

铁路高新技术国际学术报告会论文集

PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL SEMINAR ON RAIL HIGH-TECH

中国铁道科学研究院

CHINA ACADEMY OF RAILWAY SCIENCES

2002.01.22·北京

铁路高新技术国际学术报告会论文集

PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL SEMINAR ON RAIL HIGH-TECH

中国铁道科学研究院

CHINA ACADEMY OF RAILWAY SCIENCES

2002.01.22·北京

目次

CONTENTS

Introduction to Heavy Haul and High-speed Railway in North America	W. J. Harris (1)
北美重载和高速铁路介绍	W. J. Harris (4)
车桥及车轨时变系统横向振动计算中的根本问题与列车脱轨能量随机分析理论	曾庆元 向俊娄平 (7)
Fundamental Problems in the Calculation of Transverse Vibration of the Train-Bridge and Train-Track Time-Varying System and Theory of the Energy Random Analysis for Train Derailment	ZENG Qing-yuan XIANG Jun LOU Ping (16)
Present Status and Future Development of SHINKANSEN	Hiroshi OKADA (31)
日本新干线的现状和未来的发展	Hiroshi OKADA (37)
沪宁线行车安全综合监控系统的研究	康熊 管天保 黎国清 宋仪龄 (41)
Study on the Comprehensive Monitoring and Control System of Train Operation Safety for Shanghai-Nanjing Line	KANG Xiong GUAN Tian-bao LI Guo-qing SONG Yi-ling (46)
Findings of Recent Railway Research in the Netherlands	I. A. Hansen (53)
荷兰铁路最新研究成果	I. A. Hansen (75)
车辆-轨道耦合动力学研究的新进展	翟婉明 (92)
Advance of Study on Vehicle-Track Coupling Dynamics	ZHAI Wan-ming (105)
铁路智能运输系统的本质特征研究	贾利民 蒋秋华 (123)
Study on the Essential Characteristics of Railway Intelligent Transportation System	JIA Li-min JIANG Qiu-hua (128)
面向二十一世纪的计算机辅助工程(CAE)	崔俊芝 (133)
21-st-Century-Oriented Computer Aided Engineering(CAE)	CUI Jun-zhi (144)
Rolling Contact Fatigue of Rails: what remains to be done?	R A Smith (153)
钢轨滚动接触疲劳的进一步研究	R A Smith (160)
安全综合检测车的研制	杜鹤亭 高林奎 张继元 魏世斌 吴旺青 夏亮光 顾世平 (165)
Research and Development of Safety Comprehensive Inspection Car	DU He-ting GAO Lin-kui ZHANG Ji-Yuan WEI Shi-bin (170) WU Wang-qing XIA Liang-guang GU Shi-ping
The Challenge of Rail Reform in China	Louis S. Thompson (177)
中国铁路改革所面临的挑战	Louis S. Thompson (194)

Introduction to Heavy Haul and High-speed Railway in North America

Dr. W. J. Harris

(Retired Vice President, AAR)

Introduction

It is a great pleasure to return to Beijing to be a part of this seminar on railroad technology. From 1980 to 1996, I was in China nearly twenty times working with CARS, working on a UNDP project in Dalian, and participating in a variety of World Bank studies. It is good to return and find China still on a fast track toward economic progress and continuing to upgrade its railroad system. It is good to find old friends still hard at work on railroad issues.

Railroads in the United States are managed differently than those in the rest of the world. They own their rights of way and pay taxes on them. They or other private sector institutions own the locomotives and equipment that operates on the rail lines to move freight.

In the 19th Century, When railroads were granted a franchise to operate between city pairs, they were required to provide passenger and freight service. From about 1825, when the first railroads began to operate in the USA, until about 1945, there was little competition for rail freight or passenger service except in those areas where barge transport on rivers or canals was available. However, by 1970, the demand for intercity rail passenger service had fallen to nearly zero, but the railroads were still required by their original franchises to provide extensive service. The United States Congress took note of the economic crisis faced by the railroads and relieved them of further passenger transport responsibilities. Amtrak was created to assume ownership of all of the passenger assets of the railroads and to develop and operate a national intercity passenger system. In addition, Amtrak was granted ownership of the rail

lines from Washington D. C. to Boston, called the Northeast Corridor. This line, the only electrified intercity line in the USA, was electrified from Washington to New Haven, a city between New York and Boston.

The legislation that established Amtrak, and subsequent legislation, mandated that Amtrak become economically self-sufficient. Since Amtrak has not achieved that objective, there are active programs in place to consider how to replace Amtrak.

In summary, in the United States there is a network of rail lines owned, for the most part, by private companies. Those companies provide freight service on those lines. Amtrak provides passenger service on its own lines in the Northeast Corridor and leases space on the lines of the freight railroads for the operation of passenger service.

Given these circumstances, in the United States, it can be seen that high speed passenger service is being addressed by Amtrak and by the Federal Railroad Administration, sometimes in cooperation with state agencies seeking to achieve higher speed passenger service on specific lines between specific city pairs. If high speed service were established between all of the city pairs under consideration, the service would fall far short of creating an interconnected national USA high speed rail system. These selected possible high speed corridors are under consideration as a means to reduce congestion on the interstate highway systems in those areas and to reduce congestion at airports serving relatively close city pairs.

The only high speed corridor now in operation in the United States is the Northeast Corridor from Washington, DC to Boston. That service is possible,

in part, because there has been complete separation of grade crossings for the entire route.

All USA high speed rail operations must comply with Federal Railroad Administration safety regulations that prohibit train speeds over 100 miles per hour on lines with grade crossings.

Seventy years ago, when the private railroads still provided the bulk of intercity passenger service, there was intense competition in the New York to Chicago corridor to achieve high speeds. Regularly those steam trains traveled for extended periods at 100 miles per hour.

When Amtrak began operations on the electrified lines between Washington and New Haven and with diesel service elsewhere, speeds were limited by FRA regulations until the grade crossings were eliminated.

Amtrak diligently pursued the objective of creating a grade crossing free corridor from Washington to Boston. Speeds of 120 miles per hour were achieved with the first generation of higher speed trains. However, the line has many curves that cannot be eliminated because of the nature of the surrounding developments. Amtrak worked with the supply industry to acquire tilt trains capable of operating at 150 miles per hour. The TGV was selected as the basic train set for this service, and design changes were made to create a TGV tilt train. Federal Railroad Administration regulations required that the train withstand major impacts and demonstrate significant crush resistance. In order to meet these objectives, there was a significant delay in putting the first train sets in service, but they are now operating regularly between Washington, DC, New York, and Boston with schedules that are competitive with air travel in the Northeast Corridor.

In order to facilitate high speed rail service in the non-electrified intercity corridors discussed previously, the Federal Railroad Administration has contracted for the development of a non-electrified locomotive. The prototype vehicle is now being tested. It has demonstrated that it can reach speeds of 150 miles per hour.

In the new intercity corridors under consideration, there is intensive study of the grade crossing

problem. It may be too expensive to achieve total grade separation in all of these corridors. A variety of grade crossing protective systems are under consideration such as four quadrant gates intended to eliminate intrusion by motor vehicles into a grade crossing on an active high speed line. This research is continuing.

A second aspect of high speed ground transportation service under study in the USA is related to maglev developments. Maglev has been of interest to the technical community since it was first demonstrated that the phenomenon could support a train. The United States is mindful of the fact that both Germany and Japan have been engaged in prototype development of maglev systems for decades but have not yet made a commitment to an operational system. However, the Federal Railroad Administration has requested proposals from communities interested in considering the installation of a maglev system. Seven proposals were received. Of those, two were selected for more complete development. A plan is being prepared for a maglev system to transport passengers from downtown Pittsburgh, Pennsylvania, to the airport in Pittsburgh. A second plan is being developed for a maglev system to provide service between Washington, D.C. and Baltimore. These plans will be reviewed when completed, and a decision will then be made whether to proceed with construction of the guide ways and purchase of the vehicles.

Earlier concepts of using maglev systems in the rights of way of the Interstate system were rejected, in part, after it was found that the grade crossing structures interfered with the construction of the guide way.

