

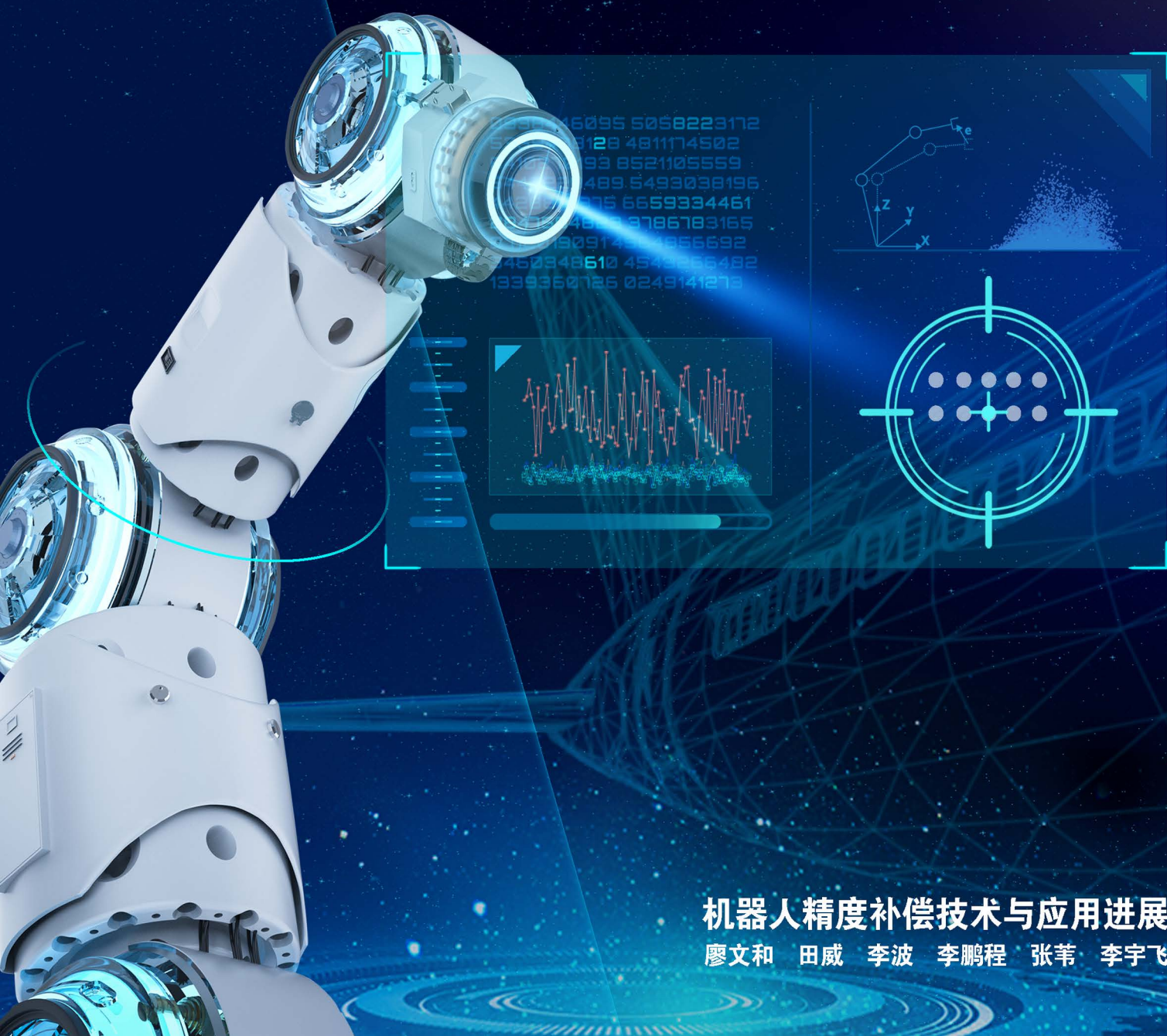
航空学报

5

2022 / Vol.43

HANGKONG XUEBAO

机器人先进制造与装配技术专栏



机器人精度补偿技术与应用进展

廖文和 田威 李波 李鹏程 张苇 李宇飞

目 次

机器人先进制造与装配技术专栏(执行主编:廖文和,田威,郑侃;策划编辑:李世秋)

机器人精度补偿技术与应用进展	廖文和,田威,李波,李鹏程,张苇,李宇飞(627142)
大型复杂构件机器人制孔技术研究进展	董松,郑侃,孟丹,廖文和,孙连军(627133)
机器人型装备在航空装配中的应用现状与研究展望	王皓,陈根良(626128)
飞机部件数字化调姿定位测量点的优选与构造算法	巴晓甫,薛红前,李西宁(625514)
考虑关节回差的工业机器人精度补偿方法	田威,程思渺,李波,廖文和(625569)
面向大型卫星的可移动混联机器人加工技术	张加波,刘海涛,乐毅,杨继之,易茂斌,王云鹏,柔磊(625731)
机器人铣削系统精度控制方法及试验	李宇飞,田威,李波,张楠(625815)

综 述

混合相/冰晶条件下的结冰研究综述	黄平,卜雪琴,刘一鸣,林贵平,杨坤(025178)
航空发动机管路系统动力学特性综述	汪博,高培鑫,马辉,孙伟,林君哲,李晖,韩清凯,刘中华(025332)

流体力学与飞行力学

ARJ21 飞机尾涡在侧风条件下的近地演化数值模拟	张钧铎,左青海,林孟达,黄伟希,潘卫军,崔桂香(125043)
平流层系留气球气动参数敏感性分析	张冬辉,张泰华,崔燕香,陈臣,王生(125083)

