

## 基于 ZigBee 通信的微电网监控网络

齐志远,李志峰

(内蒙古大学 电子信息工程学院,呼和浩特 010021)

**摘 要:**为实现分布式发电微电网的灵活组网,将 ZigBee 应用到微电网监控网络中进行信息传输,提出一种将通信地址采用动态分配短地址附加虚拟短地址的方法,以进行微电网各单元地址唯一性识别。通过网络节点优先接入能量峰值高的信道方式,提高通信链路的可靠性。实验结果表明,动态分配短地址与虚拟短地址相结合能够正确识别现场设备的地址,与 ZigBee 设备出厂时分配的 64 位唯一地址相比,应用短地址能更有效减小通信中数据包的长度,网络测试证实其通信距离和数据传输稳定性满足微电网监控网络的需求。

**关键词:**微电网;分布式发电;监控网络;ZigBee 通信;虚拟地址

**中文引用格式:**齐志远,李志峰. 基于 ZigBee 通信的微电网监控网络[J]. 计算机工程,2017,43(4):79-83.

**英文引用格式:**Qi Zhiyuan, Li Zhifeng. Microgrid Monitoring Network Based on ZigBee Communication[J]. Computer Engineering, 2017, 43(4):79-83.

## Microgrid Monitoring Network Based on ZigBee Communication

QI Zhiyuan, LI Zhifeng

(College of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

**[Abstract]** In order to realize the flexible construction of microgrid with distributed generation, ZigBee is used to transmit information for the monitoring network of microgrid. Communication address that is composed of dynamic short address and virtual short address is proposed to identify unique address of each unit of microgrid. The ZigBee network nodes preferentially connect with the channel of high peak energy to improve the reliability of communication link. Experimental results show that the combination of dynamic short address with virtual short address can correctly identify the address of the field device. Compared with the 64 bit unique address assigned by ZigBee manufacturer, the application of short address can reduce more effectively the data packet length during communication. The tests of network verify that both communication distance and stability of data transmission meet the monitoring network requirement of microgrid.

**[Key words]** microgrid; distributed generation; monitoring network; ZigBee communication; virtual address

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-3428.2017.04.013

### 0 概述

微电网可以解决风力发电、太阳能发电等分布式发电的随机波动性对电网冲击的问题,能够提高供电可靠性和电能质量。目前微电网控制有主从控制、对等下垂控制和分层控制 3 类。主从控制可以实现电压和频率的无差控制,但对主控制单元依赖性强<sup>[1-2]</sup>。对等下垂控制属于有差控制,由于缺少通信设备,无法有效调度所有单元协调动作<sup>[3-4]</sup>。分层控制需要通信线路传递采集的控制信息<sup>[5-6]</sup>。微电网监控系统常用光纤以太网和 MODBUS 协议方式实现信息传递<sup>[7]</sup>,但是由于微电网中发电单元、储能

装置、负载等分散布置,有线通信存在着施工复杂、铺设线路的经济成本和维护成本较高、安装设备灵活性差、扩展和维护困难等缺点。

无线通信具有灵活组网、无需考虑布线问题、网络易于扩展、方便实现不同设备兼容等优点,可以应用到微电网监控网络通信中。无线通信种类多,应用途径也不同,其中无线公网数据传输速率有限,存在运营设施依赖公网、付费运行以及网络管理等问题<sup>[8]</sup>。在短距离无线通信中,蓝牙、Wi-Fi 等方式传输距离过短<sup>[9-13]</sup>,不适合微电网监控系统的要求。

ZigBee 无线通信具有低复杂度、低功耗、低成本的特点,使用全球免费的 2.4 GHz 频段,数据传输采

**基金项目:**国家自然科学基金(51167010)。

**作者简介:**齐志远(1968—),男,副教授、博士,主研方向为传感器网络、网络通信、微电网控制;李志峰,硕士研究生。

**收稿日期:**2016-06-16 **修回日期:**2016-08-21 **E-mail:**qi\_zhiyuan@126.com

用 250 Kb/s 速率,以自组织和多跳的方式组网,能够很好地保证传输数据的实时性和可靠性。ZigBee 终端节点与网关之间通过路由节点进行中继,可以拓展无线通信距离<sup>[14-15]</sup>。本文利用 ZigBee 无线通信组建微电网监控网络,进行各分布式发电设备间的信息传输,实现并网逆变器的即插即用功能,增加微电网系统的开放性和易扩展性。

