

摘 要

经济圈是城市化发展到一定阶段的必然产物，对整个国家的经济发展具有强大的带动作用。交通网络是经济圈内客货运输的载体，其综合效率的衡量对于经济圈合理规划发展有着重要的参考意义，可以指导经济圈交通资源如何有效地整合，引导经济圈交通网络体系一体化构建进程，并推动经济圈交通的可持续发展。本论文依托于国家高技术研究发展计划 863 项目(编号:2007AA11Z202)，对经济圈交通网络综合效率进行了系统的分析研究。

本文首先在剖析了经济圈交通网络和交通效率概念的基础上，为经济圈交通网络综合效率作了明确的定义。并从硬件、软件、政策、环境四个方面一一探究了经济圈交通网络综合效率的影响因素，并逐一分析了这些因素的影响机理。

其次，借助图论的方法研究了经济圈交通网络的构成要素与表示方法，在经济圈交通网络拓扑图的基础上，对交通网络的结构进行了深层的分析，从结构角度研究了交通网络的可达性、结构效率、运行效率以及网络组件的重要度。

最后，从经济、社会、环境三个角度探讨了交通投入指标的构成和算法，继而又按照安全、便利、快捷、可靠、舒适五种最为广泛的交通要求，探讨了交通需求满足程度指标的算法。借鉴评价的方法，运用模糊评级法和层次分析法，最终提出了经济圈交通网络综合效率的评判方法，并通过长三角经济圈交通网络的实例求解，论证了该方法的可行性。

关键词：经济圈；交通网络；综合效率；交通投入；交通需求满足程度。

Abstract

Economic circle is an inevitable production of urbanization and it is of great prominence for the national economic development. Transportation networks are the carrier of passengers and cargoes in economic circle. The synthesis efficiency measure has an important reference value for the rational planning and development. It will guide the traffic resources how to effectively integrate and the process of transportation integrative structuring in economic circle, and eventually promotes the sustainable development of economic circle. This thesis is supported by National 863 Foundation of P.R. China (2007AA11Z202), researched the synthesis efficiency of transportation networks in economic circle Systematically.

Firstly, basing on analyzing the concept of the economic circle transportation networks and transportation efficiency, this paper made the explicit definition for the economic circle transportation networks synthesis efficiency. And the influencing factors of the economic circle transportation networks synthesis efficiency is explored, which include four aspects such as hardware, software, policy and environment. The mechanism of the effect of these factors are analyzed one by one.

Secondly, the integrant elements and description methods of transportation networks are analyzed with the graphic theory. On the base of economic circle transportation networks abstract graph, in-depth analysis to the transportation networks structure is carried on. And transportation networks accessibility, structural efficiency, operating efficiency and as well as the networks module's importance are studied from the structural angle.

Finally, the constitution and the algorithm of transportation investment indexes are discussed from the economy, the society and the environment three angles. And then according to the five most widely traffic demands such as safe, convenient, fast, reliable and comfortable, discussed the algorithm of the traffic demand satisfaction indexes. Draw on evaluation methods, by the use of fuzzy evaluation method and AHP, ultimately the economic circle transportation networks synthesis efficiency evaluation method is put forward. By calculating and evaluating the Yangtze River Delta economic circle transportation networks, the feasibility of this method is proved.

Keywords: Economic circle; Transportation networks; Synthesis efficiency;
Transportation investment; Traffic demand satisfaction.

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个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，也不包含为获得东南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。

研究生签名：张友浩 日期：2009.3.6

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名：张友浩 导师签名： 日期：2009.3.6

经济圈交通网络综合效率分析方法研究

第一章 绪论

1.1 论文研究的背景和意义

1.1.1 论文研究的背景

经济全球化和区域经济一体化是当前和未来人类社会经济发展的一个主要趋势,也必将对人类社会的政治、文化等领域以及交通运输等行业产生重要影响。经济圈就是区域经济一体化和城市化发展的产物。20世纪中期以来,国际城市发展经验表明:大都市及大经济圈是城市和区域发展的最佳选择。如今经济圈的发展水平已然成为衡量一个国家或地区社会经济发展水平的重要标志。未来国家之间的竞争,将主要表现为国际大经济圈之间的竞争。

经济圈是城市发展的必然阶段,是国家和区域竞争力的重要体现。经济圈的经济增长对经济圈区域的交通运输业的快速发展有着极大的促进作用,经济圈内各城市之间的经济结构的变化对经济圈交通运输的结构变动也有着极其深刻的影响。而经济圈交通网络作为经济圈内一切实物流动的重要载体,是引导经济圈社会经济持续、快速、协调发展的重要动力,其结构、状况和功能对经济圈的发展具有不可忽视的支持和推动作用。

快速便捷、高效安全、互联互通的交通网络是经济圈内各城市协调发展的基础。经济圈交通网络不仅承担着经济圈内各城市之间生产原料、商品、人员等经济要素的流通功能,还担当着经济圈与外界沟通联系的功能。一个完善的经济圈交通网络可以强化经济圈系统内外的经济联系,最大限度地提高系统的开放程度和效率,带来运费降低、区域可达性提高等直接效果,并引起经济圈区域产品成本下降、产品市场扩大、经济圈整体优势增强等一系列良性的间接效果,从而促使经济圈经济系统向更高阶段演化。

与国外经济圈相比,我国经济圈发展相对滞后。三大经济圈和其他的经济圈虽然已有雏形,但是其发展基本处于自发层次,尚未具有统一规划和建设功能,发展中缺乏理论支持和协调机制。经济圈内各城市相互竞争、各自为政地盲目发展,使得经济圈面临着资源严重短缺、环境恶化、产业布局不合理、城市定位不准确等严重的发展问题。经济圈内的交通基础设施建设也缺乏有效的协调统筹、通盘考虑,以致交通网络的效率低下,结构趋同,建设重复,未能发挥区域经济的规模效益。要解决经济圈发展中存在的这种区域性问题的根本办法是打破行政区划的束缚,建立以经济联系为基础的区域统一规划机制和区域协调机制,同时不断提高规划水平和建设水平。就交通方面而言,则应当建立经济圈统一的交通网络体系,有效地对经济圈内的交通资源进行统筹整合优化,让交通网络发挥出最大的经济社会效益。

基于此,本论文准备从效率的角度进行分析,以经济圈交通网络的综合效率为切入点,通过对综合效率的分析研究,寻求整体优化经济圈交通网络的思路。论文题就此产生。

1.1.2 论文研究的目的和意义

论文研究的目的和意义主要包括以下几个方面:

1. 适应经济圈经济发展需求

改革开放以来,我国以大城市为中心、发展水平相近地区的经济联系和合作加强,逐渐形成了各具特色的经济区。经济圈已然成为各国和世界经济发展的重要支撑力量。我国目前呈现出几个重要的经济圈区

域,主要包括京津冀、长三角、珠三角等。如今,经济圈内交通运输的发展问题已成为区域经济研究的一个重要课题,并提出了交通一体化等目标。但是目前相关理论研究尚显不足。如何按照经济圈经济发展的内在规律制定有效的交通运输发展策略,有赖于在准确把握交通运输与经济圈经济发展之间因果关系的基础上对相关理论进行深入研究,为经济圈交通网络的发展提供理论依据。

2. 适应城市化水平不断提高的要求

近年来我国城市化水平进入加速期。城市化率从1993年的28%提高到2004年的42%,并预言2020年中国的城市人口将达到8.3亿。我国内地城市数量也从改革,开放初期的193个增长到了660个,其中100万人口以上的特大城市已然达到了40个。城市化水平的提高,经济圈的出现对传统交通交通运输模式提出全新的挑战。在眼下新的社会经济背景下,正确认识经济圈的交通特性,探索适合城市化发展模式下经济圈的交通结构并对其实施有效的引导和调控,已然成为一项极其重要而急迫的工作。

3. 适应交通发展模式的需求

当前,交通运输对经济社会发展的影响更深刻地体现在交通出行密集区域和交通走廊地带。经济圈交通网络作为交通运输系统的重要组成部分,逐渐呈现出通道式、密集式等典型模式。主要的经济圈交通网络既是国家交通网络体系的主干,也往往是国家或区域的中枢地带,是经济要素在区域上集聚的载体。随着经济发展和社会进步,区域一体化发展模式越发明显,城镇之间的联系日益紧密,城镇之间的合作和竞争也日趋激烈,针对这种模式进行经济圈交通网络模式的专项研究,以使得经济圈交通更好的服务于经济发展模式,成为必要。

4. 促进经济圈交通运输效率的提高

各种运输方式在运输特性、发展历程、适应范围等方面都有各自的特点,相互之间既存在竞争又存在互补,因为影响因素过多,难于量化,使得综合运输体系在各个层次上的规划(交通网络、枢纽、线路等)具有很大的不确定性,造成了不同的交通方式在规划和建设上缺乏统一的部署,最终导致了重复建设乃至恶性竞争,不利于综合交通系统的整体发展,这也是经济圈交通运输效率低下的主要原因。目前对运输效率研究主要都是针对某一种运输方式的,对多种运输方式之间的交通效率以及整个交通网络的综合效率的分析严重欠缺。针对经济圈交通网络整体进行研究,促使各种交通方式在服务区域内有机衔接,保证最方便快捷的换乘和换乘,有利于促进经济圈交通运输效率的提高。

5. 弥补传统交通分析方法的不足,丰富综合交通理论体系

传统交通分析方法主要有以下几个特征,一是单独研究某一种交通运输模式;二是多数针对具体工程项目,特别是对新建项目关注偏多;三是分析方法多数以定性分析为主,定量分析不足。本文希望在系统理论指导下,把定性分析与定量计算相结合,尝试对经济圈交通网络的综合效率进行分析方法的探索,希望能弥补传统交通分析方法的不足,丰富综合交通理论体系。

1.2 国内外研究现状综述

国内外对于经济圈特性、交通网络优化、交通网络评价等方面都进行了不同程度的相关研究。为本文奠定了坚实的理论基础,主要的相关研究包括以下几个方面。

1.2.1 经济圈特性及其对交通网络的影响

1898年,英国学者霍华德最早从城市群体角度探索性地提出系列同心圆组成的“田园城市”结构。其后1922年恩温进一步发展成“卫星城”理论。西班牙工程师马塔主张建立沿高速、运量大的交通走廊进行城市开发的“节点—走廊”格局式的“带形城市”。芬兰规划师沙里宁指出应集中设置联系城市主体部分的高速专线,提出了“有机疏散”理论。1933年,德国地理学家克里斯泰勒提出著名的中心地理论,

其中,交通因为其空间运输成本性、可达性成为中心地网络结构建构的三大支配原则之一。现代城市群研究大家是法国地理学家戈德曼,他将研究领域从都市区扩展到了城市群层次,并进一步预言“大都市带”是城市群发展最高阶段。戈特曼(J. Gottmann)于1957年提出了大都市城镇连绵带的概念,并预言大都市带是人类居住形式的最高阶段,具有无比的先进性。麦基(McGee)针对发展中国家大都市连绵带的发展,提出了灰色区域理论,该理论认为发展中国家大都市连绵带的差异在于:(1)在大都市的外围地区出现了城乡交错带,这些交错带呈现出既不同于城市,有不同于农村的发展路子和管理模式;(2)在大都市之间,沿主要的交通干线形成了发展走廊;(3)在发达的区域,出现了中小城镇的发展势头。灰色区域理论认为便捷的交通条件和完善的交通网络是灰色区域形成的重要条件。英国专家汤姆逊(J. Michael Thomson)对诸多城镇实地考察后认为,地理特征、相对可达性、建设和动态作用是影响城镇的四大要素,其中相对可达性与动态作用均与交通条件有关。

国内方面,王岳平从定量分析的角度系统研究了我国经济结构变化对交通运输业的影响,指出交通运输业与经济阶段的划分有着较强的相关性。叶玉玲分析了都市圈的交通特征,探讨了大都市圈不同发展阶段的划分。对上海都市圈与国外成熟都市圈的社会经济和交通发展状况进行分析与研究,指出了上海都市圈发展模式存在的问题。杨涛以沪宁城市带综合交通体系的战略思考为视点,分析长三角城市群特别是沪宁城市带综合交通体系特征,借鉴国外大城市群综合交通体系发展经验,提出本地区综合交通体系发展的基本方针和方向。肖昭升根据对京津冀都市圈综合交通网络现状分析,以及区域经济地理特征和经济一体化发展要求,提出推进京津冀都市圈交通一体化发展的思路和建设重点。

1.2.2 交通网络优化

1973年, Morlok 首次提出了定量的交通网络设计问题,此后在国际上形成了交通规划领域中的一个新的研究方向—网络设计问题(Network Design Problem, NDP)。网络设计问题可以分为三类:离散性网络设计问题(DNDP)、连续性网络设计问题(CNDP)和混合网络设计问题(MNDP)。其中 DNDP 研究在现有的交通网络中确定需要新建设的道路, CNDP 研究在现有的交通网络中确定已有的部分道路应提高的通行能力的优化值, MNDP 指既含有 DNDP 又含有 CNDP 的网络设计问题。

对交通网络设计问题的研究主要集中在模型建立和算法求解两方面。从数学上讲,双层规划模型是描述网络设计问题的一种好技术。其中,上层问题是最小化系统总费用,下层问题则刻画 DUE 或 SUE 交通流模式。一般而言,双层规划问题的求解是困难的,因而设计有效的算法是最富挑战性的问题之一,也是交通网络设计问题研究的主要任务。近年来相关的理论研究主要有:2001年 Q.Meng 等针对连续平衡网络利用边际函数将双层规划转化为单层优化问题, Jing Zhou 等研究在线路容量限制下最佳通行车费的二层规划方法时指出交通路线的车费是交通网络的一个重要决策变量;2002年 G.Cohen 等证明 Clegg 和 Smith 提出的双层规划求解算法不具收敛性, Qiang Meng 等建立了连续网络设计问题的包含公平约束的二层规划模型, Ya geng Yin 在探究交通规划与管理问题的多目标双层优化理论时提出采用 GAB 方法和 O-K 求解算法; Michael Patricksson 等建立了交通管理双层数学模型,并提出了将平衡约束的数学规划问题转化为一个在产品空间控制和交通流的 Lipschitz 优化问题的合理算法。以上这些理论研究,经济圈交通网络优化理论并没有作为一个专门的研究角度进行探讨,只是在其中有所涉及,但是这些理论研究为经济圈交通网络优化的进一步探讨奠定了坚实的基石。

国内方面, 聂伟建立了都市圈交通结构发展趋势预测的等长度递补变维分形模型和道路交通系统发展趋势预测的熵变模型;以小汽车、长途汽车和城际铁路列车为研究对象,研究了适合都市圈客运交通方式选择的 logit 模型并提出了道路网络优化的两阶段双层模型—远期规划模型和近期规划模型。

杜进有对区域交通网络的结构、主要组成要素、节点和路段等部分进行了分析,建立了区域交通网络及其组成部分的表示方法;通过建立定性和定量结合的目标函数组合,建立了包括结构、性能、环境等 5

个方面的区域交通网络结构的多目标优化模型。

1.2.3 交通网络评价

国外最早应用于道路建设项目的评价方法是成本——效益分析法，该方法将项目的效益和成本以单一的货币为单位进行度量，没有考虑项目建设的一些难以货币化的效果。20世纪60年代末到70年代初，出现了加权图表法和分级评分法，主要用来考虑道路建设项目对环境、社团凝聚力、财力、能耗等方面的影响，但是这两种方法在定量评价方面仍存在较大问题。因此，出现了成本——效果分析法和修正成本——效果法。随着对评价方法要求的日益提高，评价技术得到迅速发展，原有的评价方法被淘汰或改进，同时新的方法不断出现。目前，国外一些发达国家一般都有专门的指导手册对评价目标、步骤、指标、方法等进行详细的说明，用来指导方案的评价。其中层次分析法和专家经验法是较流行的方法。

国外道路网络评价研究主要集中在路网可达性、可靠性等单项技术指标上，学术界对道路网络的综合评价研究不多。值得注意的是，在进行道路网络规划时越来越重视分析规划方案可能产生的环境问题。

国内学者对于道路网络评价的研究主要集中在评价方法方面。单一评价方法上，李延忠、赵怀明和汪敏、朱辉和隗志才、陈敬武等人分别利用 DEA 方法对公路网综合评价进行了研究。聂伟则以都市圈为研究背景，进一步提出了基于 DEA 和加权灰色关联分析的道路网络评价方法。这种方法可以对每一个评价对象都去寻求最有利的指标权重系数分配，使得每一个评价对象对于标准对象的关联度都是相对最优的，从而得到客观公正的评价结果。

组合评价方法上，翟冬梅等建立了基于模糊评价和层次分析的公路网组合评价模型。蒲芳等则利用层次分析和关联分析的组合方法研究了长江三角洲干线公路网规划方案的综合评价。马荣国等利用层次分析和嫡理论的组合模型研究了公路建设项目综合评价中的权重确定问题。许薇根据都市圈高速公路网规划目标评价系统多因素、多指标、多层次的特点，将灰色关联分析法用于多层次综合评价当中，建立了都市圈路网规划目标评价模型。

1.3 研究内容、方法及思路

1.3.1 研究内容

本文主要研究内容包括三大部分：

1. 经济圈交通网络综合效率影响因素分析
2. 经济圈交通网络结构分析
3. 经济圈交通网络综合效率度量方法研究

1.3.2 研究方法

1. 系统分析方法

经济圈交通网络是一个非常复杂的系统，要研究其内部运行机制和外部联系，必须采取系统的观点。本论文在影响因素分析、效率指标的选取等方面采用了系统分析的方法。

2. 定性定量研究相结合的方法

定性分析与定量研究相结合，是工程类科学研究的趋势。论文中对一些指标的分析和处理过程，都使用了定性分析和定量相结合的方法。

3. 宏观与微观相结合的方法

论文涉及的研究对象较多，范围较大，总体上属于宏观研究的范畴。具体到研究内容上，相对而言，经济圈交通网络结构分析和经济圈交通网络综合效率影响因素分析属于宏观范畴，经济圈交通网络综合效率的度量方法研究属于微观范畴。

1.3.3 研究思路

专门针对经济圈交通网络的效率方面的研究很少，但针对交通网络以及交通效率这两方面的研究却很多。另外在交通效率方面的研究上也大多只关注了可达性、机动性、服务水平等方面，对环保方面的效益问题亦涉及甚少。因此，本文试图在研究中立足经济圈交通网络这么一个综合运输框架体系，从效率的角度考量其各方面的指标含义及计量方法。将前人的研究成果扩充至一个更宽泛的领域。

1. 经济圈交通网络综合效率影响因素分析

在这一部分首先会对一些基本概念和经济圈交通网络综合效率的含义做一个详细的介绍，在明确概念之后，对其纷繁复杂的影响因素按硬件因素、软件因素、政策因素、环境因素这四大类进行逐一的介绍并分析其对综合效率的影响机理，以作为下文的理论基础。

2. 经济圈交通网络结构分析

首先会对经济圈交通网络基本要素（节点、边、权以及相应配套设施）的具体功能做一个全面的分析，在对每一要素都透彻把握之后，再以抽象的几何模型方式表示出经济圈交通网络的整体结构特征，并从结构的角度对经济圈交通网络进行各项指标的分析，从而对经济圈交通网络有一个整体性的了解。

3. 经济圈交通网络综合效率度量方法研究

这一部分本文将从路网密度、可达性、出行效率、路网建设费用、枢纽建设运营费用、对大型客货流集散点的覆盖程度、出行时间、污染物排放量、大气污染饱和度、燃油消耗量等现有的一系列指标中选取适当的指标表征经济圈交通网络的交通投入和交通需求满足程度两个方面，深入探讨指标的求解方法并将其扩充至经济圈综合交通网络。各种指标由于其衡量的角度不同，指标的含义、单位都大相径庭，本文将进一步讨论如何将统一这些指标的量纲，赋予不同指标的以合理的权重，最终总结出经济圈交通网络效率的度量方法，并将之付诸于实际运用。

1.3.4 论文结构

论文章节由以下五部分组成

1. 绪论

主要包括研究背景、研究意义、研究现状综述、研究内容、方法、思路等。

2. 经济圈交通网络综合效率的概念及影响因素

主要介绍经济圈、交通网络以及交通效率方面的相关概念，给出经济圈交通网络综合效率的明确定义，探讨其影响因素和影响机理。

3. 经济圈交通网络结构分析

主要包括经济圈交通网络的基本要素分析和网络结构分析。

4. 经济圈交通网络综合效率度量方法研究

总结度量指标并探讨求解思路。

5. 研究结论和展望

主要包括论文已取得的研究成果和有待进一步研究的课题等。

整篇论文的总体结构和技术路线如下图所示。

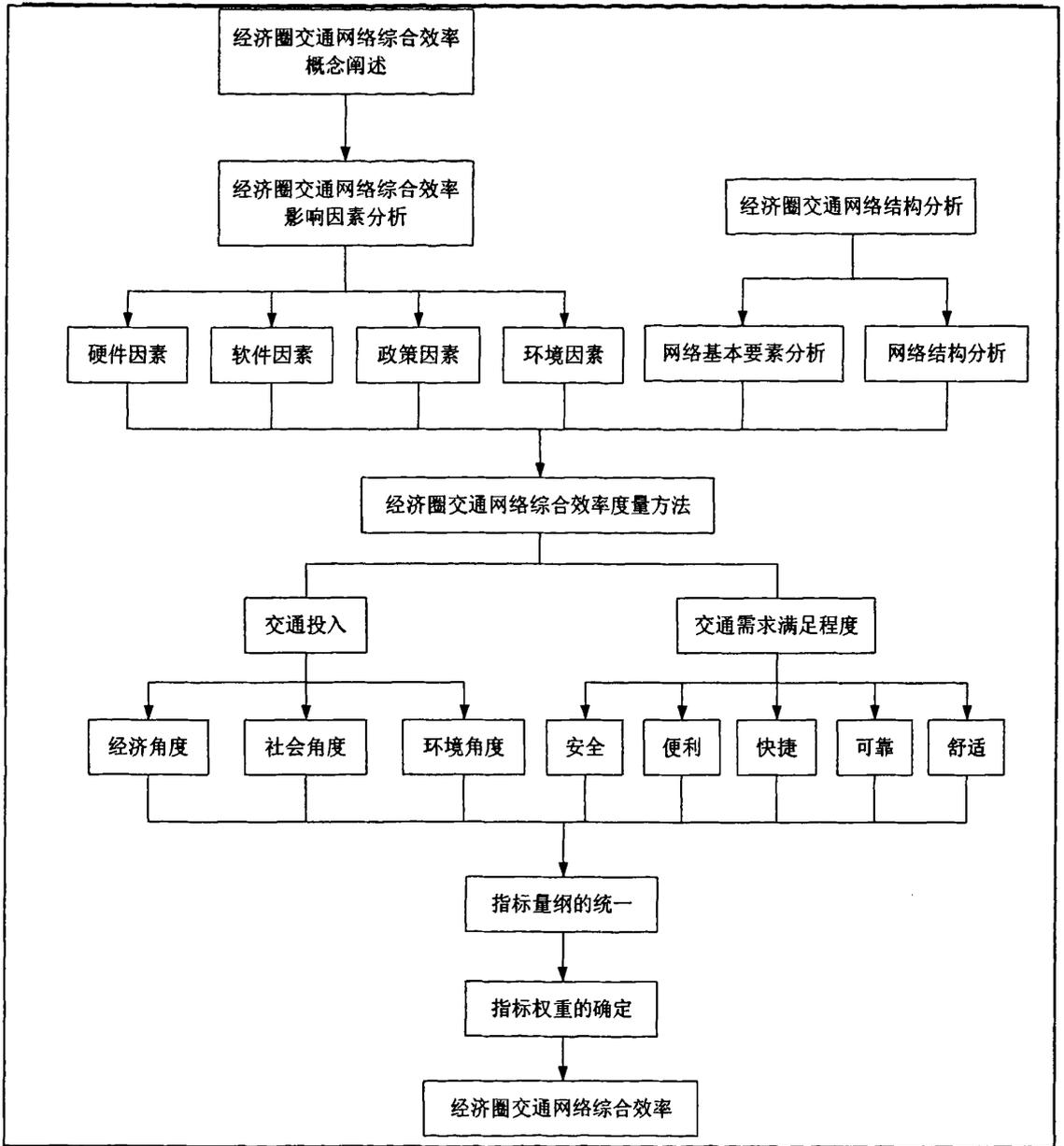


图 1-1 论文总体结构示意图

第二章 经济圈交通网络综合效率的概念及影响因素

2.1 经济圈基础理论

2.1.1 经济圈的概念

经济圈是城市化进程发展到一定阶段的产物，是一种特殊的地域空间组织形式，是经济、社会共同作用的结果。

经济圈最早的定义起源于 1950 年的日本，当时日本行政管理厅给出的定义是：以一日为周期，可以接受城市某一方面功能服务的地域范围，中心城市人口规模必须在 10 万人以上^[1]。1957 年，法国学者戈特曼明确提出大经济圈的概念^[2]，他认为经济圈是一种以其高密度的城市、一定门槛规模的人口以及巨大的城市体系区别于其他地区和其他城市类型的空间组织。1960 年日本行政厅再次提出了大经济圈的概念：中心城市为中央指定市，或人口规模在 100 万人以上，并且临近有 50 万人以上的城市。

如今，经济圈的定义已不如过去那么拘泥于人口数和距离，其作为一个经济概念，可以概括为，在特定的地域范围内，以一个或几个经济发达的大城市或特大城市为核心，以一系列不同性质、规模和等级的中小城市为载体，共同组成的在空间上位置相近，在功能上紧密联系、分工协作、相互依存的具有圈层式地域结构和经济一体化倾向的地域空间组织^[3]。

