航空发动机强度设计系统建设与应用

王　威,耿　瑞,王相平,宋　洋,曹　航,赵　娜,葛长闯
(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:结构强度设计是航空发动机设计、研制过程的重要组成部分。为了建立适用于航空发动机强度设计的体系平台,提升设计能力,依据航空发动机设计体系建设要求,结合航空发动机强度设计专业工作实际,提出“流程驱动、要素集成”的平台建设思想,并以流程模板的形式驱动工作任务的实施,实现强度设计系统的工程化应用。在系统建设过程中有效运用系统工程以及精细化工程等先进的方法,围绕“适用、好用、真用”的指导思想开展强度设计系统的建设与优化,搭建适合于强度设计专业的设计系统,重点解决工作流程、设计资源、工作任务、数据管理与型号及预研等实际工作相结合的问题,并将此系统应用于型号研制的强度设计工作中。

关键词: 强度设计;设计体系;流程驱动;要素集成;流程模板;航空发动机
中图分类号: V231.9　　**文献标识码:**A　　**doi:**10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.01.019

Construction and Application of Aeroengine Strength Design System

WANG Wei, GENG Rui, WANG Xiang-ping, SONG Yang, CAO Hang, ZHAO Na, GE Chang-chuang
(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The structural strength design is an important part of the design and development process of the aeroengine. In order to establish the system platform suitable for aeroengine strength design and improve the design ability, according to the requirements of aeroengine design system construction, combined with the actual work of aeroengine strength design specialty, the platform construction idea of "process drive and elements integration" was put forward. Work task implementation was driven in the form of a process template. The engineering application of strength design system was realized. Effective application of advanced methods such as system engineering and fine engineering in the process of system construction was carried out. The construction and optimization of the strength design system about the guiding ideology of the "suit, useful, true"was carried out. A design system suitable for strength design specialty was built. The problem of combining working process, design resource, work task, data management with practical work such as model and pre-research was solved in detail, and the system is applied to the strength design of model development.

Key words: strength design; design system; process drive; elements integration; process template; aeroengine

0　引言

航空发动机设计体系是规范指导和实施涡喷/涡扇/涡桨/涡轴类型航空发动机设计活动的技术系统。设计体系将规范发动机设计的全部流程,指定(或推荐指定)设计过程所使用的各类工具和方法,提供各类与设计活动相关的数据服务,是航空发动机设计经验的总结归纳和深化结晶,包括设计规范、设计软件、工程数据库和系统集成平台 4 部分[1-4],其中系统集成平台以信息化为载体,可充分发挥体系要素的指导、参照作用[5-7]。结构强度设计是航空发动机设计、研制过程的重要组成部分,在发动机整机及零部件的结构强度设计工作中发挥重要作用,保证发动机产品在寿命期内达到强度和可靠性设计要求[8-11]。随着中国航空工业的飞速发展,航空发动机设计研制任务日益繁重[12-14],整机和部件结构强度设计工作量也随之越来越大,但原有强度设计工作的开展、存储、管理和转

收稿日期:2018-09-19　　**基金项目:**国家重大基础研究项目资助
作者简介:王威(1985),男,硕士,工程师,主要从事航空发动机强度设计工作;E-mail:469073214@qq.com。

引用格式:王威,耿瑞,王相平,等.航空发动机强度设计系统建设与应用[J].航空发动机,2020,46(1):97-102. WANG Wei,GENG Rui,WANG Xiangping, et al. Construction and application of aeroengine strength design system[J]. Aeroengine, 2020, 46(1): 97-102.

化应用的方式过多地依赖于个人技术经验和技术传授这一途径,不能很好地将强度设计的各工作流程环节和关键要素很好地结合起来,既缺乏对成熟工作的规范化指导,又缺少针对特殊工作的灵活转化,已经无法适应现阶段任务的需求,不仅影响工作和学习效率,而且不利于知识经验的积累、传承和运用。

为了弥补上述不足,本文紧密结合强度设计体系建设要求,充分考虑航空发动机强度设计相关专业技术需求与现状,以国内外先进仿真平台为基础,建立适用于航空发动机结构强度的设计系统[15],以此平台为载体,彻底改变现有工作模式和流程,彻底理顺和规范了整个强度设计过程,实现强度设计工作规范性与灵活性的统一。

