

# 高速铁路轨道不平顺养护管理技术研究

宋博韬

中国铁路上海局集团有限公司宁波工务段 浙江 宁波 325006

**摘要:** 本文旨在分析和研究高速列车在运行过程中存在的突出问题。分析了轨道不平顺和车轮相互作用对高速列车的大小、波长大小和共振频率的影响,研究了轨道不平顺的类型,在正确测量了轨道不平顺种类的数据后,对轨道不平顺的状况进行科学评价。利用轨道质量指数等不平顺统计指标,利用轨道高度、方向、距离、水平、变形等动态检查收集的综合指标,以250米长的线段作为基本长度单位,进行轨道规律评估、判断和维护;然后用这个基本长度单位的标准偏差来测量和评估各种不平顺性,只要标准偏差超过允许的限度,状态将被确定为不良,严重不平顺段的统计特征就会更加突出,使需要维护的高速铁路轨道得以科学平衡。

**关键词:** 高速铁路; 养护管理; 轨道不平顺; 综合指标

## 1 引言

中国高速铁路技术发展迅速。截至2020年底,中国高铁里程超过3.8万公里,居世界第一。轨道作为高速铁路和客运专线的核心技术之一,其平整度高、稳定性好、低频维护<sup>[1]</sup>,已成为引领和支撑高铁列车的重要基础设施。自轨道传入中国以来,中国铁路从业人员不断学习轨道的特点,不断对其进行更新换代。目前,设计速度超过350公里/小时的高铁线路全部采用平板轨道,中国铁路工程师正在追求自主创新。此外,随着市民对更高速度的需求不断增加,环境恶劣的地方也需要高速铁路建设,轨道的挑战是巨大的,需要考虑许多问题。例如,传统的设计理论能否指导目前的轨道结构设计?如何保证高速铁路的正常使用?新的轨道养护技术能否实现安全稳定运行,延长高速铁路的使用寿命?这些问题是阻碍轨道发展的难点。

轨道不平顺影响列车运行的舒适性和安全性,加剧了车辆与轨道之间的动态作用,缩短了列车与轨道的维修周期和使用寿命<sup>[2]</sup>。高速铁路特别注重轨道的高度平顺性。本文对高速铁路轨道不平顺进行了分析研究,分析了高铁轨道不平顺与车辆轮对相互作用的影响幅度、影响波长和共振频率,突出了严重不平顺路段的统计特征,科学地权衡了需要维护路段,实现了线路的精细化修复,提高了运行效率,提高生产线光洁度,延长生产线使用寿命,具有重要的现实意义。

## 2 高速铁路轨道不平顺主要原因

轨道不平顺是引起振动和增加轮轨相互作用的主要原因<sup>[3]</sup>。它对道路交通的平衡性、舒适性和安全性有重要影响,是直接限制车速度的主要因素之一。在高速条件下,轮轨相互作用的影响更大,对轨道装置的破坏更

大。它有以下特点:

### 2.1 振幅影响

随着交通速度的增加,轨道不平顺幅度对交通平衡和安全的影响将迅速增大。在高速行驶条件下,微小的轨道不平顺会对轮轨振动产生强烈的冲击,产生较大的轮-轨相互作用力。例如:无缝线路钢轨轨道中焊缝振幅小于0.5mm的小台阶造成的不平顺性,会导致数倍于车轮静载荷重量的巨大轮轨冲击。因此,在高速4T轨道上出现的幅度较小、一般认为在低速时无需纠正、维护和管理轨道不平顺现象,必须严格控制。

### 2.2 波长范围

随着机车速度的增加,影响轨道不平顺程度的波长范围也相应扩大。在运行速度较低的情况下,路基高程偏差、不均匀沉降和桥梁偏转对波长的影响较小,需要进行维护、监测和管理。但在高速工况下,长波不平顺对机车的振动影响已不容忽视。当运行速度接近140 KM/H时,引起机车振动的敏感波长可达40米。当行车速度超过160 KM/H时,能产生强烈机车振动的敏感波长可达50米。因此,必须修正和维护的波长范围也要大大增加,特别是要加大力度,在20~50米范围内修复路堤下沉造成的小型路堤问题<sup>[4]</sup>。

### 2.3 控制共振

当车速不高时,波长为44米和50米的轨道方向不平顺影响最小,无需处理。但当车速达到140 KM/H和160 KM/H时,频率均为1 HZ,机车与车体的自频也为1 HZ,机车频率与车体频率相同或接近,车体必然发生强烈共振<sup>[5]</sup>。因此,在高速条件下,必须严格控制具有共振波长特性的定向轨道不平顺。在高速运行条件下,一旦引发脱轨事故,造成的危害将比低速运行时严重得多。例

