，对于某些实际问题，这些数据很难或根本无法获得；

3) 交通仿真模型需要验证、标定、进行有效性检验，如果忽略了这些工作，结果的真实就不能得到保证；

4) 交通仿真模型的建模除了需要具有交通方面的专业知识，还需要对计算机程序设计、概率统计、决策论等知识有充分了解。

交通仿真模型的主要应用范围有：

1) 对交通管理中的各种策略和方案的评价；

2) 对交通设施、交通工程进行评估和预测；

3) 对交通安全进行分析和评估；

4) 交通诱导和为出行者提供信息；

- 5) 对新交通技术和新设想进行测试;
- 6) 为交通工程技术人员提供培训等。

5.1.1 交通仿真模型概述^[79]

1955年, Lighthill 和 Whitham 用流体中的微粒比拟交通流中的车辆, 标志着交通仿真模型研究的开始。从那以后对交通流的数学描述和建模就成为一个非常活跃的研究领域。

交通仿真模型的划分标准是多样的, 按细节层次划分为亚微观模型、微观模型、中观模型和宏观模型; 按操作方法划分为分析模型和仿真模型; 按过程表示划分为确定模型和随机模型; 按变量独立程度划分为连续模型、离散模型和半离散模型; 按应用规模分为网络模型、区间模型、路段模型和十字路口模型等。通常情况下, 习惯按细节层次进行划分。

微观模型是以个体车辆行为为研究对象, 描述目标车辆与其周围交通环境的相互关系, 由于要对每一时刻每辆车的行为都进行运算, 因此对计算机的运算速度及内存需求会随着车辆数的增加而增加。一般适用于离线、中小型路网的交通仿真。通过采用并行处理技术, 微观模型也可以用于大型路网的交通仿真。

中观模型以车辆群体行为为研究对象, 既不区分车辆和驾驶员的行为, 也不单独描述, 而是运用一种更聚合的方式来描述两者, 如概率分布函数。由于模型中的变量太多, 难于实时求解, 所以在线应用上受到限制。

宏观模型以车辆整体流动为研究对象, 将交通流和流体进行类比, 抽象级别较高。具有如下优点: 宏观模型输入较为简单, 计算量不大, 比较适合对大型路网进行交通流仿真, 且校验较为容易。宏观模型能够分析和重现交通流的宏观特性, 但却不能分析交通流的微观特性及车辆之间的相互作用。

5.1.2 交通微观仿真模型的国内外研究^[80-89]

国外交通仿真研究始于上个世纪 60 年代, 但是由于当时计算机性能的限制, 这一时期的交通仿真模型多采用宏观模型, 系统的主要特点是以优化城市道路的信号设计为应用目的, 模型的灵活性和描述能力较为有限, 仿真结果的表达也不够理想。

近几十年来, 由于计算机的迅速发展, 使得研究微观交通仿真模型和开发微观交通仿真器成为可能。微观交通仿真模型以车辆个体在路网空间上的运动

为求解目标,模型的核心功能是描述目标车辆与其周围交通环境的相互关系,即周围的交通环境如何导致了或决定了车辆的驾驶行为。其中,车辆交通环境包括目标车周围的车辆、目标车所在的道路设施和交通规则。目前,全球已有一百多个微观交通仿真模型,并有几十种商业化的微观交通仿真软件和仿真器,其中大部分都可以进行城市交通仿真。

下面简单介绍国外典型的城市微观交通仿真模型和国内微观仿真交通模型发展情况。

PARAMICS (PARAllel MICrosopic Simulator) 是英国 Quadstone Limited 公司的产品,1992 年开始开发。它采用了并行处理技术,能够仿真从单节点到全国规模的各种路网。路网规模最多可达到 100 万节点、400 万路段、32000 个区域,同时计算 25 万辆车,且速度快于实时。模型的显著特点是计算速度快,能对实时仿真成百上千的车辆,并且对车辆的行为具有很高的分辨率;具有强大的可移植性和可扩展性;为宏观数据格式提供直接接口;实现智能的路径选择;可视化的交互应用环境。

INTEGRATION 是美国的 M. Van Aerde 教授等开发的亚微观交通仿真模型,混合使用了微观交通仿真模型和宏观交通仿真模型。模型能以 0.1 秒的刷新速度再现实际交通条件下的车辆跟驰、换道、可接受间距等行为。车辆的运动及交通信号灯的配置采用动画来展现。每次运行周期都记录车辆的出行时间、出行距离、停车次数、燃油消耗、排放等数据。

MITSIM (Microscopic Traffic Simulator) 由麻省理工学院的杨齐博士等开发,是 MIT 开发的 SIMLAB (SIMulation LABoratory) 软件的核心模块之一,主要包含路网描述、出行需求及路径选择和驾驶行为三大部分,可用于研究动态交通控制和事故处理方案、实时路径诱导、自适应交叉口信号控制、匝道和干线控制、车道控制。

CORSIM 是一个可用于高速公路、城市道路及路网交通分析的微观仿真模型,由美国联邦公路署 (FHWA) 开发。CORsIM 包含两个微观仿真模型 FRESIM 和 NETSIM, FRESIM 是一个高速公路交通仿真模型, NETSIM 是一个城市交通仿真模型。CORSIM 中有先进的跟驰模型和换道模型,以 1 秒为周期刷新车辆的运动状态,并以动画显示动态交通状况。CORSIM 提供了多种指标来量化路网的性能,实现交通管理系统的开发和评价。

HUTSIM 是芬兰的一个面向对象的微观交通仿真软件包,包括 HUTEDI, HUTSIM 和 HUTSIM—分析器等三个部分。其中 HUTEDI 是一个运行于 DOS 环

境下的仿真模型编辑器；HUTSIM 是一个运行于 DOS 环境下的交通仿真器；HUTSIM—分析器是一个新开发出的运行于 Windows 操作系统下的可用于分析或显示仿真输出结果的软件。该软件可应用于服务水平的评估；分析交通排放（包括噪声）和燃油消耗；交通安全分析；交通运输管理及预测；三维虚拟场景仿真等方面。

GETRAM (Generic Environment for TRaffic Analysis and Modeling) 是西班牙 TSS 公司开发的用于交通建模和分析的软件环境。GETRAM 中包括微观交通仿真器 AIMSUN2 (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks)、图形路网编辑器和路网信息数据库。它适用于不同类型的路网，如城市路网、高速公路、一般公路、交通干线、环路或是混合情况；提供两种不同方式的交通仿真，一种是基于输入交通流和转向比例的，将车辆随机分布于路网；另一种是基于 OD 和路径选择模型的，根据每辆车的 OD 动态分配特定路径；模拟不同的交通控制，如有、无信号灯的交叉路口、匝道控制；模拟车载信息系统对驾驶员行为的影响；提供流量分布、速度分布、出行时间、排放等统计输出。

VISSIM 微观交通仿真软件是德国 PTV 公司的产品，它以 0.1 秒为步长进行仿真计算。VISSIM 中的车辆纵向运动采用心理—生理学模型，车辆横向运动则采用基于 If-then 规则的算法。VISSIM 的驾驶员行为模拟被分为保守型和冒险型两大类。VISSIM 提供图形化的界面，以二维和三维动画方式直接显示车辆的运动状态，并能生成离线文件。这些文件可收集诸如平均车速、停车延误、路口排队长度等统计数据。VISSIM 能够模拟城市道路和郊区公路的交通状况，特别适合模拟各种城市交通管理控制系统。

在我国，用系统仿真技术进行道路交通的仿真实验开始于 20 世纪 80 年代，主要集中在高等院校及研究机构。他们采用不同的计算机语言开发了用以研究通行能力和服务水平、宏观交通流分配、交通流诱导等的仿真模型或仿真系统。90 年代以来，同济大学、北方交通大学等高校已经开发了自己的微观交通仿真系统。仿真系统主要有 TJTS、NTIS 等。

TJTS (Tongji Traffic Simulation) 是同济大学开发的城市道路交通仿真实验系统，采用了面向对象软件开发技术。TJTS 的城市道路交通微观仿真模型主要包括路网描述模型、方案描述模型、车辆产生模型、车辆行驶模型和网络分析模型。目前，TJTS 仿真系统可对路网、交叉口等不同范围内的交通控制与管理方案、道路几何设计方案进行评价和改善，通过计算机动画和数据文件形式提

供动态交通状态描述, 已经在一些课题中应用。

NITS (Network Integrated urban Traffic Simulation system) 是由北方交通大学开发的一个城市交通仿真平台。包括中观模拟工具包, 用于对交通配流进行模拟; 还有微观模拟工具包, 进行交通的微观仿真模拟, 对模拟结果进行分析和处理, 并可以实现二维、三维的可视化。

5.2 改进的城市交通微观仿真模型

武汉理工大学的商蕾于 2003 年以微观交通仿真建模和城市微观交通仿真系统开发为研究重点, 建立了车辆行为模型, 其中包括跟驰模型、邻车影响模型和换道模型。模型中充分考虑了邻道车辆对驾驶行为的影响及驾驶员的反应延迟, 使模型更符合真实情况; 在此基础上开发了城市微观交通仿真系统。该系统包括车辆产生模型、路网模型、交通规则模型、信号灯控制模型、车辆行为模型、路径选择模型、路口转向描述模型; 并且在图形工作站 OCTANE 上实现城市微观交通仿真系统的可视化, 可从多角度实时观测交通状况^{[79][80]}。

本文在上述工作的基础上添加了公交车辆运行(包括公交车进出站点)的微观仿真模型, 并通过交通调查对仿真结果进行验证; 同时用 Floyd-Warshall 算法对路径选择模型进行了改进。

5.2.1 城市交通微观仿真模型框架

城市微观交通仿真模型是运用数学方法对城市道路交通系统进行的抽象, 本文建立的城市微观交通仿真模型主要包括:

1) 车辆产生模型——用以解决交通流的输入问题。模型根据路网的 OD 矩阵及流量的时间函数, 按照某种车头时距的概率分布规律, 随机地、不断地在车源处产生新的车辆。

2) 路网模型——运用节点、路段、车道三种结构体, 描述道路的几何特征、车道划分、隔离带等, 反映路网的拓扑关系。路网模型属于静态模型, 在进入仿真运算后, 模型参数不再发生变化。

3) 交通规则模型——为了真实地反映车辆的行驶状态, 运用模型中的约束条件对模型中的驾驶行为进行限制, 建立准确的交通规则模型。常见的城市交通规则主要有车道转向限制、车道车辆类型限制、车道限速等。

4) 信号灯控制模型——建立通用的信号灯控制模型, 对交叉路口的信号灯

控制进行反映。

5) 车辆行为模型——车辆行为主要有两种，即跟驰行为和换道行为。

6) 路径选择模型——该模型根据车辆 OD 和当前车辆所在位置用路径寻优算法选择行驶阻抗最小的路线。

7) 路口转向模型——根据车辆当前行驶方向和下一个路段行驶方向的位置关系，确定车辆在路口的转向情况（左转、直行或右转）。

城市微观交通仿真流程如图 5.1 所示。

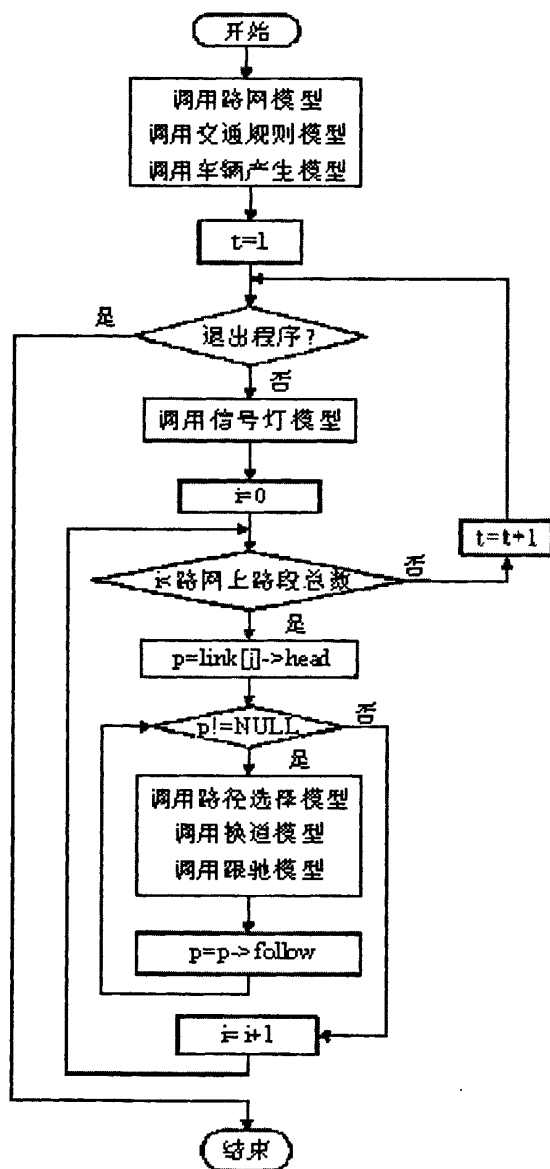


图 5.1 仿真流程图

5.2.2 公交车运行仿真模型^{[91][94]}

公交车的驾驶行为可以分为两种状态：在远离公交站点时，其行为和其他车辆相同，在接近站点和驶离站点时，不仅自身存在减速、怠速、加速的状态变化，而且会对周围车辆产生干扰，导致其他车辆的运行速度和路段的通行能力下降。研究公交车驾驶行为造成的交通瓶颈问题，对缓解相应路段的交通拥挤、减少机动车尾气排放有重要意义。

由于公交车驾驶行为的特殊性，本文在城市车辆仿真的基础上对公交系统进行抽象再现公交车辆的运行以及公交车辆与其他车辆之间的相互影响。公交车运行微观仿真包含公交网络描述模型、公交车辆产生模型、乘客需求模型、公交站点事件反应模型和公交车辆运行模型。

5.2.2.1 公交路网模型

公交路网是由公交线路、公交站点和其他一些公交设施（例如公交专用道）组成。公交线路由依次相连的路段组成，公交站点分布在公交线路所属的路段上。由于公交站点的相对不变性，因此对于公交车而言，不存在路径寻优的考虑；根据设置位置、设置方法和站台型式，公交站点有不同的分类方法。

1) 根据设置位置的不同分类

公交站点可以分为交叉口上游公交停靠站、交叉口下游公交停靠站和路段公交停靠站。不同的位置公交车运行受交叉口信号灯的影响程度是不相同的。

2) 根据设置方法的不同分类

公交站点可以设置在沿机动车和非机动车分隔带上。对于三块板和四块板的道路，机非分隔带宽度满足条件时，站台设置在机非分隔带上的公交站点是我们国家许多城市最常见的一种设站形式。与之相对应的是沿中央分隔带设置的公交站点，这种类型站点的特点是方便公交车的换道和转向，但这种形式的站点存在一定的技术与安全问题并需要设置专门的人行天桥或地下过街通道。此外还有沿人行道设置的公交站点，由于公交停靠要占用和穿过非机动车道，这种类型容易导致公交车与非机动车产生干扰，适用于无机非分隔带或机非分隔带不满足设站且非机动车流量不大的道路。

3) 根据站台形式分类。

公交站点可以直接设置在机动车道上，这种形式称作直线式公交站点（或非港湾式站点）。对于此种形式的公交站点，公交车辆停靠时占用一条机动车道，

形成了交通瓶颈路段，由此将会对其他车辆的正常行驶和公交车辆的超车产生很大影响，当路段机动车饱和度较大时甚至会造成交通阻塞。如果在公交站点处将道路适当拓宽，将公交车辆的停靠位置设置在正常行驶的机动车道之外，以减少公交车辆停靠时形成的交通瓶颈对社会车辆和后到先走的公交车辆超车的影响，保证路段车流的正常运行，这就是所谓的港湾式公交站点。

5.2.2.2 公交车辆产生模型

公交车辆在车源处产生，产生的方式有两种：一是严格按照发车的时刻表发车，一般是均匀分布；二是按照一定的概率分布发车，如负指数（见表 5.1）。本文采用均匀分布的发车模式。

表 5.1 公交车发车的概率分布

适用范围	分布类型	车头时距
按发车时刻表发车	均匀分布	$1/\lambda$
随机发车	负指数分布	$-\frac{\ln(P(h < t))}{\lambda}$

其中： λ ——单位时间的平均到达率，辆/s；

t ——每个计数周期的持续时间，s。

5.2.2.3 乘客需求模型

乘客在公交站点的需求决定了公交车辆在站点的停车时间。乘客需求的表示也有两种方式：简单常用的方式是用停车时间的随机分布表示，公交车辆在公交站点的停车时间根据停车时间分布随机地获取，每个站点定义停车时间的均值和均方差，并随着站点的不同而不同。不同站点分配不同的停车时间和同一站点不同时刻停车时间的随机变化。另外一种方法是利用乘客上车率和下车率计算乘客上下车时间，求其大者得出停车时间。

表 5.2 为武汉市四个典型的公交站点公交车停靠时间的统计表。其中余家头站、四美塘站和才华街站都处于城市主干道，车流量大，公交车线路也较多，同时乘客需求也大，尤其是在上下班高峰期，从统计可以看出，这三个站点公交车停靠时间的分布与正态分布相近，两头小中间大，公交车进出站时间出现频度最大的区间是在 $20 \pm 10s$ ；而团结路站是位于支路上的一个站点，公交线路较少，乘客需求小，停靠时间相对也少。本文在不失一般性的情况下，公交车进站停靠时间取固定值——20s。

