



中航工业首席专家
技术丛书

“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

陈聪慧 编著

航空发动机 机械系统常见故障

THE COMMON FAILURES
OF AERO-ENGINE
MECHANICAL SYSTEM

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点

航空发动机机械 系统常见故障

陈聪慧 编著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

航空发动机的机械系统包括传动系统、滑油系统、密封系统和主轴轴承四大部分。

本书从发现故障和排除故障的角度,简要介绍了航空发动机的机械系统,这些故障均是本书作者亲身经历的并组织或参加了排故工作。通过故障排查,从机理分析、原因查找、故障定位、故障再现、解决落实等方面,全面系统地介绍了航空发动机机械系统的常见故障及解决措施。本文还简要归纳和总结了国内航空发动机机械系统的现状和常见故障模式、例子及国外高水平设计现状,并总结了设计中应注意的问题。

本书试图从常见故障—故障实例—国内现状—国外水平—设计中需注意的几个环节,这样一条线进行论述,期望对工程技术人员有所帮助。

本书内容不是很全面,也不可能用一些例子就将庞大复杂的机械系统的常见故障全面阐述清楚,主要是说清楚解决问题的想法和思路。对从事航空发动机机械系统工作的专业人员及决策人员,提供参考和解决问题的思路,为广大设计人员指出设计时需尽量避免的薄弱环节。

图书在版编目 (C I P) 数据

航空发动机机械系统常见故障 / 陈聪慧编著. -- 北京:航空工业出版社, 2013. 12

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0325 - 6

I. ①航… II. ①陈… III. ①航空发动机—故障
IV. ①V263. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 288802 号

航空发动机机械系统常见故障

Hangkong Fadongji Jixie Xitong Changjian Guzhang

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑路 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936555 010 - 64978486

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2013 年 12 月第 1 版

2013 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 37.25

字数: 954 千字

印数: 1—2000

定价: 226.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从 2009 年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人员中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人员技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21 世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。



中国航空工业集团公司董事长

序

航空发动机的机械系统包括传动系统、滑油系统、密封系统和主轴轴承，其牵涉的学科多且国内基础相对薄弱，具有故障多发、不易考核等特点。作者陈聪慧从事该专业工作30多年，一直奋斗在航空发动机领域的第一线。本书从故障角度阐述了航空发动机的机械系统，其中绝大部分内容是他作为“救火队长”在专业和排故工作中的心得和体会，对解决机械系统故障具有引导性和方向性的作用，是航空发动机事业的宝贵财富。

国外航空发动机机械系统技术是在其他相关领域（汽车、化工、机床、船舶、钢铁等）技术水平的基础上，结合航空发动机的自身特点发展起来的。而国内的研究水平基本还处于仿制、设计、试验验证、排故、改进、验证的循环过程中。当然，排故是这个循环的重要组成部分。国内航空发动机机械系统设计很难做到一次性设计成功，除了设计方法、设计手段、材料、加工、装配、载荷、试验等方面的影响，其实最重要的是设计基础，也就是基本功和细节。本书既阐述了航空发动机机械系统的常见故障，还对比了国内外机械系统的发展水平、发展趋势，并提出了设计过程中需要注意的细节问题，对提升航空发动机机械系统的设计水平具有重要的意义。

深盼此书早日出版，使读者了解和认识航空发动机机械系统的常见故障、解决方法及需注意的细节问题，提高航空发动机机械系统整体研制水平，促进祖国航空事业的蓬勃发展。

赵振业

2013年11月25日

前 言

这是一点体会
一点教训
有些提起让人脸红
提起让人切齿
但如果随着时间的推移
你能把它们都忘记
你将虚度你的一生
就叫它“为了忘却的纪念”吧！

1 概述

很少有人会用这样一个开头来作为一本书的前言，本书写作开始于 10 年前，本是作为工作中的体会来记载的，扩充开来就变成了这本书。很深的体会是航空发动机机械系统的故障实在是太多了，包括设计、制造、装配、使用及试验方面的，等等。

