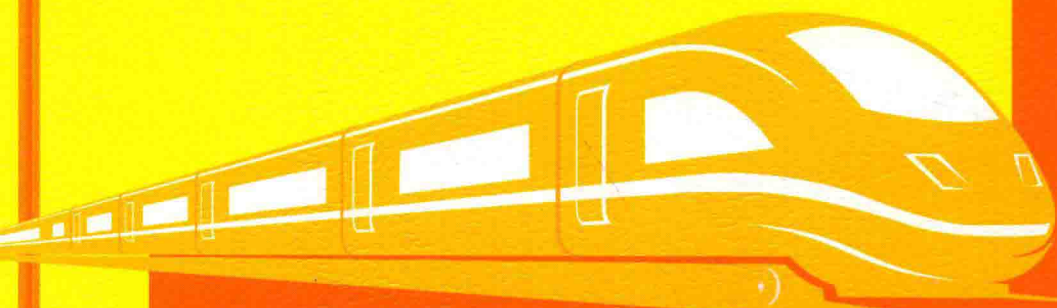


市域快速轨道交通

线路技术条件研究理论与方法

史海欧 易思蓉 王仲林 著



SHIYU KUAISU GUIDAO JIAOTONG
XIANLU JISHU TIAOJIAN YANJIU LILUN YU FANGFA



西南交通大学出版社

市域快速轨道交通 线路技术条件研究理论与方法

史海欧 易思蓉 王仲林 著

西南交通大学出版社

• 成都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

市域快速轨道交通线路技术条件研究理论与方法 /
史海欧, 易思蓉, 王仲林著. —成都: 西南交通大学出
版社, 2018.7

ISBN 978-7-5643-6217-1

I. ①市… II. ①史… ②易… ③王… III. ①城市铁
路—轨道交通—铁路线路—研究 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 119906 号

市域快速轨道交通线路技术条件研究理论与方法

史海欧 易思蓉 王仲林 著

责任编辑	杨 勇
封面设计	墨创文化
	西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	12.75
字 数	228 千
版 次	2018 年 7 月第 1 版
印 次	2018 年 7 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-6217-1
定 价	58.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

随着城市建设的蓬勃发展，副中心、卫星城概念不断提升，城市轨道交通掀起了新一轮建设高潮。特大城市如北京、广州、深圳等在轨网规划中都提出了市域快线系统布局，以加强外围副中心、周边城镇与城市中心区的快速联系，对城市轨道交通的出行时空目标提出了更高的要求，越来越多的城市也开始重视市域快线的建设。

城市副中心和卫星城的发展离不开市域快线的支持，规划提出的时空目标要求也是越来越高，而这些线路长度一般都超过 50 km 甚至达到 100 km 以上，线路的最高运行速度也在不断突破。广州率先在 2005 年年底开通了 3 号线首通段，2006 年年底开通了一期工程（广州东站至番禺广场），为国内第一次采用最高运行速度 120 km/h 车型的市域快线，实现番禺副中心至中心区出行时间在 30 min 以内，旅行速度达到 49 km/h。广州地铁对更高速度等级的线路仍在不断探索，160 km/h 速度等级线路的 18 号线、22 号线也已进入工程实施阶段。

轨道交通线路是轨道交通工程构造物的中心线，同时也是列车的运行轨迹。线路平纵面技术参数取值，对于城市轨道交通的工程投资和旅客列车运行品质具有决定性的影响。从工程角度看，最小曲线半径、竖曲线半径、线路最大坡度、最小坡段长度等参数对市域快线走向、经行区域、线路空间位置、建设规模及建设条件等，均具有重要影响。从列车运行品质看，最小曲线半径、最小坡段长度、缓和曲线等是限制行车速度的关键因素，对列车运营的安全、舒适和平顺性均有重要影响。为了提高行车速度、改善列车运行品质，自 19 世纪末期以来，列车曲线通过理论一直是一个重点研究领域，轮、轨之间的动力学性能也一直是列车曲线通过理论关注的要点。20 世纪 90 年代以来，随着车辆-轨道系统动力学理论和软件的成熟，我国铁路与城市轨道交通领域的专家们开始将车辆动力学仿真分析方法引入线路技术参数设计中，借助车-线动力学仿真分析软件，对拟定的线路参数或设计的线路平纵面进行仿真计算，进而对拟定参数或线路的车-线动力学性能进行评价。综观目前车-线动力学仿真分析方法在线路设计中的应用，基本上属于设计评价。我国轨

