

车辆/轨道相互作用理论研究进展 及发展趋势

翟婉明

西南交通大学列车与线路研究所, 成都 610031

摘 要 车辆与轨道之间的动力学相互作用问题, 是铁路轮轨系统中最基本的问题. 高速、重载铁路的发展, 加速了车辆/轨道相互作用研究进程, 也提出了更多更新的课题. 在回顾轮轨相互作用研究历史的基础上, 着重阐述了近二十多年来国内外在该领域所取得的研究进展, 并对车辆与轨道相互作用研究趋势以及今后需重点开展的研究课题, 提出了作者的观点.

关键词 车辆, 轨道, 轮轨相互作用, 动力学

1 引言

人类自 1825 年建成第一条铁路以来, 便开始了对车辆与轨道相互作用研究探索的漫长历程, 因为在铁路系统的各种相互关系中, 车辆与轨道的相互作用关系是最基本的, 同时也是最重要的问题. 车辆在轨道上行驶, 实质上是一个动力学过程, 简单来说, 是一个移动质量系统与一个无限长连续支承结构之间的动态相互作用问题. 由于线路的不平顺和车轮与钢轨表面的几何缺陷等原因, 轮轨之间产生相互作用力, 向上传递给机车车辆, 向下作用于轨道结构, 引起各自的振动, 而这些振动又相互耦合, 构成了较为复杂的振动形态, 对车辆及轨道产生不利影响, 有时甚至危及行车安全. 特别是随着当今铁路客运高速化和货运重载化需求的日益高涨与逐步实施, 轮轨系统面临着日益加剧的动荷作用和动态效应, 对车辆与轨道相互作用问题的研究无疑也提出了更多更高的要求. 因之目前国际轮轨相互作用研究十分活跃. 本文拟对这方面的理论研究进展情况作一简明介绍和评述.

2 车辆与轨道相互作用研究历史的简要回顾

轨道动力分析最早始于 1867 年, 当时 Winkler^[1]提出了弹性地基梁理论, 这一理论很快被用于轨道建模. 1926 年, Timoshenko^[2]应用弹性地基梁模型首先研究了钢轨的动应力问题, 这便是今天广泛采用的经典方法. 自 1943 年 Doir^[3]提出应建立更好的轨道模型以适应列车运行速度的增长, 直至 70 年代, 很少见到应用新的模型解决轨道实际问题的成果. 虽然 50 年代

*国家杰出青年科学基金项目、霍英东教育基金会高校青年教师基金资助课题

收稿日期: 1996 - 04 - 16, 修回日期: 1997 - 07 - 28

原苏联的沙湖年慈等对轨道不平顺引起的轮轨动荷载作了不少理论计算和试验研究，并将随机理论引入轮轨相互作用分析，但所用分析模型并无本质变化。在此期间人们更多地关心移动荷载（机车车辆）在梁（钢轨）上的动力学稳定性问题。一个重要的原因是，1954年法国国铁（SNCF）在进行最高速度为330 km/h的高速行车试验中，出现了严重的轨道正弦型方向不平顺，以至造成了轨道结构横向损害^[4]。这一实践经验引起了50年代末和60年代初对机车车辆横向运行稳定性的广泛关注。在1960~1965年间SNCF试验基础上诞生了关于机车行驶稳定性的“Prud'homme极值准则”^[5]。

最近20多年来，铁路运输业的迅猛发展，极大地推动了轮轨相互作用研究的开展，特别是在应用数学力学模型解决铁路实际问题方面取得显著成效。可以说，70年代初英国Derby铁路技术研究中心开展的轨道接头处轮轨作用力试验与理论研究^[6,7]，标志着车辆与轨道相互作用研究进入了新时代。第3节将对近二十多年来所取得的主要进展加以评述。

3 当今车辆与轨道相互作用理论研究进展

车辆与轨道相互作用研究一般采用理论建模、数值求解与试验验证相结合的方法。首先对车辆/轨道相互作用中的具体问题建立适当的数学物理模型，进而寻求有效的数学分析方法以获取系统响应，再将关键动力学指标（如轮轨作用力和构件振动加速度等）的试验测量结果与理论分析结果对比从而验证并改进理论模型，在此基础上对轮轨相互作用进行系统广泛的应用模拟研究。可见，动力学模拟是研究车辆与轨道相互作用的核心内容。

3.1 车辆/轨道相互作用模型

70年代初，英国铁路为防止和整治轨道接头区病害，率先进行了车辆通过轨道低接头的轮轨动力试验，并由此定义了轮轨冲击作用过程中的高频作用力 P_1 和中低频响应力 P_2 。同时由Lyon^[6]和Jenkins等^[7]建立了轮轨动力作用分析的基本模型，并首次研究了车辆与轨道基本参数（如簧下质量、轨道刚度等）对轮轨作用力的影响。这一基本模型将轨道描述成连续弹性基础支承的Euler梁，将车辆简化为簧下质量，并考虑了一系悬挂特性，如图1所示。图中 K_u 、

