

单相电子式电能表短距离无线通信接口设计

黄建业¹, 李双洋², 郭谋发¹, 杨耿杰¹, 高伟¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省南安市电力有限公司, 福建 南安 362300)

摘要: 针对目前电能表大多不提供无线通信接口的问题, 基于 2.4 GHz 无线通信技术设计了单相电子式电能表嵌入式无线通信接口。接口由 nRF2401 芯片和 PIC16F690 及外围电路组成; 采用 DL/T 645 规约, 开放性好, 以中断方式接收电能表数据, 提高 CPU 的利用率。该接口具有体积小、成本低、通信速率快及稳定可靠等特点, 通信距离满足自动抄表的要求。设计上综合考虑了工程中可能存在的问题, 包括通信过程中数据丢失、通信冲突、电能量数据长度超过 nRF2401 配置的收发长度等, 使所设计的接口具有工程应用价值。

关键词: 自动抄表; 单相电能表; 短距离无线通信; nRF2401 芯片; DL/T 645 规约

Design of short-distance wireless communication interface for single-phase electronic watt-hour meter

HUANG Jian-ye¹, LI Shuang-yang², GUO Mou-fa¹, YANG Geng-jie¹, GAO Wei¹

(1. College of Electric Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;
2. Fujian Nanan Electric Power Co., Ltd, Nanan 362300, China)

Abstract: Aiming at the problems of most meters without wireless communication interfaces, an embedded wireless communication interface based on 2.4GHz Wireless Communication Technology is designed for single-phase electronic watt-hour meter in this paper. The interface consists of nRF2401 chip and PIC16F690 and the peripheral circuits. It adopts DL/T 645 protocol which has good openness and receives meters' data by interrupt mode, which raises the utilization rate of CPU. The interface also has some features of small volume, low cost, high communication speed, high stability and reliability, and the communication distance can meet the need of automatic meter reading. Some possible engineering problems are taken into account in design, including data loss in communication, the problems of communication conflict, electricity data length over the data width configured in nRF2401 and so on. It makes the interface designed valuable in practical application.

Key words: automatic meter reading; single-phase electric energy meter; short-distance wireless communication; nRF2401 chip; DL/T 645 protocol

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0172-06

0 引言

随着我国“一户一表”政策的实施及城网、农网改造的完成, 居民电能表的数量急剧增加, 加之分时电价政策的推广, 抄表的数据量将成倍或数倍增加^[1]。传统的抄表收费方式存在许多弊端, 如耗时费力、准确性和一致性不高、管理费用过高等^[2-3], 无法满足用电管理和电网智能化的需求。因此, 实现户表数据的自动抄送具有现实意义。

自动抄表系统中, 采集器与电能表的数据交换功能是评价抄表系统性能的一项重要指标。目前, 采集器与电能表的通信方式有 RS-485 总线、电力线载波通信、红外通信以及短距离无线通信^[4-6]。RS-485 总线抄表方式^[7-8]利用电能表自带的 RS-485 通信接口, 无须扩展通信接口, 成本低廉, 技术成

熟, 但布线工作量较大, 维护成本高。文献[9]采用低压电力线载波通信技术实现电能表数据的抄读, 充分利用现有的配电网线路, 无需布线, 节省了通信网络线路投资。但由于我国电力网污染严重, 使得这一抄表方式难以全面推广。文献[10]基于红外通信技术设计了通信接口并应用于自动抄表。这种通信方式具有直观、操作简便等优点, 但通信距离短、抗干扰性差, 使其实用性受到限制。

短距离无线通信是通过无线方式实现电能表与采集器的数据传输, 无需长距离布线, 组网简单方便, 是一种实用的通信方案, 也是自动抄表系统中较为合理的通信方式之一。多功能电能表中通常要求具有两个完全独立且支持 DL/T 645 规约的串行通信接口, 大多是一个标准的 RS-485 通信接口和一个红外通信接口, 并不提供无线通信接口, 因此,

