

西南交通大学出版社

铁路继续教育系列教材

线路工程

铁道部人事司 组织编写
铁道部人才交流培训中心



铁路继续教育系列教材编委会

主 任	华茂昆			
副主任	费克勤	安立敏	温继武	
编 委	杨友根	吴 风	丁圻墀	宋凤书
	胡东源	卢祖文	曹 菁	柳呈祥
	于 川	许守祜	章根明	柴浦安
	顾 聪	蔡申夫	刘国祥	王申庆
	何 壁	张玉秀	杨安立	吴信然
	王 成	朱克勤	赵建国	张全寿
	黄大光			

《线路工程》编委会

主 编 邓午天 李泽民

副主编 卢世荣

主 审 顾培雄 李际中

编 委 邓午天 刘万明 杜 文 许提多
许 伦 王齐荣 郝 瀛 林国斌
林 骏 王秋明 戴玉民

序 言

《铁路继续教育系列教材》，是对铁路专业技术人员进行继续教育的基础读本。它的问世，对于抓好铁路继续教育，提高铁路专业技术队伍的素质是有益的。

铁路是我国交通运输的骨干。在加快改革开放和发展社会主义市场经济的新形势下，铁路面临着新的机遇和挑战。为把我国铁路现代化建设事业全面推向 21 世纪，我们必须以十五大精神为指导，加快铁路改革与发展，实施科教兴路战略，使铁路从传统产业逐步走向现代化。

实现铁路现代化，关键是科技，基础在教育。加快铁路科技进步，提高铁路专业技术队伍的素质，直接关系到铁路现代化的进程，现代科技发展日新月异，世界铁路在高速技术、重载技术、管理技术、安全技术和信息技术等方面取得了重大进展。为了适应新的形势，必须对全路专业技术人员广泛开展继续教育。

为了搞好铁路专业技术人员的继续教育，编写一套好的教材是非常重要的。《铁路继续教育系列教材》反映了现代科学技术发展的水平和铁路企业技术进步的特点，兼顾了教材理论体系的系统性和专业人员选修的适用性，对专业技术人员了解和把握本专业学科领域国内外科技发展动态，学习掌握先进的技术、理论和方法等会有帮助。希望全路各级组织、各级领导都来关心继续教育工作。各单位要根据实际，以这套教材为基础读本，切实抓好继续教育工作。全路广大专业技术人员要通过继续教育，不断更新知识内容，拓宽知识面，为我国铁路现代化建设事业作出新贡献。

这套教材由铁道部人事司、人才交流培训中心组织各方面的专家、教授和学者编写，部机关有关司局进行指导和审定，在此，我谨向为这套教材的编写、出版倾注了大量心血的所有工作人员表示衷心的感谢。

傅 志 寰

一九九七年十二月一日

前 言

本教材是为了适应铁路现代化建设的需要,进一步提高专业技术人员的素质,在铁道部人事司、人才交流培训中心的组织领导下编写的。

继续教育是对在职专业技术人员进行知识和技能的增新、补充、拓展和提高,不断完善知识结构,提高创造能力和专业技术水平的一种受教育途径。故本书按适于自学、有利于实用的要求,立足铁道兼顾公路的特点,以专题的形式介绍了现行铁道工程专业本科教材以外的勘测、设计(含规划)方面的新理论、新技术、新方法,即以最少的外业工作量快速建成高精度地理(环境)信息系统的勘测理论与方法,用先进理论与专家系统迅速完成与自然协调的人工建筑形位的布置与技术设计方法。由于覆盖面较宽,涉及学科较多,篇幅也有严格限制,本书不可能编入所有内容和参考文献目录,也不可能像“手册”那样实用。本书适于铁路设计工作者,也可供相关专业在校学生参考。

铁路勘测与设计继续教育教材的出版,在我国尚属首次,限于编者的水平和经验,本书难免有不足甚至错误之处,诚恳希望读者、专家给予批评指出,以便再版时修正。

本书编写工作由西南交通大学、铁道部第二勘测设计院、中铁二局集团完成。主编邓午天、李泽民,副主编卢世荣;主审顾培雄、李际中。各专题编写人员是:专题1、11 邓午天,专题2 刘万明,专题3 杜文,专题4 许提多,专题5 许伦,专题6 王齐荣,专题7、8 郝瀛,专题9 林国斌,专题10 林骏。

在本书各专题编写过程中提供了宝贵意见或资料的同志有:张小强、魏德勇、魏恕、聂世凯、朱颖、葛根荣、陈红念、白孝勇、王健、易思蓉、赵泽永。在此,谨向他们以及有关专家、领导、文献资料的作者及单位表示衷心的感谢!

