

“十二五”国家重点图书出版规划项目

中航工业科技与信息化部组织编写



航空发动机出版工程



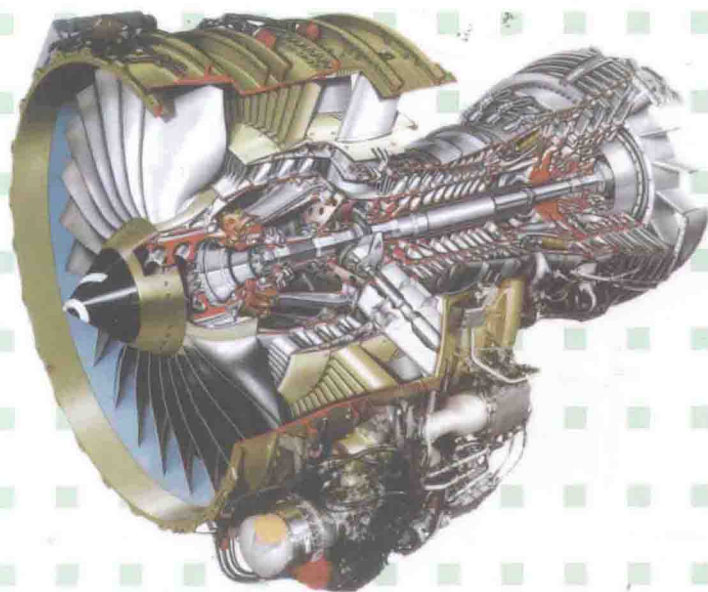
Springer

民用涡扇发动机系统

Systems of Commercial Turbofan Engines

[德] 安德瑞·林克-迪辛格 (Andreas Linke-Diesinger) 著

中航工业商发 译



航空工业出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
航空发动机出版工程

民用涡扇发动机系统

Systems of Commercial Turbofan Engines

[德] 安德瑞·林克-迪辛格 (Andreas Linke-Diesinger) 著
中航工业商发 译

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书详细介绍了现代民用航空发动机的空气系统、润滑系统、燃油系统、起动与点火系统、控制系统、反推系统、防冰系统、动力装置、飞机与发动机接口等方面的内容,介绍了不同飞机发动机制造商采用的相关发动机系统实例,对于完整地、准确地理解涡轮风扇发动机的工作原理,以及发动机各个附件系统的功能和机理很有帮助。本书结构简单,表达通俗易懂,结合大量实物图片对发动机相关系统进行了详细讲解。

本书不仅对于从事飞机发动机总体设计、机械系统、控制系统、短舱系统等专业的工程师具有一定的指导和借鉴作用,也可以作为燃气涡轮发动机专业入门人士、航空公司机械师、飞行员,以及高等航空工程院校本科生和研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

民用涡扇发动机系统 / (德) 迪辛格
(Diesinger, A. L.) 著; 中航工业商发译. -- 北京: 航空工业出版社, 2015. 4

(航空发动机出版工程)

书名原文: Systems of commercial turbofan engines

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0733 - 9

I. ①民… II. ①迪… ②中… III. ①民用飞机—透平风扇发动机 IV. ①V235. 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 080940 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2013 - 1387

Translation from English language edition:

