

城轨列车智能驾驶的 优化模型及算法

Optimization Models and Algorithms
for Intelligent Train Operation of Urban Rail Transit

◎ 陈德旺 著



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

城轨列车智能驾驶的 优化模型及算法

陈德旺 著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

近十年来,随着中国城市的快速发展,地铁建设如火如荼。据统计,截至2013年6月,中国共有轨道交通运营城市16个,总计轨道交通运营线路达68条,运营长度总里程2 060公里,运营车站总数1 350座。显然,先进的城轨列车驾驶系统对于提高地铁系统的效率和性能,具有非常重要的意义。

本书利用北京亦庄地铁线大量实测数据开展研究,采用计算智能、系统辨识、专家系统、机器学习和系统仿真等理论和方法,研究提高列车驾驶系统的智能性、准时性、舒适性、停车精度和降低列车运行能耗,还探索了列车运行时间的动态调整、智能驾驶算法的鲁棒性和人工驾驶数据的数据挖掘。本书包括9章,第1章绪论,第2章列车自动驾驶系统,第3章列车运行控制系统参数辨识,第4章列车智能驾驶算法仿真平台,第5章基于专家经验和机器学习的智能驾驶算法,第6章停车精度分析及停车算法,第7章列车节能优化操纵算法,第8章人工驾驶数据挖掘,第9章展望。

本书可作为对轨道交通系统、列车运行控制、列车自动驾驶感兴趣的广大科研人员和工程技术人员的参考用书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

城轨列车智能驾驶的优化模型及算法 / 陈德旺著. —北京:北京交通大学出版社, 2014. 4

ISBN 978 - 7 - 5121 - 1890 - 4

I. ① 城… II. ① 陈… III. ① 城市铁路 - 轨道交通 - 列车 - 运行 - 控制系统 - 优化模型 ② 城市铁路 - 轨道交通 - 列车 - 运行 - 控制系统 - 算法设计 IV. ① U284.48

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第068429号

责任编辑:吴嫦娥 特邀编辑:林 欣

出版发行:北京交通大学出版社

电话:010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街44号

邮编:100044

印刷者:北京瑞达方舟印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:10.5 字数:262千字

版 次:2014年4月第1版 2014年4月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-1890-4/U·166

印 数:1~1 500册 定价:35.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。



近十年来,随着中国城市的快速发展,地铁建设如火如荼。据统计,截至2013年6月,中国共有轨道交通运营城市16个,总计轨道交通运营线路达68条,运营长度总里程2060公里,运营车站总数1350座。显然,先进的列车运行控制系统对于提高地铁系统的运行安全、效率和性能,具有非常重要的意义。列车运行控制系统主要包括列车超速防护系统(ATP)和列车自动驾驶系统(ATO)。其中,ATP用于确保列车安全,ATO用于提高列车驾驶性能。随着计算智能和机器学习等智能理论的发展,列车驾驶系统将从目前的自动驾驶向未来的智能驾驶发展。

围绕提高列车驾驶系统的智能性和综合性能,我和我的研究生们开展了为期5年的研究。我们在国内外期刊和会议上,共发表相关论文20余篇,比较著名的SCI期刊有:IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems、Applied Soft Computing;EI期刊有铁道学报和中国铁道科学等。5年来,在我指导下相关领域毕业的研究生有10多名。本书很多内容取自我们公开发表的论文和我指导的研究生的硕士学位论文。

本书利用北京地铁亦庄线的大量实测数据开展研究,采用计算智能、系统辨识、专家系统、机器学习、系统仿真等理论和方法,研究提高列车驾驶系统的智能性、准时性、舒适性和停车精度,降低列车运行的能耗。同时,还探索了列车运行时间的动态调整、智能驾驶算法的鲁棒性和人工驾驶数据的数据挖掘。本书共有9章,内容分别为绪论、列车自动驾驶系统、列车运行控制系统参数辨识、列车智能驾驶算法仿真平台、基于专家经验和机器学习的智能驾驶算法、停车精度分析及停车算法、列车节能优化操纵算法、人工驾驶数据挖掘和总结与展望。

