

# 高速铁路中的一些力学问题

贺启庸

(铁道部科学研究院,北京 100081)

## 1 前言

自 1964 年日本建成东海道高速铁路新干线以来,由于其运量大、速度快、能耗低、污染小、运价廉、占地少和安全可靠舒适等一系列技术经济优势,引起了世界范围的重视,各国竞相修建。高速铁路技术发展日新月异,形成世界范围内振兴铁路的新局面。法国 TGV 列车试验瞬间速度已创造了 515.3 km/h 的世界纪录,充分显示了铁路提速的潜力。

为了保证高速列车运行的安全性,旅客的舒适性,装备的可靠性与耐久性,要进行列车与轨(或桥)耦合系统动力学的研究,提高列车抗蛇行失稳的临界速度的研究,轮轨粘着特性的研究,弓网系统动力学的研究,列车气动性能的研究,车体结构的轻量及优化研究和高速铁路的噪音及振动的传播研究。其中需要应用结构动力学、多体系统动力学、线性和非线性振动理论、弹塑性理论、非线性随机振动理论、有限元方法、复合材料力学、模态分析、参数辨识技术,空气动力学、声学和控制动力学(主动悬挂)等许多力学理论作为工具来进行研究。下面就高速铁路所涉及的一些主要力学问题作一简单介绍。

## 2 列车与轨(或桥)耦合系统动力学

当列车运行速度大幅度提高后,各种动力作用会急剧上升,对线路和车辆的破坏性必然也急剧增加,影响到列车运行的安全性、经济性和旅客的舒适度。例如德国在开行高速列车后发现:车轮踏面和钢轨踏面均产生 30—100 mm 的短波波浪磨耗,也就是说车轮外圆磨成了多边形,钢轨表面磨成了波浪形。因此必须探明高速列车与轨桥间的动力学行为规律,动力响应特性,从而进行优化车辆和轨桥结构参数,确定线路(或桥)的不平顺限度,以改善系统的动力学性能,降低车辆、轨道、桥梁的振动,减小轮轨间的动作用力。

传统的车辆动力学和轨道动力学是把车、轨分开来研究,研究内容着重于 10—30 Hz 以下的低频振动问题,对上述现象往往无法进行解释。由于高速铁路的发展,世界各国铁路动力学工作者逐渐把研究方向扩展到 5000 Hz 高频振动范围。动力学的模型也变成多刚体与多柔体的多体系统耦合动力学模型,这样就能反映出各种高频成份。

研究列车轨桥动力学,传统上是采用确定性的方法,但是线路不平顺是随机的,整条线路上每一处轨道自身的参数也不可能完全一致,也是随机的,因而对这种振动,采用随机振动的方法进行研究分析才更能反映实际情况,对随机振动理论提出了新课题。

列车轨桥系统中很多物理参数都是非线性的,要仿真计算,必须实测这些参数,但如道碴的阻尼和弹性等又是无法直接测量的,只有应用实验模态分析中的参数辨识技术进行测量。

## 3 高速下轮轨粘着特性

轮轨间粘着性能始终是制约铁道牵引动力和车辆动力学发展的重大问题,它影响着牵引功率的发挥、轮轨表面的磨耗和列车的制动性能。在低速下机车的粘着系数在 0.2—0.4 之间变化。在实际运行条件下,发现高速列车的轮轨粘着急剧下降,以 200 km/h 速度为例,法国

TGV 的可利用粘着系数最小值为 0.09, 试验粘着系数为 0.047。高速下粘着系数下降而运行阻力成倍上升构成了高速运输的特殊矛盾, 对这一现象产生的原因世界各国都还没有弄清楚。目前正在进行的工作是在 Kalker 理论上考虑了轮轨表面的不平顺和粗糙度的影响, 进而又考虑了非稳态的线性接触。我国有的学者认为, 除了上述原因外, 在 Kalker 理论中摩擦系数  $\mu$  是作为一个常数来处理, 实际上  $\mu$  是随滚动速度变化而变化的变量, 这就需要应用摩擦学理论来研究。因此粘着下降还要考虑高速条件下材料弹性滞后效应和在接触班上产生的高温效应可能出现的闪融现象。由此可见, 对这一问题还有大量的探索性工作要做。

#### 4 列车空气动力学

随着速度的提高, 空气动力对列车的作用越来越显著, 已成为影响高速列车能耗、噪声水平、安全性和舒适度的一个重要因素。从绝对速度而言, 高速列车比飞机低很多, 但是由于高速列车在地面运行, 其地面效应影响很大, 因此问题也更加复杂。涉及到的主要问题包括:

(1) 列车的空气阻力。对高速列车来说, 空气阻力已成为运行阻力的主要因素。研究表明: 车速 160 km/h 时空气阻力占列车总阻力的 50% 以上, 200 km/h 时约占 70—75%, 300 km/h 时占 80—90%, 因此高速列车气动外形设计和减阻措施是研制高速列车的一个重要课题。

