

1 高速列车动力学概论

自铁路诞生后,铁道车辆系统动力学经历了从问题发现、理论发展到广泛应用的过程^[1]。车辆系统动力学是高速列车最重要的基础之一,在我国高速列车发展过程中发挥了重要作用,为高速列车悬挂参数优化、安全舒适运行、减振降噪设计提供了理论基础和研究平台。同时,高速列车系统动力学自身也得到了发展,尤其是理论与工程的结合,贯穿了每种动车组的发展轨迹。高速列车系统动力学是车辆系统动力学与高速列车相结合的产物,与车辆系统动力学具有共性,只是应用对象不同并带来一些特殊问题,本书并没有严格区分二者。

1.1 高速列车的发展

铁路运输是以机车或动车提供的动力牵引列车在轨道上运行,运输旅客或货物的陆地有轨运输方式。铁路运输工具包括货物列车、旅客列车、动车组、城市轨道列车、特种车辆等,广义来说还可以包括磁悬浮列车和新型轨道交通工具。轨道是铁路运输的支撑基础,列车是铁路运输的载体和核心,而安全可靠地运送旅客和货物才是最终目的。铁路运输有众多优点,尤其是安全高效、节能环保适应了当今社会发展的需求。我国铁路建设起步较晚,但发展迅速。目前,全国铁路运营里程超过 13 万千米,其中高铁运营里程超过 3 万千米,而且高铁网络还在不断扩大中。城市轨道交通也蓬勃发展,许多城市建立了发达的地铁网络。

机车车辆经历了从蒸汽机车、内燃机车、电力机车到高速动车组的发展过程。现在世界上已有多条高速铁路运营速度达到 300 km/h。我国京沪高铁运营着世界最高运营速度 350 km/h 的复兴号动车组。图 1.1 是机车车辆发展的代表。

高速列车在不同国家、不同时代的定义不同,一般是指最高行车速度达到或超过 200 km/h 的铁路列车。日本、法国和德国先后修建了高速铁路,形成了有各自典型技术特征的高速列车体系。法国 TGV-v150 试验高速列车在巴黎东南部一段经特殊加固的铁路线上,创造了 574.8 km/h 的世界纪录。

我国从 20 世纪末开始研制高速列车,但主要是试验列车和少量载客运营列车,如先锋号、蓝箭号、长白山号、中华之星等。2004 年以来,我国在“引进、消化、吸收、再创新”的方针下,引进并发展了 CRH1、CRH2、CRH3、CRH5 系列 200~300 km/h 的动车组;开发了 CRH380A、CRH380B 等 300 km/h 以上的动车组,以及城际动车组、高寒抗风沙动车组、卧铺动车组、双层动车组等多个系列,并研发了具有自主知识产权的中国标准动车组系列。

我国已经修建和规划了巨大的高速铁路网络,拥有世界最长的高铁运营里程。由于我国高速铁路线路长、跨越区域宽、线路条件非常好,所以高速列车能以较高速度长时间持续运行,且运行线路相对单一。这是我国高速列车运行的重要特征,也是影响其动力学性能的关键

键因素。一方面，线路条件好能带来良好的乘坐舒适性，高速铁路网络能方便运营管理和乘客换乘；但另一方面，这种单一的运行状态极易造成车轮踏面凹陷型磨耗，更快地达到辮轮条件，同时这也是引发车轮多边形、车辆低频晃动等问题的重要原因。



图 1.1 机车车辆的发展代表

从铁道车辆的发展历程来看，速度和载重是发展的两大主题，围绕它们有诸多的问题需要研究，如运行安全性、乘坐舒适性、运行可靠性等，这促使了车辆系统动力学不断发展。从图 1.2 可见，在 20 世纪 60 年代之后，随着高速列车的商业运营，最高试验速度和最高运营速度都在不断地被刷新。2010 年，我国高速列车在京沪客运专线上创造了最高速度 486 km/h 的运营列车世界纪录。2016 年，中国标准动车组在郑徐客运专线上实现了 840 km/h 相对速度会车试验。我国高速列车在机车车辆滚动振动试验台上，也多次进行了 600 km/h 的

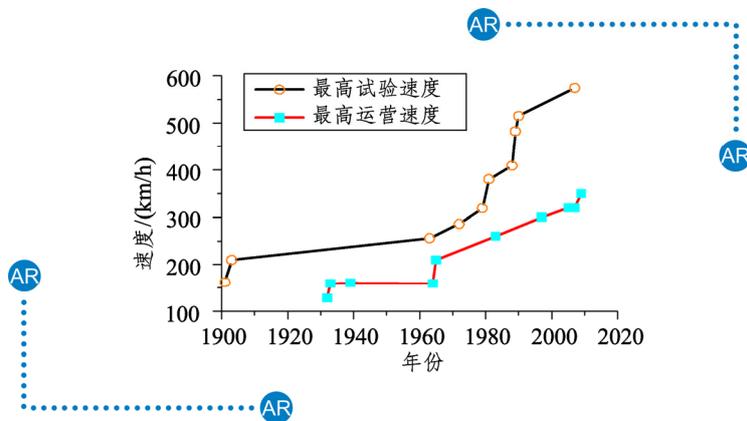


图 1.2 铁道车辆的速度纪录

高速滚振试验(见图 1.3)。每一次速度的巨大提升,都会伴随车辆动力学理论的发展。例如,20 世纪 20 年代,Carter 创立了蠕滑理论;20 世纪 60 年代,Kalker 发展了蠕滑理论,各国学者开始系统研究车辆系统动力学理论;20 世纪 80 年代之后,车辆系统非线性动力学、车辆动力学仿真等取得了巨大进展。



