

机载无线传感器网络技术应用及适航性研究

王恒亮^{1,*}, 胡涛²

1. 中国航空综合技术研究所 科技发展部, 北京 100028

2. 中国航空综合技术研究所 适航性与安全性技术研究室, 北京 100028

摘要: 对机载无线传感器网络 (WSN) 技术未来在飞机上应用的可能性以及面临的适航问题进行了分析, 给出了该技术适航审定基础制定的建议, 并研究了机载WSN的符合性设计和验证方法, 为WSN技术在飞机上的开发应用提供参考。

关键词: 无线传感器网络 (WSN); 适航性; 机载; 安全性

中图分类号: V243 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2014) 05-0013-06

目前, 机载系统中的传感器绝大部分是以有线的方式进行联接。大量的传输线不仅增加了飞机设计的复杂度, 而且给飞机的维修保障也带来了巨大的不便^[1]。无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)作为传感技术、嵌入式计算技术、无线通信技术和分布式信息处理技术发展相结合的产物, 以其耗资小、不需布线、安装方便等优点, 在环境保护、农业、医疗和军事等领域都取得了广泛的应用^[2]。WSN技术在飞机上也具有广阔的应用前景, 但是由于民用飞机的适航性要求, WSN技术应用在民用飞机上尚处在研究探索和试验阶段。

1 机载无线传感器网络

1.1 机载无线传感器网络技术概念

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由大量微型传感器网络节点采用自组织方式构成的新型网络, 部署在监测区域内的网络节点可通过测量目标的热、红外、声纳、雷达或震动等信号获取温度、光强度、噪声、压力、运动物体大小、速度和方向等目标属性, 网络通过多节点协作, 完成对感兴趣目标属性或事件的感知、采

集和处理, 并及时告知用户。采用短距离无线低功率通信方式。传感器网络节点一般都由数据采集、数据处理、通信单元、电源和软件等部分组成, 见图1。被监测物理信号的形式决定了传感器类型^[3]。处理器通常选用嵌入式处理器。数据传输单元主要由低功耗、短距离的无线通信模块组成。

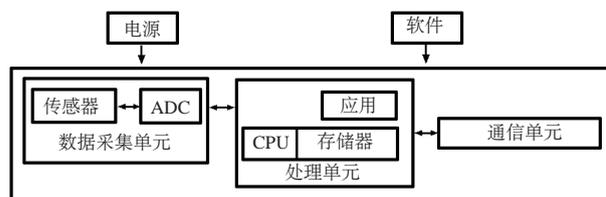


图1 传感器网络节点的组成

Fig.1 Composition of sensor networks node

图2为WSN的一种基本体系结构。大量的传感器网络节点随机分布在需要监测的区域。传感器节点配置处理能力较低的CPU、无线和传感芯片, 运行性能特别优异的网络算法。WSN具有网络部署灵活, 覆盖面广; 低成本, 高冗余的网络设计提供高可靠性保证; 分布式自组网, 支持多用户多模式的并发访问和任务实现等诸多优势。WSN

收稿日期: 2014-02-22; 录用日期: 2014-03-25

*通讯作者. Tel.: 010-84387087 E-mail: wanghengliang@yeah.net

引用格式: WANG Hengliang, HU Tao. Application and airworthiness research of airborne wireless sensor networks[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(05): 13-18. 王恒亮, 胡涛. 机载无线传感器网络技术应用及适航性研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(05): 13-18.

