



GAOSU LIECHE QIDONG YINGXIANG

高速列车 气动影响

李人宪 编著



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

高速列车气动影响

李人宪 编著

中国铁道出版社

2016年·北京

内 容 简 介

随着高速铁路运行速度的不断提升,气动作用对列车运行、隧道维护、线路寿命和路边人员安全构成的不利影响日益凸显。本书从明线会车压力波变化规律、隧道会车压力波、会车过程的气动作用力、列车通过隧道的气动作用、列车风对路边人员的气动作用、列车的横风效应、高速列车对挡风墙或声屏障的气动作用、高速空调客车内部流场、高速列车外部气动噪声等九个高速列车空气动力学方面的问题逐一进行了较为全面地阐述,并得出了一些非常有意义的结论。

本书可供从事高速列车空气动力学领域研究的专家、学者以及相关专业院校的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速列车气动影响/李人宪编著. —北京:中国
铁道出版社,2016.2

ISBN 978-7-113-21241-4

I. ①高… II. ①李… III. ①高速列车—空气动力学
—研究 IV. ①U292.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 314189 号

书 名:高速列车气动影响

作 者:李人宪 编著

责任编辑:黄璐 赵静 王明容

编辑部电话:010-51873138

电子信箱:tdpress@126.com

封面设计:崔丽芳

责任校对:孙 玫

责任印制:陆 宁 高春晓

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:中煤(北京)印务有限公司

版 次:2016年2月第1版 2016年2月第1次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:14.25 字数:345千

书 号:ISBN 978-7-113-21241-4

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)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

序

高速铁路和高速列车的发展是近年来世界运输行业发展中最突出的亮点,有可能改变国际货物运输和人员流动的格局,形成与空运相似快捷、与海运一样经济的陆路交通运输体系。中国的高速铁路建设和高速列车的发展已经走在了世界的前列,高速铁路运营里程和在建里程都达到世界第一,高速列车的生产也形成非常大的规模。

高速列车的空气动力学问题是以前在铁路建设和列车设计中很少关注的问题。列车运行速度超过 200 km/h 时许多在低速运行时不明显的气动作用问题凸现出来,给线路、隧道、列车、路边建筑等设施的设计带来新的制约因素;给列车运行、隧道维护、线路寿命和路边人员安全构成更加不利的环境条件;给相关铁路设备的设计与运行标准的制定提出更高的要求。本书总结作者近年来的研究成果,讨论了九个高速列车空气动力学相关的问题,对每一个问题都进行了比较全面地阐述,得到许多非常有意义的结论。例如对列车交会压力波问题,不但获得了压力波随车速的变化规律,而且给出了线间距对压力波的影响,并讨论了列车头部形状对压力波大小的影响。列车通过隧道和在隧道内会车会在隧道内产生极复杂的气体压力变化,过大的压力波动会造成隧道支护面使用寿命降低,因此了解隧道内可能产生的极值气体压力是隧道设计人员所希望的。书中不但给出了隧道内可能产生的最大负压极值计算结果,给出了可能产生极值压力的位置区段,而且推导出了隧道临界交会长度和单车通过隧道的最不利隧道长度的一般计算关系式,可为隧道长度设计和列车运行调度优化提供依据。在隧道口加装缓冲结构是减轻隧道入口气动效应的措施之一,但什么形式的缓冲结构更有效一直以来还不是十分清楚。在本书中比较仔细地讨论了两种结构形式的缓冲结构参数对隧道入口气动效应的影响,可以为缓冲结构设计提供参考。书中还讨论了列车运行时产生的气动作用力,如两列车交会时产生的气动作用力,横向风对列车的气动作用力,列车通过时对路边人员的气动作用力,以及列车对声屏障或挡风墙的气动作用力,给出了作用力随列车运行速度与作用距离的变化规律。这些规律的获得对列车动力学设计、声屏障或挡风墙结构强度设计和人员避让距离标准的制定应该是有很大帮助的。为定量了解高速列车车内热环境和车外声学环境,书中