饮水思源,本书的完成首先要感谢轨道交通控制与安全国家重点实验室的自主课题(RCS2009ZT004, RCS2011ZT001)、北京市科技新星项目(2010B015)、教育部基本科研业务费重点项目(2012JBM016)和科技部863项目(2011AA110502)给课题组长期稳定的支持。本书的完成还要感谢所在的国家重点实验室主任唐涛教授对我们的长期关怀、指导和帮助。他仔细阅读了这本书,并提出了很多宝贵的修改建议。我也要感谢列车运行控制系统国家工程中心主任郜春海教授,他给我们提供了大量实测数据,并在系统建模和精确停车方面给予指导和合作。还要特别感谢轨道交通控制与安全国家重点实验室的专项出版资金给予的资助。

另外,我还要感谢我的研究生们,没有他们辛勤的工作,是不可能完成这些研究内容和

这本专著的。他们是盖伟龙、阴佳腾、王丽娟、冷勇林、陈荣、裴丽君、侯赞、曾翔宇、杨诗颖和贾桂文。还要感谢本领域内很多同行专家所做的研究工作对本书的指导和启发作用。在本书中有关同行专家的工作，我们尽可能标注了引用。但是，百密一疏，如有一些标注不到之处，请予以包涵。

由于我的水平有限，写作时间较紧，研究时间也只有 5 年，还没有达到“十年磨一剑”的境界，文中出现的错误在所难免，欢迎广大读者指出。我们将继续完善相关研究，争取在下一个 5 年，推出本书的 2.0 版本，为我国列车驾驶系统从自动化到智能化的发展，略尽微薄之力。

陈德旺

轨道交通控制与安全国家重点实验室

北京交通大学

2014 年 2 月



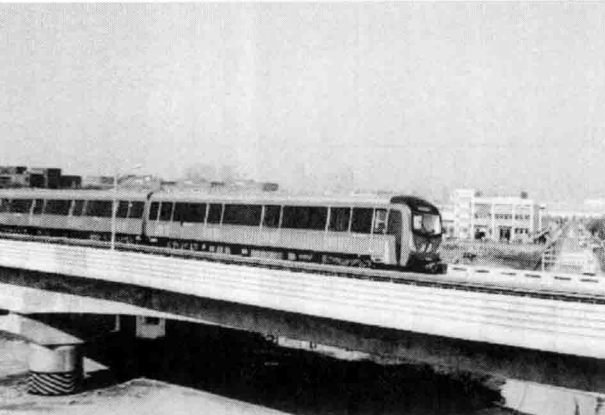
目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 ATC 系统发展概述	1
1.2.1 国外 ATC 系统发展状况	1
1.2.2 国内 ATC 系统发展状况	2
1.3 ATC 系统的基本概念	2
1.4 列车运行控制中的关键问题	4
1.5 本书章节安排	4
本章参考文献	6
第 2 章 列车自动驾驶系统及其综合性能评价	7
2.1 ATO 系统的功能	7
2.1.1 ATO 系统的基本控制功能	7
2.1.2 ATO 系统的服务功能	8
2.1.3 ATO 系统的基本要求	8
2.2 ATO 系统的基本性能指标	9
2.2.1 不超过紧急制动触发速度	9
2.2.2 实现精确停车	9
2.2.3 列车运行准点率	10
2.2.4 节能	10
2.2.5 牵引制动切换频繁度	10
2.2.6 列车舒适度	11
2.3 ATO 系统综合性能评价方法	20
2.3.1 列车不超过紧急制动触发速度的评价方法	20
2.3.2 停车精度、运行时间、能耗等隶属度函数	20
2.3.3 综合性能评价方法	23
2.4 ATO 系统综合性能评价软件设计	24
2.5 本章小结	26
本章参考文献	27
第 3 章 列车运行控制系统参数辨识	28
3.1 系统辨识与列车牵引制动系统简介	28

