

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.03.008

基于射频和 NB-IoT 的危房监测系统设计

王琨

(福州职业技术学院 信息技术工程系,福建 福州 350108)

摘要:为解决危旧房屋状态的实时监测预警问题,设计了基于无线传感网的危房监测系统。利用加速度传感器实时采集房屋状态信息,改进传感器标定算法,采用温度分段式六位置标定法提高精度。数据传输采用射频通信和窄带物联网(narrow band internet of things, NB-IoT),根据实际房屋结构设计低功耗的路由算法,保证数据可靠传输。最终实现了高精度低功耗的远程监控方案,使决策者通过手机就能实时掌握房屋状态,提高房屋倾角监测精度,误差低于 0.1° 。

关键词:危房监测;无线传感网;倾角标定;路由优化

中图分类号: TP99;TP393.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)03-0247-08

Design of intelligent dangerous building monitoring system based on radio frequency and NB-IoT

WANG Kun

(Department of Information Technology Engineering, Fuzhou Polytechnic, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to solve the problem of real-time monitoring and forecasting of dangerous old buildings, a dangerous building monitoring system based on wireless sensor network was designed. Acceleration sensors were used to monitor the house conditions in real time. The sensor calibration algorithm was improved, and the temperature segmented six-position calibration method was used to improve the accuracy. Radio frequency communication and NB-IoT (narrow band internet of things) were adopted for data transmission. According to the actual housing structure, a low-power routing algorithm was designed to ensure reliable data transmission. Finally, a high-precision and low-power remote monitoring scheme was realized, which enabled the decision-maker to grasp the real-time state of the house through the mobile phone. System test results demonstrated that the monitoring accuracy of house inclination angle was improved, and the error was less than 0.1° .

Keywords: dangerous building detection; wireless sensor network; inclination calibration; routing optimization

一直以来,中国的老旧危房监测管理主要依赖人工^[1-2],近年才逐步提出相关的信息化系统:文献[3]提出的危房动态监测预警系统整合了人工巡查和在线实时监测信息,定期出具监测报告,但数据采集仍依赖人工,耗时费力且不准确;文献[4]提出利用无人机航拍实现危房状态监测的系统,但对图像识别率要求较高,且无法实时掌握房屋状态;文献[5]提出了基于传感器的无人值守式危房智能监测系统,可远程观测房屋结构变化,

并实时报警。从世界范围内来看,危房监测需要进一步采用信息化手段,通过室内环境监控,实现建筑物的健康管理^[6-8]。上述几种采用传感器式的监测系统,虽能够实时感测建筑的状态,但存在传感器笨重、线路较多、不易大范围安装等问题。

本项目研发低功耗的智能危房监测系统,在每间房屋内部部署低功耗的微机电传感器,采集关键梁、柱、墙信息,通过无线射频模块将关键梁、柱、墙节点连接,构成无线传感网络,优化传输路

收稿日期: 2021-02-08

基金项目: 福建省教育厅中青年教育科研项目(JAT191365)

作者简介: 王琨(1983—),女,河南鄢陵人,副教授,硕士,研究方向:物联网技术与应用。

径,将信息传输到汇聚节点筛选整合,最终通过无线网络将数据传至云平台,使用户可远程实时掌握各房屋的健康状况。

1 系统总体架构

危房监测系统的采集端由房屋状态监测节点、房屋信息汇聚节点构成。房屋状态监测节点带有三轴加速度传感器,能采集关键梁、柱、墙的倾角信息。针对不同的房屋户型结构,采用直接传输和存储转发的路由算法,确保数据得以有效传输。房屋信息汇聚节点是数据的汇聚和转发中心,收集其它监测节点的信息,对数据进行滤波、误差补偿和整理融合后发送到云平台。用户可利用手机 APP 接入云平台,根据不同的权限,得到不同的房屋信息。系统总体结构如图 1 所示。

