

列车脱轨分析 理论与应用

曾庆元 向俊 周智辉 娄平 著

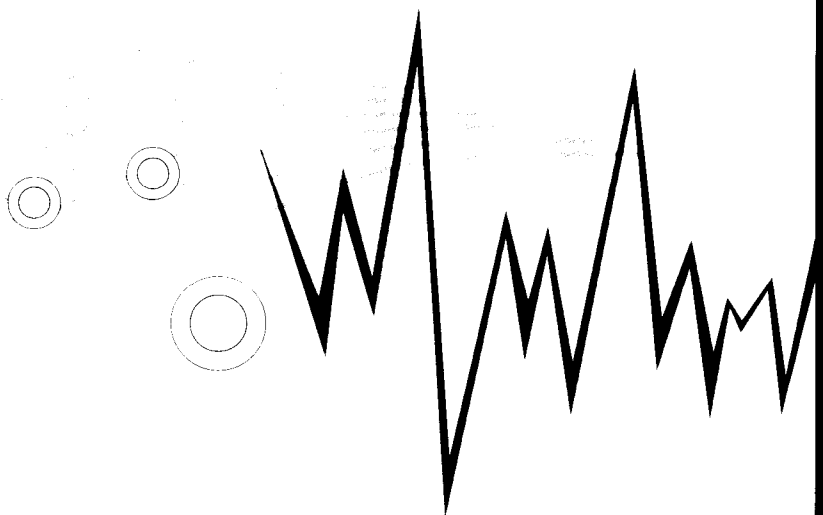


中南大学出版社

国家自然科学基金项目
铁道部科技研究开发计划项目
教育部高等学校博士点科研基金项目
湖南省院士基金项目

列车脱轨分析 理论与应用

曾庆元 向俊 周智辉 姜平 著



✈ 中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

列车脱轨分析理论与应用/曾庆元等著. —长沙:中南大学出版社,
2006. 12

ISBN 7-81105-460-4

I. 列... II. 曾... III. 行车事故 - 研究 IV. U298.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 151195 号

列车脱轨分析理论与应用

曾庆元 向俊 周智辉 娄平 著

☐责任编辑 谢贵良

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐印 装 湖南大学印刷厂

☐开 本 880×1230 1/32 ☐印张 12 ☐字数 300 千字 插页:2

☐版 次 2006 年 12 月第 1 版 ☐2006 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81105-460-4/G·166

☐定 价 35.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

序 一

列车脱轨往往造成车毁人亡,交通中断,带来严重经济损失和不良社会影响。预防列车脱轨,是确保铁路运输安全的重要课题。列车脱轨原因固然多种多样,但不外原因明确和不明原因两类。对于原因明确的脱轨,可以有针对性地采取措施加以预防。对于不明原因的脱轨,亟待做出科学解释,以便制定有效的预防措施。这一长期困扰铁路部门的重大科技难题,由中国工程院院士曾庆元领导的中南大学土木建筑学院列车脱轨理论课题组,经过20年努力探索,终于取得重大理论突破。

列车脱轨理论研究,至今已有百多年历史。1896年法国工程师Nadal首先提出,把轮轨处于一点接触时车轮开始悬浮的临界脱轨系数,作为预防脱轨的标准。各国铁路对此均表认同,并对临界脱轨系数进行了持续理论研究和大量脱轨试验,取得了一系列成果。各国铁路根据自身情况及研究成果,采用了不尽相同的脱轨评价标准。中国和日本等国家除采用脱轨系数外,还将轮重减载率作为辅助评价指标。这些研究成果和评价标准,对预防列车脱轨发挥了重要作用。但由于列车脱轨问题的复杂性,已有研究成果和评价标准存在一定局限性,仍有一些不解之谜,因此未能完全防止脱轨发生。

曾庆元院士领导的列车脱轨理论课题组,在深入分析国内外列车脱轨研究中存在的主要问题的基础上,进行多学科联合攻关,以新思路、新方法创立了列车脱轨分析新理论。他们把列车—轨道(桥梁)作为时变系统,从列车—轨道(桥梁)系统的耦合动力学和稳定性出发,考虑列车—轨道(桥梁)在运动中的相互作用,率先揭示了列车脱轨机理是列车—轨道(桥梁)系统横向振动失稳;首次提出了列车脱轨能量随机分析理论,包括弹性系统动力学总势能不变值原理,形成系统矩阵的“对号入座”法则,车

