

航空涡喷、涡扇发动机

结构设计准则

(研究报告)

第三册 叶 片



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)

第三册 叶 片

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)》

第三册 叶 片

主 编: 饶寿期

副 主 编: 徐鹤山

编 写: (按姓氏笔划为序)

王正涛 王延荣 王 鸣 许锴俊

陈 光 张 锦 饶寿期 杨晓光

高志达 徐鹤山 翟金坤

主 审: (按姓氏笔划为序)

邢德顺 陈士焯 杨治国 温卫东

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)》就好比一面镜子,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。

吴大珣

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:王相平、王海清、丛宝亨、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。

《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 编制目的	(1)
1.3 国外概况	(1)
1.4 内容提要	(2)
参考文献	(4)
第2章 载荷和载荷谱	(5)
2.1 引言	(5)
2.2 作用于叶片上的载荷	(5)
2.2.1 压气机(含风扇)叶片上的载荷	(5)
2.2.2 涡轮转子叶片上的载荷	(5)
2.2.3 叶片上载荷的计算	(5)
2.3 发动机工作包线与叶片强度、寿命计算状态	(8)
2.4 叶片结构设计对载荷的要求	(9)
2.4.1 探索研究阶段结构设计对载荷的要求	(9)
2.4.2 先期发展阶段结构设计对载荷的要求	(11)
2.4.3 工程研制阶段结构设计对载荷的要求	(12)
2.5 叶片载荷谱	(12)
2.5.1 估算叶片设计使用寿命用的载荷谱	(13)
2.5.2 飞行载荷谱与发动机寿命试验	(13)
2.5.3 持久试车和加速任务试车用的载荷谱	(15)
2.5.4 定寿延寿用的载荷谱	(15)
参考文献	(16)
第3章 典型结构和新结构	(17)
3.1 引言	(17)
3.2 压气机工作叶片	(18)
3.2.1 压气机工作叶片叶身	(18)
3.2.2 压气机工作叶片与轮盘的连接	(23)
3.2.3 工作叶片在榫槽中的锁定	(24)
3.2.4 整体叶盘(Blisk)	(27)
3.3 压气机静子叶片	(27)
3.3.1 叶片形状	(28)
3.3.2 静子叶片与整流器内、外环的连接结构	(28)
3.3.3 整流器与机匣、封严环间的连接	(29)
3.4 涡轮工作叶片	(29)

3.4.1	涡轮工作叶片的叶身	(30)
3.4.2	榫头(叶根)	(32)
3.4.3	中间叶根	(33)
3.4.4	叶片在轮盘中的锁定	(34)
3.4.5	涡轮的整体叶盘	(34)
3.4.6	叶片用的减振阻尼块	(34)
3.4.7	涡轮工作叶片的冷却	(34)
3.4.8	工作叶片毛坯加工方法	(35)
3.5	涡轮导向器叶片	(36)
3.5.1	传力导向器	(36)
3.5.2	不传力的导向器	(37)
3.5.3	复合倾斜的导向器叶片	(38)
3.5.4	导向器叶片的冷却结构	(38)
	参考文献	(39)
第4章	典型故障模式和影响分析(FMEA/FMECA)	(67)
4.1	引言	(67)
4.2	故障实例	(67)
4.3	故障模式和影响分析表	(69)
	参考文献	(69)
第5章	设计准则	(80)
5.1	引言	(80)
5.2	满足静强度和变形的要求	(81)
5.2.1	强度储备的确定原则	(81)
5.2.2	发动机设计中的限制载荷和极限载荷	(83)
5.2.3	对发动机叶片强度和变形的设计要求	(84)
5.3	提供足够的低循环疲劳寿命	(86)
5.3.1	叶片上的载荷状态	(87)
5.3.2	转子叶片低循环疲劳设计要求与保证	(88)
5.3.3	静子叶片的设计要求与保证	(93)
5.3.4	低循环疲劳寿命预测、验证及材料数据要求	(96)
5.4	防止高循环疲劳	(97)
5.4.1	防止共振	(98)
5.4.2	防止颤振	(102)
5.4.3	防止抖振	(106)
5.4.4	高循环疲劳	(107)
5.5	提供足够的蠕变/应力断裂寿命	(110)
5.5.1	蠕变载荷状态	(110)
5.5.2	叶片抗蠕变设计要求与保证	(112)

