

# 改进重复控制方法在并联型有源电力滤波器中的应用研究

周 虎<sup>1</sup>, 雷艾虎<sup>2</sup>, 李文龙<sup>3</sup>, 吴丽珍<sup>2</sup>

(1. 甘肃省电力公司, 兰州 730030; 2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050;  
3. 国网甘肃省电力公司武威供电公司, 甘肃 武威 733000)

摘要: 有源电力滤波器的电流控制器设计直接影响电流谐波的补偿效果, 采用比例积分 PI 控制跟踪交流信号时存在静差, 而基于内模原理的重复控制在特定频率处有无穷大的增益, 能够实现电流无静差跟踪, 但系统动态响应速度慢。因此, 该文提出将 PI 前馈控制与重复控制相结合的改进重复控制方法。该方法能够对电流进行无静差跟踪, 且对系统谐波具有较好的抑制效果。通过 Matlab/Simulink 仿真软件和 APF 装置验证了系统对电流谐波具有较高的补偿精度且系统的动态性能较好。

关键词: 有源电力滤波器; 电流控制器; PI 前馈控制; 改进重复控制; 谐波补偿

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1000-0682(2017)04-0030-05

## The application research of improved repetitive control method in shunt active power filters

ZHOU Hu<sup>1</sup>, LEI Aihu<sup>2</sup>, LI Wenlong<sup>3</sup>, WU Lizhen<sup>2</sup>

(1. Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730030, China;  
2. College of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;  
3. State Grid Gansu Electric Power Company Wuwei Electric Power Supply Company, Gansu Wuwei 733000, China)

Abstract: The current controller design of active power filter( APF) affects the compensation performance of current harmonics directly; the conventional proportional( PI) integration control is unable to track sinusoidal signals without steady - state error and the repetitive control based on the internal model principle can track sinusoidal signals without steady - state error, since it introduces infinite gain at the sinusoidal frequencies. However, the dynamic response of repetitive control is slow. Therefore, this paper proposes an improved repetitive control method, which combined PI feedforward control and repetitive control; the method can track current without steady - state error and has a good inhibitory effect on system harmonics. Through the Matlab/Simulink software and APF device, it is proved that the system has high compensation accuracy for current harmonics and the dynamic performance is better.

Key words: active power filter; current controller; PI feedforward control; improved repetitive control; harmonic compensation

### 0 引言

有源电力滤波器( Active Power Filter, APF) 由

于在抑制谐波方面性能较为优越, 受到了人们的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。目前, 对 APF 的研究有了较大的发展, 主要集中在对 APF 补偿效果的研究, 当电网谐波含量比较高的情况下, APF 对谐波电流的跟踪以及系统可靠性方面的研究较少, 有必要进一步深入研究。对于并联型的 APF, 其主要核心是设计电流控制器。当前的 APF 装置中的电流控制器主要采用自适应控制方法<sup>[1]</sup>、选择性谐波电流控制方

收稿日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目( 51467009); 兰州市科技计划项目( 2016-3-67)

作者简介: 周虎( 1973) 男, 甘肃兰州人, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统稳定与控制, 分布式发电及微电网的运行控制。

法<sup>[2]</sup>、PI控制方法<sup>[3]</sup>、重复控制方法<sup>[4]</sup>等。采用这些控制方法设计的APF装置均具有不同的优缺点,可以根据实际工程要求,选择最合适的电流控制方法设计APF装置。自适应控制方法在实际工程应用中,对参数的设定要求较高,难于实现;PI控制方法较为简单,容易实现,能够对直流信号无稳态误差跟踪,但对交流信号控制较差;重复控制能对交流信号进行无静差控制,但系统动态响应较差。

该文综合重复控制方法和PI控制方法的各自特点,提出一种重复控制与PI前馈控制相结合的改进重复控制方法。而所提的控制方法中,需要对各次谐波设计补偿函数,工程计算量较大,为此,结合选择性谐波电流补偿方法对主要次谐波点采用所提改进重复控制方法,而对其他谐波点采用PI控制,简化了工程设计,能够提高对电流的补偿精度,且动态性能较好。

