

燃气轮机涡轮盘强度寿命分析流程研究

杨子龙¹, 张大鹏², 苑天宇¹, 李磊¹

(1. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072; 2. 工业和信息化部电子第五研究所, 广东 广州 510610)

摘要: 涡轮盘是燃气轮机的关键部件, 在服役过程中承受着极高的离心载荷、振动载荷和热负荷, 极易失效破坏。从流程分析的全局出发, 明确了不同模块的输入输出元素, 建立了燃气轮机的研发流程构建方法。在此基础上以涡轮盘为研究对象, 针对其典型载荷, 建立了基于 ABAQUS 的涡轮盘强度分析流程, 针对其典型失效形式, 建立了包含多种试验的涡轮盘寿命分析流程, 明确了强度分析和寿命分析支撑要素, 并分析了要素之间的关联关系。

关键词: 流程; 涡轮盘; 强度分析; 寿命分析; 要素; 关联关系

中图分类号: TK474.7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.09.025

[引用本文格式] 杨子龙, 张大鹏, 苑天宇, 等. 燃气轮机涡轮盘强度寿命分析流程研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(9): 195-200. YANG Zi-long, ZHANG Da-peng, YUAN Tian-yu, et al. Study on strength life analysis process of gas turbine disk[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(9): 195-200.

Study on Strength Life Analysis Process of Gas Turbine Disk

YANG Zi-long¹, ZHANG Da-peng², YUAN Tian-yu¹, LI Lei¹

(1. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072; 2. The Fifth Electronic Research Institute of MIIT, Guangzhou, China, Post Code: 510610)

Abstract: The turbine disk is a key component of gas turbine, which is subject to very high centrifugal load, vibration load and thermal load during service and is easily damaged. Based on the overall situation of process analysis, the input and output factors of different modules are defined, the research and development process construction method of gas turbine is established, on the basis of which the turbine disk is the research object, the turbine disk strength analysis process based on ABAQUS is established according to its typical loads, the turbine disk life analysis process including various tests is established according to its typical failure mode, the support factors of the strength analysis and life analysis are clarified, and the correlation between the factors is analyzed.

Key words: process, turbine disk, strength analysis, life analysis, factors, correlation

引言

流程是为获得特定结果而进行的一系列相关活动^[1]。产品研究的流程化可以让组织形成一套共同的工作方法或沟通方式, 使得企业实现知识和专业方面的有效管理, 提高产品的创新开发能力, 从而

提高企业的创造力^[2-3]。目前, 只有美国、英国和俄罗斯等少数国家建立了相对成熟、完善的舰用燃气轮机研发流程体系。普·惠公司借助开发的涡轮自动设计系统和压气机设计研发流程体系, 使涡轮叶型和压气机设计周期缩短了 6 个月。罗罗公司应用压气机设计体系和关键零件设计体系进行辅助设计, 通过信息化辅助技术

收稿日期: 2021-03-26; 修订日期: 2021-05-02
基金项目: 国家科技重大专项(2017-I-0011-0012)
Fund-supported Project: Project: National Science and Technology Major Project (2017-I-0011-0012)
作者简介: 苑天宇(1994-), 男, 河北保定人, 西北工业大学博士研究生。
通讯作者: 李磊(1983-), 男, 河南新乡人, 西北工业大学教授。

使航空发动机从设计到取证的周期缩短为 24 个月。我国目前的舰船燃气轮机研发流程体系是在上世纪 90 年代引进的俄罗斯/乌克兰的设计软件基础上开发和建立起来的,虽然集成和发展了其研发体系中的软件和流程,但研发流程体系方法已严重滞后。

本文提出了一种燃气轮机研发流程建立方法,对研发流程的支撑要素进行了分析。并以燃气轮机典型部件涡轮盘为研究对象,建立了涡轮盘强度分析和寿命分析典型研发流程,列出了强度分析和寿命分析全流程的支撑要素,并分析了不同层级中要素间的关联关系。

1 研发流程构建方法与要素

流程的运行质量和效率是评价流程优劣的重要指标,研发单位应从需求出发,以满足研发需求为基本目标,构建一个规范化的、能完整反映其生命周期的实施系统,把设计指标传递给流程上的每一个环节和岗位,不断提升流程的效率。图 1 为研发流程系统架构。

