

文章编号: 1674-8190(2024)01-169-07

飞机操纵面数字化互换性设计

李云鹏, 姚雄华, 高帅

(航空工业第一飞机设计研究院 结构设计研究所, 西安 710089)

摘要: 随着数字化装配技术的逐渐成熟和推广应用, 适应数字量传递的互换性设计对于提升飞机操纵面设计效率、稳定装配质量和降低维护成本具有现实意义。以飞机操纵面的互换性设计为研究对象, 针对互换性的要求分析设计要点, 建立与数字化装配相协调的互换性设计流程; 从操纵面的构型特征角度分析互换性设计的结构元素; 提出实现操纵面互换性的技术途径, 给出相应的参考指标; 以某型飞机的副翼为例, 对其进行互换性分析和设计, 并通过实际装配进行检验。结果表明: 本文建立的操纵面互换性设计流程合理可行, 能够满足互换性要求。

关键词: 数字化装配; 操纵面; 互换性; 设计流程; 副翼

中图分类号: V214.6

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.01.20

Digital interchangeability design of aircraft control surfaces

LI Yunpeng, YAO Xionghua, GAO Shuai

(Structure Design Institute, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: With the gradual maturity and application of digital assembly technology, the interchangeability design adapting to digital quantity transfer is of significant practical significance for improving the efficiency of aircraft control surface design, stabilizing assembly quality and reducing maintenance cost. Taking the interchangeability design of a certain type of aircraft control surface as the research object, the design points are analyzed according to the requirements of the control surface interchangeability, and the interchangeability design process coordinated with digital assembly is established. The structural elements of the interchangeability design are analyzed from the configuration characteristics of the control surface. The technical approach to realize the interchangeability of the control surface is proposed, and the corresponding reference indexes are given. Combined with the test method of aircraft interchangeability, the aileron of a certain type of aircraft is taken as an example to analyse and design the interchangeability of the control surface, which is verified by the actual assembly inspection. The results show that the design process of control surface interchangeability is feasible, which can satisfy the interchangeability requirements.

Key words: digital assembly; control surface; interchangeability; design process; aileron

收稿日期: 2023-06-17; 修回日期: 2023-07-03

通信作者: 李云鹏(1977-), 男, 硕士, 研究员。E-mail: vemail@sohu.com

引用格式: 李云鹏, 姚雄华, 高帅. 飞机操纵面数字化互换性设计[J]. 航空工程进展, 2024, 15(1): 169-175.

LI Yunpeng, YAO Xionghua, GAO Shuai. Digital interchangeability design of aircraft control surfaces[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(1): 169-175. (in Chinese)

0 引言

大型飞机的设计和制造是一项复杂的系统工程,是航空业科研技术水平和工业制造能力的集中体现,是综合国力的显著标志,在国家经济和军事层面上具有战略意义^[1-2]。相比于中小型飞机研制,大型飞机的设计难度和制造量级都有显著的增加。多学科、多领域、多角度的综合,使得大型飞机研制具有技术难度大、协调范围广和生产周期长的特点。为适应世界制造业的先进发展趋势,提升大型飞机设计水平和制造质量,迫切需要航空业在智能制造技术和产业方面的升级,而提升设计和制造协同的数字化应用水平则成为工程人员的新选择^[3-5]。现代飞机研制由传统的模拟量协调逐步过渡到新型的数字量协调^[6-7],是促进航空业快速发展的必由之路。

随着计算机软硬件的升级换代和广泛应用,从设计到制造的流程联系更趋紧密和直接。无论是基于模型化的设计阶段,还是采用数字标工的制造阶段,不同程度地实现了设计研制和工艺协调手段的变革^[8-10]。然而,在实际应用层面,对于如何将设计要求准确传递并转变为工艺指令、快速落实到产品制造的问题,在国内尚缺乏成熟的数字化规则和解决方案。