从我国现役发动机的基本故障统计来看，机械系统的故障始终排名第一，这里有机械系统大多数是接触副，比较容易出现问题的主观原因，也有设计水平偏低，制造水平跟不上，试验、装配手段落后等客观原因，还有其他一些原因：重视程度不够、人才水平有限、投资力度偏弱、基础和规范工作不到位等。要想把机械系统的故障率大幅降低，还需广大设计、加工、试验等人员的勤奋努力。

航空发动机的机械系统主要包括传动系统、滑油系统、密封系统和主轴轴承四大部分。本书从故障角度简要介绍了航空发动机机械系统，这些故障均是本书作者亲身经历的，并组织或参加了排故工作，通过故障现象、结构介绍、故障定位、故障排查、故障原因、排故措施、措施验证等方面，全面系统地介绍了航空发动机机械系统的典型故障。本书简要归纳和总结了机械系统国内现状和常见故障模式，描述并总结了排故措施及设计中应注意的问题。当然，仅仅通过若干典型故障就将庞大的机械系统全面阐述清楚是不现实的，这里主要是讲讲解决问题的想法和思路，通过与广大读者分享排故中的心得与体会，抛砖引玉。如果本书能够为从事航空发动机机械系统工作的专业技术人员提供一点参考或解决问题的思路，足慰平生。

其实，国外航空发动机机械系统的故障率也一直是排名靠前的，国外同行通过对机械系统设计、加工、试验、装配等方面的改进，把故障率降到基本可以接受的程度，他们的很多做法也代表了先进航空发动机动力传输系统的发展趋势。

2 传动系统

先进发动机系统必然产生先进的传动系统，传动系统设计技术研究一直是国外航空发动机技术研究的重点之一。目前世界上先进航空发动机传动系统的发展趋势是在满足高速、重载的情况下，减小传动系统的体积、重量^①，提高寿命和可靠性，降低成本，提高经济可承受性。

国外经验丰富的航空传动系统设计公司在传动系统研制过程中，有着完整的设计软件及配套的强度及性能测试试验技术。设计中将各个部件的受力、变形等对其自身和相关联部件产生的影响综合考虑到强度计算中，传动部件的静态和动态分析都比较完善，计算方法能够比较准确地模拟真实工作情况。齿轮分析及设计发展到了精细化的程度，如面向强度与疲劳性能的设计、面向载荷分布的设计、面向功率密度的轻量化设计、面向动态性能的设计；高速齿轮的啮合仿真、动力学研究和动态设计已广泛应用于工程实际，形成了完整的发动机传动系统设计体系，保证发动机传动系统一次设计成功。随着齿轮动态技术的发展，国外传动技术方面已开展了传动系统的 NVH (Noise, Vibration, Harshness) 技术，评估齿轮的齿形误差及由此带来的噪声等问题。英国 SMT、Romax 等公司针对薄壁柔性机匣传动系统开展研究，分析了壳体变形造成的齿轮装配误差和传动误差以及对振动噪声水平的影响。

国外在齿轮方面做了大量的试验研究，进行齿轮构件的疲劳 - 寿命特性试验，并获得构件的 $S-N$ 曲线，可以准确地预测齿轮的寿命；通过齿轮抗疲劳制造技术研究，提高齿轮的疲劳强度约 50%；国外对齿轮喷油润滑的研究非常重视，美国 NASA 的美国陆军研究实验室的研究人员 Timothy L. Krantz 和 Robert F. Handschuh 在 2006 年进行了一项直齿轮喷油润滑试验分析研究，该项研究通过一组齿轮磨损试验，对不同喷油状况（即喷油嘴位置）下齿轮磨损情况和温升情况进行了对比。正是通过这些基础试验，总结了大量的数据，建立了丰富的数据库，作为设计依据，既可满足使用要求，又兼顾了经济性。传动功率密度 (kW/kg)，目前美国达到 12，中国为 6；直升机大修间隔期 (TBO)，国外 $\geq 8000\text{h}$ ，中国为 800 ~ 1200h。

