

基于 WSN 的道路积水监控系统的设计与实现

苗红霞, 文禹鸿, 白宏熙

(河海大学 物联网工程学院, 江苏 常州 213022)

摘要: 强降雨及城市排水系统的老化, 使得城市道路低洼处积水严重, 对市民人身安全、财产、路基、城市交通产生不容忽视的影响; 针对该问题, 采用无线传感器/执行器网络 (WSAN) 技术, 设计了道路积水监控系统; 该系统分为传感/执行层、网络层和应用层三层; 传感/执行层的传感器节点使用超声波传感器采集积水信息, 执行器节点使用执行器水泵进行排水; 网络层网关及汇聚节点使用 ZigBee 网络和 GPRS 网络相结合来实现传感/执行层与应用层之间的数据双向传输; 应用层服务器储存采集的道路积水信息, 调用百度地图 API 将实时信息显示在 web 端, 并通过网络层发送指令控制积水区域内的执行器水泵动作, 实现闭环控制; 该系统能够简洁有效地实现道路积水信息的实时共享, 可以实现及时排水, 具有实际的应用价值。

关键词: 积水监控; GPRS; ZigBee; 无线传感器/执行器网络

Design and Implementation of Road Waterlogging Monitoring System Based on WSN

Miao Hongxia, Wen Yuhong, Bai Hongxi

(College of IOT Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Heavy rainfall and aging urban drainage system make the low-lying road waterlogged seriously and have an important effect on the safety and property of citizens, roadbed and urban traffic. In order to solve this problem, the wireless sensor / actuator network (WSAN) technology is used to design a monitoring system. The system is divided into three layers: sensor / actuator layer, network layer and application layer. Ultrasonic sensors are deployed to collect the information of water level in sensor nodes of sensor / actuator layer, actuator pump is used to drain away the water in actuator nodes of sensor / actuator layer. The ZigBee network and GPRS network are configured for two-way data transmission between sensor / actuator layer and application layer in the gateway and sink node of network layer. The server of application layer stores the information of road waterlogging, calls Baidu map API to display the real-time information on the web, and sends commands to achieve closed-loop control by controlling the actuator pump in the road waterlogging area action through the network layer. The system not only shares the real-time information of the road waterlogging simply and effectively, but also realizes the timely drainage. So it has practical application value.

Keywords: water monitoring; GPRS; ZigBee; wireless sensor/actuator networks

0 引言

近年来, 强降雨以及城市排水系统的老化使得城市低洼路段、凹式立交桥、隧道处积水严重, 对人身安全、财产、路基、城市交通产生不容忽视的影响。以北京为例, 12 年特大洪涝灾害, 7 段道路交通中断, 27 个立交桥积水, 主要积水道路 63 处, 积水 30 公分以上路段 30 处, 路面塌方 31 处, 大量车辆因路面积水熄火, 全市 79 人遇难, 160.2 万人受灾, 造成严重的显性与隐性经济损失^[1]。因此, 急需寻找有效的解决办法, 将城市积水内涝带来的灾害降到最低。

现有的解决办法主要分为两个方面: 一方面是积极修建并管理好城市排水设施, 另一方面要加快城市道路(涵洞)积水监控系统等非工程性措施的建设 and 应用。

随着智慧城市的提出, 政府、研究机构和企业都在设计和开发城市道路积水监控系统上取得了积极的进展。目前, 基于超声波、射频波、压力变送等技术开发的积水深度测量系统可实现低功耗、高精度地采集道路积水信息^[2-4]; 基于无线传感

网 (WSN) 技术、云服务器开发的道路积水监测系统打破了仅市政人员可获得积水信息的状况, 实现了道路积水信息的采集和共享^[5-10], 但这些系统没有加入执行器水泵, 没有通过网络反馈控制执行器水泵动作, 无法实现闭环控制。目前, 也有部分控制执行器水泵动作, 实现水位闭环控制的系统^[11-12], 但其只能实现在线或短距离内控制, 只应用于工业生产、供水系统等领域中, 在需要远距离控制的道路积水监控系统中尚未应用。而无线传感器/执行器网络 (WSAN) 不仅可以实现数据的采集及远距离传输, 而且可以实现远距离通过网络反馈控制执行器, 实现闭环控制。但是该技术只在农场、牧场及智能家居等领域中广泛应用^[13-16], 尚未应用于道路积水监控系统。

