



中国航空学会
《航空科学技术丛书》

直升机发动机的 进气防护



Inlet Protection of Engine
for Helicopter

李立国 王锁芳 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》

直升机发动机的进气防护

Inlet Protection of Engine for Helicopter

李立国 王锁芳 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

直升机发动机的进气防护/李立国,王锁芳著. —北京:
国防工业出版社,2009.6

(航空科学技术丛书)

ISBN 978-7-118-06117-8

I. 直... II. ①李...②王... III. 直升机-航空发动机-
进气系统-防护设备 IV. V228.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 204214 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 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7¼ 字数 230 千字

2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 26.00 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	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	彭华良	蔡镭		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	刘世参
(按姓氏笔画排序)	李德毅	杨星豪	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			
本书主审委员	张鸿元			

《航空科学技术丛书》

编审委员会

主 任 刘高倬

副主任 (以姓氏笔画排序)

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 (以姓氏笔画排序)

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 (以姓氏笔画排序)

王立新 甘晓华 朱自强 伍贻兆 刘行伟 孙先仿
孙建国 严传俊 苏恩泽 李玉龙 李志强 杨 伟
吴学仁 沙长安 沈士团 张聚恩 张靖周 武 哲
周德云 孟 光 荣毅超 胡子建 费斌军 桂幸民
夏品奇 徐肖豪 高 正 高正红 高德远 梅文华
崔德刚 康 锐 梁德旺 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

曲 岩 赵霜红 邢剑飞

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、试验、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 |
| 004 | 燃气轮机燃烧室 | 林宇震 许全宏 刘高恩 著 | 2008 年 |
| 005 | 直升机复合材料结构设计 | 杨乃宾 倪先平 编著 | 2008 年 |
| 006 | 机载数据总线技术及其应用 | 支超有 编著 | 2009 年 |
| 007 | 直升机发动机的进气防护 | 李立国 王锁芳 著 | 2009 年 |

前 言

在战争环境中,武装直升机需要在砂雾迷漫的环境里起飞、降落与悬停飞行。如果事先不采取防护措施,尘砂将会给直升机和发动机带来严重的后果:危及到飞行的安全和缩短使用的寿命。

尘砂环境对直升机的外露部分都有影响,对发动机的危害最为严重。其次是旋翼操纵系统的各关节轴承、旋翼桨叶、风挡玻璃、机身结构和液压系统与电器系统。

尘砂危害首当其冲的是压气机。尘砂在离心力的作用下,造成压气机导叶根部和工作叶片尖端的严重磨蚀,从而改变了叶片的型面,增加了叶尖间隙,使压气机的效率降低,压比下降,发动机达不到预定的功率。细的尘砂黏附在压气机转盘或转动叶片上,可能会产生一个不平衡量,周期作用的结果造成转子振动的故障。如果用来封严轴承和冷却涡轮叶片的压气机引气中也含有高浓度的尘砂,则会使尘砂钻入滑油系统,造成轴承的严重损坏;用来冷却涡轮时,尘砂将会堵塞冷却通道,造成涡轮叶片及其他高温部件的过热而烧坏。

对直升机发动机进气防护系统的研究,起源于20世纪70年代的越南战争。因为当时越南砂土地带产生的尘砂,对美国的大量直升机造成了停飞的故障,迫使美军进行了大量的课题研究,发表了许多研究论著。直到90年代的海湾战争和近年的伊拉克战争,美军大量使用了许多具有先进发动机进气防护系统的武装直升机(如AH-64阿帕奇),把这方面的研究成果用于实战。

在我国,尘砂对直升机发动机造成的危害也是十分明显的。例如,新疆是我国主要的沙漠地区之一,据调查,即使在发动机进气口装有粒子分离器的美国“黑鹰”直升机,在那里使用的一年多

时间里,先后就有4台发动机,因为很细的尘砂碱性烧结在涡轮叶片上,堵塞了冷却孔,而造成涡轮超温烧坏的重大故障。此外,在我国华北保定地区,也有类似事故的发生,据调查,由于使用的Z-9直升机,在发动机进口没有装置进气粒子分离器,竟然在3个月内所发生的6次发动机故障中,有4次就是因为尘砂作用所引起的。其主要原因,就是细的尘砂不均匀地沉积在高速旋转的鼓筒轴内,破坏了转子的动平衡,引起振动,导致后轴承超负荷运转,造成了空中停车事故。由此可见,进气防护对直升机发动机的正常工作具有多么重要的作用。