通用电气公司 (GE 公司)、普拉特·惠特尼公司 (普·惠公司) 等大型发动机公司一直在努力探索与研究先进的传动系统设计方法、先进的润滑材料与冷却方式、先进的密封技术等，并出现了像 F100 发动机的先进传动系统，标志着美国综合高性能涡轮发动机技术 (IHPTET) 计划实施的前沿成果。法国斯奈克玛公司采用继承与创新相结合的方法研制的 M88 系列发动机，其先进的传动系统设计技术，提高了发动机性能，改善了发动机的维修性。

目前国际上现役军用涡扇发动机型号中，最为先进的是以美国 F119 发动机为代表的推重比 10 一级的第 4 代战斗机动力 (我们也称为第 4 代军用发动机)。

以 F119 为代表的国外先进发动机，其传动系统设计的一个典型特征是附件机匣与滑油系统附件一体化集成设计，与上一代发动机传动系统相比，明显的优势在于，通过多个附件的串联或集成设计，如主燃油泵和加力泵组合的组合泵，高空阀与电机的串联，以及超

^① 本书所提“重量”均为“质量”概念，单位为千克 (kg)、吨 (t) 等。

高转速传动附件的设计,如高转速($>6000\text{r}/\text{min}$)滑油泵组,超高转速($>28000\text{r}/\text{min}$)离心通风器等,减少了附件传动轴的数量(传动轴仅为4根),缩短了附件传动链,简化了附件机匣结构,减轻了系统重量(仅为 25.35kg),提高了可靠性和发动机性能。并且利用附件机匣节省的空间,将滑油系统附件(滑油箱、滑油滤、离心通风器、高空阀、滑油流量管理阀、磁性屑末检测器、屑末信号器等)与附件机匣高度集成为一体化结构,因附件数量及外部管路大量减少,从而大大提高了发动机传动系统、滑油系统及外部结构的可靠性和维修性。而国外对于一体化滑油系统附件已开展研制工作,目前已到了应用阶段,其技术成熟度达7~8级。

普·惠公司研制的PW1000G发动机采用自行研发的星形齿轮减速器,传递功率达20MW,传动比3:1,输入转速 $10000\text{r}/\text{min}$,已进行试飞。目前最先进的垂直/短距起降战斗机F-35采用齿轮驱动风扇(GTF)形式推进系统,离合器系统需具有传递22000kW功率的能力,并能够不打滑、不磨损,具有较长寿命。齿轮箱具有高达30:1的功率重量比(功重比),并且能在全部载荷下断油工作1min。国外已经不同程度开展了GTF的研究,并取得了丰富的研制经验和成果。大涵道比民用发动机的大功率航空传动齿轮箱的发展水平已到20~30MW水平。国外在新型传动方面也做了大量研究,如:滚柱传动、自由行星传动、液压传动、电磁传动、喷气传动、分流涡轮传动等,这些研究为发动机传动系统的发展提供了新的思路。

我国的航空工业经过新中国成立后60余年的发展,已经从生产、仿制转变为自主研制。自行研制的“太行”发动机已经装备部队。但是其技术水平和世界上的主要航空大国相比仍有20~30年的差距。在传动系统方面,我们的差距主要体现在齿轮啮合仿真、传动机匣与附件机匣一体化设计、整体动态设计、优化设计及新型传动方面。

由于受制于发动机附件数量多、转速不同、外廓尺寸较大等因素,设计较为被动,只能是附件的简单罗列,传动链太长,传动轴数量多,机匣壳体大,重量较大。如目前“太行”发动机,为满足各传动附件的转速和外廓安装要求,传动轴数量、机匣重量和体积与国外同等发动机相比均较大,

国内通过“十五”“十一五”的传动系统设计技术研究,拥有了在国际上较为先进的传动系统设计分析软件,并通过型号研制,总结出较为完善的传动系统设计方法、设计准则。但由于缺乏试验验证,没有准确的试验数据,难以修正设计方法,并影响设计的准确性。

我国尚未开展垂直/短距起降飞机齿轮驱动风扇关键技术的研究。国内在GTF的概念探索和机理研究上,还未全面启动。GTF的结构主体是大涵道比涡扇发动机,而我国的大涵道比涡扇发动机设计研究进展良好,已进入验证机试验阶段,此时开展GTF基础技术研究是最佳时机,对保持我国航空发动机的先进性和发展的延续性具有重要意义。