本文采用 WSN 技术, 使用超声波传感器采集道路积水深度, 执行器水泵排水, ZigBee 网络和 GPRS 网络相结合的方式传输积水信息及指令, 服务器储存积水信息, 调用百度地图 API 在 Web 端实时显示信息, 并通过控制积水区域内的执行器水泵动作, 完成了道路积水信息的实时共享, 及时排走了积水, 实现了闭环控制。

1 系统整体设计

本系统结构如图 1 所示, 包括了传感/执行层、网络层、应用层三层。传感/执行层由若干传感器节点和一个执行器节

收稿日期: 2017-05-08; 修回日期: 2017-05-23。

基金项目: 江苏省常州市科技支撑计划(工业)(CE20160068)。

作者简介: 苗红霞(1968-), 女, 河北邯郸人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事人工智能与工业大数据应用方向的研究

点组成, 其中传感器节点以超声波传感器为基础, 并结合温度传感器修正声速, 精确测量道路积水深度, 执行器节点使用脉冲宽度调制 (PWM) 技术控制直流水泵的流速。网络层由网关及汇聚节点构成, 网关及汇聚节点将该区域内传感器节点发来的积水信息进行融合, 并将该区域积水信息发送到软件服务器, 同时将软件服务器发送的指令转发给执行器节点。应用层由数据库、软件服务器组成, 数据库用于储存道路积水信息, 软件服务器接收到网络层发送的积水信息后转存到数据库中, 调用百度地图 API 将实时积水信息显示在 Web 端, 同时软件服务器通过处理道路积水信息, 将控制积水区域内水泵工作的指令发送给网络层, 实现闭环控制。

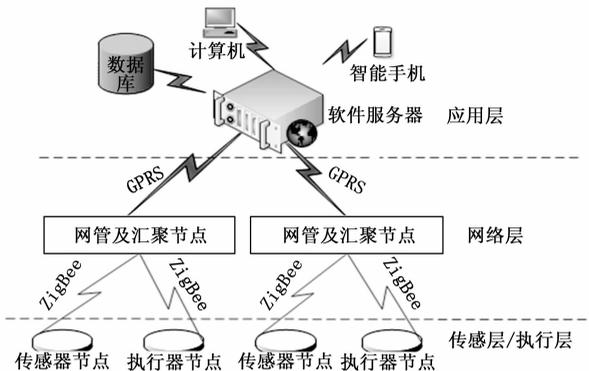


图 1 系统结构图

2 传感/执行层设计及实现

2.1 传感器节点设计及实现

在本实验装置中, 传感器节点硬件组成结构如图 2 所示, 包括了片上系统 (SOC)、超声波测距传感器、温度传感器和电池组。

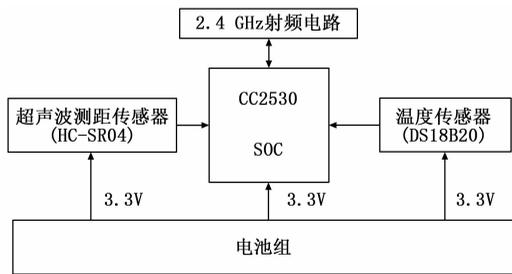


图 2 传感器节点硬件组成框图

片上系统使用 CC2530, 用于为传感器节点加入一个 ZigBee 网络, 并通过 ZigBee 网络将积水数据发送至汇聚节点。其供电模式下电流低至 $0.4 \mu\text{A}$, 可使用 ZigBee 兼容解决方案的 Z-Stack 软件, 有极高的接收灵敏度和抗干扰性能。

超声波测距传感器使用 HC-SR04+传感器, 用于采集超声波测距传感器至水面的距离, 从而计算出积水的深度。HC-SR04 探测距离为 $2\sim 450\text{ cm}$, 测量精度可达 0.3 cm 。

温度传感器使用 DS18B20 传感器, 用于环境温度的测量, 并对超声波在空气中的传播速度进行修正。DS18B20 测量温度范围为 $-55\sim +125\text{ }^\circ\text{C}$, 在 $-10\sim +85\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 精度为 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