编 者

1999年10月

目 录

1 铁路——我国现代交通体系的骨干	1
1.1 铁路是我国现代化交通体系的骨干	1
1.2 铁路的最高速度将是多少	4
1.3 城市轨道交通概述	20
思考题	24
参考文献	24
2 铁路建设项目预可行性研究的基本理论	25
2.1 概 述	25
2.2 铁路建设项目预可行性研究的编制格式	27
2.3 客货运量的调查与预测	30
2.4 铁路设计方案论证	40
2.5 经济评价的基础数据	44
2.6 铁路建设项目的经济评价	51
2.7 综合评价	63
思考题	63
参考文献	64
3 铁路行车组织设计	65
3.1 铁路行车组织设计内容与流程	66
3.2 客流组织设计	70
3.3 货流组织设计	80
3.4 车流组织设计	86
3.5 车站技术作业过程及车站通过能力与改编能力	103
3.6 区间通过能力及输送能力	120
3.7 车站分布	124
思考题	126
参考文献	127
4 测绘新技术	128
4.1 全球定位系统 (GPS) 原理及其在铁路工程测量中的应用	128
4.2 地理信息系统 (GIS) 简介	156
思考题	162
参考文献	162
5 数字摄影测量	163
5.1 概 论	163

5.2	航摄像片的基本特性	165
5.3	立体摄影测量的基本思想	168
5.4	正射投影技术与影像地图简介	168
5.5	数字地面模型及其应用	171
5.6	数字摄影测量	186
	思考题	197
	参考文献	197
6	铁路主要技术标准的综合优选	198
6.1	概 述	198
6.2	铁路主要技术标准综合优化原理	203
6.3	建模方法及主要技术经济指标的数学模型	217
6.4	新建铁路主要技术标准综合优选辅助决策系统简介	227
6.5	铁路主要技术标准综合优化的应用算例	230
6.6	展 望	232
	思考题	234
	参考文献	234
7	既有线客运提速	236
7.1	我国铁路客货列车速度的发展	236
7.2	提高客运速度的基本思路	238
7.3	提高客运速度的技术条件	242
7.4	摆式列车的应用前景	250
	思考题	255
	参考文献	255
8	高速铁路	256
8.1	世界高速铁路	256
8.2	中国需要发展高速铁路	269
8.3	京沪高速铁路的技术决策	271
8.4	京沪高速铁路的工程与造价	279
	思考题	282
	参考文献	282
9	磁悬浮铁路	283
9.1	概 述	283
9.2	磁悬浮铁路的供电方式	297
9.3	TR 线路	300
9.4	TR 运行控制系统	313
9.5	日本超导磁悬浮高速铁路技术特点	317
9.6	日本低速磁悬浮铁路 HSST 系统	322
	思考题	324

参考文献	324
10 铁路选线自动化设计	326
10.1 概 述	326
10.2 数字地形模型	328
10.3 线路计算机辅助设计	337
10.4 铁路选线最优化设计	341
10.5 铁路选线专家系统的设想	364
思考题	371
参考文献	371
11 公路线形及交叉设计概要	372
11.1 有关规定和公路等级	372
11.2 公路平面设计	277
11.3 公路纵面设计	389
11.4 道路平面交叉设计	296
11.5 道路立体交叉设计	409
思考题	424
参考文献	424

1 铁路——我国现代交通体系的骨干

1.1 铁路是我国现代化交通体系的骨干

1.1.1 铁路过去是我国综合运输体系的骨干

在我国已有的现代化民用运输方式(铁路、公路、水运、航空和管道)中,1980年以前,铁路大体处于垄断地位(只有局部路段上运力紧张),1980年起国民经济迅猛发展,但其时路网数量少(营业里程仅49 940 km),运输负荷直线上升(运输荷载1995年全路平均是1980年的2.1倍多;1996年略有下降为2 868万换算 $t \cdot km/km$,是美国铁路的3倍,日本和俄罗斯的2倍,为世界最高。京沪、京广、哈大、京沈、陇海五大干线平均运输密度为9 660万换算 $t \cdot km/km$,为全路平均负荷的3.4倍,能力利用率已达80%以上),路网的机动和应变能力差,客、货运输因而全面紧张。加之铁路装备落后,运输质量不高,路网结构不合理,中西部尤为薄弱,从而使铁路客货运量在现代化运输中的比重迅速下降,特别是客货混行的我国铁路是以承担国民经济发展所必需的货运为主的(1980~1995年,铁路行车密度中客车在30%左右,其中1995年为31.1%),客车车次少、超员现象严重。虽然1989年9月5日和1995年10月1日客票两次上调(分别调112.8%和51.8%),使客车超员现象略有减轻。但由于低等级公路投资少,建设速度快,使公路网发展速度快,加上高速公路与民航的高速发展(从1988年10月31日上海—嘉定间18.5 km高速公路通车起到1999年底总里程11 000 km、年均建成1 000 km;1999年底,公路网总长138万 km,基本上实现了乡乡通公路,从1988年底起至今的11年间年均建成3.5万 km),公路路况普遍改善、经营方式灵活以及经济发展导致节约旅行时间的重要性日益增大等原因,铁路客运量在现代化运输中的比重进一步下降了。而且,1996年起在铁路客运总量没有很大变化,且旅客平均行程近7倍于公路的情况下,客运周转量开始了少于公路客运周转量(占全国的53.7%)的历程。

