



高速铁路隧道 气动效应

赵有明 马伟斌 程爱君 张千里 著

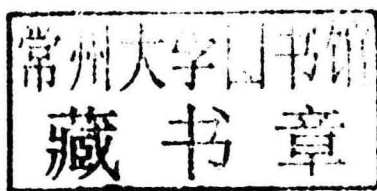
中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

本书研究项目获 2011 年度中国铁道学会科学技术奖一等奖

高速铁路隧道气动效应

赵有明 马伟斌 程爱君 张千里 著



中国铁道出版社

2012年·北京

内 容 简 介

本书在参考国内外研究成果的基础上,汇集目前高速铁路隧道气动效应最新研究成果,系统介绍高速列车通过隧道所产生的压力波和微压波现象及其研究方法和影响因素,并从工程实际应用、试验研究、数值分析等方面系统介绍三维可压缩非定常不等熵流动模型及其在简单和复杂隧道结构中的应用,论述隧道压力波的特征与防治措施;总结高速列车舒适性问题与国内外标准,以及压力控制技术和空气动力学设计与评价方法;归纳洞口微压波现象、形成机理、防治措施及数值分析方法。

本书适合高速铁路隧道工程、车辆工程及高速铁路气动效应等领域的科研、设计、试验、运营管理和科研院所等相关技术人员及师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路隧道气动效应/赵有明等著. —北京: 中国铁道出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-113-15302-1

I. ①高… II. ①赵… III. ①高速铁路-铁路隧道-空气动力学-研究 IV. ①U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 211565 号

书 名: 高速铁路隧道气动效应

作 者: 赵有明 马伟斌 程爱君 张千里 著

策 划: 时 博

责任编辑: 时 博

编辑部电话: (010)51873141

电子信箱: crph@163.com

封面设计: 郑春鹏

责任校对: 焦桂荣

责任印制: 陆 宁

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

版 次: 2012年9月第1版 2012年9月第1次印刷

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 14.25 字数: 350千

书 号: ISBN 978-7-113-15302-1

定 价: 68.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

序 一

高速铁路是世界铁路客运发展的方向。随着隧道的增多以及车速的提高,高速列车通过隧道引起的气动效应(压力波、空气阻力、列车风、微气压波等)势必会对列车运行的安全性、经济性和旅客乘坐的舒适性及隧道周围环境造成不良影响,一方面气动力对列车本身和列车运行产生作用,另一方面列车高速运行引起的气动现象对周围环境产生影响。这些都是高速铁路隧道与机车车辆设计中必须解决的关键技术问题。

《高速铁路隧道气动效应》是一部专注于高速铁路隧道空气动力学的专业性著作,有相当的理论水平和较强的工程实用价值。本书内容广泛,既有隧道空气动力学基本理论的探究,又有大量实车试验数据的深入剖析;既有数值仿真的分析,又有检测技术的研究。难能可贵的是,书中列举了动车组以300~380 km/h速度运行时的大量隧道气动效应测试数据,这在国际上尚属首次。本书结构合理、数据翔实、研究手段多样、研究内容深入,是一部高速铁路隧道空气动力学方面难得的佳作。

自2008年以来,本书作者主持和参加了200~250 km/h、300~350 km/h速度等级隧道气动效应试验研究工作,紧密结合高速铁路的发展需求,在高速铁路隧道空气动力学研究前沿领域,为高速铁路隧道气动效应研究进行了大量开创性工作,成果突出。本书就是作者近几年来在高速铁路隧道气动效应研究方法、分析理论及其应用成果方面的总结。本书的出版将会丰富和发展我国高速铁路隧道气动效应的研究成果,对广大科研及工程技术人员均有较高的参考价值。

中国工程院院士

周镜

序 二

《高速铁路隧道气动效应》一书的作者站在高速铁路隧道气动效应研究的发展前沿，从工程实际应用、试验研究、数值分析等方面系统地介绍了目前隧道气动效应国内外发展研究现状，提出了时速300~350 km条件下动车组车体内外和隧道内瞬变压力的变化规律、洞口微气压波的影响因素和变化规律及缓冲结构的设置条件、隧道附加阻力的试验方法和具体增量、隧道内辅助设施需要承受的气动荷载要求，以及长大隧道远程监测控制技术研究成果。

