

航天器用无线健康监测系统设计

申维和¹, 齐欢², 郑榕¹, 潘明健¹, 李霄¹, 郑晓刚¹, 于季弘³

(1. 空间物理重点实验室, 北京 100076; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 3. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081)

摘要: 航天器面临重复起降以及大温差、强振动以及剧烈冲击的复杂使用环境, 为提升其使用性和维护性, 提升航天器全生命周期内对其结构体能力数据的获取, 需全天候监测航天器结构体的健康状况, 并开展结构健康管理技术研究。通过无线的方式实现对航天器内外各敏感测点的数据采集、数据传输并汇总处理数据, 实现航天器结构体全方位全天候健康监测的功能。本文对航天器用无线健康监测系统开展了设计研究, 并实现了航天器无线健康监测系统的原理样机实施。

关键词: 航天器; 健康监测系统; 无线; 方案设计; 数据获取

中图分类号: TN926+.6 **文献标志码:** A

Design of Wireless Health Monitoring System for Spacecraft

SHEN Weihe¹, QI Huan², ZHENG Rong¹, PAN Mingjian¹, LI Xiao¹, ZHENG Xiaogang¹,
YU Jihong³

(1. Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing 100076, China; 2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China; 3. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Spacecraft faces a complex environment of repeated takeoff and landing, large temperature difference, strong vibration and severe impact. In order to improve its usability and maintainability, and enhance the acquisition of the structural capacity data of the spacecraft in the whole life cycle, it is necessary to monitor the health status of the spacecraft structure all day long and carry out research on structural health management technology. The data acquisition, transmission, collection and processing of the sensitive measuring points inside and outside the spacecraft are realized by wireless, and the all-round all-weather health monitoring function of the spacecraft structure is realized. The design of wireless health monitoring system for spacecraft is studied. The prototype implementation of wireless health monitoring system for spacecraft is realized.

Key words: spacecraft; health monitoring system; wireless; conceptual design; data acquisition

引 言

航天器在发射、降落以及分离过程中, 面临着从零度以下到零上数百度的巨大温差变化、多种频段振动力作用以及剧烈的冲击响应, 面临如此复杂环境使得维系航天器结构体健康极为重要, 为进一步

提升航天器的使用性和维护性,具备全生命周期内对其结构体能力数据的获取,需全天候监测航天器结构体的健康状况,并开展结构健康管理技术研究。无线方式的引入使得航天器全天候健康监测变得更为实用更为可行,通过无线的方式完成对航天器内外各敏感测点的数据采集、数据传输并汇总处理所获取数据,确保航天器结构体数据可查,健康情况可控,大幅度提高航天器的安全性和使用寿命。本文对航天器用无线健康监测系统^[1]开展了设计研究,主要研究并设计了全系统实现方案、无线通信协议以及硬件实施方案,并实现了航天器无线健康监测系统的原理样机实施。

1 无线健康监测系统方案研究与实现

航天器用无线健康监测系统实现对数十个敏感测点的传感器数据进行无线采集与传输,设计单一中心节点(读写器)配合多天线,实施星型拓扑组网架构,实现对多个子节点(标签)的数据及命令交互(图1)。子节点(标签)根据需求可进行温度测量、应变力测量以及多轴向加速度测量。中心节点(读写器)通过总线与后端设备进行交互,并接受后端设备供电维系自身工作,子节点(标签)通过自身携带的小型蓄电池进行供电。方案采用具备空口唤醒机制的超低功耗设计,实现系统的长时间待机以及连续工作。方案中无线通信协议基于超高频射频识别技术^[1]进行了裁剪与优化,以便系统更具工程实现性,硬件设计部分通过选用高精度AD大幅提升了采样精度,并扩充了子节点(标签)的初步数据处理能力。

