



住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
(经典精品系列教材)

轨道工程

(第二版)

中南大学 陈秀方 娄平 主编
同济大学 王午生 主审

中国建筑工业出版社

住房和城乡建设部土建类学科专业“十五”规划教材
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
(经典精品系列教材)

轨 道 工 程

(第二版)

中南大学 陈秀方 娄 平 主编
同济大学 王午生 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

轨道工程/陈秀方等主编. —2版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 1

住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材,
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材, 高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 978-7-112-20280-5

I. ①轨… II. ①陈… III. ①轨道(铁路)-高等学校-教材 IV. ①U213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 009924 号

本书属于高等学校土木工程专业指导委员会规划推荐教材(经典精品系列教材), 并于2012年入选第一批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。本书共分9章, 包括绪论, 轨道结构, 轨道几何形位, 道岔, 轨道力学分析, 无缝线路轨道设计, 线路维护与管理, 轨道交通噪声与振动及其控制, 轨道结构可靠性设计。本书的附录还介绍车辆轮对的蛇行运动, 谐波激励下轮轨系统的动力响应, 有砟轨道道床状态参数及检测方法, 无砟轨道可靠性设计参数估计, 常用轨道工程汉英科技名词等。

本书采用了轨道工程最新规范体系, 并介绍轨道工程技术的最新进展, 其中包括高速铁路钢轨, 无砟轨道、城市轨道交通减震型轨道、高速铁路道岔、以及轨道扣件等新型结构和部件; 专门开辟章节介绍轨道结构可靠性设计基本原理和方法, 介绍道岔区和长大跨度桥梁无缝线路设计方法。书中还介绍轨道不平顺谱密度的基本概念和计算方法。

本书适用于土木工程专业本科教学, 可作为专业入门读物, 并可供工程技术人员参考。

为配合本课程教学, 本书作者制作了教学课件, 请需要的老师登录 www.cabp.com.cn 免费下载。

责任编辑: 高延伟 吉万旺 王 跃

责任校对: 李欣慰 党 蕾

住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
(经典精品系列教材)

轨 道 工 程

(第二版)

中南大学 陈秀方 姜 平 主编

同济大学 王午生 主审

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 28 $\frac{1}{4}$ 字数: 584 千字

2017年3月第二版 2017年3月第五次印刷

定价: 53.00 元

ISBN 978-7-112-20280-5

(29713)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

出版说明

1998 年教育部颁布普通高等学校本科专业目录,将原建筑工程、交通土建工程等多个专业合并为土木工程专业。为适应大土木的教学需要,高等学校土木工程学科专业指导委员会编制出版了《高等学校土木工程专业本科教育培养目标和培养方案及课程教学大纲》,并组织我国土木工程专业教育领域的优秀专家编写了《高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材》。该系列教材 2002 年起陆续出版,共 40 余册,十余年来多次修订,在土木工程专业教学中起到了积极的指导作用。

本系列教材从宽口径、大土木的概念出发,根据教育部有关高等教育土木工程专业课程设置的教學要求编写,经过多年的建设和发展,逐步形成了自己的特色。本系列教材投入使用之后,学生、教师以及教育和行业行政主管部门对教材给予了很高评价。本系列教材曾被教育部评为面向 21 世纪课程教材,其中大多数曾被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和普通高等教育土建学科专业“十五”、“十一五”、“十二五”规划教材,并有 11 种入选教育部普通高等教育精品教材。2012 年,本系列教材全部入选第一批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

2011 年,高等学校土木工程学科专业指导委员会根据国家教育行政主管部门的要求以及新时期我国土木工程专业教学现状,编制了《高等学校土木工程本科指导性专业规范》。在此基础上,高等学校土木工程学科专业指导委员会及时规划出版了高等学校土木工程本科指导性专业规范配套教材。为区分两套教材,特在原系列教材丛书名《高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材》后加上经典精品系列教材。各位主编将根据教育部《关于印发第一批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材书目的通知》要求,及时对教材进行修订完善,补充反映土木工程学科及行业发展的最新知识和技术内容,与时俱进。