目前,数字化研究工作在设计与制造领域各有侧重。在设计研制领域,注重的是设计手段的提升,对于工艺协调所需要的具体参数和量化要求相对较为分散。罗海东等^[11]研究了航空发动机设计构型管理方法,对于构型项划分方法提出了互换性的约束条件;韩建辉等^[12]研究了通用软硬件自动测试平台设计,确定了标准化体系对于测试设备的互换性和平台便捷升级的作用。

在工艺协调领域,重点集中于对结构数模的特征分析和数字协调^[13]。郑国磊等^[14]以舱门框为例开发了工艺的数字标准模型对设计模型进行特征分析;Wu D^[15]研究了在工艺阶段飞机互换性检查的具体实施过程和执行方法;吕政伟等^[16]基于知识工程的思想提出了飞机制造协调路线设计方法,研究了面向制造准确度计算和容差分配的数据集成;帅朝林^[17]在基于结构特征建模的基础上提出了面向制造的结构设计方法,使基于模型的定义(MBD)设计思想与加工工艺知识协调,提升

了结构设计的智能化效果;王胜任等^[18]在制造环节采用数据实时迭代和修正优化的方法,对装配工艺的智能化提出了解决方案。

针对飞机设计、制造特点,需要在飞机研制的全流程实现效率的提升。在飞机设计与制造环节之间建立有效的数据传递沟通渠道,是解决该问题的有效措施。具体而言,需要在设计阶段,建立标准流程对设计要求准确分解;规范模型标注对制造元素集中管理;开发建模算法对互换特征显性传递,从而实现设计要求便捷、准确地传递到工艺协调阶段。

本文以飞机操纵面的互换性设计为研究对象,结合工程实践和相应的行业标准要求,分析操纵面在设计阶段的互换性内容和要点,建立完整的互换性设计流程;根据面向数字化装配要求,研究互换性设计与检查的数字化协调方案以及措施,并以某型飞机的副翼为例进行数字化互换性设计的验证。

1 互换性要求

1.1 标准规定

国家军用标准和航空标准从基本定义和实施方法方面对互换性做出了详细的规定,是型号互换性设计的基本要求和执行依据。

根据国家军用标准 GJB 431—1988,互换产品是指在性能、可靠性和维修性等功能和物理特性方面与相似或相同的产品等效,其在默认的配合性能下,除调整外无需变更其本身或相邻产品^[19]。

根据航空标准 HB 6892—1993,互换产品的特性突出体现在维修性方面,应易于安装、拆卸和更换,而对要安装的产品及其相邻产品或结构除设计规定的调整外,不需修配和补加工^[20]。在具体的实施过程中,航空标准 HB/Z 99.7—1987 说明了互换产品在安装过程中,仅需用连接件(螺栓、螺母、垫圈、销子等),除设计规定调整要求外,不需切割、钻孔、铰孔、加垫、敲修等^[21]。

1.2 互换产品

对于飞机设计来说,合理确定互换项目是必要的。操纵面在飞机使用过程中,容易出现偶然损伤(如鸟撞、地面撞击等),在使用中更换较频

繁,为提高飞机出勤率,必须尽快更换,因此要求互换。在飞机研制初期一般会对操纵面提出互换性的设计要求,在具体的设计过程中应对互换性设计进行落实。但是,设计和制造的稳定需要一段时间,因此,在实际操作过程中是从替换逐渐向交点互换过渡,最终实现(完全)互换。

