



# 列车空气动力学

TRAIN AERODYNAMICS

田红旗 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

# 列车空气动力学

TRAIN AERODYNAMICS

田红旗 著

中国铁道出版社

2007年·北京

## 内 容 简 介

本书内容分两大部分。第一部分论述了列车空气动力学研究方法,包括数值模拟计算、现场在线实车试验、动模型试验、风洞试验方法以及形成的综合研究体系。第二部分涵盖列车空气动力学基础与应用,论述了列车空气动力特性(空气阻力、升力、横向力及其相应的力矩,交会压力波,表面压力分布,侧部及尾部流场特性)、形成机理及规律,列车—环境(大风、隧道、桥梁、路堤等)和列车—外形耦合空气动力特性,诸因素对列车空气动力特性的影响规律,列车空气动力对其他的影响,改善列车空气动力学性能的措施,介绍了提炼出的一系列分析理论及制定的列车空气动力学性能计算、设计、试验及评价标准。

本书可供从事轨道交通运输方面的科研人员、师生和工程技术人员使用,亦可供从事空气动力学、流体力学研究的科研工作者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

列车空气动力学/田红旗著.—北京:中国铁道出版社,  
2007.1

ISBN 978-7-113-07605-4

I. 列… II. 田… III. 铁路车辆—空气动力学 IV.  
U270.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 030878 号

书 名:列车空气动力学

作 者:田红旗 著

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)

策划编辑:薛 淳

责任编辑:王明容 王风雨 聂清立

封面设计:陈东山

印 刷:北京盛兰兄弟印装有限公司

开 本:880×1230 1/32 印张:12.5 字数:324千

版 本:2007年1月第1版 2007年1月第1次印刷

印 数:1~2 000册

书 号:ISBN 978-7-113-07605-4/U·2024

定 价:60.00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:010-63549493

# 序

列车运行速度是衡量一个国家铁路现代化程度的重要标志。高速铁路具有快速、安全、舒适、环保等优势,已成为轨道交通发展的必然趋势。然而,随着列车运行速度的不断提高,不仅导致列车空气阻力急剧增大、能耗急剧增加,还因列车高速交会、通过隧道等,出现了一系列亟待解决的危及行车安全、降低旅客舒适度和影响列车周围环境的列车空气动力问题。因此,列车空气动力学是伴随着列车运行速度的提高而迅速发展起来的一门新兴学科。

正如空气动力学是发展航空航天的关键基础学科一样,列车空气动力学是发展轮轨和磁浮高速轨道交通的关键基础科学,它不仅具有类似航空航天飞行器的空气动力特性:空气阻力、升力、横向力、表面分布压力等;还有其特殊的空气动力特性:列车交会压力波、列车—隧道耦合空气动力、列车风影响下道旁人员与环境所受的空气动力、大风环境下列车空气动力、列车—桥梁(路堤)耦合空气动力等。

上述这些特殊的列车空气动力特性问题的研究,除了借助于航空航天飞行器空气动力研究成果外,还需要建立适用于列车的空气动力研究方法和体系,如建立列车交会、通过隧道时的气动数值与理论分析方法、模型试验和列车空气动力实车试验方法等。列车空气动力特性的研究方法和体系在我国过去基本上是空白,需要自主创新与开拓。

作者田红旗教授十几年来,紧密结合工程发展需求,在轨道交通空气动力学研究前沿领域,为列车空气动力学研究进行了大量开创性工作,本书就是作者多年来在列车空气动力学研究方法、分析理论及其应用成果方面的总结。

本书具有下列特色:

在研究方法方面,系统介绍了数值计算分析、风洞试验、动模型试验、在线实车试验四者紧密结合和互相补充的列车空气动力综合



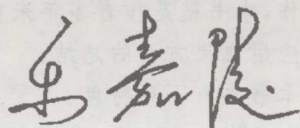
研究体系,其中有些是作者亲自开拓的。在数值计算分析方面,介绍了作者率先提出的用于列车交会、列车通过隧道的三维流场数值计算的不对称滑移网格法。在试验方面,除了列车模型风洞试验方法外,还介绍了作者主持研建的、亦是国内唯一的大型列车气动特性动模型试验系统与方法,以及作者主持开发的列车空气动力学实车试验系统与方法。其中实车试验现阶段仍然是我国列车空气动力学行车安全评估的主要试验方法。