1 平台建设思想提出

针对在强度设计体系建设中所出现的设计工作过程不够规范,经验积累不够系统等问题,提出“流程驱动,要素集成”的平台建设思想,如图 1 所示。开展初步方案论证:应用 3 类(成熟、待改进、在研)可动态扩充的流程模板规范设计工作;应用检查清单对设计精度进行有效控制; 应用规范 / 指导书 / 文件模板等体系要素指导、约束设计过程。通过对现有强度设计规范与准则的研究,将强度设计的具体环节归纳为十余种典型操作动作,针对特定强度设计工作的流程模板可以通过操作动作的组合灵活快速地建立、编辑和修改,同时可以根据具体工作需要,灵活地集成适合的体系要素,具有良好的动态扩充性,避免设计流程过于僵化不利于指导某些特定设计任务的情况发生。

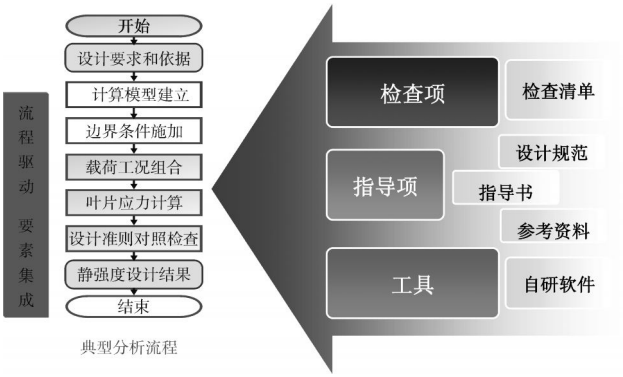


图 1 平台建设思想

2 关键技术实现

2.1 流程模板的建立与持续完善

发动机强度设计流程体现在航空发动机整个研制阶段,“十一五”期间将全部规范准则中涉及的典型强度设计流程归纳、提炼、分解、总结,形成平台上可执行的标准流程步骤,通过此步骤的组合建立流程模板,并将体系要素嵌入,以达到规范、指导不同类型强度设计活动的目的;“十二五” 期间为提高工程实用性,对流程模板进一步优化与完善,如模板中体系要素的管理与使用,设计要素与流程的映射关系的细化如图 2 所示。满足全周期研制活动如多轮次迭代、排故需求的技术实现等。

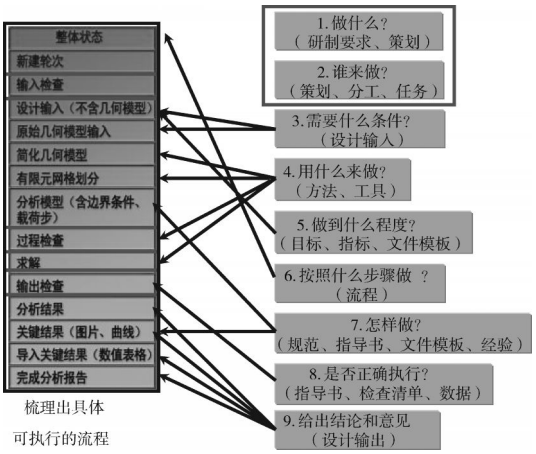
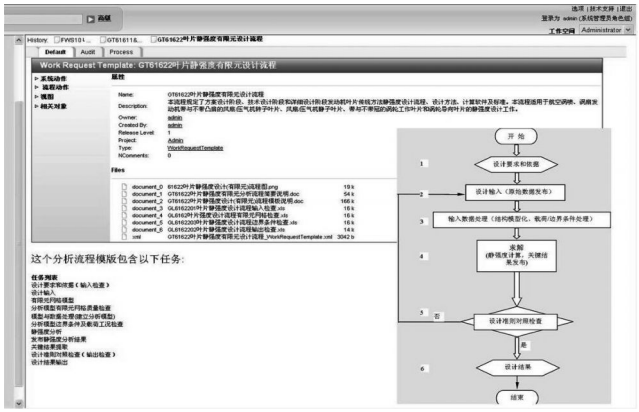


图 2 设计要素与流程的映射关系

针对以上问题, 首先在梳理体系要素基础上,对流程模板构架进行优化与重建,其优化方案如图 3 所示。其中模板涉及的各类要素包括软件、规范、指导书、文件模板、检查清单等,存放在系统的资源库中,在新模板制作时,通过链接模式调用这些要素,保证数据惟一性和可利用性。最终工程上应用的流程模板作为系统的核心,达到只要下任务,指定分析任务类型,就能确定惟一流程模板,指定惟一规范、指导书、文件模板和工作流程的目的。通过流程模板控制工作从“计划、下达以及执行和上报”各环节准确规范。



