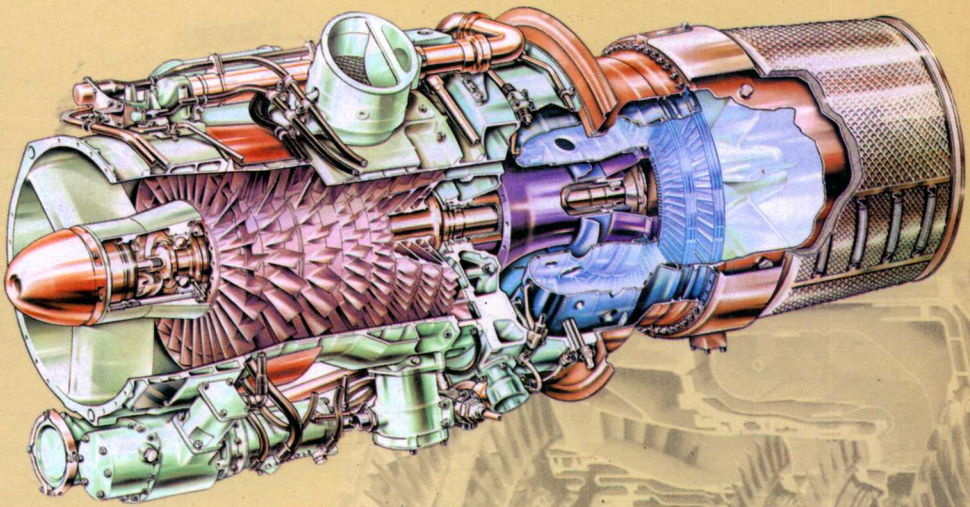




航空燃气涡轮发动机 机械系统设计

林基恕 编著



航空工业出版社

中国一航沈阳发动机设计研究所赞助出版

航空燃气涡轮发动机 机械系统设计

林基恕 编著

航空工业出版社

内 容 提 要

本书简要地介绍了航空燃气涡轮发动机机械系统的发展历史、现状及未来发展动向,并全面、系统地介绍了机械系统所包括的发动机主轴滚动轴承、主轴承腔、滑油冷却系统与其中的组件、附件传动系统和密封装置,以及密封增压系统的设计研究内容、设计方法、主要的设计考虑与设计准则等,并给出上述内容所涉及的基础知识与应用实践等,以形成航空发动机技术发展大系统的完整概念。

本书内容较全面。对从事航空航天事业的专业人员和领导层,可通过此书全面了解发动机机械系统。对于从事机械系统设计研究的人员,此书介绍了这个专业应掌握的基本知识。本书也可作为航空高校航空发动机专业的补充教材,以及作为一般理工高校机械系教材的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空燃气涡轮发动机机械系统设计 / 林基恕编著.

北京:航空工业出版社,2005.6

ISBN 7-80183-582-4

I. 航... II. 林... III. 航空发动机:燃气轮机—
机械系统—系统设计 IV. V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 023603 号

航空燃气涡轮发动机机械系统设计

Hangkong Ranqi WoLun Fadongji Jixie Xitong Sheji

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话:010-64919539 010-64978486

北京云浩印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经售

2005年6月第1版

2005年6月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:15.75

字数:400千字

印数:1—2000

定价:48.00元

作者简介

林基恕 男,1936年11月生,辽宁省大连市人。1960年北京航空学院发动机系毕业。中国航空工业第一集团公司沈阳发动机设计研究所研究员、中国航空学会动力专家会员、中国机械工程学会摩擦学分会名誉委员、北京航空航天大学兼职教授。40多年来一直从事航空发动机传动润滑专业设计与试验研究工作。曾担任沈阳发动机设计研究所传动润滑研究室主任、国家重点两个发动机型号的主任设计师和“航空发动机动力传输航空科技重点实验室”学术委员会主任。主持过多种型号航空发动机传动滑油系统设计、试验和技术攻关;开展过十多项预先研究课题;建成了门类齐全、功能完善的10多台试验设备并设计了相应的测试手段。历经40多年的设计、试验和研究工作,取得了一系列具有国内领先水平的科研成果,部分成果达到国际先进水平,确立了国内同行技术领先的地位。1998年9月,以传动润滑研究室为主体的“航空发动机动力传输航空科技重点实验室”挂牌运行。自1980年以来,在航空发动机研制和预研中荣获部级一等奖一次、二等奖四次、三等奖两次,获得国家级、部级科技进步奖10余项,发表学术论文40余篇。1992年享受国家政府津贴。