可有效地用于事件检测、目标定位、跟踪和识别,在国防军事、安全反恐、环境监测、交通管理、医疗卫生和工业生产制造等领域应用前景广阔。

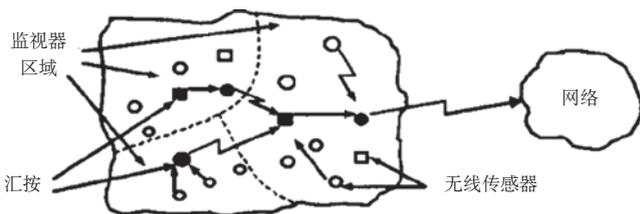


图2 无线传感器网络节点的组成

Fig.2 Composition of wireless sensor networks node

飞机包含着许多安全性关键系统,例如发动机控制系统、飞行控制系统等,也包含一些非安全性关键系统,例如飞机结构或发动机健康监测系统、座舱环境控制系统、飞行娱乐系统等。这些系统需要数量庞大的传感器对实时监测数据进行支持。当前,飞机各系统的测控工作都是由电缆提供电源和信号传输,这使得系统复杂、布线困难、系统重量大,而且长期使用容易出现故障而导致测控品质下降。例如,A380有超过483km长的电缆,包括98000根电缆和40000个连接器^[4]。飞机上布线是一项非常艰巨的任务,且需要满足EWIS(电气线路互联系统)适航性要求,比如布线时需要考虑EWIS物理分隔要求。而且,一些不可达的传感器布置点和恶劣条件限制了电缆和电缆套管的使用。如果强行使用线缆将会导致测控性能下降甚至导致灾难性故障。根据,美国海军的报告,在10年之间有6架飞机由于电气失效而坠毁,每年约有78架飞机由于电缆故障而无法执行任务,且每年有超过1000架次的飞机由于电缆故障而不得不终止任务^[5]。

WSN由一系列在空间上分布的传感器构成,每个传感器网络节点都具有感知测量、数据处理和无线数据传输功能,拥有独立电源提供能量。含有微电子机械系统(MEMs)的低成本和低功耗的多功能传感器具有体积小和重量轻的特点,非常适合在各类航空器上使用。如果应用无线传感器网络(WSN)来替代现有的线缆架构的机载传感器系统,能够满足飞机日益增长的传感器数量和冗余度要求,也能够大幅减轻飞机重量,增加燃油利用率、减少碳排放。用无线连接来替代有线连接器同样也能够带来适应性、兼容性、减少规模和提高可靠性等方面带来重大益处。使用WSN还能够降低直接成本、维护费用和报废成本。由于目前飞机上传感器系统在传感器硬件和线缆连接方面多数都采用了双/四倍冗余设计,若使用WSN

则能够大幅减轻重量。最新研究表明,塞斯纳310R的控制系统采用WSN使得重量减轻40.82kg,进而使其航程增加10%;对于一架SH-60军用运输机,如果用WSN替代其50%的线缆,则可减重121.11kg^[6]。由此可见,采用WSN对飞机减重、提高燃料利用率、减少碳排放意义重大。

图3给出了商用飞机飞行控制系统所需的一些典型传感器的大致位置布置图^[7]。从图中可以看出这些传感器的位置很分散,势必使得传感器线缆及套管很长,重量也会较大,如果使用WSN就不存在这个问题。