电池组使用串联的 3 节 1.5 V 的干电池, 用于为传感器节点各模块提供能量。电池组的电压经过 AMS1117-3.3 稳压芯片稳压后, 为 HC-SR04、MCU 及 DS18B20 提供 3.3 V 电压。

传感器节点通过温度补偿来精确地计算出水位高度, 其软件流程如图 3 所示。首先程序开始后加入汇聚节点创建的 ZigBee 网络, 并读取 DS18B20 温度传感器采集到的摄氏温度 θ 。然后根据公式 (1) 计算出超声波在空气中的声速, 式中 v 为超声波在空气中的声速。再根据超声波传感器 Echo 回波引脚高电平的持续时间 t , 使用公式 (2) 计算出超声波模块到水面的距离 S , 然后利用公式 (3) 计算出积水深度 H , 式中 L 为超声波测距传感器距路面的高度。若采样次数达 5 次, 则将积水深度的中位值发送出去。

$$v = 331.45 \sqrt{1 + \frac{\theta}{273.15}} \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{2} vt \quad (2)$$

$$H = L - S \quad (3)$$

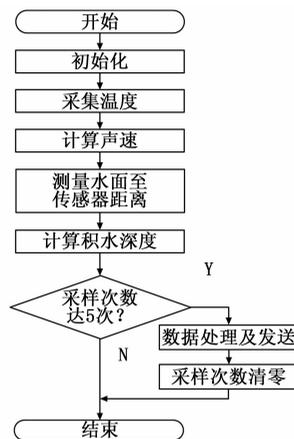


图 3 传感器节点积水信息采集的软件流程图

2.2 执行器节点设计及实现

在本实验装置中, 执行器节点硬件组成结构如图 4 所示, 包括了片上系统 (SOC)、紧急按钮、水泵驱动模块、执行器水泵、电池组和电源。

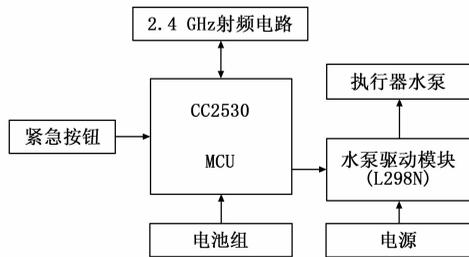


图 4 执行器节点硬件组成框图

1) 片上系统、电池组与传感器节点相同。执行器水泵使用 R385 直流隔膜泵, 用于将积水排到河道或蓄水池中。该水泵最大扬程 5 m , 工作进水压力 0.3 Mpa 。

2) 紧急按钮用于当监控系统出现故障时, 紧急启动水泵抽水。

3) 水泵驱动模块使用 L298N, 用于水泵的驱动。L298N 工作方式为 H 桥驱动, 驱动电流高达 2 A 。

4) 电源使用线性开关电源, 用于为水泵提供长久的能量。该电源能将 220 V 交流电变换成供水泵使用的 12 V 直流电。

5) 执行器节点根据指令改变 PWM 输出的占空比, 实现水泵流速的控制, 其软件流程如图 5 所示。首先, 加入汇聚节点创建的 ZigBee 网络。若紧急按钮按下, 则将 PWM 输出的占空比改为 100%, 使水泵全速抽水; 否则判断是否接收到指令, 若接收到指令, 改变 PWM 输出的占空比, 继而改变水泵的流速, 实现控制水泵的目的。

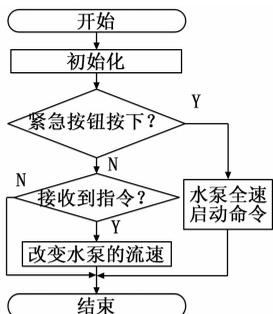


图 5 执行器节点水泵执行的软件流程图

3 网络层设计及实现

在本实验装置中, 网关及汇聚节点的硬件组成结构如图 6 所示, 包括微控制器 (MCU)、ZigBee 模块、现场显示屏、GSM 模块和电源。

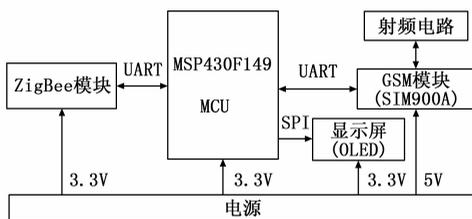


图 6 汇聚节点硬件组成框图

微控制器使用 MSP430F149 单片机, 用于 ZigBee 网络和 GPRS 网络之间数据及指令的交换以及积水信息的融合及暂时储存。该单片机使用 16 位精简指令集, 命令周期 125 ns, 五级节电模式, 掉电模式电流低至 0.1 μA, 且拥有两个 USART 单元, 60 KB flash。