## 1 微电网监控网络

微电网监控系统采用集散控制方式,监控中心承担系统能量优化管理的任务,现场控制器负责对各设备单元的调节控制。本文中监控中心的任务由工控机结合基于 JADE (Java Agent Development Framework) 的多代理控制方法实现。现场设备的信息通过 ZigBee 网络上传到工控机,驻留在工控机中的监控中心对数据进行分析、判断、处理并产生优化

调度指令。然后,监控中心将得出的控制决策命令通过工控机串口下传给 ZigBee 网络的协调器,再经过 ZigBee 网络的传送,最终将控制指令传达到现场控制器。各现场控制器按监控中心发出的指令实时调节本地设备的运行状态,共同实现微电网系统的能量平衡。

本文中的微电网采用图 1 所示的交直流混合拓扑结构。发电单元由风力发电和光伏发电构成,储能装置采用铅酸蓄电池和超级电容器组成的混合储能方式。微电网可以根据实际需求弹性加入柴油发电机等设备进行辅助供电,另外,也可以通过公共连接点与公用配电网连接。该系统中的小型风力发电及太阳能光伏发电单元通过电力电子变换装置汇入直流母线,混合储能装置通过双向功率变换器与直流母线连接。直流母线经过 DC/AC 变换器与交流母线进行能量交换,大中型风力发电机接入交流母线。

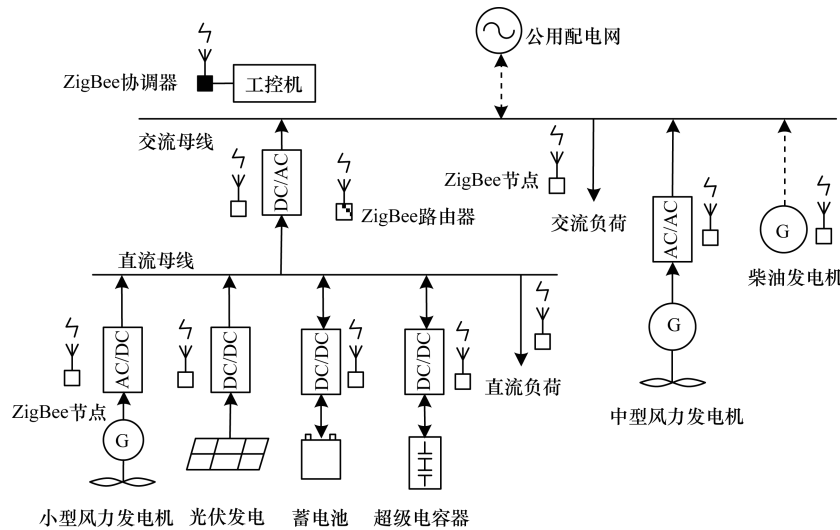


图 1 分布式发电微电网结构

针对上述交直流混合微电网结构形式,本文建立树形结构的 ZigBee 网络,该网络由协调器(网关)、路由器、终端节点 3 类设备构成。ZigBee 网络信息传输分为 2 条路径方向,一方面,终端节点将现场设备的各种信息(如电压、电流、功率、转速、风速、光照等)发送给路由器,再通过路由器转发给协调器,各种数据信息由协调器汇总后通过 RS232 串口上传到由工控机担任的监控中心。另一方面,监控中心的命令经过协调器、路由器下传给终端节点,最终将控制命令传递给现场控制器。

## 2 ZigBee 组网模式

### 2.1 协调器组网

协调器是整个 ZigBee 网络的核心,其功能是负责建立和管理网络。在启动协调器后,将进行扫描并选择合适的频率信道建立网络和设置网络标志符

等操作,然后等待路由器或者终端节点的加入。当协调器扫描到有新节点申请加入网络的信号时,将给每个终端节点分配一个网络地址,并自动将其加入网络。协调器处理的信号包括新节点加入网络请求信号、终端节点上传的数据、监控中心发送给终端节点的控制信号。协调器利用中断方式管理网络,当中断发生后,通过对数据帧的标志位进行辨别,分别进行不同的处理。

ZigBee 网络采用分布式地址分配机制,第  $n$  个 ZigBee 终端节点分配的网络地址由如下公式得到:

$$A_n = A_p + C_{\text{skip}}(d)R_m + n \quad (1)$$

$$C_{\text{skip}}(d) = \frac{(1 + C_m - R_m - C_m R_m (L_m - d - 1))}{(1 - R_m)} \quad (2)$$

