

# 创新的中国高速铁路技术(上)

何华武

(铁道部,北京 100844)

[摘要] 高速铁路是超大、复杂的系统工程。文章论述了中国铁路情急需发展高速铁路;通过博采众长,研究试验,构建创新的中国高速铁路技术体系;介绍了近期高速铁路建设的工程实践。

[关键词] 中国高速铁路;创新;技术体系;工程实践

[中图分类号] U238 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)09-0004-15

## 1 运力不足迫切需要发展铁路

铁路作为国民经济的大动脉,国家重要基础设施和大众化交通工具,具有运力大、成本低、占地少、节能环保、安全性好等多种比较优势,是综合交通运输体系的骨干,在我国经济社会发展中具有重要作用。

### 1.1 路网设备与运输业绩

近年来,中国铁路每年投产新线超过1 000 km。截至2006年底,中国铁路营业里程为7.7万km,位居世界第三。其中:

复线里程2.64万km,复线率34.3%;电气化里程2.44万km,电气化率31.7%;

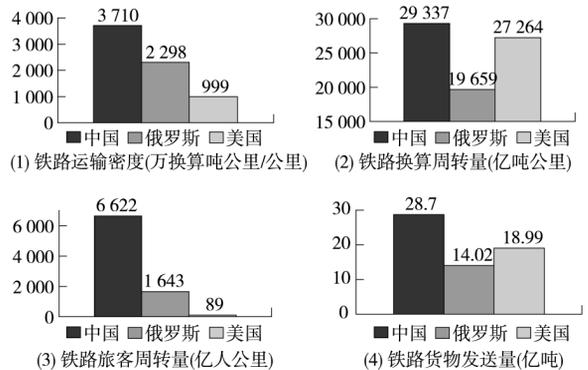
机车拥有量达到1.78万辆,其中内燃、电力机车比重为99.3%,主要干线全部实现内燃、电力牵引;

客车拥有量达到4.26万辆,其中空调车2.30万辆,占客车总数的54.0%;

货车拥有量达到56.67万辆。

2006年,中国铁路完成旅客发送量12.6亿人,旅客周转量6 622亿人·km;完成货物发送量28.7亿t,货物周转量21 715亿t·km;中国铁路运输密度为3 710万换算吨公里/公里。

中国铁路运输效率创造了运输密度、换算周转量、旅客周转量、货物发送量4个世界第一,见图1。



注:中国铁路数据为2006年数据,俄罗斯、美国铁路数据为2005年数据

图1 与俄罗斯、美国铁路运输效率比较

Fig. 1 Transportation efficiency of China railways versus that of Russia and USA

铁路用科学发展观统领各项工作,挖潜扩能、提速调图提效,并用好建成投产项目能力,合理调整车流径路,强化运输组织,运输生产主要指标进一步提高。2007年1至7月货运总发送量180 527万t,比上年同期增加17 303万t,增长10.6%;旅客发送量78 310万人,比上年同期增加4 628万人,增长6.3%;总换算周转量17 896亿t·km,比上年同期增加1 565.69亿t·km,增长9.6%。在经济和社会发展中发挥了骨干运输作用。

### 1.2 发展滞后与高铁崛起

尽管铁路部门采取强力措施,运输效率为世界之最,建设与科技取得巨大成就,但铁路运输总体上对经济和社会可持续发展的“瓶颈”制约仅仅是有

[收稿日期] 2007-03-12;修回日期 2007-06-16

[作者简介] 何华武(1955-),男,四川资阳市人,铁道部教授级高工,铁道部客运专线总设计师

所缓解而已。表1、表2、表3分别为人均乘车数、装车数满足度、与国外铁路主要指标比较。

表1 人均乘车数

Table 1 Average passenger traveling times of by train

年份	营业里程 /万 km	旅客发送量 /亿人	人均年乘 车数/次
1949年 新中国成立时	1.00		
1957年 “一五”计划末	2.17	3.12	0.48
1962年 “二五”计划末	3.46	7.41	1.40
1970年 “三五”计划末	4.10	5.16	0.62
1975年 “四五”计划末	4.53	6.96	0.75
1980年 “五五”计划末	4.99	9.12	0.92
1985年 “六五”计划末	5.21	11.09	1.05
1990年 “七五”计划末	5.34	9.49	0.83
1995年 “八五”计划末	5.46	10.21	0.84
2000年 “九五”计划末	6.87	9.30	0.75
2005年 “十五”计划末	7.50	11.6	0.85

表2 装车数满足度

Table 2 Car loading saturation

年份	全路日请求装车数	实际装车数	满足度/%
1998	94 371	72 499	76.7
1999	103 291	74 038	71.7
2000	155 522	77 645	49.9
2001	160 615	83 693	52.1
2002	161 112	87 457	54.3
2003	180 572	93 040	51.5
2004	269 320	99 327	36.9
2005	278 564	103 829	37.3
2006	283 400	109 537	38.7

表3 与国外铁路主要指标比较

Table 3 Main index of china railways compared with that of other foreign countries

国别	营业 里程	路网密度		人均年 乘车次数 (2000 - 2005年)	换算密度 /万换算吨 公里·公里 <sup>-1</sup>
		按国土面 积计算 /km·km <sup>-2</sup>	按人口计算 /km·万人 <sup>-1</sup>		
中国	77 084	80.3	0.59	0.83	3 710
美国	272 812	283.32	9.37	0.1	943
俄罗斯	85 542	50.1	5.94	0.9	2 135
印度	63 332	192.67	0.6	4.9	1 459.2
日本	20 052	530.48	1.57	171	1 410
德国	34 211	958.29	4.15	21.7	422.3
英国	19 898	818.85	3.32	16.9	387.8
法国	29 286	530.54	4.89	14.7	407.4
加拿大	48 467	48.61	15.5	0.1	698.6

解读这些数据,中国人年均乘火车不到1次! 货主请求车往往失望而归,转移给其他交通运输方式的社会成本太大了! 路网密度与人口规模、国土面积的大国地位很不相称! 这是一组冰冷的数据,是事实。最根本的问题是路网规模总量不足,主要干线能力处于饱和状态,铁路发展滞后问题十分突出。

党中央、国务院对又好又快发展铁路高度重视。

2004年1月,国务院审议通过了《中长期铁路网规划》。2005年10月,中央通过了《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》,明确提出“交通运输要合理布局,做好各种运输方式相互衔接,发挥组合效率和整体优势,形成快捷、通畅、高效、安全的综合交通运输体系。加快发展铁路、城市轨道交通,进一步完善公路网络,发展航空、水运和管道运输”。

加快建立便捷、通畅、高效、安全的综合运输体系,以最小的资源和环境代价满足经济社会对运输的总要求。铁路网的发展“通”、“畅”结合,服务质量和效率效益均要有较大程度的提高。

铁路“十一五”路网规划中,加快铁路客运专线建设,以及重点线路扩能改造,尽早实现客货分线运行。到2010年,将新建铁路17 000 km,其中,客运专线7 000 km,既有线增建二线8 000 km,既有线电气化改造15 000 km;铁路营业里程达到9万 km以上,复线和电气化率分别达到45%以上。图2为我国大陆“十一五”铁路网规划。

铁路网节点的枢纽布局应综合考虑各条线路的顺畅连通,遵循客运“零距离换乘”和货运“无缝衔接”的原则,铁路枢纽设施纳入城市发展规划,与城市空间布局相协调,并与城市交通体系有机衔接。

“十一五”期间,建设北京、上海、广州、武汉、成都、西安6个路网性客运中心,配备技术先进、能力强大的机客车运用检修设备,储备一定数量的应急移动设备和救援设备,形成全国性、现代化的机客车检修中心、调剂中心。

建设哈尔滨、沈阳、济南、南昌、郑州、福州、昆明、南宁、兰州、乌鲁木齐等10个区域性客运中心,配备适量的机客车检修整备设备,形成区域性的机客车运用检修设备基地。

建设省会级城市客站25座,地市级城市客站95座。

受人口、资源、环保等问题的困扰,人们把解决交通运输问题的目光转向了公共交通体系的轨道交通,具有国际性和时代性概念的高速铁路是其中的佼佼者。欧经委定义列车最高运行速度客运专线300 km/h,客货共线250 km/h为高速铁路;铁盟认为,高速列车运行速度不低于200 km/h。自1964年日本东海道新干线开通以来,目前世界上投入运营的时速不低于250 km/h高速铁路总长达8 000余 km,拥有高速铁路的国家和地区主要有德国、法国、西班牙、意大利、荷兰、比利时、英国、日本、韩国、中国大陆和台湾。世界高速铁路建设方兴未艾,中国