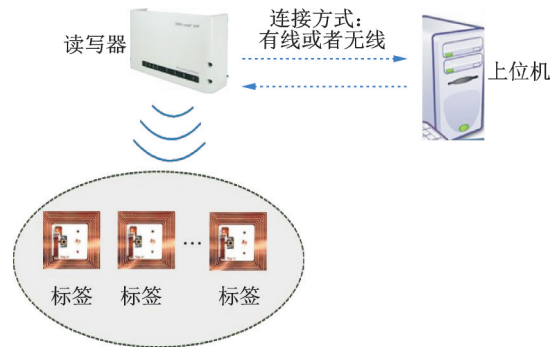


图1 健康监测系统示意框图

Fig.1 Schematic diagram of health monitoring system

2 无线通信协议研究与实现

2.1 射频识别技术

射频识别(Radio frequency identification, RFID)是新一代物联网的关键使能技术^[2],其主要由读写器和射频标签两部分组成。先进的RFID标签通常实现了感知与传输一体化,本文设计方案也采用了一体化设计。仅需将射频标签部署于物体周围或者表面,即可通过读写器与标签间信息的无线传输,实现对周围环境多物理场的无线监测。由于标签体积小、重量轻,功耗极低,因此尤为适合待检测任务种类较多、空间和重量严格受限,以及对感知频率要求高的场景。相对于传统有线监测,基于RFID的无线监测系统具有明显优势,首先标签可以被部署在物体的任意位置,其次在极端环境下可生存能力更强,航天器对于测点的要求即具备上述两点。

射频识别系统和大多数射频通信系统最大的不同点在于反向散射技术。通常射频通信系统的两端都具备发射信号的功能,比如在移动通信系统中,基站和手机终端都含有射频放大器,可以主动发射信号给对方。而无源RFID电子标签将数据发回读写器时所采用的通信方式被称为反向散射(Backscatter)技术。反向散射方式类似雷达的工作原理,如图2所示。阅读器有两个天线,发射天线和接收天线。当阅读器要求标签返回数据时,发射天线就像手电筒,发送连续载波(Continuous wave, CW)信号给标签供电,而标签就像一

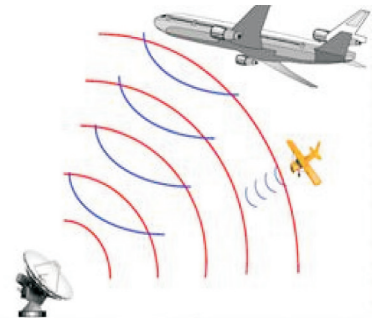


图2 反向散射原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of back-scattering principle

个镜子,标签反射最大,就是逻辑高电平;标签反射最小,就是逻辑低电平。标签控制反射强度大小的方式是控制电子标签的天线阻抗,使得反射的载波幅度产生微小的变化,这样反射的回波就携带了所需的传送数据信息。控制电子标签天线阻抗的方法有很多,大部分都是基于一种称为“阻抗开关”的方法,即通过数据的变化来控制天线负载电阻的接通和断开。所以标签端并没有主动的、需要较大功耗的射频放大器来进行信号发射,而是通过一个简单的“阻抗开关”来控制反射信号的强度。正因为这种反向散射技术的存在,标签能以非常低功耗的方式把数据回传到阅读器。

RFID技术的独特优势^[3],使得其在国防和工业中得到大量应用,例如美国NASA在肯尼迪航天中心利用RFID技术监测航天飞机和火箭发射时声波产生的振动,来预测声波对内部设备和结构可能带来的损害等。伴随而来的,高感知频率对标签存储和传输能力提出了极高的要求,因此设计适配感知频率、存储能力以及实际使用工况的RFID传输协议具有重要意义,同时也面临严峻的挑战。航天器用无线健康监测系统在极端场景下的重要应用需求,针对高感知频率要求、存储能力受限等特点,设计出基于优先级的组轮询数据传输协议,以实现数据的及时可靠交付,确保无线健康监测系统的功能实现。

2.2 组轮询数据收集协议

目前RFID主要采用基于帧分Aloha随机接入的方式来收集标签的感知数据。Aloha算法是一种非常简单的时分多址算法,基于Listen before talk原则,由读写器首先发言,继而激活进入其阅读区域的标签。帧分Aloha标签的时隙选择是自主的,但时隙是同步的,由读写器在每次收到一个消息后发送的确认消息实现。

