

# 基于 LoRa 的农田信息无线采集方案设计

孙天柱, 戴亚文

(武汉理工大学 理学院, 武汉 430070)

**摘要:** 针对传统的农业 WSN 存在距离近、功耗高的问题, 提出一种基于 LoRa 技术的农田信息无线采集系统。通过分析无线网络构成, 给出了网络参数的设计原则, 优化网络结构、降低组网难度、提高组网效率; 选择以 STM32L053 处理器、SX1276 无线芯片和 SHT11 温湿度传感器组成精简的低功耗节点硬件电路; 设计了低功耗、低碰撞的星型无线网络结构, 该系统采用分时方法周期性地对传感器数据进行采集和发送; 通过实验分析了节点的功耗, 时隙长度的选择, 对包接收率和接收信号强度指示 (RSSI, received signal strength indication) 的关系进行研究; 结果表明该系统具有通用性强、功耗低、距离远、组网便捷、稳定可靠等特点, 能够满足农田信息采集的应用需求。

**关键词:** LoRa; 农田信息采集; 低功耗; 分时方法

## Design of Field Information Wireless Acquisition Scheme Based on LoRa

Sun Tianzhu, Dai Yawen

(College of science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of traditional agricultural WSN such as short distance, high power consumption. A field information wireless acquisition system based on LoRa technology was proposed. By analyzing the composition of the wireless network, the design principles of the network parameters were given, the network structure was optimized, the networking difficulty was reduced, and the networking efficiency was improved. Choosing STM32L053 processor, SHT11 digital temperature and humidity sensor and SX1276 wireless chip to form a compact low power node hardware circuit. A low power and low collision star wireless network structure was designed. This system periodically collected sensor data through time-sharing sampling method. The node's power consumption and the selection of time slot length as well as the relationship between packet reception rate and RSSI (Received Signal Strength Indication) were analyzed by experiment. The results show that the system has the characteristics of strong universality, low power consumption, long distance, easy networking, stable and reliable, which can meet the application demand of field information acquisition.

**Keywords:** LoRa; field information acquisition; low power consumption; time-sharing method

## 0 引言

农业物联网集信息感知、数据传输、智能信息处理技术于一体, 作为物联网的一个重要发展方向, 受到了广泛关注。随着农业物联网技术的发展, 如何降低设备成本和功耗, 如何提高无线网络的传输距离、传输效率、电池寿命和可靠性等诸多问题成为农业信息化发展面临的全新挑战。无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network) 作为物联网的关键技术在农业方面已有大量的应用研究, 由于传统的 WSN 采用 ZigBee、WiFi、Bluetooth 等无线通信技术, 在通信距离、功耗、抗干扰和组网规模上存在局限性, 面对地域广阔、分布不集中、自然环境恶劣的农业应用场合, 传统的无线通信技术已经无法满足农业物联网的发展需求<sup>[1-3]</sup>。

低功耗广域网 (LPWAN, low power wide area network) 技术作为新兴的物联网无线接入技术, 与传统的无线技术相比具有传输距离远、功耗低、成本低、覆盖容量大等优点。适合于长距离、低功率和低数据传输速率的应用场合。目前 LPWAN 技术包括 LoRa、SigFox、LTE-M、NB-IoT、Weightless 等<sup>[4]</sup>。LoRa 是 Semtech 公司推出的一种新型超长距低功耗数据传输技术, 其工作频段在 1 GHz 以下, 采用线性扩频调制技术具有抗干扰、保密性强、抗多径效应等特点。其接收灵敏度高, 解决了传统无线通信设计方案无法同时兼顾距离、抗干扰和功耗的问题, 拥有广泛的应用前景<sup>[5]</sup>。