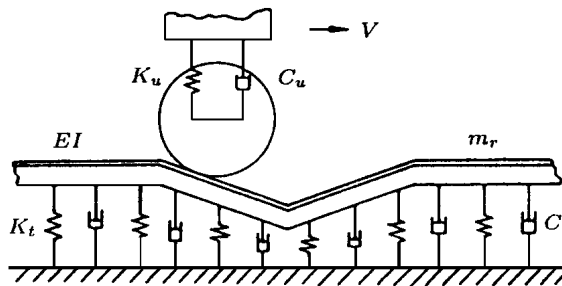


图1 车辆/轨道相互作用分析的基本模型

C_u 为车辆一系悬挂刚度与阻尼， K_t 、 C_t 为轨道支承刚度与阻尼， m_r 、 EI 分别是钢轨单位长质量和抗弯刚度， V 是车辆运行速度。1979年，Newton等^[8]为了研究车轮踏面擦伤对轨道的动力作用，又进行了一次轨道动力测试，并对模型作了局部改进，以Timoshenko梁计算钢轨的动态应力，从而使计算所得钢轨剪应变参数能直接同现场实测参量相比较，理论与试验取得了较好的一致性。与Euler梁模型相比，Timoshenko梁模型考虑了梁的剪切应变与截面旋转惯性，使梁的受力分析更加完善。但从工程应用的角度来看，Euler梁模型较之Timoshenko梁模型在数学求解上简化得多，且两种模型预测得出的轮轨作用力差异不大^[8]，故而Euler梁模

型迄今仍为铁路工程界广泛采用。

1982年, Clark等^[9]为研究车辆在波浪形磨耗钢轨上行驶的动态效应, 采用了弹性点支承连续梁模拟轨道, 并单独考虑了轨枕振动的影响, 使模拟更趋于实际。连续弹性基础梁模型与连续弹性点支承梁模型的不同之处在于前者将轨下基础作为均匀分布的整体地基, 地基特性符合 Winkler 假定; 而后者则把轨下结构描述成为一系列相隔轨枕间距的离散弹性 - 阻尼点支承体系。很显然, 前者着重反映的是轨道系统的最基本特征, 而且是总体上的效果; 而后者还可以进一步描述各个轨枕支承点的局部影响, 能更为客观地反映“钢轨是靠各个轨枕沿纵向支承于道床和路基”的事实。不仅如此, 弹性点支承梁模型可以较为方便地考虑轨道系统参数沿纵向非均匀分布的情形。例如容易反映轨道接头区轨枕非等间距支承的情形; 又如容易反映非均匀弹性支承情形; 此外, 对于模拟轨下基础缺陷如扣件松脱、空吊板及道床板结等纵向动力型不平顺, 也颇为奏效。关于连续弹性基础梁模型与连续弹性点支承梁模型的分析结果, 英国铁路曾专门做过比较, 认为低速范围内, 二种模型的预测结果相差不大, 而在高速时, 连续弹性基础梁模型会过高地估计轮轨动力作用, 实测结果也证实了模型预测值高于实