对于固定翼飞机,操纵面(副翼、扰流板、升降

舵、全动平尾和方向舵等)属于互换产品。

2 互换性设计内容

2.1 设计流程

本文建立的操纵面互换性设计流程如图 1 所示。

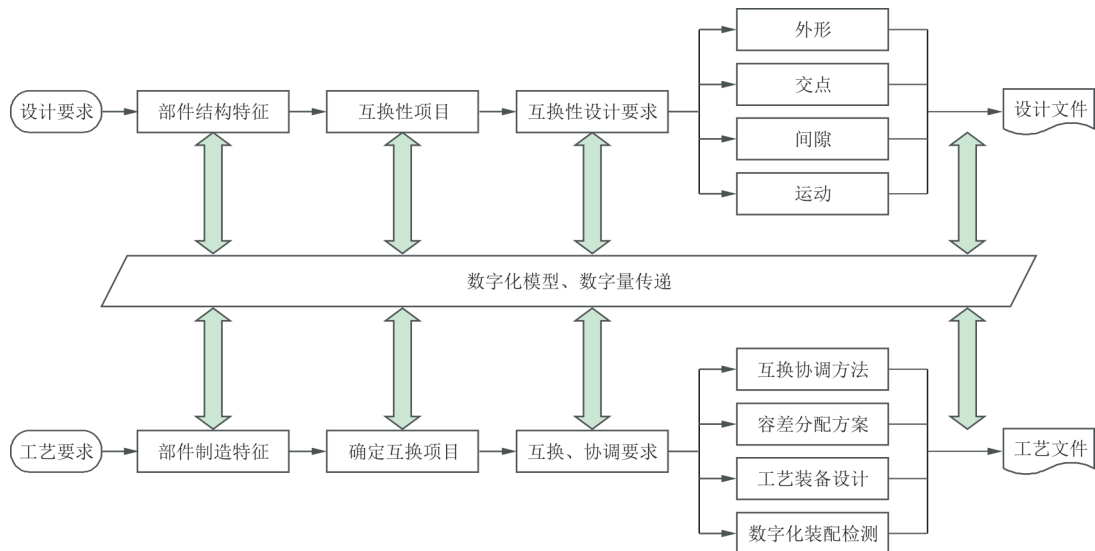


图 1 互换性设计流程

Fig. 1 Interchangeability design process

2.2 要求分解

在互换产品确定后,需要明确具体的互换要求。操纵面互换要求主要包含交点、外形、间隙和运动功能的互换。

1) 交点互换

操纵面运动功能的实现依赖于铰链结构,其交点互换指铰链交点的互换,包括铰链的间隙和同轴度的装配要求。铰链结构一般是单、双耳之间的配合,耳片之间的间隙、销轴与孔的配合是交点互换的主要内容。

2) 外形互换

操纵面的运动特点决定了其外形的检查包括静态与动态两个方面,一般首要检查的是操纵面与周边结构(固定翼面或操纵面)的外形吻合程度,主要特征是对结构间外形阶差、剪刀差和错位公差检查。

3) 间隙互换

操纵面在中立和偏转状态中有最小间隙要

求。在中立状态,操纵面总的铰链结构间隙应符合避免颤振的要求;在偏转状态,与相邻结构的最小间隙应符合设计要求,须以翼面间受载变形后的间隙为检查对象。

4) 运动功能互换

操纵面运动的灵活性是运动功能互换的基本要求,是实现运动功能的保障。操纵面的运动功能互换包括运动的灵活和极限位置的符合性。

2.3 互换性实施

飞机操纵面互换性的实施是对互换要求的落实。操纵面的运动功能是依赖于铰链结构而实现,能否实现互换关键在于铰链结构的设计。操纵面的铰链结构是由操纵机构和悬挂结构组合实现的,主要构成形式一般是单双耳配合。铰链结构的设计和制造水平对操纵面功能的实现起着关键作用,对飞机的可靠性、安全性和飞行品质具有重要影响。

操纵面铰链交点的设计关系到交点位置、间隙尺寸、外形状态和运动状况,故在操纵面设计过程中应将铰链设计作为互换性的检查点。操纵面的互换性设计包括交点定位、容差分配、间隙控制和维修性。

1) 交点定位

铰链交点的准确定位是结构承载和运动功能实现的基础。交点定位应着重关注孔和轴的配合以及多个支点孔之间同轴度的要求。操纵面一般是多支点的铰链结构,对悬挂接头的同轴度要求应与固定结构的对接相适应,对操纵接头的定位要求应与操纵系统的驱动相匹配,对于定位公差应有必要的设计补偿措施。

2) 容差分配

容差分配是兼顾设计与制造的必要手段。操纵面在容差分配时应将对位的结构件和系统件的容差状态一并加入分析中,如机翼固定后缘、操纵系统等。操纵面装配后的最终状态容差应不小于其子装配的累计容差。

