

航空发动机

飞机的心脏

(第二版)

刘大响 陈 光 等编著



航空工业出版社

责任编辑：高凤勤

责任设计：王楠



中航出版传媒有限责任公司

CHINA AVIATION PUBLISHING & MEDIA CO., LTD.

www.aviationnow.com.cn

ISBN 978-7-5165-0796-4



9 787516 507964 >

定价：56.00 元

航空发动机 飞机的心脏

(第二版)

刘大响
陈 光 等编著

航空工业出版社
北 京

内 容 提 要

本书通过翔实的史料、丰富的图片和深入浅出的描述,比较系统地介绍了航空动力100多年的发展历程,各种航空动力的特点、应用情况和发展现状,以及航空动力技术在非航空领域中的应用,并展望了航空动力在21世纪的发展前景,具有较强的知识性、科学性、趣味性和可读性。

希望本书能够普及航空发动机知识,引发社会对航空动力的关注,激发人们对航空动力的热情,弘扬和倡导“动力”意识,尤其是希望引导和教育青少年树立“振兴中华、航空报国”的远大理想,为中华民族的腾飞、为中国航空事业的发展而努力奋斗。

本书可供关心航空、热爱航空的广大读者阅读,可供高等院校非航空动力专业的师生参考,也可供从事与航空及航空动力有关工作的部队、民航、工厂和科研院所,以及能源、运输等相关行业的决策管理和工程技术人员研究参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机飞机的心脏 / 刘大响等编著. --2 版
—北京: 航空工业出版社, 2015.5

ISBN 978-7-5165-0796-4

I. ①航… II. ①刘… III. ①航空发动机—普及读物
IV. ①V23-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 113637 号

航空发动机飞机的心脏 (第二版)
Hangkong Fadongji Feiji de Xinzang (Di-er Ban)

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

中国电影出版社印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2015 年 5 月第 1 版

2015 年 5 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 15.5 字数: 377 千字

印数: 1—5000

定价: 56.00 元

航空发动机

飞机的心脏

宋健

二〇〇三年十月



序

2003年12月17日是人类实现有动力飞行100周年纪念日。飞机的发明和应用是20世纪人类取得的最伟大科技成就之一，极大地推动了人类社会文明的进步，改变了人类几千年来形成的时空观和世界观，对人类社会的日常生活和思维方式产生了巨大影响。

作为飞机的“心脏”——航空发动机，在航空技术的发展过程中起着关键性作用。在航空发展的早期，由于缺乏合适的动力，飞机的发明比以蒸汽机为标志的工业革命晚了近140年，直到19世纪末、20世纪初活塞发动机的发明和应用之后，才终于圆了人类的飞行梦。在20世纪前半叶，装有活塞发动机的螺旋桨飞机主宰了天空，并在两次世界大战中大显身手，改变了人类的战争模式，同时也推动了民用航空事业的发展，功不可没；20世纪40年代后，喷气发动机的出现，使飞机突破声障，实现了超声速飞行，并从此进入喷气飞行时代；高涵道比涡扇发动机和宽体客机的出现，使得航空运输的成本大大降低、并实现了不着陆越洋飞行。飞行不再是少数冒险家追求刺激的方式，而成为普通大众不可或缺的交通工具。21世纪，航空动力技术呈现加速发展态势，将有可能研制出超过声速5~10倍的高超声速飞行器及空天飞机，使人类进入更加经济、安全、快速、便捷的高超声速及大气层—外层空间天地往返航行时代，开辟人类航空史上的新纪元。

很显然，航空发动机不仅是飞机的动力，而且也是航空技术发展的推动力。人类在航空领域中取得的每一次重大的革命性进展，无不与航空动力技术的突破和进步相关；飞机的需求和发展又促使发动机向更高水平迈进，两者相得益彰，促进了整个航空事业的蓬勃发展；已成为一个国家科技水平、军事实力和综合国力的重要标志之一。