还分别对高速列车内部流场问题和高速列车外部气动噪声问题作了较详细的讨论,论述了外部环境参数对车内环境及其热舒适性的影响,计算分析了列车运行时可能产生的气动噪声的声压级强度、分布状况、传播和衰减规律。可为深入了解高速列车气动噪声的影响和探索降低气动噪声的措施提供帮助。在所获研究结论的基础上,作者还针对当前高速列车设计中遇到的问题提出一些合理建议,如线路附近人员避让距离建议,环境气候条件分区建议,空调客车车内热舒适性评价建议,列车侧窗气动强度设计建议等。应该说本书的内容对我国高速铁路和高速列车相关气动设计标准的制定和推动我国高速列车空气动力学的发展会有很大的帮助。

当然,书中内容并未涵盖所有高速列车空气动力学问题,有些问题的论述也不尽完美,但确是具有非常实用和参考意义的一本好书。相信本书将会为我国高速铁路的发展起到十分重要作用。

工程院院士 梁文彦

前 言

自从 20 世纪 60 年代日本开通世界上第一条速度为 210 km/h 的高速铁路运营线以来,半个世纪的时间,高速铁路和高速列车已经在许多国家成功建成和开通。正是由于高速列车具有运量大、能耗低、舒适性好、安全度高等特点,世界上越来越多的国家具有修建高速铁路的愿望。目前开通高速列车运营的国家或地区已超过 10 个,已建和在建高速铁路的国家已经超过 20 个。

如今,中国高速铁路的建设和高速列车的制造已经在世界上具有举足轻重的地位。高速铁路的通车里程和在建线路长度都是世界第一,高速列车的生产量也已经有了非常大的规模,在我国高速铁路上运营的将近 2 000 列高速列车,几乎都是国内制造。当然,毋庸讳言,我国在高速铁路建设和高速列车制造上走的是引进、消化、吸收、再创新的路线,建设起点高,发展速度快,形成规模迅速。正因如此,也可能导致一些基础理论的研究和对原始设计的理解不够深入,与高铁技术发达国家,如日本、法国、德国等国家相比,在高速列车的制造和使用标准上还是存在一定的差距,使得中国的高速铁路和高速列车在进入世界市场时遇到一定的阻碍。仅仅在高速列车空气动力学范畴内很多标准还处于缺失或不完善状态,例如列车通过时路边人员安全避让距离标准、隧道内气体压力变化限值标准、车内气体压力变化限值标准、高速空调客车车内空气质量标准、不同地区和不同季节车内温度变化限值标准、车内热舒适性评价标准、车内噪声限值标准、车外气动噪声限值标准、列车受横向风时的运行稳定性标准、声屏障的气动载荷标准等。标准的制定涉及对列车运行规律的认识、对运行环境的限定,也取决于生产技术条件的水平、人体工程学的判据,甚至种族、宗教、文化差异的影响等诸多方面的内容。但是厘清高速列车空气动力学的相关问题及高速列车气动作用对人、车、环境的影响规律,是制定高速列车空气动力学相关标准的前提。本书的工作就是力求通过大量的计算分析获得高速列车气动载荷在某些方面的作用规律。

高速列车空气动力学问题的研究方法可分为简单模型理论分析、实车线路测量数据归纳分析、风洞模型试验或水槽模型试验分析和流体力学控制微分方程数值计算分析。其中简单模型理论分析方法在早期的高速列车空气动力学研究中较多采用,但由于分析模型过于简单,与高速列车实际外形、运行工况和环境条件有较大差距,分析结果多只能用于定性研究,目前已经较少采用。其余三种研究方法是目前常用的研究手段。本书的工作是通过流体力学控制微分方程数值计算的方法,讨论了九个采用实车测量和风洞模型试验比较难于研究或几乎无法实

现的列车空气动力学问题。包括：明线会车压力波变化规律问题、隧道会车压力波问题、会车过程的气动作用力问题、列车通过隧道的气动作用问题、列车风对路边人员的气动作用问题、列车的横风效应问题、高速列车对挡风墙或声屏障的气动作用问题、高速空调客车内部流场问题和高速列车外部气动噪声问题。如果本书的内容能够对相关标准的制定或为青年学子进入这一研究领域提供些许帮助，从而有利于我国高速列车空气动力学的发展，将是作者的希望所在。

