

航空涡喷、涡扇发动机
结构设计准则

(研究报告)

第四册 机 匣



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)

第四册 机 匣

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 刘启州

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)》

第四册 机 匣

主 编: 高德平 范引鹤

副 主 编: 龚良慈

编 写: (按姓氏笔划为序)

王竹林 支中和 乐晓斌 汤 平

阮米庆 陈 伟 范引鹤 高德平

喻双喜 龚良慈

主 审: (按姓氏笔划为序)

李文明 杨治国 龚梦贤

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进行研制,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结构设计准则,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:万明学、李晓延、刘清海、郑永成、徐林耀、蒲瑞刚、温卫东、董德耀、蒋福庆等同志,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。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 编制目的	(1)
1.3 内容提要	(1)
第 2 章 载荷及载荷谱	(3)
2.1 引言	(3)
2.2 载荷类型	(3)
2.2.1 气体载荷	(3)
2.2.2 温度载荷	(6)
2.2.3 质量惯性力	(6)
2.2.4 地面吊运载荷	(7)
2.2.5 喷管气动力	(7)
2.3 载荷谱	(8)
2.3.1 压力差工作循环	(8)
2.3.2 温度工作循环	(13)
2.3.3 机动载荷谱	(13)
2.4 各类机匣承受的载荷	(14)
2.4.1 进气机匣	(14)
2.4.2 风扇机匣	(14)
2.4.3 中介机匣	(15)
2.4.4 高压压气机机匣	(15)
2.4.5 燃烧室外机匣	(16)
2.4.6 燃烧室内机匣	(17)
2.4.7 涡轮机匣	(17)
2.4.8 涡轮后框架机匣	(17)
2.4.9 外涵道机匣	(18)
2.5 机匣载荷数据来源	(19)
2.5.1 气体载荷数据	(19)
2.5.2 机动载荷参数	(20)
参考文献	(21)
第 3 章 典型结构	(22)
3.1 引言	(22)
3.2 典型机匣结构	(22)
3.2.1 进气机匣	(22)

3.2.2	压气机机匣(风扇、低压和高压机匣)	(24)
3.2.3	中介机匣	(26)
3.2.4	燃烧室机匣	(26)
3.2.5	涡轮机匣	(27)
3.2.6	涡轮后框架机匣	(28)
3.3	发动机安装节布局	(28)
3.3.1	典型发动机安装节布局方案	(29)
3.3.2	安装节布局对机匣载荷影响	(29)
3.4	机匣局部结构	(30)
3.4.1	改善机匣薄弱部位应力分布	(30)
3.4.2	改进焊接处结构,提高焊接强度	(30)
3.4.3	改进机匣局部结构,保证机匣具有足够的刚性	(30)
3.4.4	改进机匣连接处结构,保证机匣具有足够的连接刚性	(30)
3.5	机匣连接形式	(30)
3.5.1	横向安装边的连接结构	(31)
3.5.2	纵向安装边连接结构	(32)
3.5.3	静子叶片与机匣的连接结构	(32)
	参考文献	(33)
第4章	典型故障模式和影响分析	(57)
4.1	引言	(57)
4.2	故障模式统计	(57)
4.2.1	统计说明	(57)
4.2.2	各类机匣的故障统计	(58)
4.3	按故障模式统计分析	(67)
4.3.1	初始故障模式统计	(67)
4.3.2	主要典型故障分析	(67)
4.4	按破损性质统计分析	(72)
4.5	几点结论	(73)
	参考文献	(74)
第5章	设计准则	(75)
5.1	引言	(75)
5.2	机匣设计准则	(75)
5.2.1	提供足够的低循环疲劳寿命	(75)
5.2.2	防止高循环疲劳	(79)
5.2.3	提供足够的许用应力	(84)
5.2.4	提供足够的刚度	(88)
5.2.5	提供足够的蠕变寿命	(93)
5.2.6	防止屈曲	(98)