1999年12月退休,2002年11月离开工作岗位。

序

正值我们欢庆建国 55 周年的日子里，收到本书作者林基恕同志的来信和书稿，信中并嘱托为本书写序。作为自航空工业开创伊始就从事航空发动机研制工作的老兵，又愧为早期研制工作的基层技术领导，粗读书稿以后，十分钦佩本书作者在航空发动机机械系统的设计研究工作多年不被各级领导重视的情况下，在机械系统设计具有内容复杂、难度大、减重困难、使用维护故障多、可靠性要求高的特点，孜孜不倦地做了大量的开拓创新工作。在作者及有关同志的努力下，1980 年沈阳发动机设计研究所组建了传动润滑研究室，1998 年成立“航空发动机动力传输航空科技重点实验室”。经过 20 多年的艰苦努力，在航空发动机机械系统研发工作上取得显著成绩，为保证型号研制作出了贡献。

本书作者为扭转航空发动机机械系统设计不被重视的局面，提出急需出版全面介绍这方面系统的书。作者在信中特别指出“本书意在填补这个空白，能达到宣传推动作用，让后来人了解、认识并发展这个专业，以适应我国航空发动机研究的需要。”我完全赞成和支持作者写书的美好意愿，在当今世界科技日新月异地发展的年代里，亡羊补牢，时尤未晚。

本书是根据作者从事航空发动机机械系统设计的 40 多年科研实践经验和体会，并收集和积累本专业的资料，扼要地把航空发动机机械系统加以介绍，特别是本书中的第 1 章，首先介绍机械系统的发展历史、现状及主轴滚动轴承、滑油系统、附件传动系统、主轴承腔密封及二次流用密封等的关键研究发展趋势和电磁轴承与相关技术最新动态，进行了扼要的评述，可使读者了解 21 世纪航空发动机机械系统研究发展的新动向。

在第2、3、4、5章中，作者以设计基础技术为重点，分别论述主轴滚动轴承、滑油系统、附件传动系统及航空发动机密封技术，对其类型、主要设计方法、推荐设计准则、设计过程中最容易出现的技术难点，重点加以介绍；并列设计实例、试验方法、使用中故障等，均根据作者从事机械系统设计的经验和收集国内外新老型号发动机机械系统实例作了介绍和评价，特别在“航空发动机密封”一章中，阐述了航空发动机密封设计的特点及新型动密封、刷式密封、密封材料等。书中收集了近年来较先进的机械系统资料，奉献给广大的读者。本书的出版也使高等院校获得航空发动机机械系统设计的新教材。我们深盼此书早日出版，以使读者了解和认识航空发动机机械设计这门专业知识，并提高研制水平，得到各级领导的重视和支持，为我国航空发动机研制发展再立新功。



2005年6月

前 言

航空燃气涡轮发动机机械系统属于发动机技术发展的一个大系统，到目前为止仍以机械传动和润滑为主，包括发动机主轴滚动轴承、主轴承腔、滑油冷却系统与组件、主轴承腔密封装置及密封系统、附件传动系统等设计与试验研究。

航空发动机发展固然以各大气动部件的技术进步为代表，但也要求机械系统与之发展相适应。先进燃气涡轮发动机高的压比、高的涡轮燃气进口温度、高的主轴转速及严格的空限制，要求机械系统在高温、高速、重负荷、轻重量、激烈的状态变化、紧凑的空限制、长寿命和高可靠性下完成其功能，机械系统给发动机设计与研制带来了大量的不同于一般机械学的技术难题，设计上受到日益尖锐的挑战，是影响发动机可靠性、安全、寿命和性能的重要研究领域，也是制约发动机发展的关键技术。

航空发动机技术领先的国家，都有机械系统技术发展专门的研究中心和相应的队伍，各设计集团都有较强的机械系统设计力量，如美国 NASA 的动力传输研究室、普惠公司发展部轴承密封分部等。他们都认识到，可能用于航空发动机的机械元件与系统的发展要及早立项与研究。一项先进技术，从概念到实用往往要经历漫长的时间，如陶瓷轴承早在 20 世纪 50 年代就着手探索，近十年来在技术上有所突破，才开始进入航空发动机的应用实践。60 年代 NASA 提出流体气膜密封技术的发展计划，虽在民用工业上早有应用，但应用于航空发动机才刚刚开始。发动机主轴高速滚动轴承，美国从 1959 年开始立项研究，历经 30 余年才取得今天的应用实践成果。在我国，除沈阳发动机设计研究所外，其他各航空发动机科研院所都没有设立独立的研究室。各航空高等院校，也没有开设航空发动机机械系统方面的课程。致使这些技术不被人们所了解和重视，处于可有可无的被动状态。特别在领导层，还没形成机械系统与发动机各气动部件是同样重要的概念。所以，在制定发展计划、资金投入等方面常常被忽视。

推重比 8 一级先进航空发动机的研制实践表明，只有在基本发动机的早期设计计划中就包括机械系统方案，才能使发动机动力传输设计得先进、完美，才能有与大部件同步发展的技术需求和发展规划。美国普惠公司在 20 世纪 70 年代初开展了先进附件传动技术研究，在发展 F100 系列发动机过程中，采用了混合传动方案的经验证明了这一点。美国 IHPTET（综合高性能涡轮发动机技术）计划按压气机系统、燃烧室/加力燃烧室、涡轮机、排气喷管、控制系统和机械系统六大部件实施，更是促进了机械系统的发展。但以往的做法是，在基本发动机的早期设计中不考虑机械系统方案，只注重大部件的发展，从而忽视了一些有希望采用的先进机械元件与系统的开发，影响了机械系统技术的发展计划和资金投入，致使这方面的研究落后于其他大部件的发展。对此，我们应引以为鉴。

