

# 基于 WSN 的机棚温湿度精确监测系统设计

彭海军 杨建新 钱玉莹

(海军航空工程学院(青岛校区)青岛 266041)

**摘要:** 沿海地区的航空装备因高温、高湿和盐雾导致的腐蚀尤为严重,目前对此普遍采用的维护措施缺乏可靠的参考,影响维护效率和装备完好率。构建开放环境中贴近停机位的多点实时温湿度监测系统是实现科学维护的重要基础。通过比较目前机场采用的各种监测网络、分析停机位分布特征以及机场传感器布放的特殊要求,提出基于无线传感器网络(WSN)的温湿度精确监测系统。通过采用 NI 公司的 WSN 技术搭建监测网络,实现无线网络与有线网络的无缝连接,实现了对不同气候环境、不同规模机场以及不同形式停机位的全适应,具有能耗低、布线少和软硬件扩展能力强等优点。该系统为机务人员的防潮维护工作提供精确的定量参考,对实现按需维护和保障装备完好率具有重要意义。

**关键词:** 温度;湿度;凝露;监测系统;无线传感器网络

**中图分类号:** TN92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:**

## Design of hangar temperature and humidity monitoring system based on WSN

Peng Haijun Yang Jianxin Qian Yuying

(Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** High temperature, humidity and salt fog answer for most corrosion on airborne equipments deployed near coastline. Maintenance methods at present time are subjective and inefficient. Constructing distributed Real-time temperature and humidity monitoring system is important for scientific maintenance. After comparing several types of airport monitoring systems, considering distribution of air crafts and special restriction on sensor cable, new monitoring system based on WSN was brought forward. With the assistance of NI-WSN products, the new system could merge wireless and wired network and was applicable to airports with various scale and form under various climatic conditions. It has the advantages of low energy consumption, less wire layout, strong software and hardware expandability. It can provides quantitative reference for accurate moistureproof maintenance work. It has an important significance to achieve the required maintenance and the airborne equipment intact rate.

**Keywords:** temperature; humidity; condensation; monitoring system; wireless sensor network

## 0 引言

随着我国国防投入的增加和军事技术的进步,航空武器装备在数量上和型号上不断增加,其中相当一部分部署在东南沿海的机场。由于我国南北气候差异较大,经过一段时间的使用之后,东南沿海气候对航空装备的影响逐渐显现出来。在各种自然环境因素中,高温、高湿和盐雾对航空装备的影响尤为显著<sup>[1]</sup>。高温环境导致部分零部件迅速老化失效,而高湿度环境恶化电子设备性能,湿空气和盐雾结合能在金属表面形成电解质溶液,加剧电化学腐蚀<sup>[2]</sup>,从而对装备可靠性和装备完好性产生严重影响。如何减少自然环境对航空装备的不良影响是当前航空机务维护的重要

研究课题。当前主要的应对方法主要是凭经验采取通风晾晒等措施,针对性和维护效果不明显。航空装备绝大部分时间都处在室外开放的自然环境中,如何对机场当地环境进行精确测量和跟踪,在此基础上形成辅助决策意见,进而优化机务维护工作显得十分重要。目前各机场只能做到对机场区域大范围的气象监测。本文基于无线传感器网络(WSN)技术提出一种分布式的机场温湿度精确监测系统,为问题的解决提供了一种有效的途径。

