# 绪论

## 研究目的及意义

随着工业自动化水平的不断提高，流量测量技术在现代工业控制、智能制造以及环境监测等诸多领域中扮演着至关重要的角色。作为工业过程控制的重要参数之一，流量的精准测量不仅直接关系到生产效率和产品质量的稳定性，还对能耗控制和系统安全运行具有重要影响。在石油化工、食品饮料、制药、水处理等领域中，如何以低成本、高精度、强稳定性地实现流量数据的实时采集与标准信号输出，一直是研究与应用的重点方向。

本课题旨在设计并实现一款基于STM32微控制器的简易流量变送器系统，通过集成YF-S401涡轮式液体流量传感器，实现对小流量液体的实时采集与线性化处理，并将测量结果转换为标准的4–20mA模拟信号输出，以便于远距离传输和工业控制系统的集成。该设计同时在本地显示端采用OLED模块进行流量可视化输出，便于现场维护与监测。此外，系统在设计过程中注重硬件的简洁性与电路的实用性，兼顾成本控制和性能优化，力求在资源受限的嵌入式平台上实现较为完整和稳定的变送器功能。

本研究的意义不仅在于提升学生对嵌入式系统应用的理解与实践能力，更在于探索低成本流量变送器在工业现场的可行性方案。当前市场上工业级流量变送器价格较高，且多为封闭产品，难以针对具体应用场景进行定制。本课题所设计的系统具有较强的模块化和开放性，便于后期功能扩展和系统优化，具有较高的推广和应用价值。通过本设计的实施与完善，不仅为中小型工业用户提供了一种可替代的流量检测方案，也为后续研究者在流量测控、信号处理、电流环输出等相关方向提供了可参考的技术路径和工程实践经验。

## 国内外研究现状

### 国外研究进展

在国外，流量变送器的研究与应用起步较早，技术发展已较为成熟。自20世纪中叶起，欧美、日本等工业强国便开始系统研究各类流量测量技术，并在其基础上不断完善流量变送器的功能与性能。随着微电子技术、传感技术和数字通信技术的迅速发展，传统机械式或差压式流量变送器逐渐向电磁式、超声波式、涡街式和质量式等高性能、多功能方向转型。例如，Siemens、Emerson、Yokogawa、Endress+Hauser等国际知名自动化设备制造企业，长期致力于智能流量变送器的研发，其产品具备高精度、高稳定性、多变量测量和远程通讯等功能，广泛应用于石油化工、电力、水处理、医药、食品等高要求行业。

其中，Emerson旗下的Rosemount系列流量变送器具备自校准、自诊断、温压补偿、多变量输出等先进功能，产品支持HART、Foundation Fieldbus、Profibus等多种工业通信协议，能够与主流DCS、PLC系统无缝对接，提高了工业系统的集成效率。Yokogawa公司推出的高精度质量流量变送器可用于微小流量计量场景，常见于生物医药和实验室环境，其测量精度可达±0.1%，远超常规设备。近年来，国外在低功耗传感器、信号冗余设计、动态补偿算法和嵌入式实时控制等方面的研究不断取得突破，使得流量变送器更加智能化、模块化，系统安全性与可靠性大幅提升。

此外，在科研领域，国外高校与研究机构也积极开展基于物联网与边缘计算的流量变送系统研究，将流量测控与数据分析、远程管理、异常预测等功能集成，为构建智能工厂和数字化运维提供了有力支撑。这些研究成果不仅推动了流量变送器产品的升级换代，也为后续发展提供了坚实的技术基础。

### 国内研究进展

我国对流量变送器的研究起步相对较晚，早期主要依赖引进国外技术产品并进行本地化改造。自上世纪90年代以来，随着国家对工业自动化技术的重视和投入的增加，国内高校、科研院所及相关企业陆续开展了流量测控系统和流量变送器的研发，逐步实现从技术引进到自主研发的转变。目前，国内已初步形成以自主设计、产业化制造和系统集成为一体的流量变送器研发体系，产品类型涵盖电磁式、涡街式、质量式、超声波式等主流品种，广泛应用于市政供水、环保监测、食品加工、热力能源等多个行业。

在关键技术方面，国内部分企业与高校针对流量信号的非线性补偿、动态响应优化、数字滤波算法、电流环精度控制等展开了深入研究。例如，部分高校基于STM32、DSP等嵌入式平台开发了智能化流量变送器原型系统，结合数字信号处理与多点标定技术，显著提升了测量精度和抗干扰能力。同时，国内许多中小型仪器制造商在满足一般工业场合需求的基础上，不断优化产品的体积、功耗与成本结构，使流量变送器在中低端市场中具备较强的性价比优势。