(a) 初始方案

(b) 最终方案

图 3　流程模板建立与优化

其次流程模板中系统完善了用于轮次迭代的操作,如图 4 所示。制定相关执行细则,同时又对排故、试验以及预研项目等工作开展模板定制的技术研究，基本上保证模板对全周期研制工作的可覆盖性,获得的成果均已应用到科研工作中。

发布级别	标签	阶段	类型
1	压气机转子-压气机转子-静强度分析-第 1 轮次	方案论证	设计方案
1	压气机转子-压气机转子-静强度分析-第 2 轮次	方案论证	设计方案
1	压气机转子-压气机转子-静强度分析-第 3 轮次	方案论证	设计方案

图 4　流程模板轮次迭代的工程应用

另外 1 项重要改进是在流程模板中增加关键设计参数的提取与录入功能,关键设计参数对未来强度设计工作具有重要的参考价值，分为结构几何参数、载荷参数和关键结果参数。“十二五”期间对关键设计参数进行梳理,并通过流程模板实现在系统中对关键设计参数录入、查询及对比的功能,如图 5 所示。

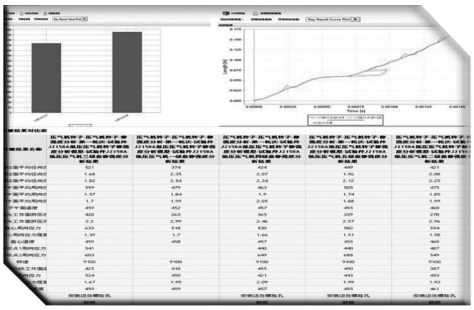


图 5　关键设计参数对比

强度设计系统的建立间接促进系统配套要素建设、平台建立,并在推行过程中,进一步推动强度设计体系成果的建设与分享。“十二五”期间,以流程模板为牵引,对涉及的各类设计要素进行全面梳理、补充和完善。截至目前,梳理流程 45 个，新增指导书 85 份,检查清单 115 份,文件模板 47 个,补充完善软件 40 余个,仿真规范 42 份,有效地促进了体系的全面建设。最终,以强度设计系统为载体（如图 6 所示），集成体系要素,充分发挥其指导参照作用。

图 6　体系建设以平台为载体

2.2　以流程为牵引的工作任务模式实现

在主任 / 组长下任务时，只要确定流程模板,也就指定了惟一的规范、指导书、文件模板和工作流程,设计人员以流程步骤作为执行项,以检查清单作为检查项,以指导书、规范以及参考资料作为指导项(如图 7 所示),规范、准确完成强度设计任务的同时,提高工作效率，系统中按工作需要进行相关工作移交,以适应实际工作需求。在设计人员开展工作的同时,主任 / 组长同步查看项目进行中的任务组成、任务完成和质量状态,工作流程如图 8 所示。

图 7　流程为牵引的工作任务

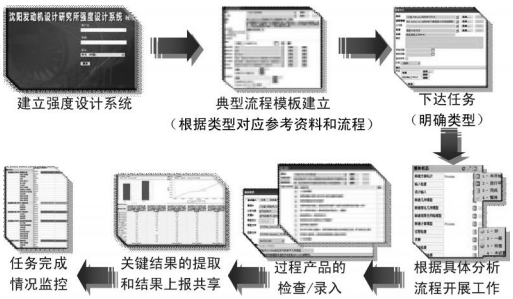


图 8　强度设计系统工作流程

2.3　强度设计工程数据库构建

在执行任务过程中,产生的数据直接作为过程数据形成数据库,按照强度设计工作需要,基于强度设

计数据梳理结果,系统中设有强度设计数据库、故障库和试验库,如图 9 所示。将需要管理的数据保存在相应的数据库中,可以针对不同的部件及分析流程进行相应存储。

图 9 强度设计数据库构建

(1)强度设计数据主要包括:原始设计输入、几何模型、有限元网格模型、载荷信息、仿真结果、关键结果、分析报告等。针对不同的部件及分析流程,其保存的数据可以有差别。

(2)强度排故数据主要包括:与排故工作相关的过程数据、故障类型、故障时间以及故障报告等重要信息。

(3)强度试验数据主要包括:与强度试验相关的原始数据、试验任务书以及试验总结报告等重要信息。

2.4 强度设计经验传承与应用

在设计体系要素补充与完善基础上,梳理工作过程中存在的问题和解决方案,以及设计方法和经验,同时也包括部分型号研制过程中积累的重要数据。利用强度设计资源库,将强度设计相关资源进行整合并分类管理,解决了经验数据经常因人员的变动而流失或因存储工具的损坏而丢失的问题,方便知识的积累、传承、借鉴和使用,有利于工作效率的提高,加速人才的培养。在资源库建设与使用过程中,随着强度设计资源数量的不断扩充和类型的不断增加,资源库结构也随之更改以适应日常工作需求,如图 10 所示。