高速铁路奋力崛起。2004 年以来,已批准开工不低于 200 km/h 铁路约 4 700 km。高速是铁路现代化的重要标志,建设高速铁路是超大、复杂的系统工程。

经过 40 多年的发展,高速铁路技术日臻完善、成熟,形成了以日、法、德 3 个技术原创国为代表,适合各自国情、路情和各具特点的技术格局。



图 2 我国大陆“十一五”铁路网规划

Fig. 2 Railway network planning of the eleventh five years plan in the mainland of China

中国铁路网特色鲜明:路网覆盖的超长性,路网密度的单薄性,线路标准的统一性,调度指挥的集中性,地质条件的差异性,分建成网的复杂性,不可能完全照搬任何一国的高速铁路技术。我国近 20 年来,在走出去、请进来,学习、考察、交流、咨询、培训高速铁路技术的同时,长期投入研究、试验,取得上百项研究成果。立足自我,充分利用我国多年来积累的技术储备,认真学习和借鉴国外高速铁路建设和运营的成功经验,坚持博采众长,加强包括原始创新、集成创新、引进消化吸收再创新在内的全面自主创新,系统设计,系统集成。在此基础上,构建具有中国特色和世界先进水平的高速铁路技术体系。

## 2 中国高速铁路技术体系

### 2.1 系统构成及集成

#### 2.1.1 系统构成及接口关系 高速铁路由高质量

及高稳定的基础设施、性能优越的高速列车、先进可靠的列车运行控制、高效的运输组织与运营管理架构等综合集成。各子系统之间既自成体系,又相互关联,既有硬件接口,又有软件联系,围绕整体统一的经营管理目标,彼此兼容,完整结合。图 3 为高速铁路系统构成,图 4 为电动车组与各子系统主要技术接口。

2.1.2 系统设计原则 实现高速铁路目标,系统设计尤为重要,它是高速铁路建设项目的龙头和灵魂。

1) 科隆至法兰克福高速铁路系统设计概述。20 世纪 70 年代初期,德国计划在最大居民区和经济区莱茵/鲁尔—莱茵/美因间修建新线,以减轻沿莱茵河两岸运输负荷已饱和的两条双线铁路的运输压力。预可研新线客货列车共线运行,客车速度 300 km/h;货运产品是运载卡车的快速驼背运输、固定编组、200 km/h 的直达货物列车。为此,线路最

大坡度由开始的 18 ‰减小为 12.5 ‰,牵引质量由 1 200 t 提高到 2 500 t。



图3 高速铁路系统构成

Fig. 3 High speed railway technological system

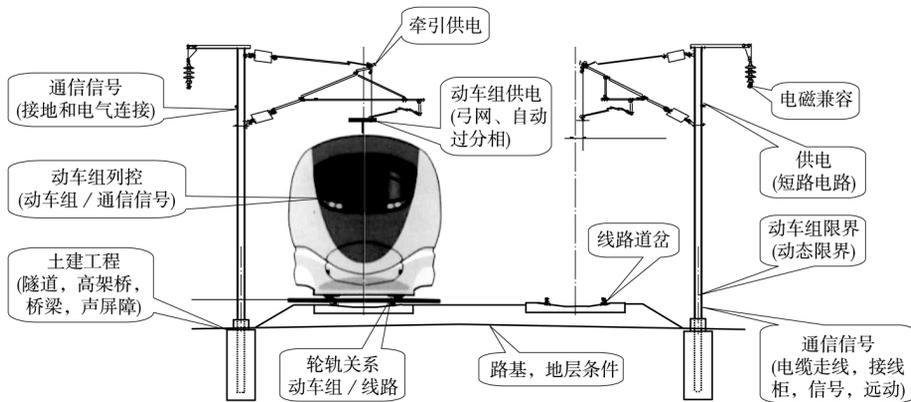


图4 电动车组与各子系统主要技术接口

Fig. 4 Main technological joints of electric multiple unit and some sub-systems

70 年代中期,情况发生变化,开始研究科隆—法兰克福之间的选线方案,并研究莱茵/美因机场连接线(机场连接线在交通政策方面得到很高评价)。到 80 年代中期,在制定德国交通线路发展规划时,重新确认了这条新线:原则上定为客运专线,线路走向紧靠 A3 号高速公路,设去机场的连接线及连接威斯巴登和法兰克福铁路总站,速度 250 km/h,最大坡度 25 ‰,最小曲线半径 3 250 m。80 年代末期,为响应欧经委高速铁路定义并适应竞争需要,加大选线灵活性,确定速度 300 km/h,最大坡度 40 ‰,与 80 年代中期方案相比,约节省工程投资 10% (2002 年价)。

采用陡坡线路,要求列车具有较大起动力,当一个动力转向架发生故障时,列车仍必须以最大的功率起动,达到牵引电机冷却装置容许的最大速度;要求精确分析在制动过程中有关设备的发热和冷却情况,把制动力自动分配到各制动系统。通过反复研究,20 世纪 90 年代中期找到了线路—列车匹配的解决方案,即采用动力分散式动车组 ICE3 型列车。这就是研发、设计、制造 ICE3 型速度 330 km/h 列车的依据。

ICE3 型列车还装备了线性涡流制动机。以上事实说明,应根据运输需求研发制造相适应的电动车组。

在同一轨道区段反复使用涡流制动机时,钢轨会因吸收一部分制动能而变热,焊接长轨会产生与温升成正比的纵向压力。当轨道结构太轻或道床不稳定时,轨排就可能压曲,通常叫胀轨跑道。为此必须根据安全性要求,把钢轨最高容许温升限制在可接受的范围。无砟轨道不会因温升而出现胀轨跑道现象,与处在“蠕动状态”的有砟轨排相比,轨道状态能稳定更长时间,维修工作量较小,维修费用较少。尽管建设成本较高,审慎比选后,高速新线全部采用无砟轨道。

欧盟 2001 年底编制了泛欧高速铁路互连互通技术标准。在坡段方面,10 km 范围内  $\leq 25 ‰$ ,6 km 范围内  $\leq 35 ‰$ ,40 ‰ 坡度作为个案处理;在隧道断面方面,根据乘车舒适度要求,列车通过隧道时产生的最大空气压差  $\leq 10 \text{ kPa}$ ,隧道净断面积  $92 \text{ m}^2$ ,速度 300 km/h 通过最大空气压差  $\leq 7 \text{ kPa}$ ;在列车运行控制系统方面,采用欧洲统一的 ETCS 系统,但开

发、试验、鉴定过程太长,为不影响投入运营,采用改进型 LZB 连续式列车自动控制系统,无线列调采用 GSM-R 系统。

设计运营条件,按小时节拍开行列车,每方向每小时开行不小于 8 列的能力;安排 4 类列车,其中一类采用多电流制式开行国际列车,一类开行 ICE3 重联长列车,其余两类开行 8 辆编组的短列车。票价设计把 ICE 二等车厢的票价在城间列车 IC 票价基础上提高 40%,旅客上座率按年平均 60% 计算。

科隆—法兰克福高速铁路系统设计取得显著成果,大坡度和新线全部采用无砟轨道,采用单电流制和多电流制结构的 ICE3 列车,尽管没有装备 ETCS 系统,但考虑了互联互通技术标准中若干重要因素。系统设计结合了穿越德国中部山脉的地形、地貌、地质条件,妥善处理了需求关系、轮轨关系、车控关系、弓网关系、互通关系,实现了运营目标,总体上展示了高速铁路的当前水平。

2) 秦沈客运专线的启示。2003 年 1 月 1 日,秦沈客运专线开通试运行,8 月正式运营。实践证明,其系统设计取得重大成果,达到了国家要求的建设目标;同时,也给我们高速铁路系统设计若干启示:

a. 客运专线如何满足旅客舒适度要做更多的考虑。最小坡段长 $\geq 400$  m,设计时为节省土石方工程,短坡、碎坡取的较多,列车达速运行过程中上下起伏频繁,乘客舒适度不理想;个别缓和曲线长度的取值,竖曲线和圆曲线重叠等问题,影响运行平稳性。

b. 客运专线如何充分考虑旅客乘车的安全、方便,尤其残疾旅客便捷上、下车,节省站停时间。由于列车类型未定,车厢中间开门的双层客车下层车底板高度为 347 mm,25 型单层客车车底板高度为 1 293 mm,国产动车组车底板高度 1 210 ~ 1 345 mm,难于做到站台高度与客车底板高度基本一致,不得不设为 500 mm。

c. 路基标准、基底填料、沉降、观测、防冻、排水等问题必须得到足够重视,客运专线对路基工后沉降要求高,尤其要改变先修建桥隧后填筑路基的传统习惯,使路基有一个合理的沉压实压时间,即置放期。

d. 桥涵设计应进一步重视改善耐久性,适应现场制梁或桥位制梁,桥梁结构形式应深入进行技术经济比选,并有利于检查与养护维修。

e. 每站设 4 组 38 号大号码道岔,侧向开通机会少,建设投资多,运营养护维修工作量大,成本高。

f. 采用双红灯防护方案,在一定程度上影响了

股道有效长度和行车间隔。

g. 多专业、系统化综合工程实施中,常发生桥梁与路基、桥梁与轨道、站场与信号、站场与轨道、路基与排水、通信与运调及旅服、信号与信息化的接口界面不明,甚至设计参数的测定和提出也相互推诿,验收中发现问题各有托词,这是专业接口和系统设计尤其要注意的。