3.1.1	系统辨识	28
3.1.2	列车牵引与制动	29
3.1.3	列车牵引特性	29
3.1.4	列车制动特性	30
3.1.5	阻力分析	30
3.2	动力学模型	32
3.2.1	单质点列车模型	33
3.2.2	多质点列车模型	33
3.2.3	列车动力学模型	34
3.3	列车基本阻力参数辨识	34
3.3.1	数学模型推导	34
3.3.2	数据预处理	35
3.3.3	参数辨识结果	36
3.3.4	验证	37
3.3.5	在线学习	39
3.4	列车制动状态参数估计	41
3.4.1	制动模型	41
3.4.2	间隔与误差分析	42
3.4.3	辨识结果	43
3.4.4	在线学习	46
3.5	列车牵引状态参数估计	47
3.5.1	牵引模型	47
3.5.2	辨识结果	47
3.5.3	在线更新	48
3.5.4	模型验证	49
3.6	本章小结	50
	本章参考文献	50
第 4 章	列车智能驾驶算法仿真平台	52
4.1	MATLAB/Simulink 仿真平台	52
4.2	列车智能驾驶算法仿真平台设计	54
4.3	列车运行控制 Simulink 模型	54
4.4	列车智能驾驶算法仿真 GUI	59
4.5	仿真平台流程	65
4.6	本章小结	66
	本章参考文献	67
第 5 章	基于专家经验和机器学习的智能驾驶算法	68
5.1	ATO 算法国内外研究现状	68

5.2 列车智能驾驶算法	70
5.2.1 智能驾驶算法技术路线	70
5.2.2 智能驾驶算法的组成部分	72
5.3 智能驾驶算法流程及仿真	78
5.3.1 性能指标	79
5.3.2 仿真结果分析	82
5.4 智能驾驶算法的鲁棒性及适应性分析	82
5.4.1 对列车模型的鲁棒性	82
5.4.2 对复杂限速的适应性	85
5.4.3 对陡坡的适应性	87
5.5 本章小结	90
本章参考文献	91
第6章 停车精度分析及停车算法	93
6.1 概述	93
6.1.1 精确停车的重要性	93
6.1.2 国内外研究现状	94
6.2 列车在车站停车误差估计模型	96
6.2.1 模型一	96
6.2.2 模型二	97
6.3 误差估计模型的仿真	97
6.3.1 性能指标	97
6.3.2 模型参数的在线学习	98
6.3.3 基于实测数据的仿真研究	99
6.4 利用应答器信息的列车精确停车算法	103
6.4.1 基于应答器信息的列车精确停车模型	103
6.4.2 基于牛顿动力学的无学习停车算法	105
6.4.3 固定学习率的启发式学习算法	105
6.4.4 可变学习率在线学习算法	106
6.5 停车算法的仿真	107
6.5.1 仿真平台	107
6.5.2 在线学习算法的仿真实验验证	111
6.6 本章小结	114
本章参考文献	115
第7章 列车节能优化操纵算法	116
7.1 概述	116
7.1.1 列车运行能耗分析	116
7.1.2 国内外研究现状	118

7.2 能耗模型与遗传算法	119
7.2.1 列车运行能耗模型	119
7.2.2 遗传算法简介	120
7.3 单目标列车节能操纵优化	122
7.3.1 遗传算法的相关设置	122
7.3.2 节能操纵优化与仿真	123
7.4 多目标优化与节能	124
7.4.1 基于加权遗传的多目标优化与仿真	124
7.4.2 多目标遗传算法优化与仿真	127
7.4.3 算法性能对比与分析	130
7.5 总结与展望	132
本章参考文献	133
 第 8 章 人工驾驶数据挖掘	135
8.1 人工驾驶与自动驾驶	135
8.1.1 列车驾驶模式	135
8.1.2 地铁亦庄线简介	136
8.1.3 自动驾驶与人工驾驶对比分析	138
8.2 数据挖掘方法	140
8.2.1 数据挖掘产生的背景	140
8.2.2 数据挖掘的任务及过程	141
8.3 数据与算法	142
8.3.1 人工驾驶数据采集与选择	142
8.3.2 数据挖掘算法	144
8.4 列车智能驾驶模型	148
8.4.1 性能评价指标	148
8.4.2 实际线路数据仿真	150
8.4.3 基于数据挖掘算法的列车智能驾驶模型软件	152
8.5 本章小结	154
本章参考文献	154
 第 9 章 总结与展望	156
9.1 总结	156
9.2 展望	157