当然，这并不意味着高速列车空气动力学问题只有本书提到的内容，例如高速列车与各类桥梁间的气动作用问题、高速列车风与线路积雪相互作用对列车运行的影响问题、高速列车风与雨水相互作用对列车运行的影响问题、列车通过隧道的微气压波问题、受电弓的气动作用力和气动噪声问题等，本书均没有涉及。作者的工作也远非尽善尽美。限于计算机资源条件，只分析了较短隧道的压力波动问题和会车作用力问题，长大隧道列车气动作用或许与短隧道中的气动现象和影响规律不尽相同；只分析了极端情况下横向风（横风方向与列车运行方向垂直）对列车运行状况的影响，具有不同偏航角方向的环境风对列车运行的影响问题没有讨论；风沙环境下粉尘与微粒对车内空气质量的影响问题也是应该关注的问题。此外本书中所得结论也仅是一家之言，有些计算结果与实测值做了对比，有些部分的计算结果还没有对标条件。同样限于计算机计算能力，一些问题的计算模型网格划分可能不够精细，尽管在可能的情况下都尽量实施网格无关性检验，但有些计算只能利用到我们现有计算机的最大计算能力（例如外部气动噪声问题计算）。因此，计算结果也可能不够准确，甚至可能得到错误的结论而作者还不自知。真诚希望同行专家不吝赐教，批评指正。

能够完成本书的工作离不开师长、同事和学生的支持和帮助。首先要感谢我的博士生导师刘应清教授，是他把我引到高速列车空气动力学的研究领域。另外，还要感谢西南交通大学牵引动力国家重点实验室主任张卫华教授，他在笔者研究条件十分困难时给予了设备和资金上的支持，使得研究工作能够持续。当然，还应该感谢我的研究生们，因为相当大一部分计算工作是他们完成的，如张曙、赵晶、刘杰、关永久、王明明、赵继维、郑拯宇、叶坤、陈琳、肖睿、袁磊、丁皓、姚澍、康健、崔鹏翔、刘济洲、陆晓柳等，都对本书的工作有所贡献，许多时候是在与他们的交流与争论中才使得研究内容更加清晰，研究目标得以明确。诚然，应该感谢的还包括我的家人，是他们容忍我将大部分时间贡献在计算机前，而没有陪伴在他们身边。

由于铁路科技图书出版基金的资助使本书得以出版，承蒙中国工程院梁文灏院士为本书作序，中国铁道出版社编辑黄璐、赵静、王明容为本书出版做了大量的工作，在此一并表示感谢。

作者

2015年于成都

目 录

1 引 言	1
2 明线会车压力波变化规律	20
2.1 问题的提出	20
2.2 研究方法	22
2.3 分析模型	24
2.4 模型验证	25
2.5 计算分析	26
2.6 不同头型车会车压力波比较	30
2.7 结 论	33
参考文献	34
3 隧道会车压力波	36
3.1 问题的提出	36
3.2 研究方法	36
3.3 三维仿真分析	38
3.4 最大负压值估算	47
3.5 隧道临界交会长度与最不利隧道长度	51
3.6 结 论	58
参考文献	59
4 会车过程的气动作用力	61
4.1 问题的提出	61
4.2 研究方法	61
4.3 计算模型与基本假设	62
4.4 列车交会过程数值计算	64
4.5 结 论	76
参考文献	77
5 列车通过隧道的气动作用	79
5.1 问题的提出	79
5.2 研究方法	79

5.3	列车通过隧道时空气压力变化分析	82
5.4	单车通过时的最不利隧道长度	89
5.5	缓冲结构气动作用分析	90
5.6	列车通过双线隧道时的气动作用力	96
5.7	结 论	101
	参考文献	102
6	列车风对路边人员的气动作用	105
6.1	问题的提出	105
6.2	研究方法	106
6.3	计算分析模型	107
6.4	数值计算结果分析	108
6.5	列车风作用力与车速、人车距离及车型间关系	113
6.6	结论与建议	114
	参考文献	115
7	列车的横风效应	117
7.1	问题的提出	117
7.2	研究方法	120
7.3	计算模型与计算工况	121
7.4	计算结果与分析	122
7.5	结 论	128
	参考文献	128
8	高速列车对挡风墙或声屏障的气动作用	130
8.1	问题的提出	130
8.2	研究方法	131
8.3	列车通过时声屏障所受气动载荷	131
8.4	声屏障支撑结构强度计算	137
8.5	声屏障支撑结构的疲劳寿命估计	140
8.6	结 论	142
	参考文献	143
9	高速空调客车内部流场	145
9.1	问题的提出	145
9.2	研究方法	145
9.3	新风口与废排风口位置问题	147
9.4	客室内流场参数计算	149
9.5	客室流场参数设计规范与热舒适性评价	154