3) 高速铁路系统设计总体原则是<sup>[2]</sup>:

a. 符合安全适用、技术先进、经济合理的要求。考虑设备的兼容性,具备本线旅客列车和跨线旅客列车共线运行、正线双方向行车的运输组织条件。具体说,应充分发挥新建线路骨干作用和既有线路网络作用,扩大服务范围,使高速、提速的成果惠及广大城镇百姓。法国、德国目前新建投入运营的高速铁路分别为 1 859,964 km,高速列车通达里程分别为 6 200,6 326 km。中国建设社会主义和谐社会,铁路新线、既有线、枢纽是一张完整的路网,高速、快速客运必须覆盖更大的地区和更多的人口。

b. 线路基础设施和不易改建的建筑物和设备,应适应长远发展要求;对易改建的建筑物和设备,宜按近期运量和运输性质设计,预留发展条件。

c. 最小曲线半径、最大坡度、到发线有效长度、动车组类型、列车运行控制方式、运输调度方式、追踪列车最小间隔时间,须根据行车速度、沿线地形地质条件、输送能力和用户需求等,以及经济技术比选后确定。

d. 车站位置根据沿线城市的经济、客运量、铁路运输组织、通过能力和技术作业需要,结合工程条件等综合研究确定。车站的布局、规模,根据铁路技术政策,结合城市规划等统筹考虑。

e. 选线设计宜避开高填、深挖和长路堑等路基工程,并绕避不良地质条件地段。无法避开时,采用桥涵通过或选用其他适宜的工程措施处置。

f. 路基、桥涵、隧道、轨道等各类结构物的设计要满足强度、刚度、稳定性、耐久性要求,并加强各结构物的协调和统一,使车、线、桥(或路基、隧道)的组合具有良好的动力特性,严格控制结构物的变形及工后沉降。

g. 认真执行国家节约能源、节约用水、节约材料、节约用地等有关方针政策,因地制宜地利用太阳能、风能、地热能等可再生能源,提高能源、资源的利用效率,减少污染。

h. 坚持科学用地、合理用地、统一规划的原则,在满足运输生产和安全防护要求的基础上,节约用

地,少占耕地。

i. 重视保护生态环境、自然景观和人文景观;重视水土保持,生态环境敏感区、湿地的保护和防灾减灾及污染防治工作。选线、选址宜绕避自然保护区、风景名胜区、饮用水源保护区、国家重点文物保护单位等环境敏感区;通过城市或居民集中地区时,应采用适宜的速度值或降噪减震措施,满足国家环保标准和要求。路基边坡宜采用绿色植物与工程相结合的防护措施,兼顾美观与环保、水保、节约土地等要求。

j. 加强对桥、隧和路基上电缆槽、接触网、声屏障,综合接地线、通信、信号电缆过轨等设备的系统设计,充分考虑综合利用设施。

k. 按全封闭、全立交设计。设置防灾安全监控系统,根据需要对自然灾害和异物侵限等进行监测。

l. 统筹运作、详细研究、科学论证工务工程、牵引供电、通信信号、信息系统、电动车组、运用维修各子系统的协调配合及系统优化和集成,实现高速度、高密度、高安全性。

2.1.3 系统集成 为确保系统的完整性和各子系统之间紧密衔接,必须按系统工程施作,加强系统设计,强化系统集成,实现整体优化。参考国外高速铁路系统集成做法,结合我国国情,中国高速铁路系统集成框架见图5至图8。

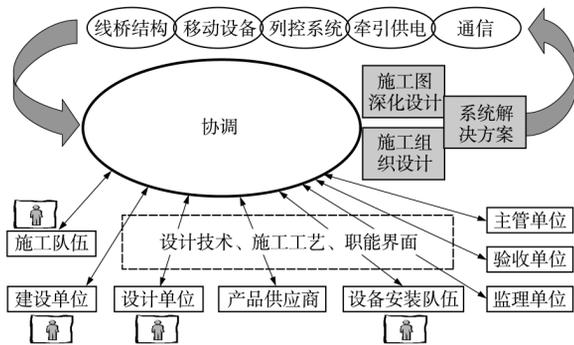


图5 系统集成关系

Fig. 5 System integration and their relations

中国高速铁路系统集成目标:通过合理利用各种资源,实现优化配置,使建设高速铁路这一超大、复杂的系统工程达到一流的工程质量、一流的装备水平、一流的运营管理。

## 2.2 工务工程

### 2.2.1 线路、枢纽与站场

1) 线路。线路平、纵断面设计应重视线路的平顺性,提高旅客的乘坐舒适度。车站及两端正线的设计标准,与区间线路相同;均停车的车站、环保等

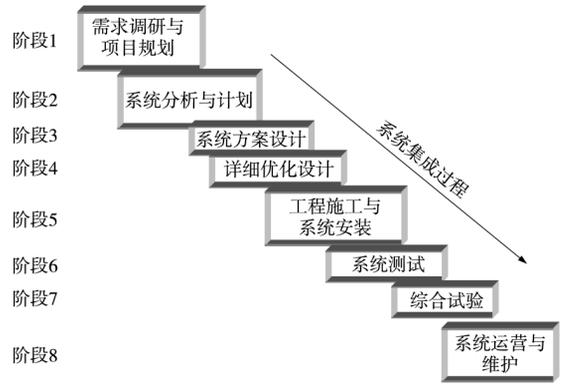


图6 系统集成过程

Fig. 6 System integration process

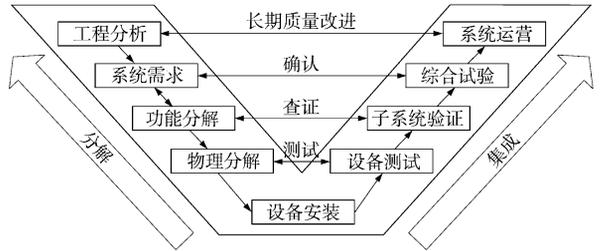


图7 系统工程

Fig. 7 Systematic engineering

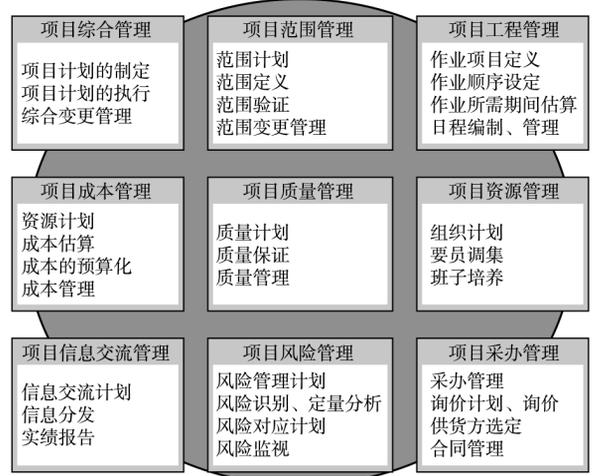


图8 系统集成项目管理

Fig. 8 System integration projects management

因素要求限速通过的车站、自然特征要求限速通过地段以及利用既有铁路地段,采用与行车速度相适应的技术标准。

a. 线路平面。最小曲线半径取决于实设超高  $h$ 、旅客列车最高速度  $v_c$  和最低速度  $v_d$ , 即

$$R_{\min} = 100 \text{int} \left\{ \frac{1}{100} \max \left[ 11.8 \cdot \frac{v_c^2}{h + h_q}, 11.8 \cdot \frac{v_c^2 - v_d^2}{h_g + h_q} \right] + 1 \right\}$$

因地制宜,按表 4 合理选用曲线半径。必要时,采用 100 m 整倍数的曲线半径。

表 4 线路平面圆曲线半径

Table 4 Curve radius of track plain

(m)