表 5.2 公交停靠站台时间频率分布

停站时间区间	余家头站 (和平大道、非港湾式)	四美塘站 (和平大道、港湾式)	才华街站 (友谊大道、非港湾式)	团结路站 (团结路、非港湾式)
<10	7	5	6	13
10~15	25	22	22	11
15~20	32	33	36	4
20~25	28	25	36	2
25~30	26	24	34	0
>30	17	24	27	2

5.2.2.4 公交站点事件反应模型

描述车辆行驶行为的交通仿真模型可以分为 3 种类型：跟车模型、换道模型和事件反应模型。其中跟车模型、换道模型描述的是车辆最基本的两种行驶行为，即跟车行驶和变换车道。事件反应模型则反映车辆在各种特定事件情况下的行驶行为。模拟仿真车辆在交叉口面对信号灯转换和公交车进靠及驶离站点的行驶行为就是典型的事件反应模型。

为了准确地表示公交车车辆的运行特点，根据公交车车辆与公交站点的距离把路段分为两个区段：站点远区段和站点近区段。

在站点远区段，其运行特征与其他车辆相差无几，运用跟车模型和换道模型就能描述公交车的行驶行为；而在站点近区段，公交车车辆的运行不仅受前后车的影响，还受公交站点的制约，在距离站点不同位置其运行特性也不一样。因此根据位置的不同又可以把公交车进出站点分成四个阶段（图 5.2）：变换车道、减速进站、停车上下客及加速出站。需要指出的是如果车辆一直行驶在道路外道，则变换车道这个阶段可以省略，而对于港湾式站点，公交车加速出站还需要考虑安全间隙进行换道。

对于非公交车车辆，由于公交站台的影响，其驾驶行为也会发生变化，在靠近站台时，处于外道的车辆往往会选择换道到内侧车道，尤其是非港湾式站台；而处于内道的车辆此时也会避免换道到外侧车道。

根据邹智军的研究，公交车已经开始停靠站过程的区域一般可取距离停车线 100m 左右的范围，在这个距离进行换道外侧等准备工作；在停靠站区域上游 30~50m 的距离范围进入减速进站过程。本文将进站强制换道（如果此时车辆位于内侧车道）的决策点定为 100m，减速的决策点定位 30m。

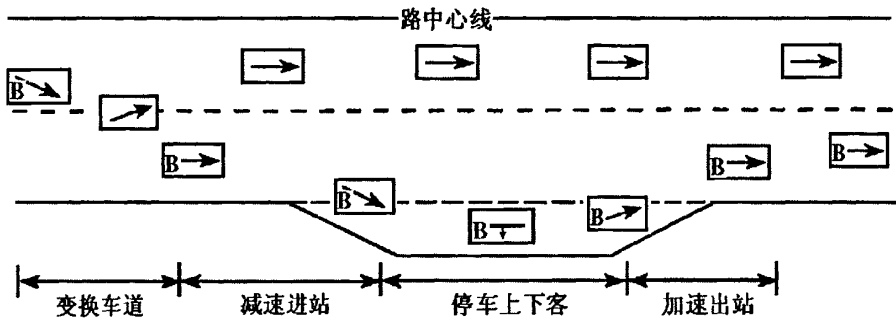


图 5.2 公交车进出站台的行驶特征 (带 B 的为公交车)

5.2.2.5 公交车运行模型

公交车在站台远区段行驶状态的描述可以参照一般车辆的跟车模型和换道模型, 只是车辆的部分参数需按大型车来设置。

5.2.2.6 实例分析

为了说明公交车仿真模型的应用, 现选取的武汉市武昌小东门路口进行仿真研究。

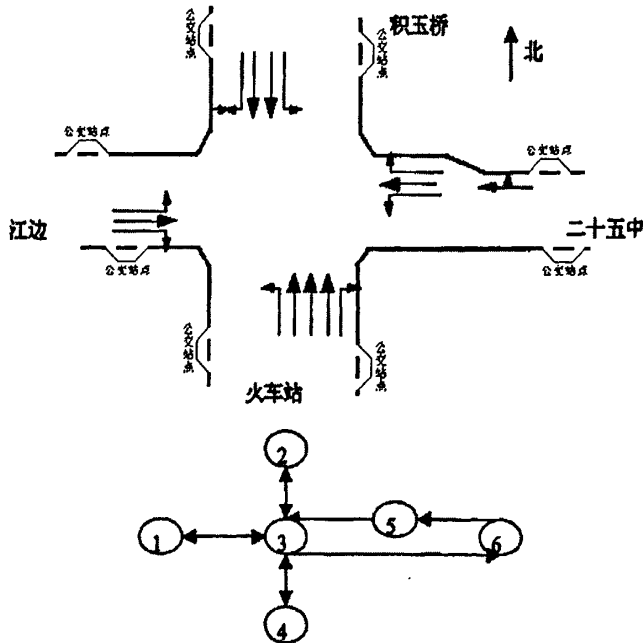


图 5.3 武汉市武昌小东门路口路网描述 (1~6 为路网节点号)

该路段为十字路口, 高峰小时 (17: 00~18: 00) 车流量超过 7000 辆。其路网拓扑结构与车道使用规定见图 5.3, OD 分布情况见表 5.3, 车种比例见表

5.4, 信号灯控制方案见表 5.5。

表 5.3 高峰小时交通量

OD 对编号	起点 O	终点 D	到达率 (辆/秒)	说明
1	1	2	0.1075	江边至积玉桥
2	1	4	0.093	江边至火车站
3	1	6	0.184	江边至二十五中
4	2	1	0.179	积玉桥至江边
5	2	4	0.142	积玉桥至火车站
6	2	6	0.218	积玉桥至二十五中
7	4	1	0.024	火车站至江边
8	4	2	0.106	火车站至积玉桥
9	4	6	0.079	火车站至三十五中
10	6	2	0.444	二十五中至积玉桥
11	6	1	0.233	二十五中至江边
12	6	4	0.184	二十五中至火车站

表 5.4 路网车种比例

小型车 (以小汽车为主)		中型车 (以卡车为主)		公交车			
90%		10%		定时发 车(如: 每隔 300 秒 发一辆 车)	Diesel, Heavy bus, Fuel-injected, Euro II	50%	
车型	比例 %	车型	比例 %				
Pt/ Sm-Tk/ Lt/MPFI/3wy	20	Ds/Tk/Med/Dir-inj/Improved	60		定时发 车(如: 每隔 300 秒 发一辆 车)	Diesel, Heavy bus, Fuel-injected, Euro II	50%
Pt/ Sm-Tk/ Med/MPFI/3wy	20						
Pt/ Sm-Tk/ Lt/MPFI/Euro II	40	Ds/Tk/Lt/Dir-inj/Improved	40	定时发 车(如: 每隔 300 秒 发一辆 车)		LNG, Medium bus, Fuel-injected, 3way	50%
Pt/ Sm-Tk/ Med/MPFI/Euro II	20						
合计	100	合计	100				

表 5.5 小东门路口信号灯控制方案

相位	时长 (s)	东进口	西进口	南进口	北进口	说明
1	40					南北进口左转弯
2	85					南进口通行、北进口直行
3	30					东进口通行
4	35					东西进口通行

利用吴其伟博士在“城市公交车行驶特性测量与分析”项目研究中对武汉市公交车行驶特征的调研结果，对公交车仿真模型中的部分参数进行确定并验证，以证明模型的有效性。

本着反映武汉市城市道路的整体状况，该项目选择了 715 和 719 两条公交线路，研究对象为装配 YC6G230-20 发动机的上海申沃 SWB6105 城市公交客车。两条线路覆盖了武汉三镇，分别经过长江一桥、二桥及江汉二桥，基本能反映武汉市的交通特征。其中对于公交线路 715，每天往返 3 次，从早晨 7:30 至晚上 8:30，进行 14 天的数据采集，行驶里程达到 1825km，基本涵盖了车流量高峰期与非高峰期、工作日与非工作日各个时段的车辆行驶参数。数据采集采用由课题组自主研发的多通道车载道路试验数据采集系统，主要测量的参数有车速、平均车速、怠速比例、加减速比例、发动机转速、扭矩等。表 5.6 是根据所采集数据分析得到的公交车部分技术参数和结构参数。

表 5.6 SWB6105 城市公交车部分运行参数和结构参数

主要技术参数		结构参数	
排量 (L)	7.8	长/宽/高 (mm)	10420/2480/3300
标定功率 (kW)	170	汽车整备质量 (kg)	10700
全负荷最低燃油消耗率 (g/kW.h)	≤215	实际运行中的最大速度 (m/s)	22
排放标准	欧 II	实际运行中的最大加/减速速度 (m/s ²)	9.25/-12.7

最终公交车相关参数值如表 5.7。最后利用城市微观交通仿真模型模拟小东门路口高峰小时交通状况，对建立的模型产生 10 组随机数种子，并进行 10 次运行，如满足事先设定的置信度，则以其平均值作为其仿真值；如不满足，则增加一次运行，再进行比较，直至其满足条件。模拟后得到的公交车运行工况如表 5.8 所示。

表 5.7 城市微观交通仿真模型公交车的相关参数

模型中公交车相关参数	
车辆长度 m	10
发车间隔 s	300
公交站点坐标分布情况	路段 13 (-400, 0)
	路段 23 (0, 400)
	路段 43 (0, -400)
	路段 65 (400, 0)
	路段 31 (-200, 0)
	路段 32 (0, 200)
	路段 34 (0, -200)
路段 36 (200, 0)	
公交站点类型	港湾式
最大运行速度 m/s	22
最大加速度 m/s^2	3
最大减速度 m/s^2	-10

表 5.8 路口高峰期公交车运行工况对比表

	试验数据	模拟数据
平均速度 km/h	16.82	17.24
速度标准差 m/s	6.32	8.03
怠速比例%	38.08	44.46
加速比例%	34.08	37.08
减速比例%	17.34	14.07
匀速比例%	10.4	4.38

通过表 5.8 对比分析可以看到：

(1) 试验数据的平均速度和模拟数据的平均速度相差不大, 表明在有信号灯的路口, 对速度影响最大的是红绿灯的分配时间;

(2) 速度的标准差有一定的差值, 主要是因为实际中车辆的加减速不可能像仿真模型中的那样反应迅速, 速度变化过渡时间较长;

(3) 在两组数据中各种工况的比例分配具有一致性, 但模拟数据的匀速比例远小于试验数据, 这和跟驰模型中驾驶员行为参数有关系, 在后续的工作中应重新进行标定;

(4) 模拟数据基本可以反映公交车的实际运行工况。

本文同时还模拟信号灯配时优化(表 5.9)及公交站点由港湾式改成非港湾式后交叉口通行能力的情况, 并进行对比分析。

表 5.9 经过优化的小东门路口信号灯控制方案

相位	时长 (s)	东进口	西进口	南进口	北进口	说明
1	30					南北进口左转弯
2	45					南进口通行、北进口直行
3	30					东进口通行
4	55					东西进口通行

表 5.10 三种模拟方案的结果对比

	方案对比		模拟车辆运行工况对比						
	信号灯控制	公交站点类型	车型	车队行驶距离 km	平均速度 km/h	加速度比例%	减速度比例%	怠速比例%	匀速比例%
方案 I	见表 5.5	港湾式	公交车	24.97	10.24	37.1	14.1	44.4	4.4
			小车	636.66	17.3	39.2	18.0	30.8	12
			中车	58.38	13.22	32.6	12.1	34.2	21.1
方案 II	见表 5.9	港湾式	公交车	25.43	10.5	36.9	14.6	42.6	5.9
			小车	664.23	17.9	38.3	19.0	25.8	16.9
			中车	55.23	13.6	33.1	13.2	32.5	21.2
方案 III	见表 5.5	非港湾式	公交车	23.05	10.2	36.4	13.9	43.2	6.5
			小车	626.47	15.8	33.2	18.2	34.4	14.2
			中车	52.36	12.8	34.7	12.3	32.2	20.8

经过对比分析, 可以得出以下结果:

(1) 方案 II 中的车队行驶总距离最长 (见表 5.10), 表明通过的车辆数最多, 这和信号灯配时优化有关, 在这种方案中, 各种车队的速度也有所提高 (见表 5.10);

(2) 对于港湾式和非港湾式公交车站点的模拟, 可以发现非港湾式模型中各种车队的速度都有所下降 (见表 5.10 中的方案 I);

(3) 三种方案中, 方案 III 的各种技术指标最差, 方案 II 的最好, 但是整体提高不多, 这和路口处于交通流高峰期有关。

5.2.3 路径选择模型

5.2.3.1 最短路径寻优算法^[95-98]

作为解决交通拥挤的一种策略, 交通诱导已经成为智能交通研究中非常重要的组成部分, 而最优路径选择方法是其一个重要的手段。

将城市路网抽象为图论意义下的网络问题, 路径选择问题就变成了网络图中的最短路径问题。需要指出的是这里最短路径不单指“纯距离”意义上的最短路径, 也可以是“经济距离”意义上的最短路径, “时间”意义上的最短路径等。

最短路径计算分静态最短路计算和动态最短路计算。静态路径最短路径算法是在外界环境不变的情况下计算最短路径。主要有 Dijkstra 算法, A* (A Star) 算法和解决任意两点间的最短路径的 Floyd-Warshall 算法等。动态路径最短路是在外界环境不断发生变化的情况下, 即不能计算预测的情况下计算最短路径。典型的有 D* 算法。

Dijkstra 算法是求最短路径算法中最基本和使用最广泛的一种, 属于广度优先搜索。对于网络的遍历, 通常有两种方法: 深度优先搜索和广度优先搜索。广度优先是从初始状态一层一层向下找, 直到找到目标为止; 深度优先是按照一定的顺序查找完一个分支, 再查找另一个分支, 以至找到目标为止。经典 Dijkstra 算法在求从网络中的某一节点 (源点) 到其余各节点的最短路径时, 将网络中的节点分成三部分: 未标记节点、临时标记节点和永久标记节点 (最短路径节点)。算法开始时源点初始化为最短路径节点, 其余为未标记节点; 算法执行过程中, 每次计算所有最短路径节点与其相邻节点的权值, 同时把这些相邻节点 (不包括最短路径节点) 从未标记节点修改为临时标记节点, 判断权值后, 在所有临时标记节点中提取权值最小的节点, 修改为最短路径节点后作为

下一次的扩展源；重复前面的步骤，当所有节点都成为最短路径节点后算法结束。需要注意的是用 Dijkstra 算法求最短路径的网络图不能有负权边。

Dijkstra 算法能得出最短路径的最优解，但由于它遍历计算的节点很多，所以效率低。

上面说的广度和深度优先搜索方法有一个很大的缺陷就是它们是在一个给定的状态空间中穷举。这在状态空间不大的情况下是一种合适的算法，可是当状态空间十分大，且不可预测的情况下就显得效率太低、速度太慢了，甚至不能完成。而启发式搜索是解决这一问题的有效方法。启发式搜索是在状态空间中对每一个搜索位置进行评估，得到最好的位置，再从这个位置进行搜索直到目标。这样可以避免大量毫无方向的搜索，从而提高了效率。在启发式搜索中，对位置的评估是十分重要的，采用了不同的评估可以有不同的效果。启发式搜索包括很多种算法，如局部择优搜索法、最好优先搜索法、A* (A Star) 算法等，这些算法都使用了启发函数。

A*算法的启发函数表示为：

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (5.1)$$

其中 $f(n)$ 是节点 n 的估价函数， $g(n)$ 源点到节点 n 的实际代价， $h(n)$ 是从节点 n 到目标节点最佳路径的估计代价。其中， $h(n)$ 的约束条件是：对于所有节点， $h(n)$ 决不会超过实际代价且不为负值。在这里 $g(n)$ 代表了搜索的广度优先趋势，因而可提高搜索的完备性，但影响搜索效率； $h(n)$ 则代表了搜索的深度优先趋势，因而可提高搜索的效率，但影响完备性。因此保证找到最短路径的关键在于 $h(n)$ 的选取。由此可见，A*算法和 Dijkstra 算法的区别在于有无估计代价 $h(n)$ ，Dijkstra 算法相当于 A*算法中 $h(n)$ 值为 0 的情况。

A*算法的伪程序如下：

Open = [起始节点];

Closed = [];

while (Open 表非空)

{

 遍历 Open，取得估价值最小的节点 X，并从 OPEN 表中删除

 if (X 是目标节点)

 {

 求得路径 PATH;

```
    返回路径 PATH;
}
for (每一个 X 的子节点 Y)
{
    if( Y 不在 OPEN 表和 CLOSE 表中 )
    {
        求 Y 的估价值;
        并将 Y 插入 OPEN 表中; //还没有排序
    }
    else if( Y 在 OPEN 表中 )
    {
        if( Y 的估价值小于 OPEN 表的估价值 )
            更新 OPEN 表中的估价值;
    }
    else //Y 在 CLOSE 表中
    {
        if( Y 的估价值小于 CLOSE 表的估价值 )
        {
            更新 CLOSE 表中的估价值;
            从 CLOSE 表中移出节点, 并放入 OPEN 表中;
        }
    }
    将 X 节点插入 CLOSE 表中;
    按照估价值将 OPEN 表中的节点排序;
} //end for
} //end while
```

A*等启发式算法等在静态路网中寻优非常有效, 但不适于在环境如权重等不断变化的动态路网下进行路径寻优。D*算法是动态的 A*算法(D-Star, Dynamic A Star), 最初由 Carnegie Mellon 大学机器人中心的 Stentz 提出, 主要用于机器人探路, 是火星探测器采用的寻路算法。目前也被广泛应用在人工智能和智能交通领域。其主要原理是: (1) 初始时, 根据现有的已知环境信息求得最短路径; (2) 机器人沿最短路径移动, 若下一节点无变化, 则直接利用 (1) 所得信