辆构架蛇行波为列车—轨道(桥梁)系统横向振动激振源,弹性系统运动稳定性的总势能判别法则。

应用这一新理论对 21 例长大列车是否脱轨进行分析,其中 9 例脱轨,12 例不脱轨,理论计算结果与实际吻合。应用这一原理对列车在横向振幅超过标准的 7 座桥梁运行安全性进行分析,理论计算结果是低于桥梁设计车速时桥上列车不会脱轨,与超标准振幅桥梁长期行车未发生脱轨的实际情况相符,已为铁路局所采用。这些实例表明,新理论对不明原因脱轨给予了正确解释,对实践有重要的指导作用。

曾庆元院士对桥梁事业怀有深厚感情。他几十年从事桥梁结构科研和教学工作,培养了一批高级技术人才,发表了许多研究成果,解决了桥梁设计施工和运用中的许多实际问题,为我国桥梁事业做出了杰出贡献。由曾庆元院士及其合作者完成的《列车脱轨分析理论与应用》,是多年研究列车脱轨理论的总成果,也是曾庆元院士为铁路发展做出的新贡献。

《列车脱轨分析理论与应用》一书,系统阐述了列车脱轨能量随机分析理论。2005 年铁道部科技司组织专家鉴定认为:“课题组实现了列车脱轨分析理论的重大突破。本理论研究成果为原始创新,达到了国际领先水平,具有很高的实用价值和广阔的应用前景,为制定预防列车脱轨措施及预防列车脱轨标准提供了理论依据,可供线、桥设计和规范修订参考。”我坚信列车脱轨分析理论会不断发展,为我国铁路运输安全,特别是高速(快速)铁路和既有线提速安全,提供理论和技术支持。我期待着列车脱轨分析新理论在铁路建设和运营管理中得到广泛应用,取得更大成效。

中国工程院院士

国家青藏铁路建设领导小组副组长

铁道部党组书记

铁道部副部长(正部级)

孫永福

2005 年 11 月

序 二

《列车脱轨分析理论与应用》是全面阐述列车脱轨的分析理论及其应用的专著，是作者及其合作者多年研究成果的总结。书中剖析了国内外列车脱轨的主要问题，提出了解决列车脱轨问题的理论、方法，并给出了若干应用实例。

列车脱轨分析是一个综合性很强的、多学科交叉的研究领域，它涵盖了结构动力学、结构稳定性、车辆动力学、轨道动力学、桥梁工程、轮轨相互作用、数值计算方法、现代控制理论等，是国际上铁道工程科学最活跃的研究领域之一。

本书的作者曾庆元院士长期从事桥梁结构振动与稳定性的科学研究和教学工作，具有深厚的理论基础和教学经验，已经在相关领域取得了杰出的研究成果；他率先揭示了列车脱轨的机理是列车—轨道（桥梁）系统横向振动的失稳。

在本书中作者将列车—轨道（桥梁）系统考虑成时变系统，提出了弹性系统运动稳定性的总势能判别准则及列车—轨道（桥梁）系统横向振动稳定性的分析思路，进而创立了一套列车脱轨能量随机分析理论。理论和计算方法集中在第二至第六章，主要内容包括：（1）考虑车轮悬浮、轮—轨位移（竖、横向）衔接条件及轮—轨“游间”的影响，建立了描述列车脱轨全过程的空间振动计算模型和程序；（2）提出了车轮脱轨几何准则、计算长大列车车轮脱轨的全过程，建立了列车脱轨时横向振动极限抗力做功 σ 。与车速 v 的关系曲线；（3）提出了有限次行车试验测不出列车脱轨全部信息及可能的最大输入能量 $\sigma_{p,\max}$ ，论证了 $\sigma_{p,\max}-v$ 曲线与有限次行车试验测得的 σ_p-v 曲线平行，为建立列车脱轨评判

准则奠定了基础；(4)建立了评判列车是否脱轨的系统横向振动极限抗力做功增量 $\Delta\sigma_{cr}$ 与输入能量增量 $\Delta\sigma_{pr}$ 的准则。

第七至第十四章是作者应用所建立的理论解决列车脱轨问题的实例，主要内容是：提出了预防脱轨的措施及预防脱轨标准的制定方法；算出了 21 例(9 个脱轨，12 个不脱轨)列车是否脱轨的结果，计算结果均与实际情况相符，突破了国际上百年来未解决的列车脱轨分析难题；解决了横向振幅超过桥梁限值的 7 座桥梁的行车安全性问题等。相关的应用成果得到了上海铁路局、沈阳铁路局、郑州铁路局、大桥工程局等单位的肯定，为列车脱轨预警系统的研制提供了理论依据和设计原理。