1.1.2 铁路今后仍然是我国综合运输体系的骨干

我国大陆辽阔(南北长约5 500 km,东西宽约5 200 km),内河和海运条件有限,而且资源分布和工业布局不平衡,决定了北煤南运、西煤东运、北粮南运、西棉东运的格局。人口众多,分布不均(如西部十省市国土面积占全国71.7%,人口仅占28.2%,全国百万人口以上的大城市30个、200万以上人口的城市15个,西部分别只7个、3个),随着西部开发、南水北调工程的展开,大量劳动力长距离流动务工的状况会继续。在市场经济全面发展的促进下,商务旅行亦更增多。人民生活水平提高,使国内自费旅游、探亲、求职、求学的队伍逐渐加大,出行次数和旅行距离增加。对外开放,加入世贸,加上我国文化传统独特、旅游

资源丰富,会吸引越来越多的国外客商和旅游者……。因此,虽然随着输油管道的建设,炼焦、发电(如我国有独创性的受控核裂变发电),高压输电及各种工业技术的发展,使单位产品的能耗下降等,可以使石油、煤炭等大宗货物的铁路运量增长减缓,但是在经济发展需要资源开发和今天铁路人均乘车率仅约 0.8 次的情况下,铁路运输总量肯定将不断增长,特别是在运量集中的干线上。参照发达国家 GDP 的增长与客运量的增长密切相关的经验,预计未来会类似“八五”期间(客、货运周转量分别增长了 36%、20%),铁路仍将保持客运增长大于货运增长的趋势。

另一方面,我国需以仅占世界 7%的可耕地,供养超过世界五分之一的人口,为了实现现代化建设的可持续发展,交通建设必须最大限度地发挥土地资源的效能;我国能源结构是以煤炭资源为主,石油少,而且石油资源全世界都紧缺,交通建设必须发展能有效利用多种能源的交通方式。而在同等运量下,铁路占地省、能耗低、污染少、运能大、全天候的技术经济优势符合我国长距离、大运量运输的需要。特别是随着市场经济的发展,人们的时间价值也随之增加,对旅行速度的要求也日益提高。如东京大学井口雄一教授认为,对于现代人来说旅行距离扩大 10 倍,消耗时间增加 4 倍是适当的,以人在没有阻碍的情况下,用 5 min 走完 0.4 km 路程为基点,加上等待、换乘时间,对于铁路希望的旅行速度是:近距离(300 km 以内)约为 160 km/h、中距离(500~600 km)约为 250 km/h,长距离(1 000 km 及以上)则为 400~500 km/h。现代铁路(含磁浮铁路)完全有能力满足这种要求。另外,若从旅客旅行时间 t 与旅客到达交通工具的往返时间加等待时间 t_1 、旅行距离 L 和旅行速度 v 的关系 $t=t_1+L/v$,来对比火车(设 $t_1=1$ h, $v=200\sim 500$ km/h)、汽车($t_1=0$, $v=80\sim 120$ km/h),民航($t_1=2.5$ h, $v=700\sim 900$ km/h),则加上经济、舒适和方便等条件,铁路可在 200~2 500 km 范围内与公路和民航竞争。

所有这些决定了,铁路今后必然还是我国现代化交通体系的骨干。

1.1.3 未来的中国铁路

1.1.3.1 2002 年的中国铁路

为了使铁路能真正负起运输骨干的责任,当好国民经济的先行官,考虑到我国铁路网长度不足,结构不合理(西部尤为薄弱),且我国既不同于地广人稀,有相当发达的高速公路和航空网的美国、加拿大等国的铁路可以货运为主,又不能像有方便海运条件的日本、法国铁路可以客运为主,中国铁路既要货运重载,又要客运高速且加大行车密度,需要形成一种重量、密度、速度兼容的运输网,以巩固铁路在综合运输体系中的骨干地位。1998 年初铁道部根据党中央加快铁路建设的决策,决定在 1998~2002 年,按照“决战西南,强攻煤运,建设高速,扩展路网,突破七万”的总体部署,遵循以市场需求为导向,依靠科技进步,扩展西部地区路网、完善路网布局,打通限制口(1999 年 12 月 26 日,随着广元—阳平关复线电化通车,铁路运输的最后一个限制口——广元口悄然消失),建设大能力干线,改善装备水平、建设必要的客运专线,满足客运快速和货运重载的需要,提高铁路运输的应变能力、机动能力和现代化水平,提高路网质量和综合运输能力等建设原则。计划建设新线 5 340 km,既有复线 2 580 km,既有电气化 4 400 km,地方铁路 1 000 km。使 2002 年我国铁路进出西南的通道能力翻一番,西部路网骨架基本形成(如建设遂宁—重庆线路 147 km,可与达成线形成成一渝间 320 km 的新通道,以后新通道以客运为主,成渝线以货

运为主；内昆通车后，为“黔煤入川”提供了便捷通道），中部路网有较大拓展，东部路网进一步完善；陕西、山西、内蒙古西部的“三西”煤炭外运总能力达到 3.5 亿吨，基本适应外运需要；客车速度明显提高，三大运输繁忙干线基本实现客货分线（建设 422 km 秦（皇岛）沈（阳）客运专线，与改造过的 299 km 京秦线共同形成 721 km 京沈快速客运通道；京广线以客运为主，京九线以货运为主；积极做好京沪高速铁路前期工作，力争开工建设）；营业里程可突破 7 万公里，其中复线里程可达 2.1 万公里，电气化里程 1.5 万公里，主要通道基本适应国民经济发展和进步的要求，客货运输紧张状况有明显缓解；路网综合能力、整体功能和现代化水平显著提高。