图 1.3 滚动振动试验台车辆高速试验

轮轨系统是导致车辆动力学复杂化、影响其发展空间的重要因素。在轨道交通未来发展方向上,高速磁浮列车和真空管道技术是两个热点。高速磁浮列车借助无接触的磁浮技术使车辆悬浮在轨道上,通过无接触的直线电机驱动运行,从而将导向、支撑、牵引解耦。高温超导磁浮还具有自稳定悬浮特性,并利用钉扎效应实现自导向,悬浮和导向系统基本上不需要输入能量。这些是值得传统轮轨列车参考和借鉴的。高速磁浮列车技术总体来说还不够成熟,限制了其大规模商业运用。

受稠密大气层的条件所限,地面交通工具的商业运营速度都不宜超过 400 km/h,否则将面临能耗高、噪声大等问题^[2]。建造一条与外部空气隔绝的管道,将管内抽为接近真空以减小空气阻碍,列车运行速度可以大幅提高。由于该管道是密封的,因此可以在海底及气候恶劣地区运行而不受任何影响。虽然国内外已有多个研究机构对该技术开展研究,但目前真空管道列车仅处于起步阶段,可靠的技术研究还需要人们长时间地努力和探索。采用真空管道运输的列车可能与现在的列车差异甚大,由于是全新的线路,改变现有的转向架承载方式,甚至使用柔性车体也是不错的选择,相关的动力学研究还没有系统开展。

在物理、材料和计算机等科学技术迅速发展的基础上,轨道车辆技术必将迎来新的机遇和挑战。首先是研发环保、智能、安全、快速的交通工具,这是人类永恒的追求,在 21 世纪有可能取得巨大突破;其次是车辆系统动力学的相关知识、研究方法和手段,这也必将取得颠覆性的发展。例如,量子计算机的应用可以解决计算速度瓶颈问题,关键是我们还没有足够精确的分析模型;人工智能技术的引入也将引起分析手段的变革。无论轨道交通的明天怎样,本书的大部分内容仍然是开展相关研究的重要基础。

1.2 车辆系统动力学内容和发展

车辆系统动力学主要是研究车辆在运行过程中与振动相关的力学问题。常规动力学包括决定最高运行速度的蛇行运动稳定性、保证安全的运行安全性、提高乘坐舒适性的运行平稳

性等，这些已经相对成熟。车辆系统动力学的研究范围还包括轮轨滚动接触、噪声、气动安全性、脱轨安全性、悬挂控制等诸多方面，这些研究正处于不断发展完善中。

1.2.1 车辆系统动力学理论的发展

自从火车发明不久，铁道车辆系统动力学现象就开始被关注^[3]。车辆系统动力学是在振动力学^[4]、多体系统动力学^[5]等学科的基础上，考虑机车车辆特殊的运行环境，尤其是轮轨接触关系和轮轨蠕滑，发展形成的一门独立学科，如图 1.4 所示。

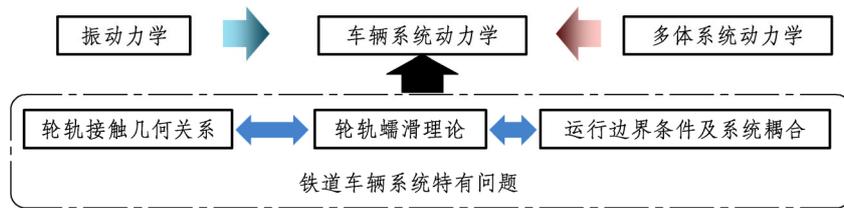


图 1.4 车辆系统动力学的基础

车辆系统振动环境和振动特点与一般机械系统有显著差异。在轨道不平顺激励下，车辆系统的振动既包括一般的线性或非线形振动，还有比较特殊的横向振动，这与轮轨蠕滑和轮轨约束有密切关系。车辆横向振动涉及蛇行运动，这是一种非线性自激振动，对车辆运行安全性、运行平稳性均有直接影响。当考虑列车系统或者车辆系统精确模型时，动力学仿真模型将是一个高维的非线性系统，为了准确快速模拟，还需要数值计算方法的支持。车辆悬挂元件非线性动态特性、轮轨磨耗等问题越来越受到重视，这些都与材料特性有关。车辆在侧风下的运行安全性、地震环境下的运行安全性、高寒条件下的动力学性能在高速运行条件下也尤为重要，这与空气动力学等自然环境学科有关。车辆系统动力学还与其他很多学科有关联，例如电气系统的振动、电机瞬态特性、桥梁等结构振动等对车辆的影响。综上所述，车辆系统动力学是一门多学科交叉的学科，高速列车耦合大系统动力学就是针对这种多学科交叉耦合的研究。本书主要针对车辆系统本身的动力学问题，以上影响因素都可以作为运行边界条件。

1. 轮轨接触几何关系

轮对由两个车轮、车轴和其他部件组成，将轮对放置在钢轨上时，两侧车轮和钢轨的接触区域与很多因素有关。由于车轮和钢轨的踏面轮廓都是曲线，左右车轮的接触位置会相互影响，过去计算机处理速度不快，轮轨接触几何关系的计算十分复杂。

如图 1.5 所示，轮轨接触存在单点接触、多点接触和共形接触几种情况。所谓几点接触，实际上是几个接触区域，这些接触区域称为接触斑。在轮轨接触几何关系计算时，不考虑车轮和钢轨的弹性变形，寻找左右轮轨间最小间隙所处的位置，计算得到的是一个或者多个点位置，简称为接触点。计算到接触点后，再根据 Hertz 或者非 Hertz 接触理论，计算接触斑大小和接触参数。轮轨接触几何关系的发展，在接触点类型方面是从单点接触向两点接触、多