在理论分析方面,基于大量的风洞试验、动模型试验、实车试验和计算分析的综合研究,作者提出了一系列经过试验验证的新的分析理论关系式,包括稳态运行时的列车气动特性理论关系式、人体安全退避距离关系式、列车交会压力波与列车速度(静止交会、等速交会、不等速交会)、线间距、车体宽度、附面层厚度的关系式,列车外形参数与空气阻力、升力、交会压力波关系式,大风环境下列车气动特性关系式等。这些理论分析具有很高的学术和工程应用价值。

在工程应用方面,作者还提出了众多的填补国内空白的列车空气动力学性能设计、试验及评价标准,包括列车空气阻力系数、升力系数设计建议标准,列车气动外形设计标准,气压变化下的人体舒适度评价标准,微气压波评价标准,列车交会行车安全评估体系及大风环境下行车安全保障体系等。

《列车空气动力学》一书是我国轨道交通领域在空气动力学方面的第一部学术著作,目前在国际上尚未有同类专著出版。它的出版不仅对我国高速轨道交通发展起着重要的作用,也必将推动我国在列车空气动力学领域的进一步开拓与创新。

中国工程院院士  
中国空气动力研究与发展中心研究员



2006年12月28日

# 序

高速铁路是一项庞大的多学科交叉的系统工程,包括了诸如列车空气动力学在内的许多关键基础科学与技术。为满足我国铁路提速、自主发展高速轨道交通和研制新型列车的迫切需要,十几年来,田红旗教授孜孜不倦,在列车空气动力学领域进行了开创性研究,解决了我国铁路因空气动力危及行车安全、降低旅客舒适度、增大空气阻力、影响环境等工程难题。

田红旗教授根据多年来的研究成果,撰写的《列车空气动力学》是我国轨道交通领域在空气动力学方面的第一部学术著作,涵盖了列车空气动力学研究方法、分析理论及工程应用,目前还没有发现国外有同类专著发行。这本书的出版标志着我国列车空气动力学的研究已步入了国际前列。

本书既有很高的理论学术水平,又有很强的工程实用性,其特征在于:

系统论述了列车空气动力学研究方法、空气动力特性、形成机理及规律、影响因素、分析理论与工程应用。

构建了从理论分析和数值模拟计算到风洞试验、动模型试验和在线实车试验的列车空气动力学综合研究体系。包括作者主持研建的目前世界上规模最大、国内唯一的列车气动特性动模型试验系统,独创的三维可压缩非定常具有相对运动流场数值模拟的非对称滑移网格方法,主持开发的填补国内空白的列车空气动力性能测试实车试验系统等,为列车空气动力性能分析提供了综合研究平台。

提炼出一系列原创性理论关系式。包括列车交会压力波与列车速度、线间距、车体宽度、附面层厚度的理论关系式,列车外形参数与列车空气阻力、升力、交会压力波的理论关系式,风向、风速、车速、路堤高度与列车空气阻力、车辆空气升力和横向力的理论关系式,人体安全退避距离方面的理论关系式。这些成为铁路建设确定复线间距

和安全退避距离、设计列车空气动力外形和结构、确定列车牵引功率、制定客货列车共线运输和编组模式、建立大风环境下行车安全保障系统等的理论基础。

论述了列车空气阻力、升力、表面分布压力、交会空气压力波形成机理、构成、基本规律；通过作者主持开展的序列变换头部主型线的48种流线型头部形状、车体底部和侧部等部件组合优化、不同断面车辆组成的复杂编组列车等研究，论述了影响这些空气动力性能的因素和提出的改善措施。为研制减阻节能、环保、舒适和安全的新型列车提供了科学依据。

创建了从列车空气动力分析到流线型外形、结构优化和工程设计、板梁数控加工、对号入座组焊一体化的流线型列车研制方法，结束了我国流线型列车手工制造历史，主持完成了我国所有的流线型列车外形及结构设计，使我国机车车辆民族工业在车体创新设计、制造方面实现了技术突破。

从理论角度论述了列车交会、列车通过隧道的空气动力对行车安全的影响，提出了解决此类问题的方法。据此作者建立了列车空气动力学行车安全研究与评估方法，主持完成了我国既有铁路五次提速、即将进行的第六次提速、所有新型国产和进出口列车的空气动力学行车安全评估，为预防列车空气动力危及行车安全提供了科学依据。

