

# 集成电能计量及远程互动的微型智能断路器设计

欧阳曾恺<sup>1,2</sup>, 徐 晴<sup>1,2</sup>, 刘 建<sup>1,2</sup>, 田正其<sup>1,2</sup>,  
黄奇峰<sup>1,2</sup>, 钱立军<sup>3</sup>, 丁 振<sup>4</sup>

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 210019; 2. 国家电网公司电能计量重点实验室, 南京 210019;  
3. 国网江苏省电力公司, 南京 210019; 4. 浙江正泰仪器仪表有限责任公司, 杭州 310000)

**摘要:** 目前微型断路器主要用于住宅配电线路的监控与保护, 不具备多用电回路的分项电能计量及自动通断控制, 也不支持远程互动; 为提高断路器智能化、互动化水平, 降低用户生活能耗, 设计了一种集成电能计量及远程互动功能的微型智能断路器, 包括断路器本体、开关电源模块、主控单元、采样回路、自动重合闸模块、显示屏等; 通过基于 RS-485 总线的一路总开关、多路分开关的拓扑设计, 实现家庭内多用电回路的分项用电数据计量、存储、显示及负荷曲线上传; 基于电力线宽带载波通信方式实现用户经服务主站和集中器与断路器的远程互动; 用户可查询家庭多用电回路的负荷情况并远程控制断路器自动对选定用电回路拉合闸, 有利于提高住宅节能水平, 适用于建筑节能管理、电力需求侧响应等场合。

**关键词:** 微型断路器; 电能计量; 宽带载波; 多回路控制; 远程互动

## Design of Minimum Circuit breaker Integrating Electric Energy Metering and Remote Interaction

Ouyang Zengkai<sup>1,2</sup>, Xu Qing<sup>1,2</sup>, Liu Jian<sup>1,2</sup>,  
Tian Zhengqi<sup>1,2</sup>, Huang Qifeng<sup>1,2</sup>, Qian Lijun<sup>3</sup>, Ding Zhen<sup>4</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 210019, China;  
2. State Grid Key Laboratory of Electric Energy Metering, Nanjing 210019, China;  
3. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210019, China;  
4. Zhejiang Chint Instrument & Meter Co., Ltd, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Nowadays minimum circuit breaker (MCB) is used for residential distribution line monitoring and protection, not supporting electric energy metering or automatic open-close control for multi-circuits. A design scheme of smart minimum circuit breaker integrating electric energy metering and remote interaction is proposed to improve intelligentization and communication level, which also contributes to decreasing house energy consumption. The smart MCB consists of circuit breaker, switching mode power supply, sampling circuit, auto-reclosure, display screen and so on. Metering, storage, display and upload of multi-circuits electric energy data as well as load curve, are available by "primary-branch" structure based on RS-485 bus. Users are able to communicate with household smart MCB in long distance by service station and concentrator based on power line broadband carrier. Electric energy data query and remote open-close control of selected home circuits are achieved, which is helpful to promote house energy conservation level, indicating a wide application in building energy consumption management and electric power demand side response.

**Keywords:** minimum circuit breaker; electric energy metering; broadband carrier; multi-circuits control; remote interaction

## 0 引言

随着我国城镇化水平的不断提高, 住宅建筑的能源消耗问题已不容忽视。改造现有住宅的配套设施、开展电力需求侧管理, 促进用户与供电企业的供需互动, 将是降低住宅建筑能耗, 实现全社会节能减排的有效途径。微型断路器(minimum circuit breaker, MCB)是低压配电系统中广泛使用的一种开关电器, 承担终端配电线路, 尤其是住宅内用电回

路与电器设备的监控与保护重任, 可即时接通、分断线路并处理短路、接地、过负荷及过压等电气故障, 对供电的安全、稳定起到十分重要的作用<sup>[1-3]</sup>。若能在现有微型断路器基础上对其进行功能扩展, 在不额外增大体积的前提下实现住宅内多用电回路的分项电能计量及远程拉合闸, 将有助于增加用户参与电力需求侧响应的可行性及积极性, 降低电网负荷峰谷差, 提升住宅建筑节能水平。

目前的家用微型断路器智能化程度不高, 大部分需要手动复位实现用电合闸, 尚不能智能识别负荷属性、根据用户需求进行响应<sup>[4]</sup>。现代信息通信技术、传感器技术、智能控制技术等多学科的发展与交叉融合为研究微型智能断路器提