设计速度 /km·h <sup>-1</sup>	无砟轨道			有砟轨道		
	R <sub>min</sub>	R	舒适度良好条件下有关参数	R <sub>min</sub>	R	舒适度良好条件下有关参数
350	5 500	8 000 ~ 10 000	$h \leq 170$ mm	7 000	9 000 ~ 11 000	$h_{\max} \leq 170$ mm
300	4 000	5 500 ~ 8 000	$h_g + h_q = 110$ mm	4 500	6 000 ~ 9 000	$h_g + h_q = 100$ mm
250	2 800	3 300 ~ 3 700	$h + h_q = 220$ mm	3 000	3 600 ~ 4 000	$h + h_q = 200$ mm
200	1 800	2 500 ~ 2 800		2 000	2 500 ~ 2 800	$\Delta h = 20 \sim 50$ mm

由表 4 可以看到,相同设计速度条件下,无砟轨道较有砟轨道 R 小。

为保证线路测设和检测精度,使铺设、养护、维修达到要求的标准,R<sub>max</sub> 一般控制在 12 000 m。

铁路线间距主要受列车交会运行时的气动力作用控制。线间距窄,会车压力波大,对动车组的车体流线、头型、车宽、气密性、门窗设计和制造要求高,但线间距窄,可节省土建工程投资。线间距确定有灵活性,日本线间距最窄,1972 年以后投入运营的线路线间距为 4.3 m,设计速度为 260 km/h,其他国家有所加宽。我国高速铁路正线按线间距不变的并行双线设计,曲线地段设计为同心圆,列车时速 350 km 时正线线间距为 5.0 m,时速 300 km 时为 4.8 m。

经 6 种线型的缓和曲线对比分析,缓和曲线采用三次抛物线形。缓和曲线的长度取决于超高顺坡率、未被平衡的横向加速度时变率  $\beta$ 、车体倾斜角度  $f$  等参数取值,在下式中取最大值,再取为 10 m 的整数倍。

$$l_0 = 10 \operatorname{int} \left\{ \frac{1}{10} \max \left[ \frac{h}{i_{\max}}, \frac{v_c}{3.6} \times \frac{h_q}{\beta}, \frac{v_c}{3.6} \times \frac{h}{f} \right] + 1 \right\}$$

舒适度良好条件下, $i_{\max} = 2 \%$ , $\beta = 23$  mm/s,

$f = 25$  mm/s。

无砟轨道与有砟轨道采用相同的设计超高,缓和曲线长度标准相同。

缓和曲线间夹直线和圆曲线的长度主要受列车运行平稳性和旅客乘坐舒适条件控制,一般条件下该值不小于  $0.8v_{\max}$ 。

缓和曲线与道岔前后接缝间直线段长度,应考虑列车在曲线上产生的振动与道岔上产生的振动不叠加。试验表明,车辆振动的周期约为 1.0 s,按 1.5 ~ 2.0 个周期内基本衰减完,一般条件下该值不小于  $0.6v_{\max}$ 。

**b. 线路纵断面。**客货共线运行的铁路,其坡度由货物列车牵引质量决定,用限制坡度表示,设计坡度还要考虑曲线半径、隧道附加阻力的折减。高速铁路移动设备牵引和制动性能优良,适应大坡度运行,不考虑折减,用最大坡度表示。坡度大小对选

线、选址、工程数量、运营费用等影响大,是高速铁路设计的主要技术指标之一。

日本除北陆新干线的坡度为 30 ‰以外,其余各线 15 ‰延长不足 1 km,10 km 内均坡不大于 12 ‰。法国平均坡度 25 ‰时,最大坡长不大于 4 km。东南线、地中海线 35 ‰,其余各线不超过 25 ‰。德国除科隆至法兰克福线 40 ‰外,其余各线客货共线不超过 12.5 ‰。

我国在京沪高速铁路,京津城际,武广、郑西、沈大、沈哈、京郑客运专线进行了最大坡度 8 ‰,10 ‰,12 ‰,15 ‰,20 ‰,25 ‰适应地形能力的研究分析,各线跨越公路、铁路、河流,必要时采用 20 ‰坡度,平原地区 12 ‰较为合理,低山丘陵区 15 ‰适应地形条件较好,低中山区 20 ‰适应地形能力强。武广客运专线采用 20 ‰坡度,穿越瑶山山区减短了桥隧长度,最长隧道仅为 10.081 km。

动车组爬坡性能,根据目前掌握的数据,350,300,200 km/h 列车总重分别是 768,536,408.5 t,牵引总功率分别是 21 120,8 800,4 800 kW,与坡度适应情况见表 5。

表 5 列车运行速度与坡度适应情况

Table 5 Train running speed and gradient adaptation

动车组 类型	单位质 量 /kW·t <sup>-1</sup>	牵引 功率 /km·h <sup>-1</sup>	速度值 /km·h <sup>-1</sup>	基本 阻力 /N·kN <sup>-1</sup>	牵引力 /N·kN <sup>-1</sup>	剩余 牵引力 /N·kN <sup>-1</sup>	平坡上运 行剩余加 速度的 /m·s <sup>-2</sup>	保持匀 速运行 的坡道 值/%
350 km/h	27.5	350	18.47	24.18	5.71	0.06	5.71	
		300	14.17	28.22	14.05	0.14	14.05	
		250	10.47	33.86	23.39	0.23	23.39	
		300	13.01	18.198	5.18	0.05	5.18	
300 km/h	16.4	280	11.55	19.584	8.03	0.08	8.03	
		250	9.53	21.897	12.36	0.12	12.36	
		200	6.63	27.24	20.62	0.21	20.62	
		200	6.80	18.468	11.67	0.12	11.67	
200 km/h	11.8	180	5.80	20.493	14.69	0.15	14.69	
		160	4.90	23.076	18.18	0.18	18.18	
		150	4.48	24.66	20.18	0.20	20.18	

最大坡度与最大坡段长度的关系,进行了不同工况下的运行模拟,结果见表6。

表6 在最大坡度上运行一定长度后的末速度

Table 6 Final speed of trains after running on the maximum gradient for certain length (km/h)

电动车组 $V_{\max}$	350			300			200				
最大坡度/ $\%$	15	20	25	30	15	20	30	20	25	30	
初速/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	340			280			200				
坡长	1	337	335	333	332	279.3	279.2	275.8	189.2	186.3	186
/km	2	334	331	328	324	271.8	269.9	266.1	185	179.1	175.6
	3	332	327	322	317	268.9	264.8	257.7	181.1	172.6	165.9
	4	330	323	317	310	266.3	260.4	249.2	177.5	166.3	157
	5	328	320	312	303	264.3	256.2	240.7	174.2	160.7	148.5
	6	326	317	307	297	262.2	252.4	232.9	171.4	155.8	141.1
	7	324	313	302	291	260.2	248.5	225.2	168.6	151.3	134.8
	8	322	310	298	285	258.3	245.1	218.2	166.3	147.4	129.4
	9	321	308	294	280	256.6	241.8	211.3	164.2	144	124.9
	10	319	305	290	275	254.9	238.7	205.2	162.3	141.2	120.8

综上所述,正线最大坡度,一般条件下不大于20%;困难条件,经技术经济比较,不大于30%。当采用15%、20%时,坡段长度不宜大于9 km、5 km。

最小坡段长度既要满足列车运行的平稳性要求,确保列车在前一竖曲线上产生的振动在夹坡段长度范围内完成衰减;又要尽可能地适应地形,减少工程数量,节约工程投资,使两者取得最佳的统一。一般条件下最小坡段长度不小于900 m,困难条件下  $L_p = 1/2(\Delta i_1 + \Delta i_2) R_{sh} + 0.4v_{\max}$ , 并取50 m 整倍数。

$\Delta i \geq 1\%$  时,设圆曲线型竖曲线连接,一般条件下  $R_{sh}$  取30 000 m。

考虑行车安全和舒适度的影响,测设、养护、维修、检测工作的难度,竖曲线与竖曲线、缓和曲线、道岔均不得重叠设置。

如果要避免竖曲线与平面圆曲线重叠设置,由于高速铁路曲线半径大,圆曲线长,工程投资将增加较多。因此,对平面、竖曲线最小半径做了限制。

站坪坡度到发线有效长范围内受列车进站安全停车、停车后能启动、不自行溜逸和站内作业安全条件控制,困难条件下不大于1%。

线路全立交、全封闭,按标准进行栅栏防护,按要求设附属设施。

## 2) 枢纽与站场

a. 枢纽。针对高速铁路、客运专线引入枢纽面临的新情况,应建立适应城市发展、客站保留在城市内便于旅客出行、货站逐步调整到城市外围以减少对城市干扰的“客货分线、客内货外”新格局;大力发展城际、市域及其它短途运输,采用“人便其行,