设计一种低成本高性能的无线通信接口并应用于自动抄表系统是有意义的。本文以 nRF2401 芯片为核心设计单相电子式电能表的嵌入式无线通信接口, 取代传统的 RS-485 通信接口和红外通信接口, 为电能表与采集器的数据交互提供通信通道。

1 硬件设计

1.1 系统结构

单相电子式电能表、无线通信接口以及采集器构成的系统结构如图 1 所示。电能表与无线通信接口采用串行异步通信, 采集器与无线通信接口则通过无线方式进行数据传输, 以无线通信接口作为桥梁完成电能表与采集器的数据交互, 一个采集器负责多个电能表的电能量数据采集。

电能表与无线通信接口的通信利用电能表 CPU 和无线通信接口的串行异步接口, 以 TTL 电平实现互联, 硬件实现简单; 无线通信接口采用模块化设计, 其无线通信部分电路 (如图 2) 也可直接应用于采集器, 采集器的 CPU 可采用 16 位单片机, 并具备一定的数据存储容量, 当集中器由于故障等原因暂时无法接收数据时也能保证电能量数据的完整性。通信协议采用 DL/T 645-1997《多功能电能表通信规约》^[1], 简单明了, 开放性好。

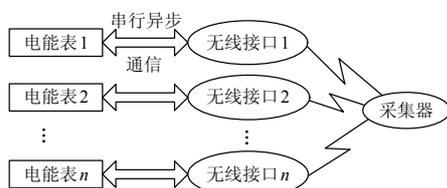


图 1 硬件结构图

Fig.1 Hardware structure diagram

1.2 无线通信接口硬件设计

无线通信接口作为电能表与采集器数据的交互窗口, 一般要求体积小、功耗低、成本少, 对数据的存储容量要求不是很高, 可选择廉价的处理器, 以尽量降低成本。本设计选用低成本、低功耗的 8 位闪存单片机 PIC16F690。无线通信接口采用模块化设计, 包括 PIC16F690 和无线通信部分两个电路模块, 无线通信部分选用挪威 Nordic 公司的 2.4 GHz 单片无线收发芯片 nRF2401, 由单片机 PIC16F690 控制实现短距离无线数据通信。

1.2.1 nRF2401 芯片及其外围电路

nRF2401 工作于 2.4 GHz 全球开放 ISM 频段, 采用 SoC(System on Chip)方法设计, 只需少量外围元件便可组成射频收发电路。芯片内置 CRC 纠错硬件电路和协议; 集成了频率合成器、功率放大器、

晶体振荡器和调制器等功能模块; 有 125 个频道, 满足多点通信和跳频通信需要, 最高传输速率达到 1 Mbps, 最大发射功率 0 dBm。通过软件最多可设置 40 bit 地址, 发送方发送的地址与接收方配置的接收地址一致时才能成功通信。

nRF2401 的收发模式有 ShockBurst™ 收发模式和直接收发模式两种。在 ShockBurst™ 收发模式下, nRF2401 采用片上 FIFO 堆栈区来进行低数据率的时钟同步和高数据率的传输, 极大地降低了功耗, 而且使用低速的单片机也能实现很高的发射数据速率。

nRF2401 采用 DuoCeiver 技术, 为 RX 提供了两个独立的专用数字通道, 可代替两个单独接收系统。nRF2401 可以通过一个天线接口从两个相隔 8 MHz、通信速率为 1 Mbps 的接收机上接收数据, 同时将两个数字通道的输出反馈到两个单独的 MCU 接口。通道 2 的频率只有在比通道 1 的频率高出 8 MHz 时, 才能正常接收。

nRF2401 的收发模式选择、通道 2 的启用与否、传输速率、nRF2401 晶振频率、信号发射功率、收发频率、接收方地址、地址长度、收发数据长度的配置等, 均由配置字的值决定。配置字共有 144 bit, 最高 24 bit 保留, CPU 只需向 nRF2401 写入 15 字节配置字, 新送入的配置字在 CS 引脚的下降沿开始工作。本文将 nRF2401 配置为 ShockBurst™ 收发模式, 并只启用通道 1, 通道 2 保留。

nRF2401 及其外围电路设计如图 2 所示。nRF2401 的供电电压范围为 1.9~3.6 V, 电源电压 VDD 选择+3.3 V; 晶振的允许值有 4 MHz、8 MHz、12 MHz 和 16 MHz, 本设计采用 1 Mbps 的通信速率, 故选择 16 MHz 晶振。