9.6 两种空调管路系统比较	161
9.7 车外环境压力突变时对车内环境的影响	165
9.8 结 论	170
参考文献	171
10 高速列车外部气动噪声	173
10.1 问题的提出	173
10.2 研究方法	173
10.3 列车外声场的数值计算分析	179
10.4 考虑四极子声源的远场气动噪声	202
10.5 结 论	203
参考文献	204
附录 A 表格索引	206
附录 B 插图索引	208
附录 C 作者近年发表的相关论文	216

1 引 言

世界上第一条铁路于 1825 年 8 月 27 日在英国建成,起点为 Stockton,终点为 Darlington,全长约 27 km,起始开行速度 4.5 km/h,后增加到 24 km/h。19 世纪 30 年代,美国(1830 年)、法国(1832 年)、比利时(1835 年)、德国(1835 年)、加拿大(1836 年)、俄国(1837 年)、奥地利(1838 年)、荷兰(1839 年)、意大利(1839 年)等国相继建成本国的第一条铁路,开启了铁路运输的时代。中国的第一条铁路是 1876 年英国在中国的代理商怡和洋行出资修建的吴淞到上海的所谓“寻常马路”,后被清政府赎回并拆除。真正中国自己出资修建的第一条铁路是 1881 年建成的唐山至胥各庄的唐胥铁路,全长 9.7 km,用来运输从唐山开平煤矿开采出的煤炭。经过 100 多年的建设,世界上铁路的总里程已经超过 130 万 km,其中美国约 27 万 km(高峰时曾有约 40 万 km),俄罗斯 12.8 万 km,中国约 12 万 km,印度 6.3 万 km,加拿大 5.7 万 km。超过 140 个国家或地区建有铁路,没有铁路的国家已经非常少了。

机车的出现更早于铁路的建设。1804 年英国工程师特里维塞克就制造了以蒸汽机为动力的轨道运行机车,不过当时的轨道并不是现代意义的钢轨。1825 年英国人乔治·斯蒂芬森制造的“旅行”号蒸汽机车在世界第一条铁路上运行,可认为是第一辆正式商业运用的铁路机车。经过将近 200 年的发展,铁路机车已经从早期的蒸汽机车发展为燃料热效率更高的内燃机车和操纵更便捷的电力机车。铁路机车的运输能力从开始的一列车几吨货物到当前一列车最高十万吨以上的载重量,已经有了质的变化。铁路机车的运行速度也有极大的提高,蒸汽机车的运行速度一般只有每小时几十公里,而内燃机车和传统电力机车的速度可以达到 100 km/h 以上。随着经济的发展和需求的增加,更快的铁路运输速度成为人们追求的目标,高速铁路的发展正成为许多国家新的铁路运输能力提升的标志。当然,更快的速度也对铁路的建造精度和机车的制造质量提出更高的要求。

按照国际铁路联盟的定义,以 200 km/h 作为高速铁路的最低列车运行速度,德国在 20 世纪 30 年代已经达到试验速度 205 km/h,但是真正意义的运营高速铁路是日本在 20 世纪 60 年代建造的东海道新干线高速铁路,列车运营速度为 210 km/h,开启了高速铁路和高速列车的新时代。由于高速铁路运量大、速度快、安全度高、经济性好,世界上许多国家都相继修建了高速铁路。目前世界上具有高速铁路运营的国家或地区超过 10 个,已建和在建高速铁路的国家超过 20 个。世界高速铁路建设概况见表 1-1。

表 1-1 世界高速铁路建设概况

序号	国家 (地区)	高速铁路运营里程 (km)	最高运营速度 (km/h)	在建高铁里程 (km)
1	中国大陆	19 000(2015 年底)	350	3 000
2	西班牙	2 665	300	17 81
3	日本	2 388	300	775
4	法国	1 872	320	730

