

含典型故障的航空发动机 整机振动分析

陈 果 尉询楷 王海飞 冯国全 李成刚 王德友 著



科学出版社

内 容 简 介

航空发动机整机振动问题严重影响现役飞机的安全性和可靠性,也制约在研发发动机的研制目标和周期。在发动机结构可靠性的故障中,整机振动方面的故障占相当高的比例,主要表现为转子不平衡、转子联轴器不对中、转子叶片-机匣碰摩、滚动轴承配合松动及滚动轴承疲劳剥落等典型故障。本书针对现代航空发动机在研制、生产和使用过程中所出现的典型故障展开研究,首先,引入耦合动力学思想,建立航空发动机转子-支承-机匣整机振动耦合动力学模型,并利用 Newmark- β 法与翟方法相结合的数值积分法进行模型求解;然后,针对各种典型故障建立故障动力学模型,并导入航空发动机整机振动模型中,利用时域数值积分方法获取机匣测点的振动信号,并进行故障特征分析;最后,建立考虑航空发动机实际结构特征的转子试验器进行故障模拟,并以此验证航空发动机整机振动建模方法和典型故障动力学模型的正确有效性。

本书可以作为航空宇航推进理论与工程学科、航空发动机维修专业的本科生、研究生和具有一定专业知识的科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

含典型故障的航空发动机整机振动分析 / 陈果等著. —北京: 科学出版社, 2024.6

ISBN 978-7-03-078037-9

I. ①含… II. ①陈… III. ①航空发动机-故障诊断 IV. ①V263.6

中国国家版本馆CIP数据核字(2024)第009960号

责任编辑: 张海娜 赵微微 / 责任校对: 任苗苗

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 图阅社

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2024年6月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2024年6月第一次印刷 印张: 28

字数: 562 000

定价: 258.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

转子动力学作为动力学的经典分支，早在 20 世纪末就已经研究得非常深入，取得了许多重要研究成果，在国内形成了诸多有影响力的研究团队，并有多部相关著作出版。作者第一次接触航空发动机整机振动与转子动力学概念是在 2005 年，当时通过学科建设项目引进了中国航空工业第一集团沈阳发动机设计研究所（现中国航空发动机集团有限公司沈阳发动机研究所）设计制造的带机匣的航空发动机转子试验器，该试验器在结构特征上与航空发动机非常相似，是研究航空发动机整机振动和故障模拟的重要试验平台，为作者后续的研究工作奠定了重要的基础。在此期间，作者有缘结识了沈阳发动机设计研究所的王德友副总师，在他的指导下，开始阅读国内外许多著名学者的著作和论文，尤其是《航空发动机设计手册（第 19 册）——转子动力学及整机振动》这本书对作者的影响最大，书中严谨的公式推导和详细的理论阐述使作者获益匪浅，让作者对前辈们严谨的治学态度和工作作风肃然起敬。从此，作者开启了在航空发动机整机振动与转子动力学领域的研究工作。

在研究方向的选择上，作者注意到当时该领域的研究工作存在几个薄弱环节，主要体现在：①大部分研究工作主要集中在转子动力学本身，而忽略了转子-支承-机匣的耦合作用和一体化建模与分析。②转子系统故障动力学建模与分析重点探讨的是故障非线性振动机理，由于所建立的转子动力学模型过于简单，无法模拟实际航空发动机的固有特性。在故障信号的振动分析中，不能直接针对机匣加速度信号进行分析并提取故障特征，而实际发动机的故障分析往往仅能依靠机匣测点的振动加速度，从而导致故障仿真结果难以应用于工程实际。③含典型故障的航空发动机整机振动分析很少有相关商用软件，通用的有限元商用软件对于航空发动机典型故障的非线性建模非常复杂，且计算效率极低，普通工程技术人员很难掌握和使用，因此，针对含典型故障的航空发动机整机振动分析，亟须开发具有自主知识产权的工程化软件。④典型故障模型未能很好地与实际航空发动机结构特征结合，研究工作偏于理论探讨，缺乏试验验证环节，难以解释航空发动机整机振动故障原因。

鉴于此，作者利用近二十年时间，针对上述几方面的问题展开了详细研究，主要如下。

(1) 针对整机振动建模方法问题，将著名车辆动力学专家翟婉明院士的耦合动

力学思想引入航空发动机整机振动, 并利用 Newmark- β 法与翟方法^①相结合的数值积分方法, 在时域直接进行模型求解, 最终实现了航空发动机整机振动响应的快速计算。原因是在车辆动力学领域, 将车辆和轨道作为一个耦合系统建立耦合动力学模型, 与在航空发动机整机振动领域将转子、支承、机匣以及安装节作为一个耦合系统建立航空发动机整机耦合动力学模型, 从理论上是相通的。该思路来源于作者在师从翟院士的攻博期间所汲取到的耦合动力学建模思想和精髓, 以及翟院士提出的高效显式数值积分方法——翟方法, 在此谨向恩师表示衷心的感谢和由衷的敬意。

