**轮轨相互作用**

列车在轨道上运行时，机车车辆和轨道系统的振动使得车轮和钢轨的接触关系及作用力不断发生的动态变化。

**摘要**

拼音:lunɡuixiɑnɡhuzuoyonɡ

英文名称:interaction between wheel and rail

适用范围:列车运行

所属学科:交通运输工程 铁路运输

**目录**

1 原理

2 影响因素

2.1 轮轨接触几何关系

2.2 轮轨激扰

2.3 轮轨动态相互作用

2.4 蛇行运动

2.5 车辆曲线通过

**原理**

轮轨相互作用关系是车辆-轨道耦合动力学研究的核心，是车辆子系统和轨道子系统之间的连接纽带，两子系统之间的动态耦合与反馈作用均通过这一环节而实现。轮轨相互作用主要研究轮轨界面的接触几何关系、激扰源、相互作用力以及轮轨作用引发的轮轨运动行为。列车的驱动、制动、正常运行都要依靠轮轨相互作用，因此，轮轨相互作用直接影响列车运行安全和舒适性，以及车辆部件和线路结构的使用寿命和维护成本。

**影响因素**

轮轨相互作用受轮轨接触几何关系、轮轨激扰、轮轨动态相互作用、蛇形运动、列车曲线通过等影响。随着列车运行速度的提高和机车车辆载重的增大，轮轨相互作用对车辆-轨道耦合系统性能的影响也越发显著。

**轮轨接触几何关系**

轮轨接触几何关系是指轮轨接触斑（点）的数目、位置以及轮轨空间接触几何参数，是确定轮轨接触状态和相互作用力的基础。轮轨接触状态可通过接触几何参数来描述，主要包括轮轨接触角（图1中轮轨接触斑切线与轮轴中心线的夹角）、车轮滚动圆半径及左右轮径差、接触点处车轮踏面圆弧曲率及钢轨轨顶截面圆弧曲率、轮对侧滚角、轮对垂向和横向位移等。假定轮对没有摇头运动（左右轮之间没有纵向位移差）时轮轨之间的接触几何关系如图1。轮对在实际运行过程中必然存在摇头角位移，此时轮轨接触关系不再只是车轮主轮廓线与钢轨轮廓线之间的关系，而是三维空间内曲面与曲面之间的约束关系问题。

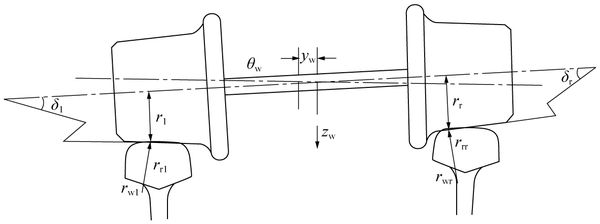


图1 轮轨接触平面几何关系示意图

轮轨接触平面几何关系示意图

轮轨接触几何关系与车轮和钢轨的外形直接相关，车轮踏面和钢轨顶面通常被设计成由多段圆弧和直线组成。轮轨型面匹配设计的一般原则有：为了获得更好的车辆横向运动稳定性和曲线通过能力，需对轮轨几何接触函数中的轮径差和等效锥度进行合理设计；为了获得更低的轮轨接触应力和磨耗均匀性，需对轮轨接触的范围和光带（常用接触区）宽度进行控制，还要对轮轨材质特性进行匹配设计。车辆轨道耦合动力学理论提出的轮轨空间动态耦合关系算法，考虑了车轮和轮轨踏面弹性变形的影响，可以模拟轮轨之间的多点接触行为。常见的轮轨接触状态可分为3种：左右轮轨均接触的正常状态如图2a，属最常见的情形；左侧轮轨相互脱离如图2b，右侧接触，这也是一种时有发生的轮轨接触状态，有车辆倾覆的危险；左右轮轨均相互脱离的悬浮状态如图2c，是特定条件下可能出现的瞬时状态，有较大的脱轨危险。