基于吸引域与二元极值理论的结冰飞机飞行风险量化评估 伍强,徐浩军,裴彬彬,魏扬,张杨(125137)

适用于工程数据的飞行器气动特性修正框架 李金晟,庄凌,宋加洪,卢宝刚,苏伟,吴乔(125157)

基于全线程树数据结构的笛卡尔网格高效生成技术 陈浩,毕林,华如豪,周清清,唐志共,袁先旭(125170)

类 X-43A 飞行器高超声速分离仿真 赵飞,刘丽玲,石泳,左光,万千,张宇佳(125171)

耦合粒子图像测速误差的连续伴随数据同化技术 邓志文,何创新,刘应征(125305)

燃烧室构型对旋转爆震波传播特性的影响 赵明皓,王可,王致程,朱亦圆,李清安,范玮(125372)

固体力学与飞行器总体设计

民机全机疲劳试验综合加速技术研究 with 验证 王育鹏,田文朋,宋鹏飞,夏峰,冯建民(224919)

飞机典型壁板结构剪切屈曲疲劳试验与分析方法 苏少普,常文魁,陈先民(225219)

考虑组件保形约束的多组件结构系统布局优化 郭文杰,朱继宏,罗利龙,常亮(225225)

面向直升机抗坠毁的新型夹心八边形蜂窝设计、仿真和理论研究 王佳铭,李志刚,梁方正,刘婉婷,廖就,陈芳育,李萌,邵特立(225244)

复合材料整流罩减振降噪的动力吸振器设计 李航行,胡迪科,吴邵庆(225249)

桨叶分段线性扭转对旋翼性能的提升 张宇杭,韩东,万浩云(225264)

循环热机载荷作用下航空涡轮盘蠕变疲劳寿命预测 陈克明,田若洲,郭素娟,王润梓,张成成,陈浩峰,张显程,涂善东(225290)

载荷敏度抑制下涡轮盘拓扑优化及结构演化 闫浩,吴晓明(225295)

基于振动监测的部件状态维修与备件订购联合决策 何勇,王红,李晶,齐彦昆(225304)

飞行器结构布局与尺寸混合优化方法 胡嘉欣,芮姝,高瑞朝,苟建军,龚春林(225363)

固旋翼垂直起降混电飞行器推进系统设计 宗建安,朱炳杰,侯中喜,杨希祥(225395)

面向满足率与利用率的通用备件优化配置方法 王俊龙,楼京俊,阮旻智,徐立(226978)

电子电气工程与控制

- 电推进飞机新型高功率密度轴向磁场永磁电机对比与分析 高华敏,张卓然,王晨,薛涵,刘业(325229)
- 电推进飞机移相双绕组永磁电机特性分析..... 陆嘉伟,张卓然,李进才,孔祥浩(325230)
- 基于改进的 FCM 和信息熵修正的航迹融合算法 甄绪,刘方(325236)
- 基于 CPC1e 高速总线的机载多核计算处理平台 俞大磊,崔西宁,李成文,刘婷婷,周勇(325238)
- 在线学习的循环自适应机动目标跟踪算法 熊伟,朱洪峰,崔亚奇(325250)
- 临近空间伴有尾流高超声速目标检测定位算法..... 薄钧天,王国宏,于洪波,张翔宇(325255)
- 基于多尺度深度学习的自适应航拍目标检测..... 刘芳,韩笑(325270)
- 跑道侵入与冲突检测的共形几何代数描述..... 焦卫东,王瑞冬,姚军强,庞艳丽(325297)
- 基于 Transformer 模型的卫星单目位姿估计方法 王梓,孙晓亮,李璋,程子龙,于起峰(325298)
- 临近空间高超声速多目标检测前跟踪算法..... 薄钧天,王国宏,于洪波,张翔宇(325299)
- 递进式路径转移姿态机动快速规划方法 王卓,徐瑞,李朝玉(325308)
- 基于 DE-MADDPG 的多无人机协同追捕策略 符小卫,王辉,徐哲(325311)
- 韧性无人机群多域协同方法建模与求解 孙沁,李鸿旭,王毓智,周丽萍,张英朝(325340)

材料工程与机械制造

- 平纹机织与 2.5D 机织复合材料平板弹道冲击特性对比 冯振宇,迟琪琳,崔怀天,解江,牟浩蕾(425116)
- 基于 BPNN 的封严涂层孔隙分布均匀性超声表征 董珍一,林莉,雷明凯,马志远(425294)
- 飞机高锁螺栓孔边缺陷阵列远场涡流传感器仿真与试验 宋凯,欧阳永杰,方志泓,霍俊宏,崔西明(425301)
- 热梯度环境下梁高频振动的能量流模型 刘知辉,牛军川,贾睿昊(425336)

ACTA AERONAUTICA ET ASTRONAUTICA SINICA

(Monthly)

Volume 43 Number 5

May 2022

CONTENTS

Special Topic: Advanced Manufacturing and Assembly Technology Using Robotic

(Guest Editors: LIAO Wenhe, TIAN Wei, ZHENG Kan; Managing Editor: LI Shiqiu)