(2) 针对模型真实性问题, 作者在建立航空发动机整机模型的过程先后经历了四个阶段。第一阶段为 2005~2009 年建立整机集中质量模型, 该模型将转子和机匣均简化为集中质量、惯量、刚度和阻尼, 同时, 考虑了滚动轴承的非线性作用力, 该模型主要用于转子典型故障的非线性动力学仿真, 但是难以模拟实际发动机的振动特性。第二阶段为 2009~2011 年建立整机连续梁模型, 该模型的主要特点是将转子按等截面自由梁连续模型进行构建, 并利用模态截断法进行响应求解, 其主要目的是更加逼近真实的转子系统, 然而, 该模型不仅建模复杂, 而且很难模拟真实发动机的固有特性。第三阶段为 2011~2017 年建立整机 4 自由度梁单元有限元模型, 该模型利用 4 自由度梁单元将转子和机匣进行离散, 从而建立有限元模型, 将支承系统建成含轴承外圈和轴承座的集总参数多自由度模型, 最后利用 Newmark- β 法与翟方法相结合的数值积分方法进行耦合系统动力学仿真, 该模型不仅能够模拟航空发动机整机振动固有特性, 而且也能进行多种典型故障的导入和仿真。但是, 由于该模型不能考虑轴向振动和绕轴向的扭转转动, 难以研究航空发动机主轴承的复杂载荷, 以及由转子不对中、弯扭耦合等故障所导致的轴向振动和扭转振动等复杂动力学行为。第四阶段为 2017 年建立综合考虑复杂滚动轴承模型的整机 6 自由度梁单元有限元模型, 该模型对滚动轴承进行了详细建模。首先, 建立了 5 自由度球轴承动力学模型, 推导了在 5 自由度复杂变形下的轴承力和力矩表达式; 然后, 针对圆柱滚子轴承, 利用“切片法”推导了考虑轴承径向变形、圆柱转子凸度、轴承间隙及轴承倾斜引起的角向变形等复杂因素作用下的圆柱滚子轴承的作用力; 最后, 将复杂的球轴承模型和滚珠轴承模型与 6 自由度的转子和机匣有限元梁模型结合, 建立了含复杂滚动轴承建模的航空发动机整机振动模型, 并利用数值积分方法进行了动力学方程求解, 该模型不仅能够模拟航空发动机整机振动固有特性, 而且能进行多种典型故障的导入和仿真, 同时, 也可以用于研究由转子和轴承典型故障所引发的轴向、径向和扭转振动, 以及由

^① Zhai W M. Two simple fast integration methods for large-scale dynamic problems in engineering. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1996, 39 (24): 4199-4214.

机动飞行导致的主轴承非平稳冲击载荷等。

纵观整个建模过程,通过不断地迭代和更新,模型逐渐趋于复杂和真实,最后形成的航空发动机整机耦合动力学模型不仅能够很好地模拟实际航空发动机系统的整机固有特性,而且能够将典型故障模型导入整机模型,直接利用时域数值积分法实现整机故障动力学仿真,并且能够很方便地模拟实际航空发动机的测试场景,获取机匣测点的振动响应,并对故障信号进行模拟仿真和分析。当然,随着动力学建模方法的改进、计算能力的提升,模型的复杂程度可以进一步提高以更加逼近真实航空发动机,例如,在转子叶片建模、机匣建模、轴承力建模、附件传动齿轮箱建模等方面均有很大的拓展空间。

(3) 针对典型故障未能很好地与实际发动机结构结合,以及试验验证环节薄弱的问题,在沈阳发动机研究所王德友副总师和李成刚研究员的帮助下,设计制造了多个考虑发动机实际结构特点的转子试验器,其中包括能够模拟实际航空发动机结构特征的带机匣的航空发动机转子试验器、能够模拟高压转子盘鼓式连接结构的多螺栓连接面转子试验器、能够模拟低压转子套齿连接结构的带套齿联轴器的转子不对中试验器、能够模拟叶片振动的带局部机匣-叶片的转子试验器,以及能够模拟发动机发附与飞附连接的带膜盘联轴器的转子不对中试验器等。利用这些试验器进行了转子不平衡、不对中、碰摩、叶片振动及滚动轴承损伤等故障模拟,并将故障仿真结果与试验结果进行比较,以此验证故障模型的有效性,同时,也可以利用这些试验器进行模态试验和临界转速试验,来验证整机振动建模方法的有效性和模型的真实性的。