本书开展的研究具有开创性，取得大量的研究成果，丰富和发展了我国高速铁路机车车辆及隧道的设计理论和方法，已制定或修订技术标准和相关技术条件5项。其研究成果对高速铁路隧道设计和确定动车组隧道内最高交会速度具有重要的参考意义与指导作用，对相关学科的发展起到了积极的促进作用，在科研成果转化方面取得较大成绩。

本书结构完整，逻辑性较强，是一部既有较高学术价值，又有较强实用价值的好书，达到国内外先进水平。其主要特点是将理论应用于实践，系统地讲解了高速铁路隧道气动效应理论，并结合国际领先的测试技术，全面分析目前高速铁路隧道气动效应的影响因素、减缓措施、控制技术等，对高速铁路隧道工程设计与施工、列车优化设计具有指导意义。

本书作者主要从事高速铁路隧道工程及路基工程相关研究与应用工作，先后主持和参与了200~250 km/h高速铁路隧道气动效应试验研究、300~350 km/h高速铁路隧道气动效应试验研究、高速铁路隧道缓冲结构深化研究以及高速铁路隧道气动效应相关标准及设计参数优化研究等与之有关的科研项目，具有较强的专业功底，把握了该领域的发展方向。

中国铁道科学研究院研究员



前 言

我国高速铁路隧道存在山区修建较多、长及特长隧道较多、隧道群较多、普遍采用无砟轨道等特点。长期以来，由于列车运营速度较低，在我国，隧道气动效应一直未引起足够重视。随着客运专线及高速铁路大量开通，前期的研究成果已经不能适应我国高速铁路的发展。列车运行速度提高以后，列车与周围空气的动力作用明显加剧，尤其是高速列车在隧道中运行时诱发的空气动力效应，将关系到旅客乘车舒适度、隧道洞口附近环境保护、隧道设计参数合理性、铁路运营条件等，是高速铁路隧道设计和运营中必须考虑的关键技术问题。

自 20 世纪 60 年代日本新干线投入运行后，日本和西欧一些国家相继围绕列车高速过隧道问题开展了一系列研究，主要集中在乘客舒适度、压力波及微压波的传播和形成机理及其计算方法、列车空气阻力、列车头型设计、削减压缩波和微压波的各种方案以及相关试验方法等方面。中国铁道科学研究院从 20 世纪 90 年代起，通过国外资料的调研分析、数值模拟计算及现场实测，对高速铁路隧道气动效应进行研究，结合合武铁路、石太客运专线开展时速 200 ~ 250 km 的隧道气动效应研究，结合武广高速铁路、郑西高速铁路及京沪高速铁路开展时速 300 ~ 380 km 的隧道气动效应研究。作者结合前期的研究成果，对高速铁路隧道气动效应进行了系统地整理，该研究成果对我国高速铁路隧道设计和确定动车组隧道内最高交会速度具有重要的参考和指导意义，丰富和发展了我国高速铁路机车车辆及隧道的设计理论和方法，对我国高速铁路的建设具有重要指导作用。

全书共分 7 章：第 1 章论述目前隧道气动效应国内外研究历程、现状及涉及的科学问题；第 2 章从理论上对隧道内瞬变压力、车体内瞬变压力、隧道洞口微气压波、列车风、列车隧道内行车阻力等产生的机理及发展规律进行研究与探索；第 3 章介绍目前国内外高速铁路隧道气动效应先进的数值模拟计算手段，对其技术难点进行重点分析，并结合理论、实车试验数据，对高速铁路

