

绪 论

一、轨道的作用和特点

1. 轨道的作用

轨道是铁路、地铁的主要技术装备之一，一些轻轨也采用了同样的轨道形式。轨道是行车的基础，它的作用是引导机车车辆平稳安全运行，直接承受由车轮传来的荷载，并把它传递给路基或桥隧等建筑物。

作为行车基础的轨道是提高道路承载能力需求的产物。早在 16 世纪，随着英国工业革命的兴起，大量的矿石需要从矿区运到最近的码头，矿车的载重量越来越大，道路因沉重的矿车将其压出沟槽而破坏。为了降低车轮对路面的压力，提高运载重量和速度，1605 年有了第一条用木条铺成的木轨道，木轨道既减小了对路面的压力，也减小了运行阻力，使得马拉的矿车载重量成倍提高，速度也有了较大提高。

随着冶炼技术的进步，铁价越来越便宜，铁条被用来加强曲线和容易破坏地段的轨道。大约在 18 世纪中期，出现了铸铁轨轨道。为了限制车辆因横向运动而脱离轨道，采用了在车辆的车轮上设置轮缘的方法，并被沿用至今。铸铁轨轨道进一步提高了轨道承载能力。1830 年英国建成第一条由蒸汽机车牵引的真正意义上的铁路后，铁路运输的速度和载重量对轨道的承载能力提出了更高的要求。19 世纪 40 年代，在铁轨下铺设了与之垂直的木轨枕，用来连接两根铁轨。木轨枕的应用较好地保持了铁轨之间的相对位置，减小了轨枕下地面的应力。减小地面应力的另一个有效措施是在地面上轨枕下铺设一层碎石组成的道床。同时，碎石道

床还提高了轨道的弹性和排水性能，使轨道便于维修。

铁路运输的效率和速度促使各发达资本主义国家竞相修建铁路，到 1860 年，世界各国已修建了 10 万千米铁路。同时，铁路运输的发展也推动了轨道结构的发展和完善，1865 年，钢轨代替了铁轨，建成的轨道具有了现代轨道结构的基本结构形式，我们把它叫做传统轨道或普通轨道。传统轨道的道床由散体材料碎石组成，又叫有砟轨道。以区别后来发展的无砟轨道。

有砟轨道具有铺设方便、造价低、易维修等优点，是世界铁路轨道的主要结构形式，法国高铁采用有砟轨道，其最高运营速度达到 330 km/h，试验速度达到 596 km/h。我国除普速铁路外，200 km/h 以上的提速铁路，部分 250 km/h 的客运专线也采用有砟轨道。

有砟轨道道床石砟在振动的冲击作用下容易磨损、粉化，道床容易变形。列车速度越高，碎石道床的变形越快，道床的几何形位不易保持，轨道的维修工作量大。针对有砟轨道的缺点，本着少维修的思想，无砟轨道用钢筋混凝土结构取代了碎石道床。无砟轨道虽然建设成本高，但具有高稳定性、高平顺性的优点，在高速铁路上得到大量应用。我国京津城际、武广和郑西客运专线、京沪高速铁路等都采用无砟轨道，运营速度高达 350 km/h。在长大隧道及城市地铁中，因为维修不方便，一般均选用无砟轨道。但无砟轨道一旦出现伤损，则维修较为困难。

2. 轨道的结构特点

轨道结构自上而下由钢轨、轨枕、碎石道床或钢筋混凝土整体道床等力学性能不同的材料组成，钢轨之间用接头联结零件联结或焊接，钢轨和轨枕用扣件联结，在站场还有用于列

车转换轨道的道岔。因此，轨道的结构特点是组合性和散体性。此外，轨道结构属于细长的工程结构物，跨越各种地理环境，受环境影响大。

从静力学角度看，轨道结构的传力机理非常合理。轨道结构最上层是强度最高的钢轨，用以承受车轮施加的巨大压力，轮载传递到轨枕时，由于相邻轨枕的分担作用，传到轨枕的压力约减小 $1/2$ 。轨枕与道床之间的接触面积数倍于钢轨与轨枕的接触面积，散体材料堆积而成的碎石道床或钢筋混凝土组成整体道床应力又减小数倍，经过道床的扩散，最后传递到路基、桥隧结构物上的应力更小。