5.2.7	尽量减小热变形和热不协调	(104)
5.2.8	提供对于非正常工作和意外事故的保护措施	(108)
	参考文献	(110)
第6章	设计分析方法	(112)
6.1	引言	(112)
6.2	设计分析项目	(112)
6.3	分析方法	(114)
6.3.1	解析和经验分析方法	(114)
6.3.2	有限元分析方法	(142)
6.3.3	寿命分析方法	(165)
6.3.4	可靠性分析方法	(183)
6.3.5	寿命误差带分析	(191)
	参考文献	(193)
第7章	材料与工艺	(194)
7.1	引言	(194)
7.2	探索研究阶段	(194)
7.2.1	机匣的选材原则	(194)
7.2.2	典型机匣的材料及其性能分析	(196)
7.2.3	发展中的新材料及其性能	(198)
7.2.4	材料性能数据及其来源和可靠度要求	(199)
7.2.5	关键工艺对材料性能的影响	(201)
7.3	先期发展阶段	(204)
7.3.1	材料冶金和工艺处理的特殊要求	(204)
7.3.2	材料性能数据及其来源和可靠度要求	(204)
7.3.3	冶金、冷、热加工等工艺对材料性能的影响	(205)
7.3.4	焊接工艺对材料性能的影响	(206)
7.3.5	材料缺口敏感性分析	(207)
7.3.6	构件尺寸和表面状态对材料性能的影响	(207)
7.3.7	环境对材料性能的影响	(209)
7.4	工程研制阶段	(210)
	参考文献	(210)
第8章	试验验证	(211)
8.1	引言	(211)
8.2	机匣结构验证试验项目	(211)
8.3	材料和工艺特性试验	(212)
8.3.1	试验目的	(212)
8.3.2	试样	(212)
8.3.3	试验设备	(212)

8.3.4	试验方法	(212)
8.3.5	特别说明	(227)
8.4	放大或缩小的模型试验	(227)
8.4.1	试验目的	(227)
8.4.2	试样	(227)
8.4.3	试验设备	(227)
8.4.4	试验方法	(228)
8.4.5	特别说明	(235)
8.5	机匣的低循环疲劳试验	(235)
8.5.1	试验目的	(235)
8.5.2	试样	(236)
8.5.3	试验设备	(236)
8.5.4	试验方法	(236)
8.5.5	特别说明	(240)
8.6	机匣振动试验	(240)
8.6.1	试验目的	(240)
8.6.2	试样	(240)
8.6.3	试验设备	(240)
8.6.4	试验方法	(240)
8.6.5	特别说明	(240)
8.7	机匣组件静力试验	(240)
8.7.1	试验目的	(241)
8.7.2	试样	(241)
8.7.3	试验设备	(241)
8.7.4	试验方法	(242)
8.7.5	特别说明	(253)
8.8	机匣包容性试验	(253)
8.8.1	试验目的	(253)
8.8.2	试样	(254)
8.8.3	试验设备	(254)
8.8.4	试验方法	(255)
8.8.5	特别说明	(256)
8.9	安装边密封试验	(256)
8.9.1	试验目的	(256)
8.9.2	试样	(256)
8.9.3	试验设备	(257)
8.9.4	试验方法	(258)
8.9.5	特别说明	(260)

8.10	发动机机匣的台架试验	(260)
8.10.1	试验目的	(260)
8.10.2	试样	(260)
8.10.3	试验设备	(261)
8.10.4	试验方法	(261)
8.10.5	特别说明	(269)
	参考文献	(269)
第9章	评定标准	(271)
9.1	引言	(271)
9.2	应力限制要求	(272)
9.2.1	应力强度储备的表示方法	(272)
9.2.2	应力强度储备的一些推荐数据	(272)
9.3	变形限制要求	(277)
9.4	高循环疲劳寿命要求	(278)
9.5	屈曲条件要求	(279)
9.6	蠕变限制要求	(279)
9.7	低循环疲劳寿命要求	(281)
9.8	包容能力要求	(282)
	参考文献	(284)
第10章	风险评定	(286)
10.1	引言	(286)
10.2	风险定义及评定目的	(286)
10.2.1	风险定义	(286)
10.2.2	风险评定目的	(287)
10.3	风险评定要点	(287)
10.3.1	技术问题说明	(288)
10.3.2	技术展望	(288)
10.3.3	发展项目计划	(289)
10.3.4	活动网络图	(289)
10.3.5	专家调查法	(291)
10.3.6	仿真模拟	(293)
10.4	机匣风险评定的主要问题	(298)
	参考文献	(299)
第11章	计划网络	(300)
11.1	引言	(300)
11.2	探索研究	(303)
11.2.1	初步分析	(304)
11.2.2	详细设计	(304)