运行速度的不断提高促使高速列车在技术上的发展不断取得进步,试验速度不断刷新。德国在 1988 年实现最高 408.9 km/h 的试验速度,日本在 1995 年实现 443 km/h 的最高试验速度,法国更是在 2007 年创造了 574.8 km/h 的世界纪录试验速度。中国的高速铁路和高速列车的发展起步较晚,但发展速度很快,自从 1999 年开行(秦沈客专)高速列车以来,2008 年实现了 396.4 km/h 的试验速度,2009 年实现了 416.4 km/h 的试验速度,2010 年实现了 486.1 km/h 实验记录速度。轮轨列车试验速度发展如图 1-2 所示。应该说中国目前已经具备了制造 500 km/h 以上速度等级高速列车的能力^[2],2013 年我国制造的更高速度试验列车在试验台上运行速度达到 605 km/h,线路试验速度可能超过 500 km/h 的国产高速列车如图 1-3 所示。假以时日,中国创造新的高速列车速度实验纪录是完全可能的。

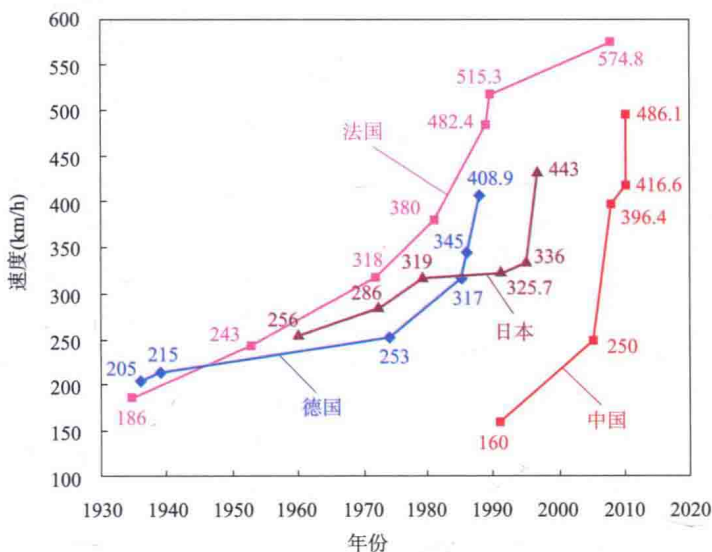


图 1-2 轮轨列车试验速度发展



图 1-3 线路试验速度可能超过 500 km/h 的国产高速列车^[2]

随着列车运行速度的提高,许多在低速运行时并不突出的空气动力学问题越来越明显。列车在空气中高速运行,使列车周围空气产生强烈的扰动。扰动的空气一方面对列车周围环境产生一定的负面影响,如高速列车对线路附近人员和设施的气动作用问题、气动噪声扰民问题等;另一方面对列车本身也会产生较大的消极作用,如气动阻力问题、列车运行的气动稳定性问题、列车的气动强度问题、高速条件下列车空调系统稳定运行问题等。此外环境空气状态的变化也可能引起高速列车气动性能变差,如横向风速过大时列车的横风稳定性问题,风速大、气压低或温度过高、过低时,列车空调系统是否能正常工作的问题等。这些列车空气动力学问题中,有些问题已经基本上了解清楚了,如列车在明线运行时的气动阻力问题。一般认为列车气动阻力可分解为压差阻力(与车头、尾形状关系最大)、摩擦阻力(与列车长度和表面光洁程度相关)和局部阻力(主要与车身表面凸起物相关);总的气动阻力的大小基本上与车速的平方成正比,因此可以按照所希望的车速设计列车动力系统的功率。但有些问题还不是十分清楚,例如同样是气动阻力问题,列车进入隧道时的气动阻力是变化值,什么时刻气动阻力最大?最大气动阻力比明线运行时的气动阻力大多少?在隧道中气动阻力如何变化?与阻塞比和隧道长度是什么关系等。隧道内的气动阻力问题还只涉及列车动力系统功率储备问题,有些列车空气动力学问题不弄清楚可能会影响列车的正常运行甚至会造成行车事故。例如我国广深线开行准高速列车时,车下负压曾将线路上装备坑盖板吸出打在运行列车上,两车交会时的气体压力波曾将对面客车侧窗玻璃全部击碎,美国和中国都曾发生集装箱列车运行时由于风力作用将车上集装箱吹下列车的情况,环境风使运行列车侧翻或停止运行的情况更是时有发生。也有些列车空气动力学问题在一国没有突出的负面表现,但换一个环境却会出现问题。例如日本川崎重工制造的300 km/h速度的高速列车在日本运行没有出现空调系统问题,但是在中国线路上运行时却出现了车内环境重度污染的问题。因此高速列车空气动力学问题仍然还是需要认真研究的问题。