2.1.2 经济圈的类型

根据经济圈的中心城市数量多少和其他中小城市的分布特征，可以把经济圈分为三种类型^[4]。

1. 单核心经济圈

单核心经济圈是最常见的都市圈，这种经济圈的城市体系呈金字塔式结构：即以一个大城市或特大城市为核心，周围有几个中等城市围绕，这些中等城市再联系若干个小城市或更多的小城镇，塔顶是核心城市、塔身是中等城市、塔基是中小城市或小城镇。单核心经济圈的中心城市在城市规模、经济发达程度等各个方面都处于突出地位，是整个经济圈的引力中心和辐射源。这就造成了经济圈内城市之间的联系以向心联系为主，同级规模城市之间的横向联系薄弱。这类经济圈的交通体系的空间分布基本上也是以中心城市为核心呈放射状分布。

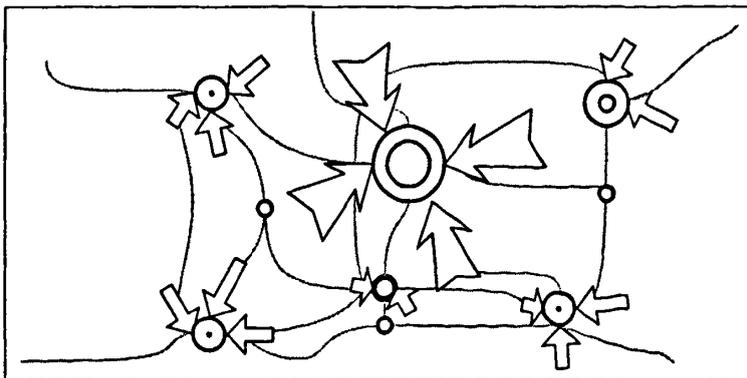


图 2-1 单核心经济圈空间结构示意图

2. 双核心经济圈

双核心经济圈并不常见，其城市体系特征为：以两个大城市或特大城市为核心，其它中小城市分别以两个中心城市为核心，分布在周围。这两个核心城市的空间距离较近，相互之间的经济作用很强，既相互依存又相互制约，分别有自己的势力范围，共同引领经济圈发展。这类经济圈的交通体系在空间分布上表现为围绕两个城市的放射状交通网，另外两个中心城市之间有发达的交通通道连接。

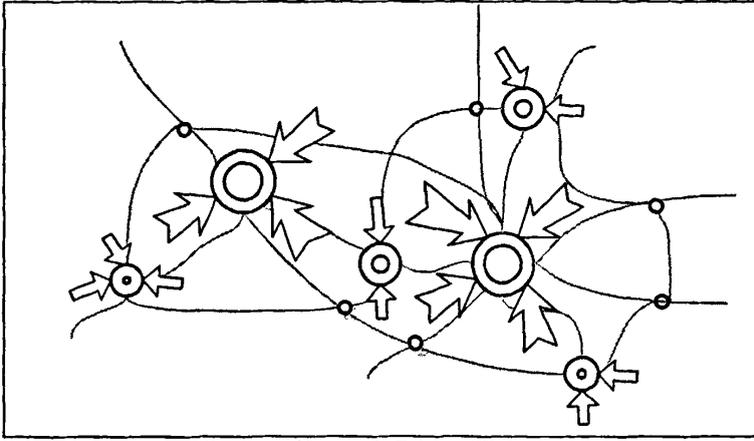


图 2-2 双核心经济圈空间结构示意图

3. 多核心经济圈

多核心经济圈的城市体系特征为：没有任何一个或两个城市处于中心地位，而是由三个或三个以上的城市共同担当了中心城市的功能，每个城市分担一部分中心功能，其它城市围绕在这几个较大的城市周围。这类经济圈中的中心城市的城市规模一般不算太大，因此必须由几个城市共同带动经济圈经济发展，在空间分布上一般呈三角形或多边形，中心城市处于顶点上，其他城市分布在中心城市周围。几个中心城市之间经济联系密切，其他城市依地理位置受一个或两个中心城市的吸引和辐射。因此，多核心经济圈的交通系统呈现网络化布局，几个中心城市之间有高速通道连接，而其他城市则有公路与一到两个中心城市相连。

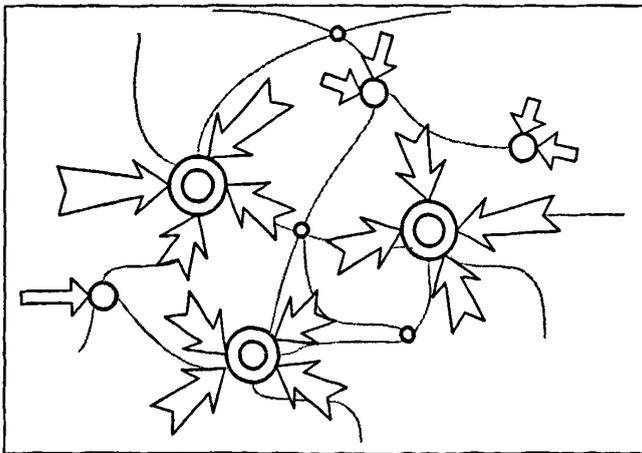


图 2-3 多核心经济圈空间结构示意图

2.1.3 经济圈的特性

经济圈作为一类特殊的地域空间组织形式，有着自己独特的区域特征^[1]。

1. 高聚集性

经济圈的高聚集性表现在以下几个方面：城镇密集，在一定的地域空间内密集地分布着数量众多的不同规模的城市；人口密集，经济圈的人口密度比一般区域要高得多，通常占整个行政区域总人口的很大比

例：产业密集，经济圈的 GDP 产值很高，三大产业均高度集中，对经济发展的贡献巨大；生产要素密集，经济圈都是资金、技术、人才高度密集的地区，以满足经济发展的需要；基础设施密集，伴随着高密度人口和高密集产业，经济圈的交通网、物流网、通讯网、能源网的发达程度自然也是其他区域所无法比拟的。

2. 高能级性

经济圈的高能级性表现在以下几个方面：城市化水平高，发达的经济圈城市化水平一般为 50% 以上，比一般区域高得多；人口素质高，经济圈内人口的平均受教育程度、高学位人才的比例和专业技术人才比例都远远高于其他区域；产业水平高，经济圈内资本和技术密集型产业多，高新技术产业多，第三产业比重大，产业效益和发达程度是其他区域难以企及的；基础设施发达，经济圈内的交通运输系统、通讯网络、水电网等基础设施都很完备，且比其他区域快捷先进。

3. 开放性

经济圈内的城市之间存有密切的社会经济联系，是一系列城市的有机复合体，因此，开放性可以说是经济圈的一个显著特征。其开放性主要体现在：经济圈内的城市都会主动寻求和其他城市的协调和合作，在经济上共同发展，互相促进；经济圈内高素质人才流动频繁，使得新思想、新技术、新文化传播异常迅速。

4. 整体性

经济圈既然是多个城市的有机复合体，因此讲究的是圈内所有城市的整体发展效果，这种整体性体现在：政策整体性，单个城市的政策必须服从经济圈整体的政策以克服城市之间政策差异造成的微观经济主体运行的障碍和企业的短期投机行为；行政整体性，经济圈内各城市政府通常在重大原则问题（如跨区重大项目投资、环境保护等）上协调一致，以避免个别城市因追求个体利益而损害整体利益；规划整体性，经济圈一般都由统管全局的决策执行机构来负责经济圈城镇体系规划、跨城市基础设施规划、重大项目的落地安置、综合环境治理等工作，以保证整个经济圈的协调统一。

5. 非均衡性

经济圈内部各城市在发展上，主要是经济发展上表现出明显的非均衡性。各卫星城市的经济发达程度一般依据其距离中心城市的远近距离和城市本身的规模等级呈明显的梯度性。中心城市毋庸置疑处于经济最发达、人均 GDP 最高的第一梯度，是整个经济圈的核心发展极和辐射源。离中心城市较近的中等规模城市通常是经济次发达的第二梯度。距离中心城市比较远的地区一般经济发展水平最低。

2.1.4 我国三大经济圈的介绍

中国三大经济圈是指 20 世纪 80 年代崛起的中国第一个高增长区珠三角经济圈，90 年代以上海为中心发展起来的长三角经济圈以及 21 世纪成长起来的环渤海经济圈^[18]。

下面便依次介绍一下我国这三大经济圈的基本状况^[29]。

1. 珠三角经济圈

珠三角面临南中国海，为西江、北江、东江的汇合处，也即珠江的出口处，水陆交通发达、海外联系便捷，是内地沿海南部通向世界的重要门户地区。珠三角素有“珠三角”、“大珠三角”之分。近年来又提出了“泛珠三角”的概念，其包括广东、福建、江西、湖南、广西、海南、四川、贵州、云南九个省区和香港、澳门两个特别行政区，简称“9+2”。这说明了珠三角的迅速崛起以及有着巨大的拓展空间，并且有望成为世界瞩目的特大经济区。珠三角发展特色主要表现在：实现了富饶地区的快速城市化；形成了“外向导入式”为主的发展模式；呈现出以农村城镇化为主导的“爆发式”城市化；表现出多中心、高强度、聚集式的城市群发展形态；勾勒出内、中、外三个圈层的“圈层式”经济与城市发展特点；在城市与乡村的连接地区出现了一种“既非城市又非农村”的特殊空间结构形式。

2. 长三角经济圈

长三角地区紧临东海,是我国最大的内河长江的出口处,长江三角洲地区可以说是我国城市化程度最高、城镇分布最密集、经济发展水平最高的地区。长三角包括上海市、江苏省八个城市和浙江省六个城市,共计十五个城市,以后又有浙江台州市加入了长三角城市经济协调会,即所谓的“15+1”。它以上海为中心,南京、杭州为副中心,包括江苏的扬州、泰州、南通、镇江、常州、无锡、苏州,浙江的嘉兴、湖州、绍兴、宁波、舟山,共15个城市及其所辖的74个县市,以沪杭、沪宁高速公路以及多条铁路为纽带,形成一个有机的整体。长江的黄金通道流经29个主要城市,把长三角引向内陆腹地,是世界与中国大陆连结的重要门户地区。长三角充分利用国际国内两种资源、两个市场,成为全国最具活力的地区之一。长三角的发展特色主要表现在:形成综合性产业基地;城市化呈现结构性大发展;城市综合实力全国领先,圈层特徵明显;城市与城镇工业化水平较高;城市大物流条件初步形成;城市教育科技实力雄厚,高层次人才密集;城乡居民生活水平比较富裕,全国领先。

3. 环渤海经济圈

环渤海位于中国东部沿海的北部地区,通过京津唐城市带引向中国北方腹地,区位优势,工业密集、城市密布,是内地沿海北部通往世界的重要门户地区。由京津领衔的环渤海湾经济区产生于1986年,一般认为,狭义上是指辽东半岛、山东半岛、京津冀为主的环渤海滨海经济带,其目标是打造以北京、天津为双核的世界级城市。从更大的范围来说,已形成了“5+2”战略合作格局的框架,即河北、山西、辽宁、山东以及内蒙古中东部五个省区,北京和天津两个市。环渤海地区发展特色主要表现在:形成了中国重要的工业密集区和大型城市群;区域规划发展的起步较晚,区域经济发展相对于珠三角和长三角明显落后;开始全力构建环渤海经济圈区域经济发展新平台,建立“多赢”的区域协调和合作新机制。

2.2 经济圈交通网络综合效率

2.2.1 经济圈交通网络

经济圈交通是指将经济圈内不同位置、不同组成部分的城镇连接起来的交通运输系统。经济圈交通一般都由好几种交通运输方式的交通系统构成。这些交通运输方式互相补充配合,构成了整个经济圈的综合交通网络。网络中含有各种交通运输方式的車站、枢纽、线路。经济圈交通网络与城市交通网络在基本要素上有区别,同时也包涵了城市交通网络^[5]。

经济圈交通网络的定义为^[6]:在经济圈地域范围内的多种交通运输方式互相配合衔接的综合交通网络,是由多种交通运输方式所连接的运输线路、交通站点以及相应地辅助设备组成的复合体,承担着经济圈内外的交通运输作业。

可见经济圈交通网络包括地域范围内公路、铁路、航空、水运、管道五种交通运输方式的运输线路、交通站点、衔接枢纽以及其配套设施。

2.2.2 交通效率

效率这个词源于工程学,它的原意是指设备在一定工作时间内所产生的有用功在总功中所占的比例。随着“效率”这一词汇在各行各业的广泛使用,它的涵义也丰富多彩起来。按最普遍的解释,效率可定义为一定的时间内有用产出与投入量的比值。它揭示了投入和产出之间的比率关系。

按照这样一种对效率的理解,将其应用于对交通系统的效率诠释,则是:“一定的交通投入与交通需求的满足程度的对比关系”^[7]。这个比率越高,效率也就越高,反之则说明效率低下。

交通效率具有以下几个特性^[8]:

1. 时间尺度特性

有的交通系统的构建具备的是长期效率，短期效率有可能很低，而有的交通基础设施的建设具备的则是短期效率，长期效率有可能无法保证。可见时间周期的取值对交通效率的影响还是很大的。

2.空间尺度特性

有的交通系统就微观上来看，即单看某一路段或某一节点效率很高，可就宏观上看，整体效率却很低下，反之亦然，微观上效率低下的交通系统也有可能宏观上效率可观。可见衡量交通系统的效率时如何取值衡量范围对效率的影响也很大。

3.角度特性

同样一个交通系统要素，如果衡量其交通效率的角度不同，其结果可能也不同。比如从经济角度衡量效率很高的一个交通设施，从环境角度衡量其效率则有可能很低下。同样的投入，由于从不同的角度审视交通系统要素对交通需求的满足程度，交通效率的结果有可能大相径庭。

4.主观特性

每一个人都能以自己的价值观对交通系统的交通效率做出评判，有的交通设施或许令机动车驾驶员很满意，可步行者却有可能很不满意。可见从每一类交通参与者的价值观念出发所得出的交通效率是不同的。

交通效率的以上特性也就决定了，只有在特定的时间、空间、衡量角度以及价值观念下的交通效率才有其确切含义。

2.2.3 经济圈交通网络综合效率的概念

在经济圈交通网络还有交通效率概念的基础上，将交通效率的概念放宽应用于经济圈交通，可以初步推出经济圈交通网络的效率指的就是经济圈地域范围内由多种交通运输方式所连接的运输线路、交通站点以及相应地辅助设备组成的综合交通网络，其一定时间内的交通投入与交通需求满足程度的对比关系。

这里衡量经济圈交通网络的效率时取的时间尺度可以根据需要取一个定值，如一天或一年，空间尺度则取整个经济圈地域范围。

鉴于交通效率的特性，我们还需要考虑剩下的两个因素。

对于经济圈交通网络而言，其效率可以从社会可持续性、经济可持续性以及环境可持续性这三个角度来进行衡量。社会可持续性是指交通网络应保证经济圈内的客流物流安全快捷地到达目的地。经济可持续性是指交通网络的建造运营应尽可能以最低成本的投入满足更多的交通需求。环境可持续性是指交通网络对沿线地区环境的不良影响应尽可能的减弱。这三个角度互相渗透、互相补充，缺一不可，只有综合三个角度，得出的结论才能全面反应经济圈交通网络的效率状况。

至于价值观念方面，站在任一类交通参与者的立场上去评判整个经济圈交通网络的效率都是有失偏颇的，因为交通参与者只能亲身体会经济圈交通网络的一小部分，无法纵观全局。因此，对于经济圈交通网络这样一个空间范围很大的交通实体，其效率的估算，必须站在规划者、管理者的立场上，依据交通参与者对交通网络的实际交通需求，即安全、便利、快捷、可靠、舒适这几方面的性能来进行客观的评判。

经过上述分析，可知经济圈交通网络综合效率的概念应为：从社会、经济、环境三个角度综合衡量一定时间内经济圈地域范围内的由多种交通运输方式所连接的运输线路、交通站点以及相应地辅助设备组成的交通网络的交通投入与经济圈内交通需求满足程度的对比关系。

2.3 经济圈交通网络综合效率影响因素

既然已经明确了经济圈交通网络综合效率的概念，那么为了进一步确定综合效率这个新指标的求解公式，还需要理清究竟有哪些因素对效率值有影响及其影响机理。

从定义看去，影响经济圈交通网络综合效率最终结果的因素无非两个，经济圈的交通投入和经济圈交

通需求的满足程度。而交通需求的满足程度又牵扯到交通需求和交通服务能力两个方面，因此，只要是对交通投入、交通需求、交通服务能力这三个方面任一方面有影响的因素就必然会牵连到综合效率。

经济圈交通网络包涵多种交通运输方式，交通线路、站点、枢纽众多，占地宽广，其间现行的一系列的交通法令、法规规范着所有交通部门服务人员和交通参与者的交通行为，通讯系统和监控系统等先进科技手段更为经济圈交通系统的正常运行和有序管理提供了强力的支持。这些环节中的每一个细节都会对经济圈交通网络综合效率有着不可忽视的影响。另外，社会经济、地理环境、天气因素等等一系列交通网络的外部因素对经济圈交通网络的效率亦有着或直接或间接的影响。

这些纷繁复杂的种种因素总的来说可以划分为四大类：硬件因素、软件因素、政策因素、环境因素。下文便按如此四大类的顺序对经济圈交通网络综合效率的影响因素来逐一进行分析。

2.3.1 硬件因素

硬件因素主要是指经济圈综合交通系统基础硬件设施的情况。

2.3.1.1 交通运输线路

和交通最密切相关就是线路。汽车需要公路，火车需要铁路，轮船需要航道，这一点毋庸置疑。因此经济圈交通网络的效率必然和交通运输线路息息相关。就公路和铁路而言，路网的覆盖率就直接影响了客物流的流通效率，路网覆盖率越高，那么必然交通服务能力就越高。但并不是说覆盖率越高越好，因为覆盖率的增高，必然意味着建设成本和运营成本的增高，尽管客物流的运输时间是缩短了，但节省的这一部分时间效益是否抵得上投入成本的增加，这必须在验证之后才能断言。

总的来说，交通运输线路对于效率的影响，主要表现在以下三个方面：线网覆盖率和综合非直线系数会直接影响客物流的运输时间，覆盖率越高，非直线系数越低，客物流运输时间就越短，线网的服务能力也就越高；线路（仅限于公路、铁路和管道）的总里程和等级则直接与建造运营成本挂钩，总里程越长，等级越高，建造运营成本就越高，交通投入也就越高；另外线路的等级还影响到交通运输工具在路线上运行的速度以及客物流的通行能力，线路等级越高，运行速度越快，通行能力越大，线路的交通服务能力就越高。

从效率的角度来看，我们希望以最低的交通投入，完成最多最快的客物流运输，也就是提供最大的交通服务能力。低成本要求线路总里程短、等级低，客物流运输快捷又要求线网覆盖率高、路网综合非直线系数低、等级高。由于线路总里程、线网覆盖率和路网综合非直线系数三个指标之间存在相关性，因此将这三者放在一起考虑，若要达到效率最优，线网的布局就应尽可能（因为布局要受到地理条件的限制）做到里程长度与覆盖率的最优化，以最短的里程完成最大的覆盖率，只要做到这一点，那么路网综合非直线系数自然也是最低的。线路等级这一指标本身则同时影响交通投入和交通服务能力两个方面，因此若想效率最优，应该在以上三个指标确定，也就是线网布局已经确定的情况下，寻求自身的最优化，以最低成本提供最大服务能力。

交通运输线路对于综合效率的影响可以简明的表示为下图所示的关系图。箭头指示即表示前项对后项有影响。

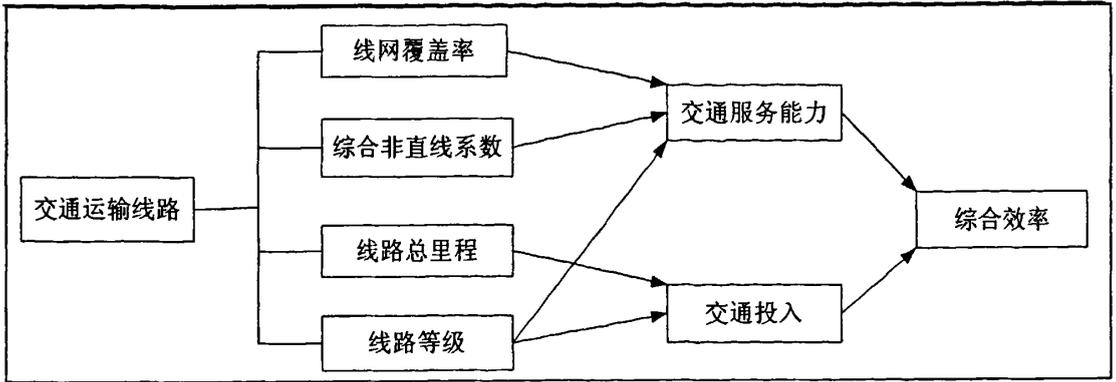


图 2-4 交通运输线路对经济圈交通网络综合效率影响机理示意图

2.3.1.2 交通枢纽

交通枢纽是在两条或者两条以上交通线路的交汇、衔接处形成的，具有交通组织、交通中转、交通交换以及部分或者全部交通运输辅助的装卸、仓储、信息服务及其它辅助服务功能的综合性设施。交通枢纽可以是单一交通运输方式的枢纽，也可以是两种或两种以上交通运输方式的综合枢纽。一般称呼服务于一种交通方式的枢纽为单式交通枢纽，例如单一的机场、火车站、港口、长途汽车站等；称呼服务于两种或两种以上交通方式的枢纽为复式交通枢纽，也就是通常所说的综合交通枢纽。而按交通枢纽的功能也可分为对内枢纽和对外枢纽两种，对内枢纽主要为城市内部区域之间或区域中心与对外枢纽的客货流交换提供服务，而对外枢纽则连接着对外交通运输线路与城市交通线路，为城市与其他城市、地区的客货流运输服务。经济圈交通网络中考虑的交通枢纽主要是指对外枢纽。

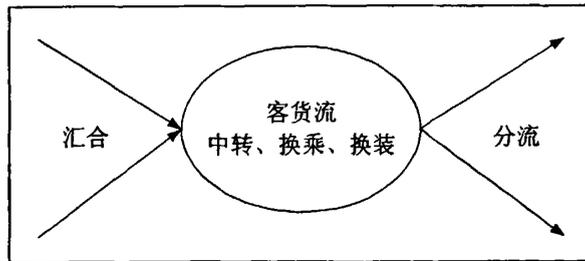


图 2-5 交通枢纽运转示意图

交通枢纽作为客货流集散和中转的重要场所，其服务能力对交通网络的服务能力有着直接的影响。即便线路的通行能力很大，而交通枢纽的服务能力跟不上的话，整个交通网络的服务能力也不可能让人满意。但是也不是说交通枢纽就是造得越大越好，因为交通枢纽存在一种典型的规模效应。一个交通枢纽的存在必然会吸引运输生产的多种要素在交通枢纽附近聚集，这是因为交通枢纽附近具有运输快捷、方便、成本低廉的优势，大量的客货流产生点受此优势的吸引，都期望聚集到交通枢纽周边地区集中组织生产运输，从而产生了交通枢纽的极化效应。当然，一定程度的集中有利于开展大规模生产运输，对经济以及交通的影响都是正面的。但若是过度集中便过犹不及了。当单个交通枢纽规模过于庞大时，会吸引过多的客货流在站场周围聚集，使得枢纽及其周边地区承受的交通压力过大，交通复杂化乃至产生堵塞，污染也会加重，客货流运输组织成本反而提高了。这样一来交通枢纽的规模经济效应便成为了规模不经济。可见每个交通枢纽的应根据其服务范围内的社会经济情况确定适宜的场站规模，另外还要与交通运输线路的服务能力相适应，以免成为遏制交通网络服务能力的瓶颈。当然，交通枢纽的规模还直接与建造时的资金投入以及运营时人力、物力投入挂钩。

另外，交通枢纽的所处位置对交通网络的效率也有着不容忽视的影响，理论上来说，交通枢纽应当布设在客货流集散最为便捷的地点，这就要求交通枢纽所处的位置，应该满足交通枢纽服务范围内的客货流到达枢纽的总行程最短或总费用最省，如果城市对外枢纽布局不当便会使得城市对外交通的效率降低，因

为这里牵扯到交通枢纽的选址问题，本文在此只是点到为止，不做详细解说。

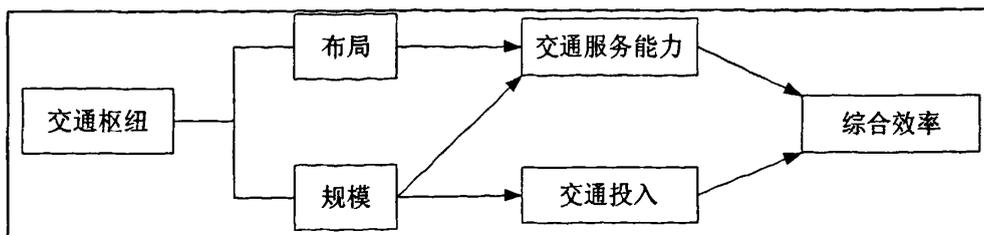


图 2-6 交通枢纽对经济圈交通网络综合效率影响机理示意图

2.3.1.3 载运工具

各种交通运输方式运送旅客和货物的速度以及能承运的容量，不仅受交通运输线路的制约，还要取决于载运工具的速度和容量。

载运工具的分类与交通运输方式的分类类似，分为道路载运工具、轨道载运工具、水上载运工具、空中载运工具以及其他载运工具。各种载运工具具有不同的使用性能，对于旅客和需要运送货物的人来说，主要希望所选择的载运工具具有下述性能：速度快、容量大、费用低、安全可靠（事故少、准点等）、污染少、舒适性（对旅客）好。

然而，这些性能不可能都完美地体现在某一种载运工具上，因为各项性能要求之间有些是互相抵触的。例如，要求速度快就势必多消耗能源，从而使得费用增大。而且另一方面，不同的运输对象或运输任务对载运工具的各项使用性能的要求也不尽相同。有的要求容量大，速度可以低些；有些要求速度高，而容量并不大。因此每种载运工具都有其存在的必要，以满足用户各自的要求。

载运工具本身对经济圈交通网络效率的影响机理很显而易见，随着科学技术的进步，载运工具的速度提升得越快、容量增加得越大，对环境的污染越少，那么经济圈交通网络的效率也就越高。