其中, $A_p$ 为父节点地址; $C_{\text{skip}}(d)$ 为网络地址的偏移量; $d$ 为路由器所在节点深度; $C_m$ 为子节点最大数目; $R_m$ 为子节点中路由器的最大数目; $L_m$ 为网络最大深度。

## 2.2 路由器中继

路由器作为协调器和终端节点的中介,其功能为扩展延伸 ZigBee 网络的覆盖范围。新入网的节点选择路由距离最近、收发信号最强的路由器作为父节点入网。路由器不具备单独组网功能,也不会向终端节点发送控制命令,只负责转发数据、探寻最佳路由、建立路由表、修复路由等操作。在路由器初始化后,查询信道并选择合适的网络,并向该网络的协调器发送加入请求,在协调器允许后加入网络。

## 2.3 终端节点入网

终端节点能自动搜索并加入预定的网络,但不能转发信息。在终端节点完成初始化后,执行信道扫描、建立邻居表、进行父节点的能量扫描等操作,其依据探测到的信道能量大小决定采用哪个路由器作为父节点,然后发送入网请求信息。终端节点加入某一路由器节点后,将发送一条声明信息给协调器,表明该节点已加入由协调器建立的网络。在入网请求得到协调器响应后,终端节点进入网络监听和等待状态。在终端节点成功加入网络之后,可以将数据包周期性发送给协调器节点。终端节点与路由节点只要彼此在通信范围内,就能够通过自动寻找建立网络连接。在路由节点撤销或当前信道通信质量差导致网络连接断开时,终端节点可以通过重新寻找路由建立网络连接。

## 3 地址唯一性识别

在 ZigBee 网络应用中,通信地址可以选择采用 16 位短地址或 64 位扩展地址。64 位扩展地址是设备出厂时分配的唯一地址。16 位短地址是 ZigBee 组网时由协调器分配的网内动态地址。ZigBee 协议使用 16 位的个域网标志符(PAN ID)标识一个网络,动态短地址只在一个具体的 PAN 网络内唯一。动态地址需要结合 PAN 网络标识符才能与其他网络的设备进行区分。在网络信道连接不畅时,某一终端节点可能脱离网络连接,当该节点重新入网时,协调器会重新为其分配一个动态地址。该终端节点在采用新的动态地址时,若路由表不能实时更新,监控中心存在不能正确识别新动态地址的情况。使用 64 位扩展地址可以识别终端节点的地址,但 64 位扩展地址使得数据包长度增大,导致通信效率下降。

为了使监控中心对现场设备的识别不受动态地址变化的影响,本文利用虚拟物理地址方式对终端节点的地址进行识别。每个与现场设备对应的

ZigBee 终端节点分配一个指定的 8 位虚拟地址,该地址在 ZigBee 网络中具有唯一性。在信息传输时,数据包采用“动态地址”+“虚拟地址”+“现场信号”的方式。当监控中心对接收到的终端节点信息进行地址解析,根据虚拟地址判断终端节点的实际地址。监控中心发送控制信息时,也在控制信号的前面插入虚拟地址后进行数据包下载。终端节点接收到数据包后,判断发送的虚拟地址是否与本地地址一致,如果收到的虚拟地址与本地设备地址不一致,表明 ZigBee 通信错误,该数据包将被抛弃。通过虚拟地址方式可以避免 ZigBee 通信中的动态地址对数据传输的影响,确保微电网监控中心能准确识别设备地址,从而方便实现发电单元的即插即用,增加系统扩展的灵活性,提高微电网系统的可靠性,满足微电网控制实时性需要。Zigbee 通信的数据包格式如图 2 所示。