为了保证机车车辆安全平稳地运行，轨道必须给有轮缘的车轮提供连续平顺滚动的表面，为此，要求轨道具有一定的几何形位（如轨距、水平、轨向等）。轨道几何形位的误差叫轨道不平顺。轨道结构的特点决定了轨道几何形位很难准确控制，轨道不平顺是客观存在的。

轨道不平顺可分为静不平顺和动不平顺：静不平顺是指钢轨的轮轨接触面不平顺，如钢轨轨面不平顺、不连续（接头、道岔）和几何形位误差；动不平顺是指轨下基础弹性不均匀，如扣件失效、轨下支承失效、路基不均匀以及桥台与路基、路基与隧道等过渡段的弹性不均匀。

3. 轨道荷载的特点

轨道荷载具有重复性和随机性的特点。荷载的重复性表现在两个方面：一是指不同的列车通过时荷载的反复作用；二是指每列车通过时每个车轮荷载的反复作用。

相对轨道某一断面而言，车轮由远处而来、接近、离开，将车辆自重传递给钢轨及轨下基础，使线路发生沉陷、变形，形成一条以车轮和钢轨接触点为中心的位移变形曲线，

钢轨及轨下基础承受由小到大再变小的荷载作用，并激起线路各部分振动。列车车轮依次通过该断面，轮群对线路该断面的荷载还具有周期性，轨道在列车轮群周期性荷载作用下作强迫振动。

列车在轨道上运行时，由于客观存在的轨道不平顺、车轮不圆顺、车辆的蛇行运动等原因，使轮轨系统产生冲击和振动。轮轨不平顺是轮轨系统的激振源，不平顺的波长、波深、出现位置都有很大的不确定性，因此振动及振动产生的荷载是随机的。

由于轨道荷载的重复性和随机性，轨道及各部件长期处于交变应力状态。交变应力产生于轮轨系统振动引起的动力循环和每通过一个车轮的一次应力循环。

4. 轨道的工作特点

轨道是边维修边工作的工程结构物，其工作特点是维修的经常性和周期性。

轨道结构是一种以“破坏”为前提的特殊结构物。所谓“破坏”是指轨道结构在列车荷载反复作用下，逐渐改变轨道的几何形位，形成轨道不平顺。轨道不平顺会影响行车平稳和旅客舒适，甚至会造成列车脱轨等事故。同时，轨道不平顺会加剧轮轨系统的振动并加速轨道状况恶化。当轨道变形超过了轨道几何尺寸容许限度值，或者难以通过维修保持轨道变形小于容许限度时，则认为轨道结构已不能满足应有的承载能力，为了恢复其功能必须进行大规模的维修。

轨道各部件的破坏主要表现为疲劳破坏，是交变应力作用下损伤逐渐积累的结果。导致轨道破坏的主要原因是轨道及其各部件长期受振动和交变应力的作用。在交变应力作用下部件的破坏叫疲劳破坏，其破坏形式与静荷载下发生的强度破坏截然不同。金属材料的疲劳破

坏过程可分为疲劳裂纹形成、扩展和脆断 3 个阶段，其疲劳寿命主要由应力循环中的平均应力、应力幅和循环次数 3 个因素控制。

此外，振动使道砟颗粒间的摩擦系数减小，加速道床下沉，所以振动加速度也是造成轨道破坏的原因之一。

二、运营条件与轨道的关系

作为行车基础的轨道，其任务是安全、平稳的运输旅客和货物，同时运营费用还要尽可能地经济。为了满足运输要求，轨道结构必须与运营条件相适应。运营条件用行车速度、轴重和运量三个参数来描述，它们从不同的侧面影响轨道结构。