第1章 绪 论

本章主要介绍 ATC 系统的发展历史和系统组成,然后介绍本书的章节安排和各章节的主要内容。

1.1 引言

近年来,随着公共交通对高效、便捷、安全等需求日益增强,我国城市轨道交通建设得到了迅猛发展,各大城市地铁、轻轨等轨道交通基础项目相继开建。目前,全国将近 50 个城市具备了地铁建设的需求和条件,国务院已批复我国 28 个城市兴建城市轨道交通。在北京、上海、广州、深圳、天津、杭州等 35 个城市的近期规划中,地铁占 72%,轻轨占 10%,市域快速轨道交通系统占 8%。预计到 2015 年,总投资额接近 11 568 亿元,是 2010 年的 5.9 倍。我国城市轨道交通行业将步入一个跨越式发展的新阶段,中国已经成为世界上最大的城市轨道交通市场。

国外的城市轨道交通系统往往采用高密度、高速度的运营方式,因此必须依赖先进的轨道交通信号进行控制和管理。原来的列车运行控制要依靠司机,随着科技的进步,轨道交通也迅速发展,行车速度快、载客量大和追踪间隔变短成为其主要特点,这也大大增加了司机的驾驶难度,因而容易导致交通事故的发生。

根据以上考虑,列车自动控制(Automatic Train Control, ATC)系统应运而生。ATC 是将先进的控制技术、通信技术、计算机技术和轨道交通信号技术融为一体的行车指挥、控制、管理自动化系统^[1]。然而,目前我国地铁信号系统的关键技术主要是由国外引进的,并且不尽相同。成套的引进轨道交通信号系统设备不仅费用高,而且升级换代比较困难,更不利于设备的互联互通。国家相关科技部门指出,地铁的关键技术要实现以自主知识产权为主。

1.2 ATC 系统发展概述

1.2.1 国外 ATC 系统发展状况

ATC 系统自 20 世纪 70 年代投入运用至今,经历了 40 年的发展,技术日趋成熟,为使



列车控制技术指标更加合理,世界上许多国家纷纷探究更为先进的 ATC 系统。最早出现的 ATC 系统为固定闭塞系统,采用传统的多信息音频轨道电路,按照固定模式,根据线路情况、固定的速度和列车特性等级确定闭塞分区长度,列车的最小行车间就是闭塞分区,且需设立防护区段。依赖指定列车的性能来划分固定闭塞分区,如果线路上有不同性能的列车,需按最差性能的列车制动条件进行设计,以保证列车行车安全。

20 世纪 80 年代是计算机技术飞速发展的黄金时期,这为地铁信号系统的发展创造了良好的软硬件环境。世界上一些著名的信号公司,如德国的西门子公司、日本的日立公司、美国的西屋公司、法国的阿尔斯通公司等相继推出准移动闭塞 ATC 系统。准移动闭塞 ATC 系统的列车占用检测和 ATP 信息以数字式音频无绝缘轨道电路作为传输媒介,通过音频轨道电路的发送设备向车载设备提供目标距离、线路状态、目标速度等信息。为保证列车在速度—距离曲线下能够有序地运行,列车运行的速度—距离曲线通过 ATP 车载设备结合固定的车辆性能数据计算得到。在这种 ATC 系统中,列车最小行车安全间隔为闭塞分区,根据目标距离和目标速度随时调整列车的行车距离,固定闭塞较列车追踪运行的最小安全间隔长,有利于提高区间通过能力。目前,基于准移动闭塞的 ATC 系统在世界范围内得到了广泛应用,并且取得了良好的效果。典型的有日本的数字 ATC、德国的 LZB80、加拿大的 Scltrac MB 等系统设备。

以日本为例,自 20 世纪 90 年代开始,为进一步提高列车运行速度、减少轨道电路的安装和维护费用、缩短列车运行间隔时间,日本铁路开始研究新一代数字 ATC 系统。数字 ATC 系统改善了旅客乘车的舒适度,缩短了列车运行间隔时间。如今,作为准移动闭塞 ATC 系统基础的数字轨道电路正朝着双向信息传输和更高的传输速率方向发展^[2]。

1.2.2 国内 ATC 系统发展状况

目前,国内地铁的很多先进设备大都从国外进口,并没有形成自己的一整套系统。作为欧洲未来标准化的新型列车控制系统正在高效实施。我国制定城市轨道交通列车自动控制(ATC)系统技术标准具有很大的必要性,研制有自主知识产权的 ATC 系统已经迫在眉睫^[3]。

