



大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

民机先进制造工艺技术系列
主编 林忠钦

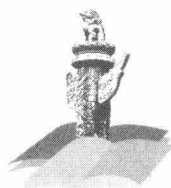
飞机喷管的 理论与实践

Аэродинамика Реактивных Сопел

【俄】G·N·拉夫鲁欣 著
李志黎 军 等译
胡立安 赵霞 校对
李天主审



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

民机先进制造工艺技术系列

主 编 林忠钦

飞机喷管的 理论与实践

Аэродинамика Реактивных Сопел

【俄】G·N·拉夫鲁欣 著

李志黎 军 等译

胡立安 赵 霞 校对

李 天 主审



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

这本文集是俄罗斯及其他国家最近 50 年有关喷管航空气体动力学领域研究成果和文献资料的归纳总结。本书研究了圆形喷管、平面(二元)喷管和三元喷管。所给出的喷管研究资料适用于固壁喷管、引射喷管、斜切口喷管、双涵道喷管、高超声速飞行器喷管等,喷管特性涵盖推力反效、推力矢量偏转和消音等状态。书中对大量基础研究问题进行了归纳总结,其中包括从低速粘性流到超声速喷流在管道内的流动问题、浸没空间内喷流的流动问题等。对各种布局类型的喷管性能和流动特性进行了分析研究,根据基础研究和试验结果揭示了各种形式喷管的使用效能,比较分析了它们的优缺点,读者可以将本书的数据和结果用于现代飞行器的喷管研制。

© ФИЗМАТЛИТ, ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт»
имени профессора Н. Е. Жуковского, Лаврухин Геннадий Николаевич, 2003
上海市版权局著作权合同登记号: 09 - 2016 - 951

图书在版编目(CIP)数据

飞机喷管的理论与实践 / (俄罗斯) G·N·拉夫鲁欣著;
李志等译. —上海: 上海交通大学出版社, 2016
大飞机出版工程
ISBN 978 - 7 - 313 - 16436 - 0

I. ①飞… II. ①G… ②李… III. ①飞机—尾喷管—
研究 IV. ①V235

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 311944 号

飞机喷管的理论与实践

著 者: [俄] G·N·拉夫鲁欣	译 者: 李 志 黎 军 等
出版发行: 上海交通大学出版社	地 址: 上海市番禺路 951 号
邮政编码: 200030	电 话: 021 - 64071208
出 版 人: 郑益慧	
印 制: 上海盛通时代印刷有限公司	经 销: 全国新华书店
开 本: 787 mm×1092 mm 1/16	印 张: 21
字 数: 396 千字	
版 次: 2016 年 12 月第 1 版	印 次: 2016 年 12 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978 - 7 - 313 - 16436 - 0/V	
定 价: 128.00 元	

版权所有 侵权必究
告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话: 021 - 61453770

大飞机出版工程

丛书编委会

总主编

顾诵芬(中国航空工业集团公司科技委副主任、中国科学院和中国工程院院士)

副总主编

金壮龙(中国商用飞机有限责任公司董事长)

马德秀(上海交通大学原党委书记、教授)

编委(按姓氏笔画排序)

王礼恒(中国航天科技集团公司科技委主任、中国工程院院士)

王宗光(上海交通大学原党委书记、教授)

刘洪(上海交通大学航空航天学院副院长、教授)

许金泉(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授)

杨育中(中国航空工业集团公司原副总经理、研究员)

吴光辉(中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员)

汪海(上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员)

沈元康(中国民用航空局原副局长、研究员)

陈刚(上海交通大学原副校长、教授)

陈迎春(中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员)

林忠钦(上海交通大学常务副校长、中国工程院院士)

金兴明(上海市政府副秘书长、研究员)

金德琨(中国航空工业集团公司科技委委员、研究员)

崔德刚(中国航空工业集团公司科技委委员、研究员)

敬忠良(上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授)

傅山(上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员)

