

100



学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权北京交通大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，提供阅览服务，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

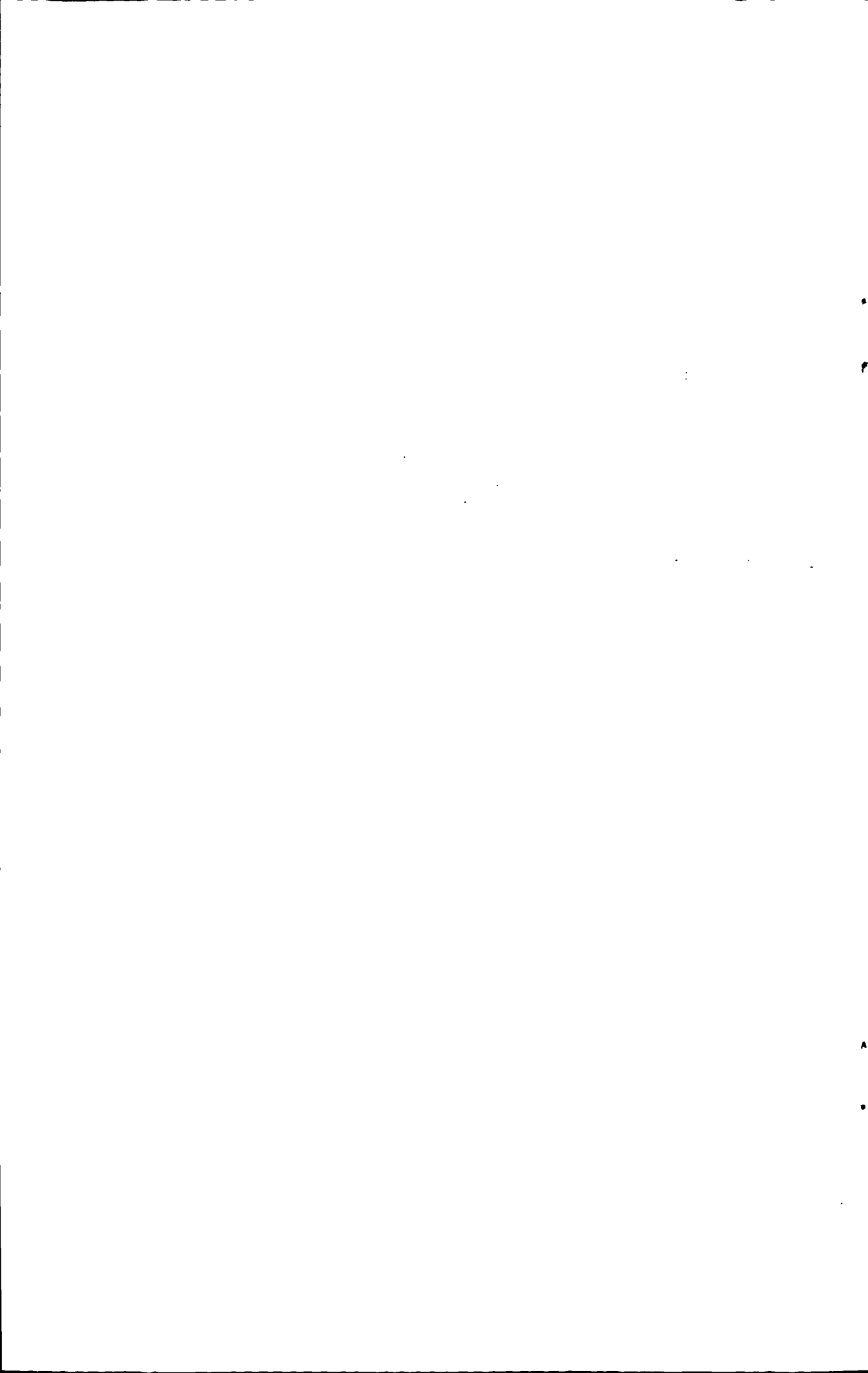
(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：赵金方

导师签名：

签字日期：2010年6月24日

签字日期：2010年6月24日



中图分类号: U268.3
UDC: 623

学校代码: 10004
密级: 公开

北京交通大学

硕士学位论文

动车组零部件预防性维修周期决策模型的研究

The Study of EMU Components Preventive Maintenance Period
Decision Model

作者姓名: 赵金方

学 号: 08121962

导师姓名: 宋永增

职 称: 副教授

学位类别: 工学

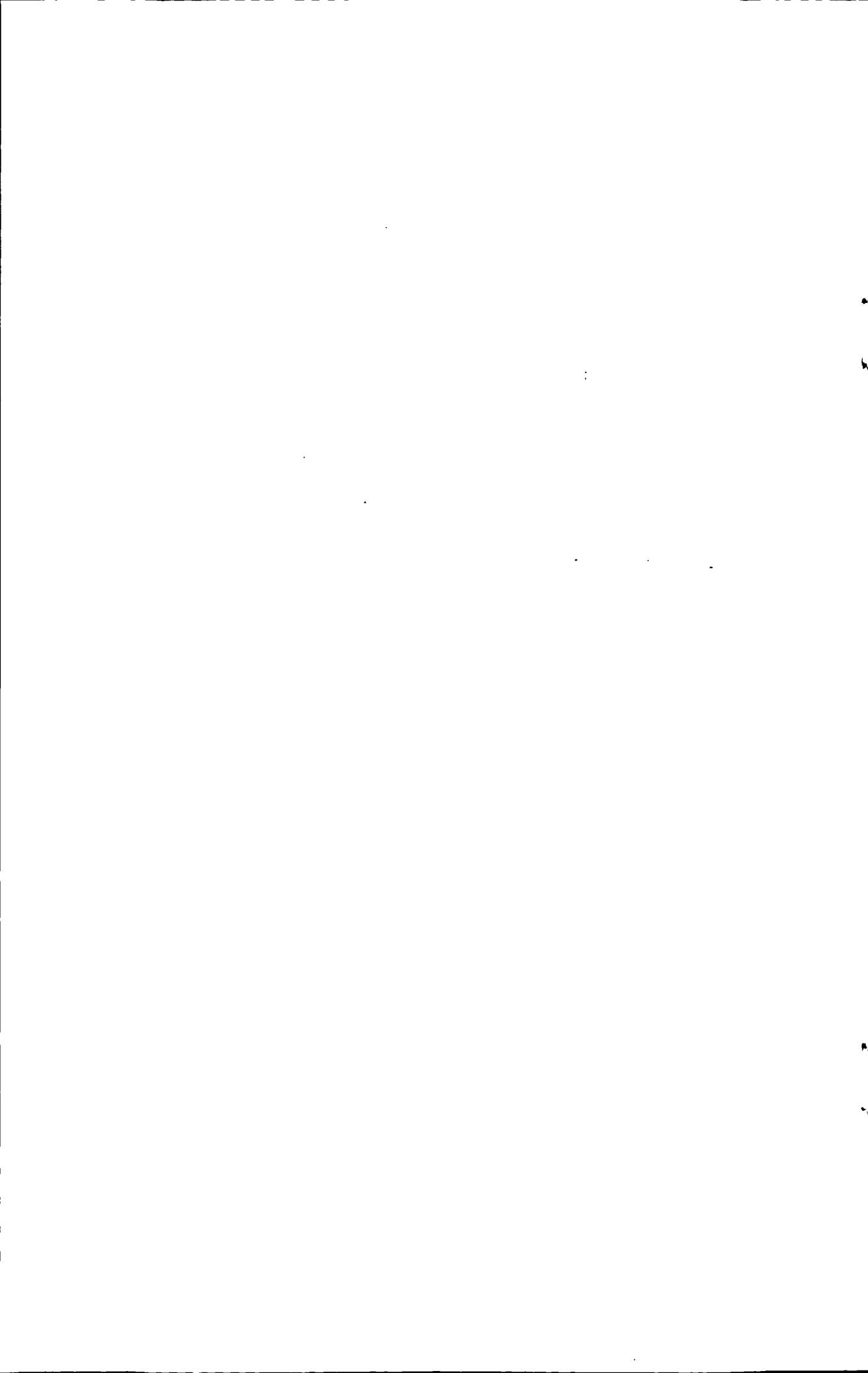
学位级别: 硕士

学科专业: 载运工具运用工程

研究方向: 载运工具安全与
检测控制技术

北京交通大学

2010年6月



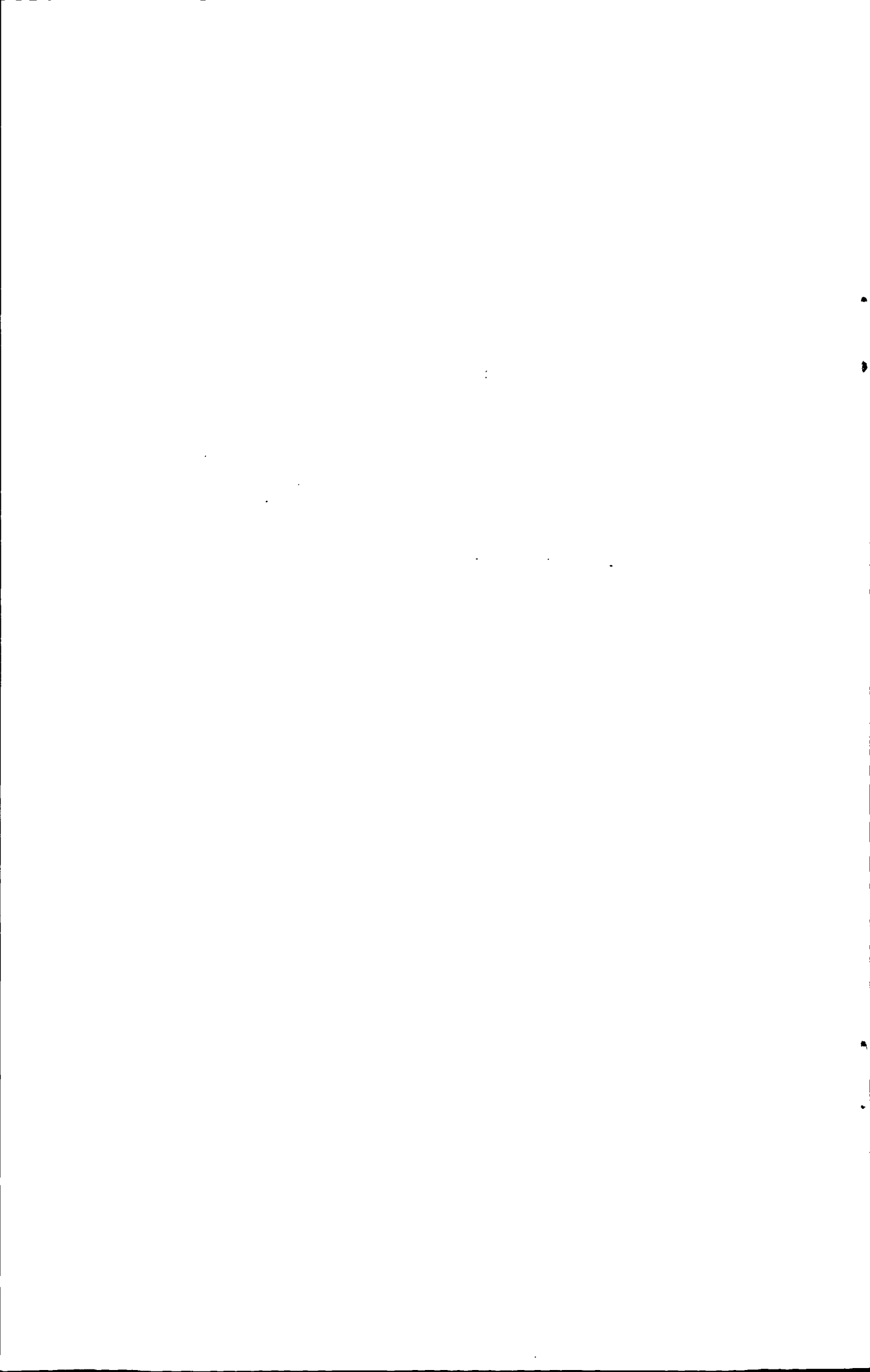
致谢

本论文从选题、研究方向制定、研究内容到论文撰写和定稿的整个过程都是在导师宋永增副教授的悉心指导下完成的。宋老师严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，深深地感染和激励着我，让我终生受益。在两年的研究生学习中，宋老师不仅在学业上给我会心指导，同时还在思想、生活上给我无微不至的关怀，在此向他表示最真挚的感谢和崇高的敬意！

另外还要特别感谢丘成老师和齐红元老师对我在 Matlab 编程方面的指导；同时也非常感谢远在德国深造的王灵芝师姐，能在百忙之中审阅我的论文并提出宝贵意见。

在论文撰写期间，王雅楠、李喜娟、郭晓倩、左顺宏、徐国祥、沈志勇以及北京理工大学的成刚、赵涛等同学对我论文的研究工作给予了热情的帮助和支持，在此向他们表达我最真挚的谢意。

同时，感谢多年来一直支持和关怀我的父母和哥哥、弟弟，你们的爱是我前进的最强动力，你们的理解和支持使我能够在学校安心学习，完成学业。



中文摘要

摘要：客运高速化是当今世界铁路共同发展趋势。动车组的维修是高速铁路系统综合保障工程中重要组成部分，是实现动车组安全运行、高效运营的必要保障。随着动车组技术的不断更新，现行动车组的维修体制已经不能满足我国铁路运输发展的需要，修制改革迫在眉睫。在国产动车组逐步走出国门之际，建立具有中国特色的维修体制意义深远。

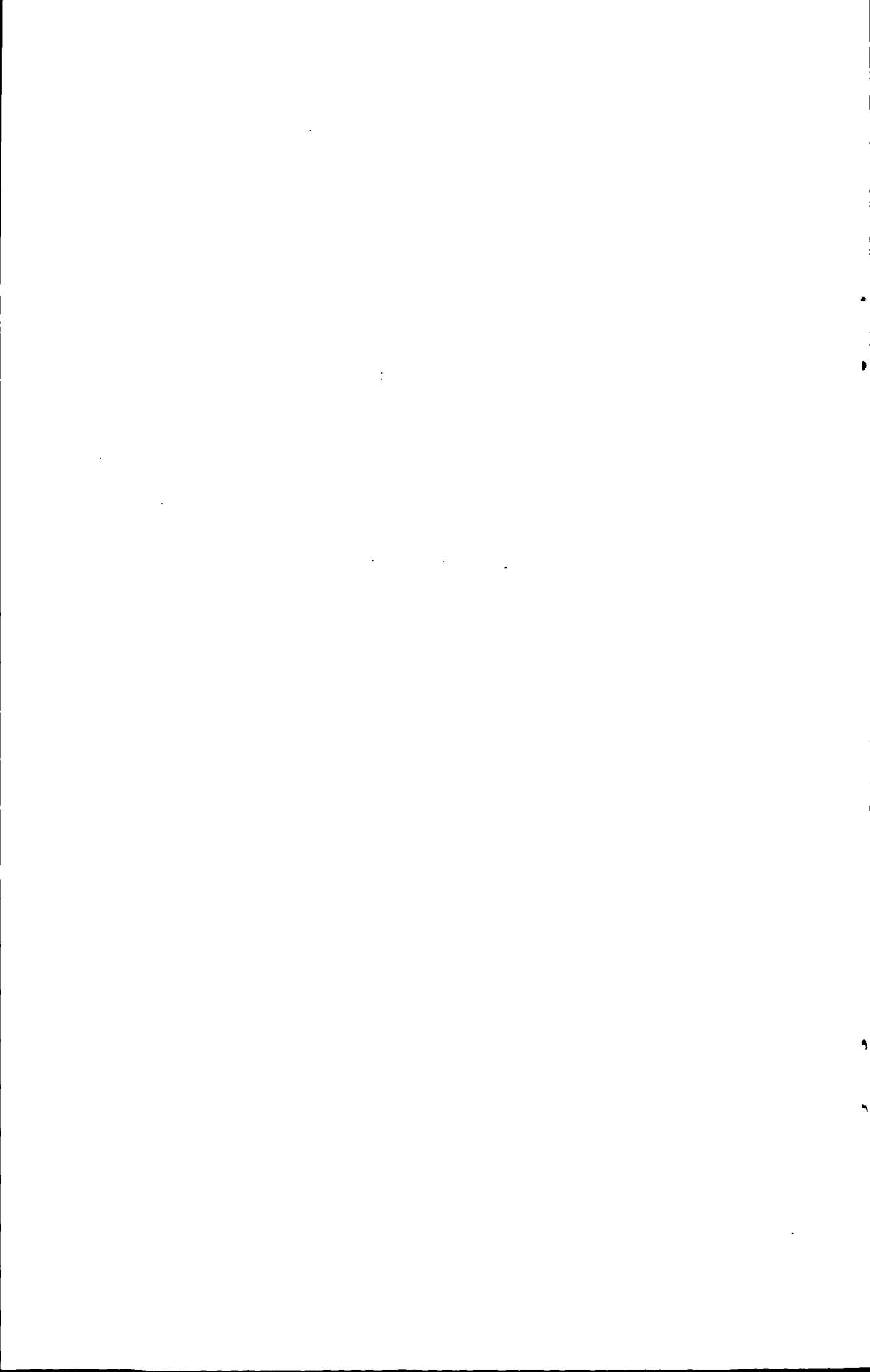
本文主要对动车组复杂零部件的维修方式、维修周期进行了研究，得到了一套不同维修方式下的动车组零部件维修周期的优化模型，并开发了动车组维修周期决策支持系统对该方案进行了实现，最终确立了不同零部件的优化维修周期。

文章以可靠性工程为基础，根据动车组复杂设备故障多样性特点，利用危害性分析中的重要度评估方法和蒙特卡罗方法为重要度不同的零部件确立了合适的维修方式。在此基础上，论文提出了“以可靠性为中心”的费用最小的状态维修周期优化模型和可用度约束下的费用最小的计划维修周期优化模型，并通过Matlab、Access、LabVIEW以及Excel混合编程，构建了维修周期决策系统，实现了维修周期的优化。

论文渐进式地阐述了维修方式、分布模型、优化模型和决策系统的确立过程，并通过实例分析验证了模型的正确性，在一定程度上降低了动车组维修的费用，也为维修决策者提供了一定帮助。

关键词：动车组；维修周期；可靠性；可用度；决策支持系统

分类号：U268.3



ABSTRACT

ABSTRACT: The passenger high-speed orientation is now becoming the common direction of railway technology development all over the world. The maintenance of EMU is the important part of comprehensive guarantee engineering in high-speed rail system, and maintenance is the basic premise to ensure EMU safety and high-efficiency. With the EMU technology perpetual renewal, existing maintenance system of EMU couldn't meet the needs of railway transportation in China, so that reform must be put in practice. At the time of EMU made by China steps toward abroad increasingly, it is far-meaning to build Chinese characteristic maintenance theory.

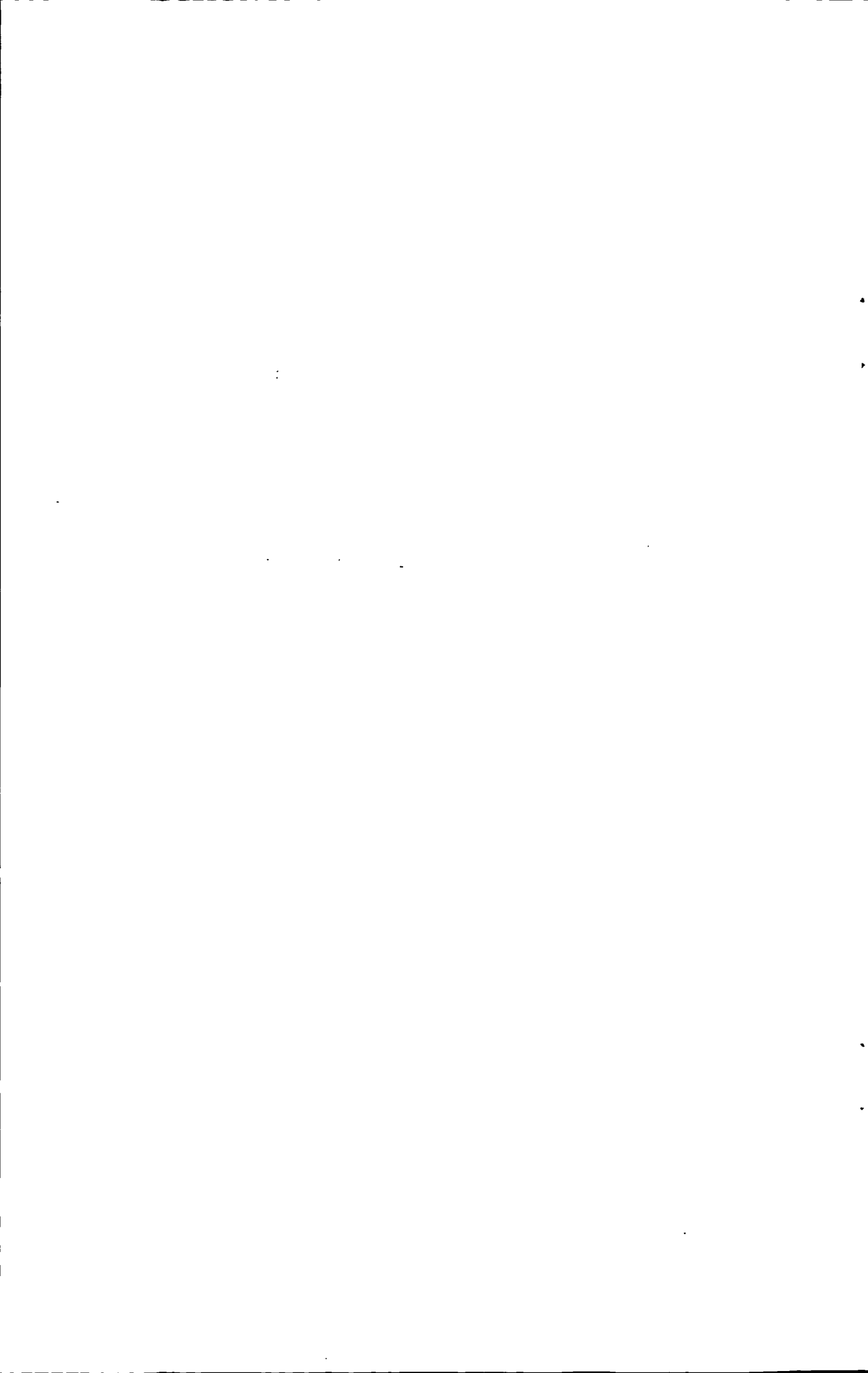
This article is studied on the maintenance mode of complex components and maintenance period of EMU, got a suit of EMU maintenance period optimization models under different maintenance modes, developed the EMU Maintenance Period Decision Support System to realize optimization scheme, and ultimately achieves the best maintenance period of different components.

Article based on the reliability engineering, according to failure variety of EMU equipment, makes use of significance evaluation and Monte Carlo method of CA to decide the suit maintenance mode. On that base, the article brings forward the least fee model of condition maintenance period under "Reliability Centered" and the least fee of plan maintenance period under the restrict of availability. Besides, article builds Maintenance Period Maintenance Period Decision Support System to realize optimization scheme by mix-program of Matlab、Access、LabVIEW and Excel.

The article states the process of building the suit maintenance mode、distributing model、optimization model and decision support system, and validates all over models, which is useful to supporters.

KEYWORDS: EMU; Maintenance period; Reliability; Availability; Decision Support System

CLASSNO: U268.3

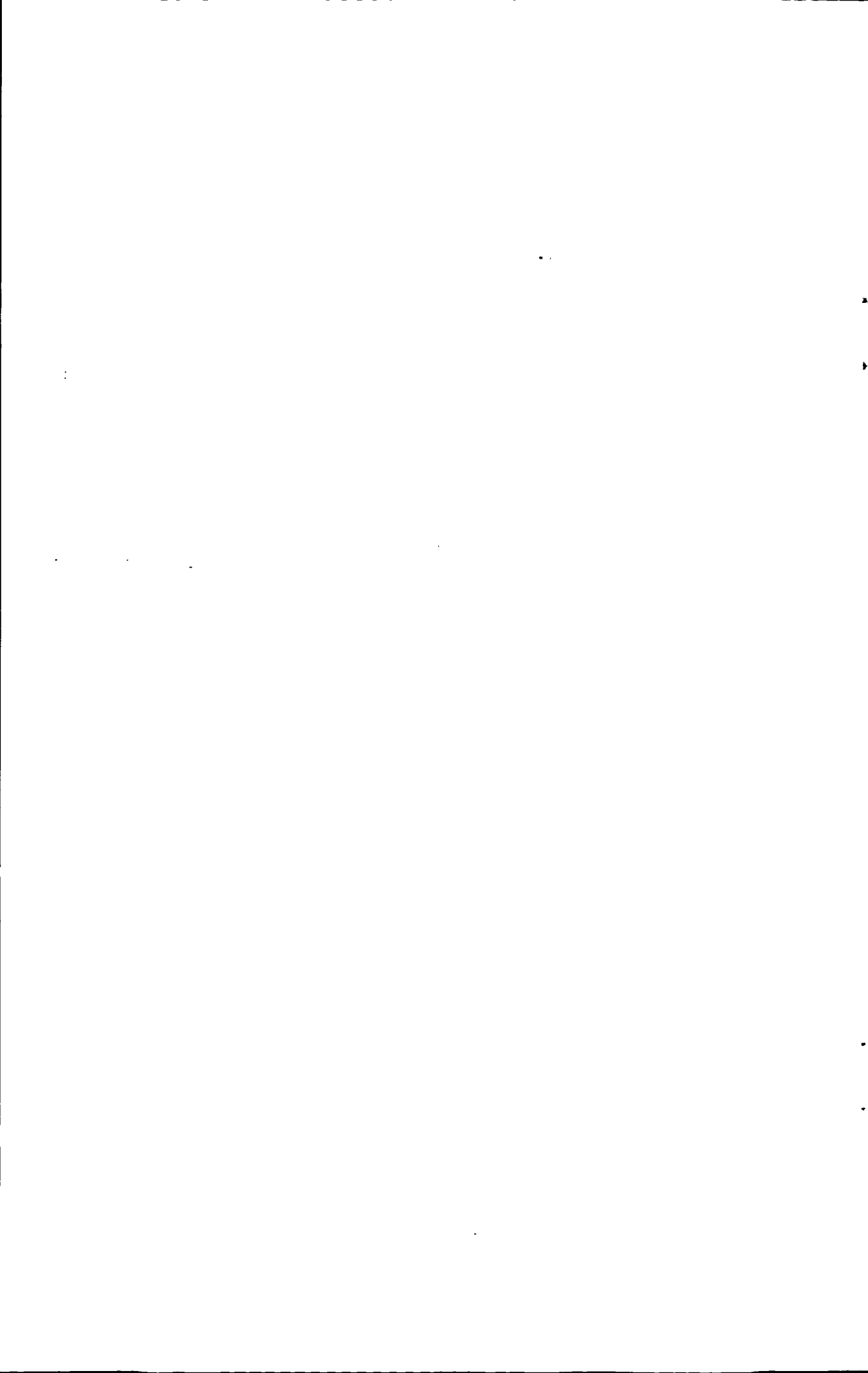


目录

中文摘要	iii
ABSTRACT	v
1 绪论	1
1.1 国内外动车组维修的研究	1
1.1.1 动车组维修理论的发展	1
1.1.2 国外动车组维修现状及发展趋势	2
1.1.3 我国机车车辆维修现状	3
1.1.4 我国动车组维修存在的问题	3
1.2 论文研究内容及意义	4
1.2.1 研究内容	4
1.2.2 研究意义	5
1.3 论文研究的结构框架	6
2 动车组复杂设备重要功能单元及其维修方式	9
2.1 概述	9
2.2 复杂设备重要功能单元	9
2.2.1 复杂设备的结构特点	9
2.2.2 复杂设备重要功能单元的确立原则	10
2.3 重要功能单元维修方式的确立	10
2.4 动车组重要功能单元及维修方式的确定	13
2.5 本章小结	15
3 动车组零部件的可靠性分布模型	17
3.1 概述	17
3.2 可靠性相关理论	17
3.2.1 可靠性定义	17
3.2.2 可靠性指标	18
3.3 可靠性数据的收集、分析与处理	18
3.3.1 可靠性数据的收集	18
3.3.2 传统可靠性数据的分析与处理方法	20
3.4 可靠性分布模型的确立	20
3.4.1 可靠性常用分布模型	20
3.4.2 动车组零部件分布模型的选定	22

3.4.3	动车组零部件分析与应用.....	24
3.5	本章小结.....	27
4	动车组零部件维修周期的优化模型.....	29
4.1	概述.....	29
4.2	状态维修零部件的周期决策模型.....	29
4.2.1	零部件状态维修周期模型假设.....	29
4.2.2	单部件分布函数及维修周期模型.....	30
4.2.3	零部件成组维修周期模型 ^[7]	33
4.2.4	状态维修零部件周期经济性优化 ^[7]	34
4.3	计划维修零部件的周期决策模型.....	35
4.3.1	计划维修中故障类型多样性分析.....	35
4.3.2	原有计划维修周期模型缺陷.....	36
4.3.3	可用度约束下经济性最优的周期模型 ^[9]	37
4.4	动车组零件分析与应用.....	40
4.4.1	零件状态维修周期优化.....	41
4.4.2	零件计划维修周期优化.....	41
4.5	本章小结.....	42
5	动车组零部件维修周期决策支持系统的设计.....	43
5.1	概述.....	43
5.2	决策支持系统.....	43
5.2.1	决策支持系统的概念.....	44
5.2.2	决策支持系统的结构.....	44
5.3	数据库的建立.....	46
5.3.1	表及表关系的建立.....	47
5.3.2	窗体的建立.....	48
5.3.3	查询的建立.....	50
5.4	系统的开发.....	51
5.4.1	系统的总体框架.....	51
5.4.2	LabVIEW 和 Access 的接口.....	51
5.4.3	LabVIEW 和 Matlab 的接口.....	54
5.4.4	LabVIEW 和 Excel 的接口.....	56
5.5	决策支持系统的实现.....	57
5.5.1	数据输入模块.....	57
5.5.2	故障记录查询模块.....	58

5.5.3 故障维修费用查询模块	59
5.5.4 零件维修周期优化模块	59
5.6 动车组零部件分析与应用	60
5.6.1 零件状态维修周期优化	60
5.6.2 零件计划维修周期优化	62
5.7 本章小结	64
6 结论与展望	65
参考文献	67
附录 A	69
附录 B	71
附录 C	73
作者简介	75
独创性声明	77
学位论文数据集	79



1 绪论

1.1 国内外动车组维修的研究

1.1.1 动车组维修理论的发展

维修实践需要一种思想观念作为指导，称之为维修思想^[1]。在一定的维修思想指导下，制定出一套维修计划、维修方式、维修等级。维修思想是维修制度的主轴线，不同阶段的维修思想决定了一定时期的维修制度，维修思想的演化过程具体如图 1-1 所示。