RFID系统确保了较快的响应速度,同时也带来了标签碰撞的问题,为了解决标签碰撞问题,RFID系统通常采取两种类型的防碰撞算法:一种是确定性防碰撞算法,如二进制搜索算法、动态二进制搜索算法等;另一种是随机竞争类防碰撞算法,如动态帧时隙Aloha算法、分组增强型动态Aloha防碰撞算法等。在通用RFID系统中,由于标签发送具有随机性,标签发射时间不需要同步,帧分Aloha具有协议简洁以及可执行度高的优势,但其随机特性导致协议性能下界无法得到保证,而应用于航天器的无线传输系统设计需求与之有所不同,其需要具备严格的确定性而非随机性,也往往需要考核系统传输性能的下界。

基于确定性以及可靠性的考虑,提出一种基于组轮询方式的感知数据收集协议,协议由标签筛选和感知数据收集两个阶段组成^[4],如图3所示。

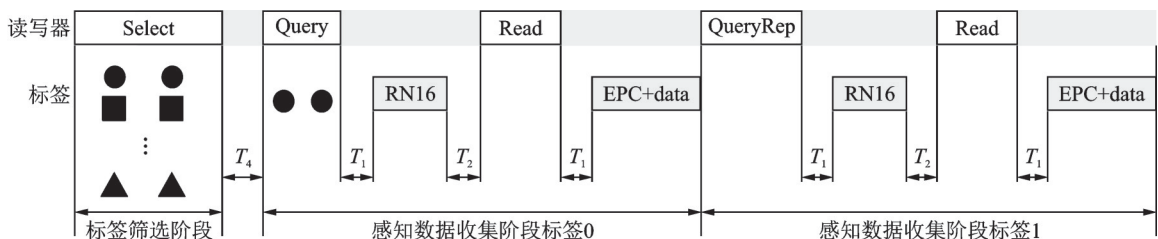


图3 组轮询数据收集示意图

Fig.3 Schematic diagram of group polling data collection

(1) 标签筛选阶段:读写器可以通过“Select”命令来指定当前被询问的标签。“Select”中包含一段掩码“Mask”,可以指示标签的EPC。因此,如果收到掩码为标签EPC的“Select”命令,那么对应EPC的标签将被唯一地筛选出来,并在后续阶段发送感知数据。

不同的“Select”命令通过不同的编号区分,通过目标指示来确定需要修改标签的哪种标志位(被选标记还是被询问标记)。筛选过程通过掩码存储区块、掩码区块起始地址、掩码长度以及掩码内容共同决定标签是否被此条“Select”命令选中,经过比对后,被成功选中的标签将修改自身状态字。

协议利用标签EPC间的关系,将标签分成若干组,并通过上述“Select”命令每次选出一组标签进行数据收集。假设读写器覆盖范围内有 n 个标签,它们的EPC分别设置为十进制数 $0\sim n$,用 $l=9$ 比特0-1序列表示,可以将相邻编号的 g 个标签分为一组,且各组间无标签重叠,此时 $g=\min\{2^m, n\}$, m 的值可以为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \min\{n/2^m, l-1\}\}$ 。假设分组编号为 i , $1\leq i\leq \lfloor n/2^m \rfloor$ 。当 m 越大时,组数越少,最大组的标签数越多,所需“Select”命令越少,但是协议的灵活性越差。

分组之后,读写器开始依次轮询各组。以轮询第一组(组号 i 为1)为例,读写器首先发送“Select”,其中位置指向EPC所在位置的最左边 $l-m=8$ 比特序列并且Mask是长度为 $(l-m)$,十进制值为 $i-1$ 的比特序列。收到指令后所有标签提取自身EPC的最左边8比特序列,并与收到的Mask比较。由于只有EPC为0和1时才能成功匹配,所以仅有第一组标签 $\{0, 1\}$ 被选中。

(2)感知数据收集阶段:读写器通过“Select”命令选中标签后,通过“Query”命令与标签建立连接,并收集感知数据。首先,读写器发送“Query”命令,其中指定标签将采用链路频率、数据速率和调制方式,并设置本轮询问的时隙个数的 $Q=1$ 。这使得标签0在收到“Query”之后,由于其计数器counter为0,它在收到此命令的第一个时隙向读写器回复一个16比特的随机序列(RN16)。然后,读写器发送一个包含此RN16的“Read”命令,指向标签内存中特定位置和长度的数据,其格式如图3所示。标签收到“Read”命令后,比较收到的RN16与之前自己发送的RN16,如果两者相同,则向读写器发送EPC和指定的感知数据。收到EPC后,读写器可以确定此标签就是目标标签。