多种流线”,实现铁路与其它交通方式有机衔接,服务城市的现代化客运综合交通枢纽;集中利用通道资源多线跨越大江大河。充分利用既有铁路设施,优化铁路枢纽总图布置,并与城市总体规划相协调、相配合。

枢纽建设根据总布置图分期实施,根据远景发展需要规划预留用地。近期工程做到布局合理,规模适当,运营方便,工程节省和经济效益显著,并减少扩建过程中的废弃工程及施工对运营的干扰。

枢纽内容车站的数目、分工和配置,应从方便旅客运输出发,根据客流量、客流性质、既有设备情况、运营要求、城市规划和当地运输条件等因素比选确定。具体说,应根据引入铁路数量、旅客列车对数,首先采用数模方法,模拟、仿真列车作业过程所需要的到发线数量和相关设施,由于数模参数选取准确度问题,需要采用物模手段验证;第二采用类比手段,由于物模条件的限制,类比手段也是一种论据充分的方法。

当既有客站数量和客站规模能满足运输能力、运输质量要求时,无疑不新建客站;反之,则新建客站。轨道交通的性质决定新建客站选址应首选城市中心区范围;不得已时,另辟它址。

枢纽内设多个客运站时,应最大限度地便捷旅客,合理分工。宜分别办理其中几条衔接线路的始发、终到旅客列车,并相互办理通过本客运站的旅客列车。

设置动车整备所、动车段、客机和客车整备所、检修设施的客运站,尽量缩短相互配置距离。

b. 车站。高速铁路沿线车站宜设在市区范围内,也可设在靠近市区的合适地点,与市区主要干道间应有便利的交通联系,并为发展旅客综合运输创造条件。

系统考虑车场、站房建筑、广场、轨道交通及其他公共交通,构建以人为本,可持续发展的现代、综合交通客运中心。

大型客站分场分线布置,以列车作业过程仿真模拟配置车站设备;充分利用城市地下空间布置铁路设施。

到发线数量应满足高峰时段列车密集到发的需要。有效长不小于650 m。

正线与到发线连接,及两正线间渡线均采用18号道岔。

车站咽喉区在保证必需的通过能力、作业安全和提高作业效率的条件下,布置应紧凑,减少正线上的道岔数量。

站台长度不小于 450 m,采用 1.25 m 高站台与无障碍通道,创造便捷、舒适的旅行环境。

旅客流线组织要简洁顺畅、短捷合理,站内导向直观明确。

2.2.2 路基工程 采用土工结构物的路基设计理念,强化基床结构,严格控制工后沉降,提高路基质量。科学划分填料类别,优化路基填料配制;加强特殊地区的路基填筑技术。加强边坡防护和防、排水设施;采用新型支挡结构和不良地质条件路基加固新技术;推广土工合成材料;在线路刚度变化处设置过渡段。路基工程应具有足够的强度、稳定性和耐久性。

作用在路基面上动应力设计值为 100 kPa 时,有砟轨道路基上的轨道及列车荷载换算土柱高度和分布宽度按表 7 规定。

无砟轨道路基上的轨道和列车荷载土柱高度和分布宽度,依据轨道类型和列车类型计算确定。作用在路基面上的动应力值,依据轨道结构类型计算确定。

表 7 轨道和列车荷载换算土柱高度及分布宽度

Table 7 Earth column conversion and distribution width calculated according to tracks and train load

列车活载种类	设计轴重 /kN	钢轨/kg	轨枕/根·m <sup>-1</sup>	道床厚度 /m	道床顶宽 /m	道床坡度	分布宽度 /m	计算高度/m				
								18	19	20	21	22
ZK 活载	200	60	1667	0.35	3.6	1:1.75	3.4	3.0	2.8	2.7	2.6	2.4

1) 路基横断面。路基横断面主要考虑路基稳定的需要、线间距、轨道结构形式、曲线超高设置、路肩宽度、通信信号和电力电缆槽布置、接触网立柱基础位置、声屏障基础、养护维修需要等因素,综合考虑路基防排水系统。双线有砟轨道路基标准横断面如图 9 所示,双线无砟轨道路基标准横断面如图 10 所示。

接触网杆基础、电缆沟槽、声屏障基础与路基同步设计,同步施工。

有砟轨道正线曲线地段路基面在曲线外侧加宽,加宽值在缓和曲线内渐变。曲线半径 5 500 ~ 11 000 m,加宽值 0.3 ~ 0.5 m。

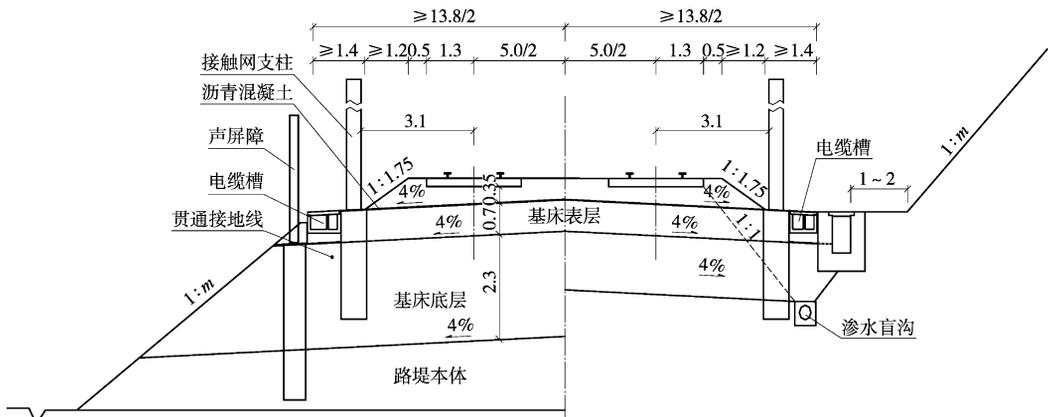


图 9 双线有砟轨道路基标准横断面示意图

Fig. 9 Standard cross-section of double-line ballast track subgrade

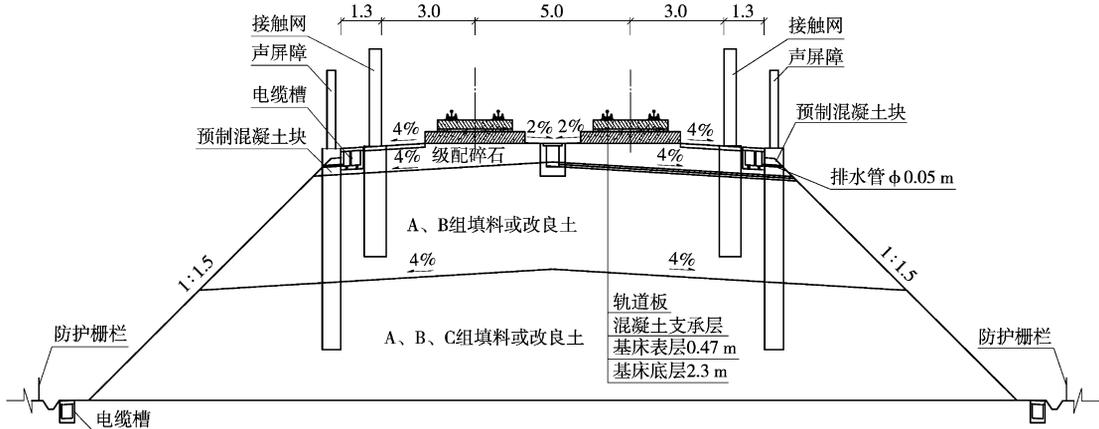


图 10 双线无砟轨道路基标准横断面示意图

Fig. 10 Standard cross-section of double-line ballastless track embankment

2) 基床及本体。路基基床厚度受控列车动应力与路基自重应力。动应力由轨道、道床传至路基本体,沿深度逐渐衰减,其分布采用布氏(Boussinesq)理论计算。

在路基深度  $H$  处,列车荷载引起的动应力只占路基自重荷载的一小部分,高速铁路动应力与自重引力之比为 0.2 时, $H \approx 3$  m,基床厚度定位 3 m。

基床表层厚度由路基顶面变形量不大于 3.5 mm 和作用在表层底面动应力不大于基床下部填土允许应力强度控制。当基床表层、底层变形模量  $E_1 = 210$  MPa,  $E_2 = 34$  MPa,表层厚度 70 cm 时,能够满足路基顶面变形量  $< 3.5$  mm 的控制条件。

综合变形控制与强度控制,取基床表层厚 70 cm。

秦沈客运专线的试验和冻害问题提醒我们:级配碎石按标准组成材料质量,混合料良好的级配,按要求填筑,能形成较高的力学强度和水稳性。但仍具有一定的渗水性,在长时间雨季或积雪融化的条件下,可能渗入级配碎石以下的基床底层中,从而产生冻害和翻浆冒泥、基床变形等病害,影响轨道的平顺性。因此,有砟轨道在表层总厚度不变的条件下,在表层顶面增设 5 ~ 10 cm 沥青混凝土防水排水层。级配碎石基床表层的压实标准见表 8,基床底层填料及压实标准见表 9,基床以下路堤填料及压实标准见表 10。