于 2010 年 12 月 30 日开通的北京地铁亦庄线标志着国产化地铁信号控制系统的成功运用^[4]。负责该线 ATC 系统设计的北京交控科技有限公司依托于北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室,是国内较早研究 CBTC 的公司。此外,北京全路通信信号有限公司、中国铁道科学研究院也在研究自己的 ATC 系统。这些都将大力推动我国 ATC 系统的蓬勃发展。

1.3 ATC 系统的基本概念

列车运行控制系统是根据列车在铁路线路上运行的客观条件和实际情况,对列车运行速度及制动方式等状态进行监督、控制和调整的技术装备,如图 1-1 所示。

世界上新建的地铁系统大都配置了先进的列车自动控制设备,以此来保证列车运行的安全性,以及操作的方便性和灵活性。ATC 系统由 ATP(列车自动防护)、ATO(列车自动运行)、ATS(列车自动监控)3 个子系统组成。ATP 是 ATC 系统最重要的部分,可以执行列车与列车之间距离的监控、超速防护等功能;ATO 主要执行列车站间自动运行、定点停车、自动折返等功能;ATS 主要是监督列车状态^[5]。这 3 个子系统之间的连接关系如图 1-2 所示。

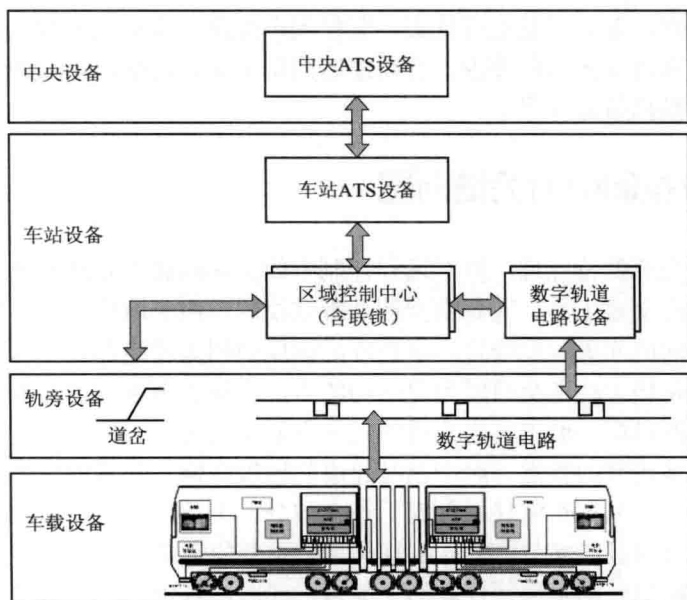


图 1-1 列车运行控制系统

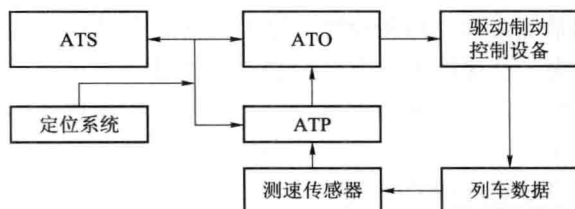


图 1-2 ATC 系统组成

1. ATP 子系统

ATP 作为 ATC 的子系统,通过列车检测、列车间隔控制和联锁(联锁设备可以是独立的,有的系统也可以包含在 ATP 系统中)等实现对列车相撞、超速和其他危险的故障—安全防护列车自动控制系统。ATP 子系统是整个 ATC 系统的基础。ATO 子系统和 ATS 子系统都依托于 ATP 子系统的工作。列车自动防护系统(ATP)亦称列车超速防护系统,其功能为列车超过规定速度时即自动制动,当车载设备接收地面限速信息,经信息处理后与实际速度比较,当列车实际速度超过限速后,由制动装置控制列车制动系统制动。

2. ATO 子系统

ATO 子系统自动控制列车行驶、确保列车安全和指挥列车驾驶。ATC 系统必须包括列车自动防护(ATP),可以包括列车自动监督(ATS)和列车自动驾驶(ATO)。列车自动驾驶用于代替司机完成列车驱动和设备制动等操作,自动实现列车的启动加速、匀速、惰行、制动等基本功能。

3. ATS 子系统

ATS 子系统作为列车自动控制系统 ATC 的子系统监督列车、自动调整列车运行,以保证列车按时刻表运行,提供调整服务的数据,以尽可能减少列车未正点运行造成的不便。自动