息向后追溯。若下一节点状态发生变化,则根据当前信息按 A*算法的原则重新计算各节点的估价函数,获得下一扩展节点;(3)若该扩展节点为目标节点,过程终止,回溯即得到最优路径。否则,返回步骤(2)。

D*算法在动态环境中具有高效寻路的特点,当算法沿最短路径移动发现障碍节点时,立即更新环境信息,重新计算新的最短路径并避开了障碍节点,使得整个寻路过程不受环境的影响而快速完成。

上述算法都是对网络图中一对顶点求最短路径,除此之外,还可以运用 Dijkstra 算法还可以求出网络图中每一对顶点的最短路径,即每次以一个顶点为源点,重复执行 Dijkstra 算法 n 次。但这种算法的实现比较复杂, Floyd 提出了另外一个较为简单的算法——Floyd-Warshall 算法,其基本思想是:设图 G 中有 n 个顶点,编号从 1 到 n 。令 $c[i, j, k]$ 表示从源点 i 到结点 j 的最短路径的长度,其中 k 表示该路径中的最大顶点(编号值),也就是说 $c[i, j, k]$ 这条最短路径所通过的中间顶点最大不超过 k 。若 $i = j$, 则 $c[i, j, k] = 0$; 若 G 中包含从 i 到 j 的弧, 则 $c[i, j, 0]$ 等于弧 $\langle i, j \rangle$ 长度; 否则 $c[i, j, 0] = \infty$ 。 $c[i, j, n]$ 则是从 i 到 j 的最短路径的长度。对于任意的 $k > 0$, 通过分析可以得到: 中间顶点不超过 k 的 i 到 j 的最短路径有两种可能: 该路径含或不含中间顶点 k ; 若不含, 则该路径长度应为 $c[i, j, k-1]$, 否则长度为 $c[i, k, k-1] + c[k, j, k-1]$ 。即:

$$c[i, j, k] = \min\{c[i, j, k-1], c[i, k, k-1] + c[k, j, k-1]\}, k > 0 \quad (5.2)$$

这样,问题便具有了最优子结构性质,可以用动态规划方法来求解。

5.2.3.2 路网模型^{[99]-[102]}

在交通仿真模型中,城市路网系统可以抽象为一个网络图。路网模型为“节点(交叉口)——弧(路段)”赋权有向图的型式,即用图的节点表示路网的交叉口,而交叉口之间的路段被抽象为网络图中有方向的两条弧,它们具有不同的通行能力、交通流量和阻抗。这种型式能够有效表达城市路网的拓扑关系和路段的阻抗,但不能显性地表达转向的阻抗(即交叉口的阻抗)。对于公路网系统而言,交通流在交叉口处的延误只占全部行程时间的一个很小比例,故可以忽略转向阻抗。而城市道路网系统中交叉口延误占据整个行程时间的很大一部分,甚至可能会远远超过路段行驶时间。因此,必须将转向阻抗反映到路径选择模型中。

为了表达车流经过不同路段通过交叉口的转向延误和限制,传统模型把各个交叉口各个转向延误的平均值作为交叉口的阻抗,或者把交叉口进口道路段

对应的各个转向延误的平均值加入该路段的旅行时间，但是这些平均化的处理都不能表达从该路段转入不同路段的不同转向延误之间的差别。因此，Allsop、Charlesworth、Meneguzzer 和王丰元等人提出了基于传统路网模型的扩展模型，将每个交叉口扩展为一个子网络，即增加虚拟节点和虚拟弧，一个虚拟节点对应交叉口的一个进口或出口方向，连接虚拟节点的一条虚拟弧对应交叉口一个可能的转向，其弧长则对应延误，扩展后的网络就不存在转向延误和限制。然而扩展模型首先要重新构造路网，而大量虚拟节点和虚拟弧的添加导致网络规模和计算复杂度大大增加，尤其不适合在大路网中使用。例如一个十字路口，使用传统路网模型对其定义为由 5 个节点和 8 条路段组成，如图 5.4(a)所示；而如果使用扩展模型考虑十字路口的右转、直行、左转和掉头四个转向，则需要把路网增大到 16 个节点和 24 条路段，如图 5.4(b)所示。路网扩展后，节点和路段的数量都增加了很多，因此导致了网络规模和计算复杂度大大增加。

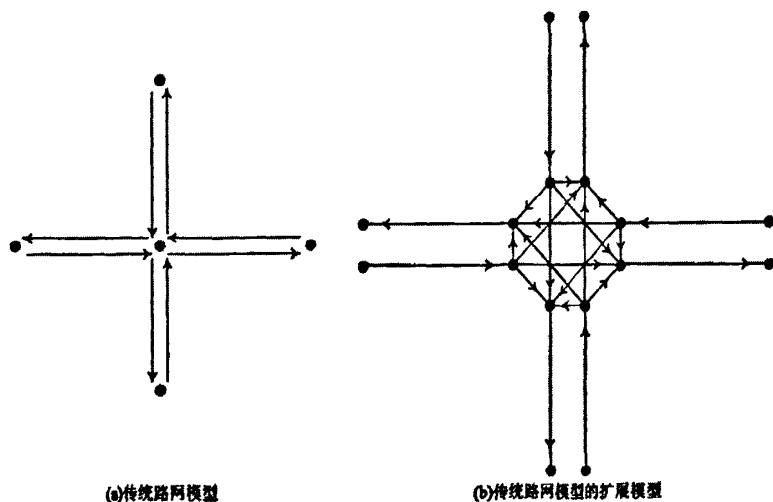


图 5.4 路网扩展模型

为了处理路段之间交叉口的转向延误和限制同时避免过大的增加路网规模，张国强和晏克非等人提出使用考虑转向延误的路网模型，可以处理路段阻抗以及路段之间的转向延误和限制，同时不需要增加路网模型中节点和路段的数量，只需在原来路网模型的基础上增加若干个相关的转向。其路网模型描述如下：

$$G = (N, A, R, T) \tag{5.3}$$

G 为城市路网系统；

N 为城市路网系统的节点集合，是对城市道路交叉口的一个抽象，

$N = \{i | i \in \text{整数}\};$

A 为城市路网系统的路段集合, 路段由其邻接交叉口的有序排列表示, 具有方向性, $A = \{v_{i,j} = \langle i, j \rangle | i, j \in N \text{ 且 } i \neq j\};$

R 为城市路网系统的转弯关系集合, 对于任一交叉口, 其转弯关系可由其邻接路段表示, 也可由其邻接交叉口表示, $R = \{(v_{i,k}, v_{k,j}) | v_{i,k}, v_{k,j} \in A\}$ 或 $R = \{(i, k, j) | i, k, j \in N \text{ 且 } i \neq j \neq k\};$

T 为城市路网系统在路段上和交叉口上的阻抗集合, $T = (T_A, T_R)$ 。其中 T_A 为路段阻抗集合, T_R 为交叉口阻抗集合。

如果路网的阻抗是车辆的行驶时间, 则车辆由起始节点沿着路网中某条可行路径到达节点 j 的时间可表示为:

$$t(j) = t(i) + t(b(i), i, j) + t(i, j) \quad (5.4)$$

式中: $t(i)$, $t(j)$ 分别为车辆由起始节点到节点 i 和 j 的行驶时间; $t(b(i), i, j)$ 为车辆通过交叉口 i 的延误, 其中 $b(i)$ 为车辆经过节点 i 的前一个节点, 和节点 i 构成路段 $v_{b(i),i}$; $t(i, j)$ 为车辆通过路段 $v_{i,j}$ 的行驶时间。

5.2.3.4 阻抗的计算^{[103]-[106]}

路径选择模型的关键是道路阻抗的计算。道路交通的阻抗一般被定义为道路使用者在出行过程中花费在道路上的行程时间, 它是道路使用者选择路径的依据, 也是进行交通分配和路网规划的重要参数。车辆在城市路网中的运行时间基本可以概括为两部分: 一是在路段上的行驶时间; 二是车辆通过交叉口的延误时间。

车辆在路段上的行驶时间是由车辆在路段上的行驶长度和行驶速度两个因素来确定的, 车辆在路段上的行驶长度等于路段长度减去车辆在交叉口前的排队长度, 而行驶速度和交通流密度紧密相关。对于路段行驶时间的研究, 既有通过实测数据进行回归分析的, 也有进行理论研究的。其中广泛应用的是由美国道路局开发的 BPR 公式, 形式为

$$t_a = t_0 [1 + \alpha (\frac{q_a}{c_a})^\beta] \quad (5.5)$$

式中: t_a 为路段 a 的行驶时间; t_0 为路段 a 的零流阻抗, 即路段上为空静状态时车辆自由行驶所需要的时间; q_a 为路段 a 的交通量; c_a 为路段 a 的最大交通容量; α 、 β 为阻滞系数, 在美国公路局交通分配程序中, $\alpha = 0.15$ 、 $\beta = 4$ 。

但是 BPR 公式是基于公路交通的观察数据得来的, 对于城市的道路交通并

不合适,其主要原因是城市道路交通是由路段和交叉口组成的,车流是间断流,而且当红绿灯交替,车流离开交叉口进入下个路段时,最开始的车辆是以集团的形式行驶的,而后的车辆则是以某种分布形式通过。显然这与公路交通是有很大的区别。

车辆通过信号交叉口的延误是由于交叉口处信号控制和车辆到达随机性引起运行车辆不能以期望速度行驶而产生的时间损失。根据交通流运行特性和延误产生的原因,信号交叉口延误又可分为三种:均匀延误、随机延误和过饱和延误。均匀延误是假设车辆均匀到达时产生延误;随机延误是由于信号周期内,车辆到达的随机波动性造成的;过饱和延误是车辆到达超过了信号交叉口的通行能力时,滞留车辆额外经受的延误。习惯上把后两种延误定义为增量延误。因此,常用的延误公式往往有两项构成:均匀延误和增量延误。

目前,用于信号交叉口及无控制交叉口延误分析的模型较多,较典型的如英国 TRRL 的韦伯斯特(Webster)模型和美国 HCM 延误模型(该模型分为 1985 年版和 2000 年版)等。

Webster 信号交叉延误计算模型是 F V Webster 于 1958 年提出,国际上经典的交通工程著作和日本出版的《交通工程学》都引用推荐了该公式。Webster 交叉口进口车道延误的计算公式为:

$$d = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda X)} + \frac{X^2}{2q(1-X)} - 0.65\left(\frac{C}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} X^{2+5\lambda} \quad (5.6)$$

其中, d 为每辆车的平均延误; c 为信号周期时长; λ 为绿信比,即有效绿灯时间与信号周期时长的比率; q 为标准化交通量 (pcu/h); s 为饱和流量 (pcu/h); X 为饱和度,即观测最大流量与信号交叉口进口道的通行能力之比 $q/\lambda s$ 。式(1)第一项是均匀车辆到达率所产生的延误;第二项是车辆到达随机性所产生的延误;第三项是由模拟法求出的补偿项,该公式适用于饱和度 $X < 1$ 时情况。

HCM 模型是由美国交通研究委员会 (Transportation Research Board, TRB) 出版的《美国道路通行能力手册》提供的。下面介绍 1985 年版和 2000 年版中的计算信号交通延误的。

1985 年版通行能力手册交叉口进口车道延误的计算公式为:

$$d = 0.38c \frac{(1-\lambda)^2}{1-\lambda X} + 173X^2[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + 16X/s}] \quad (5.7)$$

其中，第一项是均匀车辆到达率所产生的延误；第二项是随机到达或超饱和和流所产生的延误。该式主要适用于饱和度 $X \leq 1.2$ 时。

2000 年版通行能力手册交叉口进口车道延误的计算公式为：

① 当无初始车辆排队(即 $Q_b=0$)时，

$$d = \frac{0.5C(1-g/c)^2}{1-[\min(1,x)g/C]} \frac{(1-P)f_{PA}}{1-(g/C)} + 900T \left| (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kLX}{cT}} \right| \quad (5.8)$$

② 当存在初始车辆排队(即 $Q_b>0$)时，

$$d = d_s \frac{t}{T} + d_u \frac{(T-t)}{T} \frac{(1-P)f_{PA}}{1-(g/C)} + 900T \left| (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kLX}{cT}} \right| + \frac{1800Q_b(1+u)t}{cT} \quad (5.9)$$

当 $X \leq 1.0$ 时，且 $t=T$ 时；

$$u = 1 - \frac{cT}{Q_b[1-\min(1,X)]}, \quad T_c = \max \left| T, \frac{Q_b}{c} + TX \right|;$$

当 $X \leq 1.0$ 时，且 $t = \min \left| T, \frac{Q_b}{c[1-\min(1,X)]} \right|$ 时， $u=0$ ， $T_c=T$ ；

当 $X > 1.0$ 时， $t=T$ ， $u=1$ ， $T_c = \max \left| T, \frac{Q_b}{c} + TX \right|$

其中， P 为车辆在绿灯时间到达比率； f_{PA} 为绿灯时车队到达补充调节系数； C 为信号周期； g 为有效绿灯时间； X 为饱和度； T 为调查交叉口延误的时间； k 为取决于信号设置的延误增加系数； L 为上游合流、分流的调节系数； c 为通行能力(pcu/h)； Q_b 为调查开始时初始排队车辆数； t 为调查时间段 T 内未存在车辆排队的的时间区间； u 为延误参数。

2000 年版 HCM 延误模型在 1985 年版的模型基础上，做了很大的修订。第一，考虑调查初始时交叉口就存在车辆排队对延误的影响，所以该模型是由三部分组成，第一项是标准延误项，第二项是随机到达或超饱和和流所产生的延误项，第三项是存在初始排队而增加的延误项；第二，对于 1985 年版 HCM 模型中式(2)的第二项存在的缺陷进行了修正。

综上所述可知，均匀延误往往是由于信号灯的作用引起的，是车辆必然经受的延误，随机性因素较少；增量延误是由于个别周期车辆不能释放完，或过饱和引起的延误。当饱和度小于 1 时，增量延误往往是由于个别周期车辆不能释放完引起的，具有随机性。

在本文中，为了减少各种模型参数的标定和验证带来的复杂性，同时又不

失一般性，对于路段行驶时间采用路段长度除以期望行驶速度得到，而信号灯交叉口的延误采用 Webster 信号交叉延误计算模型。

5.2.3.3 实例分析

设图 5.5 为城市交通道路的局部网络图。其网络模型中的各个元素为：

$$N = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$$

$$A = \{v_{1,2}, v_{2,1}, v_{1,3}, v_{3,1}, \dots, v_{8,9}, v_{9,8}\};$$
 其中路网的带权邻接矩阵见表 5.11。

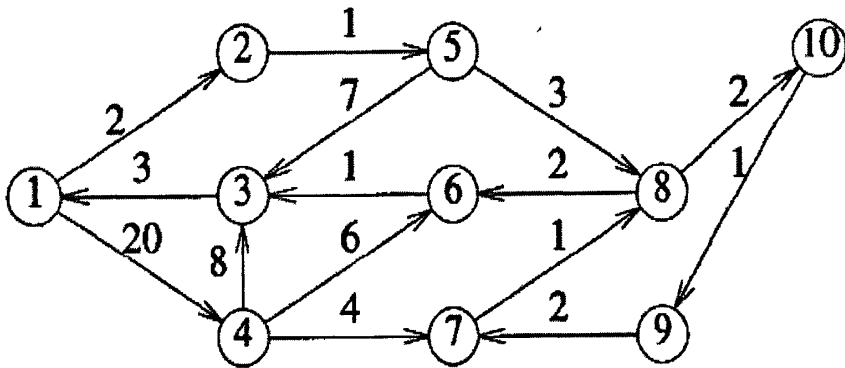


图 5.5 路网示意图

表 5.11 带权邻接矩阵

$$G = \begin{pmatrix} \infty & 2 & \infty & 20 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ 3 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & 8 & \infty & \infty & 6 & 4 & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & 7 & \infty & \infty & \infty & \infty & 3 & \infty & \infty \\ \infty & \infty & 1 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 2 & \infty & \infty & \infty & 2 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 2 & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 1 & \infty \end{pmatrix}$$

$R = \{(v_{1,2}, v_{2,1}), (v_{1,2}, v_{2,3}), \dots, (v_{10,9}, v_{9,10})\}$ ；根据路网的带权邻接矩阵可以确定路网的转向转向延误，见表 5.12。

本文利用 Floyd-Warshall 算法求出路网每对节点间的最短路径，这样行驶在

路网中的车辆可以根据当前所在位置和目标位置决定下一个阶段的行驶路线。当路网中路段权值和交叉口转向延误发生变化时，每隔一定时间间隔进行一次路径寻优计算（例如一个平均信号周期），将计算结果信息发送给在路网中的车辆，以便其进行动态的路径寻优。对于城市交通微观仿真模型而言，由于是对每辆车进行仿真，当路网规模较大，在线车辆较多时，计算量十分巨大，采用这种方法进行动态的路径寻优，可以减少车辆路径选择时的计算时间和内存耗费，同时与现实中的城市交通流诱导相符合。