本文针对农田信息采集的实际应用需求, 利用 LoRa 技术设计了一种农田信息采集系统。整个系统充分考虑了功耗、成本以及系统稳定性等方面的要求, 采用多频段 TDMA 接入方式, 通过设计精简的低功耗硬件电路和高效率的无线通信协议, 达到了功耗低, 容量大, 覆盖范围广的目的。并针对节点功耗, 时隙长度以及链路质量方面展开实验研究。

收稿日期:2017-12-25; 修回日期:2018-01-24。

基金项目:湖北省高新技术专项(2016lg0097)。

作者简介:孙天柱(1991-),男,湖北随州人,硕士研究生,主要从事无线传感网络方向的研究。

## 1 系统结构

基于 LoRa 的无线信息采集系统用于实现农田信息的精准测量, 其总体结构设计如图 1 所示, 包括传感器节点、网关、服务器。网关负责网络的建立与维护, 传感器节点通过无线方式申请入网, 与网关建立通信连接。传感器节点分布在田间进行农田信息采集, 并将采集到的信息发送至网关, 网关将节点数据汇总后进行处理、存储, 网关通过串口、以太网或 GPRS 与服务器相连。无线网络采用多频段 TDMA (time division multiple access) 接入方式, 划分多个子网, 在子网中每个网关与节点组建星型网络, 节点周期性地数据上传到网关, 服务器通过调用网关数据对采集到的数据进行处理, 分析每个接入节点的状态, 并转换成有价值的信息, 供用户访问使用, 从而实现了农田信息的无线采集。

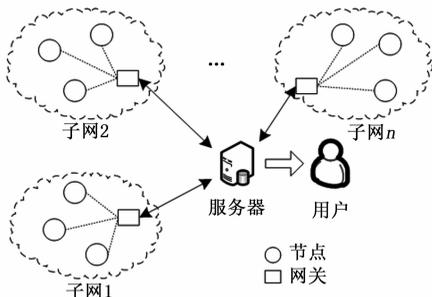


图 1 系统结构图

## 2 无线网络设计原理及方案

### 2.1 网络设计指标

针对该农田信息无线采集系统自身特点, 以及它的工作环境, 系统网络设计的主要技术指标如下:

1) 低功耗, 由于传感器节点所处的工作环境需采用电池供电方式, 能量有限, 保证系统硬件正常工作和适当的传输距离, 应尽量降低功耗, 延长电池寿命。

2) 远距离, 由于农田现场地域广阔, 通信距离的限制以及障碍物的遮挡等环境因素的影响使得传输质量变差, 影响数据传输距离, 需要无线通信有较强的抗干扰能力和较远的通信距离, 提高网络覆盖范围。

3) 易扩展, 节点数据能够无线上传到网关, 同时保证网络容量, 应降低组网难度, 提高组网效率, 使用灵活, 能够扩展到更多的应用领域。

### 2.2 网络结构设计

网络拓扑结构根据无线通信特点、应用需求进行设计。LoRa 通信传输距离远、速率低。农业监测一般有以下应用需求: 网络覆盖范围较大, 节点数量较多, 单节点数据量较少, 但需要周期性发送监测数据, 对数据的准确性要求高, 实时性要求相对不高等。星型网络是各种网络拓扑结构的组网基础, 它具有结构简单、延迟低、组网容易等特

点, 可以降低通信协议的复杂度以及整个网络的能耗<sup>[6]</sup>。本文选择星型拓扑作为无线网络基础结构, 考虑到单个星型网络容量有限以及远距离的节点无法覆盖的问题, 根据区域将系统划分成多个子网, 每个子网分配独立的信道, 相同信道的节点和网关组成星型结构的子网, 可以降低信号间的相互干扰, 扩充网络容量, 增加覆盖范围。

