

航空涡喷、涡扇发动机

结构设计准则

(研究报告)

第六册 转子系统



中国航空工业总公司发动机系统工程局

航空涡喷、涡扇发动机
结构设计准则

(研究报告)

第六册 转子系统

中国航空工业总公司发动机系统工程局

1997年

《航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告)》

审 定 委 员 会

名誉主任: 吴大观

主 任: 李其汉

副 主 任: (按姓氏笔划为序)

尹泽勇 孙 慈 许 棠 江和甫

严成忠 张恩和 顾家柳 唐智明

董德耀

委 员: (按姓氏笔划为序)

王旅生 宁宣熙 李文明 刘启洲

朱明俊 任培正 邢德顺 杨治国

陈 光 陈士煊 张连祥 林继红

钱笃元 聂景旭 黄劲东 龚梦贤

温卫东 韩红志

《航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告)》

编写委员会

主任: 杨士杰

副主任: (按姓氏笔划为序)

吕文林 朱梓根 岳承熙 范引鹤

饶寿期 高德平

委员: (按姓氏笔划为序)

王延荣 支钟和 田忠贤 乐晓斌

李 勇 刘廷毅 刘湘生 陆 山

张 锦 陈 伟 陈俊粤 胡舜东

徐林耀 晏砺堂 徐鹤山 屠一鹤

龚良慈 熊昌炳

总 编: 杨士杰(兼)

《航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告)》

第六册 转子系统

主 编: 朱梓根

副 主 编: 刘廷毅

编 写: (按姓氏笔划为序)

朱梓根 李文明 李其汉 刘廷毅

刘永泉 陈 光 陈美英 宋文兴

晏砺堂 张连祥 张德平 董奇志

熊昌炳

主 审: (按姓氏笔划为序)

刘启洲 顾家柳

序 言

自从燃气涡轮发动机问世以来,各国在发动机研制初期,普遍存在着重性能、轻结构强度、耐久性和可靠性的倾向,直到外场出现故障、影响使用,给军事上和经济上造成重大损失后,才把结构强度放到与发动机性能同样重要地位来对待,美国F100发动机的惨痛教训是值得人们深思的一例。我国航空发动机历经仿制、使用、改进改型和自行研制约四十年,国外重性能、轻结构强度的错误观念也反映在我国航空发动机的自行研制的过程中,所幸的是在1987年颁布了《GJB241—87涡轮喷气、涡轮风扇发动机通用规范》。现在,新研制的发动机已按制定的型号规范要求研制,根据规范规定的研制阶段和程序、质量保证条例和定型试验要求安排研制工作,开始不单从性能方面,而且在结构强度、耐久性方面较全面地贯彻和实施有关内容。但是,由于重性能、轻结构强度的影响时间较长,即使在近十多年研制技术有所改进的情况下,也还没有彻底的扭转,结构强度工作还没有得到足够的重视。特别是从管理方面,如何结合我国国情和有限的研制、使用经验,逐步摸索并总结出符合国情的航空发动机研制程序和研制方法,避免重走国外“重性能、轻结构强度”的覆辙,是当前从事发动机研制工作的各级领导和广大科研人员极为关注的迫切需要解决的问题。

经过发动机行业同志们数十年的辛勤劳动,在型号研制工作中不停地探索,结合学习国外发动机研制中结构强度设计的经验教训,也摸索到不少自己的经验。从事发动机研制的人员,特别是结构强度工作人员,通过发动机结构完整性大纲的研究,以及从结构故障成为阻碍发动机研制进程的棘手问题的经验教训中,对结构强度工作在发动机研制过程中的重要性有了更深的认识。进一步认识到结构强度工作程序化、规范化的重要性,以及组织编写《发动机结构完整性指南》(简称《指南》)和《航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告)》(简称《准则(研究报告)》)的迫切性。