- Error compensation technology and its application progress of an industrial robot
..... LIAO Wenhe, TIAN Wei, LI Bo, LI Pengcheng, ZHANG Wei, LI Yufei(627142)
- Robotic drilling of large complex components; A review
..... DONG Song, ZHENG Kan, MENG Dan, LIAO Wenhe, SUN Lianjun(627133)
- Research progress and perspective of robotic equipment applied in aviation assembly
..... WANG Hao, CHEN Genliang(626128)
- Optimization and construction algorithm of measuring points for digital attitude adjusting and positioning of aircraft components
..... BA Xiaofu, XUE Hongqian, LI Xining(625514)
- An error compensation method of an industrial robot with joint backlash
..... TIAN Wei, CHENG Simiao, LI Bo, LIAO Wenhe(625569)
- Mobile hybrid robot processing technology for large satellites
..... ZHANG Jiabo, LIU Haitao, YUE Yi, YANG Jizhi, YI Maobin, WANG Yunpeng, ROU Lei(625731)
- Accuracy control method and experiment of robot milling system LI Yufei, TIAN Wei, LI Bo, ZHANG Nan(625815)

Reviews

- Mixed phase/glaciated ice accretion; Review
..... HUANG Ping, BU Xueqin, LIU Yiming, LIN Guiping, YANG Kun(025178)
- Dynamic characteristics of aero-engine pipeline system; Review
..... WANG Bo, GAO Peixin, MA Hui, SUN Wei, LIN Junzhe, LI Hui, HAN Qingkai, LIU Zhonghua(025332)

Fluid Mechanics and Flight Mechanics

- Numerical simulation on near-field evolution of wake vortices of ARJ21 plane with crosswind
..... ZHANG Junduo, ZUO Qinghai, LIN Mengda, HUANG Weixi, PAN Weijun, CUI Guixiang(125043)
- Sensitivity analysis of aerodynamic parameters of stratospheric tethered balloon
..... ZHANG Donghui, ZHANG Taihua, CUI Yanxiang, CHEN Chen, WANG Sheng(125083)
- Quantitative evaluation of flight risk of icing aircraft based on theory of region of attraction and binary extreme value
..... WU Qiang, XU Haojun, PEI Binbin, WEI Yang, ZHANG Yang(125137)

Aircraft aerodynamic characteristic correction framework for engineering data	LI Jinsheng, ZHUANG Ling, SONG Jiahong, LU Baogang, SU Wei, WU Qiao(125157)
Efficient Cartesian mesh generation method based on fully threaded tree data structure	CHEN Hao, BI Lin, HUA Ruhao, ZHOU Qingqing, TANG Zhigong, YUAN Xianxu(125170)
Hypersonic separation simulation of aircraft similar to X-43A	ZHAO Fei, LIU Liling, SHI Yong, ZUO Guang, WAN Qian, ZHANG Yujia(125171)
Continuous-adjoint based data assimilation technique coupled with particle image velocimetry error	DENG Zhiwen, HE Chuangxin, LIU Yingzheng(125305)
Effect of combustor configurations on propagation characteristics of rotating detonation waves	ZHAO Minghao, WANG Ke, WANG Zhicheng, ZHU Yiyuan, LI Qing'an, FAN Wei(125372)

Solid Mechanics and Vehicle Conceptual Design

Research and verification of comprehensive acceleration technology for civil aircraft full-scale fatigue test	WANG Yupeng, TIAN Wenpeng, SONG Pengfei, XIA Feng, FENG Jianmin(224919)
Fatigue buckling test and analytical approach of aircraft typical panel structures	SU Shaopu, CHANG Wenkui, CHEN Xianmin(225219)
Integrated layout and topology optimization of multi-component structural systems considering component shape-preserving design constraints	GUO Wenjie, ZHU Jihong, LUO Lilong, CHANG Liang(225225)
Design, simulation and theoretical study on novel cored octagon honeycomb for helicopter crashworthiness	WANG Jiaming, LI Zhigang, LIANG Fangzheng, LIU Wanting, LIAO Jiu, CHEN Fangyu, LI Meng, SHAO Teli(225244)
Optimization design of dynamic vibration absorbers for vibration and noise reduction of composite fairing	LI Hangxing, HU Dike, WU Shaoqing(225249)
Rotor performance improvement by blade piecewise linear twist	ZHANG Yuhang, HAN Dong, WAN Haoyun(225264)
Creep fatigue life prediction of aero-engine turbine disc under cyclic thermal load	CHEN Keming, TIAN Ruozhou, GUO Sujuan, WANG Runzi, ZHANG Chengcheng, CHEN Haofeng, ZHANG Xiancheng, TU Shandong(225290)
Topology optimization and structure evolution of turbine disks based on load sensitivity suppression	YAN Hao, WU Xiaoming(225295)
Joint decision making for condition-based maintenance and spare parts ordering of components based on vibration monitoring	HE Yong, WANG Hong, LI Jing, QI Yankun(225304)
Hybrid optimization method for structural layout and size of flight vehicles	HU Jiaxin, RUI Shu, GAO Ruichao, GOU Jianjun, GONG Chunlin(225363)
Design of hybrid-electric fixed-wing VTOL aircraft propulsion system	ZONG Jian'an, ZHU Bingjie, HOU Zhongxi, YANG Xixiang(225395)
Optimization configuration method of common spares fill rate and utilization rate	WANG Junlong, LOU Jingjun, RUAN Minzhi, XU Li(226978)