而后,读写器发送“QueryRep”命令,收到此命令后,标签1的counter减少1变为0,此时标签1立即发送RN16,依次完成连接建立和感知数据传输。继而,读写器重复以上操作,不同之处在于要相应变化Mask,最终实现全系统多节点(标签)传感器数据的收集。

2.3 基于优先级的轮询数据收集协议

考虑到飞行器实际应用中的工程需求,利用轮询方法具有时隙分配确定性和可排序性的优点,所设计协议可支持小规模快速数据收集,以及高优先级(高感知频率标签)标签单轮内多次传输,以保证重要数据的时效性。

(1)支持小规模快速数据收集:假定收集 n 个标签中指定的 m 个标签的数据,那么可先将此 m 个标签进行分组,然后通过“Select”指令优先对此 m 个标签进行组轮询来收集数据。

(2)支持高感知频率标签的数据收集:为了保证高感知频率标签的可靠数据收集,防止缓存溢出,需要在轮询过程中对这类标签进行多次数据收集。以10 Hz感知频率为例,假设每次感知数据存储占16 bit,缓存空间为256 bit,其中最多160 bit用于感知数据存储,那么要求此标签须在1 s内将所有数据传给读写器。此时,如果轮询完 n 个标签的总时长为 T ,那么可以将此类标签设为首个轮询标签,并在间隔1 s内再次轮询此类标签。这一过程可以通过修改“Select”命令来实现^[5]。

3 系统硬件设计与实现

系统硬件设计包含子节点(标签)与中心节点(读写器)两部分,系统通过实现射频唤醒与自动待机完成低功耗设计^[6],即当没有射频输入的时候,MCU处于超低功耗状态,此时系统的总体功耗仅约2 mA。当有射频输入时,MCU被激活。同时,当MCU在约定时间内没有收到新的射频信号时,MCU将自动恢复到低功耗状态^[7]。

3.1 读写器硬件设计

中心节点即RFID读写器,其电路功能框图如图4所示,主要包含对外接口、读写器天线、读写器处理模块(R2000模块)等^[8],中心节点主要功能为根据后端设备指令,通过无线方式向众多子节点发送射频指令,并接受各子节点反馈的采集数据^[9]。

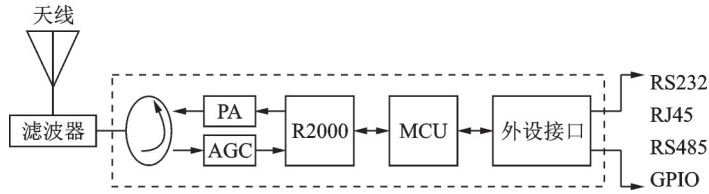


图4 中心节点硬件电路框图

Fig.4 Hardware circuit diagram of central node

3.2 标签硬件设计

标签(子节点)电路原理框图如图5所示。整个节点由电池供电,调制解调电路把被调制的射频信号中的命令提取出来并转换为使能信号EN,传送给主控芯片MCU^[10]。主控MCU在未被使能激活的情况下,处于超低功耗模式^[11],当主控MCU接收到EN使能信号,自动唤醒进入正常工作模式,之后,主控MCU进一步接收信号,并根据信号的内容,执行相应的测温或通信操作。主控芯片MCU采集内置和外置传感器的信号,并转换成数字信号,编码成低频串口数字信号,返回给调制解调模块。RF前端内的调制器把低频数字信号作为调制信号,以反向散射的方式,通过天线返回到中心节点^[12]。