高等学校土木工程学科专业指导委员会
中国建筑工业出版社

第二版前言

本书属于高等学校土木工程专业指导委员会规划推荐教材（经典精品系列教材），并于2012年入选第一批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。根据教育部《关于印发第一批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材书目的通知》要求，本书按计划在原有基础上进行修订完善。

我国通过高速铁路、重载铁路和城市轨道交通的建设，全面推动了铁路工程技术的创新和发展，在世界铁路行业中具有重要地位。铁路轨道工程采用了新技术、新材料、新结构和新标准。在我国轨道工程技术领域里，制定了《铁路轨道极限状态法设计暂行规范》，《铁路无缝线路设计规范》，《轨道几何状态动态检测及评定》等一系列新规范和新标准；高速铁路广泛采用无砟轨道、无缝线路、高速道岔等新型轨道结构；高速铁路钢轨采用了新材料和新工艺；高速铁路的维护管理采用大型养路机械和现代轨道不平顺检测与控制方法。我国的轨道工程技术，以引进国外先进技术为切入口，伴随高速、重载铁路工程建设的进程，形成了我国铁路轨道工程的技术体系，在铁路轨道可靠性设计、无缝线路和无砟轨道等工程技术方面逐步突显出中国轨道工程的技术特征。为反映我国轨道工程技术的显著进步，本书开辟新的章节第9章《铁路轨道可靠性设计》，介绍结构可靠性设计基本原理和铁路轨道可靠性设计方法，在轨道工程教学中建立了新的知识点。重新编写第1章和第2章，介绍世界铁路轨道技术的发展和我国高速铁路钢轨、无砟轨道结构及新型轨道扣件。第4章在介绍国外高速道岔的同时，介绍我国高速道岔的结构和发展概况。第6章增设了道岔无缝线路和长大跨度桥梁无缝线路设计。第7章介绍了我国线路维护管理的新体制、轨道不平顺管理新标准、轨道不平顺谱密度基本知识及其应用。附录分列若干专题内容，可供拓展教学内容选用，并可供工程技术人员参考。

本书由陈秀方教授、娄平教授主编，参加编写的有陈秀方教授、娄平教授、向俊教授、曾志平教授和张向民博士等。主编人统筹全书内容，曾志平制作教学课件。

本书在编写过程中得到中南大学土木工程学院领导的支持，并得到业内同仁的热情帮助。中国铁路总公司吴细水教授级高级工程师，中国铁道建筑总公司金

守华教授级高级工程师，中铁第四勘察设计院集团有限公司孙立教授级高级工程师、郢永杰高级工程师、陈潇工程师，中国铁道科学研究院刘秀波研究员、尤瑞琳助理研究员等领导和专家为本书提供了宝贵的技术文献资料。硕士研究生侯西蒙为本书的动力学例题计算做了细致的工作。硕士研究生林志华参加了教学课件文档的制作。中国建筑工业出版社吉万旺编辑为本书的编写提出宝贵的指导意见，使之顺利出版。在此向他们致以诚挚的谢意！

作者的学术水平有限，如有疏漏，恳请指正。

作者

2016年10月

第一版前言

本书由高等学校土木工程专业指导委员会第三届五次会议确定为规划推荐教材,适用于土木工程专业道路与铁道工程及相关课群组《轨道工程》专业课教学,由中南大学主编,西南交通大学参加编写,同济大学主审。

我国铁路通过列车提速和客运专线铁路工程建设,全面推动了铁路工程技术创新。铁路轨道工程采用了新技术、新材料、新结构和新标准,原有的铁路轨道教材已不能适应时代要求,因而必须采用铁道工程最新规范体系,反映轨道工程技术最新发展水平,并以一主多辅的专业课教学思想为指导,重新组织教材内容,编写合乎现代教学要求的轨道工程教科书。本书引入了高速铁路钢轨、高速铁路道岔、新型无碴道床、新型养路机械等现代轨道工程新技术;引入了轨道不平顺谱密度管理方法与标准、无缝线路轨道新的设计方法和理论、以及车辆稳态通过曲线理论;还引入了轨道交通噪声与振动及其控制并定为专门章节。编者希望通过以上内容的引入使教材反映出现代铁路轨道工程技术及设计理论的发展水平,同时也希望能有助于推动轨道工程教学内容的创新,使之更具先进性、科学性和实用性。