我国航空发动机的研制还处在低水平状态，虽然已从仿制走上了自行研制的道路，但走起来困难重重。沈阳发动机设计研究所自 1980 年重新组建传动润滑研究室以来，在从业人员的艰苦创业和不懈努力下，随着型号研制的需求和预先研究的开展，机械系统有了很大的发展：建成了配套齐全的各类试验设备并设计了相应的测试手段，培养和造就了一支专业科技队伍；历经几十年的刻苦钻研，在专业的广度和深度上拓展，不仅满足了发动机型号研制的需要，还取得了一大批高水平的预研成果。“航空发动机动力传输航空科技重点实验室”在沈阳发动机设计研究所的挂牌运行，标志着这个专业的发展达到国内领先水平，得到了发动机行业的认可。所从事的航空发动机机械系统设计与试验研究，尽管经验有限，整体水平与国际先进水平相比尚有差距，但终归走出了自行发展的路子。我们曾把这些经验与方法加以汇总，编成了《航空发动机设计手册》第 12 册·传动及润滑系统，但手册定为“秘密”级，接触和使用范围有限。

航空发动机机械系统不被人们所认识，其中原因之一是全面地、系统地阐述这个专业的资料极少，航空高校没开设这门课程，专业宣传不够，到目前还没有一本全面阐述这个专业的书籍。因此，不清楚机械系统是什么，难于形成机械系统是发动机技术发展的一个大部件的概念，机械系统似乎就是几个齿轮和轴承，只是一些较为零乱的、

杂乱无章的工程设计内容。实际上，机械系统是发动机结构的基础，是一门技术高深的机械学科，在发动机设计时从里到外，从前到后，设计内容多、难度大，减重困难，使用维护麻烦，要求可靠性高，且与其他大部件关联协调多。机械系统所面临的任务，更需要知识面广、有坚实的工程设计能力和孜孜不倦的探索精神，才能很好地完成。根据自己多年从事这个专业的体会，这个行业在国内不够受重视，技术力量较薄弱，存在着很多的技术空白，设计上有很多盲目性，确实是一个亟待开发和具有发展潜力的领域。随着航空燃气涡轮发动机技术的日益发展，涉及这个专业的技术难题越来越多，但又没有现成的设计方法和成熟的设计分析技术可用。因此，从业者必须潜心、刻苦、开拓，不断地充实知识面，具有多学科、跨学科的理论，才能面对工程设计上的挑战。本书的目的，就是把几十年来收集和积累的一些专业资料和工作中的经验与体会，汇集起来，扼要地把航空燃气涡轮发动机机械系统设计的内容、主要的设计考虑与设计准则、所涉及的基础知识与应用实践等，力求全面、系统地加以介绍，让人们初步了解和认识这个专业。对从事这个专业的人员来说，本书介绍了进入这个行业的基本知识。呼吁航空高校尽快开设这门课程，能培养出专业方面的人才。寄希望于未来的年轻人，相信他们定会使这个专业大发展，更繁荣。

在此，我要特别感谢陈国林、杨九高、常春江、战明学等一批默默无闻、终生奋斗在发动机机械系统发展战线，并作出很大贡献的同仁们，他们不愧是我国航空燃气涡轮发动机机械系统发展的开拓者。

我的老师——北京航空航天大学陈光教授，不仅积极参与机械系统的发展工作，还给我们提供很多有用的资料和指导，并主动担任本书的审校，提出许多宝贵意见，对此我致以学生的敬礼。同时，感谢吴老为本书写序和给予我们的鼓励。