1. 行车速度与轨道的关系

行车速度对轨道的影响主要表现在作用方面。行车速度越高，机车车辆和轨道的振动强度越大，作用于轨道的动荷载也越大，轨道的几何形位越难保持，轨道及其各部分交变应力幅度和振动都越大。所以，行车速度越高，轨道结构及部件破坏越快。

从理论上讲，当车轮圆顺的列车在平顺的轨道上行驶时，轨道承受的动轮载比静轮载增加很少，速度的影响不大。但由于客观存在的轨道不平顺和车轮不圆顺等因素，动力作用会随行车速度的增加而明显增加。在不平顺严重时，可比静轮载大 2 倍多。

轨道横向水平力也随行车速度提高而增大。横向力产生的主要原因是机车车辆的蛇行运动和机车车辆曲线通过的导向力。过大的横向力容易造成车轮脱轨、钢轨侧面磨耗，还会引起轨道框架横向位移，增加无缝线路失去稳定的可能性。

此外，提高行车速度会引起车辆振动速度和加速度提高，影响乘客旅行舒适度。试验证

明，人体可以适应较大的速度变化，但对加速度的变化却是敏感的。

因此，行车速度越高对轨道平顺性要求越高，高速铁路要求有高平顺性。要使轨道具有高平顺性，不但要严格控制轨道几何形位，还要强化轨道结构，控制动力作用下轨道的变形。

2. 轴重与轨道的关系

轴重是指一个轮对承受的机车或车辆的重量，轴重的一半称为静轮重。轴重反映了轨道承受的静荷载强度，决定了各部件交变应力的平均应力水平。轴重越大，轨道承受的荷载也要越大。各部件的交变应力水平随轴重增大而增大，所能承受的荷载循环次数大为减少，使用寿命缩短，轨道疲劳破坏速度加快。

研究表明，钢轨头部伤损几乎全是疲劳伤损，而且都是由超载所引起的。钢轨折损率随轴重的增加而增加。除钢轨外，其他轨道部件也同样出现这种情况。由于各种疲劳现象而导致钢轨折损以及轨道几何形位的破坏，都与轴重有关。重载货物列车，即使运行速度不高，其对轨道的破坏往往要比一般高速列车大。如果轴重与行车速度同时增加，钢轨疲劳折损率的增长规律，将更趋复杂。

3. 运量与轨道的关系

运量常用机车车辆的通过总量表示，是反映轴重、速度、行车密度的一项综合指标。行车速度和轴重决定了轨道结构荷载强度以及各部件交变应力的应力幅和平均应力，行车密度决定了荷载和应力作用的频度。钢轨的磨耗和折损、轨道永久变形的积累、混凝土轨枕的破坏以及联结零件的伤损都与累计通过总重有直接的关系。运量越大、行车密度越大、列车荷载作用越频繁、单位时间内应力循环次数越多，则整个轨道的永久变形积累及其部件的疲劳

损伤越快，轨道的维修周期越短。同时，运量越大，可用以维修的作业时间越少。

运营条件的轴重、行车速度和运量三个参数基本上能与平均应力、应力幅和应力循环次数这三个因素对应起来：轴重与平均应力对应；行车速度与应力幅对应；运量与单位时间内应力循环次数对应。铁路运输的发展方向是高速、重载、高密度。为了满足运输要求，轨道只能从提高轨道结构整体强度和轨道平顺性两方面入手，以降低疲劳应力幅度，增加轨道疲劳寿命，减小轨道维修工作，保证行车平稳和安全。

三、铁路轨道的类型

轨道是由不同力学性能部件组成的工程结构，为适应运营条件的需要，就产生了一个合理配套问题，应力不同的轨道类型应与之相适应。轨道类型应考虑以下因素：

轨道各个部件要有足够的强度和稳定性。钢轨是轨道结构中最重要部件，先确定钢轨类型，然后从技术经济观点出发，确定与之配套的轨枕类型与铺设数量，以及道床的材料与断面尺寸，使之组成一个等强度的整体结构，充分发挥各部件的作用。