随着国内研制产品的不断增加,传动系统设计已由仿制渐渐转成自行设计,一些先进的设计思想和技术诸如有限元分析方法以及概率设计均被应用到传动系统的设计中,国内通过预研等方法引进或开发了一些新的设计手段,正在逐步应用到设计中。如齿轮的动态特性分析、附件机匣整体振动特性分析、新型高强度齿轮材料、齿轮弯曲疲劳极限值测试等基础研究越来越受到重视,开展了大功率传动系统试验研究,逐步解决了型号研制中出现的问题和故障。

3 滑油系统

滑油系统的设计牵涉到大量的两相流动、弹流润滑、复杂换热等较边缘、难度大的学科，经典理论较少，随着发动机设计技术的不断进步和深入，对于滑油系统的精细化设计要求越来越高，因此自 20 世纪 90 年代以来，欧美航空发动机研发水平先进的国家逐渐重视航空发动机滑油系统的预先研究以及先进设计技术。通过高等院校的实验室研究成果与制造商的设计实践相结合，在近 20 年产生了大量基于试验的技术成果。

尤其是在 21 世纪初期，德国、法国、英国、比利时、意大利等欧洲国家联合开展了未来商用及军用航空发动机传动滑油系统的预先研究项目——ATOS (Advanced Transmission and Oil System Concepts for Modern Aero-engines) 计划，其项目团队主要包括阿维奥集团 (Avio Group)、布里特公司 (Brite)、邓禄普流体系统公司 (Dunlop Fluids Systems)、FAG Kugelfischer 公司、MTU 航空发动机公司 (MTU Aero Engine)、伊斯帕诺-絮扎公司 (Hispano-Suiza)、罗尔斯·罗伊斯公司 (罗·罗公司)、罗·罗德国公司和比利时宇航公司 (Techspace-Aero) 等，及卡尔斯鲁厄大学 (Karlsruhe)、烈日大学 (Liege)、诺丁汉大学 (Nottingham)、南安普顿大学 (Southampton) 等国际知名大学，耗时 8 年针对滑油系统开展了大量的试验、设计、仿真及新材料的技术探索，形成了一批技术成果，主要包括航空发动机轴承腔内部的流动和换热研究、滑油系统着火和防火研究、新型电驱动滑油泵及滑油系统设计技术研究、金属海绵高效离心通风器研究等，并已逐步应用到罗·罗公司、斯奈克玛公司的商用发动机中。

为满足未来商用航空发动机及军用战斗机发动机的滑油系统设计的要求，主要开展以下方向的技术研究：

(1) 滑油系统的设计与分析技术研究，主要包括滑油系统循环量的精确设计、热分析研究、轴承腔油气两相流流动与换热研究、滑油通风系统设计与分析基础研究、仿真技术等。国外研究者以大量的轴承和齿轮试验为基础，结合先进的 CFD 分析软件，在方案设计过程，能够以不同的油气掺混比，分析出油气两相流条件下整个滑油系统（包括供油子系统、回油子系统、通风子系统）的压力、流量、温度场等性能数据，确保轴承及齿轮获得可靠的润滑和冷却。其分析数据在随后开展的部件试验、整机试验以及飞行验证试验中逐步修正完善。

(2) 滑油系统的精确分析及与飞机共同开发的热管理系统设计技术研究。由于未来航空发动机的热负荷越来越高，滑油系统需要带走的热量逐渐增加，这需要更精确的系统热分析技术，并与飞机、燃油系统进行集成化设计，尽量合理地将热量分配到各个系统中，避免某一系统和部件的过度温升。

(3) 高效、轻量化的滑油系统部件设计技术。例如通过新的设计技术提升通风器分离效率及滑油泵工作效率，以达到高转速、小体积的滑油部件的设计能力；采用新型散热技术提升滑油系统散热器散热效率，缩小散热器体积；应用新材料、新工艺，以达到滑油系统各部件的轻量化、小体积的目的。