ZigBee 模块, 用于网关及汇聚节点与传感器节点或执行器节点之间通信, 将传感器节点传来的数据发送给 MCU, 并将 MCU 发送的指令传给执行器节点。ZigBee 模块是一个适应 2.4 GHz IEEE 802.15.4 的无线收发器, 拥有两个 USART 单元, 8 KB RAM。ZigBee 模块与 MCU 之间使用 UART 通信协议通信, 该协议参数为: 波特率 115 200, 停止位 1 位, 数据位 8 位, 无奇偶校验。

现场显示屏使用 OLED 显示屏, 用于现场积水深度的显示。OLED 显示屏具有对比度高, 视角广, 反应速度快, 不用实时刷新等优势。OLED 显示屏与 MCU 使用 SPI 通信协议通信。

GSM 模块使用 SIM900A, 用于借助 GPRS 网络与远端服务器实现通信, 可以将 MCU 的数据上传至服务器, 同时将服务器的执行指令下传给 MCU。SIM900A 通过 AT 命令控制, 嵌入 TCP/UDP 协议, 支持 FTP/HTTP 协议。SIM900A 与 MCU 使用 UART 通信协议通信, 该协议参数为: 波特率 115 200, 停止位 1 位, 数据位 8 位, 无奇偶校验。

电源使用开关电源, 用于为网关及汇聚节点各模块提供长

久的能量。该电源能将 220 V 交流电转换成 3.3 V、5 V 两路直流电, 其中 3.3 V 供 ZigBee 模块、MCU 及显示屏使用, 5 V 供 GSM 模块使用。

网关及汇聚节点通过配置 ZigBee 网络与 GPRS 网络, 实现传感器节点、执行器节点与服务器之间数据及指令的传输, 其软件流程如图 7 所示。首先创建一个 ZigBee 网络, 等待传感器节点和执行器节点加入, 创建一个 GPRS 场景, 初始化 HTTP 服务, 并设置 HTTP 会话参数。当任意传感器节点发送数据时, 网关及汇聚节点接收并储存该数据。直到所有传感器节点的数据均接收完毕, 则将与中位值相差 10 的异常数据舍弃, 然后将该区域的设备编号, 采集时间及该区域积水深度组成一个数据包, 利用 HTTP 会话的方式发送至服务器, 并等待接收和转发服务器指令。最后将该区域积水深度及采集时间显示到显示屏上。

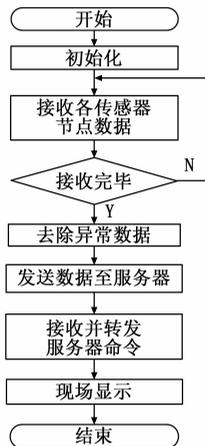


图 7 汇聚节点数据及指令传输的软件流程图

4 应用层设计及实现

应用层系统模块可分为数据预处理、预测模型、数据可视化和数据仓库 4 个模块, 如图 8 所示。服务器系统的处理流程分为数据输入、数据预处理、模型训练、水位预测及数据可视化 5 个步骤如图 9 所示。

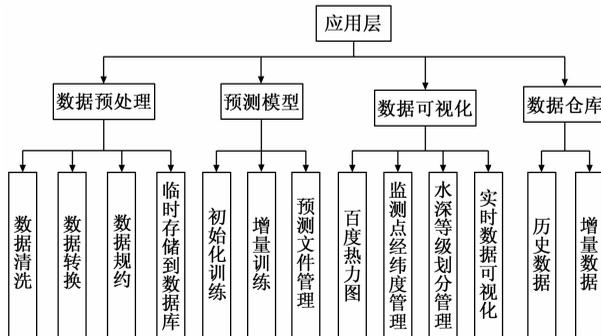


图 8 应用层模块结构图

4.1 数据输入

传感器节点将自己的数据通过 ZigBee 网络传输到网关及汇聚节点, 网关及汇聚节点通过 GPRS 向 Apache 服务器发送数据, 具体数据包为设备编号、数据发送时间及积水深度, 主服务器端接收到数据包后, 将其存储到 MySQL 数据库中。