全书共分8章,由陈秀方主编,王午生主审,参与编写的专家教授有:陈秀方(第1、6、7章)、刘学毅(第5章)、唐进锋和金守华(第2、8章)、江成(2.2.3无碴道床)、向俊(第3、4章)、顾经文(4.5.3国外高速道岔发展概况)、周小林(附录)。全书各章的书稿由主编人进行了内容调整和增删。

在本教材的编写过程中,得到中南大学和土木建筑学院领导的支持,并得到业内同仁的热情帮助。同济大学王午生教授,仔细审阅了书稿,并提出了许多宝贵意见。铁道部高速办赵国堂研究员,铁道部运输局吴细水高级工程师,铁道部工程技术研究所刘华高级工程师,中国铁道建筑总公司金守华高级工程师,中国铁路工程总公司高慧安高级工程师,西南交通大学王平教授,铁道科学研究院赵汝康研究员、江成研究员、顾经文研究员、王继军助理研究员等领导和专家为本书提供了宝贵的技术文献资料。博士研究生姚京成,硕士研究生张向民、唐乐、朱文珍、曾华亮、易锦、黄友剑等为本书的文献检索、书稿打印、校对及有关例题计算付出了极大艰辛。中国建筑工业出版社朱首明主任为本书的编写提出宝贵

的指导意见，使之顺利出版。在此向他们致以诚挚地谢意！

作者学术水平有限，如有疏漏，敬希指正。

作者

2005年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 现代铁路发展概况	1
1.2 我国铁路运输模式	5
1.3 轨道的组成	5
1.4 轨道在铁路运营中的技术特征	8
1.5 本书的主要内容及学习方法	9
复习思考题	10
第 2 章 轨道结构	11
2.1 概述	11
2.2 钢轨	11
2.3 轨枕	36
2.4 有砟道床	47
2.5 有砟轨道设计标准	54
2.6 无砟轨道的结构形式	55
2.7 扣件	72
复习思考题	89
第 3 章 轨道几何形位	91
3.1 概述	91
3.2 机车车辆走行部分构造简介	92
3.3 直线轨道几何形位	100
3.4 曲线轨道几何形位	106
复习思考题	123
第 4 章 道岔	124
4.1 道岔的种类	124
4.2 单开道岔构造	127
4.3 单开道岔的几何形位	145
4.4 单开道岔总布置图设计	150
4.5 列车通过道岔的容许速度及高速道岔	160
4.6 特种道岔	174
4.7 轨道连接	178

复习思考题	187
第 5 章 轨道力学分析	188
5.1 概述	188
5.2 轨道的荷载	188
5.3 轨道结构静力计算	190
5.4 轨道结构动力作用的准静态计算法	210
5.5 轮道部件强度检算	213
5.6 轮轨相互作用	224
5.7 车辆转向架稳态通过曲线计算	237
5.8 车辆运行平稳性和安全性评估	245
复习思考题	253
第 6 章 无缝线路轨道设计	255
6.1 概述	255
6.2 长钢轨轴向温度力	256
6.3 无缝线路轨道稳定性计算	262
6.4 路基上的无缝线路轨道设计	275
6.5 桥上无缝线路	283
6.6 道岔区无缝线路设计	302
6.7 特殊地段无缝线路设计	306
复习思考题	307
第 7 章 线路维护与管理	308
7.1 我国线路维护管理体制	308
7.2 线路修理周期	309
7.3 线路设备大修	310
7.4 线路维修	313
7.5 轨道几何形位的检测与管理	314
7.6 大型养路机械	323
复习思考题	333
第 8 章 轨道交通噪声与振动及其控制	334
8.1 控制轨道交通噪声与振动的意义	334
8.2 噪声与振动的基本知识	334
8.3 噪声的危害与评价	340
8.4 振动的危害与评价	347
8.5 轨道交通噪声的特点	350
8.6 轨道交通噪声的控制	352
复习思考题	354