2.3.2 软件因素

科学技术的进步始终支撑和推动着交通运输业的发展，不仅带来载运工具的革新，还带了交通管理手段的革新，这些技术的运用使得现有的交通网络的运行效率更容易得到保证。

2.3.2.1 监控技术

交通监控是指监视和收集交通状况的信息并进行集中处理。交通监控包括交通路段的监控、交通枢纽的监控以及载运工具运行状况的监控。路段监控是指在交通繁忙、事故较多的路段上安装监控摄像头或车辆，收集交通量、车速、车辆通过时间等信息，并将它们传送到控制中心，进行处理和分析。交通枢纽的监控则是收集交通枢纽内部的客流量、旅客等待时间等信息。

2.3.2.2 动态诱导技术

动态诱导技术主要是针对公路运输方式的路线导行技术。采用动态诱导技术的路线导行系统一般使用计算机根据公路网络上各个路段的交通状况来进行交通状况的实时预测，进而为出行车辆提供“最佳路线”的导行信息，使之能避开交通量比较大，交通拥挤严重的路线，改行交通压力较小的路线，以最短的时间到达目的地，从而实现路网整体交通流优化的一种交通信息发布系统的统称。

2.3.2.3 通讯技术

通讯技术的发展是配合上面两个技术发展而来的，通过监控所发现的问题以及通过路线导行系统所计算出来的最佳路线都必须经由通讯技术传达给交通参与者，以便交通参与者采取及时的措施。常见的通讯手段包括路边可变信息标志、车载信息显示导行系统、交通广播、手机短信、网络等。

2.3.3 政策因素

2.3.3.1 各地方政府的交通政策

经济圈的发展往往突破了行政区的界限，成了跨越行政区的经济区，因而存在着大量的跨越行政区的协调任务。正确的政策有利于促使资源在空间的优化配置、控制经济圈内部差距扩大，协调经济圈内部关系。由于交通业的特殊性质，它的发展必然要受到政府行为的制约。合理的政府行为将促进交通系统内部及其与外部系统之间的协调；反之，交通发展则容易受到阻碍。政府的政策对于交通网络综合效率的影响是多方面的，有的政策会影响交通投入，有的政策会影响交通需求和交通网络服务能力。作为政府部门应当根据实际情况及时修正相关政策，促使经济圈交通网络向节能高效的方向发展。

2.3.3.2 经济圈总体发展规划

经济圈总体发展规划是经济圈的发展蓝图，它对经济圈内各行业，包括交通业的发展都具有重大的指导意义。在很大程度上，经济圈规划将决定交通网络在未来多年内的发展态势甚至于具体项目的具体布局，经济圈发展取向将大大影响交通网络发展方式的选择。为了实现一定的发展取向，如环保取向、节能取向、大交通容量取向等，政府可以通过税收、投资、价格等经济杠杆以及舆论导向来左右经济圈交通网络发展的方向。

2.3.3.3 交通管理措施

交通管理的措施、方法较多，各种措施的有效范围广狭不一，涉及的时间长短也不同。全局性管理是指在经济圈范围内，在较长时间内有效的那些措施。如对驾驶员的管理、对载运工具的管理等，特别是信号、标志、标线等给交通参与者传递法定含义的管理设施。这些管理措施和设施一般有一个统一执行的规定，以免各地方之间因管理方法的差异而产生混乱。局部性管理是指仅在局部范围内，在较短时间内有效地一些措施。如在规定时间内某个路段禁行等。这些措施可根据当地当时的特殊交通条件，为了适应某种交通需要而提出。

交通管理的一个很重要的手段就是通过颁布交通法规和规则，规定载运工具在交通运输设施中运行时的行动准则，以保证交通流畅有序，确保交通参与者的安全。主要内容包括载运工具的管理和检验、驾驶员的培训和规则以及载运工具的运行规则。载运工具和管理直接关系到交通网络运营时的安全性，只有严格把关的检验和培训才能降低事故率。载运工具的运行规则主要是对公路运输方式中车辆运行规则的管理，概括起来主要有分道行驶、最高车速和驾驶规则（跟车、会车、超车规则等）三个方面。其中对于最高车速的规定直接关系到公路网络的服务能力，因为无论车辆的自身性能多好，最高时速多快，实际行驶时都不能超过路段规定的最高车速。

除了硬性的交通法规和规则，还可以通过其他手段来进行交通管理，依据管理性质可以大致分为两类，即交通系统管理和交通需求管理。交通系统管理着眼于提高现有交通设施的使用效率，也就相当于是提高交通网络的服务能力。交通需求管理着眼于对交通需求，企图降低需求量，以适应现存交通网络的服务能力。另外值得一提的是，这两类交通管理的基本措施中都涉及到了收费管理的问题，即运用价格杠杆来调节交通量的时空分布，尽量使交通网络上的交通量可以均衡分布。

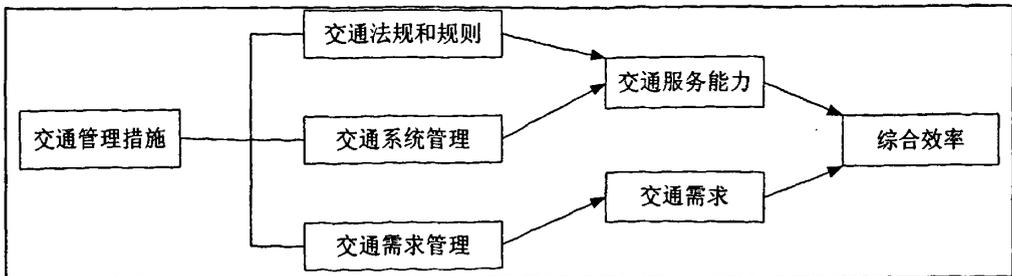


图 2-7 交通管理措施对经济圈交通网络综合效率影响机理示意图

2.3.4 环境因素

这里的环境不光是指自然环境，还包括社会环境、经济环境等。这些环境因素加在一起构成了交通网络所处的整个环境背景。

2.3.4.1 社会经济发展程度

在影响经济圈交通的诸多因素中，经济圈社会经济发展程度是最密切相关的因素之一。因为它既是产生交通需求的源点，又是促进交通供给的动力。社会经济的繁荣与交通网络的发展是互相依赖、互相促进的关系。

日本前首相田中角荣在《列岛改造论》一书中有以下两条著名结论，“国家的先进程度是和人民交通距离成比例的”，“国民生产总值的增长同交通量、交通距离的增长成正比”。该结论同样适用于经济圈，如果以人均国民生产总值作为经济圈社会经济发展程度的定量概念， P 为人均国民生产总值增长率， T 表示人均交通出行次数增长率， D 表示人均出行距离增长率， K 是一个变值系数，则上述结论可以用数学模型表示为：

$$P = KTD$$

这一模型充分说明了经济圈交通与经济圈社会经济发展的密切关系。

经济圈社会经济的繁荣发展，必然会使得区域辐射力上升，商品经济、物质文化交流加快，带来人流、物流的大幅度上升，从而产生大量的交通出行需求。另一方面，随着社会经济的发展、生活水平的提高，人们对交通出行方式的要求也会越来越高，势必会选择便利、快捷、舒适的载运工具。

综上所述，可知，经济圈的社会经济发展程度是与交通需求成正比的，社会经济越发达，交通需求就越大，其中包括交通出行需求和交通服务质量的需求，如果交通设施和载运工具的发展跟不上社会经济的发展速度，那么经济圈交通网络的效率必然低下。

2.3.4.2 人口数量

经济圈人口的数量、空间分布和密度是确定经济圈交通设施与结构的重要依据。经济圈的人口密度与交通设施的规模相关。在经济圈发展过程中人口数量与交通用地规模之间一直处于一种由不适应到适应再到不适应的动态循环之中，其中不适应是长期的、绝对的，适应是暂时的、相对的。

在经济圈发展进程中，由于社会经济发展的吸引力，人口数量除了自然增长外，还有很大数量的机械增长，即吸引周边地区的人口大量涌入经济圈，机械增长率大大高于其他地区。因此经济圈内的口数量增长与交通设施规模增长的不平衡性表现得十分突出，一旦人口增长过快，就容易产生交通问题。

因为经济圈的地域范围是相对固定的，人口数量的高速增长必然也就意味着经济圈内的口密度增加。而人口的高度密集则必然会带来巨大的交通出行量，特别是增大了单位面积上的交通发生量。可见经济圈的人口数量是和经济圈的交通需求成正比的。人口越多，交通需求就越大，就越难满足，如果交通设施的规模跟不上的话，经济圈交通网络的效率自然高不了。

2.3.4.3 布局形态与地理环境

经济圈的布局是指经济圈的物质（环境）实体在地域空间上的投影，具体分为经济圈的人口布局、经济产业布局、土地功能布局以及交通形式结构等。经济圈的布局形态直接影响到经济圈交通网络的布局，而经济圈内的地理环境也在一定程度上制约着交通网络的布局。这个布局不仅包括交通线路的设置和走向，还包括交通枢纽的选址。可以说是经济圈的布局形态和地理环境决定了经济圈交通网络的布局形态。而经济圈交通网络的布局形态则与效率是直接挂钩的，影响机理可参见硬件因素的交通运输线路和交通枢纽部分。可见经济圈的布局形态和地理环境对经济圈交通网络效率有着间接的影响。

另外，经济圈所处的地理环境还直接影响到交通运输线路的造价，比如长三角经济圈内河流众多，那便意味着建造公路和铁路时，要建造许多的桥梁，从而使得成本增加，交通投入增大。而地势起伏的地区，修路甚至还要开山凿隧道，所花费的成本就更大了。

2.3.4.4 气候与天气

晴朗天气下的交通运输线路通行能力和恶劣天气下的通行能力差别很大，因此对于短时间内以及恶劣天气所占比例较高的经济圈交通网络综合效率而言，天候因素不能忽视。恶劣天气包括雨雪、霜冻、雾天等。在这样的天候下需要对交通运输线路的通行能力做相应的折减，也就意味着交通服务能力的下降。

第三章 经济圈交通网络结构分析

3.1 经济圈交通网络的结构组成

由第二章经济圈交通网络概念可知,经济圈交通网络包含各种交通运输方式的站点、枢纽、纵横交错交通运输线路以及相应的配套设施。但是这样的表示方法显然不利于抽象分析,因此引用图论中节点、边、权的表示方法,对交通网络进行抽象地表示,这种抽象的交通网络结构称为拓扑结构^[9]。

经济圈交通网络拓扑结构的基本要素为:节点、边、权。

3.1.1 节点

在一般的交通网络拓扑结构中,节点是交通流产生、消失或者交通流路径转换的地点,节点之间由边连接。具体到经济圈交通网络的拓扑结构,节点代表的便是各种交通运输方式的站点、两种或多种交通运输方式的换乘枢纽以及规模较大的交通流交汇地(如小城镇、城市间交通网络中的重要交通交汇处等)^[19]。很多人会误把节点单纯等同于枢纽,确实,大城市中具有综合运输功能性质的交通枢纽固然是节点,可单一交通运输方式的大型站点亦是经济圈内交通流的重要的集散地。一些规模较小的城镇也许并没有大型的交通站点和枢纽,不妨将整个城镇作为一个节点看待,直接考虑城镇的进出交通流。城市间交通网络中重要交通交汇处,如城际公路上的重点交叉口和航路上的主要分支口,亦可作为节点,因为其直接与交通流的路径走向相关。其他三种交通运输方式,铁路、航空、管道,因为其路线固定,且中途转换路线必然经过站点或是枢纽,所以不存在重要交汇处一说。

节点本身作为交通设施,占有一定的土地面积,拥有一定的通行能力,并可依据其功能、复杂程度和所处位置进行分类。

节点按功能可以划分为收发节点和中转节点。

收发节点指的是产生交通流和吸引交通流的节点。在城市交通网络中,此类节点通常指的是居民的生活小区以及其他类型的小区。在经济圈交通网络中,收发节点一般指一个城市、乡镇。当然,一些大城市很可能有多个大型对外交通站点和枢纽,那么这些站点和枢纽也可看作是收发节点。收发节点一般也都承担着中转的功能,交通流密集。

中转节点指的是交通线路的交汇处,交通流在这里进行交通行为的转换,要么更换交通工具,要么存在交通路线的选择问题。从微观上来看,中转节点一般指道路交叉口以及地铁、公交站点等,对于经济圈交通网络来说,中转节点则指城际公路网上的重要交汇处以及水域航路上主要分支口。

中转节点只为过往交通流提供一定的通行能力,本身并不会产生或吸引交通流,自然也不会反映出所处区域的社会经济状况。在对中转节点进行分析时,可以将其假设为虚拟小区。

按照节点的复杂程度,可以把节点划分为简单节点和复合节点。

复合节点的功能比较多,交通枢纽和两种以上交通方式公用的站点就是复合节点。在对复合节点进行分析时,可以将其看作是多个简单节点的组合。而交叉口、单一交通方式的站点则属于简单节点。复合节点的对于经济圈交通网络来说其重要程度比简单节点大得多,需要重点分析。

按照节点所处的位置,可以将分为圈内节点和圈外节点。

圈内节点是指位于经济圈区域范围内的节点。圈外节点,则是指位于经济圈外的节点。经济圈作为一个开放式的系统,必然是时刻与圈外的其他地区进行着人员、物资、能量以及信息上的交流,因此重要的圈外节点也应在经济圈交通系统的考虑范围之列。圈外节点一般指邻近经济圈的重要城镇和交通枢纽、港

站。圈外节点在分析时可以将其看作是外围的虚拟小区，并且同一方位的节点可以合并考虑。

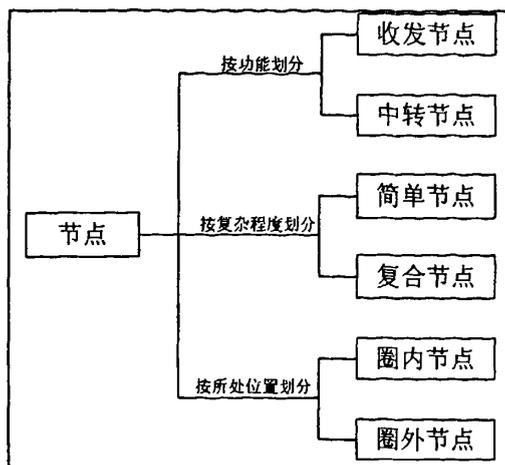


图 3-1 经济圈交通网络节点的类型划分

3.1.2 边

在交通网络拓扑结构中，边用于连接两个节点，具有方向性，是交通流通行的主要载体。城市交通网络中的边，一般代表城市道路，具有等级、车道数目、长度、宽度等属性，另外也可以表示公交、地铁等各个车站之间的区间线路。经济圈交通网络中的边则代表的是公路、铁路、航空、水运、管道这五种交通运输方式的站点、枢纽或结合部之间的区间线路，例如两城市间的城际公路、两地区间的航道等。

边根据不同场合的需要可以划分为以下三种类型：

1. 简单的边

简单的边是指某一种交通运输方式的一个具体的路段，并且在此路段上没有影响交通行为的设施，即不存在交汇处以及交通站点等。

2. 虚拟的边

虚拟的边在进行路网分析的时候经常会用到。对于相邻的两个节点来说，连接它们的可行的路径就是一条边。

3. 通道

如果两个节点之间存在多种交通运输方式的多条路径，那么就可以以一个复合的通道来表示这两个节点之间的连接。

3.1.3 权

权是与交通网络的有向边相关的指标。权可以简单地取值为有向边的路程、行驶时间、费用等，但这样的取值往往只能片面地反应出路况的一个方面，不够精确。因此还出现了以综合模式来表示权的方法，即将边的静态数据和动态数据组合起来进行表示。静态数据是指交通基础设施的基本数据，对于公路而言就是指公路的等级、车道数、长度、路面质量、静态交通管制方案（标志标线等）。动态数据则是指交通状况相关信息，就公路而言就是指交通量、平均车速等，这些变量最终可以归纳为路阻函数。总之，可以将权看作是一个独立的变量。

由于经济圈交通网络中的交通节点之间通常存在多种交通运输方式，每一种交通运输方式又可能存在多条线路，这时节点间的边的权值可以采用加权平均行程时间 t_{ij} 或加权平均运输距离 d_{ij} 来表示，计算方法为：

$$t_{ij} = \frac{\sum_{a=1}^n q_a t_a}{\sum_{a=1}^n q_a} \quad (3.1)$$

$$d_{ij} = \frac{\sum_{a=1}^n q_a d_a}{\sum_{a=1}^n q_a} \quad (3.2)$$

q_a 表示节点 i 和 j 之间每一条交通运输线路的交通量;

t_a 表示节点 i 和 j 之间每一条交通运输线路的平均行程时间;

d_a 表示节点 i 和 j 之间每一条交通运输线路的长度;

n 为节点 i 和 j 之间交通运输线路的数目。

由于交通参与者在选择了客货运输的交通方式之后,具有自发选择最短行程时间或运输距离的特性,可见,即使同一种交通运输方式的交通运输线路不只一条,但绝大部分交通量仍然会集中在最短线路上。因此,在对权值要求不甚精确的情况下,式(3.1)和式(3.2)可以进一步简化,即将 q_a 取值为每一种交通运输方式的交通量, t_a 为每一种交通运输方式的最短行程时间, d_a 为每一种交通运输方式的最短运输距离,此时 n 即为节点间的交通运输方式种数。

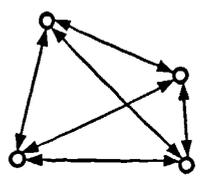
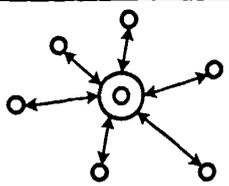
3.2 交通网络的基本单元形式

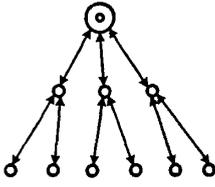
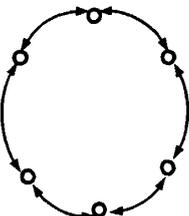
合理的经济圈交通网络形式有助于整个经济圈交通网络效率的发挥,提高经济圈范围内的可达性,节约交通设施建设运营资金,缩短运输时间,降低运输费用,从而赢得良好的经济、社会和环境效益。

而对经济圈交通网络形式的准确把握,更有助于我们从宏观上把握经济圈交通网络的优缺点,为交通基础设施的建设提供参考。本节便就交通网络中常见的一些网络结构形式做一个介绍。

在交通网络中,有五种具有典型特征的基本单元形式,任何一个交通网络都可以拆分为这五种基本单元形式的组合。这五种基本单元形式在某些情况下是可以相互转换的,而它们各自的优缺点也会随着具体情况的不同而有所不同。

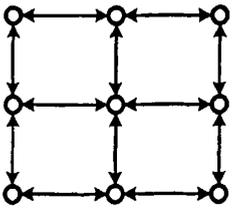
表 3.1 交通网络基本单元形式表

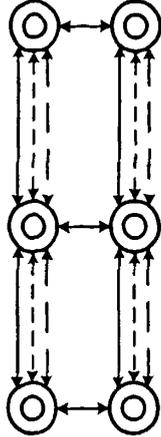
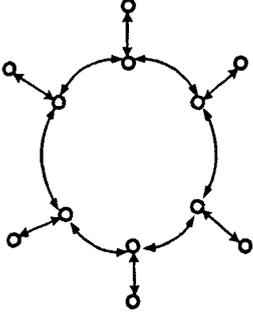
名称	介绍	优缺点	适用范围	示意图
全通网络单元	全通网络单元形式中的各个节点之间全部都有边相连接。	优点是运输费用最省,运输可靠性最高,各节点之间运距最短,缺点是基本建设最多,建设总里程最长。	这种形式的路网一般适用于重要程度相当的节点间的直达交通联系,如经济圈干线网布局、城市群交通网络规划等。	
放射单元	放射单元形式表现为一个中心节点和分布于四周的卫星节点,中心节点在整个交通	优点为方向可达性较高,建设总里程较少,成本低,缺点是中心节点的交通压力过大,可靠性一般。	这种形式的路网一般适用于重要程度相差较大的节点间的交通联系,有助于促进核心城市对周围地区的辐射和影响	

	中处于中心枢纽的地位。		作用。	
树形单元	树形单元的节点分为好几个层次，每一级节点都与上一级节点相连，最终由次级节点与顶层节点相连接，层次分明。	优点是串联各节点的建设总里程最少，成本最低，缺点是可靠性较差。	这种形式的路网一般适用于连接干线公路与支线公路，如县乡公路网的布局规划。	
带状单元	带状单元中的节点全部以直线方式相连接，且每个节点只和相近的两个节点有连接。	优点是快速沟通重要节点，性价比高，缺点是可靠性极差，一旦某路段受阻，便会波及整条路径。	带状单元常用于一些干线交通方式的建设模式，如高速公路、铁路等	
环状单元	环状单元中的全部节点连成一个闭合的环。	环状单元形式的主要作用在于加强外围各交通节点的联系，截流外围区域内的客流以减轻中心区域的交通压力，当出现路段受阻时，便成为带状单元的情形，可靠性中等。	这种单元形式多见于城市和地区的外围环绕交通。	

在这五种基本单元形式的基础上，交通网络变化万千，其中又有一些具有典型意义的发展形式。下面便就以下三种变化形式做一个简单的介绍。

表 3.2 交通网络变化形式表

名称	介绍	优缺点	适用范围	示意图
棋盘形式	棋盘形式是指以纵横有序的线路连接交通节点的形式。	优点是线网布线均匀，交通节点可以分散布置，利于交通组织，机动性强，可靠性相对高，缺点是非直线系数大，平行线路间互相联系较差，而且工程量最大，另外由于交通流量分散，因此不容易集中发展。	在区域范围内的交通节点重要程度差别不大时，容易形成这样的形式，其特点是平行线路多，相互交叉次数少。	

<p>并列形式</p>	<p>并列形式是好几条带状单元构成,且每一条带状单元都有几条平行线路(一般是指不同交通运输方式的线路)共同联系着一系列节点,而处于两条带上的节点之间的联系则不强。</p>	<p>并列形式的优点是效率高,能够充分发挥将两个节点之间的连接优势,连接的可靠性随着并联线路数目的增加而增加。缺点在于两条带上的节点之间联系较弱,效率优势的范围有限。</p>	<p>并列形式适应了当今交通快速重载的技术发展趋势,有利于核心城市之间快速运输的发展。</p>	
<p>放射环状形式</p>	<p>放射环状形式是由环形单元形式和放射单元形式组合变化而来。</p>	<p>放射环状形式优点是中心区域与周边区域之间的连接线路的非直线系数最小,缺点是中心区域的交通压力很大,交通组织复杂,而且一旦中心区域交通出现问题,整个交通网络将陷入瘫痪,可靠性不够。</p>	<p>目前很多大城市和周边区域之间的交通形式都是采用的这种形式。环形旨在稳定环内区域,引出过境交通,放射形旨在以高效的方向性连接周边区域。</p>	

实际的交通网络都是上述五种基本单元和形式和三种变化形式的混合形式,这样的混合形式可能具有这几种形式的优点,也有可能具有这几种形式的缺点。

3.3 经济圈交通网络的抽象表示

经济圈交通网络是由经济圈地域范围内的交通节点和交通线路(边)所组成的一个完整的系统。这个系统里的交通节点可大可小,从宏观上看,可以将一个城市作为一个交通节点,精确到细节的话,也可以将交通节点细化到乡村小站点。交通线路(边)包含的形式就更加错综复杂,既可以是高速公路、等级公路,也可以是高速铁路、水路,甚至还可能是乡间的无等级公路。

在对经济圈交通网络进行研究时,可以按地理位置、经济状况、人口数量、区域功能等指标将经济圈划分为若干个交通小区。各交通小区拥有各自的交通中心(即交通节点),并确定各小区的影响范围。在经济圈交通网络中,交通干线及主要交通枢纽承担着绝大部分的小区间客货运量,非干线线路承运的区间交通量很小。各交通小区的区内交通量也有可能给区内的交通节点带来较大的交通压力,从而影响到区间客货运的正常进行,因此在对精准度要求很高的情况下,区内交通量也应纳入到考虑因素中。

3.3.1 交通网络的表示

鉴于现实的交通运输网络纷繁复杂,在对其进行分析研究时便免不了要进行一定程度的简化、假设和抽象描述。交通网络的表示实质上便是实现对网络的抽象,并在抽象的基础上通过某种介质将其表示出来。目前大多是以计算机为介质,将交通网络的信息表示在计算机上,以方便在计算机上进行分析处理。如今计算机技术已经高度发达,计算机可以对各种交通网络进行辨识、搜索、存储及运算,并且可以为交通分

配、网络优化、交通量预测分析及交通质量评价等工作提供技术支持。

依据抽象程度的不同，交通网络的表示可以分为以下几种类型^[10]：

1. 详尽的交通网络

近乎完全按照现实网络进行绘制，内容全面，但分析起来较为困难。详尽的表示方法可以是详细的图形表述，也可以是通过复杂的数据结构完成的数值表示，还可以是详尽的文字表述。

2. 逻辑网络

对实际交通网络进行功能性或者结构关系的简化，得到抽象的逻辑性网络，其中的节点和边代表交通逻辑关系。逻辑网络还可细分为功能性网络、可达性网络等。逻辑网络通常用于对交通网络进行性能分析。

3. 结构网络

仅仅模拟交通网络的结构，进行辅助性的管理使用。

4. 参数网络

仅仅对主要参数进行抽取，一般只适用于规划或者管理的某个方面。

3.3.2 经济圈交通网络的区划

交通网络可以抽象为由若干节点和边组成的有向网络图。为此，需要将经济圈区域划分为一些相对独立的亚区域，这个工作称为“区划”。区划工作旨在揭示经济圈内的社会经济活动与交通网络之间的关系。只有在区划完成之后，才能相继确定各亚区域的节点以及连接各亚区的区间交通线路（边），从而完成对经济圈交通网络的抽象描述。网络描述是经济圈交通网络分析的基础工作，而区划则是网络描述的基础工作^[11]。

1. 区划的层次

根据研究的实际需要，区划的详细程度可以有所不同，大致可分为微观、中观和宏观三个层次。对于经济圈交通网络来说，效率分析属于一个宏观的范畴，因此，可以将区划层次定位宏观。

