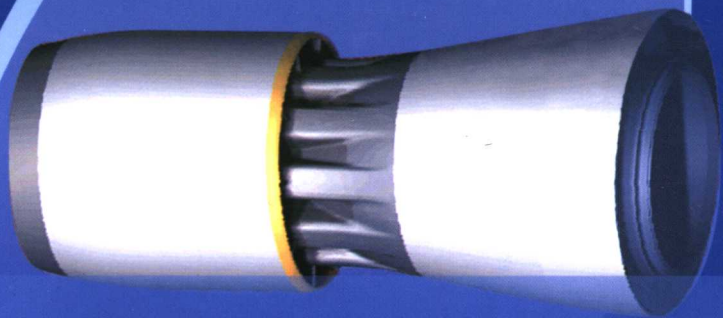




中国航空学会
《航空科学技术丛书》

航空用引射混合器



Aeronautic Ejector / Mixer

李立国 张靖周 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

中国航空学会
《航空科学技术丛书》

航空用引射混合器

Aeronautic Ejector/Mixer

李立国 张靖周 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航空用引射混合器 / 李立国, 张靖周著. —北京: 国防工业出版社, 2007. 1

航空科学技术丛书

ISBN 7-118-04571-3

I. 航... II. ①李...②张... III. 航空发动机—引射器: 混合器 IV. V233

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 063744 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9¼ 字数 223 千字

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 彭华良 蔡 锺

委 员 (按姓名笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

《航空科学技术丛书》 编审委员会

主任 刘高倬

副主任 (按姓名笔画排序)

马恒儒 王欣 丛日刚 刘国华 杨国庆 杨育中
姜澄宇 胡海岩 魏钢

编委会顾问 (按姓名笔画排序)

王中 刘大响 李明 宋文骢 张福泽 陈一坚
陈懋章 贲德 钟群鹏 徐建中 曹春晓 管德

编委会委员 (按姓名笔画排序)

王立新 甘晓华 伍贻兆 刘行伟 孙先仿 孙健国
朱自强 严传俊 吴学仁 张靖周 张聚恩 李玉龙
李志强 杨伟 沈士团 沙长安 苏恩泽 周德云
孟光 武哲 胡子建 荣毅超 费斌军 夏品奇
徐肖豪 桂幸民 高正 高正红 高德远 梁德旺
崔德刚 康锐 梅文华 程洪彬

编委会编辑部

吴松 王晓舟 郝刚 唐应恒

编委会办公室

汪淳 赵霜红 欧阳黎明

总 序

航空器的诞生和发展,不仅极大地改变了人类的生活方式,促进了社会经济繁荣,而且成为决定现代战争胜负的重要因素和国家综合实力的集中体现。建国以来,我国航空工业经历了维修、仿制、自主研发、实验、生产、装备使用等过程,取得了丰硕成果。尤其是近 20 年来,航空技术研究有不少突破性科技成果,涌现出一大批有突出贡献和学术成就斐然的技术专家、学科带头人,他们的科技成就和丰富经验,是我国航空事业的宝贵财富。以图书为载体,记录这些成就,传播这些经验,可以扩大航空领域科学技术的交流,促进航空科技事业的继承与发展,加快航空科技人才的培养和提高。

21 世纪是科技迅猛发展的时代,国民经济的发展必须依靠高科技,武器装备和军事技术的发展更要依靠高科技。航空科技图书出版工作是航空科技和军队航空武器建设事业的一个组成部分,优秀的航空科技图书既是航空科技工作的一种成果,也是科技水平的重要标志,是国家的重要财富。出版《航空科学技术丛书》,不仅是从总体上对我国航空科技发展的总结,而且是为今后航空科技加强自主创新、实现持续快速发展奠定了良好的技术基础。

这套丛书将按照飞机、发动机、材料工艺、综合航电、机载设备和武器等领域来分类和组成,在每一类中可进一步细分为设计、气动、强度、原理、燃烧、控制、实验与测试技术、工艺、材料、信息技术等学科。其中部分著作是由航空领域的院士、著名专家等牵头组织编撰或修订的学术专著;部分著作是目前处于科研生产一线的学科带头人结合科研课题和科研成果的有较高学术价值的专著;另有一些是偏重工程应用的、有推广价值的技术著作。具体分列

如下:

(1) 在航空科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论著作;学术思想新颖,内容具体、实用,对航空科技发展有较大推动作用的专著。