Electronics and Electrical Engineering and Control

- Comparison and analysis of new high power density axial flux permanent magnet machine for electric propulsion aircraft
..... GAO Huamin, ZHANG Zhuoran, WANG Chen, XUE Han, LIU Ye(325229)
- Characteristic analysis of dual-winding permanent magnet synchronous machine with phase-shifted windings for electric
propulsion aircraft LU Jiawei, ZHANG Zhuoran, LI Jincai, KONG Xianghao(325230)
- Track fusion algorithm based on improved FCM and information entropy correction ZHEN Xu, LIU Fang(325236)
- Multi-core computing and processing platform based on PCIe high speed bus in airborne applications
..... YU Dalei, CUI Xining, LI Chengwen, LIU Tingting, ZHOU Yong(325238)
- Recurrent adaptive maneuvering target tracking algorithm based on online learning
..... XIONG Wei, ZHU Hongfeng, CUI Yaqi(325250)
- Algorithm for detecting and positioning hypersonic targets with wakes in near space
..... BO Juntian, WANG Guohong, YU Hongbo, ZHANG Xiangyu(325255)
- Adaptive aerial object detection based on multi-scale deep learning LIU Fang, HAN Xiao(325270)
- Conformal geometric algebraic description of runway incursion and conflict detection
..... JIAO Weidong, WANG Ruidong, YAO Junqiang, PANG Yanli(325297)
- Transformer based monocular satellite pose estimation
..... WANG Zi, SUN Xiaoliang, LI Zhang, CHENG Zilong, YU Qifeng(325298)
- Track-before-detection algorithm for multiple hypersonic targets in near space
..... BO Juntian, WANG Guohong, YU Hongbo, ZHANG Xiangyu(325299)
- Rapid attitude maneuver planning method based on progressive path transfer
..... WANG Zhuo, XU Rui, LI Zhaoyu(325308)
- Cooperative pursuit strategy for multi-UAVs based on DE-MADDPG algorithm
..... FU Xiaowei, WANG Hui, XU Zhe(325311)
- Resilient UAV swarm modeling and solving based on multi-domain collaborative method
..... SUN Qin, LI Hongxu, WANG Yuzhi, ZHOU Liping, ZHANG Yingchao(325340)

Material Engineering and Mechanical Manufacturing

- Comparison of ballistic impact behaviors between plain woven and 2.5D woven fabric composite plates
..... FENG Zhenyu, CHI Qilin, CUI Huaitian, XIE Jiang, MU Haolei(425116)
- Ultrasonic quantitative characterization of pore distribution uniformity of seal coating based on BPNN
..... DONG Zhenyi, LIN Li, LEI Mingkai, MA Zhiyuan(425294)
- Simulation and experiment of array remote-field eddy current sensor for hole edge defect of aircraft high lock bolt
..... SONG Kai, OUYANG Yongjie, FANG Zhihong, HUO Junhong, CUI Ximing(425301)
- Energy flow model for high-frequency vibration of beams in thermal-gradient environment
..... LIU Zhihui, NIU Junchuan, JIA Ruihao(425336)

《航空学报》第十届编辑委员会

主任委员(主编):孙晓峰

(以下按音序排列)

副主任委员(副主编):蔡 斐 房建成 韩杰才 聂 宏 杨树兴 张 军 张卫红
顾问编委:曹春晓 陈懋章 顾诵芬 胡海岩 李 明 林左鸣 魏炳波 吴一戎
编 委:徐建中 朱 荻 朱自强
蔡晋生 陈曾平 陈海昕 陈坚强 陈 谋 陈 正 崔海涛 崔乃刚
邓小刚 丁希仑 高正红 桂幸民 郭洪波 何雅玲 何 友 黄 海
黄攀峰 黄伟光 姜宗林 金栋平 康 锐 李贺军 李迎光 李应红
李玉龙 廖桂生 刘 莉 刘战强 孟 光 苗 强 史忠科 宋征宇
孙希明 孙玉文 唐长红 王彬文 王大轶 王海峰 王立新 王少萍
吴光辉 吴启晖 吴子牛 夏元清 向锦武 谢里阳 邢誉峰 徐 兵
徐国华 杨 超 杨智春 叶友达 余雄庆 袁慎芳 岳晓奎 詹 梅
张定华 张靖周 张开富 张丽艳 张显程 郑日恒 周 荻
ICHCHOU Mohamed(法国) LIU Jie(加拿大) PECHT Michael(美国)
SHU Chang(新加坡) WANG Zhijian(美国) XU Kun(中国香港)
YANG Vigor(美国) YANG Zhiying(英国) ZHANG Ketao(英国)
ZHANG Rui(新加坡) ZHANG Youmin(加拿大) ZHANG Yu(美国)
ZHU Zhenghong(加拿大)

社 长:刘德生 副社长:俞 敏

编辑部主任:蔡 斐 英文审核:孙洪丽, 夏 历, 郑 飞

编 辑:范真真, 李 丹, 李明敏, 李世秋, 王 娇, 王小辰, 张 晗, 张丽辉

航 空 学 报

(月刊)

第 43 卷 第 5 期

2022 年 5 月 25 日 1965 年创刊

ACTA AERONAUTICA ET
ASTRONAUTICA SINICA

(Monthly)

Vol. 43 No. 5

25 May 2022 Started in 1965

主 管 中 国 科 学 技 术 协 会

主 办 中 国 航 空 学 会
北 京 航 空 航 天 大 学

编辑出版 北 京 航 空 航 天 大 学
航 空 知 识 杂 志 社
北京海淀区学院路 37 号, 100083
电话: (010) 82317058
传真: (010) 82313502
网址: <http://hkxb.buaa.edu.cn>
电子邮件: hkxb@buaa.edu.cn

主 编 孙 晓 峰

印 刷 北 京 科 信 印 刷 有 限 公 司

国内发行 北 京 报 刊 发 行 局

国外发行 中 国 国 际 图 书 贸 易 集 团 有 限 公 司
北京 399 信箱, 100020

Superintended by China Association for Science
and Technology

Sponsored by Chinese Society of Aeronautics
and Astronautics
Beihang University

Edited and Published by Beihang University
Aerospace Knowledge Press
37 Xueyuan Road, Beijing 100083, China
Tel: 86(10)-82317058
Fax: 86(10)-82313502
Website: <http://hkxb.buaa.edu.cn>
E-mail: hkxb@buaa.edu.cn