5.5.3	叶片蠕变计算、试验和评估要求	(118)
5.6	提供足够的抗氧化/腐蚀能力	(122)
5.6.1	压气机叶片的腐蚀环境分析	(122)
5.6.2	压气机叶片的选材及相应的防护措施	(123)
5.6.3	涡轮叶片的热腐蚀	(124)
5.6.4	涡轮叶片的防护涂层	(126)
5.6.5	隔热涂层叶片寿命研究	(129)
5.7	提供足够的抗外物损伤能力	(132)
5.7.1	外物对叶片损伤的形式与后果	(132)
5.7.2	材料及叶片结构形式的考虑	(133)
5.7.3	叶片外物损伤变量预测和限制	(133)
5.7.4	抗外物损伤能力的保证和考虑	(136)
	参考文献	(137)
第6章	设计分析方法	(139)
6.1	引言	(139)
6.2	叶片常规计算方法——名义应力法	(140)
6.2.1	由叶片离心力所引起的应力	(140)
6.2.2	气动力产生的弯矩	(140)
6.2.3	由离心力产生的弯矩	(141)
6.2.4	离心力弯矩对气动力弯矩补偿	(141)
6.2.5	叶片截面面积、重心坐标、惯性矩及叶片截面的抗弯断面系数的确定	(142)
6.2.6	叶片的弯曲应力	(142)
6.2.7	涡轮叶片的计算特点	(142)
6.2.8	叶片榫头强度计算	(142)
6.3	叶片线弹性和热弹性有限元分析方法	(144)
6.3.1	叶片用薄壳单元的线弹性分析方法	(144)
6.3.2	叶片用厚壳单元的线弹性分析方法	(146)
6.3.3	叶片三维热弹性有限元分析方法	(146)
6.4	叶片三维热弹塑性和蠕变有限元分析方法	(150)
6.4.1	叶片三维热弹塑性有限元分析方法	(150)
6.4.2	叶片三维热弹塑性蠕变有限元分析方法	(154)
6.5	定向结晶和单晶涡轮叶片的热弹性蠕变有限元分析方法	(158)
6.5.1	定向结晶材料叶片的本构关系	(159)
6.5.2	确定定向结晶叶片工程弹性常数的 wells 方法	(162)
6.5.3	各向异性叶片材料的弹塑性矩阵[Dep]	(168)
6.5.4	各向异性材料叶片的蠕变计算分析方法	(171)
6.6	叶片的接触分析	(171)
6.6.1	计算模型和总体坐标系的选取	(171)

6.6.2	边界条件处理及方程组的形成	(171)
6.6.3	接触类型的判定	(175)
6.6.4	方程组求解	(175)
6.7	叶片振动分析	(176)
6.7.1	固有振动特性的有限元分析	(176)
6.7.2	叶片共振分析	(179)
6.7.3	叶片振动响应分析	(181)
6.8	叶/盘耦合振动	(184)
6.8.1	用模群法分析叶/盘耦合振动	(184)
6.8.2	子结构联立迭代法与旋转态叶/盘耦合动力分析	(185)
6.8.3	叶/盘共振	(185)
6.9	叶片颤振分析	(186)
6.9.1	颤振发作的判据	(186)
6.9.2	叶片弯扭耦合颤振计算	(188)
6.9.3	叶片颤振预估计算	(190)
6.10	高循环疲劳分析	(193)
6.10.1	高循环疲劳特征	(194)
6.10.2	等寿命设计方法	(194)
6.10.3	多向疲劳应力	(199)
6.11	叶片蠕变/应力断裂寿命预测方法	(201)
6.11.1	寿命计算分析方法	(201)
6.11.2	涡轮叶片蠕变寿命预测	(205)
6.12	叶片低循环疲劳寿命预测方法	(208)
6.12.1	低循环疲劳基本知识	(209)
6.12.2	基于 Manson—Coffin 方程的低循环疲劳寿命预测方法	(211)
6.12.3	时间和循环分数法	(216)
6.12.4	应变范围划分(SRP)法	(216)
6.13	叶片结构设计分析中的推荐程序	(218)
6.13.1	MSC/NASTRAN 大型通用程序的功能和特点	(219)
6.13.2	ABAQUS 大型非线性通用程序功能和特点	(220)
	参考文献	(220)
第7章	材料和工艺	(222)
7.1	引言	(222)
7.2	叶片材料的选择原则	(222)
7.2.1	压气机转子叶片材料的选择	(222)
7.2.2	压气机静子叶片材料的选择	(223)
7.2.3	涡轮转子叶片材料的选择	(223)
7.2.4	涡轮导向叶片材料的选择	(224)