2. 区划的原则

区划时应遵循的原则有以下四条：

- (1) 社会经济现状与区域发展规划相结合。
- (2) 区域经济中心与其吸引范围相结合。
- (3) 交通网络的布局与客货交通流相结合。
- (4) 行政区划与自然地理条件相结合。

3. 区划方法

区划应在调查和收集历年资料的基础上采取系统分析的方法，根据经济圈内的社会经济状况、地理位置确定经济中心、交通中心，然后再根据该中心的交通影响范围来进行区划。

4. 范围界定问题

由于经济圈交通网络的开放性，经济圈边缘区域的交通节点必然和一些圈外节点也有着密切的交通联系，在区划过程中，默认的方法是经济圈和外界之间的分界一定在某个圈内节点上。区划后，圈内节点的对外交通不再独立进行分析，而是将对外交通看作是整个经济圈交通网络的对外交通关系。

3.3.3 交通网络的表示方法

在经济圈交通网络分析处理过程中，需要将实际的交通网络抽象为节点和边的集合体，而抽象完成之后还需要将抽象图进一步表示成为计算机可以分析处理的计算机语言。

目前表示方法有以下五种。

1. 邻接矩阵

邻接矩阵是表示各交通节点之间连接关系的矩阵，是交通网络最常用的数值表示方式。邻接矩阵 C 的元素取值按下述规则确定：

$$C(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 和 } j \text{ 之间存在连接线路} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 和 } j \text{ 之间不存在连接线路或者 } i = j \end{cases}$$

因为交通网络中的线路都是双向行驶的，所以有 $C(i, j) = C(j, i)$ 。即邻接矩阵 C 肯定是对称矩阵。

2. 路编目表

路编目表表示法是将交通网络中节点和线路依次编上序号，然后根据线路的序号以及线路所对应的起讫节点号存储网络。一般情况下，采用顺序编目的办法，序号数值小的线路先排序，已编排过的线路不再编排。路编目表的运算不太方便，但在分配交通量等细致到节点与线路的工作时，可以将线路号与线路起讫节点号一一对应起来，为工作带来便利。

3. 路权矩阵

邻接矩阵和路编目表所提供的信息只能识别节点与节点之间的邻接关系，即可以根据它们确定交通网络的连接方式。但连接节点的这些线路的状况如何，上述两种表达方式无法反映出来。路权矩阵就是在邻接矩阵的基础上，进一步考虑了节点间连接线路的交通状况（即路权）之后改进的表达方式。路权可以取值为两节点之间的路程、行驶时间、费用等。路权矩阵 D 的元素取值按下述规则确定：

$$d(i, j) = \begin{cases} 0, & i = j \\ \infty, & \text{节点 } i \text{ 和 } j \text{ 之间不存在连接线路} \\ \alpha, & \text{节点 } i \text{ 和 } j \text{ 之间存在连接线路，线路的权值为 } \alpha \end{cases}$$

通过路权矩阵不仅可以判断出节点之间的连接关系，还能确定连接线路的优劣

4. 邻接目录法

当交通网络有 n 个交通节点时，邻接矩阵和路权矩阵就是 $n \times n$ 阶。可见，一旦交通网络比较复杂，节点一多，这两个矩阵就会很庞大，数据量很多。交通网络中有邻接关系的节点毕竟只是一小部分，因此矩阵中的绝大多数元素都是无意义的无效元素。网络越复杂，矩阵中无效元素所占的比例就越高。这样一来不仅记录繁杂，容易出现错漏，计算起来也徒添不少麻烦，影响计算效率。

邻接目录法就是为了解决无效元素过多这个问题而产生的。邻接目录法只输入有效元素，即只输入每一个节点有邻接关系的线路和节点的信息，从而构建起整个交通网络结构。在表示时，一共有三组数组，第一组数组 $R(i)$ ，表示与节点 i 相连接的线路的条数，第二组数组 $V(i, j)$ ，表示与节点 i 有线路相连接的节点的节点号，第三组数组 $W(i, j)$ ，表示与节点 i 相连接的线路的权值，线路权值的顺序与数组 $V(i, j)$ 的节点顺序相一致。根据实际需要，第三组数组 $W(i, j)$ ，也就是线路权值可以有好几组，分别表示线路的不同信息，行程距离、行驶时间、费用等等。

5. 信息矩阵^[6]

上述四种方法所表示的交通网络信息十分有限，前两种只表示出了连通度，而后两种也只显示了简单的路权。信息矩阵则可以将交通网络的线路信息尽可能的包容在矩阵中，如线路的类型、等级、里程、通行能力等一系列相关信息。信息矩阵 B 的元素的表示如下例所示：

$$B_{ij} = (\text{线路类型, 线路长度, 通行能力, 运输费用})$$

其中后三个值都是数量值，而线路类型可以规定公路为 1，铁路为 2，水路为 3，航道为 4、管道为 5，这样便可以转为数值代替。可见信息矩阵 B 的元素为行向量。

当然节点 i 和 j 之间有可能不只一条线路相连接，因此矩阵元素的表示也可以是几条线路信息的并列，因此元素值也可以是 n 维行向量， n 为节点 i 和 j 之间存在的交通运输线路的数目。继而交通节点的信息，如人口、GDP、通行能力等则可以另立附加表格。

3.3.4 经济圈交通网络的表示实例

上一节介绍了交通网络的五种表示方法，这一节便以长三角经济圈为例，选用这五种表示方式中的部分方法将长三角经济圈交通网络进行抽象化表示。

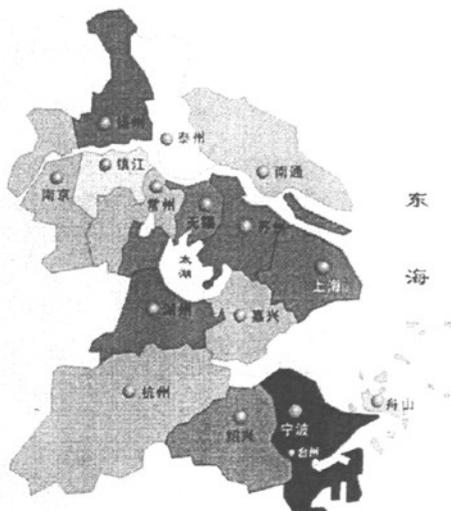


图 3-2 长三角经济圈主要城市分布示意图

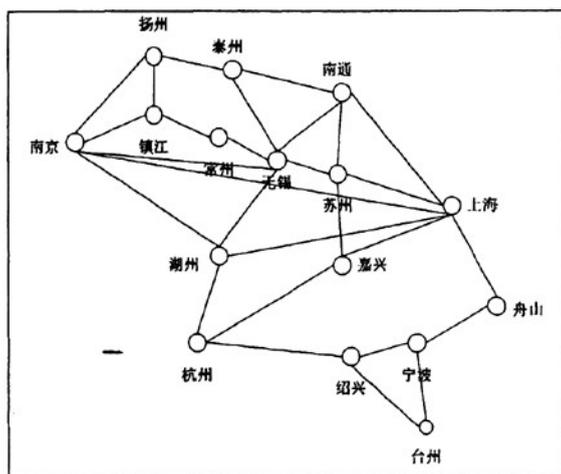


图 3-3 长三角经济圈交通网络抽象图

图 3-3 是笼统抽象化后的长三角经济圈交通网络示意图，图中城市间存在连线便表示这两个城市之间有高速公路、国道、铁路或水路相通。这里没有将低等级公路、管道和航空列入考虑。

因为用计算机进行运算时无法将节点（城市）和路段的名称用汉字来表示，因此需要对节点和路段进行数字编号。这里按照从北到南、从西到东的地理位置顺序为节点确定编号。各个交通节点（城市）的数字编号如下表所示。

表 3.3 长三角经济圈交通节点编号表

扬州	泰州	南通	南京	镇江	常州	无锡	苏州
1	2	3	4	5	6	7	8
上海	湖州	嘉兴	杭州	绍兴	宁波	舟山	台州
9	10	11	12	13	14	15	16

根据编号之后的节点的路段，可以将长三角经济圈交通网络的抽象图修正如下：

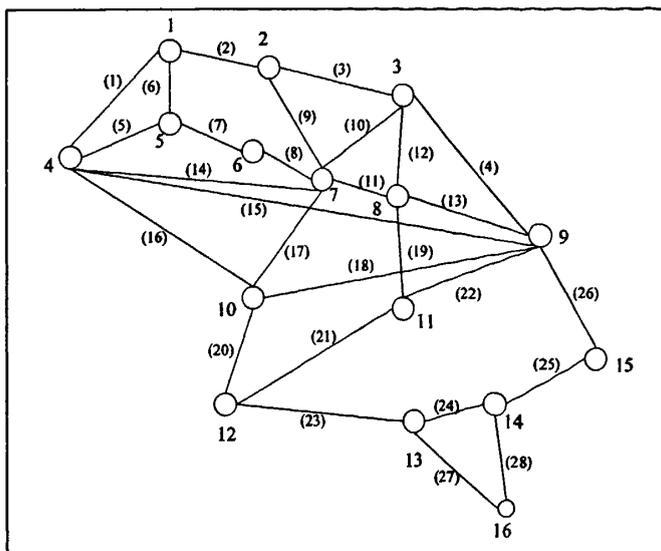


图 3-4 长三角经济圈交通网络拓扑结构

下面便分别利用路权矩阵、邻接目录和信息矩阵这三种方式来进行抽象化表示。

1. 路权矩阵

本文取两节点之间的行程距离，也就是线路的长度为路权。在两地之间有高速公路的情况下取的是高速公路的里程数，而在没有高速，有国道的情况下，则取的是国道的里程数。另外，因为舟山，也就是交通节点 15 所处的位置比较特殊，因此部分线路为水路。

在明确了路权取值方法之后，根据上一节的矩阵元素确定规则可以列出长三角经济圈交通网络的路权矩阵 D 如下。

D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	60	∞	48	36	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
2	60	0	106	∞	∞	∞	140	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
3	∞	106	0	∞	∞	∞	132	122	147	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
4	48	∞	∞	0	52	∞	169	∞	312	208	∞	∞	∞	∞	∞	∞
5	36	∞	∞	52	0	61	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
6	∞	∞	∞	∞	61	0	36	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
7	∞	140	132	169	∞	36	0	42	∞	149	∞	∞	∞	∞	∞	∞
8	∞	∞	122	∞	∞	∞	42	0	83	∞	78	∞	∞	∞	∞	∞
9	∞	∞	147	312	∞	∞	∞	83	0	160	86	∞	∞	∞	135	∞
10	∞	∞	∞	208	∞	∞	149	∞	160	0	∞	76	∞	∞	∞	∞
11	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	78	86	∞	0	70	∞	∞	∞	∞
12	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	76	70	0	63	∞	∞	∞
13	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	63	0	100	∞	243
14	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	100	0	75	201
15	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	135	∞	∞	∞	∞	75	0	∞
16	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	243	201	∞	0

2. 邻接目录

邻接目录的三组数组，前两组根据图 3-4 可以轻易获得，第三组数组，也就是线路的权值的取值方法与路权矩阵相同，采用两节点之间的行程距离。可以列出长三角经济圈交通网络的邻接目录表如下。

表 3.4 长三角经济圈交通网络邻接目录表

节点号	$R(i)$	$V(i, j)$	$W(i, j)$
1	3	2, 4, 5	60, 48, 36
2	3	1, 3, 7	60, 106, 140
3	4	2, 7, 8, 9	106, 132, 122, 147
4	5	1, 5, 7, 9, 10	48, 52, 169, 312, 208
5	3	1, 4, 6	36, 52, 61
6	2	5, 7	61, 36
7	6	2, 3, 4, 6, 8, 10	140, 132, 169, 36, 42, 149
8	4	3, 7, 9, 11	122, 42, 83, 78
9	6	3, 4, 8, 10, 11, 15	147, 312, 83, 160, 86, 135
10	4	4, 7, 9, 12	208, 149, 160, 76
11	3	8, 9, 12	78, 86, 70
12	3	10, 11, 13	76, 70, 63
13	3	12, 14, 16	63, 100, 243
14	3	13, 15, 16	100, 75, 201
15	2	9, 14	135, 75
16	2	13, 14	243, 201

3. 信息矩阵

信息矩阵作为表示最详尽的方式，可以清楚地看出两个节点之间的连接线路的直观信息。按照上一节的元素确定规则，可知：

$$B_{12} = B_{21} = \begin{pmatrix} 1, 60, 3000, 40 \\ 1, 40, 1000, 20 \\ 2, 64, 1400, 19 \end{pmatrix}$$

其中通行能力取的是每小时旅客运输人数，运输费用取的是旅客花费的金额。依次类推可以将节点之间的信息元素都表示出来，信息矩阵自然也就完成了。

3.4 经济圈交通网络结构的分析

3.4.1 经济圈交通拓扑网络的可达性

针对经济圈交通网络抽象出的拓扑网络，可以通过整体可达性矩阵或最短距离矩阵运算来获取节点和网络的可达性水平^[12-13]。

整体可达性矩阵可由网络的邻接矩阵导出。记 C 为邻接矩阵， n 为交通网络中节点的数目，可以证明， C 的 k 次幂 C^k 的元素 c_{ij}^k 表示从节点 i 经过 k 步到达节点 j 的路径数目。则可达性矩阵

$T = C^1 + C^2 + \dots + C^n$ 。节点 i 到达所有节点的直接和非直接路径数目总和 $t_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}$ 。由此可得出各节点

的相对可达性指标 T_i ：

$$T_i = \frac{t_i n}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (3.3)$$

最短距离矩阵可由网络的路权矩阵导出。记最短距离矩阵为 D ， d_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间的最短路径。则节点 i 到达所有节点的最短路径总和 $d_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}$ 。由此可得各节点的相对可达性指标 D_i ：

$$D_i = \frac{d_i n}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (3.4)$$

3.4.2 经济圈交通网络的结构效率

一个既有的交通网络，如果不考虑外在因素（如交通需求变化、管理政策变化等）的影响，也就是说，在交通需求固定的情况下，一个既有的交通网络能够提供的最大服务能力与其消耗的交通投入的比值应该是一个固定值，在此将这个值定义为交通网络的结构效率。

也可以通过数学方法更加直观地对其进行定义。首先定义一个交通网络 $G = (N, A)$ ，其中 N 为交通网络中的节点集合，节点数 $|N| = n$ ， A 为交通网络中的边的集合，边数 $|A| = a$ ，则该交通网络的固有效率 $E(G)$ 可以定义为^[14]：

$$E(G) = \frac{1}{2n} \sum_{i \in A} \left(\frac{x_{i1}}{p_{i1}} + \frac{x_{i2}}{p_{i2}} \right) \quad (3.5)$$

其中： x_i 表示在交通网络总流量达到最大时，边 i 上的交通流量，而交通网络中的边 i 大多为双向行驶，因此以 x_{i1} 和 x_{i2} 分别表示边 i 上两个方向的交通流量， $x_i = x_{i1} + x_{i2}$ ；

p_i 表示在交通网络总流量达到最大时，边 i 上的交通运输费用， p_{i1} 、 p_{i2} 应与 x_{i1} 、 x_{i2} 相对应，

$$p_i = p_{i1} + p_{i2}。$$

对于经济圈交通网络来说，边 i 往往表现为通道的形式，即好几种交通运输方式的线路并存，共同承担着连接节点的功能。因此在计算流量时应当将几种交通运输方式的线路合起来看成是一条虚拟的边，边的流量就应该等于几条线路流量的和，同样，边的费用等于几条线路的费用之和。

考虑到现实交通网络中，各条边的重要性不同，因此可以在式 (3.3) 中为每条边添加一个权重 λ_i ，以突出或降低某些的路段的影响力。改进后的交通网络固有效率 $E(G)$ 计算公式为：

$$E(G) = \frac{1}{2n} \sum_{i \in A} \lambda_i \left(\frac{x_{i1}}{p_{i1}} + \frac{x_{i2}}{p_{i2}} \right) \quad (3.6)$$

其中： λ_i 为边 i 的重要性权重， $\lambda_i > 0$ ；其他同式 (3.5)。

x_i 的确定不仅要考虑边的设计通行能力还要考虑节点的设计中转能力，边和节点都是交通总流量的约束条件，可见 x_i 的求解是一个寻求最优解的过程，表达为数学形式如下：

$$\text{目标函数：} \max \sum_{i \in A} x_i \quad (3.7)$$

$$\text{约束条件：} x_i \leq f_i, i \in A;$$

$$x_{j(in)} = x_{j(out)} \leq f_j, \quad j \in N;$$

其中： f_i 表示边 i 的设计通行能力；

$x_{j(in)}$ 表示节点 j 的流入流量；

$x_{j(out)}$ 表示节点 j 的流出流量；

f_j 表示节点 j 的设计中转能力。

对于经济圈交通网络来说，可以将一个城镇看成一个节点，其能够提供的不同交通运输方式的中转能力是有限的，因此要确定经济圈交通网络的 x_i ，需要将 x_i 拆分为 x_i^1 、 x_i^2 、 x_i^3 、 x_i^4 、 x_i^5 （分别代表五种交通运输方式），分别求解每种交通运输方式在最大流量目标下边 i 的流量，然后再将边 i 上的各种交通运输方式流量的和求出，即为 x_i 。

根据上述定义，可以看出结构效率其实可以理解为由现有交通网络提供最大服务能力的平衡状态^[15]下，单位运输费用的支出可以服务的交通量。在经济学上看来，结构效率其实就是从费用的角度对交通网络现有结构的平均效率做了一个衡量。

3.4.3 经济圈交通网络的运行效率

结构效率是在没有考虑实际交通需求的情况下所计算出的，可以说是一个完全理想状态下的效率值。交通网络在实际运营时，还需加入交通需求作为约束条件^[16-17]。

在此定义交通网络 G 中的 OD 需求向量为 q ，则交通网络 G 的运行效率 $E(G, q)$ 可以定义为：

$$E(G, q) = \frac{1}{2n} \sum_{i \in A} \lambda_i \left(\frac{x_{i1}}{p_{i1}} + \frac{x_{i2}}{p_{i2}} \right) \quad (3.8)$$

其中： λ_i 为边 i 的重要性权重， $\lambda_i > 0$ 。

x_i 表示在交通网络流量达到平衡状态后，边 i 上的交通流量， x_{i1} 和 x_{i2} 分别表示边 i 上两个方向的交通流量， $x_i = x_{i1} + x_{i2}$ ；

p_i 表示在交通网络流量达到平衡状态后，边 i 上的交通运输费用， p_{i1} 、 p_{i2} 应与 x_{i1} 、 x_{i2} 相对应。

该公式应用于经济圈交通网络时，同样需要对不同交通运输方式分开进行考虑，首先 OD 需求向量就应当细分为各种交通运输方式的 OD 需求向量 q^1 、 q^2 、 q^3 、 q^4 、 q^5 （分别代表五种交通运输方式），然后依次求得各种运输方式平衡状态下边 i 的流量， x_i 即为边 i 上的各种交通运输方式流量的和。边 i 的费用亦等于各种交通运输方式费用的和。

可以看出，在固定的交通网络结构下，交通网络的运行效率将随网络内交通流量的变化而波动，而交通网络的流量又是根据 OD 需求向量 q 来确定的，可见交通网络的运行效率与交通需求有着直接的关系。在实际交通问题中，应该根据实际交通需求来确定交通网络结构，在交通需求发生变化时，也应对交通网络结构作出适当修正，以提高交通网络运行效率。

3.4.4 经济圈交通网络组件的重要度

交通网络组件是指交通网络中的节点或边，可以理解为一个节点或一条边，也可以理解为几个节点、几条边抑或节点与边构成的集合，只要是交通网络 G 中的一部分即可。在交通网络中，这些节点和边的重要程度是不一样的。

重要度的确定方法很多, 依据传统的确定方法^[9], 经济圈节点的重要程度就可以根据对经济圈内各城市的社会、经济、自然、地理等调查分析来确定, 然后再在几点重要度确定的基础上, 类比万有引力场理论分析计算各边权值 λ_{ij} , 计算公式如下:

$$\lambda_{ij} = K \frac{D(i) \times D(j)}{L^2(i, j)} \quad (3.9)$$

式中: K 为调节系数;

$D(i)$ 、 $D(j)$ 为节点 i 、 j 的重要度值;

$L(i, j)$ 为节点 i 、 j 之间的距离。

节点和边都是交通网络组件, 所处的地位应该是平等的, 但是在传统的重要度确定方法中, 计算方法却非一视同仁, 边的重要度的计算是建立在节点重要度的基础上的, 可见以传统方法对网络组件重要度的计算缺乏一致性, 且没有考虑交通需求的影响。

在此给出第二种计算网络组件重要度的方法, 该方法是建立在交通网络运行效率的基础上的, 交通网络 G 中的组件 g 在 OD 需求向量 q 下的重要度 $I(g, q)$ 可以由交通网络 G 在删除 g 后的运行效率 $E(G, q)$ 的相对下降率来衡量。写成公式即^[14]:

$$I(g, q) = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E(G, q) - E(G - g, q)}{E(G, q)} \quad (3.10)$$

在计算某条边的重要度时, 可以直接删除该边, 但是在计算节点重要度时, 如果删除一个节点, 同时还要删除与该节点相连接的所有边。如果删除某条边和某个节点之后导致交通网络中的某 OD 对之间没有路径相连通, 那么在计算时可以在该 OD 对之间建立一条虚拟的路径, 并将该路径上的运输费用设为无穷大。

第四章 经济圈交通网络综合效率的度量方法

经济圈交通网络中的交通运输线路错综复杂，因此在进行综合效率度量的时候可以适当的进行简化，去掉一些对全局影响不大的线路。根据长年的调查结果显示，客货运输在运输距离为 300 km 以下时，基本上全部会选择公路、铁路和水路；运输距离为 300 ~ 500 km 时，旅客中选择航空方式的约占 18.80%，货物运输则仍然是几乎全部选择其他三种交通运输方式。可见在经济圈交通网络实际运营时，内部交通运输的五种交通方式中公路、铁路和水运占绝对主导地位。

铁路和水运的线路是有限的，很容易统计，只有公路网络中交通线路比较错综复杂，但是由于经济圈交通节点之间的公路交通量绝大多数都集中在主干线上，比如长三角经济圈内南京和镇江两地之间虽然存在众多的道路相通，但主干线只有沪宁高速和 312 国道。加上铁路和水运方面的沪宁铁路以及长江水道，便是南京和镇江两地之间的交通主干线。出于以上考虑，当对精度要求不是很高的时候，经济圈交通网络综合效率的度量可以只考虑交通网络中公路、铁路和水运的主干线，这样可以大大节省调查量和计算量。

由第二章定义可知经济圈交通网络综合效率是由交通投入、交通需求满足程度两方面所决定的。因此，本章从这两个方面入手，分别讨论标志着交通投入和交通需求满足程度的合适的指标，并在此基础上进一步讨论经济圈交通网络综合效率的度量问题。

4.1 交通投入

交通投入就是指经济圈交通网络建设、运营和维护所付出的成本，可以从经济成本、社会成本、环境成本三个方面来进行衡量。

4.1.1 经济成本

经济成本是指经济圈交通网络所付出的直接成本，包括各项交通设施的建设、运营、维护，载运工具的购置、运营、维护、能耗以及交通系统保持正常运转所需要付出的人力成本^[41]。

在此需要明确的就是交通设施的涵盖范围，这里交通设施应当包括三种交通运输方式（公路、铁路、水路）的交通运输线、交通枢纽（长途汽车站、火车站、码头等）以及为交通管理服务的监控系统、动态诱导系统和通讯系统。经济圈交通网络硬件设施的总经济投入 E_1 的计算公式可以表示为：

$$E_1 = \sum_{i=1}^n B_i + \sum_{i=1}^n M_i + \sum_{i=1}^m H_i + L + \sum_i P_i N_i \quad (4.1)$$

其中： B_i 表示第 i 条交通运输线路的建造费用；

M_i 表示第 i 条交通运输线路的维护费用；

n 为经济圈内交通运输线路的数目；

H_i 表示第 i 个交通枢纽的建造费用；

m 为经济圈内交通枢纽的数目；

L 表示交通管理系统设备的总购置费用；

P_i 表示第 i 种载运工具的购置单价；

N_i 表示第 i 种载运工具的数量。

可以看出式 (4.1) 对经济圈交通网络总价的估算完全是硬件设施的价值，并没有考虑交通网络运营的

能耗费用和人工费用。而且算出的这个总经济投入可以说是长年以来对交通网络建设投入的总资金,无法看出每一年在交通网络方面的投入资金,因此在考虑年投入资金的时候,需要将时间因素考虑进去,也就是交通运输线路和交通枢纽的建造费用和维护费用都需要根据使用年限进行平摊折算,另外还需要考虑一年内交通网络运营所消耗的能耗费用以及交通系统内的工作人员(包括在载运工具驾驶员、乘务员、管理人员、保养维修人员等)的人工费用^[43]。由此可以列出某一年经济圈交通网络的年经济成本 E 的计算公式为:

$$E = \sum_{i=1}^n A_i + \sum_{i=1}^m \frac{H_i}{Y_{Hi}} + \frac{L_U + L_N}{Y_L} + \sum_{i=1}^3 P_{ri} + \sum_i P_i N_{ri} + \sum_i W_i N_{wi} \quad (4.2)$$

$$\text{其中: } A_i = \begin{cases} \frac{B_i}{Y_{Bi}}, t_i \leq Y_{Bi} \\ \frac{M_i}{Y_{Mi}}, t_i > Y_{Bi} \end{cases} \quad (4.3)$$

A_i 表示第 i 条交通运输线路的在考察年份中的理论资金投入;式(4.3)中的 B_i , M_i 与式(4.1)相同; Y_{Bi} 和 Y_{Mi} 则分别表示第 i 条交通运输线路的设计使用年限和维护有效年限,不过在已知实际使用年限与设计使用年限不符的情况下,则应该取值为实际使用年限,即实际使用年限已知时, Y_{Bi} 和 Y_{Mi} 分别取值为第 i 条交通运输线路的实际使用年限和维护实际有效年限; t_i 表示第 i 条交通运输线路到考察年份为止投入使用的时间。