第9章 轨道结构可靠性设计	355
9.1 概述	355
9.2 结构可靠度基本概念	359
9.3 结构可靠指标的计算方法	366
9.4 结构可靠性设计方法	377
9.5 结构可靠性设计的荷载	380
9.6 无缝线路稳定性可靠性设计	383
复习思考题	387
附录A 无缝线路主要设计参数	389
附录B 不等波长无缝线路稳定性计算	394
附录C 谐波激励下轮轨系统的动力响应	398
附录D 单轮对蛇行运动	413
附录E 有砟轨道道床状态参数及检测方法	415
附录F 无砟轨道可靠性设计参数估计	421
附录G 国外铁路机构名简称	425
附录H 常用轨道工程汉英科技名词	426
主要参考文献	436

第1章 绪 论

1.1 现代铁路发展概况

现代交通运输有铁路、公路、水路、航空及管道等五种主要方式。19 世纪铁路和蒸汽机的出现,极大地推动了社会发展的进程。在第二次世界大战后,铁路运输受到高速公路和航空运输的严重挑战,其运输主导地位曾一度明显下降。进入 20 世纪 70 年代,由于能源危机、环境污染、交通安全等问题的困扰,人们重新审视了人类生存与发展的途径,世界普遍接受可持续发展的战略思想,将社会发展的概念从简单的经济增长拓展到经济、社会、资源环境协调发展的新高度。联合国 2000 年召开的“可持续发展世界首脑会议”,以及 2015 年近 200 个缔约方达成《联合国气候变化框架公约》的巴黎气候大会,充分体现了国际社会和各国政府对可持续发展的强烈关注。由于近代铁路运输具有速度快、运能大、能耗低、污染轻、占地少和安全性好等一系列突出优势(三种运输方式的比较见表 1-1),人们重新认识了铁路运输的价值。

高速铁路、高速公路、航空三种运输方式比较表

表 1-1

项目	高速铁路	高速公路	航空	附 注
最高速度 (km/h)	350	120	900	在 1000km 旅程范围内的单位行程耗时铁路优于航空
单向运输能力比数	10	2	1	
能耗比数	1	6	3	美国华盛顿艾兰公司统计每人·km 所耗费的单位能源
CO ₂ 排放量比数	1	3	4.6	
用于治理污染的外部成本比数*	1	4	5.2	
占地面积 (亩/km)	35 (双线铁路)	105 (4 车道)		其中占用大量可耕地
安全性 (10 亿人·km 死亡人数)	1.971 (既有铁路) 0 (高速铁路)	18.929	16.006	日本统计
运输成本比数	1/5	1/2	1	

* 外部成本是某项经济活动的生产或者消费者施予他人或社会的损失。

面对世界交通运输格局的变化,世界各国铁路系统进行了调整,确立了新的发展模式,形成了以日本铁路为代表的高速客运型模式,以美国、加拿大铁路为代表的重载货运型模式和以欧洲、俄罗斯、中国铁路为代表的客货运输并重的模式。铁路为在竞争中求发展,不断进行技术创新,积极采用现代先进技术装备,引入现代信息技术,改进经营管理方式,面貌焕然一新。1964年,世界上第一条高速铁路——日本东海道新干线问世,列车最高速度达到210km/h。法国TGV高速铁路系统,于2007年在巴黎—斯特拉斯堡东线铁路上,创造了轮轨运输系统最高运行速度574.8km/h的世界纪录。当今高速铁路运输系统正向世界范围推进,已有中国、西班牙、日本、德国、法国、瑞典、英国、意大利、土耳其、韩国、比利时、荷兰、瑞士等16个国家和地区拥有高速铁路运输系统。截至2016年底,中国高铁里程已超过2万km,为世界高铁总里程数的60%以上。世界在建的高铁总里程数约为8800km,其中包括中国6600km,土耳其510km,德国498km,日本369km,法国326km,西班牙308km,意大利146km,荷兰68km。更多的高铁建造里程数正在积极筹划之中。

我国高铁线路遍及全国东西南北和沿海地区,图1-1是中国CRH380高铁列车。通过大规模的兴建高速铁路,不仅明显地改善了交通运输状况,加速了城镇化进程,全面积累了高铁建设与运营管理经验,而且有力地推动了我国工业化技术转型升级进程。



图1-1 中国CRH380高铁列车

世界铁路运输业在提高列车速度和发展高速铁路的同时,自20世纪60年代至今,重载铁路运输也获得长足的发展,成为铁路现代化的又一发展方向。铁路重载运输的主要特点,是充分利用铁路设施的综合能力,扩大列车编组长度,大