7.2.5 叶片选材的代料原则	(225)
7.3 对叶片材料的要求	(225)
7.3.1 对叶片材料性能参数的要求	(225)
7.3.2 对叶片材料在冶金工艺等方面的要求	(228)
7.3.3 材料数据库清单的制订	(229)
7.4 关键工艺及对材料性能的影响	(230)
7.4.1 毛坯工艺	(230)
7.4.2 焊接	(231)
7.4.3 热处理	(232)
7.4.4 小孔加工	(232)
7.4.5 表面最终加工工艺	(233)
7.4.6 喷丸和涂层	(233)
7.5 叶片表面强化和保护要求	(234)
7.5.1 叶片表面层质量	(234)
7.5.2 叶片表面强化与保护	(234)
7.5.3 叶片涂层材料的选择	(235)
7.5.4 叶片材料的薄壁效应与设计的要求	(235)
7.6 延寿措施及其对材料、工艺的要求	(235)
7.6.1 表面涂层	(236)
7.6.2 防止微动磨损	(236)
参考文献	(237)
第8章 试验验证	(238)
8.1 引言	(238)
8.2 试验类别、方法、设备及测量	(239)
8.2.1 试验类别	(239)
8.2.2 仪器测量方法的有效性	(239)
8.2.3 测试手段	(240)
8.3 应力及变形测量试验	(243)
8.3.1 目的	(243)
8.3.2 内容	(243)
8.3.3 方法	(243)
8.4 结构光弹模型试验	(244)
8.4.1 目的	(244)
8.4.2 内容	(244)
8.4.3 方法	(244)
8.5 振动特性试验	(245)
8.5.1 目的	(245)
8.5.2 内容	(246)

8.5.3	方法	(247)
8.6	叶/盘耦合振动试验	(247)
8.6.1	目的	(247)
8.6.2	内容及方法	(247)
8.7	高循环疲劳试验	(249)
8.7.1	目的	(249)
8.7.2	内容	(249)
8.7.3	方法	(249)
8.8	低循环疲劳试验与结构疲劳试验	(250)
8.8.1	目的	(250)
8.8.2	内容及方法	(250)
8.9	气冷叶片的专项试验	(251)
8.9.1	目的	(251)
8.9.2	内容及方法	(251)
8.10	转子叶片部件及台架的试验	(252)
8.10.1	目的	(252)
8.10.2	内容及方法	(252)
8.11	静子叶片台架试验	(258)
8.11.1	目的	(258)
8.11.2	内容及方法	(258)
8.12	抗外物损伤试验	(260)
8.12.1	目的	(260)
8.12.2	内容	(260)
8.12.3	方法	(260)
8.13	试车及飞行考核试验中的监测与监控	(260)
8.13.1	目的	(261)
8.13.2	内容	(261)
8.13.3	方法	(261)
	参考文献	(262)
第9章	评定标准	(263)
9.1	引言	(263)
9.2	应力标准	(263)
9.2.1	屈服	(263)
9.2.2	蠕变	(264)
9.2.3	持久强度	(264)
9.3	短期变形限制标准	(268)
9.3.1	弹性变形	(268)
9.3.2	转子完整性	(268)

9.4	蠕变变形限制标准	(269)
9.4.1	叶片蠕变伸长量	(269)
9.4.2	叶片蠕变翘曲	(269)
9.5	振动和疲劳强度评定标准	(269)
9.5.1	振动	(269)
9.5.2	疲劳强度	(270)
9.6	颤振评定标准	(272)
9.6.1	亚/跨音失速颤振	(272)
9.6.2	超音速非失速颤振	(273)
9.6.3	A100 型颤振	(273)
9.6.4	超音速失速颤振	(273)
9.6.5	堵塞颤振	(273)
9.7	低循环疲劳寿命评定标准	(274)
9.7.1	安全寿命要求	(275)
9.7.2	低循环疲劳寿命评定	(275)
9.7.3	损伤容限要求	(275)
9.8	吞鸟和外来物/内来物损伤评定标准	(276)
9.8.1	吞鸟	(276)
9.8.2	外来物/内来物	(277)
	参考文献	(277)
第 10 章	风险评定	(279)
10.1	引言	(279)
10.2	风险定义及风险评定目的和要求	(280)
10.2.1	风险定义	(280)
10.2.2	风险评定的影响因素	(280)
10.2.3	风险评定目的	(280)
10.3	叶片风险评定办法	(281)
10.3.1	叶片风险评定的阶段与目标	(281)
10.3.2	叶片风险评定的基本方法	(283)
10.3.3	叶片风险评定的主要内容	(283)
10.4	叶片风险评定试例	(283)
	参考文献	(290)
第 11 章	计划网络	(291)
11.1	引言	(291)
11.2	探索研究阶段	(291)
11.2.1	初步分析和设计	(291)
11.2.2	可行性试验和分析	(292)
11.3	先期发展阶段	(293)