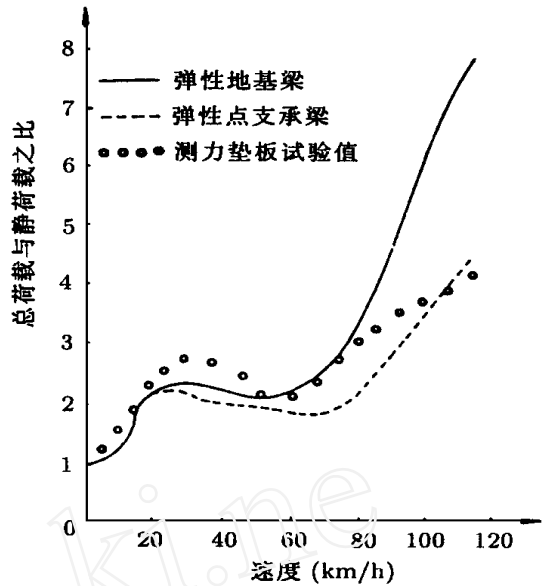


图2 轨道弹性基础梁模型与弹性点支承梁模型结果比较

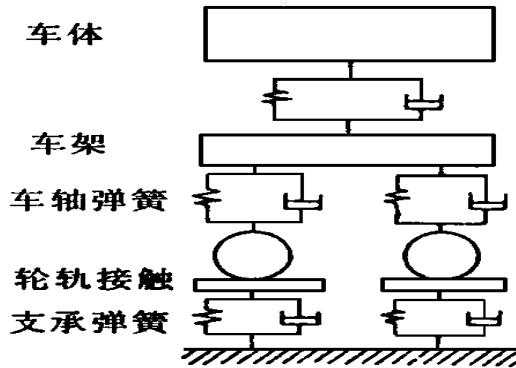


图3 “半车 - 轨道”集总参数模型

测值这一实际情形 (图2)^[8]。连续弹性点支承梁模型所得结果则在整个速度范围内均能与实测值基本吻合。

同一时期还出现了另一种类型的轮轨动力分析模型, 即所谓集总参数简化模型。其中比较有代表性的是日本 Sato “半车 - 轨道”简化模型^[10], 如图3。美国 Ahlbeck等^[11]也提出了一个与 Sato 模型相仿但更复杂的“半车 - 轨道”集总参数模型, 所不同的是轨道部分增加了一个基础参振质量, 并且考虑了钢轨接头轮轨冲击变形而引起的刚度削弱影响。吴章江等^[12]采用最简单的3自由度轮轨集总参数模型计算了低接头处轮轨冲击力。所谓集总参数模型是依据一定等效性原则, 把一个具有复杂分散参数体系的轨道结构, 变换成为一个具有少数自由度的质量 - 弹簧 - 阻尼集总参数的简化模型。例如, 文献 [13] 采用的等效变换原则是, 由轨道结构的实测自振频率推算等效质量和等效弹簧刚度, 由轨道结构实测幅频响应的对数衰减率推算等效阻尼系数。另一种等效质量变换的原则是, 弹性基础梁分布质量的动能与集总质量的动能相等, 而进行弹簧刚度变换的准则是, 使荷载点下弹性基础梁的静挠度与集总参数模型的静挠度相等。

显然, 集总参数模型较之分布参数模型具有很大的局限性, 一般只能分析轨道参数均匀分布条件 (这是等效变换成立的前提) 下的轮轨动力问题, 且集总简化所导致的数值误差对轮轨力可达 10 ~ 20 %, 对轮轨系统振动加速度可达 40 % 之多^[14]. 然而, 由等效集总参数模型预测得出的数值趋势及相互之间的数量关系, 基本上都能与实测结果相一致. 因此, 采用此种简化模型进行轮轨相互作用的定性分析, 如各种参数研究或灵敏度分析及不同种类车辆和轨道动力性能的比较研究等, 仍是行之有效的.

80 年代后期, 德国、中国、日本等国的铁路研究人员在车辆/轨道相互作用研究方面都曾做过不同尝试. 如李定清^[15]给出了 Derby 基本模型的有限元分析列式, 并考虑了钢轨接头区夹板的影响; 许实儒等^[16]采用连续弹性地基上的 Timoshenko 梁模型进行了钢轨接头处轮轨冲击力的近似解析模拟. 又如德国的 Schwab 等^[17]发展了一个多体系统 (MBS) 的计算机仿真模型用以研究高速铁路在运营中由于轨道缺陷所导致的轨道下沉过程. 日本 Sueoka 等^[18]还尝试了采用传递函数和线性叠加原理近似求解无限个车辆情形下车轮与钢轨之间的耦合振动问题.

进入 90 年代, 由于计算技术的日益进步, 使得完整细致地研究机车车辆与轨道之间的相互作用问题成为可能. 瑞典的 Nielsen^[19]和加拿大的 Cai 等^[20]相继发展了转向架 - 轨道相互作用模型, 车辆考虑构架、一系悬挂及两个轮对质量, 轨道表征为有限个离散轨枕支承的连续梁, 并分别用此模型分析了车轮擦伤引起的轮轨冲击作用. 陈道兴^[21]利用类似模型分析了非平稳随机过程的接头动力响应. 王澜^[22]建立较细致的轨道模型是为了研究轨道结构本身的随机振动而非车辆与轨道相互作用问题. 翟婉明等^[23]在提出车辆 - 轨道耦合动力学理论方法的基础上, 分别建立了整车 - 轨道垂向、横向相互作用的详细模型^[24, 25], 并应用于高速铁路轮轨动态相互作用研究^[26, 27]和重载铁路货车与线路相互动力作用分析^[28, 29]. 同时也被德国 Ripke 和 Knothe^[30, 31]应用于车辆/轨道高频动力学相互作用分析. 加拿大 Dong 等^[32]提出了一种有限元轮轨动力分析模型, 其主要特色在于对移动荷载作用下轨道模型的边界约束作了适当处理, 以期用有限长度的轨道模型来处理在移动荷载作用下的“无限长”轨道动力问题. 意大利 Diana 等^[33]在车辆与轨道结构的相互作用方面也开展了一系列模拟研究工作.

这一时期的车辆/轨道相互作用模型的一个共同特征是, 尽可能细致地考虑车辆系统和轨道系统两个方面的动力学影响因素, 而以往的研究较多地注重于轨道结构的模型描述, 对机车车辆部分考虑较少. 事实上, 车辆与轨道是互相作用、互为因果的统一体, 二者具有同等重要的地位, 车辆与轨道的耦合作用以及车辆各轮对之间的动力耦合效应都不可忽视. 因此, 应将车辆系统与轨道系统作为一个总体大系统, 而将轮轨相互作用 (轮轨关系) 作为连接两个子系统的“纽带”, 开展“车辆 - 轨道耦合动力学”^[34]的研究, 这样可以更为客观地反映铁路轮轨动力学系统的本质. 图 4 是一个较为详细的车辆/轨道相互作用模型 (模型参量的意义见文 [23]), 车辆模拟成一个以速度 v 匀速向前移动的整车多刚体系统, 轨道结构采用三层 (钢轨 - 轨枕 - 道床 - 路基) 连续弹性点支承 Euler 梁模型, 相邻支承点以轨枕间距隔开. 轮轨动力耦合关系采用 Hertz 非线性弹性接触理论加以描述. 事实上, 由该模型预测得出的轮轨系统动力响应与铁路现场实测结果已能很好地符合^[35], 图 5 是理论与试验结果的一例对比.