(4) 战斗机发动机的集成式紧凑结构的滑油附件设计技术。在采用热管理系统的前提下，将传统的主、加力燃滑油散热器合并为一个燃滑油散热器；将滑油供油泵、各级滑

油回油泵、滑油箱、滑油滤、离心通风器、通风阀、滑油流量管理阀、磁性屑末检测器、屑末信号器等滑油附件，与附件机匣集成为一体，外部管路很少，有效地减少了传动润滑系统的部件总重量，使发动机的维护点集中到一处，方便了后期的维护保养。

(5) 滑油系统全面的试验验证工作。每个型号研制过程中，对滑油系统的试验项目达 20 余项，除对组成滑油系统的各个滑油附件进行试验研究外，其在装至发动机整机之前，还在滑油系统的姿态模拟试验器上开展全状态、全包线范围的系统级性能试验及初始可靠性验证试验，与国内现行规定使用的发动机型号规范中规定的内容相比，国内各个型号研制过程中是望尘莫及的。

此外，国外航空发动机在滑油的使用方面，更趋于兼顾低温性能和高温性能且成本低廉的 4cst^①（厘斯）滑油，在滑油系统的监测技术方面，更趋于在线及时监测技术，如滑油箱油位传感器、在线滑油金属屑末信号探测器、滑油过热结焦传感器等，这些均是未来航空发动机滑油系统及部件设计技术的研究方向。

4 密封技术

在军用和民用航空发动机对先进密封技术的紧迫需求条件下，自 20 世纪 80 年代，以美国为首的航空强国，投入了大量的精力来研发密封技术。在 IHPTET 计划中，多项密封技术被列为攻关项目，有：刷密封、气膜密封、反转气膜密封、石墨密封、篦齿密封等，开展了大量的分析计算及试验研究。目前，现有密封技术基本能够满足军用、民用发动机的使用条件，现有航空发动机密封技术现状见表 1。

表 1 现有航空发动机密封技术现状

密封形式	密封压差/MPa	密封温度/℃	密封速度/(m/s)	材料
机械密封	1.05	537.8	144.00	碳石墨
篦齿密封	1.75 ~ 2.80	704.4	457.20	镍基高温合金 + 可磨涂层
刷密封	0.56 ~ 0.70	704.4	300.48	钴基高温合金
主流路气体密封 (压气机和涡轮)	级间压差 (Δp)	649.0 ~ 1093.3	365.76 457.20	合金 + 可磨陶瓷涂层

下一代航空发动机为了获得更高的性能，将要采用更高的循环参数（压力、温度），更高的转速，下一代航空发动机对气路密封及滑油密封的要求使密封技术面临着更高参数的挑战，包括更高的使用温度、更高的密封速度、更高的密封压差及长寿命、低磨损或无磨损、低发热量等。先进的密封技术已经成为航空发动机关键技术之一，下一代航空发动机对密封技术的需求指标见表 2。

^① 1cst = 1mm²/s。

表 2 下一代航空发动机对密封技术的需求指标

密封形式		密封压差/MPa	密封温度/℃	密封速度/ (m/s)	材料
机械密封	单转子密封	0.42	537.8	182.00	碳石墨
	对转密封	0.42	537.8	304.80	碳—碳复合
气膜密封		5.60	815.5	365.76	陶瓷 + 高温合金
篦齿密封		1.75 ~ 2.80	704.4	502.92	镍基高温合金、带钨的齿尖 + 可磨涂层
刷密封		0.98	815.5	457.20	优质合金或陶瓷

在这种需求下，国外航空强国已经研发了多种先进的密封技术，有：篦齿密封、刷密封、气膜密封、石墨端面密封、指尖密封等。有些密封已经完成了第1代和第2代的研发和应用，已应用到了现有先进的航空发动机上，有些密封技术正在研发中。为了满足下一代先进航空发动机对密封技术在密封速度、密封压差、密封温度、寿命等方面全面提升的要求，密封技术在结构设计、材料应用及计算分析能力上需要进行全面提高。

5 主轴轴承方面

在轴承设计分析技术方面，国外发达国家具有成熟的轴承分析软件和轴承系统耦合分析软件，且有大量的使用经验数据支撑，能够进行三维数字仿真分析与设计；大量采用了与支承结构一体化的专用轴承，使轴承设计与发动机结构设计融为一体，在保持轴承基本功能的同时，为减轻发动机重量、改善转子振动特性等做出了重要贡献。