Chief Editor SUN Xiaofeng

Printed by Beijing Kexin Printing Co., LTD
Distributors

Domestic: Beijing Bureau for Distribution of
Newspapers and Journals

Abroad: China International Book Trading
Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100020, China)

ISSN 1000-6893
CN 11-1929/V

邮发代号: 82-148 国外代号: BM427 国内定价: 80.00 元

引用格式: 王俊龙, 楼京俊, 阮旻智, 等. 面向满足率与利用率的通用备件优化配置方法[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 226978.
WANG J L, LOU J J, RUAN M Z, et al. Optimization configuration method of common spares fill rate and utilization rate[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 226978 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2022.26978

面向满足率与利用率的通用备件优化配置方法

王俊龙¹, 楼京俊¹, 阮旻智¹, 徐立^{2,*}

1. 海军工程大学 舰船与海洋学院, 武汉 430033

2. 海军工程大学 兵器工程学院, 武汉 430033

摘要: 随着装备标准化、模块化水平不断提高,通用化部组件类型及数量的比重越来越大。为了进一步提高备件保障能力,建立了通用件整体备件利用率和满足率模型,在此基础上,提出一种基于满足率指标约束下的通用备件配置优化方法。算例分析表明,随着备件配置数量的增加,备件满足率会随之增加,与此同时备件利用率会随之降低,在进行备件配置过程中,很难达到备件满足率和备件利用率双高的结果,两指标存在一定的相互制约关系。需针对实际需求综合权衡备件满足率和备件利用率之间的关系,确定主要优化指标,提高备件使用效率。研究结果为开展装备备件需求论证、制定备件保障方案提供支撑。

关键词: 通用件; 备件满足率; 备件利用率; 优化; 配置方案

中图分类号: V215.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2022)05-226978-08

备件是装备开展维修保障工作的物质基础。在确定装备备件主要保障指标和备件配置方案制定过程中,会因为对备件保障效能评估指标的理解不够,导致在制定指标要求的时候出现相互矛盾的情况。一方面,希望备件配置数量越高越好,这样才能满足装备维修保障需求,提高备件供给效果;另一方面,希望备件利用率越高越好,避免出现“备而不用”的情况,提高备件利用效率。因此,在进行装备保障过程中,需根据实际情况,选取切实有用的备件保障效能评估参数,并制定可行的评估指标要求。

通用件是在不同类型或同类型不同规格的装备中互换性的部件单元^[1]。近年来,在装备建设过程中,装备的通用化、系列化、组合化程度的不断提高,通用备件的使用比例大幅上升,为保障部门对不同装备实施一体化保障提供了条件。由于

通用件涉及的装备种类多、使用范围广、影响程度高^[2],对不同装备通用产品备件进行统一考虑配置,相比单一装备自行配置来说,备件满足率与利用率都得到了相应的提高,因此,装备设计和保障部门对通用件的保障问题越来越关注。针对装备设计与保障部门对备件保障效能问题的关注,费广玉^[3]从国军标 GJB-4355^[4]中满足率的统计定义入手,研究了备件满足率的意义,建立了以系统备件满足率为约束、其他参数为优化目标的备件配置优化模型。张志华等^[5]针对备件满足率的统计学定义,研究了单备件满足率和串联系统备件满足率的性质,给出了数学模型。阮旻智等^[6]从装备可用度出发,分析了装备可用度与系统备件满足率之间的关系,建立了任意结构系统的备件满足率模型。金正等^[7]针对舰船装备限寿件,研究了部件故障率服从指数分布的有寿件的更换规

收稿日期: 2022-01-21; 退修日期: 2022-02-11; 录用日期: 2022-02-22; 网络出版时间: 2022-03-01 18:52

网络出版地址: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2022/V43/I5/226978>

* 通信作者。E-mail: xuli123948@163.com

律,确定其保障期内的备件需求数量,建立舰船装备限寿件满足率评估模型。Rodrigues 和 Yoneyama^[8]根据装备健康管理数据,在备件满足率约束下,以购置费用为优化目标开展备件配置方案优化。Topan^[9]和 Lamghari^[10]等采用后发式算法计算备件配置情况,大大减少了装备的总停机时间,提高了备件保障效率,降低了备件购置成本。GJB1909A-2009^[11]给出了备件利用率的统计学定义,并没有给出备件利用率的具体数学表达式。应新雅等^[12]在任务时间确定情况下,建立了系统备件利用率评估模型,分析了系统备件利用率和单备件最低、最高利用率之间的关系。李华等^[13]针对备件保障概率与备件利用率的关系进行了研究,并提出了一种备件利用率的估计方法。Ma 等^[14]研究了不同工作周期内,随机需求情况下的通用件的配置问题,考虑了通用件成本结构、补充周期等因素。针对指数型部件备件利用率评估问题,徐立等^[15]针对寿命服从威布尔分布部件的通用件保障效能评估问题,采用等效的方法建立了不同寿命分布威布尔型部件的保障概率评估模型,并开展了指标约束下的备件配置方法研究。Turrini 和 Messiner^[16]根据工业部门和空军备件消耗数据,采用改进的 Kolmogorov-Smirnov 拟合检验研究备件消耗的最佳拟合分布,预测备件需求情况。Boutsellis 和 Mcnaught^[17]采用搭建仿真系统产生保障基础数据,在此基础上,通过贝叶斯网络模型开展不同保障场景下的备件需求预测。Zhu 等^[18]基于维修计划,提出了预测备件需求分布的简易方法和备件动态控制方法。Sherbrooke 等^[19-22]面向多等级多层级维修保障系统,建立了可修复备件最优库存多级控制理论,以装备可用度为评价指标,实现了通用备件的优化配置方法研究。