当前,发动机研制工作正处于关键时期,研制观念也正开始从单一追求性能转向性能与可靠性、耐久性并重,对结构强度工作提出了更高的要求,因此,《指南》和《准则(研究报告)》正适应了我们发动机当前研制的急需,希望能起到“对症下药”的作用。另外,目前发动机行业正处于新老科技人员交替的关键时刻,通过《准则(研究报告)》的编写,既可通过老科技人员言传身教,向中、青年科技人员传授研制经验,又可将老科技人员宝贵的知识财富,融入《准则(研究报告)》内容之中,供青年科技人员学习应用。这也是编写《准则(研究报告)》主要目的之一。

《准则(研究报告)》是关系到航空发动机结构性能方面的推荐性和指导性的综合研究文件,它是衔接《指南》和设计分析、试验验证的中间环节,是提高发动机结构完整性的设计要求和工作的依据。

《准则(研究报告)》不同于一般的参考性工具手册,它是根据研制实践,总结了发动机的研制和预研经验,所提供的设计、验证方法及其评定标准,可供型号研制直接使用或结合型号特点研制要求进行剪裁、修改和补充后使用。

《准则(研究报告)》的使用对象,主要是发动机结构强度工程技术人员和技术管理人员。《准则(研究报告)》提供的不同设计阶段的计划网络、评审节点和内容以及风险评估等内容是发动机研制过程中结构强度工作的管理准则。《准则(研究报告)》又好比一面镜子,用它可照出发动机可能存在的故障隐患,并可找到解决该隐患的途径和方法,这也是编写《准则(研究报告)》的重要原因。

值得指出的是《准则(研究报告)》的编写体现了先进性、科学性和实用性相结合,也反映了发动机结构完整性研究和其他相关预研项目的研究成果,总结了我国发动机研制中结构强度工作的经验教训和吸取了国外有关先进技术经验,为研制具有较高的结构可靠性、耐久性的发动机提供技术比较先进的指导系统。《准则(研究报告)》中所提供的方法、数据、图表和其它资料取之有据,内容较为具体明确、可操作、可实施,可作为发动机研制的有效参考依据。

《准则(研究报告)》的核心内容是第5章结构设计准则。第11章计划网络是贯彻结构设计准则全过程的一条主线,介绍了在发动机研制进程中,按照以时间分阶段的原则,制订强度工作在探索研究、先期发展和工程研制三个重要阶段中的研究网络,应该将此纳入先进发动机的设计、研制和使用计划中去。这种方法将是我们发动机研制中的革新点。

《准则(研究报告)》的编制历经四年之久。是在中国航空工业总公司发动机局的直接领导和关怀下进行的,三所部内高等院校和三个发动机研究所的专家、教授和从事发动机结构强度工作多年的老、中、青科技人员付出了辛勤劳动,做出了卓越贡献,在此表示衷心地感谢。《准则(研究报告)》的出版,是我国发动机行业值得庆幸的喜事。希望《准则(研究报告)》出版后,经试用、剪裁、修改和补充,能成为指令性的《发动机型号结构设计准则》,使发动机研制中的结构强度工作早日走向制度化、规范化和标准化。这是发动机研制工作者企盼已久的心愿。

吴大覿

1997.10.20

编写说明

航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则研究是涡喷、涡扇发动机结构完整性研究中的重点研究课题。《航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告)》是一份指导性和推荐性的综合研究报告,它较集中地反映了我国航空发动机行业多年来的研制、使用经验,体现了发动机结构完整性和其他相关预研项目的研究成果,并吸取了国外有关的先进经验。在本研究报告的基础上,经过一段时间的试用验证后,还将形成《航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则》,供发动机设计研制单位参考。经型号研制单位剪裁、修改和补充后,可成为该型号研制中的指令性设计文件。

本研究报告共分六册,第一册为总论,重点叙述了准则的研究方法,以及发动机研制进程中的结构强度工作内容和要求;第二册至第六册分别为轮盘、叶片、机匣、燃烧室与加力燃烧室和转子系统设计准则,均由载荷、结构、故障模式、准则、计算分析、材料与工艺、试验验证、评定标准、风险评定和计划网络等十一章组成。