H_i , P_i , n , m 的含义与式(4.1)相同;

Y_{Hi} 表示第 i 个交通枢纽的设计使用年限,在已知实际使用年限时,优先采用实际使用年限。

L_U 表示考察年份内尚在使用的交通管理系统设备的购置费用;

L_N 表示考察年份内投入使用的交通管理系统设备的购置费用;

Y_L 表示交通管理系统设备的平均使用年限;

P_{ri} 表示第 i 种交通运输方式考察年的运营费用,对于公路和水路来说就是耗费的燃油的总价,对于铁路来说,可能是油价也可能是电力价格,要看所在经济圈的铁路动力为何。

N_{ri} 表示第 i 种载运工具在考察年份内新增的数量;

W_i 表示交通系统内部第 i 个工种的平均工资;

N_{wi} 表示交通系统内部第 i 个工种的工作人员数量。

4.1.2 社会成本

社会成本主要是指社会上的交通参与者在享受交通网络提供的交通服务时所付出的成本。社会成本包括三个部分,一是时间成本,即乘坐交通工具的旅客和运输的货物所消耗的时间价值,二是运输成本,即乘坐交通工具的旅客和运输的货物所需支付的运输费用,三是安全成本,即预防交通事故的费用和交通事故造成的社会产值损失。下面便分别对这三部分进行详细的探讨。

4.1.2.1 时间成本

时间成本的量化需要考虑经济圈内旅客和货物的单位时间价值。在经济学领域里,一切社会活动都被抽象为生产和消费,作为社会活动主体的人在生产和消费活动中,始终随着时间的消耗。

消费者在消费过程中所耗费的不仅仅是物质,还有时间^[20]。按照西方经济学的影子价格原理,所消耗

的时间若用于生产活动中便可创造商品价值,即该段时间作为一种生产要素投入到生产中去便可以体现其价值。因此,商品价值中时间投入的那部分便是消费者在消费活动中的时间价值。同样,商品流通过中所消耗的时间也具有价值,因为商品流通过程中时间耗费的增加意味着商品买卖实现的推迟、运费的上升、利息的增加以及商品的损失。若为了节约时间而支付的高运费超过了利息节约的部分与商品损失的价值之和,则余下来的部分价值便是商品的时间价值。不过经济圈内的货物运输,因为运输时间较短,其买卖延迟、利息增加、商品损失的费用基本可以忽略不计,因此货物的时间价值在此不作考虑,本文重点探讨的是旅客时间价值的计算。

综上所述,所谓时间价值就是指由于时间的推移而产生效益增值量和由于时间的非生产性消耗造成的效益损失量的货币表现。

传统的消费理论认为,时间和金钱是可以直接互换的,而不需要考虑工作机会的限制,也就是说只要有更多时间用于工作,就可得到更多的收入。根据这个理论,可以列出经济圈内的旅客单位时间价值 Vot 的计算方式为:

$$Vot = \frac{\lambda Y}{n t_w} \quad (4.4)$$

式中: Y 为经济圈在考察年份的人均年平均收入; n 为每年工作周数; t_w 为每周工作小时数; λ 为时间利用系数。

而按国家计委 1993 年颁布的“建设项目经济评价方法与参数”的规定,经济圈内地区的旅客单位时间价值 Vot_i 的计算公式应该为:

$$Vot_i = \frac{GDP_i}{251 \times 8 P_i} \quad (4.5)$$

式中: GDP_i 为 i 地区考察年的国内生产总值; P_i 为 i 地区考察年的人口数; 251 的意义为全年 365 天去掉节假日后的工作日天数; 8 表示每日 8 小时工作时间。

在计算出经济圈内各个地区的旅客单位时间价值之后,可以用加权平均的方法得出经济圈的旅客单位时间价值 Vot , 计算公式为:

$$Vot = \sum_i^n \delta_i Vot_i \quad (4.6)$$

式中: δ_i 表示 i 地区的权重,可以以人口数所占的比例作为计量权重的方法,即 $\delta_i = \frac{P_i}{P}$, P_i 的含义和式 (4.5) 相同, P 表示经济圈于考察年统计的总人口数, $P = \sum_i P_i$;

n 为经济圈内的地区分区数,以长三角经济圈为例, n 就等于 16;

上述的人均 GDP 法计算简便,但计算结果不够准确,因为在实际的交通运输过程中,时间价值的会因人、因时、因地而不同,换句话说,时间价值既有客观属性,也有主观属性,交通运输过程中时间价值的特点可以概括如下:

(1) 目的性。时间的用途不同,则时间价值不同,时间价值根据出行者的出行目的不同而价值大小不同。

(2) 双效用性。根据出行者在交通行程中的感受不同,时间价值所产生的效用也不同。旅客在有利条件下时间产生正的效用,如路况良好、乘坐舒适,反之在不利条件下则产生负效用,如交通堵塞等。

(3) 动态性。对同一种出行活动,每次出行带给旅客的满足程度都是不同的,具有动态性,可见时间价值亦具有动态性。

(4) 区域性。经济发展水平的区域性差异使得不同地域间的同类交通运输活动的时间价值存在差异。

由以上特点可以看出，鉴于影响时间价值因素的多样化以及时间价值本身的复杂性，故对时间价值的量化分析上，应在抽象化、简单化、普遍化的基础上进行。

首先需要构造经济圈内旅客选择交通运输方式的行为效用函数，构造时的基本假定如下^[21]：

(1) 旅客们对于待选交通运输方式的特性很了解，并可以据此做出理性的选择，即各种交通运输方式的社会经济特性（如行程时间和费用）的约束下，旅客们总是可以按效用最大原则选择交通运输方式。

(2) 经济圈内可供旅客选择的交通运输方式的集合 $A = \{A_1, A_2, A_3\}$ ， A_1 、 A_2 、 A_3 分别表示公路、铁路和水路，旅客选择交通运输方式时考虑的可量化的特性向量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ ， k 表示可量化的特性向量的个数，对于特定的某个旅客 q ，总会对应有一个 $A_i \in A$ 和一个特性向量 X 。

(3) 对旅客 q 来说，每选择一种交通运输方式 $A_i \in A$ ，就会对应一个净效用 U_{iq} ，可以假定 U_{iq} 由两部分组成，一部分是该交通运输方式本身可以量化的部分 V_{iq} ，它是该交通运输方式的可量化特性 x 的线性函数，另一部分是随机误差 ε_{iq} ，这个值反映的是由旅客个人的偏好和观测造成的误差。

根据上述两个基本假定，可以列出经济圈内旅客的行为效用函数如下：

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq} \tag{4.7}$$

$$V_{iq} = \sum_k \theta_{ik} x_{ikq} \tag{4.8}$$

式中： θ_{ik} 为第 i 种交通运输方式的第 k 种社会经济特性的参数，该参数不受旅客影响；

x_{ikq} 为旅客 q 选择的第 i 种交通运输方式的第 k 种社会经济特性；

$k=1, 2, \dots, K$ ， K 为所选取的交通运输方式社会经济特性的个数。

由以上的效用函数，可以推导出旅客选择行为的多项 Logit 函数。具体推导过程如下：

假设 $U_{iq} \geq U_{jq}$

$$\text{即 } V_{iq} - V_{jq} \geq \varepsilon_{jq} - \varepsilon_{iq}$$

则旅客 q 选择交通运输方式 A_i 的概率为：

$$P_{iq} = p\{\varepsilon_{jq} \leq \varepsilon_{iq} + (V_{iq} - V_{jq}), \forall A_i \in A\}$$

假设随机变量 ε 的分别密度函数为 $F(\varepsilon) = \mu e^{-\mu(\varepsilon-\eta)} \exp[e^{-\mu(\varepsilon-\eta)}]$ ，且 ε 服从参数为 (η, μ) 的 Gumbel 分布，推广到 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ ，3 个独立的 Gumbel 分布，参数分别为 (η_1, μ) ， (η_2, μ) ， (η_3, μ) ，则 $\max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$

也是 Gumbel 分布，参数为 $(\frac{1}{\mu} \ln \sum e^{\mu \eta}, \tilde{\omega})$ ，在上述假定的基础上利用 Gumbel 分布的性质，可以进一步

得出旅客 q 选择交通运输方式 A_i 的概率公式为：

$$P_{iq} = \frac{\exp(\mu V_{iq})}{\sum_i \exp(\mu V_{iq})} \tag{4.9}$$

因为 μ 为任意值，因此，通常情况下假定 $\mu=1$ ，故可得一般情况下经济圈内旅客 q 选择交通运输方式 A_i 多维 Logit 模型为：

$$P_{iq} = \frac{\exp(V_{iq})}{\sum_i \exp(V_{iq})} = \frac{\exp(\sum_k \theta_{ik} x_{ikq})}{\sum_i \exp(\sum_k \theta_{ik} x_{ikq})} \tag{4.10}$$

写成矩阵形式则有：

$$P_{iq} = \frac{\exp(\overline{\theta}_i \overline{X}_{iq})}{\sum_i^3 \exp(\overline{\theta}_i \overline{X}_{iq})} \quad (4.11)$$

式中： $\overline{\theta}_i = (\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{ik})$ ， $\overline{X}_{iq} = (x_{i1q}, x_{i2q}, \dots, x_{ikq})$ ， k 为所选取的交通运输方式的社会经济特性的个数。

对此模型可以采用最大似然估计法来进行参数标定，假定 N 为样本大小，也就是经济圈内的旅客总数，并定义

$$Y_{iq} = \begin{cases} 1, & \text{旅客 } q \text{ 选择第 } i \text{ 种交通运输方式} \\ 0, & \text{旅客 } q \text{ 未选第 } i \text{ 种交通运输方式} \end{cases} \quad (4.12)$$

则可以构造出多维 Logit 交通运输方式选择模型的似然函数 Φ^* 如下所示：

$$\Phi^* = \prod_{q=1}^N \prod_i^3 P_{iq}^{Y_{iq}} = \prod_{q=1}^N \prod_i^3 \left[\frac{\exp(\overline{\theta}_i \overline{X}_{iq})}{\sum_i^3 \exp(\overline{\theta}_i \overline{X}_{iq})} \right]^{Y_{iq}} \quad (4.13)$$

对上式取对数，可得：

$$\Phi = \sum_{q=1}^N \sum_i^3 Y_{iq} [\overline{\theta}_i \overline{X}_{iq} - \ln \sum_i^3 \exp(\overline{\theta}_i \overline{X}_{iq})] \quad (4.14)$$

然后将 Φ 分别对系数求偏导，并令导数为零，可得以下方程组：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \theta_{ik}} = \sum_{q=1}^N \sum_i^3 Y_{iq} [x_{ikq} - \frac{\exp(\overline{\theta}_i \overline{X}_{iq}) x_{ikq}}{\sum_i^3 \exp(\overline{\theta}_i \overline{X}_{iq})}] = 0 \quad (4.15)$$

式中： $k=1, 2, \dots, K$ ， K 为所选取的交通运输方式的社会经济特性的个数。

经过处理，可以进一步求解方程组，从而确定系数 $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{ik}$ 。

在进行经济圈内旅客的时间价值分析时，根据国外的研究结果可知，影响旅客出行方式选择的最重要的因素一般为出行费用和时间，因此可将第 i 种交通运输方式的社会经济特性函数量化为：

$$V_i = a_i + b_i P_i + c_i T_i \quad (4.16)$$

其中： a_i, b_i, c_i 为待估参数； P_i 表示旅客选择第 i 种交通运输方式时的运输费用； T_i 表示旅客选择第 i 种交通运输方式时的运输时间。

则选择第 i 种交通运输方式的旅客单位时间价值 Vot_i 就应该满足下式：

$$Vot_i = \frac{\partial V_i / \partial T_i}{\partial V_i / \partial P_i} = \frac{c_i}{b_i} \quad (4.17)$$

可见只要求解出运输费用和运输时间对应的参数就可以知道第 i 种交通运输方式的旅客单位时间价值。结合上文的式 (4.8) 对于交通运输方式社会经济特性的表示，可以找出式 (4.8) 和式 (4.16) 的对应关系，式 (4.16) 相当于式 (4.8) 的特殊情况，此时， $k=2$ ； $x_{i1q} = P_i$ ， $\theta_{i1} = b_i$ ； $x_{i2q} = T_i$ ， $\theta_{i2} = c_i$ 。因此只要知道 P_i 和 T_i 的基础数据，就可以采用上述 Logit 模型的最大似然估计法来去求解 b_i 和 c_i 。

可以看出 P_i 和 T_i 是站在旅客的立场出发来衡定的，它们的值会随着旅客起终点的变化而变化，对于整个经济圈来说，每两个有线路相连的地区之间都存在一组 P_i 和 T_i ，也就是说每两个有线路相连的地区之间

都有其各自的旅客单位时间价值。对于经济圈内有线路相连的 a 地和 b 地来说, $P_i^{(a,b)}$ 表示的是 a 地和 b 地之间第 i 种交通运输方式的客运费, $T_i^{(a,b)}$ 表示的是 a 地和 b 地之间第 i 种交通运输方式的运输时间。并有 $P_i^{(a,b)} = P_i^{(b,a)}$, $T_i^{(a,b)} = T_i^{(b,a)}$

$P_i^{(a,b)}$ 的计算公式为:

$$P_i^{(a,b)} = \frac{I_{Pi}^{(a,b)}}{N_i^{(a,b)}} \quad (4.18)$$

式中: $I_{Pi}^{(a,b)}$ 表示考察年 a 地和 b 地之间第 i 种交通运输方式的客运总收入, 单位为元;

$N_i^{(a,b)}$ 表示考察年 a 地和 b 地之间第 i 种交通运输方式实际运送旅客的人数;

i 根据 a 地和 b 地之间的实际情况来取值, 1 代表公路, 2 代表铁路, 3 代表水路。

$T_i^{(a,b)}$ 在计算时不光要计算城际交通花费的时间, 还要计算城市内部交通所花费的时间。因为无论旅客采用何种交通运输方式在完成城际出行时必须经历以下三个阶段^[44]。

第一阶段是由出发点 O_k 至客运交通枢纽 (即某种或多种交通运输方式在出发地的客运站) 的旅程, 这个阶段称为集合阶段, 这个阶段的交通行为是通过与城际交通相衔接的市内交通来完成, 旅客根据实际情况一般可选择城市公共交通 (如公共汽车、地铁), 准公共交通 (如出租车), 私人交通 (如驾驶私人汽车) 这三类方式。

第二个阶段是乘坐所选择的载运工具完成城际旅程, 称为干线运送阶段。经济圈内可供旅客选择的交通运输方式主要有公路、铁路、水运、航空, 其中前两项所占的比重很大。

第三个阶段则是到达目标城市的客运交通枢纽之后, 同样可选择与城际交通相衔接的城市交通城市公共交通、准公共交通或私人交通到达最终目的地 D_k 点, 这个阶段称为分散阶段。

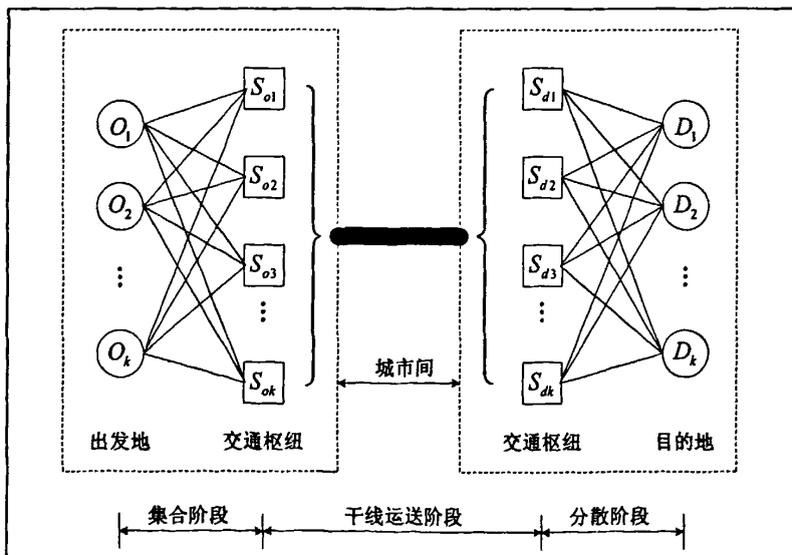


图 4-1 经济圈城际间旅客出行旅程示意图

如图 4-1 所示, 经济圈内的旅客在出行时, 所花费的时间应该是三个阶段所消耗时间的总和, 当然还要包括第一阶段与第二阶段之间, 以及第二阶段与第三阶段的换乘、衔接时间。不同的交通运输方式在三个阶段所花费的时间各不相同。

由此可知 $T_i^{(a,b)}$ 的计算公式为:

$$T_i^{(a,b)} = T_{i\text{城内}}^a + T_{i\text{城际}}^{(a,b)} + T_{i\text{城内}}^b = T_i^a + T_{i\text{换乘}}^a + T_{i\text{等候}}^{(a,b)} + T_{i\text{城际}}^{(a,b)} + T_{i\text{换乘}}^b + T_i^b \quad (4.19)$$

式中： $T_{i\text{城内}}^a$ 表示采用第*i*种交通运输方式的旅客出行时在城市*a*内需要花费的时间；

$T_{i\text{城内}}^b$ 表示采用第*i*种交通运输方式的旅客出行时在城市*b*内需要花费的时间；

$T_{i\text{城际}}^{(a,b)}$ 表示采用第*i*种交通运输方式的旅客在*a*地和*b*地之间的城际路途上所花费的时间，该值可以通过*a*、*b*两地之间交通运输线路的距离以及载运工具的平均运营速度来确定，计算公式为 $T_{i\text{城际}}^{(a,b)} = l_i^{(a,b)} / \bar{V}_i^{(a,b)}$ ， $l_i^{(a,b)}$ 表示*a*、*b*两地之间第*i*种交通运输方式线路的长度， $\bar{V}_i^{(a,b)}$ 表示*a*、*b*两地之间第*i*种交通运输方式的平均运营速度。该公式只适用于*a*、*b*两地之间的第*i*种交通运输线路只有一条的情况。若同一种交通运输方式的交通运输线路不止一条，该情形多见于公路，就不能用上述公式进行计算了。如果城市*a*和城市*b*之间有着不止一条的公路相连接，这时代表公路运输城际耗

费时间的 $T_{i\text{城际}}^{(a,b)}$ 的计算公式应该为 $T_{i\text{城际}}^{(a,b)} = \sum_k \frac{N_{1k}^{(a,b)} l_{1k}^{(a,b)}}{N_1^{(a,b)} \bar{V}_{1k}^{(a,b)}}$ ， $N_{1k}^{(a,b)}$ 表示*a*、*b*两地之间的第*k*

条公路考察年内实际运送旅客的人数， $N_1^{(a,b)}$ 表示*a*、*b*两地之间考察年内公路实际运送旅客的人数，

$N_1^{(a,b)} = \sum_k N_{1k}^{(a,b)}$ ， $l_{1k}^{(a,b)}$ 表示*a*、*b*两地之间的第*k*条公路的长度， $\bar{V}_{1k}^{(a,b)}$ 表示*a*、*b*两地之间的第*k*条公路上车辆的平均速度。

T_i^a 表示采用第*i*种交通运输方式的旅客从居住地到城市*a*的交通枢纽所需花费的时间；

$T_{i\text{换乘}}^a$ 表示采用第*i*种交通运输方式的旅客在城市*a*由市内交通换乘城际交通所需花费的时间；

$T_{i\text{等候}}^{(a,b)}$ 表示采用第*i*种交通运输方式的旅客来往于*a*、*b*两地时等候城际交通工具所花费的时间，因为 $T_{i\text{等候}}^{(a,b)}$ 是一个双向概念，因此 $T_{i\text{等候}}^{(a,b)}$ 也是一个双向概念，即 $T_{i\text{等候}}^{(a,b)} = T_{i\text{等候}}^{(b,a)}$ ，计算时可以对*a*城和*b*城的等候时间取平均值，写成公式就是 $T_{i\text{等候}}^{(a,b)} = (T_{i\text{等候}}^a + T_{i\text{等候}}^b) / 2$ ， $T_{i\text{等候}}^a$ 和 $T_{i\text{等候}}^b$ 分别表示*a*城和*b*城的等候时间。

$T_{i\text{换乘}}^b$ 表示采用第*i*种交通运输方式的旅客在城市*b*由市内交通换乘城际交通所需花费的时间；

T_i^b 表示采用第*i*种交通运输方式的旅客从居住地到城市*b*的交通枢纽所需花费的时间。

*i*根据*a*地和*b*地之间的实际情况来取值，1代表公路，2代表铁路，3代表水路。

T_i^a ， T_i^b ， $T_{i\text{换乘}}^a$ ， $T_{i\text{换乘}}^b$ ， $T_{i\text{等候}}^a$ ， $T_{i\text{等候}}^b$ 这六个值没有明确的计算公式，因此要在对大量的调查数据进行分析之后才能确定，可以在城市内几个重要的交通枢纽通过问卷调查的形式来获取旅客的出行信息，并问卷数据进行整理分析，从而获得经济圈内每个城市的市内平均出行时间、换乘时间和等候时间。

由公式(4.18)和(4.19)计算出经济圈内凡是有线路相连接的*a*城市和*b*城市之间的 $P_i^{(a,b)}$ 和 $T_i^{(a,b)}$ 之后，再由式(4.10)所示的Logit模型的最大似然估计法求解参数 $b_i^{(a,b)}$ 和 $c_i^{(a,b)}$ ，最后通过式(4.19)就可以求出*a*城市和*b*城市之间的采用第*i*种交通运输方式的旅客单位时间价值 $Vol_i^{(a,b)}$ 。

在此定义

$$\delta^{(a,b)} = \begin{cases} 1, & a、b\text{之间有线路相连接且}a \neq b \\ 0, & a、b\text{之间没有线路相连或}a=b \end{cases} \quad (4.20)$$

则可以列出经济圈客运的年时间成本 T_p 的计算公式为：

$$T_p = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n \delta^{(a,b)} \sum_i \text{Vol}_i^{(a,b)} T_i^{(a,b)} N_i^{(a,b)} / 2 \quad (4.21)$$

式中： $\text{Vol}_i^{(a,b)}$ 为考察年 a 地和 b 地之间采用第 i 种交通运输方式的旅客单位时间价值；

$T_i^{(a,b)}$ 为考察年 a 地和 b 地之间第 i 种交通运输方式的运输时间，计算公式见式 4.19。

$N_i^{(a,b)}$ 为考察年 a 地和 b 地之间第 i 种交通运输方式实际运送旅客的人数；

n 为经济圈内的地区分区数，以长三角经济圈为例， n 就可以取值为 16；

i 根据 a 地和 b 地之间的实际情况来取值，1 代表公路，2 代表铁路，3 代表水路。

因为经济圈内货运方面的时间价值并未列入计算，因此经济圈客运的年时间成本 T_p 就等于经济圈交通网络的年时间投入 T 。

4.1.2.2 运输成本

运输成本是指经济圈内乘坐交通工具的旅客和运输的货物所需支付的运输费用，对于乘坐公共交通工具的旅客来说，运输费用就是指票价（汽车票、火车票、船票等）；对于采用私人交通工具（如私人小汽车等）的旅客来说，运输费用是指出行过程中支付的过路费和消耗的燃油费，但是本文在经济成本的计算中已经将经济圈内各种交通运输方式的燃油费用都列入考虑了，其中当然也包括了私人交通工具的燃油费用，因此本节在考虑运输成本时不再计算燃油费用，也就是说对于采用私人交通工具的旅客来说，运输费用单纯表示出行过程中支付的过路费；对于运输的货物来说，运输费用就等于支付的运货款。

经过上述剖析，可以将经济圈交通网络的年运输成本 I 的计算公式列出：

$$I = I_p + I_G \quad (4.22)$$

式中： I_p 表示经济圈考察年的客运总收入， I_p 不仅包括各个客运部门的营业收入还包括各个收费公路收缴的私家车过路费；

I_G 表示经济圈考察年的货运总收入， I_G 只需计算各个货运部门的营业收入即可，因为货车的过路费必然包含在运货款项中，无需重复计算。

4.1.2.3 安全成本

安全成本是指为了减轻或免除经济圈交通网络在客货运输过程中人身伤亡等事故给人、社会、自然造成的灾害，保护交通参与者的生命安全与健康，保障和维护人类的价值增值过程而进行安全管理所支付的一切费用，以及由于没有达到既定安全目标，而造成的一切损失费用的总和^[22]。

根据安全成本定义，可以将安全成本划分为保证性安全成本和损失性安全成本^[23-26]。

保证性安全成本就是指事故预防投入，又可以分为安全技术成本和安全成本两个部分。安全技术成本主要是指交通安全设施（如公路上的交通隔离栏、护栏、铁路道口的信号隔离栏等）的设置费用、安全技术引进费用、安全检测仪表购置费用。安全管理费用主要是指对驾驶人员、乘务人员、管理人员、维修人员等的培训费用、对交通安全设施进行巡视检查的费用、对交通安全知识进行普及教育所投入的费用、为鼓励安全运输而支付的奖励费用等。

损失性安全成本也包括事故直接损失和事故处理费用两部分。事故处理部分则可以细分为医疗及补偿费用、劳动力伤亡造成的社会产值损失以及消除交通事故后果的其他花费。事故的直接损失是指由交通事故造成的直接财产损失。事故处理费用中的医疗和补偿费用就是指对事故死伤者的治疗费用和赔偿费用；劳动力伤亡造成的社会产值损失可以分为死者和伤者两部分来考虑，死亡人员的损失可按其生前所能创造的 GDP 来计算（该价值依据名义工资来计算，可看作是劳动力对 GDP 的边际贡献，名义工资取经济圈平均工资的 2 倍）^[28]，受伤人员则按误工所损失的收入来计算；消除事故后果的其他花费是指事故调查、清理事故现场、修复受损道路、护栏，等这些所支出的花费。