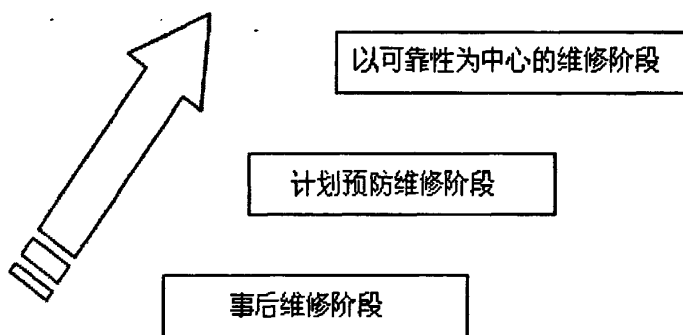


图 1-1 维修理论的发展

Fig. 1-1 Development of Maintenance Theory

可靠性技术是一门年轻的学科，我国引进可靠性技术只有 20 多年的历史。目前，大家公认的可靠性定义是：“产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力”（见 GB3187-1982）^[2]。

参考文献[1]中，所谓“以可靠性为中心”的维修思想是在可靠性理论的基础上建立起来的状态修方式的扩展。这种思想认为，零部件的可靠性是由设计制造决定的，维修的目的是控制、削弱或消除影响可靠性下降的各种因素，以保证和恢复固有的可靠性。

实践证明并不是维修越勤，修理范围越大就能减少事故，相反会因频繁拆卸而出现更多的故障^[3]。“计划预防维修制”多用于高速列车维修的宏观管理，如制定修理周期结构、进行维修组织等；而“以可靠性为中心”的维修制度较合适于高速列车维修的微观管理，如制定维修方式、实施质量控制、在各级修程中根据视情或技术状态进行单元部件的更换修理等。

1.1.2 国外动车组维修现状及发展趋势

目前世界上高速列车维修思想和制度大致分为两大体系^[4]：(1)是在“预防为主”维修思想指导下，以磨损理论为基准的计划预防维修制度；(2)是以“可靠性为中心”的维修思想指导下，以故障统计理论为基准的预防维修制度。

在动车组维修领域内，目前仍然是计划预防修的大框架，整车或大部件定时或运行里程进行不同等级的维修。

随着世界经济一体化浪潮的到来和各国经济的迅速发展，高速铁路运输安全性越来越受到各国政府的重视，维修工作是铁路安全性的重要保证，高速铁路的维修也随着科技的发展孕育着新的发展趋势^[5]：

(1) 高速列车维修中大量采用新技术设备

德国 Hamburg 动车组之所以能在 60min 内完成长 412m 的 ICE 动车组的维修保养和整备工作，正是由于它采用了大量的新技术，这些技术包括：车载微机诊断系统；自动监测轮对踏面裂纹、磨损和不圆度的踏面诊断设备；微机信息系统等。

(2) 用系统工程观点进行维修

首先是对高速列车整个寿命期费用进行研究，将总费用保持在最经济的状态；其次是把技术、财物、管理等诸方面的因素综合起来进行全面管理；另外，利用系统工程理论对高速列车的可靠性、维修性和可用性进行研究，对高速列车的各个环节进行综合分析；最后进行信息反馈，运用维修中的信息反馈部门，以便改进设计。

(3) 在设计阶段对维修作综合考虑

法国 TGV 高速列车设计制造部门非常重视高速列车的可靠性设计和维修性设计。由于采用了可靠性设计与维修设计，保证了列车的质量，再加上有维修基地的良好维修作保证，使得 TGV 高速列车达到了非常好的效果^[6]。

(4) 采用灵活性维修，增加了维修的机动性。将计划维修措施分解为许多小组成部分，即“最小工作包”，完成这些工作包花费较短的时间。不同的维修等级由不同的工作包组合，彼此相互衔接，从而增加了维修的灵活性。这样就能够充分利用库停时间完成各项修程，从而减少由于维修造成的停运，使动车组的利用率大大提高。

(5) 各国铁路实行动车组修制改革，使动车的维修向更高的维修制度阶段发展，各国铁路根据本国铁路的具体情况，不乏有先进维修模式，例如近年来发展起来的“以可靠性为中心维修 (RCM) / 寿命周期费用 (LCC)”的维修模式，以可靠性和寿命周期费用为目标来安排动车组的维修，从而达到最佳效益的目的^[7]。

1.1.3 我国机车车辆维修现状

几十年来，我们对机车车辆采用的是“以预防为主”的维修思想，建立的是以磨损理论为基础的设计预防维修制度，如图 1-2 所示。

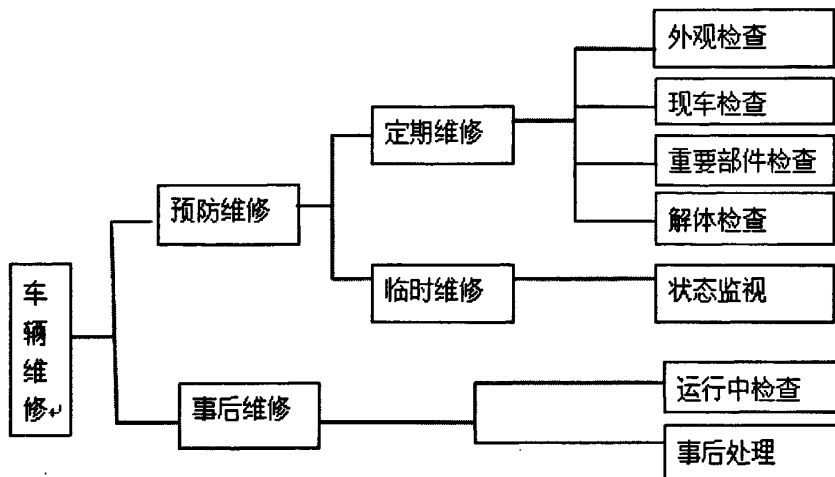


图 1-2 我国机车车辆维修框架

Fig.1-2 Block of Train Maintenance in China

上个世纪 50 年代，我国引进的前苏联计划预防维修制度并实施定期维修的方式，实质上是一种强制性的预防维修。经过实践统计研究，动车组很多故障属于磨损以外的故障，即早期故障和偶然故障，因此定期维修时机难以确定^[8]。近年来，我国“在计划预防维修的前提下，逐步实施状态修、换件修和主要零部件的专业化集中维修”。该政策提出的计划预防维修属于预防性维修，是符合先进维修理论思想的，也是适应我国铁路维修现状的^[9]。

1.1.4 我国动车组维修存在的问题

虽然铁道部已经针对即将开行的国产高速动车组拟定了修程修制方案，但是，作为我国首次制定的方案，它基本上是国外原型动车组修程修制的简单综合，其中没有考虑我国动车组的实际运行条件，方案中存在着诸多需要补充、改进和完善之处。自 2007 年 4 月 18 日铁路实施提速战略以来，高速列车虽然未发生重大行车安全事故和责任晚点，但在日常检修中仍然发现不少故障，下面是 2007 年 4 月 18 日至 7 月 18 日三个地运用故障进行了统计分析。

2007 年 4 月 18 日至 7 月 18 日，CRH2-013A 和 CRH2-032A 动车组共发生运用故障 917 件，具体分布部位见表 1-1^[10]。

表 1-1 CRH2 故障分布部位统计

Table1-1 Statistic of CRH2 Failure Distributing Position

序号	故障部位	故障件数 (件)	比例
1	牵引传动系统	217	23.7%
2	车内设施	207	22.6%
3	转向架	169	18.4%
4	空调系统	87	9.5%
5	给水卫生系统	69	7.5%
6	制动系统	40	4.4%
7	司机室	34	3.7%

由以上的故障分布统计也引出了我国动车组维修中的一些问题, 总体表现在以下几个方面:

(1) 维修方式决策不当导致维修任务量增加

对各类零部件的可靠性、维修性、监测性及经济性因素的分析不全面直接导致维修方式决策不当。大多还是沿用前苏联基于纯磨损机理确定的维修机制, 该修制只适用于磨损程度仅取决于运用时间的机车部件, 如服从指数分布的电子元件的故障率为常数, 是不随时间发生变化的, 不适合采用计划性维修。因此, 出现了维修方式决策不合理, 维修工作量大却成效不大的现象^[11]。

(2) 预防性维修中对零部件维修不均衡^[12]

目前在复杂设备的维修决策过程中, 欠缺对设备各部件的相关故障分析, 导致可靠性分析时寿命分布决策不准确, 不能为进一步的维修决策提供有力的依据, 出现过度维修和欠缺维修同时存在的现象。

(3) 预防性维修中可用度低下且维修费用居高不下

随着维修理论和技术的不断完善, 维修不再只是以恢复或保持设备的规定状态为单一目标, 而应该结合可用度、费用、维修性等因素进行综合权衡。目前复杂设备计划性维修决策研究中, 大多是以可用度最大或费用最低为目标的单方面要求进行分析 and 决策, 欠缺对提高可用度同时降低维修费用的综合考虑。

1.2 论文研究内容及意义

1.2.1 研究内容

由于我国高速铁路起步相对较晚, 因此在高速动车组运用与维修方面面临着

先期经验严重匮乏的客观现实。我国铁路机车维修的主要技术政策是“在计划预防维修的前提下,逐步实施状态修、换件修和主要零部件的专业集中修”。该政策提出的计划修属于预防性维修,是符合先进维修理论思想的,也是符合我国铁路维修现状的。但对于机车故障、维修和费用信息进行统计后发现,由于一味地墨守先前历史经验或者照搬国外经验,缺少可靠性分析与维修决策的系统理论和方法指导,我国动车组维修还存在大量需要改进和完善的地方。

本文主要对基于信息化条件下动车组“以可靠性为中心”维修思想下的维修周期优化问题进行研究,从维修方式选择、故障分布模型确定、维修周期决策三个环节提出更加具有精确性和实用性的预防性维修周期优化模型和方法,利用 Matlab、Access、LabVIEW以及Excel混合编程,构建维修周期决策系统实现模型的优化,为不同维修方式的零件确立最优的维修周期。

论文研究的目的是在可靠性分析的前提下,大大降低动车组维修的费用,以最终实现动车组零部件维修的可靠性、经济性、有效性三效合一,为动车组维修决策者提供一定的支持。

1.2.2 研究意义

自2007年第6次铁路大面积提速以来,CRH系列动车组已投入运营100多列,最高运营时速达350 km,在京津、京沪、京哈、京广、浙赣、胶济、陇海等干线运行达8000万公里以上。根据铁道部《中长期铁路网规划》,到2020年,全国铁路营业里程达到12万公里以上,铁路将建设“四纵四横”快速客运专线和多个城际快速客运系统,形成快速客运网络^[13]。届时,最高行车速度达200km/h以上动车组的数量将超过千列。如此规模的高速动车组能否安全可靠、高效地运行,是人们极为关注的焦点之一。因此,动车组维修具有更加深远的意义。

合理的维修周期不仅是动车组安全、可靠、高效运行的有利保证,更是动车组运营经济效益的主要来源。本论文对动车组零部件维修周期的研究具有以下几个方面的意义:

(1) 尽量减少动车组维修中存在的过度维修和不足维修,保持动车组复杂设备固有可靠性的检修率,提高设备的使用可靠性;(2) 有效避免故障的发生,减少计划外维修任务量及额外费用,降低动车组设备的检修率;(3) 以最小的资源消耗保持设备的可用度,提高动车组设备的可利用率,延长设备的使用寿命。(4) 加快全路动车组信息系统建设步伐,不断优化完善软件功能,尽早形成操作简单、功能强大、信息兼容、高效可靠的网络系统。

1.3 论文研究的结构框架

本论文的研究囊括了统计学、可靠性、维修工程学以及计算机模拟等多学科理论与技术，从实际出发，遵循理论研究、模型开发与应用验证三者结合的基本原则，研究的主要思路如图 1-3 所示。首先开展复杂设备的维修调研，找准存在的

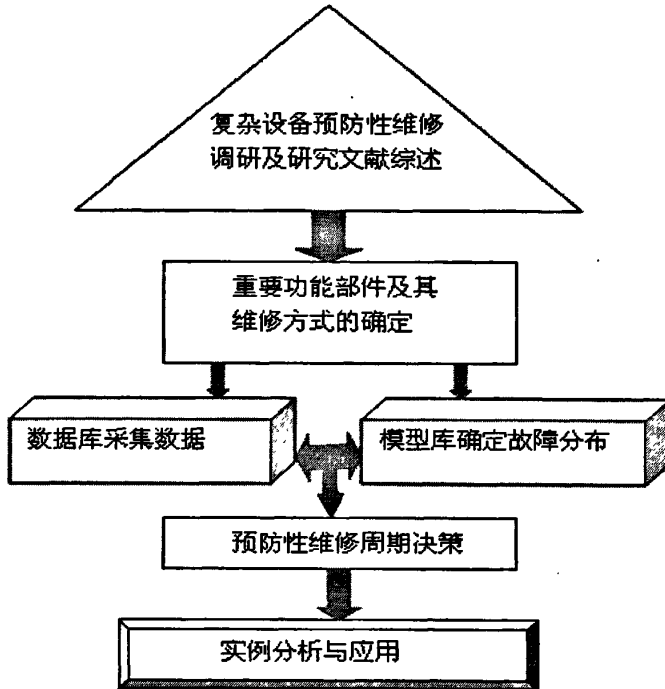


图 1-3 论文的研究思路

Fig.1-3 The Study Line of Paper

问题和原因，确定研究对象和目标；然后在总结和分析已有相关文献的基础上，针对复杂设备零部件的故障特点确定不同零部件的维修方式，进一步利用可靠性和有效性分析确立预防性维修周期优化模型，建立起决策支持系统；最后通过工程实例，验证以上方法、模型和决策支持系统的可行性和适用性。

依据研究思路，论文共分 6 章，主体结构框架如图 1-4 所示。

第 1 章介绍研究背景与意义，针对目前动车组维修中存在一些问题，提出本文的研究对象、目的、方法和思路。

第 2 章主要是确定维修方式，这是复杂设备维修决策的基础性工作。论文针对现有确定重要功能单元及其维修方式的故障模式影响方法的不足，完善设备维修的影响因素指标体系。以动车组零部件为例，对复杂设备的重要功能单元进行故障模式及原因分析，并应用重要度评估模型确定了复杂设备的重要功能单元及其维修方式。

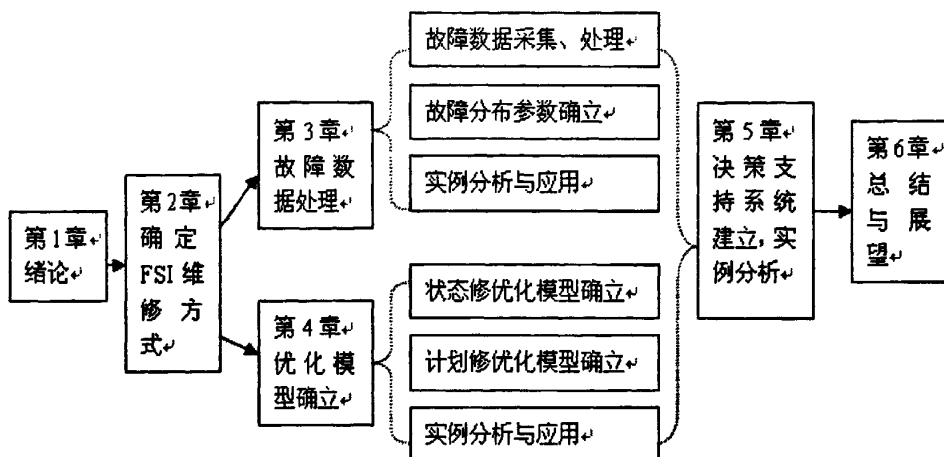


图 1-4 论文结构的主体框架

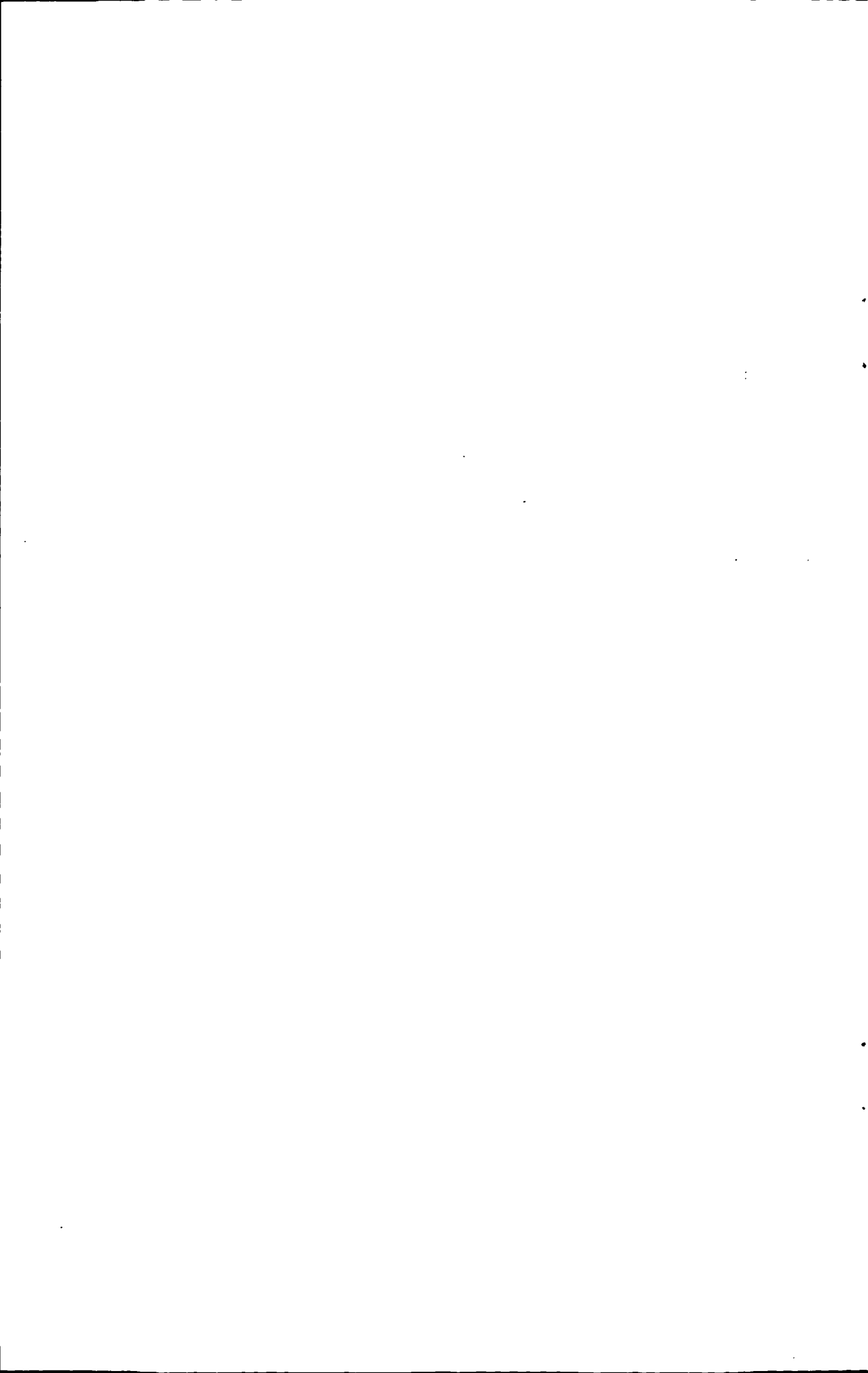
Fig.1-4 The Main Block of Paper

第 3 章的研究内容是根据故障数据的分析原则，利用 Weibull++7 的优先级分析，准确确立了各零部件的最优分布函数及参数值。

第 4 章主要基于故障维修和可靠性相关理论，针对不同的维修方式提出“以可靠性为中心”的费用最小的状态维修周期优化模型和可用度约束下的费用最小的计划维修周期优化模型，并通过工程实例验证模型的正确性。

第 5 章主要在 3、4 章的基础上，运用 Matlab、LabView、Access 和 Excel 混合编程，构建动车组维修周期决策支持系统。第 5 章针对第 2 章维修方式的确立、第 3 章分布模型的确立和第 4 章周期优化模型的确立，从可靠性、经济性、可用度实现了动车组维修周期的优化，并通过维修周期决策支持系统将最终的优化结果反馈到人机交互界面上，方便用户存储、浏览。

第 6 章对全文进行总结，阐述论文的主要结论、创新点即以本领域有待进一步深究的方向和内容。



2 动车组复杂设备重要功能单元及其维修方式

2.1 概述

复杂设备正常工作是动车组安全行车的基本保证。每个复杂系统都是由大量零部件组成，各个零部件因功能不同在设备中所起的作用也不同。重要功能单元（Functionally Signification Item, FSI）^[9]是指对设备正常工作有直接影响的零件，一旦 FSI 发生故障，设备的安全性和经济性将面临着严重的威胁。因此，确定 FSI 及其维修方式是保证系统安全必不可少的一项工作。

2.2 复杂设备重要功能单元

2.2.1 复杂设备的结构特点

2.2.1.1 零件组成的复杂性

动车组是一个庞大的机械系统，由成千上万个零件组成。每一个部分又包含着若干个子系统、功能单元，例如机械、液压、气动、电力、电子及机电组成等。零部件在设备中功能各异，对系统的影响也不尽相同。零件的复杂多样性，增加了维修工作的任务量，“一视同仁”地进行维修工作既是不现实的，也不利于维修的经济性。

2.2.1.2 零件故障的复杂性

在设备使用过程中，零部件在所难免地会发生故障。零件故障与零件的设计、制造、材料、使用和存储等一系列因素密切相关，因此同一设备中的不同零部件的故障模式千差万别，比较常见的类型有：磨损、表面损伤、腐蚀、变形、尺寸超差、裂纹、断裂、加工缺陷和电损伤等。对于不同的故障机理，只有因地制宜、对症下药才能起到事半功倍的效果。如果只用磨损来涵盖所有的故障机理而制定维修计划，制度本身就存在缺陷。因此，复杂设备中更需要分阶段、分等级的维修制度。

2.2.1.3 零件故障寿命分布的复杂性

自上个世纪 50 年代我国引进前苏联的计划预防维修制度，普遍认为所有的设备故障率都符合“浴盆曲线”。随着维修理论不断发展，发现除典型“浴盆曲线”外还存在另外五种故障率曲线^[14]，具体如图 2-1 所示。类型 A 是典型的浴盆曲线；

类型 B 是典型的由老化引起故障率升高的情况；类型 C 是在整个使用寿命周期中故障率不断升高；类型 D 是故障率首先升高，然后保持不变；类型 E 是故障率保持不变；类型 F 是早期故障率降低到一定值则保持不变^[8]。现在实行的以“磨损理论”为基础制定的预防维修制度主要针对于 A、B 两种模式。随着客运高速化、模块化、自动化的发展，复杂设备中 D、E、F 零件越来越多，因而传统的基于“浴盆曲线”制定的“一视同仁”的计划性维修已经不能满足复杂设备对维修的要求。

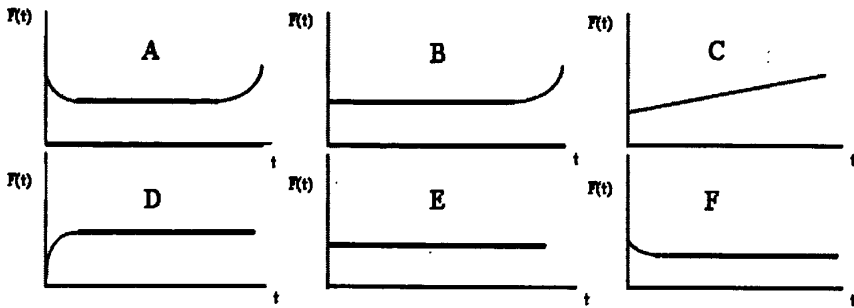


图 2-1 复杂设备的故障分布曲线

Fig.2-1 Fault Ratio Curve of Complex DeVices

2.2.2 复杂设备重要功能单元的确立原则

由于复杂设备中零件对设备影响不同，“一视同仁”地对零部件进行维修也不利于维修的经济性和可行性。因此，确定复杂设备的重要功能单元（Functionally Significant Item, FSI）是进行维修决策的一项基础工作。

首先按设备组成的复杂程度分系统、部件和零件依次列出其所有单元，形成层次清晰、重要度分明的“结构树”；然后把故障显然对装备没有重要后果的单元略去，“去除糟粕，取其精华”，剩余的就是复杂系统的零件骨干。零件略去的原则如下^[9]：

- (1) 它们的功能对设备的功用没有重大影响；
- (2) 它们的故障没有安全性和实用性后果，容易进行修复；
- (3) 根据经验和实际分析可靠性极高的产品。

根据简化的“结构树”，可以缩小研究范围，锁定研究目标，减小分析的工作量。但是简化过程要严谨全面，不可以存在 FSI 遗漏，以免造成设备重要度定位“差之毫厘”，致使后面的研究工作“谬之千里”。

2.3 重要功能单元维修方式的确立

现存的维修方式共有三种：计划维修、状态修和事后维修。三种维修方式并没有先进落后之分，正确地选择维修方式可以有效避免过度维修和失修，提高系统的可用性和经济性。在确定了复杂设备 FSI 的基础上，需要根据各单元的功能、故障模式、故障原因和故障影响对 FSI 进行危害性分析 (CA)，从而为维修方式的确定提供所需信息。

现有的危害性分析方法主要有：风险优先数法、故障模式危害度和产品危害度模型。以上三种方法虽然决策合理，能有效减少计划预防维修造成的设备过剩维修问题和失修等问题，但由于检测设备费用高昂，让很多决策者望而生畏。本文采用加权法建立 CA 重要度模型，为 FSI 维修方式的确立提供支持。通过对设备的全寿命全过程影响设备重要度的因素进行全面分析，得出决定设备各系统、子系统和部件重要度因素，主要包括可靠性、维修性、检测性和经济性因素见表 2-1^[9]。

表 2-1 设备 CA 重要度评估决策因素

Table2-1 Evaluating Decision Factors Significance of DeVlce CA

类别	因素	
可靠性因素	故障率	FR
	故障对人员和环境的影响	S
	故障对系统功能的影响	SF
维修性因素	停机时间	DT
	维修性设计	MD
检测性因素	可检测性	I
经济性因素	维修费用	MC
	停机损失	BL

特别地，本文根据文献[9]从可达性、结构性等方面对维修性设计进行分析，见表 2-2。在各项因素分析中，为了避免设备重要度评估过于复杂又兼顾评估的精确性，设定评分等级为 3~6 个，由专家、专业维修技师和操作人员根据以往的故障记录、维修时间、维修费用等进行评分^[8]。

表 2-2 维修性设计对维修的影响因素

Table2-2 Affecting Factors of Design to Maintenance

因素	类别
可达性	操作空间
	外部结构
	内部结构
结构性	操作程序简单
	操作技术要求
部件特性	标准化
	通用性
	可交换性
维修安全性	机械损害防护
	电子损害防护
	爆炸和毒气防护

根据文献[9]所述,各个决定因素对维修周期决策的结果影响程度不同,因此需要确定各评估因素的影响权重值,用来体现各因素之间的相对重要性,用 $\omega_i(i=FR,S,SF,DT,MD,I,MC,BL)$ 表示各个决定因素的权重大小,其确定是否准确直接影响到重要度的评估。为了准确得到 $\omega_i(i=FR,S,SF,DT,MD,I,MC,BL)$,采用层次分析法^[15-16]。首先,构造判断矩阵 J 。其中,重要性尺度 $r_{ij}(i,j=1,2,3\dots n)$

$$J = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & & & \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix}$$

表示任意两个因素之间的相对重要性,参考值见表 2-3,且 $r_{ij} \cdot r_{ji} = 1, (i, j = 1, 2, 3 \dots n)$ 。

表 2-3 重要性尺度及含义

Table2-3 Scale and Meaning of Importance

重要性尺度 r_{ij}	含义 (否则取倒数)
1	同等重要
3	稍微重要
5	相当重要
7	非常重要
9	绝对重要
2, 4, 6, 8	上述等级之间的情况

对各因素的重要性尺度进行评定之后,构造矩阵 J 的齐次线性方程组,如式(2-1)所示,求出矩阵 J 最大特征根 λ_{max} 对应的 $\omega_i(i=FR,S,SF,DT,MD,I,MC,BL)$ 就是各因素的权重值。然后,根据各因素的权重值对各因素进行优先级排序。

$$\begin{cases} (r_{11} - \lambda)\omega_1 + r_{12}\omega_2 + \dots + r_{1n}\omega_n = 0 \\ r_{21}\omega_1 + (r_{22} - \lambda)\omega_2 + \dots + r_{2n}\omega_n = 0 \\ \dots \\ r_{n1}\omega_1 + r_{n2}\omega_2 + \dots + (r_{nn} - \lambda)\omega_n = 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

同时,需要根据矩阵 J 的随机一致性比率 u_j 判断矩阵 J 的一致性,检验公式如下:

$$u_j = u_N / u_S \quad (2-2)$$

u_S 为矩阵的平均随机一致性指标,取值如表 2-4; u_N 为矩阵的一般一致性指标,且 $u_N = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ 。

表 2-4 3~9 阶判断矩阵的 u_S 值

Table2-4 Value of u_S in 3~9 Step Estimation Matrix

n	3	4	5	6	7	8	9
u_S	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

若 $u_j < 0.1$ 时,则认定判断矩阵具有满意的一致性,说明权重分配是正确的,

否则需要调整判断矩阵，直到符合要求止。

各个决定因素打分和各个决定因素的权重确定的基础上，顺理成章地可以得到各单元的重要度评估指数。本文根据文献[9]利用线性加权求和建立 CA 重要度评估模型，简化计算的同时准确得出 FSI 各单元的 CA 重要度参数 C ：

$$C = s_{FR}\omega_{FR} + s_S\omega_S + s_{SF}\omega_{SF} + s_{DT}\omega_{DT} + s_{MD}\omega_{MD} + s_I\omega_I + s_{MC}\omega_{MC} + s_{BL}\omega_{BL} \quad (2-3)$$

其中， $s_i (i = FR, S, SF, DT, MD, I, MC, BL)$ 是各个决定因素的评分值。

以往，重要度分析主要通过模糊综合评价方法，通过计算各个决定因素的隶属度来评估其权重^{[17][18]}。这类方法计算量巨大，不适用组成单元数量多、结构复杂的复杂设备，而且需要大量的主观数据，从一定程度上造成了计算结果的主观性。论文采用蒙特卡罗方法，利用算随机取大量的数值，既迅速及时地进行大量数据处理，而且还提高了计算结果的客观性。

2.4 动车组重要功能单元及维修方式的确定

以铁路 CRH2-013A 的给水卫生系统的 11 个零部件（表 2-5）为研究对象，进

表 2-5 给水卫生系统故障明细表

Table 2-5 Failure List of Feedwater Sanitation

序号	故障类别	故障数（件）	比例
1	喷嘴故障	22	31.9%
2	电茶壶故障	11	15.9%
3	冲水系统故障	10	14.5%
4	污物槽故障	9	13.0%
5	饮水机故障	7	10.1%
6	洗脸台故障	4	5.8%
7	坐便器盖故障	2	2.9%
8	水龙头故障	1	1.4%
9	蜂鸣器故障	1	1.4%
10	密封圈脱落	1	1.4%
11	干手器喷水	1	1.4%
	小计	69	100%