本书结构合理，表述清楚，是从事铁道工程科研、教学的专家、教授、研究生值得认真阅读的一本好书，本书的出版不仅具有重要的理论意义，而且具有巨大的应用价值。

笔者向作者、读者和出版者致意，衷心祝贺本书出版。

中国工程院院士
中科院数学与系统科学研究院研究员

崔俊芝

2006 年 4 月

国内外十位专家评审意见

1. [美国]傅公康教授评审意见

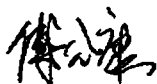
列车脱轨问题是 100 多年来公认的世界性难题,列车脱轨分析理论及判别准则多年来采用“脱轨系数”与“轮重减载率”等作为列车脱轨评判准则,这些参数的内涵信息太少,过于简单,不能反映列车脱轨的全过程,其限值判别标准具有较大的保守与不确定性,很难反映列车是否发生脱轨的事实。

曾庆元院士和他的学生们采用非常规的理念和方法,经过近十年的艰苦努力,在这个问题的分析理论和实际应用方面取得了突破性进展。他们率先明确提出了列车脱轨的力学机理是列车—轨道(桥梁)时变系统横向振动失稳。基于这个基本概念,他们考虑了车轮悬浮、轮轨位移衔接条件及轮轨“游间”影响,根据“弹性系统动力学总势能不变值原理”与形成矩阵的“对号入座”法则,建立了列车—轨道(桥梁)时变系统空间振动方程。对此方程,曾庆元院士课题组采用了 Wilson- θ 法求解,并编制了相应计算程序,首次计算了长大列车的脱轨全过程,并创立了一套列车脱轨能量随机分析理论。基于弹性系统运动稳定性总势能判别准则及列车脱轨机理,他们提出了“判别列车脱轨的能量增量判别准则”,进而分别提出了桥梁和轨道预防列车脱轨评判标准的制定方法。运用上述“列车脱轨能量随机分析理论”及其“列车脱轨的判别准则”,这个研究团队对运营现场多起列车脱轨实例进行了大量的计算分析,其结果与现场实例相符,说明了该理论是正

确可行的,可应用于桥梁与线路轨道列车不明原因脱轨的分析,并据此可提出预防列车脱轨的有效措施。

曾庆元院士课题组首次独立提出的列车脱轨分析理论及判别准则明显地提升了有关研究的学术水平。就本人所知,曾庆元院士课题组出版的著作《列车脱轨分析理论与应用》,是世界上第一本全面阐述列车脱轨分析理论及其应用的专著。他们关于该理论和应用的研究为原始创新,研究整体达到了国际领先水平。

本人认为,曾院士课题组的列车脱轨分析理论与应用研究成果具有重大学术价值。推广应用后,巨大的经济与社会效益是可以期待的。



傅公康,博士,教授,高等桥梁工程中心主任
韦恩州立大学,美国底特律
(兼)同济大学长江学者讲座教授

2006年6月27日

2. [美国]John Ma 博士评审意见

列车脱轨往往造成车毁人亡,交通中断,带来严重经济损失和不良社会影响,列车脱轨原因固然多种多样,但不外原因明确和不明原因两类。对于原因明确的脱轨,可以有针对性地采取措施加以预防,对于不明原因的脱轨,亟待做出科学解释,以便制定有效的预防措施。列车脱轨理论研究,至今已有百年历史,1896年法国工程师Nadal首先提出,把轮轨处于一点接触时车轮开始悬浮的临界脱轨系数,作为预防脱轨的标准。各国铁路对此均表认可,并对世界脱轨系数进行了持续理论研究和大量脱轨试验,取得了一系列成果,各国铁路根据自身情况及研究成果,采用了不尽相同的脱轨评价标准。中国和日本等国家除采用脱轨系数外,还将轮重减载率作为辅助评价指标。这些研究成果和评价标准,对预防列车脱轨发挥了重要作用,但由于列车脱轨问题的复杂性,已有研究成果和评价标准存在一定局限性,仍有一些不解之谜,因此未能完全防止脱轨发生。

