

# 传感器智能化及电子数据表格更新方式的研究

朱晓博<sup>1</sup>, 马尚昌<sup>1,2</sup>, 张素娟<sup>1,2</sup>, 杨笔锋<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程学院电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

**摘要:** 针对传感器发展现状、特点及应用, 利用 STM32 微控制器与轻量级 TCP/IP 协议栈结合的方式实现了传统传感器的智能化, 并利用在程序中编程技术实现了传感器电子数据表格 TEDS(Transducer Electronic Data Sheets)的在线更新。一方面实现了传统传感器的智能化, 使其能够自动识别、即插即用, 并支持在线更新与升级, 另一方面实现了传感器的网络化, 方便传感器的远程访问与控制。

**关键词:** 信号与信息处理; 气象探测; IEEE 1451 协议; 电子数据表格; 智能传感器; STM32 微控制器

**中图分类号:** TP212.6

**文献标志码:** A

## 0 引言

随着传感器技术的发展, 传感器网络化与智能化成为智能传感器发展的一种趋势, 但由于不同厂商生产传感器的网络接口协议不同使各类传感器没有统一的标准, 增加了用户使用和维护的成本。因此, 为了方便传感器联网, 需要一种通用的传感器网络接口标准, 使不同厂家生产的传感器可以实现较好的通用性, 这也是智能化传感器发展的关键。IEEE 1451 系列标准为传感器的网络化和智能化提供了一种具体通用的框架, 能够使不同厂家生产的传感器之间具有即插即用以及立即联网的功能。

## 1 IEEE 1451 标准简介

IEEE 1451 是一个智能传感器接口的标准族, 定义了一系列为使智能传感器连接到 MCU、仪表系统以及现场控制网络的开放、通用并独立于网络的标准, 提供了一系列基于监测和控制应用的有线或者无线的协议<sup>[1]</sup>。标准将智能传感器分成两个模块, 即智能变送器模块(STIM)以及网络适配器模块(NCAP)<sup>[2]</sup>。STIM 由传感器和微处理器结合而成。充分利用了 MCU 的运算和存储能力, 可对传感器的数据进行处理, 包括对测量信号的调理、自校正以及自补偿等, MCU 是智能变送器的核心。NCAP 是将设备连接到网络上的通信接口装置, NCAP 用于实现对 STIM 的控制, 使其具有连网的功能, 并实现数据存储、处理、以及 TEDS 中规定的校准引擎等功能。在 IEEE 1451 标准族中, IEEE 1451.2 标准规定了一个 10 线的 TH 接口, 用于 STIM 与 NCAP 之间的互连, 对电子数据表格(TEDS)进行了定义, 并给出详细的数据格式, 为传感器方便的应用到多种网络提供了方便, 使传感器能够具有“即插即用”兼容性<sup>[7]</sup>。文中参照的标准主要为 IEEE 1451.2 标准。

TEDS 的设计是整个 IEEE 1451 协议族重要的创新以及精华所在, 能够使传感器同时具有即插即用的兼容性。NCAP 通过与 STIM 之间的数据交互获取 TEDS 的内容, 并通过协议规范实现智能传感器的自动识别, 同时实现对 STIM 的配置以及传感器的即插即用。在 IEEE1451.2 标准中, TEDS 可分为 8 个可寻址的单元部分, 其中前两个 TEDS 即 Meta-TEDS 和 Channel TEDS 是必选且为只读, 其他是可选的<sup>[1]</sup>。TEDS 的具体定义如表 1 所示。

数据校准是传感器数据采集的重要一环, 能够较好地提高传感器测量数据的精度。IEEE 1451.2 标准为传感器数据的校准提供了一种方式, 即在 TEDS 中存储校正系数, 使用校准软件结合校正 TEDS 中的校准参数即可对传感器数据进行校准。Calibration TEDS 中定义的校正引擎就是用特定的数学函数将传感器的数据(可以是来自一个或多个 STIM 或者来自其他途径)融合在一起, 获取多项式系数, 并通过相应的数学公式计算出比较精

