

文章编号: 1674-8190(2023)04-031-08

嵌入式大气压力传感器复杂气象环境防护技术发展趋势与展望

熊亮, 宋世峰, 周游, 王双, 马烽文

(航空工业成都凯天电子股份有限公司 大气数据系统研究室, 成都 610091)

摘要: 嵌入式大气数据传感器系统是飞翼气动布局飞行器重要的飞行传感器子系统, 是准确测量飞行大气参数的关键保障。其嵌入式大气压力传感器有效的防水、防尘、防除冰设计, 是飞行过程中压力准确感受, 飞行大气参数稳定、实时测量的重要保证。针对嵌入式大气压力传感器防水、防尘、防除冰技术现状, 分析了存在的不足与缺陷, 结合工程化应用需要和相关工程技术研究成果, 提出了嵌入式大气压力传感器复杂气象环境防护状态在线监测设计、加热器功率自适应调节设计和快速拆装设计的技术发展方向, 阐明了未来嵌入式大气压力传感器复杂气象环境防护技术的研究目标、内容, 以及涉及的水、湿气监测技术, 结冰状态监测技术, 表面疏水与低可探测技术和易维护式结构设计技术等关键技术的解决方案。

关键词: 嵌入式大气数据传感器系统; 嵌入式大气压力传感器; 防护; 监测; 加热器

中图分类号: V247.1⁺6

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.04.03

Development trend and prospect of flush air data pressure sensor for complex meteorological environment protection technology

XIONG Liang, SONG Shifeng, ZHOU You, WANG Shuang, MA Fengwen

(Air Data System Department, AVIC Chengdu CAIC Electronics Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

Abstract: The flush air data sensing system is a key or important flight sensor subsystem for the measurement of flight atmospheric parameters such as air pressure altitude, indicated airspeed, Mach number, angle of attack and sideshow angle, which are required for flight safety control, communication and navigation of flying wing pneumatic layout aircraft and precise weapon strike. The effectiveness of water-proof, dust-proof, anti-ice and de-icing design of the flush air data pressure sensor in the system is an important guarantee for accurate pressure feeling, stability of atmospheric parameters and real-time performance during flight. In this paper, aiming at the technology present status of water-proof, dust-proof, anti-icing and de-icing of flush air data pressure sensors in flush air data system, the existing shortcomings and defects are analyzed, combined with the needs of engineering application and research results of related engineering technology, the flush air data pressure sensor for complex meteorological environment protection status online monitoring, heater power adaptive control and rapid disassembling design as development direction is proposed, the future research goal and content of flush air data pressure sensor for complex meteorological environment protection technology are illustrated, and the solutions of key technologies such as moisture monitoring technology, freezing condition monitoring technology, surface hydrophobic and low detectable technology and easy maintenance structure design technology are presented.

Key words: flush air data sensor system; flush air data pressure sensor; protection; monitoring; heater

收稿日期: 2022-05-15; 修回日期: 2022-11-08

基金项目: 国防科技创新特区基金(19-163-142-12-ZT-004-002-03)

通信作者: 熊亮, xixiangli@126.com

引用格式: 熊亮, 宋世峰, 周游, 等. 嵌入式大气压力传感器复杂气象环境防护技术发展趋势与展望[J]. 航空工程进展, 2023, 14(4): 31-38.

XIONG Liang, SONG Shifeng, ZHOU You, et al. Development trend and prospect of flush air data pressure sensor for complex meteorological environment protection technology[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(4): 31-38. (in Chinese)

0 引言

嵌入式大气数据传感器系统是一种依靠嵌入在飞行器前端(或机翼)不同位置上的压力传感器阵列测量飞行器表面压力,并根据压力分布与大气数据的函数关系推导包括动压、静压、迎角和侧滑角等飞行参数的大气数据测量装置^[1-7],为飞行器飞行安全控制、通信导航及武器打击精度提供保证。嵌入式大气压力传感器通常由压力传感器部件和电子解算部件组成,用于感受安装位置处的局部流场压力,为飞行器进行气压高度、指示空速、攻角、侧滑角等飞行大气参数的解算提供信号源。由于嵌入式大气压力传感器与安装位置处的蒙皮形面共形,具有不影响飞行器整体气动、隐身性能和耐高温性能好的显著特点,基于嵌入式大气压力传感器感受的压力进行飞行大气参数解算的嵌入式大气数据传感器系统已在国外B-2、X-47B、神经元、雷神等飞翼气动布局类飞行器及F/A-18、X-33、X-34、X-38等高超声速飞行器上得到成熟应用^[8-11],在常规气动布局飞行器中为实现对气压高度的准确测量,嵌入式大气压力传感器也多用于进行机身静压的测量。