计算分析方面更为详细、严谨、科学，对轴承的静态、准动态、动态的分析计算形成了自己的分析模式。常规计算中对轴承供油喷嘴的压力、最佳供油量、表面应力等进行较准确的分析评估。其计算工具经多年完善和试验数据修正变得更为精确。

在轴承应用技术方面，发动机设计部门联合轴承企业研发部门，共同制订了较完善的轴承应用技术规范，建立了较完整的轴承应用数据库。双方技术相互渗透、相互促进，整机设计时充分重视为主轴承工作创造合理的工作环境，防止其他系统及零件对轴承造成损伤，轴承设计时考虑其对整机性能的影响。给出的轴承工况条件更为全面、准确。轴承公司根据发动机设计人员给出的初始条件进行更为详细的分析，并由发动机设计方进行轴承腔的温度场测量，从而使轴承设计条件更为准确。

国外从第4代军用发动机开始，主轴轴承与其他结构件同机同寿、视情维修，民机和燃气轮机主轴轴承寿命达到了数万小时，建立了长寿命轴承寿命评估技术体系，其寿命主要根据理论分析并结合使用经验和飞行考核结果给定。

除常规轴承外，国外已在地面燃气轮机和直升机上采用了混合陶瓷轴承，在新研制的航机上也已经开始论证使用陶瓷轴承，充分利用了陶瓷轴承高强度、低摩擦因数、耐热及长寿命的特性，为降低整机重量，优化滑油系统设计提供了条件。

在轴承试验研究方面，对于成熟材料的轴承很少作全尺寸轴承耐久性试验，基本不作

寿命试验；对于新材料、新结构轴承主要作轴承零件试验和必要的轴承系统试验。相对工程试验而言，国外更加重视轴承基础研究方面的试验工作。国外常规轴承试验 DN 值已经达到 $4 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ 。另外，针对各型发动机的工况和特殊要求，开展了专项试验研究，例如，润滑冷却效率试验、滑油中断试验、转动力矩试验、缺陷扩展试验、高速磨损试验等。

在轴承基础研究方面，针对轴承损伤扩展与再现、工作面及次表面残余应力与寿命的关系、滑油污染对寿命的影响等做了大量试验，积累了大量试验数据。还通过试验给定材料疲劳寿命极限，发展了轴承新寿命理论，确定各种材料的寿命系数、润滑系数和滑油污染度系数。

数据库数据齐全，通过 30 多年的试验数据统计和积累，使轴承的设计更能满足实际需求。通过计算分析并与数据库的数据进行对比即可估算轴承的初始寿命，并能选取正确的材料、加工参数，轴承的实际寿命通常高于设计寿命。

在轴承先进制造技术方面，材料向表面强化方向发展。领先的二次淬硬技术优化了残余应力分布，增加了表面硬度，适用于表面应力大于 2200MPa 以及滑油污染度较高的轴承工况中，其寿命可达到双真空冶炼 M50 钢的 14 倍。

国外在轴承冷热加工方面具有完善的标准和严格的质量管理体系，加工现场已开始采用流程控制系统软件对加工过程、热处理或镀银时间进行管理，保证加工的一致性，避免受到不同加工者的影响。加工时注重锻造流线、组织分布、表面应力状态控制，以提高和保证轴承的疲劳寿命。另外，国外对产品采取一系列有效的无损检测手段，包括磁粉荧光检查、酸洗、涡流检测、X 射线衍射仪、巴克豪森噪声仪等，控制出厂产品的质量。

在故障诊断方面，故障分析手段和方法更为科学和齐备，能够很快定位各类故障并迅速排除。在轴承失效分析方面，国外均建立了轴承失效数据库，对每次失效的轴承进行拍照、分析、编写故障特征和查找原因等，库中含有丰富的轴承失效图片及信息。技术人员可以通过图片信息比对来分析类似失效故障。

在轴承试验设备方面，国外具有多种轴承试验台，按用途可分为疲劳寿命试验器、摩擦转矩试验器、润滑测试试验器、密封性试验器、通用测试试验器和特殊应用试验器。试验器具备开展收油效率、温度场、功率消耗、保持架刹车特性、密封温度和流量（气体和油）、耐久性（含偏心）、加速/减速刹车、滑油中断、失效扩展、损坏零件进一步测试等试验能力。