(4) 针对含典型故障的航空发动机整机振动分析软件开发问题,采用 Microsoft Visual C++ 6.0 语言,基于 Windows 平台开发了航空发动机整机振动分析软件 EVDYNA。该软件界面美观,便于操作,能够很方便地实现转子、机匣和支承的建模,能够模拟转子不平衡、不对中、碰摩、支承松动、滚动轴承疲劳剥落等多种故障模式,并能够很方便地实现各种故障模型的导入,最后模拟航空发动机实际测试场景,实现整机振动的仿真模拟测试,获取包括转子、支承、机匣在内的所有节点的振动响应,一方面为故障信号分析提供仿真数据,另一方面为故障诊断提供仿真样本。该软件于 2015 年取得了软件著作权,随着研究工作的进一步开展,软件功能正在不断地发展和扩充。

本书是在国家安全重大基础研究计划(国防 973)项目、国家科技重大专项项目、装备预研项目和国家自然科学基金项目等的支持下,在总结多年研究成果的基础上,提炼出含典型故障的航空发动机整机振动建模和故障分析方法,并结合工程应用撰写而成的。

全书由陈果负责撰写和统稿,北京航空工程技术研究中心尉询楷高工参与了

第9章的撰写；南京航空航天大学王海飞副教授参与了第7章、第8章的撰写；沈阳发动机研究所冯国全研究员参与了第3章的撰写；太行国家实验室李成刚研究员参与了第5章的撰写；沈阳发动机研究所王德友副总师参与了第7章的撰写。

作者近年来作为专题负责人参与了中国航空发动机集团有限公司沈阳发动机研究所主持的国防973计划项目、哈尔滨工业大学主持的国家科技重大专项(“两机”专项第一期)课题,以及北京航空工程技术研究中心主持的国家科技重大专项(“两机”专项第二期)课题,主持了4项国家自然科学基金项目、3项装备预研项目,以及1项航空基金项目等。在项目研究过程中,结识了行业内的许多著名专家和学者,他们分别是中国航空发动机集团有限公司沈阳发动机研究所的刘永泉院士、王德友副总师、杜少辉副总师、吴法勇副总师、冯国全研究员、李成刚研究员、姜广义研究员、胡伟研究员、黄海研究员、吴英祥高工等,北京航空工程技术研究中心的尉询楷高工、赵雪红高工,中国航发商用航空发动机有限责任公司的曹明研究员、宋会英高工,中国航天科工集团第三研究院三十一研究所的廖仲坤研究员、邵伏勇研究员、张华高工,北京航空航天大学的洪杰教授、马艳红教授、张大义教授等,西北工业大学的廖明夫教授、王四季副教授,哈尔滨工业大学的陈予恕院士、刘占生教授、王黎钦教授、曹登庆教授、张广辉教授、侯磊教授、张传伟教授,东北大学的韩清凯教授、马辉教授、罗忠教授等,天津大学的曹树谦教授等,西安交通大学的陈雪峰教授、曹宏瑞教授,以及南京航空航天大学的罗贵火副教授、臧朝平教授、李舜酩教授等。各位专家的学术观点和学术思想,使作者茅塞顿开,受益匪浅,在此表示衷心感谢!

最后还要感谢作者的研究生所做的一些创新性的研究成果,其中硕士研究生有:2006级的周海仑和李兴阳、2011级的乔保栋、2012级的赵文涛、2013级的赵斌、2014级的宋培培、2015级的谢阶栋、2018级的杨默晗、2019级的李伦绪,博士研究生有:2011级的于明月、2013级的王海飞、2015级的屈美娇。另外,还要特别感谢2022级硕士研究生刘富海同学对本书做出的大量校对和修订工作!

由于水平有限,本书难免存在诸多疏漏和不足之处,恳请读者批评指正!