由于嵌入式大气压力传感器的压力传感器直接暴露在机体外部环境中,无论是在露天停放,还是执行飞行任务期间,遇到雨、雪、沙尘、潮湿等复杂气象环境不可避免^[12],若无防护措施或者防护措施有效性不强,对飞行安全的影响是灾难性的。2008年美军在关岛坠毁的B2轰炸机事故原因调查也证明了这一点^[13]。伴随探测技术的进一步发展及隐身技术的研究与突破,飞翼气动布局飞行器是满足能够对敌近距侦察、长期监视和毁灭性突袭等作战需求的重要武器装备,嵌入式大气压力传感器作为飞翼布局飞行器飞行大气参数测量的重要设备,如何保证在复杂气象环境中压力感受不受影响和长期稳定工作,是嵌入式大气压力传感器设计的关键点。

为满足新一代装备具备远航程、跨多区域作战面临的复杂气象环境适应性及装备状态在线监测、视情维修体制和缩短出勤准备时间的需要,提升装备复杂环境中的战场生存能力,针对嵌入式大气压力传感器复杂气象环境防护技术工程化应

用现状,分析现有嵌入式大气压力传感器适应复杂气象环境防护技术与满足装备应用需求的不足,在对可用于嵌入式大气压力传感器防水、防尘、防冰和除冰相关技术的研究成果和应用前景分析总结的基础上,明确嵌入式大气压力传感器复杂气象环境防护技术发展的4个方向,以及各方向研究目标、研究内容、关键技术的解决方案。

1 复杂气象环境防护技术现状

1.1 设计标准现状

针对嵌入式大气压力传感器,国内外没有专用标准或规范对其复杂气象环境适应性(防水、防尘、防冰和除冰)要求进行明确规定,已发布的国外标准SAE AS 8006A《总压、总静压传感器的最低性能标准》^[14]、SAE AS 393《电热空速管》^[15]、SAE AS 5562《皮托管和总静压管冰雨最低鉴定要求》^[16]、TSO-C16a《电加热型皮托管和全静压管》^[17]、TSO-C16b《电加热型皮托管和全静压管》^[18],以及国内航空标准CCAR-25-R4《中国民用航空规章第25部——运输类飞机适航标准》^[19]、RTCA DO-160G《机载设备环境条件和试验程序》^[20]、HB 6167.13—2014《民用飞机机载设备环境条件和试验方法第13部分:结冰试验》^[21]、HB 7045—1996《民用航空器电热空速管最低性能要求》^[22],均仅规定了皮托管类产品淋雨、沙尘、防/除冰的测试程序和方法,而嵌入式大气压力传感器与机身蒙皮共形安装,飞行过程中局部气流速度、水滴搜集系数与皮托管存在较大差异,现有的技术标准不能规范和指导当前嵌入式大气压力传感器的防水、防尘、防冰和除冰设计,以及试验验证要求,缺乏统一的防水、防尘、防冰和除冰设计要求和试验验证标准,迫切需要基于目前工程化应用情况、研究进展和装备应用需要,建立内容全面包容、准确规范、操作性强的通用规范,用以指导嵌入式大气压力传感器的研制、生产和试验验证。

1.2 防护技术工程化现状

1.2.1 防水方面

在当前飞行大气数据探测领域,为了防止水

进入嵌入式大气压力传感器中的压力敏感体进而影响压力测量的准确性,目前工程实践中主要采用基于物理原理的设计方法。一方面考虑通过控制测压孔开孔尺寸保证水滴受到的表面张力大于其重力和冲力的合力(如图1所示),同时兼顾测压孔开孔尺寸与压力迟滞之间的相互影响^[12,23-24],通常选择测压孔外径为0.70~2.08 mm,防止水滴穿过测压孔进入测压腔;另一方面遵循气往上走、水往下沉的水气分离原理,通过气压管路、水分沉淀腔或沉淀槽等微机械结构设计^[25](如图2~图3所示),对进入压力传感器内部的水进行储存,采用定期清理维护的方式避免对压力测量的影响。此外,嵌入式大气压力传感器的受感器内部安装的防冰和除冰加热器产生的高温热量对从测压孔进入的水进行一定程度的蒸干^[26]。但飞翼气动布局飞行器的扁平外形使得嵌入式大气压力传感器测压孔法线与飞行器轴线之间的夹角减小,飞行过程中出现水进入气压传递管路依然不可避免。