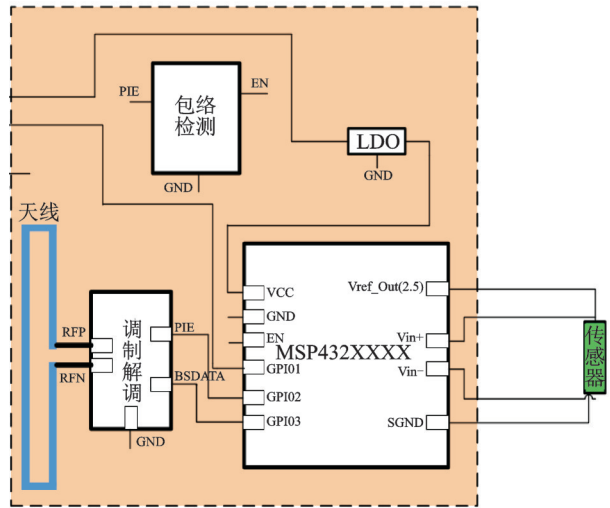


图5 子节点硬件电路示意图

Fig.5 Hardware circuit diagram of sub node

4 天线设计与实现

4.1 标签天线设计

标签选用通过多次弯折得到的弹簧天线(见图6),弹簧天线主体结构小型化,具有成本低、增益高、频带宽等优点,且可选用尺寸较多,方便与主板进行集成^[13]。使用HFSS仿真软件对天线性能进行仿真,仿真结果表明该设计能够满足系统需求,仿真结果如图7所示。

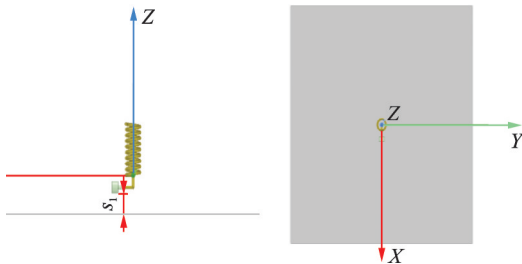


图6 标签天线仿真布置图

Fig.6 Tag antenna simulation layout

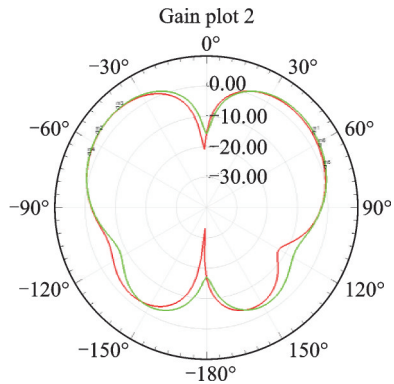


图7 标签天线仿真二维方向图

Fig.7 Two-dimensional pattern of tag antenna simulation

4.2 读写器天线设计

读写器天线选用陶瓷介质天线产品,通常陶瓷介质天线多用于GPS和RFID产品中^[14],采用右旋圆极化设计,扁平状小型结构,具有低反射损耗、轴比小、增益高的特点^[15],读写器天线通过高频线缆与读写器连接,结构外形如图8所示。

5 无线健康监测系统测试情况

航天器用无线健康监测系统标签原理样机如图9所示,中心节点原理样机如图10所示。

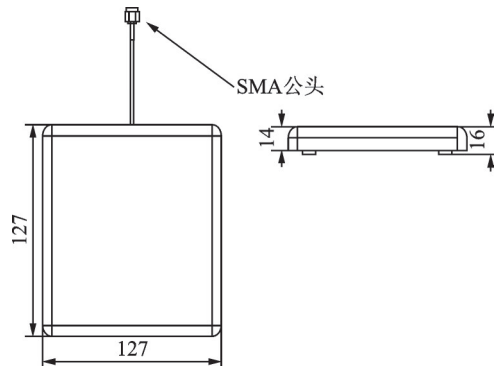


图8 读写器天线结构外形图

Fig.8 Structure outline of reader antenna

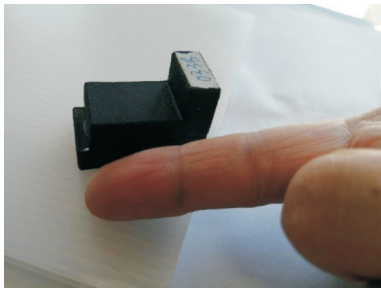


图9 子节点原理样机实物图

Fig.9 Physical diagram of sub node prototype



图10 中心节点原理样机实物图

Fig.10 Physical diagram of central node prototype

波形分析:阅读器的信号可以被子节点正确解析,子节点回复的信号可以被阅读器正确解析,实现完整的交互,分别如图11、12所示。



图11 子节点接收无线指令并响应时序波形

Fig.11 Sub node receives the wireless command and responds to the timing waveform

