

©西南交通大学博士学位论文精品文库

文库

# 机车车辆运行动态模拟研究

全国百篇优秀博士学位论文



著者 © 张卫华 导师 © 沈志云



西南交通大学出版社



西南交通大学博士学位论文精品文库  
——全国百篇优秀博士学位论文

# 机车车辆运行动态模拟研究

Jiche Cheliang Yunxing Dongtai Moni Yanjiu

著 者 张卫华  
导 师 沈志云  
专 业 机车车辆

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·

-----  
**图书在版编目 ( C I P ) 数据**

机车车辆运行动态模拟研究 / 张卫华著. —成都: 西南交通大学出版社, 2006.5

(西南交通大学博士学位论文精品文库)

ISBN 7-81104-216-9

I. 机... II. 张... III. 机车—车辆运行—动态模型—研究 IV. U260.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 004441 号  
-----

西南交通大学博士学位论文精品文库

**机车车辆运行动态模拟研究**

**著者 张卫华**

责任编辑	刘莉东
责任校对	韩松云
封面设计	王 可
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 . 028-87600533
邮 编	610031
网 址	<a href="http://press.swjtu.edu.cn">http://press.swjtu.edu.cn</a>
电子邮箱	<a href="mailto:cbsxx@swjtu.edu.cn">cbsxx@swjtu.edu.cn</a>
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	11
字 数	189 千字
版 次	2006 年 5 月第 1 版
印 次	2006 年 5 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-81104-216-9
定 价	38.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 西南交通大学博士学位论文精品文库

## 编 委 会

编委主任 周本宽

编委副主任 蒲 云

委 员 (按姓氏笔画为序)

王怀东 刘建新 罗中琼

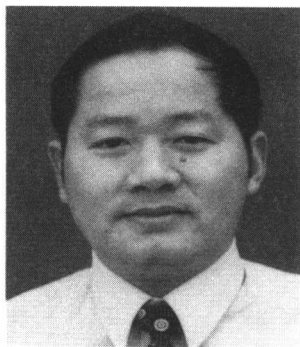
郑凯锋 夏显波 梁 娜

曾家刚

## 作者简介

张卫华，西南交通大学教授，博士生导师。1961年4月生，1983年毕业于西南交通大学机械系，1996年获工学博士学位。现任西南交通大学牵引动力国家重点实验室主任，教育部“长江学者奖励计划”特聘教授。四川省和铁道部学科带头人，人事部新世纪百千万人才工程国家级人选。获国家杰出青年科学基金和教育部跨世纪优秀人才基金重点资助。长期从事机车车辆设计理论、车辆系统动力学及机车车辆试验的科研和教学工作。主持各类纵向课题20余项，其中主持国家自然科学基金项目5项，国家科技攻关重点项目3项，国际合作项目6项。先后发表学术论文110余篇，专利授权10项。获国家、铁道部和四川省科技进步一等奖、茅以升铁道科技奖和詹天佑铁道科技奖——成就奖，两度获得国家重点实验室建设先进工作者——金牛奖。

（注：此论文完成于1996.8）



摘

要

本论文就铁路机车车辆滚动振动试验台进行专题研究,并在以下几个方面进行了系统研究:

(1) 系统论述了滚动振动相结合的必要性,研制了世界上第二台滚动振动试验台。

滚动振动试验台试验作为机车车辆动力学性能试验研究的有效手段,在世界铁路机车车辆的发展中发挥了重要作用。本论文简述了世界各国有关机车车辆动力学试验台的发展情况,对已有滚动、振动试验台进行了系统介绍和对比。提出采用静态轨道谱作为滚动振动试验台的轨道模拟激振输入,并探讨其科学性和合理性;论述了滚动和振动相结合是机车车辆性能预测的最佳途径。在此基础上,研制了我国第一台、世界第二台机车车辆整车滚动振动试验台。论文研究了试验台的方案形式和关键技术,介绍了试验台的结构、系统组成、主要参数、功能情况。通过实验,验证了该试验台能满足机车车辆运行动态模拟的速度、振动和精度的要求。论文还介绍了试验台自1995年启用以来,所完成的新型机车车辆大型试验的情况,以此说明由于有科学、合理的设计技术路线,试验台研制的成功,在我国高速、重载机车车辆的研制过程中发挥了重要作用。