本文针对通用件备件保障效能评估问题开展,建立通用件整体备件利用率和备件满足率评估模型。在此基础上,开展备件评估指标约束下的备件优化配置研究。通过算例分析,研究常用备件评估指标备件满足率和备件利用率之间的关系。为装备论证、保障部门开展备件需求论证,制定备件配置方案提供理论支撑和决策支持。

1 基本描述及模型假设

1.1 保障过程描述

假设某通用件分别装备在 N 台不同类型或者编号的装备中,已知该通用件观测周期内在装备 n 中的计划工作时间为 $T_n (1 \leq n \leq N)$,当该通用件发生故障后,采用换件维修的方式进行维修。由于工作时间和装备结构的差异,装备 n 中通用件 $j (1 \leq j \leq J, J$ 为部件种类总数)的故障率会有差异,记为 λ_{nj} 。现需在备件仓库中配置该通用件数量记为 s 。在整个观测周期内,备件数量能够满足各装备备件需求的概率称为备件满足率。根据国军标 GJB1909A—2009 的定义,在规定的级别上和规定的时间内,实际使用的备件数与该级别实际拥有的备件数之比称为备件利用率。装备保障部门通常会对备件的保障效能即备件满足率和备件利用率提出指标要求,其中备件满足率为主要指标,一般会规定门限值 P_0 ,备件保障需使其满足指标要求。在满足备件使用需求的基础上,装备保障部门一般希望备件利用率越高越好。

1.2 模型假设

在装备保障过程中,为使得装备尽快排除故障投入使用,降低装备停机维修时间,装备现场通常对具备更换能力的故障部件进行换件处理。由于装备的科技水平和精密程度不断提高,在装备保障现场开展故障部件维修的效益较低,通常不进行故障部件的原位修复,而进行换件修理。除此之外,受生产过程影响,在装备部件批次采购之间,装备关重件的临时采购较为困难。因此,为了研究的方便,本文在建立模型和开展方案优化过程中做如下假设:① 装备故障维修仅进行换件维修,通用件均具备可更换属性;② 观测周期内不考虑通用件的补给;③ 故障后的部件不进行维修,无法作为完好件投入使用;④ 本文通用件备件寿命类型均服从指数分布。

2 通用件备件利用率模型

2.1 单类通用件备件利用率模型

假设部件故障率为 λ ,则若部件寿命类型服

从指数分布,则在任务时间 T , 部件发生的故障次数 X 服从泊松分布,其公式为

$$P(X = k) = \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

对于同一类型装备,由于任务时间不尽相同,某一装备 n ,在任务时间 T_n ,装机数为 Z_n ,该装备上,部件发生故障次数 X_n 服从泊松分布,其公式为

$$P(X_n = k_n) = \frac{(\lambda Z_n T_n)^{k_n}}{k_n!} e^{-\lambda T_n} \quad k_n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

在观测周期内,装备 $1 \sim N$,设部件在不同装备上的装机数为 $Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_n, \dots, Z_N]$ 在不同任务期间 $T = [T_1, T_2, \dots, T_n, \dots, T_N]$ 条件下,该类部件发生故障次数 X 的概率为

$$P[X | (Z, T)] = P\left[X = \sum_{n=1}^N k_n | (Z, T)\right] \quad (3)$$

式中: n 表示装备序号。

根据卷积定理,可得 N 个装备在任务周期 T 内,发生 k 次故障的概率为

$$P[X | (Z, T)] = P[X_1 = k_1 | (Z_1, T_1)] * P[X_2 = k_2 | (Z_2, T_2)] * \dots * P[X_n = k_n | (Z_n, T_n)] * \dots * P[X_N = k_N | (Z_N, T_N)] \quad (4)$$

式中:“ $*$ ”号表示卷积;装备总体在观测周期内的故障次数 $X = X_1 + X_2 + \dots + X_N$,同样的可求故障次数 $k = k_1 + k_2 + \dots + k_N$ 。

当该类备件配置数量为 s 时,由统计定义可知,备件利用率的统计量 Y 是一个离散型随机变量,与部件故障次数 X 的关系式为

$$Y = \begin{cases} \frac{X}{s} & 0 \leq X \leq s \\ 1 & X > s \end{cases} \quad (5)$$

则对于装备总体而言,可得当某类备件配置数量为 s 时,装备任务安排为 $T = [T_1, T_2, \dots, T_n, \dots, T_N]$,单个装备该类部件的装机数为 $Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_n, \dots, Z_N]$ 时,在观测周期内备件利用率为

$$P_1[s | (T, Z)] = \sum_{k=0}^s \frac{k}{s} \cdot P[k | (T, Z)] + \sum_{k=s+1}^{\infty} P[k | (T, Z)] = \sum_{k=0}^s \frac{k}{s} \cdot$$

$$P[k | (T, Z)] + 1 - \sum_{k=0}^s P[k | (T, Z)] = 1 - \sum_{k=0}^s P[k | (T, Z)] + \sum_{k=0}^s \frac{k}{s} \cdot P[k | (T, Z)] \quad (6)$$