进行列车运行图管理,及时调整运行计划,监控列车进路,自动显示列车运行和设备状态,完成电气集中联锁和自动闭塞的要求,自动绘制列车实际运行图,车站旅客导向,车辆检修期的管理,列车的模拟仿真等^[6]。

1.4 列车运行控制中的关键问题

由于城市轨道交通的特殊性,列车运行控制中的关键问题主要是安全问题、效率问题和成本问题。对于任何交通工具,人身安全都是最重要的。由于地铁运行于较为封闭的环境,而且列车与列车之间的间隔时间较短,不合理的调度或列车超速都会对列车运行安全造成威胁。此外,效率高是城市轨道交通较为突出的特点,密集的车辆调度,最大化地实现人员流动是城市轨道交通的目标。城市轨道交通的效率主要体现为列车追踪间隔时间,如何最优化地安排车辆的接发是研究的重点。对于已经建成的地铁线路,此后的成本问题主要为运营成本。就列车本身而言,列车牵引耗电占据了绝大部分。因此,从效率和成本来说,研究一种能够遵循运营计划时间且能够节能的控制算法具有重要的意义。

先进的控制算法也是列车运行控制的关键科学问题,包含了以下关键技术。

(1) 控制性能评价。控制算法的优劣需要用一定的指标衡量,基于这些基本的算法比较才能体现各个算法的优劣。而且,有些优化控制算法依赖这些性能指标的数学表述。

(2) 列车运行控制系统模型。由于控制算法的被控对象是列车,如果系统模型的特性能够用数学的方法表示出来,这将极大地方便控制算法的设计。

(3) 仿真平台。列车运行控制现场测试是一个需要多方面进行协调的过程,新算法的研究很难直接用于实际列车控制。因此,仿真平台的搭建有利于新算法的初步实现及其验证,仿真平台的仿真性能直接影响算法的研究。

(4) 控制算法研究。这是最为关键的问题,先进的控制算法能够带来优越的控制性能,进而影响城市轨道交通运营效率和成本。

上述4个关键问题所涉及的内容,有机结合,相辅相成,是实现列车运行控制技术必不可少的4个过程^[7-9]。

1.5 本书章节安排

本书围绕上述4个问题,对列车运行控制技术的实现进行了系统的研究。本书各章的内容安排如下。

第1章:概述ATC系统的发展历程和基本概念,阐述本书整体架构和出书目的。

第2章:简要概述ATO系统的基本功能和基本性能评价指标。然后,针对ATO系统的这些性能指标,给出各性能指标的数学表述。将这些性能指标量化主要基于两点考虑:①算法的优劣评判需要一些统一的指标;②优化算法需要用到这些性能指标的数学表达式作为优化函数的一部分。这些性能指标的数学表述中,尤其是舒适度的表示,由于目前没有统一的标志,本章给出了3种舒适度评价模型,并通过对比算法求得的结果与实际人员感受进行了对比分析。为方便评价判断,在给出各性能指标分配权重的基础上,本章给出了一种综合性能评价方法,最后展示了相关软件的设计。



第3章：列车作为被控对象，算法研究开始前有必要了解其特性。本章利用列车运行记录的信息对列车运行控制系统进行系统辨识。在介绍系统辨识基本方法后，针对列车运行特性，建立了列车运行控制的单质点模型、多质点模型和动力学模型。利用实测数据，对列车牵引系统、制动系统和基本阻力进行了参数辨识，并研究参数的在线学习算法，通过交叉校验的验证方法，验证了参数的有效性。

第4章：仿真平台作为仿真算法的有力工具，方便了算法在实际运用之前的改进和验证。本章详细介绍了列车运行控制 Simulink 仿真模型各模块的类型、功能和连接关系，并且针对 GUI 的设计，详细介绍了 GUI 函数控制 Simulink 的详细代码，为读者提供关键问题的解决方法。最后，给出了本平台的仿真流程，进一步阐明平台建设的思路。该平台可作为列车运行控制仿真的通用平台，因为算法的实现通过代码完成，开发算法仅需在文本中输入代码，不需要考虑 Simulink 模块的兼容与否。

