

铁路轨道几何尺寸超限对行车安全的影响分析

程利明

国家能源集团新朔铁路大准铁路分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010010

【摘要】：铁路轨道几何尺寸在规定限值内保持稳定，是维持列车—轨道系统平顺性的关键。当轨向、高低、水平、轨距等几何参数出现超限时，轮轨受力关系随之失衡，列车振动幅度上升，运行姿态偏离设计状态。由此产生的冲击作用将加速结构疲劳，削弱轨道支撑能力，并显著提升脱轨与设备损伤的风险。基于轨道几何变化对动力响应的影响，可揭示超限状态与行车安全下降之间的内在关联，为进一步控制轨道状态提供理论基础。

【关键词】：轨道几何尺寸；超限状态；行车安全；动力响应；脱轨风险

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.042

引言

铁路运输对轨道几何状态的依赖极为敏感，微小偏差亦可能在高速荷载下被放大为显著扰动。随着轴重增大与速度提升，轨道各项几何参数的稳定性愈加关键。超限状态不仅会改变轮轨间的受力分配，还会触发连续的动力耦合效应，使运行振动由局部扩大至系统层面。读者在面对轨向偏移、高低变化或轨距异常时，往往能直观感受到安全裕度正在缩小，因此对轨道几何超限影响的深入解析显得尤为必要。通过揭示几何变化与运行风险之间的对应关系，可使轨道状态背后的物理机制更加清晰，为理解行车安全的敏感环节奠定坚实基础。

1 轨道几何超限现象的关键表现

轨道几何尺寸在长期载荷环境下不断受到轮轨压力、温度变化与基础沉降的共同影响，超限现象便在此背景中逐渐显露。轨向偏移使钢轨在平面内出现不规则曲折，导致列车运行方向偏离设计中线；高低变化使钢轨在纵向上形成起伏，使轮对在通过时产生附加跳动；水平变化则改变两股钢轨的横向高度差，引发列车在曲线及直线区间出现不稳定横摆；轨距异常出现时，两股钢轨间距超出限值，使轮缘约束力削弱，轮对导向性能明显下降^[1]。这些偏离均来自结构刚度差异、扣件松弛、道床下陷或钢轨磨耗等复杂因素，呈现出空间分布广、诱因多样、演化持续的特点，给轨道几何状态带来显著波动。

在高载荷与高速运行的工况下，几何偏差更容易被放大。钢轨多处存在轻微失稳时，列车动力响应会在短距离内迅速累积，使超限部位由弱化状态演变为突出的不规则源。轨向偏移常与高低变化相互叠加，使轮轨接触点轨迹变得紊乱，导致接触应力短时急剧提升；水平变化在曲线区段更为敏感，易使外轨高度不足或过大，引发离心力变化加剧；轨距扩大或收窄时，轮缘与钢轨之间的配合关系被破坏，稳定导向能力下降，使车辆姿态对不规则敏感度提高。多项几何指标同时出现偏移时，轨道系统呈现出复合性超限状态，使振动、冲击与轮轨噪声声明显增强，甚至形成周期性激振源，进一步削弱结构抗变形能力。

在现场检查与监测体系中，几何超限常以多维指标的形式

出现，其分布具有阶段性、区域性与演变性特征。新线投入运营后，道床结构尚未完全稳定，轨向与高低易在短期内形成小范围集中偏移；既有线受长期运营影响，道碴破碎与结构疲劳逐步累积，几何偏差呈持续扩散趋势，并沿线路形成一定的空间规律。季节温差较大地区的钢轨受热胀冷缩影响显著，水平变化和轨向偏移的波动性更强；大型货运线路因轴重高，轨距偏差往往更为突出。通过连续监测可观察到，任何单项几何偏差一旦向超限方向发展，往往会牵动其他指标协同变化，使轨道状态在较短时间内出现集中的异常段落，而这正是行车安全风险的孕生区域。

2 几何偏差引发的动力失衡机制

轨道几何偏差进入超限区间时，轮轨系统的受力格局便发生明显改变。轮对在通过轨向偏移区段时，接触点会沿钢轨侧向移动，使轮轨法向力在横向分布上出现不均，进而引发附加侧向冲击。高低变化引起的竖向不平顺使轮对周期性离散载荷增大，钢轨垂向位移随之增强，导致轨下结构承载路径被迫调整。水平变化影响两侧钢轨的支撑差异，轮对通过时产生不对称力矩，使车辆在横摆方向上的响应更加敏感^[2]。轨距超限使轮缘间的约束能力下降，轮缘—轨头间的接触状态变得不稳定，进而破坏原有的导向平衡。多种偏差共同作用时，会形成复杂的受力叠加，使轮轨间的力学交换由平稳状态向非线性激励模式转变。