收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-04-13。

作者简介: 欧阳曾恺(1990-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事电能计量、通信检测等方向的研究。

供了良好的技术条件<sup>[5]</sup>。微型智能断路器以微处理器为核心,一方面具备传统断路器的过负荷、过电压、漏电流等多元保护能力,另一方面可以扩展自动重合闸、负荷分析、本地 LCD 显示等新型功能,并通过配置通信接口实现与其他设备的双向通信,构成集监控、保护、信息交互于一体的通信网络,使断路器从基本的本地保护升级为智能化、网络化的远程保护<sup>[6-7]</sup>。

针对目前家用微型断路器存在的上述不足,本文设计了一种集成电能计量及远程互动的微型断路器。通过一路总开关和多路分开关的拓扑设计,在具备传统家用微型断路器保护功能的基础上,实现家庭内多用电回路的分项电流、电压、功率及电量(包括总电量和当前电量)的计量、存储、显示,以及负荷曲线数据的上传。支持 RS-485 与宽带载波 2 种通信模式,可选择手动或自动两种拉合闸控制模式。在自动控制模式下可通过宽带载波通信方式接收来自用户服务网站的远程命令,自动拉、合闸。采用开关电源及片上系统设计严格控制断路器总开关体积为 4 P,分开关体积为 2 P,实现了较低成本下住宅节能水平的提升,适用于电力需求侧管理、合同能源管理、建筑能耗管理、智慧城市建设等场合,具有良好的工程应用价值。

### 1 功能架构

为实现预期目标,微型智能断路器应具备以下功能:

1) 多用电回路的分项电能计量:微型智能断路器由一路总开关和多路分开关构成,安装在户内配电箱(型号通常为 PZ30)内。总开关位于住宅的总进线处,可控制住宅内全部用电回路的通断;分开关位于住宅内的各分支用电回路上。开关内部集成了采样电路及计量模块,可实现该回路的电流、电压、有功功率和电能的计量。各路数据经 RS-485 总线汇总至总开关主控单元累加,得到住宅当前总电流、功率及电能。

2) 多用电回路的电能存储与显示:微型智能断路器在总开关处装有一个 LCD 显示屏,可用于轮流显示各分开关所在用电回路的用电数据及汇总所得的住宅当前总电流、功率及用电量。

3) 本地及远程通信:微型智能断路器的各路分开关与总开关之间将通过 RS-485 总线实现本地数据的串口通信。同时,为实现用户与微型智能断路器的远程互动,需将本地数据经通信网络传输至远方的用户服务主站。为减少改造成本,最大程度利用现有设施,考虑到电网公司现有的用电信息采集系统已经大规模推广应用、技术方案成熟,可直接通过电网公司在用户台区部署的集中器进行断路器存储数据的抄读及控制命令的下发,最终实现定时将本地用电数据经集中器上传至用户服务主站。用户通过登录主站,将可查询自家当前各用电回路的用电数据,也可以设置各类远程控制参数,如是否同意参与电网公司的需求侧响应等。

4) 负荷曲线存储及上传:通过在微型智能断路器总开关的主控单元加装高精度时钟和 FLASH 存储卡,可实现家庭内各分支用电回路负荷曲线数据的带时标存储,采用数据压缩技术每天一次将负荷曲线数据块上传至集中器,既保证数据测量准确性,也控制了数据流量,不至于过多占据通信带

宽。此项功能有助于电网公司进行用户负荷分析,也可作为用户参与了负荷转移/削减等需求响应事件的佐证记录,将有力支撑电力需求侧响应激励机制的实施。

5) 远程多用电回路通断控制:微型智能断路器设有手动及自动两种拉合闸模式,当处于自动模式时,用户可在主站上对所查询的多支用电回路进行通断选择。

6) 常规用电安全保护:微型智能断路器具备常规的短路、漏电流、过负荷等保护功能。一旦某用电回路监测到上述情形,该回路上的分开关将快速响应,及时分闸。

### 2 系统设计

基于上述功能架构,微型智能断路器组成结构如图 1 所示,主要包括断路器本体、开关电源模块、主控单元、采样回路、自动重合闸模块、宽带载波通信模块、LCD 显示屏、控制方式选择按键、清零按键等部分。微型智能断路器的总开关和分开关均具备本地数据处理、存储、通信及自动重合闸功能,区别在于其输入电流规格不同、对应功能不同。