幅提高列车牵引总重(5000t以上),从而增强运输能力,提高运输效率,并降低运输成本。重载运输适宜于煤炭、矿石等大宗货物的长距离集中运输,诸如美国、加拿大、澳大利亚、南非、巴西、俄罗斯和中国等幅员辽阔的国家,其技术适应性尤为显著。为提高运输能力和盈利水平,有关各国进行了一系列的重载技术试验,并发展重载铁路。1967年10月,美国诺克福西方铁路公司(N&W,现已归入诺克福南方铁路公司)在韦尔什—朴次茅斯间250km线路上,开行了列车全长6500m、总重44066t的重载列车。该列车由500辆煤车编组而成,并由6台内燃机车分别位于列车头部和中部进行牵引。1996年5月28日,澳大利亚在纽曼山—海德兰港铁路线上,试验开行了列车全长5892m、总重72191t(铁矿石净重为57309t)的重载列车。该列车由10台Dash-8内燃机车牵引540辆货车(列车编组形式为:3台机车+135辆货车+2台机车+135辆货车+2台机车+135辆货车+2台机车+135辆货车+1台机车),试验列车平均速度为57.8km/h,最高速度达75km/h,创造了重载列车的世界纪录。由于美国铁路充分发挥了重载运输的优势,使之成为盈利的运输产业,其货运市场的份额保持在40%的水平,并显现上升趋势。此外,还有加拿大、澳大利亚、巴西和南非等国的重载铁路都取得了良好的经济效益,并在交通运输业中占有重要地位。20世纪90年代初,我国建成第一条重载铁路大同—秦皇岛运煤专线,年运量达4.4亿t,是世界最繁忙的重载铁路。至今开行10000t和20000t重载列车。2014年4月2日,在大秦线进行了3万t级重载列车试验。试验列车总重达31500t,总长3971m,由4台机车牵引315节货车组成,试验运行里程达738.4km。图1-2是运行在我国大秦线的3万t重载试验列车。2014年,我国又建成了设计轴重30t的重载铁路,西起山西吕梁市,东至山东日照港,横贯晋、豫、鲁三省,全



图1-2 大秦线3万吨重载试验列车

长 1269km, 称为山西中南部铁路通道。

由于城市轨道交通能充分利用地下空间, 节约城市用地, 环保效益良好, 并具有较高的准时性、速达性、舒适性和安全性, 一直处于世界发达国家主要城市公共交通系统的主导地位。表 1-2 列举了世界主要大城市轨道交通所占公共交通比重。截至 2014 年底, 全世界城市轨道交通线路总里程已达 13000km。

世界主要大城市轨道交通所占公共交通比重

表 1-2

城市	莫斯科	巴黎	伦敦	东京	纽约
轨道交通所占公共交通比重 (%)	56	71	57	86 (市中心地区)	70

我国城市轨道交通已进入快速发展时期。截至 2014 年, 我国城市轨道交通运营里程已达 3155km, 主要城市如北京、上海等地的地铁旅客运输量名列全球前两位 (统计量见表 1-3)。图 1-3 是北京地铁列车。在这里顺便说明, 本书对于“城市轨道交通”与“地铁”的称呼不再加以区分。



图 1-3 北京地铁列车

世界主要城市地铁全年客流量概况

表 1-3

国家/地区	系统	全年人次 (百万)	年份
中国	北京地铁	3250	2015
中国	上海地铁	3068	2015
韩国	首尔地铁	2559	2012
日本	东京地铁	2496.6	2014
俄罗斯	莫斯科地铁	2451	2014
中国	广州地铁 (包括佛山地铁)	2280	2014
中国	香港铁路	1904.6	2014
美国	纽约地铁	1766.8	2014

另外,处于研发阶段的磁悬浮铁路,不属于轮轨技术系统,其功能指标及可靠性尚待深入验证,已超出本书范围,故此从略。

1.2 我国铁路运输模式

我国铁路运输系统有高速铁路、重载铁路和客货共线铁路三种运输模式。

凡设计和运营速度 250km/h 及以上,且初期运营速度不小于 200km/h 的新建客运专线归属于高速铁路。高速铁路列车追踪间隔时间最小按 3min 设计,轴重不大于 17t,编组不大于 16 辆。