我国有关直升机发动机进气防护问题的研究早在20世纪70年代就开始了。我们参加了其中主要的研制与试验工作。

七八十年代,为将Z-5(即苏制Ми-4)直升机的活塞式发动机,改用加拿大的PT6T-6涡轮轴发动机,我们提出了自行研制与之相配套的单管式进气粒子分离器任务。为此,与厂方合作,收集了大量的进气防护技术资料,设计各种试验设备,完成了不同模型的试验。确定了装置这种粒子分离器之后,发动机所付出的性能代价——在起飞、悬停和水平增速飞行时,进气粒子分离器的总压损失和所取得的净化进气效果——进气粒子分离器对各种尺寸尘砂粒子的分离效率。

90年代,我们紧跟国外在这方面的研究进展,与研究所合作,进行了多管式进气粒子分离器的涡旋管元件及60涡旋管组合件的设计与性能实验,获得了在各种使用条件下的总压损失与对各种尺寸尘砂粒子的分离效率数据,并在上述性能实验的基础上,又与厂方合作,为Z-9直升机设计模拟试验设备,进行了自行研制的多管式进气粒子分离器装机组件的性能试验及扫气排尘砂系统的多喷管引射器比较试验与数值计算,获得了与英国装机件相当接近的数据,并取得了满意的Z-9直升机装机的试飞结果。

与此同时,我们还参加了由陆航局主持的“国军标”中有关直升机发动机进气防护相关部分的主要编审工作。

从这些年在上述各方面所进行的研究工作内容来看,作者既

进行了单管式进气粒子分离器的研究,也进行了多管式进气粒子分离器的研究;既进行了各项基础性的元件性能试验与其配套件的相关试验,也进行了装机组件的性能试验;既有试验研究,也有数值计算与分析研究。内容还是比较全面的,具有一定的代表性。

尽管我们对有关直升机发动机进气防护问题的研究任务完成了不少,资料收集也十分丰富,但却缺乏系统的整理与分析。作为这方面研究工作的主要承担者,有完成这项系统总结与归纳工作的义务,推进今后这项工作的继续与发展,为完成武器装备的现代化服务。

本书的内容除了首先介绍直升机工作的污物环境及论述其进气防护的必要性之外,着重讨论了阻拦式进气过滤器、单通道的惯性粒子分离器、多通道的惯性粒子分离器与整体式惯性粒子分离器等几种进气防护方式,对进气防护装置的研制与发展、尘砂磨蚀模型与发动机的寿命预测等也作了分析,还从两相流的基本方程出发,对不同型面的单通道惯性粒子分离器的流场与粒子轨道进行了数值分析,并对与多通道粒子分离器相配套的多喷管引射器,从数值计算与试验研究两个方面进行了论述。本书分为8章:第一章,在介绍直升机工作的尘砂、盐雾与冰雪等污物环境的基础上,讨论了尘砂对发动机各部件,特别是压气机叶片带来的危害与防止尘砂危害的使用维护措施,从而论述了进气防护的必要性。第二章,对阻拦式进气过滤器,从过滤器压力降、过滤效率与过滤器内的回复传输等性能出发,在分析与试验两方面进行了讨论,并着重对UACL惯性粒子分离器、CH-46直升机的波音粒子分离器与莱康明(Lycoming)粒子分离器等几种单通道的惯性粒子分离器进行了论述。第三章,分析了多通道粒子分离器的原理与应用,并从多管粒子分离器涡旋管元件的性能测试、60个涡旋管组合件的性能测试与多管粒子分离器装机件的性能测试三个方面进行了论述。第四章,在动力离心式粒子分离器讨论的基础上,对整体式惯性粒子分离器的优越性与多种功能进行了讨论,对进气防护装置

的研制与发展,从分类、系统的要求与研制方法等方面作了分析。第五章,提出了尘砂磨蚀模型——有效粒子尺寸与磨蚀减少因子,并用这个磨蚀模型,把一系列的磨蚀试验结果与发动机的寿命预测相联系了起来。第六章,从两相流的特性出发,提出了气固稀相流动的基本方程模型,为两相流的数值分析打下了基础。第七章,分析了不同型面的单通道惯性粒子分离器的计算模型、网格划分与边界条件,计算出了粒子轨道与总压损失,并讨论了劈尖位置改变对粒子分离器性能的影响。第八章,对与多通道粒子分离器相配套的多喷管引射系统进行了理论分析、数值计算与试验研究,获得了比较一致的结果。本书的第一至第五章,由李立国编写,第六至第八章,由王锁芳编写,最后由李立国统稿整理成书。