(2) 首次推导出三维轮/轮接触几何关系,并分析了与轮/轨接触关系的区别。

轮轨接触几何的计算是机车车辆动力学研究的基础。针对滚动(振动)试验台以有限半径的滚轮代替平直钢轨造成的试验台的轮/轮接触有别于轮/轨接触。本论文采用“迹线”法首次对三维空间轮/轮接触关系进行了推

导计算,编制了相应软件,进行了相应的计算。计算了我国 TB 型锥形车轮踏面和 LM 磨耗型车轮踏面与 60 kg 钢轨型面的接触几何状况,比较了两种不同型面配合时的等效锥度、等效接触角,以及接触超前滞后角等接触几何参数。并与线路的轮/轨接触工况进行比较,给出了两种接触工况的接触几何参数的区别,以及这些主要区别对动力学性能的影响。

### (3) 机车车辆试验台试验系统的运行方程的建立和试验运行仿真。

机车车辆系统动力学研究尽管比较成熟,但机车车辆——滚动振动试验台系统的动力学数学模型有它的特殊性。本论文从轮轨接触几何关系的创建,轮轨相对运动蠕滑率、轮轨蠕滑力计算公式的推导,轮对运动方程到整车运动方程的推导,首次建立了机车车辆——滚动振动试验台系统的动力学数学模型,并编制了机车车辆试验台试验的动态计算机仿真软件。为针对机车车辆试验台试验有关问题的研究创造了条件。

(4) 解决机车车辆非线性系统运动的稳定性求解方法和试验方法,系统分析机车车辆试验台稳定性试验与线路运行的差别,以及试验台误差对机车车辆稳定性试验结果的影响。

滚动振动试验台的一个主要功能就是进行机车车辆运动稳定性试验,这也是纯滚动试验台所具有的唯一功能。由于试验台的轮/轨接触有别于线路的轮/轨接触,这一差别导致了试验台的试验结果有别于线路试验,特别是蛇行失稳试验(即运动稳定性试验)。另外,由于机车车辆系统,包括轮轨关系,实际上是非线性的,而机车车辆非线性蛇行失稳临界速度有别于线性系统,它与线路的激扰有关。为此,本文重点对机车车辆非线性系统运动稳定性问题进行研究,提出作用 Poincare 点映射方法,通过判断其不动点的稳定性来求得机车车辆非线性系统运动的极限环及其稳定性。同时利用滚动振动试验台,提出了一套机车车辆非线性稳定性试验方法,并得到车辆实车的非线性稳定性 Hopf 分叉点和极限环曲线,通过试验验证线性失稳临界速度和非线性失稳临界速度的区别。

利用机车车辆非线性稳定性求解方法编制了计算软件;结合准高速、高速客车以及货车动力学性能试验,对计算软件进行了验证。在此基础上,进行有关机车车辆蛇行失稳试验台试验与线路试验之间的误差分析。分析表明,在试验台上试验所得到的蛇行失稳临界速度低于线路状态下的实际值,而且具体的误差值与机车车辆本身的结构有关,特别是与一系列悬挂参数有关。这一研究结果对机车车辆试验台试验结果的分析和修正提供了理论依据。

本论文利用稳定性极限环幅值—速度关系图,对八种试验台可能存在的状态误差导致机车车辆试验台稳定性试验误差进行了详细分析,这些分析的结果对认识试验的特性和如何正确使用好滚动(振动)试验台有着重要的指导意义。利用这些分析结果对指导试验、调整试验台有着重要的参考价值,在机车车辆试验台试验运行中得到广泛应用。