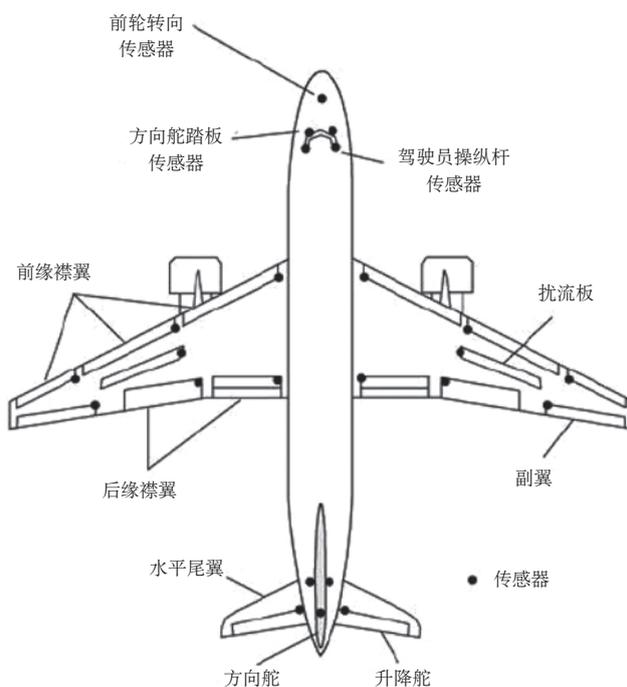


图3 商用飞机的典型传感器布置

Fig.3 Typical layout of commercial airplane sensors

1.2 机载WSN应用设想

WSN未来可用于飞机的非安全性关键系统,例如座舱环境控制系统、诊断系统、发动机和飞机健康状态监测系统;随着技术的不断成熟和进步,还可能用于安全性关键系统,例如飞行控制系统、发动机控制系统。下面以应用WSN的飞机健康状态监测系统为例来说明WSN在飞机上的应用^[8]。

飞机的重要部件如发动机、重要结构件、机翼载荷等在系统状态发生变化或出现故障时,其振动、应力、声音、压力、温度等信号携带着大量的状态信息。将传感器节点安装在这些部位组成一个WSN可实时采集飞机健康状态信息,并以无线、低功耗、多跳的通信方式,将采集到的数据传输到机载服务器,为飞机健康状态监测和故障诊断

提供可靠的数据。基于这一应用需求设计的飞机状态监测WSN系统方案如图4所示。该系统包括有线网络和无线网络两部分。

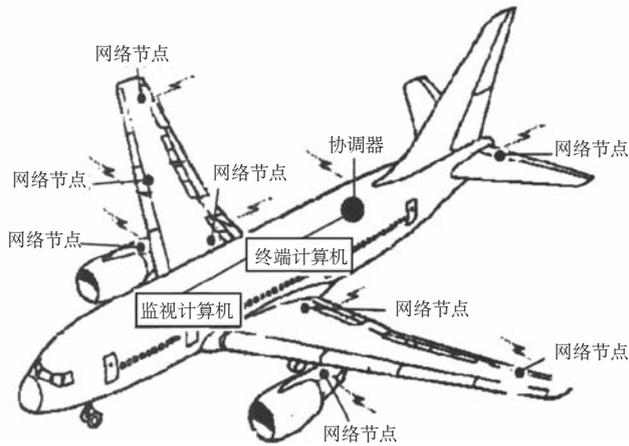


图4 飞机健康状态监测系统

Fig.4 Aircraft health monitoring system

有线网络是由带触摸屏的监视计算机(安装在驾驶员机舱中)、服务器和终端计算机(带有WSN协调器)构成的有线(或无线)局域网。驾驶员通过监视计算机触摸屏观测掌握飞机的各种监测参数、趋势、状态综合、智能诊断结果等。每台终端计算机都带有WSN协调器,管理一个WSN,可以实时监控无线网络各节点状态信息。终端计算机也可兼顾服务器功能,用于管理及控制一个WSN,终端计算机个数可根据监测参数的多少来设置,以提高系统的效率和灵活性。服务器通过无线网与地面计算机构成实时监测诊断远程网络化系统,实现信息共享。

无线网络部分由协调器、路由器和终端节点3种节点组成,各网络节点只要在通信范围内,相互间就可进行通信。协调器是无线网络中的主设备,用来组建一个WSN,可监控和配置网络的节点,维护网络。路由器用来维护网络结构,为数据传输寻找路径及实现数据的多跳传输;还可将自身作为父设备,允许其他节点加入网络。终端节点寻找协调器或邻近的路由器作为父节点加入网络,当终端节点与网络断开连接时,可寻找新的路由入口,重新加入网络,这样就增加了WSN的可靠性和增大了网络的覆盖率,大大增强了系统的稳健性。路由器和终端节点带有传感器模块用来监测飞机的物理参数,如振动、应变、温度和光照等,将采集的信息以无线方式发送给协调器。