1.1.3.2 2050 年的铁路网

党的十五大在展望下世纪时指出，我国“到世纪中叶建国一百年时，基本实现现代化，建成富强民主文明的社会主义国家”。那么 2050 年时作为经济平稳、健康发展所需的基础设施，铁路网的情况应如何？

铁道部经济规划研究院路网规划研究所，在考虑铁路网与人口、生产力布局、区域经济、社会发展、国防建设及外贸等关系的基础上，采用国土结点法，用 9 个 200 万以上人口、东中部的重要省会城市及交通枢纽共 20 个作为节点，考虑了他们所在地域面积的影响，预测得我国需要的客运专线网的规模为 0.9 万 km，如图 1.1。选择东部经济带、中部经济带和西部经济带中现有人口 20 万以上的所有城市、港口、大资源开发地、主要旅游景点及边境口岸和有战略意义的城镇 625 个作为节点，预测的客货混跑路网总规模为 10.8 万 km，再加上枢纽内各种走行线和一些里程较短的支线约 3 000 km，总计 2050 年我国需要的路网规模约 12.2 万 km。到那时东、中、西三个经济带中路网在全国路网的比重分别为 27.2%、35.8% 和 37%；东、中、西部每 10^4 km^2 国土的铁路网密度的比是 3 : 1.8 :



图 1.1 客运专线网示意力

1，比现在的比值 5.4 : 3.8 : 1 显著缩小。全国平均每 100 km^2 国土面积人的路网密度为 1.25 km，比 1995 年扩大了近 1 倍，虽仍低于发达国家和印度目前的水平（是德国的 1/10，英国、日本的 1/6，美国、印度的 1/2），但在同时提高技术装备水平（复线率、电化率等）的情况下，是可以满足我国国民经济发展需要的。

用铁路网发展规模系统动力学模型法预测的 2050 年铁路网规模也大致如此。

未来铁路网的特点之一是有客运专线网。专线网除有一般铁路的优点外，一个显著的特点就是列车旅行速度高。提高旅行速度又可以增加客运量，法国、英国、日本等的经验都是如此。日本铁道技术研究所提出的考虑人口数量和分布的变化及通过提高速度等运输条件，导致诱发客运量的“引力模型”可供参考。引力模型是说，两城市间的客运量和两城市人口的乘积成正比，与输送阻力的 β 次方成反比，可用下式表示

$$q_{ij} = q_{ij0} \times \frac{P_i \cdot P_j}{P_{i0} \cdot P_{j0}} \times \frac{1}{(R_{ij}/R_{ij0})^\beta}$$

$$R_{ij} = \frac{U_{ij}}{W} + T_{ij}$$

式中: q_{ij} 是 i 、 j 城间的客运量; P_i 、 P_j 是 i 、 j 城的将来人口; R_{ij} 是 i 、 j 城间的输送阻力; U_{ij} 是 i 、 j 间的运价; W 是时间价值; T_{ij} 是 i 、 j 间的旅行时间。

上式下标中的“0”表示现状,下标没有“0”表示将来。使用时可先求出各种运输工具的交通阻力,再用引力模型来分别求得客运量。

1.1.3.3 2050 年的铁路勘测设计

2050 年的铁路勘测设计,将实现以专家系统为主要手段的铁路可行性研究,以进一步优化国家铁路网;使用先进测绘手段采集地质、地貌等地理信息;建成铁路设计信息管理数据库;实现以总体设计(或线路设计)为主线的计算机集成设计系统。即各专业(线路、路基、桥涵、隧道、车站、房建、给排水、概预算等)子系统模块,具有对本专业内容分析、优化设计、输出数字成果或设计图纸的功能,并在与主系统联网交换信息过程中推进铁路总体设计,达到最优优化成果。在工程结构物(如桁架等)的建造上,实现计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System,简称 CIMS),其过程为用计算机辅助设计(CAD)总图和零部件,在计算机中组装、模拟结构物的真实受力状态,分析并优化设计有关构件,再将设计成果传输到数控机床,用计算机辅助制造(CAM)技术控制构件等的加工,并采用产品数据管理系统控制生产的全过程。

1.2 铁路的最高速度将是多少

1.2.1 影响旅行速度的因素

影响旅行速度的因素有两方面,一是以车辆、地面设备的性能、养护水平等为基础的列车速度,即物理能力;二是考虑营业政策、运输设备等条件而编制的列车运行图,即软技术能力,如图 1.2 所示。