同时,在求得式(4)之后,可进一步求得该类部件的备件满足率模型

$$P_s[s | (T, Z)] = \sum_{k=0}^s P[k | (T, Z)] \quad (7)$$

2.2 通用件整体备件利用率模型

2.1 节搭建了单类备件利用率模型,在实际开展备件保障时,需要考虑装备不同种类备件总的利用率。根据国军标 GJB1909A-2009 的定义,备件利用率定义为:在规定的级别上和规定的时间内,实际使用的备件数与该级别实际拥有的备件数之比。假定装备总体共有 M 类备件,第 m 类备件配置数量为 s_m (m 为 $1 \sim M$ 之间的正整数),对于备件仓库而言备件总的配置方案为 $s = [s_1, s_2, \dots, s_m, \dots, s_M]$,则在观测周期内,不同部件总的备件利用率为

$$P_{sl}(s) = \frac{\sum_{m=1}^M s_m P_{ml}[s_m | (Z, T)]}{\sum_{m=1}^M s_m} \quad (8)$$

式中: P_{ml} 为第 m 类部件的备件利用率。

也可求得部件总的备件满足率为

$$P_{ss}(s) = \prod_{m=1}^M P_{ms}[s_m | (Z, T)] \quad (9)$$

式中: P_{ms} 为第 m 类部件的备件满足率。

3 备件优化模型及优化方法

3.1 备件优化模型

对于规定的保障任务,装备保障部门在制定备件配置方案时,需要考虑的是在备件能够满足备件需求的同时,所携带的备件能够尽可能地得到应用。因此备件满足率和备件利用率作为 2 个重要的指标,是备件筹措部门关注的重点。通常情况下,备件满足率作为备件保障效果的主指标,会设置一定的约束,使得其高于某一水平。与此同时,需要备件利用率尽可能地大。

可描述备件配置优化模型为,在备件满足率

指标下 P_{s0} 的前提下,使得备件利用率最大,即

$$\begin{cases} \max & P_{sl}(s) \\ \text{s. t} & P_{ss}(s) \geq P_{s0} \end{cases}$$

3.2 备件配置方案优化算法

针对具体模型,可采用边际优化算法对优化模型进行求解,其算法流程如图 1 所示。

步骤 1 备件数量初始化。由于备件总体备件满足率为各不同种类的部件联乘求得,因此,部件总体备件满足率低于各类备件满足率指标要求,初始状态下,求得各类备件在刚好达到备件满足率指标要求时的备件配置数量即为各类备件的初始配置数量。此时 $s = [s_1, s_2, \dots, s_m, \dots, s_M]$ 。

步骤 2 如果 $P_{ss}(s) \geq P_{s0}$ 迭代结束,输出此时的备件配置方案 s 即为所求。如果 $P_{ss}(s) < P_{s0}$ 则转步骤 3。

步骤 3 在原有备件配置下,可求得各类备件数量加 1 时的边际效益值,如第 m 类备件增加的边际数量为 e_m ,第 m 类备件的边际效益值为

$$\Delta\mu(s + e_m) = \frac{P_{ss}(s + e_m) - P_{ss}(s)}{P_{sl}(s) - P_{sl}(s + e_m)}$$

步骤 4 比较各类备件的边际效益值,选取边际效益值最大的该类备件,配置数量加 1,此时,如果 $P_{ss}(s) \geq P_{s0}$,迭代结束,输出此时的备件配置方案 s 即为所求。如果 $P_{ss}(s) < P_{s0}$,则转步骤 3 继续迭代。

4 算例分析

对于 4 类通用型部件,其在 4 个不同类型装备上的参数、装机数、任务时间等指标如表 1 所示。假设上级要求任务期间,部件总的备件满足率指标为 0.9,现求观测周期内,不同类型的备件配置方案,使得在达到备件满足率指标要求的同时,备件利用率达到最大。

对于不同故障率和装机数的部件 1~部件 4,随着备件数量的增加,其备件利用率和备件满足率之间的关系变化如图 2~图 5 所示。

由图 2~图 5 可知,随着备件配置数量的增加,备件满足率随之增加,与此同时,备件利用率随着备件配置数量的增加逐渐降低,二者具有一定的相关性。说明在进行备件配置过程中,要制

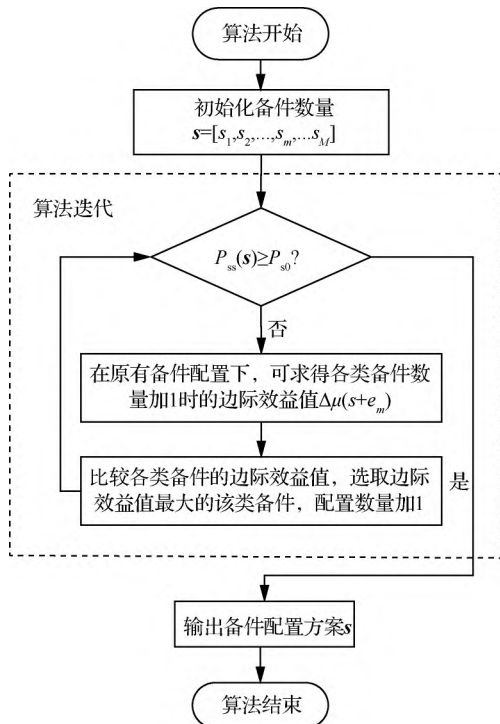


图 1 备件配置方案优化算法流程

Fig. 1 Optimization algorithm flow of spare parts configuration scheme

表 1 各部件参数

Table 1 Parameters of each component

备件类型	故障率 $\lambda/(\text{次} \cdot \text{h}^{-1})$	不同装备装机数	任务时间/h
1	0.002 1	(2,1,2,1)	960
2	0.001 4	(1,2,1,1)	840
3	0.003 1	(2,1,3,1)	660
4	0.003 4	(1,1,1,2)	450