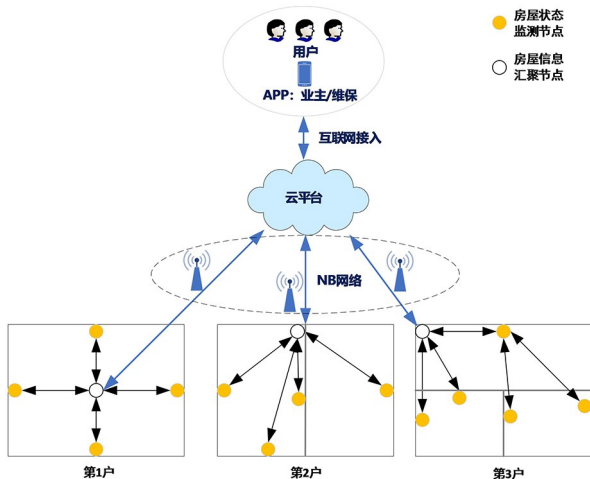


图 1 危房监测系统的总体框图

Fig.1 General diagram of dangerous building monitoring system

2 关键模块原理与设计

危房监测系统主要实现房屋倾角数据的采集与传输,根据模块化的设计思路,房屋状态监测节点主要由倾角传感器模块、供电模块、无线射频模块和主控模块构成;房屋信息汇聚节点主要由 GPS 定位模块、温度传感器模块、无线射频模块、NB-IoT 通信模组和主控模块构成,如图 2 所示。倾角传感器的体积、功耗和精度,无线射频模块的选型和路由设计是系统设计的关键。

2.1 倾角传感器模块设计

当房屋发生沉降、扭曲或倾斜时,建筑的承重梁、柱子或承重墙会发生倾斜,需要采用高精度的

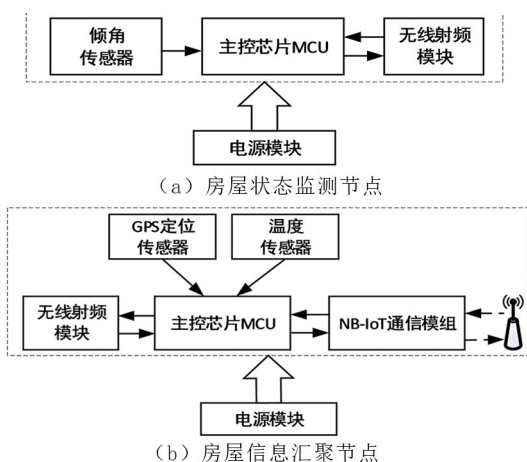


图 2 危房监测系统硬件电路结构框图

Fig.2 Hardware circuit block diagram of dangerous building monitoring system

传感器准确测量各关键梁、柱、墙的倾角。工程上使用的倾角测量仪比较重,质量约 500~5 000 g,工作电压介于 12~48 V,部分采用有线的数据传输方式不适合直接安装在房屋内部使用,需要选择体积小、功耗较低的传感器测量倾角。

三轴加速度传感器体积微小,能够实时测量 x 、 y 、 z 轴上的加速度 A_x 、 A_y 、 A_z 。其中, z 轴上的倾角 θ 满足公式(1)。已知 3 个轴的加速度值,就能求出 z 轴的偏移角度。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z} \right) \quad (1)$$

综合考虑工作电压、分辨率、体积等因素,倾角传感器采用博世系列的三轴低功耗加速度传感器 BMA253。该器件供电电压为 1.62~3.60 V,工作模式在正常模式、深度暂停模式、低功耗模式和暂停模式之间切换,最低功耗电流低至 6.5 μ A。BMA253 采用差分电容原理将角度变化转换为加速度信号输出,转换精度为 12 位数字分辨率,体积为 2 mm × 2 mm × 0.95 mm 的长方体。在同类传感器中,其分辨率较高、体积较小、功耗较低,综合性能最优,能够满足设计需求。

2.2 通信模块设计

由于危房监测的特殊性,可以在房屋的关键梁、柱、墙上通过铆钉或螺丝安装倾角传感器模块,形成房屋状态监测节点。监测节点通过预先设计的路由协议进行组网,将数据传送给汇聚节点。每户设置一个汇聚节点,将收集到的信息整合后上传云平台。

目前常用的近距离无线通信技术包括 ZigBee、WiFi、蓝牙及无线射频技术。其中无线射频技术的通信频段主要包括 230、315、433 MHz 和 2.400 GHz 频段,前 3 个频段虽然通信距离可以达到几千米,但是信号穿透能力弱、传输速度慢且不易组网,因此采用起始频率为 2.400 GHz、带宽为 0.125 GHz 的无线射频技术作为近距离无线通信的备选方案。对比 ZigBee、WiFi、蓝牙和无线射频(2.400 GHz)技术,发现无线射频(2.400 GHz)技术功耗低、开发成本低、抗干扰能力好,因此采用无线射频(2.400 GHz)技术作为近距离无线通信手段,具体参数对比见表 1。