尽管如此，国内在核心传感器制造、微功耗电路设计、高可靠性系统集成等方面仍存在明显不足，尤其是在极端工况下的稳定性、高频响应能力以及对复杂流体特性的适应性方面，与国外先进技术尚有一定差距。此外，当前国内大多数流量变送器仍采用模拟或部分数字控制结构，真正具备智能诊断、自学习算法和远程通信能力的产品仍处于初步发展阶段。未来，提升自主知识产权核心部件的研制能力、加强软硬件一体化设计、推动国产高端变送器走向国际市场，将是国内研究的主要方向。

## 本文主要研究的内容

# 系统总体设计方案

# 系统硬件设计

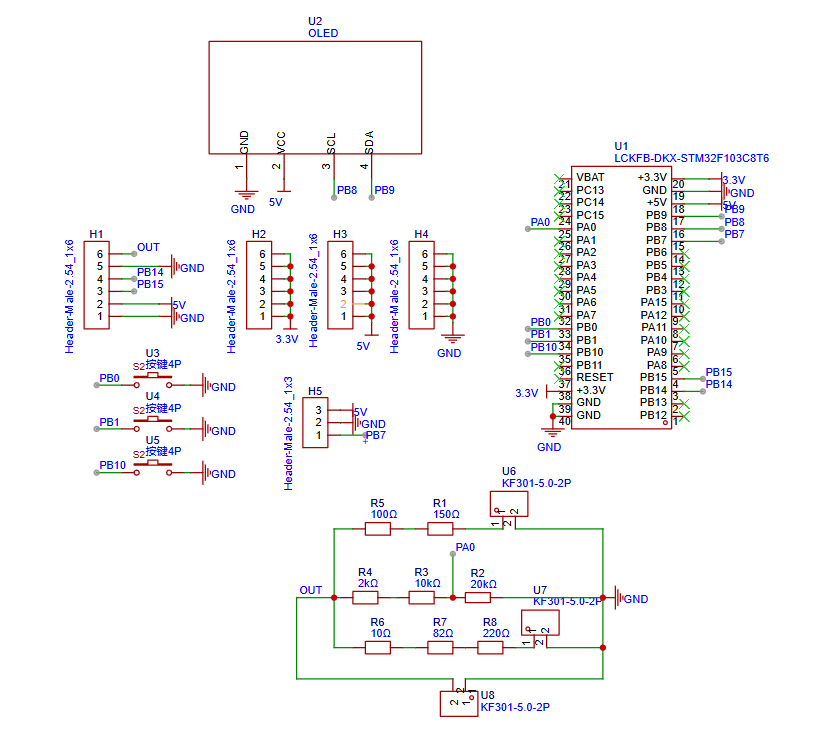
本系统的硬件部分以STM32F103C8T6单片机为核心控制器，配合MCP4725模块、OLED模块、涡轮流量传感器、小型水泵即按键输入模块，共同构建起完整的简易流量变送器平台。各功能模块围绕主控芯片分工明确、相互协作、完整对流量的采集、电压的输出、电流的输出、OLED显示等核心功能，系统硬件结构如图所示。以下是主要硬件模块的详细介绍。

图 3.1 系统总体硬件设计

## STM32最小系统

如图所示，本系统选用的 STM32F103C8T6 单片机基于 ARM Cortex-M3 内核，主频高达 72MHz，片上集成 64KB Flash 和 20KB SRAM，具有较强的运算处理能力和灵活的外设接口资源。该微控制器内部集成多路通用定时器、高精度 12 位 ADC、多通道 PWM 输出、USART、I2C、SPI 通信接口等，能够满足复杂控制系统对数据采集、信号处理及外设通信的多方面需求。

在本课题设计的简易流量变送器系统中，STM32F103C8T6 作为核心控制单元，承担着多项关键任务。首先，STM32通过定时器的输入捕获功能实时读取YF-S401 涡轮式流量传感器输出的脉冲信号，并依据单位时间内的脉冲数计算出当前液体流量值。其次，STM32对采集到的流量数据进行线性映射与数值转换，通过DAC模块输出与之对应的模拟电压信号，并经由外围电路转换为标准 4–20mA 工业电流信号，便于远距离信号传输和标准化输出。