表 5.12 路网交叉口的转向延误

路段编号	$v_{1,2}$	$v_{1,4}$	$v_{2,5}$	$v_{3,1}$	$v_{4,3}$	$v_{4,6}$	$v_{4,7}$	$v_{5,3}$	$v_{5,8}$	$v_{6,3}$	$v_{7,8}$	$v_{8,6}$	$v_{8,10}$	$v_{9,7}$	$v_{10,9}$
$v_{1,2}$	∞	∞	3	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
$v_{1,4}$	∞	∞	∞	∞	2	4	1	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
$v_{2,5}$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	3	4	∞	∞	∞	∞	∞	∞
$v_{3,1}$	2	3	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
$v_{4,3}$	∞	∞	∞	3	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
$v_{4,6}$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	2	∞	∞	∞	∞	∞
$v_{4,7}$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	3	∞	∞	∞	∞
$v_{5,3}$	∞	∞	∞	4	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
$v_{5,8}$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	3	4	∞	∞
$v_{6,3}$	∞	∞	∞	2	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
$v_{7,8}$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	2	2	∞	∞
$v_{8,6}$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	2	∞	∞	∞	∞	∞
$v_{8,10}$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	1
$v_{9,7}$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	3	∞	∞	∞	∞
$v_{10,9}$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	2	∞

具体实现的伪程序如下：

$Aweight[i][j]$ 为路段的权重； $Rweight[i][k][j]$ 为转向的延误；若 $Aweight[i][j]$ 、 $Rweight[i][k][j]$ 不存在，赋予其一个很大的数； $Dist[i][j][0]$ 、 $Dist[i][j][1]$ 分别为路段 $v_{i,j}$ 第一个节点 i 后接节点号和最后一个节点 j 前接节点号， $Dist[i][j][2]$ 为从节点 i 到节点 j 的最短距离。

```

for(int k = 1; k <= n; k++)
    for(int i = 1; i <= n; i++)
        for(int j = 1; j <= n; j++)
            {

```

$Dist[i][j][2] = \text{Min}(Dist[i][j][2], Dist[i][k][2] + Dist[k][j][2] + Aweight[Dist[i][k][1]][k][Dist[k][j][0]]);$

$Dist[i][j][0] = Dist[i][k][0];$

$Dist[i][j][1] = Dist[k][j][1];$

}

进行这三个循环之后得到的数组 $Dist[i][j]$ 就是图中各个结点之间的最短路径。表 5.13 就是运用 Floyd-Warshall 算法求出的每对节点间最小的路段与交叉口转向阻抗之和。

表 5.13 每对节点间的最小阻抗

节点 ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	2	16	20	6	18	25	13	21	19
2	18	0	11	41	1	13	20	8	16	14
3	3	7	0	26	11	23	30	18	26	24
4	14	18	8	0	22	6	4	8	14	12
5	14	18	7	37	0	8	15	3	11	9
6	6	10	1	29	14	0	33	21	29	27
7	13	17	8	36	21	5	0	1	7	5
8	10	14	5	33	18	2	8	0	4	2
9	18	22	13	41	26	10	2	6	0	10
10	21	25	16	44	29	13	5	9	1	0

5.3 本章小结

本文在商蕾城市交通微观仿真模型的基础上添加公交车运行模型和车辆路径选择模型，并在交通调查的基础上对一些相关数据进行了确定，使该模型具有更为真实的仿真和准确的分析能力，同时为研究机动车排放提供了仿真平台。

第6章 交通管控措施对机动车排放影响的案例研究

目前,由于机动车保有量的急剧增加,机动车所排放的污染物对城市大气环境的污染已经构成公害,严重危害人体健康,破坏自然界的生态环境平衡。因此机动车尾气排放的控制和治理已经成为城市环境可持续发展亟待解决的课题之一。在道路条件不易改善及车辆状况不易改变的情况下,通过改善交通管理和控制来减少排放是一种相对经济且有效的手段。

其实现方法主要有以下几种:

1) 交通信号的控制 (Traffic Signal Control, TSC)

交通信号控制的主要目的是改善交通流的质量,实践表明改善交通信号控制不但能提高车辆在城市道路中的运行速度,减少延误并增强交通安全,而且还可以减轻汽车尾气排放造成的污染和减少燃油消耗。

2) 高排放车的限行 (High Emitting Vehicle Restriction, HEVR)

高排放车是指那些排放量大、浓度高、排放的稳定性差的车辆。虽然一个交通路网中它们所占的比例不一定很大,但它们对排放的贡献率是非常高的。曾有研究表明北京市机动车排放的CO、HC和NO_x中50%分别来自于15.90%、13.98%、11.13%的高排放车。因此对高排放车的限行是改善城市大气环境,提高城市大气环境质量的一个重要措施。

3) 公交运输的优先权 (Public Transport Priority, PTP)

交通信号的公共车辆优先控制是公共交通科学管理的重要手段之一。在某些国家,特别是西方一些发达国家,十分重视在信号控制的交叉口给予公共车辆优先权。这是因为公共交通运输量大,平均每个乘车人所占用的道路面积小。如果能发挥公共交通运输的特点,提高公共车辆的运行效率,降低公共车辆在交叉口的延误,势必吸引更多的人乘坐便捷快速的交通工具,则有利于减少个人交通,从而缓解交通拥挤和减少排放污染的紧张局势。

4) 动态路径诱导 (Dynamic Route Guidance, DRG)

动态路径诱导是根据当前路网的交通流状况及各类车辆的目的地,经优化计算为每一辆车提供最佳的行驶路线。通过交通诱导可以减轻交通拥堵,减少车辆在途的逗留时间,还可以充分利用交通路网,达到优化均衡网络交通流的目的。通过路径诱导也能减少高峰时刻拥堵路段的机动车尾气排放量,从而达到改善环境的作用。

本文建立了一个以本地化 IVE 模型作为排放子模型的城市交通微观仿真模型，它可以对不同交通控制策略、各种道路条件和交通服务水平下机动车的排放进行评估和预测，提供相关污染物的排放清单。下面利用这个模型对不同交通管控策略下的城市机动车排放进行仿真研究。

6.1 路段限速对车辆排放的影响

根据交通流理论，当道路上车辆增多、密度增大时，驾驶员被迫降低车速；而当车流密度变小时，驾驶员又可以以较大的车速行驶。这就是 Green Shields 提出的速度—密度的关系模型，并由此可以推出流量与密度的关系和流量与速度的关系。三者的关系见图 6.1。

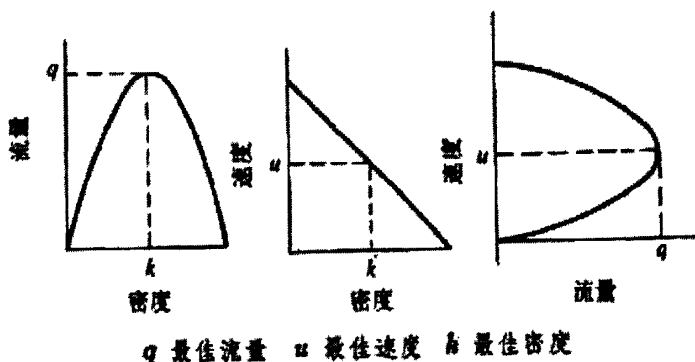


图 6.1 交通流量、交通流速度与交通流密度的关系图

当路段上车流密度较小时，驾驶人员都希望提高车速，以期望速度行驶。车速太高会对安全行驶造成不利影响，因此城市很多路段会对车辆行驶的最高速度进行限制，但车辆速度的变化又会对车辆排放产生一定影响。

为了分析路段限速对行车速度、车辆排放的影响，本文建立了一个长 500m 的单车道路段仿真模型，并设置：

- 1) 车辆到达服从泊松分布；
- 2) 仿真车型两种，均为小型车，车辆期望速度为 108km/hr。20%的仿真车辆为高排放车，即发动机为化油器供油、尾气无催化处理、行驶里程大于 161Kkm。另外 80%为闭环多点喷射供油，三元催化，行驶里程小于 79 K km 的车辆。

- 3) 路段限速分别设为 72km/hr、54km/hr 和 43.2km/hr。

通过仿真计算和分析，可以得到如图 6.2 所示的不同限速下平均速度-到达

率曲线。总的说来，随着车辆到达率的增加，路段上车辆不断增多，平均车速逐渐减小，交通流由稀疏流逐步转变到稠密流。当到达率增加到 0.3 pcu/s 时，平均车速显著降低；当到达率较小时（小于 0.14 pcu/s），限速对车流平均速度影响非常明显。限速高的路段平均车速大于限速低的路段。在这样的稀疏流中，路段上的车流量较少，由于受限速制约，驾驶员无法提速。只能按限速行驶。从交通管理角度来看，在城市道路中设置合理的限速，虽然增加了出行者的旅行时间，但是有利于保障正常的交通秩序，降低由于突发事件导致交通事故的可能性；当到达率达到并超过一定值时（大于 0.22 pcu/s），不论路段的限速如何，交通流平均速度趋于相同，说明此时车辆行为主要受跟驰前车影响。也就是说，在稠密流中，交通限速对行车速度影响有限。

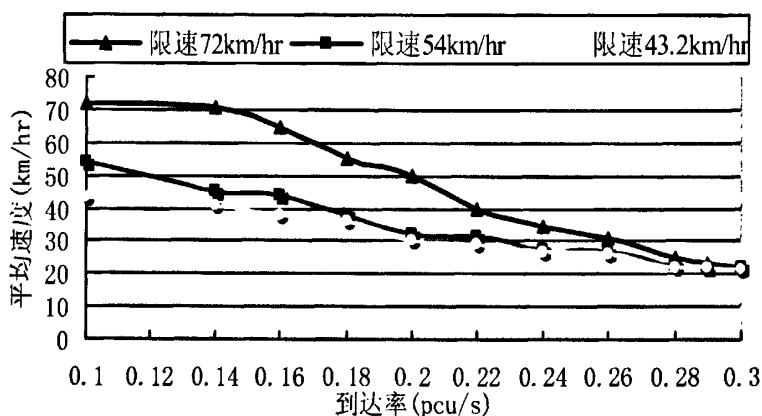


图 6.2 不同限速情况下的速度-到达率的变化情况

表 6.1 和图 6.3 是在路段不同限速情况下车辆随到达率变化的排放情况。从仿真的结果看，机动车排放与路段限速、到达率之间的关系有以下特点：（1）车辆排放随着到达率的增加而递增；（2）在低到达率或高到达率情况下，车辆的排放变化不大。参考图 6.2 也不难看出，这两种情况下的车辆平均速度随到达率变化不大，要么以接近自由流速度（或限速）行驶，要么由于车流密度过大而以最低安全速度行驶；（3）在相同的到达率条件下，车辆排放随路段限速的增加而减少。一般说来，较高的限速有利于减少车辆的排放。但当车辆到达率增加到一定值时，限速对车辆排放的影响就很小了。由此可见，在保证行车安全的条件下，提高路段的限速值可以提高行车速度、进而减少车辆的污染物排放。但当车流量达到一定值时，限速对车辆的排放影响很小了。

表 6.1 限速对路段车辆在各种到达率下的排放影响

最高限速 72 (km/h)				
到达率(pcu/s)	车速(km/hr)	CO (g/km)	CO ₂ (g/km)	NO _x (g/km)
0.1	72	3.33	101.04	0.24
0.14	70.776	3.32	102.08	0.24
0.16	64.836	3.36	103.56	0.25
0.18	55.152	3.81	137.71	0.37
0.2	49.932	4.44	161.47	0.44
0.22	39.672	4.86	176.60	0.48
0.24	34.308	8.04	289.27	0.76
0.26	30.708	9.70	356.02	0.93
0.28	24.781	10.10	355.04	0.96
0.3	21.996	10.05	358.18	0.96
最高限速 54 (km/h)				
到达率(pcu/s)	车速(km/hr)	CO (g/km)	CO ₂ (g/km)	NO _x (g/km)
0.1	54	4.51	139.15	0.33
0.14	45	4.17	151.55	0.41
0.16	43.632	4.55	165.56	0.45
0.18	38.088	4.79	175.36	0.47
0.2	31.932	4.97	182.93	0.49
0.22	31.428	5.35	195.96	0.53
0.24	27.036	8.82	311.12	0.83
0.26	26.46	10.27	361.20	0.97
0.28	22.752	10.13	361.76	0.96
0.3	21.78	10.14	361.76	0.96
最高限速 43.2 (km/h)				
到达率(pcu/s)	车速(km/hr)	CO (g/km)	CO ₂ (g/km)	NO _x (g/km)
0.1	43.2	5.54	172.77	0.42
0.14	40.752	4.67	172.87	0.46
0.16	37.692	4.96	182.62	0.49
0.18	36.036	5.14	188.85	0.51
0.2	29.952	5.26	193.53	0.52
0.22	29.304	5.62	205.80	0.55
0.24	26.568	9.11	325.08	0.87
0.26	25.956	10.03	362.42	0.96
0.28	22.068	9.97	360.55	0.95
0.3	21.204	9.98	360.39	0.95

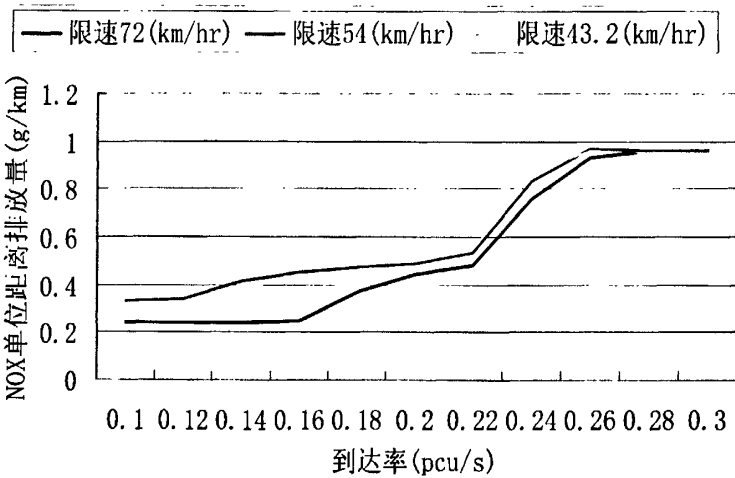
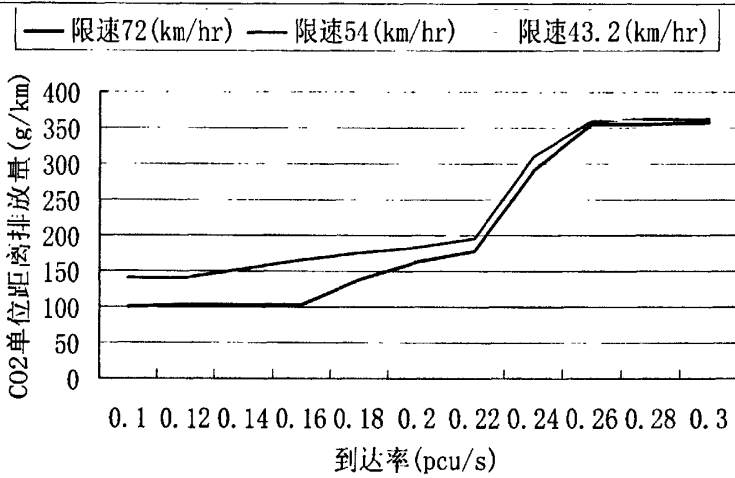
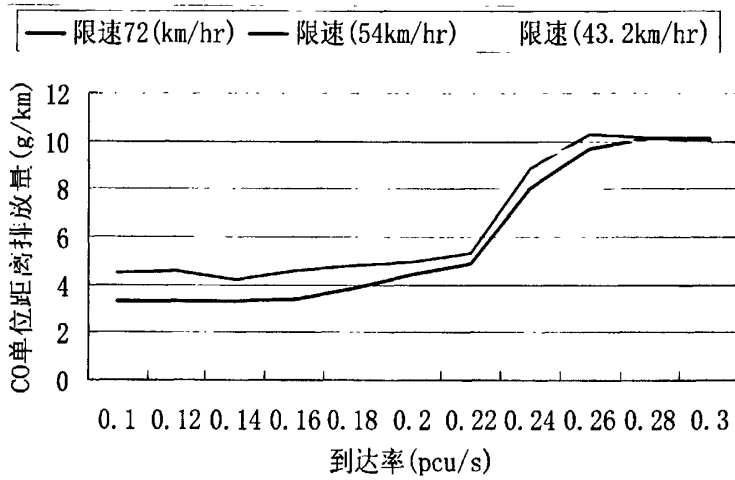


图 6.3 不同限速情况下车辆单位行驶距离的污染物排放

6.2 公交站点形式对车辆排放的影响

第 5 章中已有仿真实例探讨了不同形式公交站点对交通流特性的影响。通过研究发现，采用港湾式公交站点（方案 II）的交叉口交通运行状况最好，各种车辆的速度都有所提高，各种工况中匀速比例有所增加、怠速比例减少，见表 5.10 和图 6.4。