根据上述分析，可以将经济圈交通网络的安全成本的组成明细梳理如下：

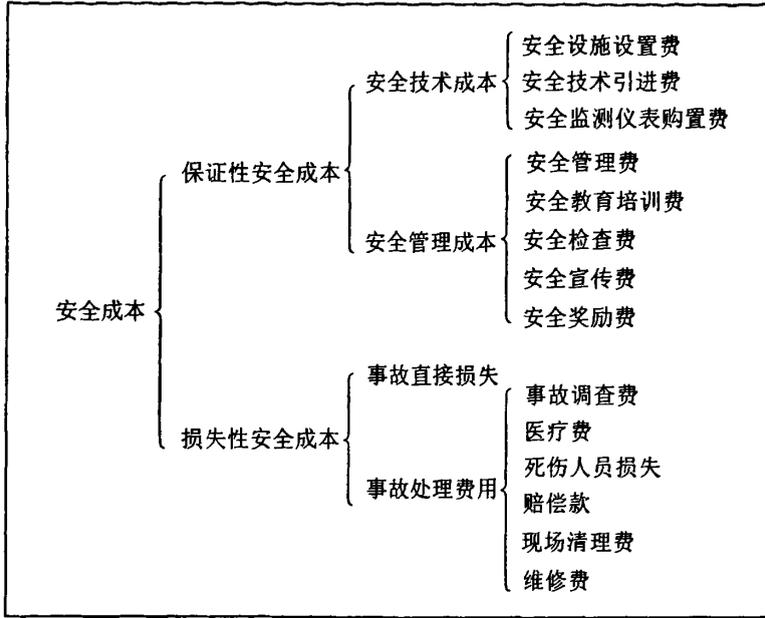


图 4-2 经济圈交通网络安全成本组成

则经济圈交通网络的年安全成本 B 可以表示为：

$$B = C + L \tag{4.23}$$

式中： C 表示经济圈交通网络考察年的保证性安全成本；

L 表示经济圈交通网络考察年的损失性安全成本。

与时间成本、运输成本不同，安全成本 B 的两个组成部分本身具有直接的联系。保证性安全成本 C 越高，安全设施、措施、管理防范越完善，损失性安全成本 L 就越低。反之，损失性安全成本 L 就越高。运用安全分析模型对 B 、 C 、 L 三者关系进行考量的话，可发现以下规律^[26~27]。

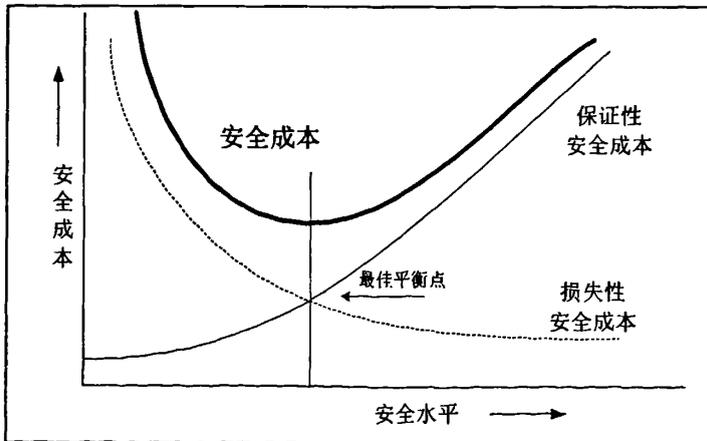


图 4-3 经济圈交通网络安全成本动态变化曲线

从图 4-3 中可以看出，保证性安全成本 C 和损失性安全成本 L 之间存在一个理论上的平衡点，该点上的保证性安全成本和损失性安全成本持平。最佳平衡点处的安全成本就是合理的最低成本，如果保证性安全成本低于平衡点，那么损失性安全成本就会增加，反之，保证性安全成本就会增加。适度增加预防方面的投入固然可以降低安全方面的隐患，但是无限度的增加则会给交通部门带来经济上的负担。另外，安全成本分析模型要同所谓的零事故率区分开来，如果要真正做到零事故率，事故预防投入势必相当大，不具

备可操作性。

4.1.2.4 社会成本

在上述三小节的基础上，经济圈交通网络的年社会成本 S 很容易得出：

$$S = T + I + B \quad (4.24)$$

式中： T 为经济圈交通网络的年时间成本；

I 为经济圈交通网络的年运输成本；

B 为经济圈交通网络的年安全成本。

4.1.3 环境成本

环境成本是指交通网络在建设过程中和建成后形成的网状构造物及载运工具运行的排放物和噪声对周围环境产生的不利影响的量化值。不利影响包括以下几个方面^[30-31]：

(1) 生态环境方面

由于交通线路的建设，导致沿线水文地质和天然植被被破坏，使自然生态环境失去原有的平衡，加剧了水土流失，造成坍方滑坡等；破坏了珍稀动植物的生存条件，使其繁衍生息受到影响；载运工具运行的排放物对农业土壤、水资源造成的污染。

(2) 大气环境方面

主要是由于载运工具运行所产生的悬浮微粒 (TSP)、一氧化碳 (CO)、二氧化碳 (CO_2)、氮氧化物 (NO_x)、碳氢化合物 (HC)、铅尘 (Pb) 和二氧化硫 (SO_2) 等。

(3) 声环境方面

交通对声环境的影响主要表现为载运工具加速、颠簸及机件运转等造成的噪声和振动、鸣笛声、刹车声以及载运工具与承载面之间的摩擦声等。另外，在交通设施施工中，各种施工机械产生的噪音和振动，虽然只是在施工期间的影 响，但对于经济圈整体来说，这种声污染始终存在。

(4) 社会环境方面

交通网络对环境的正面影响主要是社会环境的影响，但另一方面也会给社会环境带来一些负面影响，如征地拆迁、行政区划改变、人们生活、生产通道的割断和改变，历史文物的保护等。

可见环境成本其实就是环境质量的损失成本，可以直接反映出经济圈内的交通运输活动对环境的影响程度。下面将探讨如何对环境质量的损失进行量化估算。整个估算过程可以概念性地表示如下：

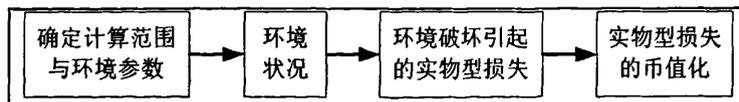


图 4-4 环境损失成本的估算过程

4.1.3.1 生态破坏成本

生态破坏的损失可分为直接损失和间接损失^[32]。直接损失是指交通运输线路（公路、铁路）侵占了大面积土地而造成的农田、草地、经济作物等的产量损失；间接损失是指因土地占有而引起的植被对涵养水源、土壤价值、固定 CO_2 、净化空气能力的丧失。

(1) 土地资源损失

估算土地资源损失时，可采用机会成本法，即计算因交通设施占用而损失的净土地“最好可替代用途”的净效益^[36]。估算公式如下：

$$C_{\pm地} = \sum_{i=1}^n M_i P_i S_i \quad (4.25)$$

式中: M_i 表示考察年第 i 种农作物 (也可为水果、木材等) 的单位产量;

P_i 表示考察年第 i 种农作物的市场价格;

S_i 表示经济圈内第 i 种农作物至考察年为止累计损失的种植面积;

n 表示损失的农作物的种类。

(2) 涵养水源的损失

由于植被涵养水源的作用, 可以延长当地的丰水期, 缩短枯水期, 提高农田灌溉及供水能力。而交通线路占用土地之后, 因为土壤和植被的减少, 肯定会对当地的水源造成不利影响。对于此不利影响的量化可以采用影子工程法, 影子工程法是恢复费用法的一种特殊形式。影子工程法是在当生态环境破坏后, 用人工方法建造一新工程来替代原来的环境功能, 然后用建造新工程所需的费用来估计生态环境破坏造成损失的一种方法。在此就可以理解为要保证农业灌溉的需要, 那么损失的那一部分植被涵养水源的能力, 就必须通过建造水库的方法来解决, 因此在此采用水库的建设成本来替代涵养水源的损失^[34]。计算公式如下:

$$C_{\text{水库}} = P_{\text{库容}} A \sum_i^3 S_i H_i (Y_i - Y) \quad (4.26)$$

式中: $P_{\text{库容}}$ 表示简易农林小水库单位蓄水量的库容成本, 取 $0.67 \text{ 元}/\text{m}^3$;

A 表示土壤容重, 取 $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$;

S_i 表示经济圈考察年内第 i 类绿地被交通设施侵占的面积, 绿地类别分为三类, 第一类为林地和果园, 第二类为灌木林地, 第三类为草地和耕地;

H_i 表示第 i 类绿地根系的平均深度, 第一类取 0.7m , 第二类取 0.4m , 第三类取 0.2m ;

Y_i 表示第 i 类绿地原本的土壤含水率;

Y 表示交通设施建造后的土壤含水率。

(3) 土壤价值损失

该损失可以采用影子价格法来估算损失的土壤肥力的经济价值^[37]。计算公式如下:

$$C_{\text{土壤}} = \left(\sum_i^3 N_{ni} P_i + N_o P_{\text{有机}} \right) Z \quad (4.27)$$

式中: N_{ni} 表示经济圈内单位面积土层中第 i 种养分的平均含量, $i=1, 2, 3$, 分别代表氮、磷、钾;

P_i 表示第 i 种无机肥料的市场价格, 同样 $i=1, 2, 3$, 分别代表氮、磷、钾;

N_o 表示经济圈内单位面积土层中有机 AC 的平均含量;

$P_{\text{有机}}$ 表示有机化肥的市场价格;

Z 表示经济圈考察年因交通设施建设导致的水土流失量 (运营期间不会新增水土流失)。

(4) 净化大气的损失

绿地还具有净化大气的作用, 不仅可以固定空气中的 CO_2 , 还能吸收空气中的 CO 和 NO_x , 释放 O_2 。确定固定 CO_2 的损失主要有碳税率法、造林成本法和人工固定成本法。西方一些国家都采用碳税制来限制 CO_2 等温室气体的排放。因为我国尚无此税制, 故采用制造成本法来确定^[38]。可列出固定 CO_2 损失的计算公式如下:

$$C_{\text{二氧化碳}} = 1.63 \times 273.3 \sum_{i=1}^n T_i S_i \quad (4.28)$$

式中: 1.63 是根据光合作用的反应方程式确定的, 其的含义是植物每生产 1 g 干物质, 需要 1.63 g CO_2 ;

273.3 的含义是我国森林固定 CO_2 的成本为 273.3 元/ $t^{[33]}$;

n 表示绿地的划分种类, 在此 $n=5$, 五类绿地依次为林地、果园、耕地、灌木林、草地;

T_i 表示第 i 类绿地的年平均生产力, 即绿地的年平均生物蓄积量, 热带雨林取 $2000 g/(m^2 \cdot a)$, 热带季雨林取 $1500 g/(m^2 \cdot a)$, 需要根据经济圈范围内林地的实际状况取值, 果园取 $600 g/(m^2 \cdot a)$, 耕地取 $644 g/(m^2 \cdot a)$, 灌木林取 $600 g/(m^2 \cdot a)$, 草地取 $500 g/(m^2 \cdot a)$, 计算时单位需统一到 $t/(m^2 \cdot a)$;

S_i 经济圈内至考察年为止因交通设施建设而受损的第 i 类绿地的面积。

氧气释放减少的损失计算方法与固定 CO_2 损失的计算方法类似, 计算公式为:

$$C_{\text{氧气}} = 1.2 P_{\text{氧气}} \sum_{i=1}^n T_i S_i \quad (4.29)$$

式中: 1.2 是根据植物光合作用和呼吸作用反应方程式得出的, 每生产 1g 干物质, 会释放出 1.2g O_2 ;

$P_{\text{氧气}}$ 表示氧气的市场价格;

n 、 T_i 、 S_i 的含义与式 4.30 相同

净化 CO 和 NO_x 的损失则可以用人工削减空气中 CO 和 NO_x 的成本来替代, 计算公式如下:

$$C_{\text{废气}} = P_{CO} \sum_{i=1}^n N_{CO_i} S_i + P_{NO} \sum_{i=1}^n N_{NO_i} S_i \quad (4.30)$$

式中: P_{CO} 和 P_{NO} 分别表示人工净化单位重量的 CO 和 NO_x 的成本;

N_{CO_i} 和 N_{NO_i} 分别表示第 i 类绿地单位面积对 CO 和 NO_x 的年吸收量;

S_i 经济圈内至考察年为止因交通设施建设而受损的第 i 类绿地的面积。

则净化大气损失的计算公式即为:

$$C_{\text{净化}} = C_{\text{二氧化碳}} + C_{\text{氧气}} + C_{\text{废气}} \quad (4.31)$$

(5) 泥沙滞留、淤积的损失

根据国内已有的研究成果^[40], 我国土壤侵蚀总量中滞留泥沙和淤积泥沙量分别约占 33% 和 24%。根据上述比例可以写出土壤侵蚀总量中滞留部分和淤积部分泥沙的年损失估算公式:

$$C_{\text{泥沙}} = C_{\text{滞留}} + C_{\text{淤积}} \quad (4.32)$$

$$C_{\text{滞留}} = 33\% Z P_{\text{挖掘}} / \rho \quad (4.33)$$

$$C_{\text{淤积}} = 24\% Z P_{\text{库容}} / \rho \quad (4.34)$$

式中: Z 表示经济圈考察年因交通设施建设导致的水土流失量;

$P_{\text{挖掘}}$ 表示挖取单位体积的泥沙所需的费用, 参照相关资料, 取 6.5 元/ m^3 ;

$P_{\text{库容}}$ 表示简易农林小水库单位蓄水量的库容成本, 取 0.67 元/ m^3 ;

ρ 表示泥沙容重, 参照相关资料, 取 1.28 t/m^3 。

4.1.3.2 污染破坏成本

经济圈交通网络在建设和运营过程中对沿线环境造成的污染破坏, 主要集中在三个方面: 空气、水、噪声。因为空气污染和水污染还会导致居民健康的受损及沿线植物的减产等, 因此在计算这些连带损失时, 空气污染和水污染的损失是合并计算的。

(1) 大气污染损失

大气污染损失主要是指经济圈交通网络在运营的过程中,各载运工具所排放的废气对大气造成的污染损失。公路网络大气污染物排放总量主要是根据各车型的交通量、平均行驶里程、平均运行车速来确定各车型的综合排放因子进而求出的。通过 TSIS 交通仿真,可以用 CORSIM 排放模型计算公路网络各种大气污染排放物的总量^[42],计算公式如下:

$$V_{\text{公路}i} = TQ_i \sum_j (L_j n_j) \quad (4.35)$$

式中: $V_{\text{公路}i}$ 为经济圈公路网络考察年第 i 类大气污染排放物总量;

T 为计算周期时长,这里取一年;

Q_i 是指公路网络机动车综合排放率,为 TSIS 仿真输出的结果,单位为 $g/(s \cdot m)$;

L_j 为 j 路段的长度;

n_j 为 j 路段的车道数。

铁路部门的列车数量有限,可以直接统计出考察年内的各种大气污染物排放总量。水路的大气污染排放总量的计算可以参考公路的算法,根据各型船舶的交通量、平均行驶里程、平均行驶速度建立 TSIS 仿真求得综合排放因子,进而求得水路考察年的各种大气污染物排放总量。最后将三种交通方式的排放量归总,即为经济圈交通网络考察年各种大气污染排放物的总量 V_i 。

$$V_i = V_{\text{公路}i} + V_{\text{铁路}i} + V_{\text{水路}i} \quad (4.36)$$

在此,取 CO_2 、 CO 、 NO_x 作为大气污染排放物损失估算的废气种类,即 $i=1, 2, 3$, 依次代表以上三种废气。其中 CO_2 造成的损失,依然采用森林固定 CO_2 的成本来计算,而 CO 、 NO_x 造成的损失,可以根据《排污费征收标准及计算方法》的规定里废气排污费的标准来予以折算。每一当量 CO 、 NO_x 的污染费标准为 0.6 元^[39]。

大气污染物当量数计算公式为:

$$\text{某污染物的污染当量数} = \frac{\text{该污染物的排放量}}{\text{该污染物的污染当量值}} \quad (4.37)$$

污染物的污染当量值见下表:

表 4.1 大气污染物污染当量值表

污染物	污染当量值
一氧化碳 CO	16.70
氮氧化物 NO_x	0.95

由此可以列出经济圈交通网络大气污染损失的估算公式:

$$C_{\text{大气}} = 273.3V_1 + 0.6 \times \left(\frac{V_2}{16.7} + \frac{V_3}{0.95} \right) \quad (4.38)$$

(2) 水污染损失^[35]

经济圈交通网络在修建对水的污染主要是施工营地生活污水、桥梁钻渣等对周围水体的影响,营运期对水体的污染主要是公路服务区、停车区、收费站等产生的生活污水、洗车废水对周围水体的影响,水路上各色船舶对河流水体的影响。水环境污染损失同样可以根据《排污费征收标准及计算方法》的规定里污水排污费的标准予以折算,每一污染当量征收标准为 0.7 元。各类污水的污染当量值在此便不再列出,可参阅相关规定。水污染损失的估算公式可列为:

$$C_{*} = 0.7 \sum_i \frac{V_i}{A_i} \quad (4.39)$$

式中： V_i 表示经济圈交通网络考察年第*i*类污水的排放量；

A_i 表示第*i*类污水的污染当量值。

(3) 对人体健康的损失

交通网络建设和运营期间排放的大量废气会对人体呼吸系统产生危害，据国内外有关成果表明，涉及的呼吸系统疾病包括慢性鼻炎，慢性支气管炎，支气管哮喘等；在水环境受污区，由于污水中含有大量的COD、BOD、石油类物质，对人体健康也会产生损害。运用人力资本法可以写出对经济圈交通网络对人体健康损害的估算公式：

$$C_{\text{健康}} = \sum_i W [I_i P (D_i + H_i) + I_i Y_i + I_o P_o] \quad (4.40)$$

式中： W 表示经济圈交通网络污染覆盖区域考察年的人口数；

I_i 表示第*i*种疾病的污染发病率，即污染区和无污染区第*i*种疾病的发病率差值；

P 表示经济圈考察年的人力资本，可以取平均工资；

D_i 表示第*i*种疾病的病患者人均误工时间；

H_i 表示第*i*种疾病病患者的陪床人员的平均误工时间；

Y_i 表示第*i*种疾病的病患者平均医疗护理费用；

I_o 表示第*i*种疾病的污染死亡率，即污染区和无污染区第*i*种疾病的死亡率差值；

P_o 表示死亡人员的经济损失，计算方法与4.1.2.3节安全成本中的方法相同，按其余生所能创造的GDP来计算。

(4) 农作物减产损失

空气和水的污染会使得农作物产量减少，质量下降从而导致经济损失。对这类损失的计算采用影子价格法，计算公式为：

$$C_{*} = \sum_{i=1}^n Q_i S_i P_i \quad (4.41)$$

式中： Q_i 表示经济圈受污染区域第*i*种农作物单位面积平均减少的产量；

S_i 表示经济圈考察年第*i*种农作物的受污染面积；

P_i 表示考察年第*i*种农作物的价格；

(5) 噪音污染损失

交通网络在建设、运营中所产生的噪声，会对沿线的居住环境产生影响。不过因噪音污染而带来的环境舒适性的变化一般很难进行定量计算，在此引入“意愿调查法”(CVM)对该值进行估算。

要得到比较令人满意的支付意愿估计值，需要满足以下几个条件：

- ①被调查者对这一调查方式有较好的理解并能明确表达出真实的支付意愿；
- ②被调查者有较强的环境意识并能够认识到环境的变化对其自身的影响；
- ③政府对环境信息的公开程度较高；
- ④被调查者的收入不能过低，否则可能出现其支付能力不足的情况。

对于“隔离交通噪声的支付愿望”与家庭人均收入的关系，可根据意愿调查的数据资料，拟出回归方程，并通过F分布检验来证明其相关性是否合理。由于意愿价值行为倾向与真正行为之间仍然存在差别，这必然导致意愿调查结果的偏差。迈里克·费里曼等人的研究显示，CVM调查的数值往往要大于实际支

付值, 行为倾向比实际的支付要高出 25%~33%, 本文选取中间的数值, 即 30%。

$$C_{\text{噪音}} = (1-0.3)P_{\text{支付}}W_{\text{户}}\eta \quad (4.42)$$

式中: 0.3 的含义为根据迈里克·费里曼等人的研究对估算的支付愿望进行折减, 折减系数为 0.3;

$P_{\text{支付}}$ 表示经济圈受影响区域平均每户家庭愿意为隔离交通噪音支付的金额, 因为支付愿望和家庭人均收入是有相关性的, $P_{\text{支付}} = a + bX$, X 为家庭人均收入, a 、 b 为回归参数, 因此可以根据经济圈内受影响区域的家庭人均收入来计算 $P_{\text{支付}}$ 的值;

$W_{\text{户}}$ 表示经济圈受影响区域的居民户数;

η 表示同意支付费用的户百分率。

4.1.3.3 环境成本

在上述两小节的基础上, 经济圈交通网络的年环境成本 C 即为:

$$C = C_{\text{生态}} + C_{\text{污染}} \quad (4.43)$$

$$C_{\text{生态}} = C_{\text{土地}} + C_{\text{水源}} + C_{\text{土壤}} + C_{\text{净化}} + C_{\text{泥沙}} \quad (4.44)$$

$$C_{\text{污染}} = C_{\text{大气}} + C_{\text{水}} + C_{\text{健康}} + C_{\text{农}} + C_{\text{噪音}} \quad (4.45)$$

式中: $C_{\text{生态}}$ 表示经济圈交通网络考察年对生态环境造成的损失;

$C_{\text{污染}}$ 表示经济圈交通网络考察年排放的污染物对周边环境造成的损失。

生态破坏主要是交通网络建造时带来的, 污染破坏主要是交通网络运营时带来的。

4.1.4 小结

依照前三小节所述, 可以将经济圈交通网络的交通投入的构成列出如下:

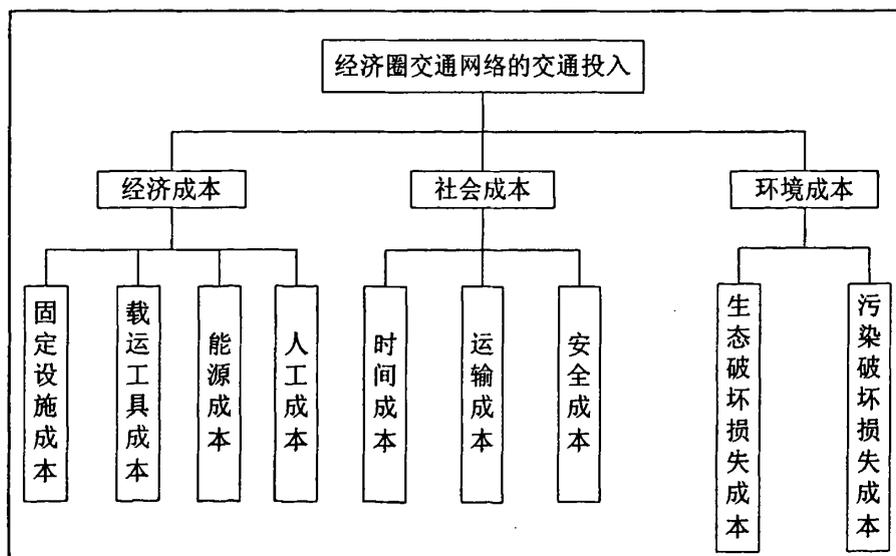


图 4-5 经济圈交通网络交通投入的构成

可以看出, 经济成本主要是从交通网络建设运营者, 也就是政府的角度来衡量的交通投入。社会成本主要是从交通网络使用者, 也就是旅客和货主的角度来衡量的交通投入。环境成本主要是从交通网络的载体, 也就是大环境的角度来衡量的交通投入。三个方面相辅相成, 互相影响、互相渗透, 缺一不可。

经济成本 E 可以一目了然地看出考察年份在交通网络的建设、运营和维护上所支付的金额, 社会成本 S 可以一目了然地看出考察年份交通参与者在交通运输上所付出的金额, 环境成本 C 可以一目了然地看出

考察年份交通网络对自然环境造成的损失换算金额。可是这些金额怎样才算合理无法考量，因为合理与否还需要看实际交通需求是否值得这样的投入。因此有必要引入实际交通需求作为对比。在实际交通需求的统计指标中，周转量不仅包括了运输对象的数量，还包括了运输距离的因素，从而比较全面的反映出了实际运输生产成果，而且周转量的指标还是各种交通运输方式通用的。

周转量包括旅客周转量和货物周转量，旅客周转量是指各种载运工具在报告期（此处定为一年）内实际运送的每批旅客的人数分别乘以其运送距离的累计数，计算单位为人公里。货物周转量是指各种载运工具在报告期内实际运送的每批货物重量分别乘以其运送距离的累计数，计算单位为吨公里。在这里需要将两种周转量进行统一，因此还需要用到换算周转量这个概念，换算周转量是指将旅客周转量按一定比例换算为货物周转量，然后与货物周转量相加成为一个包括客货运输的综合指标。换算周转量是考核交通运输业的综合性的产量指标。换算周转量 Q 的计算公式为

$$Q = \sum_i^3 G_i D_{Gi} + \sum_i^3 \alpha_i P_i D_{Pi} \quad (4.46)$$

式中： G_i 表示考察年第 i 种交通运输方式实际运送的货物吨数； D_{Gi} 表示考察年第 i 种交通运输方式运送货物的平均运距，单位为公里； i 只能取1, 2, 3，分别代表公路、铁路和水运。

P_i 表示考察年第 i 种交通运输方式实际运送旅客的人数； D_{Pi} 表示考察年第 i 种交通运输方式运送旅客的平均运距，单位为公里； i 只能取1, 2, 3，分别代表公路、铁路和水运。

α_i 表示第 i 种交通运输方式的客货换算系数，客货换算系数的大小，取决于运输1吨公里和1人公里所耗用人力和物力的多少。目前我国统计制度规定的客货换算系数，按座位折算，公路运输为0.1，铁路和内河运输为0.33，即 $\alpha_1=0.1$ ， $\alpha_2=\alpha_3=0.33$ 。