3) 间隙控制

间隙控制是对结构功能实现的保障。操纵面的间隙控制应关注铰链结构内部的间隙及其对翼面结构、封严结构的状态影响。按完全互换要求,间隙可通过垫圈或滑动衬套等形式调整,如果是交点互换允许对替换的部位做小量锉修,按适航的要求,应将操纵面设计为完全互换,避免出现结构锉修的情形。另外,翼面周边的间隙、密封和剪刀差要求应与铰链的安装相匹配,或者有补偿措施能够对翼面局部间隙结构做出微调。

4) 维修性

操纵面的互换性应与维修性相适应。对于互换部位的检查应有适当的维护通路,使其便于测量和拆装。为提高互换性检查的效率,应避免互换过程中非必须的结构拆装和搬运;应避免出现结构损坏的情况,如防腐处理、耐磨涂层等。

2.4 工艺协调

1) 数据传递

制造部门接收到设计文件后,对其中的互换

性设计要求元素进行提取和分解。制造部门反馈互换性设计的元素完整性和实施性,针对不同类型的设计要求给出制造实施方案,如采用相应的加工方式、装配路径、检测手段以及互换性实施方法。

2) 互换

(a) 根据设计要求确定互换项目;

(b) 编制互换检查的工艺文件;

(c) 采用成熟的互换协调方法;

(d) 工装设计应用考虑互换要求。

3) 协调

(a) 针对关键件特性确定容差分配方案;

(b) 优先采用交点定位;

(c) 采用数控加工和数控测量技术;

(d) 采用数字装备进行装配、检测、协调;

(e) 对交点、外形、间隙、功能进行检查。

2.5 互换检查

操纵面装配后应进行互换性检查,检查应依据设计文件、工艺文件和行业标准 HB/Z 99.7—1987^[21]开展。

1) 设计文件

设计文件指操纵面设计单位设计的结构数模、图纸和技术条件等。在设计文件中对操纵面互换的基本状态、部位、数量应予以明确。

2) 工艺文件

工艺文件指制造单位根据设计图纸、技术条件和使用维护要求而编制的互换与替换的检查技术条件。互换性检查技术条件中应包括检查的部件名称、图号、技术要求、实施方法和基本操作程序。

3) 检查方法

互换检查是根据设计文件的要求,采用工艺文件,由工艺部门负责组织实施。在部装期间可以根据需要开展预互换检查,以便及早发现并解决问题,避免进入总装阶段造成操纵面悬挂的效率降低、装机周期延长。

互换检查前应根据具体的制造情况决定基准件与互换件的比例关系,如表1所示。

表 1 互换比例关系
Table 1 Interchange Proportionality

序号	阶段	基准件	互换件	备注
1	质量波动阶段	1	2	
2	质量波动阶段	2	1	
3	质量波动阶段	2	2	两架飞机之间,之后恢复原状态
4	质量波动阶段	2	4	左右件为全同件
5	质量稳定阶段	1	1	至少两架

3 操纵面的互换性设计实例

以某型机副翼的互换性设计为实例,验证本文建立的设计流程。

3.1 互换性分解

根据操纵面的设计要求,对安装位置的要求对应于交点的互换性,对气动外形面的要求对应于外形的互换性,对空间的要求对应于间隙的互换性,对舵面运动的要求对应于机构的功能要求。即:位置—交点—悬挂/操纵铰链;气动—外形—阶差/对缝/波纹度等;空间—间隙—相对位置最小间隙;运动—功能—绕轴旋转到指定位置。

3.2 互换性设计

对于操纵面的互换性设计要求,重点体现在交点的设计方面。以副翼为例对其铰链交点进行分析,操纵和悬挂的交点设计对副翼的安装位置、外形、间隙和运动功能均有直接影响。

典型副翼铰链结构示意图如图 2 所示。

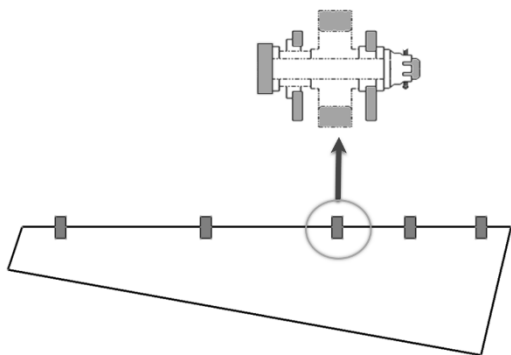


图 2 典型副翼铰链结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of aileron hinge structure