道交通线路平纵面技术参数标准取多大是合理的,线路技术条件对车-线动力学性能的影响规律如何?如何借助车-线动力学仿真分析方法选择合理的线路技术参数,使之达到最佳车-线动力学性能的要求?这便是本书所论述的线路技术参数动力学分析理论与方法的初衷。

与国内外相关论著相比,本书介绍的知识具有以下特点:

(1) 综合采用理论分析、动力仿真计算方法,通过舒适度试验、收集国内外相关的线路资料,并与工程实际对比研究分析等方法,解决了线路技术参数动力特性的变化规律、平纵面主要技术参数与动力特性参数之间的理论分析模型、各项技术参数合理取值等空间线形设计的关键问题。

(2) 应用车-线耦合动力学理论,经过大量的仿真计算,揭示了城轨列车在通过曲线时速度、圆曲线半径、实设超高、未被平衡超高、轨道结构、轨道几何形位等技术参数之间的相互动力作用关系及影响规律,给出了曲线路段车体横向加速度与未被平衡超高等技术参数的计算关系式。

(3) 建立了市域快线曲线参数动力学分析理论与方法,完善了城市轨道交通线路技术参数的计算理论与方法。

(4) 提出了 160 km/h 速度等级市域快速轨道交通线路最小曲线半径、缓和曲线长度、最小竖曲线半径、最大坡度、最小坡段长度、夹直线长度等技术参数及相应标准建议值,为制定我国市域快轨设计规范提供了科学依据。

(5) 课题研究成果已被成功应用在广州地铁设计研究院有限公司承担的广州市轨道交通 18 号线、22 号线等市域快速轨道交通项目的设计中,应用本课题的成果指导设计,通过对设计方案的优化,提高了设计质量,降低了工程投资,取得了很高的经济效益。

本书介绍的市域快轨线路技术参数动力学仿真分析方法和分析模型,对于完善城市轨道交通线路技术参数设计理论,指导轨道交通线路设计,促进我国城市轨道交通建设,具有重要的理论意义和实用价值。

本书主要内容基于著者完成的广州地铁设计研究院有限公司科研项目“市域快线 160 km/h 速度等级线路技术标准研究”等项目的研究成果。

本书主要参加撰写人员:史海欧、易思蓉、王仲林、吴嘉、陈超、郑翔、吴梦、王代富、杨冬营、王艺飞、来旭辉、郭旺旺等。

2018 年 3 月

目 录

1	绪 论	1
1.1	研究意义	1
1.2	轨道交通线路技术参数研究概况	2
1.3	曲线参数动力学仿真分析方法的研究概况	4
1.4	相关规范编制概况	7
1.5	基于最佳动力学性能的线路参数研究原理	9
2	车-线动力学分析模型建模	10
2.1	多体系统动力学基本原理	10
2.2	系统坐标系与拓扑关系	13
2.3	车辆系统模型	14
2.4	线路模型	16
2.5	轮轨接触模型	17
2.6	轨道随机不平顺性模型	21
2.7	模型的有效性验证	23
3	系统计算参数与车-线动力学性能评价指标	25
3.1	系统主要技术条件	25
3.2	曲线计算参数与计算条件	31
3.3	车辆系统动力学性能指标评估标准	34
3.4	市域快线铁路曲线参数对车-线动力学性能的影响规律	42
4	最小曲线半径	46
4.1	最小曲线半径计算理论	46
4.2	曲线外轨实设超高允许值确定方法	48
4.3	欠超高允许值确定方法	54