点接触和共形接触发展，在接触力计算方面是从 Hertz 接触向非 Hertz 接触发展。

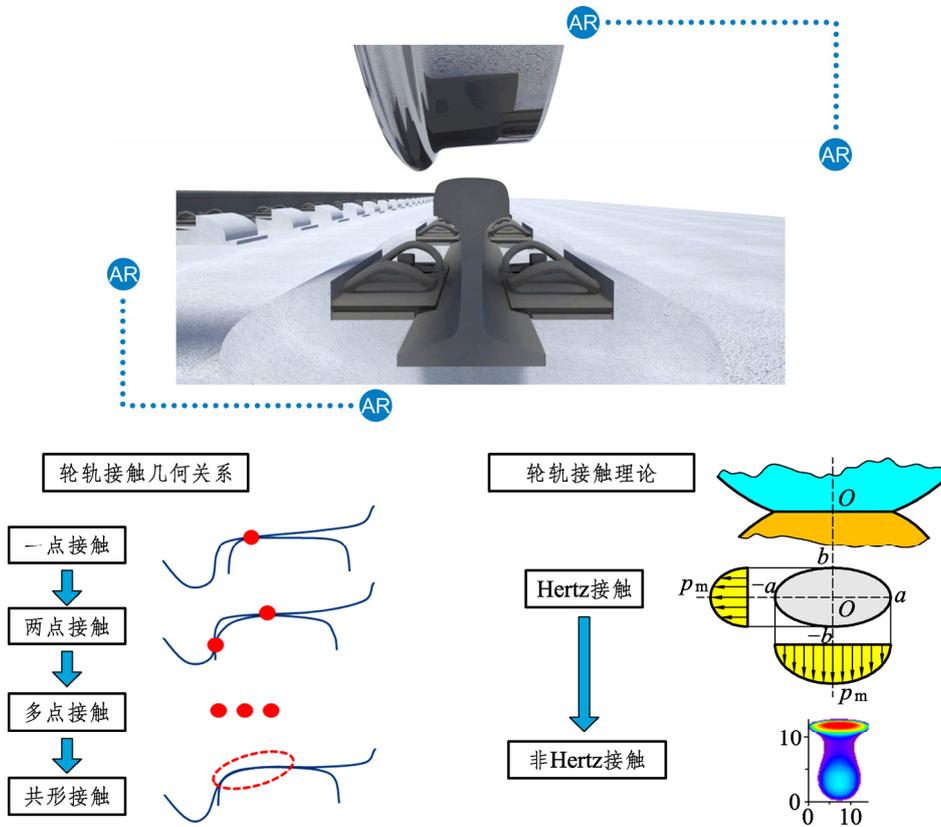


图 1.5 轮轨接触理论的发展

动力学仿真中，单点接触是最成熟和最常用的。近年来，多点接触也有所发展，但共形接触理论尚不成熟，而能用于车辆系统动力学分析的快速算法还有待研究。根据我国铁路车辆车轮踏面的大量实测数据，车轮踏面磨损有向共形接触发展的趋势，这会对磨损后的动力学性能产生较大影响，也会给动力学仿真带来困难。轮轨接触几何关系的计算主要是为了分析轮轨接触状态和提供动力学仿真输入数据。光从车轮和钢轨外形很难判断轮轨是否处于良好的状态，因此，在运营维护中，轮轨接触几何关系是重要的评判依据。轮轨型面在线快速测量是轮轨型面运营维护的基础。

2. 轮轨蠕滑理论^[6]

1926年 Carter 发表著名论文《论机车动轮行为》，将铁路钢轨看作弹性半空间，用弹性圆柱体模拟车轮，借助 Hertz 理论和弹性半空间理论求解二维弹性体滚动接触问题。Johnson K. L. 在 1958 年研究了弹性球在弹性平面上的滚动接触，将 Carter 的研究推广到三维滚动接触情形，首次将自旋蠕滑概念引入轮轨滚动接触研究；1964 年又进一步将圆形接触区推广到椭圆接触区，提出了关于纵横向蠕滑率/力定律的三次渐近曲线。

荷兰学者 Kalker 研究了滚动接触问题的线性理论，在他的博士论文中给出了三维蠕滑率/力线性定律，至今仍得到普遍应用；该定律是后来的简化理论和多个近似理论建立的基础。之后，Kalker 致力于滚动接触简化理论的研究，开发了 FASTSIM 算法，这是目前车辆系统动力学仿真中最常用、最准确的蠕滑理论之一。Kalker 还用线性规划法求解弹性体滚动接触问题，开发了“完全理论”CONTACT 程序，可求解 Hertz 和非 Hertz 接触法向问题、增量形式的滑移接触问题、稳态和非稳态滚动接触、相互接触物体内部的弹性场，是目前研究三维弹性体滚动接触问题最完善的理论。但 CONTACT 程序运行速度较慢，难以直接应用于机车车辆动力学仿真计算，一般用于理论研究或者动力学仿真的后处理。近年来，Vollebregt 对 CONTACT 程序进行了发展和完善。

1983 年，沈志云等人结合 Kalker 线性理论和 Vermeulen-Johnson 模型，同时考虑轮轨之间纵、横向蠕滑率和自旋蠕滑率对纵、横向蠕滑力和自旋力矩影响发展了一种快速算法。1999 年，Polach 在 Kalker 线性理论的基础上，提出一封闭形式的近似解，为了能够考虑由牵引力增加导致的黏着能力下降，他又对摩擦状态做出修改。这两种方法计算速度较快且满足工程精度，在车辆系统动力学仿真中得到了广泛应用。近年来，采用有限元方法求解轮轨滚动接触问题被深入研究，但求解规模太大，不适用于车辆系统动力学仿真。

现有轮轨滚动接触理论还不能准确解决某些问题，如两点接触和共形接触、弹塑性变形和残余变形累积过程、接触表面的剥离和龟裂、波浪形磨耗和高速列车车轮不圆、“第三介质”的影响等。现有技术条件还不能精确测量轮轨接触状态和受力，这对轮轨滚动接触研究和车辆系统动力学仿真带来了困难。