### 1 并联型 APF 装置控制策略

对于并联型 APF 装置,常采用电压电流双环控制策略<sup>[5]</sup>。电压外环是为了使直流侧电容电压稳定,而电流环是为了快速跟踪负载电流的变化,补偿网侧电流谐波。电流环的控制效果直接影响 APF 装置对谐波电流的补偿能力。为实现 APF 补偿后网侧负载电流的畸变率满足小于 5% 的国家标准<sup>[6]</sup>,同时具有良好的动态性能,该文提出的电流环采用 PI 控制与重复控制相结合的控制策略,APF 装置控制结构如图 1 所示。

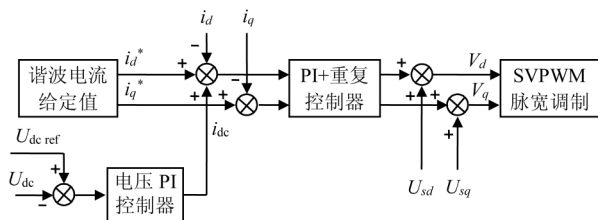


图 1 APF 装置控制结构原理图

APF 装置的控制系统主要由谐波电流提取模块、直流电压控制器和电流控制器构成。首先谐波检测模块采用多同步直接谐波提取方法实现电网负载的主要次谐波提取,获得 dq 坐标系下的谐波电流分量  $i_d^*$  和  $i_q^*$ ;再分别与 APF 输出的补偿电流  $i_d$  和  $i_q$  叠加送入电流控制器中。电流控制器要求具有很高的电流跟踪速度,对变化较大的负载电流进行补偿,在此,采用 PI 前馈控制与重复控制相结合的控制策略,具有 PI 控制的快速动态响应,同时重复控制克服了采用 PI 控制对谐波电流存在稳态误差的

缺陷,使得电流控制器能够快速、无稳态误差地跟踪负载电流。为了稳定 APF 直流侧电压,还常常需要设计电压控制器。电压控制器对电压跟踪速度远低于电流控制器,约为电流控制器的十分之一,而且电压为直流量,因此,采用 PI 控制方法能够实现对直流侧电压的无静差控制。具体是将直流侧电压参考值  $U_{dc\ ref}$  与实际测量得到的电容侧直流电压  $U_{dc}$  求差后,经 PI 控制器得到电流  $i_{dc}$ ,再将该电流叠加到电流控制器中。

此外,为了在补偿谐波电流的同时改善电网的电压质量,引入了电网电压前馈控制环节。分别将前馈电压  $U_{sd}$  和  $U_{sq}$  与电流控制器的输出电压叠加求和,得到 SVPWM 控制电压  $V_d$  和  $V_q$ ,经过 SVPWM 调节器产生 APF 中 PWM 的驱动脉冲信号,实现谐波电流的补偿和直流电压稳定控制以及电网侧电压质量的改善。

### 2 基于改进重复控制的 APF 电流控制器设计

#### 2.1 重复控制方法

重复控制是基于内模原理的一种控制方法,它对前一个周期的误差信号进行采集,然后在下一个周期输出,并将误差累加,直至为零,最终实现无静差跟踪<sup>[7]</sup>。重复控制原理框图如图 2 所示。

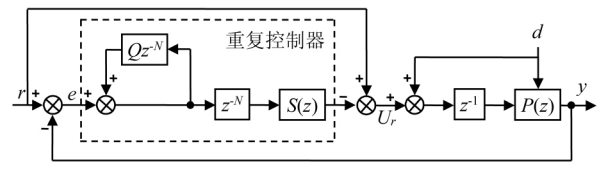


图 2 重复控制原理框图

图中  $r$  为参考信号; $e$  为误差信号; $Q$  为辅助补偿器,一般取小于 1 的积分衰减系数, $Q$  的取值与系统的稳定性相关,按照工程经验, $Q$  一般取值为 0.95。 $z^{-N}$  为一个基波周期的延时环节; $N$  为每个周期的采样点数; $S(z)$  为针对控制对象设计的补偿函数; $U_r$  为控制输入参考值; $d$  为扰动信号; $P(z)$  为离散被控对象; $y$  为系统输出。在工程应用中,重复控制器内模可以看作是一种对信号周期性的积分,其离散形式为:

$$G_{RC}(z) = \frac{z^{-N}}{1 - Qz^{-N}}S(z) \tag{1}$$

重复控制器通过实时检测  $r$  和  $y$  的偏差  $e$ ,通过内模逐周期地对偏差信号进行积分,直至系统输出的跟踪误差为零。可见,重复控制方法对周期性、重