适用于WSN的无线通信技术种类众多,如Bluetooth、Wi-Fi(IEEE 802.11)、RFID、ZigBee等。其中采用ZigBee技术组建的WSN具有自组织和自愈功能,通信可靠,并具有

功耗低、网络容量大、成本低、覆盖范围广、时延短及自动路由等特点,满足WSN所需分布式、自组织、规模大和动态性强等要求。综合比较后发现ZigBee技术最适合作为飞机健康状态监测WSN系统的无线通讯技术。

1.3 机载WSN技术现状

目前,WSN技术尚处在快速发展的阶段,正在逐渐趋于成熟。根据Gartner信息技术研究与咨询公司从2005年到2008年对WSN技术追踪和评估得出,该技术本身距离成熟的时间至少在5年以上^[9]。

将来在飞机上最有可能优先应用WSN技术的是非安全性关键系统,尤其是飞机的健康状态监测系统。通过研制价格和性能与当前可用传统模型相当的无线监测系统,可以显著增强飞机健康监测功能。无线传感器不需要电缆和内在连接,因此可以大大简化新型及改型的诊断/预测系统,并最终降低系统总重量。无线系统允许灵活替代传感器以满足改变系统的要求,并可能有助于故障识别、故障查找以及新的机队问题。在军事应用方面,由于不需要关键系统布线,将直接提高飞机的战斗生存性和总体系统的可靠性。相对于传统的电缆连接,无线连接对于水、烟、火等环境因素具有更好的忍耐力。

虽然在飞机上应用无线传感技术有很多好处,但是由于飞机的高安全性和可靠性要求,在飞机上应用WSN技术尚处在研究探索和试验阶段,很多航空、电子和网络科研人员在这方面进行了一些预研工作。目前,美国Luna创新公司(Luna Innovation)研究的用于飞行器基于状态维修(CBM)的无线传感器主要有两种拓扑结构。第一种拓扑结构是将传统的有线传感器连接到通用无线节点,这种方法允许使用现有的传感器技术,适用于小区域内高度集中大量传感器的情况。第二种拓扑结构是全部使用无线、整装传感器和一个远程访问点。这种方法具有最大的灵活性但需要一个自供电装置。这类传感器很可能用于执行大部分在线处理工作或仅仅执行周期性采样。此外,洛克希德·马丁公司在编号6282的F-16B试验机上进行了一个试验,验证了民用无线技术——蓝牙技术应用在预测健康管理(PHM)的可行性。

WSN技术要想成熟并在飞机上投入应用,目前尚有几项关键支撑技术有待突破。模块微型化、QoS保障和可靠性、数据传递延迟和数据丢失、网络安全性、能量供给在目前看来是制约应用的最大问题。另外,这些技术之间还彼此制约。首先,微型化使节点通信距离变短,路径长度增加,数据延迟难于预期;其次,能量获取和存储容量

与设备体积(表面积)呈正比,充足的能源和微型化设计之间的矛盾难于调和;再有,现有电子技术还很难做到可降解的绿色设计,微型化给回收带来困难,从而威胁到环境健康。

要实现在飞机上应用WSN,必须要解决好以上几项关键技术难题,尤其是网络的安全性、可靠性必须得到保证,数据传递延迟和丢失问题必须得到充分解决。因此,WSN要想在飞机上应用还有较长的路要走。