Systems of Commercial Turbofan Engines

by Andreas Linke-Diesinger

Copyright © 2008 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

民用涡扇发动机系统
Minyong Woshan Fadongji Xitong

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

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2015 年 4 月第 1 版

2015 年 4 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 11.25

字数: 269 千字

印数: 1—3000

定价: 46.00 元

《航空发动机出版工程》编委会

主 任：林左鸣

常务副主任：谭瑞松

副主任：张新国 李方勇

委 员：陈元先 杨圣军 魏金钟 丁 俊 庞 为
王英杰 王之林 张 健

《航空发动机出版工程》专家委员会

主 任：刘大响

副主任：郭恩明

委 员：陈 浚 唐智明 周晓青 彭友梅 张皖南
张恩和 严成忠 杨士杰 李概奇 怀寿章
殷云浩 吴学仁 江和甫 江义军 马光辉
胡晓煜

编委会办公室

主 任：魏金钟

副主任：陈 刚 焦 鹤 刘 鑫

成 员：王晓文 向 明 潘陆原 王 伟 胡晓煜
彭友梅 姜向禹 石 英 龙明灵 刘 宁
王少雄

总 序

自1903年12月17日人类首次实现有动力飞行以来,航空事业获得了迅猛发展,极大地促进了人类社会文明的进步,对世界各国的政治、经济和军事都产生了深远的影响。航空发动机作为飞机的“心脏”,不仅是飞机飞行的动力,也是促进航空事业发展的重要推动力,人类航空史上的每一次重要变革都与航空发动机的技术进步密不可分。飞机进入喷气时代始于涡轮喷气发动机的发明,飞机突破声障、实现马赫数2和马赫数3的飞行主要是由于加力式大推力发动机的出现;飞机实现垂直起降则仰仗于可旋转喷管发动机的研制成功;巨型宽体客机的问世更少不了大涵道比、大推力的涡扇发动机;第四代战斗机的超声速巡航和超机动性主要是依靠发动机的高推重比和矢量喷管。

经过百余年的发展,航空发动机已经发展为可靠性极高的成熟产品,正在使用的航空发动机包括涡轮喷气/涡轮风扇发动机、涡轮轴/涡轮螺旋桨发动机、冲压发动机和活塞式发动机等多种类型,不仅作为各种用途的军民用飞机、无人机和巡航导弹动力,而且利用航空发动机派生发展的燃气轮机还广泛用于地面发电、船用动力、移动电站、天然气和石油管线泵站等领域。航空发动机的发展也极大地带动了机械制造、电子、控制、材料和石油化工等相关产业的发展,带来了巨大的收益。目前,全球飞机发动机及其零部件制造业的收入已占航空制造业总收入的40%左右,年收入超过1000亿美元,到2015年将达到1220亿美元,人均年收入35万美元,仅美国从事航空发动机及零件制造的公司就有1000多家,年收入超过600亿美元。

进入21世纪,航空发动机正在进一步加速发展,将为人类航空领域带来新的更大变革。目前,传统的航空发动机正在向齿轮传动发动机、变循环发动机、多电发动机、间冷回热发动机和开式转子发动机发展,非传统的脉冲爆震发动机、超燃冲压发动机、涡轮基组合发动机,以及太阳能动力和燃料电池动力等也在不断成熟,这些发动机的发展将使未来的航空器更快、更高、更远、更经济、更可靠,并能够满足更加严格的环保要求,并将使高超声速航空器、跨大气层飞行器和可重复使用的天地往返运输成为现实。

但是,航空发动机的发展绝非易事,作为人类科学技术发展的最高端产

品之一，航空发动机被誉为“工业之花”“皇冠上的明珠”，具有技术难度大、风险高、耗资多、周期长等特点，要求在相关的工程技术领域具备雄厚的基础和丰富的实践经验积累，是一个国家工业基础、综合国力和科技水平的集中体现。美国将航空发动机技术描绘为：“它是一个技术精深得使新手难以进入的领域，它需要国家充分保护并稳定利用该领域的成果，长期的专门技能和数据的积累，以及国家大量的投资。”法国将航空发动机工业描绘为：“航空发动机工业是一个与众不同的工业，是当代尖端技术的标志。进入这个竞技场的顶级‘玩家’数量非常有限，其门槛设置得比其他航空专业更高，这意味着竞争者进入的难度更大。”目前，能够独立研制航空发动机的只有美国、英国、俄罗斯、法国和中国等少数国家。