## 1 机场停机位布置现状

机场是供飞机起飞、着陆、停放和组织、保障飞行活动的场所。机场占地跨度比较大,一般达到 3 km 以上,如果

是多单位合用,则机场规模相应增大,各单位的停机位相对集中。目前广泛采用的钢结构机棚的停机位布置如图1所示。

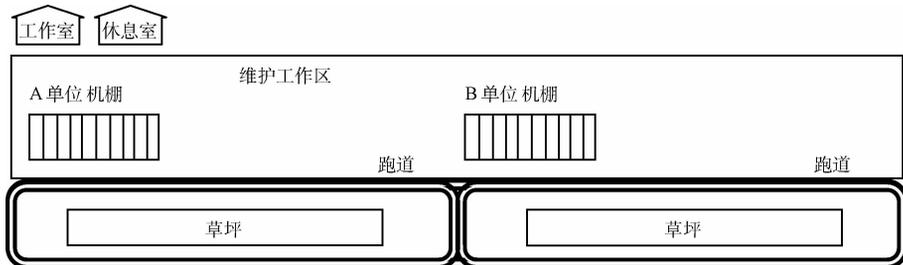


图1 机棚形式停机位的典型分布

也有部分单位仍然采用机窝来停放飞机,由于机窝的建造占地面积较大,必然导致飞机停放点更为分散。机窝一般沿牵引道两侧进行布置,开口朝向牵引道,如图2所示。牵引道尽头出口即是机场跑道。

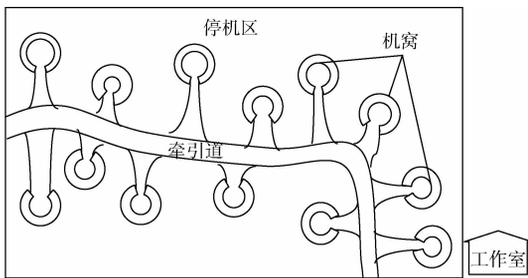


图2 机窝形式的停机位典型分布

由上面分析可知,各停机位因周边工作室、围墙、机窝围挡的存在和机窝朝向等因素会形成不同气候小环境。如果不加区分,每次都对所有飞机进行通风除潮,必然损耗相关部件的寿命,因此一般对通风时间进行严格控制;要想实现按需维护,还要对不同机位的气候小环境进行精确测量。而要获得各机位或者各机位聚集点的精确温湿度值,必然要求传感器贴近布置,这对网络的布线形式和环境适应能力提出了较高要求。

## 2 温湿度数据获取与运用

### 2.1 温湿度对机务维护的影响

在引发航空装备腐蚀的因素中,凝露是促使各种因素发生复合作用的重要一环,也是装备维护的重点防治内容。当与空气接触的物体表面温度低于空气露点时,其表面必发生凝露现象。关于凝露现象已有大量的研究<sup>[3]</sup>,对室外放置的航空装备来说,主要是春秋两季的清晨或傍晚,气候突变时以及东南沿海特有的梅雨季节,在高湿度条件下,由于大气温度相对较高,而航空装备金属外壳温度短时难以提升,当外壳温度低于周边大气的露点温度时,空气中水汽析出凝结在设备外壳上。露点与相对湿度(RH)的关系非常密切,相对湿度表示的是单位体积空气

内实际所含的水汽密度 $d_1$ 和相同温度下饱和水汽密度 $d_2$ 的百分比,即 $RH(\%)=d_1/d_2 \times 100\%$ 。温度越高的空气,能够容纳的水汽就越多;在水汽含量相同的情况下,温度越低的空气,其内部水汽越容易达到饱和。露点 $T_d$ 与空气温度 $T$ 、相对湿度 $RH$ 三者并没有精确的函数关系,只有经验数据<sup>[4]</sup>,如图3所示。图中横坐标表示相对湿度,纵坐标表示不同温度空气在此相对湿度下的露点温度。曲线最右端对应温度即空气的原始温度。由图可看出,对不同温度的空气,当相对湿度升高时,其露点温度也逐渐升高。由此可见,在某一温度下外壳是否凝露,不仅与空气中水汽绝对含量相关,而且与温度相关。

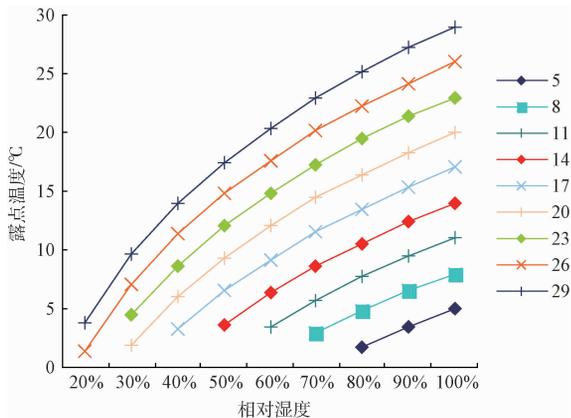


图3 不同温度的空气,在相对湿度不同时露点的分布情况

具体露点与空气温度之间的降幅如图4所示。显然空气相对湿度越高,空气到达露点所需要的温度降幅越小,如70%的相对湿度下,各温度条件的空气到达露点需要降温5~6℃,而90%相对湿度下,只需要降温不到2℃。这一组数据揭示了东南沿海地区航空装备防潮工作的迫切现状。