(2) 列车交会时的负压效应和隧道里的活塞效应及会车问题。列车交错通过相邻轨道时, 将受到反向行驶的列车头部和尾部产生的压力冲击作用。这种交会时产生的负压有可能使车辆上的车窗飞出; 在曲线轨道上车辆受到一个附加侧压力, 严重时会引起脱轨。高速列车通过隧道时, 由于压力波的作用隧道中的空气压力处于瞬变状态, 使空气呈复杂的非稳态流动。在较长隧道中列车的空气阻力比在开阔空间中大一倍以上, 所引起的牵引能量也非常大, 对长隧道, 还需解决如何排出这一能量消耗所放出的热量和废气的问题。高速列车的头部和尾部进入隧道时, 要产生压力波, 压力波以音速传播, 在隧道中反射回来, 引起隧道中空气压力的剧烈变化。这将引起比明线上错车更严重的压力冲击, 影响乘客的舒适和行车的安全。同时, 一部分压力波能量以脉冲形式的微气压波向隧道口外发射, 引起噪声。

目前, 高速列车空气动力学正逐渐形成一个独特的技术分支, 主要研究高速列车非定常绕流速度场、压力场分布规律及其与列车外形和周围环境的关系。

#### 5 弓网系统动力学

弓网系统动力学是要解决高速受流问题。日本 1964 年开通第一条高速铁路时, 曾耽心速度达到 270 km/h 以后, 接触网和受电弓会产生严重离线现象, 而不得不将最高速度限定为 210 km/h。

受流质量取决于电弓和接触网这两个振动系统之间的跟随性, 受电弓一般简化为多刚体系统, 接触网为悬索结构系统, 这也是一个多刚体与多柔体耦合的动力学问题。此外还要考虑高速气流产生的气动振动问题。

#### 6 控制动力学

控制动力学是将现代的计算机和电子技术应用于机械动力学系统, 控制其动力学行为以达到所要求的动力学性能。例如: 目前火车轮对上的车轮是固结在车轴上, 并采用锥形踏面来保持轮对趋向沿线路中心运行, 这种结构的轮对在曲线上引起轮轨磨损; 在直线上当列车速度增高, 车辆会产生蛇行失稳。随着高速列车的发展, 人们提出了车轮可绕车轴自由转动的轮对结构。它的优点是不会有蛇行失稳现象; 在曲线上内外轮会自动产生速差, 避免了轮轨的磨损。

但是这种结构却丧失了自动向线路中心复位的能力,轮对会始终靠一侧钢轨运行,造成磨损和增加运行阻力。为此在车轴上两轮之间设置了一个耦合器,用一个控制系统来控制耦合力的的大小,使轮对在直线上既有高的蛇行失稳速度,又有向线路中心复位的能力;在曲线上两轮间可自动产生差动旋转速度,实现良好的曲线通过性能。目前德、意、法、日等国家都在大力开展这一方面的研究工作,人们称之为 21 世纪的轮对,为下一世纪有轨车辆时速达到 400—500 km/h 而作准备,此外适用在小半径曲线线路上开行高速列车的车体可自动倾斜的摆式车辆、磁浮车辆均为可控动力学应用实例。

### 7 高速列车的噪音及振动的传播

国外在发展高速铁路的过程中都曾遇到噪音和振动对环境的影响问题。日本新干线的振动及噪音干扰曾受到公众的强烈反对,因而在其投入运行后不得不采取一系列措施进行补救。法国 TGV 由于噪音超标而不得不在一些局部线路区段限速运行。当今世界各国在高速铁路的进一步发展中都将防治噪音污染作为重要课题进行研究。对高速铁路所产生的噪音和振动的治理方法上,主要是研究降低噪音源本身的声级;其次是研究防治噪音传播的有效措施。

高速列车运行噪音声源主要来自轮轨间的滚动及冲击、空气动力和机械三个方面。轮轨间的滚动和冲击噪音主要是由于在轮轨滚动时轮轨间的不平顺使车轮、钢轨、道床或桥梁等产生高频振动所引起,因此本质上也是结构振动问题。这种噪声通过车辆本身向车内,通过钢轨向地基,通过空气向四周传播。因此要研究轮轨噪声产生的机理,噪声传播的特性,建立物理和数学模型进行噪音的计算和预测,并在车辆与轨道结构设计时一并给予考虑。空气噪音主要由受电弓、转向架、车厢连接及门窗外部在高速气流下所产生,因此在研究列车气动外型时要加以考虑;机械噪音以制动装置所产生的最大,因此对制动装置的频响特性要进行研究。

还要研究控制噪音的传播这种被动的方式来减少噪音对铁路沿线环境和车厢内部环境的影响。在这方面要开展各种防噪结构物和吸音材料的研究。目前正在发展的噪音主动控制技术,在高速列车噪音控制中将会有广阔的应用前景。

## SOME MECHANICAL PROBLEMS IN HIGH SPEED RAILWAYS

He Qiyong

(China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

# 风工程力学和大跨度桥梁的空气动力学问题

项海帆

(土木工程防灾国家实验室,同济大学,上海 200092)

## 1 引言

现代桥梁向长、轻、柔方向发展,使抗风研究日益成为设计者最关心的问题。对大跨度桥