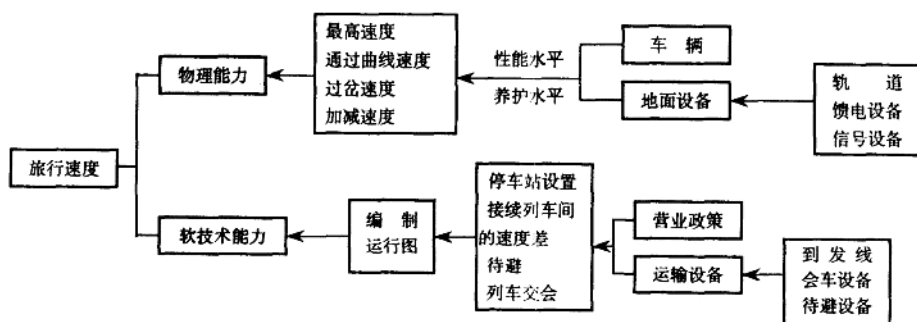


图 1.2 旅行速度的决定因素

在编制列车运行图时,调整的重点是:富余时间的调整;停车车站的调整;待避和会车间隔时间的缩短;列车排列的调整。这些都与营业政策、运输设备有关。他们在有关专业中研究。

1.2.2 制约提速的技术因素及解决途径

为了提高旅行速度，必须努力提高其物理能力，但是对不同线路必须确定重点放在提高最高速度（一般是对新建铁路）、曲线限速或者加速和减速性能（后两者一般是对既有线路）中的哪一个上效果好。另一方面，影响上述速度的是多种因素，又可分为硬性制约因素、软性制约因素，他们与铁路基础设施之间关系错综复杂，可表示为如图 1.3，分述如下：

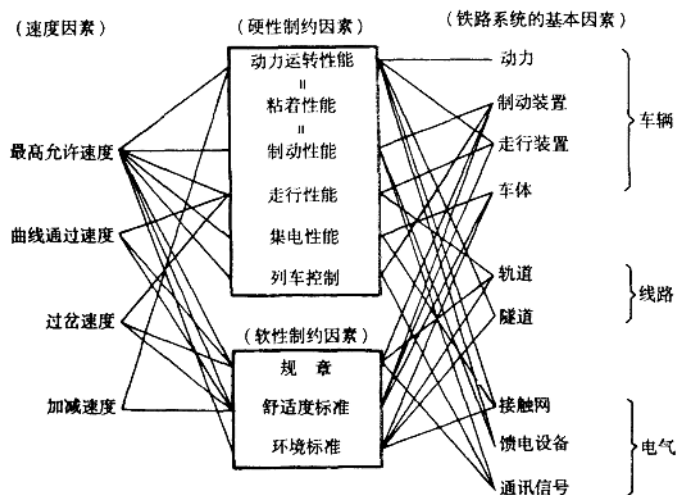


图 1.3 速度与铁路基本因素间的关系

1.2.2.1 动力运转性能

当克服走行阻力（空气、滚动和坡道阻力等）的动力不足时，速度就难以提高。车辆的功率（驱动力×速度）增加，不仅涉及成本问题，而且还有动力装置的单位（每台电机）、功率和安装空间的制约问题，及粘着限度问题。由于粘着系数（ μ ）具有随速度提高反而降低的趋势；另一方面走行阻力是随速度提高而增大的（空气阻力与速度平方成正比增加），因此从粘着力和走行阻力要达到平衡的粘着性能来看，存在一个速度限界。铁路轮轨干燥时 μ 约为 0.3、潮湿时降到 0.1 以下；而用橡胶轮胎的汽车，在干燥的混凝土路面上， μ 为 0.8，潮湿路面上为 0.5。在结冰的雪地上，汽车的 μ 值恰好相当于铁路轮轨间潮湿时的 μ 值。因此轮轨铁路车辆的加减速速度要比汽车的小得多。

改善轨轮粘着条件、提高 μ 的方法有两种：一是控制作用于轮上的力，以获得稳定、高值的粘着系数，如使用交流电机，因他们空转时扭矩显著减少，容易实现再粘着；二是加强轮轨接触面的状态管理，如对车轮可采用车轮清扫器、研磨器等，对钢轨则采用钢轨打磨等保持轨面形状。日本新干线在制动时把清扫车轮踏面的研磨器压到车轮上，在清除轮踏面污染膜的同时，利用轮踏面的粗糙化，使轨面污染膜破坏，以提高 μ 值。

1.2.2.2 制动性能和安全

速度问题是以能使列车安全停止为前提的。因为列车的动能和速度的平方成正比，万一相撞受害程度也会随速度平方成正比增加。从安全角度出发，希望制动距离尽可能地短，但

是迫使车轮停止转动的力超过钢轨和车轮间的粘着限制时, 车轮将打滑, 不但无法产生减速度, 且使车轮踏面产生扁疤, 轮轨间因而会发生较大冲击, 造成双方损伤。可以说, 依靠轮轨间粘着来实现制动的情况中, 提高粘着性是提高制动性能的关键。制动性能是构成一条铁路上的所有列车安全运行所必须的控制列车间隔和速度的信号安全系统的基础。若想提高速度, 在提高制动性能的同时, 必须千方百计地改善运输安全系统, 如规定的制动距离、车内信号和列车自动控制 (ATC) 等, 加强列车控制方面的安全度。