中南大学曾庆元院士及其领导的课题组,在深入分析国内外列车脱轨研究中存在的主要问题的基础上,把列车—轨道(桥梁)作为时变系统,从此系统横向振动稳定性出发,考虑此系统在运动中的相互作用,率先揭示了列车脱轨的力学机理是此系统横向振动丧失稳定,首次提出了列车脱轨能量随机分析理论。课题组并在现场进行了实车测试,进而分别提出了桥梁预防列车不明原因脱轨评判标准的制定方法,并建立了具有安全系数的预防桥上列车脱轨条件,使得这一长期困扰世界铁路部门的重大科技难题有了突破,全部成果体现在他们出版的《列车脱轨分析理论与应用》专著之中,应用这一理论,对21例长大列车是否脱轨进行分析,其中9例脱轨,12例不脱轨,理论计算结果与实际吻合;对

列车在横向振幅超过标准的 7 座桥梁运行安全性进行了分析, 理论计算结果与实际情况相符; 已为中国铁路局所采用。这些实例表明, 新理论对不明原因脱轨给予了正确解释, 对实践有重要指导作用。

综上所述, 中南大学曾庆元院士及其领导的课题组关于“列车脱轨分析理论与应用”的研究具有显著的创新, 无论是分析理论还是工程实际应用, 均达到国际领先水平。



土木工程系桥梁教研室主任

美国田纳西大学

2006 年 6 月 11 日

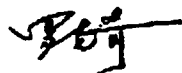
3. [英国]罗克奇博士评审意见

曾庆元院士从事铁路教学和科学研究工作数十年,多次主持和参加重大科学研究项目,取得了一系列成果,解决了众多的现场实际问题。他和他的合作者们面对铁路列车脱轨这一涉及多学科、多因素的高难度课题,根据工程振动系统必存在稳定性问题的理念,在他们以往研究列车和桥梁系统稳定性所取得的成果上,系统地对列车脱轨进行了多层次、多因素的深入分析以及大量试验,将列车脱轨的根源定位于该系统横向振动丧失稳定,创立了铁路列车脱轨能量随机分析理论,实现了对传统脱轨理论研究的突破,具有重大意义,他们在这一领域发表的研究论文数目位居国际前列。

该书第一章叙述了建立系统动力学方程组和判别该系统稳定性问题的基本原理,即“弹性系统动力学总势能不变值原理”;第二章和第三章对列车脱轨研究现状和存在的问题及对这些问题的解决方法进行了概述;第四章至第六章具体分析了列车与轨道(桥梁)这一工程系统的动力响应和稳定性问题,其中就列车脱轨的多个因素进行了详细的研究,得出了该系统保持横向稳定,防止列车脱轨的能量增量评判准则;第七章和第八章则根据铁路列车脱轨能量随机分析理论,阐述了预防列车脱轨所可能采取的措施;第九章和第十章对铁路机车、客车和货车构架横向振动波(在该分析理论中所需的激振源)的测试和数据处理作了简明扼要的叙述;第十一章至第十四章就该理论的应用给出了计算实例,对列车运行的几种不同工况进行了分析,其结果均与实际情况相符合,是对该理论的科学验证。

《列车脱轨分析理论和应用》是一本十分难得的铁路教学和科学研究的参考书。随着科学技术的进步,铁路列车脱轨的分析

也将不断深入和完善。与此同时,编制适合于铁路工程需要的通用(专用)计算机软件包将会对铁路建设的发展起到一定的催化作用。

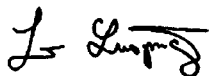
A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes.

英国雀来堡公司高工

2006 年 8 月 1 日

4. [英国]刘国平教授评审意见

专著《列车脱轨分析理论与应用》详细分析了国内外列车脱轨的主要问题,全面阐述了解决列车脱轨问题的理论和方法,并给出了许多应用实例。是作者及其合作者多年来在列车脱轨研究领域的科研成果总结。列车脱轨研究是一个综合性的交叉学科,涉及了力学、工程、数值计算、控制理论等研究领域,是铁道工程学术界非常热门的研究学科。该书主要包括了两大部分,第一部分(第一章至第六章)全面剖析了作者创立的列车脱轨能量随机分析理论,第二部分(第七章至第十四章)详细地介绍了应用所建立的理论解决列车脱轨问题的实例。该专著的特点是:内容原创性极强,理论深度很高,应用实例有效。该书反映了作者曾庆元院士在桥梁结构振动与稳定性的科学研究和教学工作方面,具有深厚的理论基础和丰富的教学经验。其内容将具有非常广阔的工程应用前景,是铁道工程界科技人员很有价值的参考书。



英国哥拿摩根大学教授

2006年7月28日

5. [日本]松浦章夫教授评审意见

一、理论方面

20 世纪 80 年代以来,该书作者曾庆元院士及其研究队伍针对列车—轨道(桥梁)时变系统振动分析理论,进行了颇具特色的研究。作者们针对过去国内外列车脱轨研究中的一些主要关键问题,就列车脱轨提出了崭新的分析理论。