我国航空发动机工业起步并不晚，在中华民国时期就曾试图建立航空发动机工业；中华人民共和国成立后，我国于1951年开始建立航空发动机修理厂，经过60多年几代航空人的艰苦努力，如今我国已建成比较完整的航空发动机科研、生产体系，研制生产出了6万多台航空发动机，已进入世界少数能够独立研制航空发动机的国家行列。但是，我国航空发动机在技术水平和产品研制方面与先进国家还存在很大差距，学习国外航空发动机的先进发展经验，对我国航空发动机的发展势必起到良好的借鉴作用。

中国航空工业集团公司组织出版《航空发动机出版工程》的目的是为广大读者提供一个全面了解世界航空发动机发展历史、现状和未来的平台，使读者对航空发动机的基本概念和工作原理有更科学、系统的认识，对国外航空发动机的产品发展经验、组织管理方法和技术发展路线有更深刻的理解，对航空发动机发展对国防建设和国民经济发展的的重要性有更充分的重视，以唤起广大读者对航空发动机事业的关注和热爱，并积极投身到这项光荣而伟大的事业中来。期望这套丛书能够为中国航空发动机的人才培养，航空发动机的科研、生产和使用提供参考和借鉴，为中国航空发动机事业的更大发展做出贡献！



中国航空工业集团公司董事长

2013年3月

序 言

市面上有很多关于涡轮发动机功能方面的教材，这些书籍多半描述发动机主要部件的运作及其热力与推力的产生原理等。虽然各种不同深浅的书籍都有，然而对于一个涡轮发动机初学者所迫切需要知道的系统运作却付诸阙如。

有鉴于此，我遂萌生了撰写一本从系统角度来看涡轮发动机的书，以弥补此缺憾。依据我长期从事航空发动机教学的经验看来，要想全面了解发动机各系统的功能，不可把发动机系统从飞机的系统中提取出来单独讨论。因为，现代涡轮发动机的系统已与飞机系统完全融为一体，必须展现飞发之间的千丝万缕的关系，在这方面，我付出了很大努力，希望提供一系列的相关信息，使读者更好地了解这些功能。在编写本书的过程中，我得到了许多领域专家的指导和帮助，经过反复推敲整理，才使本书不断趋于完善。

我在此首先要感谢 Johannes Lange 和 Hans Hansen 两位博士对这本书给予的技术指导；并且感谢 Sybille Schmidt 和 Wolfgang Lehmann 两位先生在语言文字方面所做出的润饰。当然我更得感谢我的家人对我这项工作的理解与支持。

安德瑞·林克-迪辛格
汉堡，2007 年 8 月

译者前言

目前,市面上有很多介绍航空发动机原理的教科书,它们重点讲述发动机各主要部件的设计理论、工作原理,可以满足航空发动机专业不同水平人士的基本需求。然而,对于刚刚踏入该领域的年轻工程师来说,全面了解燃气涡轮发动机运行所必需的各个相关系统的原理及其功能也是非常重要的。《民用涡扇发动机系统》(Systems of Commercial Turbofan Engines)一书正是这些教科书的很好补充。

该书的作者安德瑞·林克-迪辛格先生毕业于德国汉堡大学应用科学系航空工程专业,后受雇于汉莎技术公司推进系统工程部,先后成为一名飞机系统工程师和飞机发动机系统专业技术培训师。该书结合安德瑞·林克-迪辛格先生多年的实际工作经验,对飞机发动机相关系统进行了全面、翔实的介绍。

鉴于《民用涡扇发动机系统》一书对于航空发动机专业工程师的重要指导和借鉴作用,中航商用航空发动机有限责任公司(中航工业商发)决定组织相关部门工程技术人员对该书进行翻译,由航空工业出版社出版发行。2014年7月,中航工业商发主持召开了该书的翻译工作启动会。会议确定,由倪金刚专家担任该项目主管,负责对该书翻译及出版工作的组织与管理,包括对翻译质量和进度的管控、与出版社协商翻译出版合同的签署,以及对书稿的编辑审核等事宜。