(2) 航空工程技术理论方面有突破的应用科学专著、应用技术著作。

(3) 密切结合军用、民用航空装备现代化需要的高新技术内容的专著。

(4) 有重大发展前景和重大开拓使用价值,密切结合军用、民用航空装备现代化需要的新思想、新概念、新工艺、新材料内容的专著。

(5) 填补目前我国航空科技领域空白并具有应用价值的前沿学科和边缘学科的科技图书。

这套丛书从组织策划到付诸实施,得到了业界的热烈响应,得到了各领导机关的重视与支持,得到中国人民解放军总装备部、空军装备部和国防科工委、中国一航、中航二集团、北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学、中国民航学院以及一些航空科研院所、国防工业出版社等单位有关领导和专家的大力支持与协助,得到国防工业出版社的鼎力资助。在此,特向上述单位的领导和专家们致以热忱的谢意。

相信这套丛书的出版将对我国航空事业的发展起到承前启后、继往开来的重要作用,将是一件具有里程碑意义的工作。期望这套丛书能够有益于高技术领域人才的培养,有益于国防科研事业的发展,有益于航空科学技术的进步。

中国航空学会

《航空科学技术丛书》编审委员会

2005年12月

《航空科学技术丛书》 已出版书目

- 001 航空燃气轮机燃油喷嘴技术
甘晓华 著 2006年
- 002 飞行器结构优化设计
李为吉 宋笔锋 孙侠生 张勇 编著 2006年
- 003 航空用引射混合器
李立国 张靖周 著 2006年

前 言

引射混合器是流体力学的一种工程应用组合件,它是利用高能量主流体泵抽低能量次流体的流体力学泵,起着利用流体之间的黏性剪切力传递能量、动量与使质量相互掺混的作用。它没有运动部件,结构简单,质量轻和工作可靠。在能源、冶金、化工与燃气工程中,有着广泛、成熟的应用。同样,在航空领域中,引射混合器也得到了充分的应用。例如,用于发动机隔舱的通风冷却;降低飞机的排气噪声;抑制发动机排气系统红外辐射;排气增推和垂直与短距起落飞机的增力;清除直升机发动机进气中的砂尘;飞机的机翼防冰与环境控制以及用于提高燃烧效率减少排气污染的波瓣形燃烧喷射器等。尽管它们的着眼点不同,有的利用它来泵抽次流,有的利用它来提高次流的压力,有的利用它来引射混合,但是实验结果表明:提高泵抽次流的能力,与要求主、次流充分混合两者往往是一致的。如果以混合为应用目的,引射器也可以称为混合器。所以,可把各种应用包括在一起,泛称为引射混合器。

近些年来,随着高新技术的不断发展,使许多研究人员对主管呈波瓣形状的引射混合器给予了极大的关注,对这种形式的引射混合器做了大量的模型实验、流场测试与数值计算研究,扩大了引射混合器在航空领域的应用。首先,广泛地应用于涡扇发动机内、外涵的排气混合器之中,采用波瓣喷管混合器来降低飞机起飞时的噪声与比燃油消耗率。其次,在军用飞机上,为了降低排气系统的红外辐射信号,提高作战环境的生存率,波瓣喷管引射混合器用来强化高温燃气与环境冷空气的混合,达到红外隐身的目标,有多种飞机采用这种技术。此外,近年来还十分引人注意地把波瓣喷射器用于燃烧室之中,强化燃料与空气的混合,用以改善燃烧效

率,减少排气污染等。因此,本书从应用实验研究与流场数值计算两方面,对用于航空的波瓣喷管引射混合器进行了重点的论述与讨论。

过去,用于航空领域的引射混合器都分散在不同部门之中,缺乏必要的沟通与联系。本书试图结合作者的科研工作,广泛收集这方面的资料,把它们组合在一起,进行初步的尝试,期望有利于在航空领域进行引射混合器应用的交流与合作。

从这些年的研究工作来看,作者既经历了利用压气机引气作气源的高压比的清砂引射器研究,又经历了利用排气作气源的低压比的红外抑制器研究;既进行过常规圆喷管引射器的研究,也进行过波瓣喷管引射器、多喷管引射器和异型喷管引射器的研究。以上在引射混合器领域所从事的科研工作,得到了国防科工委、航空基金及有关航空研究院所与工厂的大力支持,为型号研制做出了贡献,具有总结和发展的必要。从学科发展来看,结合航空应用的引射混合器书籍,基本上是一片空白。因此,很有必要从航空领域的实际应用出发,在实验研究和数值分析两方面阐述这一课题,为读者提供必要的资料,为这一领域的继续发展打好基础。