陈 果

2023年8月于南京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 航空发动机整机振动研究的意义	1
1.2 航空发动机整机振动故障建模与分析研究现状	2
1.2.1 航空发动机整机振动建模与分析	2
1.2.2 故障转子-滚动轴承系统动力学分析	4
1.3 航空发动机整机振动故障建模与分析主要问题	5
1.4 本书主要内容	7
参考文献	9
第 2 章 航空发动机整机振动耦合动力学模型	14
2.1 航空发动机转子-支承-机匣整机耦合动力学模型	14
2.1.1 转子模型	15
2.1.2 机匣模型	19
2.1.3 离散支承模型	20
2.1.4 多自由度复杂滚动轴承模型	26
2.1.5 时域数值仿真求解方法	33
2.2 航空发动机整机振动分析软件 EVDYNA	35
2.3 本章小结	36
参考文献	36
第 3 章 几种典型的转子-支承-机匣耦合动力学模型	38
3.1 转子-滚动轴承试验器整机振动模型	38
3.1.1 试验器动力学建模	38
3.1.2 基于模态试验的模型验证	40
3.2 多螺栓连接面高压转子模拟试验器整机振动模型	42
3.2.1 试验器动力学建模	42
3.2.2 基于模态试验的模型验证	45
3.3 含套齿联轴器的三支点转子试验器有限元模型	49
3.3.1 试验器简介	49
3.3.2 转子试验器的套齿联轴器刚度计算	50
3.3.3 转子试验器有限元模型	52

3.3.4	基于模态试验的模型验证	54
3.4	带机匣的航空发动机转子试验器整机振动模型	57
3.4.1	试验器简介	57
3.4.2	转子-支承-机匣耦合动力学模型	58
3.4.3	基于模态试验的模型验证	62
3.5	某型高推重比双转子航空发动机整机振动模型	65
3.5.1	发动机简介	65
3.5.2	发动机整机振动有限元动力学参数	66
3.5.3	某型双转子航空发动机整机建模仿真验证	72
3.6	某型无人飞行器用小型发动机整机振动模型	86
3.6.1	发动机简介	86
3.6.2	转子-支承-机匣耦合动力学模型	87
3.6.3	发动机临界转速分析	92
3.7	本章小结	94
	参考文献	95
第4章	转子不平衡(质量偏心)故障建模与分析	96
4.1	转子不平衡(质量偏心)故障概述	96
4.2	转子质量偏心导致的不平衡故障建模与验证	97
4.2.1	转子质量偏心导致的不平衡故障建模	97
4.2.2	转子质量偏心导致的不平衡故障模型试验验证	99
4.2.3	转子质量偏心导致的不平衡故障现象和特征	102
4.3	航空发动机转子不平衡故障敏感度分析	103
4.3.1	计算条件	103
4.3.2	基于不平衡位置的响应不平衡敏感度分析	104
4.3.3	机匣测点的响应不平衡敏感度分析	117
4.3.4	基于发动机整机振型的不平衡敏感度分析	118
4.4	本章小结	121
	参考文献	121
第5章	转子不平衡(转子不同心)故障建模与分析	122
5.1	转子不平衡(转子不同心)故障概述	122
5.2	转子不同心故障建模方法	125
5.2.1	含初始弯曲的单盘转子系统振动机理分析	125
5.2.2	具有初始弯曲的有限元转子系统运动方程	127
5.3	转子-滚动轴承试验器弯曲故障特征仿真分析	127
5.3.1	仿真分析研究对象	127
5.3.2	仿真计算结果分析	127

5.4	转子不同心测试方法	130
5.4.1	测量原理	130
5.4.2	基于电涡流位移传感器测量转子弯曲试验方案	131
5.4.3	转子弯曲量测试系统开发构想	132
5.4.4	转子弯曲量测试系统介绍	134
5.4.5	转子弯曲量测试试验分析	137
5.5	转子不同心故障的仿真及试验研究	147
5.5.1	多螺栓连接面的高压转子模拟试验器简介	147
5.5.2	转子不同心故障装配仿真分析	148
5.5.3	转子不同心故障装配变形试验研究	154
5.5.4	转子不同心故障振动响应仿真分析及试验验证	160
5.6	某型高推重比双转子涡扇发动机高压转子不同心故障仿真分析	174
5.6.1	某型高推重比双转子涡扇发动机高压转子的不同心量概述	174
5.6.2	含高压转子不同心故障的航空发动机整机振动仿真计算条件	174
5.6.3	不同心故障的相位对发动机整机振动响应的影响分析	176
5.6.4	不同心量的大小对航空发动机整机振动响应的影响分析	176
5.6.5	转子质量偏心与转子不同心对于整机振动的影响分析	179
5.7	本章小结	186
	参考文献	186
第 6 章	转子联轴器不对中故障建模与分析	188
6.1	转子联轴器不对中故障概述	188
6.2	转子联轴器不对中故障分类	189
6.2.1	制造误差	189
6.2.2	安装误差及其他因素	189
6.3	联轴器制造误差产生的转子不对中故障建模	190
6.3.1	平行不对中	190
6.3.2	角度不对中	193
6.3.3	柔性联轴器的情形	193
6.4	安装误差等产生的转子不对中故障建模	194
6.4.1	转子支承不对中故障统一模型	194
6.4.2	转子支承不对中故障仿真分析及机理研究	201
6.5	某型高推重比双转子航空发动机低压转子不对中故障仿真分析	221
6.5.1	某型高推重比双转子航空发动机低压转子的套齿连接结构特点	221
6.5.2	联轴器制造误差导致的转子不对中故障仿真分析	222
6.5.3	安装误差等因素导致的转子不对中仿真	230
6.6	本章小结	240