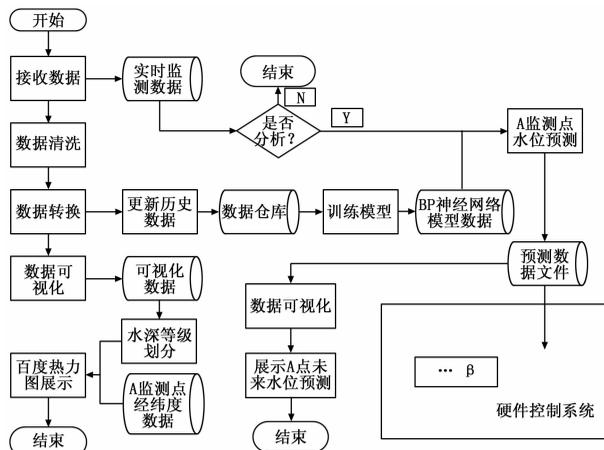


图 9 服务器数据处理流程图

4.2 数据预处理

数据预处理中, 即是对数据的清洗、转换、规约等操作。Apache 服务器对接收到的由于硬件异常、网络传输或服务器异常而产生的缺失、噪声数据进行统一的处理, 同时对数据进行规约和转换, 并将其临时存储到 MySQL 数据库中, 保证系统下一步处理的数据是安全合法的。处理规则如表 1 所示。

表 1 数据预处理规则

对象名称	处理办法	优点
缺失、噪声值	删除	\
属性冗余	皮尔逊相关系数	检测属性相关性, 减小运算量
规范化	数据按比例缩放, 使之落入一个特定的较小的区间	赋予属性相等的权重, 加快 BP 神经网络的学习速度

4.3 模型训练

在水位数据的预测流程中, 预测工具采用 RapidMiner JAVA 开源库, 数据仓库的历史数据会提供预测模型初始化的必要数据。使用反向传播算法对网络的权值和偏差进行反复的更新和训练, 使输出的向量与期望向量尽可能地接近, 当满足错误率低于给定的阈值、迭代次数高于阈值或权值收敛任一条件时, 训练终止, 最后保存网络的权值和偏差作为预测水位的离线模型。模型训练包括输入层、隐藏层、输出层三部分。

4.3.1 输入层

输入历史数据中预测水位的训练样本, 每个输入节点都被映射成一个水位相关属性, 模型随机初始化输入节点的权值。

4.3.2 隐藏层

神经网络中的每个神经元都是一个基本的处理单元, 它组合所有的输入, 进行特定的计算, 然后触发一个输出值 (激活)。其中组合函数采用参数可调的 Gaussian 函数, 即:

$$Gau(X; c, e) = \exp(1 - \frac{(x - e)^2}{2e^2}) \quad (4)$$

输出计算函数 (激活函数) 选取斜度可调的 Sigmoid 函数, 即:

$$y = \text{sig}(\text{net}_i; c, \theta) = \frac{1}{1 + \exp[-(\text{net}_i - c)/\theta]} \quad (5)$$

4.3.3 输出层

由给定的输入输出模式 (即网络中当前的相关边的权值)

对隐藏层、输出层各单元组合后进行输出, 并计算输出误差。而隐含神经元的误差是基于下一层中的神经元的误差和相关权值来计算。计算出每个神经元的误差后, 更新网络中的权值。