轨道类型与铁路等级有关，这实际上就是与运营条件相适应的问题：属于同一等级的铁路，近期运量与远期发展也有很大差别，所以应采用由轻到重，逐步加强的原则。

轨道类型的选择还应考虑经济性。轨道类型标准愈高，一次投资和大修费用愈大，但维修和养护费用较少，使用寿命较长，也就是说，分摊至每单位的运营费用愈低。因此，各种类型轨道的适应范围是以它的使用期限内大修投资成本和维修养护费用合计最小作为依据加以确定的。

我国铁路正线轨道类型分为特重型、重型、次重型、中型和轻型五种。《铁路轨道设计规

范》推荐的正线轨道类型见表 0.1。选型应按照由轻到重、逐步加强的原则，根据近期调查的运量及客车最高行车速度等运营条件按表 1 中的规定采用。

新建和改建铁路（或区段）的轨道设计，应根据设计线路在铁网中的作用、性质、速度和客货运量确定轨道类型。轨道结构宜采用无缝线路轨道，I 级铁路应一次铺设无缝线路。

新建速度 200 km/h 及以上线路正线轨道类型标准如表 0.2 所示。

表 0.1 正线轨道类型

项 目			单位	特重型	重型		次重型	中型	轻型			
运营条件	年通过总量		Mt	>50	25 ~ 50		15 ~ 25	8 ~ 15	< 8			
	路段旅客列车设计行车速度		km/h	160 ~ 120	160 ~ 120	≤120		≤120	≤100	≤80		
轨道结构	钢轨		kg/m	75	60	60		50	50	50		
	轨枕	混凝土枕	型号	—	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ		
			铺枕根数	根/km	1 667	1 667	1 667	1 760	1 667 或 1 760	1 600 或 1 680	1 520 或 1 640	
	碎石道床厚度	土质路基	双层	表层道砟	cm	30	30	30		25	20	20
				底层道砟	cm	20	20	20		20	20	15
		土质路基	单层	道砟	cm	35	35	35		30	30	25
				硬质岩石路基	单层	道砟	cm	30	30	—		—
	无砟轨道	板式轨道		混凝土底座厚度	cm	≥15						
轨枕埋入式												
弹性支承块式		≥17										

- 注：① 年通过总量包括净载、机车和车辆的质量，单线按往复总质量计算，双线按每一条线的通过总质量计算；
- ② 年通过总量大于 50 Mt 的线路，根据实际运营条件，经技术经济比选可采用 60 kg/m 的钢轨；
- ③ 货物列车设计行车速度为 120 km/h 时，应采用特重型或重型轨道，且重型轨道应采用Ⅲ型混凝土枕；
- ④ 设计行车速度小于 160 km/h 的改建铁路轨道，可采用Ⅱ型混凝土枕；
- ⑤ 明桥面铺设木枕时，每千米铺设根数按《铁路桥涵设计基本规范》(TB 1002.1) 进行设计；
- ⑥ 弹性支承块式混凝土底座厚度系指支承块下混凝土厚度；
- ⑦ 特殊情况下采用木枕时，铺设根数可根据设计确定。

表 0.2 新建速度 200 km/h 及以上线路正线轨道类型

轨道部件	项目	300 ~ 350 km/h 客运专线	200 ~ 250 km/h 客运专线		200 km/h 客货专线
		$v=300 \sim 350$	$v=200$	$200 < v \leq 250$	$v=200$
钢轨	类型	100 m 定尺 60 kg/m	1 001 m 定尺 60 kg/m	100 m 定尺 60 kg/m	60 kg/m
轨枕	型号	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
	配置根数	1 667 根/km	1 667 根/km	1 667 根/km	1 667 根/km
扣件	胶垫静刚度	55 ~ 75 kN/mm	55 ~ 75 kN/mm	55 ~ 75 kN/mm	55 ~ 80 kN/mm
道砟	标准	特级道砟	一级道砟	特级道砟	一级道砟
	厚度	35 cm	30 (35) cm	30 (35) cm	30 (35) cm
	密度	$\geq 1.75 \text{ g/cm}^3$	$\geq 1.70 \text{ g/cm}^3$	$\geq 1.75 \text{ g/cm}^3$	$\geq 1.70 \text{ g/cm}^3$
	支承刚度	$\geq 120 \text{ kN/mm}$	$\geq 110 \text{ kN/mm}$	$\geq 120 \text{ kN/mm}$	$\geq 100 \text{ kN/mm}$
	纵向阻力	$\geq 14 \text{ kN/枕}$	$\geq 12 \text{ kN/枕}$	$\geq 12 \text{ kN/枕}$	$\geq 12 \text{ kN/枕}$
	横向阻力	$\geq 12 \text{ kN/枕}$	$\geq 10 \text{ kN/枕}$	$\geq 10 \text{ kN/枕}$	$\geq 10 \text{ kN/枕}$