确可信的传感器数据。校正引擎既可以在 NCAP 中实现,也可在 STIM 中实现。校正引擎一般采用多项式作为校准函数,若校准函数多项式次数较高,则不利于实现,因此校正引擎使用分段多项式函数。

表 1 IEEE 1451.2 中对 TEDS 的定义及其内容

TEDS 名称	TEDS 包含的内容和功能
Meta-TEDS	描述任一通道所需的所有信息、全部通道的共同信息以及有关 STIM 的总体信息
Channel TEDS	描述各个通道的具体信息,如通道特性等,是每个 STIM 必须的
Calibration TEDS	用于存放通道的校准参数等信息,如校准参数、最后校准日期和校准周期等
Meta-ID TEDS	STIM 的总体信息,如版本号、序列号以及数据代码等
Channel ID TEDS	用来识别各个被赋予地址的通道
Calibration ID TEDS	描述 STIM 中各通道的校准信息
End Users' Application Specific TEDS	用来存放最终用户特定信息
Industry Extension TEDS	TEDS 的扩展

2 智能传感器系统结构与实现

2.1 系统总体结构

系统采用的结构模型是基于 IEEE 1451.2 的智能传感器模型<sup>[3]</sup>。整个系统包括 NCAP 模块、数据接口、以及由各种传感器和相应的 STIM 模块。网络模块 NCAP 通过 TII 接口与 STIM 模块连接,STIM 负责前端传感器、ADC 和信号调理模块的控制和管理,完成数据采集、预处理、特征抽取等功能。每个 STIM 根据不同需要可以挂接一种或多种传感器,配合 TEDS 来实现模块的即插即用。NCAP 通过 TII 接口实现对 STIM 的管理与控制,同时实现网络通信、数据处理、数据校正以及存储等功能<sup>[5]</sup>。TII 模块是基于 IEEE 1451.2 标准的变送器独立接口,该模块是实现 STIM 与 NCAP 之间通信与即插即用的关键。系统结构如图 1 所示。

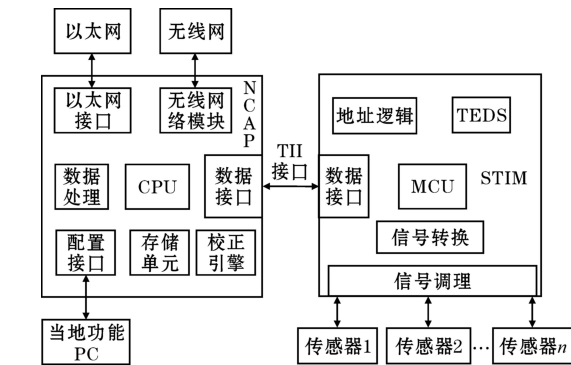


图 1 系统结构模型

2.2 STIM 结构与实现

与传统的 STIM 模块比较,系统中的 STIM 模块能够独立作为一个智能设备工作。在不需要联网和做大数据量存储时,STIM 模块独立使用,此时校准引擎在 STIM 模块实现,并且 STIM 可以挂接各种通信模块实现与终端的通信;在连接 NCAP 后,STIM 将校准引擎以及与终端通信的工作交给 NCAP 实现。

系统中 STIM 模块使用的 MCU 为 STM32。STM 32 是意法半导体基于 ARM Cortex™-M3 的 32 位嵌入式处理器,主频可达 72MHz、90DMips。具有丰富的片内资源以及强大的处理性能,且价格仅与 8 位单片机相当,性价比极高。其内部的 Flash 以及丰富的外设为实现 STIM 的基本功能及扩展功能提供了丰富资源。系统选用的 STM32F103RBT6 具有 128K 的片内 FLASH,20K 的 SRAM,2 个 SPI,3 个串口,2 个 12 位 ADC 以及其余丰富的片内外设,其中片内 FLASH 既能存储较大体积的程序,又能作为存放 TEDS 和通信协议栈的空间,SPI 可用来实现 TII 功能,3 个串口