铰链内部螺栓、滑动衬套、固定衬套和基体之间的配合关系对操纵面的转载、运动和互换性具有重要影响。根据互换性要求,进行如下设计:选择压心位置附近的铰链为定位零件;考虑展向安装的补偿,在铰链处设计具有展向滑动特性的衬套;为便于拆卸安装,滑动界面间设计为小间隙配合,如 H7/g6,滑动界面间的粗糙度应不大于 $0.8 \mu\text{m}$,与周边固定零件的间隙应不小于 13 mm。

3.3 数字化建模应用

对互换性分解的元素根据分类列入相应数模节点,如图 3 所示,作为设计与制造之间的数字化交互介质,在后续的审校过程中根据需要直接提取相应元素,作为工艺文件编制的输入。

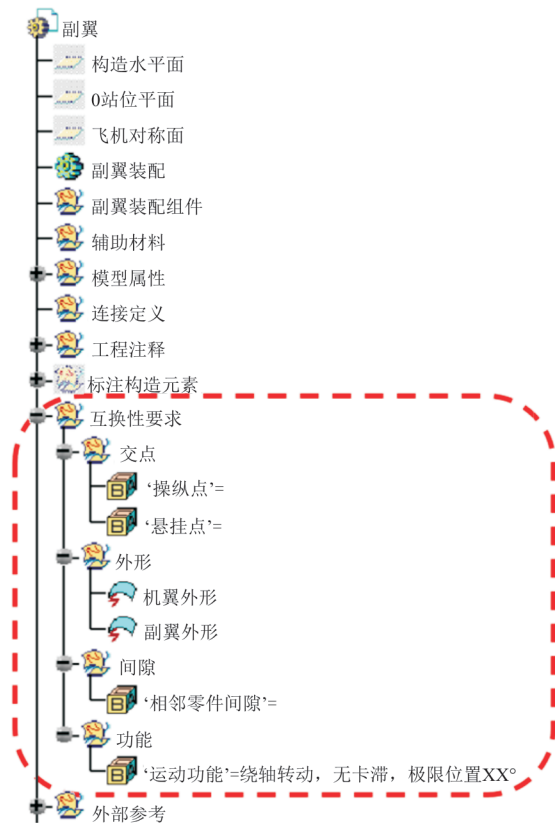


图 3 副翼结构建模示意

Fig. 3 Schematic diagram of aileron structure modeling

3.4 互换性检验

1) 通过现场实施多架机副翼互换性检查,能够通过拆卸螺栓实现完全互换,满足型号装机

要求;