行重要度评估。根据各部件的运行、维修历史记录和相关可靠性数据，由专家、维修技术人员和操作人员对需要评估的部件的评价因素以及各因素的重要性尺度进行打分，得到各因素权重的判断矩阵，矩阵中各值依次对应 FR, S, SF, DT, MD, I, MC 和 BL 各因素之间的相对重要性，然后根据公式 (2-1) 和 (2-2) 计算各因素的权重值得到各因素的优先级别，见表 2-6。

取模拟次数 $T=1000$ ，通过蒙特卡罗方法^[19-21]求得设备的 1000 个重要度指数值，对结果进行统计分析。图 2-2 是其中前四个设备的重要度累积频率图，图中横坐标为设备的重要度排序序号，纵坐标为设备在 1000 次模拟中每一排序序号的累

积频率。

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 & 1/4 & 1/2 & 1 & 2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 4 & 3 & 2 & 2 \\ 2 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 1/3 \\ 4 & 1/2 & 2 & 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1 & 1 & 3 & 1/4 \\ 1 & 1/3 & 1/2 & 1/3 & 1 & 1 & 2 & 1/3 \\ 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 2 & 1/2 & 3 & 1 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

表 2-6 各因素的优先级别

Table 2-6 Priority Level of Factors

序号	因素	权重	优先级
1	FR	0.23	1
2	S	0.050	8
3	SF	0.221	2
4	DT	0.063	7
5	MD	0.182	3
6	I	0.071	6
7	MC	0.165	4
8	BL	0.089	5

由图 2-2 可知，喷嘴最早到达累积频率 1，这说明喷嘴较其他三个设备有较高的重要度优先级。冲水系统故障率虽然比电茶壶的低，但优先级高。这打破了传统的“故障率高就重要”的主观判断准则。本案例中，喷嘴的重要度排序号在 5 之前，属于重要度级别高的，可以采用状态维修；在重要度排序号在 5~10 之间的，重要度级别中等，可采用计划维修；11 号重要度级别最低，可采用事后维修。

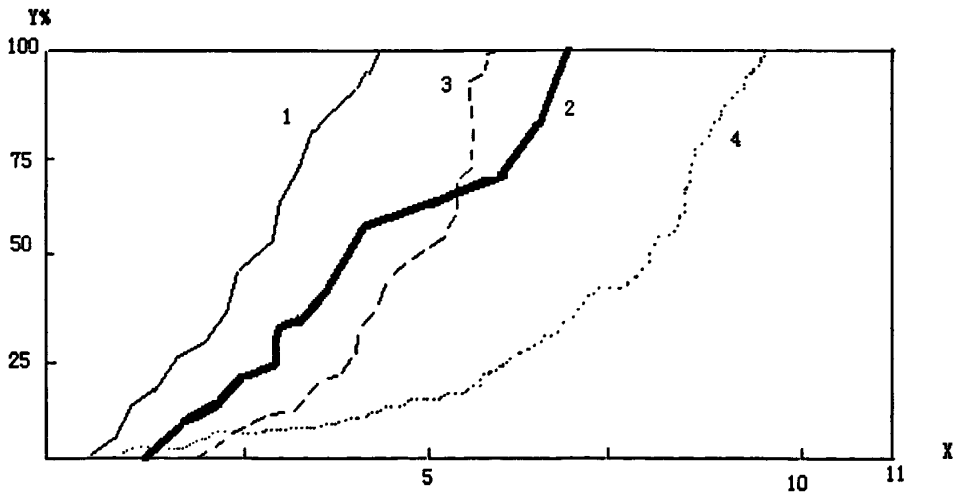
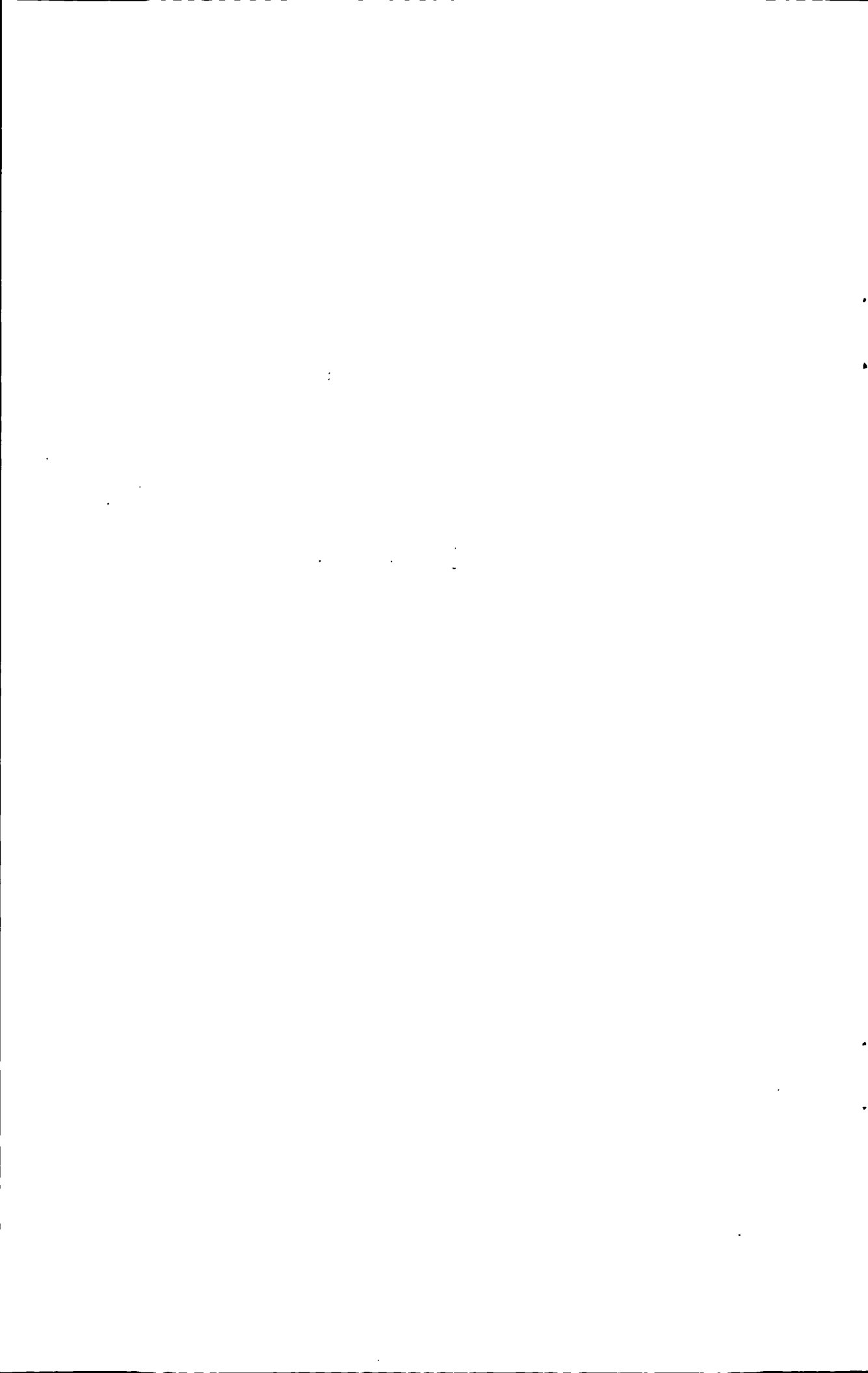


图 2-2 设备重要度排序累积频率

Fig.2-2 The Cumulation Frequency of DeVlce Importance Order

2.5 本章小结

本文在设备重要度评估模型的基础上，提出了在重要度分析中采用蒙特卡罗方法的算法流程（见附录 A），并通过案例应用说明了模型的可行性和合理性。根据计算出的设备零部件的重要度等级，确立动车组复杂设备 FSI 的维修方式，为以后的零部件分等级的维修周期决策提供有力的支持。



3 动车组零部件的可靠性分布模型

3.1 概述

本论文的主要目的是在可靠性分析的基础上开发一整套的动车组零部件检修方式、检修周期的决策系统，它能够从动车组现场故障数据，直接分析得出权重不同零部件的最优维修方式以及对应的维修间隔。在第 2 章复杂设备零部件维修方式确定的基础上，本章主要介绍可靠性分布模型的建立，包括了可靠性数据的收集、分析处理，可靠性分布模型的选择，参数的确定，具体流程如图 3-1 所示。

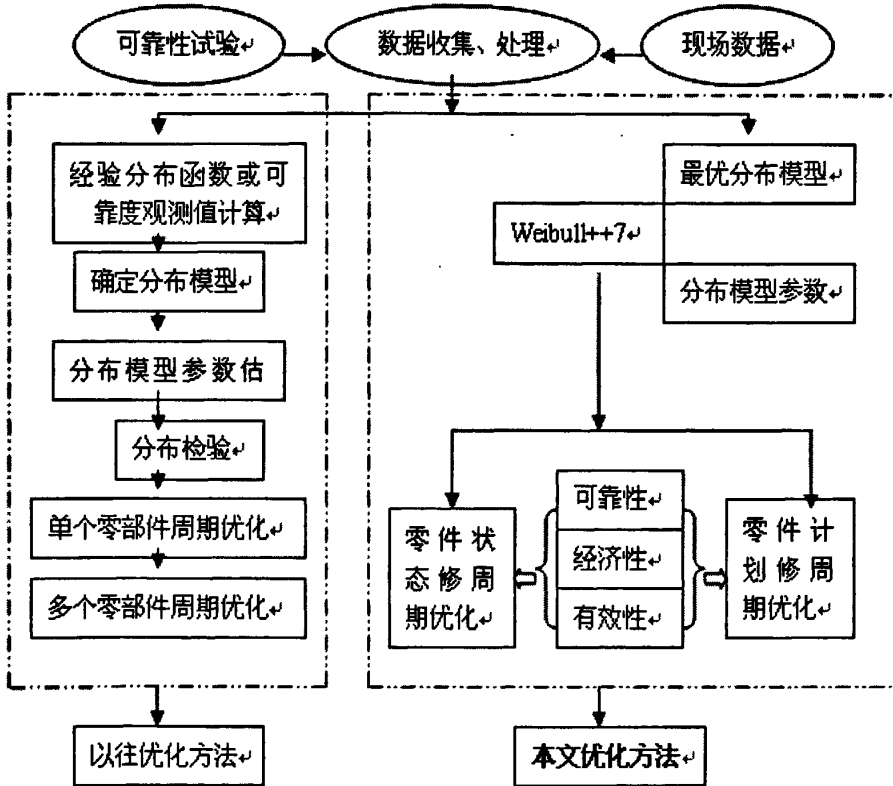


图 3-1 分布模型的确立过程

Fig.3-1 Establishment Process of Distributing Model

3.2 可靠性相关理论

3.2.1 可靠性定义

参考文献[1]中,可靠性的定义是指“产品在规定的条件下和规定的时间范围内,完成规定功能的能力”(GB3187—1982)。

根据定义可知可靠性包含五个要素:研究对象、产品所处的环境条件、产品运行时间或走行公里、规定功能和可靠度。由于产品的故障是随机变量,产品寿命是随机变量,因此产品在规定的寿命期内完成规定功能的能力也是随机的,要用概率才能定量的表示产品的可靠性程度^[22]。

3.2.2 可靠性指标

根据 GB 3187—1982 规定,产品的可靠度是时间的函数,如果产品的寿命为 T (随机变量),则产品在 t 时刻的可靠度 $R(t)(T > t)$ 为这个随机事件的概率,即可靠度函数为

$$R(t) = P(T > t), t > 0, 0 \leq R(t) \leq 1 \quad (3-1)$$

由于产品的失效与正常为对立事件,因而产品从 $t=0$ 开始,工作至任意时刻 t 的累积失效概率 $F(t)$, 即不可靠度有:

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T \leq t), t > 0 \quad (3-2)$$

失效概率密度 $f(t)$ 的观测值为产品在 t 到 $t+\Delta t$ 时间间隔内,单位时间内的实效频率,即

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3-3)$$

失效率 $\lambda(t)$ 表示当产品已经工作到 t 时刻的条件下,在下阶段 Δt 的单位时间内发生失效的条件概率(取 Δt 的极限值),即

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3-4)$$

上式两边进行积分,则得

$$\ln R(t) = - \int \lambda(t) dt \quad (3-5)$$

以上所述表明,产品的可靠性指标: $R(t), F(t), f(t), \lambda(t)$ 四者都是相互联系的,已知其中之一,便可以推算出其余三个指标^[22]。

3.3 可靠性数据的收集、分析与处理

3.3.1 可靠性数据的收集

3.3.1.1 可靠性数据的分类^[7]

动车组的现场数据主要来自机务段和车辆段,这种数据不仅可以节省大量的

人力、物力和财力，而且可以得到真实使用环境条件下大量产品的可靠性信息。由于所收集的子样数量大，环境条件真实，因此可信度高。

根据寿命试验类型，按照截尾方式可分为：

(1) 定数截尾试验数据

定数截尾试验数据是指受试产品达到规定的故障数就截止寿命试验所得到的数据。它分为有替换的及无替换的两种。将寿命试验中样品的故障时间 t （或寿命）按其大小顺序进行排列，则得到一组顺序统计量。

(2) 定时截尾寿命试验数据

定时截尾寿命试验数据是指受试产品达到规定的时间 t_0 就截止试验所得到的数据。试验也分为有替换定时截尾寿命试验和无替换定时截尾寿命试验。

(3) 不规则截尾数据

对于现场数据，由于信息来源比较复杂，产品在不同的现场使用，操作人员素质不同，环境条件也不一样，因此产品发生故障的时间、故障原因，甚至故障部位都有可能记录不完善或不准确。

动车组现场数据一般属于不规则截尾数据，复杂设备的零部件由于种种原因中途丢失信息（称为删除样品），到统计结束时，有的发生故障，有的没有发生故障。这种不规则截尾的数据通常采用残存比率法或平均秩法。

3.3.1.2 可靠性数据的收集重点^[14]

动车组故障数据收集重点主要包括：

(1) 动车组的识别数据：动车组种类、技术序列、制造序列、车辆种类、车辆顺号、型号序列、使用时间、所属单位、运营路线。

(2) 零部件的识别数据：零件编码、零件名称、附属部位。

(3) 故障的识别数据：故障机理、故障模式、维修时间、维修等级、维修方式。

(4) 故障的历史记录：维修厂家、制造厂家。

3.3.1.3 可靠性数据收集应注意的问题^[22]：

(1) 相同产品在不同使用条件下可能得到不同的数据。因此数据收集时应区别不同的条件和地区。

(2) 对数据进行筛选。任何数据都存在真伪的情况，必须制订出数据的标准判据。

(3) 数据收集中应有产品的技术履历，详细记录产品的投用年月日、生产厂家、使用记录、维修状况等。

(4) 数据收集中的人为差错只能通过人员培训、加强教育逐渐避免。

3.3.2 传统可靠性数据的分析与处理方法

动车组设备现场数据类型为不规则截尾数据,通常采用残存比率法或者平均秩次法来分析设备的可靠性^[22]。

假设 $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r (r \leq n)$ 是现场记录的样品总量为 n 的不规则截尾寿命数据,其他 $n-r$ 个样品因为各种原因丢失其记录。把这 r 个寿命数据 t_1, t_2, \dots, t_r 按照从小到大的顺序重新排列,并记作 $t_{(1)}, t_{(2)}, \dots, t_{(r)}$, 于是有 $t_{(1)} \leq t_{(2)} \leq \dots \leq t_{(r)}$ 。

由平均秩次的公式^{[15][16]}的平均秩次增量:

$$\Delta A_k = (n+1 - A_{k-1}) / (n-i+2) \quad (3-6)$$

平均秩次:

$$A_k = A_{k-1} + \Delta A_k = A_{k-1} + (n+1 - A_{k-1}) / (n-i+2) \quad (3-7)$$

式中 A_k ——故障设备的平均秩次;

k ——故障设备顺序号, $k \leq r$;

i ——所有设备的总排列顺序号,按故障时间和删除时间大小顺序排列;

n ——设备总数。

对可靠性数据的处理方法,一般使用经验函数分布法。在不知道总体分布类型情况下,进行可靠性指标的计算称为非参数法,通过一组样本观测值可以做出一个分布,称这种分布为经验分布。若以函数形式表示,则称作经验分布函数,一记为 $F_n(t)$ ^[15]。

产品在不同实验条件下和不同的数据处理条件下,所采用的经验分布函数计算方法是不一样的。由于平均秩次法采用中位秩公式,不仅适用于大样本而且适用于样本较小的情况。因此,近似中位秩公式得到广泛的应用:

$$F_n(t_i) = (i - 0.32) / (n + 0.36) \quad (3-8)$$

然后将(3-7)代入(3-8)式得:

$$F_n(t_k) = (A_k - 0.32) / (n + 0.36) \quad (3-9)$$

可得到分布函数数据点: $(t_{(1)}, F(t_{(1)})), (t_{(2)}, F(t_{(2)})), \dots, (t_{(r)}, F(t_{(r)}))$ 为后面数据拟合做准备。

3.4 可靠性分布模型的确立

3.4.1 可靠性常用分布模型

寿命分布类型是多种多样的,但每种寿命分布往往与产品本身的类型关系不大,主要取决于产品的故障机理。所谓设备寿命分布是指设备失效时间的分布,

因此要对故障及其故障时间进行研究。设故障时间为 t ，则要研究随机变量 t 的概率分布，由于故障机理不同，他们的寿命分布也不同。可靠性工程中掺用的几种分布有：二项分布、泊松分布、正态分布、对数正态分布、威布尔分布、指数分布等。其中，前两个为离散型分布，其余为连续型分布。下面重点介绍连续型分布^[22]。

(1) 正态分布

正态分布是研究随机现象发生概率应用最广的一种分布，它是德国数学家高斯（Gauss）在 18 世纪研究偏差理论时发现的，故也称为高斯分布。

正态分布的概率密度：

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-10)$$

在非寿命情况下，80%以上的问题是正态分布问题。在机械产品和结构工程中用来研究强度和应力分布；磨损型的零件和故障，如齿轮、密封环、轴承、活塞环等故障模式分布；质量过程稳定时产品尺寸及性能的度量；电阻值、半导体材料性能指标及材料强度等；许多作用相当而又互相独立的因素叠加引起的随机变量。

(2) 对数正态分布

对数正态分布是指随机变量的对数 $\ln x$ （自然对数）或 $\lg x$ （常用对数）呈正态分布，适用于机械疲劳寿命的研究，在维修性分析中对维修时间数据进行确切的分析。

对数正态分布的概率密度：

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-11)$$

对数正态分布主要用于寿命现象；事件集中发生在端部时的不对称情况，且观测值的离散程度很大，例如电机绕组绝缘，半导体器件、硅晶体管、锗晶体管、风扇叶片、车体结构、金属疲劳等。

(3) 指数分布

指数分布的概率密度为：

$$f(t) = \lambda \exp - \lambda t \quad (3-12)$$

指数分布主要用于系统、部件等的寿命。对于元件，适用于偶然失效与使用时间无关的情况。常常适用于电子设备和电子元件，多个部件组成的复杂系统，某些软件的故障模型；具有恒定故障率的零部件，经老练试验并进行定期维修的部件。

(4) 威布尔分布

威布尔分布的概率密度函数:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad t > \gamma, \beta, \eta > 0 \quad (3-13)$$

其中: β ——形状参数(威布尔斜率), 只要改变 β , 就可以得到各种故障形态的函数式;

η ——尺度参数(或特征寿命), 往往与工作条件、负荷大小有关。

γ ——位置参数: γ 表征分布曲线的位置, 不同的 γ 值曲线沿横轴平移。

威布尔分布适用于有薄弱环节的模型, 如机械中的疲劳强度、磨损寿命、腐蚀寿命等。例如滚动轴承、传动齿轮箱、电动机、发电机、电缆、蓄电池、继电器、开关、电子管、电位计、电阻、电容等许多机械、电气元件等寿命及材料疲劳等。

3.4.2 动车组零部件分布模型的选定

3.4.2.1 传统分布模型的确立方法

动车不同零件的故障率分布形式各异, 有的服从指数分布, 有的服从对数正态分布, 有的服从威布尔分布等。威布尔分布根据参数不同可以描述多种分布, 被称为“万能分布”而备受青睐。

现在比较常用的威布尔分布是三参数威布尔分布^[23]。按照传统的方法, 在故障数据分析处理过程中利用中位秩次公式求得分布函数数据点 $(t_{(1)}, F(t_{(1)})), (t_{(2)}, F(t_{(2)})), \dots, (t_{(r)}, F(t_{(r)}))$ 是确定威布尔三参数的关键。

利用威布尔万能分布的难点是精确计算 β 、 η 、 γ 值。目前, 最先进的威布尔参数值计算方法之一是相关系数法和最小二乘法。

具体计算方法如下:

a) 位置参数的估计^[23]

将分布函数数据点: $(t_{(1)}, F(t_{(1)})), (t_{(2)}, F(t_{(2)})), \dots, (t_{(r)}, F(t_{(r)}))$ 代入下式

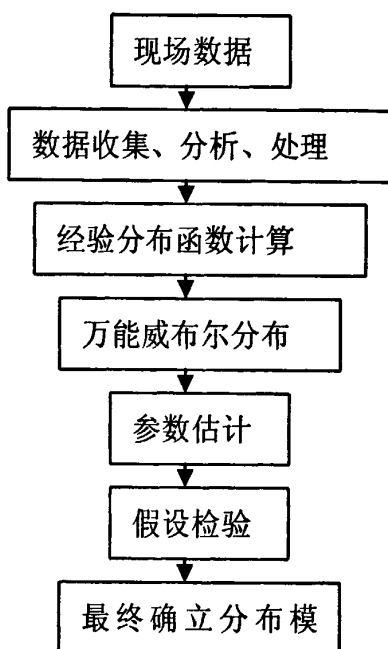


图 3-2 分布确立传统方法

Fig.3-2 Traditional Method of Distributing Establishment

$$\max |\rho(\hat{\gamma})| = \frac{\sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{[\sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})^2]^{1/2} [\sum_{i=1}^r (y_i - \bar{y})^2]^{1/2}} \quad (0 \leq \hat{\gamma} \leq t_1) \quad (3-14)$$

利用黄金分割法进行一维搜索，完成此模型对 γ 的求解。

b) 尺度参数和形状参数的估计^[23]

最小二乘法就是根据实际数据点模拟一条直线，然后过实际据点作平行于纵轴的直线，此线与模拟直线的交点即为实际数据点在模拟直线上的对应点，使得对应点与实际据点横坐标之差的平方和最小。假设 y 对 x 的线性回归方程为

$$\hat{y} = b_{yx} \hat{x} + a_{yx} \quad (3-15)$$

求使 $S = \sum_{i=1}^r [y_i - (b_{yx} \hat{x}_i + a_{yx})]^2$ 取得最小值的 b_{yx} 和 a_{yx} 。为了得到较为精确的估计值，需要利用均方误差法 (MS_e) 进行检验。一般 MS_e 越小，参数估计值越高。

在已知位置参数估计 $\hat{\gamma}$ 的情况下，便可以利用最小二乘法得到形状参数和尺度参数的估计值。

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\beta}_{yx} = \hat{b}_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})^2} \\ \hat{\eta}_{yx} = \exp\left(-\frac{\bar{y} - \hat{\beta}_{yx} \bar{x}}{\hat{\beta}_{yx}}\right) \end{array} \right. \quad (3-16)$$

参数确立之后，需要进行假设检验。常用的拟和优度检验方法有两种：一种叫 χ^2 检验，另一种叫 K-S 检验。K-S 检验^[7]不仅适用于大样本，而且适用于小样本，因此得到广泛应用。

拟合优度的度量方法是找出子样和母体间的最大偏差值，即检验统计量为：

$$D_n = \sup_{-\infty < t < \infty} |F_n(t) - F(t)| \quad (3-17)$$

式中 $\sup(\bullet)$ —— $\max(\bullet)$

$F_n(t)$ —— 样本容量为 n 的经验分布函数

$F(t)$ —— 理论分布函数 $F(t_{(k)}) = \frac{A_k - 0.32}{n + 0.36}$

然后将此最大偏差值 D_n 与偏差值 $D_{n,\alpha}$ 相比较，若 $D_n < D_{n,\alpha}$ ，则接受原假设，否则拒绝。具体的检验流程，如图 3-3 所示。

综上所述，可见传统的故障分布确立方法科学合理，具有很强的理论依据，但因计算量太大，计算精度要求过于苛刻，给编程人员带来一定负担。并且，一点模型检验失败，“万能分布”将找不到“替补”选项，这给模型分布的确立带来了极大困难。下面介绍一种既精确又简单的分布模型确立方法。

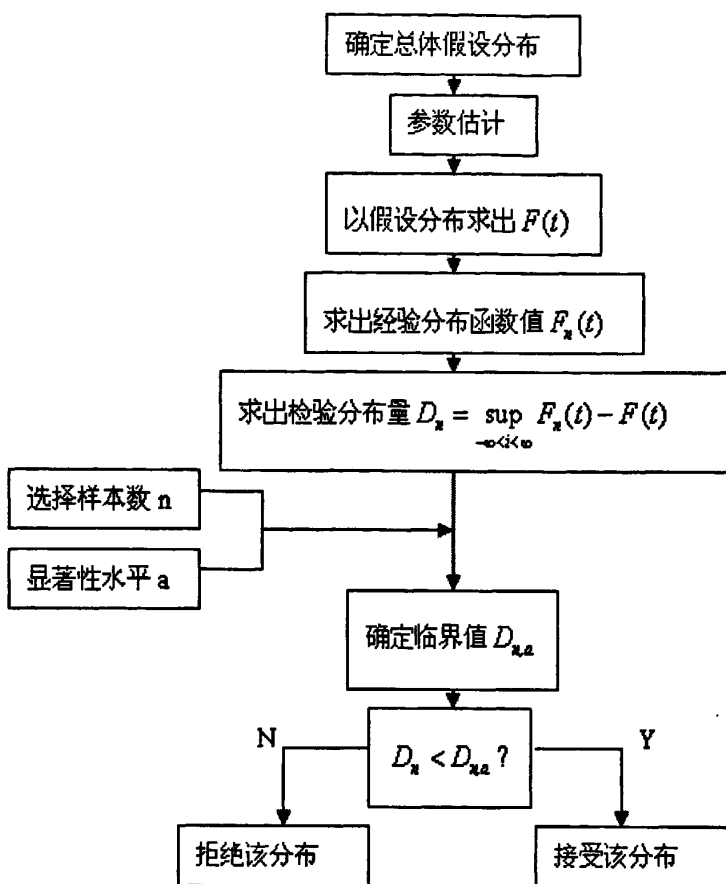


图 3-3 K-S 检验步骤

Fig.3-3 Process of K-S Test

3.4.2.2 新型分布模型的确立方法

Weibull++7 是 ReliaSoft 可靠性软件系列产品的成员之一, Weibull++7 已经成为可靠性寿命数据分析的标准软件, 软件应用多种寿命数据分布(包括 Weibull 分布的多种形式)进行寿命数据分析, 清晰精确的界面支持可靠性工程分析工作。


该软件支持 1、2、3 参数 Weibull 分布, 混合 Weibull 分布, 1、2 参数指数分布, 对数正态分布, 正态分布, Generalized Gamma 分布, Gamma 分布, Logistic 分布, Loglogistic 分布, Gumbel 分布和 Weibull-Bayesian 分布。分布向导会自动进行拟合优度检验来协助选择数据集的最佳分布^[24]。

在瑞蓝官方网站 (<http://www.reliasoft.cn/products/Weibull/v7.htm>) 可以下载试用版。利用此软件, 动车组故障数据的处理大大简化, 也保证了故障分布的多元化, 找到了故障数据最优的分布函数, 大大减小了 Matlab 的工作量。

3.4.3 动车组零部件分析与应用

例 取样本容量为 31 的动车组某电子产品的寿命试验数据^[17]:

30 926, 34 554, 36 381, 38 423, 40 103, 40 504, 42 200, 44 392,
46 092, 46 125, 46 175, 48 025, 48 025, 48 055, 48 055, 48055,
48 055, 48 056, 51 675, 52 344, 52 345, 52 345, 52 345, 52 379,
55 997, 56 202, 57 709, 57 709, 57 709, 57 709, 63 496

在“开始-所有程序”菜单中选择“Relisoft Office”，点击“Weibull++7”，即可进入主界面，选择“寿命数据表单”、“下一步”、“时间-实效数据”，将上述的寿命数据输入表单中，点击右侧的分布向导图标，点击“分析”按钮，分析完成后左侧将列出所选分布的级别，点击“执行”将选择最佳分布，如图 3-4 所示。

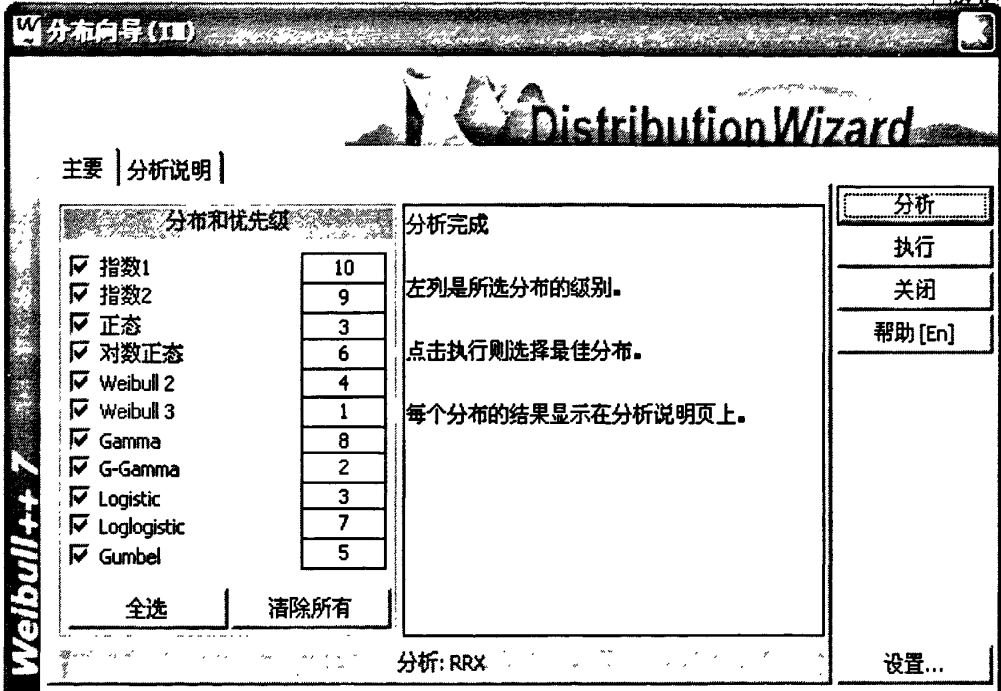


图 3-4 分布优先级的确定

Fig.3-4 decision of Distributing Priority

点击“执行”即可察看最优分布模型的各个参数值大小，如图 3-5 所示。

此外，用此软件还可以查看故障数据的柱状图和零件的可靠度曲线，具体如图 3-6、图 3-7 所示。从图中可以清楚地看到零件寿命的分布特点，以及不同可靠度下对应的寿命，其大小可以作为以后章节中零件周期优化结果的检验之一。