关于高频轮轨相互作用模拟, 主要以英国 Grassie 和德国 Knothe 为代表. 80 年代初, Grassie 等^[36, 37]开展了一系列理论与试验研究, 用以了解轮对和轨道结构的高频振动特性. 他们分别建立了垂向、横向乃至纵向轨道动力学模型, 并应用于钢轨波浪形磨耗机理研究, 这些工作至今仍在影响着轮轨高频振动的研究. 90 年代前后, 以 Knothe 为首的研究小组在轮轨高

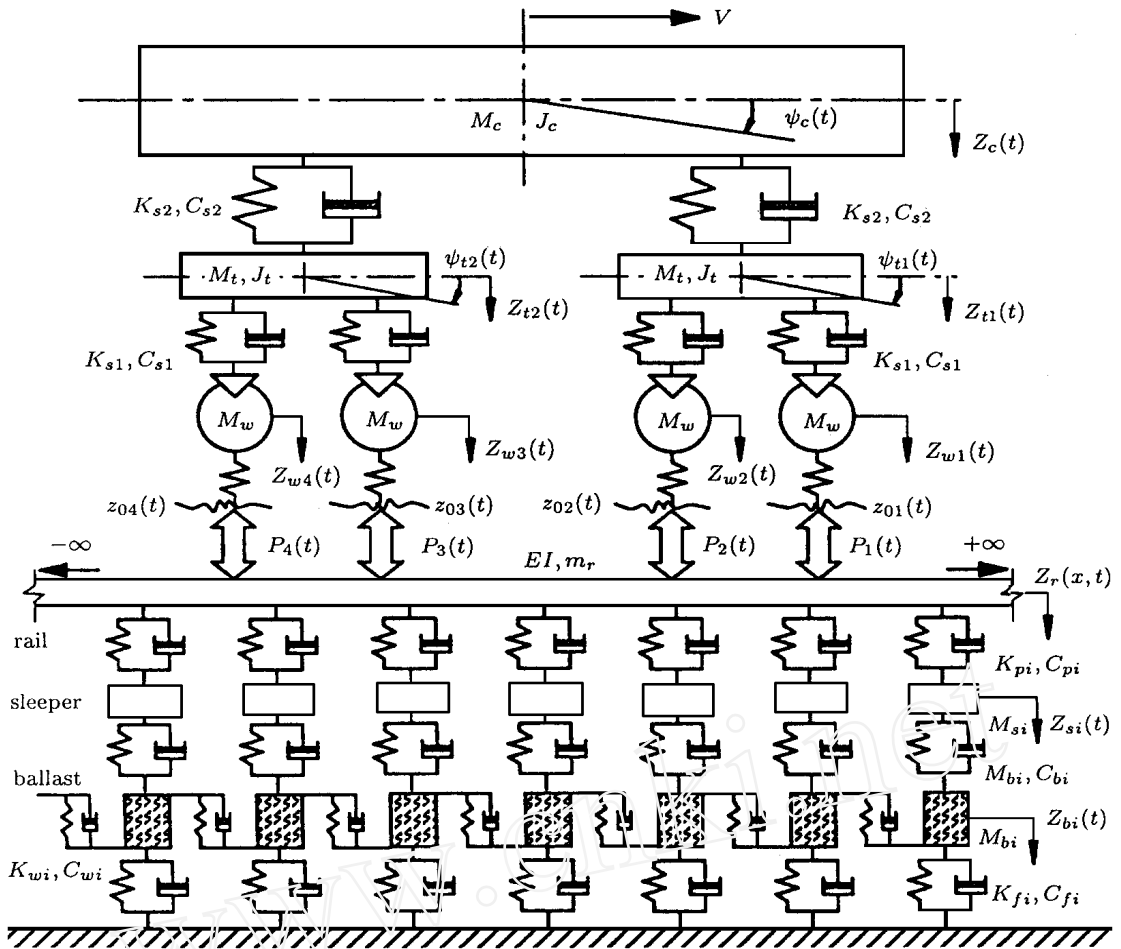


图4 车辆/轨道相互作用统一模型^[23]