3. 车辆系统动力学的发展

在 20 世纪之前，虽然也有一些动力学问题困扰着铁路运输，但由于铁路运行速度低，动力学问题并不突出。铁路初期的动力学研究更多是对问题和现象描述，例如 Stephenson 对车辆运动振荡的描述，Klingel 对具有锥形踏面的轮对运动建立的数学模型，Mackenzie 对机车通过曲线问题的分析等。随着铁路运行速度的提高，乘坐舒适度变得越来越重要，尤其是横向振动问题。Carter 首先对轮轨之间的作用力展开研究，并第一次研究了横向稳定性。在 20 世纪 50 年代以前，工程经验的积累仍然能满足车辆振动性能和安全运行的需求。但随着列车运行速度的进一步提高，对车辆安全平稳运行的需求不断提高，促进了车辆系统动力学的发展^[7]。20 世纪 60 年代之后，计算机技术、轮轨蠕滑理论、多体系统动力学的发展，使车辆系统动力学逐渐发展成为一门学科，并在工程实践中得到广泛应用。

近年来，伴随着铁道车辆行业及其他相关学科的发展，尤其是我国轨道交通的快速发展，国内外车辆系统动力学研究也在多个方向得到拓展，主要表现在对车辆系统动力学自身认识的提高和多学科交叉发展，如车辆-轨道耦合系统动力学理论^[8]和高速列车耦合大系统动力学理论^[9]的广泛应用，为我国轨道交通的进一步发展奠定了理论基础。

4. 高速列车系统动力学的发展

高速列车系统动力学考虑了高速列车特殊的运行条件，针对高速列车需求而开展动力学研究。由于高速列车对蛇行运动稳定性、运行平稳性和运行安全性有更高的要求，所以高速

列车系统动力学具有更加迫切的工程需求，是我国车辆系统动力学应用最广泛、发展最快的领域。

高速列车要求有足够的蛇行运动安全裕量，确保运行安全性。但在我国高速列车运行过程中还是发生过与蛇行运动稳定性不足有关的动力学问题。例如高速列车在车轮踏面新镟修情况下，容易发生横向低频晃动现象，严重影响了乘坐舒适性；在车轮踏面磨耗到一定程度后，部分高速列车构架横向加速度出现明显谐波，如果振动幅值较大或者与车体弹性振动模态频率接近，则容易引起车体抖动，从而降低乘坐舒适性。由于铁路运行速度的提高和客运专线的特殊运营环境，有些普通列车之前没有发现或者不够重视的动力学现象也凸显出来。例如车轮不圆导致的振动更加剧烈，甚至引发疲劳破坏事故；车轮多边形向高阶发展，其发生和发展具有突变性；列车中尾车在特殊条件下的横向晃动问题等。

从以上问题可以看出，高速列车系统动力学具有问题复杂、理论要求高、与工程紧密结合等特点。我国高速列车具有特殊运营情况，其动力学现象和国外高速列车存在差异，相关文献资料稀缺，这也为我国高速列车系统动力学的发展提供了机会。

1.2.2 车辆系统动力学仿真发展

随着车辆系统动力学理论的发展和仿真技术的进步，人们才有可能再现各种动力学现象并进行深入研究，使车辆系统动力学在车辆设计、性能预测、动力学问题分析、新技术应用等方面得到有效应用，极大地推动了车辆技术的发展。如图 1.6 所示，车辆系统动力学仿真受到多个学科和大量试验的支撑。

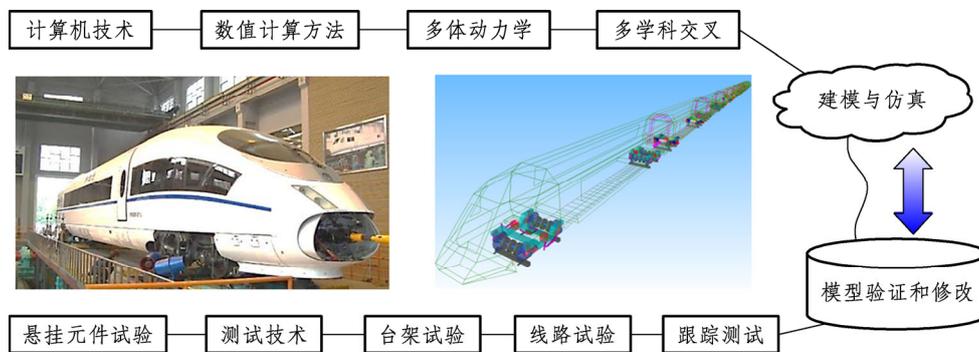


图 1.6 车辆动力学仿真基础

1. 数值计算方法

数值计算方法的发展，尤其是数值积分方法的发展，使得求解大型和复杂动力系统的响应成为可能，推动了车辆系统动力学向复杂化、非线性、大系统方向发展。这主要归功于两个方面：一是计算速度的提高，具有很多自由度的列车系统也能进行动力学仿真；二是计算精度的提高，能够更加准确地求解具有强非线性的常微分方程组，甚至是微分代数方程组。

2. 非线性车辆系统动力学仿真

铁道车辆系统一般具有两级悬挂，有许多一系和二系悬挂元件，需要在动力学模型中建立相应力元。现代车辆中广泛采用了橡胶件和液压减振器，而这两种元件都具有强非线性特性。例如橡胶节点，除了具有频率非线性外，其刚度和阻尼也随着激扰幅值而显著变化。

传统车辆系统动力学往往将悬挂力元线性化，复杂一点就采用分段线性模型。在某些特定条件下，如当车辆系统的振动幅值变化较小、主频单一时，这种简化方法能满足工程精度要求。但高速列车的振动比较复杂，悬挂元件的动态刚度和动态阻尼特性不容忽视。