4.4	过超高允许值确定方法	66
4.5	最小曲线半径标准	72
5	缓和曲线	82
5.1	缓和曲线线形	82
5.2	缓和曲线长度	83
6	夹直线及圆曲线的最小长度	104
6.1	夹直线和圆曲线的最小长度的计算原理	104
6.2	国内外夹直线和圆曲线的最小长度	106
6.3	车-线动力学仿真分析	109
6.4	夹直线及圆曲线最小长度建议值	113
7	线间距	114
7.1	线间距及其主要影响因素	114
7.2	$\Delta P_{\max}$ 估算值的空气动力学处理方法	115
7.3	区间明线直线地段线间距 D 建议值	120
8	竖曲线	122
8.1	竖曲线最小半径	122
8.2	竖曲线设置条件	130
9	最大坡度	134
9.1	最大计算坡度	134
9.2	工程经济条件对最大坡度的影响	140
9.3	国内外最大坡度应用情况	141
9.4	最大坡度取值原则	143
10	最小坡段长度	145
10.1	车钩纵向受力条件要求的最小坡段长度	145
10.2	列车运行平稳条件要求的最小坡段长度	151
10.3	旅客列车不同时跨两个变坡点条件要求的坡段长度	154
10.4	国内外工程实践	154
10.5	最小坡段长度推荐值	156
10.6	最大坡段长度限制	157

11	空间线形变化点分布标准	160
11.1	平面线形变化点的分布标准	160
11.2	纵断面线形变化点的分布标准	160
11.3	竖曲线起(讫)点与平面线讫(起)点之间的 最小夹直段长度	161
12	市域快轨车站范围内线路技术条件	171
12.1	车站设计的相关计算参数取值	171
12.2	车站内平面曲线半径	173
12.3	站外两端正线的曲线半径	177
12.4	18°道岔后曲线半径	180
12.5	车站纵断面技术条件	185
	参考文献	194

1 绪 论

1.1 研究意义

随着我国城市规模、人口、经济的飞速发展,越来越多的城市发展趋势呈现出多中心的态势,“多核”“高新区”“副中心”成为城市发展的主要方向之一;城市主副中心、组团间的快速连接通道随之成为支撑城市多中心架构的重要一环。

市域快线作为城市轨道交通线网体系中的组成部分,以服务城市内部组团为主要任务,意在实现城市各区域核心区之间的快速连接,区间长、速度快、开行对数高等特点决定了其与传统地铁、国铁及城际铁路均有所不同。轨道交通市域快线在巴黎、东京、伦敦、纽约等轨道交通建设较早的国外城市已有比较广泛和成功的实践经验;近年来在国内从国家层面到各城市都对规划建设市域轨道交通快线越来越重视,并且在部分城市取得了很好的成效。

广州率先在 2005 年年底开通了 3 号线首通段,2006 年年底开通了一期工程(广州东站至番禺广场),为国内第一次采用最高运行速度 120 km/h 车型的市域快线,实现番禺副中心至中心区出行时间在 30 min 以内,旅行速度达到 49 km/h。采用这种模式最大的特点是中心区外围采用大站间距,充分发挥了速度优势,为市民提供长距离的快速出行。通车 10 余年来,客流实现迅猛发展,日均客流 115 万人,全日客流强度更是达到 3.8 万人/km。正是速度的提高,带动了近郊形成了以地铁站点为中心的高强度开发和交通接驳,是 3 号线成功的最重要原因之一。

另一方面,随着我国区域经济的快速发展,新型城镇化建设步伐不断加快,人们居住、工作观念日渐转变,而外围副中心、卫星城和城市中心城区的联系,其最主要的功能要求是“快”。学术界多以“1 小时”作为评价居民出行时耗的分界点,城市总体规划和综合交通规划中也常以此为目标,而常规公交无法满足要求,采用轨道出行时间也就要求控制在 1 h 以内,时速 160 km 左右、旅行时间 1 h 左右的城市圈/区域经济圈应运而生。

截至目前,国内已相继开通了广州 3 号线、东莞 2 号线、深圳 11 号线、上海 16 号线等多条 120 km/h 速度等级市域快线,但截至目前也仅有广州、北京在探索实施 160 km/h 速度等级线路项目。而对于速度高达 160 km/h 市域快线技术标准,中国土木工程学会于 2017 年 3 月 29 日颁布并实施了《市域快速轨道交通设计规范》(T/CCES2—2017),该规范适用于最高运行速度在 120 到 160 km/h 范围内的钢轮钢轨市域快速轨道交通工程,但未针对城市轨道交通系统的特点,对空间线形技术条件进行系统的理论分析和研究,未对线路技术标准所采用的安全、舒适度进行理论研究,而是采用类比的方式予以确定。