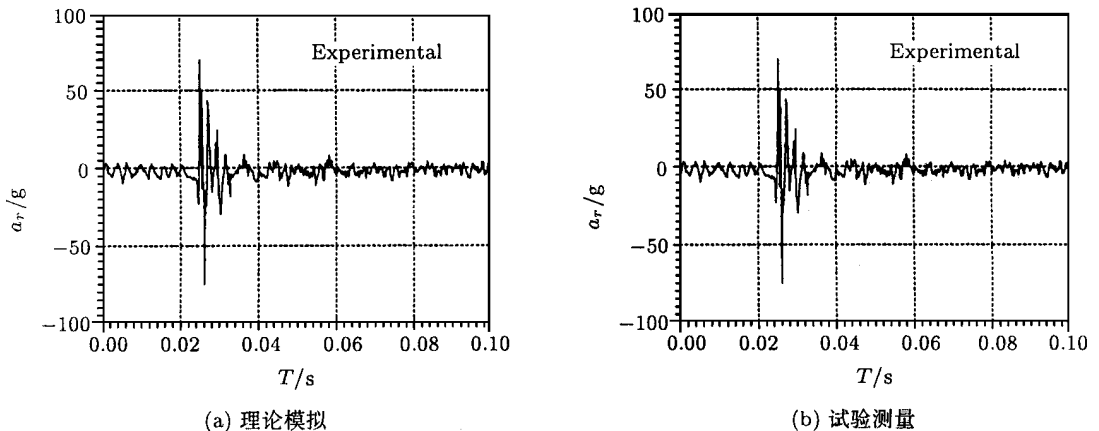


图5 统一模型预测的钢轨振动加速度响应及其相应的实测结果

频动力学行为方面取得了一系列进展。比较有代表性的成果有：Knothe 等^[38]采用梁板单元模型研究钢轨的高频振动；Ripke^[30]应用轮轨非线性接触力学研究高频车辆/轨道相互作用；Hempelmann^[39]提出预测钢轨波磨的线性模型。此外，以美国 Remington^[40]和英国 Thomp-

$\omega_n^{[41]}$ 为代表所取得的轮轨高频振动研究成果则主要针对轮轨噪声, 不在本文讨论. 关于高频域的车辆/轨道相互作用研究成果的详细介绍还可参考文献 [42].

3.2 轮轨系统激励模型

车辆/轨道相互作用系统的激励主要源于车轮与钢轨表面的不平顺, 包括线路接头不平顺、波形线路、波磨钢轨、车轮擦伤及车轮不圆顺等. 依据激励类型, 文献 [34] 将其分为脉冲型、谐波型及动力型不平顺三大类, 并给出了各自模型与激励输入表达式. 其中动力型不平顺是指轨道结构缺陷 (如空吊板、失效扣件等)、线路弹性不均 (如局部道床板结等)、轨枕间距不等而引起的特殊类型不平顺. 此外还存在非确定性的随机不平顺, 一种是低频范围的所谓轨道谱, 另一种是高频范围的轮轨表面粗糙度谱. 前者主要用于机车车辆的随机振动分析, 必须由线路实测样本统计而得, 美国等已建立了较完整的轨道谱^[43], 而我国目前正在建立之中; 后者主要用于轮轨噪声分析, 已有一些实测谱表达式, 如文献 [40, 41] 所述.

关于系统激励的输入方式, 一般有二种不同形式. 一种是车轮在轨面上运动过程中输入激励, 即所谓移动荷载状态激振 (图 6a); 一种是车辆与轨道作用点位置不变, 而使一条代表轨表面不平顺的激励带以列车运行速度反向通过轮轨接触界面, 即所谓定点荷载状态激振 (图 6b). 显然, 前一种输入方式更接近于实际, 但应用起来也相对困难, 因为所面对的是移动荷载 (车辆) 与连续梁 (轨道) 系统之间的动力学相互作用问题. 后一种输入方式因其简单易行而在许多理论研究中仍被采用, 特别是对于离散点支承轨道模型, 允许截取较短的轨道长度, 从而大大减少计算工作量.

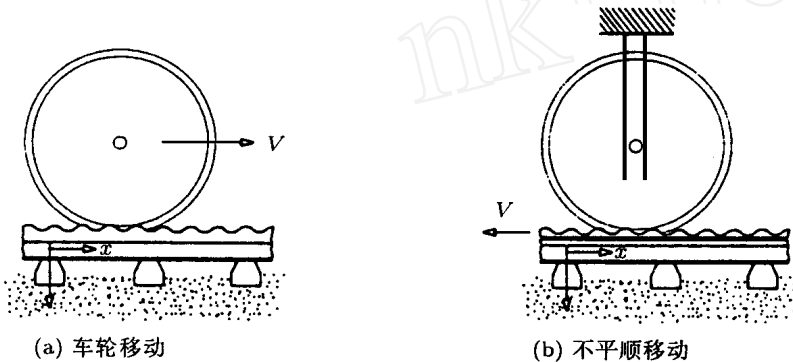


图 6 轮轨激励输入模型^[42]

3.3 轮轨接触力学模型

车辆与轨道的相互作用点就是车轮和钢轨的接触点, 可见, 车辆与轨道相互关系的一切问题的根源在于轮轨接触点之间的作用力. 所以, 轮轨接触力学模型是耦合车辆子系统与轨道子系统的关键环节.

在垂向可以采用 Hertz 弹性接触理论描述轮轨之间的垂向作用力^[23], 只需引入一个考虑轮轨接触特性参数的线性或非线性弹簧即可. 研究轮轨垂向力 P 的常用公式为:

$$P = \left[\frac{1}{G} Z \right]^{3/2} \quad \text{国 R 1)$$

式中, G 为轮轨接触常数, Z 是轮轨间的弹性压缩量. 实践证明这种方法对一般的轮轨垂向接触问题均是有效的.