天线部分电感 L1、L2 用来将 nRF2401 芯片的 ANT1、ANT2 管脚产生电平信号转换为 2.4 G 电磁波信号, 或者将 2.4 G 电磁波信号转换为电平信号输入芯片的 ANT1、ANT2 管脚。由于采集器与单相电子式电能表安装距离较近, 一般不超过 3~5 m, 无线通信接口又置于电能表内, 不要求接口具有很远的通信距离, 故将天线设计为 PCB 天线, 即将天线直接铺设在 PCB 板上, 在保证通信质量的前提下, 尽可能地减小模块的体积、重量以及成本。天线设计为 PCB 单极天线, 宽度 W 为 1.5 mm; 根据最佳天线长度是无线电信号波长的 1/4, 天线的理论长度应为 $L=17.2$ mm, 但为优化天线使其在 2.45 GHz 能够产生共振, 需延伸一段长度 (5 mm 左右), 故天线长度设计为 22 mm。

校验码 CS 是从帧起始符开始到校验码之前的所有各字节的模 256 的和, 即各字节二进制算术和, 不计超过 256 的溢出值。在发送帧之前, 先发送 1~4 个字节 FEH, 以唤醒接收方, 接着传送数据帧。发送先加 33H 再求帧校验 CS。接收时先校验 CS 再减 33H。

2.2 软件设计

2.2.1 软件流程

软件编程采用 C 语言^[13], 程序流程如图 6 所示。系统上电后, CPU 将 nRF2401 设为配置状态, 向其写入配置字。

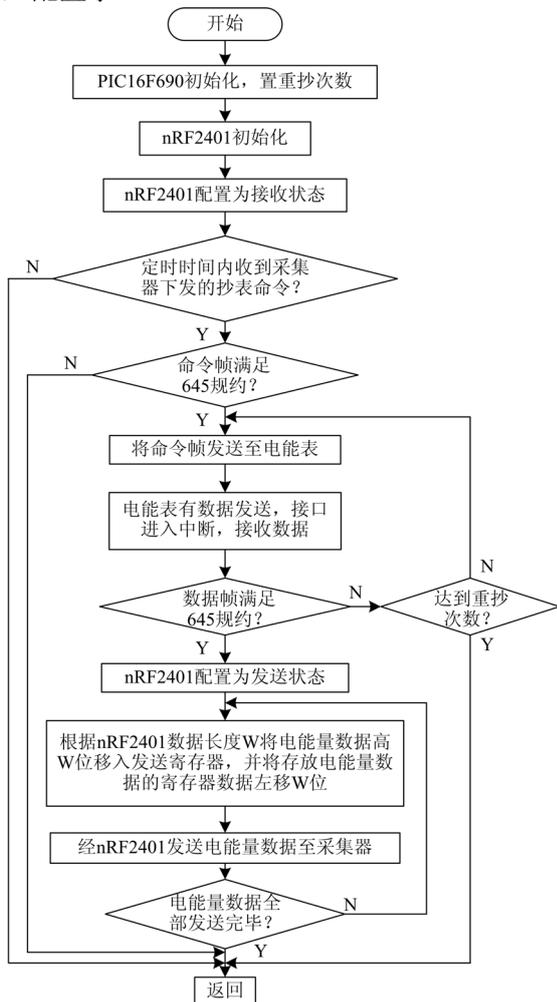


图 6 程序流程图

Fig.6 Program flow chart

配置字开始工作后, 将 nRF2401 配置在接收状态, 当定时时间内接收到采集器发送的符合 DL/T 645 规约的完整命令帧后, 通过串行异步接口将命令帧转发给电能表, 本通信接口采用中断方式接收电表返回的电能表数据, 判断电能表返回的数据帧满足 DL/T 645 规约后, nRF2401 配置为发送模式,