从理论角度论述了大风环境下列车周围空气流动机理、列车空气动力特性、风—车—路耦合空气动力特性，提出了风速—路况—车型耦合下的列车安全运行速度限值，主持研建了国际上唯一的“高原铁路大风监测预警与行车指挥系统”，为大风环境下行车指挥调度提供科学决策。

论述了制定的填补国内空白的列车空气动力性能设计、试验及评价标准，包括列车空气阻力系数、升力系数设计建议标准，列车空气动力外形设计标准，气压变化下的我国人体舒适度评价标准，微气压波评价标准，列车交会行车安全评估体系和大风环境下行车安全保障体系，使我国列车空气动力性能计算、设计、试验及评价有章可循。



当前正值我国轨道交通新一轮大发展的关键时期,适时出版《列车空气动力学》专著,必将对我国轨道交通领域的自主创新和列车空气动力学的进一步发展起到推动作用。

中国工程院院士  
中国南车集团株洲电力机车有限公司教授级高工



2006年12月11日



# 前 言

随着列车运行速度的不断提高,不仅列车空气阻力急剧增大、能耗增加,还因列车高速交会、通过隧道等,出现了一系列危及行车安全、降低旅客舒适度和影响周围环境的列车空气动力问题亟待解决。因此,列车空气动力学是铁路提速、发展高速轨道交通的关键基础学科。同世界各国一样,我国已将评价列车空气动力性能作为铁路行车安全评估的内容之一。

作者开展列车空气动力学研究始于 20 世纪 90 年代初,至今主持完成了列车空气动力学方面的国家重点科技攻关、国家 863、国家高技术产业化、国家自然科学基金和铁道部科研项目等。研究内容包括列车空气动力学研究方法、列车(列车—环境耦合)空气动力性能、分析理论和工程应用。

## 1. 建立列车空气动力学研究体系

建立了从理论分析和数值计算到动模型试验、风洞试验和在线实车试验的列车空气动力学综合研究体系。该体系包括主持研建的列车气动特性动模型试验装备,提出的用于列车交会、列车通过隧道的三维流场数值计算的非对称滑移网格法;原长沙铁道学院开发的列车空气动力学现场实车试验系统及试验方法;中国空气动力研究与发展中心研制的列车风洞试验专用地板和试验方法,国防科技大学研制的能较均匀控制地板附面层厚度的多孔均匀吸气地板和试验方法。

## 2. 开展列车空气动力性能研究

采用上述研究方法,对列车空气动力学开展了深入、细致、系统的研究。涵盖了如下内容:

- (1)研究的列车包括轮轨客运列车、货运列车、磁浮高速列车、地铁及城轨列车;
- (2)研究的列车外形从传统列车的钝型列车发展到流线型列车;
- (3)研究的列车速度从普速到准高速和提速、轮轨高速、磁浮高

速 4 个速度等级；

(4)研究的流场范围从轮轨列车系统的低速流发展到磁浮列车系统的亚音速流；

(5)从列车自身空气动力特性:列车表面分布压力、空气阻力、升力、横向力、周围流场(侧部及尾部流场)特性、交会空气压力波,发展到列车—环境耦合空气动力特性:列车—隧道耦合空气动力性能,列车—桥梁(路堤)耦合空气动力性能,强侧风环境下的列车空气动力特性等；

(6)研究的范畴从空气动力特性、形成机理、构成、基本规律、分析理论与应用,到列车空气动力性能计算、设计、试验及评价标准。

### 3. 提出一系列关系式

通过大量的试验研究和验证,提出了一系列关系式,包括列车稳态运行时气动特性关系式,列车交会压力波与列车速度(静止交会、等速交会、不等速交会)、线间距、车体宽度、附面层厚度的关系式,列车外形参数与列车空气阻力、升力、交会压力波的关系式,风向、风速、车速、路堤高度与列车空气阻力、车辆空气升力和横向力的关系式,人体安全退避距离方面的关系式。

### 4. 研究结果归宿到工程应用

研究了列车空气阻力、列车外表面空气压力(压强)、车辆空气升力等形成机理、构成、基本规律、特性,以及列车风引起的道旁人员承受空气动力特性,分析了影响这些空气动力性能的因素,提出了改善措施。研究结果已用于确定列车牵引功率、人体安全退避距离、冷却风道的进排风口位置、制定客货列车共线运输模式等。