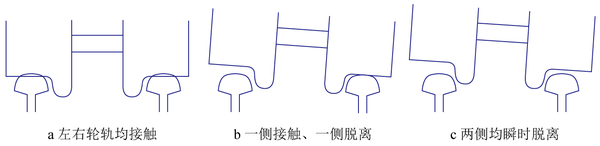


图2 常见轮轨接触状态示意图

常见轮轨接触状态示意图

**轮轨激扰**

轮轨激扰是引起机车车辆与轨道系统振动的根源，因而激扰源的形态特征直接影响轮轨相互作用。轮轨激扰可分为确定性激扰和非确定性激扰2类。非确定性激扰主要是轨道几何随机不平顺。实际线路的几何状态受众多因素的影响往往表现出明显的随机性，这些影响因素包括：钢轨初始弯曲，钢轨磨耗、伤损，轨枕间距不均、质量不一，道床的级配和强度不均、松动、脏污和板结，路基不均匀下沉，轨道支承刚度变化等等，它们综合作用构成了轨道不平顺的随机特征。轮轨确定性激扰由车辆和轨道的某些特定因素造成。车辆方面主要是车轮擦伤、车轮踏面周向和横向几何不平顺以及车轮偏心等。轨道方面的因素较为复杂，既有轨道几何状态方面的因素，如钢轨低接头、错牙接头、焊接接头、轨道局部与周期性几何不平顺、轨面波浪形磨耗等，又有轨下基础缺陷方面的因素，如轨枕空吊、道床板结、路基刚度突变等。根据激扰因素的作用性质，轮轨系统激扰源可分为脉冲型激扰、谐波型激扰、动力型激扰和随机型激扰4类。常见的脉冲型激扰包括车轮擦伤、钢轨低接头等。车轮踏面周向几何不平顺、钢轨焊接接头、轨面波浪形磨耗等属于谐波型激扰，而轨枕空吊、道床板结、路基刚度突变等则属于动力型激扰。

**轮轨动态相互作用**

轮轨相互作用力的大小将直接影响列车的运行安全与稳定以及车辆、轨道部件的使用寿命。轮对沿着轨道高速运动过程中，要将几吨至几十吨的载荷通过轮轨接触点传到轨道上，轮轨接触点处由此产生变形而形成拇指甲大小的接触斑（约120平方毫米）。轮对高速滚动过程中还伴随滑动和自旋运动，由此在轮轨接触斑上除了正压力外，还产生轮轨之间的切向分力和力偶分量，如图3中所示的直线箭头和弧线箭头。轮轨界面之间的滑动大小取决于轮轨的工作状态，如轮对自由滚动、驱动、制动状态和轮轨接触几何状态。当轮轨界面完全进入全滑动状态或滑动饱和状态，轮轨切向力主要由库伦摩擦定律确定。

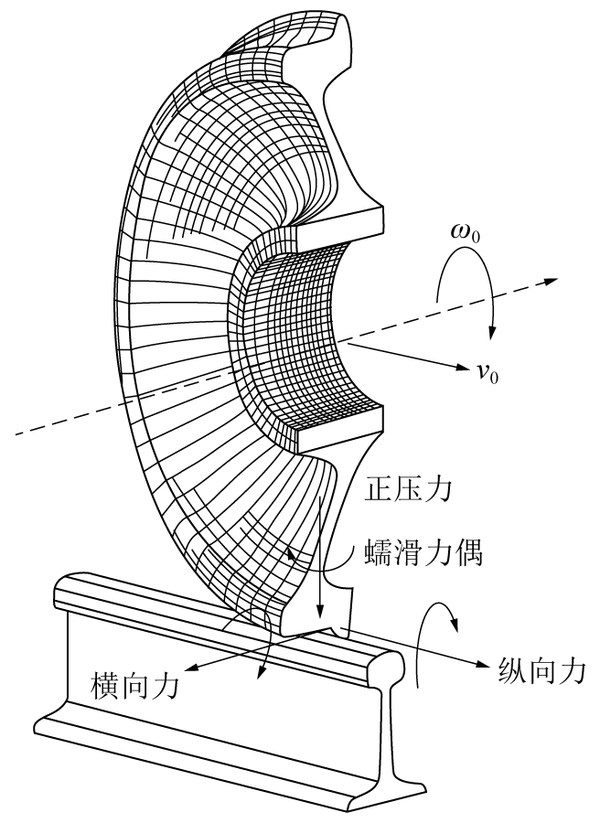


图3 轮轨动态相互作用示意图

轮轨动态相互作用示意图

轮轨间的动态相互作用力是引起机车车辆与轨道系统振动、冲击、疲劳、损伤的直接根源，也是导致轮轨系统状态破坏与功能丧失的主要原因。因此，最大限度地减轻轮轨间的动力作用，是确保铁路轮轨运输系统长期处于良好状态并高效运转的关键所在。降低轮轨动力作用的主要技术措施有：最大限度地降低机车车辆的一系簧下质量，优选机车车辆一系悬挂垂向阻尼，采用磨耗型车轮踏面外形，合理选取机车车辆一系悬挂横向刚度，提高轨道体系质量，降低轨下基础垂向刚度，合理选取扣件横向刚度等。