注：道床厚度中，括号外为土质路基上，括号内为岩石路堑、桥上或隧道内。

四、轨道结构的发展

轨道随铁路运输的发展而发展。自第一条铁路建成以后，世界铁路建设经历了初期发展、建设高潮和建路鼎盛时期。20 世纪 40 年代后，由于其他运输方式的激烈竞争，铁路发展一度进入艰难状态。随着重载运输和高速运输的发展，铁路才有了新的生命力，同时也促进轨道结构的不断发展，以满足重载高速运输的需要。

1. 提高轨道结构整体强度

(1) 钢轨重型化、强韧化。钢轨是轨道的重要部件，因直接承受车轮的巨大压力和冲击而发生弯曲变形、轨头磨耗、压溃、断裂等。因此，要求钢轨有足够的抗弯刚度、抗冲击韧性和耐磨性。此外，无缝线路的发展还对钢轨的可焊性提出了要求。应用强韧化的重型钢轨可以提高轨道结构承载能力，目前，我国正线铁路全部采用 60 kg/m 钢轨，在小半径和大坡道地段尽量采用全长淬火钢轨。

(2) 铺设混凝土轨枕。混凝土轨枕的自重大、刚度大。用混凝土轨枕铺成的轨道刚度均

匀、稳定性好、线路整齐美观，其主要缺点是弹性差，该问题是通过安装高弹性扣件来解决的。我国自 20 世纪 70 年代开始铺设混凝土轨枕，到目前已根据运营条件发展到第三代，除小部分小半径曲线还存在木枕外，绝大部分线路已换铺混凝土轨枕，用混凝土轨枕代替木枕已成为轨枕发展的主要方向。

(3) 采用无砟轨道结构。碎石道床容易引起轨道的残余变形，产生轨道不平顺，整治道床占养护维修工作量的绝大部分。用混凝土整体结构或混凝土基础层和乳化沥青砂浆层取代碎石道床的轨道叫无砟轨道。无砟轨道与有砟轨道相比，具有稳定性、平顺性、刚度均匀性好，维修工作量少，简洁易清洗等显著优点，逐渐被世界上许多国家所认识并采用。我国在隧道、桥梁上已成功铺设无砟轨道，并开始了在土路基上铺设的研究工作。

(4) 采用弹性扣件。混凝土轨枕的应用，特别是无砟轨道的应用对扣件提出了很高的要求，它除了有联结钢轨与轨枕的基本功能外，还要有调整轨距和超高的功能，在车辆动力作用下的减振功能。钢轨扣件已经从传统的普通道钉、螺纹道钉、扣板等刚性扣压件过渡到弹片和弹条等弹性扣件及方便安装的无螺栓扣件。

2. 铺设无缝线路

钢轨接头是轨道的薄弱环节之一。由于接头的存在，列车通过时轮轨冲击非常强烈，车速越高，冲击强度越大。在接头冲击力的作用下，轨道各部件的使用寿命缩短、线路状态恶化，接头区轨道养护维修工作量大。此外，接头冲击还影响行车的平稳和舒适。

从 20 世纪 30 年代开始至今，人们一直致力于将钢轨焊接成尽可能长的长轨条，消除钢轨接头，铺设无缝线路的研究与实践。研究成果解决了接头焊接，长轨条在列车动力和温度