在列车外形空气动力性能分析方面,进行了序列变换头部主型线的 48 种流线型头部形状理论与试验研究,完成了车体底部、侧部、顶部及连接部位等部件组合外形优化理论与试验研究,开展了不同断面车辆组成的复杂编组列车等研究,提出了列车空气动力外形确定方法。研究结果已用于设计列车空气动力外形和结构等。建立了从列车空气动力分析到流线型外形、结构优化和工程设计、板梁数控加工、对号入座组焊一体化的流线型列车研制方法。主持完成了我国所有的流线型列车、准流线型机车和城市轨道列车外形与结构设

计。

开展了列车交会、列车通过隧道时空气动力对行车安全、乘客舒适性及周围环境影响理论与试验研究,提出了解决此类问题的方法和改善措施。研究成果已用于铁路建设的复线间距确定、新型列车研制、与空气动力效应有关的隧道设计等。建立了列车空气动力学行车安全研究与评估方法,主持完成了我国既有铁路五次大提速、即将进行的全国大面积第六次提速、所有新型国产和进出口列车的空气动力学行车安全评估。

开展了大风环境下列车周围空气流动机理、列车空气动力特性、风—车—路耦合空气动力特性研究,提出了风速—路况—车型耦合下的列车安全运行速度限值,主持研建了“高原铁路大风监测预警与行车指挥系统”。

提出了列车空气阻力系数、升力系数设计建议标准,列车空气动力学外形设计标准,气压变化下的人体舒适度评价标准,微气压波评价标准,列车交会行车安全评估体系,大风环境下行车安全保障体系。

通过对上述的列车空气动力学研究方法、分析理论及工程应用三类科学问题开展研究。作者以排名第一获得了列车空气动力学方面的如下科技成果奖:“列车空气动力学性能研究及外形、结构设计方法”获 2001 年度国家科技进步二等奖、2000 年度湖南省科技进步一等奖,“高速列车气动特性、撞击安全动模型试验系统及应用”获 2004 年度国家科技进步二等奖,“高速列车外形设计方法及成套软件”获“九五”国家重点科技攻关计划优秀科技成果,“列车交会空气压力波研究与应用”获 2003 年度湖南省科技进步一等奖,“轮轨、磁浮列车交会与行车安全研究”获 2003 年度教育部科技进步一等奖。

正是在上述背景下,作者撰写了本《列车空气动力学》专著。

全书分两篇共十章。第一章:列车空气动力学导论;第一篇:列车空气动力学研究方法(涵盖第 2 章至第 5 章),第二篇:列车空气动力学基础与应用(涵盖第 6 章至第 10 章),包括列车稳态运行空气动力特性,列车交会瞬态空气压力波,列车空气动力学性能与列车外形,列车—隧道耦合空气动力学,大风环境下的列车空气动力学。

列车空气动力学是空气动力学在轨道交通领域的应用和进一步



发展,为了更好地体现本书的特色,对流体力学和经典空气动力学基本理论未作阐述,阅读该书时,有关这方面的基础理论部分需要参阅其他相关书籍。

本书的理论关系式、获得的规律和结论均来自自动模型试验、风洞试验和现场在线实车试验结果和结论,并结合计算进行分析提炼,同时还得到了一系列的试验验证。

本书内容主要是已取得的研究成果。由于列车空气动力学是一门新兴学科,尚处在大发展中,有待于进一步完善。

1999年末起撰写本书,历经6年完成初稿,又经半年多的修改完善。出版之际,作者谨向支持、关心及联合开展本研究工作和本书出版的各有关单位、个人致以诚挚的谢意。感谢国家发改委、科技部、铁道部、教育部、国家基金委、湖南省科技厅对本领域研究工作提供的大力支持。感谢联合开展本领域研究工作的中国空气动力发展与研究中心、国防科技大学等。特别感谢导师中国空气动力发展与研究中心的贺德馨教授和中南大学的卢执中教授,本书内容渗透着导师们的心血和智慧。特别感谢中国科学院和中国工程院沈志云院士、中国科学院张涵信院士、中国工程院乐嘉陵院士、中国工程院刘友梅院士、中国空气动力发展与研究中心朱国林教授和高树椿教授、国防科技大学王承尧教授的长期关怀和大力支持。中国工程院乐嘉陵院士和刘友梅院士在百忙之中为本书作序,国防科技大学的王承尧教授和中南大学的卢执中教授仔细审阅了全部书稿并提出宝贵意见。特别感谢中南大学轨道交通实验室的同事梁习锋、许平、张建、潘迪夫、杨明智、周丹、韩坤、高广军、姚松、鲁寨军、刘堂红、姚曙光、熊小惠等,本书出版体现了课题组全体成员的研究结晶。衷心感谢中国铁道出版社的大力支持。