对于轮轨切向接触问题的处理比较复杂, 因为这里涉及蠕滑现象. 蠕滑现象存在于两个相互挤压并有相对滚动的弹性体间, 两个物体在接触区内不同的应变率是引起蠕滑力的主要原因. 1926年, Carter^[44]首先研究了轮轨间的蠕滑现象, 定义了蠕滑率概念, 并建立了蠕滑力与蠕滑率之间的基本关系. 后来蠕滑理论得到迅速发展. 目前普遍采用的 Kalker 理论及其程序 FASTSIM^[45], 可以求解线性和非线性稳态切向接触问题. 而对大多数情形 (指非轮缘接触情形), 采用快速且适用于任意蠕滑率和小自旋值的 Shen - Hedrick - Elkins 理论^[46]是足够精确的. 对于非线性、非稳态情形 (如轨面存在短波长、大波幅不平顺), 目前只能运用 Kalker 的 CONTACT 程序, 其运算速度极慢^[47], 有待进一步研究.

3.4 车辆/轨道相互作用的分析求解方法

车辆/轨道相互作用系统动力学微分方程包含两种类型. 一种是车辆系统的二阶常微分方程组, 另一种是轨道系统的四阶偏微分方程. 以 Euler 梁钢轨模型为例, 其方程为

$$EI \frac{\partial^4 Z_r(x, t)}{\partial x^4} + m_r \frac{\partial^2 Z_r(x, t)}{\partial t^2} = - \sum_{i=1}^N F_{rsi}(t) (x - x_i) + \sum_{j=1}^4 G_j(t) (x - x_{Gj}) \quad (2)$$

式中, Z_r 是位移变量, EI 是钢轨抗弯刚度, m_r 是单位长钢轨质量, F_{rsi} 是 i 支点处轨枕动反力, G_j 是 j 号车轮对钢轨的动作用力.

求解车辆与轨道相互作用动力学系统响应的方法有两种: 频域法和时域法. 频域法将轨道系统的偏微分方程解表示成由空间坐标和时间变量构成的两个一元函数之积, 经分离变量后, 采用傅里叶变换方法将其转化为傅氏域内代数方程的求解问题, 再对所得之解实施傅里叶逆变换从而获得时域内的稳态解. 时域法运用模态叠加技术将轨道四阶偏微分方程转换成二阶常微分方程组后, 采用时间积分法直接求解系统的离散数值响应.

频域法适合于快速求解周期性均匀弹性支承的无限长轨道模型和处理随机不平顺, 对高频轮轨相互作用有关的分析具有明显优越性, 但不能解决非线性模型、非规则轨道结构模型及处理动力型不平顺等. 与此相反, 时域法可以有效地求解非线性动力学模型, 方便地考虑轨道几何不平顺和内部结构动力型不平顺, 并可处理轨道沿纵向非均匀支承结构的动力问题, 但数值积分较为费时. 由于实际轮轨动力问题中不仅包括轮轨接触非线性、车辆悬挂非线性及车轮脱离钢轨等复杂因素, 而且轨道支承刚度沿纵向并非都是均匀分布, 此外还有轨枕非等间距布置及轨下结构缺陷等现象的存在, 因此时域法正逐渐成为车辆与轨道相互作用模拟的主要方法. 两种新型快速数值积分法在该领域的成功应用^[48], 有效地弥补了时域法计算速度慢的不足.

4 未来车辆与轨道相互作用研究展望

人类现今已经能够准确地模拟飞行体在宇宙空间的运动并进行精确控制, 但却不能精确模拟铁路轮轨之间的相互作用. 由此足以说明轮轨关系及车辆与线路相互作用领域仍然存在大量尚待研究的重要课题. 综合以前成果及近期进展, 在车辆/轨道相互作用研究发展趋势方面有以下几点结论:

(1) 车辆与线路系统的各子系统研究已日趋完善, 应将车辆与轨道综合为一个整体系统, 从大系统的角度来考察子系统间的相互作用关系及其对各个子系统之影响.

(2) 低频轮轨相互作用 (如机车车辆运行平稳性和曲线通过性能等) 研究相对来说已较成熟, 中高频范围内的轮轨相互作用研究迫切需要加强, 如轮轨噪声问题是高频轮轨相互作用的结果, 在高速行车条件下将变得十分突出.