重载铁路:凡满足下列三个条件之中的两项,即归属于重载铁路。

- (1) 列车牵引重量 8 000t 及以上;
- (2) 轴重 27t 及以上;
- (3) 在线路长度 150km 及以上的区段内,年运量大于 4 000 万 t。

新建重载铁路设计速度不大于 100km/h,轴重不小于 30t,列车牵引重量万吨级及以上。

客货共线铁路是旅客列车与货物列车共线运营,设计速度 200km/h 及以下的铁路。新建客货共线铁路旅客列车最高运行速度 200km/h,快运货物列车最高运行速度 160km/h,普通货物列车最高运行速度 120km/h。双线铁路旅客列车追踪间隔时间最小按 6min 设计。旅客列车编组不大于 20 辆。160km/h 客车轴重不大于 16.5t,120km/h 客车轴重不大于 18t。普通客运机车轴重不大于 23t,货运机车轴重推广 25t。货车轴重研究推广 25t,研究发展 27t。

1.3 轨道的组成

轨道是铁路的主要技术装备之一。轨道引导列车运行,直接承受来自列车的荷载,并将其分布传至路基或桥隧结构物。轨道结构应具有足够的强度、稳定性和耐久性,并具有设计所规定的几何形位,保证列车安全、平稳、不间断地运行。

传统的轨道即有砟轨道,一般由钢轨、轨枕、连接零件、道床、防爬设备和道岔等组成,如图 1-4 所示。组成轨道的零部件采用不同力学性能的材料,有利于取得轨道结构的最佳技术经济性能。

钢轨直接和车轮接触,引导列车按规定的方向运行。钢轨将车轮荷载分布后传于轨枕。轨枕一般间隔布置,垂直于钢轨铺设,来自钢轨的压力经其分布后传于道床。

连接零件有两类:连接两根钢轨端部的零件称为接头连接零件;连接钢轨和轨枕的零件称为中间连接零件(亦称扣件)。接头连接零件使钢轨成为连续的轨

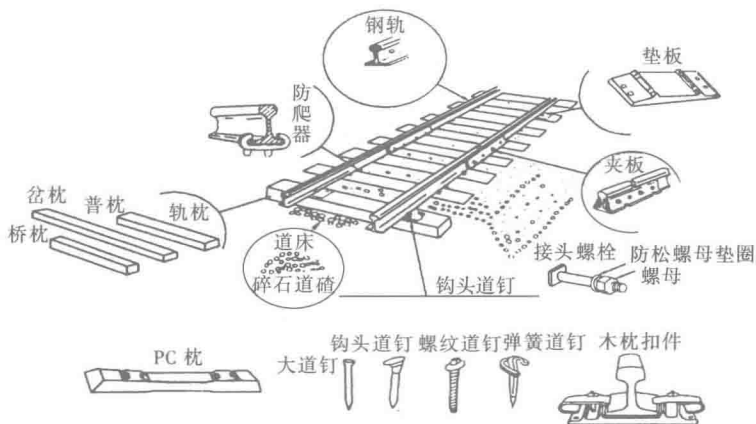


图 1-4 有砟轨道的组成

条，以便车轮能顺利滚动通过钢轨接头，并保持前后两根钢轨协调工作。扣件将钢轨和轨枕连为一体构成轨道框架，使两股钢轨保持正确的相对位置；扣件提供足够的扣压力，防止钢轨倾覆，阻止钢轨的纵向移动。

防爬设备将钢轨上的纵向力经由轨枕传递于道床，能有效地防止钢轨发生纵向位移，制止钢轨爬行。

道床将来自轨枕的压力进一步分布后传至路基或桥隧结构物。道床能产生阻止轨枕纵向或横向移动的阻力。道床具有减振降噪功能，并便于排水和调整轨道的几何形位。

道岔可实现轨道的分支和交叉，使列车从一股轨道转入或越过另一股轨道，如图 1-5 所示。



图 1-5 铁路道岔

随着高速重载运输的发展，轨道结构形式也随之发生变化，出现了诸如焊接长钢轨轨道（亦称无缝线路轨道）和无砟轨道等现代新型轨道结构形式。