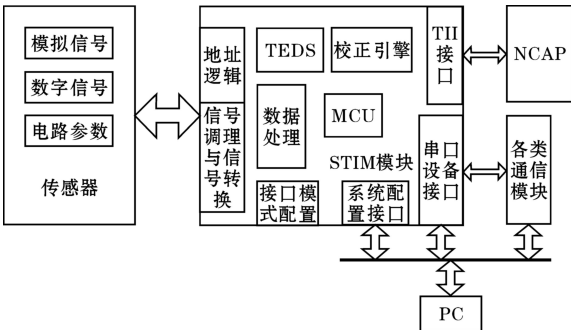


图 2 STIM 模块结构图

使STIM 在实现支持多种传感器信号输入的同时具备挂接各种通信模块的能力。STIM 模块的结构如图 2 所示。

传感器输出信号的差别较大, 比如信号种类、信号幅度、噪声源等各不相同, 因此不同的传感器的接口电路需要进行不同的前端调理。首先确定传感器的信号类型、信号范围、测量精度等参数, 确定传感器接口标准。在设计实现上, 通过硬件电路设计预留各种类型传感器信号的输入接口和 6 路拨码输入用于选择传感器; 然后通过程控开关将不同种类的信号送入不同的内部通道; 利用软件判别和程控增益放大器将不同幅值的信号放大至合适的范围; 通过程序实现对各种传感器数据的高精度采集, 完成各种传感器接口信号调理电路的重构。

2.3 NCAP 结构与实现

系统中 NCAP 采用 STM32+μCosII+LwIP 的方式实现。其中主控芯片选用 STM32 互联型的 STM32F107VCT6, STM32F107 具有 CAN2.0B 以及 USB OTG 等接口, 并增加以太网 10/100 MAC 模块, 支持 MII 和 RMII, 因此, 只需一个外部 PHY 芯片即可实现一个完整的以太网收发器。LwIP 是瑞典计算机科学院的一个开源的轻量级 TCP/IP 协议栈。具有内存使用少和代码体积小等优点, 非常适合用在小型嵌入式系统中。NCAP 模块的结构如图 3 所示。

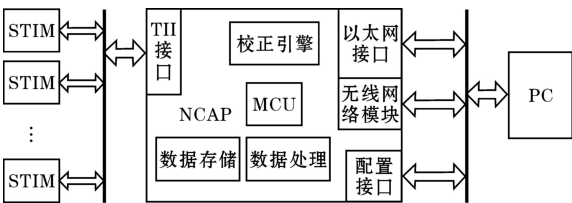


图 3 NCAP 模块结构图

在 NCAP 中需要实现一个 TCP 并发网络服务器<sup>[13]</sup>, 用于远程 PC 终端访问, 计算机可通过向 NCAP 发送控制指令来控制 NCAP 执行相应的功能, 如读取某传感器数据, 历史数据下载, 更新 TEDS 等操作。另外, NCAP 还嵌入了一个 Http Web Server, 远端 PC 可通过网页访问 NCAP 并发送指令。

2.4 TII 接口实现

网络智能化传感器的 STIM 模块和 NCAP 模块之间是相互独立的, 需要一个桥梁连接。IEEE 1451.2 定义了一个 10 线制的物理接口 TII 用于 STIM 与 NCAP 之间的连接和通信, 用于实现二者之间的数据交互、控制信息和状态信息的传递以及时钟同步, NCAP 还通过 TII 给 STIM 模块的接口提供了一个电源<sup>[4]</sup>。表 2 为 TII 接口的物理线路。

表 2 TII 接口物理线路

组	线路	缩写	逻辑	功能
数据	DATE_OUT	DOUT	正逻辑	用于 STIM 模块向 NCAP 模块传送数据
	DATE_IN	DIN	正逻辑	用于 NCAP 向 STIM 传送地址和数据
	DATE_CLOCK	DCLK	正边沿	在正边沿对 DIN 和 DOUT 上的数据进行锁存
触发	N-IN-INABLE	NIOE	低有效	用于激活数据的传送以及分隔数据传送帧
	N-TRIGGER	NTRIG	负边沿	用来执行触发的功能
	POWER	POWER	—	标准 5V 电源
支持	COMMON	COMMON	—	信号公用或地线
	N_ACKNOWLEDGE	NACK	负边沿	用于确认触发或者数据传送
	N_STIM_DETECT	NSDET	低有效	NCAP 模块用来检测 STIM 模块的传送
中断	N-IO-INTERRUPT	NINT	负边沿	STIM 模块用来请求 NCAP 模块的服务