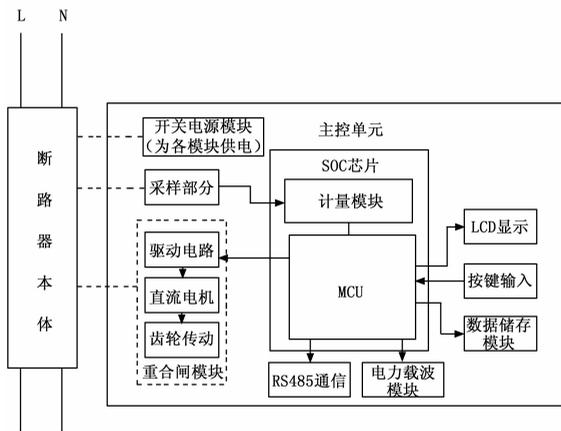


图 1 微型智能断路器系统结构图

本文设计的总开关最大输入电流定为 80 A,并具备按键响应、LCD 显示、远程通信的功能。由于总开关电流规格大于 40 A,所以断路器本体必须占 2 P 空间,再考虑自动重合闸模块和宽带载波通信模块,总开关体积需要 4 P。分开关最大输入电流定为 40 A,具备电流、电压采样及功率、电能计量功能。由于电流规格较小,断路器本体只占 1 P,若本地通信只需支持 RS-485,在采用隔离型 485 芯片方案下,附加重合闸模块,总体积可控制在 2 P。

#### 2.1 开关电源模块

微型智能断路器内部各模块正常工作时功率需求差异较大,普通线性电源难以达到设计要求。由于开关电源可将输入的交流电压转换为各种设备所需的不同直流电压,因此本文采用开关电源模块实现对各模块的稳定供电,其工作框架图如图 2 所示。

在本文设计中,开关电源模块共分两大路供电。第一路输出电压为 12 V,为自动重合闸模块的直流电机驱动电路和 MCU 中的宽带载波通信模块供电;第二路输出电压为 5 V,为主控单元内的 SOC 芯片、数据储存模块和 RS-485 通信模块供电。

在电机驱动电路中,直流电机驱动电压为 12 V,动作电

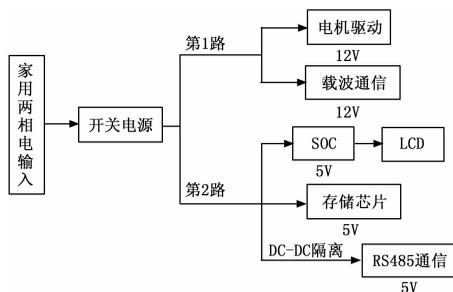


图 2 开关电源工作框架图

流为 200 mA, 可得驱动功率为 2.4 W。宽带载波通信模块的工作电压为 12 V, 工作电流需 150 mA, 算得功耗为 1.8 W。主控单元内的 SOC 芯片直接驱动 LCD 显示屏, 整体 SOC 芯片功耗不大于 0.3 W, 而数据存储模块和 RS-485 通信模块合计功耗不大于 0.1 W。综上, 为保障微型智能断路器稳定工作, 可将开关电源的额定输出功率定为 6 W。

## 2.2 主控单元

考虑到微型智能断路器的整体体积及运行效率, 主控单元的设计采用了集成计量模块及 MCU 的片上系统 (system-on-chip, SOC) 方案<sup>[8]</sup>。

在 SOC 方案下, 计量模块完成电信号的采集及运算, MCU 调用计量模块运算结果, 完成电路通断控制、远程通信和人机交互。由于计量模块具备高测量精度的电信号处理能力, 可独立完成电参量采集、模数转换等数字量运算, 因此大大降低了 MCU 的运行负荷, 提升了微型智能断路器的整体运行效率。

1) MCU: MCU 处理器内核基于 ARM 32 位 Cortex-M0 CPU 设计, 实现了微型智能断路器总开关与分开关的 RS-485 本地通信以及与集中器的宽带载波远程通信, 并驱动 LCD 以 5 s 一次的刷新周期轮流显示家庭各分支用电回路及总回路的当前电流、当日用电量 (指当天零点至目前的电能示值)、累计用电量。MCU 还负责响应清零及控制方式选择按键的输入, 按下清零键将清空保存的历史日用电量数据; 控制选择键用于实现断路器拉合闸手动或自动控制方式的切换, 手动模式下断路器将不响应用户的远程控制命令, 而自动模式下用户仍可以手动分合闸。