本书算是我们从事这个专业一辈子所剩残烛的一点光亮吧。

谬误之处，敬请指正。

林基恕

2004年10月

目 录

第1章 航空燃气涡轮发动机机械系统的发展	
1.1 机械系统是航空燃气涡轮发动机技术发展的六大部分之一	(1)
1.2 机械传动的技术发展	(2)
1.2.1 主轴滚动轴承	(2)
1.2.2 滑油系统	(4)
1.2.3 附件传动系统	(6)
1.2.4 主轴承腔密封	(9)
1.2.5 二次流用密封	(10)
1.3 电磁轴承与相关技术的发展概况	(11)
1.4 我国航空发动机机械系统预研与发展	(12)
第2章 航空燃气涡轮发动机主轴滚动轴承	
2.1 主轴承类型	(15)
2.2 主轴承设计	(16)
2.2.1 设计过程	(17)
2.2.2 设计准则与设计考虑	(18)
2.2.3 轴承径向工作间隙控制	(22)
2.2.4 轴承打滑蹭伤	(23)
2.2.5 弹性流体动力润滑(EHD)	(26)
2.2.6 轴承材料	(27)
2.3 定位球轴承设计实例	(28)
2.4 轴承的计算分析	(37)
2.5 轴承试验	(40)
2.6 轴承失效	(42)
2.7 轴承寿命	(45)
2.8 高速滚动轴承疲劳寿命的计算方法	(47)
2.9 主轴轴承使用寿命的确定	(52)
3.4 循环系统设计	(61)
3.4.1 循环系统组成	(61)
3.4.2 航空滑油	(63)
3.4.2.1 概述	(63)
3.4.2.2 滑油性能	(65)
3.4.2.3 滑油使用限制	(65)
3.4.2.4 滑油发展	(66)
3.4.2.5 我国常用滑油	(67)
3.4.3 滑油系统容量和循环量与滑油箱	(67)
3.4.3.1 滑油系统容量	(67)
3.4.3.2 滑油系统循环量	(67)
3.4.3.3 滑油箱	(68)
3.4.4 滑油供油和回油	(71)
3.4.4.1 滑油供油	(71)
3.4.4.2 滑油回油	(71)
3.4.4.3 滑油泵	(72)
3.4.5 滑油系统通风与除油器(离心通风器)	(74)
3.4.6 滑油过滤与过滤器	(77)
3.4.7 滑油冷却	(79)
3.4.7.1 需滑油导出的热量	(79)
3.4.7.2 滑油散热器	(79)
3.4.8 滑油除气与除气器	(81)
3.4.9 满足飞行姿态要求	(83)
3.4.10 防虹吸	(85)
3.4.11 滑油消耗量	(85)
3.4.12 腔区与系统排放	(86)
3.4.13 滑油系统设计的通用要求	(87)
3.4.14 几种型号航空发动机滑油系统图	(88)
3.5 应急滑油系统	(99)
3.6 主轴承腔设计	(99)
3.7 滑油系统的计算分析	(101)
3.8 滑油系统的状态监测	(104)
3.8.1 滑油系统工作参数监测	(104)
第3章 滑油系统	
3.1 概述	(57)
3.2 开式系统	(58)
3.3 循环系统类型	(59)

3.8.2 滑油中屑末监测 (105)

3.8.3 滑油状况监测 (109)

3.9 滑油系统试验 (110)

3.10 滑油系统的使用与维护 (112)

3.10.1 一般技术维护 (112)

3.10.2 加注滑油 (113)

3.10.3 滑油消耗量测定 (113)

3.10.4 放滑油 (113)

3.10.5 常见故障及其诊断 (113)

第4章 航空燃气涡轮发动机附件传动系统

4.1 传动附件的种类 (118)

4.2 设计要求与准则 (118)

4.3 齿轮箱式附件传动系统 (119)

4.3.1 中央传动装置 (119)

4.3.2 附件传动机匣 (121)

4.3.3 低压传动装置 (123)

4.3.4 传动系统图和附件传动安装座性能表 (124)

4.4 混合式附件传动系统 (126)

4.5 飞机附件传动机匣 (127)

4.6 附件传动系统的未来发展 (127)

4.7 附件传动齿轮 (128)

4.7.1 轮齿参数的一般设计原则 (129)

4.7.2 齿轮结构设计考虑 (129)

4.7.3 齿轮支撑设计 (131)

4.7.4 传动齿轮强度与振动 (134)

4.7.5 附件传动齿轮的润滑 (140)

4.7.6 航空燃气涡轮发动机附件传动齿轮典型故障 (140)

4.7.7 附件传动齿轮材料 (144)

4.8 传动杆 (145)

4.8.1 设计考虑与准则 (145)

4.8.2 传动杆的设计计算 (146)

4.9 膜盘联轴器 (147)

4.9.1 膜盘联轴器的结构和一般设计要求 (147)

4.9.2 膜盘面 (149)

4.9.3 膜盘设计 (150)

4.9.4 膜盘联轴器试验 (152)

4.10 双速传动装置 (152)

4.10.1 工作原理 (152)

4.10.2 滚棒离合器结构设计 (154)

4.10.3 棘轮离合器结构设计 (156)

4.10.4 离合器主要材料 (157)

4.10.5 试验修正 (158)

4.11 传动机匣壳体 (158)

4.11.1 传动机匣壳体的设计准则与要求 (158)

4.11.2 传动机匣壳体材料 (159)

4.11.3 附件传动机匣壳体的典型结构 (159)

4.12 附件传动机匣的安装结构 (161)

4.13 附件传动系统试验 (164)

第5章 航空燃气涡轮发动机密封

5.1 航空燃气涡轮发动机采用密封的主要部位 (168)

5.2 主轴承腔滑油密封装置的类型 (170)

5.3 主轴承腔滑油密封的密封系统 (170)

5.4 主轴承腔密封的设计原则 (183)

5.5 典型航空燃气涡轮发动机主轴承腔密封系统举例 (186)

5.6 静密封 (188)

5.7 动密封 (191)