TII 接口以标准 SPI 串行通信方式为基础, 所以具体实现的时候用 STM32 的 SPI 接口配合 IO 口和外部中断来实现。NCAP 通过 TII 给 STIM 提供电源以及一个通用的地线。STIM 具有独立的电源模块, 但是 TII 接口的电源只能由 NCAP 提供, 也就是说 STIM 独立使用时 TII 接口不起作用。STIM 模块 TII 接口程序流程如图 4 所示。

NSDET 用来检测 STIM 是否连接到 NCAP 或从 NCAP 移除。在 STIM 上 NSDET 与地线即 COMMON 脚连接到一起。在 NCAP 上 NSDET 与 POWER 脚接在一起, NCAP 可以读取 NSDET 的状态。在 STIM 刚与

NCAP 的连接时, NSDET 上的信号可能会出现抖动, 需要一些时间稳定。STIM 上电初始化需要一小段时间。当 NSDET 稳定在低电平状态而 NACK 引脚准备好的时候, NCAP 可以通过 NIOE 脚向 STIM 传送数据的信号。当数据传送完成时, NCAP 将 NIOE 拉高, 而 STIM 通过拉高 NACK 回应 NCAP。

2.5 TEDS 内容

系统选用 TEDS 中的 Meta-TEDS、Channel TEDS、Calibration TEDS 以及 Industry Extension TEDS 部分, 其中前 2 个 TEDS 每个传感器都必须具备, Meta-TEDS 用于描述 STIM 的参数和全部通道的共同信息, 如数据结构、通道数等信息; Channel-TEDS 用于规定每个通道的参数, 如单位、量程、校准模型(如果相应通道存在校准 TEDS)等信息; Calibration-TEDS 是否需要视传感器而定, 用来存放校准参数等信息, 如分段数、分段边界、多项式系数等信息, 并可随时供传感器对各个通道的原始数据进行校正运算, 比如温湿度传感器输出信号受环境影响较大, 需要对采集数据进行校准, 则相应通道存在 Calibration-TEDS; Industry Extension TEDS 中存放用户以及设备维护人员需要的一些扩展信息, 如最后维护人员姓名、联系方式、最后维护日期等参数。TEDS 存储在 STM32 片内 Flash 的最后 2K 字节的区域。

3 系统在线升级方式实现

3.1 STM32 的 IAP 简介

IAP 是一种在程序中编程的机制, 可以通过串口、CAN 总线、以太网、Zigbee 等有线或无线的接口对 MCU 内部的程序进行动态更新, 与比较常用的 ICP 与 ISP 技术有很大区别。ICP 在单片机编程中较为常用, 需要机械式地连接下在线, 通过仿真器烧写程序; 而 ISP 技术则是在单片机中内置了一个 bootloader 程序, 开机会先进入 bootloader, 通过程序的引导对单片机进行烧写。ICP 和 ISP 都需要连接下载线等机械式操作, 若产品的外壳没有预留相应接口或安装在狭窄空间, 更新则无法进行。但若引进 IAP 技术, 则完全可以解决上述问题, 还可以实现远程编程和无线编程。STM32 微控制器具有大容量的片内可编程 Flash, 同时具有丰富的外设通信接口, 因此可以方便地实现 IAP 技术。

3.2 IAP 方式实现 TEDS 以及程序的在线更新与升级

既然 IAP 方式可以把程序写到某个地址然后再跳转到该地址执行程序, 那么只要存储空间足够大, 在一片微控制器上可以实现存储多个程序文件并动态在各个程序文件之间跳转, 可以在 Flash 空间内专门预留一片地址作为存储 TEDS 的空间, 其余空间作为程序与数据存储地址。STM32F103RBT6 具有 128K 字节的 Flash, 空间规划如图 5 所示。