LoRa 传输速率低导致信道占用时间长且覆盖范围广, 在一个星型网络中, 节点间的数据碰撞会导致数据的丢失, 极大地影响数据的传输效率。处理无线网络碰撞的方式有竞争和时分复用 (TDMA) 两大类, 竞争方式是指节点在发送数据之前需要先检测当前信道是否空闲, 若空闲则占用信道直接发送数据, 否则直至检测到信道空闲为止。竞争方式具有灵活性高、简单、稳定等特点, 适用于节点数量较少的小规模网络中, 但是当网络节点数量增多且各节点发报频率增大时, 信道会非常繁忙, 致使数据传输率下降, 同时长时间的信道监听会造成能量浪费。

时分复用是为网络中每个节点分配独立的用于数据发送或接收的时隙, 而节点在其它空闲时隙内转入睡眠状态, 这些特点很适合无线传感器网络的节能需求<sup>[7]</sup>。本文的星型网络采用竞争和时分复用相结合的方式, 节点入网时采用竞争方式, 入网后采用分时方式发送数据。

基于 TDMA 的网络必须建立网内同步, 使各个设备工作在同一时间基准上。子网系统的同步时间以网关时间作为标准, 采用单向同步机制减少通信开销。由于节点入网时间具有随机性, 采用竞争方式发送入网申请, 同一信道的网关收到入网申请后则即刻下发时间戳、工作周期、时隙分配信息给节点。节点收到时间戳信息后估算发送延时, 调节本地时间完成时间同步, 根据工作周期和时隙分配信息设置休眠及唤醒时间。

### 2.3 网络参数分析

时间同步会存在时钟误差, 包括时钟偏差 CS (Clock Skew) 和时钟漂移 CD (Clock Drift), CS 为同步建立之初, 节点与网关的时钟偏差; CD 为节点晶体振荡器的硬件差异引起的节点间的时钟相对漂移<sup>[8]</sup>。时钟误差可能随着时间的累积不断增大, 节点的时钟误差  $t_{ce}$  为:

$$t_{ce} = \frac{1}{f_0} \int_0^t f(t) dt + t_{cs} \quad (1)$$

其中:  $f_0$  为节点晶体振荡器的标称频率,  $f(t)$  是晶振在  $t$  时刻的实际频率,  $t_{cs}$  为同步完成后的时钟偏差。

节点在时间同步完成之后进入休眠状态, 在下一个工作周期所对应的时隙之前唤醒, 假设网络为每个节点分配的时隙长度为  $\Delta\tau$ , 网关的时间为  $t_g$ , 节点同步后经过了  $N$  个工作周期  $T$ , 节点  $i$  的数据发送时刻为:

$$t_i = N \cdot T + i \cdot \Delta\tau + t_g + t_{ce} \quad (2)$$

数据包传输时间即信道占用时间为  $t_d$ , 与数据包长度和物理层发送速度相关。当时钟误差累积到一定程度, 相

邻节点的数据发送时间间隔小于  $t_d$  时, 数据包发送时间重叠便会产生无线碰撞, 造成数据包的丢失。因此需要在时钟误差累积到一定值之前重新进行时间同步。

由于节点时钟误差和新节点的入网申请不可预测, 每个节点划分的时隙长度必然要大于数据包的传输时间, 假设新节点入网耗时为  $t_e$ 。为使节点快速入网, 这里定义时隙长度的最小值:

$$\Delta\tau_{\min} = t_d + t_e + 2\max(t_{ce}) \quad (3)$$

一般来说数据包传输时间和新节点入网耗时固定不变, 最小时隙由时钟误差决定。因此单个星型网络的节点容量为:

$$C = T/\Delta\tau_{\min} \quad (4)$$

### 3 系统硬件设计

农田信息采集节点模块的硬件结构如图 2 所示, 由主控芯片、无线芯片、传感器及其外围电路及扩展接口组成。可以实现对农田温度、湿度等多个物理量的获取, 并通过射频单元将获取的农田信息发送给网关。节点还具有多路模拟数字扩展通道、RS232 等扩展接口, 可以根据实际需要进行使用。