将电能表数据发送给采集器。

2.2.2 实际问题及解决方案

无线通信接口用于自动抄表系统会遇到以下问题, 如通信过程中数据丢失、电能表返回的数据帧长度超过 nRF2401 配置的收发长度、多个采集器安装距离较近而造成通信干扰等, 需合理设计软件以解决这些问题。

(1) 数据帧校核

无线通信接口接收到采集器下发的抄表命令或电能表返回的数据后, 根据 DL/T 645 规约定义的帧格式对数据帧进行校核, 判断是否符合规约要求, 若符合则继续下一步的数据传输。通信过程中如发生数据丢失, 无线通信接口收到的数据将不满足 DL/T 645 规约。

校验数据帧, 首先应找到帧起始符与结束符。根据 DL/T 645 规约, 找到数据帧中第一个为 0x68 的字节并暂定为起始符, 接着判断该字节后第七个字节是否为 0x68, 是则确定该字节为帧起始符。帧起始符确定后, 根据数据长度 L 确定帧的长度为 $12+L$, 便可找到帧的结束字节, 若该字节为 0x16 则确定其为帧结束符。起始符与结束符确定后计算帧的校验码是否与 CS 相等, 是则满足 DL/T 645 规约。若不存在帧起始符与结束符, 则该数据帧不满足 DL/T 645 规约。

(2) 电能表数据重抄

若电能表返回的数据帧经校核不符合 DL/T 645 规约, 无线通信接口需重发命令帧给电能表, 抄读电能表数据。若在设置的重抄次数内仍未获得正确的电能表数据, 则本次抄表失败, 等待采集器发送新的抄表命令。

(3) 长帧处理

由于 nRF2401 收发数据长度在配置字中已经确定, 若电表返回数据帧长度超过 nRF2401 收发数据长度, 无线通信接口应将数据作多次发送。由于 nRF2401 信号传输速率很快, 故发送间隔时间只需考虑采集器 CPU 读取 DATA 脚数据的时间, 间隔时间取几十个微秒即可。

数据帧的长度应在第一次即发给采集器, 采集器在接收到第一个帧后, 确定该次接收的数据不完整, 不进行数据帧校核, 把数据转存到一个更大的寄存器后, 继续接收无线通信接口发送的数据, 并将接收的数据整合为一个完整帧判断符合规约后再发送给集中器。

(4) 多模块通信

nRF2401 芯片支持点对点 and 点对多点通信, 但不具备载波检测功能。当多点对点通信, 如若干个

无线通信接口同时发送电能量数据至采集器、或多个采集器安装距离近且同时抄读电能表数据（如冻结）时，均可能发生通信冲突，造成通信失败。针对这两种情况提出软件上的解决方案，确保数据成功传输。

本文提出两种方案避免多个无线通信接口同时发送数据给采集器，一种是将无线通信接口的接收地址配置为电能表地址，采集器抄读某个电能表数据时，发送地址采用对应电能表地址，发送的数据为满足 DL/T 645 规约的抄表命令帧。这样只有与该电能表地址一致的一个无线通信接口参与通信。另一种是将无线通信接口配置为相同的接收地址。抄读电能量数据时，采集器发送符合 DL/T 645 规约的抄表命令帧，所有的无线模块均能收到命令帧并将命令帧转发给对应的电能表，若无线接口有接收到电能表返回的数据帧，则启动发送模式将数据发送给采集器，若命令帧中的表地址与电能表地址不符，电表不返回数据，无线接口不启动发送模式。本文选择方案一，需要注意的是，电能表的地址为 6 字节，而 nRF2401 接收地址最多只有 5 字节，故取电能表地址的低 5 字节作为 nRF2401 的接收地址。

