

车隧气动效应 原理与方法

CHE SUI QIDONG XIAOYING YUANLI YU FANGFA

王英学 高 波 赵文成 申玉生 周佳媚 著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

车隧气动效应原理与方法

王英学 高 波 赵文成 申玉生 周佳媚 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

我国的高速铁路技术在经历了十几年的发展和技术积累后,已日趋成熟和完善,随着高铁走出去战略的推进,高速铁路已经成为中国制造的名片。

本书作者以十几年来参与的高铁相关科研项目及取得的成果为基础,系统梳理、分析了车隧气动效应的原理、技术和方法。通过本书的学习和阅读,不仅可以掌握车隧气动效应的理论知识,还可以了解治理方法和实际工程的设计及应用方法。

本书对研究车隧气动效应的工作者及工程技术人员都有很好的参考借鉴作用。

图书在版编目(CIP)数据

车隧气动效应原理与方法/王英学等著. —北京:
中国铁道出版社,2017.2
ISBN 978-7-113-17751-5

I. ①车… II. ①王… III. ①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(2016)第 289865 号

书 名:车隧气动效应原理与方法
作 者:王英学 高 波 赵文成 申玉生 周佳媚 著

策 划:曾露平 读者热线:(010)63550836
责任编辑:曾露平 许 璐
封面设计:白 雪
责任校对:张玉华
责任印制:郭向伟

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.51eds.com>

印 刷:虎彩印艺股份有限公司

版 次:2017年2月第1版 2017年2月第1次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:12 字数:400千

书 号:ISBN 978-7-113-17751-5

定 价:38.00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,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010) 63550836

打击盗版举报电话:(010) 51873659

前 言

高速铁路始建于 20 世纪 60 年代,日本东海道新干线在 1964 年的运营速度达到了 210~230 km/h,取得了举世瞩目的成就。日本新干线穿越的山岭较多,为节省建设投资,选取的隧道断面较小,列车通过隧道引起气动音爆及由列车车厢内压力波动造成的耳部疼痛等一系列车隧气动问题也随之产生。于是,日本的许多学者开始对车隧气动问题展开研究,形成了大量有关高速列车车辆、隧道工程、线路工程等专业的一系列理论和技术成果,保障了日本高速铁路技术处于国际领先行列。

我国从 20 世纪 90 年代开始研制自己的高铁系统,采取“稳扎稳打”的技术方针,自 1997 年开始实行的“六次大提速”,检验和测试了火车和高铁车辆、信号、轨道、线路、桥隧等一系列理论、技术和设计方法。随后,我国逐步进入高铁建设和快速发展阶段。2007 年 4 月 18 日,256 列时速 200 km 至 250 km 的“和谐号”高速列车如梭似箭般穿行于大江南北,在 6 003 km 的提速铁路线上飞驰,标志着中国铁路步入高铁时代。

“十二五”期间,我国铁路新线投产达到 3.05 万 km,固定资产投资完成 3.58 万亿元,成为历史上投资完成和投资新线最多的五年。截至 2016 年底高铁营业里程超过 2.2 万 km,位居世界第一。我国幅员辽阔,山岭众多,铁路线路中,隧道占有很大比重。截至 2015 年底,全国在建铁路隧道 3 784 座,总长 8 692 km;规划隧道 4 384 座,总长 9 345 km;运营隧道 13 411 座,总长 13 038 km。2015 年新增开通运营铁路隧道 1 316 座,总长度 2 160 km,其中 10 km 以上隧道 18 座,长度 245 km。对于高速铁路隧道,车隧气动效应的治理是建设和设计过程中必须考虑的问题。

作者针对车隧气动效应的研究,始于 20 世纪末,是伴随着我国高铁技术从起步到成长、壮大过程,同时承担了国家自然科学基金、国家“863”、铁道部(铁路总公司)及各设计院的相关科研项目十余项,研究成果形成多项专利并获得多个科技进步奖,解决了大量的工程设计问题。

本书是对多年来从事车隧气动效应研究过程中的研究经验和方法的提炼和总结,并汇总了许多相关研究成果,可为相关研究领域的业界同仁提供参考。

全书分为:基本原理、研究方法、治理方法及研究成果四部分,由西南交通大学王英学等教授编撰。

各章节的分工如下:第 1 章由高波教授编撰;第 2 章由中铁第四勘察设计院集团有限公司的赵文成教授级高工编撰;第 3 章由西南交通大学申玉生副教授、周佳媚教授编撰,