2) 通过数字化模型交互,实现互换性要求的显性化传递,提升设计与制造的协同效率。

4 结 论

1) 本文通过对飞机操纵面互换性设计要求的分解,建立了以数字化方式传递约束的互换性设计流程,该流程能够满足互换性要求。

2) 对操纵面实现互换性的约束条件进行量化,通过对设计流程在副翼研制过程中的应用,验证了操纵面互换性设计的有效性,有助于提升设计与制造的协调效率。

参 考 文 献

- [1] 胡思远. 大飞机工程的战略意义、实施瓶颈及改革建议[J]. 工程研究, 2010, 2(1): 5-14.
HU Siyuan. Strategic significance, implementation bottleneck and reform suggestions of large aircraft engineering [J]. Journal of Engineering Studies, 2010, 2(1): 5-14. (in Chinese)
- [2] 郑晓博, 雷家骕. 我国发展大飞机的产业组织问题研究[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2009(s1): 33-42.
ZHENG Xiaobo, LEI Jiasu. Research on industrial organization of large aircraft development in China [J]. Journal of Tsinghua University (Philosophy and Social Sciences), 2009 (s1): 33-42. (in Chinese)
- [3] 于勇, 陶剑, 范玉青. 大型飞机数字化设计制造技术应用综述[J]. 航空制造技术, 2009(11): 56-60.
YU Yong, TAO Jian, FAN Yuqing. Application of digital design and manufacturing technology for large aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(11): 50-60. (in Chinese)
- [4] 范玉青, 梅中义, 陶剑. 大型飞机数字化制造工程[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
FAN Yuqing, MEI Zhongyi, TAO Jian. Digital manufacturing engineering for large aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [5] 朱剑英. 智能制造的意义、技术与实现[J]. 机械制造与自动化, 2013(3): 1-6, 10.
ZHU Jianying. Significance, technology and implementation of intelligent manufacturing [J]. Machine Building & Automation, 2013(3): 1-6, 10. (in Chinese)
- [6] 唐水龙, 卢鹤. 飞机装配数字化协调与模拟量协调的对比分析[J]. 航空制造技术, 2012(10): 26-29.
TANG Shuilong, LU Hu. Comparative analysis of digital coordination and analog coordination in aircraft assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(10): 26-29. (in Chinese)
- [7] 陈雪梅, 刘顺涛. 飞机数字化装配技术发展与应用[J]. 航空制造技术, 2014(1): 58-65.
CHEN Xuemei, LIU Shuntao. Development and application of digital assembly technology for aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(1): 58-65. (in Chinese)
- [8] 吴光辉, 刘虎. 大型客机数字化设计支持体系框架[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1386-1394.
WU Guanghui, LIU Hu. Framework of digital design support system-of-systems for large airliners [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1386-1394. (in Chinese)
- [9] 来云峰, 李婉丽. 模型驱动的民机数字化制造工艺技术研究与实践[J]. 航空制造技术, 2020(8): 70-76.
LAI Yunfeng, LI Wanli. Research and practice of digital manufacturing technology based on model-driven civil aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020(8): 70-76. (in Chinese)
- [10] 侯卓兵, 孟静晖, 胡成丹. 面向模块化配置生产的大型飞机装配规划与仿真技术[J]. 航空制造技术, 2017(4): 24-30.
HOU Zhuobing, MENG Jinghui, HU Chengdan. Large aircraft assembly plan and simulation technology for module-based configuration production [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(4): 24-30. (in Chinese)
- [11] 罗海东, 陈芝来, 肖金彪. 基于EBOM的航空发动机设计构型单台管理方法研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(6): 127-133.
LUO Haidong, CHEN Zhilai, XIAO Jinbiao. Study on the single management method of aero-engine design configuration based on engineering bills of material [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(6): 127-133. (in Chinese)
- [12] 韩建辉, 张芬, 杜永良. 自动飞行控制计算机通用自动测试平台设计[J]. 航空工程进展, 2020, 11(1): 122-131.
HAN Jianhui, ZHANG Fen, DU Yongliang. The design of general automatic testing platform for automatic flight control computer [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(1): 122-131. (in Chinese)
- [13] 韩志仁. 大飞机数字化制造关键技术[J]. 航空制造技术, 2016(1): 53-57.
HAN Zhiren. Key technologies of large aircraft digital manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(1): 53-57. (in Chinese)
- [14] 郑国磊, 李文杰, 王自军. 某大型飞机舱门框工艺标准数字模型[J]. 航空学报, 2010, 31(8): 1674-1679.
ZHENG Guolei, LI Wenjie, WANG Zijun. Digital technology standard model of door frame for a large aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(8): 1674-1679. (in Chinese)
- [15] WU D. Interchangeability and replacement inspection of air-