民机先进制造工艺技术系列

编 委 会

主 编

林忠钦（上海交通大学常务副校长、中国工程院院士）

副主编

姜丽萍（中国商飞上海飞机制造有限公司总工程师、研究员）

编 委（按姓氏笔画排序）

习俊通（上海交通大学机械与动力学院副院长、教授）

万 敏（北京航空航天大学飞行器制造工程系主任、教授）

毛荫风（中国商飞上海飞机制造有限公司原总工程师、研究员）

孙宝德（上海交通大学材料科学与工程学院院长、教授）

刘卫平（中国商飞上海飞机制造有限公司副总工程师、研究员）

汪 海（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

陈 洁（中国商飞上海飞机制造有限公司总冶金师、研究员）

来新民（上海交通大学机械与动力工程学院机械系主任、教授）

陈 磊（中国商飞上海飞机制造有限公司副总工程师、航研所所长、研究员）

张 平（成飞民机公司副总经理、技术中心主任、研究员）

张卫红（西北工业大学副校长、教授）

赵万生（上海交通大学密歇根学院副院长、教授）

倪 军（美国密歇根大学机械工程系教授、上海交通大学密歇根学院院长、教授）

黄卫东（西北工业大学凝固技术国家重点实验室主任、教授）

黄 翔（南京航空航天大学航空宇航制造工程系主任、教授）

武高辉（哈尔滨工业大学金属基复合材料与工程研究所所长、教授）

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、比重大于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和应用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索和不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 B737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008 年 5 月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教 1 时,亲自撰写了《飞机性能及算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展 50 年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理 50 多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如：2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力设计》), 由美国堪萨斯大学 2008 年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》) 等国外最新科技的结晶；国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》《民用飞机气动设计》等专业细分的著作；也有《民机设计 1 000 问》《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助, 体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命, 凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果, 具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性, 既可作为实际工作指导用书, 亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养, 有益于航空工业的发展, 有益于大飞机的成功研制。同时, 希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空, 并投身于中国航空事业做出一点贡献。

顾诵芬

2009 年 12 月 15 日

序

制造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基。《中国制造 2025》提出,坚持创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展,加快从制造大国转向制造强国。航空装备,作为重点发展的十大领域之一,目前正处于产业深化变革期;加快大型飞机研制,是航空装备发展的重中之重,也是我国民机制造技术追赶腾飞的机会和挑战。

民机制造涉及新材料成形、精密特征加工、复杂结构装配等工艺,先进制造技术是保证民机安全性、经济性、舒适性、环保性的关键。我国从运-7、新支线 ARJ21-700 到正在研制的 C919、宽体飞机,开展了大量的工艺试验和技术攻关,正在探索一条符合我国民机产业发展的技术路线,逐步建立起满足适航要求的技术平台和工艺规范。伴随着 ARJ21 和 C919 的研制,正在加强铝锂合金成形加工、复合材料整体机身制造、智能自动化柔性装配等技术方面的投入,以期在宽体飞机等后续型号的有序可控生产奠定基础。但与航空技术先进国家相比,我们仍有较大差距。

民机制造技术的提升,有赖于国内五十多年民机制造的宝贵经验和重要成果的总结,也将得益于借鉴国外的优秀出版物和数据资料引进。因此有必要编著一套以“民机先进制造工艺技术”为主题的丛书,服务于在研大型飞机以及后续型号的开发,同时促进我国制造业技术的发展和紧缺人才的培养。

本系列图书筹备于 2012 年,启动于 2013 年,为了保证本系列图书的品质,先后召开三次编委会会议和图书撰写会议,进行了丛书框架的顶层设计、提纲样章的评审。在编写过程中,力求突出以下几个特点:① 注重时效性,内容上侧重在目前民机

研制过程中关键工艺;② 注重前沿性,特别是与国外先进技术差距大的方面;③ 关注设计,注重民机结构设计与制造问题的系统解决;④ 强调复合材料制造工艺,体现民机先进材料发展的趋势。

该系列丛书内容涵盖航空复合材料结构制造技术、构件先进成形技术、自动化装配技术、热表特种工艺技术、材料和工艺检测技术等面向民机制造领域前沿的关键性技术方向,力求达到结构的系统性,内容的相对完整性,并适当结合工程应用。丛书反映了学科的近期和未来的可能发展,注意包含相对成熟的内容。

本系列图书由中国商飞上海飞机制造有限公司、中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司、沈阳飞机设计研究所、北京航空制造工程研究所、中国飞机强度研究所、沈阳铸造研究所、北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学、上海交通大学、西安交通大学、清华大学、哈尔滨工业大学和南昌航空航天大学等单位的航空制造工艺专家担任编委及主要撰写专家。他们都有很高的学术造诣,丰富的实践经验,在形成系列图书的指导思想、确定丛书的覆盖范围和内容、审定编写大纲、确保整套丛书质量中,发挥了不可替代的作用。在图书编著中,他们融入了自己长期科研、实践中获得的经验、发现和创新,构成了本系列图书最大的特色。

