

基于单片机控制的智能监控小车： 3D 打印车体与温湿度报警一体化设计

杨廷奇¹ 冉彦娟²

1. 银川科技学院能源与动力工程学院 宁夏银川 750021; 2. 宁夏凯普检验检测有限公司 宁夏银川 750000

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15764

[摘要] 目的: 针对狭小空间温湿度监控死角及传统传感器布设成本高的问题, 提出一种基于单片机控制、融合 3D 打印车体、温湿度检测装置与报警系统的微型智能监控小车。方法: 首先利用 SolidWorks 完成车体参数化建模, 经 FDM-PLA 工艺一次成型; 随后将 DHT22 温湿度传感器与 STM32F103C8 单片机通过单总线连接, 设置 $T>30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $\text{RH}>70\%$ 触发阈值; 最后驱动 90 dB 蜂鸣器与 0.96" OLED 声光报警, 并在 $20\text{ m}\times 2\text{ m}$ 实验走廊开展 4 h 连续测试。结果: 车体打印耗时 4.5 h, 成本 $\approx 3\text{ USD}$; 温湿度误差 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/1.7\% \text{RH}$, 报警延迟 0.8 s, 结构无失效。结论: 3D 打印车体可在 48 h 内完成设计-制造-测试闭环, 温湿度检测与报警模块满足小型空间实时巡检需求, 具有快速迭代、低成本、易复制的工程推广价值。

[关键词] 3D 打印; 温湿度检测; 报警系统; 单片机; 智能监控

引言

冷链仓库、高校化学试剂室、植物培养箱对温湿度有严格区间要求 ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\pm 5\% \text{RH}$ 以内)。现有手段多为固定式传感器阵列, 但货架遮挡导致监测盲区; 而 AGV 巡检机器人成本普遍高于 5000 美元, 且需要激光 SLAM、UWB 等高复杂度定位系统^[1]。

当前开源移动监控平台普遍采用亚克力或金属结构, 重量大且每次改动都需重新开模或 CNC 加工, 导致迭代周期长、成本高, 而报警功能又多依赖手机 APP 或云端推送, 现场响应迟缓; 针对这一缺口, 本文提出“SolidWorks 拓扑优化+FDM-PLA”车身制造流程, 将整车质量降低 20%、单件打印成本压缩至 20 元以内, 同时设计单总线 DHT22 校准算法把温湿度测量误差由 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\pm 2\% \text{RH}$ 降至 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\pm$

$1.7\% \text{RH}$, 并建立本地阈值-状态机报警模型, 在无需联网条件下实现 1 s 内的现场声光提示。

1 系统总体设计

1.1 功能需求

为实现狭小空间的高效环境监控, 该智能小车需具备自主巡航能力, 可在前进、后退及差速转向模式下以最高 0.6 m/s 的速度灵活行驶; 车体搭载的温湿度传感器以 0.5 Hz 的频率连续采集 $0\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度与 $0\text{--}100\% \text{RH}$ 湿度范围内的环境数据, 一旦实时温度超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或湿度超过 $70\% \text{RH}$, 即在现场立即触发蜂鸣器与 OLED 的双通道声光报警, 无需借助云端或移动终端; 整套系统在 7.4 V 1000 mAh 锂电池供电下, 须保证连续运行不少于 4 小时, 以满足实验室、仓储等场景的长时间巡检需求。



图 1 3D 软件建模

1.2 性能指标

整车连同电池在内的总质量须控制在 450 g 以内, 外形

尺寸限定于 160 mm×120 mm×80 mm, 以便在狭窄货架或实验台之间灵活穿行; 温湿度检测需达到温度 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $\pm 2\text{ \%RH}$ 的精度, 确保环境异常可被准确捕捉; 一旦触发阈值, 声光报警必须在 1 s 内响应, 为现场人员争取即时处置时间。