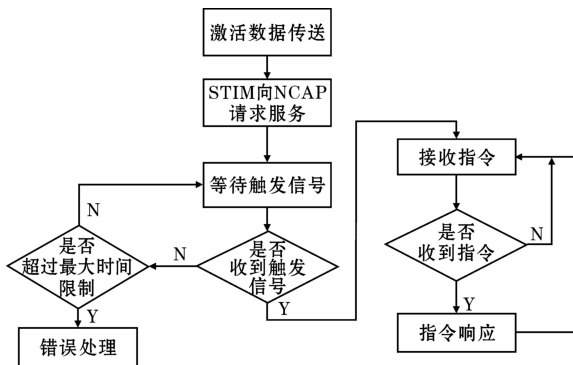


图 4 STIM 模块 TII 接口程序流程图

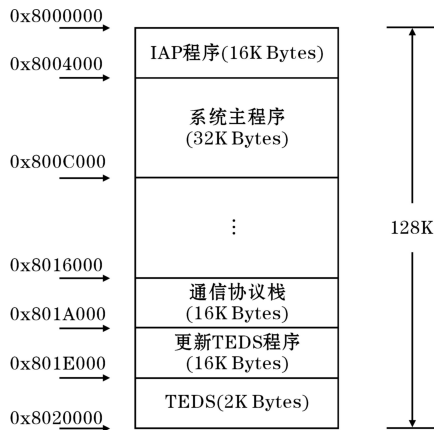


图 5 STM32 内部 Flash 空间规划

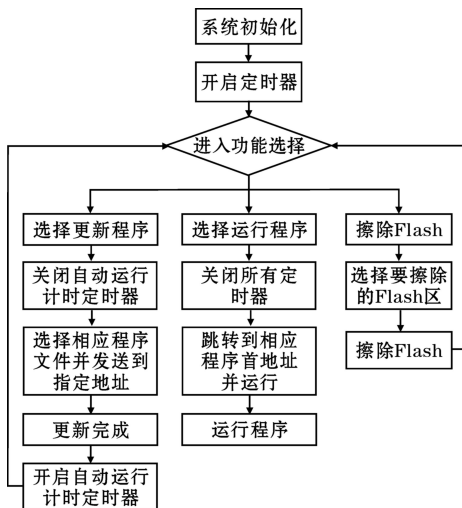


图 6 IAP 程序流程图

IAP 程序是整个系统的引导程序, 系统开机首先运行的是 IAP 程序, 此时若无操作, 则 8 秒后系统自动跳转到系统主程序的起始地址运行主程序, 可以通过输入选项选择需要执行的功能。下载用的程序文件需要“. bin”格式。程序流程图如图 6 所示。

首先系统初始化时钟、终端、USART 以及定时器等外设, 然后开启定时器 2 和定时器 3, 其中定时器 2 主要用于给写 Flash 定时, 定时器 3 用来给自动运行剩余时间计时。功能选择有 3 种类型: 更新程序、运行程序和擦除 Flash。用串口助手测试程序的界面如图 7 所示。



图 7 串口调试助手测试界面

4 系统实验结果

分别采用温度、湿度、风速、风向、气压、雨量传感器接入 STIM 模块测试系统, 其中温度湿度采用一体式温湿度传感器 HMP45D, 风速风向传感器采用模拟传感器信号(风速用频率信号, 风向用 0~2.5V 电压信号), 气压传感器使用 PTB220, 雨量传感器采用模拟传感器信号(外部中断计数)。经系统实测, STIM 与 NCAP 模块能够实现正常的数据交互与指令收发, NCAP 端接收到的数据中经校准后的传感器测量值与计算值相差达到标准要求, 即温度误差 $\leq 0.2^{\circ}\text{C}$ , 湿度误差 $\leq 3\%$ (相对湿度在 80%以下), 湿度误差 $\leq 5\%$ (相对湿度在 80%以上), 风速误差 $\leq 0.5\text{m/s}$ , 风向误差 $\leq 5^{\circ}$ , 气压误差 $\leq 0.3\text{hPa}$ , 雨量误差 $\leq 0.4\text{mm}$ 。系统目前使用的传感器自识别的方式为拨码盘切换, 需要人手动操作, 今后系统需在这个方向有所改进, 提高系统的自适应与自识别能力。