本系列图书得到 2016 年国家出版基金的资助,充分体现了国家对“大飞机工程”的高度重视,希望该套图书的出版能够真正服务到国产大飞机的制造中去。我衷心感谢每一位参与本系列图书的编著人员,以及所有直接或间接参与本系列图书审校工作的专家学者,还有上海交通大学出版社的“大飞机出版工程”项目组,正是在所有工作人员的共同努力下,这套图书终于完整地呈现在读者的面前。我衷心希望本系列图书能切实有利于我国民机制造工艺技术的提升,切实有利于民机制造行业人才的培养。



2016 年 3 月 25 日

序

2014年6月,此书系作者拉夫鲁斯先生委托来中国访问的俄莫斯科航空学院飞机设计教授儒拉夫廖夫送给我。作者是俄中央空气流体动力研究院(现称国家航空中心)气动力专家,长期从事内流空气动力学研究。上一次与俄方专家会面时,他们还给了我多种专著。我拿回办公室的时候,恰巧沈阳飞机设计研究所总设计师王永庆同志也在场,他翻了一下,立即拿走了这本《飞机喷管的理论与实践》,他说他拿回去组织翻译。我个人觉得此书太专业,对飞机设计所不一定那么急需,所以也就没有再关心这件事。

直到2016年11月,李志同志突然来电话说,此书所里已经组织翻译完了,而且上海交大出版社大飞机工程准备出版,李志同志要我写个序言。我说此书我都没有看过就被王总拿走了,我怎么写这个序言?由于这个缘故,李志同志又把原书还给我。我仔细翻了一遍这本书,觉得对我国设计飞机的同志们确实有用。

该书是俄中央空气流体动力研究院建立85周年纪念丛书中的一种,因此还是很重要的一本专著。

喷管是推进飞机的很重要部件,我国没有这样的专著,西方出版的专著也没见过,一般都涵盖在喷气发动机设计的著述中。因此,针对喷管空气动力学方面的论述很少,而且也不深。此书实际上是总结了俄中央空气流体动力研究院上世纪60年代以来的研究成果,引用了大量俄中央空气流体动力研究院和苏联科学院的研究报告。

本书的特点是详细介绍了各种喷管的流动特点、物理模型及其算法。该书结合飞机,比较实用,从收敛喷管、扩散喷管、二维喷管到轴对称喷管,以及引射喷管都讲到了,比较全面。特别是结合新一代战斗机的需求——考虑推力矢量和红外隐身,这方面的内容也讲到了。

还有民机需要的反推力和降噪喷管设计,本书也进行了详细描述。最后还讲到了高超声速飞行器的喷管设计。

由此可见,此书不仅对设计战斗机有用,对设计民机也有用。不仅对飞机设计技术人员有用,对发动机设计人员也有参考作用。

上海交大出版社能够安排这本书的出版,是为发展航空科学技术工作做了一件好事。

顾诵芬

2016年12月

译者序

俄罗斯中央空气流体动力研究院(现称国家航空中心)是著名学者、空气动力学奠基人茹科夫斯基教授创建的,已经有将近 100 年的历史。早期研究院的研究范围涵盖空气动力学、强度、飞行动力学、航空发动机、风洞试验和飞行试验等,而且还有自己的设计团队,其中包括图波列夫、苏霍伊等著名设计师。俄罗斯航空发动机研究院、飞行研究院都是从中央空气流体动力研究院独立出去的航空科研机构。但在动力装置空气动力学理论和试验基础方面,中央空气流体动力研究院仍具有雄厚的实力。

《飞机喷管的理论与实践》一书就是由中央空气流体动力研究院的专家编写的。2014 年末,李天院士找到我,交给我一本俄文版《飞机喷管的理论与实践》,要求我组织翻译这本书。一开始只是准备内部出版,供相关专业参考。

2016 年底,上海交大出版社的钱方针主任给我打电话,希望我能推荐几本有关民机研制的外文书,在她们那里出版。我就推荐了《飞机喷管的理论与实践》和《大飞机飞行控制律的原理与应用》两本书。出版社虽然认可这两本书的内容,但面临一个问题——如何能够联系作者、购买版权。去年她们曾经尝试购买《大飞机飞行控制律的原理与应用》的版权,但没有成功。