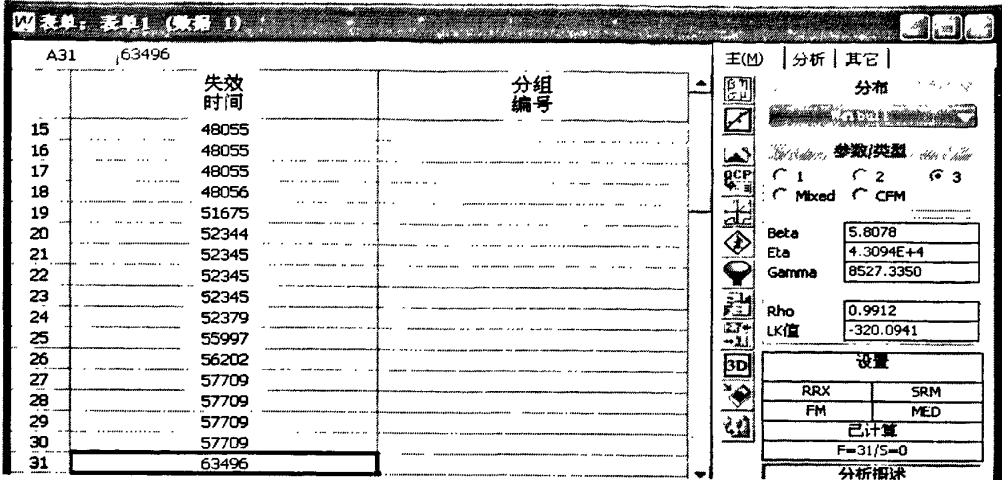


图 3-5 分布参数值查询

Fig.3-5 Distributing Parameter Value

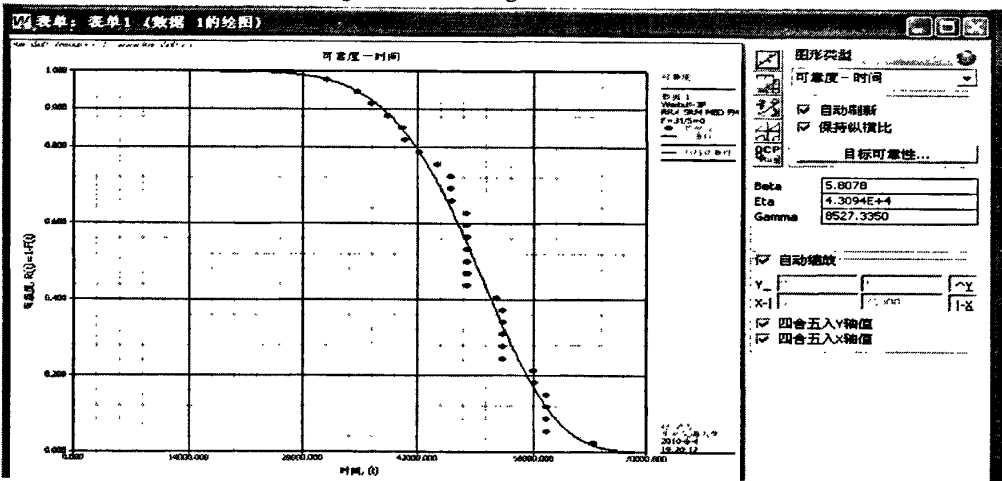


图 3-6 可靠度曲线

Fig.3-6 Reliability Curve

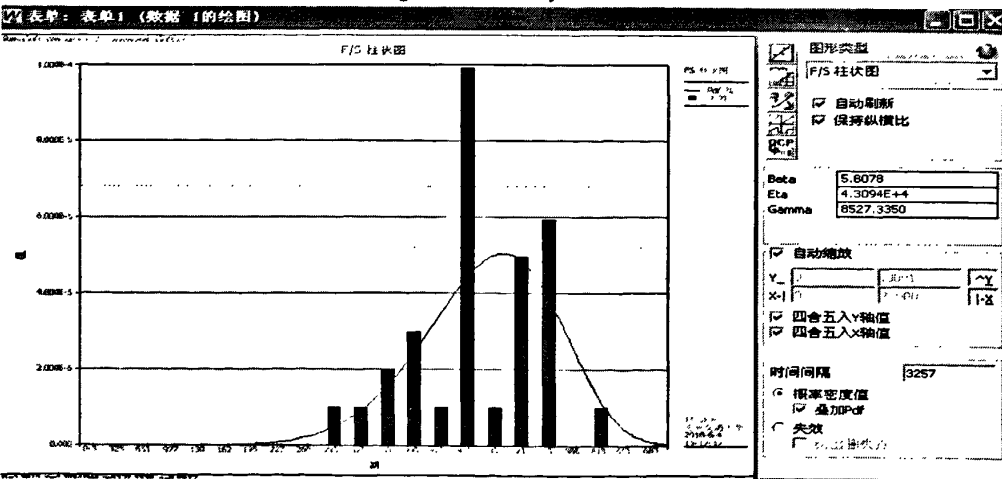
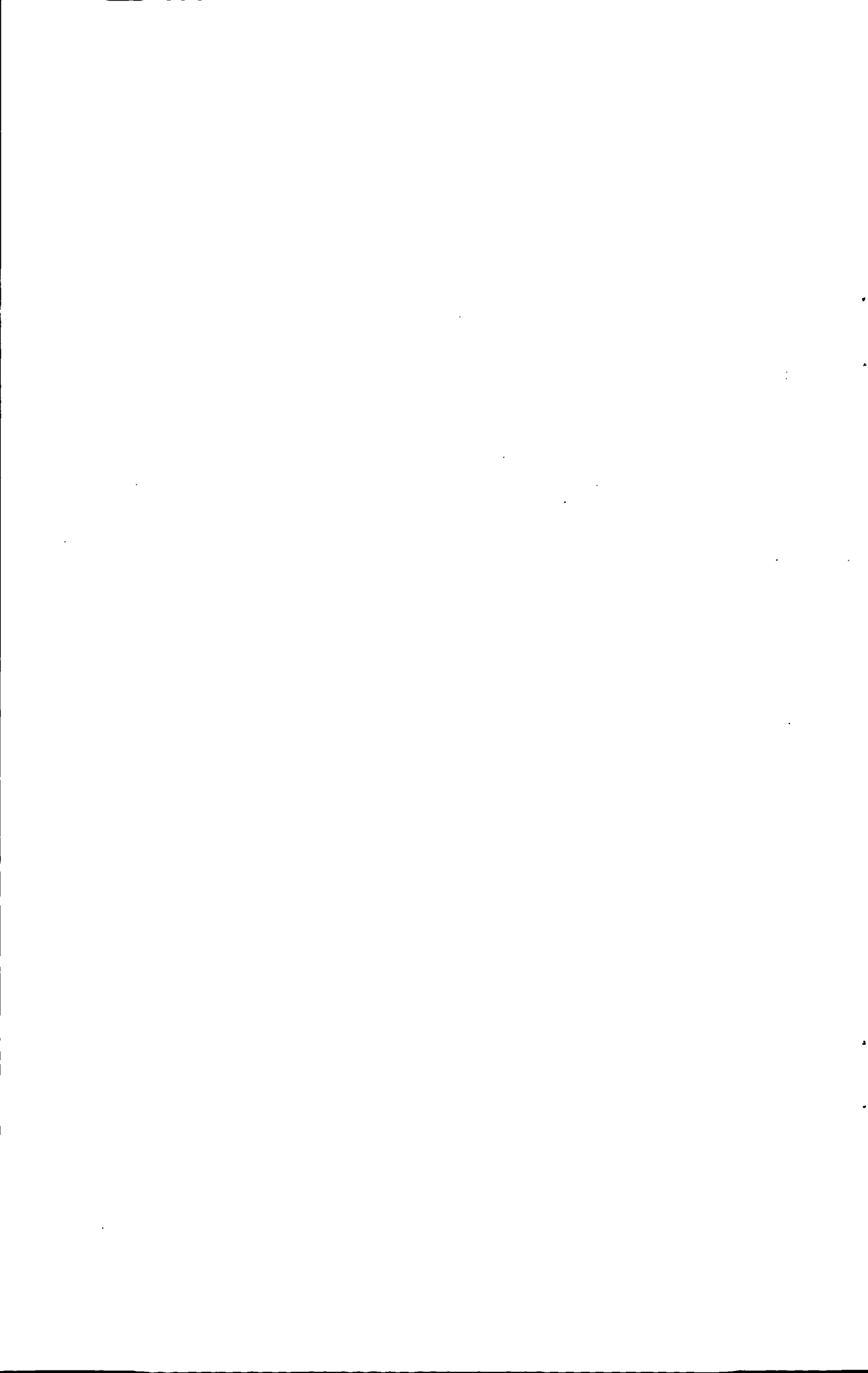


图 3-6 柱状图

Fig.3-6 Histogram

3.5 本章小结

本章对零部件现场数据进行预处理,应用 Weibll++7 确定出了故障分布的最优分布模型以及参数,在确保拟和精度的前提下,简化了故障数据处理过程,也为后面决策支持系统的建立降低了 Matlab 编程的工作量。此外,通过可靠度与时间曲线查看不同可靠度下的零件寿命,也为后续的周期优化提前寻求到了一种新的检验工具。



4 动车组零部件维修周期的优化模型

4.1 概述

设备运行中,依据管理者关注的问题不同,维修决策中可以分别以费用最低、可用度最大或风险最低为目标建立决策模型。本章根据状态修、计划维修和事后维修的特点,在第2章复杂设备FSI维修方式和第3章故障零部件分布模确立的基础上,从可靠性、可用度两方面入手,对重要度不同的零件分等级确立更加经济的维修间隔,提高复杂系统的安全性、经济性和利用率。

4.2 状态维修零部件的周期决策模型

一般而言,故障预防工作是针对具体零部件故障特点而确定的,不同零部件的可靠性特征决定了所采取的故障预防工作有不同的侧重点和最佳周期。在预防性维修中,维修周期的确定是一个很重要的内容。对具有安全性或使用性后果的故障,间隔期过长则不足以保证所需设备的安全性或使用性要求,过短又不经济;对具有经济后果的故障,维修间隔期过长或过短,都不利于经济性。因此,恰当地确定预防性维修间隔期将直接影响到设备使用的安全性和经济性^[25]。

人们注意到:由于预防性维护并不能使设备修复如新,随着维修次数以及设备役龄的增加,设备的可靠性不可避免地会随着周期性维护逐步降低,甚至有些设备不是被用坏的,而是被拆坏的。因此,更合适的维修策略应该是随着设备役龄的增加,对设备适时进行预防性维护。

作为复杂设备中的重要功能单元(FSI),其运行可靠性直接影响着系统的安全性。随着车辆监测能力和计算机处理能力的提升,对复杂系统重要功能单元实施以“可靠性为中心”的状态修已经逐渐演化成为一种集可靠性、经济性于一身的理想的预防性维修方式。

4.2.1 零部件状态维修周期模型假设

维修中所谓的复杂系统就是由多个相互联系、相互作用的不同部件组成的有机体,在维修决策时不仅要考虑部件各自的特点,同时还要考虑他们之间的相关性。从整个系统看,当维修相关较强时,仍认为系统中的部件相互独立,对应的

维修决策可能就存在局限性。部件之间的相关性可以归纳为三类：经济相关性、故障相关性、结构相关性。所谓经济相关性是指多个相关零部件一起维修时比分开维修的费用更低；所谓故障相关性是指一个部件的故障会增加系统中相关其他部件的故障风险；所谓结构相关性是指由于结构的约束，对某一部件进行维修时，就必须对相关的部件同时进行维修。这些相关性的存在要求对系统中的某一部件做维修决策时，须考虑它与其他部件之间的相互影响。为了达到系统好的维修优化，符合系统维修的实际情况，考虑部件之间的维修相关性是不可避免的^{[26][27]}。

在复杂系统中，以往各部件的最优维修间隔是各自按照单部件的维修策略来确定的，由于各部件的维修间隔迥异，有些甚至差距悬殊，按照每一个零部件的维修间隔来执行不切实际，否则系统就需要不断的停机进行维修。因此，必须将很多任务集中起来，这就是成组维修策略^[28]。本文根据参考文献[28]所述文献中所给模型的基础上，对于以可靠性为中心的多部件成组预防性维修策略进行了研究。同时考虑了由于维修差错造成预防性维修后可靠性下降的概率，和造成的成本损失，在保证系统可靠性安全运营的前提下，给出了优化系统设备维修费用的模型。本节研究的复杂设备模型具有以下特性：

(1) 该设备具有两个或两个以上的单元，各个单元在初始时刻都为全新状态，部件间的故障分布相互独立。

(2) 研究的动车组设备系统是一个串联系统，任何一个部件发生故障，或者对任何一个零部件进行维修，都会造成整个系统的停机^[29]。

(3) 研究设备系统共有以下四种方式：

在部件达到其最低可靠度时，对该部件进行预防性维修或更换，维修后部件的故障率得到改善，更换后部件为全新状态；在未达到其最低可靠度时，对部件出现的非预期故障进行小修，小修只是将部件恢复到故障前的状态并不改变部件的故障率分布；在未达到最低可靠度时，对部件进行预防性保养（如：除尘、清洗、润滑等），保养后部件的故障率得到改善，改善情况同预防性维修。

(4) 假设部件 i 在某时刻 t_k 需要进行预防性维修，如果部件 j 在时刻 $t_k + \Delta t$ 之前达到可靠度最低值，为减少预防性维修造成的停产损失，应该触发部件 $j(i \neq j)$ 在时刻 t 的预防性维修。

(5) 由于部件非预期故障进行的小修所用时间相对很少，模型中对其所占时间忽略不计^[30]。

(6) 设备在生产过程中无生产停歇。

4.2.2 单部件分布函数及维修周期模型

任何一个复杂系统都是由多个子系统、子部件组成，零部件的可靠性决定了整个系统的可靠性。因此，复杂设备的检修周期的优化模型需要从单个零部件的检修周期入手。

为了准确计算故障率和维修周期，需要建立必要的系统的维护模型。维护模型的关键在于各预防性维护周期中设备的故障率分布函数的求解。许多学者通过引入调整因子的概念，建立了不同维护周期内的故障率演化规则，从而为维修周期的确立做好准备。Malik 提出了役龄递减因子的概念，指出设备在第 i 次预防性维护之后的故障率模型将成为 $h_i(t+a_iT_i)(0 < t < T_{i+1})$ ，其中 $0 < a_i < 1$ 被称为役龄递减因子。按此理推算，预防性维护后设备的初始故障率变成了 $h_i a_i T$ 。Nakagawa 提出了另一种调整因子——故障率递增因子，指出第 i 次预防维护之后设备的故障率模型将变成 $b_i h_i(t)(0 < t < T_{i+1})$ 。

故障率递增因子的存在意味着每次预防性维护都使设备的初始故障率回到零值，但同时也增加了故障率函数的变化率。由于基于调整因子的顺序预防性维护决策取决于设备的故障率状态，该维护方法在工程实践中的可操作性很强，它是对修复非新过程的一种通用建模方法。

以上分析可知，役龄递减因子的存在表明了设备预防性维护后的初始故障率；故障递增模型可加快设备的功能衰退速率。此外，维护并不是对设备所有部件的彻底修复，有些部件可能并没有被检修；并且，随着设备运行时间的增加，设备各部件本身会发生材料疲劳、破坏或老化，而维护本身并不能彻底改变这些情况，只能改善原有的故障状态。

本文根据《一种基于可靠性的设备顺序预防性维护模型》介绍，结合设备运行的实际情况，引入了基于两种调整因子的混合式故障率演化模型，如图 4-1 所示。预防性维护前后设备的故障率函数之间的关系被定义为：

$$h_{i+1}(t) = b_i h_i(t + a_i T_i) \quad t \in (0, T_{i+1}) \quad (4-1)$$

其中， i 为预防性维修周期数， $i=1, 2, \dots, N$ ； T_i 表示部件第 $i-1$ 次和第 i 次预防性维护之间的时间间隔； $h_i(t)$ 表示第 i 次维修前的故障率分布函数； $0 < a_i < 1$ 为役龄递减因子； b_i 为故障率递增因子。 a_i 和 b_i 取值可根据部件的历史维护情况计算得出^[7]。

故障率演化规则的建立使得对不同维护周期中的故障率函数进行预测成为可能。 $h_i(t)$ 为全新部件的故障率分布函数，它一般由部件自身特性和实际运行环境决定^[31]。

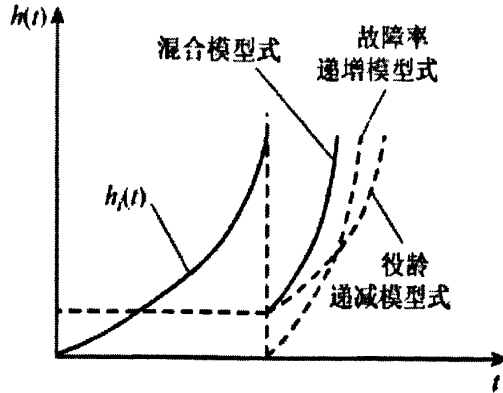


图 4-1 故障率函数的演化规则

Fig.4-1 Evolvement Rules of Failure Rate Function

在列车运行过程中，动车组对设备的可靠度有着更加严格的要求，尤其是复杂设备的关键零部件，设计生产过程中达到设定阈值 R 时，就需要对部件进行维修。由此可得^[31]：

$$\exp[-\int_0^{t_1} h_1(t)dt] = \exp[-\int_0^{t_2} h_2(t)dt] = \dots = \exp[-\int_0^{t_i} h_i(t)dt] = R \quad (4-2)$$

变形后可得：

$$\int_0^{t_1} h_1(t)dt = \int_0^{t_2} h_2(t)dt = \dots = \int_0^{t_i} h_i(t)dt = -\ln R \quad (4-3)$$

常用的可靠性分布模型，现行的主要研究方法都是用二参数和三参数威布尔分布模型^{[19]-[23]}。本文利用 Weibull++7 分析得出故障的最优分布模型，能够更精确地描述系统的故障分布，能够得出更好的优化方案。

假设 3.4 节中确定的可靠性分布模型如下：

$$h_1(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (4-4)$$

将方程 (4-2)、(4-3)、(4-4) 联立便可以得到零件每次维修间隔 T_i 。

部件在第 $N+1$ 次预防性维修时被更换，则此部件在其生命周期中的维护成本率：

$$c_{Er} = [N(C_{cm}(-\ln R) + C_{pm}(1 + \ln R)) + C_r + L * (N+1) * q] / (\sum_{i=1}^N T_i + N\tau_{pm}) \quad (4-5)$$

根据参考文献[7]可知， C_{cm} 为对部件临时出现的非预期故障进行一次小修所需费用， C_{pm} 为部件一次预防维修的费用， C_r 为更换部件所需费用， L 为预防性维修可靠性变差造成的费用损失， q 为对部件进行预防性维修造成可靠性变差的概率， τ_{pm} 为部件一次预防性维修所需时间， L 和 q 的取值可以通过对历史故障记录进行故障模式和原因统计分析得到。通过优化目标函数 $\min c_{Er}$ 可以得到部件生命周期中的最优维修计划，决策变量为 N 。

4.2.3 零部件成组维修周期模型^[7]

根据参考文献[28], 成组维修模型建立过程如下:

第1步 不规则截尾数据进行统计分析得出零件P每次维修后的故障率分布函数为:

$$h_{p(k_p+1)}(t) = b_{pk_p} h_{pk_p}(t + a_{pk_p} T_{pk_p}), t \in (0, T_{p(k_p+1)}) \quad (4-6)$$

式中 k_p 为零件 p 的维修次数, 初始值为 0。

第2步 设备设计生产的要求确定部件 p 可靠度的下限 $R_{p \min}$ 。

第3步 由 4.2 节中讲解的求取零件各次维修间隔期的方法便可以得到零件的维修间隔期 T_{pk_p} ; 通过优化目标函数 $\min c_{Er}$ 可以得到部件 p 的最优预防维修次数 N_p 。

第4步 找出 $t_k = \min(t_{1k}, t_{2k}, \dots, t_{pk}, \dots, t_{Mk})$, 作为设备第 k 次预防维修的时刻。 t_{pk} 表示在设备第 $k-1$ 次预防性维修后零件 p 下一次预防性维修的时刻; 当 $k=1$ 时, $t_{11} = T_{11}, t_{21} = T_{21}, \dots, t_{p1} = T_{p1}, \dots, t_{M1} = T_{M1}$ 。

第5步 假设机会预防性维修阈值设定为 Δt , 比较 t_{pk} 和 $t + \Delta t$ 的大小, 如果 $t_{pk} > t + \Delta t$, 则不对部件 p 进行任何操作; 如果 $t_{pk} \leq t + \Delta t$, 则部件 p 在时刻 t_k 进行预防性维修, 部件 p 的维修次数 k_p 加 1; 如果 $t_{pk} \leq t + \Delta t$, 且 $k_p = N_p + 1$, 则令 $k_p = 0$, 即此次预防性维修应对部件 p 进行更换。因此 t_k 时刻对部件 p 采取的维修方式可用下式表示:

$$Y(p, t_k) = \begin{cases} 0 & t_{pk} > t + \Delta \\ 1 & t_{pk} \leq t + \Delta t \neq 0 \\ 2 & t_{pk} \leq t + \Delta t = 0 \end{cases} \quad (4-7)$$

$Y(p, t_k)$ 为 t_k 时刻对部件 p 采取的维修方式, 不进行任何维修、预防性维修和更换维修的取值分别为 0, 1 和 2。

假定 $\tau(p, t_k)$ 为 t_k 时刻对部件 p 进行维修所需的时间, 则

$$\tau(p, t_k) = \begin{cases} 0 & Y(p, t_k) = 0 \\ \tau_{ppm} & Y(p, t_k) = 1 \\ \tau_{pr} & Y(p, t_k) = 2 \end{cases} \quad (4-8)$$

式中, τ_{ppm} 为部件 p 进行一次预防性维修所需时间; τ_{pr} 为部件 p 进行一次预防性更换所需时间; 此次维修所需停机时间为维修所需时间最长的部件的维修时间作为 $T_{parkk} = \max_{0 < p < M}(\tau(p, t_k))$ 。

第6步 第 k 次预防性维修后部件 p 需要下次进行预防性维修的时刻为

$$t_{p(k+1)} = \begin{cases} t_{pk} + T_{parkk} & Y(p, t_k) = 0 \\ t_k + T_{p(k_p+1)} T_{parkk} & Y(p, t_k) = 1, 2 \end{cases} \quad (4-9)$$

运用第 4 步的方法计算成组维修第 $k+1$ 次预防性维修的时间点 t 。重复 4~6 直到 $t_{k=n+1} > t_{end}$ ， t_{end} 表示设备在有限运行时间 $(0, t_{end})$ 范围内考虑其维修活动， t_{end} 的取值可以根据具体设备及部件的运行情况而定^[32]。

4.2.4 状态维修零部件周期经济性优化^[7]

系统的成组维修费用主要由三部分组成^[28]：（1）系统维修费用；（2）由于维修差错，预防性维修后可靠性降低造成的成本损失；（3）由于预防维修而需停机的系统损失费用。

系统维修费用包括预防维修费用 C_{ppm} 、更换维修费用 C_{pr} 和出现非预期故障后进行的修复费用 C_{pcm} 。零件 p 从时刻 t_{k-1} 预防性维修后到时刻 t_k 维修完毕一个完整的运行维修周期内的直接维修费用为：

$$C_{pk} = \begin{cases} 0 & Y(p, t_k) = 0 \\ C_{ppm} + C_{pcm} \int_0^{t_{pk_p} - (t_{pk} - t_k)} h_{pk_p}(t) dt & Y(p, t_k) = 1 \\ C_{pr} + C_{pcm} \int_0^{t_{pk_p} - (t_{pk} - t_k)} h_{pk_p}(t) dt & Y(p, t_k) = 2 \end{cases} \quad (4-10)$$

停机损失费用与停机时间 T_{parkk} 成正比关系，而 T_{parkk} 与每次预防维修的任务量有关，假设预防性维修需要停机的系统损失费用为 S_k ，这里选择第 k 次维修中维修所需时间最长的部件的维修时间作为停机时间。则有

$$S_k = C_{parkk/h} T_{parkk} \quad (4-11)$$

其中， $C_{parkk/h}$ 表示单位停机时间的损失费用。

由于人为差错是不可避免的，有人为维修就有人为差错造成可靠性变差的可能，因此零件 p 从时刻 t_{k-1} 到时刻 t_k 维修完毕一个完整的运行维修周期内，人为维修差错造成的损失可由下式来计算：

$$L_{pk} = \begin{cases} 0 & Y(p, t_k) = 0 \\ L_p * q_p & Y(p, t_k) = 1, 2 \end{cases} \quad (4-12)$$

式中： L_p 为对部件 p 进行一次差错预防性维修造成的成本损失， q_p 为对部件 p 进行预防性维修时，造成可靠性变差的概率。

成组维修第 k 次维修的总费用

$$C_k = \sum_{p=1}^M (C_{pk} + L_{pk}) + S_k \quad (4-13)$$

设备在整个有限运行时间内的总维修费用

$$C = \sum_{k=1}^n C_k = \sum_{k=1}^n \left(\sum_{p=1}^M (C_{pk} + L_{pk}) + S_k \right) \quad (4-14)$$

综上所述，机会预防性维修阈值 Δt 的大小，直接影响着设备每次预防性维修所涉及部件的多少。如果 Δt 过大，则设备在每次预防性维修时更多的零部件都需要进行维修，容易导致过剩维修；如果机会阈值 Δt 太小，就要不断的停机维修，这样虽然使得大部分部件能够得到充分利用，但增加了因频繁停机而造成的停机损失。因此必须选择合适的 Δt ，使得在保证设备可靠性的情况下达到维修最好的经济性。因此，成组优化模型表示为：

$$\min \left\{ C = \sum_{k=1}^n C_k = \sum_{k=1}^n \left(\sum_{p=1}^M (C_{pk} + L_{pk}) + S_k \right) \right\}$$

$$s.t. \quad \min(T_{pk_p}) \geq \Delta t \geq 0$$

采用 Matlabr2008b 编程，利用枚举法完成此模型的求解过程。

4.3 计划维修零部件的周期决策模型

4.3.1 计划维修中故障类型多样性分析

车辆段动车组维修调研后发现：由于运行中受各种因素的影响会发生一些故障，使设备性能降低甚至功能丧失，因此出现了一些计划外维修，影响了设备的正常运用，导致了维修费用的增加。

复杂设备的计划外故障一般分为两类^[9]：一类是计划外的可修复性故障，主要是对那些不适合做更换维修或部件故障的严重程度不足以进行换件的情况进行的，修复后回到故障前的故障率；另一类是故障后更换性故障，主要是对于已经不能通过一般的修复恢复部件的功能，更换后设备的预防性维修周期重新开始计算。如果在一个计划性维修周期内两类故障都没有发生，则按计划性维修周期进行正常的预防性维修，虽然每次预防性维修都会很大程度地恢复其功能，降低故障率但不会修复如新。

动车组复杂设备计划性维修过程基于对故障特性的分析，绘制计划性维修过程故障率变化大致曲线如图 4-1 所示。假设零件在运行中出现计划外的修复性故障，则对其进行修复性维修，即故障率不变，维修后运行时间继续累积；假设动车组零部件出现更换性故障则进行更换维修，维修后设备翻新，计划预防性维修周期从头开始。多次预防性维修周期后，设备的功能得到大部分恢复，故障率有所降低。动车组零部件在出现更换性故障前对发生的修复性故障一直进行修复性维修和计划预防维修，随着时间的延长，设备的故障率随着役龄的增加将逐渐升高，在经过 N 次预防性维修后，为了保证设备的性能，需要进行一次大修，使设备的可靠性有所提高。

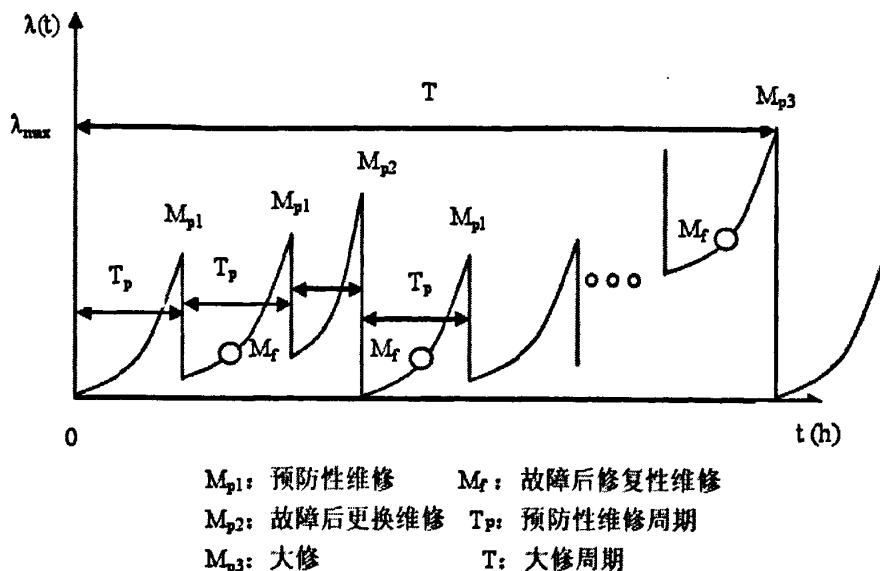


图 4-2 设备计划性维修过程中故障率变化图

Fig.4-2 Failure Rate Change in Plan Maintenance of Device

4.3.2 原有计划维修周期模型缺陷

为提高动车组零部件运行的可靠性，需要确立合时的维修周期，有效地避免过度维修和失修，最大限度地降低动车组维修的经济性。通过综述，《以可靠性为中心的维修决策模型》一书中提出了机车计划预防维修中各种维修周期决策模型，其中长可用度模型为^[33]：

$$A(T) = \frac{\text{一个更新周期中设备工作时间的期望值}}{\text{更新周期长度的期望值}} \quad (4-15)$$

费用模型为：

$$C(T) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(T,t)}{t} = \frac{\text{每个更新周期总费用期望}}{\text{更新周期长度}} \quad (4-16)$$

研究发现，我国现有的计划维修决策模型中普遍存在的问题^[33]是：“目前关于计划性维修中定时维修周期模型的综合权衡不够，数学模型是基于费用或可用度最优的单一目标建立的”。此外，已有的计划性维修周期决策模型大都基于计划外维修为更换维修的假设，忽略了修复性故障维修费用。