如：德国高铁脱轨事故和中国沈阳北车脱轨事故都是非常有害的。

### 3 高速铁路轨道不平顺类型区分

#### 3.1 轨道高低不平顺

轨道不平顺是指轨道沿线垂直高度不均匀，它是由以下因素引起的：线路施工和大修作业后的高度偏差；桥梁挠度；轨道床、路基残余挠曲变形；不均匀沉降；轨道各组成部分之间的不等间隙；暗坑的存在；空吊和空吊不一致造成钢轨垂直维护不当弹性挖掘和起泡。轨道水平度是指同一横截面上两条轨道的高程差。轨道平面变形是指左右两根轨道相对于轨道平面的表面扭曲。它是用距离一定距离的两个横截面水平幅值的代数差来测量的。

#### 3.2 轨道方向不平顺

轨道方向不平顺是指沿轨道内上缘纵向不平顺，由以下因素引起：施工和大修作业中轨道中心线位置偏差；不均匀磨损的钢轨头部侧面横向残余变形；扣件失效、未校正的钢轨死曲线、横向钢轨弹性力不一致、无缝线路温度等。轨距偏差是指在16MM高度的两轨相互作用下，两轨之间的最短距离与标准轨距之间的偏差，通常由扣件不良、轨枕肩失效、侧轨头磨损、扣件间隙、扣件紧固压力不足、列车动态弹性挤压等原因引起。它是用一定长度内轨距偏差的代数差来测量的。

#### 3.3 轨道的复杂不平顺

在轨道上同一位置，垂直不平顺性和水平不平顺性并存，称为轨道复杂不平顺性，其振幅属于二类或介于二类和三类之间，未达到三级，不存在交通安全问题，但在持续性方面存在潜在危机；连续的多波复杂不平顺易导致剧烈振动，且易受脱轨系数增大，严重影响交通不稳定甚至脱轨。周期性的连续不平顺会通过共振造成更大的危害。准直、水平和反向复杂不平顺具有负超高的特征，这种不平顺可能是导致脱轨的主要原因。同时，曲线在与螺旋相切的点上、平缓点面积的增加、反向下坡开始、末端不一致或不匹配的复杂几何不平顺性等因素对交通的平衡性、舒适性和安全性都有显著影响。

### 4 高速铁路轨道不平顺维修标准

要使轨道具有长期抵抗结构使用性能退化的能力，需要强有力的维护和技术支持。中国在维修方面的理论分析和技术研究已逐步完善，包括维修标准、维修方法，如注浆、植筋锚固、提升板等，以及基于试验和模拟的损伤维修效果评估。然而，对维修策略的研究还缺乏系统的研究和明确的结论。例如，现有维修标准在极端天气条件下的应用有待验证，维修操作缺乏系统的理

论指导，维修效果的长期评估不足。

#### 4.1 轨道的维护标准

轨道系统损伤养护标准的合理性与轨道的长期使用性能和轨道养护的经济效益密切相关。科学制定轨道系统损伤养护标准是保证列车运行稳定安全，延长结构使用寿命，有序开展养护工作的基础。我国对高铁轨道板混凝土裂缝修补、砂浆层损伤修补、混凝土系桩周围树脂损伤修补等一系列损伤修补规范作了详细规定，对我国高铁轨道的损伤修补具有重要的指导作用。自2008年第一条高铁开通以来，虽然已经过去了10多年，但轨道的损坏尚未完全暴露出来。在制定一些损伤维护规则时，现场轨道损伤统计样本数量不足，损伤管理指标值不够明确，无法为现场施工提供指导。因此，有必要结合大量的现场损伤调查、理论计算分析和现场试验，深化对不同类型轨道损伤养护标准的研究，完善我国高速铁路的养护技术体系。

#### 4.2 轨道养护管理标准

近年来，有学者通过损伤调查、试验分析和数值模拟等方法，对轨道养护管理标准进行了大量分析，如层间脱粘/空洞、宽窄缝开裂、轨道不平顺、路基不均匀沉降和冻胀、路肩损伤等。根据轨道结构疲劳寿命、行车安全、轨道系统在列车荷载作用下的静动力响应等因素，提出了板状轨道层间脱粘/空洞损伤三级养护标准，以及中国铁路轨道系统轨道宽缝开裂养护标准建议值。基于轨道检测车的车轨动力学仿真分析和实测数据，提出了高铁长波轨道垂直不规则、轨道板周期性不规则和连续多波不规则的管理标准。分析中国与其他高铁发展国家高铁轨道不平顺管理标准的差异，提出了将不同波长范围内的轨道不平顺管理标准转换为类似测量弦长管理值的方法。此外，考虑多个波长叠加后轨道不平顺对动力学指标响应的影响，采用包含多个波长分量的随机不平顺作为输入激励，利用高速铁路轨道不平顺谱估计不平顺极限值。基于路基不均匀沉降条件下乘客舒适度、板式轨道承载力、列车脱轨能量增量评价标准，提出了板式轨道路基不均匀沉降极限值和轨道分层损伤分级维护标准。