早期的列车空气动力学研究者采用极简单的理论模型研究列车空气动力学问题。例如采用单个移动点源或旋转体形成的半无限长物体模拟高速列车,将列车看成一个线声源来研究列车的气动噪声等。由于列车形状的复杂性和周围空气与地面存在相互作用,简单模型的理论研究结果与实际情况存在较大差别,因此现代列车空气动力学的研究主要采用实车测量、风洞或水槽模拟测量和数值仿真计算三种方法。

(1) 实车测量

实车测量可以实现的气动参数检测有:测作用力、测压力、测温度、测风速和测噪声。实车测量作用力通常可实现的是测量列车的气动阻力和测量列车通过时路边人员(或设备)所受到的气动作用力。列车在平直线路上运行过程中突然关闭动力,采用惯性溜车的方法,通过初始速度和溜车距离可以估算出溜车至停止时的负加速度。有了加速度,再根据列车质量就可以计算出溜车总阻力,去掉滚动摩擦阻力和机械传动阻力剩下的就是列车气动阻力。列车在线路上运行时所受到的气动作用力可以分解为三个方向的气动力和三个方向的气动力矩(阻力、侧向力、升力、俯仰力矩、侧翻力矩和偏转力矩),实车测量一般只能测量列车的气动阻力,另外五个力或力矩则无法测量。测量列车通过时路边人员可能受到的气动作用力,通常采用在线路附近安装人体模特或与人体相当的柱体模型的方法,模特或模型内部装有测力的六分量天平,用天平测出列车通过时作用在模型上的气动力和力矩。测量气体压力、温度、风速和噪声则是在列车运行过程中用相应的传感器,测量车外或车内某些位置的流场参数。一般来讲,列

车外表面和客车内部壁面或建筑结构表面、设备表面的气体压力的测量比较容易实现,只要压力传感器体积足够小,响应时间足够快,同时二次仪表的采样频率足够高即可(当然,高速列车风作用下传感器的安装强度也是必须考虑的问题)。但列车外部空间和内部空间的气体压力(变化)测量则不容易测得准确,原因是空间位置点处压力传感器必须采用支架安装,而支架的存在会破坏原始状况的流场,使当地气体压力发生变化。温度的测量一般会测量空调客车内部温度(分布),但也有列车上与外界环境相通的设备舱内的温度需要掌握。温度传感器同样需体积小、响应快,因此其安装带来的问题与压力传感器类似。风速的测量一般采用热线风速仪直接测量或采用匹托管间接测量,传感器安装时如何尽量少破坏当地流场状况仍然是必须考虑的问题。事实上风速的测量较之压力和温度的测量有更大难度,主要表现在不但要测量出风速的大小,还应测出风速的方向。而风速方向的测量在复杂流场中是极难实现的工作。气动噪声的测量可采用拾音器记录列车运行过程中的噪声信号,再经过声学处理获得所希望的声强分布。但是拾音器获得的声音信号是所有噪声信号的叠加(如轮轨噪声、电磁噪声、机械传动噪声和气动噪声),将其中气动噪声信号分离出来或去除其他噪声信号而留下气动噪声信号,目前还是不太可能完成的任务。

为了解列车空气动力学问题,各国研究者做了大量的线路实车测量工作。如日本、韩国的研究者测量了高速列车的气动阻力,测量了列车通过隧道时的隧道内压力变化以及研究了隧道出口处微气压波的变化情况^[3~7],欧洲的研究者测量了单车通过时隧道内压力变化,两列车交会通过隧道时列车表面和隧道内部的压力变化,列车通过隧道时的横向加速度,线路周围外声场的列车通过噪声,站台上列车风对人体的气动作用力等^[8~19];我国的研究人员也在高速铁路线路上进行过大量的实车测量工作,在京津高速铁路上做过气动阻力溜车试验、明线列车交会压力波测量试验、交会列车内部压力波动测量试验、外部声场噪声测量试验;在遂渝线上做过隧道内气体压力测量实验、在京沪高铁做过明线会车和隧道内会车时车外和车内压力变化试验;在京广高速武广段线路和列车上也做了类似的测量^[20~25]。为研究列车空气动力学问题掌握了大量的第一手资料。