### 2.2 数据的分析和应用

对潮湿和凝露现象主要的防治措施包括两方面,一是控制外壳与环境的温度差,当外壳温度高于露点温度时可以保证不凝露;另一方面是在监测到凝露发生后采取通风

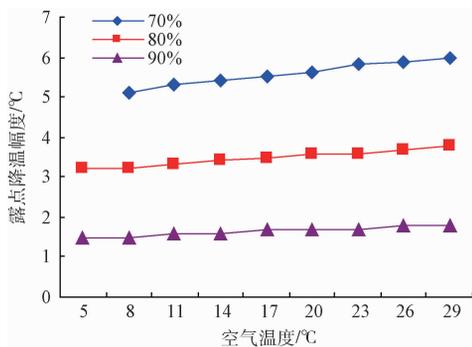


图 4 不同温度的空气到达露点的降温幅度

除潮的措施,及时将腐蚀发生的时间和程度降到最低。在现有条件下,对设备外壳温度的主动控制主要是通过空调系统提供热风 and 冷风,而在监测到凝露现象后,可以采取供热风,打开设备舱盖通风晾晒等措施。监测系统通过网络将测得各停机位的温湿度数据汇总到数据处理中心之后,需要对数据进行归纳和分析,并给出是否需要通风除潮以及要对那些机位的飞机进行通风除潮的建议。在形成正式的决策规则之前,应该对监测数据与装备实际凝露状况进行对比,根据实际情况修正决策的规则。总的来说有如下几点需要注意。

1) 凝露发生在装备外壳温度低于环境空气温度的情况下,所以春秋两季的清晨,气候突变时,或者夏季飞机从高空返回到暴晒的地面时是重点监测时刻。

2) 相对湿度达到饱和是凝露的决定条件,所以南方梅雨季节或者暴雨前后空气湿度突变时是重点监测时刻。

3) 设备舱小环境对平衡设备与环境的温度差以及环境的相对湿度有重要作用,所以应注重设备舱的密封性能。同样,飞机蒙布和上方的机棚都对飞机防潮有重要意义。

4) 从根本上解决设备防潮和解决凝露问题,还需要从航空装备设计上进行改进。

### 3 监测网络类型对比与选择

解决此类分布式的参数测量问题,目前主要有以下几类组网方法。

1) 基于 Intranet 技术和 HTTP 超文本传输协议的机场气象信息网络

此类网络将机场各类气象观测站、卫星云图观测站、气象雷达观测站和天气图形站等观测终端通过网络交换机进行信息集中处理,然后通过光纤或者拨号网络等途径提供给各类用户终端<sup>[5]</sup>。此类网络采用成熟的技术构建,通过 HTTP 协议可以获得跨操作系统的兼容性,功能全面,能承受较大的数据流量,但是建设成本较高,各类观测站对场地电源要求较高,无法贴近各机位灵活设置测量节点。

2) 基于 GPRS 网络的分布式监测网络

通用分组无线业务(GPRS)是在现有 GSM 网络上发

展出来的一种数据承载业务,目的是为 GSM 用户提供分组形式的数据业务。GPRS 提供了一种高效、低成本的无线分组数据业务,特别适用于间断的、突发性的和频繁的中小数据量传输。采用无线移动通信技术,将传统机场气象站通过安装有 SIM 卡的数据传输模块接入 Internet 网络,因此监测网络具有不受地域限制的优点。3G/4G 通信技术的迅速崛起,使网络通信带宽具有较大的增长空间<sup>[6]</sup>。这种组网方式解决了地域分布和传输带宽的问题,但还是难于解决多点精确监测的需求。