若多个采集器安装距离较近，且接收地址与频率配置一致，当同时抄读电能表数据时，可能发生一个采集器同时接收若干个无线通信接口发送的电能量数据，导致通信失败。解决该问题有两种方法，一种是将这些采集器配置在不同的接收频道，但采集器的频道应与所对应的无线接口频道一致，这样就须对无线接口的接收频道分别进行配置，不利于无线接口量产；当然，也可在量产时配置为相同频道而在现场通过该无线通信方式进行重新配置，但会给现场安装、调试和维护带来很大的麻烦。另一种是将采集器配置为不同的接收地址，该方案无需修改无线接口的配置，采集器要与所连接的无线接口建立通信，只需将接收地址发送给无线接口，作为无线接口的发送地址。该方案软件实现简单，且不改变采集器和无线接口的配置字，有利于无线接口的量产。

3 通信测试

测试实验中，用计算机模拟集中器下发抄表命令给采集器，计算机与采集器间采用 RS-232 通信。测试用单相电子式电能表有 16 台，根据电能表的地址，通过串口调试软件向采集器下发不同的抄表命令，相应电能表能返回数据帧并显示在调试软件界面上，且数据与电能表示值一致。试验结果表明该接口通信速率快，可靠性高。

将 16 个无线通信接口置于 70℃ 的封闭式烤箱内连续运行 72 h，定时、巡回地发送数据给采集器。试验结果表明，数据的收、发未受高温影响，通信成功率高，通信可靠，nRF2401 的通信频率在高温条件下不会产生偏移，稳定性高。

4 结语

本文设计的无线通信接口体积小、易于安装，成本少、功耗低，传输速率高，通信稳定，接口协议采用标准 DL/T 645 通信规约，开放性好。通过软件上的合理设计，有效避免了多模块通信的冲突问题，保证通信过程中只有点对点或点对多点通信。当电能量数据长度超过 nRF2401 配置的收发长度，接口也可在一定时间内将数据全部发送给采集器，保证了电能量数据的完整性。对接口在高温环境下进行测试，结果表明该接口通信频率稳定、数据传输可靠，具有较好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 钱建华, 陈柏超. 基于无线通信的自动抄表系统[J]. 电网技术, 2004, 28 (5): 73-76.
QIAN Jian-hua, CHEN Bai-chao. An automatic meter reading system based on wireless communication[J]. Power System Technology, 2004, 28 (5): 73-76.
- [2] 刘立新, 李国辉, 郝云芳. 基于 nRF2401 的无线自动抄表系统[J]. 微计算机信息, 2006, 22 (9): 158-160.
LIU Li-xin, LI Guo-hui, HAO Yun-fang. Wireless automatic recording system based on nRF2401[J]. Microcomputer Information, 2006, 22 (9): 158-160.
- [3] 李沙, 支长义, 朱郴良, 等. 直读远程抄表系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (19): 119-121, 150.
LI Sha, ZHI Chang-yi, ZHU Chen-liang, et al. Design of direct-reading remote meter reading system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (19): 119-121, 150.
- [4] 蒋俊峰. 自动抄表技术研究[J]. 电测与仪表, 2003, 40 (454): 41-44, 24.
JIANG Jun-feng. Research on automatic reading meter system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2003, 40 (454): 41-44, 24.
- [5] 齐秀波. 电能计量集中抄表技术的发展[J]. 电测与仪表, 2006, 43 (488): 48-50.
QI Xiu-bo. The development of automatic meter reading technology electric on energy measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43 (488): 48-50.
- [6] 秦实宏, 卢亚玲, 胡胜, 等. 基于 GSM 无线远程集中抄表电量管理系统[J]. 华中科技大学学报, 2007, 35 (12): 53-55.
QIN Shi-hong, LU Ya-ling, HU Sheng, et al. Management of electrical power through GSM