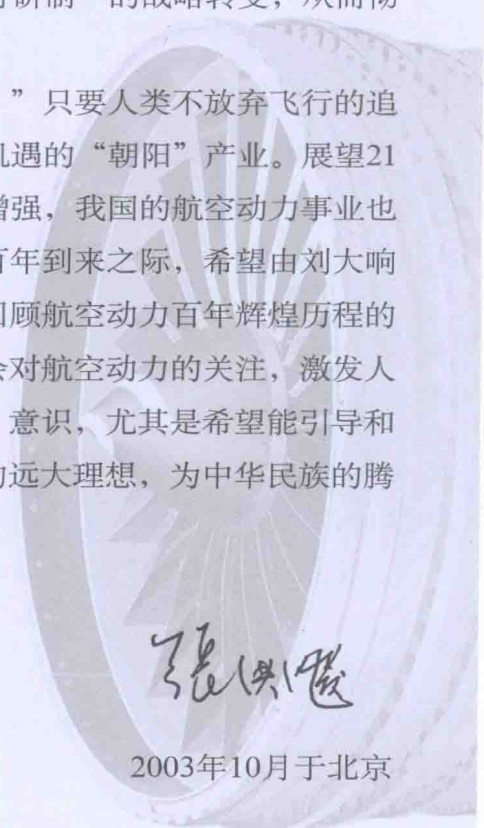
新中国成立50多年来，在党中央、中央军委、国务院和各级政府的关心和领导下，我国航空发动机事业从无到有地发展起来，为国防建设



和国民经济发展做出了自己应有的贡献。但由于技术基础薄弱、经费投入有限、体制和机制不适应，我国在航空动力领域仍处于相对落后的状态，不仅不能充分满足部队装备建设的迫切需要，而且也不能满足全面建设小康社会和国民经济可持续发展的需要，与世界先进水平的差距有逐渐拉大的趋势。航空动力技术已经成为制约整个航空事业发展的重大“瓶颈”技术，飞机的“心脏病”已经到了非彻底根治不可的地步了。

从20世纪90年代开始，发动机的问题已经逐渐引起党和国家领导人的高度重视和关注，两届政府的主要领导都曾先后对发动机问题作过重要批示，并逐步加大投入，落实计划，组织实施，力争用20年左右的时间，完成中国航空动力“从测绘仿制到自行研制”的战略转变，从而彻底根治飞机的“心脏病”。

“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。”只要人类不放弃飞行的追求，航空发动机就永远是一个充满挑战和机遇的“朝阳”产业。展望21世纪，随着国民经济的腾飞和综合国力的增强，我国的航空动力事业也必将迎来更加广阔的发展前景。值此航空百年到来之际，希望由刘大响院士和陈光教授主编的这本书的出版，在回顾航空动力百年辉煌历程的同时，能够普及航空发动机知识，引发社会对航空动力的关注，激发人们对航空动力的热情，弘扬和倡导“动力”意识，尤其是希望能引导和教育青少年树立“振兴中华、航空报国”的远大理想，为中华民族的腾飞、为中国航空事业的发展而努力奋斗。



张兴让

2003年10月于北京



编者的话

1903年12月17日，是人类发展史上一个值得永远纪念的日子，在美国北卡罗来纳州的基蒂霍克沙洲上，由莱特兄弟设计、弟弟奥维尔·莱特驾驶的“飞行者”1号，实现了有动力、载人、持续、稳定和可操纵的重于空气的飞行器首次升空。虽然留空时间只有短短的12秒，飞行距离也只有微不足道的36米，但却标志着人类征服天空的梦想开始变为现实，开创了航空飞行的新纪元。

从1903年到现在，整整一个世纪过去了，航空事业得到了迅猛的发展，极大地推动了人类社会文明进步，其作用已远远超出了科学技术领域的本身，对国家的政治、经济、军事以至人们的日常生活方式和时空观念都产生了巨大而深远的影响。应该说航空事业是人类在20世纪取得的最伟大的科技成就之一，由于飞机的存在，地球“变小”了，如今在不到一天的时间内，人们就可以飞到地球上的任何一个角落。这对生活在20世纪以前的人类来说，简直是一个难以想象的人间奇迹。