动力系统进入非线性区间后，车辆振动模式会出现新的频率成分，部分频带与车辆固有频率、轨道结构固有频率产生耦合，进而形成放大效应。在竖向方向上，高低不平顺使轮对对钢轨施加的动载系数增加，导致钢轨、轨枕、道床产生更显著的弹塑性变形。横向方向上，轨向偏移与水平变化共同作用，使轮轨间的蠕滑力不断变化，横向力峰值大幅提升，车辆蛇行运动的临界速度被压低。若在曲线区段出现轨距扩大或收窄，轮缘切入角发生变化，横向导向力可能在短时内成倍增加。动力响应越过阈值后，轮轨接触斑面积收缩，接触应力集中化，导致材料疲劳加速，使本已偏离的几何状态继续恶化。

在持续运行的过程中，动力失衡会以链式效应的形式向更

深层结构传递。道床在不均匀动载荷作用下产生局部松散或沉陷,使钢轨位移不断扩大;扣件系统在周期性侧向力扰动下出现松弛,导致轨向偏移进一步加剧;轨枕受反复弯矩作用后可能发生细微裂纹,使其弹性支撑能力下降。车辆端也会受到影响,转向架构架在高频冲击下出现应力集中,引起轮对踏面磨耗不均,使轮径差增大,进一步破坏车辆运行的平稳性。动力失衡的连锁反应不断叠加,使轨道几何偏差向超限方向加速演变,形成轨道结构劣化与车辆动力异常相互增强的过程,推动行车风险持续累积。

3 超限状态下行车风险的放大过程

轨道几何尺寸进入超限区间后,车辆运行所承受的动力环境会明显恶化,风险在不稳定的受力循环中被逐步放大。轨向偏移引起的横向力波动使轮缘与轨头间的接触关系不断变化,导向作用出现延迟或过度响应,使车辆姿态在短距离内产生不可忽视的偏移。高低不平顺造成的竖向激励使轮轨间的法向力大幅波动,局部卸载与再加载频繁交替,动力峰值不断累积^[3]。水平变化触发车辆横摆与滚摆的耦合,使车体重心在动态过程中偏离稳定位置。轨距异常使轮缘爬轨可能性增加,轮对在偏心力作用下更容易滑移,导向稳定性显著削弱。多项几何偏差叠加时,动力失衡呈现链式放大效应,行车安全受到多维度威胁。

在复杂的力学环境中,轨道结构的局部薄弱环节会率先出现失稳迹象。道床在反复动载作用下形成松散区,使轨枕支撑刚度下降,钢轨在竖向的挠度进一步扩大。扣件系统在频繁侧向力干扰中逐渐松弛,使轨向偏移在运行中不断放大,钢轨线形走向出现更明显的非对称性。轨枕间的支撑差异加剧后,钢轨受力集中化倾向更加突出,内伤扩展的速度提高。轮轨接触面也会发生变化,接触斑面积因冲击作用而缩小,应力峰值升高,使轮缘与轨头表面出现不均磨耗甚至微裂纹。裂纹在高频动载作用下迅速延伸,进一步削弱轮轨系统的可靠性。当结构疲劳累积到一定程度,局部变形的速度加快,使几何偏差在短周期内从轻度异常发展为明显超限,风险呈加速释放趋势。

车辆动力响应的变化也会反向作用于轨道,使风险在车—轨闭环系统中不断重复放大。蛇行运动的临界速度因轨向偏移降低后,车辆在中高速区间已经能够触发横向振荡,使轨头侧向磨耗急剧上升;竖向不平顺增大后,轮轨冲击导致车体加速度提升,使车下部构件承受的疲劳载荷倍增;轮径差在频繁冲击下不断扩大,进一步破坏车辆的稳定性。在这种循环放大过程中,车辆扰动增强轨道变形,轨道变形又加剧车辆振动,形成典型的失稳正反馈机制。随着结构承载能力被持续削弱,轨距扩大、轨下沉陷、扣件破损等现象可能在短时间内集中出现,使行车风险在局部区段迅速提升。若超限状态与高速、重载、曲线半径过小等工况叠加,脱轨系数会显著上升,系统安全裕度被压缩至极限区间,风险在每一次轮轨接触中都呈现出更强

的不确定性。

4 轨道状态恢复的核心思路与路径

轨道几何尺寸偏离稳定区间后,状态恢复需围绕受力重构、结构修复与线形再控制展开,使轮轨系统重新回到均衡运行的力学轨道。轨向偏移与高低不平顺往往源于支撑系统的刚度变化,道床在长期动载下形成的松散区是导致线形波动的关键环节,因此在恢复过程中必须强化道床压实度与颗粒级配,使轨枕受力重新均匀分布。轨距异常涉及钢轨横向约束能力的变化,需针对扣件系统开展力学性能修复,使轨距限制力恢复到稳定范围^[4]。水平变化与曲线区段的外轨高不一致时,可通过调整轨枕底部承载差异、改善道床肩部结构,使钢轨获得稳定的横向支撑能力。几何恢复的核心在于重新建立各构件间的力学协同,使受力路径从混乱状态转向可预测状态,为后续线形优化奠定基础。