第4章、第5章由西南交通大学王英学教授编撰。

在编撰过程中,王英学的博士生导师王建宇研究员对本书的内容规划给出了悉心指导,铁道第三勘察设计院集团有限公司的胡叙洪教授级高工为该书的编撰提出了很多建议,并提供了研究成果的适用及测试工点,在此对他们的帮助和指导一并表示感谢。

在资料收集及文整阶段,任文强博士、常乔磊硕士、张罗逊硕士、刘健硕士、郭晓杰硕士承担了很多工作,在此对他们的辛勤努力表示感谢。

由于时间仓促,书中可能存在一些纰漏或不足之处,敬请专家及同行批评指正。

著 者
2016 年

目 录

1 绪论	1
1.1 世界高铁的发展	1
1.1.1 国外高铁发展情况	1
1.1.2 国内高速铁路发展情况	4
1.2 国内外高速铁路隧道研究现状	6
1.2.1 国外高速铁路隧道发展情况	6
1.2.2 国内高速铁路隧道研究现状	9
1.3 车隧气动效应研究现状	9
1.3.1 国外车隧气动效应研究现状	9
1.3.2 国内车隧气动效应研究现状	10
1.3.3 车隧气动效应的治理方法	11
1.4 本书内容规划	14
参考文献	15
2 基本原理	17
2.1 车隧气动效应原理	17
2.1.1 车隧气动效应的产生	17
2.1.2 车隧气动效应的影响因素	20
2.1.3 列车压力舒适度	28
参考文献	33
2.2 数值分析原理	34
2.2.1 一维分析原理	36
2.2.2 二维分析原理	41
2.2.3 三维分析原理	43
参考文献	45
2.3 实验相似理论	45
2.3.1 相似及相似的条件	46
2.3.2 量纲分析法(π 定律)	48
2.3.3 相似理论的应用	49
3 车隧气动效应的研究方法	52
3.1 数值分析	52
3.1.1 数值软件的比较	52
3.1.2 有限体积法的方程离散化	55
3.1.3 紊流模型的选取	61
3.1.4 车隧相对移动的实现	64
3.1.5 边界条件的设定	66
3.1.6 计算结果的提取与分析比较	69
参考文献	71

3.2	模型实验	71
3.2.1	水槽模型实验法	72
3.2.2	弹射式模型实验法	72
3.2.3	气动发射炮模型实验法	74
3.2.4	模型实验测试设备	78
3.2.5	模型实验结果分析	82
	参考文献	84
3.3	现场测试	84
3.3.1	现场测试方法的要点	84
3.3.2	现场测试结果分析	85
3.4	小结	86
4	车隧气动效应的治理方法	87
4.1	微压波的控制方法	87
4.1.1	洞口段控制措施	87
4.1.2	洞身段控制措施	121
	参考文献	133
4.2	舒适度的控制方法	133
4.2.1	隧道断面面积	134
4.2.2	竖井的布置	135
4.2.3	不同隧道长度、列车和会车点	138
	参考文献	144
4.3	地下车站气动特性综合治理	144
4.3.1	高速铁路地下车站空气动力学问题研究现状	144
4.3.2	无缓冲设施车站气动效应研究	147
4.3.3	设置竖井车站气动特性研究	153
4.3.4	设置屏蔽门车站气动特性研究	155
4.3.5	隧道洞口设置缓冲结构	163
	参考文献	167
5	车隧气动效应研究成果	168
5.1	研究成果综述	168
5.2	隧道缓冲结构专利技术	170
5.2.1	发明专利——高速铁路隧道洞口侧部条带式音爆控制构造 (ZL201310634411.1)	171
5.2.2	发明专利——铁路隧道回路式减压洞口的修建方法 (ZL200910216049.X)	172
5.2.3	实用新型专利——高速铁路隧道洞口微压波缓冲设施 (ZL200720081645)	175
5.2.4	实用新型专利——一种帽檐斜切式隧道洞口缓冲结构 (ZL 201220750716.X)	178
5.3	实验装置专利	182
5.3.1	车隧气动实验装置发明专利说明书	182
5.3.2	专利使用证明	185
5.3.3	其他	186

之后,法国又相继开通了大西洋线、北方线、东南延伸线、巴黎地区联络线、地中海线、欧洲东部线等(见表 1.2),欧洲高速铁路网也以法国为中心向外扩散(见图 1.2)。由于当时法国列车技

表 1.2 法国高铁线路

线 路	通车时间/年	里 程/km	最高速度/(km/h)
TGV 东南线	1981~1983	417	270
里昂环形线	1992	38	270
TGV 大西洋线	1989~1990	282	300
TGV 北欧线	1993	333	320
巴黎环形线	1995	104	—
地中海线	2001	302	300