动态地址	虚拟地址	现场信号1	现场信号2	...
------	------	-------	-------	-----

图 2 Zigbee 通信的数据包格式

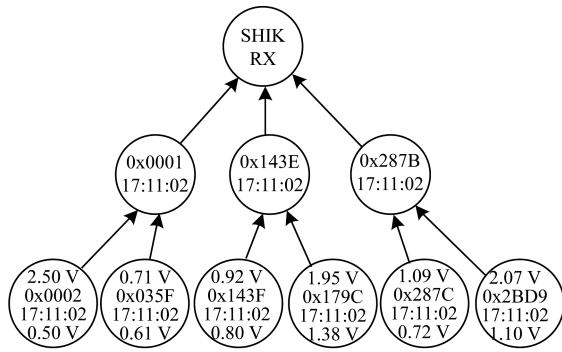
为了提高 ZigBee 通信链路可靠性,各节点就近选择能量峰值高的信道入网。路由算法通过子节点(终端节点)与父节点(包括协调器和路由器)的关系确定路径。在信道能量弱或受到干扰时,子节点可能与父节点脱离成为孤立节点。该孤立节点将重新搜索能量强的信道,从中选择临近的父节点入网,重新入网的子节点动态分配地址不同于脱网前的地址。

## 4 组网实验

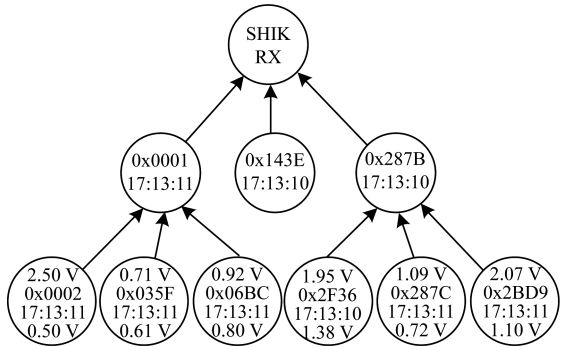
为了验证提出的 ZigBee 无线通信微电网监控网络的可行性,采用 CC2530 芯片建立树形 ZigBee 监控网络。构建的网络由 6 个终端节点、3 个路由器、1 个协调器组成,其中,6 个终端节点分别与分布式发电微电网中的大风电、小风电、大光伏、小光伏、储能和负载单元对应。为提高信号灵敏度和增加网络传输范围,利用 CC2591 功率放大器提高发射功率,并通过 Z-Stack 协议栈的应用层开发用户程序。

### 4.1 地址唯一性验证

通过改变终端节点接入网络的位置,在工控机上用串口观测地址变化情况,验证虚拟地址方式识别终端节点地址的准确性。在 ZigBee 节点 CC2530 接口处输入 0 V ~ 3.3 V 变化的电压,模拟微电网中各发电设备的电压、电流等变换信息。图 3 为虚拟地址唯一性识别验证结果。



(a)路由器2工作时的网络结构



(b)路由器2不工作时的网络结构

00	02	01	C1	27	.....	00	12	4B	00	02	01	77	FD	00	01
03	5F	02	37	2F	.....	00	12	4B	00	02	01	7B	8E	00	01
14	3F	03	47	3E	.....	00	12	4B	00	03	A5	D2	82	14	3E
17	9C	04	97	6B	.....	00	12	4B	00	02	01	78	B9	14	3E
28	7C	05	54	38	.....	00	12	4B	00	03	A5	D4	AC	28	7B
28	D9	06	AD	55	.....	00	12	4B	00	04	07	25	DF	28	7B

(c)初始节点数据包

00	02	01	C1	27	.....	00	12	4B	00	02	01	77	FD	00	01
03	5F	02	37	2F	.....	00	12	4B	00	02	01	7B	8E	00	01
06	BC	03	47	3E	.....	00	12	4B	00	03	A5	D2	82	00	01
2F	36	04	97	6B	.....	00	12	4B	00	02	01	78	B9	28	7B
28	7C	05	54	38	.....	00	12	4B	00	03	A5	D4	AC	28	7B
28	D9	06	AD	55	.....	00	12	4B	00	04	07	25	DF	28	7B

(d)改变节点位置后的数据包

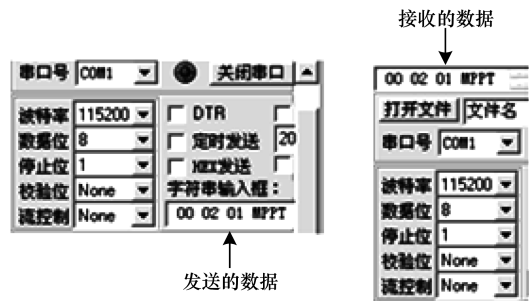
图3 虚拟地址唯一性识别

ZigBee 网络初始结构如图 3 (a) 所示, 终端节点 3、节点 4 接入父节点路由器 2。图 3 (c) 中第 1 字节和第 2 字节是终端节点的动态地址, 第 3 字节是虚拟地址, 第 4 字节、第 5 字节是现场设备的工作信息。在后面部分的数据中, 前 8 字节是每个 ZigBee 终端节点的出厂 MAC 地址, 最后 2 字节是终端节点接入的父节点 (路由器) 地址。图 3 (c) 中第 3 行数据显示节点 3 的动态地址为 143F, 虚拟地址为 03; 节点 4 的动态地址为 179C, 虚拟地址为 04; 其父节点路由器 2 的地址为 143E。