2 机载WSN技术适航性工作难点

在飞机的安全性关键功能中使用WSN技术需要有很高的安全性保证水平^[10]。FAA审定通过了一些机载无线电系统,包括无线烟火探测系统、旅客无线上网系统、座舱应急照明系统,它们都包含无线控制。但是这些使用无线的系统采用的并不是WSN技术。而且,这些也都只是非安全性关键系统,且一般运行在适航当局审定的范围之外。现有的适航规章不包含无线系统的有关规定,急需为WSN在飞机上的新颖性应用制定相应的适航要求。适航要求有必要保证机载WSN免受乘客所携带的电子产品和其他机载无线电传输系统的干扰。新的机载WSN的适航要求必须规定其免受未授权的网络入侵和数据修改,且不会出现功能丧失,或者性能逐渐降低、测量精度和数据传输误差逐渐增大。当前FAA和CAAC的适航规章要求安全性关键系统和其他通信网络(例如旅客娱乐网络)进行物理隔离,倘若安全性关键系统使用WSN,则会使得这种物理隔离无法实现。新的WSN的适航要求还必须阐明WSN的安全威胁,包括网络安全性威胁、商务威胁、信道干扰攻击等。

开展机载WSN技术的适航性工作主要困难在于该技术是一项全新的技术,且尚不成熟,不仅在飞机上没有应用实例,在飞机以外的其他领域的应用也不多见。因此,要在此时考虑在飞机上应用WSN技术的适航性工作,最大困难在于该技术本身的不成熟上,缺乏相关技术保证、技术标准和参考资料。

随着WSN技术不断走向成熟和完善,有关该技术的一些标准和要求也将会出台。当在飞机上考虑应用WSN技术时,这些其他领域的WSN标准则理应作为WSN在飞机上应用的适航性工作的参考资料。通过在飞机上使用WSN的研究和试验论证,制定WSN技术在飞机上应用有关的标准和适航要求,酌情可制定标准技术规定(TSO),依据TSO对机载WSN设备进行审查和批准,对设备设计和制造单位进行审查和批准。最终在飞机型号审定过程中,还要对机载WSN系统进行适航审定。

以上这些机载WSN系统的适航工作基本上都是从零起步,需要逐步建立起机载WSN系统的适航性工作体系。

3 机载WSN适航审定基础制定建议

现有的适航规章并不包含机载WSN或机内数据无线传输的有关规定,但是如果在飞机上使用WSN,还需要满足使用WSN的系统有关的适航要求。根据所使用的系统的不同,所适用的适航条款要求也有所不同。根据目前WSN的技术水平,短期类在飞机的安全性关键系统中使用WSN的可能性很小,而在非安全性关键系统上使用WSN的可能性会较大。因此,本文主要讨论飞机非安全性关键系统使用WSN的适航性工作,尤以飞机健康状态监测系统使用WSN为讨论重点。

表1 与机载WSN相关的适航性要求

Table 1 Airworthiness requirements correlation with airborne WSN

| 分类 | 条款号 | 名称 | 适用的子条款 |
|------------------------------------|--|----------------|------------|
| F分部“设备”的总则部分 | 25.1301 | 功能和安装 | 全部 |
| | 25.1307 | 其他设备 | (b)、(c) |
| | 25.1309 | 设备、系统及安装 | 全部 |
| | 25.1310 | 电源容量和分配 | 全部 |
| | 25.1316 | 系统闪电防护 | 全部 |
| | 25.1317 | 高强度辐射场(HIRF)防护 | 全部 |
| 机载WSN的有线供电线路需满足H分部“电气线路互联系统(EWIS)” | 除25.1725、25.1727、25.1731(为特定装置或系统的EWIS要求)外其他该分部的条款 | 多个,不一一列出 | 每个条款的全部子条款 |
| WSN静电防护的适航性要求 | 25.899 | 电搭接和静电防护 | 全部 |
| WSN系统可能着火或者WSN用于火情探测系统 | 25.1203 | 火警探测系统 | 全部 |

机载WSN应该属于机载电子设备的一部分,因此需满足机载电子设备的通用要求。机载WSN具有信号传输和型号处理能力,WSN需要有专用电子硬件和相关的软件,专用电子硬件研制的适航工作需按DO-254《机载电子硬件的设计保证指南》进行开展,电子软件的适航工作需按DO-178B《机载系统和设备适航审定的软件考虑》进行开展。