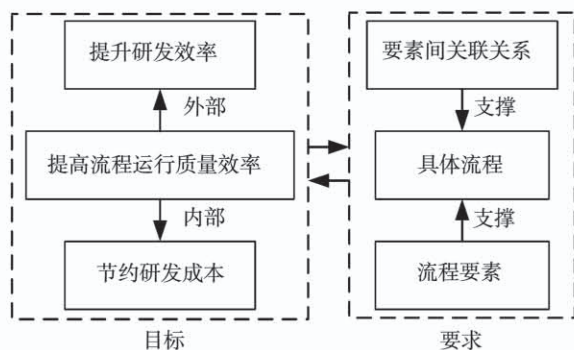


图 1 研发流程系统架构

Fig. 1 System architecture of research and development process

1.1 研发流程构建方法

完整的研发流程应包括流程分析→流程设计→流程评审发布→流程实施→流程改进等若干模块,各模块工作的输出都构成了下一模块的输入,模块间相互依存、相互联系^[4-5]。

研发流程分析:明确流程针对的研究对象、研发目标及应用范围。分析流程的模块、主要活动、输入、输出及部门分工等。明确流程各层级的任务及边界。

研发流程设计:在流程分析的基础上,进一步确定流程活动的输入输出,主要活动内容、实施标准等

内容,界定流程中各环节的任务和不同部门对接关系。

研发流程评审发布:跨部门流程由牵头部门组织专家评审组对流程进行评审。部门级流程由制定部门内部组织专家评审。评审内容为流程是否符合规范、流程环节设计及部门职责分工是否合理、流程运行能否达到预期目标等。通过评审的流程可进行发布生效。

研发流程实施:流程经评审通过后便可按部门岗位分工,依照标准实施。

研发流程监控与评估。定期采集反映流程运行状况的数据指标,监控关键实施环节,评估流程是否符合技术指标,分析存在的问题。

研发流程改进:根据流程监控及评估所反馈的问题,通过简化、整合及增减等方式对流程进行全面优化改进^[6]。

1.2 研发流程支撑要素

通过分析流程实施影响因素,严格把控实施过程中的要素管理,进而强化对研发流程的全面支撑。

针对燃气轮机设计研发流程,其支撑要素主要由强度分析环节和寿命分析环节的诸多因素组成。强度分析环节中涉及到的要素主要有三方面:分析输入要素(材料性能参数等)、构件/部件几何特征参数、服役工况以及评价要素;寿命分析环节中涉及的要素主要有与失效模式对应的材料寿命试验数据、服役工况及寿命考核部位的受载特征以及考核指标。

2 燃气轮机涡轮盘典型载荷与失效形式

2.1 涡轮盘典型载荷及分布特征

涡轮盘结构如图 2 所示。作为燃气轮机的连接部件,长期在高温、高转速的严酷环境下服役,叶片及轮盘质量引起的离心载荷、转子高速旋转引起的振动应力、温度梯度产生的热应力以及相关零件非协调变形的附加应力是其受到的典型载荷;离心载荷和温度载荷的不同步,涡轮盘复杂结构导致的应力不均匀和梯度是其典型的分布特征。

2.2 涡轮盘典型失效形式

恶劣的工作环境导致断裂失效涡轮盘,大多会造成灾难性的非包容性破坏。涡轮盘的主要的失效模式包括低周疲劳失效、蠕变/疲劳失效和高周复合疲劳失效 3 种。其中,低周疲劳主要出现在

涡轮盘结构盘缘以内位置,蠕变/疲劳失效是涡轮盘盘缘位置的主要失效模式,涡轮盘榫槽处则以高低周复合疲劳失效为主^[7],图3为涡轮盘的典型失效模式^[8]。



图2 涡轮盘典型结构
Fig.2 Typical structure of the turbine disk

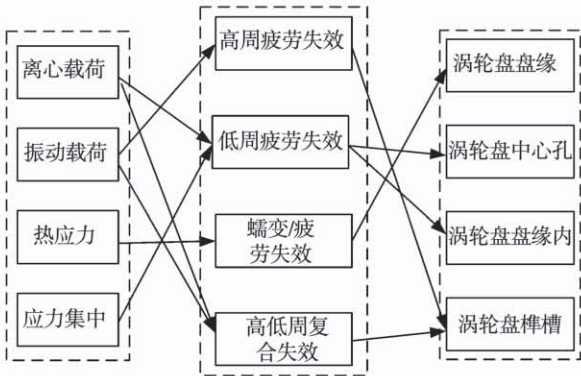


图3 涡轮盘典型失效模式
Fig.3 Typical failure mode of the turbine disk

3 燃气轮机涡轮盘强度寿命分析流程

3.1 涡轮盘强度分析流程

采用有限元分析方法,获取涡轮盘在特定服役工况下的应力、应变及温度状态,进而确定涡轮盘在服役过程中的损伤失效危险部位,为涡轮盘强度分析、寿命评估及结构研发设计提供支撑^[9]。