3. 多维车辆系统动力学仿真

动力学仿真模型维数的增加将大大增加计算时间，甚至降低计算精度。但某些列车车间耦合比较强，或者有必要分析整列车的动力学性能，就需要建立具有较高维数的列车系统动力学模型。某些车辆由于分析问题的特殊性，需要考虑详细的车内外设备、各种弹性振动，模型自由度也比较多。一种近似的方法是，将重点关注的车辆考虑每节车的详细三维模型，其余车辆采用自由度较少的简化模型，这样能充分考虑列车中不同位置车辆的动力学性能差异，为单节车辆系统动力学研究和列车编组提供参考。

4. 车辆轨道耦合系统动力学仿真

随着列车运行速度的不断提高和货物列车轴重的不断增大，列车和线路的耦合作用加强。钢轨波磨、车轮不圆、轨枕冲击、轮轨高频振动和噪声、车桥耦合振动、车线耦合振动等诸多动力学问题都还没有得到有效解决，对这些问题的分析都离不开车辆-轨道耦合系统动力学。有多种简单或者复杂的车辆-轨道耦合系统动力学模型，其中以翟-孙模型应用最为广泛^[8]。

5. 高速列车大系统动力学仿真

张卫华教授创立的高速列车大系统动力学，是包含车辆-轨道耦合、车辆-空气流固耦合、弓网耦合、机电耦合而建立的复杂大系统动力学模型^[9]。其中车辆系统是核心和纽带，其余各个系统均是通过车辆而紧密组合在一起的。大系统动力学可拆可聚，根据分析问题的需要，可以主要在某一个系统下进行仿真分析，而将其余系统作为边界条件或者输入。高速列车大系统动力学需要强大的计算能力，目前还处于不断发展和完善中。

1.2.3 车辆系统动力学试验

通过动力学试验或测试，才能准确地掌握车辆系统动力学性能。车辆系统动力学试验可以分为多种，包括小型的机理试验、大规模的整车试验等。这里按照试验条件不同，将车辆系统动力学试验简单地分为台架试验、线路试验、线路长期跟踪试验。

1. 台架试验

台架试验包括比例模型机理试验、车辆部件试验、整车试验。由于一般是在室内进行台架试验，所以边界条件和试验方案容易控制，试验工况也可以比线路试验更多。模型试验主

要用于一些基础研究，如导向机理、控制方法、轮轨磨损规律等。部件试验主要是对车辆系统某些组成部件的功能试验，如转向架参数测试、车体振动模态测试等。整车试验一般规模较大、成本较高，如整车滚动振动试验、悬挂模态试验、整车振动试验等。

台架试验也可以分为校核型试验和研究型试验。例如柔度系数试验、悬挂参数测试、转向架转动系数测试、整车动力学性能型式试验等，都是校核型试验。轮轨磨损试验、悬挂参数优化试验（滚动振动试验台上）、主动控制方法试验等，都属于研究型试验。

随着我国铁路的发展，尤其是最近几年高速列车的发展，我国成立了多个国家重点实验室和工程研究中心，配置了大批先进试验设备。例如生产高速列车的几家主机厂，都建立了整车振动试验台、滚动试验台、参数试验台等大型设备。西南交通大学轨道交通实验室也建立了小滚轮试验台（模拟车轮多边形等高频激励）、高速磨损试验台、弓网试验台、真空管道试验台等多个研究型试验台。

牵引动力国家重点实验室的机车车辆滚动振动试验台是车辆系统动力学研究的重要台架之一，经过提速改造，最高试验速度已经达到 600 km/h。在该试验台上，针对我国所有型号高速动车组开展了动力学试验。部分试验针对线路运营中的动力学问题，再现了动力学现象，并进行了大量的研究型试验。

2. 线路试验

线路试验组织起来比较困难，所以更多的是型式试验，即全面的列车动力学性能评估，主要包括运行平稳性和舒适度评估、运行安全性评估等。随着高速动车组的发展，运用考核试验也逐渐开展，试验周期往往持续一个或几个车轮镟修周期，进行多次或者跟踪考核，例如中国标准动车组就开展了 60 万千米运营考核试验。

在列车线路运营过程中，发现的一些动力学问题也需要及时解决，这就需要开展一些专项试验。在高速动车组上这种试验比较多，有时只是运营状态下的动力学测试和分析；有时要专门开行列车进行有针对性的试验。

3. 线路长期跟踪试验

近年来，随着测试技术、数据存储技术和数据处理能力的提高，动车组线路运营长期跟踪测试逐渐开展起来。现有的长期跟踪测试采用了多种先进技术，包括远程控制数据采集、无线数据传输、海量数据自动处理、测试数据远程实时监控等。

数据处理是列车线路长期跟踪测试的一大难题。例如高速动车组的跟踪测试，需要监控的通道不能太少，高速运行下采样频率不能太低，每天每节车的测试数据可达几十 GB。如何从这些海量的数据中提取有效信息，甚至捕捉一些特殊的动力学现象，掌握长期的动力学演化规律，这些都存在技术难度。我国各大主机厂联合西南交通大学牵引动力国家重点实验室，已经针对近 40 列多种型号的高速动车组开展了长期跟踪试验，跟踪试验运营里程超过 5 000 万千米，掌握了几百 TB 的海量试验数据，为我国车辆系统动力学的发展提供了基础。

1.3 车辆系统动力学研究概述

1.3.1 车辆系统动力学主要研究方法

铁道车辆系统动力学研究的主要对象是铁道车辆系统，由于越来越多的动力学问题与轮轨耦合、机电耦合、空气动力学、弓网耦合、材料性能等相关，所以近年来研究对象在不断发展扩大，但研究的焦点还是车辆系统本身。铁道车辆既和一般机械系统类似，也具有其独有特性，研究方法主要包括理论研究、试验研究和仿真研究。

1. 按照研究手段分类

(1) 台架试验研究：一般在室内台架上针对部件或整车开展试验，其边界条件容易控制，试验成本相对较低，故试验工况可以多一些。但试验台与真实运营环境存在差异，不能完全再现线路工况。

