

# 第1章 绪论

随着国家经济建设和西部大开发战略的深入推进，“货运重载”继“客运高速”之后，成为我国铁路发展的又一大引擎，是实现中长距离大宗货物运输的最佳途径<sup>[1]</sup>。重载机车牵引性能的发挥效果依赖于轮轨粘着利用状况，粘着系数、粘着故障等粘着状态的高精度检测是确保高性能粘着利用的前提条件，而复杂多变的轮轨条件给轮轨粘着状态检测带来了挑战。

## 1.1 重载运输概述

自1978年的国际重载运输大会首次召开和1985年的国际铁路重载协会正式成立之后，国际重载运输大会每4年召开一次。国际重载协会对重载铁路运输标准做了多次制（修）订，而目前仍延续使用的定义是国际铁路重载协会于2005年在巴西举办的理事会上修订的版本，指出重载运输至少满足以下3条标准中的2条：列车质量不少于8000 t；轴重 $\geq 27$  t；在运输线路不少于150 km的线路上，年运输量 $\geq 4000$ 万吨<sup>[2, 3]</sup>。

国外重载运输技术主要集中在美国、加拿大、澳大利亚、巴西、南非等煤炭、矿石等资源丰富的国家。美国是世界上重载运输技术起步较早的国家，世界上第一

辆重载单元列车于 1958 年在美国运营,其重载编组模式为固定式,运量巨大且集中,采用 85 节载重单元组成运力为 7 600 t 的矿石运输专列,同时为扩大重载运输市场,开行了双层集装箱重载货物列车<sup>[4]</sup>;加拿大重载运输模式为单元列车模式,同时开行双层集装箱列车运输模式<sup>[5, 6]</sup>;澳大利亚不仅有窄轨重载运输线路,还有准轨线路,尤其是 2001 年开行的重载列车,从编组数量、长度、净载重、总重等方面,均创造了世界重载运输记录;巴西拥有多家经营重载运输的公司,如维多利亚·米纳斯铁路 (EFVM)、卡拉雅斯铁路 (EFC) 等公司;南非的重载运输是在引进北美重载单元列车技术的基础上,结合本国实际特点经改造而发展起来的<sup>[7]</sup>。

中国的重载运输起步较晚,从最初的引进、学习、借鉴,到后来自行研制 6 轴机车,经过几十年的吸收与升华,中国的重载技术已有了很大的进步<sup>[8]</sup>。目前,在大秦、大包、蒙西、瓦日和朔黄等多条线路均开行了重载列车。整体来说,中国的重载运输发展大致经历以下阶段:第一阶段为改造既有线路,开行组合式重载列车阶段;第二阶段为新建大秦线,开行单元重载列车阶段;第三阶段为改造繁忙干线,开行混编重载列车阶段。

## 1.2 重载机车轮轨粘着检测技术研究现状

重载机车牵引/制动力的有效发挥依赖于轮对和钢轨接触时形成的粘着力,机车通过粘着作用获得并保持运行所需粘着力的本质就是通过控制牵引电机输出转矩调

整轮轨蠕滑速度，实现轮轨粘着的高性能利用<sup>[9]</sup>。

重载机车轮轨粘着利用技术从 20 世纪 60 年代起就得到了世界范围内的广泛关注。日本的粘着控制器已发展到第三代，尤其在高速铁路粘着控制领域处于领先地位；采用微处理器的 FAIVELEY AEF 83P 型防空转/滑行装置已得到法国国营铁路的认可；美国通用公司研发的粘着控制系统可在轨面连续变化的情况下，将粘着系数从 0.18 提升到 0.35，这意味着 3 台机车就能完成原来需要 5 台机车才能完成的工作<sup>[10]</sup>。

国内粘着利用技术起步较晚，研究机构主要集中在西南交通大学、中国铁道科学研究院、中车株洲电力机车有限公司等高校和科研院所。目前，我国的粘着控制装置仍以引进为主，如 ND5 内燃机车引用的是美国 GE 公司的粘着控制装置，8K 型电力机车引用的是法国 FAIVELEY 公司的再粘着控制装置。在引进国外技术的基础上，我国也自主研发了 TFX1、SFH-2 等粘着和防滑控制装置，如中车株洲电力机车有限公司研发了高粘着重载机车 C0 转向架，中车株洲电力机车研究所有限公司研制的粘着控制装置已成功应用在出口南非的 20E 型机车上。