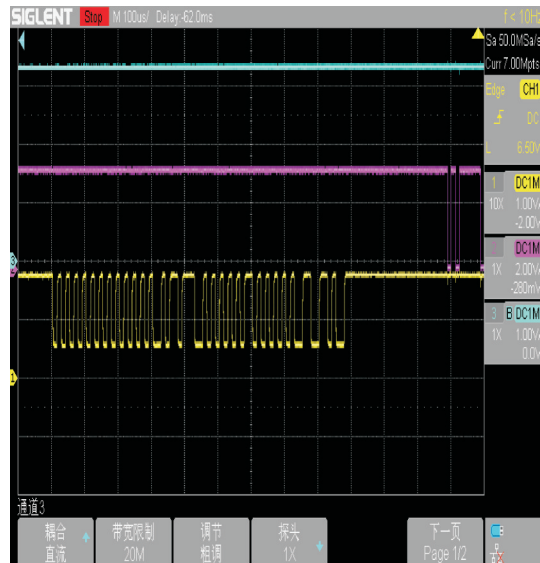


图12 子节点响应的时序波形细节展开图

Fig.12 Expanded diagram of time sequence waveform of sub node response

单节点测试:基于航天器实际工况,搭建金属背景场景,将单一子节点布置于一金属板上,读写器天线距离子节点4 m左右对子节点进行点名测试,系统工作流畅,单节点测试数据如表1所示。

多节点测试:搭建封闭金属空间以模拟航天器工况,实现多节点(测试采用52个节点)同时工作状态下多路温度传感器数据的采集与无线传输,系统工作流畅,多节点测试数据如表2所示。

表1 单节点点名测试结果统计表

Table 1 Statistics table of single node roll call test results

ID	距离/m	ID	距离/m
0x0310	4.3	0x031E	4.1
0x0311	4.5	0x031F	4.0
0x0312	4.1	0x0320	4.2
0x0313	4.0	0x0321	4.1
0x0314	3.9	0x0322	4.1
0x0315	3.8	0x0323	4.3
0x0316	4.2	0x0324	4.5
0x0317	4.2	0x0325	4.0
0x0318	4.2	0x0326	4.0
0x0319	4.0	0x0327	4.2
0x031A	4.0	0x0328	4.3
0x031B	4.1	0x0329	4.2
0x031C	4.4	0x032A	4.1
0x031D	4.1	0x032B	4.0
0x032C	3.9	0x033A	4.4
0x032D	3.8	0x033B	4.1
0x032E	4.2	0x033C	4.1
0x032F	4.3	0x033D	4.2
0x0330	4.2	0x033E	4.3
0x0331	4.3	0x033F	4.0
0x0332	4.1	0x0340	4.0
0x0333	4.0	0x0341	4.3
0x0334	4.0	0x0342	4.1
0x0335	4.4	0x0343	4.2
0x0336	4.0	0x0338	3.9
0x0337	4.1	0x0339	3.9

表2 多节点测试结果统计表

Table 2 Statistical table of multi node test results

ID	温度/°C	ID	温度/°C
0x0310	24.6	0x031E	24.4
0x0311	24.5	0x031F	24.3
0x0312	23.9	0x0320	23.7
0x0313	24.3	0x0321	24.6
0x0314	23.8	0x0322	23.7
0x0315	24.5	0x0323	24.5
0x0316	23.9	0x0324	24.1
0x0317	24.1	0x0325	24.6
0x0318	23.6	0x0326	24.4
0x0319	23.7	0x0327	23.7
0x031A	24.2	0x0328	24.7
0x031B	25	0x0329	24.4
0x031C	25	0x032A	23.9
0x031D	24.7	0x032B	24.6
0x032C	24.2	0x033A	24.4
0x032D	23.9	0x033B	24.5
0x032E	24.2	0x033C	24.7
0x032F	23.8	0x033D	24.6
0x0330	23.5	0x033E	24.2
0x0331	23.6	0x033F	24.8
0x0332	24.2	0x0340	23.6
0x0333	24.3	0x0341	24.7
0x0334	23.8	0x0342	24.4
0x0335	24.4	0x0343	24.5
0x0336	24.8	0x0338	24.4
0x0337	23.7	0x0339	23.9