参加该书翻译的人员及各自承担的工作如下:

序言	陈卓
第1章 引言	侯乃先
第2章 发动机空气系统	王春晓
第3章 发动机润滑系统	白国娟
第4章 发动机燃油分配系统	张荣
第5章 发动机和燃油控制系统	侯灵峰
第6章 机组/发动机接口	余云峰
第7章 起动和点火	杨筱璐
第8章 反推系统	陈卓
第9章 发动机防冰系统	杨坤
第10章 动力装置	沈苏华
附录A 数字化飞机系统中的数据传输	杨筱璐
附录B 执行机构位置的伺服阀控制	张荣
附录C 发动机起动失败	张荣
术语表	陈卓

全书由倪金刚汇总、统稿;郑建弘、张舟成两位专家对书稿进行了校对和技术审

核；熊少强和胡忠志两位专家在专业术语翻译方面给予了指导和帮助；陈卓工程师除了承担有关章节的翻译工作之外，还负责翻译团队的工作协调。

本书的翻译工作还得到了中航工业商发领导和诸多同事的大力支持和协助，得到了航空工业出版社编辑部工作人员的全力配合，在此表示衷心感谢。

在本书翻译、校核、审查的过程中，尽管我们做出很大努力，对书稿质量严格把关，但难免还会存在错误。读者朋友在阅读和使用该书的过程中，一旦发现谬误或翻译不妥之处，敬请提出批评和指正意见，以便我们在确认后加以修订。

我们希望本书对从事航空发动机设计或燃气轮机研究开发的工程技术人员有一定的参考价值，同时也希望对我国航空发动机的自主研制能够起到积极的借鉴作用。

译者

2015年3月，上海

目 录

第1章 引言	(1)
1.1 发动机系统概述	(1)
1.1.1 发动机系统分类	(2)
1.1.2 发动机系统需求	(4)
1.2 数字化飞机系统	(6)
1.2.1 概述	(6)
1.2.2 联合航空电子体系结构	(7)
1.2.3 集成模块化航空电子	(8)
1.3 飞机/发动机接口	(9)
1.3.1 结构接口	(9)
1.3.2 系统接口	(9)
1.4 热管理	(10)
1.4.1 发动机零件的热管理	(10)
1.4.2 燃油和滑油的热管理	(10)
1.5 发动机实例	(11)
1.6 定义和术语	(12)
1.6.1 流道截面	(12)
1.6.2 压力比	(13)
1.6.3 转速命名	(14)
1.6.4 换算参数	(14)
1.6.5 机匣位置的命名	(14)
第2章 发动机空气系统	(16)
2.1 内部空气系统	(16)
2.1.1 部件冷却和封严	(16)
2.1.2 压力平衡	(19)
2.1.3 轴承腔加压	(19)
2.2 外部空气系统	(20)
2.2.1 冷却和通风系统	(20)
2.2.2 主动间隙控制系统	(22)
2.2.3 压气机控制系统	(27)

第3章 发动机润滑系统	(34)
3.1 概述	(34)
3.1.1 发动机滑油特性	(34)
3.1.2 系统设计和部件	(35)
3.2 润滑区域	(37)
3.3 系统部件	(38)
3.3.1 滑油箱	(38)
3.3.2 滑油泵和油滤	(39)
3.3.3 滑油冷却	(40)
3.3.4 通风系统部件	(41)
3.4 润滑系统的指示和监视	(42)
3.4.1 运行数据的指示	(42)
3.4.2 指示系统传感器	(43)
3.4.3 数据处理和系统监测	(43)
3.4.4 碎屑监测	(44)
第4章 发动机燃油分配系统	(46)
4.1 概述	(46)
4.1.1 燃油性质	(46)
4.1.2 发动机的燃油供给	(47)
4.2 发动机上的燃油分配系统	(48)
4.2.1 系统设计和部件	(48)
4.2.2 工作原理	(49)
4.3 燃油与滑油热管理	(53)
4.3.1 滑油散热器和燃油温度	(53)
4.3.2 CFM56-7B 的滑油冷却系统	(54)
4.3.3 CFM56-5A/5B/5C 的滑油冷却系统	(54)
4.3.4 PW4000 的滑油冷却系统	(55)
4.3.5 V2500-A5 的滑油冷却系统	(56)
第5章 发动机和燃油控制系统	(59)
5.1 发动机和燃油控制系统的主要任务	(59)
5.2 转速和推力控制	(59)
5.2.1 转轴转速控制	(59)
5.2.2 推力控制	(60)
5.2.3 发动机推力等级	(63)
5.3 液压机械控制系统	(65)