确保粘着工作点（实时粘着系数）位于最大粘着系数附近是实现高性能粘着利用的基本条件，而最大粘着系数处于粘着特性稳定区和非稳定区的交界处，且随轮轨运行条件的变化而改变<sup>[11, 12]</sup>，这给粘着利用的操作调整带来了困难，调整幅度过大易使系统进入空转/滑行等故障情况的非稳定区，调整幅度过小又难以保证牵引性能的有效发挥。另外，若机车驱动力超过最大粘着力，将可能发生空转/滑行等严重故障，造成列车运缓、坡停，严重时还会擦伤轮轨，损坏机车零部件，甚至导致脱轨

等重大事故<sup>[13]</sup>。如 2014 年 3 月 26 日发生在湖南省娄底市的 26326 次货运列车脱轨、2017 年 1 月 5 日发生在纽约的列车脱轨、2016 年 10 月 21 日发生在喀麦隆的超载失控等事故。若能在机车运行的可控范围内及时检测出这些故障或故障隐患等情况，并采取措施加以控制，将有效避免类似事故的发生。因此，对机车轮轨粘着检测是一个亟待解决的关键问题。

实现重载机车高性能粘着利用的前提条件不仅要实时检测粘着系数和最大粘着系数，还要对运行过程中发生的空转/滑行等粘着故障进行检测。而由于轮轨粘着特性由轮轨接触物理性质决定，且随着轨道状况和蠕滑速度等因素不同，轮轨粘着特性表现出非线性、快时变等特征，即使同一地点的粘着特性也会因环境不同而发生显著变化，相应的最大粘着系数也会随之改变。例如，当存在雨雪、油污污染等介质干扰时，轮轨粘着系数将明显降低，相应的最大粘着系数也迅速下降。由于我国资源型货物的产地和消耗地存在地域空间的分割，重载列车运行地域范围广，运行中天气、坡度和线路曲率随地理位置变化而变化。这种复杂多变的运行环境使重载机车面临的轮轨条件更加恶劣，给粘着系数和粘着故障检测均带来了挑战。

### 1.2.1 粘着系数检测技术国内外研究现状

轮轨实时粘着系数工作在最大粘着系数附近是牵引动力高性能利用的标志，而复杂多变的轮轨条件加大了粘着系数的检测难度，轮轨粘着系统建模、实时粘着系数和最大粘着系数检测一直是粘着检测技术研究的热点问题。

## 1. 轮轨粘着系统建模技术

轮轨粘着关系模型是粘着系数和蠕滑速度之间关系的形式化描述，是深入分析轮轨粘着曲线特性的有效手段，可为实时粘着系数和最大粘着系数检测提供理论依据和先验知识。轮轨粘着系统建模可从粘着机理建模和试验研究两方面进行综述。

在粘着机理模型建立方面，Carter 在英国皇家学会上发表的轮轨粘着-蠕滑特性研究报告中，基于 Hertzian 原理和 Coulomb 理论将机车轮轨接触斑分为粘着区和蠕滑区，开启了轮轨粘着系统建模研究的序幕<sup>[14-16]</sup>。之后出现了 Johnson-Vermeulen 蠕滑率/力模型、Kalter 模型、Polach 粘着模型等<sup>[17, 18]</sup>。Vo 等为探讨轮轨粘着和温升之间的关系，构建了三维柔性有限元模型<sup>[19]</sup>。肖乾等利用混合拉格朗日欧拉方法，建立了轮轨滚动接触三维有限元模型<sup>[20]</sup>。常崇义等基于随机拉格朗日欧拉有限元法建立轮轨稳态滚动接触三维弹性体有限元模型<sup>[21]</sup>。王文健等通过分析不同介质下的轮轨粘着特性，构建了轮轨粘着模型<sup>[22-24]</sup>。常崇义等较详细论述了干燥条件和“第三介质”存在时的粘着蠕滑机理研究进展<sup>[25]</sup>。

在试验研究方面，中国铁道科学研究院高速轮轨关系试验室搭建的 1:1 高速轮轨试验台，可完成高速状态下轮轨粘着特性试验性能的研究<sup>[26]</sup>。西南交通大学牵引动力国家重点实验室利用 1:1 整车滚振试验台分别研究了干燥和喷水状况下粘着系数和蠕滑速度之间的关系<sup>[27]</sup>。Ohyama T 采用大型尺寸试验装置研究了干燥和潮湿状态对粘着特性的影响<sup>[28]</sup>。王文健等结合轮轨粘着试验，并基于二维滚动接触理论和部分弹流润滑理论建立了轮轨粘着数值仿真模型，给出了水油介质下轮轨表面粗糙度对轮