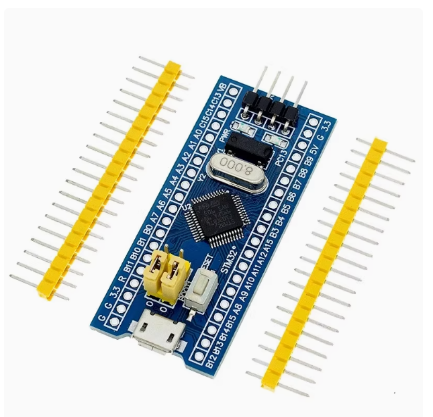
此外，STM32还通过 I2C 总线控制 OLED 显示屏，实现对当前流量、输出电压电流等关键信息的实时本地显示，便于用户直观观察系统运行状态。在系统初始化阶段，STM32完成所有外设的配置与中断注册，并在主循环中持续进行数据更新与逻辑判断，确保系统稳定可靠运行。在后期功能扩展中，STM32亦可通过预留的串口或SPI接口接入无线通信模块、EEPROM等设备，进一步提升系统的功能性与可扩展性。下面开始具体介绍使用STM32F103C8T6单片机构建的最小系统包括的几个核心部分。

图 3.2 STM32最小系统

### 电源电路

如图所示在STM32最小系统中，电源电路是保障系统稳定运行的基础部分。STM32F103C8T6单片机的核心工作电压为3.3V，典型应用中需提供稳定的3.3V直流电压供其内部逻辑电路、I/O口及片上外设使用。本系统采用常见的LM1117-3.3线性稳压器，将外部输入的5V电压稳定转换为3.3V输出，为STM32核心电路供电。

在电源输入端增加电解电容与贴片瓷片电容分别用于滤除低频和高频干扰，以提高电源稳定性。通过合理布线和地线隔离设计，避免因电源波动引起系统工作异常。同时，为方便上位机调试与供电，该系统设计了USB供电口，可直接通过电脑供电调试，简化了外部供电设计。

### 时钟电路

图 3.3 电源模块设计

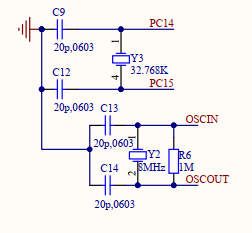
时钟电路是STM32最小系统中提供主控芯片运行节奏与外设时序控制的关键部分。STM32F103C8T6支持内部8MHz RC振荡器、外部晶振以及32.768kHz低速时钟源。如图所示在本系统中，为了提升运行的准确性与稳定性，采用一颗8MHz的有源晶振作为外部高速时钟源，并通过片上PLL倍频至72MHz，为主系统提供高频系统时钟。

图 3.4 时钟电路

### 复位电路

STM32最小系统中的复位电路主要由一个复位按钮、上拉电阻及去耦电容构成。NRST引脚通过按钮接地实现手动复位功能，用于系统调试和错误状态下的快速恢复；其上拉电阻确保系统上电初始状态为高电平，避免误触发复位。电图示, 示意图

AI 生成的内容可能不正确。容则用于滤除上电抖动，防止电压变化引起非预期复位。

图 3.5 复位电路

### 启动配置电路

表格

AI 生成的内容可能不正确。启动模式配置由BOOT0引脚控制。该引脚通过跳线帽或电阻拉高/拉低，实现从用户Flash、系统Bootloader或SRAM启动的模式切换。如图所示在本系统中，默认将BOOT0拉低，系统上电后从用户Flash区启动，确保正常执行已烧录的程序。在程序下载阶段，可临时拉高BOOT0，通过内置Bootloader从串口进行程序烧录，增强了系统的灵活性与可维护性。

图 3.6 BOOT启动电路

### 调试接口

调试与通信接口是嵌入式开发过程中不可或缺的组成部分。如图所示在STM32最小系统中，调试接口主要采用ST-Link所支持的SWD（Serial Wire Debug）两线调试方式。SWD仅需两根信号线（SWDIO、SWCLK）即可实现对芯片的在线烧录与断点调试，具有引脚占用少、效率高的优点。

## 图示 AI 生成的内容可能不正确。DAC数模转换模块

图 3.7 调试接口

在简易流量变送器系统中，为实现液体流量信号向标准模拟量输出（0–5V）之间的线性映射转换，需要将STM32内部处理后的数字量转换为相应的模拟电压信号。由于STM32F103C8T6本身不具备内部DAC（数模转换）模块，因此本系统引入了外部DAC模块——MCP4725，以实现精确、稳定的模拟电压输出功能。如图所示。

MCP4725是一款由Microchip公司推出的12位分辨率I²C接口DAC模块，具有体积小巧、输出电压稳定、支持EEPROM写入等特点。该芯片支持通过I²C总线与主控芯片进行通信，最多可提供4096级模拟输出分辨率，输出电压范围从GND至VCC（一般为3.3V或5V），输出精度高、噪声低，能够很好地满足工业模拟信号输出的需求。