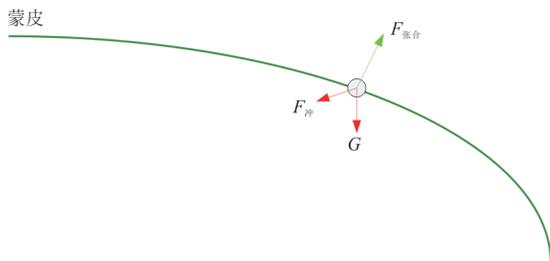


图1 水滴受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water droplet force

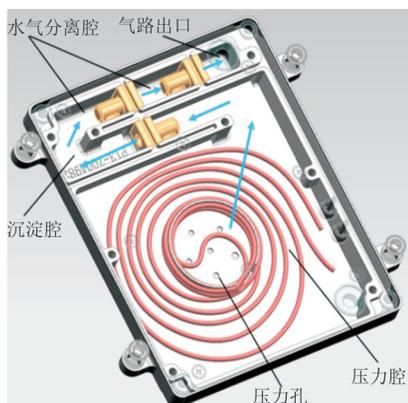


图2 气压管路、水分沉淀腔等机械结构设计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mechanical structure design of air pressure pipeline and water precipitation chamber

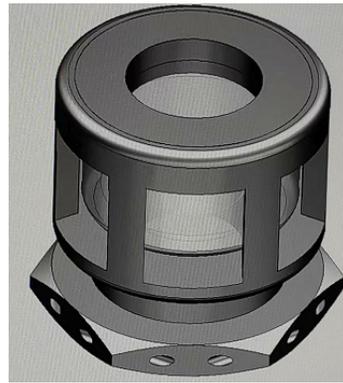


图3 水分沉淀器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mechanical structure design of water precipitation chamber

20世纪90年代,德国植物学家、波恩大学的W. Barthlott等揭示了荷叶表面的结构,荷叶表面的纳米乳突及其上的纳米分支结构提高了水滴在其表面的接触角,合理解释了荷叶的“自洁性”源于其表面的微纳结构^[27-30],为固体表面防水性能提升带来了新的解决思路。近年来,科学家和工程技术人员受“荷叶效应”启发,对人工在固体材料表面形成超疏水微纳结构的多种制备技术进行了深入研究,建立了以超快激光技术(飞秒激光、皮秒激光)、集成综合制造技术进行材料疏水表面制备技术理论模型,上述制备技术已在实验室得到验证,并开展了多项工程化应用验证^[31-38]。水滴在固体表面的接触角被提高到了150°以上,在固体表面的超疏水表面机械耐久性问题也已得到深入研究,逐步得到解决^[39-43]。嵌入式大气压力传感器有效防水工程化应用技术方案的成熟度得到了显著提升。

1.2.2 防尘方面

为了防止沙尘堵塞嵌入式大气压力传感器的测压孔和气压传递管路,主要采用以气动中心为测压孔中心,在一定尺寸的圆周上均匀排布多孔的测压孔冗余度设计、沉淀腔设计(如图4所示),并通过定期清理维护来避免沙尘对压力测量的影响。

为了防止进入嵌入式大气压力传感器内部的沙尘沿气压传递管路进入压力敏感体气腔内部,通常在气压传递管路上或压力敏感体的入口处理

入气流防尘装置,依靠过滤件上的空间网格结构将气流中的灰尘、砂砾等杂质拦截下来,同时,又不形成对气流较大的阻力^[44]。气流防尘装置结构截面示意图如图 5 所示。

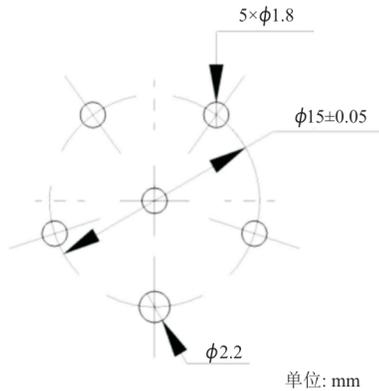


图 4 测压孔冗余度设计示意图
Fig. 4 Schematic diagram of redundancy design of pressure hole

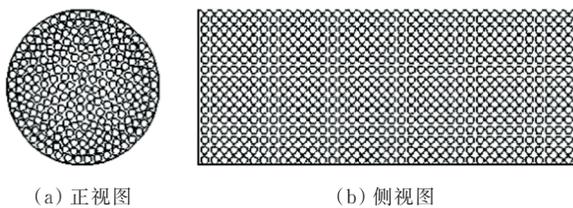


图 5 气流防尘装置结构截面示意图
Fig. 5 Schematic diagram of dust prevention device structure section