基于此,本课题重点针对 160 km/h 市域快线列车特点,对该速度下市域快线快慢车组合运营线路技术标准进行系统研究分析。

结合线路设计中考虑因素,本研究主要包括:线路平面、纵断面设计相关规范条目理论分析与规范解读;适用于快慢车组合运用模式下 160 km/h 市域快线的线路平面、纵断面技术标准及取值分析过程,以及支撑该技术标准的仿真模拟计算成果。

1.2 轨道交通线路技术参数研究概况

线路平纵面空间线形的技术参数取值,对于城市轨道交通的工程投资和旅客列车运行品质具有决定性的影响。从工程角度看,最小曲线半径、竖曲线半径、线路最大坡度、最小坡段长度等参数对线路走向与路由、经行区域、线路平面位置与敷设方式、建设规模及建设条件等,均具有重要影响。从列车运行品质看,最小曲线半径、最小坡段长度、缓和曲线等是限制行车速度的关键因素,对列车运营的安全、舒适和平顺性均有重要影响。确定线路技术条件的关键参数包括曲线超高度、未被平衡侧向加速度、垂向加速度、超高时变率、欠超高时变率、振动衰减时率等参数,而这些参数的确定受列车运行性能、轨道结构特性等复杂因素的影响。

英国、美国、德国、法国、日本等国均针对确定线路平纵面空间线形的各项参数的合理取值进行过专门研究,提出了适合各国实际的线路参数取值标准,并结合既有线改建和新建铁路的工程实际,进行了试验研究和工程经济分析研究。

我国铁道科学研究院、西南交通大学等单位,曾于 20 世纪 90 年代初,结合广深准高速铁路建设,对准高速铁路线路技术条件进行过理论和试验研

究,并提出了准高速铁路曲线参数的合理取值建议。

“八五”“九五”期间,铁科院、西南交通大学等单位参与的“京沪高速铁路线、桥、隧主要技术条件研究”项目,针对京沪高速铁路的工程实际,对高速铁路线路技术条件及参数的合理取值开展了初步研究。我国2006年前用于指导高速铁路和客运专线的相关设计规范中的线路标准,基本上以国家“八五”“九五”科技攻关项目——“高速铁路线桥隧设计参数选择的研究”的初步研究成果为依据。

“八五”“九五”期间完成的“高速铁路线桥隧设计参数选择的研究”,主要是针对有砟轨道的技术条件研究的,我国在拟定高速铁路和客运专线暂行规定时,由于尚未进行理论和试验研究,仍不能突破“八五”“九五”项目研究中的结论。在采用无砟轨道的客运专线和高速铁路上,并未在工程经济和环保方面体现无砟轨道的优越性。结合我国高速客运专线和京沪高速铁路建设的特点,研究无砟轨道高速铁路曲线主要技术参数,制定合理的无砟轨道高速铁路线路标准,对于提高高速铁路建设质量,降低建设投资均具有重要意义。

1997年以来,围绕我国既有铁路客运提速和客运专线建设,铁道部组织了大量的试验研究,取得了丰富的试验资料。试验资料已反映出现行《暂规》的曲线参数的安全性、平顺性和舒适度有较大富余度。2000年以来,通过既有线200 km/h提速和客运专线建设,我国已确定了自己的高速动车组技术条件,建造出了自己的高速动车组,并且取得了大量试验资料和运营线检测资料。自2008年以来,西南交通大学基于所承担的铁道部、国家铁路局科技规划项目“高速铁路空间线形系统理论与优化研究”“时速400公里级高速铁路空间线形技术条件及线路平纵面参数标准研究”“城际铁路设计规范站前专业标准研究”等项目,采用研究方法包括理论研究、动力学性能仿真分析、客运专线舒适度试验、运营线路实践资料收集与分析、国内外相关研究与工程实际对比分析等多种研究方法,对空间线形的主要平、纵面参数进行了系统研究,取得了多项创新性研究成果,相应研究成果纳入了《高速铁路设计规范》《城际铁路设计规范》,提出的高速铁路曲线技术参数动力学仿真分析方法和分析模型,完善高速铁路空间线形计算理论,在指导高速铁路线路设计与养护维修中发挥了重要的作用。

传统的城市轨道交通钢轮钢轨系统线路技术条件,一直参照普速铁路系统的研究与工程实践成果,未开展系统的理论研究。近年来,随着我国中心城市的双核体系、卫星城市体系和城乡一体化体系的发展,城市轨道交通从100 km/h以下的慢速体系向160 km/h、200 km/h等快速体系发展。目前