(5) 反演得到轨道谱,研究了机车车辆试验台平稳性试验方法及其误差。

滚动振动试验台最大的优点是模拟轨道不平顺,利用滚动振动试验台就可以进行机车车辆运行平稳性试验,这是一般纯滚动试验台所不具备的。但由于此前我国还没有轨道谱,无法进行平稳性试验。为此本论文利用随机波形再现技术,提出利用滚动振动试验台进行轨道不平顺谱的反演,并就轨道不平顺的反演技术进行了研究,提出了具体的轨道谱反演试验方法。通过试验得到了我国第一条轨道谱,为机车车辆试验台平稳性试验提供了必要条件,解决了我国没有标准轨道谱的难题。

论文结合高速客车的平稳性试验,就机车车辆试验台平稳性试验的可行性以及机车车辆试验台试验和线路平稳性试验的误差进行了分析。理论分析表明,在试验台上所进行的车辆平稳性试验,其平稳性指标较线路运行略高。这一研究结果同样对机车车辆试验台模拟运行试验结果的修正,具有重要理论依据和参考价值。

由于试验台有弹性,本论文对试验台其频率响应特性进行了实际测试,找出试验台的自振频率和最不利运行速度,以指导试验的开展。论文就试验台弹性对平稳性试验的影响,在理论上进行了计算分析。首次提出通过修正激振信号来减少试验台弹性对试验结果的影响,以提高机车车辆平稳性试验结果的正确性。

(6) 研究了小比例模型试验的相似关系,指出 1:1 试验台试验的必要性。

由于小比例试验台造价低,国内外建成较多。结合曼彻斯特城市大学的 1:5 滚动试验台,进行相似关系的研究,发现轮轨接触的固有特性使相似比例无法满足动力学相似试验的需要。这样小比例试验结果与 1:1 线路运行结果就有较大差距,从而说明小比例试验台很难在具体的机车车辆研究中发挥作用的原因。进一步提出在建立机车车辆运行动态模拟时,建立 1:1 全尺寸滚动振动试验台的必要性。



## Summary

This dissertation mainly deals with the development of the full-scale roller testing rig for railway vehicles and the studies of dynamic performance by using the roller rig. The following researches are included.

1. As a very useful equipment for the dynamic performance study of railway vehicles, the roller testing rig plays a very important role in the development of rolling stocks and locomotives. The brief review of development of the roller testing rig is presented, and the comparison with other roller rigs in the world are made as well. Viewpoint of using the static track irregularity spectral as the exciting input for the roller rig is pointed out, and its reasonableness is discussed. Based on discoursing upon that the roller's motion combining vibration with rotation is the best way to simulate the vehicle running condition, a new roller testing rig, which is located in National Traction Power Laboratory (TPI.) in P. R. China, is built. In this thesis, the designing scheme and key techniques are studied, and the roller rig's structure, main capacities and applications are introduced. Through the vehicles test on roller rig, it is validated that the roller testing rig's behavior can meet the requirement of simulating vehicles running. It also indicates that the design of the roller rig is successful, and the roller rig is very useful for developing high-speed passenger car and heavy haul freight car.

2. Wheel-rail contact geometry is the basis for the study of railway vehicle dynamics. As the roller rig uses finite radius rollers instead of rail, it makes the roller rig's wheel-roller contact condition different from the wheel-rail case as in the field. Under wheel-roller contact condition, a method that can calculate the contact geometry position, contact patch, creepage and creep coefficient is developed, and the computer program is developed as well. The contact geometric parameters under TB conical wheel profile and LM worn wheel profile (with 60 kg rail profile) are calculated, and both wheel profile's equivalent conicities and equivalent contact angles are compared. With comparing the contact geometric

parameters of the wheel-rail case and wheel-roller case, their differences and influence on vehicle dynamic behavior are investigated.