(3) 高速与重载铁路的迅速发展, 迫切要求对轮轨相互作用有更深刻的认识. 深入研究高

速度及重轴载运行条件下的车辆与轨道相互作用问题，是今后相当长时期内的重大课题。

(4) 发展性能可靠、适应性强的车辆与轨道相互作用综合分析软件，是一项尚待开发的工作。分析结果的可靠性需由典型试验特别是线路运行试验来确认，最终可用软件模拟代替或部分代替一些昂贵的线路试验。

关于车辆与轨道相互作用研究领域尚未解决的重要问题，主要有以下几个方面：

(1) 大蠕滑状态下的蠕滑力 - 蠕滑率关系，具有轮轨表面不平顺时的非稳态、非线性蠕滑规律。这是研究复杂轮轨相互作用的基础。

(2) 不同线路条件的轨道不平顺谱，特别是表征我国干线的轨道谱及轮轨表面粗糙度谱。这又是分析轮轨系统随机振动的前提。

(3) 轨道结构的参数（刚度、阻尼等）识别，特别是轨下胶垫和道床的非线性动力行为，例如 0 ~ 3000 Hz 范围内胶垫的动刚度特性，必须通过试验测量加以确定，从而可为轮轨相互作用模型提供重要的基础数据。

(4) 线路结构的长时效应（如道床下沉）模拟。建立恰当的模型，模拟车辆/轨道相互作用与这种效应的关系，以便为线路维护提供预测和指导。

(5) 路基动力学行为的数值模拟，包括弹性半空间理论的应用。

(6) 特殊类型的轮轨相互动力作用分析，如非传统结构转向架（独立轮对、单轮对转向架等）与轨道的动力作用问题，轨道纵向非均匀支承参数（如非均匀刚度、非等距轨枕间距等）对轮轨相互作用的影响等等。

参 考 文 献

- 1 Winkler E. Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit. Prag: Verlag H. Dominikus, 1867
- 2 Timoshenko S. Method of analysis of statical and dynamical stresses in rail. Proc 2nd Int Congress for Appl Mech, Zürich, 1926. 407 ~ 418
- 3 Dörr J. Das unendliche, federnd gebettete Balken unter dem Einfluß einer gleichförmig bewegten Last. *Ing Arch*, 1943, 14: 167 ~ 192
- 4 Knothe K. Past and future in vehicle/ track interaction. *Vehicle System Dynamics*, 1995, 24 (Supplement): 3 ~ 6
- 5 Prud'homme A, Janin G. The stability of tracks laid with long welded rails, parts I and II. *Bulletin of the International Railway Congress Association*, 1969, 88: 460 ~ 480
- 6 Lyon D. The calculation of track forces due to dipped rail joints, wheel flats and rail welds. 2nd ORE Colloquium on Technical Computer Programs, 1972
- 7 Jenkins H H, et al. The effect of track and vehicle parameters on wheel/ rail vertical dynamic forces. *Railway Engineering Journal*, 1974, 3 (1): 2 ~ 16
- 8 Newton S G, Clark R A. An investigation into the dynamic effects on the track of wheel flats on railway vehicles. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1979, 21 (4): 287 ~ 297
- 9 Clark R A, et al. An investigation into the dynamic effects of railway vehicle running on corrugated rail. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1982, 24 (2): 65 ~ 76
- 10 Sato Y. Abnormal wheel load of test train. *Permanent Way (Tokyo)*, 1973, 14: 1 ~ 8
- 11 Ahlbeck D R, et al. The development of analytical models for railroad track dynamics. In: *Railroad Track Mechanical & Technology*. Pergamon Press, 1978
- 12 吴章江, 王浦强, 李湘敏, 李景昌. 车辆通过轨道低扣接头的垂向轮轨作用力计算. *铁路机车车辆*, 1982, (1): 24 ~ 30
- 13 Singh V V. Evaluation of track stiffness and track damping. *Journal of Sound and Vibration*, 1984, (1): 129 ~ 135
- 14 翟婉明, 王其昌. 轮轨动力分析模型研究. *铁道学报*, 1994, 16 (1): 64 ~ 72
- 15 李定清. 轮轨垂直相互动力作用及其动力响应. *铁道学报*, 1987, 9 (1): 1 ~ 8
- 16 许实儒, 徐维杰, 仲延禧. 钢轨接头处轮轨冲击力的模拟分析. *铁道学报*, 1989, (工务工程专辑): 99 ~ 109
- 17 Schwab C A, Mauer L. An interactive track/ train dynamics model for investigating system limits in high speed track. In: *The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks*, 11th IAVSD Symposium, 1989. Swets &