11.3.1	初步评定	(293)
11.3.2	部件设计和验证	(294)
11.3.3	试验机试验验证	(295)
11.4	工程研制阶段	(295)
11.4.1	叶片结构设计要求	(296)
11.4.2	发动机初步设计	(296)
11.4.3	气动和结构试验器试验	(297)
11.4.4	全台发动机结构的环境验证	(298)
11.4.5	飞行考核试验	(298)
11.4.6	发动机工作寿命评定	(299)
11.5	叶片结构设计准则计划网络框图	(299)
11.5.1	探索研究阶段网络框图	(299)
11.5.2	先期发展阶段网络框图	(299)
11.5.3	工程研制阶段网络框图	(299)
	参考文献	(303)

第1章 绪论

1.1 引言

发展燃气涡轮发动机的关键是提高推重比,而推重比的提高是靠改善气动性能,提高涡轮前的温度,采用冷却的复杂结构以及发展新的耐高温的结构材料和降低工作应力裕度等措施来实现。然而,这样会增加发动机的严峻的工作条件,提高了结构的应力水平,使现代涡轮发动机的结构设计,更应该注意其设计关键和细节,以提高它的结构完整性和可靠性。

如果一台发动机关键零部件,在其重量、性能、成本和结构强度等限制范围内,在载荷和温度作用下,在规定的寿命期间内,能够正确地完成所预期的作用,那么这台发动机的零部件在结构上是令人满意的。

为了保证零部件良好地工作,零部件的设计必须遵循所制定的结构设计准则,这个结构设计准则,是根据过去对航空发动机设计、研制和使用中的经验以及对先进技术的预研所确定的。

1.2 编制目的

叶片是航空发动机的主要零件之一,其结构和承载情况十分复杂,它的结构设计质量,直接关系到发动机的性能、耐久性、可靠性和寿命。为此,制定合理的可实施的结构设计准则,是发动机叶片正确设计的重要依据。

众所周知,提高叶片材料强度或降低叶片的强度储备,都会提高叶片的工作应力,从而使叶片对设计误差、材质缺陷、使用条件和工艺过程等的影响因素更为敏感。因此,要求设计更加完善,设计技术更加先进,试验方法更加完备,以便消除一切潜在的事故条件。此外,由于先进的航空发动机叶片叶尖速度较高,并处于较高的温度和压力下工作,使现代发动机叶片设计比以前发动机叶片设计,更应该注意其结构设计细节以及寿命试验验证。估计未来的发动机的性能和应力水平还会继续向高水平方向发展。因此,吸取国外的经验,总结我国多年来结构完整性的研究成果,制定一套比较先进的、适合工程应用的叶片设计分析系统,将过去的以静强度分析方法转变为以静强度设计分析为基础、以疲劳和动力学设计分析为主、兼有断裂力学分析和可靠性设计分析内容的叶片设计分析系统,初步实现设计分析系统的更新是完全必要的,也是急需的。

1.3 国外概况

在国外发动机研制工作中,都明确地提出了发动机结构设计准则要求。美国于1973年制定的涡喷涡扇发动机通用军用规范 MIL-E-5007D 3.3节的“设计和结构”,就体现了准则的内容,特别是3.3.8节。1984年颁发的美国军标 MIL-STD-1783——发动机结构完整性大纲,明确五项任务是:设计所需资料;设计分析和材料特性以及发展试验;部件和核心发动机试验;地面和飞行试验;发动机寿命管理。它把发动机结构强度工作从方案设计开始直到发动机在使用中的寿命管理,贯穿于五项任务的始终。其中任务 I 中就提出了设计准则(4.4至4.15)。英国