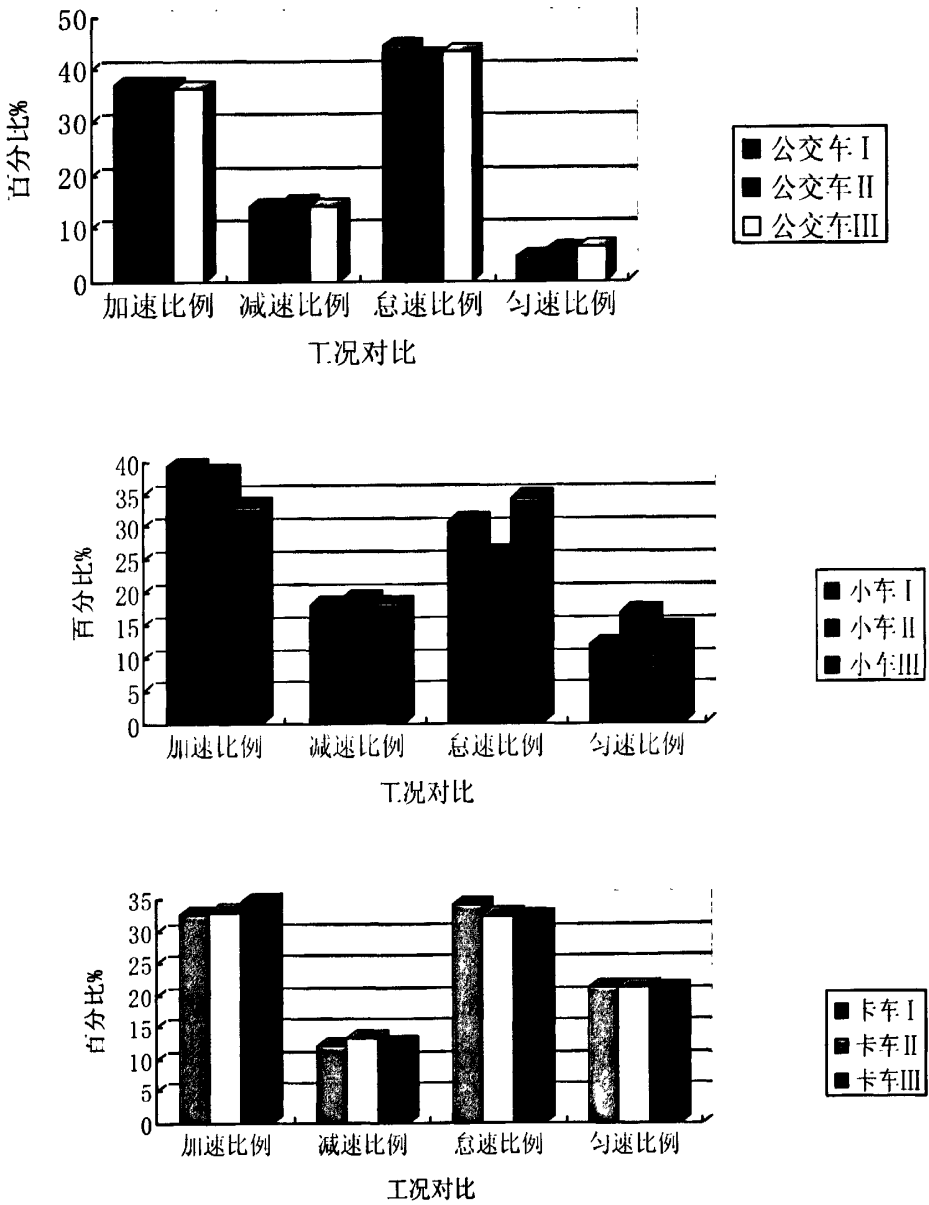
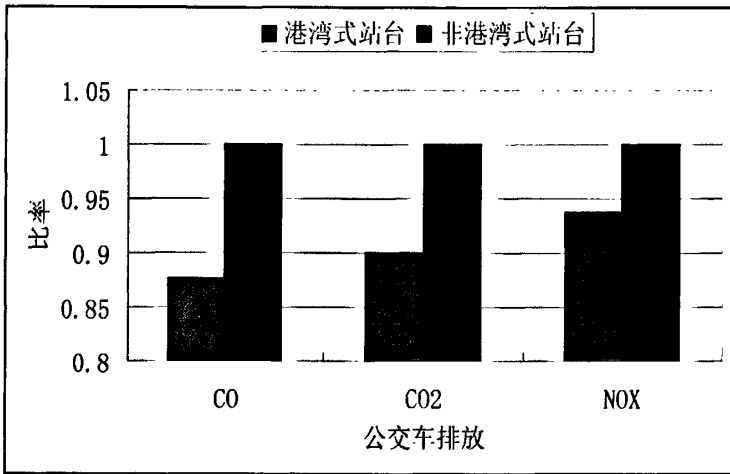


图 6.4 不同车型工况对比

下面，运用带排放子模型的城市交通微观仿真模型对采用不同形式公交站点的交叉口进行仿真，比较不同公交站点形式对排放的影响。为了减少其他因素的影响，在对比仿真中除了公交站点的形式不同外，其他参数都相同。同时，交叉口各进口的车辆到达率改为高峰时段的 80%，以便突出不同公交站台形式对车辆运行和排放的影响。

表 6.2 不同公交站台形式对车辆污染物排放情况的影响

站台形式	车辆类型	平均车速 (km/h)	车辆污染物单位距离的排放		
			CO(g/km)	CO ₂ (g/km)	NO _x (g/km)
港湾式站台	公交车	12.09	24.86	334.07	1.06
	卡 车	27.1	27.55	332.98	2.06
	小 车	33.6	4.36	257.73	0.31
	整 体	31.9	5.91	265.94	0.40
非港湾式站台	公交车	12.04	28.34	371.14	1.13
	卡 车	26.6	30.37	371.42	2.55
	小 车	31.1	4.51	271.47	0.29
	整 体	30.4	6.19	278.21	0.40



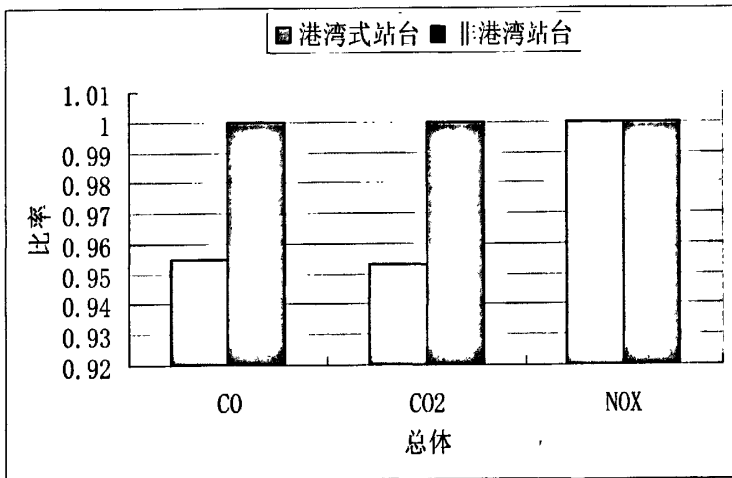
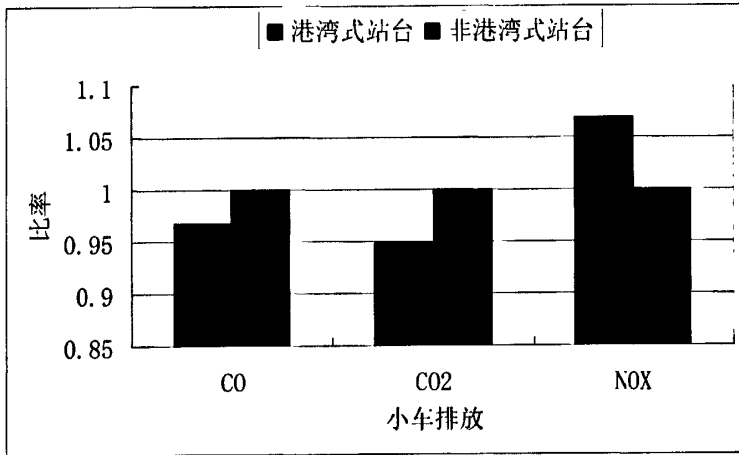
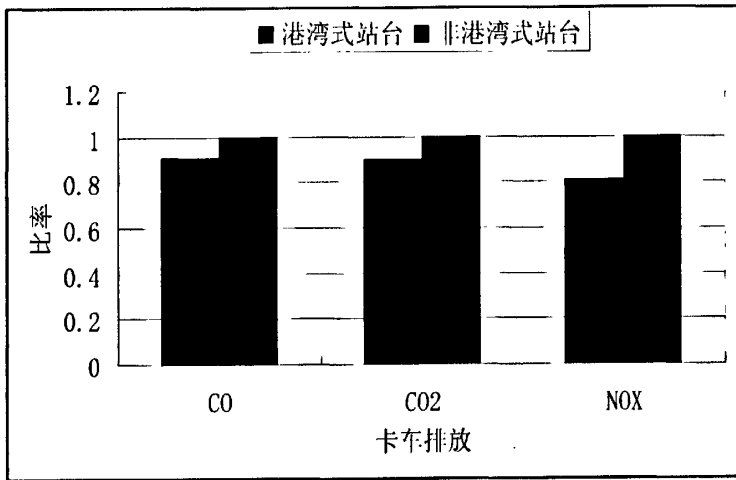


图 6.5 不同公交站台形式车辆排放对比

仿真结果 (表 6.2 和图 6.5) 表明, 采用港湾式公交站点交叉口车流的平均速度有所增加, 增幅约 5%。在这种设站方式下, 公交车进、出站及停靠的全

过程相对独立, 对其它车辆造成的干扰被降低。由于整体车速的提高, 车辆的运行工况有所改善, 各种车型 CO 和 CO₂ 的排放都有减少。同时, 卡车和公交车的 NO_x 排放是减少的, 小车的 NO_x 排放则有所增加, 这是因为虽然卡车和公交车速度有所增加会导致 NO_x 的增加, 但其在低速下的增加幅度小于由于工况改善带来的 NO_x 减少, 而小车的情况刚好相反, 因此出现相反的排放趋势。总体而言, 采用港湾式公交站点对减少车辆排放是有帮助的。

6.3 车队组成对机动车排放的影响

车队组成包括两层的定义: 一是各种类型车辆如小型客车、中型客车、卡车、公交车等在车队中所占的比例; 二是不同排放标准车辆所占的比例。如前所述, 对城市车队组成的管控是治理机动车排放的一个重要策略, 往往对改善交通环境起着决定性的意义。下面仍以小东门路口为例研究不同车队组成对车辆排放的影响。

6.3.1 车队中不同排放标准车辆组成对排放的影响

随着城市的发展, 对车辆排放要求也越来越高, 低排放标准的车辆为日益严格的法规所限制而被淘汰, 以北京为例, 2009 年对于车辆的排放标准及黄标车的划分标准如图 6.6, 排放标准低于国 I (含国 I) 的车辆都定义为高排放车, 由于我国套用的是欧洲标准, 国 I 基本上就是欧 I。

北京市机动车污染物排放标准实施情况															
	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
轻型汽车				国1			国2			国3				国4	
重型汽油车					国1				国2					国3	
重型柴油车					国1				国2					国3	国5
摩托车						国1				国2					
轻便摩托车						国1				国2					
农用运输车														国1	
道路用移动机械														国1	
油品										国2					国3

图 6.6 2009 年北京市机动车污染物排放标准实施情况

为了研究不同排放标准车辆比例对排放的变化影响, 本文在其他条件不变的情况下, 依次改变车队中不同排放标准车辆的比例进行仿真, 其中欧 II 排放标准车辆比例由 100% 依次递减到 0, 欧 III 排放标准车辆比例由 0 依次递增至 100%。仿真结果见图 6.7~6.9。

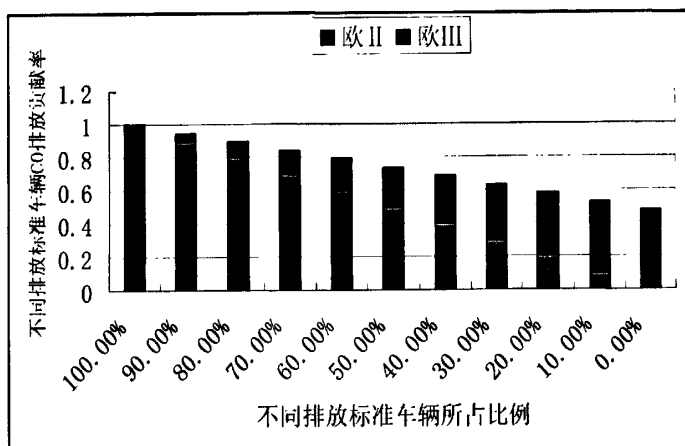


图 6.7 不同车队组成 CO 排放量变化情况

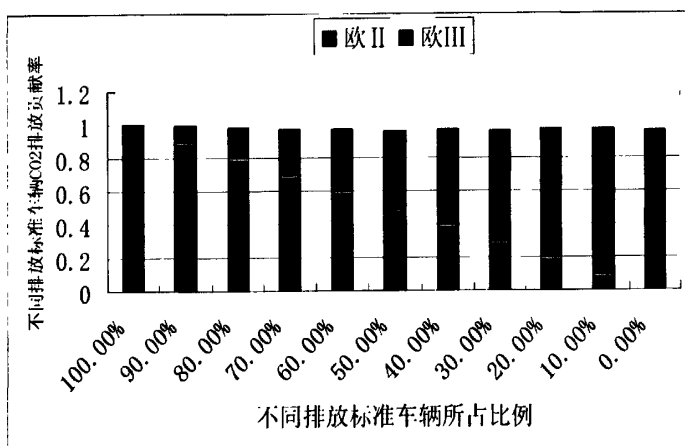


图 6.8 不同车队组成 CO₂ 排放量变化情况

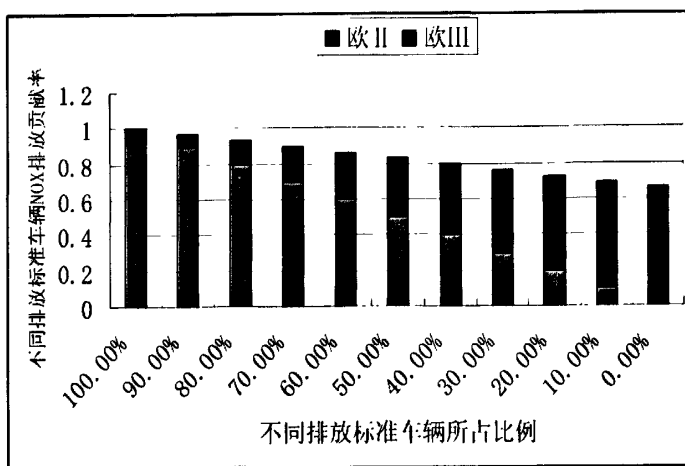


图 6.9 不同车队组成 NO_x 排放量变化情况

从仿真结果可以看出,CO 和 NO_x 的排放量与各类排放标准车辆在车队中所占比例有很强的相关性。高排放标准的车辆所占比例越大,车队总排放水平就越低,减排效果就越明显。而 CO₂ 的排放量与车队组成则无明显的相关关系。由此可以得到以下结论:车队 CO 和 NO_x 的排放依变于车辆的技术类型,而 CO₂ 对车辆的技术类型并不敏感,只与车辆功率大小有关。因此,要想减少城市交通污染物 CO 和 NO_x 的排放,最重要的是减少高排放车辆的比例,尽快限制并淘汰低排放标准车辆的使用。对于 CO₂ 的减排,主要是控制高油耗车辆的比例。政府应鼓励居民购买并使用小排量、低油耗的机动车。

6.3.2 车队中不同行驶里程数车辆组成对排放的影响

车辆污染物排放量随着行驶里程的增加会出现不同程度的劣化,为了了解车队中不同行驶里程数车辆组成对排放的影响程度,如上节研究方法一样,本文在仿真中依次改变车队中不同行驶里程数车辆的比例并对结果(图 6.10~6.12)进行分析研究。

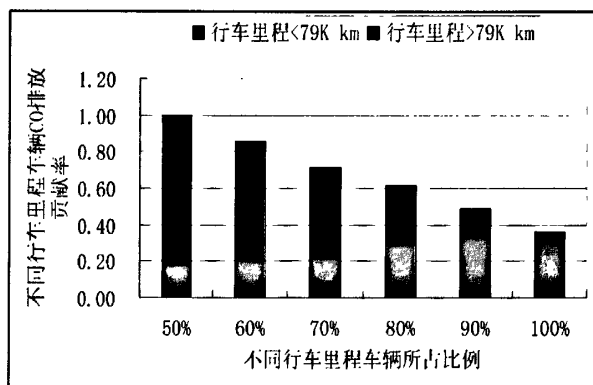


图 6.10 不同车队组成 CO 排放量变化情况

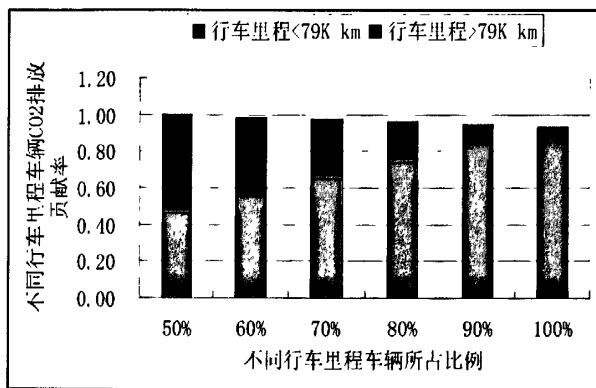


图 6.11 不同车队组成 CO₂ 排放量变化情况

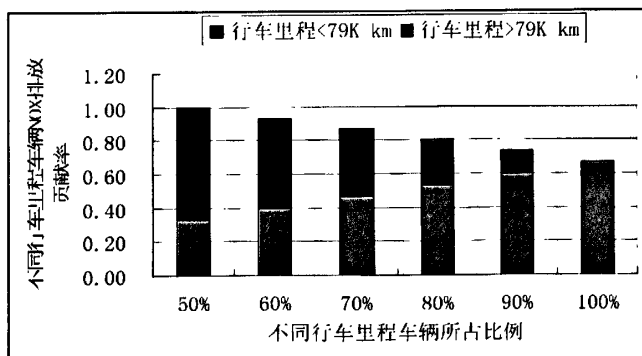


图 6.12 不同车队组成 NO_x 排放量变化情况

从图中可以发现，对于 CO 和 NO_x 而言，和上节结果相似，其排放量与不同行车里程车辆所占车队比例是强相关关系，但对于 CO₂ 情况有所不同，从图 6.11 发现随着较小行车里程车辆比例的增加，CO₂ 是略有减小的，说明行车里程对车辆的整体效率是有影响的，随着车龄的增长，车辆的磨损、油耗也随之增长，对应的 CO₂ 也会增加。因此，从减排的角度出发，制定积极合理的车辆报废标准，鼓励车辆以旧换新是十分必要的。