The United States continues to have a heavy commitment to the air mode because of the extensive distances between its major metropolitan areas. With the possible exception of a few special corridors, it does not appear likely that high speed ground transportation in the USA will match the extensive service available in Europe and Japan.

The high speed ground transportation industry has the continuing obligation to press the ability of systems depending on a steel wheel rolling on a steel rail as rapidly as feasible in order to meet the demands

of the population for low cost, reliable high speed service and to assess other technologies such as maglev to assure that they play their role in the efficient movement of people in our mobile world society. In the United States, this responsibility rests largely with government.

In view of the major commitment of the privately owned railroads to competitive freight service, it is evident that the private sector will continue to support improvements in heavy haul operations.

The first heavy axle load cars in commercial service in the USA were introduced on a trial basis about 1960 to respond to competition from barge movement of grain on the Mississippi River. The apparent success of the initial use of the heavier cars with about 28 ton axle loads led to their introduction by many railroads for the movement of many products. However, problems soon emerged. The track structure had been designed for 10 and then 20 ton axle loads. Under the increasing number of heavy cars, a variety of problems was observed. The subgrade in many parts of the United States was expansive clay. When wet, the clay changed dimensions and lost its capability to support track. As it dried, the dimensions changed again. This variable support of the track structure created serious problems in train operations. Much of the railroad system was plagued by slow orders as track engineers replaced the unsatisfactory subgrade or treated the subgrade with lime to stabilize it.

Many other changes were introduced. It was necessary to increase the quality and strength of rail. It was necessary to reduce the number of rail joints. Finite element analysis made it possible to design improved wheels. Computer modeling provided an improved basis for train handling. All of these changes and more were pursued actively by the railroads in cooperation with the railroad supply industry.

The ability to study ways to respond to the impact of heavy axle loads was rapidly improved when the Federal Railroad Administration established the Transportation Test Center at Pueblo, Colorado. That Center was created to test high speed rail vehicles pursuant to the High Speed Ground Transporta-

tion Act of 1968. A very extensive track layout was built as well as major dynamic testing facilities. After the initial testing of air cushion and linear motor vehicles, the attention of TTC began to be focused on freight railroad problems. In about 1974 the FAST track was built that made it possible to test various aspects of track under identical loads and to include in the train a variety of car features for testing under identical conditions. The testing of track and train components over more than twenty years has provided very useful information to operating railroads.

In 1983, the management of the TTC was transferred to the Association of American Railroads which has created a wholly owned subsidiary corporation called the Transportation Technology Center, Incorporated (TTCI) which continues to operate the FAST track and to conduct research on a wide variety of railroad issues through work of its staff, university laboratories, and cooperative programs with railroads and the Federal Railroad Administration.

A wide variety of studies are in progress in search of ways to improve track structure, equipment components, the dynamic interaction of track and equipment, and the critical wheel-rail interface.

The international railroad community has been sharing information on heavy haul railroad technology in formal meetings since 1978 and through the offices of the International Heavy Haul Association since 1983.

It appears that there is great potential for increasing axle loads and improving track structure to accommodate heavier cars and trains.

The effectiveness of operating trains with steel wheels on steel rails has provided means of transportation of goods and commodities that now make it possible for almost any product to be made almost any place in the world and to be marketed in almost any place in the world. The challenge to the railroad community is to continue to exploit the inherent favorable characteristics of the railroad system and to extend it to meet the growing challenges of international trade. In the United States, the responsibility for these programs rests largely on the private sector.

(责任编辑 刘卫华)

北美重载和高速铁路介绍

W.J.Harris 博士

(北美铁道协会离任副总裁)

前言

很荣幸能回到北京参加这次铁路科技研讨会。从1980年到1996年,我到中国访问近二十次,和铁道部科学研究院一起工作,在大连合作一个UNDP项目,并参与了大量世界银行的研究工作。这次回来看到中国仍在快速地发展经济,继续进行铁路系统的改造工作,我感到非常欣慰,也很高兴看到我的一些老朋友仍然在为铁路事业努力工作。

美国铁路公司的管理方式和世界其他国家的铁路公司不同。美国铁路公司拥有各自的道路使用权,并为道路使用权纳税。铁路公司或其他私有部门机构拥有机车和在铁路上进行货运的设备。

19世纪,铁路公司被赋予一项在两座城市之间进行运营的特许经营权,并被要求提供客、货运服务。第一批铁路公司大概从1825年开始在美国运营,一直到1945年,铁路货运或客运服务几乎没有任何竞争,除了那些在河流或运河上存在驳船运输的地区才有竞争。然而到1970年,人们对城间铁路客运服务的需求几乎降到零,但是铁路公司仍然被最初的特许经营权要求提供大量的服务。美国国会注意到铁路公司面临的经济危机,解除了它们继续提供客运服务的职责。美国全国铁路旅客运输公司Amtrak应运而生,获得所有铁路公司客运资产的所有权,开发并运营国家城间铁路客运系统。此外,Amtrak公司被赋予了从华盛顿(哥伦比亚特区)至波士顿这条被称为“东北走廊”上所有铁路线的所有权。这条铁路线是美国唯一一条电气化城间铁路线,从华盛顿到位于纽约和波士顿之间的纽黑文市实行电气化。

确立Amtrak公司的立法和随后推出的立法规定Amtrak公司实行经济独立。由于Amtrak公司没有达到这一目标,因此目前推出了一些计划,考虑怎样取代Amtrak公司。

总的来说,美国铁路网的大部分线路都是由私

有公司拥有的。那些公司在这些线路上提供货运服务。Amtrak公司在自身所有的东北走廊的线路上开展客运业务,在货运铁路公司的线路上为客运服务租赁线路。

在这种情况下,在美国可以看出,高速客运服务的问题受到Amtrak公司和联邦铁路管理局的重视,这些机构有时候和一些州政府合作寻求在特定的两城市之间的特定线路上提供更高速度的客运服务。如果高速客运服务在所有考虑到的两城市之间实现的话,该服务可能远不能建立一个互联的美国高速铁路系统。目前正在考虑将几条可能的高速走廊作为一种方式来缓解那些地区的州间公路系统的拥塞现象,并减少在距离较近的两城市之间提供服务的机场的拥堵。

美国目前唯一投入运营的高速走廊是从华盛顿(哥伦比亚特区)至波士顿的东北走廊。从部分意义上说,那种服务是能够实现的,因为整条线路上的平面交叉已被完全隔离。

所有的美国高速铁路运营必须符合联邦铁路管理局的安全规定,安全规定禁止在平面交叉的线路上列车时速超过每小时100英里。

70年前,私有铁路公司仍然经营着大部分城间客运业务,纽约至芝加哥走廊在实现高速运营方面展开了激烈的竞争。那些蒸汽机车牵引的列车一般以每小时100英里的速度行驶较长的时间。

当Amtrak公司在华盛顿和纽黑文市之间的电气化线路上开始运营并在其他线路上进行内燃牵引的时候,列车速度在平面交叉被取消之前一直受到联邦铁路管理局规定的限制。

Amtrak公司一直为建立一个从华盛顿到波士顿的无平面交叉走廊的目标而努力。第一代高速列车的时速达到了每小时120英里。但是由于周围环境开发的性质,这条线路有很多无法去除的曲线。Amtrak公司和供应商合作,获得运营速度为每小时150英里的摆式列车。当时,TGV高速列车被选为提供该服务的基本列车,并对其进行设计改造来制

造 TGV 摆式列车。联邦铁路管理局的规定要求列车应承受大的冲击并表现出抗压性。为实现这些目标,推迟了将第一批列车投入运营的时间,但是这些列车目前在华盛顿(哥伦比亚特区)、纽约和波士顿之间定期运营,其时刻表和东北走廊的航空时刻表一样具有竞争性。

为了改善前面提到的非电气化城间走廊上的高速铁路服务,联邦铁路管理局将研制非电气化机车的任务承包出去。目前,样车正在接受测试。测试表明样车的时速可以达到每小时 150 英里。