在磁浮轴承研究方面，国外已将磁悬浮轴承列为 21 世纪先进航空发动机的关键高新技术之一，欧美国家投入了大量的资金，期望占领这个航空高技术领域的制高点。美国在 2 个径向和 1 个轴向磁浮轴承作为发动机转子支承的单轴发动机模型上，成功地进行了运转试验，轴承最高转速为 22000r/min，DN 值为 $4.5 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ ，前径向轴承载荷为 18700N，后径向轴承载荷为 17000N，轴向轴承的轴向载荷为 12000N，轴承的工作温度为 510℃。

致 谢

光阴荏苒，转瞬我已经投身祖国航空发动机事业 30 个年头了，苦痛哀乐亦伴我半生。此书是我及我的团队心血之结晶，在此衷心感谢我的领导、朋友、同事和家人给予我的巨大帮助和支持！

衷心感谢赵振业院士在百忙之中为本书作序，赵院士渊博的知识、严谨的工作态度、饱满的工作热情，都深深地影响着我，鼓励我在工作岗位上不断进步；他平易近人的品质、一丝不苟的敬业精神更是我人生道路中学习的楷模。衷心感谢我的老首长孙慈，在我事业最迷茫的时候为我指引了前进的方向！衷心感谢沈阳发动机设计研究所刘廷毅所长、刘永泉总设计师、李宏新副所长、赵亮副所长等在本书撰写及出版过程中给予的巨大支持！

衷心感谢沈阳发动机设计研究所第五研究室全体同仁的厚爱和支持，一路走来我们同甘苦、共命运，我们是最亲密的战友、最忠诚的朋友、最温暖的亲人！特别感谢沈阳发动机设计研究所第五研究室史妍妍博士对本书付出的巨大艰辛及努力！衷心感谢第五研究室老主任林基恕老先生的厚爱！衷心感谢第五研究室前任主任张振波的大力提携！衷心感谢第五研究室战鹏主任、胡兴海副主任、信琦副主任、杨荣、孔祥锋、谷俊、赵宏达、马婷、杨宇、孔德龙、张振生、谷智赢等同志的帮助和支持！

衷心感谢我的妻子陶建萍，给予我始终如一的深爱 and 照顾，孝敬父母、抚育子女，30 余年默默无闻、毫无怨言，让我可以心无旁骛、全心工作！

感谢中国航空工业集团公司对本人工作的支持和肯定！

感谢沈阳发动机设计研究所对本书的资助！

感谢母校北京航空航天大学对我的培养！

此外，在本文的撰写和研究过程中，参考了大量的文献和资料，在此向它们的作者表示衷心的感谢！

再次向所有给予本人无私帮助的人们表示衷心的感谢！

最后，让我们秉承“航空报国，强军富民”的宗旨，祝福伟大祖国繁荣富强！祝福祖国航空工业蒸蒸日上！

目 录

常见问题及需要注意的细节	(1)
1 起动机与转接座干涉问题	(1)
2 棘轮离合器“倒链子”问题	(1)
3 螺纹反向问题	(2)
4 螺栓振动破坏问题	(2)
5 锥齿轮共振破坏问题	(3)
6 电子束焊开裂问题	(3)
7 弧齿锥齿轮着色问题	(4)
8 增压泵轴承材料选择不当问题	(4)
9 结构装配干涉问题	(5)
10 锁片断裂问题	(5)
11 附件机匣结合面渗油问题	(6)
12 传动盒壳体过热问题	(6)
13 滑油喷嘴堵塞问题	(7)
14 附件机匣渗滑油问题	(8)
15 附件接口设计不当导致的空中滑油消耗量大问题	(8)
16 封严涨圈磨损问题	(9)
17 引气管堵塞问题	(10)
18 主轴承内衬套松动磨损问题	(10)
19 空中滑油压力突降问题	(10)
20 封严装置损坏导致的空中滑油消耗量大问题	(11)
21 滑油箱油面指示玻璃窗裂纹问题	(11)
22 燃气轮机试车中转速异常及附件机匣存在异常声响问题	(12)
23 直齿圆柱齿轮节圆共振破坏问题	(13)
24 3 号轴承损坏问题	(14)
25 飞行台液压系统管路气振问题	(14)
26 滑油箱通散热器接口渗油问题	(15)
27 滑油系统单向阀堵塞问题	(15)
28 前轴承腔漏滑油问题	(16)
29 发动机后盖通风不畅问题	(16)
30 发动机后通风管脱落问题	(17)
31 石墨密封回油方式问题	(18)
32 低压转速信号弱问题	(18)
33 发动机前轴承腔滑油 Fe 元素含量超标问题	(19)