1.2.3 防冰和除冰方面

为了防止嵌入式大气压力传感器测压孔结冰、确保加热的可靠性,通常采用热力防除冰方法^[45],在测压孔的金属表面安装具有足够热量的加热器,在起飞前接通加温电源,在执行飞行任务期间保持加温状态,防止水气或者液态水在测压孔或者压力受感器的局部受感面聚集,在低温环境中结冰。加热器在压力受感器内部呈螺旋状排列,如图 6 所示。

为了降低热量散失效率、增强测压孔区域热量集中,使加热功率得到有效利用,压力受感器选用低热导率材料,同时使用低导热系统的隔热材料,例如陶瓷纤维纸、玻璃纤维棉板/毡、聚氨酯发泡板、离心玻璃纤维棉/岩棉、真空隔热板、热障涂层等。

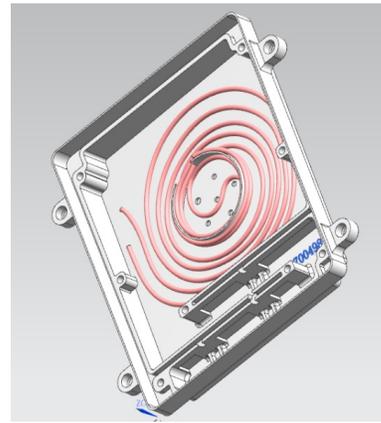


图 6 压力受感器加热器布局示意图
Fig. 6 Schematic diagram of pressure sensor heater

飞机所有部件的迎风面上均有可能结冰,从而导致飞行阻力增加、升力下降、失速攻角减小、失速速度增加等影响飞行安全的情况出现。为了将结冰对飞行安全和性能的不良影响减到最小或者防止其发生,在飞行器设计时采用结冰探测器对冰的存在和结冰条件进行探测,为飞行机组提供结冰警告。常用的结冰探测器有谐振结冰探测器、光纤结冰探测器^[46-47]。

近年来,“荷叶效应”自清洁引发了人们对超疏水材料研究的极大兴趣,研究人员对超疏水材料在防除冰性能提升方面也开展了诸多研究。大量研究和科学实验表明,超疏水技术具有可延缓结冰,显著降低冰与基底表面的黏附力的特点^[48-50],为提升嵌入式大气压力传感器防冰和除冰性能带来了新思路。

2 未来复杂气象环境防护技术发展方向

传统的嵌入式大气压力传感器的防水、防尘、防冰和除冰设计主要依靠物理结构设计来实现。为了保证飞行安全,在实际使用过程中,加热器始终处于饱和工作状态,每次飞行任务执行前对沉淀器的检查也被列入地勤工作人员的例行操作规程中。若在维护检查过程中发现沉淀器中有水或砂尘杂质等异物,需要对嵌入式大气压力传感器进行拆装、气密性检查等操作,而对于隐身飞行器,由于拆卸破坏了隐身涂层的完整性,还需要进行隐身涂层修复,维护时间较长。随着材料表面

疏水技术的突破,智能化、信息化的发展,机载设备多采用状态监控、视情维修的维修机制,一方面达到了简化维修和精准维修的目的,另一方面缩短了装备出勤准备时间。为满足未来装备智能化、信息化发展需求,嵌入式大气压力传感器的复杂气象环境防护技术应在以下4个方面得到发展:

- 1) 嵌入式大气压力传感器中的水、湿气状态在线监控;
- 2) 嵌入式大气压力传感器压力受感器表面结冰状态在线监控,防除冰功率能够自适应调节;
- 3) 具有“荷叶效应”的超疏水、吸波材料成功研制;
- 4) 嵌入式大气压力传感器的压力受感器与电子解算部件可快速拆卸,压力受感器内部实现可拆卸维护。