参考文献	241
第 7 章 转子叶片-机匣碰摩故障建模与分析	242
7.1 转子叶片-机匣碰摩故障概述	242
7.2 新型叶片-机匣碰摩模型	243
7.2.1 碰摩力模拟	243
7.2.2 转静间隙模拟	244
7.2.3 碰摩故障的时域仿真计算方法	245
7.2.4 机匣单点-转子全周的叶片-机匣碰摩故障仿真与试验验证	245
7.3 某型高推重比双转子航空发动机碰摩故障仿真分析	256
7.3.1 计算条件	256
7.3.2 高压涡轮叶片-机匣碰摩仿真	257
7.3.3 高压压气机第 4 级叶片-机匣碰摩仿真	271
7.3.4 仿真分析结论	284
7.4 本章小结	285
参考文献	285
第 8 章 滚动轴承配合松动故障建模与分析	286
8.1 滚动轴承外圈与轴承座配合松动故障建模	286
8.1.1 配合松动故障模型	286
8.1.2 滚动轴承配合松动故障在整机耦合动力学模型中的导入	288
8.2 基于转子-滚动轴承试验器的滚动轴承配合松动故障分析	289
8.2.1 仿真计算条件	289
8.2.2 不同配合间隙下的故障仿真分析	290
8.2.3 轴承外圈与轴承座相对运动轨迹分析	291
8.2.4 轴承外圈与轴承座之间的摩擦效应影响分析	294
8.2.5 转子不平衡量对轴承外圈与轴承座配合松动故障的影响分析	294
8.2.6 拧紧力矩对轴承外圈与轴承座配合松动故障的影响分析	295
8.2.7 试验验证	296
8.3 某型无人飞行器用小型发动机滚动轴承配合松动故障分析	300
8.3.1 发动机支点轴承配合松动故障仿真分析	300
8.3.2 发动机试车数据分析	306
8.3.3 仿真结果与试车数据分析结论	309
8.4 某型高推重比双转子航空发动机滚动轴承配合松动故障仿真分析	310
8.4.1 计算条件	310
8.4.2 支点 1 配合松动故障特征分析	311
8.4.3 支点 2 配合松动故障特征分析	321
8.4.4 支点 3 配合松动故障特征分析	330

8.4.5 支点 4 配合松动故障特征分析	340
8.4.6 支点 5 配合松动故障特征分析	349
8.5 本章小结	359
参考文献	360
第 9 章 滚动轴承早期表面损伤的故障建模与分析	361
9.1 滚动轴承振动产生原理与特点	361
9.2 滚动轴承故障的不同发展阶段及其频率特征	362
9.3 滚动轴承特征频率	364
9.4 滚动轴承早期疲劳剥落故障诊断原理	366
9.4.1 滚动轴承早期疲劳剥落故障信号形成机理	366
9.4.2 小波包络分析方法	367
9.5 滚动轴承故障早期表面疲劳剥落损伤建模	373
9.5.1 滚动轴承外圈故障建模	373
9.5.2 滚动轴承内圈故障建模	375
9.5.3 滚动轴承滚动体故障建模	376
9.5.4 滚动轴承故障导入	377
9.5.5 基于转子-滚动轴承试验器的滚动轴承故障模型验证	378
9.6 带机匣的航空发动机转子试验器滚动轴承故障仿真分析	383
9.6.1 带机匣的航空发动机转子试验器简介	383
9.6.2 外圈故障仿真	383
9.6.3 内圈故障仿真	386
9.6.4 滚动体故障仿真	388
9.7 某型高推重比双转子航空发动机滚动轴承故障仿真分析	391
9.7.1 某型高推重比双转子航空发动机简介	391
9.7.2 支点 1 滚动轴承故障仿真分析	392
9.7.3 支点 2 滚动轴承故障仿真分析	400
9.7.4 支点 3 滚动轴承故障仿真分析	408
9.7.5 支点 4 滚动轴承故障仿真分析	417
9.7.6 支点 5 滚动轴承故障仿真分析	426
9.8 本章小结	434
参考文献	434