#### 3) 基于 WSN 的分布式监测系统

机场对地面交通畅通的要求极高,给传感器的布线与灵活调配带来极大限制,在此情况下,采用无需布线的自测量、自供电、自组网的传感器网络具有巨大的优越性。采用低功耗的嵌入式微处理器作为传感器节点的计算和管理核心,驱动外围传感器模块进行温湿度测量,测量数据经简单过滤后经低功耗无线网络发送至网关节点,然后采用有线或者无线的形式汇总到数据中心进行处理<sup>[7-9]</sup>。这种组网方式的技术基础就是近几年发展起来的 WSN 技术。美国在 2003 年将 WSN 技术列为对较近的未来影响最大的十大技术之一,我国很多大学和研究机构的相关理论研究基本与此同步。

WSN 是由一组密集布置、随机散布的传感器节点构成的无线自组织网络,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖的地理区域内感知对象的信息,并将其提供给用户。其典型拓扑结构图 5 所示。

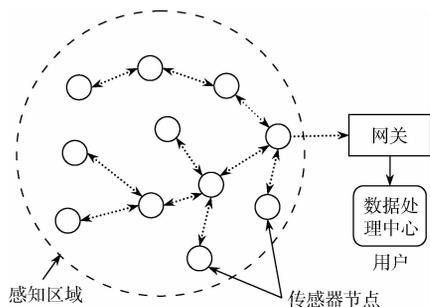


图 5 WSN 拓扑结构

其中传感器节点由电源、感知部件、嵌入式处理器、存储器、通信部件和软件这几部分构成。电源为传感器提供正常工作所必需的能源,通常采用微型电池。感知部件用于感知、获取外界信息,并将其转换为数字信号。处理器负责协调节点各部分的工作,如对感知的信息进行必要的预处理和保存,控制工作模式等。通信部件负责与其它传感器或网关的通信。软件则为整个传感器网络提供必要的软件支持,如嵌入式操作系统、嵌入式数据库系统等<sup>[10-11]</sup>。如果将网关接入移动通信网络、互联网等,则用户可以通过联网的数据处理中心获得对传感器网络的远程管理控制能力。

### 4 网络拓扑与节点配置

WSN 基于 IEEE 802.15.4g 协议(如 ZigBee 网络),与 WiFi 无线网路(基于 IEEE 802.11g)相比,进一步降低了传输带宽,但是可以获得极低的能耗以及较大的传输距离(~300 m),在外部供电不方便或者需要大规模布置网络节点的场合具有巨大的技术优越性。WSN 网络支持星型、树簇型以及网状网络拓扑,如图 6 所示。

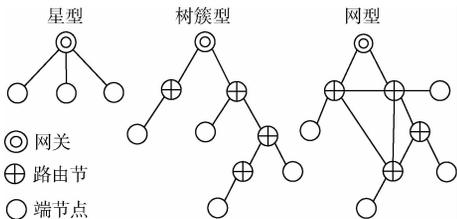


图 6 ZigBee 网络支持的拓扑结构

之所以形成了如此灵活的拓扑配置,关键是路由节点的存在。路由节点是一种特殊的测量节点,具有对其它节点信号的中继能力,因此可以扩展 WSN 的覆盖距离(如树簇型拓扑中)和冗余度(如网状拓扑中)。但是路由

节点工作耗能较多,必须使用外部电源供电,降低了网络的环境适应性和灵活性,因此只有在必要的时候才采用。

#### 4.1 机棚的节点配置

具体到监测系统中,机棚沿飞机跑道呈直线型布置,假设机位共 32 个,机位宽度 20 m,呈直线排列,如图 6 所示,机位跨度将达到 600 m。实际上需要重点监测的是因周边建筑物的存在而形成特殊小环境的那些机位,所以允许若干机位共用测量节点,比如每 4 个机位共用一个测量节点,在图 7 中黄色标出。网关是无线网络与有线网络的转换节点,必须布线而且有外部电源供电,因此不宜布置在紧贴机位处,最好布置在维护工作区外围,在图 7 中用同心圆表示。考虑节点无线通信距离,最佳位置是图中 B 区。因为形成星型拓扑结构,因此不需要配置路由节点,是一种最简洁的结构形式。