第5章：优化轨道交通的运行性能，关键是算法的优劣。本章简单介绍列车运行控制的常用控制算法：PID 控制、模糊控制和学习控制之后，着重介绍了一种基于专家经验和机器学习的列车智能驾驶算法。该算法旨在改善现有算法的运行控制性能。针对大多数算法基于数学模型的设计方法，本章算法不依赖列车运行控制数学模型，这样对列车运行控制参数有较大的鲁棒性；针对大部分方法跟踪目标速度的控制方式，本章算法无须离线的目标速度曲线，这样能够灵活应对运行时间的变化，同时在一定程度上更节能。详细介绍算法的构建之后，利用第4章搭建仿真平台，对本书算法利用实际线路数据进行了有效性、优越性、灵活性和鲁棒性的仿真。

第6章：基于城市轨道交通停车精度要求很高的现实需求，对停车模型和在线学习算法进行了深入分析和研究。根据城市轨道交通列车的制动特性，提出两个简化的列车停车误差估计模型，并且推导了参数的在线调整方法，利用实测停车数据对列车停车误差模型进行了训练和验证；之后进一步提出依靠车站布置的若干应答器所提供的精确定位信息的列车停车在线学习算法，并且建立了城市轨道交通列车精确停车仿真平台。结果表明，该算法能够将停车误差控制在 30 cm 之内，提高了停车精度和可靠性。

第7章：列车节能优化操纵是列车节能控制的主要研究方向，对降低城市轨道交通运营能耗有着非常重要的作用。本章首先介绍了列车节能优化操纵国内外的研究现状，之后根据北京地铁亦庄线的实际线路情况建立了列车的能耗模型。本章利用遗传算法对列车能耗进行了单目标优化，并利用实际运行数据进行了仿真。此外，由于列车在运行过程中是一个关于能耗最低、运行时间最佳和舒适度最高的多目标优化问题，本章采用加权遗传算法和多目标遗传算法进行问题的优化，并采用实际数据进行仿真。

第8章：人工驾驶是一种智能的驾驶模式，从人工驾驶数据中学习智能的驾驶策略，是一种有效地使列车从自动驾驶到智能驾驶的研究思路。本章的研究就是基于以上思路，利用人工驾驶记录的大量数据，采用数据挖掘中的聚类分析、回归分析，得到智能的驾驶策略。利用这些挖掘的学习策略，本章在相关仿真平台进行了学习策略仿真验证，对比分析司机驾驶数据，学习策略能够较好地模拟司机驾驶，为今后算法的研究提供了一种研究方向。

第9章：在对本书内容进行简洁的总结之后，对列车自动驾驶系统的前景进行了展望。



本章参考文献

- [1] 任丛美, 吴洪文. 列车自动控制系统浅析. 无线互联科技, 2013 (4): 91.
- [2] 刘桂英, 刘凤凤. 列车自动监控系统 (ATC) 的发展状况. 数字化用户, 2013 (13).
- [3] 丰文胜, 黄钟. 城市轨道交通列车自动控制系统的标准化设想. 城市轨道交通研究, 2002, 5 (4): 36-38.
- [4] 牛英明, 黄友能, 智国盛, 等. 北京地铁亦庄线 CBTC 示范工程的实施. 都市快轨交通, 2011, 24 (4): 9-11.
- [5] 蔡爱华, 季锦章. 地铁信号系统的现状及发展趋势. 电子工程师, 2000, 26 (5): 1-6.
- [6] 瞿莉丽. 浅谈列车自动控制系统 ATC. 科技信息: 学术版, 2008 (36).
- [7] 曾小清, 邱磊, 袁志鹏, 等. 列车运行控制及闭塞技术. 科学, 2011, 63 (5): 45-48.
- [8] 张琼燕, 邓瀚, 赵霞. 城市轨道交通列车运行控制系统仿真分析与研究. 城市轨道交通研究, 2012, 15 (8): 103-107.
- [9] 万林, 范明. 列车运行控制系统仿真平台的研究. 铁道通信信号, 2010, (8): 71-74.