因此可以引入单位交通周转量的经济成本 E' ，单位交通周转量的社会成本 S' 以及单位交通周转量的环境成本 C' ，计算公式即为：

$$E' = E/Q \quad (4.47)$$

$$S' = S/Q \quad (4.48)$$

$$C' = C/Q \quad (4.49)$$

式中： E 、 S 、 C 分别为考察年的经济圈交通网络的经济成本、社会成本、环境成本；

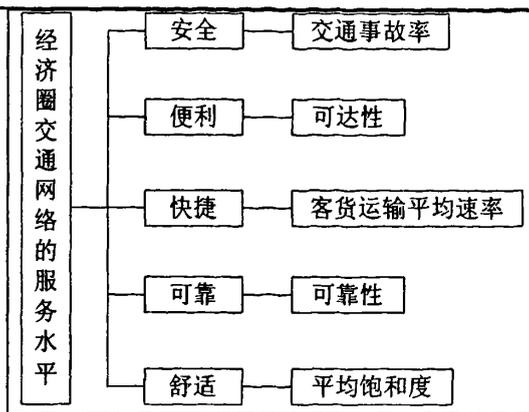
Q 为经济圈考察年的换算周转量。

计算结果的单位为元/(t·km)。

同样，用经济成本、社会成本、环境成本下细分的各种成本去除以换算周转量的话，可以得出单位交通周转量的各种成本消耗值。

4.2 交通需求满足程度

所谓交通需求满足程度，就是经济圈交通网络在为经济圈内的交通需求提供服务时的服务水平如何。对交通参与者来说，希望交通网络能够提供安全、便利、快捷、可靠、舒适的交通服务。因此交通需求满足程度便是要衡量对于交通参与者的这些交通需求，交通网络在考察年所提供的服务水平是怎样的。对应于交通参与者的要求，可以列出最能反映出经济圈交通网络对相应要求满足程度的评价指标：交通事故率、可达性、客货运输平均速率、可靠性、平均饱和度。交通参与者们的交通需求与评价指标间的对应关系见下图。



本节便依次介绍一下这五个指标的算法。

4.2.1 交通事故率

安全性是指经济圈交通网络的安全程度，现有指标中最能直观反映安全性的就是交通事故率。交通事故率也能在一定程度上表现经济圈交通安全设施建设与交通安全管理的水平。

铁路、水路的事事故率极低，几乎为零，因此安全性可以只针对公路网络来进行计算。

影响经济圈公路网络安全性的主要因素为：驾驶员、车辆、公路线性、路面状况、交通状况、管理措施、天气因素等。

交通事故率在计算时主要有万人事故率、万车事故率以及亿车公里事故率三个指标，本文采用亿车公里事故率，因为该指标不仅兼顾了客货运，还将客货的平均运距列入了考量，评判最为全面。该指标的计算公式为：

$$Z = \frac{N}{\sum_i Q_i l_i} \quad (4.50)$$

式中：Z 表示经济圈公路网络的亿车公里事故率，单位为件；

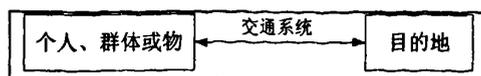
N 表示考察年发生的交通事故总数；

Q_i 表示考察年路段 i 的交通总量，单位为亿车；

l_i 表示路段 i 的长度；

4.2.2 可达性

1959 年，Hansen 首次提出了可达性的概念，将其定义为交通网络中各节点相互作用的机会的大小。此后，可达性的涵义不断引申和发展，交通地理、区域规划、城市规划、景观规划以及土地利用等领域的众多学者都从自己的研究角度出发，提出了可达性的涵义，并深入探讨了对其进行定量评价的方法。至今，学者们在可达性的精确定义上仍然难以达成一致意见。但一般来讲，可达性是指利用一种特定的交通系统从某一给定区位到达活动地点的便利程度。目前，可达性作为评价交通网络性能的一个非常有效的综合性指标，应用相当广泛。



由于可达性牵扯的网络特性和影响因素较多，其度量方法亦呈现出多样性。就已有的文献资料来看，

目前常用的可达性度量方法主要包括：距离法、累积机会法、等值线法、重力模型法、概率法、频率法、平衡系数法、时空法、效用法、基于矩阵的拓扑法、基于空间句法的拓扑法等等。

按照网络特征的差异，可达性度量方法可按下图所示体系进行分类^[45]。

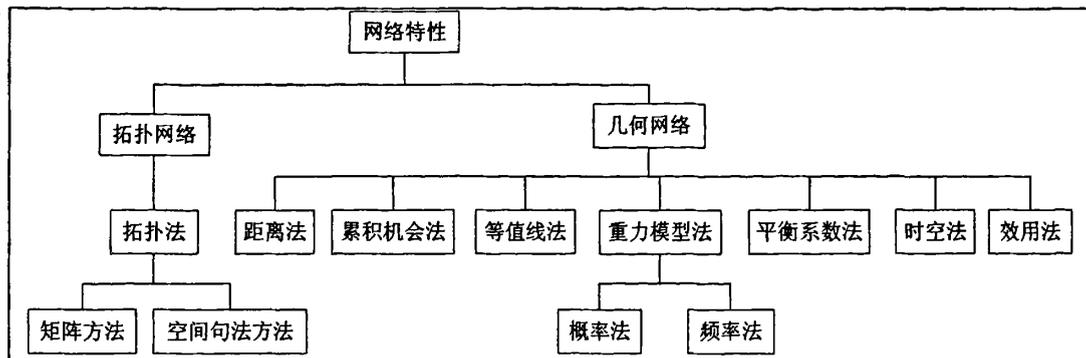


图 4-8 基于网络特性的可达性度量方法分类体系

目前最常用的可达性度量方法还是距离法和重力模型法。下面便简要介绍一下这两种度量方法的原理和算法模型。

1. 距离法

几何网络的算法中距离法是最简单的一种，该方法还可细分为平均距离法和加权距离法，其中加权距离法不仅考虑了最短距离^[46]还考虑了节点本身的属性，更合理一些。加权距离法的算法模型为：

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{ij} \times M_j)}{\sum_{j=1}^n M_j} \quad (4.51)$$

式中： A_i 为节点 i 在交通网络中的加权平均旅行时间；

T_{ij} 为节点 i 到节点 j 的最短距离，采用时间来衡量；

M_j 为节点 j 的权值，可以是节点 j 的人口、工作岗位、生产总值（GDP）等。

2. 重力模型法

重力模型法的思想来源于物理学的万有引力定律，十九世纪四五十年代斯图尔特将万有引力定律中的势能公式引入地理学，通过计算某度量点以外的所有吸引点施加到该点的势能总和来评价该点的可达性。其中吸引点对待度量点作用力的距离衰减函数是重力模型的关键。在实际应用中，常见的距离衰减函数包括指数函数、幂函数、线性函数、对数函数等，视实际计算的需要并结合研究区域的情况而定。重力模型法将空间上各吸引点的空间效应随距离而衰减与各吸引点自身的引力规模结合起来衡量可达性水平，吸引点和度量点之间的作用力规模越大、距离越小，则可达性水平越高。重力模型法最大的特色是将交通运输系统与社会经济活动纳入了统一的分析框架，因此可达性能同时反映交通运输系统的改善与社会经济活动的进展。重力模型法的算法模型如下：

$$A_i = \sum_j M_j f(d_{ij}) \quad (4.52)$$

式中： M_j 的含义与式（4.50）相同；

$f(d_{ij})$ 为阻抗函数， d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的时间、距离、费用等。常见的形式有： $f(d_{ij}) = d_{ij}^{-\alpha}$ ， $f(d_{ij}) = e^{-\beta d_{ij}}$ 。

目前，重力模型法仍存在问题。第一，距离衰减函数的确定具有很大的主观性，不同衰减函数的

衰减速率不同、适用性存在很大差异；第二，该方法将空间简化为点，被简化的原有空间区域的尺寸和形状都会影响到可达性的计算结果，需要在权衡数据量与精度的基础上确定空间简化方式。

考虑到采用重力模型法很难找到精准的衰减函数，因此本文采用距离法来度量到经济圈交通网络的可达性，但是需要在距离法的原始算法模型的基础上加一些改动，因为经济圈交通网络是一个综合网络，其可达性也应该是多种交通方式的综合可达性，另外考虑到客运和货运的阻抗也是不同的^[47]，因此将可达性算法模型修改如下：

$$A_{ai客} = \frac{\sum_{b=1}^n T_{i客}^{(a,b)} \times P_b}{\sum_{b=1}^n P_b} \quad (4.53)$$

$$A_{ai货} = \frac{\sum_{b=1}^n T_{i货}^{(a,b)} \times G_b}{\sum_{b=1}^n G_b} \quad (4.54)$$

$$A_{ai} = k_{ai客} A_{ai客} + k_{ai货} A_{ai货} \quad (4.55)$$

$$A_a = \sum_i \omega_{ai} A_{ai} \quad (4.56)$$

式中： $A_{ai客}$ 表示节点 a 在经济交通网络中第 i 种交通运输方式的客运加权平均旅行时间， i 取1、2、3，分别表示公路、铁路、水路；

$A_{ai货}$ 表示节点 a 在经济交通网络中第 i 种交通运输方式的货运加权平均旅行时间；

$T_{i客}^{(a,b)}$ 表示考察年节点 a 和节点 b 之间第 i 种交通运输方式的客运运输时间，计算公式参见式(4.19)；

$T_{i货}^{(a,b)}$ 表示考察年节点 a 和节点 b 之间第 i 种交通运输方式的货运运输时间，计算公式与客运类似；

P_b 表示为节点 b 的人口数；

G_b 表示为节点 b 的生产总值（GDP）；

n 表示经济圈内节点数；

A_{ai} 表示表示节点 a 在经济交通网络中第 i 种交通运输方式的加权平均旅行时间；

$k_{ai客}$ 、 $k_{ai货}$ 表示节点 a 的客、货运权重系数，可根据客货运输量所占比重确定；

A_a 表示节点 a 的加权平均旅行时间；

ω_{ai} 表示节点 a 第 i 种交通运输方式的权重系数，可根据交通运输方式运输量所占比重确定。

则经济圈的加权平均旅行时间 A 即为：

$$A = \sum_i A_i / n \quad (4.57)$$

上述可达性模型的特点有：

(1) 划分交通运输方式，并从客、货运两方面入手，分别研究经济圈的可达性。经济圈中城市之间的交流往往因运输对象和网络设施状况的不同而采用不同的交通方式，从而引起可达性的变化。从客运和货运两个角度研究区域的可达性，在运输时间的确定、影响节点城市权重因素的选择等方面，都比单一的可达性指标更能反映实际。

(2) 运输时间不仅考虑了城市间的运输阻抗,还考虑了城市的内部阻抗。如果城市内部交通时间在整个出行时间中的比例逐渐增大,那么其对城市可达性的影响也越来越大。这一点模型中列入了考虑。

(3) 进行了加权处理。经济圈可达性除了反映出出行难易程度外,还应该反映出经济圈人口和生产布局情况。因此,在计算各交通运输方式的客、货运可达性时,分别用城市(含郊区)人口和国民生产总值在经济圈中的比重作为权重;计算节点城市可达性时,则根据各城市客、货周转量以及各交通方式换算周转量的比重来确定其权重。

本文的可达性模型针对经济圈综合交通运输的复杂性,比较全面地考虑了影响可达性的因素,以期更加实用。

4.2.3 客货运输平均速率

通常,旅行者总是希望自己在旅途中耗费的时间越少越好,而货物运输同样期望节省交通运输时间。因此经济圈交通网络运送客货的快捷程度究竟如何,可以通过客货运输的直线里程与在途时间的比值来衡量,即经济圈交通网络的客货运输平均速率。其计算公式为:

$$v = \frac{\sum_a \sum_b L^{(a,b)} q^{(a,b)}}{\sum_a \sum_b T^{(a,b)} q^{(a,b)}} \quad (4.58)$$

式中: v 表示经济圈交通网络的客货运输平均速率;

$L^{(a,b)}$ 表示节点 a 与节点 b 之间的空间直线距离;

$q^{(a,b)}$ 表示考察年节点 a 与节点 b 之间的总运输量, $q^{(a,b)} = \alpha P^{(a,b)} + G^{(a,b)}$, $P^{(a,b)}$ 表示考察年节点 a 与节点 b 之间的旅客运送人数, $G^{(a,b)}$ 表示考察年节点 a 与节点 b 之间的货物运送吨数, α 表示客货换算系数,取值为 0.1;

$T^{(a,b)}$ 表示考察年节点 a 与节点 b 之间的平均运送时间。

v 值越大,说明网络的运输效率越高,客货运输时间越少。

4.2.4 可靠性

可靠性的标准定义为:可靠性是产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。可靠性理论与方法在工程技术中应用广泛,主要用于分析机械配件或设备工作的稳定状态。随着可靠性研究的发展,可靠性的研究范围和研究内容都在不断扩展,表现之一就是网络系统(通信网络、交通网络等)的可靠性研究^[50]。如今,可靠性已然成为衡量交通网络性能的重要指标。

现有的交通网络可靠性研究主要有以下几种:

1. 连通可靠性:是指网络中的节点保持连通的概率。

2. 行程时间可靠性:是指对于给定的 OD 点对,出行者能在规定的时间内完成出行的概率。刘海旭从出行者所能容忍的行程时间波动范围的角度,将行程时间可靠性定义为 OD 点对之间行程时间增长率小于可接受的最大行程时间增长率的概率^[49]。

3. 网络容量可靠性:是指交通网络在可接受的服务水平下,考虑到出行者的路径选择行为,所能容纳一定交通需求的概率。

可以看出连通可靠性主要是从网络的拓扑结构和行车组织方面所作的定义,没有考虑交通网络的通行能力,工作状态只能为故障和达到最大通行能力两种,不符合路网实际情况。因此本文不做考虑。

行程时间可靠性和网络容量可靠性有着紧密的相关性,网络容量可靠性在计算时需要以路段行程时间可靠性作为约束条件以满足交通网络在可接受的服务水平下,可以说是在行程时间可靠性的基础上得出

的。因此考虑到计算的繁简度, 本文取行程时间可靠性作为交通网络可靠性指标。

而行程时间可靠性在计算前需要明确一下计算范围, 那就是只针对经济圈公路网络, 因为铁路、水路在行程时间上都是有保障的, 可以认为它们的这两种可靠性为 1。

下面便介绍一下经济圈公路网络行程时间可靠性的算法。

要计算行程时间的可靠性, 首先就是要确定路段实际行程时间的变化函数。各种随机因素对路段的通行能力的影响是不同的, 这些因素可以分为连续型和离散型两种。比如重大灾害就可视为离散型的随机因素, 而日常的交通拥堵等可视为连续型的随机因素。若只考虑后一种情况, 就可以把路段的通行能力看成是一个非负连续随机变量, 服从某种概率分布。这种分布可从过去的交通资料中统计得到。由于路段的通行能力是一个随机变化的随机变量, 因此路段实际行程时间也是一个随机变化的随机变量。使用 BPR 函数, 可以将路段实际行程时间的数学形式表示如下:

$$T_i = t_{i0} \left[1 + \alpha \left(\frac{x_i}{C_i} \right)^\beta \right] \quad (4.59)$$

式中: T_i 表示路段 i 的实际行程时间;

t_{i0} 表示路段 i 的自由行程时间, 即路段长度与限定最高车速的比值。

x_i 表示路段 i 上的交通流量;

C_i 表示路段 i 的通行能力;

α 和 β 为 BPR 函数的参数, 在此可以分别取值为 0.15 和 4。

在路段通行能力随机变动的情况下, 路段的行程时间可靠性 R_i 可以表示如下:

$$R_i = P \{ T_i \leq \phi_i t_{i0} \} \quad (4.60)$$

式中: ϕ_i 表示路段 i 的拥堵系数, 反映人们可接受的交通拥堵水平, $\phi_i > 1$, 因为当路段通行能力随机变化时, 行程时间总是大于自由行程时间。一般来说, ϕ_i 应随路段的不同而不同, 因为人们对不同路段的服务水平的要求不同。 ϕ_i 可以通过对既往交通资料进行统计分析并结合 SP 调查加以确定, 为了简便计算, 也可按常规数值取为 1.2。

将公式 (4.59) 代入 (4.60) 可得:

$$R_i = P \left\{ C_i \geq \frac{x_i}{\left(\frac{\phi_i - 1}{\alpha} \right)^{1/\beta}} \right\} \quad (4.61)$$

因为路段通行能力 C_i 是一个随机变量, 它必然服从某种概率分布, 这种分布便是由考察年的交通资料统计得出的。假定 C_i 的分布函数 F_{C_i} 已知, 令

$$\rho_i = \left(\frac{\phi_i - 1}{\alpha} \right)^{1/\beta} \quad (4.62)$$

则可以将路段 a 的行程时间可靠性表示为交通流量 x_i 的函数:

$$R_i = 1 - F_{C_i} \left(\frac{x_i}{\rho_i} \right) \quad (4.63)$$

对经济圈交通网络中的公路网络来说, 可以将考察年路段 i 的年平均交通流量作为 x_i 代入式 (4.63),

便可求得考察年路段 i 的行程时间可靠性。那么，经济圈公路网络的行程时间可靠性 R_i 的计算公式则为：

$$R_i = \sum_i \frac{x_i R_i}{\sum_i x_i} \quad (4.64)$$

$$x_i = \frac{Q_i}{365 \times 24} \quad (4.65)$$

式中： Q_i 为考察年路段 i 的交通总量。

4.2.5 平均饱和度

本文认为铁路和水路的乘客舒适性是一定的，完全取决于列车与船只的等级和速度，与交通网络的关联不大。因此舒适性的考量也是只针对经济圈公路网络的。与城市交通网络类似，使用经济圈公路网络的旅客的舒适度也和网络拥挤度有着密切的关系，网络拥挤度越高，驾驶员在驾车时受到的干扰越多，行程时间也就越长，对于旅客来说，疲劳度也会增加，因此可以认为舒适性随公路网络拥挤度的增高而降低。那么，同理于城市交通道路网，经济圈公路网络的舒适度服务水平也可以通过路段的平均饱和度来衡量。计算公式为：

$$\frac{V}{C} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{C_i} \times l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (4.66)$$

式中： V/C 为经济圈公路网络的平均饱和程度；

V_i 表示考察年第 i 条路段的平均交通量；

C_i 表示第 i 条路段的设计交通量；

l_i 表示第 i 条路段的长度。

当 V/C 超出一定的数值后，其值越大，则公路网络的交通量越趋于饱和，越显得拥挤，由此可推断出经济圈公路网络的舒适性越低。

4.3 交通网络综合效率的度量方法

交通网络综合效率是交通投入与交通需求满足程度的对比关系，但是由上文的算法分析可以看出交通投入的指标单位与交通需求满足程度的指标单位完全不同，而且交通需求满足程度中的几个指标的单位亦各不相同，根本没有办法进行比较考量。因此本文借鉴评价体系的方法来统一量纲。

4.3.1 指标量纲的统一

模糊评价法通过计算指标的隶属度，来划分指标的所属等级，从而使指标之间具有了可比性^[53]。根据指标定性与定量的不同属性，其计算方法可分为模糊统计法与定量分析法。本文选用的指标都是定量指标，因此采用定量分析法。

隶属度的定量分析法有很多种，其中，fuzzy 自评判模型算法简便，应用较为广泛。自评判模型主要通过各指标的统计资料或者理论值的相对比较，构造出隶属函数。其具体计算过程为：

1. 指标原始数据标准化

设指标 X_i 的原始数据为 Z_i ，则交通投入指标以及交通需求满足程度中的交通事故率、平均饱和度属

于“成本型”指标，这类指标的标准化处理公式为：

$$Z_i^* = \frac{Z_{i\max} - Z_i}{Z_{i\max} - Z_{i\min}} \quad (4.67)$$

交通需求满足程度中可达性、客货运输平均速率、可靠性这三个指标属于“效益型”指标，这类指标的标准化处理公式为：

$$Z_i^* = \frac{Z_i - Z_{i\min}}{Z_{i\max} - Z_{i\min}} \quad (4.68)$$

式中： $Z_{i\max}$ 、 $Z_{i\min}$ 分别为指标 X_i 的统计或理论最大值和最小值。

2. 列出指标的隶属矩阵

按照评语集 {很差、差、一般、好、很好}，将标准化后的数据区间 [0,1] 对应划分成 [0,0.2]、(0.2,0.4)、(0.4,0.6]、(0.6,0.8]、(0.8,1.0]。依据指标 X_i 标准化后的指标值 Z_i^* 找到其相对应的区间，然后按该区间的隶属函数计算指标的隶属度矩阵 $R_i = (\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \lambda_{i3}, \lambda_{i4}, \lambda_{i5})$ 。

fuzzy 自评判模型的各个区间的隶属函数定义见下表。

表 4.2 fuzzy 自评判模型的隶属函数定义

隶属度	$Z_i^* \in [0,0.2]$	$Z_i^* \in (0.2,0.4]$	$Z_i^* \in (0.4,0.6]$	$Z_i^* \in (0.6,0.8]$	$Z_i^* \in (0.8,1.0]$
λ_{i1}	1	$(0.4 - Z_i^*)/0.2$	0	0	0
λ_{i2}	0	$(Z_i^* - 0.2)/0.2$	$(0.6 - Z_i^*)/0.2$	0	0
λ_{i3}	0	0	$(Z_i^* - 0.4)/0.2$	$(0.8 - Z_i^*)/0.2$	0
λ_{i4}	0	0	0	$(Z_i^* - 0.6)/0.2$	$(1 - Z_i^*)/0.2$
λ_{i5}	0	0	0	0	$(Z_i^* - 0.8)/0.2$

可以看出， $0 \leq \lambda_{ij} \leq 1$ ， $\sum_{j=1}^5 \lambda_{ij} = 1$ 。

3. 评价目标的隶属度矩阵

将各个指标的隶属度矩阵计算出来之后，便可依照下式计算评价目标的隶属度矩阵 \underline{B} ：

$$\underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{R} \quad (4.69)$$

式中： $\underline{A} = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$ ，即各指标的权重矩阵；

$$\underline{R} = (R_1, R_2, \dots, R_n)^T;$$

对于本文来说，评价目标有两个，一个是交通投入，一个是交通需求满足程度。因此需要计算两个隶属度矩阵。由式 (4.69) 还可以看出隶属度矩阵的计算还需要知道评价目标下每个指标所占的权重，该值的确定将在下一节阐述。

4.3.2 指标权重的确定

层次分析法 (简称 AHP) 是对复杂问题做出评价判断的有效方法，该方法是由美国运筹学家 T-L-Satty 于 20 世纪 70 年代初期提出的一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法。该方法尤其适合于决策结果难于直接准确计量的场合。层次分析法将复杂的问题分解成目标、准则、方案等若干层次的系统，在每一层次，按照一定准则对该层元素进行逐对比较，并按标度定量化，形成判断矩阵。通过计算判断矩阵的最大特征值以及相对应的正交化特征向量，得出该元素对该准则的权重。在此基础上，可以计算出各层次元素

对于该准则的比重。也就是说层次分析法是在比原问题简单得多的层次上进行分析、比较量化、单排序,然后再逐级综合(总排序),最后得到所需问题的解^[51-52]。

层次分析法的具体实施步骤为:

1. 划分复杂问题的层次

把复杂问题分解为由元素组成的各部分,把这些元素按其属性分成若干组以形成不同层次。同一层次元素对下一层次元素起支配作用,同时受上一层次元素支配。对本文来说,需要分解的问题的就是交通投入和交通需求满足程度,这两个问题的层次划分可分别参照图 4-5 和图 4-6。

2. 建立判断矩阵

根据层次分析结构,构造各层次的判断矩阵,判断矩阵表示在同一准则下的评价指标两两比较的相对重要程度,通过判断矩阵可求出下一层次的子元素相对于上相邻一层次元素的相对权重。判断矩阵的标度取值见下表所示。

表 4.3 判断矩阵的标度

标度 a_{ij}	含义
1	表示因素 i 与 j 两个因素相比, 具有同样的重要性
3	表示因素 i 与 j 两个因素相比, 因素 i 略微重要些
5	表示因素 i 与 j 两个因素相比, 因素 i 明显重要
7	表示因素 i 与 j 两个因素相比, 因素 i 非常重要
9	表示因素 i 与 j 两个因素相比, 因素 i 绝对重要
2、4、6、8	上述两相邻标度的中值
倒数	若因素 j 与 i 比较, 得到的判断标度值为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

则由标度 a_{ij} 为元素构成的矩阵就称为判断矩阵 a 。

3. 计算各因素的权重

在层次分析法中,各因素的权重可通过求解标准判断矩阵的特征向量而得。这里有 3 种计算方法,即几何平均法、算术平均法和逐次逼近法。前两种是近似计算方法,后一种方法精确度高,适合计算机计算。由于判断矩阵本身已经带有不少误差,并不需要很高的精度,故采用算法最为简便的几何平均法,计算步骤如下:

(1) 计算判断矩阵每列元素的总和

$$a_j = a_{1j} + a_{2j} + \dots + a_{nj} \quad (4.70)$$

式中: n 为因素的个数,后文含义相同,不再另作说明。

(2) 建立标准判断矩阵

将判断矩阵中的每一元素除以其相应列的总和,所得商组成一个新的矩阵,称为标准判断矩阵 b 。

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_j}, (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (4.71)$$

(3) 计算各因素在同一标准下的权重

计算标准判断矩阵的每一行的平均值,它们即是各因素在同一标准下的权重。

$$b_i = \frac{b_{i1} + b_{i2} + \dots + b_{in}}{n} \quad (4.72)$$

显然标准判断矩阵的每列和为 1,且各因素在同一标准下的权重和也为 1。 $(b_1, b_2, \dots, b_n)^T$ 即为该标准下的特征向量。

4. 判断矩阵的一致性检验

如果判断矩阵 a 满足 $a_{ij} = a_{ik}a_{kj}$ 的话, 则称其为一致性矩阵。一致性矩阵 a 的元素是通过两个因素两两比较得到的, 而在很多这样的比较中, 往往可能得到一些不一致的结论。例如当因素 i 、 j 、 k 的重要性很接近时, 我们在两两比较时, 可能得出 i 比 j 重要, j 比 k 重要, 而 k 又比 i 重要等矛盾的结论。这在因素的数目多时更容易发生。由于事物的复杂性, 要达到完全一致性是非常困难的, 因此允许在一致性上有一定的偏差。一致性检验步骤如下:

(1) 计算赋权和向量

由被检验的判断矩阵 a 乘以其特征向量 $(b_1, b_2, \dots, b_n)^T$, 所得的向量称为赋权和向量 c 。

$$c = a \cdot (b_1, b_2, \dots, b_n)^T \tag{4.73}$$

(2) 计算 λ_{\max}

将每个赋权和向量的分量分别除以对应的特征向量的分量, 即 $d_i = c_i / b_i$, 则:

$$\lambda_{\max} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{n} \tag{4.74}$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵 a 的最大特征根。

我们可以由 λ_{\max} 是否等于 n 来检验判断矩阵是否为一致性矩阵。 λ_{\max} 比 n 大得越多, 矩阵的非一致性程度就越严重, λ_{\max} 对应的标准判断矩阵的特征向量也就无法真实反映出各因素在同一标准下的权重。因此需要通过一致性检验来判断计算出的权重是否能够接受。

(3) 计算一致性指标 CI

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{4.75}$$

当 $\lambda_{\max} = 0$ 时, $CI = 0$, 为完全一致性; CI 值越大, 矩阵的完全一致性越差, 一般只要 $CI \leq 0.1$, 就认为矩阵的一致性可以接受, 否则需要重新进行两两比较。

因为矩阵的维数越大, 一致性将越差, 因此对于高维数的判断矩阵, 一致性要求可以适当放宽, 由此引入自由度指标 RI (RI 的取值参见表 4.4), 借以对 CI 进行修正。

$$CR = CI / RI \tag{4.76}$$

表 4.4 判断矩阵的平均随机一致性指标 RI

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI 值	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48

5. 计算指标的综合权重

求出每一层元素相对于上一层元素的权重后, 最后要求其相对于跨层元素的权重。设准则层 B_i 相对于总目标层的权重为 α_i , 准则层 B_i 下第 j 个元素 C_j 相对于 B_i 的相对权重为 β_{ij} , 则指标层指标 C_j 相对于总目标层的综合权重为:

$$\gamma_{ij} = \alpha_i \beta_{ij} \tag{4.77}$$

在计算了各个指标的综合权重后, 这样一个多层次的评价便转化成为单层次的评价, 只要计算出各指标的评价值便可实现评价目标。

就本文而言, 交通投入属于多层次评价, 而交通需求满足程度则只有一层。

4.3.3 交通网络综合效率的最终结果

在统一了指标量纲, 确定了指标权重之后, 可以计算出目标层的隶属度矩阵 B , 计算公式见式 (4.69),

该隶属度矩阵便对应表示了目标对评语集{很差、差、一般、好、很好}的隶属关系，一旦为评语集的五等级赋予一定的分值，就能计算出目标层的最终评价得分。

$$S = B \cdot C^T \quad (4.78)$$

式中： S 表示目标的评价得分；

B 表示目标的隶属度矩阵；

C 表示评语集分值向量。

由此可以分别计算出交通投入和交通需求满足程度的评价分值 S_1 和 S_2 。当交通投入成本越低时，交通投入的评价分值 S_1 就越高，反之就越低。而交通需求满足程度则是满足程度越高，评价分值 S_2 越高。

因此要评判经济圈交通网络综合效率如何，主要就是看 S_1 和 S_2 的值。

一个高效的经济圈交通网络总是希望以最低的投入尽最大限度满足经济圈内的交通需求，因此，希望 S_1 和 S_2 都是越大越好，且两者的值不宜悬殊过大。若 S_1 远远高于 S_2 ，就说明交通网络在交通投入上严重不足，以至于交通需求满足程度过低，此时需要加大投入；若 S_1 远远低于 S_2 ，就说明交通网络在交通投入上耗资过多，就算极大满足了经济圈内的交通需求，仍应寻求降低成本节约资源的解决方案。

表 4.5 经济圈交通网络综合效率判断条件

综合效率	条件
很高	$S_1 + S_2 \geq 180$
高	$S_1 + S_2 \geq 160$ (当 $ S_1 - S_2 > 20$ 时降一级)
一般	$S_1 + S_2 \geq 140$ (当 $ S_1 - S_2 > 20$ 时降一级)
低	$S_1 + S_2 \geq 120$ (当 $ S_1 - S_2 > 20$ 时降一级)
很低	$S_1 + S_2 < 120$

4.4 实例

4.4.1 长三角经济圈交通网络简介

长三角经济圈目前已建成的主要交通网络基础设施有：铁路方面，已建成上海—南京线、上海—杭州线、南京—南通线、杭州—宁波线、南通—杭州线，其中上海至南京与杭州已建成高速铁路。公路方面，已建成连接上海、南京沿线的沪宁高速公路，连接上海、常州沿线的沿江高速公路，连接南京、南通沿线的宁通高速公路，连接南京、杭州沿线的宁杭高速公路，连接上海、杭州沿线的沪杭高速公路，连接杭州、宁波沿线的杭甬高速公路，连接无锡与泰州、宜兴的锡澄高速、锡宜高速，以及国道 204、312、104、318、320 等。航道方面，承载大宗货物运输的主要航道为长江航道、沿海航道与京杭运河等。

目前长江三角洲 GDP 总量约为 53614 亿元，人口约为 9749 万人，铁路客运量 15643 万人次，铁路货运量达 17468 万吨，公路客运量达 25897 万人次，公路货运量达 143200 万吨，水路客运量达 621 万人次，水路货运量达 74580 万吨。铁路网总长达到 1476 公里，公路网总长达到 103474 公里，航道网总长达到 20372 公里。

4.4.2 指标求值

分别列出经济圈交通网络交通投入和交通需求满足程度的评价指标体系,并根据基础数据分别求解各指标值,求解方法参见4.1节和4.2节。

表 4.6 经济圈交通网络交通投入评价指标体系

目标层 A	准则层 B	指标层 C	指标值 (元/t·km)
交通投入	经济成本 (B_1)	单位交通周转量的固定设施成本 (C_1)	0.837
		单位交通周转量的载运工具成本 (C_2)	0.213
		单位交通周转量的能源成本 (C_3)	0.591
		单位交通周转量的人工成本 (C_4)	0.062
	社会成本 (B_2)	单位交通周转量的时间成本 (C_5)	0.068
		单位交通周转量的运输成本 (C_6)	0.057
		单位交通周转量的安全成本 (C_7)	0.034
	环境成本 (B_3)	单位交通周转量的生态破坏成本 (C_8)	0.132
		单位交通周转量的环境污染成本 (C_9)	0.185

表 4.7 经济圈交通网络交通需求满足程度评价指标体系

目标层 A	准则层 B	指标层 C	指标值
交通需求满足程度	安全 (B_1)	交通事故率 (C_1)	47 件
	便利 (B_2)	可达性 (C_2)	2.94 小时
	快捷 (B_3)	客货运输平均速率 (C_3)	69.4 公里/小时
	可靠 (B_4)	可靠性 (C_4)	0.74
	舒适 (B_5)	平均饱和度 (C_5)	0.46

4.4.3 指标隶属度计算

本文共邀请了 10 位相关专家划分了各指标的水平等级。运用模糊评价法计算后,各指标分属每个评价等级的隶属度见下表。

表 4.8 交通投入各指标隶属度

	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	λ_{15}
C_1	0.000	0.000	0.764	0.236	0.000
C_2	0.000	0.000	0.000	0.967	0.033
C_3	0.000	0.000	0.879	0.121	0.000
C_4	0.000	0.000	0.653	0.347	0.000
C_5	0.000	0.000	0.145	0.855	0.000

C_6	0.000	0.525	0.348	0.127	0.000
C_7	0.000	0.000	0.392	0.608	0.000
C_8	0.000	0.000	0.417	0.583	0.000
C_9	0.000	0.000	0.116	0.884	0.000

表 4.9 交通需求满足程度各指标隶属度

	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	λ_{15}
C_1	0.000	0.000	0.287	0.713	0.000
C_2	0.000	0.000	0.000	0.849	0.151
C_3	0.000	0.000	0.143	0.857	0.000
C_4	0.000	0.000	0.063	0.937	0.000
C_5	0.000	0.000	0.000	0.235	0.765

4.4.4 指标权重计算

按照指标权重计算方法，分别计算交通投入与交通需求满足程度各个指标的权重。指标体系的层级结构见表 4.6 和表 4.7；通过比较各指标重要性建立判断矩阵，并通过相关专家的指导进行修正；一致性检验及指标相对权重的计算结果如下：

表 4.10 交通投入目标层 A 因素权重计算

A	B_1	B_2	B_3	b_i
B_1	1	3	4	0.557
B_2	1/3	1	2	0.320
B_3	1/4	1/2	1	0.123
$\lambda_{\max}=3.0191, CI=0.0085$				
$RI=0.58, CR=0.0147<0.1$				

表 4.11 交通投入准则层 B_1 、 B_2 、 B_3 因素权重计算

B_1	C_1	C_2	C_3	C_4	b_i
C_1	1	2	1/2	4	0.2840
C_2	1/2	1	1/3	3	0.1715
C_3	2	3	1	5	0.4709
C_4	1/4	1/3	1/5	1	0.0736
$\lambda_{\max}=4.0513, CI=0.0171$					
$RI=0.90, CR=0.019<0.1$					

B_2	C_5	C_6	C_7	b_i
C_5	1	2	1/4	0.2014
C_6	1/2	1	1/5	0.1180
C_7	4	5	1	0.6806
$\lambda_{\max}=3.0247, CI=0.01235$				
$RI=0.58, CR=0.021<0.1$				

B_3	C_8	C_9	b_i
C_8	1	2	0.333
C_9	1/2	1	0.667
$\lambda_{\max}=2, CI=0<0.1$			

表 4.12 交通需求满足程度因素权重计算

A	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	b _i
C ₁	1	2	2	3	3	0.3684
C ₂	1/2	1	1	2	2	0.2064
C ₃	1/2	1	1	2	2	0.2064
C ₄	1/3	1/2	1/2	1	1	0.1094
C ₅	1/3	1/2	1/2	1	1	0.1094
$\lambda_{\max}=5.01289, CI=0.0322$ $RI=1.12, CR=0.02875<0.1$						

经由上述计算结果,可知交通需求满足程度的各指标权重即为表 4.12 的 b_i 列所示的特征向量值,而交通投入的各指标权重则可以按照式 (4.77) 计算得出,结果如下表所示:

表 4.13 交通投入指标的综合权重

指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
综合权重	0.158	0.096	0.262	0.041	0.064	0.038	0.218	0.041	0.082

4.4.5 结果计算

指标的隶属度和权重确定后,便可以通过式 (4.78) 分别计算得出交通投入和交通需求满足程度的的隶属度矩阵 B_1 和 B_2 :

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = (0, 0.02, 0.5124, 0.4645, 0.0031)$$

$$B_2 = A_2 \cdot R_2 = (0, 0, 0.1421, 0.7430, 0.1149)$$

若以 $C = (55, 65, 75, 85, 95)$ 表示评语集 {很差、差、一般、好、很好} 的分值,则长三角经济圈交通网络在交通投入和交通需求满足程度方面的得分分别为:

$$S_1 = B_1 \cdot C^T = 79.51; S_2 = B_2 \cdot C^T = 84.728$$

$$S_1 + S_2 = 164.238 > 160$$

$$|S_1 - S_2| = 5.218 < 20$$

4.4.5 结论分析

可以看出,长三角经济圈交通网络,在交通投入方面属于“一般”的等级,在交通需求满足程度方面属于“好”的等级,综合考虑两方面的综合效率属于“高”的等级。这说明了长三角经济圈交通网络还是能够适应经济圈社会经济可持续发展的要求的,能够以较为合理的交通投入满足经济圈内的交通出行需求,交通网络运行状况与经济、社会、环境状况较为协调。

从各指标的隶属度可以看出,大部分指标处于“好”的水平等级,但在能源、环境、安全方面尚有不足之处,若要进一步提高交通网络的综合效率,则需要推广节能的载运工具、在交通设施建设和运营过程中尽可能地减少对环境的破坏和影响、加大安全管理力度等。另外,铁路和水路无论在能源、环境还是安全上都远胜于公路,因此想要以尽可能低的交通投入满足交通需求的话,可以考虑进一步提高铁路和水路的客货运分担率,尤其是铁路部门,发展大规模轨道运输是提高经济圈交通网络综合效率的最佳手段。

第五章 结论和展望

5.1 主要研究成果

经济圈是一个国家最具创新活力的区域,对整个国家的经济发展具有强大的带动作用。经济圈的形和成长在很大程度上依赖于交通网络的建设发展,快速便捷、互连互通的交通运输体系是实现经济圈空间整合、高效发展的基础。经济圈交通网络综合效率可以科学地衡量出经济圈交通的规划和发展是否合理,进而指导经济圈交通资源更加有效地整合,有利于引导经济圈交通网络体系一体化的构建进程,并推动经济圈交通的全面协调可持续发展。

本文在分析了经济圈交通网络综合效率概念、影响因素,研究了经济圈交通网络结构的基础上,进一步探讨了经济圈交通网络综合效率的度量方法,主要研究成果如下:

1. 在深入剖析了经济圈交通网络和交通效率这两个已知概念的基础上,给经济圈交通网络综合效率下了明确的定义。
2. 从硬件、软件、政策、环境四个方面探究了经济圈交通网络综合效率的影响因素。每个方面都列举了其中的具体影响因素,并逐一分析了这些因素影响机理。
3. 借助图论,介绍了经济圈交通网络的构成要素和抽象表示的方法,并以长三角经济圈为实例详细交代了交通网络拓扑图的绘制方法与邻接矩阵、路编目录等抽象表示法的实际操作。
4. 在经济圈交通网络拓扑图的基础上,对交通网络的结构进行了深层的分析,从结构角度研究了交通网络的可达性、结构效率、运行效率以及网络组件的重要度。
5. 分交通投入和交通需求满足程度两个方面详细探讨了综合效率相关指标的算法。交通投入方面又是分别从经济、社会、环境三个角度来划分成本的,每个角度再进一步地细分,经济方面细分为固定设施成本、载运工具成本、能源成本、人工成本;社会方面细分为时间成本、运输成本、安全成本;环境方面细分为生态破坏成本和污染破坏成本,以此建立了一个完整的经济圈交通网络交通投入的指标体系,并详细剖析了每个成本指标的明确含义、成分构成和计算方法。交通需求满足程度方面是从交通参与者的角度出发,按照安全、便利、快捷、可靠、舒适五种最为广泛的交通要求,分别选取了交通事故率、可达性、客货运输平均速率、可靠性、平均饱和度作为这五种交通需求的度量指标,继而详细探讨了这些指标的具体算法。
6. 借鉴了评价的方法,运用模糊评级法及自评判模型分别计算了指标的隶属度,以统一量纲,然后运用层次分析法计算了交通投入和交通需求满足程度各指标的权重,最终提出了经济圈交通网络综合效率的评判方法,并通过长三角经济圈交通网络的实例求解,论证了该方法的可行性。

5.2 主要创新点

目前涉及交通网络效率方面的研究还很少,经济圈交通网络的效率研究就更为稀缺了,本文在查阅了大量相关文献的基础上,尝试着从效率的角度,对经济圈交通网络进行了深入的研究,也算是在某种程度上填补了这方面的空白。

本文的主要创新点有:

1. 给出了经济圈交通网络综合效率的明确定义。
2. 分析了影响综合效率各个影响因素的影响机理。
3. 选取了衡量综合效率时所用到的指标。

-
4. 在现有指标算法的基础上, 将算法的应用范围推广到了经济圈。
 5. 借鉴了评价的方法, 并将其引入到了综合效率的衡量中。

5.3 研究展望

由于作者知识水平有限, 本文还存在诸多不足和不完善之处, 有待于进行更深一步的研究, 主要有:

1. 由于经济圈存在多个行政区划以及统计标准的不同, 使得数据的收集与分析具有一定困难, 本文所运用的数据均带有估算成分, 如果需要更加精确地进行计算的话, 还需要进行大量的前期调查和数据收集工作。因此有必要对如何收集、统计基础数据进行系统的研究。

2. 本文中在进行交通需求满足程度的考量时, 安全、可靠、舒适方面的指标都只考虑了由城际公路组成的公路网络, 并没有将铁路和水路纳入考虑, 如何找到更能全面反应交通网络安全性、可靠性、舒适性的指标还需要进一步研究。

3. 在统一各指标量纲的时候, 需要明确各个指标的评价标准, 而综合交通网络评价研究目前还难以定量每个指标的评价标准, 因此在下一步研究工作中, 各个指标的评价标准应作为研究的重点。

致 谢

本文自选题、开题、撰写到收笔都是在导师邓卫教授的悉心指导、关心和帮助下完成的。邓老师渊博精深的理论知识、谦逊平易的学者风范、严谨求实的治学态度、正直宽容的处世原则，使我受益匪浅。繁忙的科研、教学、公务之余，导师在生活和学习上对我无微不至的悉心关怀，使我在求学过程中如沐春风。在此，谨向导师致以崇高的敬意和衷心的感谢，并祝取得更加辉煌的科研业绩与教学成果！

感谢王炜教授、邓卫教授、过秀成教授、陆键教授、李旭宏教授、陈学武教授、李文权教授、程琳教授、陆建教授、陈峻教授、任刚副教授、项乔君副教授、李铁柱副教授、王庆老师、季彦婕老师、陈茜老师、杨敏老师和梁衡弘老师。在东南大学六年多的学习生活中，各位老师给予了我许多指导和鼓励，使我积累了一笔可观的知识财富，其定将成为我今后人生道路的基石！

感谢郭唐仪博士、钟绍鹏博士、张兵博士、李爽博士等师兄师姐，以及易富君、潘大为、钱人杰、贺娟等师弟师妹，在平时的学习和项目实践中，他们给了我很多启发和帮助！

感谢周媛、于莉娟、刘会斌、殷秋敏、茅欢元、刘志明，和他们在一起共同学习生活的日子充满了欢乐和感动，它将成为我人生中一段美好的回忆！

感谢我的父母，他们一直默默地给予我鼓励和支持，为我的学习和生活提供了坚实的后盾和强大的精神支持。

最后，感谢所有帮助过我、关心过我、期待过我的亲人、老师、朋友和同学。

张文洁

2008年2月

于东南大学交通学院

参考文献

- [1] 张伟. 都市圈的概念、特征及其规划探讨[J]. 城市规划, 2003, 27(6): 47-50.
- [2] Gottman J. Megalopolis, or the Urbanization of the Northeastern Seaboard. *Economic Geography*, 1957, 33(7): 189-200.
- [3] 聂伟. 都市圈道路网络优化及其评价理论研究[D]. 北京, 北京交通大学学位论文, 2007.
- [4] 刘加顺. 都市圈形成机理及协调发展研究[D]. 武汉, 武汉理工大学学位论文. 2005.
- [5] 沈志云, 邓学钧. 交通运输工程学(第二版)[M]. 人民交通出版社, 2003.
- [6] 杜有进. 区域交通网络分析方法研究[D]. 成都, 西南交通大学学位论文, 2006.
- [7] 周天勇. 效率与供给经济学[M]. 经济科学出版社, 1997.
- [8] 俞礼军, 靳文舟. 交通效率的度量方法研究[J]. 公路, 2006, 10(10): 102-106.
- [9] 王伟. 道路交通工程系统分析方法[M]. 人民交通出版社, 2004.
- [10] 陆化普. 交通规划理论与方法[M]. 清华大学出版社, 1998.
- [11] 杨浩, 张秀媛, 赵鹏. 综合运输与区域经济[M]. 中国铁道出版社, 1995.
- [12] Wheeler D C. O' Kelly M E. Network topology and city accessibility of the commercial Internet. *Professional Geographer*, 1999, 51(3): 327-339.
- [13] O' Kelly M E. Grubestic T H. Backbone topology, access and the commercial Internet, 1997-2000. *Environment and Planning B*, 2002, 29(4): 533-552.
- [14] 秦进, 史峰. 一种新的交通网络效率衡量方法及其应用[J]. 系统工程, 2008, 26(4): 94-98.
- [15] 黄海军. 城市交通网络平衡分析理论与实践[M]. 人民交通出版社, 1994.
- [16] Latora. Is the Boston subway a small world network[J]. *Physical A*, 2002, 314: 109-113.
- [17] Latora. How the science of complex networks can help developing strategies against terrorism[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2004, 20(1): 69-75.
- [18] 牛风瑞, 盛广耀. 三大都市密集区: 中国现代化的引擎[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2006.
- [19] 谢文莉. 城市群公路交通网络结构分析[D]. 成都, 西南交通大学学位论文, 2005.
- [20] 唐富藏. 运输经济学[M]. 华泰书局, 1986
- [21] 周伟. 旅客时间价值[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(3): 110-116.
- [22] 姚国庆. 安全成本与安全工作经济优化[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 331-335.
- [23] 姚国庆. 论安全成本与安全成本核算[J]. 山东社会科学, 2001, 3(3): 87-89.
- [24] 马红伟, 陆刚. 安全成本及安全成本分析指标的确定[J]. 徐州建筑职业技术学院学报, 2004, 4(1): 39-42.
- [25] 郭秀珍. 关于安全成本控制的初探[J]. 建筑安全, 2003. (5): 15-17.
- [26] 李爽. 安全成本优化及其在铁路运输企业的应用研究[D]. 北京, 北京交通大学硕士学位论文, 2007.
- [27] 赵超. 安全成本分析[J]. 安全文化, 2004, 5: 7-8.
- [28] 张力, 李群仁. 几种主要运输方式的外部成本计算分析[J]. 铁道运输与经济, 2000, 1(1): 36-38.
- [29] 陈耀. 三大经济圈的发展特征及前景[J]. 决策咨询, 2003, 9: 17-19.
- [30] 王伟, 过秀成. 交通工程学[M]. 东南大学出版社, 2000.
- [31] 徐吉谦. 交通工程总论[M]. 人民交通出版社, 1991.
- [32] 汪俊三, 金鉴明, 蔡信德. 生态破坏经济损失分析方法[M]. 中国环境科学出版社, 1996.
- [33] 施溯筠, 李光. 长白山区森林固定 CO2 价值的评估[J]. 延边大学学报: 自然科学版, 2002, 28(2).

- [34] 张华君. 公路工程生态破坏的环境经济损失估算[J]. 公路交通技术, 2006, 2(1): 123-126.
- [35] 李锦秀, 廖文根, 陈敏建, 王浩. 我国水污染经济损失估算[J]. 中国水利, 2003, 21(11): 63-66.
- [36] 阮俊华. 区域环境污染经济损失评价[D]. 杭州, 浙江大学硕士学位论文, 2001.
- [37] 迈里克·费里曼. 环境与资源价值评估——理论与方法[M]. 中国人民大学出版社, 2002.
- [38] 陈毕新, 陈小鸿. 公路建设工程的环境损失估算模式探讨[J]. 交通运输工程与信息学报, 2005, 3(4): 28-32.
- [39] 郝文静. 发电企业环境成本研究[D]. 北京, 华北电力大学硕士学位论文, 2006.
- [40] 侯秀瑞, 许云龙, 毕绪岱. 河北省山地森林保土生态效益计量研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18(1).
- [41] 李群仁, 曾会欣, 张力. 京沪走廊各种运输方式的社会成本[J]. 中国铁路, (6): 6-9.
- [42] 张翊. 城市交通网络环境影响评价研究[D]. 长沙, 湖南大学硕士学位论文, 2006.
- [43] 吕正昱, 季令. 交通运输外部成本问题研究[J]. 同济大学学报, 2005, 33(7): 931-936.
- [44] 毛敏. 城市化进程中区域客运走廊的发展研究[D]. 成都, 西南交通大学学位论文, 2005.
- [45] 陈洁, 陆峰, 程昌秀. 可达性度量方法及应用研究进展评述[J]. 地理科学进展, 2007, 26(5): 100-110.
- [46] Pooler, James A. The use of spatial separation in the measurement of transportation accessibility[J]. Transportation Research Part A, 1995, 29(6): 421-427.
- [47] 聂伟, 邵春福. 区域交通可达性测算方法分析[J]. 交通科技与经济, 2008, 10(4): 85-87.
- [48] 吴威, 曹有挥, 曹卫东, 梁双波. 开放条件下长江三角洲区域的综合交通可达性空间格局[J]. 地理研究, 2007, 26(2): 391-402.
- [49] 刘海旭, 卜雷, 蒲云. 随机路网的行程时间可靠性[J]. 土木工程学报, 2004, 37(8): 102-105.
- [50] Iida. Basic concepts and future directions of road network reliability analysis[J]. Journal of Advanced Transportation, 1999, 33.
- [51] 刘凌. 武汉城市圈道路运输一体化评价体系研究[D]. 武汉理工大学学位论文, 2007.
- [52] 李建. 区域交通运输网络综合分析评价研究及实践[D]. 南昌, 江西师范大学学位论文, 2006.
- [53] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门大学博士学位论文, 2000.

攻读硕士学位期间所参加项目及发表论文

一、参加项目情况

- [1] 国家高技术研究发展计划（863 计划）课题：经济圈交通网络结构优化技术。主要参加人员。2008.1~2009.1。
- [2] 银川市城区公共交通规划。主要参加人员。2007.9~2008.10。
- [3] 石嘴山市公共交通系统规划。主要参加人员。2006.9~2006.12。
- [4] 广州市城市交通改善实施方案研究项目监理。一般参加人员。2007.10~2009.1。
- [5] 安庆市龙眠山路与集贤北路道路交通工程设计方案。一般参加人员。2007.11~2007.12。

二、发表论文情况

- [1] 经济圈交通网络效率特性分析。《2008 东南大学校庆研究生学术报告会》。080366。第一作者。
- [2] 基于蚁群算法的动态路径选择问题。《交通科技与经济》2009, 11(1): 51-53。第一作者。