- craft components[C]// The Third International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics. Haikou: IEEE, 2017: 1-8.
- [16] 吕政伟, 谭昌柏, 安鲁陵, 等. 基于知识的飞机制造协调路线交互设计技术[J]. 航空制造技术, 2017(4): 60-66.
LYU Zhengwei, TAN Changbo, AN Luling, et al. Interaction design technology of knowledge-based aircraft manufacturing coordination route [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(4): 60-66. (in Chinese)
- [17] 朝帅林. 飞机结构件数字化设计与制造技术[J]. 航空制造技术, 2016(1): 46-52.
SHUAI Chaolin. Digital design and manufacturing technology of aircraft structural parts [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(1): 46-52. (in Chinese)
- [18] 王胜任, 郭岩, 乔兴华, 等. 基于数字孪生的飞机装配工艺技术研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(8): 131-134.
WANG Shengren, GUO Yan, QIAO Xinghua, et al. Research on assembly process technology based on digital twin [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(8): 131-134. (in Chinese)
- [19] 国防科学技术工业委员会. 产品层次、产品互换性、样机及有关术语: GJB 431—1988[S]. 北京: 国防科工委, 1988. Science Defense, Technology and Industry Committee. Item levels, item exchangeability, models and related terms: GJB 431—1988[S]. Beijing: National Defense Science, Technology and Industry Committee, 1988. (in Chinese)
- [20] 中国航空工业总公司. 航空飞行器的互换性与替换性: HB 6892—1993[S]. 北京: 中国航空工业总公司, 1993. AVIC. Interchangeability and substitutability of aircraft components: HB 6892—1993[S]. Beijing: AVIC, 1993. (in Chinese)
- [21] 中国航空工业部. 飞机零部件互换与替换工作条例: HB/Z 99.7—1987[S]. 北京: 中国航空工业部, 1988. Ministry of Aviation Industry of China. Regulations on exchange and replacement of aircraft parts: HB/Z 99.7—1987[S]. Beijing: Ministry of Aviation Industry of China, 1988. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)

(上接第 168 页)

- file/Jan-Lepicovsky/publication/24285514_On-Flowfield-Periodicity_in_the_NASA_Transonic_Flutter_Cascade/links/5a94132eaca2721405666e94/On-Flowfield-Periodicity-in-the-NASA-Transonic-Flutter-Cascade.pdf.
- [11] WEBER A, HEINZ-ADOLF S, REINHOLD F. 3D transonic flow in a compressor cascade with shock-induced corner stall[C]// 2001 ASME Turbo Expo; Power and Sear. New Orleans: ASME, 2001: 1-8.
- [12] 兰发祥, 周拜豪, 梁德旺, 等. 跨、超声速吸附式压气机平面叶栅试验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(5): 1123-1128.
LAN Faxiang, ZHOU Baihao, LIANG Dewang, et al. Experience experimental investigation of transonic and supersonic aspirated compressor cascades[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(5): 1123-1128. (in Chinese)
- [13] 唐凯, 葛宁, 顾杨, 等. 大攻角范围超音压气机叶栅激波波系研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29(2): 12-15.
TANG Kai, GE Ning, GU Yang, et al. Investigation on the shock wave system of supersonic compressor cascade at different attack angle[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2016, 29(2): 12-15. (in Chinese)
- [14] 邱名, 陈述, 王子维, 等. 超声速压气机叶栅研究进展[C]// 2017年中国航空科学技术大会. 北京: 中国航空学
- 会, 2017: 349-367.
- QIU Ming, CHEN Ti, WANG Ziwei, et al. Process in supersonic cascade of compressor[C]// 2017 China Aviation Science and Technology Conference. Beijing: CSAA, 2017: 349-367. (in Chinese)
- [15] 黄开诱, 田立丰, 杨瑞, 等. 超声速变马赫数风洞流场参数线性变化验证[J/OL]. 航空工程进展: 1-10[2023-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.v.2023-0428.1603.002.html>.
HUANG Kaiyou, TIAN Lifeng, YANG Rui, et al. Linear change verification of flow field parameters in supersonic continuously variable Mach number wind tunnel [J/OL]. Advances in Aeronautical Science and Engineering: 1-10[2023-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.v.2023-0428.1603.002.html>. (in Chinese)
- [16] 潘锦珊, 单鹏. 气体动力学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
PAN Jinshan, SHAN Peng. Fundamentals of gasdynamics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)