如果因供电和维护方便而需要将网关布置在机棚队列一端工作室中,那么必须在传感器节点中有选择的采用路由节点,如图 8 中带十字的圆圈所示。在方案中需要采用 2 号和 5 号两个路由节点,6、7 和 8 号节点通过 5 号节点的将采集数据传递到 2 号节点,而 1、2、3 和 4 号节点直接与网关通信。

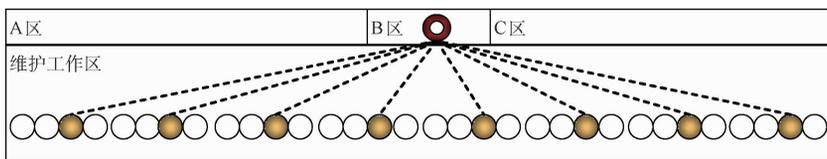


图 7 网络布置形式一(网关位于维护区外侧居中)

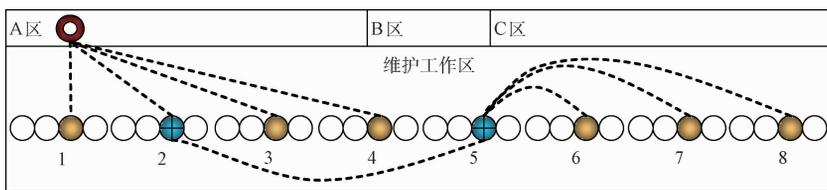


图 8 网络布置形式二(网关位于维护区外侧一端)

网络的分层模型<sup>[12]</sup>如图 9 所示,呈树簇型拓扑结构,其中路由节点 2 和 5 也称为下层节点的簇首。

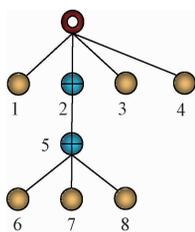


图 9 网络分层结构

号节点也有加入到路由节点 2 的下层网络的可能,而 3、4 号节点也有加入 5 号路由节点下层网络的可能,此时应注意每个路由节点或者网关可以管理的下层节点数量的限制。由于整个网络中只有 2 个路由节点,因此终端节点到网关之间的传输环节不会超过 3 跳,保证无线网络有较高的工作效率。

#### 4.2 机窝的节点配置

机窝沿牵引道两侧呈带状布置,区域宽度不超过 400 m,机窝中心间距约几十米,因而区域总长度一般不超过 800 m。布置节点的时候应综合考虑各机窝的朝向,并且重点监测小环境较特殊的机窝。如果节点总数不不多,空间距离比较集中,仍然可以采用星型网络布局;当节点

由于每个节点启动后会自动寻找网络并加入,所以 1

数较多时,必须采用路由节点来扩展节点容量和增加网络覆盖距离。图 10 所示是前文所述机窝的测量节点典型布局形式,其网络分层结构如图 11 所示。

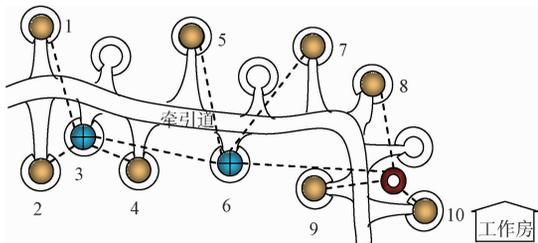


图 10 机窝附近节点布置形式

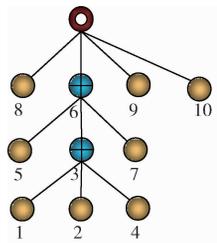


图 11 网络分层结构

## 5 监测系统的实现

国内对 WSN 的应用研究主要是通过采用各类嵌入式微处理器和传感器芯片以及无线通信模块搭建低能耗的传感器节点,采用低能耗且具有中等作用距离的链路层通信协议(如 IEEE802.15.4)实现自组织网络,由软件算法实现网络的路由、定位和覆盖<sup>[13-14]</sup>。国内研究人员针对不同的应用背景开发了不少基于 WSN 的温湿度监测系统<sup>[15-16]</sup>,绝大部分属于研究性的应用实现,在室外实地使用过程中暴露出节点能源可持续性不强、室外环境抵抗力不强、节点程序远程升级难等缺点<sup>[17]</sup>。为实现温湿度的精确可靠测量,并综合考虑建网速度和灵活性,最佳方案是采用商用产品,如美国国家仪器(NI)公司 WSN 产品。