采用商用有限元分析软件 ABAQUS 对涡轮盘强度进行分析:

(1) 将建立的涡轮盘三维实体模型导入有限元分析软件,确定输入、输出参数量纲并对材料属性进行定义;

(2) 设置分析步骤对涡轮盘进行结构静强度计算,根据实际工况确定涡轮盘上载荷及约束的施加

位置及施加载荷的大小(涡轮盘强度分析主要考虑离心载荷及热应力);

(3) 对涡轮盘有限元计算模型进行网格划分,初步设置全局种子密度,选择网格属性及单元类型,创建作业后提交进行模型初算;

(4) 根据涡轮盘结构静强度初算结果,通过设置边种子在模型应力集中部位进行网格加密,对复杂的几何区域进行分割,合理选择网格划分单元类型。重新划分网格后重新提交计算作业,比对前后两次的计算结果,进行网格质量的检查及网格无关性检验;

(5) 对涡轮盘结构强度计算模型进行后处理,确定危险部位并输出应力、应变和温度数据,作为后续涡轮盘寿命分析输入条件,至此涡轮盘强度分析流程结束。

涡轮盘强度分析流程如图4所示。

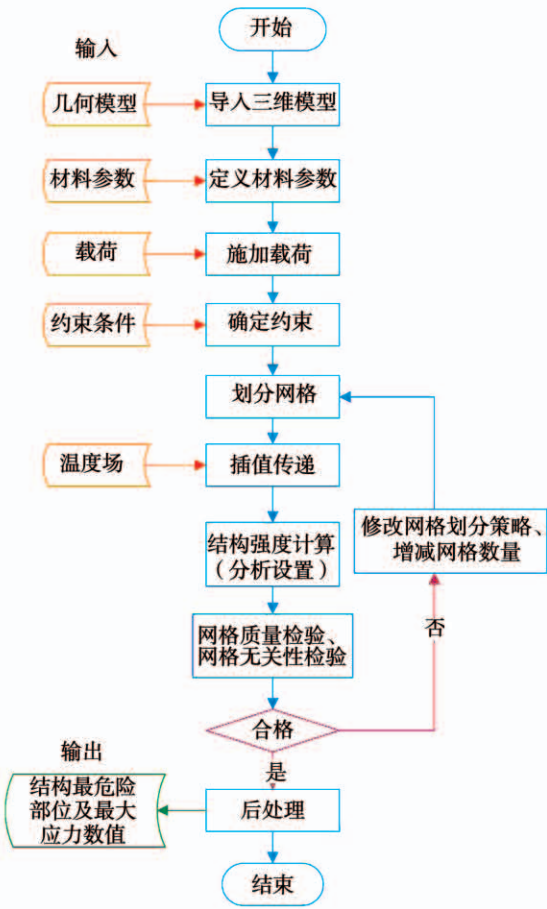


图4 涡轮盘强度分析流程
Fig.4 Turbine disk strength analysis process

3.2 涡轮盘强度准则

涡轮盘的破坏通常是由径向应力或平均周向应

力过大导致的。按照经验,涡轮盘的最大工作应力必须保证合理的安全系数和达到规定的工作寿命。

在所有必须考虑蠕变的应力条件下,应力必须小于规定的蠕变强度:平均的周向应力;在任意半径上的径向应力的合力;榫齿颈部的名义拉伸应力;榫齿的挤压应力。

3.3 涡轮盘寿命分析流程

对涡轮盘进行寿命分析,获取其在特定工况下的服役寿命,可以为燃气轮机的科学维护提供依据,发掘使用潜力和确定薄弱环节,指导涡轮典型零部件的设计,为燃气轮机的研发提供支撑。

涡轮盘寿命分析流程主要包括以下步骤:

(1) 由涡轮盘的设计要求和许用工况对实测随机载荷进行处理,形成载荷谱;