无线射频模块采用 nRF24L01,工作频率为 2.400~2.525 GHz,工作频段最多可分为 126 个可供选择的频道,频道的工作频率如式(2)所示,式中 F_0 为工作频率, RF_{CH} 为模块寄存器配置的频率值,通信双方必须保持相同的工作频率才能通信。

nRF24L01 数据传输率为 1 Mbps 或 2 Mbps,当工作在 2 Mbps 模式时, RF_{CH} 的值必须大于等于 2,才能避免模块间的干扰。蓝牙、Wi-Fi 等技术的工作频率也在 2.400 GHz,但对 nRF24L01 的干扰较少,主要有两个原因:第一,射频模块本身数据传输率较高,传输时间短,可有效避免碰撞。第二,采用跳频技术^[9],将 0.125 GHz 带宽的信道划分为若干个无线电频率通道,收发双方传输信号的载波按照预定规律进行离散变化,设置相同的时间段,发送端在发送数据时,如果在指定时间段内未收到应答信号,则按照既定规律自动切换到下一频道重新发送;接收端在接收数据时,如果在指定时间段内没有收到有效数据,则按照相同的规律自动切换到下一频道继续检测载波信号。跳频技术的时间间隔非常短,能够有效完成数据传输。

$$F_0 = 2\,400 + RF_{CH}(\text{MHz}) \tag{2}$$

表 1 近距离无线通信技术对比

Tab.1 Comparison of short-range communication technology

参数	通信协议	工作频率/GHz	通信距离/m	接收电流/mA	发射电流/mA
ZigBee	ZigBee	2.400	10~75	26.0	35
无线射频(2.4 GHz)	自行定义	2.400~2.525	>100	12.3	9
蓝牙	Bluetooth	2.400	10	20.0	300

nRF24L01 采用增强型的 ShockBurst 模式传输数据,其数据帧格式如表 2 所示。当测量的倾角值在-90°到 90°之间时,数据帧大小约为 9 B,即 72 b。汇聚节点以户为单位收集信息。汇聚节点对收集到的监测节点数据量进行整合,只保留节点编号和倾角角度信息,通过汇聚节点整合后,数据量更加精简。

表 2 增强型 ShockBurst 模式的数据帧格式

Tab.2 Data frame format of enhanced ShockBurst mode

格式	字段长度/b
帧头	8
地址	24~40
标志位	9
数据	8~256
CRC 校验	0/8/16

远距离传输采用 NB-IoT 技术,目前大部分地区 NB 网络已经普及,所选的 NB05-01 模组体积小、功耗低、成本低,传输速率介于 160~250 Kbps,可解决家用 Wi-Fi 断网的困扰,很适合小数据量的房屋倾角监测数据收发。

2.3 无线网络路由设计

每户一般只设一个汇聚节点,该节点对安装位置无特殊要求,可以采用电源适配器引入市电供电。其它监测节点由于安装位置不同,节点数较多,只能采用电池供电。因此,有必要设计低功耗的路由协议,保证监测节点尽可能长时间地工作,避免经常更换电池带来不便。

实际上,一户可能是只有一间房屋,也可能是包含两间以上的房屋。对于一户一屋的情况,nRF24L01 在无墙遮挡的通信距离能达到 100 m,所有监测节点的数据可以直接传输给汇聚节点。根据 nRF24L01 的频率特性,可以划分为 126 个频道,每个监测节点分配不同的频道作为起始频

率,汇聚节点在接收数据时,设置为对应的频道就可以收到相应数据。对于一户两屋或两屋以上的情况,如果房屋面积较大或有墙遮挡,nRF24L01的传输信号会较大衰减,一些监测节点无法直接和汇聚节点通信,故需采用部分监测节点作为中继节点,将信息传送给汇聚节点。