(2) 线路试验研究：在试验线或运营线路上针对整车开展试验，由于车辆状态、线路状态和不平顺、轮轨匹配状态都是随时间和空间变化的，所以线路试验具有随机性，某次试验结果仅能代表随机事件中的个别样本，试验成本较高。

(3) 理论机理研究：采用动力学理论研究车辆系统动力学现象的机理，如蛇行运动稳定性机理研究。可以通过理论公式推导、解析方法、数值仿真方法开展研究。一般较简单的简化系统，由于与实际车辆存在差异，应用时还需要结合具体情况具体分析。

(4) 动力学仿真研究：主要采用数值计算方法研究车辆系统动力学。由于仿真分析成本较低，可以用于动力学参数优化、性能预测和校核、具体动力学问题分析、车辆设计和维护等方面。随着仿真技术的不断进步，车辆系统动力学仿真在工程应用中发挥着越来越大的作用。

(5) 综合研究方法：针对比较复杂的问题，往往需要结合线路试验、台架试验、数值仿真，采用以上方法综合研究。

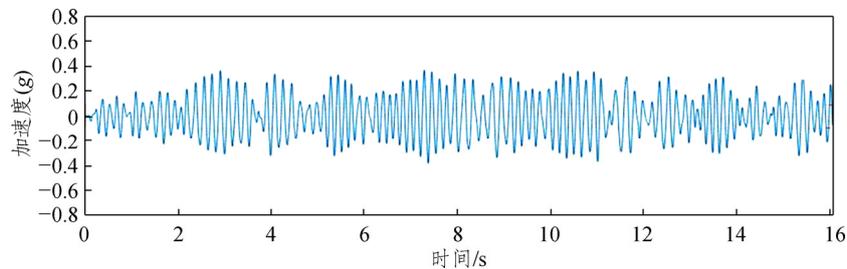
2. 按照研究域分类

对动力学问题的研究往往都要通过对时域的数据处理实现，按照数据处理的域可以将车辆系统动力学研究分为时域、频域和时频域。车辆的诸多动力学问题均有频率特性，如蛇行运动频率、悬挂频率、弹性模态频率、设备有源振动频率、车轮不圆和钢轨波磨频率（波长）等，而一般测试得到的是时域信号，所以需要将时域和频域分析结合起来。另外，稳态分析、振动模态分析等也常被采用。

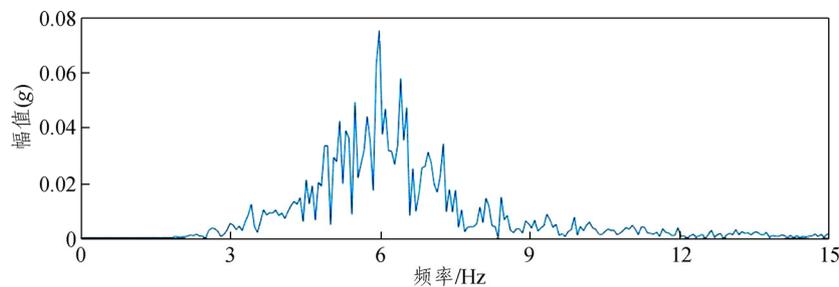
(1) 时域研究：时域信号、时域统计、时域传递和响应等，一般要结合统计方法来处理数据，例如车辆振动加速度最大值、均方根值，以及运行安全性指标中的轮轴横向力最大值、脱轨系数最大值等。时域信号如图 1.7 (a) 所示。

(2) 频域研究：频谱、功率谱、频域传递和响应等，一般是对时域信号的后处理，也可以直接在频域内研究振动传递和响应。很多动力学指标都需要频域处理，包括滤波、加权等，如平稳性指标、舒适度指标、构架横向加速度带通滤波值等，如图 1.7 (b) 所示。

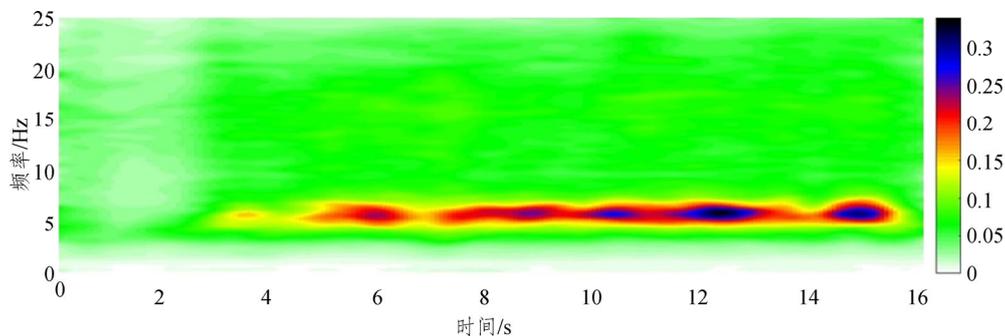
(3) 时频域研究：包括短时傅里叶变换 (STFT)、希尔伯特-黄变换 (HHT)、短时最大熵谱等方法，可以直观地分析振动频率随着时间或者车速的变化，如图 1.7 (c) 所示。但由于是三维问题，时频域研究较难精确地显示量化幅值。



(a) 时域信号



(b) 频域分析 (FFT)



(c) 时频域分析 (STFT)

图 1.7 不同域下的数据处理

3. 统计方法的应用

轨道车辆运行环境具有众多不确定性和随机因素，导致车辆系统动力学具有随机性，在车辆系统动力学研究中采用了大量的统计处理方法，包括边界条件输入、车辆系统本身、动力学响应、动力学指标等。车辆系统动力学直接采用了随机过程的统计理论和方法，但在轨道谱描述、车辆动力学指标等方面形成了自己的特点。虽然轨道车辆具有众多随机因素，但不能简单地采用随机振动理论进行研究。车辆系统具有强非线性，随机因素的组合加剧了非线性复杂程度，这使得每一辆车在每个小的运行区段都不同。