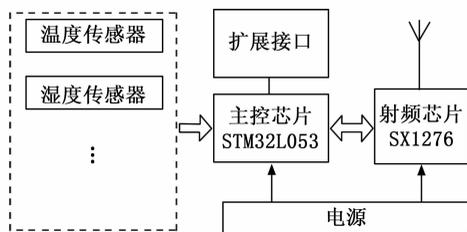


图 2 传感器节点结构图

主控芯片选用意法半导体 ST 推出的低功耗系列芯片 STM32L053, 其基于 ARM Cortex-M0+ 的内核, 最高主频 32 MHz, 配置了 8 KB RAM 和 64 KB Flash, 拥有丰富的外设资源。它具有 1.71~3.60 V 的宽工作电压, 停止模式电流仅 440 nA 且具有全 RAM 数据保存和低功耗定时计数器功能, 唤醒时间仅需 3.5  $\mu$ s。满足一般农业环境下数据处理、存储和传输的要求。设计时使用外部 8 MHz 晶振作为时钟源, 使用外部 32.768 kHz 晶振作为 RTC 日历时钟源。

射频芯片 SX1276 采用的是 Semtech 的 LoRa 无线调制解调器, 内置高效的循环交织纠错编码, 工作电压 1.8~3.7 V, 最大链路预算可达 168 dB, 频率范围 137~1020 MHz, 有效比特率范围 0.018~37.5 kbps, 低至 -148 dBm 的接收灵敏度, 最大射频功率 20 dBm, 9.9 mA 的接收电流, 200 nA 的休眠电流。射频芯片通过 SPI 方式进行数据传输, 并且有 5 个中断输出引脚, 用于产生中断事件。

传感器采用数字温湿度传感器 SHT11, 是含有已校准数字信号输出的温湿度复合传感器, 温度测量范围 -40~

123.8  $^{\circ}$ C, 湿度测量范围 0~100%RH, 工作电压 2.4~5.5 V, 休眠电流小于 1.5  $\mu$ A。采用双线串行接口与主控芯片进行通信。

网关采用的主控芯片和射频芯片与节点一样, 不需要接传感器。为得到精确时间信息需增加一个 GPS 模块, 根据实际需求选择串口、以太网或 GPRS 模块, 将数据传送到服务器。

## 4 软件设计

### 4.1 节点软件设计

传感器节点程序主体流程如图 3 所示。大致分为以下 3 个步骤。1) 节点入网及同步。节点在初始化之后进行入网过程, 先进行信道检测, 如果检测出信道空闲直接发送数据, 否则等待一段随机时间后, 再进行信道检测直至发送成功。节点在发送完请求数据后立即切换到接收模式, 若接收到网关的响应数据则配置节点参数, 否则重新发送入网请求。由于时钟的漂移造成同步误差增大, 在入网成功后经过 K 个周期后需要再次进行时间同步。2) 传感器数据采集与处理。节点完成入网后在相应的时间段内唤醒并完成传感器数据的采集和发送。发送前先进行一次信道检测, 若信道占用则延时一个随机时间后直接发送。3) 低功耗。由于节点一般使用电池供电, 为了降低功耗, 节点大多数时间处于低功耗状态。节点采用深度休眠设计, 主控芯片进入停止模式, 射频芯片、传感器均进入低功耗模式。