在目前考虑的新的城间走廊中,对平面交叉问题进行了深入的研究。由于费用太高,因此不可能在所有这些走廊上完全实现立体交叉。目前不同的平面交叉防护系统正在考虑之中,比如一个四边形闸门可以防止机动车辆闯入一条开放的高速线路上的平面交叉。该研究目前仍在继续进行。

目前,美国正在研究的高速地面运输服务的另外一个方面和磁悬浮的研制有关。由于首次表明磁浮现象能够支撑列车的运行,从而引起了技术领域的极大兴趣。美国意识到,虽然德国和日本几十年来一直在进行磁浮系统原型车的研制工作,但是两国还未承诺建立一套运营系统。然而,联邦铁路管理局已经要求有兴趣考虑建立一套磁浮系统的技术机构提交建议书。共收到了七份建议书。在这七份建议书中挑选了两份加以完善。目前正在制订一项磁浮系统的计划,在宾西法尼亚州匹兹堡市中心到匹兹堡机场之间进行旅客运输。另一项磁浮系统的计划也在制订之中,在华盛顿(哥伦比亚特区)和巴尔的摩之间提供客运服务。这些计划完成后还要进行审核,并就此作出一项决定,确定是否继续修建导轨和采购车辆。

在发现平面交叉建筑物干扰了导轨的修建之后,在州际铁路系统的道路使用权中运用磁浮系统的早期概念被部分否定了。

由于美国的主要大城市间的距离较长,因此美国继续对航空运输模式给予高度重视。除了可能的几个特殊走廊以外,美国的高速地面运输不太可能和欧洲及日本存在的大量服务相媲美。

高速地面运输业长期以来的责任是尽快实现依赖钢轨的车轮滚动的系统能力,以便满足人们对低成本可靠的高速服务的需求,并且评估磁浮等其他技术,以确保这些系统在流动性的世界里为人们高效的出行发挥作用。在美国,这一职责主要取决于政府的努力。

在私有铁路公司对竞争性的货运业务所作的重大承诺方面,很显然私有部门将继续支持改善重载运输。

大概在 1960 年,美国首批用于商业运营的较大轴重车辆在试运营中面世,以便应对密西西比河上的粮食驳船运输带来的竞争。初始使用 28 吨轴重的重型车辆所获得的明显成功使多家铁路公司开始采用这些车辆来运输多种产品。然而问题马上就出现了。因为轨道结构过去都是为 10 吨至 20 吨的轴重而设计的。随着重型车辆的大量出现,产生了许多不同问题。美国许多地方的路基都是膨胀性黏土。黏土一湿就会改变尺寸,并且失去支承轨道的能力。当它干的时候,尺寸又会有所改变。这种对轨道结构支承的变化给列车运营带来了严重的问题。由于轨道工程师替换了不满意的路基或用石灰稳定路基,铁路系统的大部分已遭到破坏。

还引入了许多其他的改变。如有必要提高轨道的质量和强度。有必要减少钢轨接头的数量。有限元分析法使设计质量较高的车轮成为可能。计算机模型化为列车运营提供了一个较高的基础。所有这些和更多的改变都是由和铁路供应商合作的铁路公司积极地推行。

联邦铁路管理局在科罗拉多州普韦布洛建立了运输测试中心后,研究大轴重影响的反应方式的能力得到了迅速提高。该中心成立后,按照 1968 年制订的“高速地面运输法案”的规定进行高速铁路车辆的测试。制定了一份详尽的轨道布置图和关键动力测试设施分布图。完成空气减震器和线性电机车辆的初始测试后,运输测试中心的工作重点开始集中到货运铁路的问题上来。大约在 1974 年,加速运营试验环行设施的轨道铺设完毕,使得在同一荷载下进行轨道各方面的测试成为可能,并将车辆的不同特征纳入列车进行相同条件下的测试。该中心对列车和列车零部件 20 多年的测试为运营铁路公司提供了非常有用的信息。

1983 年,运输测试中心被移交给北美铁道协会进行管理,北美铁道协会已建立了一家独资的分公司—运输技术中心公司,该公司继续经营高速运营试验设施线路,并通过公司员工的努力、大学实验室、与铁路公司以及联邦铁路管理局的合作计划开展了大量铁路问题的研究。

目前正在进行大量的研究,寻找改善轨道结构、设备部件、线路和设备的动态反应以及关键的轮轨接触的方法。

国际铁路机构自 1978 年以来一直在正式会议中交流重载铁路技术的信息,自 1983 年以来通过国际重载铁路协会办事处进行技术交流。

因此,通过加大轴重、改善轨道结构来承载较重的车辆和列车方面还存在很大的潜力。

有效运行在钢轨上的钢制车轮列车已经提供了

商品和货物的运输方式,这些运输方式使世界上几乎任何一个地方制造任何一种产品或在世界上几乎任何一个地方销售这种产品成为可能。铁路机构面临的挑战是继续开发铁路系统自身优势并且发展铁路系统来迎接世界贸易的不断挑战。在美国,实施这些计划的责任主要取决于私有部门的努力。

(张明静 译 陈联彬 审)

(责任编辑 刘卫华)

车桥及车轨时变系统横向振动计算中的根本问题 与列车脱轨能量随机分析理论

曾庆元, 向俊, 娄平

(中南大学铁道校区, 湖南长沙 410075)

摘 要: 本文论述了车桥及车轨时变系统横向振动计算中存在的根本问题。介绍了作者们解决这些问题的思想与方法, 提出了列车脱轨能量随机分析理论。用此理论预报了一货物列车脱轨实例, 与实际发生的脱轨事故吻合。判别了另一脱轨试验列车不脱轨, 计算了该试验列车最大振动响应, 与测试结果良好接近。

关键词: 车桥及车轨时变系统; 横向振动; 根本问题; 列车脱轨; 能量随机分析理论

列车脱轨及桥梁横向刚度限值分析问题, 研究了百多年。取得了不少成果, 但仍未满意解决。根本原因在于车桥、车轨系统(以下简称此系统)横向振动计算尚存在三个根本问题。本文论述这三个问题, 介绍我们 20 多年来解决这些问题的思想和方法, 然后提出列车脱轨能量随机分析理论。最后计算两列直线货物列车脱轨实例, 计算结果说明这个理论的有效性和可行性。

1 此系统横向振动计算中的根本问题

1.1 分别建立车辆、桥梁(或轨道)的横向振动方程组, 不能得出此系统横向振动的适定解

国内外都是分别建立车辆振动方程组(用拉格朗日方程或动静法)与桥梁振动方程组(用有限单元法), 用车轮与钢轨的相互作用力将两组方程联系起来, 用迭代法求解。由于车轮轮缘与钢轨之间有空隙(习惯称最大空隙为游间), 车轮与钢轨的横向衔接条件列不出来, 虽经迭代法求解, 可使轮轨接触力的衔接条件逐步满足, 但不能使轮轨横向位移衔接条件满足, 使此系统横向振动方程组解的唯一性无保证, 因而不能得出适定解(按数学物理方法, 有唯一而稳定的解才是适定的)。文献[1]提出桥梁和车辆之间接触点的几何相容条件为

$$u_r^i = u_b^i + y_s \quad (1)$$

式中, u_r^i , u_b^i 分别为车辆和桥梁第 i 接触点的位移向量, y_s 为轨道不平顺位移向量。文献[2]亦是这样做。很显然, 都是假定轮轨紧密接触, 这对此系统横向振动是不符合实际的, 因为轮轨之间有游间。

1.2 此系统横向振动的激振源不清楚

国内外对此系统横向振动激振源的认识不一致。文献[3]说“轨道不平顺是引起列车振动、轮轨作用力增大的主因”。2001 年 7 月吉林铁路局线桥检测设计所与我们合作在通辽干线上测试了时速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的机车, 空、重货车构架横向振动加速度波形图(习惯称为蛇行波), 统计测试结果时发现轨道平顺性好的区段的机车, 空、重货车构架蛇行波标准差 σ_p 分别为 $28 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, $49 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, $41 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, 轨道平顺性差的区段的机车, 空、重货车的 σ_p 则分别为 $39 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, $91 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, $68 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。 σ_p 越大, 振动响应越大。这些测试结果表明轨道不平顺对此系统横向振动很有影响。但是下列结果不体现轨道不平顺对此系统横向振动很有影响, 更不体现它是引起此系统横向振动的主因。