(2) 对涡轮盘材料进行材料级寿命试验,获取材料的疲劳、蠕变性能;

(3) 依照涡轮盘强度分析流程,对其进行强度分析,选取涡轮盘的失效危险部位为寿命考核部位;

(4) 根据涡轮盘的强度分析结果,针对不同部位、不同失效形式选用适当寿命预测方法计算寿命及损伤,采用损伤累积理论,即可求得涡轮盘的服役寿命^[10-13]。

涡轮盘寿命分析流程如图 5 所示。

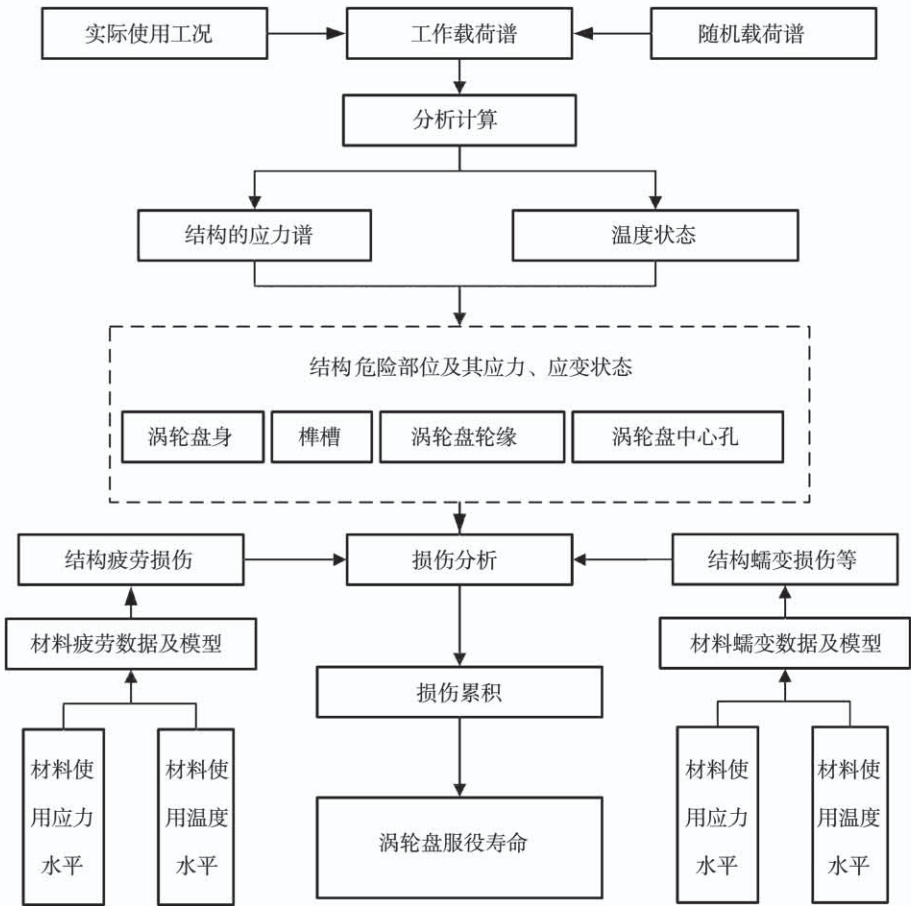


图 5 涡轮盘寿命分析流程

Fig. 5 Turbine disk life analysis process

3.4 涡轮盘强度分析支撑要素及关联关系

涡轮盘强度分析支撑输入要素包括材料的力学性能参数,如材料密度、弹性性能参数及塑性性能参数等;构件/部件几何特征参数主要指涡轮盘三维造型参数;服役工况在进行强度分析时由载荷谱体现;评价要素指对应的强度准则。

材料力学性能参数一般由试验获取,也可以从相关资料中查得,这些参数是进行强度分析的基础。需要注意的是,由于涡轮盘的服役工况复杂,以上参数需提供不同温度下的数值;三维造型参数由设计部门提供给强度分析部门,用以进行必要的载荷以及边界条件设置;载荷谱可以是实测的载荷-时间