160 km/h 级快速轨道交通的规范有《铁路线路设计规范》《城际铁路设计规范》《市域快速轨道交通设计规范》。由于市域轨道快线的技术特性不同于城际铁路,不能直接采用《铁路线路设计规范》《城际铁路设计规范》的相关技术标准,又缺乏统一的设计规范和标准,且各区域的技术特征存在差异,各中心城市结合工程建设的需要,陆续启动了市域快线建设标准编制工作,并制定了相应的地方标准。但在线路技术条件方面,仍然是按照路网铁路的相关标准,未开展系统的理论研究。

综上所述,在我国大力发展中心城市的今天,基于近年来已积累的大量高速客运专线、城际铁路、城市轨道交通等建设、试验和运营资料,结合城市轨道交通系统发展特征,对 160 km/h 级市域快速轨道交通系统线路平纵面空间线形技术条件的计算理论及其参数标准进行深入的研究,对于完善我国轨道交通空间线形设计理论,提高设计质量和运行品质,具有重要的科学意义和工程实用意义。

1.3 曲线参数动力学仿真分析方法的研究概况

传统的铁路曲线参数设计方法是建立在刚体力学上的,即将机车车辆整体假定为质点或刚体,在曲线区段上对其进行力学分析,然后基于未被平衡离心加速度及轨道磨耗等因素选择曲线参数,属于一种准静态的设计方法。这种准静态的设计方法能够很好地适应列车低速运行的情况,而在高速行车的条件下的适应性,还需进一步的探讨。随着世界高速铁路建设的发展,早在 20 世纪 90 年初我国科研工作就开始了相关的研究。

20 世纪 90 年代初期,在机车车辆的非线性稳态曲线通过理论传入我国后,我国科研工作者即开始采用这一理论进行高速铁路曲线参数的探讨。非线性稳态曲线通过理论考虑了轮轨接触的大蠕滑现象,同时也考虑了蠕滑特性和轮轨接触几何关系的非线性以及悬挂系统中的非线性。这一时期具有代表性的研究工作有:戴焕云从理论上给出了高速铁道车辆所能通过的最小曲线半径、超高等,同时给出了对车辆曲线通过性能有影响的几个参数,以确定最佳的悬挂参数和结构参数。付茂海等从国外各型客车转向架中选取一组计算参数,在建立客车横向动力学模型的基础上,研究高速客车通过曲线时的动态响应及安全性,并对转向架各悬挂参数合理选择进行分析,以及对适应于高速客运的线路提出了要求。

20 世纪 90 年代中期,随着机车车辆的动态曲线通过理论的发展,高速铁

路曲线参数的研究方法和内容也发生了变化。动态曲线通过理论更深入地考虑到曲线段各种情况,例如圆曲线上存在着线路不平顺,轮踏面与钢轨间可能的两点接触,车辆前后端牵引缓冲装置的作用等。利用动态曲线通过理论可以获得车辆运行时较为完整的动力学信息,目前较多的商用软件还保留相关功能。这一时期,付秀通等建立了一个多自由度的非线性模型,以实测的轨道方向不平顺样本作为输入数据,研究了机车非线性动态曲线通过和非线性直线横向响应。练松良等用机车车辆非线性动态曲线通过理论,研究了竖曲线与平面缓和曲线重叠对机车车辆曲线通过时的安全性和平稳性的影响。肖国根、范俊杰、童本浩、王小文等在理论分析与计算的基础上,参照国外研究成果,对高速铁路轨道结构及线路参数,尤其是缓和曲线长度及形式进行了深入的研究。