(1) 1973 年京广线南沙河桥 48 m 标准钢桁梁在单机行驶下上弦实测最大横向振幅与车速关系如图 1^[4], 很显然, 对应同一车速的各次实测最大振幅相差很多。除轮轨接触状态不同外, 同一车速的各次行车过程中车桥系统振动条件相同(同样机车、同样轨道、同样轨道不平顺, 同样桥梁、同样车速)。如果轨道不平顺是引起此系统横向振动的主因或很有影响, 则各次测试振幅应接近(因为是在相同的轨道不平顺条件下产生的); 现在相差这样大, 体现不出是主因。

(2) 文献[5, 6]以轨道横向不平顺为激振源, 算出钢桁梁桥的横向振幅都很小。为此, 文献[5]及文献[7]均取轨道横向不平顺及自由轮对蛇行波

$$y_s = A_s \sin(2\pi f t + \phi_s) \quad (2)$$

为激振源, 做此系统横向振动分析, 蛇行振幅 A_s

及相位角 ϕ_s 均为随机分布，按随机变数模拟。

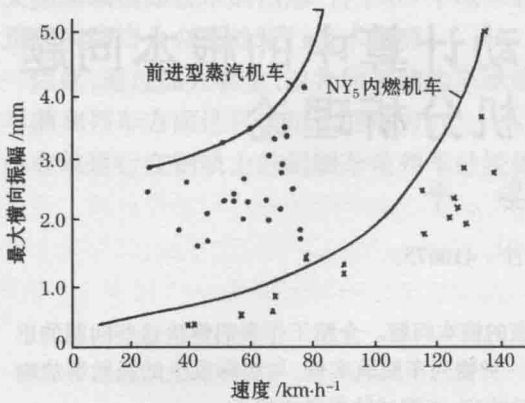


图1 48 m 桁梁在单个机车作用下上弦实测最大横向振幅与车速关系^[4]

国内外多以轨道横向不平顺为此系统横向振动的激振源。但是引起此系统横向振动的因素很多，轨道横向不平顺、车轮踏面锥度、轮轨缺陷及制造误差、车辆质量及其载重的偏心等都引起此系统横向振动。仅考虑轨道横向不平顺，显然丢掉了其他很多因素的作用；而这些因素的作用无法包括在轨道不平顺的计算中，这是以轨道不平顺为激振源计算此系统横向振动的一个问题。

1.3 由于时变系统随机振动分析理论尚未建立，此时变系统振动的随机分析难以进行

国内外分析此时变系统随机振动的方法主要为：①将车桥时变系统等效为时不变系统，按传递函数法，做此系统振动的随机分析，其缺点为未考虑此系统的时变特性。②按轨道不平顺的功率谱密度，随机模拟出轨道不平顺函数，作为激振源，分析此系统的随机振动。这种方法仅考虑轨道不平顺的随机作用，未考虑其他引起此系统横向振动的随机因素影响。③如前所述，随机选取自由轮对蛇行波[式(2)]的振幅 A_s 及相角 φ_s ，并考虑轨道横向不平顺，做此系统横向振动的随机分析。

文献[8]用(2)式进行货物列车通过 64 m, 192 m 简支钢桁梁桥下弦跨中横向振动位移随机分析，按高斯分布统计理论计算位移和实测位移，得出表 1 结果。虽然实测与计算位移的均值加两个标准差的数值比较接近，但统计的计算样本数与实测样本数不一样，就发生一个计算样本数如何确定的问题，以及若无实测样本，取多少计算样本数来统计，才能得合适结果呢？另外，由于实际轮对蛇行波是多频道随机波，不是我们表示的正弦波。所以，表 1 随机分析结果不是十分可信。

表 1 下风架跨中横向位移值

	跨度 64 m 桁梁				跨度 192 m 桁梁			
	车速 /km·h ⁻¹	统计次数 /次	平均值 $\bar{a}_{\max}$ /mm	$\bar{a}_{\max}+2\sigma$ /mm	车速 /km·h ⁻¹	统计次数 /次	平均值 $\bar{a}_{\max}$ /mm	$\bar{a}_{\max}+2\sigma$ /mm
现场实测	50~60	44	2.28	3.38	41.8~60	10	1.75	3.13
理论分析	60	32	2.32	3.47	60	25	2.77	4.29

很显然，上述随机分析方法都不能正确地分析此系统的随机振动。引起此系统横向振动的因素很多，而且都是随机的，即使用时不变系统的随机振动分析理论来分析此系统横向随机振动，亦极其困难。

2 我们解决这些问题的思想和方法

2.1 建立此系统横向振动方程组，来解决此系统横向振动方程组解的唯一性无保证的问题

解决此系统横向振动方程组解的唯一性无保证问题的途径，就是不用车轮与钢轨的横向衔接条件。那就必须将列车、桥梁(或列车、轨道)作为一个整体系统来分析，建立此系统振动方程组，此时桥梁的边界条件才是此系统的边界条件，轮轨接触面已不是此系统的边界面了，因而不需要轮轨横向衔接条件。然而，由于轮轨横向衔接条件列不出来，使此系统横

向振动方程组用一般方法(动静法、拉格朗日方程、哈密顿原理)建不出来。20 年前，笔者提出了弹性系统动力学总势能不变值原理及形成矩阵的“对号入座”法则^[10](它不是一般有限元分析中的计算机编码法)，简便地建立了此系统空间振动方程组，得到了大量实测结果的验证及很多专家的赞同。

2.2 由此系统横向振动方程组的齐次性质，确定其横向振动激振源

在不考虑风荷载作用的条件下，用上述弹性系统动力学总势能不变值原理及形成矩阵的“对号入座”法则，建立了此系统横向振动的矩阵方程 $[M]\{\delta\} + [C]\{\delta\} + [K]\{\delta\} = 0$ ，它是齐次方程组，用它只能求出响应的相对值。若已知此系统的某部分响应，就可用它和此矩阵方程求出系统其余部分的振动响应。为此，将此系统横向振动位移参数 δ 分为 k 个已知参数 δ_k 和 n 个未知参数 δ_n ，则 $\{\delta\} =$

$\{\delta_k \ \delta_n\}^T$ 。于是由矩阵分块,此系统横向振动的矩阵方程变为

$$\begin{bmatrix} M_{kk} & M_{kn} \\ M_{nk} & M_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\delta}_k \\ \ddot{\delta}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{kk} & C_{kn} \\ C_{nk} & C_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\delta}_k \\ \dot{\delta}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{kk} & K_{kn} \\ K_{nk} & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_k \\ \delta_n \end{Bmatrix} = 0$$

展开,得

$$[M_{nn}]\{\ddot{\delta}_n\} + [C_{nn}]\{\dot{\delta}_n\} + [K_{nn}]\{\delta_n\} = -[M_{nk}]\{\ddot{\delta}_k\} - [C_{nk}]\{\dot{\delta}_k\} - [K_{nk}]\{\delta_k\} \quad (3)$$

$$[M_{kk}]\{\ddot{\delta}_k\} + [C_{kk}]\{\dot{\delta}_k\} + [K_{kk}]\{\delta_k\} + [M_{kn}]\{\ddot{\delta}_n\} + [C_{kn}]\{\dot{\delta}_n\} + [K_{kn}]\{\delta_n\} = 0 \quad (4)$$

(4)式为需划去的非独立方程。(3)式右边各项都已知,从它解出系统 n 个未知横向振动响应。这样, $\{\ddot{\delta}_k\}$, $\{\dot{\delta}_k\}$, $\{\delta_k\}$ 就成为系统的激振源了。