表 8 级配碎石基床表层的压实标准

Table 8 Compacting standard of surface course of graded broken stone bed

轨道类型	填料	厚度 /m	压实标准		
			地基系数 $K_{30}$ /MPa·m <sup>-1</sup>	动态变形模量 $E_{vd}$ /MPa	变形模量 $E_{v2}$ /MPa
有砟轨道	级配碎石	0.6 ~ 0.65	≥190	≥55	<18%
无砟轨道	级配碎石	0.40	≥190	≥50	<18% ≥120

3) 路基工后沉降量及过程控制。工后沉降是指路堤建成后铺轨工程(包括铺砟)开始时计算至最终的路基剩余沉降。

有砟轨道路基工后沉降量不大于 5 cm,沉降速率应  $< 2$  cm/a。桥台台尾过渡段工后沉降量不大于 3 cm。

无砟轨道铺设完成后的路基工后沉降应满足扣件调整和线路竖曲线圆顺的要求。工后沉降一般不应超过扣件允许的沉降调高量 15 mm;沉降比较均匀、长度大于 20 m 的路基,允许的工后沉降量不大于 30 mm,并且调整轨面高程后的竖曲线半径须满

足要求。路桥或路隧交界处的差异沉降不大于 5 mm,过渡段沉降造成的路基与桥梁或隧道的折角不大于 1/1 000。

表 9 基床底层填料及压实标准

Table 9 Subgrade bed bottom fillings and its compacting standard

轨道类型	填料	厚度 /m	压实标准	改良细粒土	砂类土及细砾土	碎石类及粗砾土
有砟轨道	A、B 组填料及改良土	2.3	地基系数 $K_{30}$ /MPa·m <sup>-1</sup>	≥110	≥130	≥150
			动态变形模量 $E_{vd}$ /MPa	≥40	≥40	≥40
			压实系数 $K$	≥0.95		
			孔隙率 $n$		<28%	<28%
无砟轨道	A、B 组填料及改良土	2.3	地基系数 $K_{30}$ /MPa·m <sup>-1</sup>	≥110	≥130	≥150
			动态变形模量 $E_{vd}$ /MPa	≥35	≥35	≥35
			变形模量 $E_{v2}$ /MPa	≥60	≥60	≥60
			压实系数 $K$	≥0.95		
			孔隙率 $n$		<28%	<28%

表 10 基床以下路堤填料及压实标准

Table 10 Embankment filling under the subgrade bed and its compacting standard

轨道类型	填料	压实标准	细粒土改良土	砂类土及细砾土	碎石类及粗砾土
有砟轨道	A、B、C 组(不含细粒土、粉砂及易风化软质岩块石土)填料及改良土	地基系数 $K_{30}$ /MPa·m <sup>-1</sup>	≥90	≥110	≥130
		压实系数 $K$	≥0.90		
		孔隙率 $n$		≤31%	≤31%
无砟轨道	A、B、C 组(不含细粒土、粉砂及易风化软质岩块石土)填料及改良土	地基系数 $K_{30}$ /MPa·m <sup>-1</sup>	≥90	≥110	≥130
		变形模量 $E_{v2}$ /MPa	≥45	≥45	≥45
		压实系数 $K$	≥0.92		
		孔隙率 $n$		≤31%	≤31%

路堤建成后发生的变形、沉降主要有:基床在列车荷载作用下发生变形、本体在自重作用下的压密沉降、支承路基的地基压密沉降。压密沉降主要通过压实密度来控制。根据国外高速铁路经验和我国实践,路堤填土压实沉降量,当路堤以粗粒土、碎石类土填筑时,该沉降量约为路堤高度的 0.1% ~ 0.3%;当以细粒土填筑时,约为路堤高度的 0.3% ~ 0.5%。沉降一般在路堤竣工之后一年左右完成。因此,控制沉降主要是控制支承路基的地基压密沉降。

日本对东海道新干线运营 10 年后,路堤地下沉量、地基状况、维修量及难易度进行了分类调研,调研结论提出从地表起到约为路基宽度 2 倍的深度

范围内支承路堤地基的必要条件,满足条件地段路堤处于良好状态。借鉴其经验,在我国进行了实践,路堤地基应符合表 11 的条件。

表 11 路堤地基条件

Table 11 Embankment foundation conditions

地 层	地 基 条 件
基岩、碎、卵、砾石类	无条件
砂类土	$P_s \geq 5.0 \text{ MPa}$ 或 $N \geq 10$ , 且无地震液化可能
黏性土	$P_s \geq 1.2 \text{ MPa}$ 或 $\sigma_0 \geq 0.15 \text{ MPa}$

不能满足时,应根据地层条件等采取整平碾压、夯实、翻挖回填、换填、控制填土速率、或者采取震动或冲击碾压、强夯、砂桩、碎石桩、灰土挤密桩、CFG 桩等其它有效地基加固处理措施。无论有砟、无砟轨道,都应做工后沉降分析。

满足高速铁路的轨道平顺性除严格控制路基的均匀沉降外,不均匀沉降控制更为关键。路桥、路涵、路隧过渡段,地层变化较大处和不同地基处理措施连接处,应采取逐渐过渡的方法,减少不均匀沉降。路堤填筑后放置不少于 6 个月时间是有效方法。

由于沉降计算的精度不足以控制无砟轨道的工后沉降,因此,工后沉降的预测以施工中的沉降观测为主,分析评估沉降稳定并工后沉降满足要求后,才能进行无砟轨道的铺设。

### 2.2.3 轨道工程

1) 正线轨道。正线轨道按一次铺设跨区间无缝线路设计。要实现高平顺性和高强度,必须强化轨道基础,尤其是路基的稳定性。正线轨道静态平顺度铺设精度标准见表 12。

表 12 正线轨道静态平顺度铺设精度标准

Table 12 Precision standard of static smoothness of main line track

	高低		轨向		水平		扭曲(6.25 m)		轨距	
	有砟	无砟	有砟	无砟	有砟	无砟	有砟	无砟	有砟	无砟
幅值/mm	2	2	2	2	2	1	2	2	±2	±1
弦长/m	10		10							

正线按照线下工程类型选择轨道结构形式。桥梁及隧道地段和正线地质条件好的路基地段,集中成段铺设无砟轨道。无砟与有砟轨道之间设置过渡段。

焊接用钢轨采用 100 m 定尺长的 60 kg/m 新钢轨。

有砟轨道采用 2.6 m 长 III 型混凝土枕,特级碎石道砟。桥梁、隧道内采用弹性轨枕或铺设砟下弹

性垫层。

2) 无砟轨道。无砟轨道结构形式根据线下工程的类型,减振、降噪的环保要求,经技术经济比选后合理选择。我国已形成 CRTS 有挡肩、无挡肩板式,双块埋入式,压入式系列无砟轨道型式。

3) 高速铁路轨道类型选择。高速铁路轨道结构类型从总体上分有砟轨道和无砟轨道。

有砟轨道是铁路的传统结构。它具有铺设、更换与维修方便,造价较低,吸噪特性较好等优点。但随着行车速度的提高,其自身缺点也随之显现。法国是以有砟轨道为代表的高速铁路国家,一直以有砟轨道能够实现时速 270 ~ 300 km 的运营而感到骄傲。但随后即发现早期建造的东南线、大西洋线道砟粉化严重,轨道呈“蠕动状态”,几何尺寸难以保持,维修周期缩短,维修费用大增,影响正常的运营,使用不到 10 年就不得不全面大修,更换道砟。对于这个问题,法铁对有砟的粒径级配、颗粒形状指标、硬度系数标准进行了修订,由东南线洛杉矶磨耗率  $\leq 20\%$  和硬度系数  $\geq 17$ ,到地中海线提高到洛杉矶磨耗率  $\leq 16\%$  和硬度系数  $\geq 21$ 。此外,为减缓道砟粉化,在桥梁上、隧道内还采取了道砟下铺设橡胶垫的方式。同时,也逐渐认识到无砟轨道的优越性,因而开展了无砟轨道结构的研究和试验,在地中海线马赛隧道内铺设了双块式无砟轨道。

无砟轨道的优点是:稳定性高、刚度均匀性好、结构耐久性强、维修工作量显著减少;相同设计速度条件下,曲线半径小,有利于选线;曲线路基不需加宽,基床表层级配碎石减薄 20 ~ 25 cm;结构高度低、自重相对轻,可减轻桥梁二期恒载,减少隧道开挖断面以及道床整洁美观;减少综合维修工区设置及大型养路机械配置,在高速铁路上得到越来越广泛的应用。