5 结束语

智能化传感器是传感器发展的重要方向, 对标准化的智能传感器的研究具有很强的现实意义, 而 IEEE 1451 标准对智能化传感器的设计提供了一个通用的实现方式。根据传感器应用的现状、特点及发展趋势, 设计一种符合 IEEE1451 标准的智能传感器。该系统集数据采集、数据处理、数据传输、在线更新与自维护功能于一体, 并且能够实现系统的远程升级与管理, 实现传统传感器的网络化、智能化, 具有很强的应用前景。

参考文献:

[1] 李威, 李治, 张颖, 等. IEEE1451 协议中电子数据表格(TEDS)的研究[J]. 人工智能及识别技术, 2008, (5): 334—336.

[2] 罗双胜, 吴仲城, 申飞. 基于 IEEE1451.2 的机器人传感器接口 STIM 的设计[J]. 自动化与仪表, 2008, (3): 37—40.

[3] 李文, 叶湘滨, 杨雪. IEEE1451.2 的智能变送器模块设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2009, (2): 64—67.

(c)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- [4] 崔书平, 杨志家, 吕岩, 等. 传感器接口标准中 NACK 响应协议研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(1): 126—127, 133.
- [5] 吴中杰, 林君, 李治, 等. IEEE1451 标准智能传感器中网络应用处理器的实现[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(6): 85—88.
- [6] 叶晓慧, 张森, 吴媛媛. 基于 IEEE1451 接口的智能网络传感器设计[J]. 电子器件, 2007, 30(5): 1870—1873.
- [7] ISBN 1-55937-963-4, IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats [S].
- [8] Wilfried Elmenreich, Stefan Pitzek. Smart Transducers-Principles, Communications, and Configuration [J]. Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, 2003, (3): 510—515.
- [9] 陈峰, 孙同景, 时延妮. 基于 IEEE 1451 和 TCP/IP 协议智能传感器的研制[J]. 工业控制计算机, 2006, 19(5): 39—40.
- [10] 朱小刚, 范顺治. 基于 IEEE 1451.2 网络化智能传感器的应用研究[J]. 现代电子技术, 2007, 22: 20—22.
- [11] 来庆宇, 巢明, 唐祯安. 基于 IEEE 1451 标准的智能变送器接口电路[J]. 信息与控制, 2006, 35(2): 270—274.
- [12] W. Richard Stevens. TCP/IP 详解——卷2: 实现[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [13] 毛期俭, 杰, 余琦. 基于 TCP/IP 的串口数据流传输的实现[J]. 中国数据通信, 2003, (11): 47—53.
- [14] 殷伦, 王英民. 串口联网技术在远程设备控制中的应用[J]. 电声技术, 2007, 31(12): 34—37.
- [15] 周鹏, 黄灿, 江楠. 串口与网络结合的通信方案的研究[J]. 计算机与网络, 2011, (15): 68—70.

## Research of Intelligent Sensors and Transducer Electronic Data Sheets Online Upgrade Method

ZHU Xiao-bo<sup>1</sup>, MA Shang-chang<sup>1,2</sup>, ZHANG Su-juan<sup>1,2</sup>, YANG Bi-feng<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. CMA. Key Laboratory of Atmospheric Sounding-KLAS, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** According to the characteristics, present situation and application of sensors, this paper gives one implementation of intelligent sensor based on STM32 microcontroller and LWIP, and at the same time a method of using Application Programming technique to realize on-line updating of TEDS. On the one hand, we can implement the intellectualization of traditional sensors, to let them be able to realize automatic identification and support of plug and play as well as on-line updating and upgrading. On the other hand the networking function of sensors can be realized and convenient for the sensors remote access or control.

**Key words:** signal and information processing; meteorological detection; IEEE 1451; TEDS; intelligent sensor, STM 32