本书的内容除了概述与引射器性能的分析之外,主要阐述引射混合器在航空各部门的应用,着重介绍波瓣喷管引射混合器的模型实验、流场测试与数值计算方法及计算结果。本书共分8章。第1章,介绍了引射混合器的工作过程,及其在各工业部门和航空领域的应用简况与强化引射混合的方法。第2章,对不可压缩流体阐述了引射混合器的控制体理论分析,以及主、次流温度比、截面比与混合的不均匀性等各项因素对性能的影响,还介绍了用于引射混合器的可压缩流体的气体动力学函数分析方法,并着重叙述了波瓣喷管引射混合器增强混合的作用机制,以及波瓣喷管出口流向涡与正交涡的近期研究结果,对波瓣喷管及混合管的几何参数影响也作了分析。第3章,从红外抑制技术指标对引射冷气量的要求出发,讨论了波瓣形主喷管与混合管几何参数的确定方法,红外抑制器对发动机的性能影响,并介绍了作为红外抑制器使

用的各种引射混合器的形式,还重点叙述了波瓣喷管引射混合器的各项缩比模型实验结果。第4章,从飞机的排气噪声特性出发,讨论了各种抑制排气噪声的引射混合器喷管,以及其他的降噪方法。并在讨论引射喷管推力增益的基础上,介绍了降噪又增推的交变式波瓣喷管引射混合器,对用于垂直与短距起落飞机的引射增力器和波瓣形燃油喷射器也作了简要介绍。第5章,对各种形式的发动机隔舱冷却引射混合器进行了分析讨论,对直升机发动机进气防护系统中的清砂引射器与机翼防冰和环境控制用的引射混合器作了简要的介绍,对进气防护用的多喷管超声速引射器也作了分析与比较实验。第6章,对变截面混合管轴对称单喷管的引射器介绍了一种基于积分方法解连续方程、动量方程和能量方程,推算性能特征的分析方法,介绍了混合管内两股气流混合的流动特征,以及过渡区、射流附壁上游区和射流附壁下游区的数学模型,并给出了算例验证。第7章,对二维引射混合器的流场,在引射能力的数值预测方法上提出了一种半精确的分析方法,用一维引射特性方程估算理想的引射流量比,结合 Navier - Stokes 方程对混合管内的气流混合流动进行计算,用计算得到的混合管速度分布和壁面黏性剪切力来修正一维引射特性方程中的经验系数,逐次逼近真实的引射流量比。第8章,运用任意曲线坐标系下的完全 Navier - Stokes 方程,对波瓣喷管引射混合器进行了数值研究,包括数学模型、计算方法的全面介绍。并对我们在这一领域取得的成果进行了系统的总结。对于波瓣喷管强迫混合器,讨论了波瓣喷管出口截面的速度环量、混合管沿程的压力与速度分布、总压恢复系数和动量混合系数。对于波瓣喷管引射混合器,研究了波瓣参数与混合管参数对引射混合性能的影响,以及混合管沿程的流向涡与正交涡分布,并获得实验验证。还对具有弯曲混合管的波瓣喷管引射混合器进行了弯曲角对混合性能影响的计算与实验验证。本书的第1章~第5章由李立国撰写;第6章~第8章由张靖周撰写。最后由李立国统一整理成册。

本书的初稿曾经过中国工程院院士刘大响和东南大学周强泰

教授的审阅,并提出了宝贵的意见。作者在此仅向他们表示衷心感谢。此外,在本书的编写过程中,还曾得到南京航空航天大学能源与动力学院的许多博士与硕士研究生的帮助,在此一并表示谢意。