解决制动性能的办法有三种: 一是有效利用粘着力, 即控制制动力, 使之随粘着特性曲线变化。但因轨面情况不同, 有时 μ 会在粘着特性曲线以下, 使车轮发生滑行, 故必须有防止滑行的机构, 一旦检知 (根据车轮圆周速度异常降低或大异于其他车轮) 某轴滑行, 立即暂时缓解其制动力, 待再粘着时重新强化制动力 (日本新干线已经在每根轴上采用了这种装置)。二是用增粘研磨器, 使车轮踏面粗糙化, 但这同时也增加了磨耗 (故开发不致异常磨耗轮踏面的增粘制动研磨器是重要的研究课题)。日本的使用情况已如前述, 法国 TGV 则合并使用附挂车的踏面制动器 (仅在 $v < 200 \text{ km/h}$ 时) 和盘式制动器, 结合清扫车轮踏面来承担部分制动力。第三是采用非粘着的制动系统, 使用电磁吸附制动和涡流制动。电磁吸附制动还会磨耗钢轨等, 一般情况下不太使用。涡流钢轨制动机 (简称 ECB), 由于制造和安装上都给予了充分的考虑, 日本新干线 951 型试验车试验的结果是钢轨温度升高 $4.5^\circ\text{C} \sim 6.0^\circ\text{C}$ (当 $v = 140 \text{ km/h}$ 时, 钢轨和 ECB 间的间隙为 $10 \sim 15 \text{ mm}$), 避免了“电磁力会使钢轨变形”的担心。

1.2.2.3 运行的平稳性

车辆和线路之间的相互关系决定着运行的平稳性。作为车辆特性, 当运行速度达到某一程度时, 车辆会突然发生左右方向的自激振动, 这种现象称为蛇行运动。为了不发生蛇行运动, 需要选择和确定运行装置的各项技术参数 (轴箱支撑刚度、转向架转动阻力、踏面形状等); 即使不发生蛇行运动, 如果达到高速运行时, 由于车辆和轨道不平顺之间的相互作用, 也会使车轮作用在钢轨上的力发生变化, 有时轮重和横压明显增加, 有时轮重明显减少, 发生“轮重卸载”现象, 这样不仅加剧了轨道的破坏, 甚至还有发生脱轨的危险, 因为轮重和横压是由车轮和钢轨相互作用而产生的, 故在提高速度时, 必须同时考虑轨道构造和车辆构造。在车辆方面, 要减少转向架的转动阻力, 适应小半径曲线中的运行条件, 要设计减少轨道负担的车辆构造 (如延长转向架中心距, 采用径向转向架, 延长转向架固定轴距, 减轻轮重、簧下质量和簧间质量, 加大车轮直径, 减小轮踏面坡度、车体惯性半径和转向架惯性半径等)。

在轨道构造方面, 与走行安全和平稳性有关的要素有:

(1) 轨道承载力

提高行车速度会因轮重的附加冲击随列车速度按比例加大而增加钢轨、轨枕、道床等的负担, 主要是钢轨的弯曲应力或路基面动应力。现代的轨道理论实际上就是关于速度和轨道参数最佳选择的理论, 因此如需提高速度, 则应采取以下对策: 使用重型钢轨以减小钢轨弯曲应力, 或降低轮重、缩小轨枕间距以减小钢轨弯曲力矩与路基面动压应力, 还可以用增加道床厚度的办法减少路基面应力 (法国国铁认为, 有道碴轨道也可以运行 300 km/h , 故 TGV 大西洋线是按有道碴轨道建设的; 日本由于地形和社会条件的关系, 在新干线中采用了许多隧道和高架桥, 也正式采用了板式轨道)。

(2) 轨道破坏

轨道破坏是指虽然列车荷载在轨道承载力限度之内,轨道各部分也会发生变位,及随之而来的轨道不平顺——高低不平顺(占主要)和方向、轨距不平顺。对策是采用重型钢轨、PC 轨枕、增加轨枕数、加厚道床等以强化轨道,减小车辆轮重、簧下质量以减小对高低不平顺的车辆系数和对轨距、方向不平顺的车辆横压。

(3) 养护和维修轨道几何状态

一般地说,列车速度愈高,轨道不平顺应该愈小。从宏观上考虑,其关系可由 Birman 公式 $f=400/v$ 表示,式中 f 为轨道不平顺的容许限度(mm); v 为列车速度(km/h)。另外,根据日本研究结果,提高列车速度后,必须严格监控长波长轨道的不平顺。如车辆保持不变,对波长为 25~50 m 的长波长方向不平顺来说,在 300 km/h 时的管理值必须比在 200 km/h 时严格 2 倍以上。在小山试验线进行超过 210 km/h 的高速试验(最高速度记录为 319 km/h)时,轨道养护目标值和营业线的管理值如表 1.1 所示。

表 1.1 日本小山试验线轨道养护目标值

养护目标	轨 距 (mm)	水 平 (mm)	方 向 (mm/10m)	高 低 (mm/10m)	三 角 坑 (mm/2.5m)	上下振动 (g*)	左右振动 (g)
营业线	+6 -4	±5	±4	±6	±4	0.25	0.20
试验线	+5 -3	±4	±4	±5	±4	0.35	0.30