通过屏蔽路由器 2, 使终端节点 3 和节点 4 脱网。然后终端节点 3 和节点 4 将重新扫描信道入网, 这时节点 3 距离路由器 1 近, 并且由于来自路由器 1 信道的能量强, 节点 3 加入路由器 1; 而节点 4 距离路由器 3 近, 节点 4 加入路由器 3; 此时 ZigBee 网络结构演化为图 3 (b)。从图 3 (d) 可以看出,

第 3 行数据显示节点 3 的动态地址变为 06BC, 其父节点路由器 1 的地址为 0001, 但第 3 位虚拟地址仍为 03; 节点 4 的动态地址变为 2F36, 其父节点路由器 3 的地址为 287B, 但第 4 位虚拟地址仍为 04。由于采用虚拟地址传输方式, 监控中心接收到来自协调器的数据后, 提取第 3 位虚拟地址信息, 就可以判断该数据具体来自哪个终端节点对应的设备。由于微电网每个设备单元对应一个 ZigBee 终端节点, 在监控中心中建立记录虚拟地址与微电网单元分别对应关系的数据表, 监控中心就能准确识别来自微电网中各设备单元的信息。

监控中心产生的控制命令经串口发送给协调器, 然后通过路由器中继, 再转发给终端节点。图 4 是控制信息下传实验的地址验证结果, 终端节点接收的数据通过串口调试助手显示。图 4 (a) 是监控中心发送的数据, 其中第 1 字节和第 2 字节是 ZigBee 终端节点的动态地址, 第 3 字节是虚拟地址, 字节“MPPT”表示要求与终端节点 1 连接的风力发电单元执行最大功率跟踪控制的操作指令。图 4 (b) 显示终端节点 1 接收的指令与监控中心发出的指令相同, 表明 ZigBee 网络能够保证信息准确传达。



(a)监控中心指令发送

(b)终端节点指令接收

图4 数据下传地址验证过程

### 4.2 通信稳定性测试

由于实际环境中的电磁干扰影响, 无线通信传输达到一定距离后, 其抗干扰性能将会下降。对 ZigBee 网络在不同距离的通信丢包率和误码率进行测试, 验证其通信稳定性。测试工作在大学校园内进行, 实验时存在行人和车辆通行等障碍物遮挡 ZigBee 通信路径的情况。测试用的数据包由 2 字节目标地址与 8 字节信息构成, 每组数据由 50 个数据包组成。测试步骤如下: 开启 ZigBee 协调器; 终端节点接入网络; 启动与协调器连接的计算机串口软件; 串口软件收到发送消息指令后发送消息包; 终端设备收到数据并且保存。测试结果表明: 在 100 m 距离以内 ZigBee 设备可以进行稳定的数据传输; 距

离超过 100 m 时,丢包开始增加,110 m 时的丢包率为 4%。当通信距离最远达到 260 m,仍然可以探测到信号,但是通信效果非常不好,线路时断时连,同时丢包率严重升高。测试中改变串口波特率,分别设置为 115 200 b/s 和 38 400 b/s,但波特率的改变并没有影响丢包率的变化。加入功率放大器 CC2591 后,延长了通信距离且提高了稳定效果,相同距离丢包率明显下降,在 1 000 m 以内可以保证数据的准确传输,此距离能够满足微电网控制信息传输的需求。由于实验过程中存在行人阻碍、天气变化、附近干扰源等的影响,某些测量数据存在误差。

## 5 结束语

ZigBee 无线通信具有网络容量大、传输速率相对较高、占用频段免费的优点,可以作为分布式发电微电网信息传输的载体。本文提出 ZigBee 无线通信微电网监控网络,采用将虚拟地址与传输数据绑定的方式,使微电网监控网络避免因动态分配地址对现场设备地址识别不准确的问题。采用节点就近选择能量峰值高的信道入网,可以提高通信链路的可靠性。实验结果表明,组建的 ZigBee 网络能够稳定传输数据,地址识别准确可靠。本文设计的 ZigBee 无线通信监控网络能够满足分布式发电微电网监控信息传输的要求,增加微电网系统的开放性和易扩展性。