但在实际操作时，有时很难采用统计方法进行分析。例如线路型式试验，往往只是针对

一列车在新造状态（运行较短里程后）在某条线路某个时间段进行试验，没有考虑车辆参数的随机性和状态演变，也没有考虑线路、气候等因素的随机性。动力学仿真分析也有同样的问题，轨道谱单一、边界条件比试验更固定。所以动力学仿真结果经常被认为过于理想，但需要注意线路试验也仅仅是随机过程中的一个样本。

1.3.2 车辆系统动力学的重要应用

车辆系统动力学是一门紧密结合工程实际的学科，很多研究内容都是来源于工程实际问题，且研究成果可以直接服务于工程应用。我国高速列车技术已经逐渐成熟，但运营中的动力学问题还在不断被发现，有些问题甚至给车辆动力学带来挑战。

1. 动力学性能预测

车辆系统动力学性能预测和校核是车辆系统动力学的主要应用之一，也是整个车辆设计过程的前期工作。在车辆设计阶段结合动力学仿真，能提高设计效率，获得较优的车辆性能。由于数值仿真成本较低，可以在台架试验和线路试验之前进行大量的优选分析，为试验提供较少的必须工况。动力学性能预测一般根据以往运营经验确定一些输入条件，通过数值仿真预测车辆振动性能和运行安全性，进一步可以预测噪声、可靠性等。随着动力学仿真技术的进步，很多试验工况可以通过动力学仿真来实现和代替。

2. 动力学性能优化

车辆系统动力学性能优化是动力学性能预测的扩展，优化不仅发生在数值仿真中，在台架试验、线路试验和运用阶段均需要不断地优化动力学性能，才能形成最终具有较优性能的定型车辆。完整的优化过程是一个闭环，需要很长的优化周期。同样要充分利用各种研究手段的优势，降低优化成本，提高优化效率。如图 1.8 所示，动力学仿真可以为后面 3 个过程提供优选方案，且优化方案越往右走越少。最终的优化方案需要经历线路运营考核。有时动力学问题只有在运营一定里程后，或者某些特殊条件下才发生，这时需要从运营到仿真形成闭环。

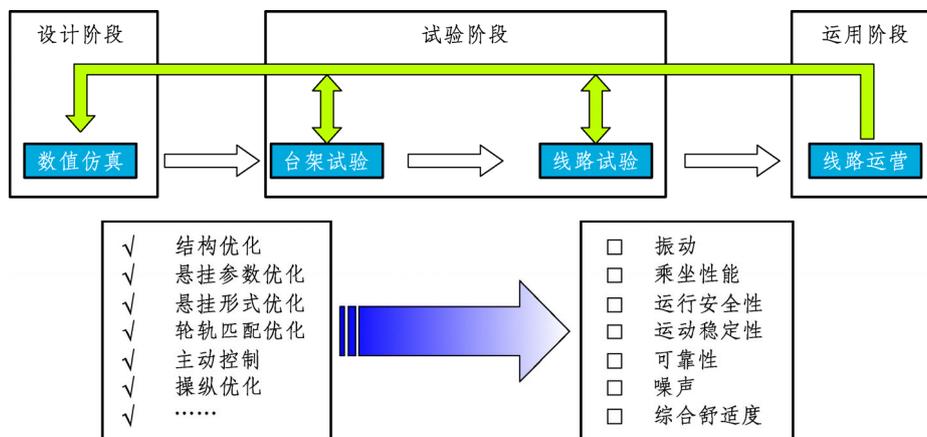


图 1.8 动力学性能优化框图

同样，优化边界条件也需要根据以前运营经验和将要运营的环境来确定，在某些有针对性的动力学问题优化中，还需要实测钢轨外形、线路不平顺、风载荷等边界条件。优化分析的内容较多，包括车辆结构、车辆参数、轮轨匹配等。评价指标一般是常规车辆系统动力学指标，也可以是有针对性的某个动力学现象。

3. 动力学现象再现和解决

车辆在线路上运营的过程中，会发生多种动力学问题，有的对车辆运营产生不利影响，需要研究解决。随着高速、重载的发展，原来可以忽略的一些动力学问题，对车辆的影响越来越大，也需要重视关注。

(1) 通过理论分析研究动力学问题。

例如，高速动车组蛇行运动稳定性不足、低频晃动现象，需要研究这些蛇行运动的机理、影响因素和解决措施。

(2) 通过简化模型仿真研究。

例如，轮轨垂向冲击引起的振动和疲劳问题，可以根据车辆轨道垂向耦合动力学模型仿真得到冲击载荷和影响因素。

(3) 通过多体动力学数值仿真研究。

例如，动车组在局部线路上不稳定现象、车辆的异常振动、列车中尾车晃动现象等，需要建立复杂的动力学仿真模型开展研究，进一步通过参数优化来解决这些问题。

(4) 通过台架试验再现和优化。

可以在滚动台、振动台、滚振台上进行动力学试验，再现线路上发生的动力学现象，并优化悬挂参数。例如，近年来对高速列车车体异常振动、构架横向加速度报警等问题，在整车滚动振动试验台上开展了大量的试验研究。

(5) 线路试验和跟踪测试。

例如，高速动车组在兰新线进行大风试验、在哈大线进行低温试验，这些动力学研究很难在台架上进行，只有结合动力学仿真和线路试验来开展。再如，高速动车组动力学性能随着轮轨磨损、运营里程的变化规律，只有通过线路长期跟踪测试才能掌握。

对于很多动力学问题，通过以上单一方法往往不能彻底解决，需要结合多种方法共同解决。随着我国轨道车辆技术的发展成熟和车辆系统动力学研究的深入，很多动力学问题可以在设计阶段就充分考虑，逐渐精确的动力学仿真提供了可靠的研究平台，这样就节约了研究成本和产品开发周期，实现了正向设计。

