

# 城际动车组车辆运行平稳性分析及养护维修建议

李君临

中铁二院工程集团有限责任公司 四川 成都 610031

**摘要:**近年来,我国通过各型动车组列车的自主研发、批量制造、长期运营和系统维护,积累了深厚的技术基础和丰富的工程经验。动车组系统作为一个复杂的多体耦合动力学系统,在轮轨接触面持续承受剧烈动态相互作用的过程中,会面临诸如运行稳定性、曲线通过性能、振动传递特性等一系列动力学问题。这些动力学问题不仅直接关系到列车的运行安全性、乘坐平稳性与旅客舒适度,也对转向架、轮对、悬挂部件等关键系统的疲劳寿命、磨耗演变及全生命周期养护维修策略产生深远影响。由此可见,动力学问题是贯穿动车组设计、制造、运营乃至维修退役全生命周期的关键课题,对其进行系统深入的分析具有重要的理论价值和工程意义。本文基于多体系统动力学理论,采用数值仿真方法,构建某型城际动车组的精细化动力学模型,对其在不同运行工况下的动态响应进行模拟计算与综合分析。研究成果可为该车型的力学性能优化、状态评估、故障预测以及针对性维修方案的制定,提供科学的理论依据与可行的技术建议。

**关键词:**动力学;等效锥度;车辆平稳性;车辆稳定性

**引言:**城际动车组列车是为适应我国经济一体化进程高速发展对高效、便捷轨道交通的迫切需求而研发的新型客运装备,填补了我国在城际轨道交通客运车辆领域的空白。随着近年来城际铁路网络持续扩张和动车组开行密度不断提高,车辆在长期高负荷运营中逐渐暴露出一些维护检修方面的典型故障与新问题。部分初期轻微异常若未能被及时监测与处理,可能逐步演变为影响行车安全与运行秩序的严重故障。因此,开展针对城际动车组的系统性故障诊断与预测研究显得尤为必要。通过对潜在问题的早期识别与干预,既可有效预防运营过程中突发故障,避免重大经济损失并保障乘客生命财产安全,也能为动车组的设计制造提供反馈,推动关键部件工艺改进与结构优化,从而从源头上提升车辆的可靠性。

## 1 动车组车辆运行平稳性相关问题分析

我国经过近十年对各型动车组列车的研发、制造、运营和维护积累了非常丰富的经验,基本掌握了各型动车组在各个阶段需要解决的基本动力学问题,可归纳为以下四点:

### 1.1 动车组运行安全性问题

主要针对各型动车组在运行过程中可能出现的安全问题进行研究,采用脱轨系数、轮重减载率、轮对垂向和横向加速度等指标进行评价,需要采集轮轨垂向力、轮轨横向力以及轮对垂向和横向加速度等基本数据<sup>[1]</sup>。

### 1.2 动车组运行平稳性问题

主要针对提高各型动车组的运行品质和承租舒适度进行研究,采用运行平稳性Spurling指标进行评价。由于

车辆的高速运行,轮对的快速转动导致踏面和钢轨直接剧烈的摩擦,在轨道不平顺等外激励的作用下,车轮踏面会产生一些缺陷和病害,例如踏面剥离、擦伤、轮对偏心、车轮多边形等,如果对带有病害和缺陷的轮对置之不理,继续使用,则会加剧和恶化轮轨间的相互作用,使得轮对踏面和钢轨出现更多问题,从而影响运行平稳性,甚至安全性。工程运营当中通常采用镟修轮对的方式解决车轮踏面的缺陷和病害。动车组车辆是载客运输的交通工具,车辆的振动对整个动车组系统所造成的影响是多方面的<sup>[2]</sup>。(1)导致车辆运行品质下降,例如乘坐舒适度下降,运行稳定性下降,运行过程中带来更大的噪声等,这对于乘客的乘坐体验是十分不利的;(2)车辆的振动会加剧车体部件的局部振动、车体和转向架间连接部件的局部振动以及转向架部件的振动,在各种局部振动的作用下,可能会对车辆结构的疲劳强度带来极大的考验,轻则增加车辆部件更换频率进而增加车辆的维修成本,重则造成严重的安全事故;(3)车辆振动最终会由轮轨界面向下传递至轨道结构,对钢轨,扣件系统,轨枕,路基等造成损害,而轨道基础的损伤以及缺陷最终会反作用于车辆系统,加剧车辆的振动,加速车辆结构的疲劳老化<sup>[3]</sup>。

### 1.3 动车组轮轨接触相关问题

线路不平顺会加剧轮轨间的相互作用,导致车轮不圆,踏面磨耗,轮缘磨耗,加剧钢轨不平顺等,需要测量轮对踏面径向跳动掌握轮对的镟修周期等。车轮踏面是轮对与钢轨的接触点和相互作用点,在车辆系统中是