限于作者水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

田红旗

2006年11月7日

于长沙中南大学



## 目 录

<b>1 列车空气动力学导论</b> .....	1
1.1 列车空气动力学研究背景与进展 .....	1
1.2 本书涵盖内容 .....	11
1.3 坐标、参数及部分术语定义 .....	15
1.3.1 坐标 .....	15
1.3.2 参数 .....	16
1.3.3 部分术语定义 .....	16
1.3.4 需要说明的问题 .....	18
<b>列车空气动力学研究方法篇</b> .....	21
<b>2 列车空气动力学数值计算方法</b> .....	26
2.1 基本控制方程及数值求解方法 .....	26
2.1.1 可压缩流的基本控制方程 .....	26
2.1.2 不可压缩流的基本控制方程 .....	28
2.1.3 数值求解方法 .....	29
2.1.4 湍流模拟 .....	30
2.1.4.1 $k-\epsilon$ 两方程模型 .....	31
2.1.4.2 雷诺应力模型 .....	32
2.2 列车流场数值模拟的关键方法 .....	32
2.2.1 列车交会流场数值计算非对称滑移网格法 .....	33
2.2.1.1 列车交会数值计算的特点 .....	33
2.2.1.2 列车交会分区方法 .....	34
2.2.1.3 耦合信息交换方法 .....	35
2.2.1.4 非对称滑移网格法 .....	38

2.2.2	列车过隧道滑移网格法	40
2.2.2.1	列车过隧道数值计算的特点	40
2.2.2.2	列车过隧道分区法	41
2.2.2.3	信息交换与滑移网格法	42
2.3	网格生成技术	43
2.3.1	再分区结构网格生成技术	43
2.3.1.1	列车表面网格生成	44
2.3.1.2	近体区域空间网格生成	46
2.3.1.3	公共交换区空间网格生成	46
2.3.1.4	外部空间网格生成	47
2.3.2	非结构网格生成	47
2.3.3	结构、非结构混合网格技术	49
2.4	定解条件	50
2.4.1	初始条件	50
2.4.2	边界条件	50
2.5	计算结果数据场可视化方法	52
2.5.1	基于等参变换的区域映射数据场插值	53
2.5.2	压力场的坐标表示法	56
2.5.3	建立场量值与颜色的对应关系	56
2.5.4	扫描线算法的改进及其在压力场彩色云图和等值线中的应用	57
3	列车空气动力学在线实车试验系统	59
3.1	列车空气动力学在线实车试验测试内容	59
3.2	瞬态空气压力测试系统	60
3.2.1	瞬态压力测试系统硬件	61
3.2.1.1	瞬态压力传感器	61
3.2.1.2	信号调理装置	66
3.2.1.3	数据采集卡	66
3.2.1.4	触发装置	68
3.2.2	瞬态数据采集处理系统	68
3.2.3	瞬态测试精度影响因素分析	72