典型隧道气动效应进行数值模拟分析；第4章主要介绍高速铁路隧道气动效应测试内容、方法、测点布置以及评判标准等关键测试技术；第5~7章根据目前各大高速铁路线路的测试数据以及数值模拟结果，总结目前国内高速铁路主要形式隧道内气动效应变化规律，最后介绍高速铁路隧道气动效应的主要研究成果以及需要进一步深化研究的科学问题。本书主要撰写人员：赵有明研究员、张千里研究员、马伟斌副研究员、程爱君副研究员、陈厚嫦研究员、朱忠林副研究员、董亮副研究员、李红梅博士、吴敏敏助理研究员、程远水助理研究员、付兵先助理研究员、郭小雄助理研究员、熊建珍副研究员、王立军副研究员、牛亚斌硕士生。全书由马伟斌、程爱君组织并统稿。

本书是一部系统介绍高速铁路隧道气动效应研究的著作，本书研究项目荣获2011年度中国铁道科学研究院科技进步特等奖、2011年度中国铁道学会科学技术一等奖。铁路科技图书出版基金资助了本书的出版，特此致谢。作者真诚地感谢铁道部科技司等相关司局领导、中国铁道科学研究院相关领导和同事们的支持和帮助。本书在撰写过程中，大量引用了中国铁道科学研究院有关20多条高速铁路联调联式以及相关科研项目研究成果、国内外同行和参考文献中的部分研究成果，在此深表感谢！另外，在撰写过程中得到中国铁道科学研究院科研处王澜处长、余翰斌副处长，铁建所叶阳升所长、柯在田副所长、龚增进主任、史存林研究员，中国铁道科学研究院咨询公司刘艳青研究员，中国铁道科学研究院研发中心宣言研究员、郭湛研究员，机辆所张岩助理研究员、何德华助理研究员，中铁西南研究院王建宇研究员、万晓燕研究员、吴剑副研究员，中南大学梁习锋教授、刘堂红副教授等的大力支持和帮助，在此深表谢意！

鉴于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请广大读者批评和指正！

作 者

2012年6月于北京

目 录

1 绪 论	1
1.1 国内外高速铁路发展现状	1
1.2 国内外高速铁路隧道气动效应研究现状	5
1.2.1 国内外高速铁路隧道概况	5
1.2.2 高速铁路隧道气动效应涉及的科学问题	13
1.2.3 高速铁路隧道空气动力学国外研究现状	15
1.2.4 高速铁路隧道空气动力学国内研究现状	17
1.2.5 高速铁路隧道气动效应研究方法	18
1.3 隧道空气动力学术语	21
2 高速铁路隧道空气动力学理论	28
2.1 隧道空气动力学理论简介	28
2.2 高速铁路隧道气动效应理论	31
2.2.1 车内与隧道内瞬变压力	31
2.2.2 洞口微气压波	43
2.2.3 隧道内列车风	47
2.2.4 列车空气阻力	47
2.2.5 气动噪声	55
3 高速铁路隧道气动效应数值模拟计算	58
3.1 高速铁路隧道气动效应数值模拟方法	58
3.1.1 数值模拟主要方法	58
3.1.2 数值模拟的基本控制方程	60
3.1.3 数值模拟主要软件简介	72
3.2 高速铁路隧道气动效应数值模拟关键技术	74
3.2.1 动网格技术	74
3.2.2 滑移网格理论	78

3.2.3	车体表面附面层处理技术	79
3.3	高速铁路隧道气动效应数值模拟计算过程	81
3.3.1	数值模拟前处理	81
3.3.2	数值模拟过程	83
3.3.3	计算工况及后处理	85
3.4	高速铁路隧道气动效应优化技术	97
3.4.1	代理模型技术	98
3.4.2	多学科敏度分析	99
3.4.3	多学科设计优化环境	100
4	高速铁路隧道气动效应测试技术	101
4.1	测试内容	101
4.2	测试方法	103
4.3	测点布置	104
4.4	测试设备	106
4.4.1	传感器性能的主要指标	106
4.4.2	传感器选取原则	108
4.4.3	传感器动态标定	111
4.4.4	数据采集系统	114
4.4.5	无线传输与控制系统	115
4.5	评判标准	119
4.6	关键测试技术	122
4.6.1	长大隧道气动效应测试技术	122
4.6.2	非恒定流空气附加阻力测试技术	123
4.6.3	附属设施气动力测试技术	124
4.6.4	动车组隧道内高速交会测试技术	125
5	高速铁路单洞双线隧道气动效应测试分析	126
5.1	动车组车体内外压力测试及变化规律	127
5.1.1	车内外瞬变压力随车速的变化规律	127
5.1.2	气动压力与隧道长度的关系	130
5.1.3	气动压力与隧道交会位置的关系	131
5.1.4	车体两侧压差对比分析	133
5.1.5	不同类型动车组隧道气动效应的对比分析	135