## 参考文献

- [1] 陈新,姬秋华,刘飞.基于微电网主从结构的平滑切换控制策略[J].电工技术学报,2014,29(2):163-170.
- [2] 高春风,杨仁刚,王江波.基于虚拟频率的微电网下垂控制策略设计[J].电网技术,2013,37(12):3331-3335.

- [3] 张庆海,彭楚武,陈燕东.一种微电网多逆变器并行运行控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(25):126-132.
- [4] Khorsandi A, Ashourloo M, Mokhtari H. Automatic Droop Control for a Low Voltage DC Microgrid[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2016, 10(1): 41-47.
- [5] 王毅,张丽荣,李和明.风电直流微电网的电压分层协调控制[J].中国电机工程学报,2013,33(4):16-24.
- [6] Thale S, Wandhare R, Agarwal V. A Novel Reconfigurable Microgrid Architecture with Renewable Energy Sources and Storage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1805-1816.
- [7] 李哲,刘澄,徐石明.微电网协调控制过程中 EtherCAT 总线的应用[J].电力系统自动化,2012,36(24):39-43.
- [8] 徐焜耀,徐鑫,侯兴哲.构建新一代智能配用电通信网建议[J].电力系统自动化,2013,37(10):1-5.
- [9] 王雪,钱志鸿,李冰.蓝牙自适应分组选择策略与选择重传算法研究[J].通信学报,2011,32(1):151-158.
- [10] 廖鹏飞,陈庆奎.基于蓝牙 4.0 到 3G 的无线传感器网关设计与实现[J].计算机工程,2015,41(9):13-18.
- [11] 牛建伟,刘洋,卢邦辉.一种基于 Wi-Fi 信号指纹的楼宇内定位算法[J].计算机研究与发展,2013,50(3):568-577.
- [12] 徐潇潇,谢林柏,彭力.基于 WiFi 信号强度特征的室内定位系统设计[J].计算机工程,2015,41(4):87-91.
- [13] Ahmed M, Kang Y, Kim Y. Communication Network Architectures for Smart-house with Renewable Energy Resources[J]. Energies, 2015, 8(8): 8716-8735.
- [14] 唐伟华,石高涛. ZigBee 网络中基于概率 CSMA 的 WiFi 干扰避免方法[J].计算机工程,2016,42(4):55-59.
- [15] Chen Yu-kai, Wu Yung-chun, Song Chau-chung, et al. Design and Implementation of Energy Management System with Fuzzy Control for DC Microgrid Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1563-1570.

编辑 刘冰

(上接第 72 页)

- [9] Edel N K, Tuteja D, Miller E L, et al. MRAMFS: A Compressing File System for Non-volatile RAM [C]// Proceedings of the IEEE Computer Society's 12th Annual International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2004: 596-603.
- [10] Doh I H, Choi J, Lee D, et al. Exploiting Non-volatile RAM to Enhance Flash File System Performance [C]// Proceedings of the 7th ACM & IEEE International Conference on Embedded Software. New York: ACM Press, 2007: 164-173.
- [11] Doh I H, Lee H J, Moon Y J, et al. Impact of NVRAM Write Cache for File System Metadata on I/O Performance in Embedded Systems [C]// Proceedings of the 2009 ACM Symposium on Applied Computing.

- New York, USA; ACM Press, 2009. 1658-1663.
- [12] Suk J, No J. HybridFS: Integrating NAND Flash-based SSD and HDD for Hybrid File System [C]// Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Applied Informatics and Communications. New York, USA: ACM Press, 2010: 178-185.
- [13] Wang A I A, Kuenning G, Reiher P, et al. The Conquest File System: Better Performance Through a Disk/persistent-ram Hybrid Design [J]. ACM Transactions on Storage, 2006, 2(3): 309-348.
- [14] 刘扬宽. 分布式文件系统中新型元数据管理子系统的研究与实现 [D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- [15] 李帅. 分布式文件系统中基于非易失存储器的缓存子系统 [D]. 镇江: 江苏大学, 2013.

编辑 刘冰