3.2.3.1	信号线长度对压力传感器输出信号的影响	72
3.2.3.2	放大器滤波频率对传感器信号波形的影响	73
3.2.3.3	采样频率对传感器输出信号的影响	74
3.3	稳态空气压力测试系统	76
3.3.1	稳态空气压力测试	77
3.3.2	拍式感压片	77
3.3.3	参考压的选取	77
3.4	其他相关瞬态测试系统	78
3.4.1	瞬态红外光电测速系统	79
3.4.2	瞬态超声波测距系统	80
3.4.3	列车风作用下人体模型承受的气动力 测试系统	81
3.5	实车试验结果数据场可视化方法	82
3.5.1	实车试验结果数据场可视化要求	82
3.5.2	离散数据四边形网格化	83
4	列车空气动力学模型试验系统	87
4.1	列车气动特性风洞模型试验系统	87
4.1.1	风洞的基本类型	87
4.1.2	低速风洞的类型和主要部件的功能	88
4.1.3	列车空气动力特性风洞模型试验原理	91
4.1.4	列车风洞测力试验技术	92
4.1.4.1	测力试验的主要测量仪器	92
4.1.4.2	测力试验的主要过程	93
4.1.4.3	测力试验的数据处理过程	94
4.1.5	列车风洞测压试验技术	94
4.1.6	列车风洞试验地面效应模拟技术	95
4.1.6.1	活动地板法	96
4.1.6.2	固定地板法	96
4.1.7	大风环境下路堤上运行列车流场风洞 模拟试验方法	98
4.2	列车空气动力特性动模型试验系统	99



4.2.1	动模型试验系统组成及功能	99
4.2.2	动模型试验系统基本原理	101
4.2.3	动模型试验系统作用	103
4.2.4	列车气动特性动模型试验控制系统	103
4.2.4.1	控制系统组成及控制流程	103
4.2.4.2	速度控制系统	104
4.2.4.3	同步控制系统	106
4.2.5	列车气动特性动模型试验测试系统	107
4.2.5.1	车载数据采集系统	107
4.2.5.2	车载瞬态空气压力测试系统	107
4.2.5.3	车载动态速度测试系统	109
4.2.5.4	车载测试系统软件	109
4.2.5.5	车载测试系统特殊设计措施	109
4.3	列车气动特性试验用模型	110
4.3.1	列车风洞模型	110
4.3.1.1	列车风洞模型设计的基本要求	110
4.3.1.2	列车风洞模型的强度、刚度及材料选择	111
4.3.2	动模型列车	111
4.3.2.1	动模型列车构成	111
4.3.2.2	动模型列车设计基本要求	114
4.4	模型试验的相似性	114
4.4.1	相似定理	114
4.4.2	完全模拟和部分模拟	115
4.4.3	自模拟	116
4.4.4	动模型试验相似性	116
<b>5</b>	<b>列车空气动力学研究方法分析、评价及综合研究体系</b>	<b>118</b>
5.1	在线实车试验可信度分析	118
5.1.1	各种列车交会试验曲线比较与分析	119
5.1.2	流线型列车交会试验重复性精度分析	120
5.1.2.1	列车静止交会试验重复性精度分析	120



5.1.2.2	列车运行交会试验重复性精度分析 .....	121
5.1.3	钝头列车交会试验重复性精度分析 .....	122
5.2	动模型列车交会试验重复性精度分析 .....	122
5.3	风洞试验重复性精度分析 .....	123
5.4	数值计算与实车试验结果比较与分析 .....	124
5.4.1	轮轨流线型列车交会 .....	124
5.4.2	磁浮高速列车交会 .....	126
5.4.3	提速钝型列车交会 .....	128
5.4.4	流线型列车稳态运行表面分布压力 .....	129
5.4.5	双层集装箱货运列车稳态运行表面压力 .....	130
5.5	动模型试验与实车试验结果比较与分析 .....	130
5.5.1	列车交会压力波幅值比较 .....	131
5.5.2	列车交会压力波波形比较 .....	132
5.6	风洞试验与实车试验结果比较与分析 .....	134
5.7	列车空气动力学研究方法评价及综合研究体系 .....	135
5.7.1	实车试验方法评价 .....	135
5.7.2	风洞试验方法评价 .....	135
5.7.3	动模型试验方法评价 .....	136
5.7.4	数值计算方法评价 .....	137
5.7.5	理论分析方法评价 .....	137
5.7.6	综合研究体系 .....	138
<b>列车空气动力学基础与应用篇 .....</b>		<b>139</b>
6	<b>列车稳态运行空气动力特性 .....</b>	<b>148</b>
6.1	列车表面空气压力 .....	149
6.1.1	列车表面空气压力的定义与表示方法 .....	149
6.1.2	列车表面空气压力与运行速度 .....	150
6.1.3	列车外表面空气压力分布规律 .....	150
6.1.4	列车表面空气压力的应用 .....	155
6.2	列车空气阻力 .....	156
6.2.1	列车空气阻力形成机理 .....	157