日本 1964 年 10 月建成 515.4 km 的东海道新干线,没有铺设无砟轨道,每日 0:00 ~ 5:00 点停止列车运行,维修线路。1972 年 3 月建成山阳新干线东段,试铺 8 km 无砟轨道,占线路全长 5%;1975 年 3 月,西段修建 273 km 无砟轨道,占线路全长 69%;1982 年以后建成的东北、北陆、上越新干线,修建无砟轨道占线路全长分别为 82%, 85%, 91%。到目前为止,日本修建无砟轨道已超过 2 700 延长公里,无砟轨道在日本可谓全面采用。

德国在上世纪 70 年代修建高速铁路,无砟轨道占线路全长不到 30%;1998 年开通柏林至汉诺威的

高速铁路,无砟轨道占线路全长 80%;科隆至法兰克福高速新线 155 km,纽伦堡至英戈尔施塔特高速新线全部采用无砟轨道。目前,路网中已有 600 多 km 无砟轨道。

此外,荷兰、韩国、中国台湾近年修建的高速铁路都成段、成线采用无砟轨道。

根据国外高速铁路的建设经验和中国铁路的研究、论证、实践,中国铁路时速 300 km 的客运专线将大范围成段、成线修建无砟轨道,除共识无砟轨道优点外还有中国铁路的特性。一是无砟轨道可将综合维修天窗减到最小,满足大量开行“夕发朝至”和“朝发夕至”旅客列车需求;有砟轨道线路维修工作量 40% 以上是道床养护和维修,综合维修必须采用 4 h 以上的矩形“天窗”,限制了高速列车在较长线路和较长时间内运行。二是由于我国符合特级道砟标准的岩藏资源相当稀少,无砟轨道可以减少客运专线建设对特级道砟的需求量。三是高速铁路由于全立交、节省用地的需要,桥梁比例高,其下部基础为无砟轨道推广应用创造了条件。正是这些原因,在京沪高速铁路设计咨询报告中,法国、德国和日本咨询专家都强调采用无砟轨道。

无砟轨道也存在地震等不可抗拒的灾害修复不如砟轨道容易,线路噪声、振动大于有砟轨道,建设投资大于有砟轨道的缺点。日本铁路在总结轨道结构类型时评价:板式轨道的工程造价是有砟轨道的 1.3~1.5 倍,即使达到 2 倍,若线路的通过总重每年 1 200 万 t,则增加的工程投资在 10 年内可以偿还。德国铁路在经济分析中,引入了“生命周期成本分析”概念,考虑无砟、有砟轨道结构不同的使用寿命,把工程费用(含利息)分摊到整个寿命周期,再加上每年的经常维修支出,计算不同结构的寿命周期成本,结论是:传统的有砟轨道尽管有着悠久的历史,但在高速度、高密度的运输通道上,要求延长其使用寿命,减少维修工作量,提高适应性,采用无砟轨道有着明显的优越性。

高速铁路的噪声源主要包括轮轨噪声、集电系统噪声、空气动力噪声、结构物噪声。当列车速度不小于 300 km/h 时,集电系统噪声大于轮轨噪声,不受控于无砟或有砟轨道结构。

无砟轨道在无道床表面吸声板的情况下,噪声源强比有砟轨道噪声源强一般增加 3~4 dB。

无砟轨道与有砟轨道轨下结构基本相同,差异主要是无砟构筑混凝土道床,有砟铺设 35 cm 厚的

道砟。整体结构而言,不存在两者刚、柔的级差,只存在有砟轨道凹凸不平的道砟吸音效果较好的量差。依据国家有关噪声、振动标准,两者均要采取相应对策措施达标。

日本山阳新干线设计速度 260 km/h,后经改造提速部分路段最高行车速度达 300 km/h;法国地中海、东部线两条线设计速度为 350 km/h,留有约 10% 余度,按 320 km/h 运营;德国科隆至法兰克福线,设计速度 300 km/h,按 330 km/h 验交,同样留有 10% 余度。数据说明,无砟、有砟轨道均未按 350 km/h 运营,世界铁路无砟轨道还没有 350 km/h 试验速度,技术上、环保上有哪些问题需要攻克,这正是中国铁路有信心在武汉试验段要解决的重大、关键技术。

#### 2.2.4 桥梁工程

1) 一般要求。桥梁结构必须具有足够的强度和刚度,保证可靠的稳定性和保持桥上轨道的高平顺性,使高速铁路桥梁结构能够承受较大的动力作用,具备良好的动力特性。桥梁主要承重结构应不少 100 年使用寿命的要求。

桥梁结构应构造简洁,规格和外形力求标准化,便于施工,建造质量易控制,达到少维修的目的。

预应力混凝土结构刚度大、噪声低,由温度变化引起的结构位移对线路结构的影响小,运营期间养护工作量少等,桥梁上部结构优先采用预应力混凝土结构。

桥梁的上部结构直接承受列车荷载,保证上部结构的竖向刚度、横向刚度和抗扭刚度,同时加强结构的整体性,提高结构的动力特性。高架线路上采用多孔等跨简支梁桥形式;在适宜条件下,采用多孔等跨布置的连续梁,能提高梁部结构整体性和刚度。

双线整孔箱形截面梁,结构横向刚度大,保证高速运行乘坐舒适度应优先采用。跨度 16 m 及以下桥梁也可根据具体情况选用整体性好、结构刚度大的其它结构形式。

适应高速铁路桥梁动力响应大和满足桥上铺设无缝线路后钢轨强度和稳定性要求,桥梁下部结构一般采用整体性强的混凝土或强度高、延性好、有利于高速行车和满足抗震要求的钢筋混凝土桥墩台。成线、成段采用统一的墩台类型,便于施工组织,同时适应景观协调要求。

涵洞采用整体性好,方便施工、便于检查维修的矩形框架涵。

由于路基与桥、涵结构物刚度的差异,会造成高

速行车“跳车”现象,设置过渡段是衰减“跳车”现象影响的有效措施。因此,相邻桥桥、桥涵之间依据施工工艺和工程造价,合理确定距离。

2) 列车竖向静活载。高速铁路桥涵荷载,根据高速行车和采用无缝线路要求,在现行规定上增列了长钢轨伸缩力、挠曲力和断轨力、气动力等几项。高速铁路桥梁长度占全线比例大,活载图式是最重要的参数之一,制定得合理与否直接影响行车安全和工程造价。活载图式定的偏低,会危及高速行车安全;定的过高,则会浪费投资。影响活载图式的因素较多,如列车类型、轴距、轴重、编组以及车辆的发展趋势等,还与运输模式中的单一客运还是客货混运、速度指标、不同结构物的加载方式等密切相关。因此,在考虑了以上各因素后确定的设计活载图式在桥梁上产生的静、动效应,应大于各类实际运行的移动设备所产生的静、动效应,并留有适当的强度储备。

欧洲各国普遍采用 UIC 活载;日本采用高速列车专用荷载  $N, P$  活载。

我国首先考虑高速铁路单一客运,跨线旅客列车上线,同时考虑基础设施按 350 km/h 设计要求,还考虑应急状态下特殊功能,研究、分析 UIC 活载基础上制定中国高速铁路活载图式。

如果我国直接把 UIC 活载作为高速铁路设计活载,它与运营活载的强度效应比余量较大,常用跨度的简支梁、中等跨度的连续梁分别约为 50%, 40%, 说明余量大,经济性差。如果用 0.6UIC, 应急状况下特殊功能个别跨度检算不能通过;如果用 0.7UIC, 余量过小。因此,采用 0.8UIC 作为我国高速铁路桥梁设计活载,即 ZK 标准活载图式(见图 11)。

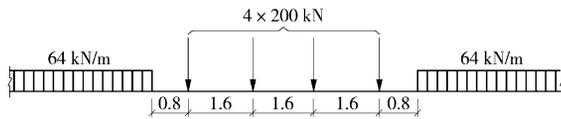


图 11 ZK 标准活载图式  
Fig. 11 ZK standard live load

经对 24 m 梁、墩、基础同精度比较,ZK 标准活载图式较 UIC 标准活载节省材料约 10%;较 0.7UIC 标准活载多耗材料约 1%。

3) 结构变形、位移和自振频率的限值。在列车竖向静荷载作用下,梁体的竖向挠度、梁端竖向转角分别不大于表 13、表 14 限值。

在列车横向摇摆力、离心力、风力和温度力的作用下,梁体的水平挠度应不大于  $L/4\ 000$ 。

无砟轨道相邻梁端两侧的钢轨支点竖、横向相

对位移不大于 1 mm。ZK 静活载作用下,3 m 梁长的扭曲变形两根钢轨间  $t$  不大于 1.5 mm。

表 13 梁体竖向挠度限值

Table 13 Vertical deflection limit of beam

项目	$L \leq 24$ m	$24$ m $< L \leq 80$ m	$L > 80$ m
单跨	$L/1\ 300$	$L/1\ 000$	$L/1\ 000$
多跨	$L/1\ 800$	$L/1\ 500$	$L/1\ 000$