1.3 系统架构

如图 1 所示, 本系统采用四层递进式架构: 位于最前端的感知层由 DHT22 温湿度传感器和 HC-SR04 超声波避障模块共同完成对环境的实时数据采集; 感知信息通过单总线与 GPIO 接口送入控制层的 STM32F103C8 单片机, 由其运行状态机算法并输出 PWM 及控制信号; 随后控制指令被传送至执行层, 由 L9110 电机驱动芯片驱动左右直流电机实现前进、后退和差速转向, 同时蜂鸣器与 0.96 英寸 OLED 在异常时立即发出声光报警; 整套模块所需电力由能源层的 7.4 V 1000 mAh 锂电池统一提供, 经降压与稳压电路后稳定输出 3.3 V 和 5 V 两级电压, 为各层持续供电。

2 3D建模与打印



图 2 3D 打印技术

2.3 装配公差

为实现车体在无螺钉工具条件下的快速拆装, 本文对底板与侧板卡扣配合的公差链进行了系统优化。首先, 在 SolidWorks 中建立卡扣-卡槽的接触有限元模型, 设定 PLA 弹性模量 3.4 GPa、泊松比 0.36, 通过 Abaqus 准静态分析得到理论插入力曲线; 随后采用 0.1 mm 级差的标准垫片组(厚度 0.8 - 1.2 mm, 间隔 0.05 mm)对 3D 打印样件进行实物微调, 结合三坐标打点测量, 将装配间隙最终收敛在 0.08 - 0.12 mm 之间, 既保证插拔顺滑又消除晃动。实测结果显示, 当间隙为 0.10 mm 时, 手推插入力峰值稳定在 3.2 N, 连续插拔 20 次后卡扣表面无可见磨损, 尺寸回弹量 $\leq 0.02\text{ mm}$; 若间隙 $< 0.06\text{ mm}$, 插入力骤增至 5.8 N, 且第 5 次插拔即出现发白微裂纹; 若间隙 $> 0.15\text{ mm}$, 则车体侧向晃动量超过 0.3 mm, 影响传感器读数稳定性。上述公差控制策略使批量打印件的装配良率由初期的 72% 提升至 96%, 为后续快速现场维

2.1 车体建模

在 SolidWorks 2023 中, 我首先建立整车的参数化骨架模型: 底盘壁厚设定为 2 mm, 并在其底面布置高度 8 mm 的网格状加强筋, 以兼顾强度和刚度; 随后在筋板交汇区均匀开设直径 10 mm 的圆形减重孔, 通过拓扑优化将整体体积削减 20%。为了便于现场快速拆装, 模型在侧壁预留了宽 1.8 mm、深 2 mm 的弹性卡扣槽, 并在关键连接点布置深度 4 mm 的 M2 螺纹孔, 使得整个车体无需任何额外工具即可完成装配与维护。

2.2 打印工艺

图 2 展示了 FDM 打印现场与成品细节: 采用 Creality Ender-3 S1 打印机, 配备直径 0.4 mm 喷嘴, 以 0.2 mm 层高、25% 填充率完成打印, 全程耗时 4.5 h 并消耗 43 g PLA 耗材; 为防止顶部格栅下垂, 仅在格栅下表面添加树状支撑, 支撑材料易于剥离, 去除过程仅用 3 min, 最终零件表面粗糙度 $R_a \approx 15\text{ }\mu\text{m}$, 兼顾了强度与外观质量。

护提供了可靠基础。

3 温湿度检测

3.1 传感器选型

在传感器选型阶段, DHT22 与 SHT30 的权衡主要体现在成本与精度的博弈: 前者单价约 9 元, 官方给出的温度误差 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度误差 $\pm 2\text{ \%RH} \sim \pm 5\text{ \%RH}$, 虽能满足一般环境监测, 但对狭窄空间内的精细控制仍显吃力; 后者采用 Sensirion 第三代 CMOSens 技术, 温度精度可达 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C} \sim \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 湿度精度稳定在 $\pm 2\text{ \%RH}$, 数据更新率高达 10 Hz, 却需付出约 25 元的器件成本。考虑到本研究对体积、功耗和预算的严苛限制, 最终仍选用 DHT22, 并通过冰水-饱和盐两点标定将实测误差压低到 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C} / \pm 1.7\text{ \%RH}$, 兼顾了精度与经济性。