飞机靠发动机提供动力飞上蓝天。作为飞机的“心脏”，航空发动机也同样走过了百年的光辉历程。从狭义上讲航空发动机是飞机的一个重要部件，为飞机的飞行提供动力，但从广义上讲它也是促进整个航空技术发展的推动力。无数事实表明，人类在航空领域中所取得的每一次重大的革命性进展，无不与航空动力技术的突破和进步相关，而飞机发展的需求又牵引和促使发动机向更高的水平迈进，两者互为依存，相得益彰，推动了整个航空事业的蓬勃发展，特别是第二次世界大战后的半个多世纪里，航空动力更是取得了令人瞩目的成就。

从海湾战争、科索沃战争和美英联军对伊拉克的战争中可以看出，即使在信息战和电子战技术十分发达的今天，配装先进动力的航空武器装备，在现代化战争中仍然是夺取制空权、决定战争胜负的决定性因素



之一。对于民用航空来说,30多年来,喷气运输机的每人·千米油耗下降了约60%,其中3/4是高涵道比涡扇发动机耗油率下降所做出的贡献。

到20世纪80年代以后,燃气涡轮发动机除了作为飞机的动力之外,也已成为巡航导弹的动力,而且改型后还用来作为舰船和坦克装甲车辆的动力;在燃机发电和其他民用产品方面,航空动力技术也有着广泛的用途,并带动和促进了机械、制造、能源、电子、控制、材料、工艺、计算机等许多相关学科和产业的发展。航空发动机被誉为“工业之花”

“皇冠上的明珠”,是一个国家科技、工业、经济和国防实力的重要标志,所以发达国家历来都将它列为国家的战略性产业,严格控制其核心技术向国外出让或转移。正是由于这一原因,再加上航空发动机技术本身的复杂性和艰巨性,目前世界上能自行设计研制飞机的国家有近30个,而能够独立研制高性能航空发动机的国家却只有美、英、法、俄等少数几个国家。

沐浴党的阳光和雨露,伴随着共和国前进的步伐,在以毛泽东、邓小平、江泽民为核心的三代领导集体的亲切关怀下,我国航空动力行业走过了半个多世纪的光辉历程,从无到有、从小到大、由弱到强,在维护修理、测绘仿制、改进改型、预先研究、新机研制等方面取得了很大成绩。截至2002年,共生产了5万多台各型发动机,装备了上万架各型飞机,为建立强大的空军、海军和陆军航空兵,为民航事业的成长壮大,为保障国家安全和促进国民经济的发展都做出了重大贡献。一代又一代航空人奋战在不同的岗位上,自力更生、艰苦奋斗、无私奉献、航空报国,为祖国和人民立下了不可磨灭的功勋。

在纪念人类实现有动力飞行100周年之际,我们编写了《航空发动机飞机的心脏》这本带有科普性质的书籍,比较系统地介绍了航空动力百年的发展历程,介绍了各种航空动力的特点和现状,介绍了航空动力技术在非航空领域中的应用,也展望了航空动力在21世纪的发展前景。其目的,一是为了纪念,二是向公众宣传航空动力知识,以激起人们对航空动力的关注和爱好。我们寄希望于更多的青少年朋友们能够参与进来,用自己的



智慧和双手研制出更先进的航空发动机来，使我们的飞机飞得更高、更快、更远、更经济、更安全，从而跻身于世界航空强国之林。

参与本书编写的人较多，可以说是一个老、中、青三结合的班子。其中贡献最大者当属我的老师陈光先生，他是北京航空航天大学教授，全国著名的航空发动机专家，从教50多年，桃李满天下，对航空动力事业的发展做出了卓越贡献。在本书编写过程中，他数审其稿，严格把关，许多章节几乎是重新编写，起到了十分关键的作用。其他参加编写的人员主要有：