1) 输出层神经元误差

$$Err_i = O_i(1 - O_i)(T_i - Q_i) \quad (6)$$

其中: Q_i 是输出层神经元 i 的输出, T_i 是基于训练样例的该输出层神经元的实际值。

2) 隐含层神经元误差

$$Err_i = O_i(1 - O_i)\sum_j Err_j W_{ij} \quad (7)$$

其中: Q_i 是隐含层神经元 i 的输出, 该单位有 j 个到下一层的输出, Err_j 是神经元 j 的误差, W_{ij} 是这两个神经元的权值。

3) 权值更新

$$W_{ij} = W_{ij} + l * Err_i * Q_j \quad (8)$$

其中: ij 是学习速度, 其值位于 0~1 的范围内。

4.4 水位预测

系统正式运行时, 数据预处理后的数据会产生一份副本, 数据原件结合经纬度等信息用来实时可视化当前水位情况。副本被用做预测输入, 通过训练完成的 BP 神经网络模型进行水位数据的预测。预测结果通过可视化模块显示在用户界面上, 同时也会进一步指导硬件控制系统进行相应的动作。

4.5 数据可视化

本文所设计的 Web 数据可视化界面如图 10 所示。只有再次添加节点设备时才会触发百度麻点图更新, 否则基准地图一直使用初始化的百度麻点地图。而批次数据采集频率范围可从一分钟到十分钟, 具体数值不定, 根据实际需求进行调整, 也可以手动请求更新, 程序默认为五分钟。基本实时数据的显示, 采用 Weka 数据可视化工具, 并结合系统给定的水深等级表和百度经纬度逆解析 API 进行颜色深度的选取和描点绘图, 在地图上构建实时水位数据麻点图。



图 10 Web 界面图

5 结束语

基于 WSA 设计的道路积水监控系统, 通过在传感/执行层传感器部署传感器节点采集积水信息, 并放置执行器节点排水, 网络层采用 ZigBee 网络和 GPRS 网络相结合的方式传输积水信息及指令, 应用层服务器储存积水信息, 调用百度地图 API 在 Web 端实时显示信息, 并控制积水区域内的执行器水泵动作。该系统实现了车辆行人可通过 web 查看道路积水实时信息, 选择合适的道路避开积水, 保护自己的人身财产安

全；同时实现了云端数据处理后再返回现场执行的控制，可及时将道路积水排走。在后续工作中，可以将道路积水数据用于控制红绿灯等交通控制系统，主动地引导车辆及行人避开道路积水严重地段。

参考文献：

[1] 姜玲, 邱志德. 城市洪涝灾害的间接经济损失评估——以北京市为例 [J]. 现代城市研究, 2014, (7): 6-13.
 [2] 孙婧. 基于改进 LEACH 算法的路面积水深度测量系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (4): 1297-1299.
 [3] 黄志武, 王曙霞. 基于传感网络的公路积水深度测量系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (2): 352-354.
 [4] 姜世英. 基于 AVR 单片机的道路积水预警系统 [J]. 自动化技术与应用, 2015, 34 (9): 40-43, 51.
 [5] 邵鹏飞, 赵燕伟, 杨明霞, 等. 城市内涝监测预警信息系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (2): 49-52.
 [6] Liu Y, Du M, Jing C, et al. Design and implementation of monitoring and early warning system for urban roads waterlogging [A]. 8th International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture (CCTA) [C]. 2014: 610-615.
 [7] 周汝雁, 白凡, 随宏运, 等. 嵌入式远程城市积水监测系统 [J]. 水利科技与经济, 2013, 19 (4): 109-112.
 [8] 祁霞, 耿博望, 陈艳超, 等. 基于云服务器的城市道路积水监测 (上接第 63 页)

7) 自主加热回路可通过遥控上注指令设定为常开或常关的状态；同时具备将自主加热回路设定为全部使能或全部禁止的功能；

8) 数管切机或者复位后，所有自主加热回路的状态重置到默认状态。

2 经验和建议

通过 SJ-10 卫星的全生命周期在轨飞行，充分验证了卫星所采取的多个系统级自主控制策略是安全可靠的，也同样适用于长期在轨飞行的卫星。SJ-10 卫星自主安全控制策略设计是对航天器自主运行与健康管理工作^[6]的有益尝试和探索。

随着我国航天事业的不断发展，国民经济、国防建设等方面都对航天器提出了新的更高的要求，航天器飞行任务越来越复杂、实时性要求越来越高、在轨寿命越来越长。建议国内航天器自主运行与健康管理工作研究应关注以下几个方面：

1) 航天器自主运行与健康管理工作理论研究：航天器自主运行与健康管理工作理论研究方面应该在充分借鉴国外现有研究的基础上，结合国内航天器研究的实际情况，在技术理论方面进行深入研究，从理论角度解决工程需要问题，指导后续的工程实现和应用。