2) 计量模块: SOC 芯片计量模块的有功电能测量误差小于 0.1%, 可提供高精度有效值、频率、ADC 波形数据等计量参数; 提供多种能量累加方式选择; 支持掉零线、掉火线的低功耗防窃电计量; 支持直流计量、单相三线计量。既保证了电能计量的精确性, 又提供了多类型的数据供用户查询, 为用电负荷分析提供了技术条件。

3) 数据存储模块: 由于家庭用电回路分支数多, 用电数据运算量、存储量较大, 因此需对 SOC 芯片自带的 8 K 静态存储器进行扩展, 满足大容量的数据存储需求。本文采用了外挂 EEPROM 芯片 (M24256-BRMN6TP) 的方案实现各类用电数据存储, 保证微型智能断路器可存储近 30 天的日用电量及累计的总用电量数据。

## 2.3 采样回路及自动重合闸模块

由于智能微型断路器计量的电能仅供用户参考而不参与

电费结算, 因此不需要达到普通智能电能表的计量精度。为节省空间, 内部不使用导轨电能表, 而是采用锰铜分流器完成电流采样、分压网络电阻完成电压采样, 并将两者集成至断路器本体内。再经 SOC 芯片计量模块, 构成采样回路, 实现用电回路的电流、电压、瞬时功率、电能量计量。电流、电压采样电路如图 3 所示。

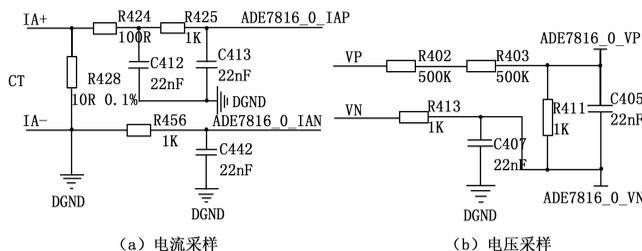


图 3 电流及电压采样电路

自动重合闸模块结构如图 4 所示, 231 是驱动电路、232 是直流电机、233 是齿轮传动机构, 采用内部组件共用开关电源的方式供电, 并去除了重合闸控制芯片与反馈电路, 改为集成到主控单元统一控制, 有效压缩了模块体积。

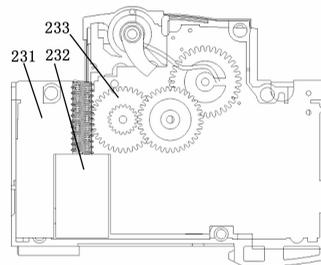


图 4 自动重合闸装置结构图

微型智能断路器某路开关合闸时, 主控单元 MCU 将根据计量模块采集、计算所得的各类电参数, 分析判断该用电回路是否存在用电异常, 当监测到该路电流过载、电压过大、短路、漏电流等异常或在自动控制模式下接收到用户的远程分闸命令时, MCU 将向自动重合闸模块的驱动电路发送控制脉冲, 驱动直流电机带动齿轮传动机构, 进而推动断路器脱扣装置实现该回路开关的自动分闸。自动控制模式下的远程合闸方式与之同理, 不再叙述。

微型智能断路器的简易立体装配如图 5 所示: 1 是盖板, 2 是断路器本体, 3 是 LCD 显示屏, 4 是印刷电路板组件, 5 是外壳, 内部集成了开关电源模块、主控单元、自动重合闸模块、宽带载波通信模块等, 6 是控制方式选择按键, 7 是清零按键。

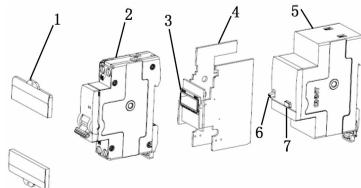


图 5 微型智能断路器简易立体装配图

### 3 远程互动方案

目前国内用电信息采集系统的典型通信方案为电能表经 RS-485 至采集器,采集器通过电力线窄带载波或无线通信方式至集中器<sup>[9]</sup>。这种方案存在通信带宽窄、速率低、实时性差、不能实现双向快速通信等问题,不利于主站对电能表的实时操作,难以满足电网企业和用户对用电信息采集、应用的更高层次要求<sup>[10]</sup>。