### 5 高速铁路轨道不平顺养护管理技术

#### 5.1 轨道设计管理理论

在中国的“十五”计划指导下，原铁道部启动了20多个铁路项目。通过总结和分析以往国内轨道的研究成果，包括设计方案、理论和方法，制定了中国铁路轨道系统I（CRTS I）和中国铁路轨道系统II（CRTS II）装配式板式轨道以及CRTS I和CRTS II双块板式轨道的设计和

建设标准,为我国高速铁路板式轨道的大规模建设奠定了坚实的基础。由于中国在高速铁路轨道的研制上走的是引进、消化、吸收、再创新的路线,初期没有掌握核心专利和关键技术,阻碍了中国高速铁路“走出去”战略的实施。为了突破技术壁垒,原铁道部于2009年开始自主创新之旅,意在打造成熟可靠、拥有自主知识产权的品牌形象。近年来,随着研究人员对轨道结构及其主要材料性能的深入了解,如何使轨道设计适应新时代的高标准,成为研究的热点。

### 5.2 轨道复杂不平顺管理分析

目前大多数情况下,仅根据大小来评估轨道不平顺的局部状态,确定需要、临时维修的地点是不够的。根据不平顺波形特性的影响,我们不仅要注意超限幅值,还要考虑幅值能近似反映对应波长的影响的平均变化率。对于三次或三次以上连续的周期性不平顺,如果在共振波长范围内,即使振幅不超过局部不平顺值评估的限度,仍然需要更多的维护和管理。

当火车经过弯道时,会产生离心力。为平衡产生的离心力,轨道在轨道外曲线处设置超高标高。同样,当列车在直线上运行遇到不平顺物时,也会产生离心力,但由于没有超高,列车会产生不平衡离心力和相应的加速度。实际上,当列车通过不平顺的线段时,车辆会向不平顺的方向向外倾斜。使该侧弹簧受到压缩,从而增加了不平衡离心加速度,轨道检测车在动态试验中测得的水平加速度也包含该值。轨道不正常(即临时维修)的安全管理,对于不符合第三类的轨道违规行为,应及时分析及时处理,以识别和判断严重违规行为。对于对齐和水平反向复杂不平顺情况,在没有维修复杂值的情况下,应先查阅相关技术规定,再提出具体要求。

### 5.3 轨道不平顺养护的引进与改造

中国从2000年开始开展轨道技术的探索与研究。在秦皇岛沈阳线、赣州龙岩线、重庆怀化线、重庆遂宁线多段铺设双块板式轨道、埋板式轨道和预制板式轨道,积累了初步经验,引进了日本、德国等行业领先国家的先进技术。中国的铁路从业者达成了共识,即追求一种能承受静、动荷载的系统,一种使不同接口兼容的

结构,以及与环境和谐的长寿命。他们坚持自主创新,采用国产零部件和材料,重点关注列车荷载、温度效应和基础变形。综合考虑裂缝演化、刚度控制和动力特性,板式轨道结构具有合理的静、动受力机制,具有良好的使用性能和经济效益。在板式轨道设计理论方面,有学者对客运专线的主要结构或构件进行了系统的分析和力学计算,明确了不同结构的功能,提出了一系列的计算模型。根据层状结构的特点,建立了适用于弹性基础的多层组合梁模型,适用于简单基础的板式轨道结构设计。该模型对轨道的强度和配筋进行了计算和验证,但对紧固件、支撑块等关键传力部件的设计涉及较少。梁-板模型修正了弹性地基上组合梁的误差,梁-实体模型采用实体单元模拟板轨道和基础。梁-实体模型虽然计算成本高、工作量大,但利用有限元法对轨道结构进行了精细的空间分析,从而提高了设计精度,减少了后期运行阶段的安全隐患。学者们综合考虑施工现场的多种因素,系统地计算分析了客运专线板式轨道的主要结构参数,提出了合理的取值范围,并初步研究了环境对板式轨道主要构件的影响。

## 6 结论

高速铁路轨道不平顺的维护管理在铁路的日常维护和维修中有着非常重要的作用,必须在日常工作中不断研究和探讨,才能找到最佳的解决方案,进行科学的管理。对高铁轨道不平顺性的预测,可以帮助铁路部门人员更好地掌握轨道设备状态。

### 参考文献

- [1]张高扬.高速铁路轨道BIM设计系统研发[J].铁道勘察,2022,48(03):118-122.
- [2]宋国亮.高速铁路无砟轨道道岔区结构偏移整治技术[J].铁道建筑,2022,62(05):32-35.
- [3]金花.武广高速铁路轨道刚度的分布特征和评价方法研究[J].铁道建筑,2022,62(04):4-7.
- [4]李法胜.城市轨道交通与高速铁路互联模式的思考[J].铁道建筑技术,2022(04):194-198.
- [5]张萼辉.高速铁路轨道板图像智能比对技术[J].中国铁路,2022(04):102-106.