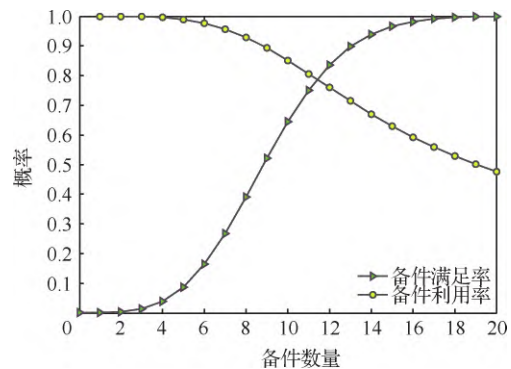


图 2 部件 1 备件满足率和备件利用率的变化情况

Fig. 2 Changes in spare parts fill rate and spare parts utilization rate of Component 1

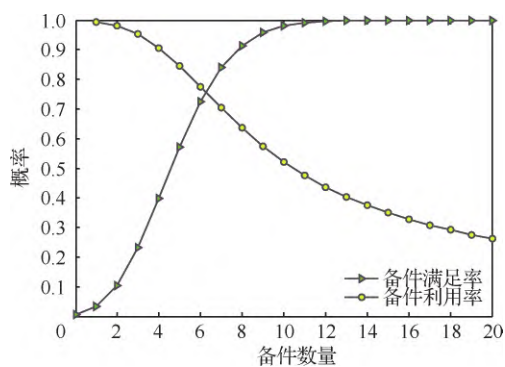


图3 部件2 备件满足率和备件利用率的变化情况

Fig. 3 Changes in spare parts fill rate and spare parts utilization rate of Component 2

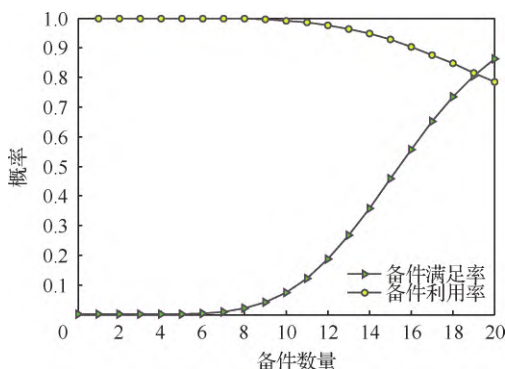


图4 部件3 备件满足率和备件利用率的变化情况

Fig. 4 Changes in spare parts fill rate and spare parts utilization rate of Component 3

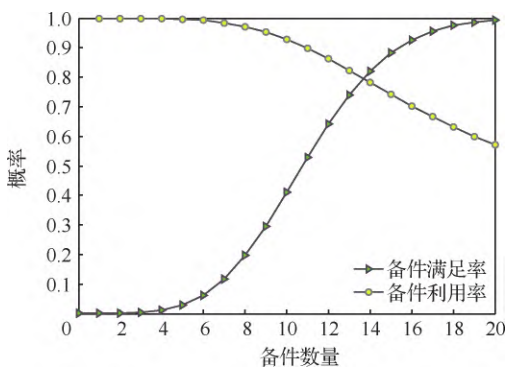


图5 部件4 备件满足率和备件利用率的变化情况

Fig. 5 Changes in spare parts fill rate and spare parts utilization rate of Component 4

定备件利用率和备件满足率“双高”的情况是很难实现的,这与2个指标的定义有关,备件满足率强调的是多备,这样才能满足装备不同情况下的备件需求;而备件利用率评价的是已配备备件的使

用情况,在备件配置数量比较少时甚至当备件不能够满足装备使用需求时,备件利用率最高,此时配置的备件均能使用到,备件利用率为1,而随着备件配置数量的增加,备件配置也足够充足,此时,很有可能有的备件用不到的情况下已经能够满足装备的备件需求,此时备件利用率较低,出现“备而无用”的情况,过高的备件满足率水平会导致备件配置的浪费。观察图2~图5可知,备件满足率曲线和备件利用率的曲线大多相交于0.7~0.8之间。

在备件满足率指标为0.85时开展备件优化配置,采用第3节的方法开展具体操作,此时,可计算各类备件的初始备件数量为(13,8,20,15),每类部件的保障概率均为0.9以上。在此基础上开展备件配置方案优化。其优化迭代过程如表2和图6所示。由表2可知,随着优化过程的开展,备件满足率随着备件配置数量的增加逐步增加。在备件满足率逐步增加的过程中,备件利用率随着备件数量的增加,备件利用率是逐步降低的。因此,在进行备件优化过程中,必须设置一个主要指标,根据第3节的论证结果可选取备件满足率为主指标,与此同时可要求备件利用率最大。

经过多次迭代,可求得优化后的备件配置方案为(16,10,23,18),此时备件总体的满足率为0.903,备件利用率为0.628,满足指标要求。

表2 优化迭代过程

Table 2 Optimal iterative process

序号	备件配置方案	系统备件满足率	系统备件利用率	最大边际效益值
1	(13,8,20,15)	0.625	0.736	3.019
2	(13,8,21,15)	0.657	0.725	3.118
3	(13,8,21,16)	0.690	0.715	3.121
4	(14,8,21,16)	0.722	0.705	3.355
5	(14,9,21,16)	0.757	0.694	2.711
6	(14,9,22,16)	0.784	0.684	2.532
7	(14,9,22,17)	0.808	0.675	2.359
8	(15,9,22,17)	0.831	0.665	2.103
9	(15,9,23,17)	0.851	0.655	2.165
10	(15,10,23,17)	0.872	0.646	1.872
11	(15,10,23,18)	0.889	0.637	1.624
12	(16,10,23,18)	0.903	0.628	