- wireless-recording system[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 2007, 35 (12): 53-55.
- [7] 郭飞, 陈根永, 张德玲. 基于 RS-485 接口的电能计量数据采集[J]. 微计算机信息, 2007, 23 (8): 99-101. GUO Fei, CHEN Gen-young, ZHANG De-ling. Data collecting technology of the electric power metering based on RS-485[J]. Microcomputer Information, 2007, 23 (8): 99-101.
- [8] 闫宝瑞. 基于 RS-485 的 PLC 与多功能电能表通信的实现[J]. 电气应用, 2006, 25 (7): 71-73. YAN Bao-ru. The realization of PLC communication with multi-faction watt-hour meter based on RS-485[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25 (7): 71-73.
- [9] 樊建学, 盛新富. 低压电力线载波集中抄表系统的研究[J]. 继电器, 2005, 33 (17): 49-52. FAN Jian-xue, SHENG Xin-fu. Research on automatic meter reading system for low-voltage customers[J]. Relay, 2005, 33 (17): 49-52.
- [10] 王琼, 刘正琼, 陈雁翔, 等. 红外遥控技术在智能抄表系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (6): 1901-1902, 1912. WANG Qiong, LIU Zheng-qiong, CHEN Yan-xiang, et al. Method of infrared communication in the application of intellectualized meter checking system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (6): 1901-1902, 1912.
- [11] 电力工业部电测量标准化技术委员会. DL/T 645-1997 多功能电能表通信规约[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998. Electrical Measurement of Electric Power Industry Standardization Technical Committee. DL/T 645-1997 multi-function watt-hour meter communication protocol[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [12] 曾庆喜, 王强, 杨英杰. nRF2401 与 SPI 接口的软硬件解决方案[J]. 东北电力大学学报: 自然科学版, 2006, 26 (1): 45-47. ZENG Qing-xi, WANG Qiang, YANG Ying-jie. A software and hardware solution of the interface between nRF2401 and SPI of MCU[J]. Journal of Northeast Dianli University: Natural Science Edition, 2006, 26 (1): 45-47.
- [13] 谭浩强. C 程序设计[M]. 二版. 北京: 清华大学出版社, 2004. TAN Hao-qiang. C program design[M]. Second edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

收稿日期: 2010-01-05; 修回日期: 2010-03-13

作者简介:

黄建业 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网自动化; E-mail: 305235659@qq.com

李双洋 (1978-), 男, 工程师, 主要从事配电、营销管理相关的技术工作;

郭谋发 (1973-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统自动化。

(上接第 141 页 continued from page 141)

- LI Tao. Study on decision making for economic operation in distribution system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [9] 王道普, 杨天顺. 10 kV 高压配电线路无功补偿的优化计算[J]. 节能, 2006(11): 29-31. WANG Dao-pu, YANG Tian-shun. Optimize the calculation of reactive power compensation of 10 kV high voltage distribution lines[J]. Energy Conservation, 2006(11):29-31.
- [10] 李泳泉, 金华芳. 10 kV 配电线路无功补偿的选择[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(2): 1-5. LI Yong-quan, JIN Hua-fang. Selection of the reactive power compensation for 10 kV distribution line[J]. Power Capacitor & Reactive Power Copmensation, 2008, 29(2): 1-5.
- [11] 李惠玲, 高振江, 庞占星, 等. 基于全网无功优化的配电网无功优化系统的设计[J]. 继电器, 2008, 36(10): 31-35. LI Hui-ling, GAO Zhen-jiang, PANG Zhan-xing, et al. Design of reactive power management system for distribution network based on reactive power optimization of the whole diatribution network[J]. Relay, 2008, 36(10): 31-35.
- [12] 王新年. 配电网电压无功优化控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2006. WANG Xin-nian. Reactive power optimization and voltage control in distribution networks[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [13] 夏继红, 牛焕娜. 计及配变无载调压分接头位置的电压/无功优化方法[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 118-112. XIA Ji-hong, NIU Huan-na. Voltage and reactive power optimization algorithm incorporating off-load tap changer transformer in distribution systems[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 118-112.

收稿日期: 2010-01-11; 修回日期: 2010-04-04

作者简介:

焦明明 (1986-), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: jiaomm0306@126.com

杨仁刚 (1953-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: yrg@cau.edu.cn

牛焕娜 (1976-), 女, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化。