11.2.3	可行性试验和分析	(305)
11.3	先期发展	(306)
11.3.1	初步评定	(306)
11.3.2	部件设计和证实	(308)
11.3.3	试验验证	(309)
11.4	工程研制	(310)
11.4.1	确定要求	(310)
11.4.2	发动机初步结构设计	(312)
11.4.3	气动和结构的试验器试验	(312)
11.4.4	发动机结构环境验证	(313)
11.4.5	发动机工作寿命验证	(314)
	参考文献	(316)

第1章 绪 论

1.1 引言

衡量燃气涡轮发动机水平的主要指标之一是发动机的推重比。发动机推重比的提高,主要依靠提高压气机增压比,提高涡轮前温度,减轻结构重量等措施来实现。然而,这些措施的采用,往往恶化了发动机的工作条件,提高了发​​动机构件的应力水平,从而增加了发动机发生故障的可能性。这就要求在新一代发动机结构设计中,更应重视其关键部位的设计细节,严格遵循结构设计的各个环节,提高设计质量,确保发动机的可靠性和耐久性。

1.2 编制目的

机匣设计准则的主要研究目标,是新机研制和在役机种改进、改型过程中,为实现可靠性和耐久性,结构设计应遵循的基本依据。在对机匣进行零部件设计、强度设计与试验等结构设计时,本准则可作为推荐性、指导性、参考性的文件。

机匣是航空发动机的主要承力件,也是形成发动机气流通道的主要构件,其结构和承载情况十分复杂。机匣结构设计的质量,直接关系到发动机的气动性能、寿命、可靠性和推重比。因此,合理地制定机匣的结构设计准则,是发动机机匣设计的重要依据,也是提高发动机结构设计质量的可靠保证。

提高材料强度或降低工作应力裕度,都可提高构件的工作应力,从而使构件对设计误差,材质缺陷、使用条件和工艺过程等因素更为敏感。因此,要求发动机的结构设计更加完善、设计技术更加先进,试验工作更加完备,尽可能地消除潜在的事故因素。此外,由于高温、高压、高转速的工作条件,使现代发动机构件比以往发动机构件受到更多强度和寿命方面的限制。因此,现代发动机设计应该比以往发动机设计更加注意其结构设计的细节和寿命验证试验。未来发动机的性能和应力水平还会向更高的水平发展。应该吸取国外经验,认真总结我国近年来航空发动机结构设计的经验,制定一套比较先进、比较完善的发动机结构设计系统以及相应的结构设计准则,在我国航空发动机自行设计的道路上,迈出坚实的一步。

1.3 内容提要

本册为“航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则”的第四册机匣部分,共分 11 章。主要内容为:

- 绪论
- 载荷及载荷谱
- 典型结构
- 典型故障模式和影响分析
- 设计准则
- 设计分析方法
- 材料与工艺

- 试验验证
- 评定标准
- 风险评定
- 计划网络

本册的核心内容是第5章,发动机机匣的结构设计准则。根据航空发动机的工作条件、航空发动机发展对结构可靠性和耐久性的要求以及以往发动机机匣出现的主要故障情况,本册提出了8项机匣设计准则。即:

- 提供足够的低循环疲劳寿命
- 防止高循环疲劳
- 提供足够的许用应力
- 提供足够的刚度
- 提供足够的蠕变寿命
- 防止屈曲
- 尽量减小热变形和热不协调
- 提供对于非正常工作和意外事故的保护措施

本册其它章节都是围绕设计准则的基本内容和要求以及实施准则的基本内容和要求而给予的补充和说明。

机匣的结构设计是一项涉及面广、技术要求高的综合性系统工程。应从载荷分析、结构设计、材料选择、工艺方法、计算分析和试验验证等诸方面进行详细的分析和研究。只有这样,设计准则的要求才能得到落实和实施。

本册的第2章对机匣上承受的载荷及载荷谱进行了分析,这是确定机匣强度储备和寿命的基础,也是机匣结构设计的前提。

第3章和第4章介绍了机匣的典型结构及其设计特点,分析了机匣常见的典型故障,为机匣结构选型、设计提供了有价值的经验。

第6章介绍了机匣设计中的一些分析计算方法,其中包括理论或经验的估算方法和有限元方法。分析内容包括应力、变形、屈曲、蠕变、振动和寿命预测等。在设计中可根据需要查阅《航空发动机设计手册》的有关部分。在手册中对各种计算方法作了更详细的介绍。