近年来发展起来的电力线宽带载波通信技术采用正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 等调制技术<sup>[11]</sup>,在 2~12 MHz 的频域内将给定信道分成几十至上千个独立的正交子信道,在每个子信道上用一个子载波进行调制,实现各子载波并行地传输数据,既提高了频带利用率,也消除了子信道之间的干扰,解决了长期以来电力线载波通信技术不稳定、信号衰减大、传输带宽和距离受限等问题<sup>[12]</sup>,具有抗干扰、通信速率快、成功率高、实时性强、可实现双向通信<sup>[13]</sup>等优点。鉴于目前基于宽带载波的采集方案已逐步推广应用,因此可通过为微型智能断路器 MCU 配置宽带载波通信模块,建立稳定、高效的远程通信信道,实现集中器对断路器本地数据的直接抄读和控制命令下发,为用户与家庭微型智能断路器的远程互动创造条件。

宽带载波通信模块通过 TTL 电平串口与主控单元 MCU 通信,读取微型智能断路器存储的本地用电数据,经调制后发送给集中器,集中器再经光纤、GPRS 无线公网等通信方式将数据上传至用电信息采集系统主站。主站可扩展一个子模块专门用于存放与用户微型智能断路器相关的各类数据,再提供一个外部数据库接口至事先建立的用户服务网站。用户服务网站可以采用手机 APP、微信公众号等方式供微型智能断路器的所有者注册完家庭信息后登录,用户将具备查询、设置、控制 3 种功能权限。

在查询功能下,用户可查看自家住宅总体及安装分开关的各用电回路的电流、功率、累计用电量、当前用电量情况。

在设置功能下,用户可选择是否上传负荷曲线数据、是否自动参加需求侧响应活动、负荷削减优先级(优先切断哪一支用电回路)等。

在控制功能下,若微型智能断路器处于自动控制模式,用户可自行选择家中任意条用电回路接通或关断,实现多回路远程分合闸。

通常用户台区的一个变压器下运行了多个集中器,而每个集中器均管理了更多的从节点(如采集器、微型智能断路器等)。当一个集中器管辖的多个从节点同时与该集中器通信时,宽带载波通信基于 OFDM 调制技术和 CSMA/CA 冲突避让机制,确保每个从节点的通信成功率<sup>[14]</sup>。因此一个台区内不同用户的微型智能断路器可同时与所属集中器进行数据交互,且互不干扰。基于宽带载波通信技术的用户与微型智能断路器远程互动方案如图 6 所示。

为使智能微型断路器成为可被集中器识别的从节点,需预先定义两者之间的通信规约。因当前智能电能表上行通信规约《DL/T 645-2007 多功能电能表通信协议》<sup>[15]</sup>已与用电信息采集系统深度兼容,考虑到智能微型智能断路器与电

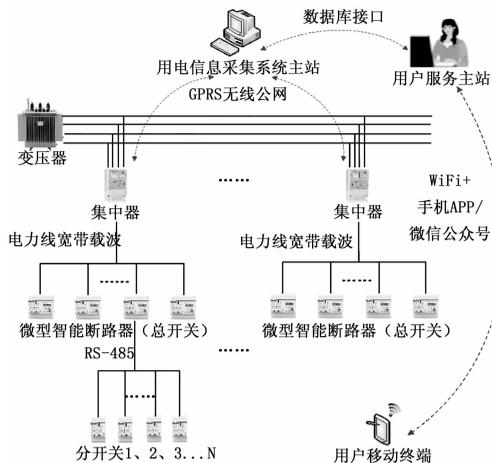


图 6 智能微型断路器远程互动通信方案

能表在整个通信架构中位置类似,可参照上述规约编写 MCU 上行通信程序,实现断路器与集中器之间的数据通信。

为支持用户经服务主站与微型智能断路器远程互动,还需扩展当前集中器的上行通讯协议<sup>[16]</sup>,以实现主站对各集中器下属微型智能断路器的统一管理。

对设置参数命令中的“终端电能表/交流采样装置配置参数”进行定义扩展,如表 1 所示。

表 1 配置参数扩展

| 名称             | 数据类型       | 字节数 | 备注       |
|----------------|------------|-----|----------|
| 电能表/交流采样装置序号   | BIN        | 2   |          |
| 所属测量点号         | BIN        | 2   |          |
| 通信速率及端口号       | BIN        | 1   | 断路器专用标识  |
| 通信协议类型         | BIN        | 1   |          |
| 通信地址           | 6 字节 BCD 码 | 6   | 填写断路器地址  |
| 通信密码           | BIN        | 6   |          |
| 电能费率个数         | BS8        | 1   |          |
| 有功电能示值整数位及小数位数 | BS8        | 1   |          |
| 所属采集器通信地址      | 6 字节 BCD 码 | 6   | 标识不同用户   |
| 用户大类号及用户小类号    | BS8        | 1   | 标识不同用电回路 |