术较为先进,TGV 技术逐步向国外传播,其中韩国 KTX 和西班牙 AVE 的列车技术就是源于 TGV^[2-3]。

3. 德国高速铁路

德国高速铁路发展稍晚于日本和法国,原因是德国高速公路网已经较为完善,政府和公众认为没有必要再发展高速铁路来吸引客流。但在日本新干线和法国高铁取得巨大成功后,德国开始重视并发展高速铁路,终于在 1991 年 6 月建成曼海姆—斯图加特线,次年建成汉诺威—维尔茨堡线,之后又修建并通车柏林—汉诺威线和科隆—法兰克福线(见表 1.3)。至此,德国高速铁路网基本形成(见图 1.3)^[4]。



图 1.2 法国高速铁路网

表 1.3 德国高速铁路线路

线 路	运营开始时间/年	路线里程/km	最高速度/(km/h)
曼海姆—斯图加特	1991	99	280
汉诺威—维尔茨堡	1992	327	280
柏林—汉诺威	1998	264	280
科隆—法兰克福	2002	177	300(330)

4. 意大利高速铁路

意大利第一条高速铁路是于 1992 年修建的罗马—佛罗伦萨高速铁路,全长 252 km,最高运行速度 250 km/h。但是,意大利并没有立即修建其他线路,而是总结第一条线路的经验,待高速铁路技术日趋成熟之后才于 1994 年着手高速铁路网的修建。2008 年底,意大利高速铁路网基本完成,总长度 1 525 km(见表 1.4 和图 1.4)。

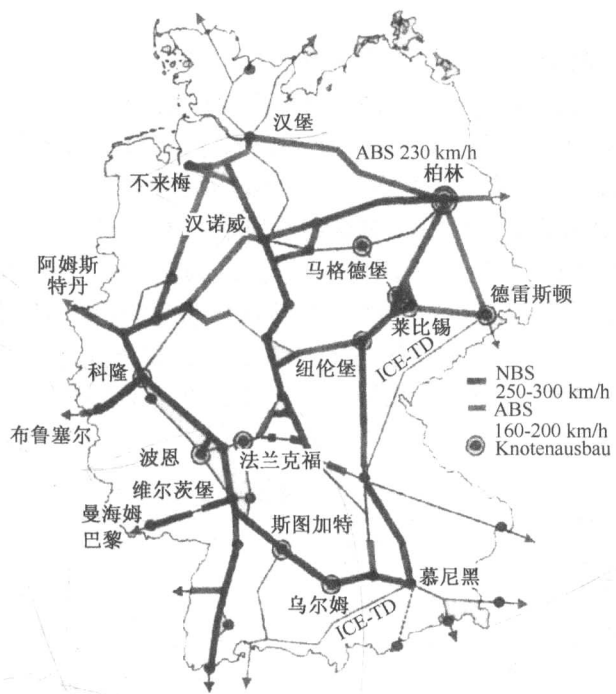


图 1.3 德国高速铁路网

表 1.4 意大利新建高铁线路

线 路	运营开始时间/年	路线里程/km	设计速度/(km/h)
都灵—诺瓦拉—米兰	2006~2009	125	300
博洛尼亚—佛罗伦萨	2008	79	300
米兰—佛罗伦萨	2007~2008	260	300
米兰—威尼斯	2008	212	300
米兰—热那亚	2008	54	300