4. 新理论和新技术研究

轨道车辆是一个封闭保守的行业，同时为了确保高安全性和高可靠性，各种新技术的应用都需要经过漫长过程。每一个新产品的开发都要进行长期理论研究和试验，动力学仿真和试验平台为这些研究提供了条件。高速列车采用新结构、新悬挂（包括悬挂结构、悬挂元件

和悬挂参数)、新踏面外形、主动和半主动控制技术、新的牵引驱动技术等,都需要进行大量的机理、仿真和试验研究。针对一些创新想法,首先要运用动力学理论进行研究,先确定可行的技术方案,再进入设计实施阶段。

与转向架有关的新技术,更是车辆系统动力学关注的重点。例如复兴号动车组采用的 LMB 车轮型面(也被称为 LMB-10 型面),就经过了大量、长期的理论设计、仿真分析、台架试验、线路试验、运营考核和推广运用,通过反复优化后最终才确定出车轮型面。

1.3.3 车辆系统动力学的难点

车辆系统动力学虽然已经能够解决铁道车辆运用过程中的部分问题,发展成为一门比较完善的学科,但仍然有许多未解之题需要长期继续深入研究。车辆系统特有的轮轨系统、运营环境具有随机性和不确定性,再加上机械系统常见的强非线性、高频振动等问题,使车辆系统动力学研究具有一定难度。

1. 轮轨系统的复杂性

轮轨滚动接触是车辆系统动力学最大的难点,不仅在于接触几何关系、蠕滑力的求解,还因为实际运营车辆的轮轨关系具有随机性和不确定性。宏观轮轨力测量本身就很复杂,微观的轮轨接触和蠕滑力测量难度更大,且至今没有精确可靠的方法。虽然现有蠕滑理论能够解决工程中的一些动力学问题,但诸如轮轨磨耗、车轮不圆、钢轨波磨、车轮防滑、轮轨接触疲劳、轮轨噪声等问题都还亟待进一步研究。

轮轨系统还具有随时间演变和随空间变化的特性,主要是由于轮轨磨耗、轮轨边界条件和轨道几何参数具有变化特征,导致了车辆系统动力学具有随机性。但有时同一车辆连续反复通过同一地点的多次试验,动力学性能也可能存在很大差异,这就具有了不确定性。

2. 运营边界条件的复杂性

运行边界条件包含的内容比较广,一般来说包括线路条件、轮轨匹配、轮轨界面、气候环境、载荷、车辆状态等。这些边界条件具有随机性,甚至还是多场耦合问题。单就气候环境而言,气温会导致车辆悬挂参数变化,环境会导致轮轨界面变化,侧风会导致车辆运行姿态变化,低温和降雪还会导致车辆结冰等诸多问题。

我国地域辽阔,很多列车运营的地域范围很广,尤其是高速列车,可能在较短时间内经历多种运营环境。例如在纵向客运专线的列车可能经历气温的剧烈变化,在横向客运专线的列车可能经历从干燥到潮湿的环境变化。

3. 强非线性

轮轨系统和部分车辆悬挂部件具有强非线性。车辆的悬挂元件如液压减振器、橡胶弹簧和节点、空气弹簧等,一般同时具有频域非线性和幅值非线性。例如空气弹簧,虽然通过建立气体热力学物理模型可以近似模拟低频垂向特性,但高频特性、横向特性还很难准确模拟。再如液压减振器,其物理模型过于复杂且精度不高,简化模型很难同时模拟幅值非线性

性和频域非线性，就连最基本的动态刚度和动态阻尼特性，也是最近几年才在工程应用中得到重视。

4. 高频振动

车辆系统具有很多高频振动源，如轮轨高频振动、牵引传动系统高频振动、电器元件高频振动。这些高频振动对噪声、结构可靠性、车轮不圆和钢轨波磨具有重要贡献。这些研究往往只能借助线路试验，而台架试验很难施加准确的高频激励，仿真模型中力元的高频特性很难模拟，所以数值仿真在这方面也具有很大的局限性。

5. 高可靠性和高安全性

铁道车辆尤其是高速列车，需要具有高可靠性和高安全性，设计时要留有较大的安全裕量。例如蛇行运动临界速度是车辆动力学最重要的性能之一，线路最高试验速度一般比运营速度快 10%，台架试验速度比线路试验速度至少再高 10%，动力学仿真比台架试验至少再高 10%。某些部件还采用冗余设计，例如速度 300 km/h 以上高速动车组每台转向架每侧安装两根抗蛇行减振器。

6. 模型验证问题

由于线路试验成本高昂，每次试验只是众多随机样本中的一个，而台架试验、动力学仿真和理论分析具有明确的边界条件，所以模型验证很难。以动力学仿真计算车辆动态包络线为例，由于包络线计算需要考虑极端恶劣的运动状态，而试验很难设置这些恶劣条件，且很难测量车辆的绝对位置和姿态，所以直接的模型验证基本不可能，只能通过一些简单的间接试验验证模型，如车辆模态频率、柔度系数试验。

如图 1.9 所示，虽然数值仿真、台架试验和线路运行之间不能完全等效，但在我们研究的特定条件下是可以近似等效的，且它们都服从基本力学规律。在车辆系统动力学研究中，既要充分利用研究手段的功能，也要注意研究手段的差异，避免错误的结论。

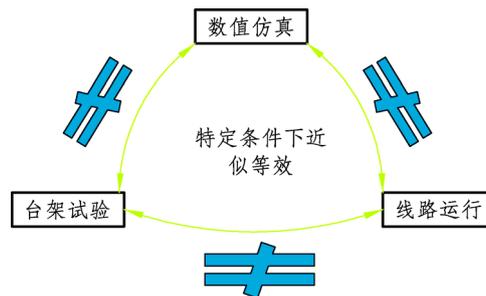


图 1.9 车辆动力学研究手段的关系