5.7.1 非接触式密封 (191)

5.7.1.1 篦齿密封 (191)

5.7.1.2 浮环密封 (194)

5.7.1.3 液力密封 (195)

5.7.2 接触式密封 (196)

5.7.2.1 端面密封 (196)

5.7.2.2 圆周密封 (202)

5.7.2.3 弹性开口环密封 (207)

5.8 新型动密封 (212)

5.8.1 流体动压气膜密封 (212)

5.8.1.1 流体动压端面密封 (212)

5.8.1.2 流体动压圆周密封 (214)

5.8.2 流体静压气膜密封 (215)

5.8.3 刷式密封 (218)

5.8.3.1 刷式密封基本结构与特性 (218)

5.8.3.2 刷式密封的结构设计 (219)

5.8.3.3 刷衬密封 (222)

5.8.3.4 刷式密封在航空燃气涡轮发动机上的应用 (222)

5.9 密封材料 (225)

5.9.1 摩擦副材料 (225)

5.9.1.1 基本要求 (225)

5.9.1.2 摩擦副常用碳石墨密封材料·····	(227)	5.9.2.3 聚四氟乙烯·····	(233)
5.9.1.3 工程陶瓷·····	(230)	5.10 航空发动机密封试验·····	(233)
5.9.1.4 硬质合金·····	(231)	5.10.1 摩擦副组对材料选择试验·····	(233)
5.9.1.5 金属·····	(231)	5.10.2 主轴承腔密封试验·····	(234)
5.9.2 辅助密封材料·····	(231)	5.10.3 刷式密封试验·····	(235)
5.9.2.1 合成橡胶·····	(232)	参考文献 ·····	(237)
5.9.2.2 高温辅助密封材料·····	(233)		

第 1 章 航空燃气涡轮发动机 机械系统的发展

1.1 机械系统是航空燃气涡轮发动机 技术发展的六大部分之一

美国 IHPTET 计划划分为压气机系统、燃烧室/加力燃烧室、涡轮机、喷管、操纵系统和机械系统六大部分，其中之一的机械系统，我们称为动力传输系统，或传动与润滑系统，它的技术内容包括：发动机主轴轴承(含减振阻尼装置)、滑油系统与组件、主轴承腔、主轴密封增压系统与密封装置、中央传动与外部齿轮箱等设计与试验研究。机械系统是发动机结构的基础，功能多、构件分散、维护麻烦、故障率高，是影响发动机可靠性、安全性、维护性、性能和寿命的重要研究领域。

机械系统传动效率高，百年来从活塞式发动机开始采用，一直延续至今。燃气涡轮发动机随着增压比、涡轮进口燃气温度和转子速度的不断提高，使得发动机内流系统温度和压力相应提高，给传动机械带来日益苛刻的工作条件。人们一直在努力地探索与研究新的机械元件、新的润滑材料、新的密封技术等，以适应发动机技术的不断发展。一个机械元件从概念到实际应用往往需要漫长的时间，如陶瓷轴承、气膜密封、高温润滑剂等都是五六十年代就立项研究的，直到近些年才开始在发动机上应用。高速滚动轴承美国从 20 世纪 50 年代末就开始“高 DN 值轴承疲劳研究”的计划，持续了 30 多年才取得如今的应用实践成果。机械系统预研必须先行，通常先在民用工业上应用，如陶瓷轴承、气膜密封、铁谱分析等，再进一步提高，才能进入航空燃气涡轮发动机苛刻的应用领域。

早期发动机设计，通常是先设计基本发动机(压气机、燃烧室、涡轮)，之后往里添加传动、润滑、密封等部分，并含糊地称为“附件”，使得发动机总体结构设计得不好，重量增加。根据国外推重比 8 一级先进发动机的研制经验，必须在发动机研制的早期就包含机械系统方案，才能把发动机设计得先进。如美国普惠公司 F100 发动机，采用了先进的附件传动技术，尽量把传动附件置于发动机体内，大功率加力燃油泵由空气涡轮驱动，不加力时可实现零转速，解决了燃油温升问题。不仅重量轻，发动机迎风面积也很小。

高推重比、低油耗、高可靠性和长寿命是现代先进燃气涡轮发动机技术要求的标志。这必然使机械系统在高速、高温、重负荷、激烈的状态变化和高可靠性长寿命下完成其功能，传统的机械传动设计日益难以应对。机械系统所完成的功能与构件，在发动机结构中较为分散，从前到后，从里到外，结构设计内容多，与很多构件相关联，在技术上需反复协调，需合理地折中利弊。随着发动机技术的发展，遇到很多新问题，不仅需要新的构件设计，还需

要新的设计方法和分析技术。机械系统越来越多地涉及到多学科、跨学科领域的知识,需要探索与求是。在很多方面遇到的是新问题或没人深入涉足的方面,因此没有成熟的资料 and 现成的方法。另外,设计的计算分析难度很大,如轴承腔内油气两相流动、系统热分析、轴承腔内滑油结焦与着火、主轴承工作拖动力模型等。与发动机其他大部件相比,机械系统设计更缺乏成熟的设计分析技术,尤其是系统中采用的各组件往往使用了多年却不知是如何设计的。很多方面还是靠对比分析和经验,机械系统尚存在许多理论与实践上的盲目性。