CCAR25《运输类飞机适航标准》的F分部“设备”的“总则”部分适用于所有的机载系统,因此,对于使用了WSN的机载系统也是适用的。此外安装WSN模块的位置还需要满足25.899“电搭接和静电防护”,防止静电对WSN模块的干扰。如果WSN应用于火情探测,那么25.1203“火警探测系统”也将适用,同时WSN系统本身也有着火的危险性。目前,机载WSN系统的传感器模块的供电不可避免要使用飞机机载电源进行供电,但模块自身也有储电功能。因此,机载WSN系统也必须满足H分部“电气线路互联系统(EWIS)”的一些条款要求。这些可能适用的适航条款如表1所示。

正如前所述,由于无线传感网络技术目前尚不成熟,还存在一些关键技术和问题尚需突破,且目前并没有机型敢于大胆尝试这项技术,因此,也没有飞机型号使用经验可供参考。

当未来无线传感网络技术足够成熟到能在飞机的非安全性关键系统中使用时,这必定是一项新颖性设计,为了保证这项新技术的安全性和适航性,可能需要为其制定相应的专用条件。在为机载MSN制定专用条件时,主要可从以下几个方面进行考虑:

(1) 机载WSN的可靠性。需要保证机载WSN能够可靠的工作,数据传输的延迟、丢失和错误在可接受的范围内,WSN连接稳定,各种功能正常,WSN模块有充足且符合要求的电源供给。

(2) 机载WSN的安全性。机载WSN的安全性必须得到保证,不能够受其他网络的或信号干扰或攻击而无法正常工作。

(3) 机载WSN的电磁兼容性。由于WSN都是电子元件且通过无线发射和接受信息,因此,它与其他电子电气设备的电磁兼容性必须要考虑,需保证它们之间不发生电磁干扰现象而影响各自正常工作。

(4) 机载WSN与飞机结构的相互影响。由于WSN的各节点模块可能较多地安装在飞机结构上,当在结构上打孔或其他形式的安装需要考虑对结构的影响。WSN模块一般自带储电装置,需要考虑电池漏液对结构的腐蚀影响。同时,需要考虑金属结构件可能会对WSN模块的信号传输造成的屏蔽和阻隔。关于这方面的适航要求可参考欧洲EASA的

CS25.302“系统与结构的交互影响”条款的规定。

(5) 机载WSN的持续适航性要求。机载WSN设备和元器件的寿命、维修性能、故障检测也必须要考虑。装入飞机结构中的WSN模块需能方便的维修和更换、WSN的某些节点出现故障时要求其自身能够及时检测出来并告知机组人员故障节点的位置,以便于查找和维修。

4 机载WSN符合性设计和验证

未来如果要将WSN技术应用于飞机的某个系统,替换其传感和测控方式为无线方式,首先需要明确使用WSN的任务和目标,明确传感器测点位置和特性、测控信号传输要求等。保证所采用的WSN传感器模块与原传感器具有等同的测量范围、相同或者更高的测量精度要求。保证测控信号的无线传输和接收延迟、数据丢失和错误在可接受的范围内。保证WSN无线网络的安全性和可靠性。此外,还需要结合该系统原有的适航性要求,给出应用WSN后该系统仍需要满足的适航性和安全性要求。

在WSN系统设计阶段,要对WSN替换方案进行反复论证其合理性,需要保证至少与原系统相同甚至更多倍数冗余的传感器和数据传输系统设计。然后,对所设计的系统进行安全性和可靠性评估,可以应用故障模式、影响和危害性分析的方法(FMECA)对其进行分析评估。最后,试制样机在地面进行试验。地面验证包括单独的系统验证和安装在飞机上进行整机情况下的地面验证。地面试验需要依据相关标准和要求开展环境与可靠性试验(GJB 150)和电磁兼容试验(GJB 1389)。地面验证通过后,需要通过飞行试验进一步验证其适航性。综上所述,机载WSN系统可能需要通过设计说明(MC1)、安全性评估(MC3)、试验室试验(MC4)、地面试验(MC5)和飞行试验(MC6)等五种方法对其符合性进行验证。