3 复杂气象环境防护技术研究目标

未来装备出勤准备时间短,为了降低维修难度,同时保证嵌入式大气压力传感器的性能,提升嵌入式大气压力传感器的寿命,需要基于状态监测手段,利用检测传感器对嵌入式大气压力传感器内部的水、湿气,以及压力受感器表面的结冰情况进行监测,根据监测信息自动调节加热器状态,实现精准除水、除冰;并采用新型特种材料,降低雨水、湿气在压力受感器表面的滞留。具体体现在以下5个方面:

- 1) 实现对嵌入式大气压力传感器中的水、湿气状态在线监测;
- 2) 实现对嵌入式大气压力传感器的压力受感器表面结冰状态在线监控,防除冰功率能够自适应调节;
- 3) 实现嵌入式大气压力传感器压力受感面的疏水和对雷达波的吸收;
- 4) 实现嵌入式大气压力传感器的压力受感器与电子解算部件的快速拆卸,电子解算部件可任意互换;
- 5) 压力受感器内部实现可拆卸维护,便于对内部的气压传递管路进行清洗,避免对隐身涂层的破坏。

4 复杂气象环境防护技术研究内容

为实现对嵌入式大气压力传感器的复杂气象

环境状态在线监控,涉及的关键技术及具体研究内容包括以下4个方面:

- 1) 水、湿气监测技术:微型水、湿气探测传感器研制及其蒙皮表面埋入技术;
- 2) 结冰状态监测技术:嵌入式大气压力传感器压力受感器表面结冰探测器埋入技术;
- 3) 表面疏水与低可探测技术:具有疏水及雷达波吸收的新型材料或材料表面涂层增生技术;
- 4) 易维护式结构设计技术:易维护的嵌入式大气压力传感器机械结构设计。

5 关键技术解决方案

5.1 水、湿气监测技术

由于湿度传感器能够对水位和湿度进行探测,并发出警告信息,针对嵌入式大气压力传感器压力腔及压力传递管路中的水、湿气,应基于微机电系统(Micro-electro-mechanical systems,简称MEMS)技术将湿度传感器微型化,并将其埋入嵌入式大气压力传感器的压力腔及压力传递管路中,对嵌入式大气压力传感器中的水、湿度情况进行实时状态监测,并依据监测情况,对加热器功率进行调节,达到清除水和降低湿度的效果。

5.2 结冰状态监测技术

无论是飞行器整体结冰探测还是局部表面结冰探测,工程化应用已经很广泛、技术很成熟。近年来,光纤结冰探测技术也得到突破,不仅能够进行结冰状态的探测,还能够提供结冰厚度状态信息,已开始推广应用,具有可与蒙皮齐平安装的特点。可在嵌入式大气压力传感器的压力受感器表面集成光纤结冰探测器实现结冰状态的实时监测,并根据结冰信息,对加热器功率进行调节,达到对结冰状态准确监控和及时清除的效果。

5.3 表面疏水与低可探测技术

嵌入式大气压力传感器表面结冰、水滴通过测压孔进入压力受感器内部均与水滴在压力受感器表面的滞留状态息息相关。通过对压力受感器表面涂覆耐高温疏水涂层或者直接采用耐高温疏水材料,增大水滴与压力受感器表面的接触角、降低滚动角,增强水滴的滚动性,降低水滴通过测压

孔的可能性,避免水滴长时间停留。

5.4 易维护式结构设计技术

1) 传统的嵌入式大气压力传感器的压力受感器部件及电子解算部件之间采用内部机械紧固连接方式,压力受感器部件的加热器引出线缆与电子解算部件采用焊接的连接方式,压力受感器部件与电子解算部件无法实现快速分离。通过采用外部机械紧固件,以及加热器引出线缆与电子解算部件之间间接插件的连接方式,实现压力受感器部件与电子解算部件之间的快速分离。

2) 压力受感器测压孔、加热器及气压传递管路实现一体化设计,并进行快速卡槽安装设计,实现快速拆卸清洗维护与安装。

6 结束语

传统的基于物理结构的防水设计、冗余测压孔和沉淀腔防尘设计、热力防除冰设计在嵌入式大气压力传感器防水、防尘、防冰和除冰性能方面存在局限性。材料表面疏水技术的突破与技术成熟度的提升,智能化、信息化的发展,能够为嵌入式大气压力传感器复杂气象环境适应性性能提升提供有效的解决方案。通过制定适应嵌入式大气压力传感器复杂气象环境防护技术设计与验证的通用规范,积极开展水、湿气监测技术,结冰状态监测技术,表面疏水与低可探测材料和易维护式结构设计技术等关键技术攻关,一方面可实现对嵌入式大气压力传感器复杂气象环境的状态监测,另一方面对嵌入式大气压力传感器加热器实现精准控制,提升其寿命。满足新一代装备状态在线监测、视情维修和出勤准备时间短的需要。