因此，本节充分考虑复杂设备故障类型多样化的特点，建立可用度约束下维修费用最小的计划维修周期最优模型^[33]，在保证动车组零部件充分利用的前提下，以最少的人力、资金消耗对动车组零件进行计划预防性维修，用来解决目前动车组零部件计划性维修中可用度降低且维修费用居高不下的问题。

4.3.3 可用度约束下经济性最优的周期模型^[9]

根据参考文献[9]本文对原有模型稍作改进, 模型参数说明:

\bar{t}_{Mf} 为平均故障后恢复性维修时间;

\bar{t}_{Mp2} 为平均故障后更换维修时间;

\bar{t}_{Mp1} 为平均预防性维修时间;

\bar{t}_{Mp3} 为平均大修时间;

$h(t)$ 为设备在 t 时刻的故障率;

$h_n(t)$ 为第 n 个预防性维修周期内设备的故障率, $h_{i+1}(t) = b_i h_i(t + a_i T_p)$;

$A_n(T_p)$ 为一个预防性维修周期平均可用度;

$F_{Mf}(t)$ 为 t 时刻发生修复性故障的概率;

$F_{p2}(t)$ 为 t 时刻发生更换性故障的概率;

P_{Mf} 为总故障中修复性故障发生的比率;

P_{Mp2} 为总故障中更换性故障发生的比率;

\bar{C}_{Mp1} 为平均预防性维修费用;

\bar{C}_{Mp2} 为平均故障后更换维修费用;

\bar{C}_{Mp3} 为平均大修费用;

\bar{C}_{Mf} 为平均故障后恢复性维修费用;

$C_n(T_p)$ 为一个预防性维修周期平均维修费用;

T 是大修周期, 即进行了 N 次预防性维修的时间, $T = NT_p$;

$C(T)$ 为大修周期平均维修费用;

$A(T)$ 为大修周期平均可用度;

模型假设:

(1) 设备在运用过程中只处于两种状态: 正常状态和故障状态;

(2) 设备的故障率随时间递增, 即处于耗损故障期;

(3) 更换维修与大修可使设备的功能恢复如新, 设备的使用寿命周期重新开始计算, 且由文献^[34]证明结论得各周期独立同分布。

4.3.3.1 设备在一个预防性维修周期 T_p 内的可用度模型

(1) 第 n 个预防性维修周期内设备因发生修复性故障需要进行维修的期望时间 $\bar{A}_{nMf}(T_p)$ 为:

$$\bar{A}_{nMf}(T_p) = \bar{t}_{Mf} \times F_{Mf}(nT_p + T_p)$$

(2) 第 n 个预防性维修周期内设备预防性维修的期望时间 $\bar{A}_{nMp1}(T_p)$ 为:

$$\bar{A}_{nMp1}(T_p) = \bar{t}_{Mp1} \cdot R_{Mp2}(nT_p + T_p)$$

(3) 第 n 个预防性维修周期内设备因发生更换性故障需要进行维修的期望时

间 $\bar{A}_{nMP2}(T_p)$ 为:

$$\bar{A}_{nMP2}(T_p) = \bar{t}_{Mp2} \cdot F_{Mp2}(nT_p + T_p)$$

(4) 第 n 个预防性维修周期内设备的工作时间期望时间 $\bar{A}_{nM\alpha}(T_p)$ 为:

$$\bar{A}_{nM\alpha}(T_p) = \int_{nT_p}^{(n+1)T_p} R_{Mp2}(t) dt$$

则, 第 n 个预防性维修周期内设备的更新周期长度期望 \bar{A}_n 为:

$$\begin{aligned} \bar{A}_n &= \bar{A}_{nMf}(T_p) + \bar{A}_{nMp1}(T_p) + \bar{A}_{nMP2}(T_p) + \bar{A}_{nM\alpha}(T_p) \\ &= \bar{t}_{Mf} \cdot F_{Mf}(nT_p + T_p) + \bar{t}_{Mp1} \cdot R_{Mp2}(nT_p + T_p) + \bar{t}_{Mp2} \cdot F_{Mp2}(nT_p + T_p) + \int_{nT_p}^{(n+1)T_p} R_{Mp2}(t) dt \end{aligned}$$

综上, 依据式 (4-15) 可以得到设备在第 n 个预防性维修周期内的可用度模型为:

$$\begin{aligned} \bar{A}_n(T_p) &= \int_{nT_p}^{(n+1)T_p} R_{Mp2}(t) dt / [\bar{t}_{Mf} \cdot F_{Mf}(nT_p + T_p) + \bar{t}_{Mp1} \cdot R_{Mp2}(nT_p + T_p) + \\ &\quad \bar{t}_{Mp2} \cdot F_{Mp2}(nT_p + T_p) + \int_{nT_p}^{(n+1)T_p} R_{Mp2}(t) dt] \end{aligned} \quad (4-17)$$

4.3.3.2 一个大修周期 T 内的可用度模型

(1) 一个大修周期内设备因发生修复性维修的期望时间 $\bar{A}_{Mf}(T)$ 为:

$$\bar{A}_{Mf}(T) = \bar{t}_{Mf} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mf}(nT_p + T_p)$$

(2) 一个大修周期内设备预防性维修的期望时间 $\bar{A}_{Mp1}(T)$ 为:

$$\bar{A}_{Mp1}(T) = \bar{t}_{Mp1} \sum_{n=0}^{N-1} R_{Mp2}(nT_p + T_p)$$

(3) 一个大修周期内设备因发生更换性故障需要进行维修的期望时间

$$\bar{A}_{Mp2}(T) = \bar{t}_{Mp2} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mp2}(nT_p + T_p)$$

(4) 一个大修周期内设备的工作时间期望时间 $\bar{A}_{M\alpha}(T)$ 为:

$$\bar{A}_{M\alpha}(T) = \sum_{n=0}^{N-1} \int_{nT_p}^{(n+1)T_p} R_{Mp2}(t) dt$$

因此, 一个大修周期内设备的更新周期长度期望 \bar{A} 为:

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \bar{A}_{Mf}(T) + \bar{A}_{Mp1}(T) + \bar{A}_{Mp2}(T) + \bar{A}_{M\alpha}(T) + \bar{t}_{Mp3} \\ &= \bar{t}_{Mf} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mf}(nT_p + T_p) + \bar{t}_{Mp1} \sum_{n=0}^{N-1} R_{Mp2}(nT_p + T_p) + \\ &\quad \bar{t}_{Mp2} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mp2}(nT_p + T_p) + \sum_{n=0}^{N-1} \int_{nT_p}^{(n+1)T_p} R_{Mp2}(t) dt + \bar{t}_{Mp3} \end{aligned}$$

综上, 根据式 (4-16) 得到设备在一个大修周期内的可用度模型为:

$$\begin{aligned} A(T) &= \sum_{n=0}^{N-1} \int_{nT_p}^{(n+1)T_p} R_{Mp2}(t) dt / [\bar{t}_{Mf} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mf}(nT_p + T_p) + \bar{t}_{Mp1} \sum_{n=0}^{N-1} R_{Mp2}(nT_p + T_p) + \\ &\quad \bar{t}_{Mp2} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mp2}(nT_p + T_p) + \sum_{n=0}^{N-1} \int_{nT_p}^{(n+1)T_p} R_{Mp2}(t) dt + \bar{t}_{Mp3}] \end{aligned} \quad (4-18)$$

4.3.3.3 建立第 n 个预防性维修周期 T_p 内的费用模型

(1) 第 n 个预防性维修周期内设备因发生修复性故障进行维修时的期望费用 $\bar{C}_{nMf}(T_p)$ 为:

$$\bar{C}_{nMf}(T_p) = C_{Mf} \cdot F_{Mf}(nT_p + T_p)$$

(2) 第 n 个预防性维修周期内设备预防性维修的期望修费用 $\bar{C}_{nMp1}(T_p)$ 为:

$$\bar{C}_{nMp1}(T_p) = \bar{C}_{Mp1} \cdot R_{Mp2}(nT_p + T_p)$$

(3) 第 n 个预防性维修周期内发生更换性维修费用 $\bar{C}_{nMp2}(T_p)$ 为:

$$\bar{C}_{nMp2}(T_p) = \bar{C}_{Mp2} \cdot F_{Mp2}(nT_p + T_p)$$

综上, 依据式 (4-2) 得到设备在第 n 个预防性维修周期 T_p 内的平均维修费用模型为:

$$C_n(T_p) = \frac{\bar{C}_{nMf}(T_p) + \bar{C}_{nMp1}(T_p) + \bar{C}_{nMp2}(T_p)}{\bar{A}_n}$$

$$C_n(T_p) = \frac{C_{Mf} \cdot F_{Mf}(nT_p + T_p) + \bar{C}_{Mp1} \cdot R_{Mp2}(nT_p + T_p) + \bar{C}_{Mp2} \cdot F_{Mp2}(nT_p + T_p)}{[\bar{t}_{Mf} \cdot F_{Mf}(nT_p + T_p) + \bar{t}_{Mp1} \cdot R_{Mp2}(nT_p + T_p) + \bar{t}_{Mp2} \cdot F_{Mp2}(nT_p + T_p) + \int_{nT_p}^{(n+1)T_p} R_{Mp2}(t) dt]} \quad (4-19)$$

因此, 设备在一个大修周期 T 内的平均维修费用模型为:

$$C = [C_{Mf} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mf}(nT_p + T_p) + C_{Mp1} \sum_{n=0}^{N-1} R_{Mp2}(nT_p + T_p) + C_{Mp2} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mp2}(nT_p + T_p) + \bar{C}_{M\alpha}(T) + \bar{C}_{Mp3}] / [\bar{t}_{Mf} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mf}(nT_p + T_p) + \bar{t}_{Mp1} \sum_{n=0}^{N-1} R_{Mp2}(nT_p + T_p) + \bar{t}_{Mp2} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mp2}(nT_p + T_p) + \sum_{n=0}^{N-1} \int_{nT_p}^{(n+1)T_p} R_{Mp2}(t) dt + \bar{t}_{Mp3}] \quad (4-20)$$

4.3.3.4 一个大修周期 T 内的费用模型

(1) 一个大修周期内设备因发生修复性故障进行维修时的期望费用 $\bar{C}_{Mf}(T)$ 为:

$$\bar{C}_{Mf}(T) = C_{Mf} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mf}(nT_p + T_p)$$

(2) 一个大修周期内设备因预防性维修时的期望费用 $\bar{C}_{Mp1}(T)$ 为:

$$\bar{C}_{Mp1}(T) = C_{Mp1} \sum_{n=0}^{N-1} R_{Mp2}(nT_p + T_p)$$

(3) 一个大修周期内设备因发生更换性维修时的期望费用 $\bar{C}_{Mp2}(T)$ 为:

$$\bar{C}_{Mp2}(T) = C_{Mp2} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mp2}(nT_p + T_p)$$

则, 一个大修周期内设备的总维修费用模型 \bar{C} 为:

$$\begin{aligned}\bar{C} &= \bar{C}_{Mp1}(T) + \bar{C}_{Mf}(T) + \bar{C}_{Mp2}(T) + \bar{C}_{Ma}(T) + \bar{C}_{Mp3} \\ &= C_{Mf} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mf}(nT_p + T_p) + C_{Mp1} \sum_{n=0}^{N-1} R_{Mp2}(nT_p + T_p) + \\ &\quad C_{Mp2} \sum_{n=0}^{N-1} F_{Mp2}(nT_p + T_p) + \bar{C}_{Ma}(T) + \bar{C}_{Mp3}\end{aligned}$$

公式 (4-17) ~ (4-20) 中:

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda_{n+1}(t) dt\right], \quad R_{Mp2}(t) = \exp\left[-\int_0^t P_{Mp2} \lambda_{n+1}(t) dt\right],$$

$$R_{Mp2}(nT_p + T_p) = \exp\left[-\int_0^{T_p} P_{Mp2} \lambda_{n+1}(t) dt\right]$$

$$F_{Mf}(nT_p + T_p) = 1 - \exp\left[-\int_0^{T_p} P_{Mf} \lambda_{n+1}(t) dt\right],$$

$$F_{Mp2}(nT_p + T_p) = 1 - \exp\left[-\int_0^{T_p} P_{Mp2} \lambda_{n+1}(t) dt\right],$$

$$h_{i+1}(t) = b_i h_i(t + a_i T_p), (i = 0, 1, 2, \dots, N-1), \quad a_i = \frac{i}{3i+7}, b_i = \frac{12i+1}{11i+1}$$

4.3.3.4 优化目标模型

运用数学公式 (4-17) 和 (4-19) 可以确定设备在一个预防周期内的最佳计划型维修周期, 其优化目标模型^[9]为:

$$\min C_n(T) \quad \text{s.t.} \quad A_n \geq A_{min} \quad (4-21)$$

运用数学公式 (4-18) 和 (4-20) 可以确定设备在一个预防周期内的最佳计划型维修周期, 其优化目标模型^[9]为:

$$\min C(T) \quad \text{s.t.} \quad A \geq A_{min} \quad (4-22)$$

4.3.3.5 可用度约束下经济性最优模型分析

根据各个参数的取值不同, 以上模型又可以细分为以下几个特殊模型^[9]:

(1) 令 $F_{Mf}(t) = 0, F_{Mp2} = 1, n=1$

以上模型演变为不可修复零件的可用度模型和费用模型;

(2) 令 $F_{Mf}(t) = 0, F_{Mp2} = 1, n \neq 1$

以上模型演变为大修周期内只发生更换预防维修的可用度模型和费用模型;

(3) $F_{Mf}(t) = 1, F_{Mp2} = 0, n=1$

以上模型演变为一个预防性维修周期内只发生修复性和预防性维修的可用度模型和费用模型;

(4) $F_{Mf}(t) = 1, F_{Mp2} = 0, n \neq 1$

以上模型演变为一个大修周期内只发生修复性和预防性维修的可用度模型和费用模型。

4.4 动车组零件分析与应用

4.4.1 零件状态维修周期优化

取动车组六个部件构成, 每个部件的故障率参数均通过 Weibull++7 计算得到; 假定设备的运行时间 360d, 停机损失费用为 550 元/d, 具体参数见表 4-1^[23]。

表 4-1 部件的参数
Table4-1 Parameter of Assembly

部件	η_p	β_p	C_{ocm}	C_{ppm}	C_{pr}	L_p	q_p	τ_{ppm}	τ_{pr}	R_{min}
1	54	1.8	300	120	450	500	0.010	0.4	0.2	0.70
2	100	2.5	450	200	1000	1500	0.005	0.6	0.4	0.75
3	108	3.2	680	300	1500	2000	0.001	0.5	0.3	0.80
4	150	3.1	200	80	260	320	0.020	0.3	0.1	0.60
5	20	2.0	50	30	200	230	0.010	0.6	0.4	0.60
6	70	1.5	700	240	1100	1500	0.006	0.9	0.5	0.80

根据以上参数对各部件单独进行以可靠性为中心非定期的预防性维修, 总费用为 54755 元。将以上参数带入本文的优化模型, 该模型的求解利用 Matlabr2008b 编程实现, 计算结果如表 4-2 所示。采用本文的优化方法总维修费用为 44108 元, 节约成本率 19.4%。

表 4-2 模型计算结果

Table4-2 Result of Model Calculation

Δt	0	1	2	3	4	5	6	7	8
总维修费用/元	52613	50781	49002	46234	44250	44108	44713	49096	53607
节约率%	3.9	7.25	10.5	15.6	19.2	19.4	18.3	10.3	2.09

最优费用下的各个部件的最优维修次数, 见表 4-3。

表 4-3 最优维修次数

Table4-3 Number of Best Maintenance

零件编号	1	2	3	4	5	6
N	5	5	5	4	6	6

4.4.2 零件计划维修周期优化

根据 4.3.3.4 模型分析中的第一种情况举例。铁路局对动车组某零部件的各类维修费用和维修时间进行统计, 使用 ReliaSoft 的 Weibull++7 求得的分布模型参数见表 4-4^[9]。

表 4-4 零件维修费用和参数值

Table 4-4 Maintenance Fee and Parameter of Component

γ_p	η_p	β_p	\bar{C}_{Mf}	C_{Mp1}	C_{Mp2}	\bar{t}_{Mf}	\bar{t}_{Mp1}	\bar{t}_{Mp2}	P_{Mf}	P_{Mp2}	A_{min}
2263.31	429.56	1.913	1760	300	3762	8.5	36	58	0.8	0.2	0.95

根据模型公式 (4-17)、(4-18)、(4-21)，应用 Matlab 编程运行得出零件在可用度 0.95 约束下的费用曲线如图 4-3 所示。由图可见，该增压器运行到大约 115 天应进行集中修，维修费用最低为 187.965 元/天。

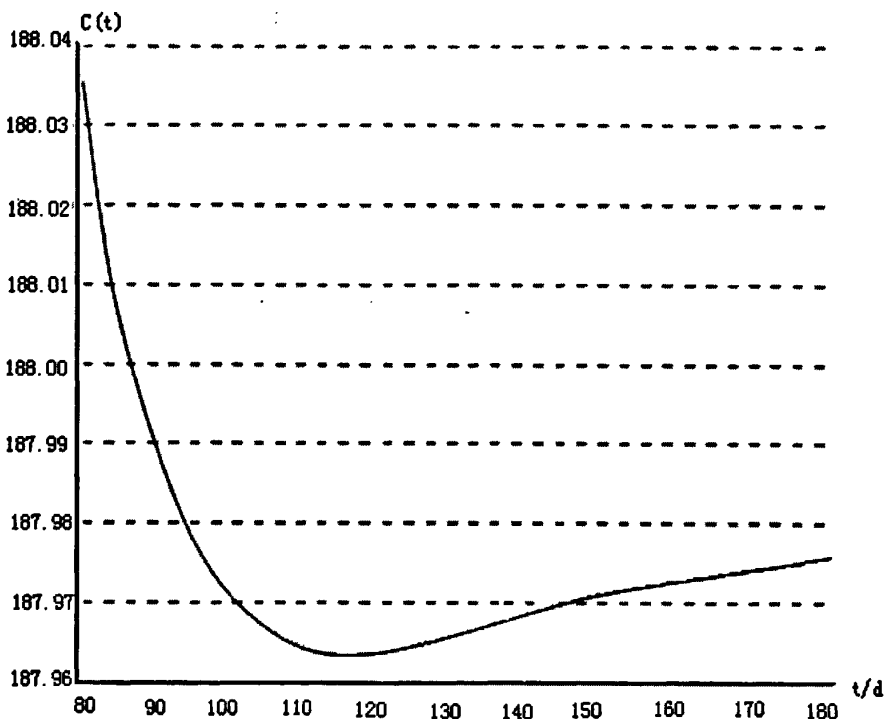


图 4-3 维修费用曲线

Fig4-3 Maintenance Fee Curve

4.5 本章小结

本章根据了复杂设备在运行过程中故障类型多样的特性，依据零件本身维修方式的不同和故障率的大小，分层次建立了不同重要度零部件不同维修方式下的检修周期模型。动车组零部件基于可靠性分析的前提下，状态修零部件以“可靠性为中心”建立了经济性优化模型，计划维修零部件以有效度约束条件建立了经济性优化模型。最后通过实例分析，验证了模型的正确性，为第五章决策支持系统的实现奠定了理论基础。

5 动车组零部件维修周期决策支持系统的设计

5.1 概述

本论文主要是开发关于动车组零部件检修周期决策支持系统。在第二章确立了FSI的维修方式、第三章确立了故障分布函数、第四章确立了维修周期优化模型的基础上,本章采用LabVIEW、Access、Matlab以及Excel混合编程,对Access数据库中的数据进行输入和查询,并通过Weibull++7对故障数据进行分析求解,根据优先级确定故障数据所遵循的最优分布,利用Matlab对故障数据进行周期优化模型求解,并将最终优化结果存储在Excel中。本章建立的维修周期决策支持系统将把数据处理、分析、计算和优化过程全部串连起来,用户可以方便地进行输入和查询。本文决策系统主要包含故障数据输入、故障记录查询、维修费用查询和维修周期六个模块,具体如图5-1所示。

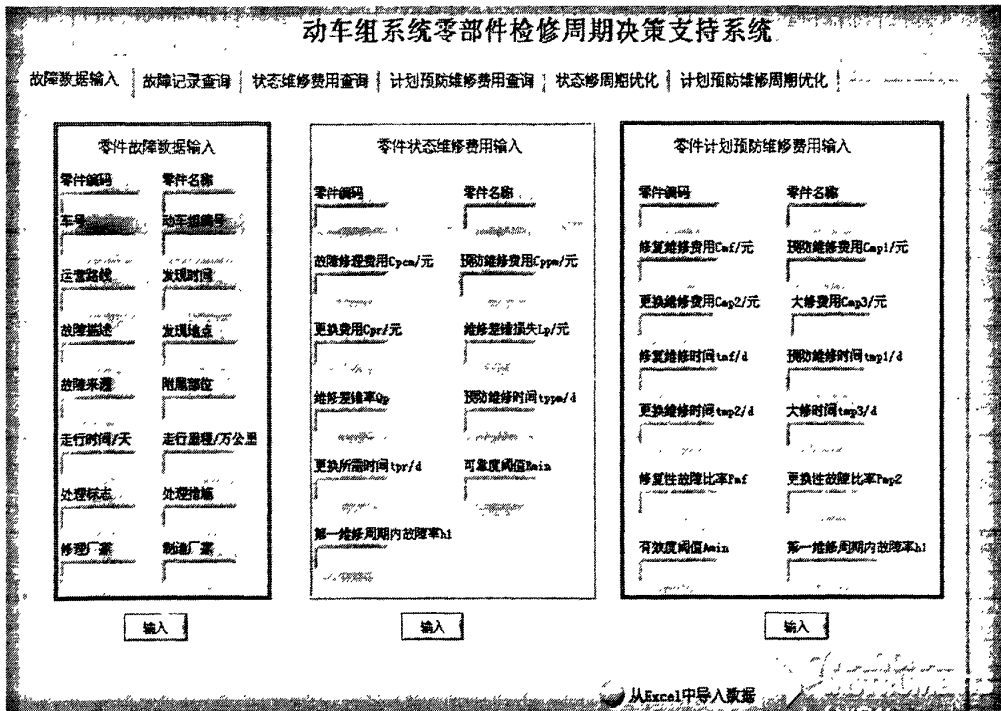


图 5-1 系统总体结构

Fig.5-1 Whole System Structure

5.2 决策支持系统

5.2.1 决策支持系统的概念

决策支持系统 (Decision Support System DSS) [35] 是以管理科学、运筹学、控制论和行为科学为基础, 以计算机信息处理和计算机模拟、仿真为手段, 综合利用现有的各种数据、信息和模型, 辅助决策者解决非结构化或半结构化决策问题的人机交互信息系统。DSS 是一个具有很大发展潜力的领域, 其应用也遍及许多领域。随着信息的复杂多变, DSS 也在不断地完善以适应新信息时代决策的需求。

DSS 是 80 年代迅速发展起来的新型计算机学科。70 年代初由美国 M. S. Scott Morton 在《管理决策系统》一文中首先提出决策支持系统的概念。就像计算机领域中许多其它术语一样, 人们至今未能对 DSS 给出一个严格的精确的定义。

5.2.2 决策支持系统的结构

1980 年 Sprague 提出了决策支持系统的“三部件”结构形式, 即人机交互系统、模型库系统、数据库系统。其结构如图 5-2 所示, 这种结构是为达到 DSS 目标的要求而形成的。

5.2.2.1 人机交互系统

人机交互系统是决策支持系统与用户之间的交互界面。用户通过“人机交互系统”控制实际决策支持系统的运行, 决策支持系统既需要用户输入必要的信息和数据, 同时要向用户显示运行的情况及最后的结果。

目前, 计算机中常见的人机界面技术有: 菜单、窗口; 命令语言和自然语言; 多媒体及可视化技术。

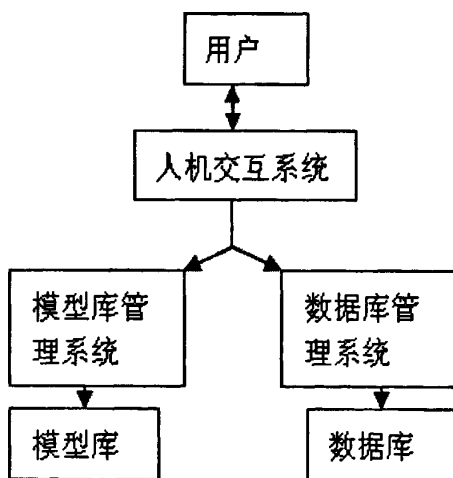


图 5-2 决策支持系统“三部件”结构

Fig.5-2 “Three Parts” of DSS

系统对输入的数据和信息,要转换成系统能够理解和执行的内部表示形式。当系统运行结束后,应该把系统的输出结果按一定的格式显示或者打印给用户。

本论文的 DSS 系统中的人机交互系统,运用 LabVIEW 编程,作为系统的主界面以及多种程序的接口。

5.2.2.2 模型库系统

模型库系统由模型库和模型库管理系统组成。模型库用来存放模型,模型不同于数据,它在计算机内以程序的形式存在或以某种算法存在,如输入、输出、计算的句子,分为数据处理、图形图像、数学、报表模型等四个类别。

模型库管理系统管理模型库。为了适应模型的静态与动态特征,模型库管理系统有两方面的功能,一类是类似数据库管理系统的静态管理功能,二是模型的动态管理功能。

模型在计算机中表现为程序形式。用计算机语言编制的模型程序分为源程序和目标程序。这两种状态与计算机的编辑功能和语言的编译功能相联,这就有必要把编辑功能和编译功能以特定的形式纳入模型管理系统中。

本论文的 DSS 系统模型主要有第三、第四章确立的三个数学模型:可靠性分布模型、状态修零部件维修周期优化模型、计划修零部件维修周期优化模型,使用 Matlab 编写。

5.2.2.3 数据库系统

数据库系统由数据库和数据库管理系统组成。

数据库用来存储大量数据,一般组织成易于进行大量数据操作的形式,典型的数据组织模型有网络模型、层次模型、关系模型等形式。数据库由数据库管理系统来维护与管理。

数据库管理系统必须具有数据库建立、删除、修改、维护,数据存储、检索、排序、索引、统计等功能。

一般来说,数据库管理系统应提供一套语言系统供用户使用数据库或提供与某种高级程序设计语言的接口。

本论文的 DSS 系统使用 Access 数据库存储零件故障数据,并且提供与 LabVIEW 主程序的接口。

5.2.2.4 动车组零部件维修周期决策支持系统结构

根据一般的 DSS 系统结构图,动车组零部件分层次检修周期决策支持系统结构如图 5-3 所示。

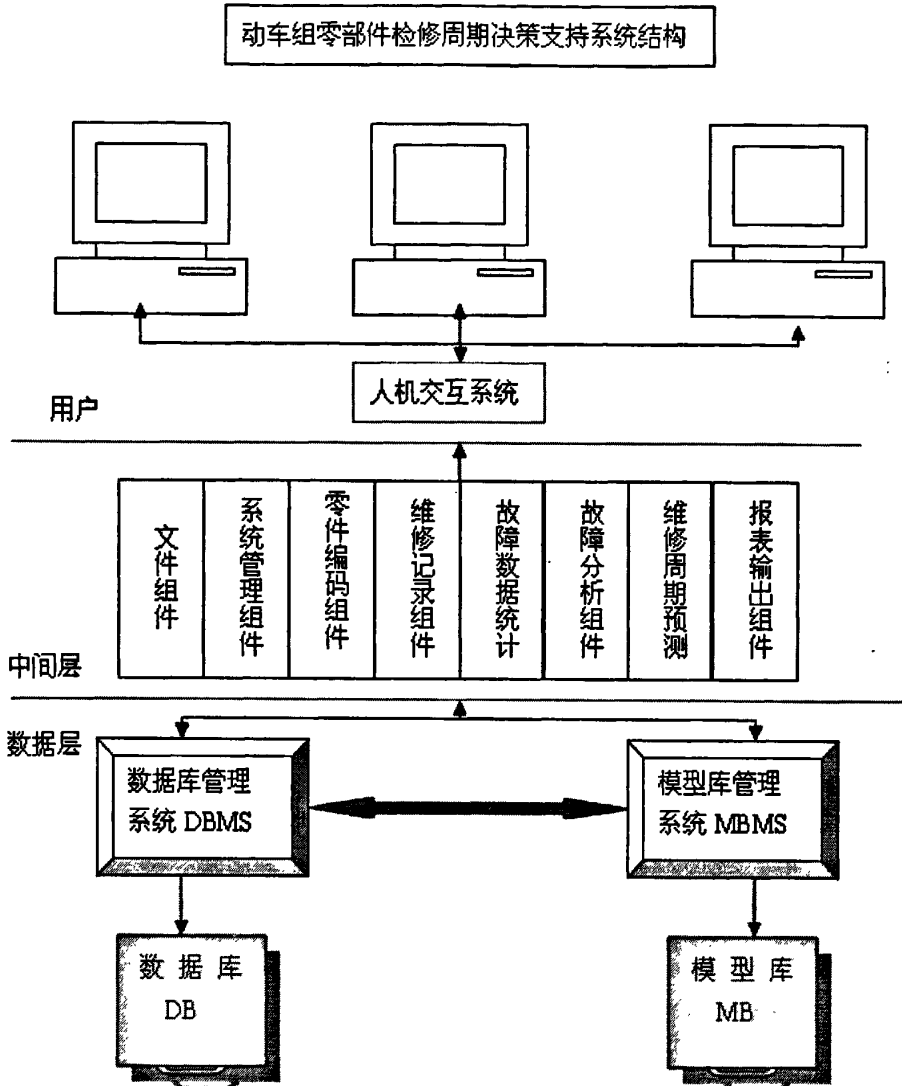


图 5-3 动车组零部件检修周期决策支持系统结构图

Fig.5-3 EMU Multi-components Maintenance Decision Support System Chart

5.3 数据库的建立

数据库领域中最常见的模型有：层次模型、网状模型、关系模型和面向对象模型。其中，关系数据库以便于修改数据库结构、逻辑化表示数据、高准确性而得到了广泛应用。

关系型数据库产品很多，较为著名的有 Oracle、SQL Server、Sybase、Access 等^[7]。美国 Microsoft 公司 1994 年推出的 Access 以存储方式单一、界面友好、易操作、强大的网络功能赢得了广泛赞誉。因此，本文同样采用 Access 关系型数据库。

5.3.1 表及表关系的建立

表是 Access 数据库的基础，是存放数据的地方。本论文建立 EMU.mdb 的数据库，该数据库有两个表：零件故障记录表和零件维修费用表。

(1) 零件故障记录表

该表主要包括零件编码、零件名称、制造厂家、车号、动车组编号、运营路线、发现时间、发现地点、故障描述、故障来源、附属部位、走行时间/天、走行里程/万公里、处理标志、处理措施、修理厂家、制造厂家，如图 5-4 所示。