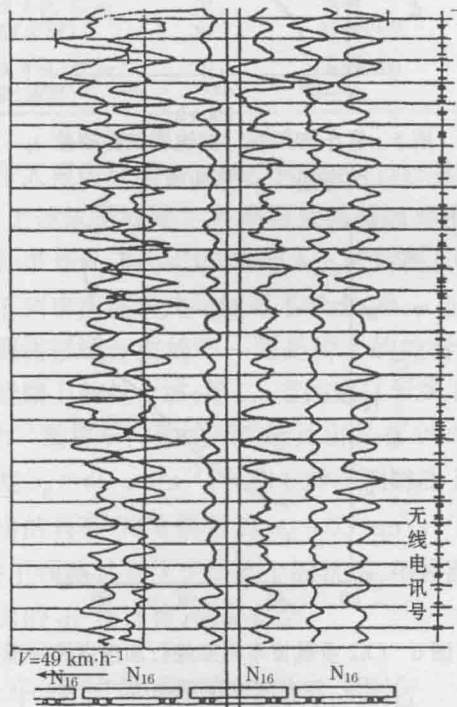


图2 沪杭线41号桥92.96 m钢桁梁上
49 km·h⁻¹货车构架实测蛇行波

选哪一个位移参数为已知?最直观的是测出轮对的横向振动位移波形图,但是轮对上不能布传感器。1984年上海铁路局潘震涛教授级高工将其在沪杭线41号桥上测出的客货车构架横向振动蛇行波,及对应测出的钢桁梁下弦节点横向振动波形图[图3(a)],无偿给我们。我们以此实测构架蛇行波为激振源,1985年,由(3)式算出了该钢桁梁横向振动波形,如图3(b)。当时受微机内存和计算速度限制,计算列车很短,图3(b)末端较高波峰由尾车出

桥引起。实际列车很长,图3(a)未包括尾车出桥响应。可见计算波形图与实测波形图良好接近。此后又算出了同样结果(图4)。文献[10]以广深线上的构架实测蛇行波为激振源,分析列车轨道系统确定性振动,算出的轨枕横向振动波形图,与实测波形图很接近。这样,我们认定构架实测蛇行波可作为此系统横向振动确定性分析的激振源。有人说,这是以响应求响应。应该指出,这确实是以响应求响应。结构地震时程响应计算中,就是以实测地震加速度波为激振源。故以响应求响应确有根据。

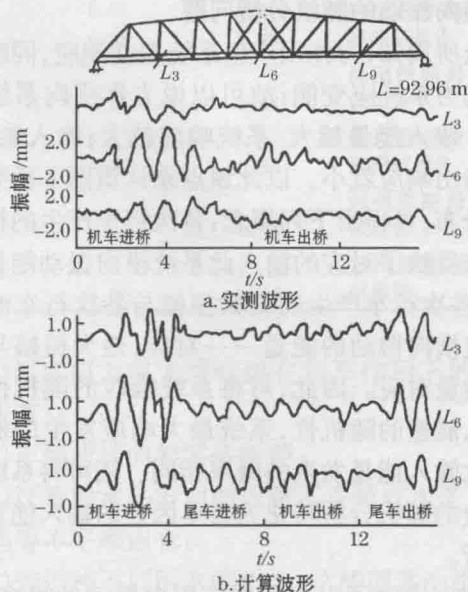


图3 沪杭线41号桥92.96 m简支下承单
线钢桁梁在49 km·h⁻¹货物列车作用
下的横向振动波形

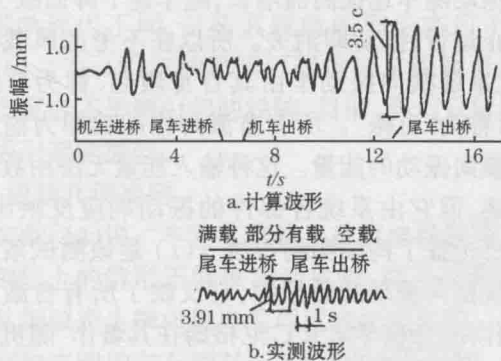


图4 在54.2 km·h⁻¹货物列车作用
下92.96 m钢桁梁下弦跨中横
向振动波形

还应该指出以下几点:①构架实测蛇行波准确反映了引起此时变系统横向振动的所有因素的影响,这是以轨道横向不平顺为激振源无法达到的。构架实测蛇行波是确定性的,所以它只能用于此系

统横向振动的确定性分析。②只有建立此系统横向振动的齐次矩阵方程,此方程中各矩阵的分块分析、及潘震涛教授的测试,才能确定构架实测蛇行波为此系统确定性振动的激振源。这说明此种激振源有坚实的实践与理论基础。③国内外分别建立的车辆与桥梁(或轨道)的振动方程都含有轮轨相互作用力的自由项,得不出此系统横向振动的齐次矩阵方程。因此,用这种方法,得不出此时变系统横向振动的激振源。

2.3 提出此系统横向振动能量随机分析理论,来解决其横向振动的随机分析问题

众所周知,力作用产生系统振动响应,同时力做功转化为系统应变能;故可以说力作用向系统输入能量。输入能量越大,系统响应越大;输入能量小,系统输出响应就小。以此观点来认识图 1 桥梁横向振幅分布,可得出下列概念:各次行车产生的桥梁振幅分布反映了对应的输入此系统横向振动能量的分布,即各次行车产生的桥梁振幅与各次行车时输入此系统横向振动的能量一一对应,最大振幅与最大输入能量对应。因此,可将系统响应的随机性视为其输入能量的随机性,系统最大响应发生的概率与其最大输入能量发生的概率相同。则可将系统多因素响应的随机分析转化为其单因素的输入能量的随机分析。

前面说明了引起此系统横向振动的很多因素,它们随列车运行,产生激扰力(称为自激力,例如轨道不平顺、轮轨缺陷引起的撞击力),使系统振动。这种振动随车速提高而增长,随车速下降而减少,列车停止运行,振动即消失。所以在不考虑风载作用时,此系统横向振动全由其自身激起,称为自激振动,常称为“自振”。所有自激力作的功即为输入此系统横向振动的能量。这种输入能量无法用数学式子表述,但它由系统各部件的振动响应反映出来。前面已论证了构架实测行波 $x(t)$ 是该测试条件下此系统横向振动的激振源,它反映了所有自激力的总体作用。印度学者 RC 尼格姆在其著作“随机振动概论”(何成慧等译,上海交通大学出版社,1985)写道“若随机变量 $x(t)$ 为弹簧位移,则 $\dot{x}^2(t)$ 与弹簧变形能成正比;若 $x(t)$ 为刚体速度,则 $\dot{x}^2(t)$ 与刚体动能成比例。”日本学者星谷胜在其著作“随机振动分析”(常宝琦译,地震出版社,1977)中说“ $x(t)$ 的均方差值是单位时间作的平均功”。根据这些论述,可知构架实测蛇行波 $x(t)$ 的均方差是单位时间作的平均功,是输入此系统横向振动的能量。均方差

的根值为标准差 σ_p ,下面随机模拟车辆构架人工蛇行波 $x(t)$ 只用 σ_p ,为简便计,下面以 σ_p 表示输入此系统横向振动的能量。

再根据前述此系统横向振动的随机分析转化为输入此系统横向振动能量的随机分析的概念,此系统横向振动的随机分析第一步归结为构架实测蛇行波 $x(t)$ 的均方差的随机分析。为此,我们在铁路干线上大量实测客货车、机车在各种车速下的构架蛇行波,截取每 km 波形图为一个样本,分别按直线和曲线统计各样本的标准差,由工程概率分析方法,得出具有 99% 概率水平的标准差 σ_p 与车速 V 的关系曲线,如图 5、图 6 所示。根据 σ_p ,由 Monte-Carlo 法