5.1.6	小 结	135
5.2	隧道内瞬变压力测试及变化规律	137
5.2.1	列车速度与瞬变压力关系	137
5.2.2	车型对瞬变压力的影响	139
5.2.3	单列通过隧道与隧道内交会时瞬变压力关系	142
5.2.4	隧道长度与瞬变压力关系	143
5.2.5	隧道内瞬变压力与车内压力的对比分析	147
5.2.6	辅助坑道对瞬变压力的影响分析	149
5.2.7	小 结	151
5.3	高速铁路隧道洞口微气压波测试及变化规律	152
5.3.1	列车速度与微气压波关系	152
5.3.2	隧道长度与微气压波关系	158
5.3.3	空间立体角对隧道洞口微气压波的影响	161
5.3.4	不同缓冲结构对隧道洞口微气压波影响分析	162
5.3.5	辅助坑道对微气压波的影响分析	169
5.3.6	单列动车组通过隧道与交会时洞口微气压波关系	170
5.3.7	小 结	171
5.4	高速铁路隧道内列车风测试及变化规律	173
5.5	高速铁路隧道内列车阻力测试及变化规律	177
5.6	高速铁路气动效应对隧道内附属设施的影响	185
6	高速铁路单线双洞隧道气动效应测试分析	190
6.1	高速铁路单线双洞设计原则	190
6.2	10号特长水下隧道气动效应测试分析	191
6.2.1	10号隧道简介	191
6.2.2	现场试验概况	194
6.2.3	测试数据分析	195
6.3	11号特长山岭隧道气动效应测试分析	199
6.3.1	11号隧道简介	199
6.3.2	现场试验概况	201
6.3.3	测试数据分析	202
7	成果及展望	205
7.1	高速铁路隧道气动效应研究成果	205

7.1.1 理论研究成果	205
7.1.2 试验研究成果	208
7.2 高速铁路隧道气动效应需要深化研究的科学问题	211
参考文献	214

1 绪 论

1.1 国内外高速铁路发展现状

铁路运输有着辉煌的历史，世界上第一条铁路诞生于英国。然而二战之后的一段时期，由于航空运输与高速公路的迅猛发展，铁路运输每况愈下，被称为“夕阳产业”。究其原因，是因为常规铁路的旅行速度太慢，不但无法与飞机相比，甚至无法与高速公路抗衡，自然越来越失去竞争力。

1964年10月1日，第一条最高时速为210 km的铁路在日本正式投入载客运输，这就是闻名世界的东海道新干线，这使得铁路成为经济效益好、技术先进的“绿色铁路”。此后，高速铁路成为世界各国关注的交通运输发展热点。2010年5月11日，日本新干线在东京以西100 km的都留市铁路上进行试运营，新干线在普通铁路上的时速约为443 km，在磁悬浮铁路上的时速约为580 km。从20世纪60年代末期开始，英、法、德等国相继向铁路加大了投资力度。1972年的试验运行中，法国TGV电动车组创造了331 km的高速轮轨时速，1989年建成的地中海线，列车平均时速达到300 km；1990年在大西洋干线上运行试验时又创造了515.31 km的时速世界纪录；2007年，改进型TGV列车在法国高速铁路东线试运行期间达到时速575 km，使高速铁路技术跃上了新台阶。德国的ICE则是目前高速铁路中起步较晚的项目，ICE(Inter City Express的简称)的研究开始于1979年，其内部制造原理和制式与法国TGV有很大相似之处，最高时速是1988年创下的409 km。英国“欧洲之星”是来往于伦敦、巴黎和布鲁塞尔之间的高速铁路线，经过英国与法国之间的英吉利海峡隧道，时速可达300 km。目前已有十个以上国家的列车客运时速达到或超过200 km，世界铁路运输已走向高速时代，如图1—1~图1—4所示。