* g 是重力加速度, $1g=9.8\text{ m/s}^2$ 。

法国 TGV 在进行 380 km/h 高速运行试验时,铺设轨道的标准为:方向 $\pm 2\text{ mm}$, 高低 5 mm (在 18 m 内)。当轨道稳定以后,高低不平顺标准是:用 10 m 平均弦测量为 3 mm (成为 10 m 弦正矢的 1/2); 用 31 m 弦测量为 8.5 mm (半振幅为 6 mm)。方向不平顺的标准是:用 10 m 弦测量为 4 mm, 用 33 m 弦测量为 7 mm (半振幅 5 mm)。后来巴黎东南线长波轨道不平顺标准与此几乎相同, 10 m 左右弦长的标准,前者为后者的 60%。

为了保持轨道良好的技术状态,还实行以舒适度为主的振动加速度的管理。管理目标值(全振幅加速度值)是:新干线中,以安全性为主的提高速度判定标准值是上下振动为 0.5 g, 左右振动为 0.4 g, 把判定标准的一半作为管理目标值,如表 1.1。

(4) 钢轨踏面管理

由于当最高速度提高到 210 km/h 以上时,钢轨踏面微小的凹凸都会影响轮重的变化、噪音和振动,据小山试验线以 300 km/h 左右速度的综合试验结果,明确了检测钢轨踏面的滤波器及其限度特性,包括 10 cm 左右的波长在内,验收值为 0.3 mm/m,管理值为 0.6 mm/m。TGV 钢轨踏面的验收标准为 0.5 mm/1.5 m 以下,用轴箱振动加速度计进行检测,必要时进行钢轨打磨作业。

(5) 提高曲线的通过速度

限制通过曲线的速度,理由大致有三:一是防止未被平衡的离心力,加上受风或振动的影响,可能发生颠覆事故;二是未被平衡的离心力虽还不致发生颠覆,但加大了轮重和横压,促进了轨道的磨损和破坏;三是未被平衡的离心力变大,会使舒适度恶化,故为保证列车平稳、舒适地高速通过曲线,必须处理好超高、欠超高和缓和曲线长度间的关系。

① 曲线通过速度和超高的关系

由图 1.4 可见, 曲线通过速度和超高的关系可用下式表示:

$$a = \frac{v^2}{(R \cdot g)} = \frac{(h + h_Q)}{S_1}$$

$$\therefore h + h_Q = \frac{v^2 \cdot S_1}{127R} = 11.8 \frac{v^2}{R}$$

式中: v 为曲线通过速度(km/h)、(m/s); R 为曲线半径(m); h 、 h_Q 为实设超高、欠超高(mm); S_1 为轨头中心距 (mm); a 为离心加速度(g); g 为重力加速度 (9.8 m/s^2)。

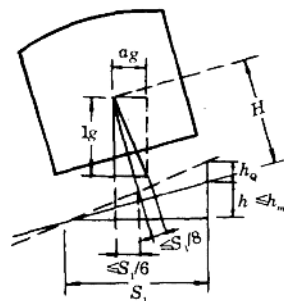


图 1.4 超高示意图

② 最大超高的考虑方法

一方面考虑车辆在有超高的曲线中停车或低速通过时, 不会由于从曲线外侧来风使车辆向内侧颠覆; 另一方面要考虑旅客不会因车辆的倾斜而感到不舒适。对于前者, 若令安全系数 n ($n = S_1/2e$, e 是离心力与重力的合力通过轨距线的交点和轨道中心的距离) 为 3, 即重力作用在轨距的 $1/6$ 以内, 则由 $H:S_1/6 = S_1:h_m$, 得最大超高值 $h_m = S_1^2/6H$ 。此式表明, 从安全角度看, 最大超高和轨头中心距的平方成正比, 与重心高成反比 (计算时要考虑车辆弹簧装置横向变化等引起的重心移动, 日本在计算时将车辆实际重心高度扩大 1.25 倍)。综合考虑这两方面, 我国一般线路最大超高用 150 mm, 京沪高速铁路线桥隧站设计暂行规定 (以下简称暂行规定) 用 180 mm。

③ 欠超高的限界

因超高不足会产生未被平衡的离心加速度, 这对安全性、舒适度和轨道维修养护都会带来影响, 故对欠超高的最大值应加以限制。

○ 从安全性方面考虑, 如车辆向外侧颠覆的安全系数取 4 (危险率为 25%), 则合力作用点在轨距的 $1/8$ 以内, 见图 1.4, 则 $h_Q = S_1^2/8H$, 即容许欠超高和轨距的平方成正比, 和重心高成反比。

○ 从舒适度方面考虑欠超高, 根据试验和国外的实例, 日本取左右方向稳态加速度值的限度为 0.08 (即 0.8 m/s^2), 未被平衡加速度(a)和欠超高是同义词, 即 $a = h_Q/S_1$, 所以, $h_Q = S_1 \cdot a$, 如果考虑车辆弹簧的挠度, 还应留有余地。考虑上述因素, 我国 I 级铁路允许欠超高值为: 一般情况 75 mm, 困难情况 90 mm。广深准高速铁路采用标准是: 一般情况 $h_Q \leq 90 \text{ mm}$, 困难情况 $h_Q \leq 110 \text{ mm}$ 。

④ 风力影响下的列车倾覆限界

与直线运行相比, 曲线运行时在风力影响下的倾覆危险性增大。倾覆危险率 D 可以用安全系数的倒数 $1/n$ 表示。当通过车辆重心的合力线通过轨距中心时, $D=0$; 当通过轨距中心与钢轨间的中点时, $D=0.5$, 通过钢轨时, $D=1$ 。