5.3.1	CFM56-3 发动机的控制系统	(65)
5.3.2	CF6-80C2 (PMC 型)的控制系统	(67)
5.4	FADEC 系统	(69)
5.4.1	系统设计	(69)
5.4.2	发动机电子控制器(EEC)	(70)
5.4.3	传感器	(76)
5.4.4	飞机/发动机接口	(77)
5.4.5	发动机 FADEC 系统实例	(78)
5.4.6	FADEC 系统设计的未来趋势	(84)
第 6 章	机组/发动机接口	(85)
6.1	发动机指示系统	(85)
6.1.1	指示的发动机参数	(85)
6.1.2	电子仪表系统上的发动机指示	(87)
6.1.3	经典仪表系统中的发动机指示	(92)
6.2	发动机控制	(95)
6.2.1	高压燃油关断控制系统	(95)
6.2.2	机械式推力杆系统	(98)
6.2.3	电气式推力杆系统	(100)
6.2.4	控制开关	(101)
6.2.5	自动飞行时的推力控制	(103)
第 7 章	起动和点火	(107)
7.1	起动系统	(107)
7.1.1	概述	(107)
7.1.2	起动系统部件	(108)
7.2	点火系统	(110)
7.2.1	概述	(110)
7.2.2	点火系统部件	(111)
7.3	驾驶舱控制和指示	(114)
7.3.1	CFM56-3 的起动系统和点火系统	(114)
7.3.2	CFM56-7B 的起动系统和点火系统	(115)
7.3.3	V2500-A5 的起动系统和点火系统	(117)
第 8 章	反推系统	(119)
8.1	反推力装置的运行	(119)
8.1.1	基本原理	(119)
8.1.2	反向器的运行	(120)

8.2 反推力装置的类型	(120)
8.2.1 气流偏转系统	(120)
8.2.2 作动系统	(122)
8.2.3 反向器控制系统	(123)
8.3 反向器结构	(123)
8.3.1 固定结构	(123)
8.3.2 可移动结构和作动系统部件	(124)
8.4 反向器控制系统	(125)
8.4.1 波音 737-600 飞机控制系统	(125)
8.4.2 A320 的控制系统	(127)
第 9 章 发动机防冰系统	(129)
9.1 发动机部件的冰生成	(129)
9.2 进气道防冰系统	(129)
9.2.1 概述	(129)
9.2.2 引气防冰系统的组件	(129)
9.3 帽罩防冰	(131)
第 10 章 动力装置	(133)
10.1 短舱	(133)
10.2 发动机本体	(134)
10.3 动力装置的组装	(134)
10.3.1 发动机安装节	(135)
10.3.2 进气道防冰系统	(137)
10.3.3 发电系统	(137)
10.3.4 引气系统	(137)
10.3.5 液压系统	(139)
10.3.6 燃油供给系统	(140)
10.3.7 火灾探测和灭火系统	(140)
10.3.8 机械式发动机控制系统	(142)
10.3.9 传感器和线束	(142)
10.3.10 发动机排液	(142)
附录 A 数字化飞机系统中的数据传输	(144)
A.1 串行端口	(144)
A.2 数据总线	(145)
A.2.1 ARINC429	(145)
A.2.2 ARINC629	(146)