字段1	字段17	字段2	字段3	字段4	字段5	字段6	字段7
零件编码	零件名称	车号	动车组编号	运营路线	发现时间	发现地点	故障描述
LZ001	轴承	首车	CRH2	京沪线	09-04-28	运行	故障
JZQ001	减振器	首车	CRH2	京沪线	09-04-30	小修	未故障
CZ001	车轴	首车	CRH2	京沪线	09-05-03	运行	故障
TH001	齿轮箱	首车	CRH2	京沪线	09-05-11	运行	故障
ZDF	制动盘	首车	CRH2	京沪线	09-05-28	运行	故障
JZQ001	轴承	首车	CRH2	京沪线	09-06-07	运行	故障

图 5-4 零件故障记录表

Fig.5-4 Parts Fault Record table

(2) 零件修理费用表

a) 状态修——字段有：零件编码、零件名称、故障修理费用 C_{pcm} /元、预防维修费用 C_{ppm} /元、更换费用 C_{pr} /元、维修差错造成的损失 L_p /元、维修差错概率 q_p 、预防维修时间 τ_{ppm} /d、更换维修时间 τ_{pr} /d、可靠度阈值 R_{pmin} 、第一个周期内的故障率 h ，如图 5-5 所示。

字段1	字段2	字段3	字段4	字段5	字段6	字段7	字段8
零件编码	零件名称	故障修理费用 C_{pcm} /元	预防维修费用 C_{ppm} /元	更换费用 C_{pr} /元	维修差错损失 L_p /元	维修差错率 q_p	预防维修时间 τ_{ppm} /d
CZ001	车轴	300	120	450	500	0.01	0.4
PZ001	喷嘴	160	20	230	400	0.005	0.5
TM001	踏面	420	160	1500	300	0.003	0.5
LZ001	轴承	280	110	500	100	0.004	0.3
JZQ001	减振器	600	260	1200	400	0.001	0.6

图 5-5 零件状态修费用记录表

Fig.5-5 Parts Plan Maintenance Costs table

b) 计划预防修——字段有：零件编码、零件名称、平均故障后恢复性维修费用 \bar{C}_{Mf} /元、平均故障后更换维修费用 \bar{C}_{Mp2} /元、平均预防性维修费用 \bar{C}_{Mp1} /元、平均大修费用 \bar{C}_{Mp3} /元、第一个维修周期内的故障率 h ，如图 5-6 所示。

编号	字段1	字段2	字段3	字段11	字段4	字段5
2	PY001	排烟管	170	20	350	3600
3	LQ001	滤清器	240	30	400	4200
4	ZT001	增压器	1000	200	2800	30000
5	JSX001	变速箱	350	50	1700	12000

图 5-6 零件状态修费用记录表

Fig.5-6 Parts Condition Maintenances Costs Table

表关系建立之后，关系随之存在，不用重复定义。本数据库中表与表之间是一对多的关系，如图 5-7 所示。

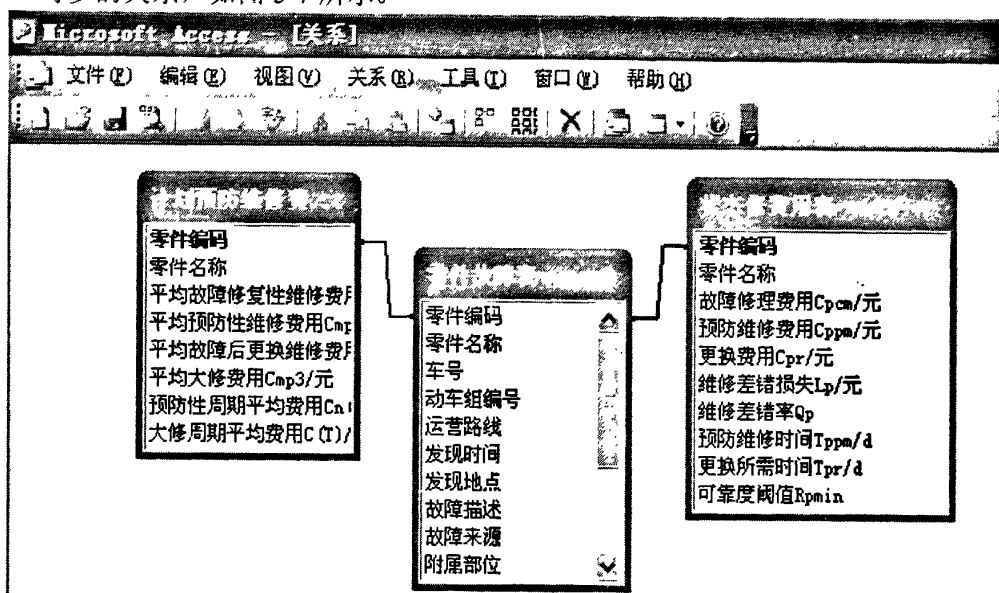


图 5-7 关系图

Fig. 5-7 Relation Chart

5.3.2 窗体的建立

窗体是用户和 Access 应用程序之间的主要接口，用于实现显示和编辑数据信息，还有控制应用程序流程的功能。在窗体中数据是直接展现出来的，尤其是一些图形信息。本数据库有三个窗体：零件故障记录、零件状态修费用窗体、零件计划预防维修费用模型，其内容与所见表的模块相同，具体如图 5-8、图 5-9、图 5-10 所示。

零件故障记录窗体			
零件编码:	LZ001	零件名称:	轴承
车号:	首车	动车组编号:	CRH2
运营路线:	京沪线	发现时间:	09-04-28
故障描述:	故障	发现地点:	运行
故障来源:	检测	附属部位:	轮对
走行时间/天:	98	走行里程/万公里:	88.5
处理标志:	未处理	处理措施:	观察
修理厂家:	北京车辆段	制造厂家:	青岛四方厂

图 5-8 零件故障记录窗体

Fig.5-8 Part Fault Record Window

零件状态维修费用窗体			
零件编码:	CZ001	零件名称:	车轴
故障修理费用 $C_{p,cm}$ /元:	300	预防维修费用 C_{ppm} /元:	120
更换费用 C_{pr} /元:	450	维修差错损失 L_p /元:	500
维修差错率 Q_p :	0.01	预防维修时间 t_{ppm} /d:	0.4
更换所需时间 t_{pr} /d:	0.2	可靠度阈值 R_{min2} :	0.6
第一周期内故障率 h_1 :			

图 5-9 状态修零件费用窗体

Fig.5-9 Condition Maintenances Part Costs Window

零件计划预防维修费用窗体			
零件编码:	BSX001	零件名称:	变速箱
修复维修费用 C_{af} /元:	350	预防维修费用 C_{ap1} /元:	50
更换维修费用 C_{ap2} /元:	1700	大修费用 C_{ap3} /元:	12000
修复维修时间 t_{af} /d:	2.5	预防维修时间 t_{ap1} /d:	1.5
更换维修时间 t_{ap2} /d:	10.0	大修时间 t_{ap3} /d:	15.0
修复性故障比率 P_{mf} :	0.92	更换性故障比率 P_{mp2} :	0.08
有效度阈值 A_{min} :	0.8	第一维修周期故障率 h_1 :	

图 5-10 计划预防维修零件费用窗体

Fig.5-10 Plan Maintenances Part Costs Window

5.3.3 查询的建立

查询是一种提问，利用查询可以查看、更改以及分析数据，也可以将它们作为窗体和报表的记录来源。查询可以从一个或多个表中，查找出有用的数据。此外，也可以根据某个查询再创建新的查询。

本数据库使用的是参数查询，共有几个查询，分别为：零件故障按编码查询、零件故障按日期查询、零件故障按维修费用查询。

(1) 按编码查询

输入零件编码，即可查询该零件的故障记录，如图 5-11 所示。

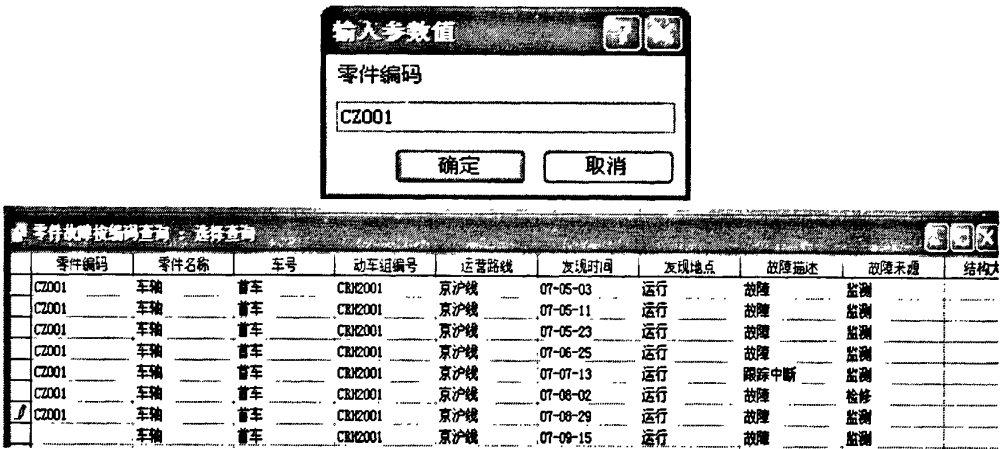


图 5-11 参数查询及结果

Fig.5-11 Parameter Demand and Result

(2) 按日期查询

输入查询的起始时间和终止时间就可以查询在此期间的所有的故障记录，如图 5-12 所示。

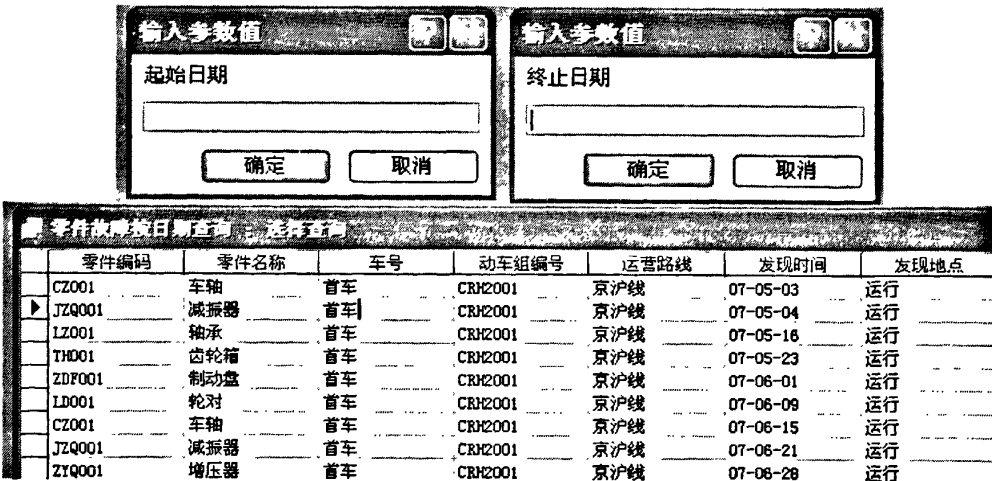


图 5-12 输入参数及查询结果

Fig.5-12 Input Parameter and Demand Result

(3) 费用的查询

复杂系统中的不同零部件有着不同的重要度等级，由此确定的维修方式也不同，状态修的维修费用和计划修的维修费用的查询过程与零件编码相近，可以参考前面方法进行查询。

5.4 系统的开发

本系统的主要功能是将存有大量故障数据的 Excel 文件通过 Access 数据库进行存储，以 LabVIEW 为中介运用 Matlab 对动车组故障零部件的维修周期优化模型进行计算，从可靠性、经济性、有效性确定出不同重要程度零部件最优的维修间隔。

5.4.1 系统的总体框架

Access 数据库具有强大的数据管理功能，用户可以方便地存储、检索、查询和管理其中的数据，但是其界面的编辑功能以及数据的复杂计算功能比较欠缺。而 LabVIEW 和 Matlab 所具有的优势可以很好的弥补 Access 以上缺陷。

LabVIEW 是美国 NI 公司推出一种非常好的面向对象的图形编程语言（G 语言），它大大简化了过程控制和测试软件的开发^[7]。LabVIEW 通过强大的硬件接口能力，可以方便地与其他系统通信，采集数据。但在各种算法的支持方面，LabVIEW 力不从心。

Matlab 具有 LabVIEW 不可比拟的强大的计算能力，完备的工具箱，以及复杂的算法。它提供了强大的矩阵运算和图形处理能力，编程效率高，但其数据输入、硬件控制方面比较繁琐。

Access、LabVIEW、Matlab 分别以强大的存储功能、良好的接口功能、完备的计算功能优势^[36-37]，三者有利地结合形成优势互补，各施所长，从而为本系统的建立奠定了技术支持。系统的总体结构如图 5-13 所示。

5.4.2 LabVIEW 和 Access 的接口

5.4.2.1 LabVIEW 实现数据库访问技术

LabVIEW 和 Access 的接口可以满足用户在 LabVIEW 界面内根据输入的条件，将数据从 Access 的表中提取出来，并显示在界面上。但是 LabVIEW 本身不具备数据库访问功能，可以采用以下几种方法实现^[39]：(1)利用 LabVIEW 的 Active ADO

控件，这种方法需要用户对 Microsoft ADO 控件以及 SQL 语言有较深的了解，这让部分用户望而生畏；(2) 利用 LabVIEW SQL Toolkit 进行访问，但是这种附加工具包价格不菲，很多用户购买不起。

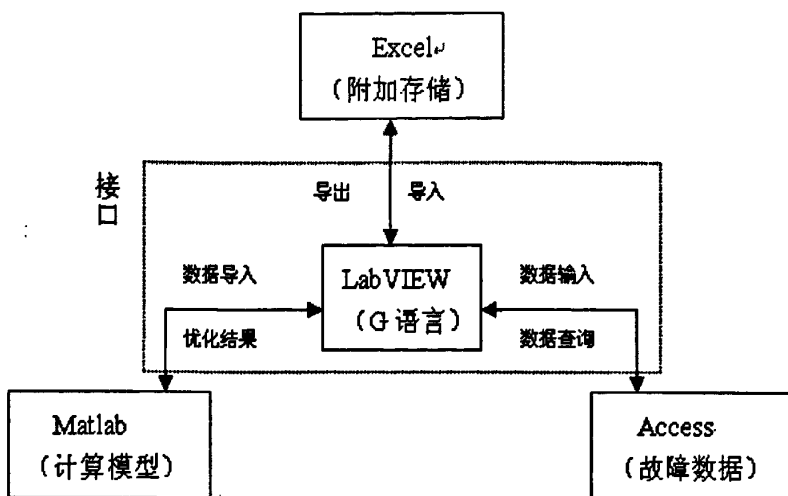


图 5-13 系统总体结构图

Fig.5-13 Software System Structure Picture

本文采用 NI 公司开发的一个免费的、多数据库平台的 LabVIEW——LabSQL 工具包。LabSQL 的优点是操作简单，不熟悉 SQL 语言的用户也可以很容易地实现数据库的访问。

在使用 LabSQL 之前，首先需要在 Windows 操作系统中的 ODBC 数据源中创建一个数据源名，英文缩写为 DSN，具体步骤如下^[7]：

(1) 打开控制面板中的管理工具，选择“数据源 (ODBC)”弹出 ODBC 数据源管理器。

(2) 选择“系统 DSN”，在右侧的选项操作中选择“添加 (D)…”按钮，在打开的创建新数据源窗口中选择“Microsoft Access Driver (*.mdb)”，并单击“完成”按钮。

(3) 在随后出现的“ODBC Microsoft Access 安装”对话框中（如图 5-14 所示）的“数据源名”一栏中创建自己的 DSN 名称“DB”，并利用下面的“选择”按钮选择需要利用 LabSQL 访问的数据库，单击“确定”按钮^[40]。

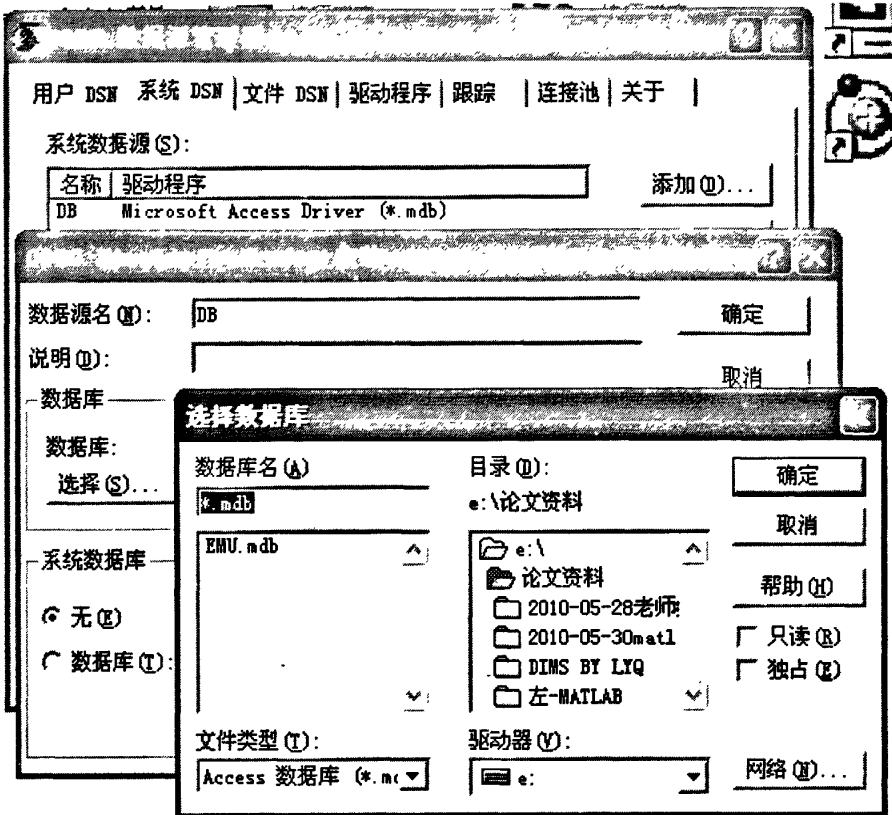


图 5-14 安装对话框

Fig.5-14 Installation Dialog Box

完成后可以在“我的电脑\控制面板\管理工具\数据源(ODBC)”中的“系统 DSN”里看到刚才创建的 DSN，以后 LabSQL 就可以利用这个 DSN 访问与之相关联的数据库，如图 5-15 所示。

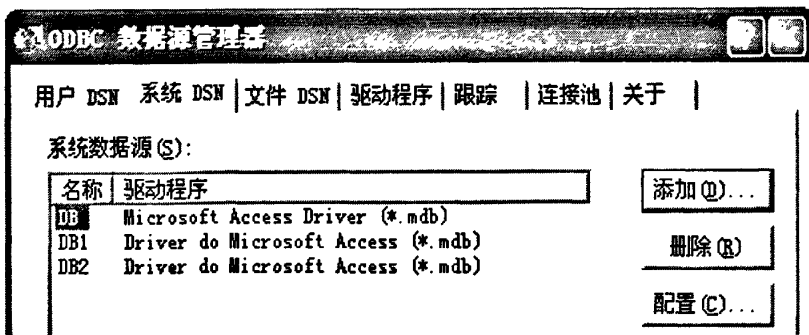


图 5-15 ODBC 数据管理器

Fig.5-15 ODBC Data Manager

5.4.2.2 LabVIEW实现数据库输入及查询功能

LabSQL VIs 含有 10 个 Command VIs、10 个 Connection VIs、22 个 Recordset VIs 和 2 个 TopLevel VIs。故障记录的查询、修改、添加以及删除都是通过以上子 VI 来实现，具体步骤如图 5-16 所示：

(1) 利用 ADO Connection Creat.vi 创建与数据库的连接, 并由 ADO Connection Open.vi 打开需要数据库。数据库由字符串指定“DSN=DB”。“DB”是在管理工具数据源中创建的 DSN, 以后的操作都是以此来完成的;

(2) 利用 SQL Execute.vi 执行 SQL 语句^[41], 并将结果输出;

(3) 利用 ADO Connection Close.vi 断开与数据库的连接。

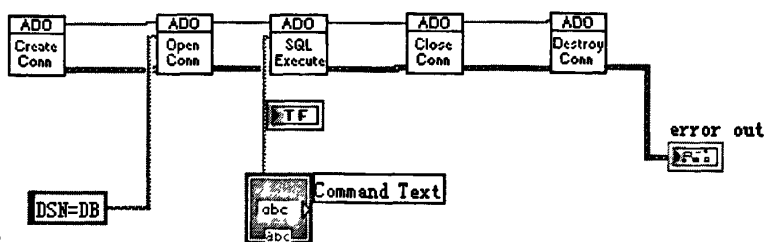


图 5-16 SQL 语句执行程序框图

Fig.5-16 Block of Execute SQL

查询、输入的 SQL 语句为:

INSERT INTO 零件故障记录, VALUES (连接输入数据);

SELECT*FROM 零件维修费用, WHERE 零件编码= '连接输入数据'。

5.4.3 LabVIEW 和 Matlab 的接口

5.4.3.1 LabVIEW和Matlab的数据传输

Matlab 是 MathWorks 公司开发的“演算纸”, Matlab 以其强大的科学计算能力、大量稳定可靠的算法库, 已成为数学计算方面的计算标准。本文 Access 中的数据经过 LabVIEW 传输到 Matlab 中进行计算, 计算结果也将通过 LabVIEW 显示在人机交互界面上。因此, LabVIEW 和 Matlab 的接口关系着优化模型的成败。

要圆满地完成数据的传输, 需要利用 LabVIEW 和 Matlab 的混合编程来实现。本文使用 Matlabr2008b Script 节点的方法在 LabVIEW8.2 的环境下对本系统进行了开发。下面介绍 Matlab Script 节点实现混合编程的步骤^[42]。

(1) 打开 LabVIEW 的程序面板, 通过函数(数学)脚本与公式-Matlab Script Nodes, 打开 Matlab Script 控件。

(2) 添加 Matlab 脚本程序, 将调试好的 Matlab 程序通过在 Matlab Script 控件的节点边框上点击右键, 在弹出的菜单中选择“Import”, 程序导入脚本节点到此结束。

(3) 定义 LabVIEW 与 Matlab 的传递函数及其数据类型, 连接并仿真。

在该软件的 Mathscript 节点中, 状态修一共有 12 个输入, 将数据从 LabVIEW

输入 Matlab, 它们分别是 n -系统中零件的个数, 数组 h -零件第一个维修周期的故障率, 数组 ccm -零件非预期故障维修费用, cpm -零件一次预防性维修费用, 数组 cr -零件更换维修费用, 数组 cl -零件维修差错费用, 数组 q -维修差错发生的概率, 数组 tpm -零件预防性维修需要时间, 数组 tpr -零件更换维修需要的时间, R -零件可靠度阈值, $tend$ -运行时间范围, $cpark$ -停机损失费用。

状态修共有三个输出: $cpro$ -优化前设备一年的维修费用, $cbeh$ -优化后设备一年的维修费用, mr -优化率, 字符数组 $book$ -优化方案表。具体如图 5-17 所示。

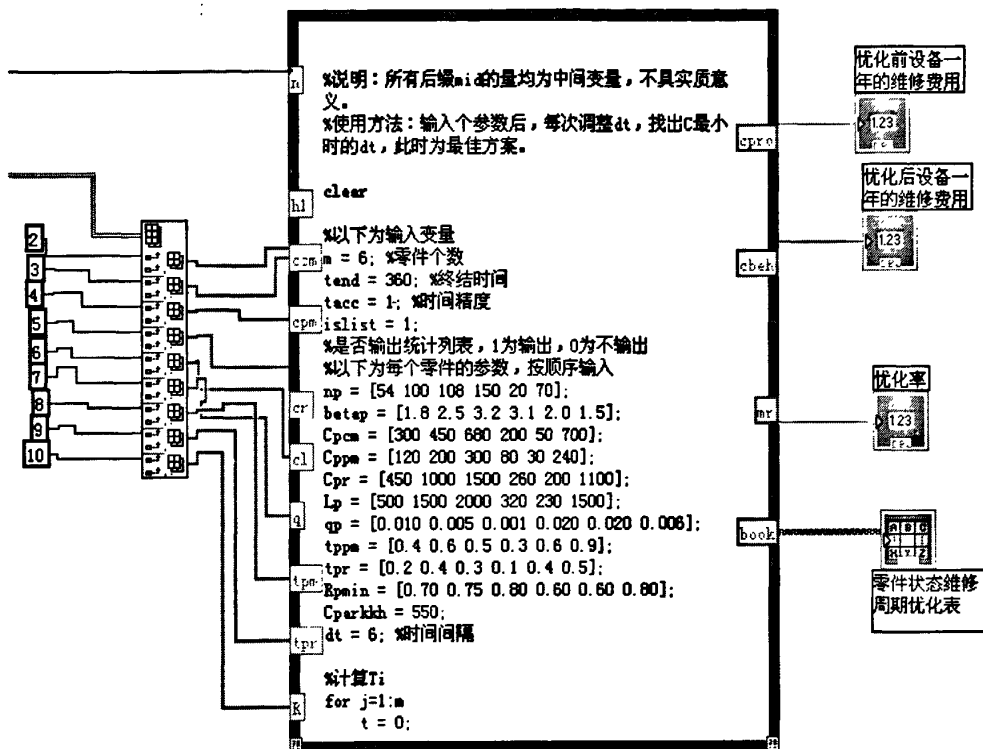


图 5-17 Mathscript 节点

Fig. 5-17 Mathscript Node

同样, 在 Mathscript 节点中, 计划预防维修共有 13 个输入, 它们分别是 n -系统中零件的个数, h -零件第一个维修周期的故障率, cmf -零件非预期故障维修费用, $cmp1$ -零件平均预防维修费用, $cmp2$ -零件平均更换维修费用, 数组 $cmp3$ -平均大修费用, tmf -平均故障后恢复性维修时间, $tmp1$ -平均预防性维修时间, $tmp2$ -平均故障后更换维修时间, $tmp3$ -平均大修时间, pmf -修复性故障发生比率, $pmp2$ -更换性故障发生比率, $Amin$ -可用度阈值。

计划预防维修共有三个输出, $cpro$ -优化前设备单位维修费用, $cbeh$ -优化后设备单位维修费用, MR -优化率, 字符数组 $book$ -优化方案表。表示方法与上述状态修类似, 在此不再赘述。

5.4.3.2 LabVIEW和Matlab的混合编程

以往对 Access 中的故障数据都是直接导入 Matlab, 利用 Matlab 编程实现对中位秩次公式的求解, 再在 Matlab 编程环境中, 利用相关系数法和最小二乘法分别求出三参数威布尔分布函数的位置参数、尺度参数和形状参数值。通过第二章的分析, 对故障数据引入 Weibull++7 软件, 利用该软件可以非常方便的求解故障函数的各个参数, 而且根据优先级不同, 找到最匹配的分布函数, 而不再单一的利用“万能公式”——威布尔分布进行描述。从而, 也大大地减少了运算量, 同时提高了计算精度, 更加精确的描述了不同零部件在各自工作环境下所遵循的故障分布函数。

本节主要介绍用 Matlab 编程求解的过程, 不同维修方式的零部件检修周期的确立流程见附录。

- a) 复杂设备状态修维修周期的确立流程 (见附录 B);
- b) 复杂设备计划预防维修周期确立流程 (见附录 C)。

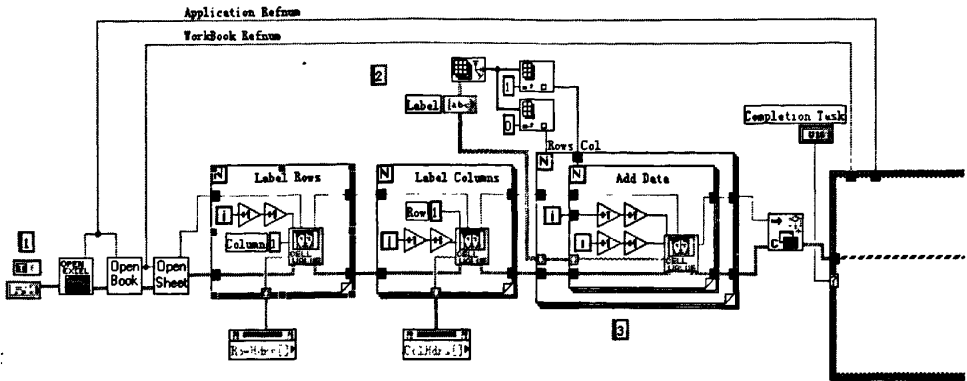
5.4.4 LabVIEW 和 Excel 的接口

为了方便用户查阅、保存、打印等, 还需要将 LabVIEW 中的优化周期表转存到 Excel 中, 因此, 需要解决 LabVIEW 和 Excel 的数据传输问题, 即接口问题。

5.4.4.1 由 LabVIEW 导入 Excel^[7]

LabVIEW 和 Excel 之间的数据传输^[42]主要通过 ActiveX 控件, 为了便于操作性和代码重用性, LabVIEW 把针对对象 Application、Workbook、Worksheet、Range 的操作分别组装成为 Open Excel.vi、Open Workbook.vi、Open Worksheet.vi 和 Set Cell Value.vi 等一系列子 vi。Open Excel.vi 打开 Excel 应用程序, Open Workbook.vi 打开 Excel 工作簿、Open Worksheet.vi 打开 Excel 工作表, Set Cell Value.vi 对单元格进行操作。

如图 5-18 所示, 1 框中依次连接 Open Excel.vi、Open Workbook.vi 和 Open Worksheet.vi, 打开 Excel 一个工作表, 2 框将零件维修周期优化方案表中元素依次取出, 再通过 3 框中的 Set Cell Value.vi, 写入到 Excel 表格中。单击“导入到 Excel”, 即可完成此操作。

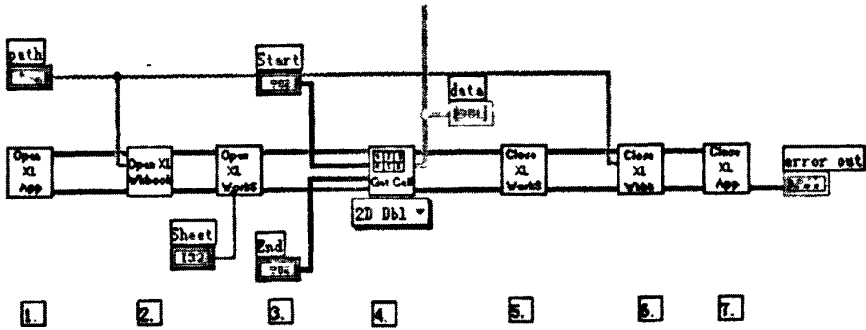


5-18 LabVIEW 导入 Excel 框图

Fig. 5-18 Importing Data from LabVIEW to Excel

5.4.4.2 由Excel导入LabVIEW

Excel 和 LabVIEW 之间的数据传输^[43]如图 5-19 所示。



5-19 Excel 导入 LabVIEW 框图

Fig. 5-19 Importing Data from Excel to LabVIEW

- (1) 打开 Excel 文件；
- (2) 打开 Excel 工作簿；
- (3) 打开 Excel 工作表；
- (4) 指定要输入的 Excel 的起始类和终止列，输出结果；
- (5) 关闭 Excel 工作表；
- (6) 关闭 Excel 工作簿；
- (7) 关闭 Excel。