由于我国航空发动机长期处于仿制阶段,自行研制的水平不高,人们似乎对机械系统是发动机技术发展的一个大部件认识不足。这可从各航空高校和发动机各科研院所的专业设置和专业技术实力上看出。因此,在研究发动机发展规划、考虑各专业发展计划、安排预先研究等方面往往被忽视或排不上队。

沈阳发动机设计研究所于1980年重新组建了传动润滑设计研究室,明确了专业分工和专业发展,把产品设计与试验研究结合起来。经过几十年来的努力,从产品设计的需求和自己工作的实践体会,重新认识了这个专业的重要性,并在专业的深度和广度上有了一定的探索与深入,在预研和型号研制上取得了很大的技术进展。一批预研成果获得部级科技进步奖,并已用于型号发展中。研究室积极创造条件,建成了国内一流、齐全配套的机械传动试验设备,开创了这个专业的发展与繁荣,受到发动机行业的青睐与重视。1998年9月,“航空发动机动力传输航空科技重点实验室”挂牌运行,表明了机械系统在航空发动机研制中的地位得到了认可。

然而由于实验室没有专门的经费支持,领导对机械系统又不够重视,重点实验室美好的愿望难以实现和继续发展。随着老技术人员的退休,专业实力正在滑坡。

其他院所目前没有建立专业研究室,也未形成专业实力。航空各高校也未开设这个专业的课程,未来人才供应贫乏。这种状况,极不适应我国航空发动机研制的需要,应引起全行业的关注并给予积极的支持。

1.2 机械传动的技术发展

机械传动技术,百年来随着航空燃气涡轮发动机发展的需要而发展,概括起来有以下几个方面。

1.2.1 主轴滚动轴承

随着航空涡轮发动机的技术发展,要求发动机主轴滚动轴承材料和润滑剂能在高温、高速和重载下工作。技术先进的国家都在滚动轴承试验和研究上下功夫。美国于20世纪50年代末,就预测未来发动机主轴承工作速度达 $3.0 \times 10^6 DN$ 值(轴承内径(mm)与轴速(r/min)之乘积),NASA于1959年开始了“高 DN 值轴承疲劳研究”,该计划包括试验计划和分析计划。70年代又将圆锥滚子轴承和小内径轴承的研究也列入到该计划中。通过几十年广泛的研究分析和大量的试验,获得的结果如下:

(1) 球轴承和圆锥滚子轴承已分别能够达到 $3.0 \times 10^6 DN$ 值和 $2.4 \times 10^6 DN$ 值的工作速度。其疲劳寿命均超过民用机通常能达到的程度。

(2) 航空燃气涡轮发动机滚动轴承的使用温度已从 176.7°C 提高到 315.6°C ，且可靠性有一定的提高。

(3) 发展并试验验证了滚动轴承分析和设计用计算机程序如 COMB、SHABERTH 等。

(4) 确立了所用的轴承钢和润滑剂的工作性能。

(5) 在高速下，环下润滑方式优于传统的喷射润滑方法。

(6) 使用双真空熔炼(VIM-VAR) AISIM50 钢的轴承寿命约为单真空(CVM) AISIM50 钢的 7 倍。

(7) 用 CBS-1000M 材料制作，在 DN 值为 2.4×10^6 速度下的圆锥滚子轴承，其寿命约为预测寿命的 24 倍。

(8) 润滑剂满足 MIL-L-23699 军用规范要求，可为 DN 值 3.0×10^6 工作速度和 218.4°C 温度下的工作轴承，提供足够的弹性流体动力润滑膜。

这些发展计划的成果，奠定了航空发动机主轴滚动轴承的应用基础，不断提升着先进航空燃气涡轮发动机主轴滚动轴承的应用实践水平。

20 世纪 70 年代航空燃气涡轮发动机在外场的使用故障中，高速圆柱滚子轴承滚子端面偏心磨损已占很大比例。当时发展高速滚子轴承技术遇到的主要问题是滚子的歪斜和打滑，在理论上还认识不清楚。美国普惠公司在美国海军及空军协同下，于 1975 年至 1980 年间为考察高速圆柱滚子轴承影响歪斜与打滑的 30 个独立变量，在分析的基础上，用内径 124mm 的滚子轴承(TF30 发动机 5 号轴承)，在 DN 值 $(1.0 \sim 3.0) \times 10^6$ 条件下进行大量的试验研究，以评价出轴承的几何尺寸、容差、设计与运转参数对轴承打滑、滚子歪斜及磨损特性的影响。设计了三组共 21 种轴承，评价了 18 个主要的独立变量。后来又设计了第四组包括 6 种独立变量的轴承，重复进行了 4 种重要轴承参数的试验。试验结果给出了高 DN 值下滚子轴承的性能，其磨损的回归和相关分析，揭示出高 DN 值滚子轴承选择设计参数的重要趋势为：