34	波纹管裂纹问题	(19)
35	地面油滤导致的滑油压力失常问题	(20)
36	后通风器卡爪断裂问题	(20)
37	斯贝发动机滑油压差异常问题	(21)
38	橡胶圈老化问题	(21)
39	轴承打滑蹭伤问题	(22)
40	后盖安装错位问题	(22)
41	后轴承腔滑油供油量分配问题	(23)
42	齿轮轴内部密封铜堵错位问题	(24)
43	飞机附件机匣轴承损坏问题	(24)

传 动 篇

案例 1：中央传动杆中间轴承磨损故障	(29)
1.1 故障现象	(29)
1.2 结构介绍	(32)
1.3 故障定位	(34)
1.4 故障排查	(35)
1.4.1 设计复查	(35)
1.4.2 传动杆临界转速计算分析	(36)
1.4.3 中间轴承滚子理化分析	(38)
1.4.4 上安装座裂纹断口分析	(38)
1.4.5 上安装座材质分析	(41)
1.4.6 传动杆尺寸测量	(43)
1.4.7 传动杆动不平衡量测量	(45)
1.4.8 管后段组合件测量	(45)
1.4.9 轴承滚动体尺寸测量	(45)
1.4.10 同轴度测量	(45)
1.4.11 喷嘴喷射方向检查	(46)
1.4.12 附件机匣及转接齿轮箱振动测量	(46)
1.5 故障原因	(46)
1.6 排查措施	(46)
1.7 措施验证	(47)
1.7.1 中间轴承温度监控	(47)
1.7.2 故障复现情况	(49)
案例 2：传动杆共振失效故障	(50)
2.1 故障现象	(50)
2.2 结构介绍	(50)
2.3 故障定位	(51)

2.4	故障排查	(51)
2.4.1	设计及工艺复查	(51)
2.4.2	临界转速计算	(51)
2.5	故障原因	(52)
2.6	排故措施	(52)
2.7	实施方案及措施验证	(52)
2.7.1	方案1: 阶梯轴方案	(52)
2.7.2	方案2: 阶梯轴加阻尼方案	(53)
2.7.3	方案3: 限幅轴承方案	(53)
2.7.4	方案4: 短轴方案	(54)
2.7.5	方案选取	(54)
案例3: 中央传动杆花键磨损故障		(55)
3.1	故障现象	(55)
3.2	结构介绍	(57)
3.3	故障定位	(59)
3.4	故障排查	(60)
3.4.1	设计复查	(60)
3.4.2	磨损花键理化分析	(60)
3.4.3	花键强度校核	(61)
3.5	故障原因	(63)
3.6	排故措施	(63)
3.7	措施验证	(64)
案例4: 飞机附件传动机匣传动杆花键磨损故障		(65)
4.1	故障现象	(65)
4.2	结构介绍	(66)
4.3	故障定位	(66)
4.3.1	故障树	(66)
4.3.2	类似故障对比分析	(67)
4.4	故障排查	(67)
4.4.1	设计复查	(67)
4.4.2	花键挤压强度校核	(67)
4.4.3	传动杆临界转速估算	(68)
4.4.4	两端相配内花键之间同轴度分析	(68)
4.4.5	传动杆角向偏斜量分析	(68)
4.4.6	花键硬度复查	(68)
4.4.7	装配复查	(69)
4.5	故障原因	(70)
4.6	排故措施	(70)
4.7	措施验证	(71)