本研究报告是在中国航空工业总公司发动机系统工程局领导下,组织结构强度行业专家编制的,由六〇六研究所任总编单位,第一册由六〇六研究所任主编单位;第二册由西北工业大学任主编单位;第三、第六册由北京航空航天大学任主编单位;第四、第五册由南京航空航天大学任主编单位,六〇六研究所还为各册的副主编单位。

参加本册编审工作的人员还有:欧园霞、黄太平、洪庆宽等同志。在此一并表示感谢。

由于编写经验及水平有限,文中不妥之处敬请阅者批评指正。

《航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告)》编委会

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 内容简介	(2)
第2章 载荷与载荷谱	(3)
2.1 引言	(3)
2.2 发动机转速	(3)
2.3 扭矩	(5)
2.4 不平衡力	(6)
2.5 陀螺力矩	(7)
2.6 轴向载荷	(8)
2.7 离心载荷和径向载荷	(9)
2.8 转子温度场	(10)
2.9 振动载荷	(11)
2.10 发动机工作包线	(11)
2.11 机动飞行包线	(13)
2.12 喘振载荷	(15)
2.13 设计使用寿命和设计用法	(16)
2.14 设计任务循环	(17)
第3章 典型结构和新结构	(22)
3.1 引言	(22)
3.2 转子结构	(22)
3.2.1 转子的基本结构形式	(22)
3.2.2 转子的连接结构	(24)
3.3 转子支承方案	(28)
3.3.1 单转子支承方案	(28)
3.3.2 多转子支承方案	(31)
3.4 转子支承结构	(39)
3.4.1 挤压油膜	(39)
3.4.2 弹性支座	(44)
3.4.3 带挤压油膜的弹性支座	(50)
3.4.4 滚珠轴承与滚棒轴承并列作为1个支点	(50)
3.4.5 防止轴承滑蹭损坏的措施	(51)
3.5 压气机、涡轮转子间的联轴器	(54)
3.5.1 刚性联轴器	(54)
3.5.2 柔性联轴器	(55)
参考文献	(60)

第4章 典型故障模式和影响分析	(61)
4.1 引言	(61)
4.1.1 航空燃气涡轮发动机结构和工作特点	(61)
4.1.2 航空燃气涡轮发动机发展上的变化和要求	(61)
4.1.3 发动机故障类型	(62)
4.1.4 排故方法分析	(62)
4.2 转子不平衡引起的振动过大	(63)
4.2.1 现象和特征	(63)
4.2.2 原因分析	(64)
4.2.3 影响分析	(65)
4.2.4 排故方法	(65)
4.3 转子的碰摩	(66)
4.3.1 现象和特征	(66)
4.3.2 原因分析	(71)
4.3.3 影响分析	(72)
4.3.4 排故方法	(73)
4.4 转子热弯曲	(73)
4.4.1 现象和特征	(73)
4.4.2 原因分析	(74)
4.4.3 影响分析	(75)
4.4.4 排故方法	(75)
4.5 转子突加不平衡	(76)
4.5.1 现象和特征	(76)
4.5.2 原因分析	(78)
4.5.3 影响分析	(78)
4.5.4 排故方法	(78)
4.6 转子裂纹故障	(80)
4.6.1 现象和特征	(80)
4.6.2 原因分析	(81)
4.6.3 影响分析	(81)
4.6.4 排故方法	(82)
4.7 转子两向刚性异性引起的故障	(83)
4.7.1 现象和特征	(83)
4.7.2 原因分析	(83)
4.7.3 影响分析	(83)
4.7.4 排故方法	(84)
4.8 转子失稳	(84)
4.8.1 现象和特征	(84)
4.8.2 原因分析	(84)