历程,也可以是设计载荷谱,根据研发的不同层级选取对应的数据。

涡轮盘强度分析流程中典型的支持要素及关联关系如图6所示。

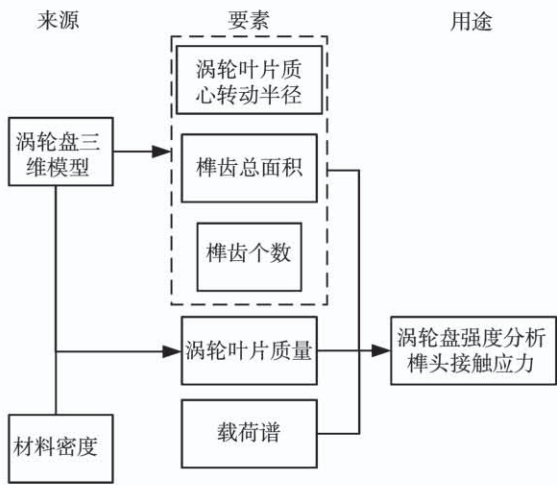


图6 强度分析流程中的要素及关联关系
Fig.6 The factors and correlations in the process of strength analysis

3.5 涡轮盘寿命分析支撑要素及关联关系

针对涡轮盘寿命分析流程,其支撑要素中的材料寿命试验数据包括材料的低周疲劳性能数据、高周疲劳性能数据及蠕变性能数据等。寿命考核部位的受载特征体现在失效危险点处的应力、应变及温度状态。服役工况在进行寿命分析时由载荷谱体现;考核指标即安全系数及设计寿命^[14-15]。

材料寿命试验数据一般由试验获取,也可以从相关资料中查得,这些参数是进行寿命分析的必要前提。需要注意的是,由于涡轮盘的服役工况复杂,以上性能数据需对应相应的服役温度;寿命考核部位的受载特征由强度分析获得;载荷谱可以是实测的载荷-时间历程,也可以是设计载荷谱,根据研发的不同层级选取对应的数据。

涡轮盘寿命分析流程中典型的支持要素及关联关系如图7所示。

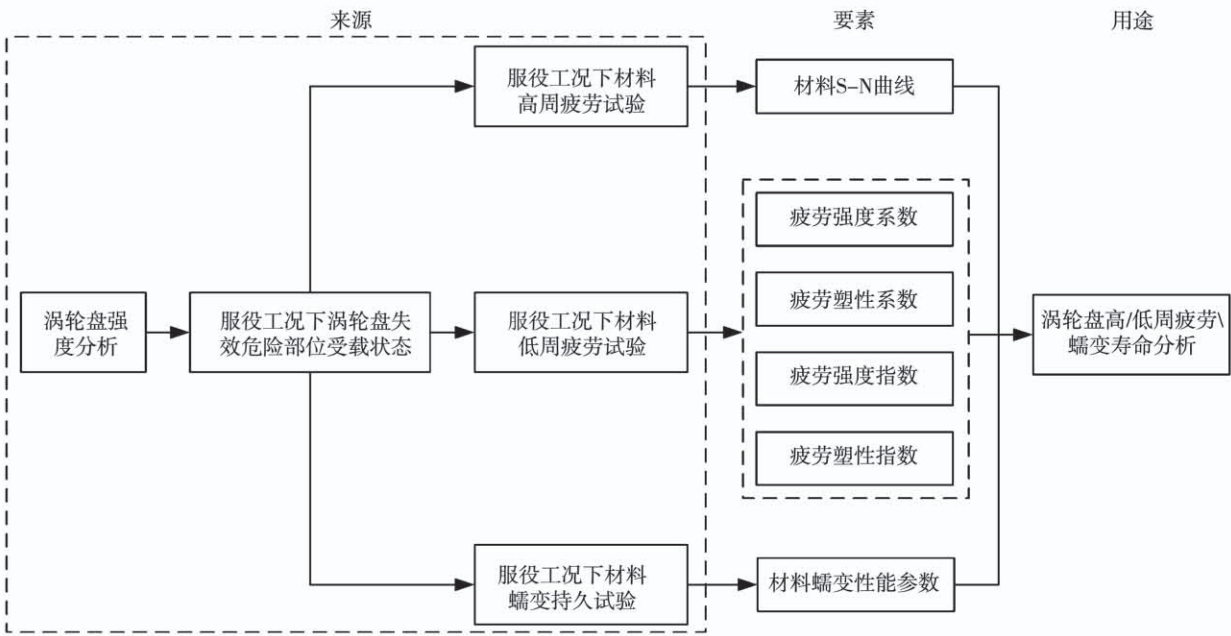


图7 材料力学性能要素及关联关系
Fig.7 The factors and correlations of the material mechanics performance