可在配置参数“通信速率及端口号”中定义常数值用于申明该测量点为微型智能断路器;在“通信地址”中定义断路器的 6 字节通信地址;在“所属采集器通信地址”定义不同值以区别不同用户;在“电能费率个数”或“用户大类号及用户小类号”中定义 0 为总开关,其他值依次表示各分支用电回路的分开关。这样就通过集中器实现了对不同用户智能微型断路器及某一断路器总开关下不同分开关的统一管理。

由于电流、电压、功率、电能、负荷曲线数据等均在 Q/GDW 1376.1 中有对应的 Fn 明确标识,故无需再对电能数据类型进行通信规约扩展。而拉合闸等控制类操作在 DL/T 645 中已有定义,因此主站只需对集中器执行数据转发

命令 (AFN=10H) 中的“透明转发” (F1), 即可令微型智能断路器自行响应远程控制。

综上可知各用户的智能微型断路器均可作为台区内集中器下的一普通节点, 集中器对其的操作与当前抄读采集器/电表的方式一致。

### 4 软件设计

微型智能断路器软件系统主程序主要分为系统初始化程序, 控制模式判别程序、分合闸控制程序、数据采集程序, 数据处理程序, 数据显示程序、通信程序等几部分。系统运行的流程如图 7 所示。

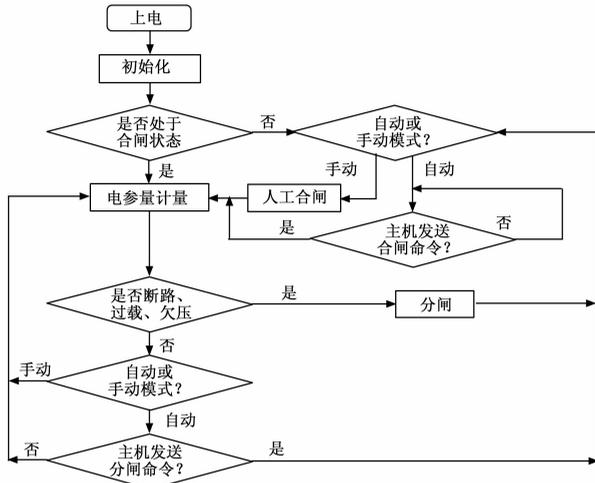


图 7 软件系统流程图

在系统上电初始化后, 软件系统首先判断断路器开关是否处于合闸状态, 若处于分闸状态, 则在转为合闸之前不会运行其余程序。在断路器合闸后, 系统将自动执行数据采集、处理、显示及通信等程序, 并实时监测用电回路是否出现异常, 一旦判定为异常, 将会立即执行分合闸控制程序切断问题线路。在正常情况下, 以用户的手动分合闸操作为最高优先级, 用户的手动分闸将会中断所有程序的执行; 在用户未进行人工操作时, 控制模式判别程序将会判断断路器是否在自动模式。若为自动模式, 则结合用户在服务网站设置的远程控制参数, 一旦接收到远程的分合闸命令, 断路器将会执行分合闸控制程序自动拉合选定的用电线路; 若为手动模式, 则断路器正常执行除分合闸外的其余程序, 但不响应任何远程控制命令。

### 5 试验结果与分析

根据上述设计要求对微型智能断路器进行了样机研制, 并从功能特性、环境适应性、机械结构、电气结构、机械性能、电气性能、绝缘性能、电磁兼容性、计量准确性、可靠性等方面对其进行了试验验证, 主要试验项目及结果如表 2 所示。

上述试验结果表明设计的微型智能断路器满足相关设备的技术规范要求, 具备在家庭用电场景下的电能计量及本地互动功能, 基于宽带载波通信和用户服务网站建立的远程交互方案也是可行有效的。