3. Although the study of vehicle system dynamics comes to perfection, the study of vehicle-roller rig system dynamics is leaving to open. In this thesis, the calculation formulas of wheel-roller contact creepages, creep forces and equations of motion of wheelset are derived. The mathematical model of the vehicle-roller rig system is established, and computer program is developed. This is the basic condition for the study of the vehicle-roller rig system.

4. One of the main capabilities of roller rig is to test and study the stability of rail vehicles. This is also the only function roller rigs (with pure rotation without excitement) have. Because the roller rig's wheel-roller contact condition is different from the actual wheel-rail condition, this results in difference between roller rig test results and field test results, especially for vehicle stability test. Since the characteristics of suspension parameters and wheel-rail (roller) are nonlinear, the hunting stability behavior for nonlinear system is certainly different from linear system. Therefore, the nonlinear system stability of the rail vehicles is studied as a key work in this thesis. The Poincare map method is employed to obtain the limit cycles of the vehicle system and the stability of the limit cycles is determined by studying the stationary point on the map. This is the first time to solve the nonlinear stability problem of rail vehicles successfully by using Poincare map method in China. Meanwhile the test method for nonlinear stability of the rail vehicles is given. Also it is the first time to obtain the real railway vehicle's limit cycle curve and Hopf bifurcation point by roller rig test in the world. The test results validate that there are differences for the hunting critical speeds between linear system and nonlinear system.

According to the method of calculating nonlinear system stability, a computer program for full-size rail vehicle model with full degrees of freedom and full nonlinear suspension characteristics is established, and validated by means of high-speed passenger car and freight car tests on roller rig. Based on it, the differences of rail vehicle's hunting critical

speeds on roller rig and on track are analyzed. The analyze results indicate that the hunting critical speed on roller rig is lower than on track, and the differences are related to the vehicle structure and the suspension parameters, particularly the primary suspension parameters. The analyzed results provide good basis for analyzing and modifying the test results of rail vehicles on roller rig.

The roller rig, as a test equipment, has some state errors such as the gauge, rail cant and yaw angles, etc. These state errors influence test results of railway vehicle's stability as well. Limit cycle amplitude-speed relation is used to determine the hunting critical speed of railway vehicles, the influence of eight state errors on test results are investigated in detail. These analyses are very useful for the roller rig tests of vehicles and the amendment of the test results.

5. Another main function of roller rig (with excitement) is to simulate track irregularity. It means that using the roller rig can simulate the railway vehicles running on the track. Unfortunately, the roller rig can not directly simulate the track random inputs, because up to now there isn't any standard track irregularity spectral in China. Therefore in this thesis, applying the technology of recreating random signals, a method of recreating track irregularity using the testing roller rig is set up, and a test for recreating track irregularity is introduced. The test is very successful, and the first track irregularity input function is obtained in China.

In this thesis, the method of dynamic response test for vehicles on roller rig is given, and the differences of test results on roller rig and on track are studied. The study shows that the ride index on roller rig is slightly larger than that on track. This study is very valuable to modify the response test results.

Since roller rig system has its own dynamic property, its frequency response is measured and the influence of roller rig on the response test results is also investigated. In order to reduce the influence, a test method using modified input signals in accordance with roller rig's elasticity

characteristic as an input signal, is suggested.

6. Finally, a 1 : 5 scale roller rig for railway vehicle, which is located in Manchester Metropolitan University, is introduced. According to the study results of similarity relation, it is found that the similarity relation of the wheel-rail contact can not meet the dynamics similarity relation, and it leads to that results of scale test can not demonstrate the 1 : 1 actual railway vehicle's behaviors. It indicates that it is the only way to simulate railway vehicle's running behaviors by using 1 : 1 full-scale test rig.