徐通源 研究员，中国燃气涡轮研究院副总师，主要从事高空台建设和发动机试验研究；在本书编写和统稿中，发挥了重要作用；

金捷 博士，中国燃气涡轮研究院副主任设计师，在本书编写和统稿中，发挥了重要作用；

张健 研究员，中国航空工业第一集团公司科技发展部副部长；

郭昕 研究员，中国燃气涡轮研究院副院长；

王惠儒 研究员，中国燃气涡轮研究院副总师；

徐国 高级工程师，中国燃气涡轮研究院航空发动机高空模拟试车台主任。

在这里，我们首先要衷心感谢原全国政协副主席和原中国工程院院长宋健院士为本书题词。宋健院士是国内外知名学者，享有崇高的声誉。在他担任国务委员和国家科委主任期间，一直十分关心航空工业，尤其是大型飞机及航空发动机的发展，曾多次听取汇报并做出重要指示，对我国航空工业和动力技术的发展给予了极大的关注和支持。衷心感谢国防科学技术工业委员会张洪飏副主任为本书作序。张洪飏副主任是目前我国航空动力技术研究的主要领导者和组织者之一，他既懂专业，又擅长管理，在为实现中国航空动力“从测绘仿制到自行研制”的战略转变中倾注了全部心血，对我国航空动力可持续发展起到了重要的促进和推动作用。同时，还要感谢国防科学技术工业委员会科技质量司吴伟仁司长等领导同志对本书的出版所给予的极大关心和支持。



“雄关漫道真如铁，而今迈步从头越。”21世纪已经来到，知识经济悄然兴起，科学技术突飞猛进，这是一场无声的“革命”，它预示着人类社会经济生活将发生巨大变化。在新的百年中，航空动力技术可能会出现预想不到的重大突破，它必将促进航空事业更加迅猛的发展，为人类文明进步做出更大贡献；而一旦实现了航空与航天动力的有机结合，飞机将以5~10倍声速跨越大气层飞行，那时从北京到美国纽约可能只需要2~3小时，人们期待已久的高超声速飞行和太空自由往返飞行也就为期不远了。

最后，我还必须再强调一句，为了体现航空动力技术日新月异发展的态势，在本书编写过程中，我们尽量多搜集了一些最新的资料和图片。但由于篇幅所限，许多我们参考并引用的资料图片不能在书中一一列出，在此谨向这些资料的作者及单位表示深切的谢意，尤其要感谢英国罗罗公司王光秋先生对本书编写中所用图片给予的大力支持。

此外，为了能将航空动力各种十分复杂的技术问题写得准确扼要，深入浅出，通俗易懂，图文并茂，以达到既“实用”又“有趣”的目的，我们曾反复推敲，数易其稿。但由于客观条件和编者水平有限，难以实现初衷，书中的不足和错谬之处在所难免，恳请读者批评指正。



刘大响

2003年10月于北京



第二版前言

《航空发动机飞机的心脏》一书，自2003年编写出版以来，得到了行业内外专家学者、研究院所和企业的干部职工，特别是各高等院校相关专业的莘莘学子、一些高级中学青少年同学们以及广大空军指战员的热情关爱和大力支持，他们阅读后反映良好，市场上本书已销售一空，不少单位领导鼓励我们尽快出第二版。在此期间，有些读者指出了书中的个别错误和不足之处，有些读者希望对近几年来航空动力的新进展作些补充，对21世纪航空发动机的发展方向增加一些新内容，这些都使我们深受感动和鼓舞。在此，我代表作者们对广大读者表示诚挚的谢意。

近10年来，世界航空动力技术有了许多新的发展和亮点，我国也取得不少可喜的进步和成绩。尤其是自2011年以来，党中央和国务院领导对加快航空动力的发展高度重视和亲切关怀，作了一系列重要指示，提出了要求，指明了方向，航空发动机行业迎来了前所未有的历史性发展机遇。我们一定要牢牢抓住这个难得的机遇，走创新驱动发展之路，实行举国体制，坚决打好航空发动机“翻身仗”。既要进一步加强基础和应用基础研究，提高自主创新能力，又要想国家之所想，急部队之所急，拿到急需的军民用动力装备，还要为未来又好又快的可持续发展奠定技术基础，尽早实现“从跟踪研仿向自主研制”的战略转变，扭转航空动力落后的被动局面，让我国各型军民用主力飞机都装上健康强劲的“中国心”，实现中国人民又一强国之梦。有鉴于此，我们同航空工业出版社紧密合作，以更好的质量将本书第二版尽快推出，以飨读者。

根据世界航空动力技术的最新进展，我们对第十一章21世纪的航空发动机进行了较大的补充和完善，对书中的其他章节原则上没有作大的变化，只是根据读者的反映，对原书中的一些文字、标点和表述方式，进行了必要修改和完善。