20世纪90年代中后期,随着我国高速铁路建设工作提上日程,针对高速铁路相关问题的研究工作异常活跃。与此同时,得益于轮轨接触关系研究所取得的重大进展,使得较为系统、准确地对车辆、轨道相互作用成为可能。翟婉明系统提出的车辆-轨道耦合动力学理论,并综合考虑了车辆动力学模型和轨道动力学模型,集车辆系统和轨道系统为一体,提出了车辆-轨道垂向耦合动力学模型,并在之后提出了车辆-轨道垂向、横向相互作用详细模型。这一耦合动力学理论的提出,在很大程度上促进了我国高速铁路科学的发展,为以后许多的研究奠定了理论的基础。岳渠德、李成辉、王平、刘学毅、雷晓燕、练松良等科学工作者相继在铁路车辆与轨道动力相互作用理论与实践方面开展了大量的研究工作。沈锐利、曾庆元、单德山、李小珍、高芒芒、张格明、夏禾、蔡成标、吴定俊等针对列车在桥上运行所引起的车桥系统振动问题提出了许多各具特色的车桥动力相互关系模型。这些理论与实践方面的研究工作,使得车辆与结构耦合理论日益成熟。车辆与结构耦合理论的发展,一方面为我国铁路的提速与高速化提供了有力的保障,另一方面使得基于车线动力学来研究线路设计参数成为一种可行的新方法,而这种方法更能准确地反映各线路参数对行车安全、运行稳定及乘坐舒适性的影响。这一时期针对铁路曲线参数的主要研究有:在既有线提速的研究中,朱开明等从动力学角度研究、分析轨向、轨距不平顺对车辆动力响应的影响,提出线路改道中的问题。王开云、周维俊等基于机车车辆-轨道耦合动力学理论,对提速机车车辆通过山区小半径曲线、客货共线线路纵断面坡度组合及平纵断面匹配等问题进行了研究。练松良对秦沈客运专线线路设计中竖曲线与平面曲线重叠问题进行了理论及试验研究,验证了混跑模式下平曲线与竖曲线零距离搭接时的可行性,同时计算了车辆通过竖曲线时的振动衰减距离。刘鑫等采

用北美铁道协会开发商业软件 NUCARS, 对秦沈专线高速试验段采用三次抛物线型缓和曲线进行了列车线路动力学仿真分析, 并考虑不同超高设置方法的影响, 将分析结果与半波正弦缓和曲线进行对比, 得出三次螺旋线缓和曲线线型及中国采用的超高方式满足秦沈线试验段高速的舒适性和安全性的要求。张毓等分别通过试验的方法验证了秦沈客运专线缓和曲线参数设置的合理性和既有线最小半径 2 200 m 曲线动力学性能的合理性。针对高速铁路曲线参数选取问题, 朱颖等基于车辆-轨道耦合理论分别对列车动态通过高中速客车共线与高低速混跑的曲线轨道进行了动力学性能指标的仿真计算、分析与评价, 探明了考虑列车动态运行在曲线轨道上的行车安全、运行平稳性及轮轨磨耗等多项动力学性能指标下最小曲线半径的动力性能, 从而作为制定最小曲线半径技术可行、经济合理的有力支撑。宣言在其博士学位论文中对客运专线曲线车线耦合动力学性能与无砟轨道结构的振动响应做了仿真研究。宋晓文、马卫华等讨论了缓和曲线长度对机车车辆通过性能的影响。基于车-线动力学模型, 易思蓉通过建立转向架纵向刚度与高速铁路最小曲线半径仿真模型, 探索了基于车辆动力学仿真对高速铁路最小曲线半径进行优化的方法。何华武等仿真计算了提速线路夹直线和圆曲线的最小长度。龙许友利用 MATLAB 对高速铁路曲线参数对车线系统动力响应和线路参数优化匹配进行了研究, 并通过少量的算例说明了曲线参数在无砟轨道不平顺条件下对车-线系统动力学响应的规律。陈文豪通过 Ansys 分析了我国无砟轨道最小曲线半径的取值问题。翟婉明等基于机车车辆与线路最佳匹配设计原理, 采用车辆-轨道耦合动力学仿真技术, 提出了一套切实可行的评估方法。周志华基于 ADAMS/Rail 软件对高速客运专线平纵断面设计参数进行了动力分析。

在国外, 高速铁路发达国家也利用动力学理论与计算机仿真手段对系统动力响应与线路几何条件的关系进行了大量研究。其中具有代表性的有: Z. Krzyszto 对车辆动态曲线通过时曲线半径、超高及行车速度对行车动力性能影响作了深入研究。K. Miyagaki、Y. Sato 等对缓和曲线线型从频域及时域上进行了系统分析, 并以此提出了新的缓和曲线线型。Louis T. Klauder 利用车辆动力学仿真软件 NUCARS 计算 ACELA 客车通过缓和曲线时的车体横向加速度和轮轨横向力, 提出改善型三次抛物线缓和曲线能明显降低车体横向加速度和轮轨横向力的变化幅度, 但缓和曲线的设置难度相应增大。