2) 航天器平台内务自主管理工作研究：航天器平台内务自主管理工作包括能源的自主管理工作、热控的自主管理工作、自主导航与控制、信息自主调度和管理等方面，目前在这些方面已经有一定的基础，但面对未来航天器更高的自主管理工作要求还需要进一步加强研究，提高航天器平台的内务自主管理水平。

3) 自主任务规划：航天器自主运行的一个重要体现就是自主任务规划，自主任务规划技术研究主要研究在没有地面测控系统支援的情况下，根据空间环境、自身飞行状态以及各种约束条件自主规划航天器飞行任务，减小对地面的依赖，提高生存能力。对于在轨航天器，研究如何根据实时环境进行任务自动规划，形成控制策略来控制航天器，以便完成各种任务要求。

系统 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2015, 15 (11): 37-39.
 [9] 孙永尚, 刘扬, 赵军合, 等. 北京市内涝积水监测预警系统设计与实现 [J]. 地理空间信息, 2015 (4): 117-119.
 [10] 夏志川, 钟小建, 阮飞, 等. 城市道路积水多点监测及预警系统设计 [J]. 电子测试, 2013 (5): 56-57.
 [11] 周继裕, 王承亮, 黄楠, 等. 基于超声波的高精度水位控制系统设计 [J]. 现代电子技术, 2014 (10): 116-119.
 [12] 郝迎吉, 高红红, 王燕, 等. 远距离水位智能监控系统的研究与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25 (6): 809-812.
 [13] Li Z, Wang N, Hong T, et al. Closed-loop drip irrigation control using a hybrid wireless sensor and actuator network [J]. Science China Information Sciences, 2011, 54 (3): 577-588.
 [14] Wark T, Crossman C, Hu W, et al. The Design and Evaluation of a Mobile Sensor/Actuator Network for Autonomous Animal Control [A]. 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks [C]. IEEE, 2007: 206-215.
 [15] Suh C, Ko Y B. Design and implementation of intelligent home control systems based on active sensor networks [J]. Transactions on Consumer Electronics IEEE, 2008, 54 (3): 1177-1184.
 [16] Mo L, Xu B, You X, et al. Distributed lighting system based on wireless sensor and actuator networks [J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2013, 20 (1): 21-46.

4) 故障诊断与系统重构技术研究：航天器自主故障诊断与系统重构，主要研究不依赖地面监测卫星的运行参数，对航天器进行实时的健康状态监控，及时发现航天器故障，包括在故障发生时或之前做出及时的反应，对航天器子系统进行重组，或使航天器进入安全模式运行，或平稳降级使用，阻止更大的连续性故障发生，从而提高航天器的安全可靠性和长寿命，保障设备的安全性，降低风险，减少不必要的经济损失。

3 结束语

本文主要针对 SJ-10 卫星系统级自主安全控制策略进行了介绍，卫星系统级自主安全控制的核心目的在于通过实施能源自主安全控制、温度自主控制等策略确保整星安全运行，减少地面人员的干预。

随着航天事业的发展，传统的测控方式越来越受束缚，作为航天器未来发展的一项关键技术，航天器自主运行与健康管理工作技术的实现对于全面提高我国的航天器运行管理水平，克服地面站的不足，降低成本预算，对我国的航天器技术跃上新的台阶具有十分重要的意义^[7]。

参考文献：

[1] 李春华, 倪润立. 中国返回式卫星与空间科学实验 [J]. 空间科学学报, 2009, 29 (1): 124-129.
 [2] 付华圆. 电动汽车蓄电池剩余电量估计算法的研究与实现 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2010.
 [3] 周奇. 铅酸蓄电池能量监测系统的设计 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
 [4] 严加朋. 蓄电池电量计量与管理系统的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
 [5] 胡文瑞. 空间的物理学 [J]. 物理, 2008, 37 (9): 637-642.
 [6] 代树武, 孙辉先. 航天器自主运行技术的进展 [J]. 宇航学报, 2003, 24 (1): 17-22.
 [7] 曹国荣. 航天器在轨自主健康管理技术的研究和应用 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.