2.5 可动态扩展的数据库技术实现

通过流程模板的形式驱动工作任务的实施,实现“流程驱动,要素集成”的平台建设思想的工程化应用。保障了强度设计的规范性、系统的灵活性及良好的扩充性,保障了流程、数据库和用户权限均可灵活配置。不但满足型号研制及组织机构调整等需求,也满足保密工作的要求。主要内容如下:

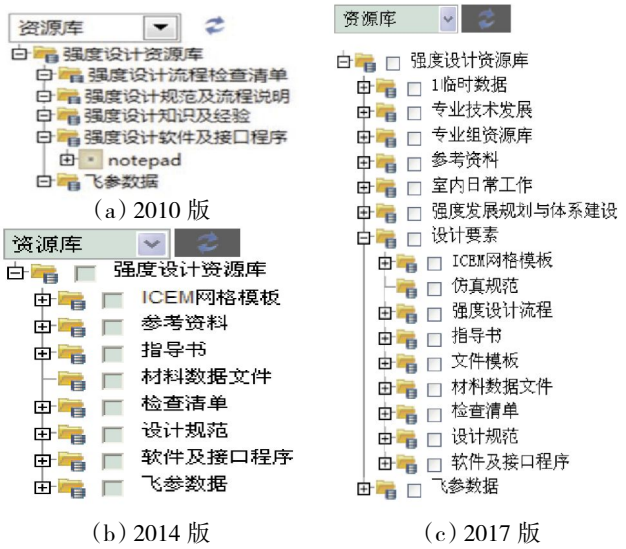


图 10 资源库规划

(1)流程模板可以根据不同设计阶段不同设计特点进行快速调整,可涵盖发动机全生命周期强度设计活动,包括设计、排故、试验以及预研工作。同时,新的知识经验也能快速集成在流程中,有利于知识的积累、经验的传承与应用。

(2)数据树初始只有基本框架,在正式使用时,根据研制型号增加,当有新型号时,可通过类似型号结构快速生产新的型号,既满足工作需求,也满足保密要求。为按照强度设计规范的 9 大专业细化所搭建,以适应专业调整的需求。

(3)资源库可以根据实际使用需求快速扩充和调整,以适应资源数量的不断扩充和类型的不断增加。

(4)系统中的枚举项都可以根据需要扩充,不至于因系统僵化而导致需要重新开发的问题。

在强度设计系统建立过程中,考虑到强度设计系统与研发集成平台以及其他系统数据的交换问题,提前开展强度设计系统与研发集成平台集成方案研究,为后续系统集成提供技术保障。方案如图 11 所示。主要内容包括以下 5 方面:

(1)强度分析任务发起。研发集成平台将具体强度分析任务通过 2 个系统接口发送至强度设计系统,然后传递任务说明文件指分析请求单 XML,在分析请求单 XML 文件中,说明输入数据要求、输出数据要求、时间节点、项目信息等。该分析请求在强度设计系统中,状态显示为待执行。

(2)设计输入推送。相关专业将设计输入分为几何模型和其他设计输入,通过研发集成平台推送到强

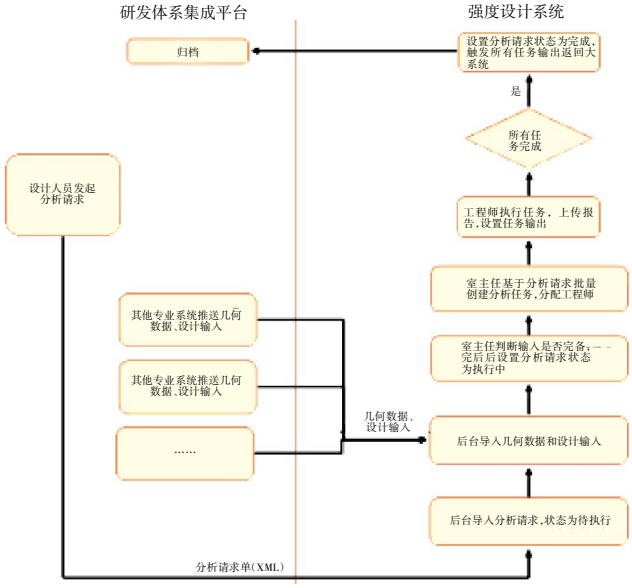


图 11　与研发集成平台初步集成方案

度设计系统,强度设计系统后台创建相应类型的几何模型和其他设计输入,并与分析请求关联。

(3)强度分析任务创建。在强度设计系统中,室主任或组长判断任务所属数据是否完备，数据完备后，设置分析请求状态为执行中，批量创建强度分析任务,并分配给相关设计人员。强度分析任务通过与分析请求的关联,找到关联的几何数据和其他设计输入。