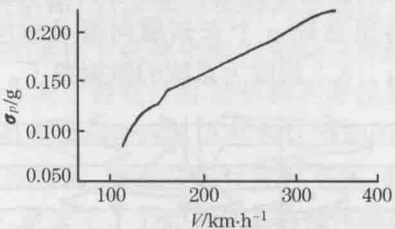


图 5 客车构架蛇行加速度波标准差 σ_p 与车速 V 关系曲线

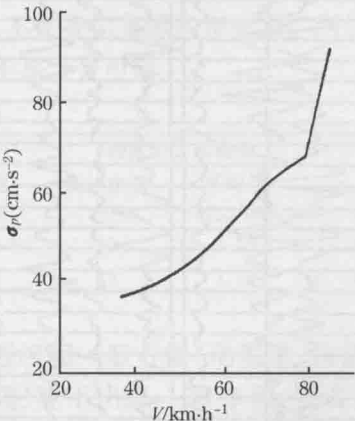


图 6 C62 重载货车构架蛇行加速度波标准差 σ_p 与车速 V 关系曲线^[10]

随机模拟出构架蛇行波,仿照人工地震波,我的计算过程较长,请参阅文献[10]。因为构架人工蛇行波的基频取自构架蛇行基频的实测资料。构架蛇行基频的随机性亦很强烈,每取一个实测基频,随机模拟出一条构架人工蛇行波,以它为激振源,计算此系统横向振动,得出一个样本。所以,第二步照此做下去,可得出很多响应样本。最后按工程概率分析方法,得出此系统具有 99% 概率水平的横向振动响应。这样分析的工作量很大。为减少计算工作量,我们多次选取构架蛇行实测基频,模拟构架人工蛇行波,计算此系统横向振动响应,得出产生最大振动响应的构架人工蛇行波,一次算出此系统横向振动

最大响应。这样的随机计算效果见表2。可见,此种构架人工蛇行波,能够预测此系统最大振动响应;它包括了所有引起此系统横向振动诸多因素的影响,反映了不同轮轨接触状态的作用,因此合理和可靠地预测了此系统振动最大响应的激振源。上述此系统多因素横向振动响应的随机分析转化为单因素的

此系统横向振动输入能量随机分析的概念、构架实测蛇行波标准差的统计分析、构架人工蛇行波的随机模拟、此系统横向振动响应的工程概率分析及其振动最大响应的计算等内容,构成此系统横向振动能量随机分析理论^[10]。

表2 多跨简支上承钢板梁桥在提速货车(C62)作用下桥梁与车辆响应计算最大值与多次实测最大值的比较

桥名	车速/km·h ⁻¹	实测和计算	桥梁跨中上翼缘最大横向振幅/mm	桥梁跨中上翼缘最大横向加速度/g	车辆轮对最大横向摇摆力/t	车辆车轮最大脱轨系数	实测资料来源
	75~85	实测	11.91		6.61	0.49	铁道科学研究院测试报告
大凌河 18 孔 32m 钢板梁桥	80	计算	10.75	0.29	6.88	0.69	沈阳铁路局测试报告
	75	实测		0.26			
	70	计算	6.17	0.23	5.56	0.54	铁道科学研究院测试报告
郑武线 6 孔 20 m 钢板梁桥	73	实测	2.07				铁道科学研究院测试报告
	70	计算	2.20	0.16	3.55	0.35	郑州铁路局测试报告
郑武线 4 孔 32 m 钢板梁(原型)	70	实测	7.44				郑州铁路局测试报告
	70	计算	7.85	0.23	5.60	0.55	郑州铁路局测试报告
郑武线 4 孔 32 m 钢板梁(加固)	70	实测	4.72				
	70	计算	5.02	0.18	4.50	0.46	

有些人提出疑问——桥上构架蛇行波与线路上的不同,上述依据线路上实测构架蛇行波标准差统计出的标准差 σ_p 模拟出的构架人工蛇行波 $X(t)$ 合理吗?下列事实证明此问题可不考虑,第一,分不出图2实测构架蛇行波的哪一段是桥上的蛇行波,哪一段是线路上的蛇行波;第二,前述通辽干线上实测 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 重货车构架蛇行波统计出具有99%概率的标准差 $\sigma_p=49\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$,与图6所示湘黔线上实测并统计出的具有99%概率的 $\sigma_p=53\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 接近;第三,桥上线路状态优于线路上的状态,用线路上实测统计出的 σ_p 作计算,偏于安全。

3 列车脱轨能量随机分析理论

列车脱轨是车辆剧烈横向振动的结果。上述此系统横向振动能量随机分析理论是分析此系统的横向随机振动。所以上述此系统横向振动能量随机分析理论亦可用来分析列车脱轨,只是要考虑以下脱轨分析中的特殊性问题。

3.1 列车脱轨原因及我们研究的目标

- 文献[12]介绍了俄罗斯总结出下列脱轨原因:
- (1)外部条件不良时的紧急制动或完全的常用制动,占俄罗斯脱轨事故的30%;
 - (2)超过额定的列车运行速度;
 - (3)接头拉开和轨缝胀大造成的断轨;

- (4)温度应力或无缝线路在列车作用下的横向跑道(胀道);
- (5)车辆或转向架零件断裂;
- (6)严重的水平方向的线路不平顺或水平、三角坑、沉陷等不平顺组合;
- (7)若干种不同因素的组合,这些因素个别存在时不构成脱轨危险;
- (8)我国铁路提速发生过轻重车辆混编列车及全列空车脱轨^[13]。

脱轨原因不同,分析其脱轨的理论亦应不同。上述(6)、(7)、(8)三种原因引起的列车脱轨可简称为轨道复合不平顺引起的脱轨,目前,我们只研究此种原因引起的脱轨。

3.2 脱轨几何准则

文献[14]说:“车轮从钢轨上垂直地跳起来又回落到钢轨上的情形不能评定为危险,而是明确地以车轮从钢轨产生横向偏离的程度来评定危险。以车轮与钢轨之间的左右相对变位,来作为指标时,无论对脱轨或倾覆(翻车)等险情都可作出精度良好的评价”。铁道部科学研究院单轮对滚动试验表明:车轮轮缘顶端爬上钢轨顶面时,即造成完全脱轨。根据以上研究结果,得出车轮脱轨几何准则如下:

- (1)车轮悬浮量 $\mu_s(t)$ 等于轮缘顶端爬上钢轨顶部时的悬浮量 $|\mu_s(t)|$;
- (2)车轮相对于钢轨的横向水平位移 $\triangle$ 等于轮

缘顶端爬上钢轨顶部时的相对横向水平位移 $|\Delta|$ 。(1)、(2)条件同时满足时车轮脱轨。 $|\mu_s(t)|$ 及 $|\Delta|$ 根据车轮及钢轨断面几何尺寸确定。

铁科院单轮对滚动试验用的车轮踏面和钢轨头顶面外形如图 7, 可知其 $|\mu_s(t)| = 25 \text{ mm}$, $|\Delta| = 54 \text{ mm}$ 。

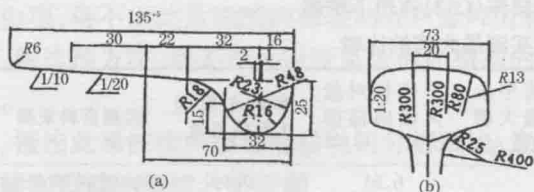


图 7 车轮踏面和钢轨头顶面外形

3.3 轨道复合不平顺脱轨机理及评判脱轨的能量准则

前已说明,在不考虑风载作用下,此系统的横向振动由轨道不平顺、轮轨缺陷、车轮踏面锥度、车辆部件制造误差、车辆质量及载重偏心等因素引起。这些因素引起此系统横向振动自激力,自激力做功成为输入此系统横向振动的能量,它由车辆构架蛇行波的标准差 σ_p 表现出来, σ_p 越大,此系统横向振动越大。这种概念已为实测及经验证实。例如前述通过干线轨道平顺性好和差的区段测试的 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 机车,空、重货构架蛇行波标准差 σ_p 分别为 $28 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, $49 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, $41 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $39 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, $91 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$, $68 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。这些资料说明轨道平顺性好时, σ_p 小,轨道平顺性差时, σ_p 大,列车横向振动大。同时车辆类型亦很有影响。另外,图 5、图 6 说明车速提高, σ_p 增大。但是只要轨道很平顺,轮轨缺陷极微,车辆制造精确,车辆振动特性良好,在高速下仍可做到 σ_p 很小,列车运行很平稳。这就是高速列车平稳运行的机理。若轨道平顺性、车辆动态特性等因素只适应低速平稳运行要求,则列车提速后,由于 σ_p 随车速提高而增长, σ_p 可能增长至脱轨时的输入此系统横向振动能量值,而造成脱轨。这就是车辆及轨道技术状态都符合标准的车轨系统在提速后发生脱轨的机理。