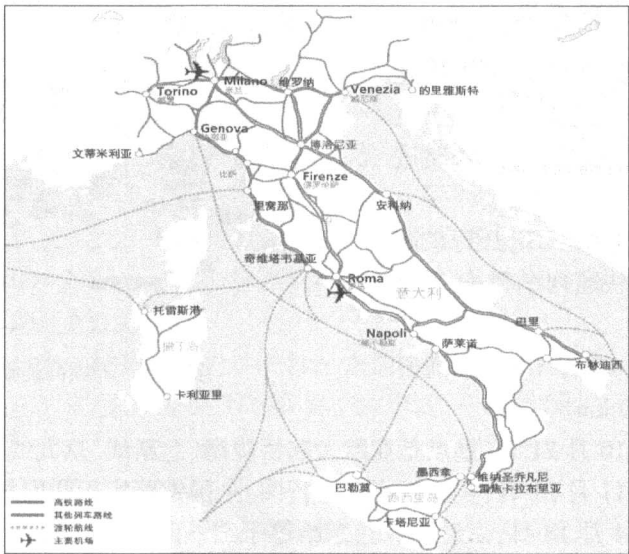


图 1.4 意大利高速铁路网

5. 韩国高速铁路

20 世纪 80 年代,随着经济的增长,韩国私家车以每年 13%的速度增长,随之而来的是严重的交通阻塞,导致韩国的交通物流成本高于其他发达国家,为了解决这一问题,韩国决定修建高速铁路。2004 年 4 月 1 日韩国第一条高速铁路首尔—釜山(京釜线)的第一阶段首尔—大邱段通车,2010 年 11 月 1 日第二阶段大邱—釜山段通车,自此首尔—釜山(京釜线)全线通车,全长 408.5 km,最高时速为 300 km。韩国高速列车为在充分吸取法国阿尔斯通 TGV 列车技术的基础之上研发的 KTX 列车,但韩国自主研发的 HSR-350X 型列车也在运行中,时速可达 352.4 km。为了扩大京釜线建设的影响力,韩国决定将湖南(大田—木浦)线电气化,使京釜线和湖南线相连接,实现高速列车服务,全长 407.6 km。该条线路已于 2015 年 4 月 1 日全线通车,自此,韩国高速铁路“人字形”铁路线基本形成(见表 1.5 和图 1.5),成为韩国民众出行的重要交通工具之一。

表 1.5 韩国高铁线路

线 路	通车时间/年	里 程/km	设计速度/(km/h)
首尔—釜山(京釜线)	2004	409	300
首尔—木浦(湖南线)	2015	408	300

英国、西班牙也继法国之后陆续建设高速铁路并运营;之后丹麦、荷兰、比利时、瑞典等国也在新世纪筹备建造高速铁路,预计 2020 年,整个欧洲的高速铁路网将基本形成;此外,美国、俄罗斯、澳大利亚等国近几年也在规划高速铁路网的投资建设^[5-6]。

1.1.2 国内高速铁路发展情况

党的十六大以来,铁路的现代化建设取得了显著成绩,高速铁路发展成就尤为突出。自 1997 年以来,中国铁路进行了六次既有线提速。

第一次:1997 年 4 月 1 日,开行最高时速 140 km 的 40 对快速列车和 64 列夕发朝至车。

第二次:1998 年 10 月 1 日,最高时速达到 140 km 至 160 km。

第三次:2000 年 10 月 21 日,重点是亚欧大陆桥陇海、兰新线、京九线和浙赣线。

第四次:2001 年 11 月 21 日,实施新列车运行图,全国铁路实行联网售票。

第五次:2004 年 4 月 18 日,京沪、京广、京哈等干线铁路提速区段列车最高时速可以达到 160 km。

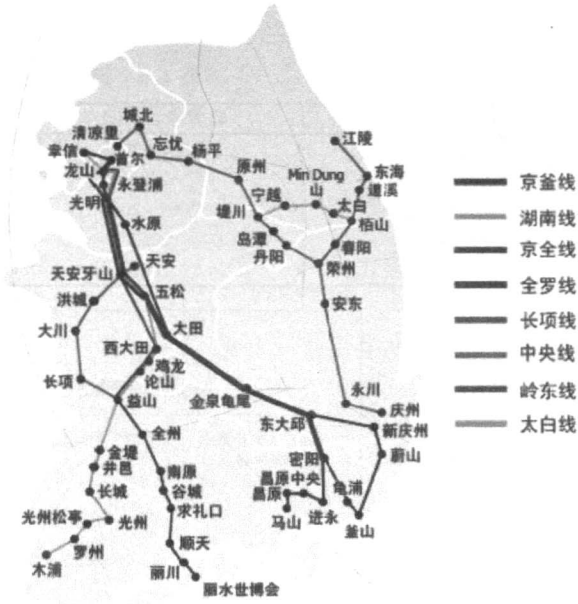


图 1.5 韩国高速铁路网

第六次:2007年4月18日,中国铁路第六次大面积提速调图正式付诸实施,中国首次在各主要提速干线(如京哈线、京广线、京沪线、京九线、陇海线、胶济线等)大规模开行时速高达200~250 km的中国铁路高速(CRH)动车组列车,达到了世界上既有线路提速改造的先进水平。

至此,我国完成了对铁路既有线路的提速,进入高铁技术“和谐”号的时代,成为与德国的ICE,法国的TGV,欧洲的“欧洲之星”,日本的新干线系统并列的高铁系统。

中国大陆目前已经开通的高铁线路包括:

2008年8月1日——中国第一条具有完全自主知识产权、世界一流水平的高速铁路京津城际铁路通车运营。

2009年12月26日——世界上一次建成里程最长、工程类型最复杂、时速350 km的京港高铁武广段开通运营。

2010年2月6日——世界首条修建在湿陷性黄土地区,连接中国中部和西部、时速350 km的郑西高速铁路开通运营。

2012年12月1日,世界上第一条地处高寒地区的高铁线路——哈大高铁正式通车运营。

2013年以来,宁杭、杭甬、盘营高铁以及向莆铁路相继开通。

2014年12月26日,中国三条重要高铁干线——兰新高铁、贵广铁路和南广铁路开通运营。

2015年1月1日起,北京西到重庆北、成都东每天开行的高铁列车开通。

中国规划建设的“四横四纵”高速铁路客运网骨架已经初具规模。

1. 四横,东西向

太青客运专线:太原—石家庄—济南—青岛。由胶济客运专线(济青高速铁路)、石济客运专线及石太客运专线组成,全长约770 km,连接华东和华北地区。全线设计时速为200~350 km。

徐兰客运专线:徐州—商丘—郑州—洛阳—西安—宝鸡—兰州,由郑徐客运专线、郑西客运专线、西宝客运专线、宝兰客运专线组成,全长约1400 km,连接西北和华东地区,其中徐州至宝鸡段时速为350 km,宝鸡至兰州段时速为250 km。

沪汉蓉客运专线:上海—南京—合肥—武汉—重庆—成都,全线由沪宁城际铁路、合宁铁路、合武铁路、汉宜铁路、宜万铁路宜昌至利川段、渝利铁路、遂渝铁路和遂成铁路构成,全长约1600 km,连接西南和华东地区。全线除了宜万铁路一段因穿越喀斯特地形和神农架地区,时速仅为160 km,遂渝铁路CTCS-2列控装置未投入使用限速160 km/h,沪宁段时速300 km,其余线路的时速均为200~250 km。远期宜万铁路时速提升至200 km,遂渝铁路CTCS-2列控装置投入使用后,速度提至200 km/h。

沪昆客运专线:上海—杭州—南昌—长沙—贵阳—昆明,由沪杭客运专线(350 km/h)、杭长客运专线(350 km/h)、长昆客运专线(250 km/h)组成,全长2080 km,连接华东、华中和西南地区。

2. 四纵,南北向

京沪客运专线(京沪高铁):北京—天津—济南—徐州—蚌埠—南京—上海,全长约1318 km,设计时速为350 km。有蚌埠—合肥的合蚌客运专线和南京—杭州的宁杭客运专线

为支线,设计时速为 350 km。其中北京—蚌埠—合肥段也是京台高速铁路的路线。

京广深港客运专线:北京—石家庄—郑州—武汉—长沙—广州—深圳—香港,由京石客运专线、石武客运专线、武广客运专线、广深港客运专线组成,全长 2 260 km,连接华北、华中和华南地区,设计时速为 350 km。建成后会是世界上通车里程最长的高速铁路客运专线。

京哈客运专线:北京—承德—沈阳—哈尔滨,并包含沈阳—大连的支线和盘锦—营口的联络线。由京沈客运专线、哈大客运专线、盘营客运专线组成,全长约 1 700 km,连接东北和关内地区,设计时速为 350 km。

杭福深客运专线(东南沿海客运专线):杭州—宁波—温州—福州—厦门—深圳,由杭甬客运专线、甬台温铁路、温福铁路、福厦铁路及厦深铁路组成,全长约 1 600 km,连接长江、珠江三角洲和东南沿海地区。其中杭甬客运专线为 350 km/h 级别,其他线路为 250 km/h 的 I 级干线。

当前,中国铁路网日趋完善,四横四纵的交通网已经基本形成,围绕北京的 1~12 h 的数小时经济圈正在逐步形成,未来,人们的出行将更为便捷。

近几年,中国高铁海外项目硕果累累。中国高铁的海外合作渐入佳境,也让世界人民近距离感受到“中国制造”的精良品质。

2014 年 4 月,中国在南美洲铺设的高铁“第一轨”——委内瑞拉迪阿铁路开始铺轨。

2014 年 7 月,由中国承建的土耳其“安伊高铁”正式通车。

2016 年 1 月,中国、印尼企业组建合资公司,开工建设印尼雅万高铁。

2016 年 2 月,中国提供融资并承建的伊朗高铁项目开工。

2016 年 5 月,中泰铁路已开建,这是泰国首条标准轨铁路。

2016 年 9 月,中美合建的美国西部快线高铁项目开工。

2016 年底,中俄“莫斯科—喀山高铁”项目设计工作将完成,并将于 2017 年动工。

目前,中国高铁已经完全拥有自主知识产权和核心技术,掌握了集设计、施工、装备、制造、列车控制、系统集成、运营管理于一体的高速铁路承载技术。中国铁路设备的出口市场已遍布亚洲和欧美地区,实现了六大洲的全覆盖,铁路装备也从单纯的产品出口向产品、工程、技术、标准全方位输出转变。伴随着中国高铁成功走出去,为国家带来的不仅仅是 GDP 的增加,更重要的是它极大提高了中国的国际形象及国际影响力和国际地位。