首先感受到线路垂向和横向的线路不平顺,也是使车辆前进的纵向蠕滑力的作用面,也是踏面制动车辆减速制动时制动力的作用面,可见车轮踏面是整个车辆系统外部激励和振动的输入源头。所以通过所获得的踏面数据和分析车轮踏面随运行里程的演化规律,进一步则可以分析得到车辆振动的演化规律<sup>[4]</sup>。

车轮踏面的磨耗主要包括三个方面:(1)正常的轮轨接触关系下,由于车辆载荷和轮轨间的摩擦系数产生的轮轨蠕滑力长时间长周期的作用于车轮踏面而导致的踏面磨耗,这也是最主要的一个方面;(2)当车辆通过水平曲线段时,在离心力和线路超高的共同作用下,轮对会产生一定的横向位移。在轮缘的作用下,车轮踏面单纯在水平面上的磨耗加入了轮缘和钢轨间的相互作用,轮缘与钢轨的相互作用更像是一种切削作用,会使车辆产生较大的横向振动,轮轨接触界面也会产生较大的噪声,极大的恶化了轮轨间的接触关系,给车辆和线路的维护和检修工作带来了极大的工作量;(3)非正常磨耗,主要是由于车轮踏面已经存在例如踏面擦伤、车轮扁疤、车轮不圆等伤损病害,或是钢轨已经存在例如波浪形磨耗、焊缝不平顺等伤损病害而导致对踏面的进一步磨耗<sup>[5]</sup>。

#### 1.4 动车组关键部件的相关性能研究

动车组作为一个复杂的系统工程,车辆的长期服役、高速运行和异常振动引起的关键部件特性变化以及疲劳破坏,会引起车辆的平稳性和安全运行问题。因此对这些关键部件的性能进行针对性的研究,需要该部件的相关测试数据。

动车组车辆平稳性和车辆稳定性受到多方面因素的影响,下文将重点探讨等效准度对车辆平稳性的影响。由于车轮的踏面具有一定的锥度,所以转向架存在蛇行运动,如果蛇行运动长期保持并且无法衰减,则有可能导致转向架和车辆横向失稳,最终导致运行安全性和舒适性的问题。我们通过Simpack软件建立城际动车组动力学仿真模型,模拟计算分析车轮踏面等效锥度的特性参数对车辆平稳性、车辆舒适度和构架横向加速度的影响。

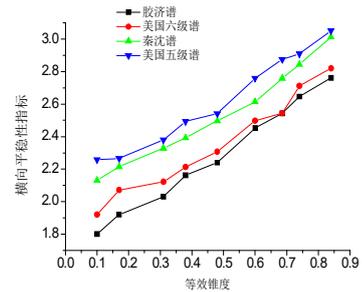
#### 2 等效锥度对动车组车辆运行平稳性影响

根据GB/T5599-1985和TB/T2360-93中的相关规范要求,我国机车车辆平稳性指标分为优(<2.5),良好(2.5~2.75)和合格(2.75~3.0)三个等级。

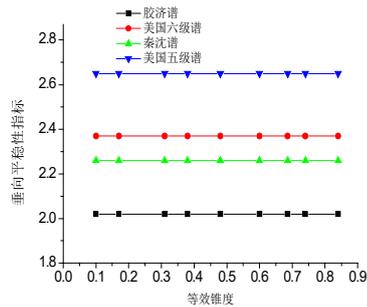
本文建立的城际动车组车辆动力学模型新车工况采用等效锥度0.1的LM型踏面与CHN60钢轨互相匹配而成的轮轨接触几何关系,仿真模拟在不同等效锥度下,通过不同线路不平顺激励下的车辆平稳性指标、车辆舒适度指标和车辆构架最大横向加速度的变化情况,计算速度

均为160km/h。

由下图1-1可知,随着等效锥度增大,车辆的横向平稳性指标显著增大,垂向平稳性指标无明显变化。即增大等效锥度会恶化车辆的横向平稳性,对车辆的垂向平稳性无影响;不同的线路不平顺对平稳性指标的影响较大,胶济谱和美国六级谱的横向平稳性指标较小,在等效锥度超过0.7以后横向平稳性指标超过2.5的优级标准,美国五级谱的平稳性指标最大,秦沈谱次之,在等效锥度超过0.6以后横向平稳性指标超过2.5的优级标准。



(a) 横向平稳性指标



(b) 垂向平稳性指标

图1-1 车辆平稳性指标

由图1-2可知,随着等效锥度增大,不同线路激励下的车辆舒适度指标均随之增大,在等效锥度超过0.6以后增幅明显;同样胶济谱和美国六级谱的舒适性指标较低,秦沈谱和美国五级谱的舒适性指标较大,但在所计算的锥度范围内各舒适性指标均小于2.0。