4 结 论

从研发流程构建角度出发,建立了研发流程构建方法,明确了燃气轮机研发流程支撑要素;以燃气轮机关键部件涡轮盘为研究对象,针对其结构特征,

围绕特定的服役环境,分析了涡轮盘的典型受载特征及失效形式;建立了涡轮盘强度分析流程,在强度分析流程基础上建立了涡轮盘寿命分析流程;明确了涡轮盘强度、寿命分析流程支撑要素,并分层级地描述了各要素间的关联关系:

(1) 建立了包含流程分析→流程设计→流程评审发布→流程实施→流程改进等若干模块的研发流程。

(2) 针对涡轮盘的受载特征,围绕涡轮盘服役环境,明确了涡轮盘的疲劳/蠕变交互的失效形式,建立了涡轮盘强度分析流程,在此基础上,建立了涡轮盘寿命分析流程。

(3) 从分析输入和评价要素等层级角度出发,明确了涡轮盘强度分析和寿命分析的支撑要素,建立了支撑要素间的关联关系,实现了研发初级阶段的流程分析、设计。

参考文献:

- [1] 赵卫东,俞东慧. 流程管理[M]. 北京:知识产权出版社,2007.
ZHAO Wei-dong, YU Dong-hui. Process management [M]. Beijing: Intellectual Property Press, 2007.
- [2] SENK M K, ROBLEK M. The impact of the standardization of the NPD process on its efficiency[J]. Journal of Business Economics and Management, 2019, 20(7): 149 – 167.
- [3] 毕 婷,徐雪峰. 业务流程管理能力及其影响因素研究[J]. 情报科学, 2012(7): 999 – 1002.
BI Ting, XU Xue-feng. Research on business process management capability and its influencing factors[J]. Information Science, 2012(7): 999 – 1002.
- [4] 王茂祥,李 群. 企业流程管理的实施模型及支撑要素研究[J]. 中国软科学, 2017(S1): 224 – 229.
WANG Mao-xiang, LI Qun. Research on the implementation model and supporting elements of enterprise process management [J]. China Soft Science, 2017(S1): 224 – 229.
- [5] COOPER R G. Overhauling the new product process[J]. Industrial Marketing Management, 1996, 25(6): 465 – 482.
- [6] 邹慧君. 机械产品概念设计及其方法综述[J]. 机械设计与研究, 1998(2): 9 – 12.
ZOU Hui-jun. A summary of conceptual design and methods of mechanical products [J]. Mechanical Design and Research, 1998(2): 9 – 12.
- [7] EGD-3 斯贝 MK202 发动机应力标准[S].
EGD-3 Spey MK202 engine stress standard[S].
- [8] 陶春虎. 航空发动机转动部件的失效与预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
TAO Chun-hu. Failure and prevention of rotating components of aeronautical engines [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.
- [9] 赵 霞. 某涡浆发动机涡轮转子强度与寿命计算[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
ZHAO Xia. Calculation of turbine rotor strength and life of a turbo-prop engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [10] 付 娜. 某航空发动机涡轮盘和叶片的强度分析与寿命计算[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
FU Na. Intensity analysis and life calculation of turbine plates and blades of an aero engine[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [11] 李其汉,王延荣. 航空发动机结构强度设计问题[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
LI Qi-han, WANG Yan-rong. The problem of structural strength design of aero-engine[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014.
- [12] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
YAO Wei-xing. Structural fatigue life analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.
- [13] 尚德广. 疲劳强度理论[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
SHANG De-guang. Fatigue Intensity Theory[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [14] WANG P, ZHANG Z, HUANG X, et al. An application of active learning Kriging for the failure probability and sensitivity functions of turbine disk with imprecise probability distributions[J]. Engineering with Computers, 2021(1): 1 – 21.
- [15] 李宏新,王延荣,石 亮,等. 涡轮盘疲劳寿命评估流程及应用[J]. 航空动力学报, 2017, 32(10): 2419 – 2426.
LI Hong-xin, WANG Yan-rong, SHI Liang, et al. Turbine disc fatigue life assessment process and applications[J]. Journal of Aerodynamics, 2017, 32(10): 2419 – 2426.

(金圣迪 编辑)