



国际重载铁路最佳应用指南

——轮轨关系

国际重载协会

铁路科技图书出版基金资助出版

国际重载铁路最佳应用指南 ——轮轨关系

国际重载协会 编

中国铁道出版社

2009年·北京

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2009-3450 号

图书在版编目 (CIP) 数据

国际重载铁路最佳应用指南. 轮轨关系/国际重载
协会编; 郭俊等译. —北京: 中国铁道出版社, 2009. 6
书名原文: Guidelines to Best Practices
for Heavy Haul Railway Operations;
Wheel and Rail Interface Issues
ISBN 978-7-113-10146-6

I. 国… II. 国… III. ①重载铁路—铁路工程②重载铁
路—轮轨关系 IV. U239.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 090314 号

Copyright © 2001 International Heavy Haul Association
All rights reserved.

Reproduction or translation of any part of this work without the
permission of the copyright owner is unlawful. Requests for permission
or further information should be addressed to:
International Heavy Haul Association
2808 Forest Hills Court
Virginia Beach, Virginia 23454 USA

Library of Congress Control No. :2001 131901

书 名: 国际重载铁路最佳应用指南——轮轨关系
作 者: 国际重载协会
译 者: 郭 俊 温泽峰 王文健 陈光雄 曾 京 刘启跃
审 校: 任 化
出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)
责任编辑: 薛 淳 聂清立 韦和春
封面设计: 冯龙彬
印 刷: 北京市兴顺印刷厂
开 本: 880 mm×1 230 mm 1/32 印张: 10.875 字数: 320 千
版 本: 2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-113-10146-6/U · 2516
定 价: 68.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 请与本社发行部调换。

编辑部电话: (010) 51873138 发行部电话: (010) 51873170

打击盗版举报电话: (010) 63549504

本指南由国际重载协会理事会赞助编写,理事会成员如下:

澳大利亚

Brian G. Bock, 国际重载协会主席, 澳大利亚国家铁路

Michael Darby, 理事, 澳大利亚私营铁路

巴西

Ronaldo Costa, 理事, 巴西巴西淡水河谷公司

加拿大

Michael Roney, 理事, 加拿大铁路协会

中国

钱立新, 理事, 中国铁道协会

俄罗斯

Alexander L. Lisitsyn, 理事, 全俄铁道科学研究院

瑞典/挪威

Thomas Nordmark, 理事, 瑞典/挪威北欧重载运输协会

南非

Harry Tournay, 理事, 南非思博纳特(Spoornet)公司

国际铁路联盟(UIC)

V. C. Sharma, 理事, 国际铁路联盟国际部

美国

Roy A. Allen, 理事, 北美铁道协会

国际重载协会首席执行官

W. Scott Lovelace

《国际重载铁路最佳应用指南——轮轨关系》

翻译和审校人员

翻译：郭 俊 温泽峰 王文健

陈光雄 曾 京 刘启跃

审校：任 化

序

大约 50 年前,世界许多地区的铁路开始提高轴重,以求提供效率更高、成本更低的散装货物运输。但严重的钢轨、线路、车轮及车辆等问题接踵而生。为此,许多公司和管理部门开始了针对性的研究。研究结果第一次于 1978 年在澳大利亚珀斯举行的重载会议上公布。会议非常成功,因此 1982 年在美国的科罗拉多州科罗拉多斯普林斯召开了第二次关于重载铁路工程建设与经营的研讨会。会议上,与会代表对建立一个常设机构来分享重载铁路技术信息表示了极大的兴趣。

1983 年初,时任北美铁道协会研究部副总裁的哈里斯(William J. Harris)博士向参加 1982 年国际重载会议的代表发出邀请,在华盛顿共同讨论建立一个常设机构。1983 年夏天,来自澳大利亚、加拿大、中国、南非和美国的代表正式成立了国际重载协会。1994 年和 1995 年,俄国和巴西先后加入了国际重载协会。1999 年,挪威和瑞典铁路共同以北欧重载铁路协会的名义加入。国际铁路联盟国际部于 1999 年成为了国际重载协会的准会员,并且参加了国际重载协会理事会会议。