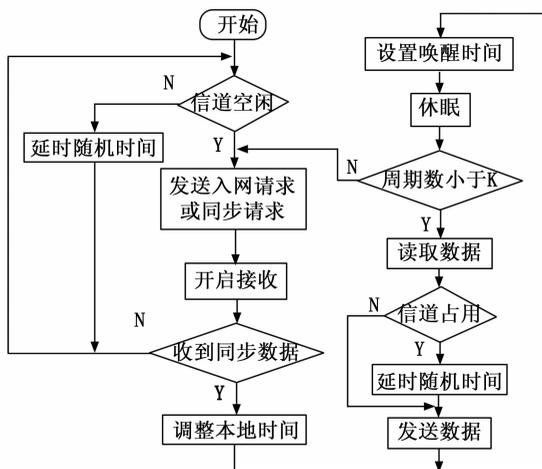


图 3 节点软件主流程图

### 4.2 网关软件设计

网关初始化后根据 GPS 时间定期调整时钟, 网关一般处于接收状态, 当收到入网请求后立即获取本地 RTC 时间、工作周期、分配时隙信息并发送给节点, 当收到同步请求后发送本地 RTC 时间, RTC 时间信息精确到毫秒; 当收到正常的温湿度数据后记录下当前时间、RSSI 值等信息并将其进行存储处理, 服务器通过 Modbus 协议对网关数据进行调用。网关主体流程如图 4 所示。

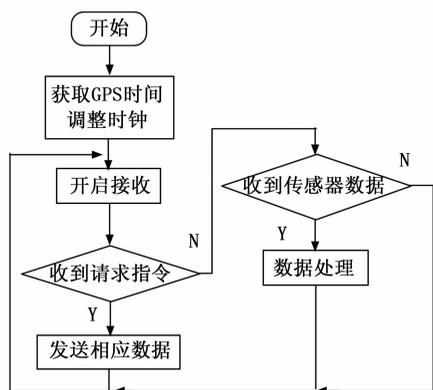


图 4 网关软件主流程图

### 5 试验验证

LoRa 的设置参数决定 LoRa 通信的实际特性, 包括传输速率、接收灵敏度和覆盖范围。本文中 LoRa 网络工作频段选择 780 MHz, 带宽 125 kHz, 扩频因子为 7。数据包长度为 10, 通过计算数据包传输所需时间  $t_d$  约为 34 ms, 入网同步耗时  $t_e$  约为 70 ms, 网关设置为最大发射功率 20 dBm。利用逻辑分析仪测得时钟偏差 CS 一般小于 50 ms, 32.768 kHz 的晶振误差最大为 20 ppm, 则时钟漂移 CD 最大约为 72 ms/h, 假设每小时进行一次时间同步则最小时隙约为 350 ms。假设将每个节点时隙划分为 1 s, 周期  $T$  为 60 s, 则单个子网的节点容量为 60。

#### 5.1 节点功耗

无线节点采用 3.7 V 锂电池供电, 射频芯片发射功率为 14 dBm, 可实现视距 2 km, 非视距 500 m 的通信距离。利用功率分析仪测得节点在入网完成后一个周期的电流状况如表 1 所示。可以发现数据发送所需电流最大, 数据采集耗时最长。节点每小时进行一次时间同步时的接收电流为 20.6 mA, 耗时 45 ms, 周期  $T$  设为 60 s。通过计算单个节点每天消耗的电量为 2.96 mAh, 可以实现低功耗长久工作。

表 1 节点一个周期的电流消耗状况

状态	电流/mA	时长/ms
数据采集	12.4	320
数据处理	9.7	5.8
数据发送	73.2	36.2
休眠	0.012	—

#### 5.2 链路质量特性

无线通信会受到各种因素的影响, 链路质量的研究有助于及时了解网络的运行状况。RSSI 的值是评估链路质量的重要指标, 本系统通过改变节点与网关的距离, 每次连续发送 200 个数据包, 统计均值 RSSI 和包接收率。测得 RSSI 均值与包接收率的关系如图 5 所示。