1	绪 论 .....	1
1.1	机车车辆发展与试验 .....	1
1.2	机车车辆整车试验台的发展 .....	3
1.3	本论文的主要工作 .....	5
2	机车车辆运行动态模拟方法论证及滚动振动试验台的研制 .....	7
2.1	在我国建立机车车辆动态模拟试验台的必要性 .....	7
2.2	机车车辆试验台的模式 .....	9
2.3	机车车辆动态运行模拟的最佳方案 .....	11
2.4	我国滚动振动试验台的研制 .....	17
2.5	滚动振动试验台动力特性的验证 .....	29
2.6	滚动振动试验台的应用情况 .....	32
3	轮/轮接触关系的研究 .....	36
3.1	轮/轨接触关系研究的现状 .....	36
3.2	轮/轮接触几何关系 .....	37
3.3	轮/轮接触几何关系的计算 .....	46
3.4	轮/轮、轮/轨接触工况的接触几何关系比较 .....	52
3.5	轮/轮接触, 接触斑蠕滑系数计算 .....	55
3.6	接触点区轮轮(轨)曲面间距计算 .....	59
4	车辆——试验台系统轮对运动 .....	63
4.1	轮/轮接触蠕滑率计算 .....	63



4.2	轮对方程 .....	68
5	车辆系统非线性运动稳定性研究 .....	73
5.1	车辆非线性系统周期运动稳定性 .....	73
5.2	车辆动力学模型 .....	76
5.3	车辆非线性系统的运动稳定性问题及计算结果 .....	77
5.4	车辆运动稳定性试验台试验方法 .....	81
5.5	车辆运动稳定性试验台试验实例 .....	83
5.6	总 结 .....	87
6	机车车辆滚动振动试验台稳定性试验与仿真计算比较 .....	89
6.1	25 吨轴重货车试验 .....	89
6.2	仿真计算 .....	91
6.3	200 km/h 高速客车稳定性试验和计算结果比较 .....	100
7	车辆滚动振动试验台稳定性试验结果误差分析 .....	102
7.1	试验台试验对车辆稳定性的影响 .....	102
7.2	准高速客车试验结果误差分析 .....	104
7.3	车辆参数对试验台试验结果的影响 .....	108
7.4	试验台状态对试验结果的影响 .....	111
8	车辆滚动振动试验台平稳性试验研究 .....	120
8.1	轨道不平顺谱的反演获得 .....	120
8.2	平稳性试验的误差分析 .....	130
8.3	滚动振动试验台弹性对车辆垂向振动的影响分析 .....	133
8.4	运行平稳性试验实例 .....	138
9	1:5 比例车辆模型滚动试验台试验不足分析 .....	142
9.1	相似试验 .....	143
9.2	1:5 比例车辆滚动试验台的试验系统介绍 .....	143
9.3	相似比例分析 .....	144
9.4	1:5 模型试验响应误差及相似比分析 .....	148
9.5	1:5 试验台蛇行试验 .....	151
10	结 论 .....	152
	致 谢 .....	155
	参考文献 .....	156



# 绪 论

## 1.1 机车车辆发展与试验

自人类发明蒸汽机车至今的近两个世界的历史长河中,铁路的发展与工业文明的发展总是分不开的。铁路机车车辆更代表着现代工业的发展,从早期的蒸汽机车到后来的内燃机车和发展迅速的电力机车。更快捷、更方便、更安全是铁路技术的发展方向。快捷就是提高列车的运行速度,列车运行速度从火车发明时的一二十公里/小时,发展到20世纪50年代的五六十公里/小时。到了80年代,由于铁路运输与航空及高速公路运输的竞争,促进了铁路的发展。在西方各国,发展高速铁路成为铁路发展的重点,随着高速铁路技术的日趋成熟,列车的运行速度已达到二三百公里/小时,在法国其试验车速度达到515.3 km/h。方便就是要列车准时正点运行,并具有在订票、车内电信方面的便利。安全就是要自动排除一切事故的发生。然而,这一切的保证都在于依靠现代高新技术,包括高速机车车辆技术、现代通讯技术、自动控制技术和检测技术。而这些技术的采用还需要有高水平的试验技术,这包括:试验设备(装置)、试验方法、数据的测试和处理技术。