在 1991 年不列颠哥伦比亚省温哥华市举行的会议上,思博纳特(Spoornet)铁路公司执行总裁波拉马·劳斯提出了编写重载铁路最佳运行手册的建议。手册是根据此届国际重载协会及其他届会议上发表的技术论文编写的。这便是此应用指南的前身。

为鼓励重载运输研究与开发信息的交流,国际重载协会组织召开了 6 次国际会议和 10 次专家技术会议。国际重载协会理事会认识到,尽管召开这些会议是传播最新技术信息的最佳

途径,但对于任何一位管理人员,要获得这 16 次国际会议和技术专业会议提供的信息是非常困难的。因此,国际重载协会理事会一致赞同出版一本指导手册,提供有关最佳重载运输实用技术的综合信息。这对于世界各地重载铁路运输企业是一个有益的贡献。也正是基于此考虑,编写本书才付诸于实践。理事会成立了技术审查委员会,受委托编写这本重载运输指南,重点放在轮轨关系问题上。技术审查委员会的成员们及其所属机构对此的付出是巨大的。国际重载协会的财政支持使此项目得以实现。在此对俄罗斯铁道部、全俄铁路研究院、南非思博纳特(Spoornet)铁路公司、澳大利亚私营和国家铁路、美国铁道技术研究中心有限公司(TTCI)为此提供的资金和支持一并表示诚挚的谢意!

本指南汇集了在本成本效益基础上最佳运行实践的各种技术选择方案。并通过各种形式,将研究成果提供给运营商以更好地优化其铁路运营。

如若能够提供足够的研究或现场新资料,将尽快出版第二版。技术审查委员会欢迎大家多提宝贵意见以便对手册的进一步改进。反馈意见可通过电子邮件发送至国际重载协会首席执行官 Scott Lovelace 先生,电子邮件是:ihha@erols.com。

国际重载协会主席

Brian G. Bock

中文版前言

重载运输是当今铁路的主要发展方向之一,重载运输技术的创新与发展,提高了铁路的运输能力,提升了铁路在运输市场的竞争力。

中国铁路重载运输实践从 1984 年至今,经历了 20 多年,中国铁路人在重载运输领域进行了不懈的研究与实践。2003 年以来,中国铁路依靠自主创新,研制开发了大秦线重载运输成套技术装备,在大秦线成功开行了万吨和 2 万吨重载列车,建立了具有中国铁路特点的重载技术体系,使大秦线运量逐年提高到 2008 年的 3.4 亿吨。与此同时,中国铁路在既有繁忙干线实施提速技术创新,创造了时速 200~250 公里动车组列车,5000~6500 吨货物列车和双层集装箱列车共线运行的运输新模式。中国铁路既有线运输能力、运输效率、列车速度大幅提升,为国家经济发展做出了重要贡献。

恰逢第九届国际重载运输大会于 2009 年在中国上海召开,第九届国际重载运输大会筹备委员会为展示交流在重载运输领域取得创新性成果和实践经验,共同推动国际重载运输的发展,经国际重载协会同意并授权,由中国铁道出版社出版中文版《国际重载铁路最佳应用指南——轮轨关系》和《国际重载铁路最佳应用指南——线路与维护》。

在此,特别感谢国际重载协会。

第九届国际重载运输大会筹委会

二〇〇九年六月

前 言

本手册汇集了基于成本效益的最佳应用技术。研究成果的编写形式,适合铁路运营商利用这些成果更好地服务于各自的运营。

众所周知,轮轨关系是解决重载运输的关键。轮轨接触面的摩擦必须小,才能保证低阻力重载运输;但同时,也要求有足够的摩擦力,满足牵引力、制动力和列车转向的需要。所使用的材料必须非常坚固,才能抵抗重载产生的垂直作用力,以及由于轨道和车轮不平顺造成车辆垂直加速所带来的轮轨接触面的动力反应。同时,磨损率和故障率都不能过高,以免危及具有成本效益的重载运输。