我找到俄罗斯无人机协会会长,请他帮忙联系作者。很幸运,他只用三天时间就帮助我们解决了问题。保证了这两本书的顺利出版。

为了保证这两本书的出版质量,顾诵芬院士亲自给我写信,要求让李天院士、李明院士分别作为两本书的终审。李天院士负责《飞机喷管的理论与实践》一书的终审。

本书不仅可以作为飞机设计机构研究人员的参考资料,也可以作为从事风洞试验、CFD 计算科研人员的参考。

译者

2016 年 12 月

初版序言

随着航空科学和技术的不断发展,研制复杂多状态飞行器的需求更加迫切,为此应当广泛开展一系列综合性的科学研究工作,其中包括深入研究喷气发动机、动力装置及其各部件的空气动力学现象。

动力装置在满足越来越高的经济性要求和最大推力情况下,还需同飞机机体融合以减小外部阻力,这样就导致必须详细研究排气装置,其主要部分就是喷管,它是发动机或动力装置的一个最重要的元件。实质上就是形成喷管研制所涉及的各研究方向或分支,例如内流燃气动力学、带喷管飞机的尾部或后部的空气动力学,并且采用数值计算和试验手段研究喷管的空气动力学。

在国内外出版物中,存在大量关于喷管空气动力学方面问题的研究结果,包括理论研究、数值计算和各种试验。这方面的问题与所有物理科学一样,理论与试验之间存在紧密的联系。在各种用途飞机喷管的研究、试验和试制过程中,已经积累了大量经验,这些经验表明,在选择喷管时,需要满足一系列提出的要求,因此需要解决一整套彼此关联的燃气动力学问题:研究管道中的湍流流动;研究亚声速、跨声速、超声速气流中物体的绕流;研究底部区的流动;研究飞机外部绕流与喷管喷流之间的相互影响——复杂外形分离区域的流动。当然还有其他方面的问题。

由于存在三维流动,存在湍流和各种形式的分离区,因此,决定了喷管燃气动力学参数和几何参数多种多样,喷管的布局形式也多种多样,喷管的调节规律也多种多样,但是,决定喷管布局形式的最主要条件是获得最大推力,且喷管的外部阻力最小。目前使用理论方法并不能完全解决现代飞机和目前规划中飞机喷管设计实践中出现的各种问题。

在理论研究方面,起最大促进作用的是与喷管内部燃气流动相关问题的解决,以及简单(独立)物体平面流动或轴对称收敛物体无黏流问题的解决,最近这些年还解决了黏性来流问题。对于解决飞机设计过程中动力装置喷管气动力问题,主要还是依靠试验手段:设计试验模型进行风洞试验。

尽管如此,在一系列学术专著和教材中,还是足够详细地研究了喷管的燃气动力学问题,但时至今日,还没有出现一部将喷管空气动力学各方面主要问题的解决办法综合在一起的专著,内容包括喷管内流特性的确定、外部阻力和底阻的确定、喷管在飞机上实际布局情况下有效推力的确定及其他方面的问题。各种出版物上所讲述的喷管气动力问题都带有局部色彩,缺乏全面性和系统性,尤其是没有将各种情况下的喷管气动特性与所研究物理现象的复杂性和方法的多样性联系在一起,而且给出的结果形式也给各类研究人员增加了难度,很难接受、分析和研究现有数据,甚至会导致结论错误。

本书所描述的喷管气动特性,是以中央空气流体动力学研究院 30 年期间所开展研究的成果为基础,还有部分材料则来自国内外出版的资料。各章节内容中还包括中央空气流体动力学研究院多年从事的喷管气动问题研究综述。

本书材料适用于喷管的实际研究和设计制造,可以作为航空院校学生,以及航空发动机制造领域工程师、科学技术人员的参考资料。

本书最后列举了各章节所使用的参考资料,前面是国内出版的,后面是国外的,按字母表顺序排列。

原版前言

喷管是安装了喷气发动机的任何飞行器排气装置的一个主要的不可分割的元件。除了喷管外,现代飞机的排气装置,特别是多状态的超声速飞机和高超声速飞机,都是喷气发动机或动力装置的复杂元件,其中包括将空气输送到喷管的各种系统、推力矢量偏转和反推力系统(或装置)、降低噪声和红外辐射的系统等。