总结上述已有的研究可以发现, 早期铁路曲线参数的研究多针对当时争议比较大的缓和曲线类型以及长度是否能够满足提速或高速行驶需要的问題, 而近期的研究则更多的关注高速铁路曲线参数之间以及与平纵断面其他设计参数之间的合理匹配问题。所采用的研究方法也随着车辆系统动力学的

发展而异：由早期的非线性稳态曲线通过理论、动态曲线通过理论过渡到更加细致、精确，更能反映车辆、轨道整个大系统的车-线耦合理论。由于基于车-线耦合理论的商用软件目前还不多，一般需要自编程序实现，难度较大，所以目前的研究工作更多的是依赖于多体动力学商用软件，如 SIMPACK、ADAMS/Rail 等。这类商用软件的一大特点是更多地关注车辆系统的模拟，而将轨道结构简化为一个弹性块，忽略了轨道结构的具体构造，没有真实地反映车辆系统与轨道系统之间复杂的相互作用关系，得到的结论在理论上存在一定的不足。而现有基于车-线耦合理论的曲线参数研究中，要么建模时对线路模型进行了大量的简化，如用离散的少数点对线路进行数值方法拟合，要么仅是对少量的典型运行工况进行验证式的研究，所得出的结论必然存在一定的偏差，难以对曲线参数及其匹配形式对车-线系统的影响规律有清楚的认知。

1.4 相关规范编制概况

铁路及轨道交通线路平纵面空间线形作为结构物的中心线和列车运行轨迹，其技术参数取值对构造物建设和列车运行条件具有至关重要的影响，因此在所有相关规范中，均制定了严格的技术标准。正如前述，英国、美国、德国、法国、日本等国均针对确定线路平纵面空间线形的各项参数的合理取值进行过专门研究，并结合既有线改建和新建铁路的工程实际，进行了试验研究和工程经济分析研究。在此基础上，制定了适合各国实际的线路技术参数标准。

在规范与标准方面，欧美国家铁路与城市轨道交通是统一体系，相关标准也是按统一体系制定。美国所有的铁路都是私营的。各个铁路所在地区的地形不尽相同，运营传统也不尽相同，因而无法作出详细规程，但美国铁路工程协会的规范是需要在全国应用的规定。1842 年，法国制定了最早的铁路工程规范，且 100 多年来，随着技术的不断创新，不断更新相应的技术规范 and 标准，其铁路技术的进步不断地影响着铁路定线设计。德国《铁路技术管理规程》对铁路基础设施的设计、线路的线形和选线设计作了详细规定。1994 年德国铁路改革后，铁路线形和选线设计还执行欧盟铁路规程 RL96/48/EG 的互操作性技术条件基础设施篇相应规定。日本国土交通省铁路局和土木技术标准研究会制定的《铁道技术标准》，对各轨道交通系统的线形与选线设计制定了详细的标准与规定。

作为我国铁路领域的国家标准之一，《铁路线路设计规范》一直是指导铁

路线路设计的重要规范。自 1965 年首次制定统一规范以来,共进行了 4 次重大修订。1995 年之前的版本,设计速度是 120 km/h,设计原则基本上基于最经济原则。1995 年以后,随着铁路技术水平的提高和我国经济水平的不断提高,铁路设计理念由经济原则转为满足速度目标值原则;从此,随着铁路速度水平的不断提高,我国铁路的速度目标值由原来单一的 120 km/h 设计速度不断发展到 120 km/h、140 km/h、160 km/h、200 km/h、250 km/h、350 km/h 多级设计速度并存体系。为了指导各种类型速度的铁路设计,铁道部组织制定了相应的设计规范、暂规或技术条件,主要包括:《铁路线路设计规范(2006)》(以下简称《线规》)、《高速铁路设计规范》(以下简称《高铁规范》)、《时速 200 公里新建铁路线桥隧站设计暂行规定》(以下简称《客运 200 km/h 暂规》)、《新建时速 200~250 km 客运专线铁路设计暂行规定》(以下简称《客运 200~250 km/h 暂规》)、《新建时速 200 公里客货共线铁路设计暂行规定》(以下简称《客货 200 km/h 暂规》)、《既有线提速 200 km/h 技术条件》(以下简称《提速 200 km/h 技术条件》)和《城际铁路设计规范》(以下简称《城际规范》)。