4.8.3	影响分析	(87)
4.8.4	防止转子失稳的方法	(88)
4.9	篦齿封严装置裂断	(88)
4.9.1	现象和特征	(88)
4.9.2	原因分析	(89)
4.9.3	影响分析	(89)
4.9.4	排故方法	(89)
4.10	转子支承不同心故障	(90)
4.10.1	现象和特征	(90)
4.10.2	原因分析	(90)
4.10.3	影响分析	(90)
4.10.4	排故方法	(90)
4.11	转子支承结构间隙、松动故障	(90)
4.11.1	现象和特征	(91)
4.11.2	原因分析	(92)
4.11.3	影响分析	(92)
4.11.4	排故方法	(92)
4.12	弹性支承故障	(92)
4.12.1	现象和特征	(92)
4.12.2	原因分析	(93)
4.12.3	影响分析	(93)
4.12.4	排故措施	(93)
4.13	油膜阻尼器故障	(94)
4.13.1	故障现象	(94)
4.13.2	原因分析	(94)
4.13.3	影响分析	(94)
4.13.4	排故措施	(94)
4.14	主轴断裂故障	(95)
4.14.1	故障现象	(95)
4.14.2	原因分析	(95)
4.14.3	影响分析	(97)
4.14.4	排故措施	(97)
4.15	旋转套筒屈曲故障	(98)
4.15.1	故障现象	(99)
4.15.2	原因分析	(100)
4.15.3	影响分析	(101)
4.15.4	排故措施	(101)
4.16	转子振动和强度故障一览表	(101)
	参考文献	(105)

第5章 设计准则	(106)
5.1 引言	(106)
5.2 允许的临界转速	(107)
5.2.1 准则说明	(107)
5.2.2 准则实施	(112)
5.3 允许的转子弯曲应变能	(114)
5.3.1 准则说明	(114)
5.3.2 准则实施	(116)
5.4 转、静子间的间隙控制	(117)
5.4.1 准则说明	(117)
5.4.2 准则实施	(123)
5.5 允许的支承结构载荷	(131)
5.5.1 准则说明	(131)
5.5.2 准则实施	(132)
5.6 转子稳定性储备	(134)
5.6.1 准则说明	(134)
5.7 防止转动薄壁件共振	(136)
5.7.1 准则说明	(136)
5.7.2 准则实施	(140)
5.8 防止气动弹性自激振动	(143)
5.8.1 准则说明	(143)
5.9 防止转动薄壁件外压屈曲	(145)
5.9.1 准则说明	(145)
5.9.2 准则实施	(146)
5.10 防止屈服	(147)
5.10.1 准则说明	(147)
5.10.2 准则的实施	(148)
5.10.3 花键设计准则	(155)
5.11 防止屈曲	(156)
5.11.1 准则说明	(156)
5.11.2 准则的实施	(157)
5.12 足够的高频疲劳寿命	(159)
5.12.1 准则说明	(159)
5.12.2 准则实施	(159)
5.13 足够的低循环疲劳寿命	(161)
5.13.1 准则说明	(161)
5.13.2 准则实施	(161)
5.14 叶片飞出后轴应有足够的强度和变形限制	(162)
5.14.1 准则说明	(162)