A. 2. 3	AFDX	(147)
附录 B	执行机构位置的伺服阀控制	(149)
B. 1	概述	(149)
B. 2	带有溢流阀的伺服阀	(149)
B. 3	带有燃油喷嘴的伺服阀	(150)
B. 4	带有导向阀的伺服阀	(151)
B. 5	失效安全的执行机构定位	(152)
附录 C	发动机起动失败	(153)
C. 1	发动机起动失败的类型	(153)
C. 1. 1	热起动	(153)
C. 1. 2	湿起动	(154)
C. 1. 3	悬挂起动	(155)
C. 1. 4	起动失速	(156)
C. 2	由 FADEC 系统检测到的其他异常起动情况	(156)
术语表		(158)
参考文献		(163)

第1章 引言

1.1 发动机系统概述

燃气涡轮发动机包含几个主要部件，这些部件通过一系列热力学工作循环，改变着气流的状态。现代涡扇发动机的设计都遵循单元体的概念。一个典型的双转子涡扇发动机（如图 1-1 所示的 V2500-A5），由以下几个主要单元体组成：

- 风扇单元体；
- 低压压气机（LPC）单元体；
- 核心机或燃气发生器；
- 低压涡轮（LPT）单元体；
- 附件齿轮箱单元体。

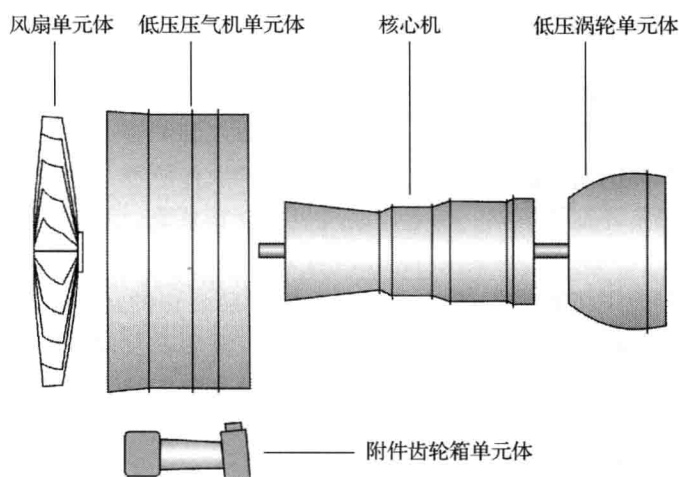


图 1-1 V2500-A5 的主要单元体

核心机主要由高压压气机（HPC）、燃烧室和高压涡轮（HPT）三大单元体构成。每一单元体均呈模块状可快速拆装，易于维修，不必分解至组件级。发动机各单元体都预先组装成部件，然后再完全组装成整机。每个部件都有其特定的维护程序、技术要求和工装需求。