具体的路由产生过程如下:由汇聚节点获取邻接节点位置,形成邻接矩阵,如果还有孤立节点,汇聚节点的下一级节点就重复前述步骤,直到所有的节点都被遍历。接着,考虑节点发送数据的消耗、节点发送数据对邻接节点的消耗以及节点接收响应的消耗,按照式(3)计算出源节点到目的节点的基本代价矩阵,基本代价矩阵里的元素值代表直接连通的两个节点的传输功耗,综合两个矩阵,计算出每个监测节点到汇聚节点的最低功耗,就能得到最优路径表。

$$E_{i\text{total}} = E_i + E_{\text{tr-cost}} \times \text{adj}(i) + E_{\text{re-cost}} \times \text{adj}(d) \quad (3)$$

式中, $E_{i\text{total}}$ 指从节点*i*到目的节点的总功耗, E_i 指节点*i*发送或接收数据的功率消耗, $E_{\text{tr-cost}}$ 指传输数据时,节点*i*对各邻接节点影响的功率消耗, $E_{\text{re-cost}}$ 指收到数据后,回复确认信息对其各邻接节点的影响功率消耗, $\text{adj}(i)$ 和 $\text{adj}(d)$ 分别指节点*i*和目的节点*d*的邻居数目。

以一户三居室的房屋为例,分布在室内节点对应的拓扑图如图3所示,数字代表传感器节点的编号,节点0为汇聚节点,其它节点为监测节点,该房屋的邻接矩阵 A_{sd} ,如式(4),矩阵中“1”表示该节点与其是邻接节点,可直接通信;“0”表示不是邻接节点,不能直接通信。再根据式(3),综合nRF24L01考虑的能耗状态及计算的简便性,设直接通信时 $E_i = 2.0 \text{ mW}$,穿墙时时 $E_i = 3.0 \text{ mW}$, $E_{\text{tr-cost}} = E_{\text{re-cost}} = 0.2 \text{ mW}$,计算出源节点到目标节点的基本代价矩阵 P_{sd} ,如式(5)所示。

$$A_{sd} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P_{sd} = \begin{bmatrix} 0 & 3.4 & 0 & 0 & 4.4 & 4.2 \\ 3.4 & 0 & 4.2 & 4.6 & 4.6 & 0 \\ 0 & 4.2 & 0 & 3.2 & 0 & 0 \\ 0 & 4.6 & 3.2 & 0 & 4.6 & 4.4 \\ 4.4 & 4.6 & 0 & 4.6 & 0 & 3.4 \\ 4.2 & 0 & 0 & 4.4 & 3.4 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

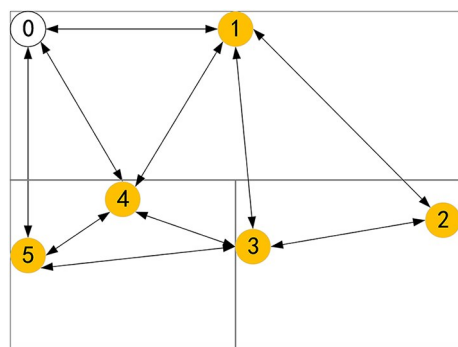


图3 三居室房屋网络拓扑图

Fig.3 Network topology of a three-bedroom house

利用式(4)和式(5),通过最少节点遍历法求出源节点和目标节点间的最低能耗,就能确定它们之间的最优路径。以求本例最复杂的节点2到节点0的最优路径为例。根据式(4)可知,从节点2到节点0无直接通路,只能通过中转的形式到达;通过普通遍历的方法,可以得到以下5种路径,分别为:

- (1) 节点2→节点1→节点0;
- (2) 节点2→节点3→节点1→节点0;
- (3) 节点2→节点3→节点4→节点0;
- (4) 节点2→节点3→节点5→节点0;
- (5) 节点2→节点3→节点4→节点5→节点0。

利用公式(5),可以得到5种路径对应的功耗分别为:

- (1) $P_{20-1} = 4.2 + 3.4 = 7.6 \text{ (mW)}$;
- (2) $P_{20-2} = 3.2 + 4.6 + 3.4 = 11.2 \text{ (mW)}$;
- (3) $P_{20-3} = 3.2 + 4.6 + 4.4 = 12.2 \text{ (mW)}$;
- (4) $P_{20-4} = 3.2 + 4.4 + 4.2 = 11.8 \text{ (mW)}$;
- (5) $P_{20-5} = 3.2 + 4.6 + 3.4 = 14.2 \text{ (mW)}$ 。