5.14.2 准则实施	(162)
参考文献	(164)
第6章 设计方法	(166)
6.1 引言	(166)
6.2 支承动、静刚度计算	(166)
6.2.1 支承静刚度计算	(166)
6.2.2 支承动刚度计算	(169)
6.3 滚动轴承刚度计算	(170)
6.4 挤压油膜阻尼器	(173)
6.4.1 结构和尺寸的选取	(173)
6.4.2 阻尼器的油膜力	(174)
6.4.3 带挤压油膜阻尼器转子的稳态和瞬态特性	(174)
6.5 特殊单元转子动力学模型	(175)
6.5.1 花键、套齿	(175)
6.5.2 销钉、螺栓连接	(175)
6.5.3 碰摩非线性单元建模问题	(177)
6.5.4 Alford力的考虑	(178)
6.6 临界转速和应变能分析	(179)
6.6.1 计算模型	(179)
6.6.2 临界转速计算方法	(181)
6.6.3 应变能计算	(189)
6.7 稳态不平衡响应	(191)
6.7.1 坐标变换	(191)
6.7.2 复数单元传递矩阵	(191)
6.7.3 不平衡响应计算	(193)
6.8 转子动力学特性优化	(195)
6.8.1 临界转速	(195)
6.8.2 振动不敏感转子设计	(198)
6.9 瞬态响应	(201)
6.9.1 瞬态响应研究内容	(201)
6.9.2 瞬态响应分析方法	(201)
6.10 转子热弯曲响应	(204)
6.10.1 转子的温度场和热弯曲	(204)
6.10.2 转子热弯曲响应	(204)
6.10.3 热弯曲转子动力特性计算方法	(205)
6.11 有限元子结构模态综合法	(207)
6.11.1 转子的子结构有限元分析	(207)
6.11.2 机匣子结构有限元分析	(208)
6.11.3 转子—支承—机匣系统模态综合法	(208)

6.12	转动薄壁件的振动	(212)
6.12.1	圆柱薄壳固有频率计算公式	(212)
6.12.2	转动的任意轴对称壳体的振动计算	(213)
6.13	转动薄壁轴屈曲临界载荷	(222)
6.13.1	不转动的圆柱壳屈曲失稳临界载荷计算公式	(222)
6.13.2	转动的任意轴对称壳的屈曲失稳	(223)
6.13.3	算例	(224)
6.14	轴的变形分析	(225)
6.14.1	常规方法	(225)
6.14.2	传递矩阵法	(226)
6.14.3	有限元法	(226)
6.15	轴系的应力分析	(227)
6.15.1	常规计算方法	(227)
6.15.2	主轴的弹性和弹塑性有限元法分析	(234)
6.15.3	花键设计方法	(235)
6.16	疲劳寿命预测	(240)
6.16.1	高循环疲劳(HCF)	(241)
6.16.2	低循环疲劳(LCF)	(246)
6.17	蠕变分析	(251)
6.17.1	蠕变计算方法	(252)
6.17.2	蠕变损伤与破裂	(255)
6.17.3	蠕变屈曲	(258)
	参考文献	(261)
第7章	材料与关键工艺	(263)
7.1	引言	(263)
7.2	主轴材料的选择	(264)
7.2.1	载荷分析	(264)
7.2.2	工作环境分析	(264)
7.2.3	主轴的结构特点分析	(264)
7.2.4	主轴材料的选择	(264)
7.3	主轴用材料	(265)
7.3.1	常用的主轴材料	(265)
7.3.2	复合材料	(266)
7.4	主轴材料特性要求	(269)
7.4.1	物理性能	(269)
7.4.2	力学性能	(269)
7.4.3	环境(化学)性能	(270)
7.4.4	工艺性能	(270)
7.5	加工工艺对主轴材料的影响	(270)

7.5.1	锻造	(271)
7.5.2	热处理	(272)
7.5.3	连接工艺	(272)
7.5.4	机械加工工艺	(272)
7.5.5	主轴制造工艺过程的质量检验	(273)
7.6	弹性支承座材料与工艺	(274)
7.7	材料数据库检验清单	(274)
7.7.1	探索研究	(275)
7.7.2	先期发展	(275)
7.7.3	工程研制	(276)
7.8	涡轮轴质量验收标准实例	(276)
7.8.1	Incoloy901材料的低压涡轮轴质量验收标准	(276)
7.8.2	斯贝发动机高压涡轮轴质量验证验收标准	(278)
7.8.3	高压涡轮轴解剖锻件的力学性能检查(项目、试件位置选取、数量)	(280)
7.8.4	典型主轴锻件流程图	(281)
	参考文献	(283)
第8章 试验验证		(284)
8.1	引言	(284)
8.2	转子支承柔度试验	(285)
8.2.1	目的	(285)
8.2.2	内容	(285)
8.2.3	方法	(285)
8.3	转子系统中连接部位柔度试验	(287)
8.3.1	目的	(287)
8.3.2	内容	(287)
8.3.3	方法	(287)
8.4	弹性支承试验	(287)
8.4.1	目的	(287)
8.4.2	内容	(287)
8.4.3	方法	(288)
8.5	挤压油膜阻尼器试验	(290)
8.5.1	目的	(290)
8.5.2	内容	(290)
8.5.3	方法	(291)
8.6	转子动力特性试验	(292)
8.6.1	目的	(292)
8.6.2	内容	(293)
8.6.3	方法	(293)
8.7	部件和整机模态试验	(297)