在本设计中，STM32通过I²C接口向MCP4725写入计算后的数字量，该模块随即将数字值转换为模拟电压信号输出。实现液体流量向工业标准电流信号的映射输出。该信号可以稳定传输至远端上位机或PLC系统，实现远程监控与控制。

MCP4725模块支持非易失性EEPROM存储功能，允许用户将默认输出值写入芯片内置存储器中，使其在系统断电重启后仍能保留上次的输出状态。这对于需要掉电记忆或初始化状态保持的应用场景具有明显优势。此外，MCP4725模块的供电与逻辑电平支持3.3V，完美兼容STM32F103C8T6的I/O电平，简化了电平转换电路的设计。

图 3.8 DAC数模转换模块

## 涡轮流量传感器

在本设计的简易流量变送器系统中，流量检测作为整个信号链路的起点，对于系统的精度与稳定性具有至关重要的意义。为实现对液体流量的实时采集与后续转换，本系统选用了YF-S401涡轮流量传感器作为主要检测器件。如图所示。

YF-S401是一款基于霍尔效应原理的涡轮式流量传感器，内部结构主要包括叶轮组件、霍尔元件以及导流塑料壳体。当液体流经传感器内部时，会带动叶轮旋转，叶轮中嵌入的磁体在转动过程中不断触发内部的霍尔传感器，从而在传感器的输出端形成连续的脉冲信号。该信号的频率与流经的液体流速成正比，能够以非接触方式实现流量感知，具备响应快、可靠性高等优点。

YF-S401传感器采用标准6mm外螺纹接口，安装方便，机械强度高，适用于多种小型液体输送系统。在硬件设计中，传感器的工作电压通常为5V，输出为标准的方波信号，兼容STM32F103C8T6的GPIO输入电平，因此可直接连接至微控制器，无需额外电平转换或信号调理电路。

在本系统中，YF-S401连接至STM32的外部中断引脚，配合定时逻辑完成脉冲读取。STM32根据设定的采样周期记录单位时间内接收到的脉冲数量，并据此完成后续的软件计算与流量推导。在数据未被处理前，该脉冲信号本质上是一种数字事件，因此具备良好的抗干扰能力，尤其适合在实际工业与半工业环境中使用。

图 3.9 涡轮流量传感器

## 液晶显示模块

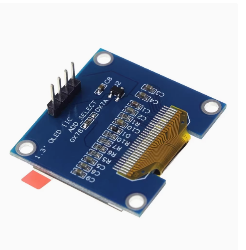
在简易流量变送器系统中，为了实现对液体流量、电压、电流等运行状态的实时可视化显示，提升用户对设备运行情况的直观掌控，系统选用了基于I²C接口的 OLED液晶显示模块 作为人机交互界面。如图所示。

OLED显示技术具有功耗低、对比度高、视角广、响应快等显著优点。相较于传统的LCD液晶屏，OLED无需背光源，具有更薄的结构和更高的显示清晰度，非常适合在嵌入式系统中作为信息输出终端。在本设计中所选用的OLED模块通常为0.96英寸，分辨率为128×64像素，支持图形与文字混合显示，模块内部集成SSD1306显示驱动芯片，支持I²C通信接口，极大简化了硬件接线与软件控制流程。

在实际系统中，OLED模块通过SCL和SDA与STM32F103C8T6微控制器相连，占用GPIO资源极少。STM32通过配置I²C总线并调用对应驱动函数，可实现对OLED显示内容的灵活更新，包括流量值、输出电压、输出电流等关键信息。该显示内容能够实时反映系统当前运行状态，便于用户及时获取设备输出数据并进行必要操作。

此外，OLED模块支持多种字体显示、图形绘制以及动态刷新等功能，为系统界面设计提供了丰富的扩展性。在低光环境下，OLED自发光的特性使其依然具备良好的可读性；而在白天强光下，其高对比度也保证了显示内容的清晰呈现，极大提升了设备的使用体验。

图 3.10 OLED液晶显示模块



## 小型水泵

在本设计的简易流量变送器系统中，为了构建一个稳定、可控的液体循环环境，确保流量检测模块在无外部水源的情况下持续工作，系统选用了一款 12V 直流小型抽水泵作为液体流动驱动装置。如图所示。

该小型抽水泵体积小巧、结构紧凑，采用无刷直流电机作为驱动核心，具有功耗低、噪声小、输出稳定等优点。其泵体材质多为防水工程塑料，耐腐蚀性良好，适用于清水或其他低粘度液体的输送。在运行时，水泵通过旋转内部叶轮对液体施加压力，使液体从进水口吸入并由出水口排出，从而在管道系统中形成稳定的流体通道。