这次第二版修订工作，由陈光先生主持，金捷教授统稿，胡晓煜研究员做了大量资料、素材的搜集和编写工作，此外，李应红院士、李维研究员、邹正平教授、唐海龙研究员、陈敏副教授等也参与了部分内容的编写工作，在此一



并表示感谢。

由于本人水平有限，尽管做了很多努力，但书中的错误和不足之处仍在所难免，恳请读者批评指正。

陈光先生与我都年事已高。当前发动机形势大好，令人鼓舞，催人奋进。但任务艰巨，使命光荣，可以说任重而道远。“老牛自知使命重，不用扬鞭自奋蹄”，我们两人都愿意在有生之年，继续与大家在一起共同努力，为根治飞机“心脏病”贡献微薄之力，有一分热，发一分光，直到自己的生命之光熄灭为止。

我们从事了一辈子发动机的教书育人和科研工作，对中国航空发动机事业充满了情感和眷恋，也抱有坚定的信心和期待。我们相信，当前正努力奋战在发动机第一线的广大科技人员、工人和干部，一定会使发动机早日“破茧化蝶”，为实现中华民族伟大复兴的“中国梦”做出更大的贡献。

我们也寄希望于年轻的下一代，本着“仰望星空、放飞梦想、脚踏实地、开拓直前”的精神，不断有所发明、有所创新、有所前进，使“中国心”更加出彩，不断推动人类社会文明更大的进步。

刘大响

2015年3月29日



作者简介

刘大响 著名航空动力专家。1937年10月生。湖南省祁东县人。1960年毕业于北京航空学院。1986—1999年任中国燃气涡轮研究院总工程师、总设计师和第一总设计师。1995年当选为中国工程院院士。



现任中国航空工业集团公司科技委副主任，北京航空航天大学教授、博士生导师；兼任总装备部科技委委员；国防科工委专家咨询委员会委员、APTD计划专家委员会主任和总师组组长；国家863航天航空领域专家委员会顾问；中国空军顾问；中国燃气涡轮研究院高级顾问和“高空模拟试验重点实验室”学术委员会主任；南京航空航天大学能源与动力学院名誉院长、西北工业大学高级顾问和中国工程热物理学会常务理事。

40多年来，长期从事航空发动机设计和研究工作，曾任三项大型国防科技预研项目和一项国家重点工程(高空台)的总工程师、第一总设计师或主要技术负责人之一，主持完成多项重大课题研究和国际合作。荣获国家科学技术进步奖特等奖1项、二等奖2项和部级科学技术进步奖10余项以及香港“何梁何利”科学技术进步奖。主编《航空发动机设计手册》第七册(进、排气装置)等专著四部，撰写科研报告和论文100余篇。1995年荣获全国先进工作者称号。1996年荣获中国航空工业总公司劳动模范和劳模标兵称号。1997年当选党的十五大代表。2001年荣获中国航空工业第一集团公司航空报国金奖。2002年获俄罗斯科学院荣誉博士学位。2003年当选第十届全国人大代表、十届全国人大常委会委员和外事委员会委员。



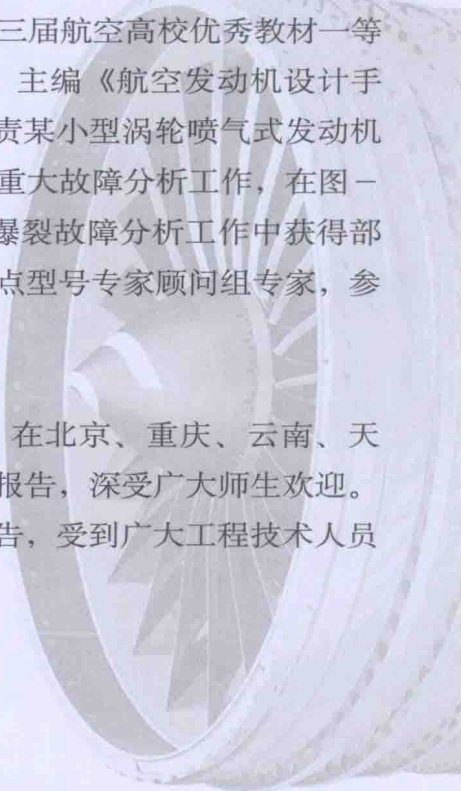
作者简介

陈光 著名航空动力专家。1930年生。1955年毕业于北京航空学院。北京航空航天大学教授，长期从事航空发动机结构设计的教学、科研、生产工作，享受国务院政府特殊津贴。