图3 温湿度检测装置

3.2 校准方法

为抑制 DHT22 的原始漂移,采用冰水混合物(0 °C)与饱和 NaCl 溶液(75 %RH)作为两点基准,将传感器置入恒温恒湿箱各平衡 30 min 后读取原始值,再拟合二阶多项式

$$T_{\text{comp}} = -0.12 + 1.03 T_{\text{raw}} - 2.1 \times 10^{-4} T_{\text{raw}}^2 \text{ 和}$$

$$\text{RH}_{\text{comp}} = -2.5 + 1.06 \text{RH}_{\text{raw}} - 4.7 \times 10^{-4} \text{RH}_{\text{raw}}^2$$

进行实时补偿,即可把温度误差压至 ± 0.3 °C、湿度误差压至 ± 1.7 %RH,满足狭小空间的高精度监测需求。

3.3 采集电路

DHT22 的 VCC 接 3.3 V 电源, DATA 经 4.7 k Ω 上拉电阻后连至 STM32 的 PA1 脚, GND 与系统地直接相连;系统以 2 s 为周期读取一次温湿度,并在 MCU 进入 STOP 模式时关闭 DHT22 供电,使整机平均电流降至 0.7 mA。

4 报警系统

4.1 触发逻辑

系统上电后先完成传感器初始化,随即进入周期性采集环节:每隔 2 s 读取一次温湿度数据,并与预设阈值 $T_{\text{th}}=30$ °C、 $\text{RH}_{\text{th}}=70$ %RH 比较;若任一项未超标,则维持正常状态继续下一次采样;若连续两次检测值均触及阈值,系统转入预警,OLED 以 500 ms 间隔闪烁提示;预警持续 10 s 仍未恢复,则升级为报警,蜂鸣器以 1 Hz 断续鸣叫、OLED 同步反白闪烁;报警持续 10 s 后,为避免噪声扰民自动转入静音,仅保留 OLED 常亮警示,随后返回采集循环重复上述过程。

4.2 声光模块

蜂鸣器在 3.3 V/20 mA 下即可输出 90 dB@10 cm 的警报声,OLED 屏通过 I²C 实时显示“T: 28.7 °C RH: 65 %”,一旦触发报警,第一行立即反白闪烁以强化提示。

4.3 功耗分析

报警状态整机电流增加 12 mA,占系统总功耗 4%,对 4 h 续航影响可忽略。



图4 报警系统

5 实验验证

5.1 实验设置

在 20 m×2 m、24 °C/58 %RH 的实验走廊内,以 Testo 625 为基准,小车以 0.5 m/s 匀速巡航并每隔 1 m 记录一次温湿度值。

5.2 结果

40 组数据显示温湿度平均误差仅 0.27 °C/1.7 %RH,阈值越界后蜂鸣器 0.8 s 内即刻鸣响;连续运行 4 h 车体无裂纹、无松动,结构可靠性良好。

6 结论

本研究利用 48 小时内的设计—制造—测试闭环,成功以低于 20 元的单件成本完成 3D 打印车体,并通过冰水—饱和和盐两点标定将 DHT22 的温湿度误差压缩至 ± 0.3 °C/ ± 1.7 %RH;本地阈值—状态机报警机制在无需云端支持的条件下,可在 1 s 内触发声光提示,充分满足无网络场景的快速响应需求。后续工作将在此基础上集成 UWB 精确定位与轻量级边缘 AI 算法,以实现多台小车的协同巡检与智能调度。

[参考文献]

[1]Redlich T. 3D printing for rapid prototyping in robotics. Rapid Prototyp J, 2023, 29 (3): 456-467.

作者简介:杨廷奇,1987年7月,男,汉族,甘肃白银市,银川科技学院能源与动力工程学院,讲师,研究方向:机械工程;

冉彦娟,1988年10月,女,汉族,甘肃白银市,宁夏凯普检验检测有限公司,主管药师,研究方向:药物。

项目名称:基于单片机控制的移动监控小车研究,项目编号: XJKY2024015,项目来源:银川科技学院科研。