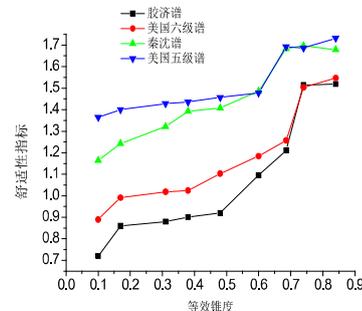


图1-2 车辆舒适度指标

综上所述,在不同的线路条件下,随着等效锥度的

增大,车辆平稳性指标和车辆舒适度指标均有不同幅度的增长,即车辆运行品质降低,线路谱对车辆的运行品质影响较大。

### 3 城际动车组车辆养护维修建议

根据上述试验和理论分析结果,对该城际动车组的维护检修策略提出以下建议:

#### 3.1 等效锥度监控与趋势管理建议

鉴于等效锥度在0.1-0.8范围内与车辆运行品质呈负相关——即随着等效锥度增大,车辆振动加剧、平稳性下降,建议将等效锥度作为轮对状态的关键监测指标,纳入日常检测与长期跟踪体系。

#### 3.2 镟修时机与阈值建议

综合考虑运行安全性、平稳性与经济性,推荐在等效锥度达到 0.5-0.6区间(对应运行里程约16-18万公里)时,对车轮踏面进行预防性镟修。该阈值区间既可避免过早镟修导致轮对寿命损失,又能有效抑制因等效锥度进一步升高而引起的动力学性能恶化。

#### 3.3 维修决策支持建议

建议在实际维修计划中,结合等效锥度检测数据与车辆实际运行状态(如车载振动监测信息),实施状态修与计划修相结合的维修模式。若等效锥度接近0.5且车辆出现异常振动或平稳性指标超限,可适当提前镟修;若车辆状态平稳,则可结合里程周期适度延后,实现维修决策的科学化与精细化。

### 结束语

综上,在铁路强国战略的引领下,我国铁路事业发展呈现出蓬勃生机,路网规模、技术装备和运输效率均位居世界前列。铁路运输已深度融入经济社会发展脉络和人民日常生活,成为支撑区域协同、保障民生出行、服务国家战略的重要载体。随着列车开行密度持续加大、运行速度不断提升以及服役环境日趋复杂,动车组在长期服役过程中面临着多维度的挑战——复杂的气象条件、差异化的线路状态、持续变化的轮轨关系、机电系统的自然老化以及偶发的极端工况等内外因素相互耦合,可能引发设备性能退化、部件异常磨损乃至系统性风险,对铁路运营的安全性、可靠性、经济性产生深远影响。

面对这些挑战,铁路运营单位、设计单位、装备制造企业及科研机构应共同构建覆盖全生命周期的动车组健康管理体系。这需要从以下维度系统推进:

第一,深化状态感知与智能诊断能力。通过布设多维传感器网络,融合图像检测、声学诊断、振动分析等技术,实现对关键部件状态的实时监测与早期预警,建立“数据采集-特征提取-故障辨识”的智能分析链条。

第二,构建差异化精准维修策略。突破传统固定周期维修模式,依据车辆实际运行状态、线路条件、服役年限等多源信息,动态优化镟修、更换、调试等维修作业的时机与范围,实现“该修才修,修必修好”。

第三,完善维修决策支持系统。整合车辆履历数据、运行数据、检测数据与维修记录,构建数字孪生模型,开展维修方案仿真推演与效果评估,为现场作业提供科学依据。

第四,健全协同管理机制。推动设计、制造、运营、维护各环节信息共享与技术反馈,形成闭环改进体系,从源头提升车辆可靠性和可维护性。

通过构建这样系统化、智能化、精准化的运维体系,不仅能有效控制安全风险、降低全生命周期成本,更将推动铁路运输向更高品质、更可持续的方向发展,使铁路这一绿色交通方式在综合交通运输体系中持续发挥骨干作用,为交通强国建设提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1]Polach O. Characteristic parameters of nonlinear wheel/rail contact geometry[J]. Vehicle System Dynamics,2010,48(S1):19-36.
- [2]Sawley K, Urban C, Walker R. The effect of hollow-worn wheels on vehicle stability in straight track[J]. Wear,2005,258(7-8):1100-1108.
- [3]王忆佳,曾京,罗仁,等.高速车辆车轮磨耗与轮轨接触几何关系的研究[J].振动与冲击,2014,33(7):45-50.
- [4]陈经纬,秦成伟,许红江.踏面等效锥度对车辆横向平稳性的影响[J].中国铁路,2013(S1):58-59.
- [5]马广宇,曾京,汪群生.基于城际动车组的踏面磨耗预测及参数优化[J].机械制造与自动化,2019,48(4):32-36.