NI-WSN 由 3 部分组成:节点、网关和软件。空间分布的测量节点与传感器直接连接,监测系统状态或者运行环境。采集到的数据通过无线传输至网关。网关可以独立运行,也可连接至一台采集、处理、分析和显示数据的主机。通过 NI-WSN 软件,可快速配置传感器网络,并结合 NI LabVIEW 图形化开发环境提取、分析并显示测量数据。因此 LabVIEW 是有线和无线两种测量系统无缝集成的软件平台。使用 NI WSN-9791 以太网网关可以创建一个基本的基于 PC 的 WSN 监测系统<sup>[18]</sup>,如图 12 所示。

### 5.1 节点

NI WSN 测量节点可直接搭载各种传感器,具有工业级通信可靠性。测量节点通过低功率可靠运行,实现长期分布式部署。在室外使用时,可在设备外加装防护外壳,

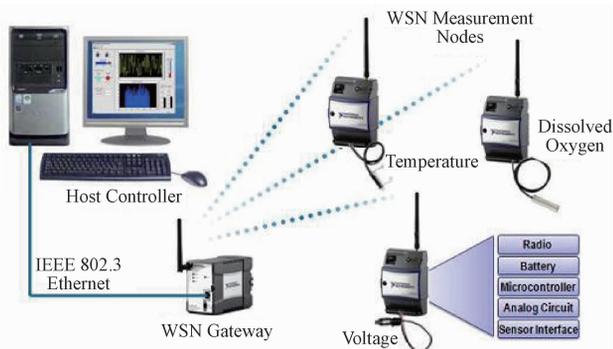


图 12 基于 PC 的 WSN 监测系统

大大增强其自然环境适应能力。使用 LabVIEW WSN 模块可对节点进行编程,可灵活定制节点的任务,进行基本的本地分析和控制等操作。节点可以直接使用 4 节 1.5 V、AA 碱性电池供电,持续工作达 3 年;也可采用 9~30 V 的外部电源供电。路由节点必须采用外部电源供电。

### 5.2 网关

在 WSN 系统中,网关相当于网络协调员,负责节点授权和消息缓存。网关从分布的节点收集测量数据并发送到数据处理中心,在数据处理网络中使用各种 NI 软件收集、处理、分析和显示测量数据。在 WSN 系统中,最多可同时使用 14 个网关来扩充监测系统规模,每个网关都工作于互不干扰的无线频道。NI WSN-9791 以太网网关必须连接至一台主机。它工作于 2.4 GHz,带有符合 IEEE 802.15.4 标准的无线收发设备,通过 1 个以太网端口与数据管理中心的 Windows PC 或 LabVIEW Real-Time 主控制器互联。可利用 9 VDC 到 30 V DC 外部供电,容许 -30~70 °C 环境温度、50g 冲击和 5g 振动。一个网关最多与 8 个终端节点(在星形拓扑中)或最多 36 个测量节点(在树簇型和网状拓扑中)通信,节点之间最大户外无线通信距离 300 m。因此在前述机棚星型拓扑方案中,只需要配备配置一台网关<sup>[19]</sup>。如果采用树簇型拓扑结构,则系统具有较大的扩展能力。对于多个单位共用机场的情况,可以通过多网关进行集成。

### 5.3 软件

配套 NI LabVIEW 图形化开发环境,结合基于配置的工具和强大的编程功能,可开发具有专业用户界面的测量、分析和控制应用程序,实现数据记录、事件检测、警告、短消息服务、网络数据可视化等功能。本系统主要任务是对分布采集的温湿度数据进行校正、归纳并分析,根据凝露和腐蚀的条件形成除潮维护辅助决策意见。在系统早期使用过程应密切关注重点时间段航空装备的潮湿情况并及时修正决策条件。经过一定时间的数据积累和观测之后可形成统一或者差别化定制的维护意见,进一步对决策建议进行优化。所有这些更新或者升级可随时通过无线方式下载至测量节点,不受室外环境的影响。通过 NI