应该说线路实车测量是获得列车空气动力学参数最直接、最可靠的方法,但是线路实车测量也存在许多局限性。第一,线路或车辆没有制造完成时无法进行测量;第二,有些空气动力学参数无法测量,如除气动阻力外的另外五个列车气动作用力(矩);第三,受环境条件影响比较大,例如环境风速、风向对气动阻力测量结果有直接影响,环境背景噪声对列车气动噪声测量结果有直接影响,线路运行条件对所需试验要求有一定限制;第四,测量数据有限,不容易总结出规律性的列车空气动力学特征;第五,线路实车测量所需试验开支巨大,通常完成试验需国家行为。因此,在可能的情况下应尽量少做线路实车试验。

(2) 风洞和水槽模型试验

风洞模型试验是基于相似原理而设计的气体动力学试验,与线路实车测量试验不同,风洞试验中列车模型不动,而周围气流在风洞风机的作用下高速运动。风洞模型试验可以测量的列车空气动力学参数有:气动作用力、压力、风速、噪声、流迹。高速列车的风洞试验必须采用缩尺模型,因为不可能建造大得足以将列车开进去并满足足够小阻塞比的风洞。用风洞试验来测量列车模型的气动作用力,是将列车模型用天平支撑起来,而模型在一定的风速下受到的气动作用力可通过六分量天平测得,因此比起线路实车测量,风洞测量列车气动作用力要方便得多,而且可以测量任一方向的气动力和力矩。在风洞试验中测压力和测风速与线路实车测

量方法基本一致,用相应的压力传感器或速度传感器测量一定部位的流体压力或速度。为降低或消除传感器安装支架对流场的影响,风洞模型试验可以采用更精密的(无流场内支架的)速度测量仪器(如激光多普勒测速仪),更精确的测量某点或某一断面的气流速度(分布)。但风洞试验通常无法测量车内流场参数,因为一方面列车模型不可能做得很大,内部空间无法做成与实车结构形式一样,另一方面由于要安装测力天平,车厢内部空间被天平结构占据,车内流场不复存在。风洞试验测量列车的气动噪声可以完全屏蔽掉轮轨噪声、电磁噪声和机械传动噪声的影响。但是风洞运行本身就会产生很强的气动噪声,要区分风洞自身的气动噪声和列车模型的气动噪声基本上是不可能的。因此只有在风洞的降噪设计上想办法,设计出低噪声风洞或静音风洞。这在技术上是比较困难的事情,而且会使风洞的建造成本大幅度上升。更重要的是目前还没能得出可靠的(或普适的)声学缩尺比参数,无法确定缩尺列车模型噪声测量结果与实车噪声测量结果的严格对应关系。测流迹的目的是直观观察车体附近气流的运动方向。采用的方法是在列车模型前方风洞中生成均匀且稳定流动的烟雾或液体气泡,或者在车体模型上粘贴或绑扎细丝带,气流绕过车体模型时,烟雾、气泡或丝带的运动方向是可以观察到的,不同位置气流运动方向就可以被观察和记录下来,用以研究列车外部速度场。

风洞模型试验可以消除环境气流状况的不利影响,可以人为设置所希望的试验气流速度,可以自由改变风速相对于列车模型的方向,可以不受线路运行状况的制约,可以基本不受限制地重复所希望的试验工况,而且可以将列车某一部分结构(如受电弓结构)的气动特性单独进行风洞试验研究。因此各国的研究者大量采用风洞模型试验的方法研究列车空气动力学问题。日本的学者采用风洞模型试验的方法研究了列车的气动阻力问题、列车外部压力分布问题、高速铁路隧道洞口微气压波等问题^[26-31],欧洲的学者采用风洞模型试验研究了高速列车的气动噪声问题^[32,33],美国联邦铁路运输署也利用模型风洞试验做了大量的列车气动性能研究。除此之外欧洲和美国的学者还采用水槽实验方法研究了列车通过隧道时的压力波动问题^[34-36]。中国的研究人员也采用模型试验研究了各种高速列车空气动力学问题^[37-41]。模型风洞试验或水槽试验为列车空气动力学性能研究积累了大量的数据,也获得了不少列车气动性能规律性方面的研究成果。