作者

2006年1月20日

目 录

第 1 章 引射混合器概述	1
1.1 引射混合器的工作过程	1
1.2 工业用引射混合器	3
1.2.1 冷凝器用蒸汽引射器	4
1.2.2 制冷用蒸汽引射器	6
1.2.3 气力输送用引射器	6
1.3 航空用引射混合器的作用	7
1.3.1 隔舱通风冷却与降低排气噪声	8
1.3.2 降低排气温度抑制排气系统的红外辐射	8
1.3.3 清除直升机发动机进气中的砂尘	9
1.3.4 排气引射增推和垂直与短距起落飞机的应用	10
1.3.5 飞机的机翼防冰与环境控制	11
1.4 强化引射混合的主要方法	11
1.4.1 优选混合管与主喷管的几何参数	11
1.4.2 低压比引射器采用波瓣形主喷管	12
1.4.3 高压比引射器采用多喷管组合的主喷管	13
参考文献	14
第 2 章 引射混合器的性能分析	15
2.1 引射混合器的控制体分析	15
2.1.1 引射混合器的特性方程	15
2.1.2 次流进气系统的总压损失与引射器的工作点	18
2.2 引射混合器的影响因素	19
2.2.1 主、次流温度比的影响	20
2.2.2 混合管截面积与主喷管出口截面积之比的影响	20

2.2.3	混合管内主、次流混合不均性的影响	21
2.2.4	混合管壁面摩擦系数的影响	22
2.3	引射混合器的气体动力学函数分析	23
2.3.1	用气体动力学函数表示的引射器基本方程	23
2.3.2	临界扼流与堵塞状态	25
2.4	引射混合器泵抽性能的统一表示方法	26
2.4.1	自由混合层、混合间隙和最佳混合管长度	27
2.4.2	引射混合器泵抽性能的统一表示方法	30
2.5	波瓣喷管在引射混合器中增强混合的作用机制	33
2.6	波瓣喷管出口混合流场中的几种涡	38
2.6.1	流向涡	38
2.6.2	正交涡	40
2.6.3	马蹄涡	41
2.6.4	几种涡的近期测量结果	42
2.7	波瓣参数对引射混合器性能的影响	48
2.7.1	波瓣形面	48
2.7.2	波瓣的几何参数	49
2.7.3	波瓣的排列方式	51
2.8	混合管几何参数对波瓣引射混合器的性能影响	52
	参考文献	54
第3章	红外抑制用的引射混合器	56
3.1	红外抑制对发动机排气系统的降温要求	56
3.1.1	排气系统的红外辐射及其降温方法	56
3.1.2	武装直升机红外辐射抑制器的性能要求	58
3.2	武装直升机红外抑制器设计的相关分析	59
3.2.1	红外抑制技术指标对引射冷气量的要求	59
3.2.2	抑制器主喷管参数对发动机功率损失的影响	61
3.2.3	抑制器主喷管的出口参数及出口截面确定	62
3.2.4	抑制器的引射特性方程与混合管的参数确定	63
3.3	作为红外抑制器使用的各种引射混合器	63

3.4	波瓣喷管引射混合器的缩比模型实验	68
3.4.1	模型实验系统	68
3.4.2	圆柱混合管截面比对引射流量比的影响	69
3.4.3	主、次流温度比对引射流量比的影响	70
3.4.4	次流进口截面对引射流量比的影响	72
3.4.5	次流的阻力特性方程与损失系数	75
3.4.6	圆锥混合管扩张角对引射流量比的影响	76
3.4.7	主喷管有无中心锥的比较实验	79
3.5	混合管弯曲对引射流量比的影响	82
3.5.1	圆柱形弯曲混合管的模型实验	82
3.5.2	矩形弯曲混合管的模型实验	85
	参考文献	87
第4章	降噪与增推用的引射混合器	89
4.1	飞机的喷气噪声	89
4.1.1	噪声的基本特性与航空噪声测试	89
4.1.2	飞机的喷气噪声	91
4.2	抑制喷气噪声的引射器喷管	95
4.2.1	引射器喷管的噪声抑制作用	95
4.2.2	多孔喷管引射器的泵抽能力与降噪能力实验	98
4.3	降低喷气噪声的其他方法	100
4.3.1	旁通气流偏心与导流片使次流偏斜的降噪方法	101
4.3.2	锯齿形出口与小突片降噪法	102
4.4	引射器喷管的推力增益	105
4.4.1	理想引射器的泵轴率	105
4.4.2	引射器喷管的推力	106
4.4.3	单喷管的推力	106
4.4.4	引射器喷管的推力增益	108
4.5	降噪增推的交变波瓣引射混合器	110
4.5.1	交变波瓣引射混合器	110
4.5.2	交变波瓣噪声抑制器的推力增益	112