本书第五章是对成本效益的讨论,第四章为案例分析。这两章汇集了铁路部门为取得具有成本效益的最佳重载运输所做出的各种选择方案。这些案例研究有个共同点,其过程都包括系统研究,同时必需包括对车辆、车轮、钢轨和轨道的研究。案例研究中其中一个项对从矿山到港口铁路矿石专线运营的研究,其机车车辆都是专用的;另一个案例是一条重载运输铁路线路,其重载运输仅占该铁路总运量的很小一部分;还有一个混合运输向重载运输专线过渡的案例。本手册中的铁路最佳运行技术还包括各种外在变化因素,如轴重、线路曲线和年运量等等。

在对提供各种解决方案进行比选时,也必需考虑铁路运输的具体条件。对于采用专用机车车辆的铁路专线,如果考虑采用其他类型列车,那么这些线路就会不适用重载运输。

这些案例研究和各种最佳运行实践分析表明,没有哪一种方案是完美无缺的,没有哪一种方案是完全适合各种运输条件的。适用于专用机车车辆从矿山至港口专线的解决方案与混合运输铁路线路不同。很多选择方案均强调,在对某一特定目的做出最佳决策之前,应对各种方案进行研究。

由于存在许多潜在解决方案,本手册第二、三章汇集了有关车轮与车辆以及钢轨与线路方面的最新技术。

根据对本手册的改进建议,以及新技术和新的现场信息,将考虑对本手册进行定期修订。

本指南受国际重载协会理事会的委托,由技术审查委员会撰写和编辑。

William J. Harris 哈里斯博士,国际重载协会名誉主席。

William J. Harris 于 1907—1985 年担任北美铁道协会研究及试验部任副总裁,同时也是国际重载协会的首任主席。

Willem Ebersohn 教授、博士(曾任南非比勒陀利亚大学铁路工程系主任),美国 AMTRAK(铁路客运公司)工程服务部主任。

Willem Ebersohn 教授在南非比勒陀利亚大学土木工程系任教期间,获得了铁路工程教授职称。他与思博纳特(Spoornet)公司合作进行重载运输研究,与美国 Amtrak 公司合作,对高速线路问题开展了广泛的研究。

James Lundgren 博士,美国铁道技术研究中心有限责任公司副总裁。

James Lundgren 博士早期在加拿大铁路工程部工作,后来加入了北美铁道协会,作为铁路行业代表,在运输试验中心工作。当时运输试验中心受联邦铁路局管理,成功转入到北美铁道协会。Lundgren 博士一直与国际重载协会保持联系。

Harry Tournay 先生,南非思博纳特(Spoornet)公司副总经理。

Harry Tournay 先生一直在思博纳特(Spoornet)公司从事机车车辆的改造研发工作。他从事对不同国家的机车车辆的设计,尤其在轮轨关系研究领域是名副其实的专家。

Sergey Zakharov 教授、博士,全俄铁道科学研究院摩擦学部主任。

Sergey Zakharov 博士一直从事铁路内燃机车和电力机车发展的研究,解决各类铁路摩擦学问题。最近 11 年来,他集中开展对轮轨关系及其相互摩擦学方面的研究,在组织召开国际重载协会 IHHA—99 STS 会议关于轮轨关系的会议上发挥了重要作用。