6.3.3 车队中卡车限行对排放的影响

在城市交通控制策略中，有一项就是针对卡车特别是大型车辆的分时段限行，其出发点是因为大型车辆占路面积大，提速慢，通行效率低，已成为目前高峰期交通拥堵的主要因素；同时由于大型车辆大部分采用的是柴油发动机，其对城市的 NO_x 和 PM 贡献率也非常大，下面对交叉口实施卡车限行策略前后进行仿真，重点研究在此策略下各种车辆排放物的变化情况。

仿真中仍假设路口到达率为高峰小时的 70%，对车队卡车限行前后进行仿真计算，车队中各种车辆比例见表 6.3。

表 6.3 不同比例高排放车的车队组成情况

车 型		I		II	
		技术类型	比例%	技术类型	比例%
小 车	满足排放标准	181 (欧 II)	30	181 (欧 II)	30
		117 (欧 II)	30	117 (欧 II)	35
		189 (欧 III)	30	189 (欧 III)	35
卡 车	满足排放标准	1084	10	—	0
合 计		—	100	—	100

对比限行前后的仿真结果（见表 6.4），可以看出通过交叉口车辆的平均速度增加了 6%；车辆的污染物排放量也有不同程度地减少，尤其是 NO_x 和 PM 的排放量大为减少。由此可以看出，对大型车辆的限行除了能提高道路通行能力外还可以有效减少包括 NO_x 和 PM 在内的车辆污染物排放。

表 6.4 卡车限行前后仿真结果对比

方案	平均速度	车辆单位距离的污染物排放量(g/km)			
		CO	CO ₂	NO _x	PM
I（卡车限行前）	30.8	8.6	213	1.37	0.023
II（卡车限行后）	32.6	7.5	202	0.41	0.006
两种方案的对比	+6%	-13%	-5%	-70%	-74%

6.4 信号灯配时优化对机动车排放的影响

前面讨论了道路设施情况和车队组成情况对交叉口车辆排放的影响，下面讨论信号灯配时变化对车辆排放的影响。

城市交叉口信号配时优劣不仅直接影响到交叉口的交通控制效果，还影响交叉口的车辆行驶状况和路网交通运行状况。以往研究多数都是以交通延误、排队长度等纯交通学指标来优化信号配时，而很少考虑到环境指标、经济学指标和其他辅助指标。本节基于提高交叉口通行能力和减少车辆排放的多目标对交叉口信号配时进行优化，以达到既能改善道路交通能力又能保护环境的目的。

6.4.1 优化模型

基于交叉口通行能力与信号控制之间的关系以及车速及车辆行驶工况与机动车污染物排放之间的关系。本文建立交叉口机动车通行能力和污染物排放量与交叉口信号配时的数学模型。模型以交叉口的通行能力（平均车速）为目标函数，机动车各种污染物排放（单位时间的排放量）为主要约束条件。转化为数学优化问题就是：

$$\text{Min } f(x), x \in R^n \quad (6.1)$$

$$\text{s.t. } g(x) \geq 0$$

其中 $f(x)$ ， $g(x) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_n(x))^T$ ， $g_i(x)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 均为定义在 $X \subset R^n$ 上的实值函数。 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为交叉口的信号配时方案，包括信号周

期时长、各相绿灯时长以及相位顺序等； $f(x)$ 为交叉口的通行能力； $g(x)$ 为约束条件组成的列向量，主要约束条件为交叉口特定条件下机动车各种污染物的排放量，与单位时间内车辆的数量、车辆的类型、车队组成，平均车速、行驶工况等因素有关。它和交叉口的气象环境、背景浓度以及交叉口街谷尺寸等构成了交叉口当时的大气污染物浓度，必须满足小于环境质量标准。

6.4.2 遗传算法^{[107]-[109]}

将实际问题抽象为数学模型后，就必须在对设计变量、目标函数、约束条件分析的基础上，寻求有效的优化方法，以求得模型的最优或近似最优解。按照解决问题的基本思想不同，传统最优化算法可以分为以下类型：

(1) 解析法亦称为间接法，又称乘子法，以数学表达式描述非线性规划问题，并利用数学分析方法求出目标函数和约束函数的导数，用解析法求出函数的极值，而后按充要条件确定其最优解。因为在迭代过程中要用到函数的导数，所以要求函数一定是连续可微的。如最速下降法、Newton法、变尺度法、Lagrange乘子法、梯度法、Kelley法等。

(2) 数值解法又称为直接法，以数值解法进行迭代计算，根据一定的收敛判别条件，逐步逼近最优点。一般在非线性问题的目标函数的数学表达式比较复杂，函数不可导或求导困难时使用。如坐标轮换法、单纯形法、复合形法、约束降维法、可变容差法等。

传统优化算法的共同特点是：对于复杂工程设计、评估等优化问题，收敛速度慢，难以找到全局最优解。大量的研究实践表明，应用数学规划等经典的数学方法来求解此类优化问题的效果不够好。随着计算机计算能力的不断增强和计算机技术不断发展，从20世纪70年代开始，研究人员开始利用计算机及计算机技术解决此类问题，并获得了很多的研究成果，出现了一些解决上述复杂优化问题的新的方法技术及新的优化算法。

新的优化算法主要是以求解问题的近似满意解为特征的，如模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)、微粒群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)等。上述算法被统称为“智能优化算法”。鉴于待求解问题的复杂性，精确算法的计算复杂度很高，在可接受的计算时间内无法求出问题的确切最优解。与经典数学规划的求解目标截然不同，智能优化算法的目标并不是求解待优化问题的

最优解，而是在可接受的计算时间内获得问题的近似满意解。对于很多经济系统和工程优化问题来说，由于存在大量的随机因素，往往也没有确切的最优解，因此很适合采用智能优化算法求解此类问题。

(3) 遗传算法 (GA) 是一种基于自然选择原理和群体遗传学机制的参数全局搜索 (寻优) 方法。遗传算法在搜索时考虑了问题解空间中多点搜索，从而减少了陷入局部最优解的可能性，具有顽强的鲁棒性。它并不需要对象的特定知识，也不需要对象的搜索空间连续可微，特别是对于传统的优化算法不能有效求解的非凸、非线性规划问题，遗传算法具有明显的优势，因而在优化领域有着广泛的应用。而交通系统本身就是一个随机性、离散的非线性系统，采用传统的优化方法往往无法满足其要求。目前，遗传算法已被广泛地应用到交通运输领域。

6.4.3 优化仿真模型的组成和实现的步骤

本文在城市微观仿真模型和 IVE 排放模型的基础上建立基于遗传算法的交通信号动态优化配时模型，对交叉口在车辆污染物排放约束下的交通通行能力最优 (大) 值进行仿真评估。模型由两大部分组成，即带有 IVE 排放子模型的城市交通微观仿真模型和基于遗传算法的优化控制模型，其关系如图 6.13 所示：

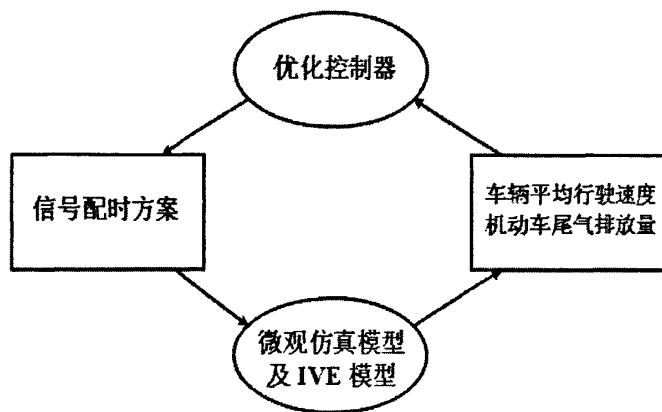


图 6.13 系统组成

具体实现步骤的流程图如图 6.14 所示：

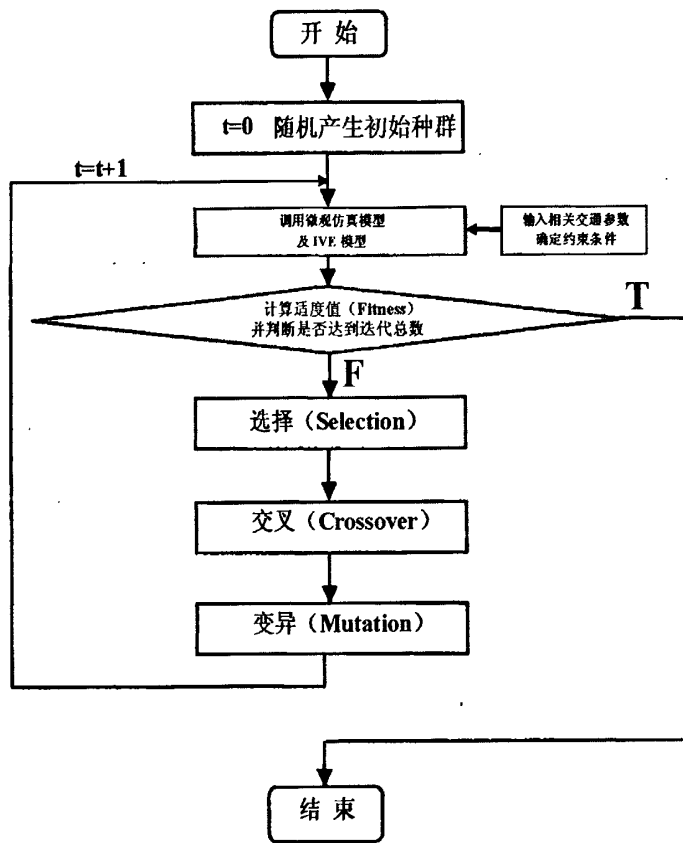


图 6.14 基本流程图

相关交通参数可以由微观交通仿真模型获得，也可以通过实地调查获得，做成数据库以备调用。机动车各种污染物排放的约束条件可以通过在实地测量数据或城市街道峡谷机动车尾气扩散模型仿真的基础上根据大气环境质量标准确定。

6.4.4 遗传算法的设计

1) 优化目标

假设要最大化 i 个目标函数，则

$$obj = \sum_i \omega_i obj_i \quad (6.2)$$

其中： ω_i 代表权重系数，表示各目标的重要度，满足 $\sum_i \omega_i = 1$ 。 obj_i 代表各优化目标，如平均速度、停车次数、尾气排放量等。

在城市交通信号优化配时中的目标函数并非都是求其最大值。例如，对于延

误、停车次数、尾气排放量等目标函数追求其最小值，而对于平均速度等目标函数则追求其最大值。因此如果是最小化目标函数，则需将其进行最大化的变换。

2) 编码

每一个体向量由需优化的参数组成， $X_m = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。本文中 $x_i (i = 1 \dots n)$ 表示交叉口各相绿灯的时长。因解空间为正整数，故而采用实数编码的原则，随机产生满足条件的种群个体。

3) 选择

本文采用最常用的比率选择法。

4) 交叉和变异

为了提高迭代速度，本文采用自适应的遗传算法。自适应的交叉率 p_c 和变异率 p_m ，其计算表达式为：

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ p_{c1} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (6.3)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2})(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}} & f \geq f_{avg} \\ p_{m1} & f < f_{avg} \end{cases} \quad (6.4)$$

上式中 p_{c1} 、 p_{c2} 是交叉率的上下限值， p_{m1} 、 p_{m2} 是变异率的上下限值； f_{max} 、 f_{avg} 、 f' 、 f 分别代表群体中最大的适应度值、每代群体中的平均适应度值、要交叉的两个个体中较大的适应度和要变异个体的适应度值。

另外，在程序中还实施了 Keep The Best 策略，采取这种策略有助于遗传算法的收敛。其具体做法为：将第 0 代中得到的最优个体及其适应度值保留起来；从第 1 代开始，将每一代中得到的最优个体和前一代的保留个体进行比较，如果刚得到的最优个体优于前一代保留个体，则它将成为当前代的保留个体，否则将前一代保留个体作当前代保留个体。

6.4.5 优化实例与分析

现选取典型的多车道双向、四相位信号灯控制十字交叉路口进行仿真优化研究。

1) 交叉口的描述

交叉路口交通流分布如图 6.15 所示，图中，交叉路口东、南、西、北 4 个

方向的进口道路均分为 3 个车道，分别为左转车道、直行车道和右转车道。相位分布及顺序如图 6.16 所示：第一相位，东、西向进口道的直行，其他交通流禁止通行；第二相位，东、西向左转，其他交通流禁止通行；第三相位，南、北向直行，其他交通流禁止通行；第四相位南、北向左转，其他交通流禁止通行；所有右转车辆不受限制。交叉口各 OD 对的车辆到达率见表 6.5，服从泊松分布。信号灯周期 C 为 120 秒，各相位的绿灯时间约束为 $12 < gi < 60$ ，以保证每个相位车辆有足够时间穿越交叉口。

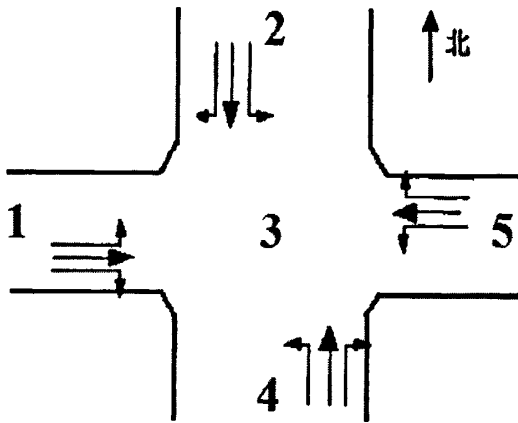


图 6.15 交叉口交通流分布图

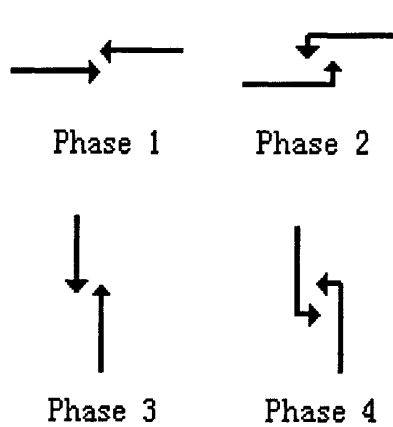


图 6.16 信号灯相位分布及顺序

表 6.5 路口高峰小时的车辆到达率

OD 对编号	起点 O	终点 D	到达率 (辆/秒)
1	1	2	0.1
2	1	4	0.1
3	1	5	0.4
4	2	1	0.2
5	2	4	0.3
6	2	5	0.2
7	4	1	0.2
8	4	2	0.4
9	4	5	0.1
10	5	2	0.4
11	5	1	0.2
12	5	4	0.1

2) 模型仿真

本文中遗传算法的最大进化代数 and 种群大小分别为 50 和 50；个体向量为信号灯每个相位的时长；优化目标是交叉口通过车辆的平均速度；约束为单位时间车辆污染物的单位距离的排放量，本文选取 CO 这种对大气环境影响最大的污染物作为约束目标；对于优化中约束的处理，模型采用的是罚函数的方法，即当个体违反约束条件时，对该个体的选择概率乘上一个小于 1 的罚系数，其大小取决于个体违反约束条件的程度。交叉和变异中自适应的交叉率 $p_{c1} = 0.9$ ， $p_{c2} = 0.6$ ，变异率 $p_{m1} = 0.1$ ， $p_{m2} = 0.001$ 。最初信号配时为每相 30 秒。

3) 无优化配时仿真

从路口各个方向的车辆到达率可以看出南北直行、东西直行以及东进口右转弯流量很大，按照各转向方向等时分配的方案显然是不合理的，按这种配时方案进行仿真，车辆平均速度和污染物排放量计算结果如表 6.6，因为右转不受信号灯限制，所以表中没有列出右转车道车辆的情况。

表 6.6 优化前路口交通情况和污染物排放情况

路段 ID	车道 ID	在线车辆数	怠速车辆数
13	0 (左转)	9	2
	1 (直行)	103	63
23	0 (左转)	46	5
	1 (直行)	90	83
43	0 (左转)	7	2
	1 (直行)	112	56
53	0 (左转)	12	4
	1 (直行)	83	68
合计		462	283
平均车速 (km/h)	10.14		
污染物排放总量(g)	CO	18394.8	
	CO ₂	141883.3	
	NO _x	711.5	