本书的初稿曾经过东南大学周强泰教授的审阅,并提出了宝贵的意见。作者在此谨向他表示衷心的感谢。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。

目 录

第一章 发动机进气防护的必要性	1
1.1 直升机发动机的进气防护概况	1
1.2 进气防护相关的概念	4
1.3 直升机工作的污物环境	7
1.3.1 尘砂环境	7
1.3.2 尘砂环境的取样	11
1.3.3 海上的盐雾环境与防盐措施	14
1.3.4 冰雪的形成环境与防冰系统	15
1.4 尘砂对发动机各部件带来的危害	16
1.5 压气机叶片磨蚀的基本规律	19
1.5.1 粒子的运动方程	20
1.5.2 叶片磨蚀的特点	21
1.5.3 叶片磨蚀的影响因素	24
1.5.4 叶片的磨耗磨蚀	30
1.6 叶片磨蚀对压气机与发动机性能的影响	32
1.7 防止尘砂危害的使用维护措施	36
参考文献	39
第二章 进气过滤器与单通道粒子分离器	41
2.1 发动机进气防护的主要方法	41
2.2 阻拦式进气过滤器的性能	43
2.2.1 过滤器的压力降	44
2.2.2 过滤器的效率	46
2.2.3 过滤器内的回复传输	47
2.3 过滤器的性能试验结果	48

2.4	直升机进气防护用的过滤器简况	54
2.5	几种单通道的惯性粒子分离器	57
2.6	UACL 惯性粒子分离器	58
2.7	CH-46 直升机的波音粒子分离器	66
2.8	莱康明(Lycoming)粒子分离器	74
	参考文献	75
第三章	多通道粒子分离器	77
3.1	多通道粒子分离器的原理与应用	77
3.1.1	顿得逊层管元件(涡旋管)的性能特征	79
3.1.2	顿得逊层管元件的简化理论分析	83
3.2	多管式粒子分离器涡旋管元件的性能测试	86
3.2.1	试验对象与测试系统	86
3.2.2	试验方法	88
3.2.3	测试结果及分析	89
3.3	60个涡旋管组合件的性能测试	91
3.3.1	60个涡旋管组合件的结构方案	91
3.3.2	试验测试系统	92
3.3.3	试验结果分析	93
3.4	多管式粒子分离器装机件的性能测试	96
3.4.1	多管式粒子分离器装机件的性能测试系统	96
3.4.2	试验测试结果分析	98
3.5	OH-6A 直升机上的多管式粒子分离器	100
	参考文献	102
第四章	整体式粒子分离器与进气防护装置的研制	104
4.1	动力离心式粒子分离器	104
4.2	整体式惯性粒子分离器	110
4.3	进气防护装置的研制与发展	118
4.3.1	进气防护装置的分类与使用情况	118
4.3.2	对进气防护装置的要求	120
4.3.3	进气防护装置的研制方法	123

4.3.4 进气防护装置的发展趋势	126
4.3.5 进气防护装置设计的一般原则	128
参考文献	129
第五章 尘砂磨蚀分析与发动机的寿命预测	130
5.1 影响尘砂磨蚀的参数	130
5.2 磨蚀模型——有效粒子尺寸与磨蚀减少因子	135
5.2.1 有效粒子尺寸	135
5.2.2 磨蚀减少因子	137
5.3 发动机的磨蚀试验结果与寿命预测	139
5.3.1 涡旋管过滤器的性能试验 ^[1]	139
5.3.2 单级轴流扫气鼓风机的磨蚀试验	141
5.3.3 Turmo IVB 发动机上的磨蚀试验	144
5.4 尘砂危害影响发动机寿命的实用经历	150
参考文献	154
第六章 发动机进气防护两相流动基本方程	155
6.1 发动机进气防护两相流动概况	155
6.2 发动机进气防护的稀相流动基本方程	156
6.2.1 发动机进气防护的稀相流动基本方程	156
6.2.2 气固两相流动的数值模拟	161
参考文献	164
第七章 粒子分离器流场与颗粒轨迹计算	166
7.1 整体式粒子分离器的数值模拟	166
7.1.1 整体式粒子分离器的计算模型	166
7.1.2 整体式粒子分离器计算模型的网格划分	168
7.1.3 整体式粒子分离器计算模型的边界条件	168
7.2 不同型面粒子分离器性能的比较分析	169
7.2.1 粒子分离器流道型面对其性能的影响	170
7.2.2 两种不同型面粒子分离器的分离效率及 粒子轨迹	171
7.2.3 两种不同型面粒子分离器的扫气比及	