LabVIEW WSN Pioneer 模块可自定义节点任务,如优化使用策略以延长电池寿命,优化模拟和数字输入性能等,这些都可以在数据管理中心的 Windows PC 上轻松实现。

## 6 结 论

防潮防腐蚀对东南沿海地区航空装备维护有特别重要的意义,当前的防潮维护工作大多基于主观经验判断,不能把握准确需求,在过度维护和维护不足之间难于找到可靠的参照。借助于 WSN 技术,通过配置 NI 公司的最新货架产品,本文实现了对各种规模分散布置的停机位的温湿度精确监测,为确定机务维护工作的时机和范围提供了可靠的建议,具有布线少、建网快、维护简便和二次开发能力强等优点,对提升机务维护工作的质量和效率有较大意义。

## 参考文献

- [1] 张令波,程丛高.酸性盐雾对航空材料及结构件腐蚀影响研究[J].航空标准化与质量,2015(5):43-47.
- [2] 李敏伟,傅耘,李明,等.典型航空印刷电路板盐雾环境腐蚀损伤规律研究[J].装备环境工程,2012,9(6):29-35.
- [3] 林伟,汪金刚.采用模糊控制技术的电气设备防凝露控制器[J].哈尔滨理工大学学报,2015,17(2):36-39.
- [4] 庞增辉,刘世安,许格.变电站室外箱柜凝露原理与防治措施分析[J].科技创新导报,2014,34(1):1-2.
- [5] 吴昊旻,赵小缘,华牡丹.丽水气象网络数据监控平台的设计与实现[J].气象水文海洋仪器,2016(3):71-75.
- [6] 王辉.基于 GPRS 的机场气象数据无线传输系统设计[J].机电产品开发与创新,2014,27(3):129-131.
- [7] 张军,吴建锋.基于无线传感器网络的温湿度检测系统[J].杭州电子科技大学学报,2010,30(6):5-8.
- [8] 杜帅,秦伟,张柯,等.基于 ZigBee 技术的绿地智能喷灌系统设计[J].国外电子测量技术,2016,35(3):71-75.
- [9] 苏圆圆,何怡刚,邓芳明,等.绝缘子温湿度在线监测技术研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(7):1098-1106.
- [10] 李建峰,程咏梅.无线传感器网络的研究与发展[J].微处理机,2008,29(5):48-50.
- [11] 向凤红,孔庆平.基于 ZigBee 的低功耗无线传感器网络改进协议[J].传感器与微系统,2017,36(3):1-4.
- [12] 曾庆权.基于 WSN 的战场分布式网络技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2009.
- [13] 徐新黎,皇甫晓洁,王万良,等.基于无线充电的 Sink 轨迹固定 WSN 路由算法[J].仪器仪表学报,2016,37(3):570-578.
- [14] 李建坡,董子奇.基于能量迭代的无线传感器网络非均匀分簇路由算法[J].计算机应用研究,2016,33(6):824-827.
- [15] 王欢,黄晨.高精度无线环境温湿度测量系统设计与研究[J].电子测量与仪器学报,2013,27(3):211-216.
- [16] 周海鸿,周嘉奉.基于 ZigBee 技术的温湿度监测系统[J].国外电子测量技术,2015,34(7):75-79.
- [17] 朱文平,张耀南,罗立辉.生态水文中无线传感器网络应用研究[J].冰川冻土,2011,33(3):573-581.
- [18] 王颖涛,李增峰,刘颖君.基于 WSN 的实验室环境远程智能监控系统[J].机械工程师,2016,48(2):34-36.
- [19] 郭韶峰.基于 NI-WSN 的电阻应变式传感器实验平台改造[J].自动化与仪器仪表,2015,37(7):194-196.

## 作者简介

**彭海军**,1980 年出生,讲师,博士,研究方向为航空电子技术、传感器技术。

E-mail:penghj0383@sina.com

**杨建新**,1970 年出生,副教授,硕士,研究方向为航空电子技术、自动控制技术。