我国城市轨道交通发展较晚。1986 年,根据国家计委的要求,北京市城市建设研究院会同有关单位共同编制了国家标准《地下铁道设计规范》(GB 5017—92),并于 1993 年 1 月颁布执行。该《规范》是我国首次编制的城市轨道交通工程设计国家标准。2000 年,建设部组织对《地下铁道设计规范》进行修订,形成了国家标准《地铁设计规范》(GB 50157—2003),并于 2003 年 8 月 1 日颁布实施。该规范适用于钢轮钢轨系统,最高运营速度为 100 km/h。它也是目前对城市轨道交通线形和选线设计提出系统要求的唯一规范。2000 年以来,随着多制式交通系统在我国城市交通体系中的应用,以北京市为代表的中心城市,适应城市轨道交通系统建设与运营维护的需要,陆续编制了各类轨道交通系统设计规定。住房与城乡建设部(原建设部)适应城市轨道交通建设的需要,也积极组织相关单位编制城市轨道交通系统规范,并于 2009 年 10 月 1 日颁布了《城市轨道交通技术规范》(GB 50490—2009)。本规范是以功能和性能要求为基础的全文强制标准,条款以城市轨道交通安全为主线,统筹考虑了卫生、环境保护、资源节约和维护社会公众利益等方面的技术要求,并未对城市轨道交通的建设和运营提出全面、具体的要求。

为了适应新型城镇化发展,满足市域铁路建设和发展的需要,中国铁道学会组织编制了《市域铁路设计规范》(T/CRS C0101—2017),土木工程学会组织编制了《市域快速轨道交通(120~160 km/h)技术规范》。这两个规范以团体标准发布,适用于新建设计速度 100~160 km/h、运行市域铁路车辆的

标准轨距客运专线铁路。这些规范明确了主要技术标准、综合选线、系统设计、综合开发、安全设计等方面的原则性要求。

上述城市轨道交通规范和标准的编制过程中,均未针对城市轨道交通系统的特点,对空间线形技术条件进行系统的理论分析和研究,未对线路技术标准所采用的安全、舒适度进行理论研究,而是采用类比的方式予以确定。

1.5 基于最佳动力学性能的线路参数研究原理

空间线形技术参数是限制行车速度的关键因素,对列车运营的安全、舒适和平顺性均有重要影响。确定铁路空间线形技术条件的关键参数是曲线超高、未被平衡侧向加速度、超高时变率、欠超高时变率、竖向加速度等参数,而这些参数的确定受高速列车性能、轨道结构特性等复杂因素的影响。本书基于作者最新完成的高速铁路平面纵断面参数计算理论及参数标准研究课题成果,介绍基于最佳动力学性能的空间线形参数计算理论与方法。

应用车-线动力学模型,分析车辆作用下的动力响应和动力性能,研究各动力性能指标随平纵面技术参数、行车速度及超高的变化规律,用动力学仿真分析的方法,建立车-线动力学性能与曲线参数的关系模型,用动力学仿真分析模型确定满足安全性和舒适度标准的空间线形技术参数允许值,分不同速度等级、不同轨道类型确定空间线形技术参数允许值,进而不同速度目标值高速铁路空间线形的技术参数。这种基于动力学仿真分析确定空间线形参数允许值进而确定平纵面技术参数的方法,称为基于最佳车-线动力学性能的空间线形技术参数计算方法。该方法的基本思路是:

首先,综合考虑车辆、曲线线路空间几何特性和轨道结构特性,建立车-线动力学模型;基于所建立的模型,对车辆通过曲线的车-线动力学性能进行分析,研究各项空间线形参数引起的各向力在轨道中的传递规律及其对轨道各部分的影响,提出轨道受力对理论模型修正计算方法;基于车-线动力学模型,对高速列车通过曲线的列车行车平稳和舒适性进行分析,研究列车通过曲线的车辆-轨道相互作用机理,分析理论模型与实际运行状态之间在列车行车平衡、舒适及安全性方面的适合度,提出相应的理论模型修正计算方法。