参考文献

- [1] 王臻, 张彦军, 雷武涛, 等. 嵌入式大气数据传感系统研究进展[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 309-315.
WANG Zhen, ZHANG Yanjun, LEI Wutao, et al. Development of the flush air data sensing system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3): 309-315. (in Chinese)
- [2] 王晓璐, 刘战合, 苗楠, 等. 测压点分布对嵌入式大气数据传感系统计算精度的影响研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(4): 592-598.
WANG Xiaolu, LIU Zhanhe, MIAO Nan, et al. Research on orifices distribution effects on accuracy of flush air data sensing system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(4): 592-598. (in Chinese)
- [3] 郑守铎, 陆宇平, 叶玮. 基于 χ^2 检验的FADS系统故障检测与管理技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(11): 1449-1451.
ZHENG Shouduo, LU Yuping, YE Wei. Technology research of FADS system fault detection and management based on χ^2 analysis[J]. Computer Measurement & Control, 2007, 15(11): 1449-1451. (in Chinese)
- [4] 姜杨, 张磊, 黎明. 嵌入式大气数据传感器系统测压孔布局研究[J]. 宇航计测技术, 2016, 36(6): 56-60.
JIANG Yang, ZHANG Lei, LI Ming. Research on layout of pressure taps in flush airdata sensing system[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2016, 36(6): 56-60. (in Chinese)
- [5] 方习高, 陆宇平. 嵌入式大气数据传感系统的求解算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(3): 398-400.
FANG Xigao, LU Yuping. Research on algorithms of flush airdata sensing system[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(3): 398-400. (in Chinese)
- [6] 方习高. 嵌入式大气数据传感系统的技术及应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
FANG Xigao. Research on technology and application of flush airdata sensing system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [7] 马航帅, 雷廷万, 李容冰, 等. 高性能飞行器大气数据传感技术研究进展[J]. 航空计算技术, 2011, 41(5): 118-123.
MA Hangshuai, LEI Tingwan, LI Rongbing, et al. Survey of air data sensing technology for high-performance[J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(5): 118-123. (in Chinese)
- [8] 百度百科. B-2轰炸机[EB/OL]. [2022-05-15]. https://baike.baidu.com/item/B-2%E8%BD%B0%E7%82%B8%E6%9C%BA/3148017?fr=ge_ala.
Baidu Baike. B-2 stealth and strategic bomber[EB/OL]. [2022-05-15]. https://baike.baidu.com/item/B-2%E8%BD%B0%E7%82%B8%E6%9C%BA/3148017?fr=ge_ala. (in Chinese)
- [9] JOST M, SCHWEGMANN F, KOHLER T. Flush air data system—an advanced air data system for the aerospace industry[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. [S.l.]: AIAA, 2004: 1-16.
- [10] DAVIA M C, PAHEL J W, WHITE J T. Development of a flush airdata sensing system on a sharp-nosed vehicle for flight at Mach 3 to 8[C]// 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, USA: AIAA, 2000: 1-12.
- [11] COBLEEGH B R, WHITEMORE S A, HAERING E A. Flush airdata sensing (FADS) system calibration procedures and results for blunt forebodies: AIAA-99-4861[R]. USA: AIAA, 1999.
- [12] 熊亮, 田勇. 嵌入式大气数据系统性能指标的影响因素分析[C]// 第八届中国航空学会青年科技论坛论文集. 西安: 中国航空学会, 2018: 432-437.
XIONG Liang, TIAN Yong. Analysis of influence factors