日本铁道技术研究所报告 No793(1972 年 2 月)建议: 对于倾覆的容许危险率 D , 静态时取 0.6, 动态时取 0.8 为宜。

通过曲线时的倾覆危险率由三种因素组成, 可用下列公式表示:

$$D = \pm 2h_G^*/S_1 \times [v^2/(R \cdot g) - h/S_1] \quad \text{此项为未被平衡离心力和重力分力之差}$$

$$+ 2h_G^*/S_1 \times (1 - \mu/(1 + \mu)) \times h_{GT}/h_G^* a_r \quad \text{此项为振动惯性力}$$

$$+ h_{BC}^* \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot C_r / (W \cdot S_1) \quad \text{此项为风压力}$$

(正号为向外侧倾覆, 负号为向内侧倾覆)

式中: h_G^* 为 $1.25 h_G$; h_G 为车辆重心高(m); S_1 为轨距(m); v 为通过曲线速度(m/s); R 为曲线半径(m); g 为重力加速度(9.8 m/s^2); h 为超高(m); μ 为 W_T/W_B ; W_T 为转向架质量(kg); W_B 为车体质量(kg); h_{GT} 为转向架重心高(m); a_r 为重心位置的横向振动加速度(当 $v \leq 80 \text{ km/h}$ 时, $a_r = 0.00125v$, 当 $v \geq 80 \text{ km/h}$ 时, $a_r = 0.1$); h_{BC}^* 为 $1.25 h_{BC}$; h_{BC} 为风压中心高度(m); ρ 为空气密度($0.125 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$); U 为风速(m/s); S 为车体横向受风面积(m^2); C_r 为车体受风系数; W 为车辆总质量(kg)。

如新干线 0 系车辆通过 $R = 2500 \text{ m}$ 的曲线且 $D = 1$ 时, 当最低运行速度为 80 km/h 时, 向内侧倾覆的限界风速为 35 m/s , 实际上, 列车由于风力影响而停止运行的限界风速是 30 m/s 。

⑤ 使用摆式车辆提高通过曲线速度

摆式车辆通过曲线时, 由于车体倾斜, 能使重力和离心力的合力与车体底面大致垂直, 使旅客几乎感觉不到未被平衡离心加速度的存在。另外, 由于摆式车体可以在满足旅客舒适度的前提下, 充分利用超高的安全限值, 故在通过曲线时, 可以比一般列车速度快。当然也会产生更大的轨道作用力、增加外轨磨损和增加转向架的年维修费用。摆式车辆因车体倾斜方式不同而有自然倾斜式和强制倾斜式之分。

i 自然倾斜摆式车

自然倾斜摆式车直接利用离心力使车体倾斜, 倾摆结构简单, 可靠度较高。但因车辆重心向曲线外侧偏移, 重力和离心力合力指向轨面的位置要比普通车辆更靠外轨侧, 故从向外倾覆分析是不利的。其次倾斜装置的阻力大, 进入和驶出曲线时, 车体倾斜滞后, 加上车辆重心上升(和回落), 舒适性差。另外, 车辆下部的变位较大, 会影响车辆限界, 因此一般车体倾角较小, 过曲线速度的提高也少(日本 381 系摆式车的摆动角为 5°), 自然摆式车的欠超高与作用在旅客身上的未被平衡离心加速度 a' 的关系可根据图 1.5 说明如下:

$$a' = a - h/s_1 - \phi = v^2/(R \cdot g) - h/s_1 - \phi$$

$$\text{又} \quad v^2(R \cdot g) = (h + h_Q)/s_1$$

$$\text{代入上式得} \quad a' = h_Q/s_1 - \phi$$

$$\therefore h_Q = s_1(a' + \phi)$$

式中: a' 、 a 分别为对旅客、车体的未被平衡离心加速度(g); h 、 h_Q 是超高、欠超高(mm); S_1 是轨中心距(mm); ϕ 是倾斜角(弧度); v 是通过曲线的速度(m/s); R 是曲线半径(m); g 是重力加速度(9.8 m/s^2)。

ii 强制倾斜摆式车

强制倾斜摆式车是利用气压或油压使车体倾斜, 要先检知车辆的未被平衡离心加速度, 然后再使气压或油压作用, 机构较复杂, 可靠度也容易降低。但是, 这种车车体倾斜时重心是向曲线内侧移动的(与自然摆式车相反, 参看图 1.6), 因此对于对外侧倾覆来说, 强制式倾斜更有利, 故其车体倾斜角可以更大(意大利的 ETR401 电动车组, 倾斜角达 10°), 能更好利用欠超高的安全限值, 因而列车通过曲线的速度可比一般列车高 30% 左右。

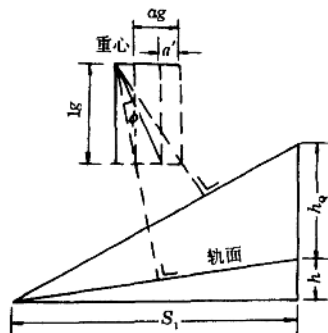


图 1.5