1.2 国内外高速铁路隧道研究现状

1.2.1 国外高速铁路隧道发展情况

(1) 日本高速铁路隧道

日本是一个多山的岛国,新干线大部分位于山区,因此更多的采用隧道结构且隧道比例较大。东海道新干线隧道占全线延长 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,隧道所占线路比例不断提高,日本营业新干线隧道总长度达 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 1.6。

表 1.6 新干线隧道长度 单位: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,铁路隧道线间距较小(4.2 m 或 4.3 m),隧道断面面积较小(62 m²或 64 m²)。

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,车内会产生很大的压力波动。为降低列车交会和进出隧道时车内的压力变化,在列车的密封特性上付出了巨大的代价,因而这方面的技术在世界高速铁路中也是领先的。表 1.7 是日本高速列车车体与隧道断面积之比(阻塞比)和车体密封耐压标准不断提高的情况,虽然采取了加强列车密封性等措施,目前仍无法从根本上缓解较为明显的车内压力波动,列车通过隧道时,乘客仍有耳鸣等不适现象。

表 1.7 新干线列车的阻塞比与密封耐压性

车 型	100 系	E1 系	300 系
最高行车速度/(km/h)	230	240	270
隧道阻塞比	0.22	0.25	0.20
密封耐压/(kPa/毫米水柱)	4.9/500	5.4/550	7.4/750

(2)法国高速铁路隧道

法国国营铁路修建高速线的隧道工程自大西洋西岸开始。由于地质和环境保护方面的原因,各隧道的施工方法不同。根据高速铁路的特点,在设计时主要从行车安全、舒适度以及防噪声方面予以考虑。法国高速铁路隧道线路及明洞长度见表 1.8。

表 1.8 法国高速铁路隧道线路及明洞长度统计 单位:km

高速线	大西洋线	北方线	巴黎地区联络线	东南延伸线	地中海线	东部线	里昂—都灵线
隧道长度	20.8	3	9.6	6.3	12.3	4.7	33.3

法国高速铁路隧道一般采用曲线形,明洞一般较长且简化洞门山体防护处理。为与自然景观相协调,有时洞门附近还设置装饰建筑物。由于列车通过隧道时速度较高,所以,在明洞顶部开天窗以缓解列车的微气压波作用,隧道内侧壁设避车洞,侧壁上设人形扶手杆。

当列车长度为 360 m 时,考虑隧道内会车时瞬变压力最不利的情况下,隧道的最不利长度为:速度 300 km/h 时为 299 m、485 m、1 254 m;速度 350 km/h 时为 257 m、415 m、1 075 m。

法国的高速铁路通常根据列车的运行速度来决定隧道内的净空面积,一般不低于表 1.9 的规定值。

表 1.9 法国高速铁路隧道净空断面积值 单位:m²

列车速度	230 km/h	270 km/h	300 km/h
双线隧道	63	83	100
单线隧道	46	59	70

(3)德国高速铁路隧道

德国第一条高速铁路修建于 1971 年。到 2006 年底,德国已经建成通车的高速铁路共有 5 条:汉诺威—维尔茨堡、曼海姆—斯图加特、汉诺威—柏林、科隆—法兰克福、纽伦堡—慕尼黑,共计 917 km,其中有 100 多座隧道的长度超过 200 km。

德国高速铁路隧道“有效净空面积”是世界高速铁路隧道中最大的。德国铁路在高速隧道设计时主要考虑如下问题:

- ①隧道的“有效净空面积”,客货混运线路为 82 m²,客运专线为 92 m²;
- ②为消减洞口微压波的爆裂声而修建了洞口缓冲结构物;
- ③由于空气阻力加大而引起的纵向坡度折减。

德国铁路认为在高速隧道横断面设计时必须满足如下基本要求:

- ①从缓解和消减空气动力学效应出发对隧道“有效净空面积”或阻塞比(列车横截面积/有效净空面积)的要求;
- ②高速铁路建筑限界、线间距和曲线加宽要求;
- ③隧道内专门养护、维修、防灾救援所需空间;
- ④隧道内作业人员承受的列车风不超过临界值。