表 14 梁端竖向转角

Table 14 Vertical rotating angle of beam ends

项目	台与梁之间 $\theta/\text{rad}$	相邻两孔梁之间 $\theta_1 + \theta_2/\text{rad}$
有砟轨道	$2 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$
无砟轨道	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$

简支梁竖向自振频率不小于下列限值:

$$L \leq 40$$
 m,  $n_0 = 120/L$

$$40$$
 m  $< L \leq 80$  m,  $n_0 = 23.58L^{-0.592}$

车线桥耦合动力响应分析或列车牵引试验安全性和舒适性要满足下列限值:

$$\text{脱轨系数 } Q/P \leq 0.8$$

$$\text{轮重竖向减载率 } \Delta P/P \leq 0.6$$

$$\text{轮对横向水平力 } Q \leq 80$$
 kN

车体竖向振动加速度  $a_z \leq 0.13g$  (半峰值)  
( $g$  为重力加速度)

$$\text{车体横向振动加速度 } a_y \leq 0.10g \text{ (半峰值)}$$

墩台纵向及横向水平线刚度应满足高速行车时列车安全性要求和旅客乘车舒适度要求。由墩台横向水平位移差引起的相邻结构物间的水平折角不大于 1‰。

墩台基础的沉降量按恒载计算,工后沉降量不大于表 15 限值。

表 15 墩台基础工后沉降量限值

Table 15 Limit of settlement after construction of abutment and pier foundation

项目	墩台均匀沉降量 /mm	静定结构相邻墩台沉降量之差/mm
有砟桥面桥梁	30	15
无砟桥面桥梁	20	5

4) 结构构造。有砟、无砟桥面布置见图 12、图 13。

预应力混凝土梁的徐变上拱值,轨道铺设后,有砟桥面不大于 20 mm,无砟桥面不大于 10 mm。

道岔全长范围的梁部采用连续结构,特别困难时,梁缝的设置应避开尖轨和心轨范围。

#### 2.2.5 隧道工程

1) 耐久性 & 内轮廓。隧道结构应具有足够的耐久性,主体结构按不小于 100 年正常使用的要求设计。隧道轨顶面以上净空横断面面积限值见

表 16。隧道建筑限界及内轮廓见图 14。

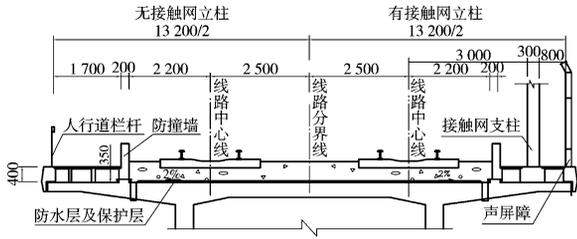


图 12 有砟桥面布置  
Fig. 12 Ballast bridge deck map

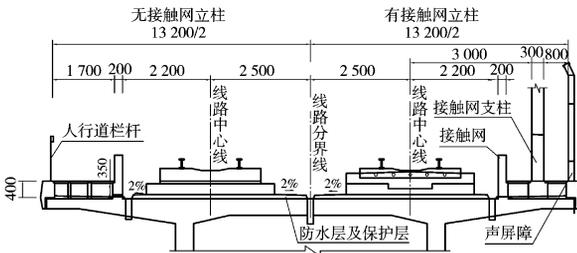


图 13 无砟桥面布置  
Fig. 13 Ballastless bridge deck map

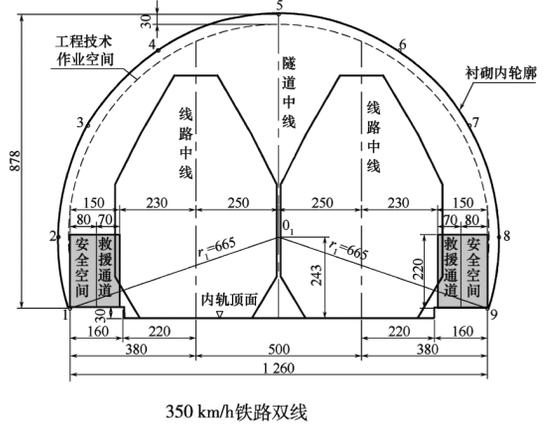
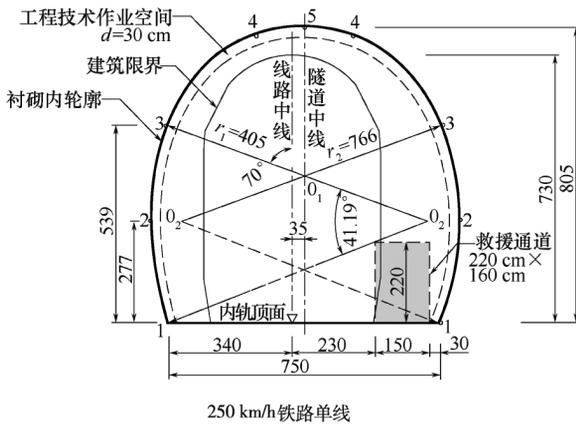


图 14 隧道建筑限界及内轮廓(单位:cm)

Fig. 14 Construction clearance and its inner profile of tunnels

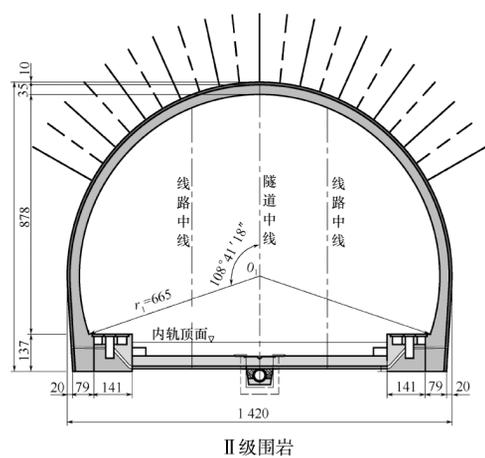
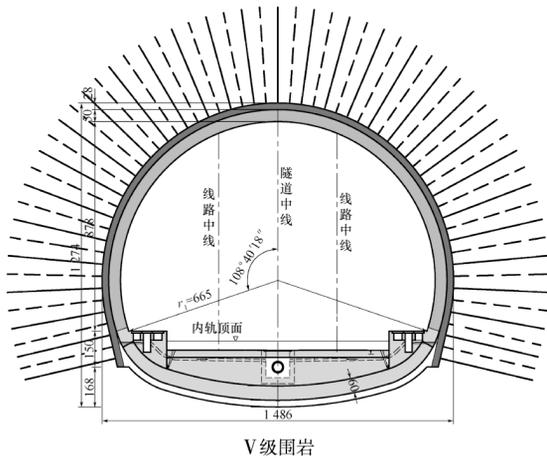


图 15 时速 350 km 双线铁路隧道代表性衬砌结构断面

Fig. 15 Cross-section of lining structure representative of 350 km/h double-track tunnels

表 16 隧道轨顶面以上净空横断面面积限值

Table 16 Cross section area limit of clearance above tunnel track surface

速度 /km·h <sup>-1</sup>	单线 /m <sup>2</sup>	双线 /m <sup>2</sup>	安全空间 (宽×高)	救援通道 (宽×高)	工程技术作业空间/m
200	50	80	0.8 m×2.2 m	1.5 m×2.2 m	0.3
250	58	90	0.8 m×2.2 m	1.5 m×2.2 m	0.3
300~350	70	100	0.8 m×2.2 m	1.5 m×2.2 m	0.3

注:救援通道距线路中心 2.3 m,救援通道已含安全空间

洞门尽量减少边仰坡开挖,实用美观。采用斜切式,需要时设置洞口缓冲结构。

2) 衬砌。暗挖隧道采用复合式衬砌,明挖隧道采用整体式衬砌,掘进机施工圆形隧道采用管片单层衬砌。

时速 350 km 双线铁路隧道代表性衬砌结构见图 15。

湿陷性黄土隧道底部应进行加固处理。

隧道衬砌结构防水标准采用一级。初期支护与二次衬砌间铺设防水板厚度不小于 1.5 mm。