目 录

1 最佳运行指南的介绍和讨论	1
1.1 指南介绍	1
1.2 系统研究	1
1.3 轮轨接触界面的相互作用问题讨论	1
1.4 成本效益分析举例	6
1.5 关于车辆/线路相互作用问题的讨论	7
1.6 关于轮轨关系的讨论	7
1.7 对四个案例研究的讨论	7
1.8 关于优化重载运输维修方案的讨论	8
2 支撑技术及车辆轨道相互作用	9
2.1 车辆轨道相互作用	9
2.2 轮对和轨道	9
2.3 一般铁道车辆悬挂系统	15
2.4 重载车辆悬挂系统	26
2.5 钢轨和车轮型面设计	34
2.6 导向精度和容许偏差	45
参考文献	49
附录 锥度的推导	50
3 轮轨作用行为	53
3.1 系统论方法在轮轨作用行为研究中的应用	53
3.2 轮轨接触力学	55
3.3 轮轨材料	64
3.4 润滑和摩擦管理	71

3.5 轮轨损伤模式:机理和成因	80
参考文献.....	105
附录 A 钢轨缺陷和编号	113
附录 B 车轮缺陷和编号	115
4 重载专题研究	116
4.1 澳大利亚铁矿石专运运输线路和 BHP 铁矿运输车专题 研究	116
4.2 加拿大太平洋运煤专线轮轨成本降低专题研究	123
4.3 Carajás 铁路的轮轨作用行为.....	132
参考文献.....	157
4.4 基本重载钢轨系统设计的快速参考表	157
5 维持轮轨的最优性能	182
5.1 维持轮轨的最优性能	182
5.2 钢轨结构老化	185
5.3 钢轨磨耗测量	214
5.4 钢轨断面保养程序	220
5.5 轮对失效风险管理和维护	255
5.6 车轮和车辆相互作用状态测量	262
5.7 路旁润滑器的实际应用	272
5.8 车轮和钢轨寿命的最优化	284
5.9 结 论	298
参考文献.....	299
术 语.....	302

1 最佳运行指南的介绍和讨论

由技术审查委员会(TRC)主席威廉 J. 哈里斯 (William J. Harris) 博士、国际重载协会理事会及技术审查委员会成员 Harry Tournay 先生、技术审查委员会成员 Willem Ebersöhn 博士、Sergey Zakharov 博士、James Lundgren 博士等共同编写。

1.1 指南介绍

通过本指南,可以更好地了解优化重载铁路运输的途径。在 1.2 节中,强调指出了采取系统研究的重要性;1.3 节回顾了轮轨关系研究的历史;1.4 节是对成本效益的分析;在 1.5~1.8 节中,分别对本手册的后 4 章进行了简短介绍。

1.2 系统研究

本指南强调指出,如果改变铁路系统某一部分,而同时不考虑对系统其他部分的影响是不可取的。增加轴重的同时可能对轨道和桥梁带来巨大的影响,改变钢轨的特性可能引起车轮特性发生不可预测的变化。因此,本手册中的指导意见趋向于强调构件之间的相互作用,以及将轮轨关系问题作为系统进行研究的重要性。

通过最佳运行的方式,用系统研究的态度对待轮轨关系的设计与维护,可减少钢轨内侧和车轮轮缘的磨耗,避免车轮损坏和钢轨缺陷,稳定车辆特性,包括安全问题及降噪等。

1.3 轮轨接触界面的相互作用问题讨论

轮轨关系是重载运输问题中的关键。在轮轨接触处,只有低摩擦小阻力才允许重载运输。但是,还必需有足够的摩擦力,才能提供牵引力、制动力及对列车的转向性能。轮轨所使用的材料必需有足够的强度,才能承受重载产生的垂向作用力,以及由于轨道和车轮不平顺造成车辆垂

向及横向加速所带来的轮轨接触面的动力响应。同时,磨损率和脆断率都不能过高,否则将危及具有成本效益的重载运输。

在 175 年前铁路刚开始出现时,在钢轨上滚动钢质车轮并具有良好的承重能力几乎是不可思议的。当然,与现在的荷载相比,那时的荷载非常低。几十年来,轴重一直在持续稳定地增加。