- for flush air data sensors system performance index [C] // Proceeding of the 8th Youth Science and Technology Forum of Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Xi'an: CSAA, 2018: 432-437. (in Chinese)
- [13] 新浪. 美军公布B2坠机直接原因[EB/OL]. [2022-05-15]. <http://mil.news.sina.com.cn/p/2008-06-08/1053504376.html?from=wap>. Sina. Us military says direct cause of B2 crash[EB/OL]. [2022-05-15]. <http://mil.news.sina.com.cn/p/2008-06-08/1053504376.html?from=wap>. (in Chinese)
- [14] SAE International. Minimum performance standard for pitot and pitot-static probes: SAE AS 8006A[S]. USA: SAE, 2015: 1-14.
- [15] SAE International. Airspeed tubes electrically heated: SAE AS 393[S]. USA: SAE, 2015: 1-17.
- [16] SAE International. Ice and rain minimum qualification standards for pitot and pitot-static probes: SAE AS 5562[S]. USA: SAE, 2015: 1-17.
- [17] FAA. Electrically heated pitot and pitot-static tubes(I): TSO-C16a[S]. USA: FAA, 2010: 1-8.
- [18] FAA. Electrically heated pitot and pitot-static tubes(II): TSO-C16b[S]. USA: FAA, 2017: 1-6.
- [19] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011. Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard of transport aircraft: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [20] RTCA. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment: DO-160G[S]. USA: RTCA, 2010.
- [21] 中华人民共和国工业和信息化部. 民用飞机机载设备环境条件和试验方法(第13部分): 结冰试验: HB 6167. 13—2014[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2014. Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment of civil airplane (Part 13): icing test: HB 6167. 13—2014[S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2014. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国工业和信息化部. 民用航空器电热空速管最低性能要求: HB 7045—1996[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 1996. Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Minimum performance requirements for electric pitot tubes in civil aircraft: HB 7045—1996[S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 1996. (in Chinese)
- [23] 沈国清. 嵌入式大气数据传感器系统误差分析及其消除方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012. SHEN Guoqing. Error analysis of flush air data sensing system & research on methods of error eliminating[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [24] 李清东, 张孝功, 任章. FADS压力传感器延迟补偿[J]. 航天控制, 2008, 26(6): 12-15. LI Qingdong, ZHANG Xiaogong, REN Zhang. The time delay compensation method for the pressure sensors of FADS [J]. Aerospace Control, 2008, 26(6): 12-15. (in Chinese)
- [25] GILKISON B A, REID A N, HOFFMANN N. Thermal management system for air data sensor module: US 2020/0309630[P]. 2019-03-28.
- [26] ROUSE G F, DUPULS P B, THOMAS S H. Flush surface air data sensor: US 6672152B2[P]. 2004-01-06.
- [27] KOCH K, BARTHLOTT W. Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2009, 367: 1487-1509.
- [28] 高雪峰, 江雷. 天然超疏水生物表面研究的新进展[J]. 物理, 2006, 35(7): 559-564. GAO Xuefeng, JIANG Lei. Recent studies of natural superhydrophobic biosurfaces [J]. Physics, 2006, 35(7): 559-564. (in Chinese)
- [29] 佟威, 熊党生. 仿生超疏水表面的发展及其应用研究进展[J]. 无机材料学报, 2019, 34(11): 1133-1144. TONG Wei, XIONG Dangsheng. Bioinspired superhydrophobic materials: progress and functional application [J]. Journal of Inorganic Materials, 2019, 34(11): 1133-1144. (in Chinese)
- [30] 方楠, 王敏, 王晓静, 等. 国外超疏水材料最新进展及其军用潜力分析[J]. 军民两用技术与发展, 2022, 463: 16-19. FANG Nan, WANG Min, WANG Xiaojing, et al. Recent progress and analysis of military potential of superhydrophobic materials abroad [J]. Dual Use Technologies & Products, 2022, 463: 16-19. (in Chinese)
- [31] SHEN Y, LIU S, ZHU C, et al. Facile fabrication of hierarchical structured superhydrophobic surface and its ultra dynamic water repellency [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 313: 47-55.
- [32] RUI Pan, ZHANG Hongjun, ZHONG Minlin. Triple-scale superhydrophobic surface with excellent anti-icing and icephobic performance via ultrafast laser hybrid fabrication [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(1): 1743-1753.
- [33] ROY S, IZAD A, DEANNA R G, et al. Smart ice detection systems based on resonant piezoelectric transducers [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1998, 69(3): 243-250.
- [34] WANG H P, HE M J, LIU H, et al. One-step fabrication of robust superhydrophobic steel surfaces with mechanical durability, thermal stability, and anti-icing function [J]. ACS Applied Material & Interfaces, 2019, 11(28): 25586.
- [35] TONG W, XIONG D, TIAN T, et al. Superhydrophobic surface on aeronautical materials via the deposition of nanoparticles and a PDMS seal [J]. Applied Physics, A, 2019, 125(3): 177.
- [36] 王新锋. 几种微/纳米结构超疏水材料的制备及其性能研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2020.