- Zeitlinger, 1989. 502 ~ 514
- 18 Sueoka A, Ayabe T, Kawakami M, Tamura H. An approximate model with an infinite number of vehicles for analysis of coupled vibrations between railway vehicle wheels and rail in the vertical direction. *Int J of JSME, Series III*, 1988, 31 (4) : 739 ~ 747
 - 19 Nielsen J C O. Train/track interaction: coupling of moving and stationary dynamic systems: [Dissertation]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 1993
 - 20 Cai Z, Raymond G P. Theoretical model for dynamic wheel/rail and track interaction. Proc 10th Int Wheelset Cong. Sydney, Australia, 1992. 127 ~ 131
 - 21 Chen D, et al. Non-stationary random irregularities on heavy haul railway track in China. Proc 5th Int Heavy Haul Railway Conf. Beijing, 1993. 489 ~ 496
 - 22 王澜, 姚明初. 轨道结构随机振动理论及其在轨道结构减振研究中的应用. *中国铁道科学*, 1989, 10 (2) : 41 ~ 59
 - 23 翟婉明. 车辆-轨道垂向系统的统一模型及其耦合动力学原理. *铁道学报*, 1992, 14 (3) : 10 ~ 21
 - 24 Zhai Wanming, Sun Xiang. A detailed model for investigating vertical interaction between railway vehicle and track. *Vehicle System Dynamics*, 1994, 23 (Supplement) : 603 ~ 615
 - 25 Zhai W M, Cai C B, Guo S Z. Coupling model of vertical and lateral vehicle/track interactions. *Vehicle System Dynamics*, 1996, 26 (1) : 61 ~ 79
 - 26 翟婉明. 高速铁路轮轨系统的最佳动力设计原则. *中国铁道科学*, 1994, 15 (2) : 16 ~ 21
 - 27 翟婉明. 高速铁路轮轨冲击振动的特征及其控制原理. *铁道学报*, 1995, 17 (3) : 28 ~ 33
 - 28 Zhai Wanming, Wang Kaiwen, Fu Maohai, Yan Junmao. Minimizing dynamic interaction between track and heavy haul freight cars. Proc 5th Int Heavy Haul Railway Conf. Beijing, 1993. 157 ~ 162
 - 29 翟婉明, 严隽毫, 孙翔. 大型货车对线路动力影响的研究. *西南交通大学学报*, 1993, (5) : 37 ~ 41
 - 30 Ripke B. Hochfrequente Gleismodellierung und Simulation der Fahrzeug - Gleis - Dynamik unter Verwendung einer nichtlinearen Kontaktmechanik. *VDI Fortschritt - Berichte*, Reihe 12, Nr. 249, Düsseldorf: VDI - Verlag, 1995
 - 31 Ripke B, Knothe K. Simulation of high frequency vehicle - track interactions. Interaction of Railway Vehicles with the Track and its Substructure, *Vehicle System Dynamics*, 1995, 24 (Supplement) : 72 ~ 85
 - 32 Dong R G, Sanker S, Dukkupati R V. A finite element model of railway track and its application to the wheel flat problem. Proc Instn Mech Engrs, Part F. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 1994, 208 : 61 ~ 72
 - 33 Diana G, et al. Interaction between railroad superstructure and railway vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 1994, 23 (Supplement) : 75 ~ 86
 - 34 翟婉明 著. 车辆-轨道耦合动力学. 北京: 中国铁道出版社, 1997
 - 35 翟婉明, 蔡成标, 史炎, 王其昌. 车辆-轨道相互作用统一模型及软件的试验验证. *铁道学报*, 1996, 18 (4) : 42 ~ 46
 - 36 Grassie S L, et al. The dynamic response of railway track to high frequency vertical/lateral/longitudinal excitation. *J Mech Eng Sc*, 1982, 24 (2) : 77 ~ 102
 - 37 Grassie S L, et al. The behaviour of railway wheelsets and track at high frequencies of excitation. *J Mech Eng Sc*, 1982, 24 (2) : 103 ~ 110
 - 38 Knothe K, Strzykowski Z, Willner K. Rail vibrations in the high frequency range. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, 169 (1) : 111 ~ 123
 - 39 Hempelmann K. Short pitch corrugation on railway rails—A linear model for prediction. *VDI Fortschritt - Berichte*, Reihe 12, Nr 231, Düsseldorf: VDI - Verlag, 1994
 - 40 Remington P J, et al. Wheel/rail noise, part I—IV. *Journal of Sound and Vibration*, 1976, 46 (3) : 359 ~ 451
 - 41 Thompson D J. Wheel - rail noise generation, part I—V. *Journal of Sound and Vibration*, 1993, 161 (3) : 387 ~ 482
 - 42 Knothe K, Grassie S L. Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies. *Vehicle System Dynamics*, 1993, 22 (3/4) : 209 ~ 262
 - 43 Garg V K, Dukkupati R V. Dynamics of Railway Vehicle System. Academic Press, 1984
 - 44 Carter F W. On the action of locomotive driving wheel. *Proc Roy Soc London, Ser A*, 1926, 112 : 151 ~ 157
 - 45 Kalker J J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact. *Vehicle System Dynamics*, 1982, 11 : 1 ~ 13
 - 46 Shen Z Y, Hedrick J K, Elkins J A. A comparison of alternative creep force model for rail vehicle dynamic analysis. Proc 8th IAVSD Symposium, MIT, Cambridge, 1983. 591 ~ 605
 - 47 卡尔克著. 三维弹性体的滚动接触. 李自力译. 成都: 西南交通大学出版社, 1993
 - 48 Zhai Wanming. Two simple fast integration methods for large - scale dynamic problems in engineering. *Int J Numer Methods Eng*, 1996, 39 (24) : 4199 ~ 4214

VEHICLE/ TRACK INTERACTIONS : THE STATE - OF - THE - ART

Zhai Wanming

Train & Track Research Institute , Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China

Abstract Vehicle/track dynamic interaction is very important for the wheel/ rail system. A review is here briefly presented of the historical background of the wheel/ rail interaction. Recent advances are reviewed on the research in this domain. And recommendations are made for the future research on the vehicle/ track dynamic interactions.

Key words vehicle , track , wheel/ rail interaction , dynamics

www.cnki.net