在列车、轨道(桥梁)的整体分析问题上,为了解决车轮、钢轨间的接触问题,想出了有效利用“弹性系统动力学总势能不变值原理”的方法,并以之为基础,在满足轮轨位移衔接条件的前提下,以较高的精度,成功地模拟出了车轮、钢轨之间的接触状态。另外,由于使用了该方法,在用有限元法求解时,能够简洁地导出刚度矩阵、质量矩阵以及阻尼矩阵,可以提高求解的效率。该理论与原有理论的不同之处在于:针对列车—轨道(桥梁)时变系统横向振动稳定性问题,根据运动稳定性总势能判别准则,进行了列车是否脱轨的判定。

二、应用方面

针对列车脱轨研究的以下三个问题,在新的切入点上探讨了实用的方法。

(1)防止脱轨指标的设定问题

现行的脱轨系数 Q/P 对防止脱轨有一定的效果,但却成为不了根本性指标。作者们在实验中实测出的大量数据表明,很多情况下都会大大超出限定值(界线值) $[Q/P] = 0.8, 1.0$ 。

(2)脱轨的机理问题

现行的指标,在车轮、轨道一点接触时,无法模拟实际行车时出现的因车轮上浮产生的悬空现象。

(3)列车脱轨模拟计算中的根本问题

①列车、轨道的系统分析模型,不能满足真实的车轮、轨道的接触条件。

②将轨道横向的不平顺假定成列车、轨道(桥梁)系统的激振源,是不合理的。原本的振动源应该是因车轮与钢轨的接触状态变化而产生的。

③现行的其他的模拟计算模型,在模拟轨道不平顺的随机性时没有考虑到瞬时点的可变性,这是个很大的问题。本书作者们以实测到的大量台车(转向架)的蛇行波为基础,统计出具有99%概率的标准差 σ_p ,运用蒙特卡罗法随机模拟台车的蛇行波,将这些模拟波作为横向振动的激振源来使用,再模拟计算出最大振动响应,而所计算出的最大响应值又与大多数桥梁上取得的实测值极为吻合。该成果在铁道部召开的鉴定会上得到了很好的评价。

[评论:由于最理想的测量数据是车轮、钢轨间的相对运动波,实地测量是很困难的。为此,作为替代,作者们使用了实测的台车振动波,把车轮、钢轨间的相对运动间接地掌握住了。虽然,在精度方面还留下了课题,但基于这样的实测值而导入的激振源,在实际的横向振动评价上应该可以提供最实际的评价值。]

松浦章夫

日本芝浦工业大学教授

2006年7月10日

6. [澳大利亚]秦庆华教授评审意见

《列车脱轨分析理论与应用》是全面阐述列车脱轨的分析理论及其应用的专著,是作者及其合作者多年研究成果的总结。本书第一章提出了弹性系统运动稳定性的总势能判别准则,它是列车脱轨分析理论的基础。第二章在全面细致地分析国外及国内脱轨研究背景的基础上,深刻指出并剖析了其存在的主要问题,同时提出了解决这些问题的思想和方法。第三、四、五、六章详细论述了列车脱轨分析理论。第七、八章论述了预防脱轨标准的制定。第九、十、十一、十二、十三、十四章叙述了车辆构架蛇形波测试及脱轨分析理论应用。书中剖析了国内外列车脱轨的主要问题,提出了解决列车脱轨问题的理论、方法,并给出了若干应用实例。全书系统性强,表达清楚,文字简练,是一本难得的学术专著。

本书具有如下一些特点:

(1)创立了一套新的列车脱轨分析理论,这套理论起始于列车—轨道(桥梁)系统横向振动稳定性分析,一步一步推证,结果于脱轨评判准则的建立,国内外未见有如此清晰的列车脱轨分析理论,所以这套理论有极高的学术水平,为原始创新。

(2)这套理论的脱轨评判准则来源于此系统横向振动稳定性的标志——脱轨与不脱轨的条件。故这套理论中的评判准则能够控制脱轨,从而解决了脱轨控制问题,所以这套理论是列车脱轨控制理论,是脱轨研究中的重大创新。

(3)算出了21例长大列车是否脱轨,解决了7座横向振幅超限桥梁的列车走行安全性问题,计算结果均与实际情况符合。表明这套理论能反映实际,准确可靠,具有优越的应用效果。

(4)应用这套理论,研究组提出了预防不明原因脱轨的措施、