(4)西班牙高速铁路隧道

截至 2005 年底,西班牙建成通车的高速铁路有 2 条。马德里—塞维利亚高速铁路全线共修建隧道 17 座,总长度为 15. 819 km(占线路全部长度的 3. 4%),净空有效面积为 75 m²。绝大部分隧道集中在通过地形崎岖的莫雷那山地的不拉洒脱尔塔斯—阿尔科莱亚的区段上,在近 104 km 的地段修建了 15 座总长达 15. 059 km 的隧道(占全线隧道总数的 88. 2%),隧道长度为 259~2 540 m。马德里—巴塞罗那高速铁路全线共修筑隧道 26 座,总长度 61 km(占线路全部长度的 3. 4%),净空有效面积为 100 m²。

西班牙高速铁路的隧道设计针对列车高速运行的特点所考虑的主要因素有:列车速度、列车长度、隧道长度、隧道宽度、空气与列车的摩擦、空气与隧道的摩擦、通气竖井数量、通气竖井宽度、会车时两列车进出隧道时产生的压力差。

欧洲 ORE 组织对于高速铁路隧道设计的有关问题进行了大量的技术研究和试验,提出了许多非常重要的研究报告。其中,ORE 组织 C149 委员会所提出的“高速列车通过隧道时对人体听觉器官的效应试验”第 10 号报告中指出,人体可承受的气压变化极限(3 s 内)在旅客列车上为 3 kPa,在隧道内为 5 kPa。这些研究的试验结果在西班牙修建高速铁路隧道时均得到了重视和采用。

(5)韩国高速铁路隧道

韩国已建成的高速铁路为京釜高速铁路,全长 409 km,设计最高行车速度目标值为 350 km/h,隧道总长度为 162. 106 km,隧线比约为 40%。全线共有 89 座隧道,最长的隧道为

金井隧道,长 20.333 km。隧道净空有效面积为 107 m^2 ,是目前世界各国高速铁路隧道净空有效面积最大的。考虑的主要因素有:列车截面积、速度、密封性等。

1.2.2 国内高速铁路隧道研究现状

2015 年已经建成的客运专线及城际铁路项目中,除京津城际铁路外都设计有隧道工程。其中武广、广深港、郑西等客运专线设计速度目标值为 350 km/h ,石太、合武、合宁、甬台温、温福、福厦等铁路设计的速度目标值为 250 km/h ,广深城际铁路设计的速度目标值为 200 km/h 。最长的山岭隧道为石太线的太行山隧道,长 27 839 m;最长的黄土隧道为郑西线的函谷关隧道,长 7 851 m;最长的水下隧道为广深港客运专线狮子洋隧道,长 10 800 m。

中国台湾台北至高雄高速铁路总长度为 345 km,其中隧道总长度为 47.217 km(不含松山至版桥段约 16 km 的地下结构)。暗挖隧道 42 座,明挖隧道 6 座。单孔双线隧道的断面形状较接近圆形或椭圆形,开挖宽度约为 13.5 m,高度约为 11.7 m,开挖断面积约为 $130\sim 140\text{ m}^2$,衬砌完成后宽度为 12.6 m,高度为 9.6 m。中国台湾高速铁路最高行驶设计速度为 350 km/h ,考虑隧道内空气动力效应,轨面以上净断面积取 90 m^2 ,对于长度大于 3 km 的隧道,为防止列车出隧道时引起的爆炸噪声,隧道洞口采用 45° 斜洞门设计,另加设明洞解压段,起顶部开设 2 处开孔,以减少微气压波影响。为避免影响区域水文变化,长度大于 3 km 的隧道,大部分规划为不排水隧道,其余较短的隧道则规划为排水隧道。高速铁路隧道的维修及逃生步道均设于隧道内两侧,长度大于 3 km 的隧道,增加横坑或者竖井作为紧急逃生道。

1.3 车隧气动效应研究现状

1.3.1 国外车隧气动效应研究现状

自 20 世纪 60 年代日本新干线投入运行后,日本和欧洲一些国家相继围绕高速铁路气动效应问题开展了一系列研究。其研究范围主要集中在压力波的变化梯度及乘客的舒适度、压力波和微压波的传播与形成机理及其计算方法、列车空气阻力、列车头型设计、消减压缩波和微压波的各种方案以及相关试验方法等。