8.7.1	目的	(297)
8.7.2	内容	(297)
8.7.3	方法	(297)
8.8	台架整机动力特性试验	(298)
8.8.1	目的	(298)
8.8.2	内容	(298)
8.8.3	方法	(298)
8.9	整机测振点特性比较试验	(300)
8.9.1	目的	(300)
8.9.2	内容	(300)
8.9.3	方法	(300)
8.10	密封装置振动试验	(301)
8.10.1	目的	(301)
8.10.2	内容	(301)
8.10.3	方法	(301)
8.11	薄壁轴振动试验	(302)
8.11.1	目的	(302)
8.11.2	内容	(302)
8.11.3	方法	(303)
8.12	主轴应力分布试验	(303)
8.12.1	目的	(303)
8.12.2	内容	(304)
8.12.3	方法	(304)
8.13	主轴的屈服强度储备试验	(305)
8.13.1	目的	(305)
8.13.2	内容	(305)
8.13.3	方法	(305)
8.14	主轴的破坏扭矩和扭转稳定性(屈曲)试验	(305)
8.14.1	目的	(305)
8.14.2	内容	(306)
8.14.3	方法	(306)
8.15	主轴的疲劳强度和寿命试验	(306)
8.15.1	目的	(306)
8.15.2	内容	(306)
8.15.3	方法	(307)
8.16	发动机转子持久试验	(309)
8.16.1	目的	(309)
8.16.2	内容	(310)
8.16.3	方法	(310)

8.17	测试仪器和数据处理方法	(310)
8.17.1	转子系统测试仪器及应用	(310)
8.17.2	数据处理方法	(312)
	参考文献	(314)
第9章	评定标准	(315)
9.1	引言	(315)
9.2	应力标准	(315)
9.3	疲劳寿命	(317)
9.4	轴的变形限制	(318)
9.5	支承载荷限制	(319)
9.6	屈曲临界载荷安全裕度	(320)
9.6.1	轴的扭转屈曲载荷安全系数	(320)
9.6.2	转动薄壁结构外压屈曲失稳安全系数	(320)
9.7	间隙控制要求	(320)
9.8	不平衡度要求	(321)
9.9	频度限制	(323)
9.9.1	发动机临界转速	(323)
9.9.2	转动薄壁件共振安全裕度	(323)
9.10	转子弯曲应变能限制	(324)
9.11	整机振动标准	(324)
9.11.1	整机振动值的意义	(324)
9.11.2	整机振动的限制参数	(324)
9.11.3	整机振动限制参数的选取	(325)
9.11.4	整机振动标准的选取	(325)
	参考文献	(328)
第10章	风险评定	(329)
10.1	引言	(329)
10.2	风险的定义与度量	(329)
10.2.1	风险的定义	(329)
10.2.2	风险的度量	(329)
10.2.3	风险的分类	(330)
10.3	风险评定的目的和内容	(330)
10.4	风险评定方法	(331)
10.4.1	概述	(331)
10.4.2	确定工作计划	(332)
10.4.3	制定活动网络	(332)
10.4.4	进行专家意见调查	(332)
10.4.5	网络模拟分析	(335)
10.5	风险评估的应用例题	(338)