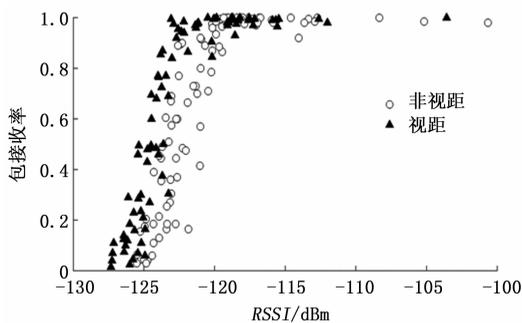


图 5 包接收率与 RSSI 的关系

由图 5 可知当 RSSI 的值大于 -118 dBm 时, 包接收率稳定在 0.9 以上, 为稳定区; 当 RSSI 值小于 -118 dBm 时, 包接收率随着 RSSI 的减小而减小, 为非稳定区, 将该点定义为拐点。RSSI 值为 -127 dBm 时, 包接收率接近 0, 将该点定义为零点。视距与非视距环境下包接收率与 RSSI 的关系相似, 通过对比发现非视距环境下的拐点和零点对应的 RSSI 值较大, 当 RSSI 值相同时, 视距环境有更好的通信质量。拐点的值可以为子网划分提供重要的指导。

#### 5.3 时隙选择

星型网络的时隙长度对网络容量和网内节点数据碰撞有着根本影响。为进一步测试网络可靠性, 将系统接入最大节点数, 且所有测试节点距网关近, 通信质量好。改变时隙长度测得在 5 小时内整个网络的丢包率如表 2 所示。

表 2 网络系统丢包率统计表

时隙/ms	节点数	周期/s	丢包率/%
300	30	9	12.56
500	30	15	4.37
1000	30	30	1.53
2000	30	60	0.34

通过实验发现随着时隙长度的增加, 丢包率呈现减小的趋势。当时隙长度大于 500 ms 节点能够实现快速入网, 数据碰撞一般存在于新节点入网时, 在所有节点完成入网后节点间的数据几乎没有碰撞, 整个系统的丢包率小于 5%, 可以满足一般通信要求。但时隙长度过大也会造成信道资源的浪费, 因此选择合适的时隙长度对于权衡网络的效率和容量非常重要。

### 6 结论

为了解决传统无线采集系统传输距离近、功耗高的问题, 本文根据 LoRa 的无线传输特性和应用需求设计了一种多频段 TDMA 周期性无线采集方案, 主要对多频段 TDMA 网络结构、子网低碰撞率实现方法和网络时隙长度选取方法进行了分析介绍。并对节点功耗、无线链路质量、时隙长度进行了测试, 实验结果表明: 利用 STM32L0 和 SX1276 的 LoRa 节点设计方案具有功耗低的优势; 利用 RSSI 值可以快速判断链路质量状态; 选择合适的时隙大小可以减小数据碰撞, 提高网络容量。该系统覆盖范围广,

功耗低, 成本低, 扩展性能好且具有较高稳定性, 可以广泛应用于农业、工业等需要对信息进行大范围无线采集的领域, 具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 李 瑾, 郭美荣, 高亮亮. 农业物联网技术应用及创新发展策略 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (S2): 200-209.
- [2] 郑纪业, 阮怀军, 封文杰, 等. 农业物联网体系结构与应用领域研究进展 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (4): 657-668.
- [3] 何 勇, 聂鹏程, 刘 飞. 农业物联网与传感仪器研究进展 [J]. 农业机械学报, 2013, 44 (10): 216-226.
- [4] Augustin A, Yi J, Clausen T, et al. A study of LoRa: long

range & low power networks for the internet of things [J]. Sensors, 2016, 16 (9): 1466.

- [5] 赵太飞, 陈伦斌, 袁 麓, 等. 基于 LoRa 的智能抄表系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 298-301.
- [6] 陆 游, 禹素萍, 姜 华, 等. 一种能量可计算的星型无线传感器网络协议 [J]. 天津工业大学学报, 2013, 32 (4): 60-65.
- [7] 王陆江, 张 伟, 张敬忠. 基于 TDMA 的无线传感器网络时隙分配算法 [J]. 计算机工程与设计, 2008, 29 (7): 1706-1708.
- [8] 徐焕良, 刘佼佼, 王浩云, 等. WSN/WSAN 中的时间同步算法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48 (31): 56-60.