在喷气发动机和火箭发动机的研制实践中,喷管布局的选择、设计和研制目的如下:保证喷气发动机每个工作状态的所需推力最大,即保证燃气从喷管流出的过程最大程度接近理想化,而且尽可能使喷管的质量和外形最小。当飞行器的飞行状态不需要提供最大推力,而是只需要部分推力时,喷管还是要保证动力装置的外部阻力最小。

除了保证推力最大和外部阻力最小两项要求之外,还要加上喷管调节简单(如果需要调节)、喷管在飞机上的布局合理、对喷管进行热防护和冷却等要求。

喷管完善性水平和满足要求的程度,会在整体上对飞机的效率产生实质性的影响。例如,带加力涡轮喷气发动机的喷管质量可以占到发动机质量的20%~40%,而跨声速飞行时的发动机推力效率损失可能会提高30%^[20,99,119]。

对于英法联合研制的“协和号”超声速客机,在起飞理想推力状态下,喷管推力损失每提高1%,飞机有效载重就减少5%,对于超声速飞行状态 $Ma_\infty \cong 2.7$,即总航程约为7 300 km的状态,这将导致航程减少约250 km,即约下降3.5%^[40,91]。

对于航程达到10 000 km、喷管冲量达到300 s的巡航导弹,冲量损失1%,将导致导弹航程减少约500 km,即减少了约5%^[64]。

喷管类型、布局形式和参数的选择应当采用求极值的方法,但是,由于一系列的客观原因,这类问题很难得到准确而严格的数学解,目前只能近似解决。这与一系列因素有关,首先,按照现有的科学理论,由于黏性流动和气流的各参数混杂,我们只能近似确定燃气热能转换成动能过程的特性,这种转换是喷管

的主要用途,其次,在喷管流场中存在亚声速、跨声速和超声速流动,存在施加在喷管上的各种限制条件,存在喷流对附近飞机机体元件绕流的影响,这些都将影响动力装置的推力效率。

喷管类型或布局形式的选择首先取决于发动机的级别或类型——空气喷气发动机或火箭发动机,它们是为各种形式的飞行器而研制的。这两种级别的发动机可能具有不同形式的喷管,但很多特性是相当接近或者符合某些共同的变化规律,其中包括喷管的内流特性。

空气喷气发动机和火箭发动机的分类,在很多专著和书籍^[1,3-5,52,58,77]中都有详细叙述,其中主要研究的问题就是与这些发动机的喷管有关。在这些文献中,研究的大部分问题是喷管内部燃气的动力学,而喷管对外部气动力影响的研究偏少,特别是喷管对飞机气动力的影响问题,研究得更少。

本书主要致力于研究空气喷气发动机的喷管,以及它们在飞机上的布局形式,还研究喷管燃气动力学特性及空气动力学特性的确定方法。另外研究的一系列问题包括喷管的内流特性、有无尾喷流情况下的飞行器的外部阻力和底阻等,这部分内容对于空气喷气发动机和火箭发动机都能使用。

例如,空气喷气发动机和火箭发动机都可以使用最简单的火药式或液体喷射式锥形超声速喷管或拉瓦尔喷管,因此,在研究各种喷气发动机时,进行内流特性换算是合适的。

接下来,对于不同来流速度情况下尾部收缩部分的外阻力和底阻的确定问题,类似问题需要分析不同用途的飞机,其中也包括无人机。

飞行器的种类或形式千差万别,其用途和完成的任务各有千秋,所使用的喷气发动机也不一样,因此,喷管类型、布局形式的选择需要根据飞行器的布局形式而定。决定喷管形式选择的因素包括:

- (1) 飞行器的用途: 战斗机、军用运输机、客机还是无人机。
- (2) 飞行器的速度: 亚声速、超声速或高超声速。
- (3) 喷气发动机的类型: 不带加力的涡轮喷气发动机,双涵道发动机(涵道分开或者在一个喷管内混合流动),带加力燃烧室的发动机,高超声速冲压发动机,变循环发动机或火箭发动机。

总体讲,上面列举的因素是彼此有联系的,因为飞行器的用途及其飞行速度就已经决定了它们将采用的发动机类型及其喷管形式。

随着飞行器逐渐复杂,所完成的任务数量逐步提高,它们对安装在上面的喷气发动机提出的要求也越来越高,当然,对这些发动机上喷管的要求也水涨船高。

现代及未来飞行器对喷管提出的主要要求包括如下几种:

- (1) 满足飞行器的战术技术要求。