5 总结

通过对无线传感器网络(WSN)技术发展概况及其未来在飞机上可能的应用以及由此带来的适航性工作的难点分析,可以知道:(1)WSN技术目前尚不成熟,但未来该技术成熟后,在飞机上应用潜力很大、能带来诸多益处;(2)飞机的非安全性关键系统将首先尝试应用WSN技术;(3)在机载WSN真正实现应用之前,为了保证其安全和可靠性,围绕该技术及产品将有很多的适航工作需要开展,主要包括新的技术标准的制定、适航规章的补充修订、型号审定过程中的专用条件的制定等。

参考文献

- [1] 刘恩朋. 机载无线传感网络技术的发展与应用[J]. 测控技术, 2012, 31(9):1-2.
LIU En-peng. Measurement & Control Technology, 2012, 31(9):1-2. (in Chinese)
- [2] 杨洲, 景博, 张劫. 无线传感器网络在机载系统故障预测与健康管理的应用研究[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(Suppl.): 339-340.
YANG Zhou, JING Bo, and ZHANG Jie. Application of Wireless Sensor Network on Airborne System of Prognostics and Health Management[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(Suppl.): 339-340. (in Chinese)
- [3] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7):1282-1291.
REN Fengyuan, HUANG Haining, LIN Chuang. Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(7):1282-1291. (in Chinese)
- [4] M. Heinen. The A380 program[R]. Global Investor Forum, 2006.
- [5] J. Collins. The challenges facing U.S. navy aircraft electrical wiring systems[C]. Proceedings of the 9th Annual Aging Aircraft Conference, 2006.
- [6] K. Kiefer. Real-world experience in wireless instrumentation and control systems[C]. Proceedings of the CANEUS "Fly-by-Wire" Workshop, 2007.
- [7] R. K. Yedavalli, R. K. Belapurkar. Application of wireless sensor networks to aircraft control and health management systems[J]. Journal of Control Theory Application, 2011, 9(1):28-33.
- [8] 马建仓, 彭锦涛, 张国强等. 飞机状态监测无线传感器网络系统[J]. 测控技术, 2009, 28(11):6-9.
MA Jiancang, PENG Jintao, ZHANG Guoqiang, et al. Wireless Sensor Network System for Aircraft Condition Monitoring[J]. 测控技术, 2009, 28(11):6-9. (in Chinese)
- [9] 朱红松, 孙利民. 无线传感器网络技术发展现状[J]. 中兴通讯技术, 2009, 15(5):1-5.
ZHU Hongsong SUN Limin. Development Status of Wireless Sensor Network[J]. ZTE Communications, 2009, 15(5):1-5.
- [10] K. Sampigethaya, R. Poovendran, L. Bushnell, et al. Secure wireless collection and distribution of commercial airplane health data[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2009, 34(7): 14-20.

作者简介

王恒亮(1982—)男, 研究生, 工程师。主要研究方向: 机载航空电子适航性技术。

Tel: 010-84387087

E-mail: wanghengliang@yeah.net

Application and Airworthiness Research of Airborne Wireless Sensor Networks

WANG Hengliang^{1,*}, HU Tao²

1. Project Control and Operation Department, AVIC China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China

2. Department of airworthiness and Safety Technology, AVIC China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China

Abstract: Future possible application of airborne wireless sensor networks technology and the airworthiness issues during the application of this technology on the aircraft were analyzed. Some suggestions about the establishment of airworthiness certification basis for this technology were given. The design methods of compliance and verification methods of the airborne WSN were also studied. This paper can provide a reference to the application of WSN on the aircraft.

Key Words: WSN; airworthiness; airborne; safety

Received: 2014-02-22; Accepted: 2014-03-25

*Corresponding author. Tel.: 010-84387087 E-mail: wanghengliang@yeah.net