很明显,通路(1)消耗的功耗最少。综上,中间节点越多,消耗的功率越大。因此,采用最少节点遍历法寻找两节点间的通路,如果通路有多条,再比较功耗大小,选择功耗最低的那条路径作为最优路径。

3 加速度传感器的倾角标定

实际工程中,监测节点采集的倾角数据是判断危房状态的核心要素,根据中国住建部 2016 年发布的《危险房屋鉴定标准》(JGJ125-2016),对于不同层高的倾斜率限值要求不同,倾斜率下限为 0.5%,换算成倾斜角约为 0.3°,因此传感器采集的倾角误差要低于 0.3°。

本设计研究了基于位置、温度等的误差补偿技术,对传统的六位置标定法^[10]进行改进,采用温度分段式六位置标定法设计。根据所使用的三轴加速度传感器误差原理,建立如下模型:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $N_i(i=x,y,z)$ 为加速度传感器的输出响应, $A_i(i=x,y,z)$ 为加速度传感器对应轴的激励加速度, $k_i(i=x,y,z)$ 为加速度传感器的标度因数, $k_{ij}(i=x,y,z;j=x,y,z;i \neq j)$ 为加速度传感器的非正交误差, $D_i(i=x,y,z)$ 为加速度传感器的零偏。该模型在标定时,仅需确定 6 个位置就能求得 12 个参数,位置参数如表 3 所示。

表 3 三轴加速度传感器的坐标轴取向及各轴重力加速度

Tab.3 Coordinate axis orientation and gravity acceleration of three-axis acceleration sensor

位置	坐标轴取向			重力加速度		
	x 轴	y 轴	z 轴	x 轴	y 轴	z 轴
1	地	东	南	g	0	0
2	南	西	地	0	g	0
3	西	地	南	0	0	g
4	东	北	天	0	0	$-g$
5	东	天	南	0	$-g$	0
6	天	西	南	$-g$	0	0

将加速度传感器放在倾角精度误差低于 0.01°的转台上,转台带有温控装置,保持恒温。通过控制转台使加速度传感器达到相应的位置,记录此时的输出响应 $N_{ij}(i=x,y,z;j=1,2,3,4,5,6)$,代入公式(6),即可求得相应的值。例如,当加速度传感器处于位置 1 和位置 6 时,得到

$$\begin{bmatrix} N_{x1} \\ N_{y1} \\ N_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} N_{x6} \\ N_{y6} \\ N_{z6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

从式(7)、式(8)可得

$$k_x = \frac{N_{x1} - N_{x6}}{2g}, k_{yx} = \frac{N_{y1} - N_{y6}}{2g}, k_{zx} = \frac{N_{z1} - N_{z6}}{2g} \quad (9)$$

$$D_x = \frac{N_{x1} + N_{x6}}{2}, D_y = \frac{N_{y1} + N_{y6}}{2}, D_z = \frac{N_{z1} + N_{z6}}{2} \quad (10)$$

同理,将加速度传感器置于位置 2、5 时,得到

$$k_{xy} = \frac{N_{x2} - N_{x5}}{2g}, k_y = \frac{N_{y2} - N_{y5}}{2g}, k_{zy} = \frac{N_{z2} - N_{z5}}{2g} \quad (11)$$

$$D_x = \frac{N_{x2} + N_{x5}}{2}, D_y = \frac{N_{y2} + N_{y5}}{2}, D_z = \frac{N_{z2} + N_{z5}}{2} \quad (12)$$

将加速度传感器置于位置 3、4 时,得到

$$k_{xz} = \frac{N_{x3} - N_{x4}}{2g}, k_{yz} = \frac{N_{y3} - N_{y4}}{2g}, k_z = \frac{N_{z3} - N_{z4}}{2g} \quad (13)$$

$$D_x = \frac{N_{x3} + N_{x4}}{2}, D_y = \frac{N_{y3} + N_{y4}}{2}, D_z = \frac{N_{z3} + N_{z4}}{2} \quad (14)$$