本系统中，水泵的主要作用是推动液体流经YF-S401涡轮流量传感器，实现对液体流速变化的有效检测。由于YF-S401本身为被动型传感器，其流量测量依赖于液体流动产生的机械旋转，因此必须配套水泵等动力装置提供流速驱动。通过水泵的持续运转，能够保证传感器输出稳定的脉冲信号，供后端STM32微控制器进行流量采集与处理。

图 3.11 12V直流水泵

值得一提的是，该水泵顶部集成有一枚手动旋钮，可通过旋转调节进出水流速大小，从而实现对系统整体液体流量的精细控制。如图所示。该功能不仅为系统在不同测试条件下提供了灵活的调节能力，也便于开发阶段对流量范围与系统响应的校准和验证。用户无需改动电路即可直接调整泵速，简化了实验操作，提升了系统的可操作性与灵活性。

## 图示 AI 生成的内容可能不正确。电源模块

图 3.12 水泵旋钮

在简易流量变送器的设计中，为确保各功能模块稳定供电、提升系统的整体可靠性，采用了一块基于 XL2596S 降压芯片的电源模块对系统电源进行调节与分配。如图所示。

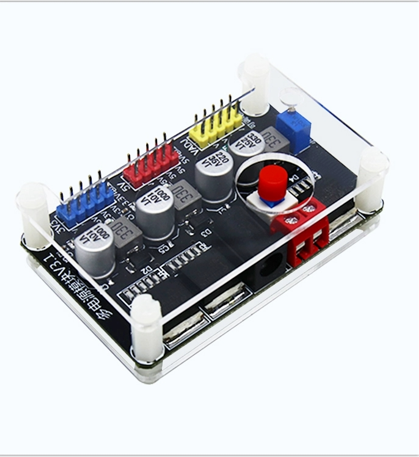
XL2596S 是一款高效、稳定的 DC-DC 降压型电源管理芯片，广泛应用于工业控制、电源适配器、嵌入式设备等场景。其具备输入电压宽、输出电压稳定、负载能力强、效率高达 75%～85%、外围器件少等显著优势。在本系统中，该模块可将外部输入的12V直流电压稳压转换为系统所需的 5V、3.3V 或其他可调电压等级，分别用于 DAC 模块、OLED 显示模块、传感器及其他功能单元的供电。

具体而言，系统中使用的 MCP4725 数模转换模块、涡轮流量传感器等对供电电压要求较高，需稳定的 3.3V 或 5V 电压以保证输出线性度和精度。XL2596S 模块通过精密的反馈控制和PWM调制，能够提供纹波小、响应快的直流电源，有效避免电源干扰对信号处理模块的影响。此外，该模块集成多圈可调电位器，用户可根据不同模块的实际电压需求手动调节输出电压范围，从而为系统提供高度灵活的电源支持。

在硬件结构中，电源模块的输入端通过接线端子或DC头与外部12V电源相连，输出端则通过稳压后的多路引线向系统各功能模块分配所需电压。为提升模块稳定性与安全性，该电源模块还配备有过流保护、过温保护等功能，避免异常条件下损坏核心器件。

该模块体积小巧，输出能力强，适用于本系统对空间和性能均有一定要求的嵌入式设计环境。通过合理规划与布局，电源模块与主控单元STM32、DAC模块、OLED模块等构建起稳定的供电链路，为系统长期稳定运行奠定了坚实基础。

图 3.13 电源模块



# 系统软件设计

## 主控制器

### 面向对象设计模式

### 多线程并发处理

### 配置文件在多模块控制中的应用设计

## 设备类统一接口设计

### LED灯实现方案

### 蜂鸣器实现方案

### OLED屏幕实现方案

## 监听类统一接口设计

### 语音监听接口设计

### 网络监听接口设计

### 烟雾传感器监听接口设计

### 消息队列接听接口设计

### MQTT监听线程接口设计

## 视频监控及人脸识别

### 视频监控方案

### 人脸识别方案

## MQTT通信模块设计

### 设备属性上报机制设计

### 指令下发与消息响应流程

## 安卓APP

### 控制指令下发

### 传感器信息显示

### 视频监控

# 系统测试与分析

## 编译及运行

表 5.1 的方法和

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |

图形用户界面, 应用程序

AI 生成的内容可能不正确。

图 5.1 基于方式方法

### Makefile

### Shell

## 系统测试环境

## 系统功能模块测试与分析

### 模块功能测试

### 总结

# 总结与展望

### 总结

### 展望

# 参考文献

# 致谢

# 附录

# 附录一 程序

# 附录二 元件清单