6 结束语

本文提出了航天器用无线健康监测系统的设计方法,研究并设计了全系统方案、无线数据交互协议以及硬件电路方案,并完成了原理样机研制,进行了充分测试,测试结果表明无线健康监测系统基本实现了预想功能,并具备了一定的实际工程使用基础。

参考文献:

- [1] 丁治国. RFID关键技术研究与实现[D]. 合肥:中国科技大学,2009.
DING Zhiguo. Research and implementation of RFID key technologies[D]. Hefei: China University of Technology, 2009.
- [2] 轩秀巍. 超高频射频识别系统的关键技术研究[D]. 天津:天津大学,2012.
XUAN Xiuwei. Research on key technologies of UHF radio frequency identification system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

- [3] 闫娜. 低功耗低成本无源射频识别标签芯片的研究与设计[D]. 上海:复旦大学, 2007.
YAN Na. Research and design of low power and low cost RFID[D]. Shanghai: Fudan University, 2007.
- [4] 王铮. 超高频RFID空中接口协议的研究与系统设计[D]. 天津:天津大学, 2011.
WANG Zheng. Research and system design of UHF RFID air interface protocol[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [5] 李兵. 超高频射频识别系统性能的分析与测试[D]. 长沙:湖南大学, 2011.
LI Bing. Performance analysis and test of UHF RFID system[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [6] 童乔凌. RFID阅读器芯片设计及通讯算法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2010.
TONG Qiaoling. RFID reader chip design and communication algorithm research[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [7] 王耀. 超高频RFID标签芯片中低功耗模拟电路关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009.
WANG Yao. Research on key technologies of low power analog circuit in UHF RFID TAG chip[D]. Chengdu: University of Electronic Science and technology, 2009.
- [8] 喻剑. RFID中间件关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2009.
YU Jian. Research on key technologies of RFID middleware[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.
- [9] 范志广. 超高频射频识别_RFID_中的若干问题研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
FAN Zhiguang. Research on some problems in ultra-high frequency radio frequency identification[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [10] 刘冬生. 射频识别标签芯片关键技术的研究与实现[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.
LIU Dongsheng. Research and implementation of key technologies for RFID[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [11] 舒元超. 无线可充电传感器网络系统分析与优化[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
SHU Yuanchao. Analysis and optimization of wireless rechargeable sensor networks[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [12] 陈力颖. 无源超高频电子标签芯片设计研究[D]. 天津:天津大学, 2008.
CHEN Liying. Design and Research of passive UHF RFID TAG chip[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [13] 靳钊. 无源超高频射频识别标签设计中的关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
JIN Zhao. Research on key technologies in passive UHF RFID design[D]. Xian: XiDian University, 2011.
- [14] 任彪. 无线传感器网络节能机制与移动性的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2006.
REN Biao. Research on energy-saving mechanism and mobility in wireless sensor networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006.
- [15] 李玉凯. 无线传感器网络高效可靠数据传输理论及应用研究[D]. 保定:华北电力大学, 2011.
LI Yukai. Research on theory and application of high energy efficiency and reliable data transmission in wireless sensor networks [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2011.

作者简介:



申维和(1985-), 通信作者, 男, 工程师, 研究方向: 飞行器无线传感网络、电气系统无缆化以及非接触传能系统, E-mail:36471904@qq.com。



齐欢(1989-), 女, 工程师, 研究方向: 航天器电气系统总体设计。

郑榕(1970-), 女, 研究员, 研究方向: 临近空间飞行器设计。

潘明健(1986-), 男, 高级工程师, 研究方向: 飞行器测控系统总体设计、无线电气系统设计等。

李霄(1980-), 男, 高级工程师, 研究方向: 航空宇航科学与技术。

郑晓刚(1979-), 男, 高级工程师, 研究方向: 航天项目管理。



于季弘(1979-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 天基物联网和无源通信。