将式(10)、式(12)、式(14)中对应的 D_x 、 D_y 、 D_z 平均,得到

$$\begin{aligned} D_x &= \frac{N_{x1} + N_{x2} + N_{x3} + N_{x4} + N_{x5} + N_{x6}}{6} \\ D_y &= \frac{N_{y1} + N_{y2} + N_{y3} + N_{y4} + N_{y5} + N_{y6}}{6} \\ D_z &= \frac{N_{z1} + N_{z2} + N_{z3} + N_{z4} + N_{z5} + N_{z6}}{6} \end{aligned} \quad (15)$$

标定时,通过六位置法,利用式(9)、(11)、(13)、(15)就能求解模型中的所有参数。由于加速度传感器是每 20℃ 约产生 0.1°的误差,因此在标定时,以 20℃ 为单位划分温度范围,固定最高温度和最低温度,分两次使用“六位置法”,求出相关参数,取其平均值,得到此温度段的最终参数。输入新的加速度值时,根据不同温度段模型

进行误差补偿,得到 N_x 、 N_y 、 N_z 的精确值,从而确定精确的倾角。

4 系统软件设计

危房监测系统房屋终端的主程序流程如图 4 所示。当网络注册成功后,汇聚节点根据网络拓扑生成最佳路由表,按此路由对各房屋节点的状态数据进行采集,经滤波、误差补偿,得到精确数据。如果接收到来自云平台的数据采集命令,则启动 GPS 模块,采集当前位置和时间信息,通过 NB 网络将时间、位置及房屋状态信息发送到云平台,进入低功耗类模式;否则,自行判断房屋状态数据,若超出警戒值,将信息上报到云平台;若未超出警戒值,则不做任何动作。最后,都进入低功耗类模式,等待下一次的中断唤醒。

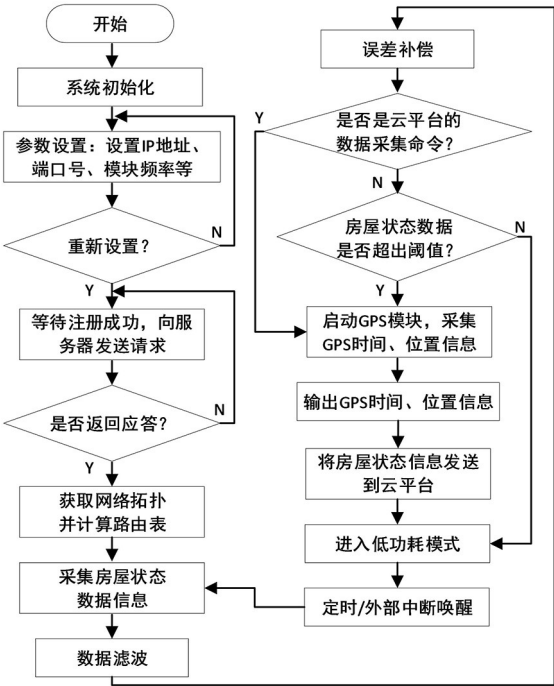


图 4 危房监测系统房屋终端主程序流程图

Fig.4 Flow chart of the housing terminal of the dangerous building monitoring system

“采集房屋状态数据信息”部分,主要包括利用 nRF24L01 进行数据的收发。nRF24L01 采用增强型的 ShockBurst 模式处理数据包,该模式下能够自动进行数据重发,自动产生应答信号,且数据传输时间短,有效避免数据碰撞,降低能耗,具体数据帧格式如表 3 所示。

采用 nRF24L01 进行通信的流程主要包括数据发送和数据接收两部分,根据接收到的“发送能使”和“接收使能”信号来判断。当发送数据时,设置数据前缀,发送数据,在规定时间内收到应答信号,则表示发送成功;未接收到应答信号,则按照既定规律跳频重新发送,直到接到应答信号为止。当接收数据时,先检测载波,在频道匹配的情况下解析数据包,当目的地址等于节点地址时,读取数据,进行 CRC 校验,如果校验不成功,则按照既定规律跳频,重新接收数据;当目的地址和节点地址不相等时,进行转发。

本系统的 APP 功能主要包括注册登录模块、房屋数据查看模块和房屋数据分析模块。设计时,将设备的 IMEI 码与用户信息绑定,一般使用者可以通过身份注册认证,登录查看自家房屋的状态信息,但无法查看别人家的信息。只有管理员账号有权限查看所有房屋信息,并对一段时间区域内的房屋状态信息导出,以实现对区域内房屋进行整体的预警和决策。