轨粘着系数的影响规律<sup>[29]</sup>。考虑到物理样机仿真实验过程中的费用昂贵等因素,张昌凡等利用机械多体动力学仿真软件 ADAMS 的可视化特点和 MATLAB 强大的函数库功能,搭建了转向架、机车车体、机车轮轨等机车关键部件模型<sup>[30]</sup>,并通过调整相应的参数,以模拟不同轮轨条件下的机车运行状态,进而通过 ADAMS/Control 模块,将仿真模型导入 MATLAB/Simulink 中,实现 ADAMS 与 MATLAB 之间的协同仿真。

然而,现有的模型大多是轮轨条件确定下的静态粘着系统模型,模型参数受轮轨条件影响较大,如水介质下的粘着系数比干态下降低了 40%。而且,受雨、雪、落叶、砂土等复杂多变轮轨条件的影响,轮轨粘着特性表现为强烈的不确定性和非线性,不利于现有模型在实际系统中的应用。

## 2. 实时粘着系数检测技术

基于机理模型和基于数据分析是常见的实时粘着系数检测技术。在机理模型方面,Kadowaki 等基于实时驱动转矩与给定值的比较分析,给出了轮轨粘着系数的计算方法<sup>[31]</sup>;Sadr 等通过构建机车加速模型,设计了粘着系数估计策略<sup>[32]</sup>;Spiryagin 以轮速和驱动转矩为基础估算了粘着系数<sup>[33]</sup>。毕鑫等采用线性蠕滑理论和非线性修正方法,推导出轮轨接触点的蠕滑力计算公式<sup>[34]</sup>。林文立等通过分析粘着系数和负载转矩的关系,利用负载转矩观测器,实现了粘着系数的间接估算<sup>[35]</sup>。张昌凡等人通过构造级联形式的负载转矩和转矩导数观测器,可同时获取粘着系数及其变化规律<sup>[36]</sup>。

在数据分析方面,Castillo 等利用神经网络估计了 ABS 系统中的粘着系数<sup>[37]</sup>。

Pichlík 等基于机车模型和机车运行速度,提出了基于卡尔曼滤波的粘着力计算方法<sup>[38]</sup>。Hussian 等基于多级卡尔曼滤波和模糊逻辑,给出了轮轨粘着条件评价方法<sup>[39]</sup>。Cai 等通过构造观测器实现了粘着系数的感知<sup>[40, 41]</sup>。Xu 等利用机车车轮旋转速度和牵引转矩在线检测了轮轨粘着系数<sup>[42]</sup>。同时,在负载转矩不变时,通过构造扰动观测器实现粘着系数的估计,也可获得较好的应用效果<sup>[43]</sup>。

尽管基于模型和基于数据的实时粘着系数检测方法在特定环境与情况下的检测效果较好,但各有局限性:如基于模型的观测器方法对噪声敏感较大,基于数据的神经网络方法又需要数据样本标签完备。而重载机车复杂作业环境的诸多特点导致重载机车运行数据的不完备性,且数据中存在的非高斯噪声等不确定扰动,增加了现有方法对实时粘着系数的辨识难度。

### 3. 最大粘着系数检测技术

粘着斜率法和蠕滑速度法是常见的最大粘着系数检测方法。粘着斜率法主要通过计算粘着特性曲线的斜率来搜寻粘着峰值点,这实际上等价于粘着系统模型中粘着系数对蠕滑速度的导数,其值在粘着区为正,空转或滑行区为负,而在最大粘着系数点处为零。蠕滑速度法则是通过调节蠕滑速度,使其反复地增加和降低,自动搜寻最大粘着系数。然而,粘着斜率法是基于线性化的机车牵引模型,其观察频率工作点范围很小;蠕滑速度法采用的蠕滑速度需将车轮速度和车体速度进行换算才能得到,由于尚不具备经济适用的车速测量方法,该法在实际应用时效果欠佳。

基于运行数据的最大粘着系数获取方法也得到了重视。Aguilar 等提出基于神经

网络的最大粘着系数获取方法<sup>[44]</sup>；何静等基于 Kiencke 粘着-蠕滑模型，构造了极大似然意义下的模型参数辨识框架，进而将参数估计问题转化为二次规划问题进行求解，建立了依据轮轨条件实时更新参数的最大粘着系数辨识模型<sup>[45]</sup>。

考虑到粘着特性曲线实际上的非线性特点<sup>[46]</sup>，有学者提出预设几条标准轨面，然后基于实时运行数据在线辨识当前机车所在的轨面，通过标准轨面与当前轨面的非线性关系，在线辨识轮对最大粘着系数<sup>[47]</sup>，其中较为常见的有轨面辨识方法有模糊辨识、基于支持向量机（SVM）、最小二乘法等方法。