高速和安全对机车车辆的要求就是高速化、高性能和高可靠度。为此,对机车车辆综合性能的研究和各种新技术的采用是必不可少的,而这些新型机车车辆性能如何,各种新技术是否应用成功,只有通过各种试验

才能验证。<sup>[1~3]</sup> 机车车辆性能试验的类别, 根据不同的试验内容和对象大致可分为四种:

(1) 机车车辆的综合性能试验。如牵引性能、制动性能、粘着、列车阻力空气动力学等。

(2) 机车车辆动力学性能试验。如运行蛇行失稳、运行平稳性、振动冲击、轮轨相互作用等。

(3) 走行安全性试验。如各种安全系统、走行安全限界等。

(4) 零部件特性试验。如各部件静强度及疲劳强度、电气系统性能, 传动装置负荷特性, 发动机动力性能等。

这些试验, 前三项通过线路运行试验或模拟运行试验来进行, 第 4 项零部件特性试验, 则往往通过专用的试验装置来进行, 如缓冲器试验机、疲劳试验装置等。

任何一辆新型机车车辆在正式投入运行以前, 运行试验是必不可少的, 特别是线路运行试验。但随着列车运行速度日益提高, 行车密度的加密及其他种种原因, 要在营业线上进行实车运行试验已变得很困难, 这已成为新型机车车辆开发研究的一大障碍。因此, 各种可进行机车车辆综合性能和动力学性能试验的试验台和试验线相继建成, 为机车车辆研制过程中的中间试验和验收前的检测提供了条件。由于高性能机车车辆模拟运行试验台的试验有着线路试验无法比拟的优越性, 越来越受到铁路发达国家的重视。经过近二三十年的实践, 证实了模拟运行试验台试验与线路运行试验相比具有如下优点:

(1) 可同时进行多项性能试验, 试验周期短, 试验成本低。

(2) 有效的试验可缩短机车车辆的研究时间, 节约研究经费。

(3) 试验台试验具有良好的重复性。

(4) 在试验台试验可排除各种干扰, 进行单因素分析。

(5) 可进行线路上无法进行的试验, 如超高速运行, 蛇行失稳, 各种人为设置的极端条件下的运行试验等。

(6) 由于测试装置定置安装, 因此检测方便, 并可检测在线路运行中无法检测的运行信号。

正是由于机车车辆室内动态模拟试验台有这样明显的优越性, 近 30 年来, 日益受到各铁路发达国家的重视。



## 1.2 机车车辆整车试验台的发展

机车车辆整车动力学试验台的发展,具有从简单到复杂的过程。随着列车车速的提高,机械工业和电子工业的发展,研制的试验台日趋完善。如何能更准确模拟机车车辆的运行状况,是试验台发展的必然趋势<sup>[4~9]</sup>。

### 1.2.1 日 本

早在1957年日本铁道技术研究所就装备了机车车辆滚动试验台,并利用偏心滚轮实现正弦波激振。这是一个二轴半车试验台,运行30多年,在防止货车脱轮、电力再生制动和无摇枕转向架等很多研究开发项目中起到了重要作用。由于车速的不断提高,为适应新的需要,1987年后又开始建造功能更全面的整车滚动台,并可实现同轴两滚轮的横向激振,垂向仍用偏心轮激振。

### 1.2.2 法国威特里(Vitry)

该试验台是1964年由CAFL公司建成的,可实现同轴滚轮的同时横向垂向运动,并采用了较简单的液压控制方式。该试验台能测试机车车辆垂向、横向和摇头振动的频率,以及测试它的振幅和共振现象,特别是能研究由于冲击力而产生的垂向和横向的激振力的变化与机车车辆运行的关系,进行有关走行安全性和平稳性的研究。

### 1.2.3 德国柏林(Berlin)

1967年前民主德国在柏林也建成了滚动台,在这个试验台上可作机车车辆及弹簧、制动系统、动力装置的定型及验收试验。