5.5 决策支持系统的实现

进入图 5-1 的主界面后，运行程序，会弹出对话框：“Please select an MDB file”，让用户选择数据库，然后选择在第五章刚建的数据库“EMU.mdb”。

5.5.1 数据输入模块

点击故障数据输入选项卡，即可进行故障数据的录入，如图 5-20 所示。该模块分为三个部分，分别是零件故障数据输入、零件状态维修费用输入和零件计划

预防维修费用输入。

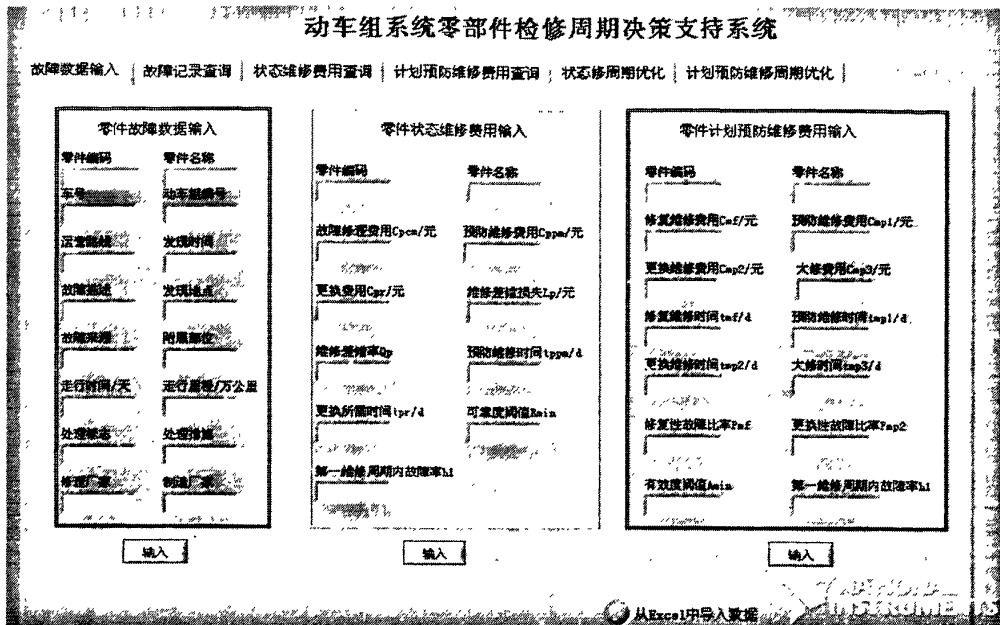


图 5-20 数据输入模块

Fig.5-20 Data Input Module

5.5.2 故障记录查询模块

点击“故障记录查询”选项卡，即可进入查询界面。只要输入“零件编码”或“零件名称”中的任意一个，点击“查询”，即可得到满足要求的记录。同时，输入“起始时间”和“终止时间”，可查询该时段的零件故障记录，如图 5-21 所示。

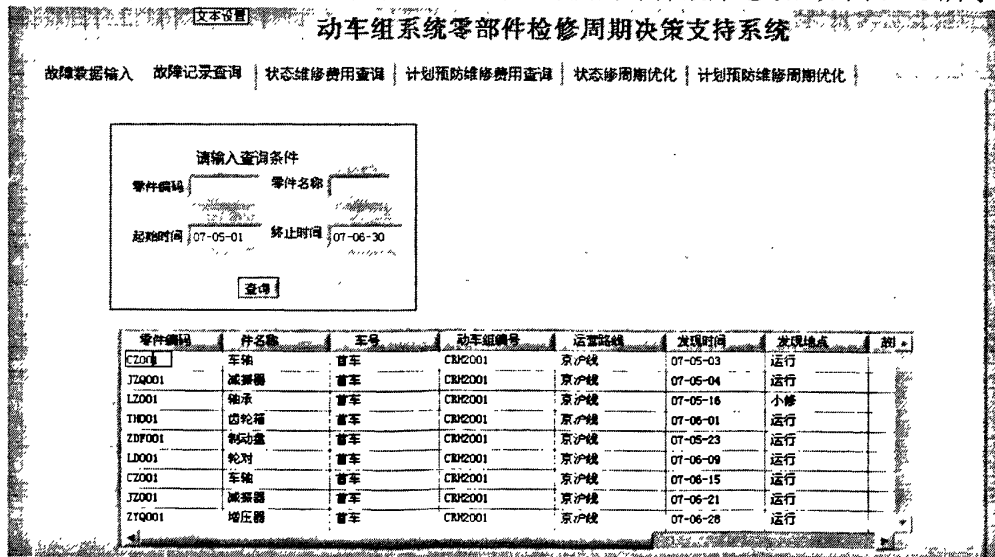


图 5-21 故障记录查询模块

Fig.5-21 Fault Record Query Module

5.5.3 故障维修费用查询模块

点击为维修费用查询选项卡，输入“零件编码”或“零件名称”中的任意一值，即可进行查询，结果如图 5-22、图 5-23 所示。

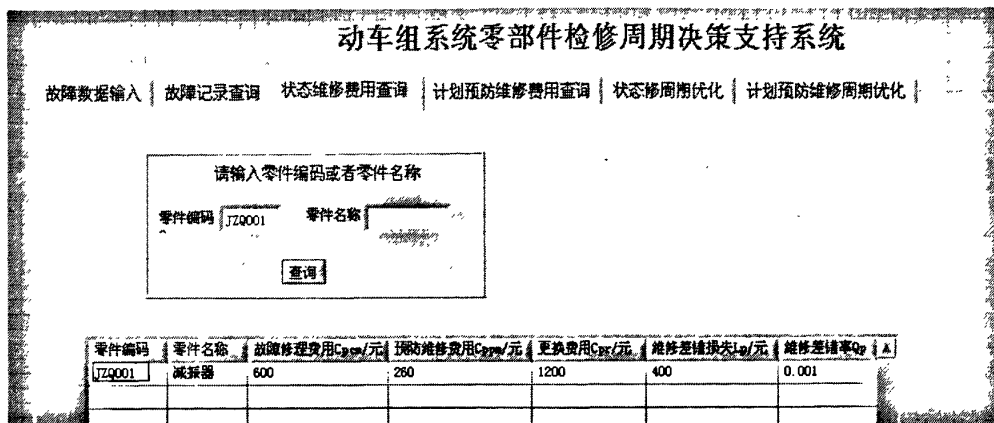


图 5-22 状态维修费用查询模块

Fig.5-22 Condition Maintenance Costs Selection Module

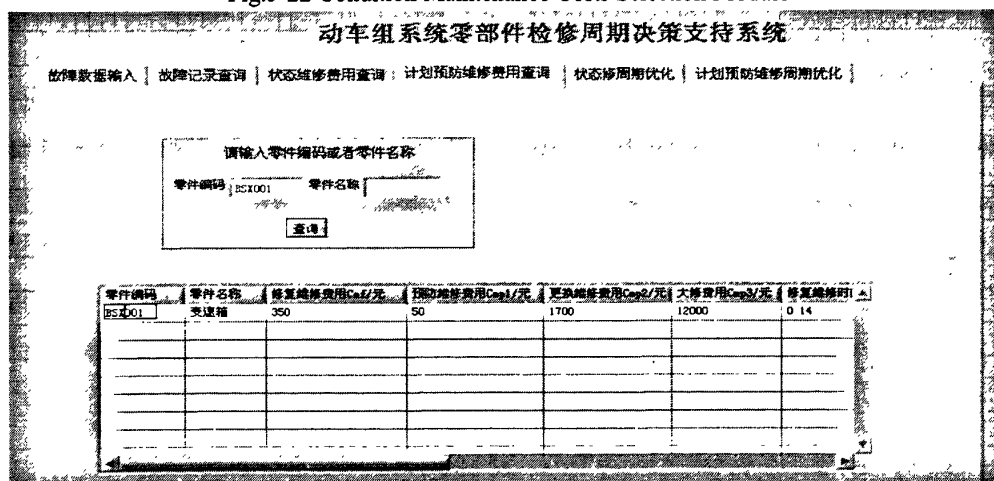


图 5-23 计划维修费用查询模块

Fig.5-23 Plan Condition Maintenance Costs Selection Module

5.5.4 零件维修周期优化模块

点击维修周期优化选项卡，即可进入周期优化模块。若零件属于状态维修方式，在周期优化前，需要输入“运行时间范围”和“停机损失费用”，然后点击“开始优化按钮”，即可进行优化；若零件属于计划维修，则直接点击“开始优化”。

零件状态维修的优化结果是包含“0、1、2”的一张表，表中第一行数字代表

从零件的全新状态开始每次的维修时间，单位为天；第一列维零件编码，第二列为零件名称，表中数字 0 代表不进行维修，1 代表预防性维修，2 代表更换维修。如图 5-24 所示。点即“导入 Excel”，便把优化结果导入到 Excel 中。

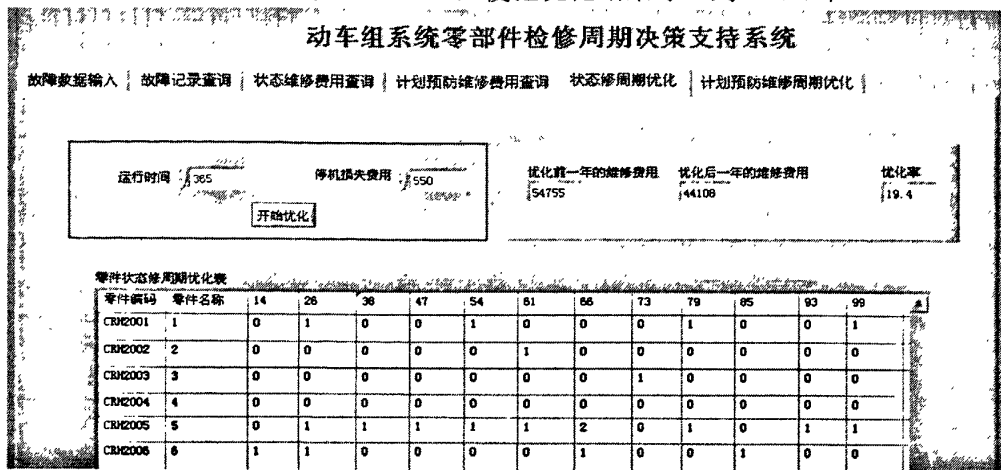


图 5-24 状态维修周期优化模型

Fig.5-24 Condition Maintenance Periods Optimizing Module

计划预防维修周期优化结果比较简单，优化结果中只有四项内容：最佳计划预防维修次数，最佳计划预防维修间隔，大修周期内平均维修费用和最佳大修周期。与状态维修优化结果一样，也可以方便地查看优化前和优化后的费用对比及优化率，具体如图 5-25 所示。

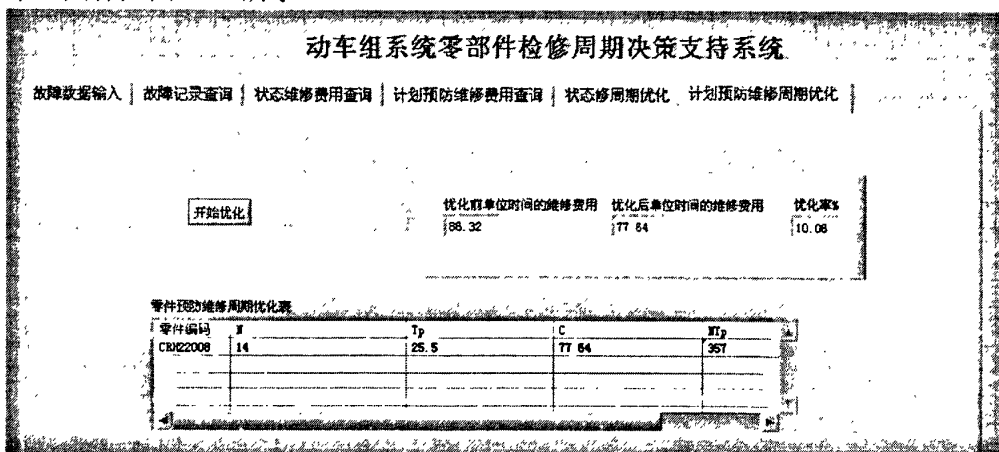


图 5-25 计划维修周期优化模型

Fig.5-25 Plan Maintenance Periods Optimizing Module

5.6 动车组零部件分析与应用

5.6.1 零件状态维修周期优化

仍然以 4.4 节为例，动车组六个部件具体参数见表 5-1^[23]，假定设备的运行时间 360d，停机损失费用为 550 元/d。

表 5-1 部件的参数

Table5-1 Parameter of Assembly

部件	η_p	β_p	C_{pcm}	C_{ppm}	C_{pr}	L_p	q_p	τ_{ppm}	τ_{pr}	R_{min}
1	54	1.8	300	120	450	500	0.010	0.4	0.2	0.70
2	100	2.5	450	200	1000	1500	0.005	0.6	0.4	0.75
3	108	3.2	680	300	1500	2000	0.001	0.5	0.3	0.80
4	150	3.1	200	80	260	320	0.020	0.3	0.1	0.60
5	20	2.0	50	30	200	230	0.010	0.6	0.4	0.60
6	70	1.5	700	240	1100	1500	0.006	0.9	0.5	0.80

将这六个零部件的故障数据和维修费用存放在零件维修费用表中，如图 5-26 所示。

零件编号	零件名称	故障修理费用C _{pcm} /元	预防修理费用C _{ppm} /元	更换费用C _{pr} /元	维修差错损失L _p /元	维修差错率q _p	预防维修时间T _{ppm} /d
CRH2001	1	300	120	450	500	0.010	0.4
CRH2002	2	450	200	1000	1500	0.005	0.6
CRH2003	3	680	300	1500	2000	0.001	0.5
CRH2004	4	200	80	260	320	0.020	0.3
CRH2005	5	50	30	200	230	0.010	0.6
CRH2006	6	700	240	1100	1500	0.006	0.9

图 5-26 零件状态维修费用表

Fig.5-26 Original Data of Parts on Condition Maintenance

在图 5-24 中的“运行时间范围”中输入 365，“停机损失费用”中输入 550，然后点击“开始优化”，得到如图 5-27 所示结果。计算结果如表 4-2 所示。采用本文的优化方法总维修费用为 44108 元，节约成本率 19.4%。

动车组系统零部件检修周期决策支持系统

故障数据输入 | 故障记录查询 | 状态维修费用查询 | 计划预防维修费用查询 | 状态修周期优化 | 计划预防维修周期优化

运行时间: 365 停机损失费用: 550

优化前一年的维修费用: 54755 优化后一年的维修费用: 44108 优化率: 19.4

开始优化

零件编号	零件名称	14	26	38	47	54	61	66	73	79	85	93	99
CRH2001	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
CRH2002	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
CRH2003	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
CRH2004	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CRH2005	5	0	1	1	1	1	1	2	0	1	0	1	1
CRH2006	6	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0

图 5-27 状态维修周期优化方案

Fig.5-27 Optimization Program of Condition Maintenance Period

点击“导入 Excel”，将上述优化方案的结果存入 Excel 中，如图 5-28 所示。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	零件编码	零件名称	14	26	38	47	54	61	66	73	79	85	93
2	CRH2001	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
3	CRH2002	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	CRH2003	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	CRH2004	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	CRH2005	5	1	1	1	1	1	1	2	0	1	0	1
7	CRH2006	6	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0

图 5-28 优化结果导入 Excel

Fig.5-28 Result of Optimization Importing into Excel

正如前面所述，导入 Excel 中的状态维修周期的优化结果是包含“0、1、2”，见表 5-2。表中第一行数字代表从零件的全新状态开始每次的维修时间，单位为天；第一列维零件编码，第二列为零件名称，表中数字 0 代表不进行维修，1 代表预防性维修，2 代表更换维修。按照表中的时间对零件进行维修，即可实现可靠性和经济性的最优结合。

表 5-2 状态修周期优化表

Table5-2 Condition Maintenance Period Optimization

时间 天	零部件						时间 天	零部件					
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
14	0	0	0	0	1	0	192	0	0	0	0	2	0
26	1	0	0	0	1	1	199	0	1	0	0	0	1
38	0	0	0	0	1	0	208	1	0	0	0	1	0
47	0	0	0	0	1	1	214	0	0	0	0	0	1
54	1	0	0	0	1	0	221	0	0	0	0	1	0
61	0	1	0	0	1	0	228	1	1	1	0	1	1
66	0	0	0	0	2	1	237	0	0	0	0	1	2
73	0	0	1	0	0	0	244	1	0	0	1	1	0
79	1	0	0	0	1	0	251	0	2	0	0	1	0
85	0	0	0	0	0	1	256	2	0	1	0	2	0
93	0	0	0	0	1	0	265	0	0	0	0	0	1
99	1	0	0	0	1	1	272	0	0	0	0	1	0
109	0	0	0	0	1	1	283	0	0	2	0	1	0
117	1	1	0	0	1	2	290	1	0	0	0	1	1
123	0	0	0	0	1	0	299	0	0	0	0	1	0
129	2	0	0	1	2	0	306	0	0	0	0	1	1
138	0	0	1	0	0	0	313	0	1	0	0	1	0
144	0	0	0	0	1	1	319	1	0	0	0	2	0
157	1	0	0	0	1	0	325	0	0	0	0	0	1
164	0	1	0	0	1	1	334	0	0	0	0	1	0
173	0	0	0	0	1	0	340	1	0	0	1	0	1
180	0	0	0	0	1	1	348	0	0	0	0	1	1
186	1	0	1	0	1	0	357	1	0	1	0	1	2

5.6.2 零件计划维修周期优化

本论文在 4.4.2 节中已对采用计划维修的动车组零件 ($n=1$) 进行了周期优化, 确立了在可用度 ($A_{min} \geq 0.95$) 约束条件下的最优的经济性检修周期。现对 $n \neq 0$ 的情况, 即零件在一个大修周期内需要进行若干次预防小修, 应用本文的可用度约束条件下维修费用最小的模型确定零件的最优预防小修周期以及一个大修中的预防小修的最优次数。

以动车组某采用多次计划预防维修的零件为研究对象, 输入车辆段统计的故障数据, 利用 ReliaSoft 软件的 Weibull++7 计算得到如表 5-3 的参数值。

表 5-3 变速箱平均费用统计量

Table.5-3 Mean Free Statistic of Transmission Case

C_{Mf} /元	C_{Mp1} /元	C_{Mp2} /元	C_{Mp3} /元	t_{Mf} /d	t_{Mp1} /d	t_{Mp2} /d
142	45	2460	12655	0.2	0.05	0.45
t_{Mp3} /d	P_{Mf}	P_{Mp2}	A_{min}	β	η	γ
0.65	0.95	0.05	0.95	2.08	1252.95	896.206

将以上数据输入 Access 数据库 EMU.mdb 的计划维修费用表中, 如图 5-29 所示。

零件名称	平均故障修复性维修费用C _{Mf}	平均预防性维修	平均故障后更换	平均大修费用C _{Mp3}	平均故障后改	平均预防性	平均故障后
变速箱	142	45	2460	12655	0.2	0.05	0.45

图 5-29 零件计划维修费用表

Fig.5-29 Original Data of Parts on Plan Maintenance

在图 5-25 中, 点击“开始优化”, 即可得到变速箱的周期优化方案——最优预防周期、大修中最优预防次数、最优预防维修费用和优化率, 具体如图 5-30 所示。

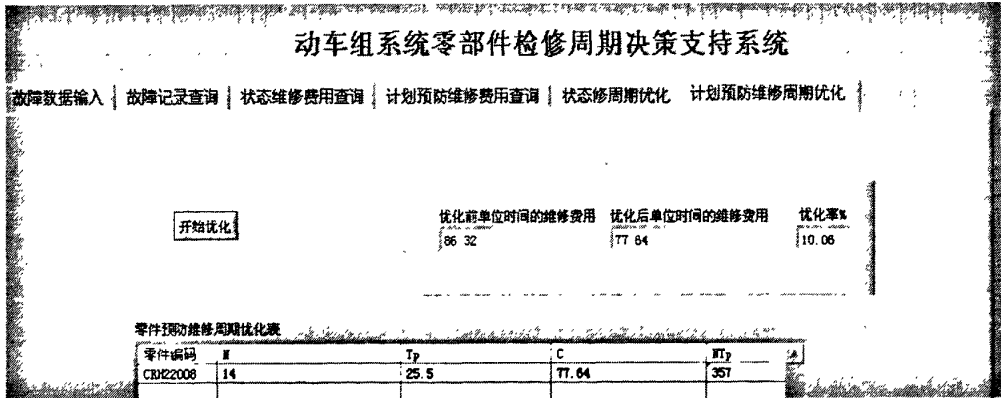


图 5-30 计划维修周期优化方案

Fig.5-30 Optimization Program of Plan Maintenance Period

由图可以得出动车组零部件最佳的计划维修间隔、最佳维修次数和大修周期和优化联系, 具体的零件费用曲线如图 5-31 所示。由图可知, 当 $N=14$ 时, 平均维修费用最低, 为 77.64 元/天, 最佳计划维修周期为 25.5 天, 大修维修周期为 357 天, 此时的可用度也满足 A_{min} 的要求。优化结果表明该计划维修周期在保证可用度

的前提下比现行的小修费用降低了 10.06%。

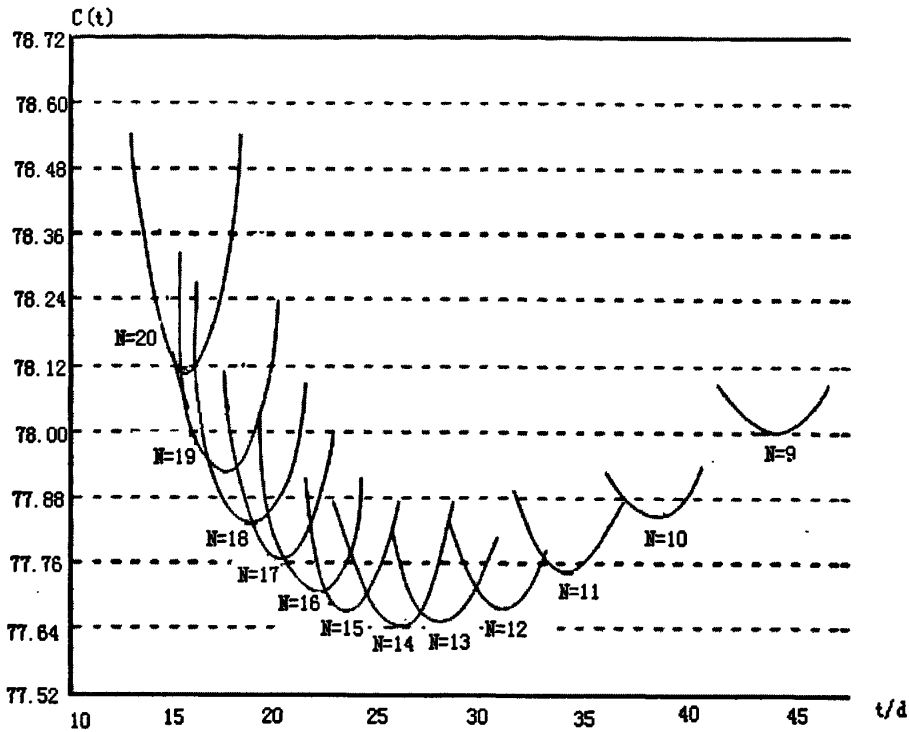


图 5-31 有效度约束下平均维修费用曲线

Fig.5-31 The Mean Fee Curve under Validity Restriction

5.7 本章小结

本章主要介绍了动车组零部件维修周期的决策系统的实现过程，是整篇论文比较重要的部分。在第 2 章复杂设备 FSI 维修方式确立、第 3 分布模型确立和第 4 章周期优化模型建立的基础上，本章建立了零件故障数据库系统，并通过人机交互系统有效地将模型库与数据库结合起来，构建了动车组零部件的维修周期决策系统。本章详细介绍了系统的功能和实现方法，主要利用了 LabVIEW 与 Matlab、Access、Excel 的混合编程，实现 LabVIEW 与 Matlab、Access、Excel 之间的通信。通过实例分析，该系统能针对不同维修方式下的零部件，分别确立了“以可靠性为中心”的维修费用最小的状态维修周期和可用度约束下维修费用最小的计划维修周期，同时也为动车组维修费用居高不下的问题提供了有效的决策模型和方法。

6 结论与展望

动车组是关乎我国国计民生的大事，维修是动车组安全可靠运行的有力保证，因此，建立一套具有中国特色的动车组维修方案意义深远。

本文设计并开发了动车组零部件维修周期优化模型和决策支持系统，主要完成了以下几个方面的工作：

(1) 以 CRH2-013A 为例，根据给水卫生系统故障统计，首先确立了给水卫生系统的重要功能单元 (FSI)，然后对其进行了危害性分析 (CA) 中的重要度评估指标，应用基于蒙特卡罗模拟的加权 CA 重要度评估模型确定了给水卫生系统 FSI 的维修方式。

(2) 对动车组故障现场数据的收集、分析、处理进行了深入研究，并通过 Weibull++7 优先级分析确立了最优零部件的故障分布模型和参数。

(3) 在故障分布模型确立基础上，针对零件不同维修方式分别确立了“以可靠性为中心”的费用最小的状态维修周期优化模型和可用度约束下的费用最小的计划维修周期模型，并通过工程实例，小试牛刀。

(4) 使用 Access、LabVIEW、Matlab 以及 Excel 混合编程，开发了动车组零部件维修周期决策支持系统，并且能够通过该系统分等级确定维修周期的优化方案。

本论文具有以下创新点：

(1) 没有照搬国外的维修制度，也没有一味沿用我国现有机车的维修制度，而是在继承和发扬我国传统机车维修制度的基础上，以“拿来主义”的方式引进了“以可靠性为中心”的维修思想，利用危害性分析 (CA) 中的重要度评估方法和蒙特卡罗方法确立了 FSI 的维修方式。

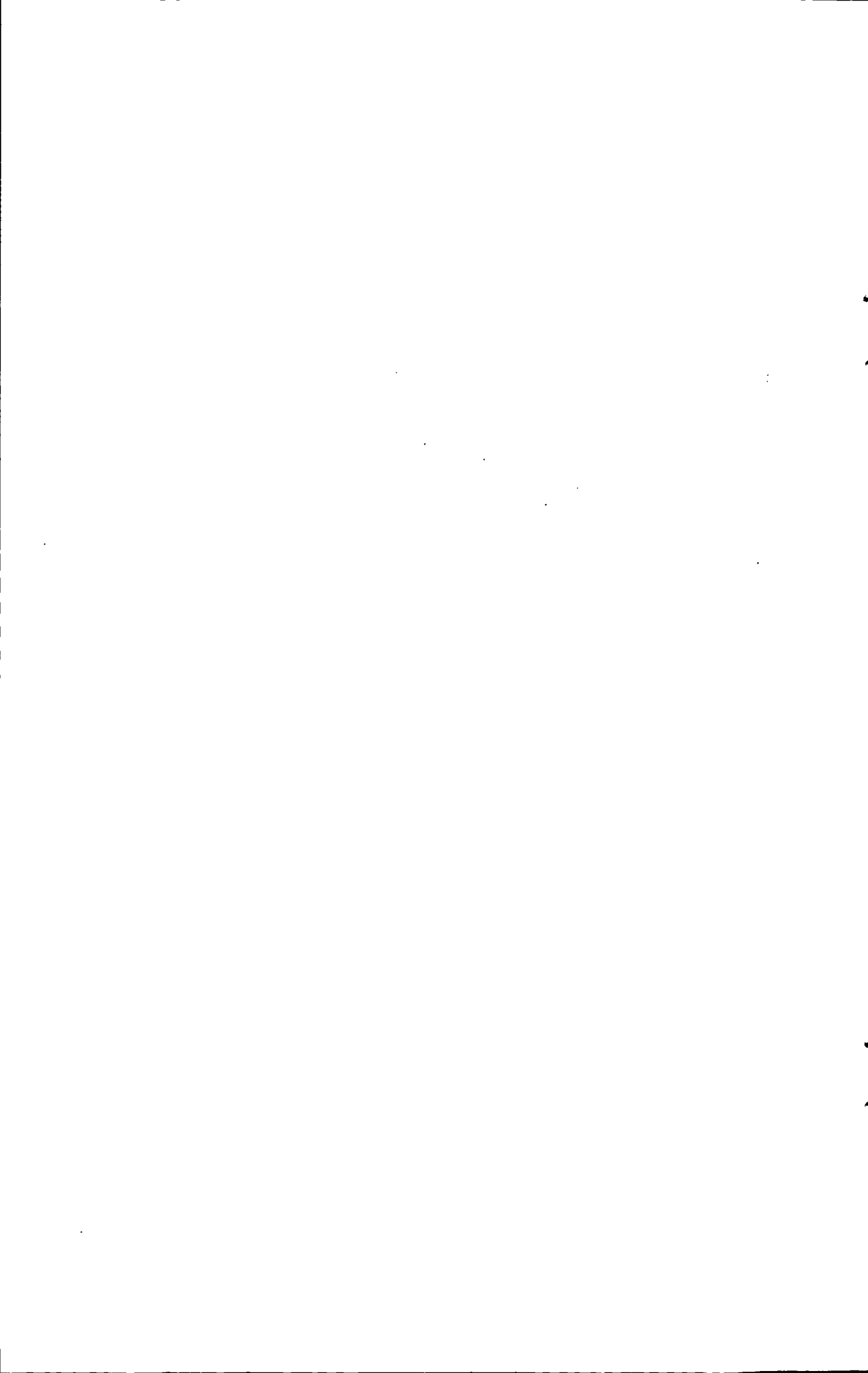
(2) 针对不同的维修方式，本文提出了“以可靠性为中心”的费用最小的状态维修周期优化模型和可用度约束下的费用最小的计划维修周期模型，从可靠性、经济性、有效性确立了动车组零部件的维修周期。

但是，由于作者的能力和有限，存在很多不足之处：

(1) 本文只是基于理论分析得出了优化模型，还需要实践的检验和改进。

(2) 本文侧重点在于维修周期的决策，如果能和一套功能强大的管理信息系统结合起来，整个系统的功能将会更加完善。

(3) 论文的周期优化模型只是立足于经济相关性研究，如果能结合故障相关性和结构相关性建立维修周期模型，优化结果将会更加合理。



参考文献

- [1]董锡明.机车车辆基本理论.北京:中国铁道出版社,2005.3:1-21.
- [2]崔殿国.机车车辆可靠性设计及应用.中国铁道出版社,2008.3:10-19.
- [3]周晓军,奚立峰,李杰.一种基于可靠性的设备顺序预防性维护模型.上海交通大学学报,2005,39(12):2044-2047.
- [4]严立,朱新河,严志军等.面向21世纪的交通运输机械设施维修现状与展望.交通运输学报.2001,1(2):47-51.
- [5]刘丽影,刘继刚,刘继.我国高速动车组检修制度.同济大学学报,2001,29(8):1000-1003.
- [6]张欣元.法国TGV高速列车的检修.国外铁道车辆,1999(2):39-42.
- [7]张晓帆.动车组多部件维修决策支持系统的开发.北京交通大学硕士学位论文.2009.6.
- [8]翟士述.动车组维修制度探究.辽宁师专学报,2008,10(2):97-98.
- [9]高萍.基于可靠性分析的复杂设备预防性维修决策研究.清华大学博士学位论文.2008.6.
- [10]陈文芳.CRH2动车组运用故障分析及对策.铁道技术监督,2007,35(8):10-12.
- [11]池毓敢,周力.时速200km动车组修程修制的建议方案.铁道车辆,2005,43(4):30-32.
- [12]姜志武.高速铁路发展概况.科技信息,2007,3:166-167.
- [13]董锡明.现代高速列车维修新发展.铁道机车车辆,2008,28(5):40-43.
- [14]李彦青.动车组维修管理信息系统的研究与开发.北京交通大学硕士学位论文.2008.6.
- [15]温岚.用模糊综合评判法和层次分析法解决星船故障的评价问题.航天器环境工程,2005,3:179-184.
- [16]张毅.基于重要度划分的设备维修方式决策.武器装备自动化.2005,24(6):23-24.
- [17]张艳丽,赵建平.设备重要度的模糊综合评判.南京化工大学学报,1999,21(6):40-43.
- [18]董玉亮,顾煜炯,杨昆.基于蒙特卡洛模拟的发电厂设备重要度分析.中国电机工程学报,2003,23(8):201-205.
- [19]高萍.基于蒙特卡罗方法的设备维修决策模型.系统仿真学报.2007,19(22):5112-5114.
- [20]黄宝旭,韩帮军.蒙特卡罗方法在设备预防性维修周期确定中的应用.聊城大学学报,2004,17(3):48-50.
- [21]张颂,王中杰.基于仿真的生产设备预防性维修周期研究.自动化仪表,2007,28(3):37-39.
- [22]董锡明.机车车辆运用可靠性工程.北京:中国铁道出版社.2002.6.
- [23]王灵芝.铁路设备关键零部件的可靠性分析模型及其应用研究.铁道学报,2008,30(4):93-97
- [24]<http://www.reliasoft.cn/products/Weibull/v7.htm>.
- [25]金玉兰,蒋祖华,侯文瑞.以可靠性为中心的多部件设备预防性维修策略的优化.上海交通大学学报,2005,40(12):2052-2055.