50 多年前,增加轴重的频率改变了,突然间,人们发现有必要改进路基、道砟以及轨枕和扣件;突然间,人们发现有必要提高钢轨硬度、改进钢轨质量,在某些条件下,要采用淬火处理的钢轨;突然间,人们发现有必要改进车轮和车辆悬挂系统;突然间,人们发现有必要提高检测的能力和周期,以减少事故发生,改进服务质量。

这些对改进材料、设计和操作方式的需求,是基于必要的实际经验以及可获得的研究成果。无论各种难题的性质如何,对钢轨和车轮技术的持续关注,为不断提高轴重打下了基础。这些指导意见提出了改进最初构件和系统的选择方案,以及通过维护确保轮轨系统的持续作用的实用技术,以保证系统能够承担日益增加的荷载。

在钢轨上运行钢制车轮技术已完全满足铁路重载和大轴重运输的要求。钢对钢接触的特殊性质可大大减小荷载下两个接触体的变形。同时在整个接触面因摩擦造成的滚动接触的能量损耗非常小,两接触体的材料阻尼也非常小。这就是为什么铁路的滚动阻力如此之低、可完成大运量的原因。

接触面面积非常小,而相应的接触应力却很高。通常情况下,接触面呈椭圆状,相当于直径为 13 mm(1/2 英寸)硬币的大小(见图 1.1)。这意味着餐桌大小的面积(1.3 m×1.3 m 或 4.5 英尺×4.5 英尺)就能支撑起 20 000 t 重的列车!

在接触面的下面,无论是车轮还是钢轨,由于其周围材料通过对压力的反作用“支承”压力,所以钢材承受来自各个方向的压力是巨大的。如图 1.1 所示,接触面下方钢元素会聚集如箭头所示。这被称为应力的三轴状态。每一个箭头对车轮钢材的压力几乎是相等的,使钢材不能向任何方向移动或流动,因此可承受荷载。在这种情况下,使用高强度钢,轴重超出当前的水平(最大约 60 t 或以上)是可以实现的。

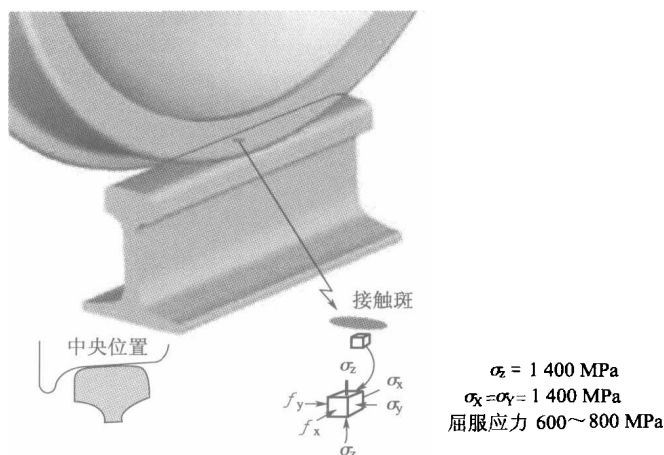


图 1.1 轮轨之间的接触：车轮放置在钢轨的中央

造成铁路不能达到此轴重，以及为什么一些铁路在采用目前一般轴重也出现问题，其原因是上述这些理想的接触条件并非总能达到。原因如下：

(1) 轨道及车辆的状态可能造成动态荷载，大大超过了静态荷载，常常在轮轨之间产生冲击；

(2) 接触斑的面积在某些无法控制的轮轨接触条件下可能会大大减少；

(3) 应力的三轴状态均衡可能被如下因素破坏：

- 摩擦力交错作用在接触面上，或接触发生在车轮或钢轨的边缘；
- 出现两点接触，在一个或两个接触面上出现集中相对打滑，加快了磨损。

图 1.2~图 1.6 展现常见的不良轮轨接触状况。

图 1.2：由于车轮踏面擦伤、钢轨接头、钢轨焊缝软化、钢轨波浪磨耗以及道岔处出现的非连续性引起的动态冲击荷载。

图 1.3：轮缘内圆角与轨距角之间出现集中的单点接触，造成轨头龟裂及剥落。

图 1.4：轨顶与车轮之间出现集中的凸面接触，造成轨顶及/或车轮踏面材料向外侧流动、剥落。如果接触向钢轨和车轮外缘方向发展，情况会更严重，会造成接触面下无材料支承应力单元。此时，应力的理想状态