时速200~250 km的高速铁路在欧洲、日本等已是比较成熟的技术，而时速超过500 km的超高速磁悬浮技术也在研究中。高速铁路在世界发达国家的崛起，使百年铁路重振雄风，传统铁路再展新姿，铁路发展进入了一个崭新阶段。高速铁路的蓬勃发展，在世界范围内引发了一场深刻的交通运输革命。



图 1—1 日本新干线



图 1—2 德国 ICE 模式



图 1—3 西班牙 AVE 模式



图 1—4 英国“欧洲之星”

近年来，世界各国研究应用表明：高速铁路具有安全可靠、快捷舒适、运载量大、低碳环保等特点，倍受世界各国的关注，使得铁路与其他运输方式竞争取胜变为现实。从 2010 年 12 月在北京举行的第七届世界高速铁路大会上可以看出，高速铁路已成为世界铁路发展的必然趋势，前景广阔。截至 2011 年初，全球投入运营的高速铁路近 2.5 万 km，分布在中国、日本、法国、德国、意大利、西班牙、比利时、荷兰、瑞典、英国、韩国、中国台湾等 17 个国家和地区。澳大利亚、美国、俄罗斯也已规划或将修建高速铁路。已建成的高速铁路隧道约 1 149.2 km(不含意大利的隧道)，其中日本为 698.6 km，法国为 60.1 km，德国为 199 km，西班牙为 15.8 km，韩国为 189.4 km，见表 1—1。在建高速铁路有 16 条，线路总长超过 3 000 km，将于今后几年陆续在 9 个国家建成投产。

随着中国国民经济的发展与交通的日益繁忙，许多铁路干线运力紧张的问题日益突出，20 世纪 80 年代末，中国将铁路高速化提上了议事日程。经过

表 1—1 国外已建成高速铁路隧道长度统计

国 家	线 别	线路长度(km)	隧道长度(km)	隧线比(%)	建成时间
日 本	东海道新干线	515.4	69	13.5	1964年10月
	山阳新干线	553.7	281	50.7	1972年/1975年
	东北新干线	496.5	112	24	1982年6月
	上越新干线	269.5	106	39	1982年11月
	北陆新干线	117.4	60	51	1997年10月
	东北盛冈—八户	96.6	70.6	73	2002年12月
法 国	大西洋线	282	20.8	7.4	1989年
	北方线	333	10.7	3.2	1993年
	巴黎地区联络线	128	9.6	7.5	1994年
	东南延伸线	148	6.3	4.3	1992年/1994年
	地中海线	250	12.7	5.2	2001年
德 国	汉诺威—威尔茨堡	327	121	37	1991年6月
	曼海姆—斯图加特	99	31	31	1991年6月
	科隆—法兰克福	219	47	21.3	2002年8月
西班牙	马德里—塞尔维亚	471	15.8	3.4	1992年4月
韩 国	汉城—釜山	412	189.4	46	2004年

十几年的努力,中国的铁路事业有了飞速发展。1994年12月22日,中国首列最高运行时速超过160 km的准高速列车在广深线上正式开通运营,被命名为“春光号”的准高速列车最高运行时速183 km。2003年7月1日,中国第一条铁路客运专线——秦沈客运专线正式开通运营,该线全长404.65 km,试验最高时速达到321 km,设计运营时速200 km。2005年6月竣工通车的遂渝线,设计时速200 km,开辟了中国高速铁路发展的新纪元。在2007年实行的中国铁路第六次大提速中,中国首次在各主要提速干线大规模开行时速高达200~250 km的中国铁路高速动车组列车(CRH),达到了目前世界上既有线提速改造的先进水平。2008年8月,中国首条设计时速达300 km的高速铁路——京津城际铁路通车运营。2011年7月1日,设计时速为350 km、运行时速为300 km的京沪高速铁路正式开通运营,其线路全长为1318 km,并于2010年12月在实车试验中创造了486.1 km的最高时速。截至2011年底,中国大陆投入运营的高速铁路已达8849 km,还有一大批在建设之中。目前,中国已成为世界上高速铁路发展最快、系统技术齐全、集成能力强、运营里程最长、运营速度最高、在建规模最大的国家。根据《中长期铁路网规划(2008年调整)》和目前的建设速度,到2020年,中国高速铁路总里程将超过1.6万 km,铁路营业里程达12万 km以上。