- WANG Xinfeng. Preparation and properties of several micro/nanostructured superhydrophobic materials [D]. Wuhan: Hubei University, 2020. (in Chinese)
- [37] 陈广华, 王国威, 宋丹. 镁合金超疏水表面制备技术的研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(6): 134-140.
CHEN Guanghua, WANG Guowei, SONG Dan. Research progress of preparation technology of super-hydrophobic surface on magnesium alloys [J]. Materials Protection, 2022, 55(6): 134-140. (in Chinese)
- [38] ZHANG Wenluan, WANG Dehui, SUN Zhengnan, et al. Robust superhydrophobicity: mechanisms and strategies [J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(6): 4031-4061.
- [39] 范友华. 超疏水涂层的制备及其在模拟环境中的防腐蚀性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
FAN Youhua. Study on preparation of superhydrophobic coatings and its anticorrosive property in the simulated environment [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [40] 潘瑞, 钟敏霖. 超快激光制备超疏水超亲水表面及超疏水表面机械耐久性[J]. 科学通报, 2019, 64(12): 1268-1289.
PAN Rui, ZHONG Minlin. Fabrication of superwetting surfaces by ultrafast lasers and mechanical durability of superhydrophobic surfaces [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(12): 1268-1289. (in Chinese)
- [41] WANG D H, SUN Q Q, HOKKANEN M J, et al. Design of robust superhydrophobic surfaces [J]. Nature, 2020, 582: 55-59.
- [42] 王德辉. 浸润性与机械稳定性拆分强化构筑超疏水表面及其应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
WANG Dehui. Decoupling mechanical and wetting stability for robust superhydrophobic surfaces and application [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [43] 郭锦程. 耐磨超疏水涂层的制备及其性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
GUO Jincheng. Reach on preparation and performance of wear resistant superhydrophobic coating [D]. Taiyuan: North University of China, 2021. (in Chinese)
- [44] 米玲, 熊亮. 大气气流防尘过滤装置: ZL201520149673.3 [P]. 2015-03-16.
MI Ling, XIONG Liang. Air flow dust filter device: ZL201520149673.3 [P]. 2015-03-16. (in Chinese)
- [45] 刘晓林, 朱彦瞳, 王泽林澜, 等. 飞行器仿生防冰涂层技术现状与趋势[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 527331.
LIU Xiaolin, ZHU Yantong, WANG Zelinlan, et al. Research progress and development trend of bio-inspired anti-icing coatings for aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 527331. (in Chinese)
- [46] 林贵平, 卜雪琴, 申晓斌, 等. 飞机结冰与防冰技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
LIN Guiping, PIAO Xueqin, SHEN Xiaobin, et al. Aircraft icing and anti-icing technology [M]. Beijing: Beihang University Press, 2016. (in Chinese)
- [47] 李微, 叶林, 张杰, 等. 光纤式结冰传感器的试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009(8): 16-18.
LI Wei, YE Lin, ZHANG Jie, et al. Experimental study on the fiber-optic sensor for direct ice detection [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009(8): 16-18. (in Chinese)
- [48] 龙江游, 吴颖超, 龚鼎为, 等. 飞秒激光制备超疏水铜表面及其抗结冰性能[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0706002.
LONG Jianguyou, WU Yingchao, GONG Dingwei. Femto-second laser fabricated superhydrophobic copper surfaces and their anti-icing properties [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0706002. (in Chinese)
- [49] 李君, 矫维成, 王寅春, 等. 超疏水材料在防/除冰技术中的应用研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(1): 24-38
LI Jun, JIAO Weicheng, WANG Yinchun, et al. Research progress on application of superhydrophobic materials in anti-icing and de-icing technology [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(1): 24-38. (in Chinese)
- [50] 沈一洲, 谢欣瑜, 陶杰, 等. 超疏水防冰材料的理论基础与应用研究进展[J]. 中国材料进展, 2022, 41(5): 388-397.
SHEN Yizhou, XIE Xinyu, TAO Jie, et al. Review on theoretical foundations and applications of superhydrophobic anti-icing materials [J]. Materials China, 2022, 41(5): 388-397. (in Chinese)

作者简介:

熊亮(1985—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器大气数据探测技术。

宋世峰(1988—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器大气数据探测技术。

周游(1985—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器大气数据探测技术。

王双(1987—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器大气数据探测技术。

马烽文(1998—),男,学士,工程师。主要研究方向:飞行器大气数据探测技术。

(编辑:马文静)