由动力学理论来理解,脱轨是列车丧失横向运动稳定性,可由运动稳定性理论来认识列车脱轨的机理。在用了达朗贝尔原理(d'Alembert's Principle)之后,动力问题转化为动力平衡问题。文献[15]论证了系统静力稳定性的能量准则可用来判断系统的运动稳定性,并十分简便,不过它用系统总势

能的二阶变分表示,用于此系统运动稳定性分析很复杂,我们改用 S P Timoshenko 分析系统静力稳定性的能量法来分析。该法的物理概念是:考察结构平衡状态的稳定性时,该结构偏离此平衡状态一微小位移,计算由此微小位移引起的结构应变能增量 U 及外力做功的增量 ΔT ,若 $\Delta U > \Delta T$,则表示结构抗力的增长大于外力作用的增长,使结构始终维持稳定平衡,因此被考察的结构平衡状态是稳定的。反之,若 $\Delta U < \Delta T$,则表示结构抗力的增长,赶不上外力作用的增长,使结构稳定平衡成为不再可能,所以被考察的结构平衡是不稳定的。这样,Timoshenko 得出判别结构平衡稳定性的能量准则为

$$\begin{aligned} \Delta U > \Delta T & \quad \text{系统平衡状态稳定} \\ \Delta U < \Delta T & \quad \text{系统平衡状态不稳定} \\ \Delta U = \Delta T & \quad \text{稳定平衡与不稳定平衡的分界点} \\ & \quad \text{(被称为中性平衡)} \end{aligned} \quad (5)$$

对照前述列车脱轨机理,按上述能量准则来评判列车脱轨时此系统动力平衡状态的稳定性,应将(5)式 ΔT 代之以输入此系统横向振动的能量 σ_p (因为它来自激力做功), ΔU 应改为系统内力做功,包括弹性力、惯性力、阻尼力作的功。因为系统动力平衡是弹性力 f_s 、惯性力 f_i 、阻尼力 f_D 与干扰力 $P(t)$ 的平衡,我们将弹性力、惯性力、阻尼力三者之和称为系统抗力,则 ΔU 称为系统抗力做功,以 σ_c 表示。将 σ_c 、 σ_p 分别代替(5)式中的 ΔU 和 ΔT ,得出评判列车脱轨的能量准则。

$$\sigma_c > \sigma_p \quad \text{不脱轨} \quad (6)$$

$$\sigma_c = \sigma_p \quad \text{临界脱轨状态} \quad (7)$$

$$\sigma_c < \sigma_p \quad \text{脱轨} \quad (8)$$

各种情况下此系统脱轨时的抗力做功 σ_c 可以算出,输入此系统横向振动的能量 σ_p 则靠实测和统计。由于列车脱轨时的 σ_p 不能实测和统计,所以无法建立脱轨时实际输入此系统横向振动能量 σ_{pc} 与车速 V 的关系曲线。已建立的 σ_p - V 曲线(图 5,图 6)都是未脱轨的。车速为 $M \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时虽已发生过脱轨,但由于脱轨的强烈随机性,脱轨试验的有限次行车,很可能测不出该车速下脱轨,而测出并统计出了输入能量 σ_p ,它小于 σ_{pc} 。因此不能直接按(6),(7),(8)式判断 M 车速时列车是否脱轨。(6),(7),(8)式是由考察脱轨时此系统能量的变化,判别其平衡状态的稳定性来建立的。现在是在 σ_p 小于 σ_{pc} 的条件下考察车速为 M 时此系统平衡状态的稳定性,故不能用(6),(7),(8)式,亦不能用 S P Timoshenko

判别第一类稳定的能量法来判断。我们应用文献[16]说明压弯杆件平衡状态稳定性的概念来解决应用 σ_c 计算结果及 σ_p - V 曲线判断列车是否可能脱轨的问题,不过此时考察 N 到 M km·h⁻¹车速时此系统在 M 车速下动力平衡状态的稳定性。由于 σ_c 为脱轨时此系统的抗力做功及 σ_p - V 中的 σ_p 为非脱轨时的输入此系统横向振动的能量,可写出下列两式

$$\sigma_{CN} > \sigma_{PN} \quad (9)$$

$$\sigma_{CM} > \sigma_{PM} \quad (10)$$

式中, σ_{CN} 、 σ_{CM} 分别为 N 、 M 车速时此系统脱轨时的抗力做功; σ_{PN} 、 σ_{PM} 顺次为 N 、 M 车速时输入此系统横向振动的能量。

(10)式与(9)式两边对应相减,分别得出车速从 N 提高到 M 时此系统抵抗脱轨的抗力做功的增长量($\sigma_{CM} - \sigma_{CN}$)及输入此系统横向振动能量的增长量($\sigma_{PM} - \sigma_{PN}$)。若有

$$(\sigma_{CM} - \sigma_{CN}) > (\sigma_{PM} - \sigma_{PN}) \quad (11)$$

则(11)式反映车速从 N 提高至 M 时,此系统抗力做功的增长超过输入此系统横向振动能量的增长,根据文献[16]阐明的概念,在 M 车速下此系统动力平衡状态是稳定的,不会脱轨。反之,若有

$$(\sigma_{CM} - \sigma_{CN}) < (\sigma_{PM} - \sigma_{PN}) \quad (12)$$

则(12)式表示车速从 N 提高到 M 时此系统抗力做功的增长落后于输入此系统横向振动能量的增长,根据文献[16]阐明的概念,在 M 车速下,此系统动力稳定平衡成为不再可能,因而会脱轨。(11)式、(12)式为应用未脱轨的 σ_p - V 曲线及 σ_c 的计算结果评判列车是否脱轨的能量准则。

3.4 σ_c 的计算及 σ_p 的实测与列车脱轨预报

由(7)式知,列车脱轨时的 σ_p 等于 σ_c 。由于列车脱轨的强烈随机性,我国多次列车脱轨试验都未测出车轮掉道。因此 σ_c 很难测出。另外列车脱轨可能引起翻车、造成人员伤亡、轨道破坏、中断线路行车,给国家带来很大损失,即使试验能做出脱轨,亦不宜实施。由于我们提出了弹性系统总势能不变值原理及形成系统矩阵的“对号入座”法则,已考虑轮缘接触、车轮悬浮,建立了此系统空间振动方程;已测试统计出 σ_p ;已模拟出各种车速下的构架蛇行波;故根据前述脱轨几何准则,已用试算法由(7)式算出了列车脱轨全过程及脱轨时的 σ_c ,为应用(11)、(12)式评判列车是否脱轨奠定了基础。

构架蛇行波的测试资料是分析列车脱轨的根本基础。大量测试各种车速下的构架蛇行波,并统计

出具有一定概率水平的 σ_p 与车速 V 的关系曲线,就可根据此曲线及 σ_c 的计算结果,按(11)式、(12)式预报该车速下的列车是否有脱轨危险性见下面列车脱轨计算实例。

4 直线货物列车脱轨实例计算

4.1 实例一

1997年7月8日2422次全列空载C63货物列车在徐州以南津浦线直道区段K730+56处发生脱轨,运行速度70 km·h⁻¹,编组车辆数61,转8A转向架,线路状态符合规范标准。要求在这些条件下,预报此系统列车在70 km·h⁻¹车速下是否可能脱轨。我们先分别计算此系统在60 km·h⁻¹、70 km·h⁻¹车速下脱轨时的抗力做功 σ_{c60} 、 σ_{c70} ;再由重货车的 σ_p - V 曲线(图6)及通辽干线上测试统计的空、重车 σ_p 的比值,分别找出60 km·h⁻¹、70 km·h⁻¹空货车的 $\sigma_{p60}^{\text{空}}$ 、 $\sigma_{p70}^{\text{空}}$;然后比较($\sigma_{p70}^{\text{空}} - \sigma_{p60}^{\text{空}}$)及($\sigma_{c70} - \sigma_{c60}$)按(11)式、(12)式判断此系统列车在70 km·h⁻¹车速下是否可能脱轨。