曾任中国航空工业集团公司科技委委员，中国航空学会理事，北京航空学会常务理事、秘书长，中国航空学会科普工作委员会委员。在国内航空专业刊物上发表过多篇有关航空发动机结构设计方面的文章。主编的《航空燃气涡轮发动机结构设计》教科书获航空航天工业部第三届航空高校优秀教材一等奖，全国高校第二届优秀教材评比优秀奖。主编《航空发动机设计手册》第三册(可靠性、维修性)。曾参与并负责某小型涡轮喷气式发动机的研制工作；多次参加军内、外航空发动机重大故障分析工作，在图-154客机发生的发动机四级低压涡轮非包容爆裂故障分析工作中获得部级科技成果奖。作为原航空工业部发动机重点型号专家顾问组专家，参与了两项重点型号发动机研制的顾问工作。

多次参加中国科学院老科学家讲演团，在北京、重庆、云南、天津、唐山等地为大、中学生作过几十场科普报告，深受广大师生欢迎。在航空发动机工厂、研究所作过多次专题报告，受到广大工程技术人员的欢迎。



目录

第一章~~~~~飞机使人类升空的梦想变为现实（1）

第二章~~~~~形形色色的飞机（19）

第三章~~~~~航空发动机的发展与分类（49）

第四章~~~~~涡轮喷气发动机（63）

第五章~~~~~涡轮风扇发动机（89）

第六章~~~~~涡轮螺旋桨发动机（109）

第七章~~~~~涡轮轴发动机（121）

第八章~~~~~燃气发生器及核心机（135）

第九章~~~~~航空发动机的试验（147）

第十章~~~~~航空发动机在非航空领域及武器中的应用（167）

第十一章~~~~21世纪的航空发动机（181）

第一章

飞机使人类升空的梦想变为现实

人类的飞天之梦

碧空万里，浩瀚无垠，神秘莫测，令人神往。飞向天空，是人类亘古以来的幻想，是古往今来最经久不衰的话题。看到小鸟在天空中



自由飞翔，人们都渴望像鸟儿一样飞行。在世界各民族绚丽多彩的神话中，都能找出许多人与鸟比翼齐飞的传说。我国的嫦娥奔月(图1-1)、牛郎织女、七仙女下凡、列子御风飞行、萧史和弄玉乘鸾骑凤上天、孙悟空腾云驾雾一个筋斗十万八千里等神话故事，充分

反映出人们对飞行的遐想和渴望。在古代关于舜帝的传说中，说到舜帝在受其继母迫害、将被烧死在谷仓顶上时，手持斗笠(另一种说法是天女赠送的披风)从空中跳下，逃离了熊熊大火(图1-2)，这被认为是人类使用降落伞的雏形。在《封神演义》里有个叫雷震子的人，是姜太公手下的一员大将，他肋下生翅，能在空中自由飞来飞去。这个故事反映出人们幻想升空飞行的强烈愿望。

在西方的神话中，许多众神都长有翅膀，或拥有飞鹰作为坐骑，长着一对小小肉翅的可爱的小天使，至今还被人们当作吉祥物；在古希腊，人们广泛传诵着伊卡洛斯与他父亲一起用羽毛和蜡做了一对翅膀，竟成功地从克里特岛上的监狱里逃出来的故事，勇敢的伊卡洛斯不听父亲忠告，执意高飞，想接近太阳，结果因他的翅膀被熔化，掉进了大海(图1-3)；在阿拉伯的著名童话故事《一千零一夜》中，有名的“飞毯”就是对直升机飞行器的一种向往，“神灯”中的可飞行数百里的巨人，实际上是人们对能在空中自由翱翔的飞机的渴望。

人类为了实现腾空飞行的梦想，从探索鸟类飞行的奥秘到

图1-1 嫦娥应悔偷灵药，碧海青天夜夜心

图1-2 舜帝的斗笠被认为是现代降落伞的雏形