表 2 试验项目与结果一览

| 试验项目      | 试验要求                            | 试验结果   |
|-----------|---------------------------------|--|
| 额定电流      | 80 A                            | 80 A, 合格   |
| 额定短路能力    | >6000 A                         | >8000 A, 合格  |
| 远程自动合闸时间  | <3 s                            | 各分支回路平均合闸时间: 2.67 s  |
| 远程自动分闸时间  | <2 s                            | 各分支回路平均分闸时间: 1.35 s  |
| 上电延时      | >7 s                            | 8 s  |
| 有功电能准确度等级 | 2 级                             | 各额定电流百分数下电能计量误差均小于 0.8%  |
| 整机功耗      | <8 W                            | 7.6 W, 合格  |
| 保护功能      | 过负荷、短路、过流 (过热)、漏电 (选配) 保护功能     | 保护回路出现过负荷、短路、过电流、漏电时断路器均在规定时间动作                                  |
| 监测功能      | 当前电压、电流、有功功率等, 测量误差不超过 ±1%      | 电压测量误差: 0.8%<br>电流测量误差: 0.6%<br>有功测量误差: 0.8%                     |
| LCD 显示功能  | 轮流显示当前总电量, 当日电量, 当前电流、电压、功率、时间等 | 显示内容: 当前时间、当前电流、电压、功率、总电量, 当日电量; 显示内容及刷新周期人工可设                   |
| 负荷记录功能    | 存储不少于 30 天的电压、电流、功率、电能数据        | 电压、电流、功率、电能数据采样周期: 1 分钟; 存储天数: 40 天                              |
| 通信功能      | 支持 RS-485 和宽带载波通信               | 上电后 3 s 内可进行 RS-485 通信, 5 s 内可进行宽带载波通信                           |
| 远程互动功能    | 支持参数查询与设置, 并响应远程拉合闸命令           | 各用电回路电流、功率、累计用电量、当前用电量; 查询平均响应时间: 2.29 s<br>互动参数设置平均响应时间: 1.56 s |

### 6 结论

本文设计了一种集成电能计量及远程互动的微型智能断路器。在明确功能架构的基础上实现对断路器各组成单元的最小体积设计, 并基于宽带载波通信技术及通信规约扩展建立了与电网公司用户服务网站的远程交互方案。该微型智能断路器在具备传统家用断路器保护功能的基础上, 可提供家庭内多用电回路的分项用电数据计量、存储、显示, 及负荷曲线数据上传功能, 支持用户对家庭用电信息的远程查询及多用电回路的远程自动拉合闸控制。实现了较低成本下住宅建筑节能水平的提升, 为用户参与电力需求侧响应创造了有利条件, 具有良好的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 何莉莉. 基于微处理器的断路器智能化技术的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2010.  
[2] 马利人, 汪斯珂. 基于微型断路器的三相智能电表费控电路应用分析 [J]. 仪表技术, 2012 (11): 9-12.

[3] 李鹏杰. 用于微型断路器的交直流剩余电流保护技术的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.

[4] Nazmiye B O, Rosemary D, Martha B, et al. The development of smart homes market in the UK [J]. Energy, 2013, 60 (1): 361 - 372.

[5] 基于 PC104 总线便携式断路器检测仪的研制 [J]. 自动化与仪表 2010, 25 (3): 10 - 12.

[6] 张自峰. 低压断路器智能化的发展趋势 [J]. 电气应用, 2010 (6): 23.

[7] 牟龙华, 朱国锋, 朱吉然. 基于智能电网的智能用户端设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 38 (21): 53 - 56.

[8] 韩 钊. 基于 ADE7758 的多功能电参数测量模块设计 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

[9] 张有兵, 翁国庆, 曹一家, 等. 网络化电能质量监测系统中的配电网载波通信 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (6): 116 - 122.

[10] 陈金辉, 韩媛媛, 武文平. 基于单片机 PIC16F877A 和计量芯片

ATT7022A 的三相多功能复费率电能表的设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (2): 98 - 100.

[11] 刘 尧, 黄玉辉, 潘华明. 配电网电缆屏蔽层宽带载波通信技术 [J]. 华东电力, 2007 (12): 60 - 62.

[12] 智志高新. 电力载波通信的革命性颠覆: 宽带载波 [EB/OL]. [2015 - 06 - 05]. http:// www. chinasmartgrid. com. cn/news/20150605/605618.shtml.

[13] 孙 哲. 基于宽带通信的实时用电信息采集系统研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.

[14] 陈 可, 胡晓光. 基于电力线宽带载波集中器设计与中继算法 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31 (9): 115 - 120.

[15] 电力行业电测量标准化技术委员会. 多功能电能表通信协议: DLT 645-2007 [S]. 北京: 中国电力企业联合会, 2007.