毋庸讳言,风洞模型试验研究方法也存在一定的局限性。第一,风洞模型试验由于是利用相似原理模拟列车与空气间的相对运动,列车模型在试验过程中是静止不动的,则列车与地面间的相对移动引起的气流运动就很难真实模拟。比较理想的办法是采用履带式地面平台,但这样做又会给模型的支撑带来困难。第二,由于车体模型较小,风洞地面的气流边界层有可能“淹没”部分列车模型。因此风洞试验中车体模型都需要安装在风洞地面上部一定高度的平台上,平台的迎风边沿还需要削薄,并设置一排小孔,采用平台下部抽风的方法降低平板边界层的厚度。经过这些措施“处理”后,模型车下方流场已经与实际情况有较大差别了。第三,由于风洞工作段空间尺寸不可能做得很大,为保证足够小的模型与风洞阻塞比,列车模型有时不得不做得比较小,为保证相似准则数(如雷诺数)相等,风洞中的风速就要求很高。如采用1:10的缩尺模型,为保证雷诺数相等,模拟300 km/h列车运行速度,若阻塞比为1:10,则在约12 m²面积的风洞试验段中风速要远超过声速。这在目前的技术条件下虽不能说无法实现,但会使风洞建设和运行费用极为昂贵。尽管可以利用“自模化”现象大幅度降低所需风速,但“自模化”一般只针对气动力或压力的测量结果有效,对于其他气动参数的测量恐没有“自模化”现象。第四,在气体流动状态是紊流的条件下,缩尺模型引起的气动噪声测量结果无法与

全尺寸列车在相同流动条件下的噪声测量结果相对应。因缩尺模型的气动声学量测量应满足斯德鲁哈尔数(Strouhal Number) $S_r = fL/U_\infty$, 式中 f 为频率、 L 为模型特征长度、 U_∞ 为气体流速。如果模型缩尺比为 $1:N$, 则气动噪声测量所得声强频率为全尺寸列车对应声强频率的 N 倍。但这一准则只对流体是层流流动时正确, 对于紊态流动产生的气动噪声不能完全满足 S_r 数的对应关系, 而高速列车模型风洞试验的风速在满足雷诺数相等的条件下会使风洞内流场为紊态流场。更重要的是, 满足斯特鲁哈尔数的缩尺率测量, 一般只有在模型形状是圆柱体且气流横向流过, 同时产生卡门涡街的条件下才比较准确, 对于高速列车复杂外形, 即使风洞噪声测量参数满足 S_r 数, 测量结果的缩尺换算也可能会有较大偏差。第五, 风洞模型试验很难模拟具有相对运动表面的流场, 如列车进入隧道、列车在明线或在隧道内会车的过程。当然, 在弹射风洞中这种动态过程有可能模拟, 但是大缩尺比对动态流场参数的影响会使得测量结果出现较大的分散性。

(3) 数值仿真计算

事实上, 列车周围空气的流动状态与其他流体流动过程没有本质的差别, 因此也是满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律的, 也能够用流体流动控制微分方程来描述其运动和变化状态。笛卡尔坐标系下的车体附近空气流动所满足的控制微分方程为^[43]:

$$\text{质量守恒方程} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1-1)$$

$$x \text{ 向动量守恒方程} \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \mathbf{u}) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_{Mx} \quad (1-2)$$

$$y \text{ 向动量守恒方程} \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \mathbf{u}) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_{My} \quad (1-3)$$

$$z \text{ 向动量守恒方程} \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \mathbf{u}) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_{Mz} \quad (1-4)$$

$$\text{能量(内能)守恒方程} \quad \frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho i \mathbf{u}) = \operatorname{div}(k_t \cdot \operatorname{grad} T) - p \cdot \operatorname{div} \mathbf{u} + \Phi + S_i \quad (1-5)$$

$$\text{状态方程} \quad p = p(\rho, T) \text{ 和 } i = i(\rho, T) \quad (1-6)$$

对理想气体 $p = \rho RT$ 和 $i = c_v T$

式中 \mathbf{u} ——空气流动的速度矢量;
 ρ ——空气密度;
 u, v, w ——速度 \mathbf{u} 在 x, y, z 三个坐标方向分量;
 μ ——空气动力黏度;
 p ——空气压力;
 t ——时间;
 T ——空气温度;
 i ——空气内能;
 c_v ——空气定容比热;
 k_t ——空气导热系数;
 R ——理想气体常数;

S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz} ——动量守恒方程源项(忽略体积力)