(1) 滚子转接(拐角半径)半径跳动是最主要因素，相当于滚子动力学不平衡度，在轴承设计时应尽可能小，取 0.02mm 以下。

(2) 滚子与引导挡边间隙是重要的影响因素，设计时取所评价的中间值，即 0.05mm 。

(3) 滚子的长/径比设计时应取较小值，即 0.77 。

(4) 滚子端面对外径跳动和内圈挡边高度可以维持在所评价的最大值，即 0.0045mm 和滚子直径的 30%。

(5) 预载 227kg 的试验轴承在所有试验转速下，滚子均不打滑。不预载或轻载 (68.1kg) 轴承，滚子打滑出现在 DN 值 $(1.0 \sim 2.5) \times 10^6$ 范围内， DN 值 2.0×10^6 打滑度最大。 DN 值 2.7×10^6 以上滚子不打滑。在所有试验条件下，滚子打滑均未引起轴承出现有害的热效应，也未产生目视可见的打滑蹭伤和损坏。

这些试验结果，解决了困扰高速圆柱滚子轴承发展的关键技术问题，用于高 DN 值滚子轴承设计，可以解决高速圆柱滚子轴承打滑和歪斜问题。

根据现代发动机外场使用统计，疲劳剥落已不是轴承失效的主要问题，表面损伤和腐蚀等引起的始于表面的表面疲劳占总失效率的大部分。从工程角度看，外场典型的始于表面的损伤，归为五类：磨粒磨损、打滑损伤、压痕、大碳化物及腐蚀。损伤似乎按“鳞剥”机理发展，鳞剥层约 $100\mu\text{m}$ ，最终导致剥落。

经典的次表面疲劳理论目前仍指导着轴承设计，但计算中的随意性和验证试验的巨大工

作量常使人感到困惑。发展新的轴承设计方法是轴承长寿命、高可靠性的有力保证,有关轴承使用寿命的研究仍是个亟待解决的研究课题。

在 3.0×10^6 DN 值轴承试验中偶然出现的内环瞬时断裂,经分析和进一步试验得出结论:高 DN 值下由于离心负荷大,轴承内环与轴又是过盈配合,使内环周向应力加大,是全硬轴承钢对裂纹敏感所致。为此,对高 DN 值轴承,须改进轴承材料的断裂韧性,并发展断裂力学计算方法。美国 GE 公司推出了具有良好断裂特性的渗碳钢 M50NIL,已投入使用。M50NIL 除了提高断裂韧性外,其表面残余应力为压应力(-350MPa),提高了轴承的使用寿命。如果表面镀铬(M50NIL TDC),则其抗表面鳞剥能力大大提高,使用寿命比 M50 会大幅提高。研制一种渗碳但又含 13% 铬的不锈钢材料是今后的发展方向。

陶瓷轴承研究取得了实用性进展,用铁基合金跑道和氮化硅滚动元件组成的轴承和全陶瓷轴承均进行了全尺寸试验,显示出很大的发展潜力,已进入应用阶段。

美国 IHPTET(综合高性能涡轮发动机技术)计划第 II 阶段提出,耐 316℃ 液体润滑剂和耐 816℃ 有限寿命轴承的目标,对聚苯醚、全氟烷醚及混合陶瓷/轴承钢轴承进行了研究。在 JETEC(联合一次性使用涡轮发动机方案)发动机上使用了带有氮化硅滚动元件的无保持架止推轴承,用燃油雾润滑冷却,在 47000r/min 下进行 10h 循环运转。气相润滑和固体润滑方式有望取消润滑系统,又能极大地降低对昂贵液体的需要。

DN 值 3.3×10^6 、滑油温度 399℃、重量减轻 20%、生产费用降低 20%、维护费用降低 10% 的 IHPTET 第 III 阶段目标,实现的路途尚很遥远。验证 306℃ 润滑剂和陶瓷轴承的第 II 阶段目标,高的单位费用仍是个难以解决的问题。

轴间滚子轴承工作间隙控制受安装配合、支撑结构、温度场变化等多因素的影响。现代先进发动机轴间滚子轴承打滑蹭伤故障时有发生。对于主轴承安装配合、轴承工作间隙控制、轴承使用寿命等一类难以分析处理的向题,成熟发动机的使用经验和各设计集团的诀窍,仍是最为实用的解决办法。

虽然主轴承设计在理论和实践上还有不少待解决的向题,由于冶金、加工、滑油冷却、润滑剂、滑油过滤及状态监测等技术的不断进步,主轴滚动轴承在 DN 值 $(2.4 \sim 3.0) \times 10^6$ 、工作温度 316℃ 下能可靠地工作,使用寿命达几千至上万小时,基本满足军用机、民用机的使用要求。