**蛇行运动**

车辆在平直轨道上运行时，轮对横摆和摇头自由度耦合的运动称为蛇行运动。轮对蛇行运动引起车体的横向运动称为一次蛇行，引起转向架的横向运动称为二次蛇行。轮对蛇行运动是一种自激振动，随着运行速度的提高，机车车辆的蛇行运动逐渐趋向剧烈，以致横向振动丧失稳定，这时的运行速度称为蛇行失稳临界速度。确定机车车辆的临界速度、分析影响临界速度的因素和寻求提高临界速度的措施，是蛇行稳定性的研究内容。车辆蛇行稳定性分析可分为线性稳定性和非线性稳定性2类。线性稳定性分析能够反映车辆系统最基本的横向稳定特征。对于在直线轨道上运行的车辆来说，线性临界速度是表征车辆在理想平直轨道上保持直线运动能力的一种固有参量，其大小反映了车辆系统沿直线稳定运动能力的强弱。实际上轮轨铁路系统是一个强非线性系统，因而轮对蛇行稳定性分析需要考虑车辆-轨道耦合系统的非线性因素。非线性蛇行稳定性分析理论需要考虑轮轨接触几何非线性、轮轨蠕滑非线性、车辆悬挂参数非线性以及轨道部件参数非线性等。车辆系统的非线性临界速度还与轨道激扰大小有关，对应于实际线路条件的蛇行失稳临界速度称之为实际临界速度。通常而言，车辆的实际蛇行失稳临界速度要低于线性临界速度，而高于非线性临界速度。

**车辆曲线通过**

车辆通过曲线轨道时，曲线线形变化将导致轮轨动态相互作用。一方面，车辆与曲线轨道的横向相互作用加剧；另一方面，曲线轨道线形及结构参数对列车运行安全性、平稳性和乘坐舒适度的影响显著。理想情况下，机车车辆依靠内外钢轨上轮轨蠕滑力的差异实现轮对导向，轮缘不与钢轨接触。实际工程中，机车车辆和曲线线路参数匹配不合理、服役状态恶化、列车操控不当等均会降低车辆的曲线通过性能，从而导致机车车辆需要靠轮缘导向。轮缘导向在车辆通过曲线时会产生很大的轮轨横向力，使轮缘和钢轨侧面严重磨耗，线路展宽，极端情况下轮缘可能爬越钢轨而造成脱轨事故。因此，机车车辆的曲线通过性能关系到列车的运行安全性。21世纪以来，随着铁路高速化、重载化发展，车辆和轨道耦合作用加剧，基于车辆-轨道耦合动力学理论进行曲线通过性能分析，可以更准确地认识曲线段轮轨系统的动态相互作用规律，在曲线线路参数与车辆参数匹配设计分析中得到应用。

理论分析和工程实践表明，改善机车车辆曲线通过性能的主要措施包括：减小一系和二系悬挂回转刚度，减小一系横向刚度，减小轴距，增大踏面锥度等。但是，这些措施会降低机车车辆的蛇行运动稳定性，即机车车辆的蛇行稳定性和曲线通过性能是互相矛盾的。这就要求机车车辆转向架的设计应在保证蛇行稳定性的前提下，尽量改善曲线通过性能。一般而言，在曲线半径较小的线路上，为减少轮缘和钢轨的磨耗，应采用减小轮缘力、减小轮缘和钢轨侧面摩擦系数、降低轮缘和钢轨侧面摩擦速度的技术措施。为了减小或消除轮缘力，需要改进转向架结构设计，尽可能扩大蠕滑导向的工作范围。为了降低轮缘和钢轨侧面的摩擦系数，可以对钢轨侧面或轮缘进行润滑。轮缘和钢轨侧面的摩擦速度受车轮对钢轨冲角的影响，冲角越大，轮缘磨耗愈烈。采用磨耗型踏面不仅能在较长时间内保持踏面的基本形状，而且能使轮轨磨耗降低。

（作者：翟婉明 ）