在持续运行的重载或高速线路中,几何状态的恢复并非单次干预即可保持稳定,需要结合结构特性开展周期性的动态调整。竖向不平顺可通过捣固设备提升轨下结构的密实度,使钢轨与轨枕间的弹性支撑更加均衡;轨向偏移较为严重的区段,需利用稳定车、道床整形设备重建线路整体的空间几何关系,使钢轨线形符合动力学要求。针对轨距扩大趋势明显的位置,可通过加强扣件预紧力、更新磨损严重的绝缘件、增加横向加固构件等方式,使轨距变化率控制在可接受范围内。监测系统的参与能够实时捕捉几何变化的细微趋势,使恢复工作从被动响应转向主动调控,轨道系统在动态环境中获得更高的适应性。

在结构恢复的基础上,还需要通过精细化管理手段减缓几何劣化速度,使轨道状态在长期运行中保持稳定。道床排水能力对几何保持具有决定性意义,通过改善边坡、利用反滤层材料、增加排水沟等方式,可有效减少雨季沉降导致的高低与水平变化;钢轨磨耗控制则依赖于定期打磨,通过改变接触几何形状降低轮轨接触应力,使轨向偏移与轨距异常的诱发因素减少;扣件系统的耐疲劳性能可通过相应材质升级或加强维护周期来提升,使轨下结构在复杂动载中保持稳定约束力。轨道状态恢复并不止于将几何指标压回限值以内,更关键的是使各构件在动力循环中形成稳定的力学链条,使轮轨在高速、重载、高频环境下维持持续的平顺与安全。

5 轨道几何稳定性与行车安全提升

轨道几何保持在稳定区间时,轮轨系统能够维持均衡的受力模式,使列车在高速运行中保持平顺状态。轨向线形符合设计中线时,轮缘导向力维持在合理范围,车辆姿态不会因横向扰动出现偏移;高低变化受到严格控制后,竖向动载呈现可控波动,轮轨接触点沿纵向的运动保持连续性;水平关系稳定时,车体横摆幅度显著减弱,重心在动态过程中的偏移被抑制;轨

距维持在精确范围内后,轮缘—轨头间的啮合作用更加稳定,导向性能得到保障^[5]。几何稳定性建立的过程中,各指标之间形成协同作用,使车辆动力响应在可预测区间内运行,为行车安全奠定坚实基础。

在持续运行的周期中,几何稳定性能够显著减缓结构老化速度,使关键部件承载状态保持均匀。钢轨在稳定的动态环境中,其接触面积变化规律更加平稳,应力峰值降低,有利于减少轨头疲劳裂纹的萌生;轨枕在稳定支撑体系中受力更加均匀,道床颗粒结构不易被破坏,使沉陷速率得到抑制;扣件系统在侧向力波动较小的情况下,预紧力衰减速度放缓,使轨向和轨距长期保持稳定。车辆端的磨损模式也会因几何条件良好而发生变化,轮对踏面磨蚀更加均匀,蛇行阈值不易下降,使车辆稳定性得到持续强化。稳定的几何状态不仅能够延长结构寿命,也能持续降低振动、噪声等不利因素。

在车—轨系统的动态闭环中,几何稳定性还能够提升线路整体的容错能力,使运行环境对外界扰动具备更强的抵抗能力。高速线路在遭遇突发荷载、温度梯度变化或列车编组差异

时,结构因具备稳定的线形与支撑刚度,能够快速吸收与分散扰动的能量,避免局部应力集中;重载线路在通过大轴重列车时,由于轨道结构几何一致性更高,动载荷沿线路的传递更加顺畅,不易出现局部薄弱区的快速劣化。随着稳定性提升,脱轨系数、轮轨力峰值、车体加速度等关键指标在运行过程中保持在安全范围,使行车风险得到显著削弱。几何稳定性在轨道系统中的价值不仅体现在维持现有平顺状态,更体现在持续提高行车安全水平,使车辆运行在更可控、更可靠的力学环境之中。

6 结语

轨道几何状态的变化贯穿列车运行的全周期,任何偏离稳定区间的趋势都会在动力传递与结构响应中累积为潜在风险。几何超限的形成、放大与恢复过程共同构成车—轨系统的核心演变链条,而几何稳定性则在这一体系中发挥关键支撑作用。将轨道保持在可控范围,使力学关系趋于协调,可使行车安全在复杂运行环境中获得持续保障,为线路长期可靠运行提供坚实基础。

参考文献:

- [1] 昌俊平.基于轨迹预测的立交枢纽行车安全研究[D].重庆交通大学,2025.
- [2] 崔庭琼,杨一步,张欣萍,等.轨道交通行车安全监测系统的模块化设计[J].中国信息化,2025,(11):99-100.
- [3] 江凡,亢寒晶,邓宝,等.强风作用下不同因素对行车安全的影响[J].广东公路交通,2025,51(05):56-63.
- [4] 徐幼成,唐强.轨道静态几何尺寸偏差自动化监测精度研究与应用[J].城市轨道交通研究,2025,28(08):57-64.
- [5] 徐家栋.高速铁路病害施工轨道几何尺寸监测与控制[J].铁道勘察,2023,49(03):62-68+115.