[16] 国家电网公司. 电力用户用电信息采集系统通信协议 第 1 部分: 主站与采集终端通信协议: Q/GDW 376. 1-2013 [S]. 北京: 国家电网公司营销部, 2013.

(上接第 119 页)

步骤 3: 对各雷达进行正确的战场参数设置, 包括部署位置以及阵面朝向、发射频率等关键参数, 即可开始仿真。仿真过程中可通过各半实物雷达以及雷达数学模型的 P 显界面观察到各雷达对目标的探测情况, 包括雷达工作方式、波形参数、脉压增益、雷达的波束方位角、俯仰角信息以及目标的位置、速度等。以雷达 1 的状态显示为例, 如图 9 所示。

| 目标参数信息        |          |
|---------------|----------|
| 参数项           | 目标1参数    |
| 仿真时刻[s]       | 326      |
| 航迹编号          | 1        |
| 雷达工作方式        | 跟踪       |
| 波形参数          | 40Hz     |
| 脉压增益[dB]      | 7500     |
| ECEF坐标X[m]    | -2981450 |
| ECEF坐标Y[m]    | 1762650  |
| ECEF坐标Z[m]    | 7598940  |
| ECEF坐标Vx[m/s] | 3201.21  |
| ECEF坐标Vy[m/s] | -1900.64 |
| ECEF坐标Vz[m/s] | 960.58   |
| 波束方位角[deg]    | -5.83    |
| 波束俯仰角[deg]    | 11.83    |

图 9 被探测目标的状态数据显示

步骤 4: 仿真结束后, 选择各半实物雷达或雷达数学模型生成的过程记录文件, 使用结果分析程序, 回放记录数据, 可以清楚分辨出目标的清晰轨迹, 如图 10 所示。

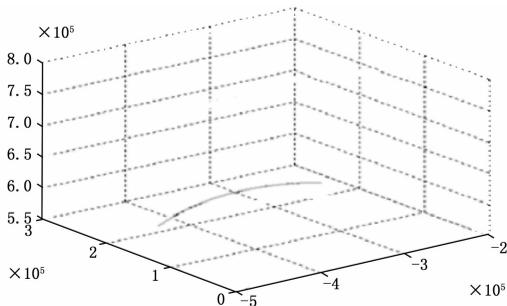


图 10 仿真数据的比较分析图

步骤 5: 选择各半实物雷达和雷达数学模型生成的过程记录文件, 结合 5 部雷达的探测结果, 可针对任意一个被探测的

目标进行组网雷达的覆盖性分析。如图 11 所示。根据时序图可知, 导弹于起飞后 8 分钟陆续被 5 部地基雷达探测到。该仿真数据与 STK 软件仿真数据基本一致。证明该半实物仿真系统可正常运行且分析有效。

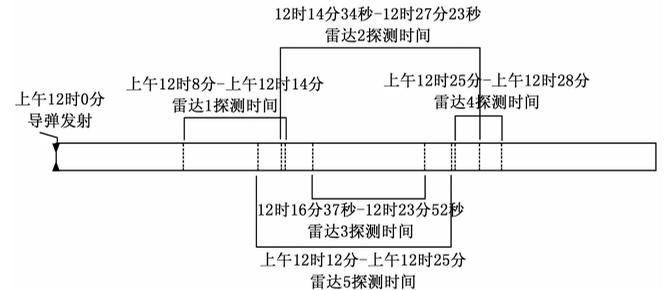


图 11 针对某型导弹的雷达探测仿真覆盖性分析时序图

根据时序图可知, 导弹于起飞后 8 分钟陆续被 5 部地基雷达探测。

### 5 总结

由该套组网雷达半实物仿真系统的仿真结果可知, 该套半实物仿真系统能有效准确地扫描跟踪到视场内的目标并完成仿真后的数据分析。该系统的建设提高了作战仿真系统的高效性和逼真度, 更加完整地模拟需要的战场环境。此外应用时分复用的技术、半实物模型与功能辅助验证模块相结合的方法, 缩减实际创建的半实物设备成本, 简化试验方法, 降低试验难度。

#### 参考文献:

[1] 宋济慈. 组网雷达仿真与对抗技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.

[2] 刘 峰, 曾 涛, 刘 伟. 基于“时间反演”的组网雷达半实物仿真方法 [J]. 计算机仿真, 2004 (6).

[3] Skolnik M I. 雷达手册 (第三版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

[4] Jane's radar and electronic warfare systems [Z]. 2005 - 2006: 156.