第7章介绍了机匣的选材原则以及对机匣材料性能参数的要求。由于机匣的制造工艺对材料性能有密切关系,本章介绍了几种典型工艺对机匣常用材料性能的影响。

第8章介绍了机匣设计过程中必须进行的试验工作。在不同的阶段上,按试验要求进行验证,以确保设计准则的实施。

第9章根据准则内容和要求,提出了判断是否满足准则的标准。评定标准与各国的设计经验、设计分析手段和方法、材料和工艺水平等有密切的关系。由于我国发动机自行设计还刚刚开始,经验不多,研究工作也开展得较少,所提供的数据仅仅作为参考。

第10章介绍了构件的风险评定方法。为了提高机匣的可靠性,减少机匣结构设计的风险是具有重要意义的。

第11章介绍了机匣设计的计划网络。计划网络将机匣设计的全部活动分为探索研究、先期发展、工程研制等三个阶段。计划网络对于研究工作的计划管理和保证设计质量具有十分重要的意义。

第2章 载荷及载荷谱

2.1 引言

本章是针对燃气涡轮喷气和涡轮风扇发动机机匣和承力框架等而编写的,其内容包括机匣载荷及载荷谱、机匣受力分析及载荷的来源。载荷主要包括气体载荷、温度载荷和质量惯性载荷。在载荷谱中,列出了对机匣寿命影响较大的压力差工作循环,用于进行机匣低循环疲劳寿命分析。对于在机匣或承力框架设置安装节或附件吊挂等局部结构系统的寿命分析,则列出了机动载荷谱,供分析参考使用。

本章以涡轮风扇发动机为例,列出了主要机匣(不包括火焰筒及加力燃烧室机匣)所承受的静载荷。对于载荷来源所列出的载荷参数如压力、速度、流量或机动载荷参数等,均属于计算机匣载荷的原始参数,需要经过若干计算环节,才能获得机匣载荷,但只有压力差值可以很快地计算得到。计算气体轴向力时,要结合机匣结构,按力的传递方向,逐个部件计算叠加,最后在发动机推力节处平衡。计算惯性载荷时,首先需要计算发动机安装节和转子支承载荷,然后进行整个发动机机匣惯性载荷的计算。最后将气体轴向力、扭矩及惯性载荷综合起来进行单个机匣的载荷计算。这是一项繁琐的分析项目,属于发动机载荷分析部门的工作。详细的分析过程不属于准则编写的内容,将在《航空发动机设计手册》(第17册)中叙述。

本章较详细地阐述了机匣载荷及载荷谱,并收集了一些特殊飞行状态下或发动机在飞机上不同布局引起的载荷,供设计时参考。在载荷谱编写中,叙述了获取设计工作循环的渠道,同时对空测参数转换成使用工作循环的方法作了简介,并以 WP6 发动机燃烧室外机匣压力差谱编制过程为例,作了进一步说明。在机匣载荷数据来源中,介绍了原始参数获取的渠道。对引用参考的数据均作了说明,提请使用者结合具体情况进行必要的修正。

本章所述内容和指出的不同载荷对机匣强度的影响,对于从事机匣结构强度分析的工程技术人员,具有一定的参考作用。

2.2 载荷类型

2.2.1 气体载荷

燃气涡轮喷气和涡轮风扇发动机在地面或装机运转时,由于气体流动产生的作用在机匣上的气体载荷主要有压力差、轴向力、扭矩和温度载荷。

2.2.1.1 压力差

图 2-1 表示了以燃气涡轮风扇发动机为例的所有部件机匣。

图 2-1 中,所有机匣内壁面形成发动机的管道流动,其中包括主流道和内流道两部分,产生发动机机匣的部分推力,而机匣外壁面与机身或短舱内壁面形成的发动机外部气体流动,通过尾喷口引射气流冷却机匣壁面,降低机身或短舱的环境温度,因此处于不同气体流动环境条件下的机匣壁面均承受了不同的壁面压力差的作用。一般按下式计算压力差值:

$$q = p_{\text{外}} - p_{\text{内}} \quad (\text{MPa}) \quad (2-1)$$

式中: $p_{\text{外}}$, $p_{\text{内}}$ —— 机匣外壁面和内壁面的静压力, MPa。