1.2.2 滑油系统

润滑剂的性能对先进发动机设计有很大影响。目前先进涡轮发动机规范均规定使用符合美军标 MIL-L-7808J 和 MIL-L-23699C 的滑油,这类酯类滑油几经改进,其热性能为:

主体油氧化安定性为 160~180℃;

热点稳定性温度不超过 400℃;

自燃温度欧盟有人给出为 320℃,美国人测得的温度为 370~420℃;

蒸发性在最高主体油温度(180℃)时的蒸气压范围为 13~133Pa。

由于滑油这些热性能的限制,致使先进发动机设计,不得不采用较冷空气环绕轴承腔,热区轴承腔采取热防护与隔热措施;选用高性能密封装置;要综合考虑密封增压空气等。这不仅增加了发动机结构的重量和冷却空气量,同时用于冷却的滑油流量也很大,使滑油系统组件重量难以降低。先进发动机即便采取了这些措施,热区轴承腔滑油结焦现象也在所难免。因此,滑油系统在发动机初步设计阶段要进行滑油系统热分析,按初步设计的结构和飞

行典型任务,计算出典型点系统所需的滑油流量、燃油/滑油温度水平、轴承腔内气体温度与壁温分布、轴承、齿轮工作温度等,以审视润滑剂和各构件是否超过工作极限,以便选择合适的轴承腔冷却空气、密封增压空气及热区轴承腔防护隔热措施等。同时还要顾及密封装置泄漏、密封增压系统与轴承腔通风的影响,保持轴承腔压不低于滑油泵进口最低压力,不高于密封增压空气压力,并尽量减少通风量以减少滑油的使用消耗。这种计算要反复迭代,以求在结构、重量方面得到最佳的折中。热分析方法至今虽然还不完善,要想得到实用的计算结果,必须以技术较成熟的发动机作为对比分析的基础。

润滑剂严重地制约着先进发动机的发展,美国 IHPDET 计划第 I 阶段为了减重和满足飞行任务的要求,提出研制 330℃ 液体润滑剂,其主要热性能指标是:

- (1) 主体油氧化温度 330℃;
- (2) 热点安定性 510℃;
- (3) 自燃温度 649℃;
- (4) 在 330℃ 时蒸气压为 267Pa。

如果采用这种高温润滑剂,热区轴承腔、轴承、支座等不需要热防护与隔热,无需冷却空气,滑油流量亦可减少至目前发动机的 50%。整个机械系统可减重 12%,满足了 IHPDET 计划第 II 阶段减重 10% 的要求。美国普惠公司为了兼顾 IHPDET 计划第 III 阶段任务要求的润滑剂最低温度能力,进行了 360℃ 液体润滑剂的研制。

发展高温润滑剂,人们进行了几十年广泛的探索与研究,使用油温 260℃ 和 316℃ 的规范 MIL-L-27502 和 MIL-L-87100 早已制定,但目前还没有油品能全面满足要求。美国研制聚苯醚和全氟烷醚,高温性能已达到要求,如可在 300~360℃ 下工作的聚苯醚油,早已在仅有的几架 SR71 高空侦察机 J58 发动机上使用,但高至 4℃ 的注点,使用时需用三氯乙烯稀释。这类油当前的价格也很高,使用费用问题很难解决。

对酯类油在高温性能方面还在进一步地挖潜,已取得了一些成效,如 IHPDET 计划第 I 阶段研制出符合 MIL-PRF-7808L 第三级和第四级的润滑油,能承受较高温度而不结焦,已用在推重比 10 发动机 F119 上。

绝大多数航空燃气涡轮发动机多采用循环滑油系统,系统设计通常取决于设计部门的经验和发动机本身的结构特点,但必须包括供油、回油通风和滑油散热三方面的功能,对一些特定用途的发动机有一些新颖的系统结构,如 JT15D 发动机滑油系统靠油池腔压和合适的管径实现回油与通风,J85、CF6、CFM56 等发动机利用转轴中心通风,省掉外部通风管。近年来日益重视利用滑油系统来发现或预测传动零件的故障,在系统的各回油路上设置油滤和磁塞,地面维护时取油样进行滑油光谱和铁谱分析,以便在维护时发现故障。美国 IHPDET 计划已研制出联机滑油状态监视系统,使用小而价格低的传感器检测滑油中的磨损颗粒、油性能退化和污染,代替昂贵且费时的脱机滑油分析方法。

20 世纪 70 年代初美国曾针对提高发动机生存能力、降低滑油系统易损性,提出了一些可能实用的滑油系统方案。如腔式滑油系统,把滑油系统所有关键组件如滑油箱、滑油泵、滑油滤等置于中介机匣内,以得到有效的防护。还有取消所有的外部供油、回油及通风管路,滑油在各自轴承腔内成为一个独立的循环系统,利用热管技术对滑油进行散热。这些系统的研究与应用都有一些局限性,未得到进一步的发展。

针对先进发动机,在使用 I、II 型合成滑油的制约下,为了适应发动机更高的系统温度