第2章 列车自动驾驶系统 及其综合性能评价

列车自动驾驶(ATO)已经成为轨道交通发展的重要目标之一,北京近期开通的多条地铁线路均采用了列车自动驾驶技术,如何评价ATO系统的性能显得至关重要。一个高性能的ATO系统能够在保证列车安全、正点、运行过程舒适的同时,使能耗和运行时间达到铁路运营部门的要求。

本章首先对列车自动驾驶过程中的停车精度、准时性、舒适性、能耗等相关要素进行分析,结合模糊隶属度函数,制定了各要素的评价方法。然后,将各个指标的评价方法综合成为统一的ATO系统性能评价方法。为了更好地应用该方法对ATO系统的综合性能进行评价,本书利用MATLAB进行了软件开发,对北京地铁亦庄线ATO系统的综合性能进行了评价,收到了很好的效果。

2.1 ATO系统的功能

ATO系统根据ATP提供的数据,在ATP的监控下,自动控制列车的加速、巡航、惰行、制动等^[1]。它的功能分为基本控制功能和服务功能。基本控制功能是自动驾驶、自动折返、车门打开。这3个控制功能相互之间独立地运行;服务功能包括列车位置、允许速度、巡航/惰行等。

2.1.1 ATO系统的基本控制功能

1. 自动驾驶

- (1) 自动调整列车运行速度。
- (2) 自动进行停车点的目标制动。
- (3) 从车站自动发车。
- (4) 区间内临时停车。
- (5) 自动考虑限速区间。

2. 无人自动折返

无人自动折返是一种特殊情况下的驾驶模式,该模式不需要司机的控制,而且列车上的



全部控制台将被锁闭^[2]。从接收到无人驾驶折返运行许可时,列车就自动进入无人自动折返模式。这时列车会自动回到出发站台。列车到达出发站台后,ATC车载设备就会退出无人自动折返模式。

3. 自动控制车门开闭

ATP子系统负责监督开门的条件,当ATP发出“开门”命令后,可以按照事前的设定由ATO子系统自动地打开车门,也可以由司机手动打开正确一侧的车门。车门的闭合只能由司机来控制。车门打开功能的输入来自ATP功能的车门释放、运行方向和打开车门的数据,以及来自ATS的确定目的地信号^[3]。

2.1.2 ATO 系统的服务功能

1. 列车位置

列车位置功能从ATP功能中接收到当前列车的位置和速度等详细信息。根据上一次计算后所运行的距离来调整列车的实际位置。此调整也考虑到在ATP功能计算列车位置时传送和接收的延迟时间,以及打滑和滑行。

另外,ATO功能与测速单元的接口为控制提供更高的测量精确性。列车位置功能也接收到地面同步的详细信息,由此确定列车的实际位置和计算列车位置的误差。对于列车位置调整,可在由ATO功能规定的直至接近实际停车点10~15m的任意位置开始。由于这种调整,停车精度由ATO控制在希望的范围内^[4]。

2. 允许速度

允许速度功能为ATO速度控制器提供列车在轨道任意点的对应速度值。这个速度没有被优化,只是低于当前速度限制和制动曲线给出的限制。允许列车速度调整是为了能源优化或由惰行/巡航功能完成的列车运行。允许速度功能的输入来自ATP功能的轨道当前位置的速度限制,以及列车制动曲线。允许速度功能的输出至ATO速度控制器。

3. 巡航/惰行功能

巡航/惰行功能的任务是按照时刻表自动实现列车区间运行的惰行控制,同时节省能源,保证最大能量效率^[5]。

2.1.3 ATO 系统的基本要求

(1) 根据线路条件、道岔状态、前方列车位置等,实现列车速度自动控制。列车在区间停车应尽量接近前方目的地。列车在区间停车后,在允许信号的条件下列车自动启动;车站发车时,列车启动由司机控制。

(2) ATO系统应能提供多种区间运行模式,满足不同行车间隔的运行要求,适应列车运行调整的需要;司机手动驾驶及由ATO系统驾驶之间可在任何时候转换;手动驾驶时由ATP系统负责安全速度监督,自动驾驶时由ATO系统给出对驱动、控制设备的命令,ATP系统仍然负责速度监督。

(3) ATO系统的定点停车精度应根据站台计算长度、列车性能和屏蔽门的设置等因素选定。站台定点停车精度宜在 $\pm 0.25 \sim \pm 0.50$ m范围内选择。

(4) ATO系统的控制过程应满足舒适度和快捷性的要求。舒适度的要求主要是牵引、惰行和制动控制,以及各种工况之间的转换控制过程的加、减速度的变化率。快捷性主要是指