中国高速铁路主要线路规划为“四纵四横”。“四纵”即:北京—上海高速铁路,全长1318 km,贯通环渤海和长三角东部沿海经济发达地区;北京—武汉—广州—深圳(香港)高速铁路,全长2350 km,连接华北、华中和华南地

区；北京—沈阳—哈尔滨(大连)高速铁路，全长 1 612 km，连接东北和关内地区；上海—杭州—宁波—福州—深圳高速铁路，全长 1 650 km，连接长三角、东南沿海、珠三角地区。“四横”即：青岛—石家庄—太原高速铁路，全长 906 km，连接华北和华东地区；徐州—郑州—兰州高速铁路，全长 1 346 km，连接西北和华东地区；上海—南京—武汉—重庆—成都高速铁路，全长 1 922 km，连接西南和华东地区；上海—杭州—南昌—长沙—昆明高速铁路，全长 2 264 km，连接华中、华东和西南地区。我国高速动车组通过引进、吸收、消化、创新，已经发展成具有中国特色的高铁模式，分别经过 CRH₁、CRH₂、CRH₃、CRH₅、CRH₃₈₀、CRH_{380AL}、CRH_{380BL} 一系列更新，如图 1—5 ~ 图 1—10 所示。



图 1—5 CRH₁ 动车组



图 1—6 CRH₂ 动车组



图 1—7 CRH₃ 动车组



图 1—8 CRH₅ 动车组



图 1—9 CRH_{380A} 动车组



图 1—10 CRH_{380B} 动车组

1.2 国内外高速铁路隧道气动效应研究现状

高速铁路建设与运营作为一项复杂的系统工程,需要多种学科的技术支持。许多在低速时可以忽略的问题,在高速时却变得非常明显,例如高速列车与空气的相互作用。随着铁路高速化的推进,关于高速列车与空气相互作用的研究,已逐步形成了一个独立的学科——高速铁路空气动力学。近几年来,各国在推进铁路高速化和磁悬浮列车发展的过程中,都将空气动力学问题作为关键内容之一进行研究。

1.2.1 国内外高速铁路隧道概况

(1) 日本高速铁路隧道

日本是个多山的岛国,新干线大部分位于山区,因此更多地采用隧道结构且隧道比例较大。东海道新干线建设中,隧道占全线延长的13.5%。有了东海道新干线的运营经验,由山阳新干线、东北新干线、上越新干线,直至北陆新干线高崎至长野区段的基础设施中,隧道所占线路长度比例不断提高,日本营业新干线中隧道总长度达635 km(不包括秋田、山形小型新干线),约占新干线线路总长的33%,见表1—2。

表 1—2 新干线隧道长度(km)

线路名称	东海道新干线	山阳新干线		东北新干线
		冈山以东	冈山以西	
隧道长度	69(13.5%)	58(35%)	223(56%)	112(24%)
线路名称	上越新干线	北陆新干线 高崎—长野		东北新干线延伸线 盛冈—八户
隧道长度	106(39%)	60(51%)		70.6(73%)

日本是第一个修建高速铁路的国家,由于地形、经济原因,再加上对隧道空气动力学效应影响缺乏相关实践经验,新干线基本上以双线隧道为主,铁路的线间距较小(4.2 m或4.3 m),隧道断面较小(62 m²或64 m²)。日本新干线隧道断面如图1—11所示。

另外,由于隧道断面过小,列车在隧道内运行特别是在隧道内会车时,车内产生很大的压力波动。为降低列车交会和进出隧道时的车内压力变化,在列车的密封特性上付出了巨大的代价,因而在该方面的技术也是世界高速铁路中先进的。表1—3是日本高速列车车体与隧道断面积之比(阻塞比)和车体密封