(4)执行任务。强度设计人员完成任务后设置为完成状态，任务的输出可选项为任务的所有过程数据,包括报告、模型、结果等。由设计人员选定输出数据(可以为多个),该输出将返回研发集成平台。

(5)分析请求闭环。分析请求的所有任务完成后,触发接口将该分析请求所有任务的输出推送到研发集成平台,等最后 1 项任务完成后,触发分析请求的状态设置为完成。

3　强度设计系统推广与应用

历经7 年时间,共经历 Demo 版、2012 版、2014 版 3 个版本,搭建开发、测试、试运行、投入使用 4 个阶段，完成航空发动机强度设计系统的开发与完善工作。针对以上版本开展多轮次软件功能的测试与完善工作,如 2012 版 166 条、2014 版 112 条,测试记录。其中多次针对某项功能开展多轮次迭代修改。最终建立适合于强度设计专业的设计系统,并将此系统应用于型号研制的强度设计工作中,系统主要功能和特点见表1。

目前,强度设计系统在各预研项目和型号工作中全面推广使用,数据信息逐步增加,截至 2017 年底,系统中各数据库建设情况见表 2。数据增量情况如图 12 所示。

表 1　系统主要功能及特点

1.设计资源管理与应用	对强度设计工作相关的资源和经验进行整合,分类存储于资源库中;
2.流程固化与应用	采用强度设计流程模板实现设计流程规范性与灵活性的统一;
3.工作任务管理	实现强度设计过程数据（包含关键设计参数)的录入与管理;
4.数据管理	
5.用户及权限的管理	根据角色和数据类型不同进行权限管理;
6.批量导入	批量导入表格,快速扩充数据库;
7.系统扩充	系统具有良好的扩充性，方便后续相关内容补充和完善。

表 2　强度设计系统使用情况

过程数据库	强度设计任务数据库	1270 个
	几何模型数据库	1011 个
	简化几何模型数据库	301 个
	有限元网格模型数据库	575 个
	分析模型数据库	987 个
	关键结果参数数据库	2127 个
	强度设计报告数据库	1315 个
资源库	参考资料增加到 1092 项，各类经验数据库在不断扩充	

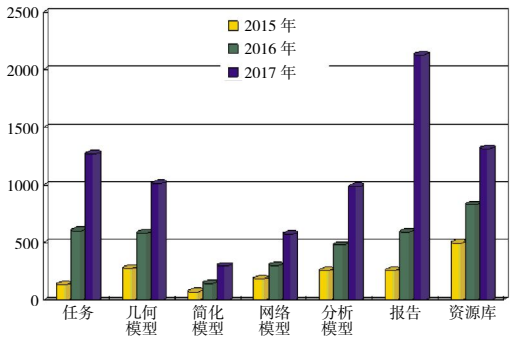


图 12　强度设计系统数据增量

4　总结

(1)提出“流程驱动,要素集成”的航空发动机强度设计体系总体思路,建立能够满足发动机全研制周期的强度设计系统。

(2)提出“流程模板”的技术概念,将流程步骤、设计要素、经验等嵌入模板中,通过对模板的管理和调用,驱动任务流程,保证了系统的规范与灵活。

(3)发展了设计过程数据谱系化管理和系统动态扩展技术,并实现在航空发动机强度设计系统中的应用。

航空发动机强度设计系统是航空发动机设计体系的重要组成部分，是发动机研制经验和教训的结晶，反映了行业目前所能够达到的技术和管理水平。通过此系统平台的建立,强度设计工作将包括流程驱动、规范/指导书参照、清单及各类模板约束、经验数据库支撑的规范高效的技术活动。由此提升了强度设计工作的技术水平和管理水平、提高了设计成功率及工作效率,最终实现结构强度设计能力稳步有序提升的目标。

参考文献:

[1] 张光星,卫刚.航空发动机设计体系建设指南[M]. 北京:国防科学技术工业委员会,2004:1-51.
ZHANG Guangxing, WEI Gang.Aeroengine design system guidance [M]. Beijing:Commission of Science, Technology and Industry for National Defence,2004:1-51. (in Chinese)

[2] 张光星,卫刚.航空发动机设计体系考核评估办法[M]. 北京:国防科学技术工业委员会,2010:1-53.
ZHANG Guangxing, WEI Gang.Aeroengine design system assessment method [M]. Beijing:Commission of Science, Technology and Industry for National Defence,2010:1-53. (in Chinese)

[3] Concepts NREC. Agile engineering design system [M].Massachusetts: Concepts NREC,2012:1-7.