4) 无约束优化配时仿真

下面利用遗传算法对交叉口的信号灯配时进行无约束优化，即并不把车辆污染物排放量作为约束条件，仅把路口的平均车速作为优化目标。

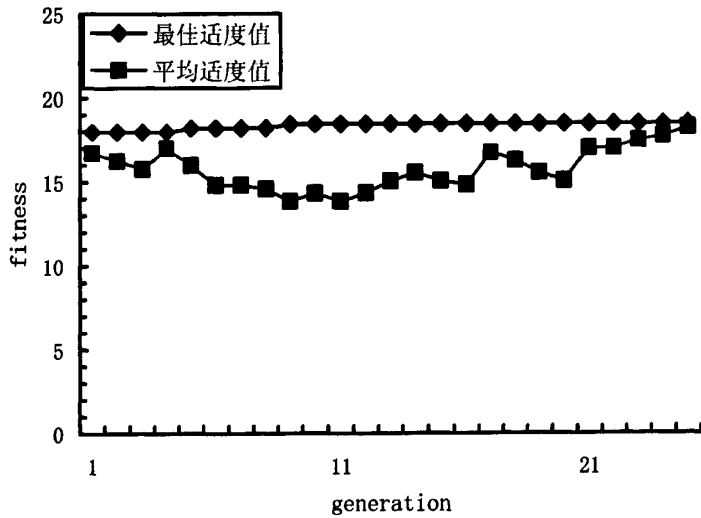


图 6.17 历代适应度曲线

由遗传算法所计算的每一代适应度和平均适应度值如图 6.17 所示，可以看出其在第 9 代左右即收敛至最大值，适应度也在 21 代以后趋于最佳适应度值。优化后信号灯配时方案如下：周期仍然是 120 秒，各个方向新的配时如表 6.7，新的方案对交叉口南北直行和东西直行有很长的绿灯时间，满足了这两个方向的较高的车流量，同时对车流量较少的东西左转限制其通行时长，从到达率的角度看优化配时方案是适当的。

表 6.7 优化后的配时方案

相位	时长(s)	相位分布	说明
1	40		南北直行
2	27		南北左转
3	40		东西直行
4	13		东西左转

对于优化后的交通情况和车辆污染排放情况以及和无优化方案的对比见表 6.8。从表中可以看出优化配时的效果是明显的，车速有 81%地增加，总怠速车

辆减少 53%，表明车辆拥堵情况在配时优化后有显著的减轻。

表 6.8 优化前后路口交通情况和污染物排放情况

优化方案				对比无优化方案
路段 ID	车道 ID	在线车辆数	怠速车辆数	
13	0 (左转)	17	10	8/8
	1 (直行)	81	46	-22/-17
23	0 (左转)	32	12	-14/7
	1 (直行)	51	0	-39/-83
43	0 (左转)	17	9	10/-2
	1 (直行)	78	30	-34/-26
53	0 (左转)	23	12	11/4
	1 (直行)	22	14	-61/-54
合计		321	133	-141/-150
总行驶里程 (km)	215.3	平均车速(km/h)	18.4	181%
污染物排放量(g)		CO	16001.9	87%
		CO ₂	128498.3	90.6%
		NO _x	646.9	90.9%

此外，CO、CO₂ 和 NO_x 的总排放量都减少了，其中 CO 大约减少了 13%，CO₂ 和 NO_x 的总排放减少量差不多都是 10%，通过对仿真结果的研究，发现路口单位时间内，车辆的总行驶里程增加了 36%，这说明车辆从较低的速度增加到较高的速度时，单位 CO 排放量是减少的，符合机动车的 CO 的排放规律，车辆的速度越大，单位距离的 CO 排放应该是递减的；但 CO₂、NO_x 的单位距离排放也是减少的。对仿真车辆的工况进行取样调查（表 6.9），尤其是对车队加速度的情况进行更为详细的划分，发现在优化信号灯配时方案后，车辆的速度得到了增加，怠速的比例大为减小，匀速比例增加较多，同时车辆在不同加速度区间的比例变化不是很大，这表明车辆在信号灯配时未优化后，怠速时的排放大大减少，从而减少了 CO₂ 和 NO_x 的单位排放，再次证明了优化信号灯配时对车辆污染物排放的减少有明显的效果。

表 6.9 信号灯配时优化前后车队工况情况对比

车队工况情况 (加速度 $a \text{ m/s}^2$ 、速度 $v \text{ m/s}$)	优化	无优化
-0.1 > a >= -1	13.4	10.0
-1 > a >= -2	1.6	1.1
-2 > a >= -3	0.8	0.6
-3 > a	2.2	2.3

续表 6.9 信号灯配时优化前后车队工况情况对比

车队工况情况 (加速度 a m/s ² 、速度 v m/s)	优化	无优化	
加速比例%	$0.1 < a \leq 1$	9.6	8.0
	$1 < a \leq 2$	3.6	3.2
	$2 < a \leq 3$	3.8	4.3
	$3 < a$	0.6	0.7
怠速比例%	$-0.1 < a < 0.1, v < 0.1$	35.1	48.9
匀速比例%	$-0.1 < a < 0.1, v \geq 0.1$	29.3	20.9

5) 有约束优化仿真

为了满足大气环境质量的要求,在某个区域内的特定时空环境里,往往对区域内机动车单位时间内排放的污染物总量进行限制,这不仅要求机动车个体的排放因子要小,而且行驶的车辆数也是有限制的,因为如果车辆数太大,机动车排放仍然可能超标,导致大气环境恶化,因此如何在单位时间内机动车排放的限制下最大程度地提高道路的通行能力也就成为交叉口信号灯优化的目标之一。

在上述无约束配时优化仿真研究中,一个周期内(120s)交叉口车辆CO排放大约为16,000g,现将CO的路段排放量在其基础上按一定百分比进行限制,并采用罚函数方法进行优化,罚函数 f 采用下面的公式。

$$f = (LimitCO / EmissionCO)^2 \tag{6.5}$$

其中 $LimitCO$ 为CO的限制值, $EmissionCO$ 为配时信号采用每代个体仿真对应的CO值。采用这种形式的罚函数可以在约束条件不能满足的情况下,找到次优解。仿真对比结果见表6.10。

表 6.10 不同CO限制约束的优化仿真对比

CO排放的限制比例	信号灯相位时长分配情况(s)	交叉口CO排放总量(g)	交叉口CO单位排放量(g/km)
98.75%	(48,14,41,17)	15781.9	69.6
96.5%	(42,20,35,23)	15399.1	66.6
94.75%	(39,19,26,36)	15002.4	64.3
92.5%	(42,16,19,43)	14797.6	63.3
90.5%	(42,16,19,43)	14797.6	63.3
87.5%	(42,16,19,43)	14797.6	63.3

从仿真计算对比发现，通过排放作为单一约束值进行信号控制优化时，实际优化效果并不显著。在绝大多数情况下，交通通行能力的最大优化和车辆排放的最小优化结果是一致的。提高通行能力就能达到改善交通污染物排放的目的。

6.5 交叉口禁左对车辆排放的影响

在交叉口，由于不同方向的交通流汇合、分流，形成诸多冲突点和交织点，使交通情况复杂，对平面交通带来很大的压力。为了解决这个问题，交叉口一般采用信号灯控制的方式来分配不同方向交通流的通断以减少冲突点和交织点。对于十字路口而言，四相位信号控制最为普遍，然而采取四相位控制会使每个信号相位分得的有效绿灯时间减少，实际每条车道的通行能力降低，从而降低了整个交叉口的通行能力。因此采用禁止左转减少交叉口的信号相位成为提高交叉口通行效率的一种手段。

本章利用微观仿真对禁左带来的机动车排放变化进行研究。图 6.18 是四相位控制和采用禁左后两相位控制的交叉口交通流分布图。它们对应的配时方案见表 6.11（其中右转不限），路口各个方向的到达率参看表 6.12，仿真结果见表 6.13。

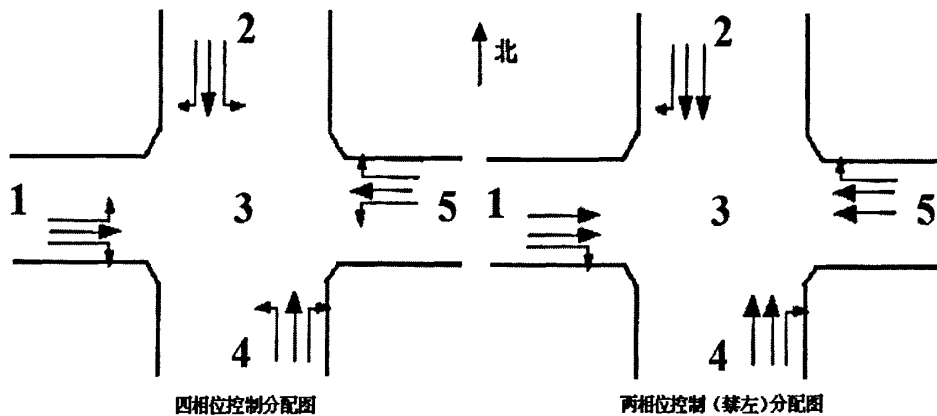


图 6.18 四相位控制和采用禁左后两相位控制的交通流分布图

表 6.11 四相位控制和采用禁左后两相位控制的配时方案

	四相位控制 (周期时长 120 秒)				两相位控制 (周期时长 60 秒)	
相位	I	II	III	IV	I	II
相位分布						
时长	30 秒	30 秒	30 秒	30 秒	30 秒	30 秒
说明	南北直行	南北左转	东西直行	东西左转	南北直行	东西直行

表 6.12 四相位控制和采用禁左后两相位控制的路口各方向车辆到达率

OD 对编号	起点 O	终点 D	到达率 (辆/秒)	
			四相位控制	两相位控制
1	1	2	0.1	—
2	1	4	0.1	0.15
3	1	5	0.1	0.15
4	2	1	0.1	0.15
5	2	4	0.1	0.15
6	2	5	0.1	—
7	4	1	0.1	—
8	4	2	0.1	0.15
9	4	5	0.1	0.15
10	5	2	0.1	0.15
11	5	1	0.1	0.15
12	5	4	0.1	—

表 6.13 四相位控制和采用禁左后两相位控制的仿真结果

		四相位控制	两相位控制
平均速度(km/h)		29.0	57.4
车辆工况(%)	减速比例	22.6	25.3
	加速比例	21.4	26.8
	怠速比例	36.7	6.4
	匀速比例	19.3	41.5
CO 总排放量(g)		2773	2750
CO ₂ 总排放量(g)		73097	68645
NO _x 总排放量(g)		444	438
CO 单位距离排放量(g/km)		13.6	11.9
CO ₂ 单位距离排放量(g/km)		358.5	297.6
NO _x 单位距离排放量(g/km)		2.2	1.9

从仿真结果看,采用禁左方案后,由于增加了直行方向的通行时间,车辆速度大幅提高,约增长了一倍。从车辆工况中也反映出,车辆怠速比例减少了30.3%,匀速比例增加了22.2%,车辆几乎以不停车方式通过了路口,道路的通行能力自然就得到很大提高。从机动车排放的角度观察,由于工况的改善,车辆单位距离的污染物排放量都减少了约15%(图6.19)。但在总量上,除CO₂外,其他污染物减少量不是很明显。这是由于通行能力的增加而使更多的车辆经过路口造成的。总得说来,禁左的管控措施对减少车辆单位距离的排放是很有效的。

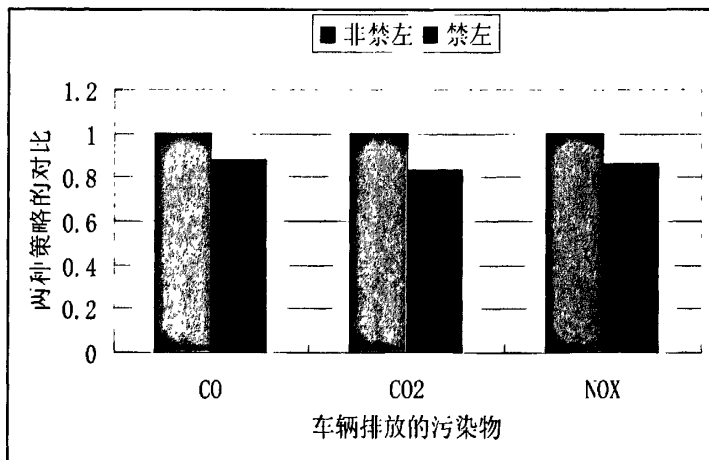


图 6.19 禁左和非禁左对车辆排放的影响

6.6 本章小结

本章运用带排放模型的交通微观仿真模型评估城市交通管控措施对机动车排放的影响，并获得一些积极的结果。

1) 对单路段下车辆排放与不同车辆到达率和路段速度的关系进行了研究。通过仿真分析发现，在稀疏流中限速对排放影响明显；而在稠密流中，限速对排放的影响不大。

2) 对车辆排放与公交站点形式、车队组成以及信号灯配时之间的关系进行了仿真研究；同时，对交叉口采取禁左控制方法进行仿真，发现禁左即可以较大幅度地提高路口的通行能力，同时对车辆单位距离排放也有一定的效果。

3) 对信号灯配时进行基于遗传算法的多目标优化研究，通过优化可以在控制车辆污染物排放量的前提下获得最佳的交通指标。

第7章 总结与展望

7.1 本文主要工作

随着中国城市化进程的不断加速以及人们生活水平的日益提高,城市环境问题、尤其是城市交通污染越来越为人们所关注。我国国家环境保护总局就有研究报告指出,城市道路机动车的尾气排放已经成为我国城市大气污染的最主要贡献源。如何有效降低并解决交通污染成为急需解决的重大课题。

本文在城市交通微观仿真模型的基础上,研究并耦合本地化的 IVE 排放模型,对不同交通管控策略下的城市机动车排放进行分析,为从不同角度寻求治理交通污染的途径和方法做了探索。

具体工作如下:

1) 对 IVE 排放模型进行接口开发

运用 C 语言对国外成熟的适合发展中国家的 IVE 排放模型进行软件开发,并完成了 IVE 模型与其他交通仿真模型的接口程序,使之具有良好的兼容性和可移植性。同时,运用二次开发的 IVE 模型对交叉口机动车排放进行仿真研究,分析排放与绿信比和车辆到达率的作用关系。

2) 对 IVE 排放模型进行本地化处理

IVE 模型为国外的排放模型,为了使计算结果更符合当地车辆排放情况,本文参阅大量文献资料,并做了相关数据的调查和试验,对输入参数中的天气情况、地理情况、车辆的 I/M 制度、燃油情况、城市路网情况、车队组成情况进行了甄别和选择,以符合武汉市的具体情况,同时运用在线测量的车辆排放数据与 IVE 模型的计算数据进行对比分析,初步获得武汉市轻型车的地区修正系数,使 IVE 模型能较准确的计算和评估武汉市的机动车排放情况。

3) 完善和改进城市交通微观仿真模型

在商榷城市交通微观仿真模型的基础上,增加了公交车运行模型和路径选择模型,并在交通调查的基础上对一些相关数据进行了验证和确定。

公交车运行模型从微观的角度对公交车进出站事件进行仿真,并对不同形式的公交站台对交通的影响进行评估;路径选择模型在考虑转向延误的情况下对路网模型进行改进,同时通过 Floyd 算法寻找车辆在路网中的最短行程时间。

4) 通过微观交通流仿真方法研究交通管控策略对机动车排放的影响

利用本文搭建的仿真平台,对路段、交叉口和路网的机动车排放情况进行仿真,分析和研究多种交通管控措施对机动车排放的影响,包括路段限速、禁左、公交站点形式、信号灯控制策略、车队及车龄组成等不同情况下机动车不同污染物的排放规律,得出了一些有益的结论。

7.2 创新点

1) 研究并建立适用于武汉市的本地化 IVE 排放模型

目前,国外已有许多成熟的机动车排放模型。这些模型都是基于国外的交通系统特点、城市环境、车辆使用和保养情况而建立的,与我国国情存在很大的差异。因此,为了更好的对本地交通排放进行分析和研究,必须建立本地化的机动车排放模型。这一工作,在我国仅有北京、上海进行过研究。

本文针对武汉市交通和环境特点,在调研和试验的基础上,对 IVE 排放模型进行了本地化的研究,使该模型在武汉地区使用具有更准确的计算结果和指导意义。

2) 对 IVE 模型进行二次开发并与微观交通流仿真模型耦合

虽然现有的绝大多数商业交通流仿真软件能够进行排放分析和研究,但是其核心模型不允许用户针对本地实际情况进行完善和二次开发,这样就会造成仿真结果的误差。

本文对国外成熟的适合发展中国家的 IVE 排放模型进行二次开发,提升了 IVE 模型的可扩展性和可移植性。并使之与武汉理工大学自主开发的城市道路微观交通流仿真模型耦合,可主要用于武汉市交通流特性及其排放分析与研究。今后,如果能获取其他城市的机动车排放数据,该模型还能快速的本地化,更有效地应用于其它城市的交通系统研究中。

3) 研究主要交通管控措施对机动车排放的影响

分析和评价交通管控措施的有效性,是当前交通流仿真模型的一项重要应用。本文借助自主搭建的仿真平台,就包括车道限速、禁左、公交站点形式、信号灯控制策略等在内的主要交通管控措施对机动车排放的影响进行了深入研究,取得了有意义的研究成果。

7.3 展望

由于时间和研究条件的限制,本文的工作还存在不足之处。下一阶段,拟

就如下几个方面继续深入研究：

1) 深入 IVE 模型本地化研究工作，增加对相关交通管理部门的调研，开展深入的排放在线实测，获取更准确的武汉市在线机动车排放数据；

2) 基于对路段和交叉口的交通与机动车排放的研究成果，开展城市交通路网的研究；

3) 针对城市大气环境污染的研究热点，将带排放模型的交通仿真模型与城市大气扩散模型耦合，研究交通污染排放与扩散。

致 谢

本文的研究工作是在导师高孝洪教授的悉心指导下完成的。在此论文完成之际，谨向先生致以崇高的敬意和衷心的感谢。回想师从先生与之交往的几年时间，每每与先生交流都能让我受益匪浅、获益良多。尤其在论文撰写和修改过程中，先生以缜密的逻辑、敏锐的思维，深刻的洞察帮助我对论文和材料进行梳理，并逐渐呈现论文价值。他渊博的学识，看问题的高度和角度，迅速把握问题实质的能力以及终生学习的精神给我留下了深刻的印象，值得我不断学习。然先生严厉而不失宽容的气度，淡定而兴趣广泛的生活态度，乐于关心帮助晚辈的成长精神，尤为令我敬佩，铭记终身！