- [26]王华胜.基于加权最小二乘法的机车车辆零部件可靠性分析.铁道学报, 2001,23(6):21-25.
- [27]蔡景,左洪福,王华伟.多部件系统的预防性维修优化模型研究.系统工程理论与实践,2007, 2: 133-138.
- [28]王灵芝.以可靠性为中心的多部件系统预防性维修优化研究.计算机集成制造系统, 2008, 14(10): 2042-2046.
- [29]吴波,丁毓峰,黎明发.机械系统可靠性维修及决策模型.北京:化学工业出版社.2006.12.
- [30]蔡景,左洪福,刘明,耿端阳.复杂系统成组维修策略维修优化模型研究.应用科学学报, 2006, 24(5): 533-537.
- [31]奚立峰,周晓军,李杰.有限区间内设备顺序预防性维护策略研究.计算机集成制造系统,2005, 11(10):1465-1468.
- [32]Hoang Pham, Hongzhou Wang.Imperfect maintenance. European Journal of Operational Research, 1996,94: 425-438.
- [33]贾希胜.以可靠性为中心的维修决策模型.北京:国防工业出版社, 2007.
- [34]曹晋华,程侃.可靠性书学引论(第二版).北京:科学出版社, 2005.
- [35]王辉鹏,董春游.决策支持系统发展研究.应用能源技术, 2009(6): 48-50.
- [36]刘静,吴衍青,汤宇晖.Matalb/VC++/Access 组和编程方法及其应用.计算机工程, 2001, 27(3): 23-24.
- [37]张良,何也熙.Matlab、Access 和 VB.NET 混合编程方法的研究和应用.计算机工程与设计, 2009, 30(5): 1232-1235.
- [38]吴松涛,龚家伟.在 LabVIEW 中利用利用 LabSQL 实现数据库访问.外国电子测量技术, 2006, 25(4): 53-56.
- [39]岂兴明,周健兴,矫津毅.LabVIEW8.2 中文版入门与典型实例.人民邮电出版社.2008.
- [40]曾三槐,蒋大为.数据库原理与运用基础.长沙:湖南科学技术出版社, 1998.
- [41]袁培铎.基于 LabVIEW 与 Matlab 混合编程的应用研究.信息技术, 2007, 36(6): 129-131.
- [42]胡绍海,高亚峰,肖坦.基于 LabVIEW 的 Excel 报表生成技术研究.测控技术, 2007,26(10): 64-66.
- [43]陈锡辉,张银鸿.LabVIEW8.2 程序设计从入门到精通.北京:清华大学出版社, 2007.

附录 A

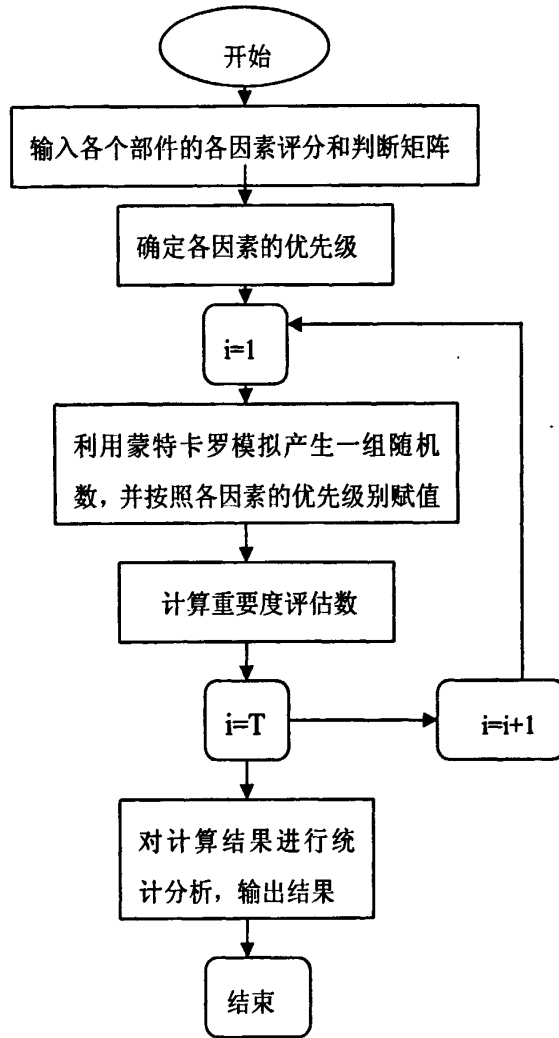
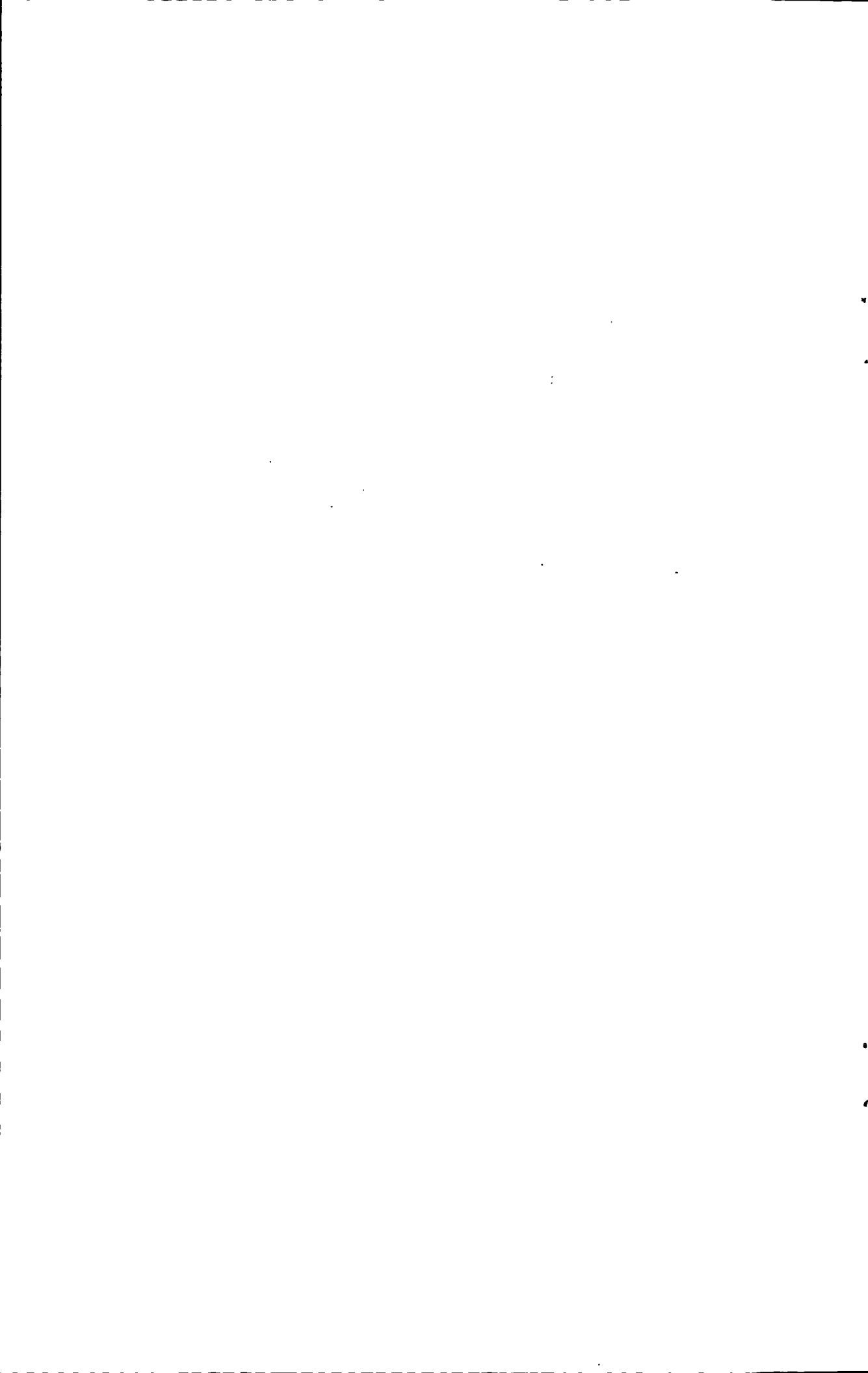


图 1 设备重要度评估算法流程图

Fig.1 Evaluation Arithmetic Flow of DeVice Importance



附录 B

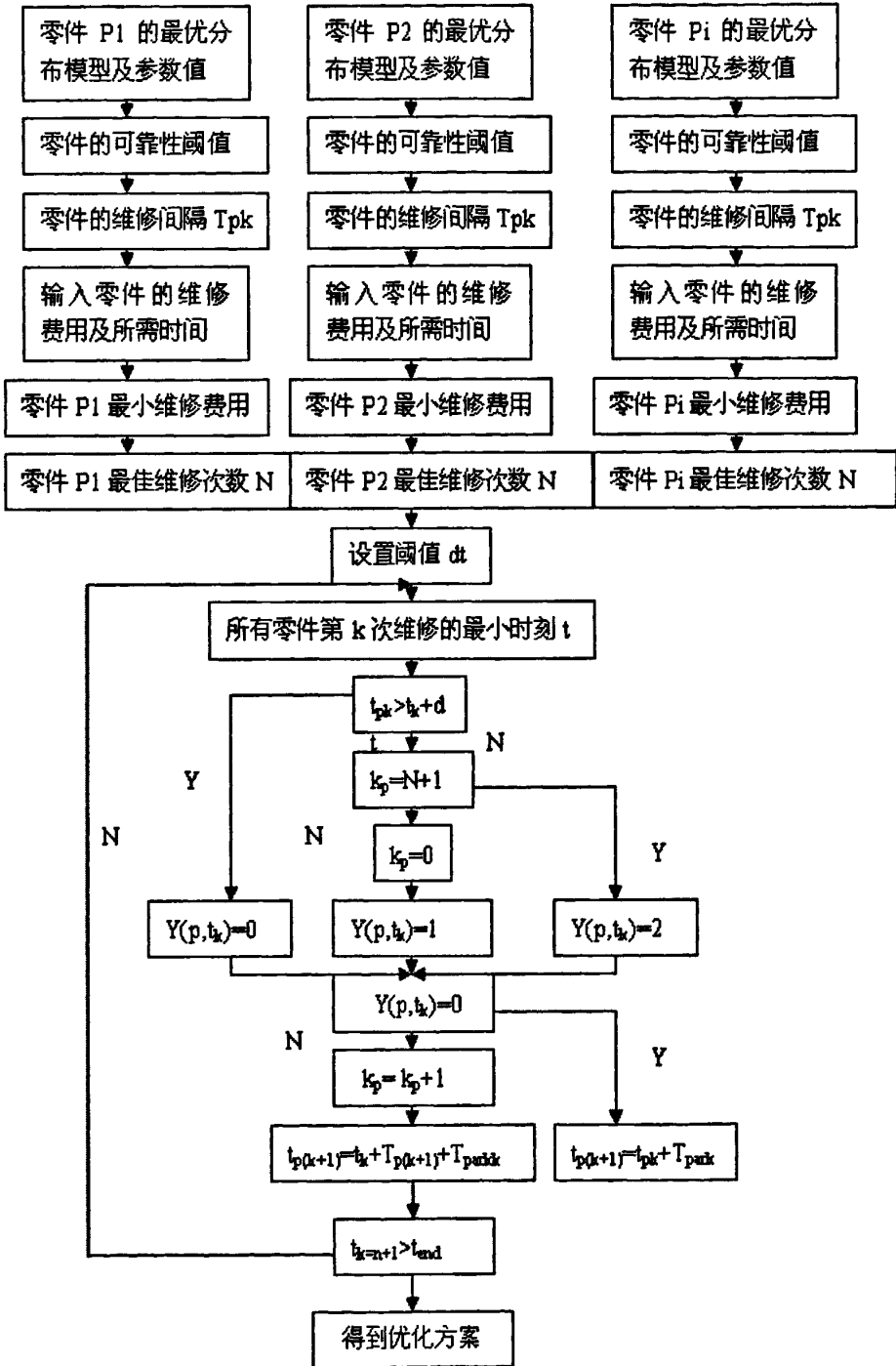
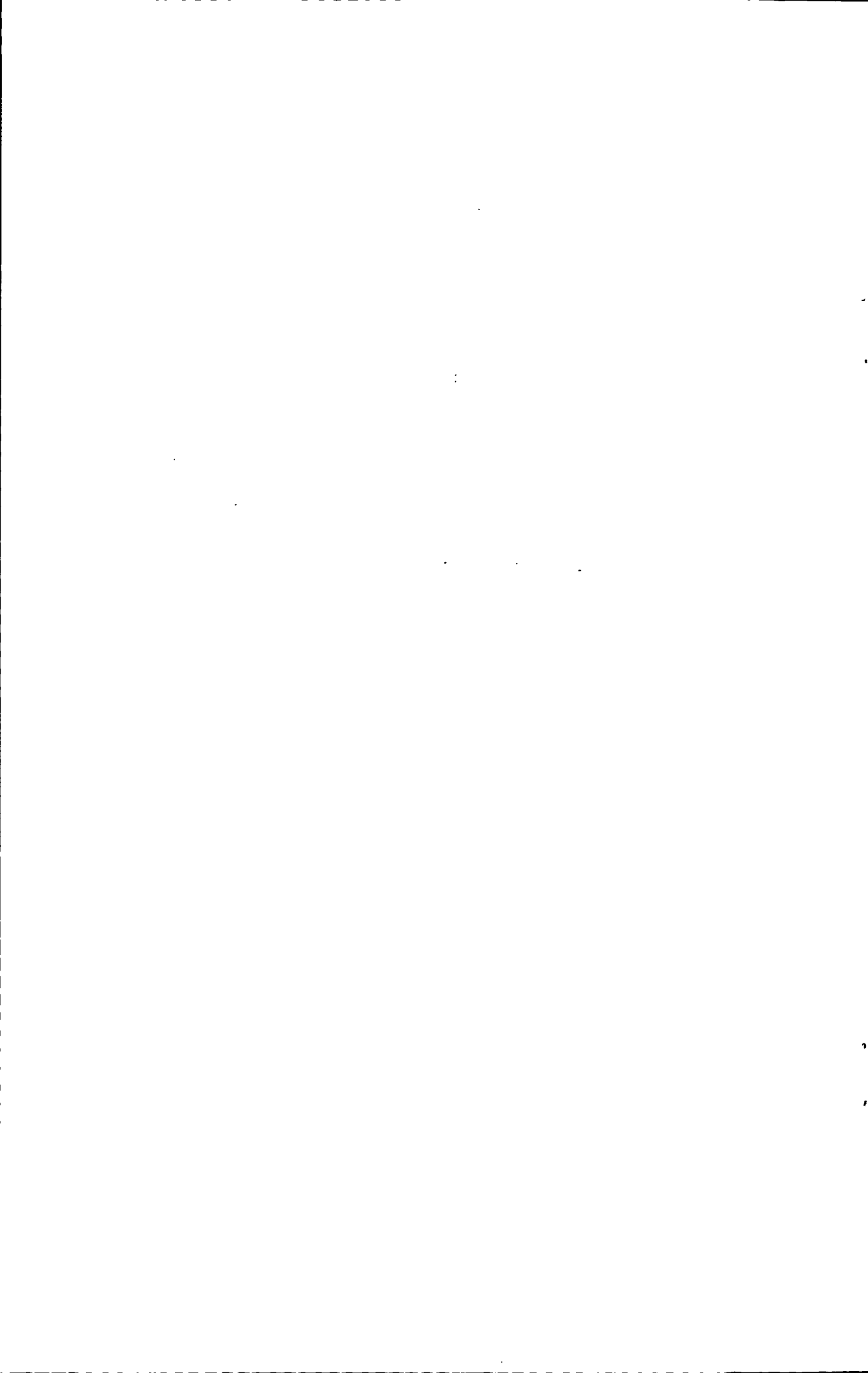


图 2 复杂设备状态修优化流程图

Fig.2 Flow of Complex Equipments Condition Maintenance



附录 C

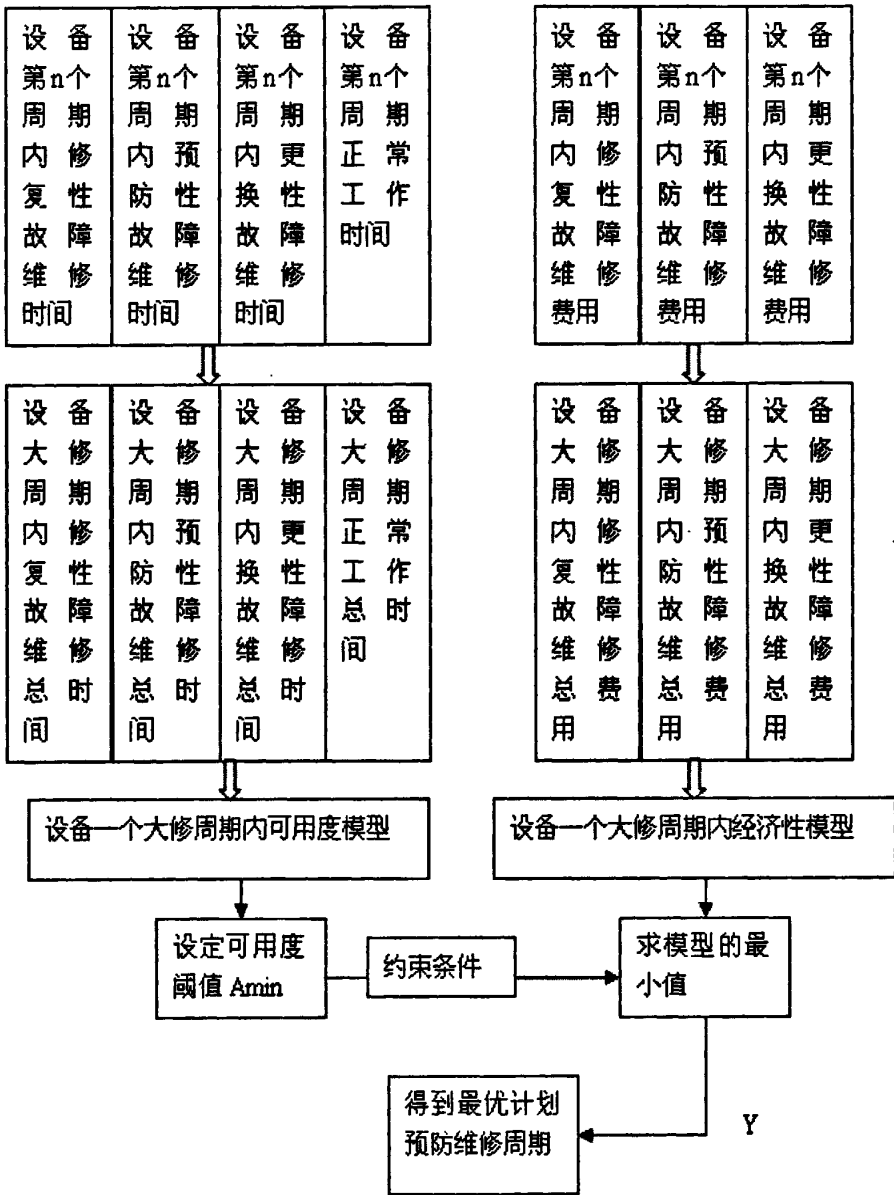
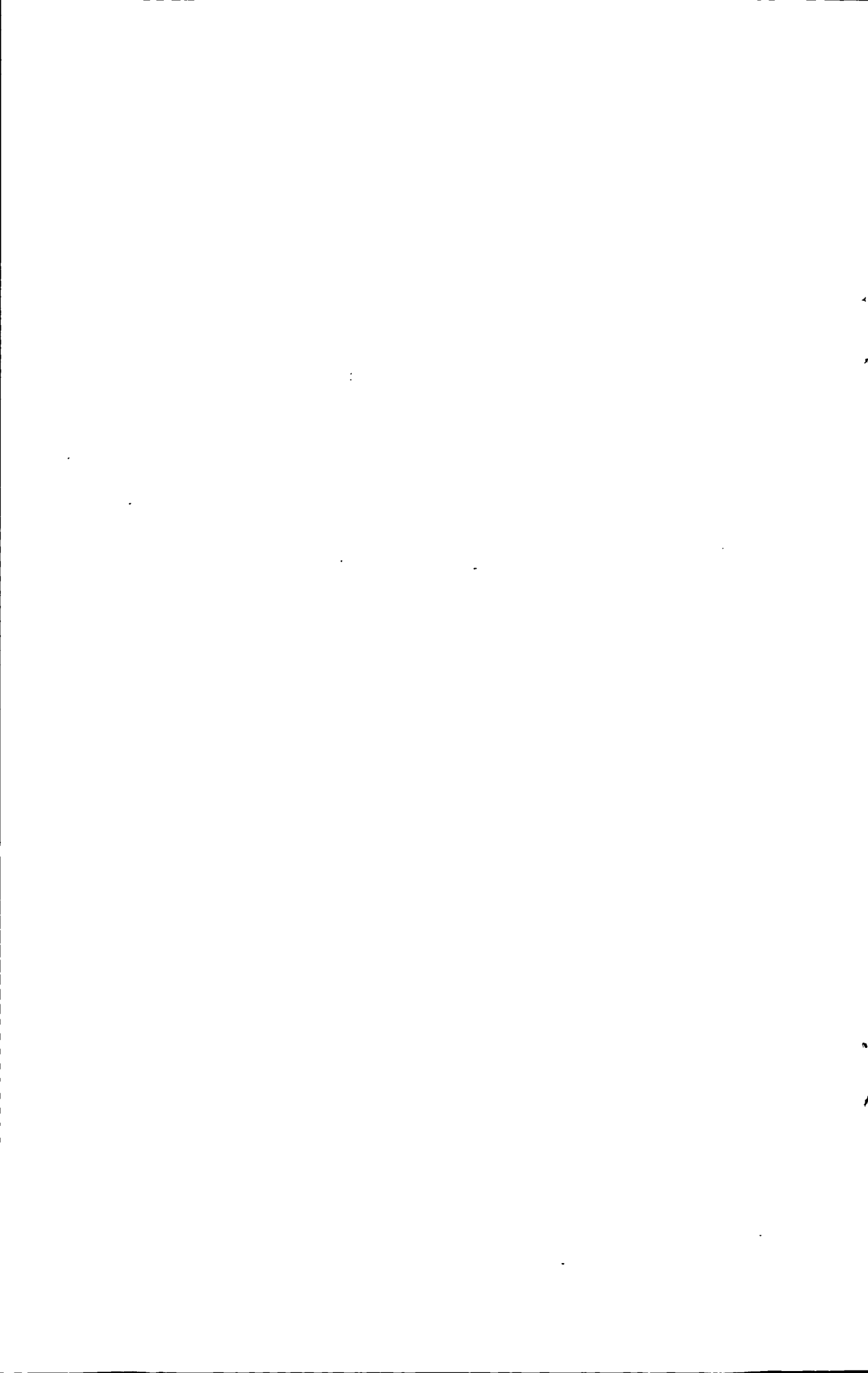


图 3 复杂设备计划预防维修状态修优化流程图

Fig.3 Flow of Complex Equipments Plan Maintenance



作者简历

赵金方，女，1986年12月出生，山东临沂人。2004年至2006年就读于山东理工大学交通与车辆工程学院车辆工程专业，获得学士学位。2008年9月起就读于北京交通大学机械与电子控制工程学院载运工具运用工程专业，攻读硕士学位。

读研期间参与的科研项目：

2009年4月-8月	青岛庞巴迪 CRH1 假台车的 A3 设计	担任橡胶堆设计人员；
2009年5月-6月	铁道部科学院车辆所 350T-定子重载实验	担任安全测试员助理。



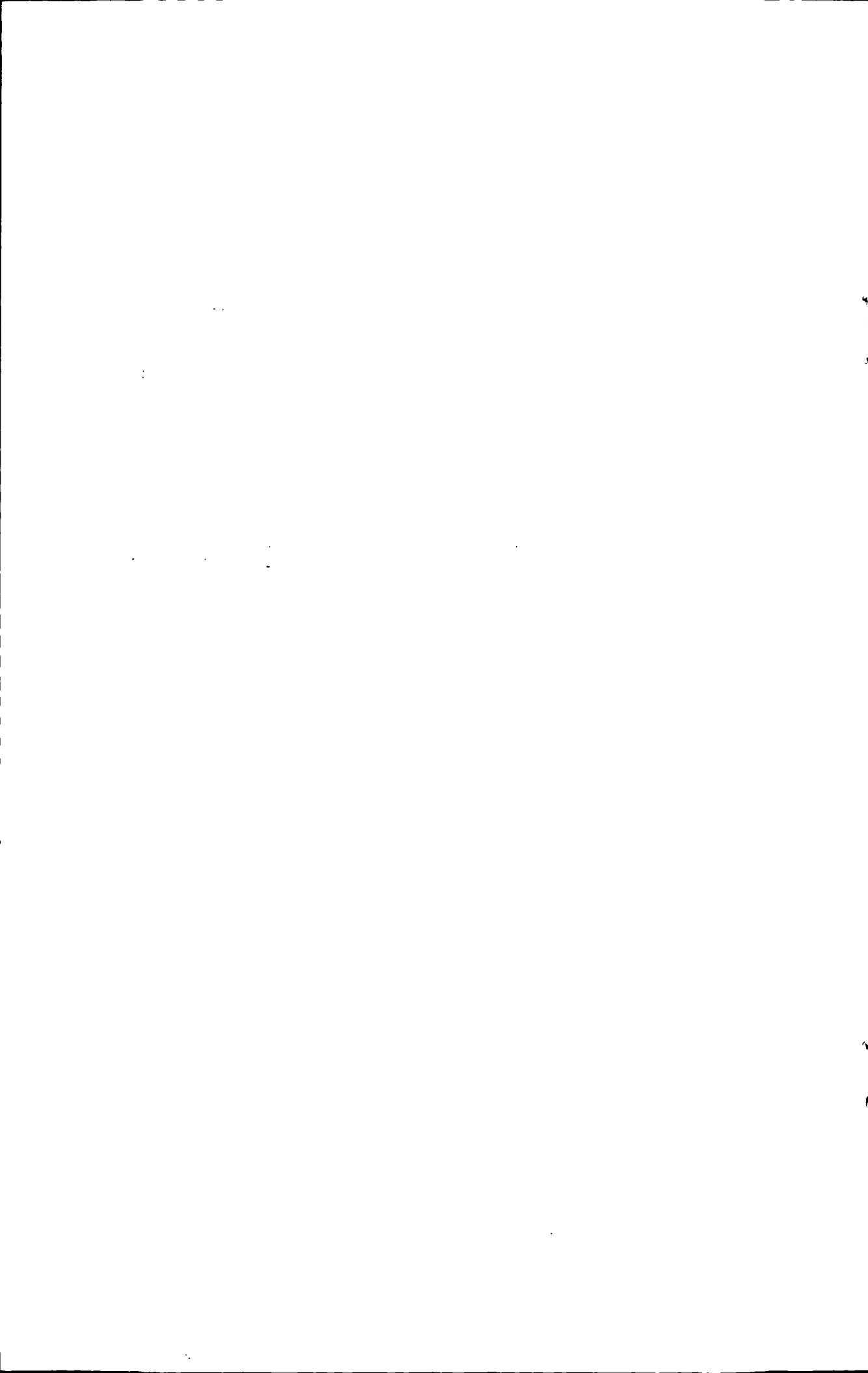
独创性声明

本人声明所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通大学或其他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。

学位论文作者签名：

签字日期：

年 月 日



学位论文数据集

表 1.1: 数据集页

关键词*	密级*	中图分类号*	UDC	论文资助
维修周期	公开			
学位授予单位名称*		学位授予单位代 码*	学位类别*	学位级别*
北京交通大学		10004	工学	硕士
论文题名*		并列题名		论文语种*
动车组零部件预防性维修周期决策 模型的研究				中文
作者姓名*	赵金方		学号*	08121962
培养单位名称*		培养单位代码*	培养单位地址	邮编
北京交通大学		10004	北京市海淀区西 直门外上园村 3 号	100044
学科专业*		研究方向*	学制*	学位授予年*
载运工具运用工程			2 年	2010
论文提交日期*	2010.6.8			
导师姓名*	宋永增		职称*	副教授
评阅人	答辩委员会主席*		答辩委员会成员	
电子版论文提交格式 文本 () 图像 () 视频 () 音频 () 多媒体 () 其他 () 推荐格式: application/msword; application/pdf				
电子版论文出版 (发布) 者		电子版论文出版 (发布) 地		权限声明
论文总页数*	79			
共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。				