(1) σ_{c60} 、 σ_{c70} 的计算

采用文献[11]的车辆及轨道计算模型,假定 σ_p ,模拟出70 km·h⁻¹构架人工蛇行波,算出此系统空间振动响应及车轮最大悬浮量 $\mu_s(t)$,看它是否达到轮缘尖端爬上钢轨顶部时的悬浮量 $|\mu_s(t)| = 25$ mm(图7),若未达到,再假定更大的 σ_p ,重复计算,直到最大的 $\mu_s(t) = 25$ mm时为止。产生 $\mu_s(t) = 25$ mm的 σ_p 就是我们要求的70 km·h⁻¹的此系统抗力做功 σ_{c70} 。由于受到计算机内存及运行速度的限制,计算了一台ND₅型机车牵引29辆C₆₃空载货车,以70 km·h⁻¹速度在500 m长的直线轨道上的走行情况。计算中用的轨道竖向几何不平顺为郑武试验线上实测的轨道竖向几何不平顺。计算结果发现机车后第4辆货车第1轴左轮的车轮悬浮量最大,达25 mm,此时车轮轮缘顶点已经爬上钢轨顶面,发生脱轨。限于篇幅,只列出该车轮对应的一些主要计算结果,分别见图8~图12。产生 $\mu_s(t) = 25$ mm的 $\sigma_p = 115$ cm·s⁻²,故要求的 $\sigma_{c70} = 115$ cm·s⁻²。按同样方法算出 $\sigma_{c60} = 105$ cm·s⁻²。

(2) 60 km·h⁻¹、70 km·h⁻¹空货车构架实测统计出的输入能量 σ_p 的确定图6为C62重货车的 σ_p - V 曲线。我们在通辽干线上实测统计(具有99%

概率)出的 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的空、重货车 σ_p 的比值为 1.3。从此结果可知,如果实测并统计出了空车各种速度下的 σ_p ,并在图 6 中绘出空车的 σ_p -V 曲线,它必定在重货车 σ_p -V 曲线的左上方,而这两条曲线的起点都各自在图 6 车速 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 竖轴上的 σ_p 点。 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的空、重车的 σ_p 可以认为相等,因此,这两条曲线在竖轴上交于一点。

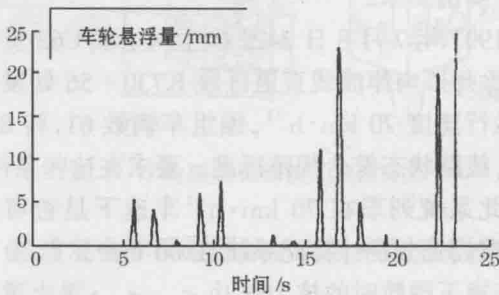


图 8 第 4 车第 1 轴左轮车轮悬浮量时程曲线

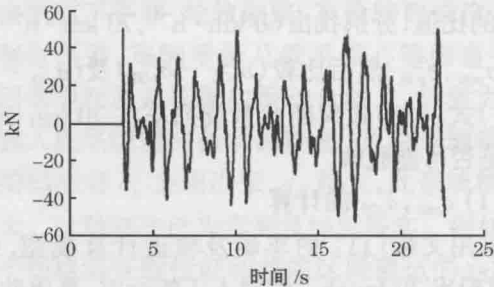


图 9 第 4 车第 1 轴左轮轮轨横向力时程曲线

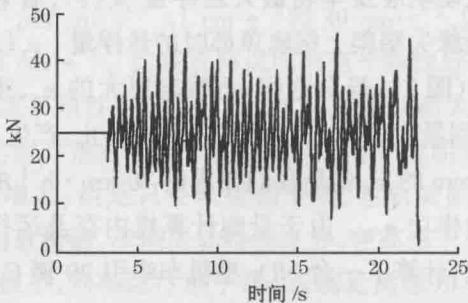


图 10 第 4 车第 1 轴左轮轮轨重向力时程曲线

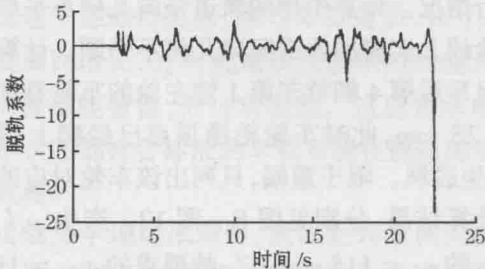


图 11 第 4 车第 1 轴左轮脱轨系数时程曲线

假定从 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 到 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的车速区间中,空、重货车 σ_p 的比值按车速线性递增,则每 $10\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 此比值递增 $\frac{0.30}{4} = 0.075$; 于是 $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

此时比值为 1.375。查图 6,得重车在 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 σ_p 分别 $53\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 及 $65\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$,故空载货车在 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 σ_p 分别为 $1.3\times 53 = 68.9\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 及 $1.375\times 65 = 89.4\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

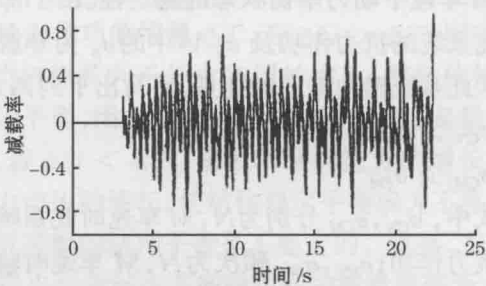


图 12 第 4 车第 1 轴左轮轮重减载率时程曲线

(3)判断是否脱轨

$\sigma_{c70} - \sigma_{c60} = 115 - 105 = 10\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$, $\sigma_{p70}^{\text{空}} - \sigma_{p60}^{\text{空}} = 89.4 - 68.5 = 20.5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$, 所以 $(\sigma_{c70} - \sigma_{c60}) < (\sigma_{p70}^{\text{空}} - \sigma_{p60}^{\text{空}})$, 根据(12)式,在 $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时会脱轨,此结论与实际吻合。

4.2 实例二

为进一步检验上述列车脱轨能量随机分析理论,再对现场脱轨试验最大响应进行预测。1997 年 5 月 9 日至 8 月 6 日,在京沪线徐州以南津浦线十里堡至桃山集间连续发生 7 起货物列车脱轨事故,线路为直线。为了找出南津浦线直线区段 7 起脱轨事故的原因,铁科院、济南铁路局和徐州铁路分局于 1997 年 10 月 28 日~11 月 11 日在南津浦线褚庄集~高家营间进行了脱轨试验^[17]。鉴于我国铁路货车空车脱轨机率最大,故选择了试验中的方案Ⅲ,即全列空车编组振动响应进行预报。试验时的线路状况为: $60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 钢轨,60 型钢筋混凝土轨枕,碎石道床,无缝线路,长大直线,纵坡很小,属于优良线路。线路状态轨检结果为:最大高低值 11.5 mm ,最大轨向值 11 mm ,最大轨距误差 7.5 mm ,最大水平值 6.5 mm ,最大扭曲值 8 mm ,属于优良线路。

按实例一计算模型,考虑空、重车 σ_p 的比值自 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 1.3 随车速增长,前已算出,每 $10\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 增长 0.075,故至 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,空、重货车的比值为 $1.3 + 0.075\times 2 = 1.45$ 。从图 6 查出 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 重车 $\sigma_p = 87\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$,得出 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 空车的 $\sigma_{p80}^{\text{空}} = 1.45\times 87 = 126\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$,再算出此系统 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 脱轨时的抗力做功 $\sigma_{c80} = 165\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 。前已算出 $\sigma_{c70} = 115\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$,已确定不脱轨的 $\sigma_{p70}^{\text{空}} = 89.4$