被打破,材料开始流动。

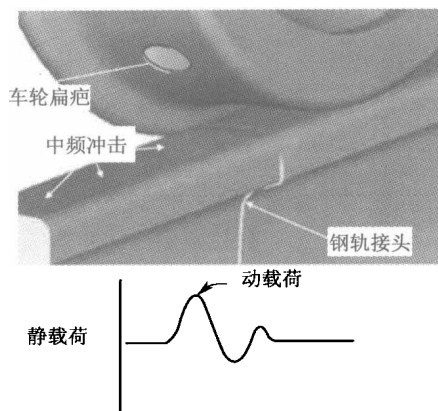


图 1.2

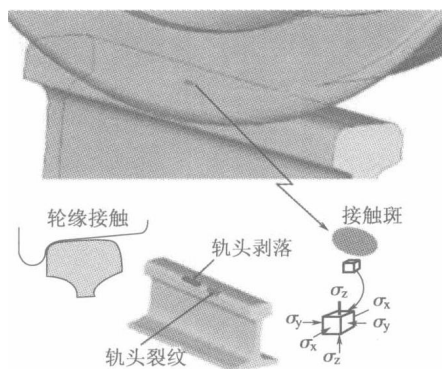


图 1.3

图 1.5: 曲线上轮轨间横向蠕滑是车辆和轨道性能恶化的原因。由于打滑或微量打滑产生的沿接触滑动方向的力引起接触斑下材料微单元的变形。这些破坏了接触斑微单元的压力和应力平衡情况, 导致材料流动。同时, 也可能造成轨顶中部磨耗和变形, 也就是通常所说的波浪磨耗或材料流动。

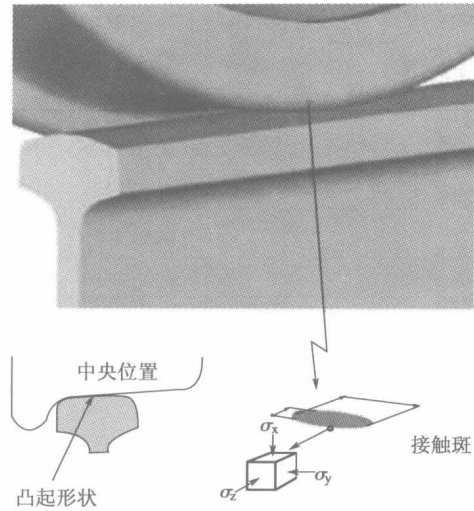


图 1.4

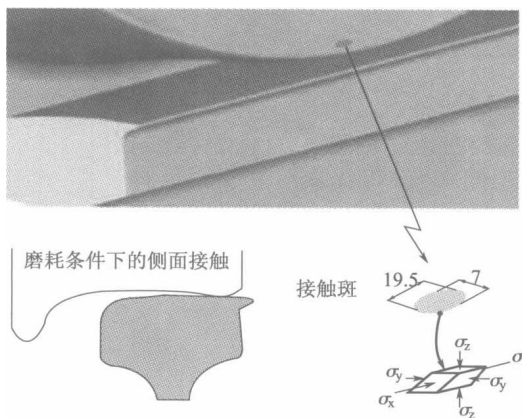


图 1.5

图 1.6: 对接触体形状控制不当会影响接触面的尺寸和轮廓, 造成应力集中、材料流动和疲劳。一旦钢轨或车轮材料缺陷发生在接触应力集中之处, 问题会急剧恶化。