5 系统结果测试

依据上述软硬件设计达成的系统,对系统的精度进行测试,利用误差精度低于 0.01° 的标准模块设置不同的倾角,对比本系统输出的角度和标准测试角度,具体结果如表 4 所示。

表 4 倾角测试结果对比
Tab.4 Inclination angle comparison

位置	标准测试角度/(°)	本系统测试角度/(°)
1	0.00	0.00
2	5.00	5.01
3	10.00	9.99
4	15.00	14.99
5	20.00	20.01
6	30.00	30.01
7	45.00	44.98
8	60.00	60.03
9	75.00	75.02
10	90.00	90.01
11	-2.00	-2.00
12	-5.00	-4.99
13	-10.00	-10.01

续表

位置	标准测试角度/(°)	本系统测试角度/(°)
14	-15.00	-14.99
15	-20.00	-20.01
16	-30.00	-30.02
17	-45.00	-45.02
18	-60.00	-59.98
19	-75.00	-74.97
20	-90.00	-90.02

由表 4 可见,在标准的-90°到 90°范围内,本系统中传感器倾角的误差精度均小于 0.1°,不仅

满足危房标准中“倾斜度精度低于 0.3°”的要求,并且误差精度更小,有利于通过数据的长期积累,实现对房屋状态的精准分析和预判。

为测试系统通信的可靠性,将数据采集、接收节点放在距离不同、干扰不同和障碍物不同的空间测试,nRF24L01 的数据传输率为 1 Mbps。节点每 1 s 发送一次采集数据包,干扰信号来源于对 Wi-Fi 和 4G 手机的不间断使用,障碍物是建筑物的墙壁,记录 5 min 内收到的数据包,根据公式(16),可以得到表 5 的数据采集率统计表。

$$\text{数据采集率} = \frac{\text{采集到的数据包数}}{\text{发送的数据包总数}} \times 100\%$$

(16)

表 5 不同情况下数据采集率统计表
Tab.5 Statistics of data collection rate under different circumstances

通信距离/ m	无障碍且无干扰 采集率/%	一堵墙且无干扰 采集率/%	无障碍且有干扰 采集率/%	一堵墙且有干扰 采集率/%
5	100.00	100.00	100.00	100.00
10	100.00	96.67	99.45	96.33
20	99.00	92.00	98.89	91.67

由表 5 可见,不同情况下,5 m 内的数据采集率均为 100%,无丢包;10 m 内的数据采集率最差为 96.33%。丢包数随着通信距离的增长而增加。一般一户房屋内的最大直线距离在 10 m 以内,因此能满足实际通信需求。

为测试房屋状态监测节点的功耗,采用 1 节 3 400 mA·h 的锂电池进行供电,为了快速得到统计结果,将 5 个相同的监测节点并联取电,每 1 s 采集传输一次数据,测试得到电池约在 75 h 后

耗尽电量。按照上述测试结果,采用 1 节 3 400 mA·h 的锂电池对 1 个节点供电,节点每 1 h 采集传输一次数据,则可以工作 22 500 h,即 2.57 a,也能够满足系统的功耗要求。

系统通过远程采集危房信息,综合展示房屋各关键支柱、梁、墙的信息、倾角实时变化的曲线。通过历史数据,得到某房屋所有支柱节点倾角的变化曲线,如图 5。房屋支柱的倾角变化如表 6 所示。