[4] 王永明,卫刚,兰发祥,等.航空发动机设计体系的建设与发展[J].燃气涡轮试验与研究,2007,20(3):7-10.
WANG Yongming, WEI Gang, LAN Faxiang,et al.Constructing and developing of aeroengine design system[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007,20(3):7-10.(in Chinese)

[5] 时艳芳,徐华胜.信息技术在航空发动机设计体系集成平台建设中的应用[J].燃气涡轮试验与研究,2013,26(5):7-10.
SHI Yanfang,XU Huasheng. Application of information technology on construction of aeroengine design system [J]. Gas Turbine Experiment and Research,2013,26(5):7-10.(in Chinese)

[6] 王光升,罗新星.基于设计体系的航空发动机 R & D 知识转移系统动力学建模与仿真[J].系统工程,2017,35(3):7-10.
WANG Guangsheng,LUO Xinxing. Modeling and simulation of konwledge trasferring in aeroengine R&D institutions based on design system[J]. Systems Engineering,2017,35(3):7-10.(in Chinese)

[7] 陈庆陵,李伟,张国军. 基于知识重用的设计体系与应用[J]. 河南科技大学学报,2003,24(3):60-63.
CHEN Qingling, LI Wei, ZHANG Guojun. Design system and application based on knowledge reuse [J]. Journal of Henan University of Science and Technology, 2003, 24(3):60-63.(in Chinese)

[8] GJB/Z 101 航空发动机结构完整性指南[S]. 北京:国防科学技术工业委员会,1995:1-79.
GJB/Z 101 Engine structural integrity guidance[S]. Beijing:Commission of Science, Technology and Industry for National Defence, 1995: 1-79.(in Chinese)

[9] GJB241 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范[S]. 北京:国防科学技术工业委员会,1987:1-148.
GJB241 General specification for aircraft turbojet and turbofan engine [S]. Beijing:Commission of Science, Technology and Industry for National Defence, 1987:1-148.(in Chinese)

[10] CCAR-33 R2 航空发动机适航规定 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2012:1-93.
CCAR-33 R2 Airworthiness regulation for aircraft engine [S].Beijing: Civil Aviation Administration of PRC, 2012:1-93.(in Chinese)

[11] 刘廷毅.航空发动机研制全寿命管理研究及建议[J]. 航空发动机, 2012,38(1):1-6.
LIU Tingyi.Research and suggestion of lifecycle management for aeroengine development[J].Aeroengine, 2012, 38(1):1-6.(in Chinese)

[12] 江和甫, 蔡毅, 斯永华. 对航空发动机研究和发展规律的认识[J]. 燃气涡轮试验与研究,2011,14(3):7-10.
JIANG Hefu, CAI Yi, SI Yonghua. Understanding the law of aeroengine research and development[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011,14(3):7-10.(in Chinese)

[13] 李其汉.航空发动机结构完整性研究进展[J]. 航空发动机,2014,40(5):1-6.
LI Qihan. Investigation progress on aeroengine structural integrity [J]. Aeroengine, 2014, 40(5):1-6.(in Chinese)

[14] 杨士杰,李其汉. 加强航空发动机结构强度基础研究[C]// 中国航空协会. 中国航空学会第五届动力年会报告论文集. 北京:2003: 145-153.
YANG Shijie, LI Qihan. Strengthen basic research on aeroengine structure strength [C]// China Aviation Association. Report Anthology for 5th Annual Meeting of Power Branch of Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Beijing: 2003:145-153.(in Chinese)

[15] 周柏卓,杨士杰. 航空涡喷、涡扇发动机强度设计系统[J]. 航空发动机,2003,29(4):32-35.
ZHOU Baizhuo, YANG Shijie. The strength design system of the turbojet and turbofan engine [J].Aeroengine, 2003,29(4):32-35.(in Chinese)

(编辑:贺红井)