除了便于维修之外，这种部件概念也有助于描述发动机的基本运行功能和其工作循环现象。以下章节，将这些部件的组合视为发动机本体。

然而，发动机本体无法独立运行，也无法满足飞机的各种功能需求。因此，发动机本体还需要增加其他配套系统，才能工作起来（如图 1-2 所示）。

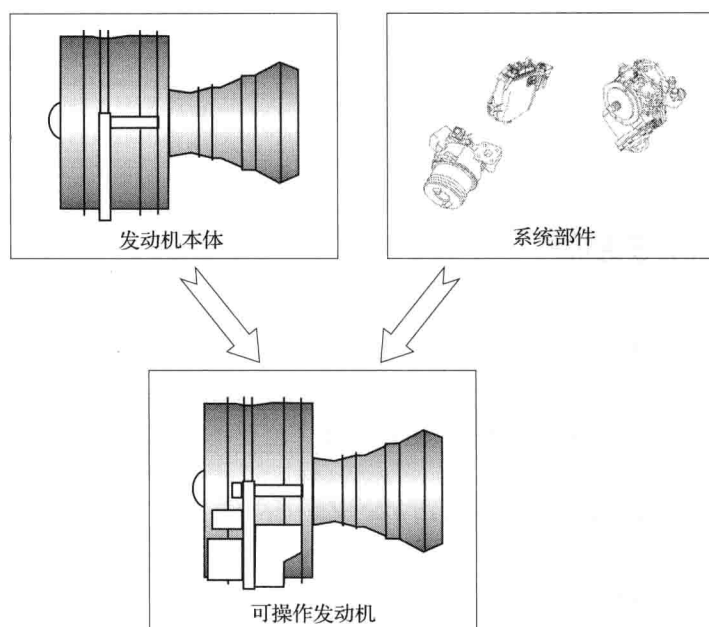


图 1-2 发动机本体加上发动机系统组成可操作的发动机

这些与发动机相关的配套设施，通常称为发动机系统。为了理解飞机发动机如何运行，不仅仅要知道发动机本体是如何工作的，更需要了解配套系统如何工作。本书向读者介绍了发动机本体的基本设计和大型涡扇发动机的工作原理，大致介绍一些最常用系统的设计。如果想要详细了解某一特定发动机机型及其系统，就必须对该机型做更进一步的研究。

发动机还需要为飞机附件系统（或简称为机体系统）的运行提供传动动力，如舱压系统、电气系统和液压系统。为了连接这些系统，需要在发动机上安装一些接口。另一方面是如何把发动机与其他系统组合起来形成一套完整的动力推进系统。这就涉及到进气道、推力喷管和整流罩。一般而言，这些部件不是由发动机公司负责提供，然而它们却也是动力推进系统中的一个环节。

1.1.1 发动机系统分类

从整个操作看来，发动机系统可以按其功能和重要性进行归类。第一类包含了发动机典型的主要系统，它们是：

- 空气冷却和密封系统；
- 润滑系统；
- 燃油分配系统；
- 控制系统；

- 发动机控制；
- 指示系统；
- 点火系统；
- 排气和反推系统；
- 起动系统；
- 整流罩、进气道和喷口。

还有其他不属于发动机的系统，但它们从功能上讲是与发动机相关的。这些系统在发动机正常工作时处于待命状态，当需要时就会被激活。它们可以并入次要的发动机系统，这些系统是：

- 防火系统；
- 防冰系统。

将发动机的功率提供给飞机的系统合并为供给系统。同时有些系统也从发动机某一部件中提取动力或气体，供应另一部件。而且，它们同时也是飞机系统的重要成员。这些系统是：

- 发电系统；
- 气压动力系统；
- 油压动力系统。

读者可以通过使用培训手册或者维修手册的形式初步了解某个型号飞机或发动机的技术概要。民航界对这些出版物中涉及的系统进行归类和命名是有国际标准的，依据的是 ATA 规范 100 家“制造商技术数据”。该规范明确规定了民航技术手册章节的编号。该规范中，飞机各个系统有对应的章节，并有标题和章节号。详情如表 1-1 所示。

表 1-1 ATA 章节号和标题

章节号	标 题	说 明
70	标准方法—发动机	发动机工作时遵循的程序
71	动力装置	进气道，整流罩，发动机架，动力装置拆卸/安装
72	发动机	从压气机到涡轮以及齿轮箱的发动机描述和检查
73	发动机燃油与控制	燃油分配系统、发动机控制系统和燃油指示
74	点火	发动机点火系统
75	空气	发动机空气系统的冷却和压气机控制
76	发动机控制	发动机控制和控制组件
77	发动机指示	功率（压力比或扭矩）、转速（ N_1 ， N_2 ， N_3 ）、温度（排气温度（EGT），短舱温度）、振动指示
78	发动机排气	喷管结构和反推系统
79	发动机滑油	发动机滑油系统和相关指示
80	起动	发动机起动系统