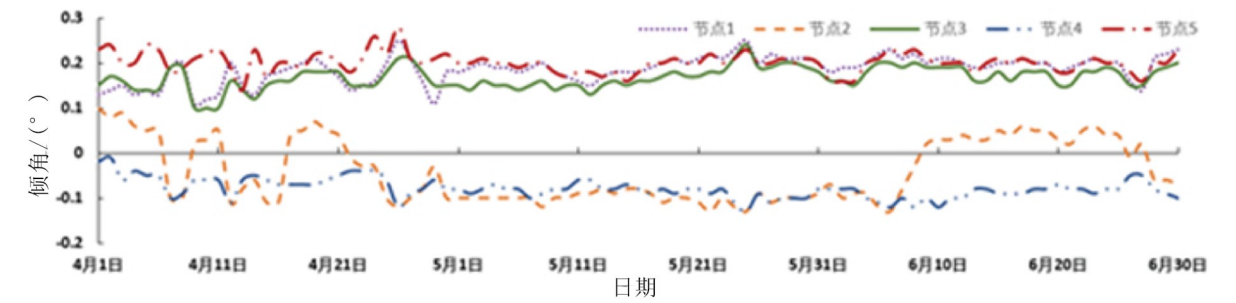


图 5 危房监测系统曲线图
Fig.5 Diagram of dangerous building monitoring system

从图 5、表 6 可以清晰的看出房屋中每个支柱一段时间内的数据变化情况。从倾角数值和倾角变化两个维度,将数据分为 3 个级别分析,就能形成对房屋状态的三级二维预警。对倾角数值划分为 3 个级别,当单次倾角值小于 0.2° 时,支柱状态健康;当单次倾角值在 0.2° 到 0.3° 之间时,提示轻度风险;当单次倾角值超出 0.3° 时,进行报警。同时,对支柱倾角的变化程度进行监测,监测等级也分为 3 级,当倾角变化值在 0.1° 以内时,支柱目前状态健康;当倾角变化值在 0.1° 和 0.2° 之间时,提示轻度风险;当倾角变化值超出 0.2° 时,进行报警。实际上,结合房屋状态数据及周边建设情况和天气情况,就能有效预测房屋状态。

表 6 房屋支柱的倾角变化表
Tab.6 Inclination changes of house pillars

节点	日变化倾角/($^{\circ}$)	月变化倾角/($^{\circ}$)
1	0.13	0.14
2	0.11	0.15
3	0.11	0.12
4	0.08	0.08
5	0.09	0.09

参考文献:

[1] 王晓东,樊静. 精细化管理的房屋安全在线监测系统的设计与实现[J]. 测绘通报, 2019(1):144-148.

[2] 陈利展. 农村危旧房屋专业化动态监测模式探索:以慈溪市农房专业化动态监测工作为例[J]. 住宅科技, 2020, 40(8):73-75.

[3] 于雪飞. 危房动态监测管理探析[J]. 科学技术创新, 2018(30):123-124.

[4] 李超. 无人机航拍技术在隆德县危房危窑改造恢复农用地现状监测调查中的应用[J]. 南方农业, 2017, 11(27):112-113, 115.

[5] 魏世玉,江君. 危房智能监测传感系统研发[J]. 中国设备工程, 2017(14):198-199.

[6] KUMAR A, SINGH A, KUMAR A, et al. Sensing technologies for monitoring intelligent buildings:a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(12):4847-4860.

[7] MUSTAPHA S, NG C T, LU Y, et al. Sensor networks for structural health monitoring[J]. Journal of Sensors, 2020, 2020:1-2.

[8] NOEL A B, ABDAOUI A, ELFOULY T, et al. Structural health monitoring using wireless sensor networks:a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3):1403-1423.

[9] 孙保群,王琼. 基于 nRF2401 软件跳频协议的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2012, 38(5):46-48, 51.

[10] 王小春. MEMS 微惯性航姿系统的优化设计与集成技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.

6 结语

本设计将无线传感网、微机电传感器等技术引入危房监控领域,通过对关键梁、柱、墙节点的监测,实现了对整个房屋的监测,监测的倾角误差精度低于 0.1° ,为利用人工智能算法做出精准预判奠定基础。本设计具有“低功耗”和“智能化”的显著特色。“低功耗”主要体现在两个方面:(1)采用新一代传感器博世 BMA253,利用加速度测量倾角,并采用微控制器实时控制,使该传感器工作在“正常模式”、“深度暂停模式”等模式之间实时切换,有效降低能耗;(2)采用低功率传输技术,优化路由算法,利用低功耗射频芯片,有效提高系统的生命周期。“智能化”也体现在两个方面:(1)危房数据采集智能化,摒弃以往人工采集的不准确性和非实时性,采用三轴加速度传感器远程实时采集,改进传感器标定算法,使倾角误差精度低于 0.1° ;(2)采集端发现异常数据及时报警,上位机利用云平台对海量数据进行分类存储,生成按日、按月的房屋状态曲线,实现了对房屋状态的监测。

(责任编辑:方素华)