(上接第 96 页)

表 2 均流电流  $I_1:I_2=2:1$  实验数据

$U_o/V$	$I_1/A$	$I_2/A$	$I=I_1+I_2/A$	均流精度/%
8.02	1.0103	0.4987	1.5090	0.43
8.01	1.8089	0.5911	2.4000	1.48
8.02	2.0156	0.9864	3.0020	1.36
8.01	2.8249	1.3831	4.2080	1.35
8.00	3.4206	1.6796	5.1002	1.22

1.5~5.1 A 范围内变化, 负载电流均流精度均低于 1.5%。从表 3 可知, 该系统在电流比 0.5~2 范围内都有较高的均流精度, 最大均流误差小于 1.5%。

实验过程中进行了 100 次电路上电启动, 启动测试双向 DC-DC 电路参数从 0 A 到满载 5 A, 均流电流比例 0.5~2, 测试过程中均未出现电路故障现象, 电源输入电流平稳上升, 未出现瞬态电流过大拉低输入电源电压现象, 证明本系统稳定性良好。

表 3 均流比例  $k=0.5\sim 2$  实验数据

均流比例 $k$	均流精度/%
0.50	1.40
0.75	1.23
1.00	1.20
1.25	1.26
1.50	1.21
1.75	1.32
2.00	1.48

本系统不足之处在于系统数字信号控制器 DSPIC30F4011 的 32 MHz 主频偏低, 使得 PWM 调节精度较低, 10 位 ADC 采样模块精度较低, 最终均流调节精度不高。若改进使用更高主频的 DSC 和外接更高采样位数的 ADC 芯片, 可大幅度提高其电流调节精度。

## 5 结束语

本文提出了一种电源模块数字主从控制法的改进算法, 并设计了基于该算法的并联双向直流电源。该算法的创新

之处在于降低并联电源主从控制中主模块出现故障和系统瘫痪的概率。试验结果表明了限制主模块最大输出电流、电路启动时主模块采用软启动控制等技术对于改善在稳态和瞬态过程的均流效果都较为有效。但其算法需要在主从模块初始状态不匹配程度较小的情况下才能实现, 且需要保证主从电路参数差异不大。基于此算法的系统设计稳定, 均流精度高, 可应用在汽车照明、功率放大等低压大电流的系统中。

#### 参考文献:

- [1] 王正仕. 直流电源并联的有功均流技术 [J]. 电工技术, 2000: 15-16.
- [2] 张 强, 姚绪梁, 张敬南. 大功率直流电源并联运行的均流控制 [J]. 电力电子技术, 2011, 45 (3): 73-75.
- [3] 程荣仓, 刘正之. 基于自主均流法模块并联的小信号分析 [J]. 电力电子技术, 2001: 36-38.
- [4] 郑争兵. 基于数字均流技术的直流电源系统研究 [J]. 电源技术, 2013, 37 (12): 1114-1126.
- [5] 陈 坚, 康 勇. 电力电子学—电力电子变换和控制技术 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2002: 56-58.
- [6] 罗耀华, 马 威. 双向 DC-DC 变换器并联仿真 [J]. 应用科技, 2010, 37 (4): 47-51.
- [7] 韩 军. 一种用于并联组合直流变换器的均流策略 [J]. 电力电子技术, 2017, 51 (4): 114-117.
- [8] 艾 欣, 邓玉辉, 黎金英. 微电网分布式电源的主从控制策略 [J]. 华北电力大学学报, 2015, 42 (1): 1-6.
- [9] 韩培洁. 微电网主/从控制策略的分析研究 [J]. 低压电器, 2012, 14 (1): 22-26.
- [10] 蒋智化, 刘连光, 刘自发, 等. 直流配电网功率控制策略与电压波动研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (4): 919-926.
- [11] 涂春鸣, 熊涌辉, 肖 凡, 等. 基于电流跟踪的多直流微源并联运行主从控制策略 [J]. 电网技术, 2017, 41 (7): 2205-2213.
- [12] 林渭勋. 现代电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.