(1) 乘车舒适度标准研究

欧洲各国、日本主要采用“七分法”调查表,运用现场实车试验调查和室内压力仓调查的手段,针对本国入种制定舒适度标准。20 世纪,世界各国的舒适度标准主要为单一型指标,主要根据运输类型、气压波动频繁程度、运输服务舒适度等级,对车内 3 s 或 4 s 内的气压变化提出控制标准。21 世纪以来,为了更好地保证旅客乘车舒适度,欧洲铁路联盟、德国、荷兰等提出了更为全面和严格的复合型舒适度标准,即分别对车内 1 s、4 s、10 s、…、50 s 内的气压变化提出控制标准。同时,从医学角度出发,为保证旅客和乘务人员的健康,国外规定车内气压变化幅度最大允许值为 10 kPa ,并且要考虑列车密封性完全丧失的最坏情况。

(2) 瞬变压力波动程度与隧道长度间的非单调变化规律研究

世界各国在研究瞬变压力时,认为对于瞬变压力存在“最不利长度”隧道,非“最不利长度”隧道中的瞬变压力相对较小。如法国专家认为隧道长度为列车长度的 0.8 倍、1.2 倍、3.5

倍时较为不利。世界各国在修建高速铁路隧道时,为控制车内瞬变压力基本采用了两种模式:一是以欧洲各国为代表,采用大断面隧道降低对列车密封性能的要求,减少运营成本;一是以日本为代表,采用密封性能较高的列车减小隧道断面面积要求,降低工程投资。

德国、英国、瑞士等国均开展过隧道中辅助坑道设置对瞬变压力影响的理论计算和现场试验研究,并发现在长度 1 000~2 000 m 左右的隧道中,通过合理设置辅助坑道可以将瞬变压力降低 50% 左右,如瑞士的 Emmequerung 隧道。但国外的研究主要针对具体隧道,没有给出不同长度隧道中辅助坑道如何设置的普遍规律。

(3) 隧道洞口微气压波研究

隧道洞口微气压波现象是于 1975 年山阳新干线在冈山和博多间进行新干线试运行首次发现的。欧洲各国、日本均开展了微气压波机理研究,分为三个阶段进行研究,即首波在隧道入口释放形成微气压波,并通过理论计算和现场试验提出了有砟轨道微气压波的计算方法,同时提出了消减微气压波的缓冲结构洞门形式及设计参数。日本在其长隧道中通过现场试验发现了无砟轨道对微气压波的激化作用,如时速 200 km,隧道长度 8 km,碎石道床隧道洞口 20 m 处的微气压波为 7 Pa 左右,而板式道床隧道洞口 20 m 处的微气压波为 120 Pa 左右。但国外对长隧道中无砟轨道对微气压波激化作用的理论研究较少,相关研究成果也没有对外公布。

Ozawa 首次解释了微气压波的基本特征,同时也描述了日本对四条板式道床隧道和四条碎石道床隧道的现场测试结果,另外还通过模型实验对微气压波现象进行了模拟。测量结果显示,微气压波的压力峰值近似与列车速度的 3 次方成正比,并且板式道床隧道出口的微气压波峰值比碎石道床隧道出口的微气压波峰值大得多。随着测点距离隧道出口越远,微气压波峰值越小,而且,微气压波的峰值基本上与方向无关,即微气压波近似以球形向外传播。通过模型实验研究得知,在隧道入口添加缓冲结构(开口和无开口的),将能获得很好的微气压波缓减效果。Yamamoto 和 Maeda 的研究表明,沿着隧道轴向合理分布的竖井对于微气压波的缓减也具有很好的效果。

以上研究结果表明,高速铁路气动效应的影响因素主要有:

- ①列车方面:运行速度、横截面积、车头和车尾形状、编组长度及车辆的气密性等;
- ②隧道方面:隧道有效净空面积、隧道断面形状、隧道长度、复线间距、隧道坡度、线路曲线半径、隧道壁面粗糙度及辅助结构物形式(隧道口缓冲结构、通风通道、隔墙、道床类型)等;
- ③其他方面:列车在复线隧道中交会及相对运行列车各自进入隧道口的时间差等,多种因素交织在一起,使隧道气动效应的研究远比明线空气动力问题复杂。

1.3.2 国内车隧气动效应研究现状

我国在 20 世纪 90 年代初期才第一次提出和发展高速铁路。当时日本等国的一些学者已经对高速铁路隧道空气动力学效应进行了超过 20 年的研究,并且得到了很多实质性的结论,但我国并没有掌握其核心技术。随着高速铁路的日益发展,车隧气动效应也越来越显著,使其成为一项不可忽视的问题。于是国家发改委、铁路总公司、科研单位以及各大高校纷纷展开了对高速铁路隧道空气动力学效应的研究,有关空气动力学效应的项目也越来越多。