同时在此还要特别感谢商蕾副教授，她在论文创作期间给予的帮助和带来的鼓励是我完成论文的巨大动力；感谢博士同门师兄弟金华彪，雷伟，高海波，游伏兵，陈丹等的关心帮助以及论文撰写方面的建议。

此外，感谢严新平教授、吕林教授和吴超仲教授为论文提供数据支持，感谢能动学院和轮机系领导的关心，督促以及在工作安排上的大力支持。

最后，我要感谢我的家人，他们默默地奉献和支持使我能将更多的精力投入到论文创作中，谨以此论文献给我亲爱的家人，以及所有关心、鼓励我的人，谢谢你们！

参考文献

- [1] 王炜等. 城市交通系统能源消耗与环境影响分析方法[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] 交通运输业如何减排. [2009-8-23].<http://www.cssponline.com/Magazine/ArticleShow.asp?ArticleID=1195>
- [3] 伏晴艳等. 上海市空气中 NO_x 的污染现状及分担率[J]. 上海环境科学,2001, 20(5): 224~232
- [4] 金小山. 广州市机动车尾气污染现状及控制措施[J]. 交通节能与环保,2009,(3):20~23
- [5] 杨清玲. 重庆市主城区机动车污染分担率研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2009,34(4):173~177
- [6] 杭州市机动车排气污染现状. [2009-03-20]. <http://www.hangzhou.gov.cn/main /zwdt/ztzj/dqwrzxzz/hahaha/T281427.shtml>
- [7] 中华人民共和国国家统计局统计数据. <http://www.stats.gov.cn/tjsj>
- [8] 樊颖玮. 城市交通可持续发展问题的思考[J]. 交通与运输 2006,(2):66~68
- [9] Serge P. Hoogendoorn, Piet H.L.Bovy, State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling, Special Issue on Road Traffic Modelling and Control of the Journal of Systems and Control Engineering, 2000.
- [10] 杨兆升. 城市交通流诱导系统理论与模型[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [11] 李勤. 现代内燃机排气污染物的测量与控制[M]. 北京:机械工业出版社,1998
- [12] 李铁柱,王炜,李修刚. 城市交通规划中机动车空气污染影响分析技术及其应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(2): 90~96.
- [13] H.Christopher Frey, Alper Unal, Nagui M Roupail and et al. On-Road Measurement of Vehicle Tailpipe Emissions Using a Portable Instrument. Air & Waste Manage.2003. Assoc. 53
- [14] Roupail, N.M, Frey, H.C, Unal and et al. ITS Integration of Real-Time Emissions and Traffic Management Systems, IDEA Project No. ITS-44, Prepared by North Carolina State University for the IDEA Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. May 2000.
- [15] Barth, M, Norbeck, J, Ross, M, Wenzel and et al. Phase 2 Interim Report for NCHRP 25-11 Development of a Modal Emissions Model; Prepared by University of California, Riverside; University of Michigan; Ford Motor Company for Transportation Research Board; Riverside, California, 1997.
- [16] De Vlioger. On-Board Emission and Fuel Consumption Measurement Campaign on Petrol-Driven Passenger Cars; Atmos. Environ. 1997, 31(22), 3753~3761.

- [17] 余志生编著. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,1996(第二版)
- [18] 夏韪. 城市道路轻型车微观排放模型研究[D]. 吉林:吉林大学,2005
- [19] 黄琼等. 机动车尾气排放评价模型研究综述[J]. 交通环保,2003, 24(6):28~31
- [20] 曾天才. 欧洲汽车废气排放评估综合模型体系[J]. 世界环境,2002, (2):38~44
- [21] 贺克斌,郝吉明,付立新. 我国汽车排气污染现状与发展[J]. 环境科学,1996, (4)
- [22] 傅立新. MOBILE 汽车源排放因子计算模式研究[J]. 环境科学学报,1997,17(4):474~479
- [23] 王云鹏,沙学峰. 基于汽车排放评估的交通环境评价方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2004, 34(1):118~121
- [24] 杨延相,蔡晓林,杜青等. 实际道路上的车辆尾气排放因子和燃油消耗的研究[J]. 燃烧科学与技术,2003,9(2)
- [25] 吴其伟,吕林,锁国涛. 城市公交车发动机循环工况的试验研究与建立[J]. 内燃机工程,2006,27(3):73~76
- [26] 邓顺熙. 西安城市交通干道汽车污染物排放因子[J]. 交通环保,1999, (8):7~10
- [27] Du Qing, Yang Yan-xiang, Zhu Di, Cai Xiao-lin. Investigation of Automobile Driving Pattern on Real-Road Condition in Tianjin. Transactions of Tianjin University. 2002, Vol.8 No.4
- [28] Zhao Hui, Cheung C.S, Hung W.T, Investigation of Motor Vehicle On-Road Exhaust Emissions Behavior. Journal of Combustion Science and Technology. 1999, 5(1):100~107
- [29] Thomas J. Fournier. Method of Analyzing Vehicle Emissions and In-Flight Gas Analysis Apparatus. U.S. Patent 5,099,680, 1992] Kurt Gutmann: Method of And Apparatus for Analyzing Exhaust Gases of Motor Vehicles. U.S. Patent 5,105,651, 1992
- [30] Stephen Joel Harris: Modulation Schemes for On-Board Diagnostic Exhaust System. U.S. Patent 5,709,082, 1998
- [31] Breton, L.A.G Real-time On-road Vehicle Exhaust Gas Modular Flow-meter and Emissions Reporting System. U.S. Patent 6,148,656, 2000
- [32] H.C.Frey, N.M. Roupail, A.Unal and J.D. Colyar, Vehicle Emissions and Traffic Measures: Exploratory Analysis of Field Observations at Signalized Arterials. Paper Presented at 2001 Transportation Research Board Annual Meeting
- [33] Michal Vojtisek-Lom, Joseph E. Allsop. Development of Heavy-Duty Diesel Portable, On-Board Mass Exhaust Emissions Monitoring System with NO_x, CO₂ and Qualitative PM Capabilities. SAE paper 2001-01-3641, 2001
- [34] Tong H.Y, Hung, W.T., Cheung. On-road Motor Vehicle Emissions and Fuel Consumption in Urban Driving Conditions. JAWMA, 2000, 50(4):543~554
- [35] 沙学峰. 城市道路机动车动态排放预测模型研究[D]. 吉林:吉林大学,2007
- [36] 董刚,陈达良,张镇顺,等. 机动车行驶中尾气排放的遥感测量及排放因子的估算[J]. 内燃机学报,2003,21:116~119.

- [37] 张建伟,李孟良,艾国和等.车辆行驶工况与特征的研究[J]. 汽车工程,2005,27(2): 221~224.
- [38] 张潇,于雷,宋国华等. 基于 PEMS 技术的交叉口尾气排放特性分析[J]. 安全与环境工程,2006,13(3):132~137.
- [39] 吴超仲,徐成伟,严新平等.基于优化速度模型的城市交通微观尾气排放模型[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2008,32(2):203~205.
- [40] Matthew Barth. Vehicle Emissions Modeling in the U.S.A. Vehicle Emissions Modeling in the U.S.A.. 3rd Japan Clean Air Program Conference Tokyo, Japan.2002
- [41] USA EPA. MOBILE6 User's Manual [M]. Washington:U.S.EPA,2002.
- [42] California Air Resource Board. EMFAC User's Guide [M].U.S. California: California Air Resource Board, 2002.
- [43] Leonidas Ntziachristos, Zissis Samaras. COPERTIII Computer-programme to calculate emissions from road transport User's manual [M]. Kongens ytorv, 2000.5~13.
- [44] William Hendricks Bachman. A GIS-Based Modal Model of Automobile Exhaust Emissions [D].Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2000.9~13.
- [45] Matthew Barth, et al. Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM) User's Guide [M]. California: University of California Riverside, 2000.
- [46] John Koupal, Mitch Cumberworth. Draft Design and Implementation Plan for EPA's Multi-Scale Motor Vehicle and Equipment Emission System (MOVES). Washington: U.S. EPA, 2002.
- [47] An F, Barth M, Norbeck J, et al. Development of comprehensive modal emissions model: operating under hot-stabilized conditions. Transportation Research Record 1587[M]. Washington D.C.: National academy Press, 1997: 52~62.
- [48] Jiménez-Palacios J L. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [49] Koupal J,Michaels H, Cumberworth M, et al. EPA's Plan for MOVES:A Comprehensive Mobile Source Emissions Model [S].U.S.EPA Documentation,2002.
- [50] University of California at Riverside. IVE Model User's Manual. Version 1.1.1. 2004.
- [51] 何东全,郝吉明,贺克斌等. 应用模式计算机动车排放因子[J]. 环境科学,1998, 19(3): 7~10.
- [52] 王海鲲,陈长虹,黄成等. 应用IVE模型计算上海市机动车污染物排放[J]. 环境科学学报, 2006, 26(1):1~9.
- [53] 谢绍东,宋翔宇,申新华等. 应用 COPERTIII模型计算中国机动车排放因子[J]. 环境科学, 2006, 27(3):416~419

- [54] 徐成伟,吴超仲,初秀民等. 基于 CMEM 模型的武汉市轻型机动车平均排放因子研究[J]. 交通与计算机, 2008,26(4):185~188
- [55] 霍红,贺克斌,王歧东. 机动车污染排放模型研究综述[J]. 环境污染与防治, 2006, 7(7):526~529.
- [56] University of California at Riverside. IVE Model Attachment C Characterizing Emission Variations due to Driving Behavior from On-Road Vehicles. 2004
- [57] University of California at Riverside. IVE Model Attachment A Development of the Emission Rates for Use in the IVE Model. 2004
- [58] University of California at Riverside. IVE Model Attachment B Development of the correction Factors for Use in the IVE Model. 2004
- [59] 姚志良,贺克斌,王歧东等. IVE 机动车排放模型应用研究[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 1928~1933.
- [60] Theodoros Zachariadis, Zissis Samar. An Integrated Modeling System for the Estimation of Motor Vehicle Emission [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, Vol.49.
- [61] 何春玉,王歧东等. 运用 CMEM 模型计算北京市机动车排放因子[J]. 环境科学研究, 2006, 19(1):109~112.
- [62] LI Xiu-gang, LI Guo-qiang, PANG Su-seng et al. Signal timing of intersections using integrated optimization of traffic quality, Emissions and fuel consumption: A note[R]. Transportation Research Part D, 2004, 9(5), 401~407.
- [63] 任福田等. 交通工程学[M]. 北京:人民交通出版社, 2003
- [64] 杨晓光,杨佩昆. 信号灯控制交叉口停车线前停车率模型[J]. 同济大学学报, 1993, 21(1),67~73
- [65] Nagui Roupail, Auderzej Tarko, Jing Li. Traffic Flow at Signalized Intersections. 79th TRB Annual meeting. 1999.
- [66] James M. Lents, Nicole C. Davis, Comparison of On-Road Vehicle Profiles Collected in Seven Cities Worldwide. TRANSPORT and AIR POLLUTION 13th International Scientific Symposium. 2004
- [67] Nicole Davis, James Lents, Mauricio Osses et al. Development and Application of an International Vehicle Emissions Model. Transportation Research Board 81st Annual Meeting . 2005. Washington, D.C.
- [68] 张翠荣,廖可文,陈铁帅等. 武汉市地气温关系的统计分析与地温预测模型. 2007 年湖北省气象学会学术年会暨全省青年气象科技工作者学术交流会议, 2007.
- [69] 郝吉明等编著. 城市机动车排放污染控制: 国际经验分析与中国的研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2001.

- [70] 熊秋芬,刘静,洪国平等. 武汉市相对湿度相关气象要素分析及预报[J]. 湖北气象, 1999, (3):29~31
- [71] 余瑞林,杨华,刘承良. 武汉市道路交通网络的分形特征[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 2009, 15(2):72~76.
- [72] 北京市、上海市、天津市和武汉市统计年鉴. 2002~2009.
- [73] Liu Huan, He Chunyu et al, Beijing Vehicle Activity Study. <http://www.issrc.org>. 2005
- [74] Cheng Huang, Hansheng Pan et al, Shanghai Vehicle Activity Study. <http://www.issrc.org>. 2005
- [75] Liu Huan, Wang Qidong et al, Tianjin Vehicle Activity Study. <http://www.issrc.org>. 2006
- [76] WANG Qidong. Studies for cities' vehicular emission factors based on driving cycles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [77] 雷伟. 武汉市道路轻型车行驶工况与排放特性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2007.
- [78] Akihira Fukutomi. Simulation approach to the study of driving behaviour, fuel consumption, and emissions[D]. Ottawa:Carleton University,2004.
- [79] 商蕾. 城市微观交通仿真及其应用[D].武汉:武汉理工大学,2004.
- [80] Qi Yang. A simulation Laboratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems [D]. Massachusetts inst. Of Tech.,Cambridge,1997
- [81] 邹智勇等. 城市道路交通仿真系统软件研究[J].交通运输工程学报,2001(3):9~15
- [82] 陆化普编著. 智能运输系统[M]. 北京:人民交通出版社,2002
- [83] 刘运通,石建军等著. 交通系统仿真技术[M].北京:人民交通出版社,2002
- [84] 钟邦秀,杨晓光. 面向对象微观交通仿真系统的研究与实现[J].系统仿真学报,2002, 14(4):418~421
- [85] 林勇等. 城市交通系统的微观仿真研究[J].计算机工程与应用,2002(20):154~159
- [86] 商蕾,高孝洪. 微观交通仿真模型研究[J].交通科技,2003,196(1):4~6
- [87] 邹智军等. 道路交通仿真研究综述[J].交通运输工程学报,2001,1(2):88~91
- [88] 庄焰等. 微观交通仿真软件 PARAMICS 在 ITS 模拟和评价中的应用[J].系统仿真学报,2005(7):
- [89] 周光伟,杨晓光. 城市道路交通微观仿真模型结构[J].中国公路学报,2001 (增)
- [90] 苏永云等.公交运营特性模型研究[J].重庆交通学院学报,2001(1)
- [91] 邹智军. 事件反应仿真模型[J].同济大学学报,2003,31(4):437~440
- [92] 葛宏伟. 城市公交停靠站点交通影响分析及优化技术研究[D]. 南京:东南大学,2006.
- [93] Jaime Gibson, Irene Baeza, Luis Willumsen. Bus-stops, congestion and congested bus stops[J]. Traffic Engineering & Control, 1989, v30(6):291~296.

- [94] Rodrigo Fernandez. A New Approach to Bus stop Modelling [J]. Traffic Engineering and Control, 2001, 21(9):240~246.
- [95] 唐焕文,秦学志编著. 实用最优化方法[M]. 大连:大连理工大学出版社,2004.
- [96] Cascetta E, Russo F, Viola F.A et al. A model of route perception in urban road networks. Transportation Research Part B, 2002,36(7):577~592.
- [97] K. I. Trovato. Differential A*:an adaptive search method illustrated with robot path planning for moving obstacles and goals, and an uncertain environment[J]. Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence,1990, 4(2):356~362.
- [98] A. Zelinsky. A mobile robot exploration algorithm[C]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(6):221~227.
- [99] 张国强,晏克非. 城市道路网络交通特性仿真模型及最短路径算法[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(3):60~62.
- [100] 唐小勇,程琳. 考虑转向延误的交通网络存储结构[J]. 公路交通科技, 2007, 24(1): 134~138.
- [101] Ziliaskopoulos A K, Mahmassani H S. A note on least time path computation considering delays and prohibitions for intersection movements. Transportation Research Part B, 1996, 30(5): 359~367.
- [102] Kirby R F, Potts R B. The minimum route problem for networks with turn penalties and prohibitions. Transportation Research,1969, 3(4):397~408.
- [103] Willam R, Meshane, Roger P Roess. Traffic engineering [M]. New Jersey: American Prentice-Hall company, 1990.
- [104] 邵长桥,荣建,任福田等. 停车延误、引道延误和控制延误关系研究[J]. 中国公路学报, 2002,15(4):90~93
- [105] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual [M]. Washington: National Research Council, 2000.
- [106] Rod Troutbeck, Miranda Blogg. Queuing at Congested Intersections [R]. 77th TRB Annual Meeting, 1998.
- [107] Davis LD. Hand book of Genetic Algorithm [M]. London: Van Nostrand Reinhold, 1991
- [108] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社.2001.10.
- [109] 王小平,曹立明. 遗传算法理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社.2002.1.

攻读博士学位期间发表的论文及参加的科研项目

一、发表的论文

- [1] Zhang Ben, Shang Lei, Chen Dan. A study on the traffic intersection vehicle emission base on urban microscopic traffic simulation model. Proceedings of the 1st International Workshop on Education Technology and Computer Science, ETCS 2009, 2009, v(2), p789-794. (EI 核心收录)
- [2] Zhang Ben, Shang Lei, Chen Dan. Traffic Intersection Signal-planning Multi-object Optimization Based on Genetic Algorithm. Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications, ISA 2010, 2010.
- [3] 张本, 商蕾, 陈丹. 基于微观交通仿真的城市交叉口机动车尾气排放评估. 交通与计算机, 2008, 26 (4) :95-98.
- [4] 张本, 商蕾, 高孝洪. 基于遗传算法的交叉口信号配时多目标优化. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2010, (已录用)

二、科研情况

- [1] 北京市道路交通流仿真和预测预报系统. 北京市科委项目 (项目编号: D07020601400705)
- [2] 城市交通混合仿真建模及其应用研究. 武汉理工大学基金项目 (项目编号: xjj2007058);