在基于模糊系统的轨面辨识中，模糊系统利用观测到的粘着系数和蠕滑速度值进行模糊辨识，输出和当前轨面最接近的标准轨面，进而得到当前轨面环境下的粘着峰值点<sup>[48-52]</sup>。由于蠕滑速度、粘着系数这两个量的观测存在不确定性，所以应用模糊系统的方法进行在线轨面辨识可以有效地避免这种不确定性所带来的误差<sup>[53]</sup>。针对单纯的模糊辨识方法的缺陷，引入轨面相似度概念，利用模糊逻辑推理得出当前轨面和标准轨面的相似度，然后相似度作为权值对各个标准轨面的粘着峰值进行加权平均，得到的值作为当前轨面的峰值点<sup>[47]</sup>，以规避单纯模糊辨识方法中识别结果都为预设的固定值的缺陷，相似度的引入使得辨识结果相对有所提升。但和单纯模糊辨识方法一样，该方法所得出的辨识结果也依赖于预设的标准轨面参数的合理性。

在基于支持向量机（SVM）的轨面辨识方法中，利用分类好的离线数据训练最佳分类函数，当机车运行时，根据观测到的粘着系数和蠕滑速度计算分类函数的值，得到当前所在的标准轨面，进而获得当前轨面的粘着系数峰值点<sup>[54]</sup>。另外，有学者提出



使用最小二乘法来在线辨识<sup>[55]</sup>，以提高对粘着性能参数的估计精度。该类方法为了实现在线实时地估计出粘着性能参数，使用了递推最小二乘法来实现算法<sup>[56, 57]</sup>。该类方法能突破算法对预设标准轨面的依赖，对机车环境变化能够有一定的适应能力，提高了估计算法的精确度。

综上所述，无论是基于机理还是基于数据的实时粘着系数和最大粘着系数辨识方法，都很少考虑因轮轨条件多变引起粘着特性变化问题。且受地域跨度广、地形和线路复杂、运行范围宽等客观条件制约，不同轮轨条件的关键变量和参数都可能发生随机变化，这种复杂多变的运行环境使重载机车面临的轮轨条件更加恶劣，加大了粘着特性的精确分析难度。

### 1.2.2 粘着故障检测技术国内外研究现状

重载机车运行过程中的空转、打滑等粘着故障时有发生，能有效检测出这些故障不仅可为粘着控制提供依据，还可为预防故障恶化提供支撑。粘着故障通常分为两类：一是特征比较明显，利用常规手段较易检测出的显著故障；二是特征不明显，利用常规手段难以检测，但经过时间累计可发展为显著故障的微小故障或故障隐患<sup>[58-60]</sup>。

#### 1. 显著粘着故障检测

机车运行时出现的空转、打滑等故障常伴随着列车某些状态的明显变化，如发生空转时的车轮转速大于正常车轮转速、车轮速度发生突变时加速度增大、空转时

的定子实际电流和基准电流的差大于设定阈值等，这些可通过运行状态变化判断的故障均可表示为显著粘着故障。蠕滑率、速度差、加速度、加速度微分、电流差等判据方法是常见的显著粘着故障检测方法<sup>[61]</sup>。然而，这些方法的适用性受制于车轮速度、蠕滑速度等运行数据检测的精确程度，对噪声的抑制鲁棒性较差。

从机车运行数据统计规律出发，He 等针对车轮状态检测中存在的类间样本误分代价不等的问题，利用自适应变异粒子群算法优化支持向量机参数，提出了参数优化的轮轨粘着故障检测方法<sup>[62]</sup>。陈哲明等利用改进的递归最小二乘算法预测粘着-蠕滑曲线斜率，以判断车轮是处于粘着状态还是滑动状态<sup>[63]</sup>。Wang 等通过集成多速率法和扩展卡尔曼滤波方法测量牵引转矩，以实现机车滑行故障检测<sup>[64]</sup>。Sichani 等基于轮轨粘着模型，利用机车动态仿真环境，分析了运行故障引起的危害<sup>[65]</sup>。Gou 等提出了电力牵引传动系统的牵引变流器开环切换故障诊断方法<sup>[66]</sup>。Hussain 等基于运行数据和先验知识，构造了基于卡尔曼滤波和模糊逻辑多级模型的粘着故障检测方法<sup>[67]</sup>。鉴于滑模观测器较高的鲁棒性能，加之算法简单、实时性强、易于工程实现，在粘着故障检测方面也得到了应用<sup>[68]</sup>。

## 2. 微小粘着故障检测

粘着微小故障通常包括不明显的微小故障和未发生的故障隐患，前者通常指故障已经发生但故障特征不明显，偏离正常运行状态程度较小，难以被检测的故障类型；后者是指机车仍处于正常运行状态，故障尚未发生，但依据系统运行状态的动态变化趋势，极有可能发展为故障的故障隐患。现有的微小故障检测方法主要包括