复性的信号具有较高的增益。但是,当输入信号变化时,由于延迟环节  $z^{-N}$  的存在,使得输出产生一个基波周期的延迟,此时系统处于开环控制状态,系统临界稳定。因此,采用重复控制方法后使得系统的动态性能变差。

### 2.2 改进重复控制器设计

为克服单一的重复控制存在输出动态性能较差的缺陷,考虑传统的 PI 控制动态响应速度好但控制交流信号时存在稳态误差的缺点,综合重复控制和 PI 控制各自的优点,提出了一种改进的重复控制方法,将单一重复控制的指令前馈通道改为 PI 前馈控制,并将该方法应用于 APF 装置中,其控制结构如图 3 所示。所提改进重复控制仅仅对前馈通道加以改进,以确保控制系统的动态性能,而对系统的特征方程没有影响,因此可以采用传统的重复控制方法进行系统的稳定性分析与设计。

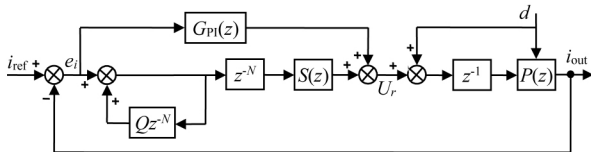


图 3 改进重复控制的结构图

重复控制器中补偿函数  $S(z)$  的设计对于控制系统的性能影响较大。实际的 APF 装置中,对周期性工频电流信号的跟踪,会带来高频谐波电流信号,可以通过设计合理的补偿函数  $S(z)$  实现谐波电流的抑制。 $S(z)$  的设计取决于等效控制对象  $G_p(z)$  的特性。由图 3 可知,系统闭环传递函数为:

$$G(z) = \frac{(z^N - Q) G_{PI}(z) z^{-1} P(z) + S(z) z^{-1} P(z)}{(z^N - Q) (1 + G_{PI}(z) z^{-1} P(z)) + S(z) z^{-1} P(z)} \quad (2)$$

令式(2)的分母为 0,得到控制系统的特征方程为:

$$\Delta = (z^N - Q) (1 + G_{PI}(z) z^{-1} P(z)) + S(z) z^{-1} P(z) = (1 + G_{PI}(z) z^{-1} P(z)) \cdot [z^N - (Q - \frac{S(z) z^{-1} P(z)}{1 + G_{PI}(z) z^{-1} P(z)})] = \Delta_1 \Delta_2 = 0 \quad (3)$$

此外,令等效的被控制对象  $G_p(z)$  为:

$$G_p(z) = \frac{z^{-1} P(z)}{1 + G_{PI}(z) z^{-1} P(z)} \quad (4)$$

由式(3)可知,要使控制系统稳定工作,需确保  $\Delta_1 = 0$  和  $\Delta_2 = 0$  的所有特征值均落在单位圆内。其中,若仅  $\Delta_1 = 0$  的所有特征值落在单位圆内,则 PI 控制器单独作用时,控制系统稳定;若仅  $\Delta_2 = 0$  的所有特征值落在单位圆内,则以  $G_p(z)$  为控制对象的重复控制器单独作用时,

控制系统稳定。

此外,APF 装置电流环采用重复控制策略的主要目的是提高系统抑制工频谐波电流的能力,因此,对于补偿函数  $S(z)$  可以选用低阻尼谐振滤波器,以此抑制其他频率范围内的谐波电流。以 5 次谐波为例,其低阻尼谐振滤波器为<sup>[8]</sup>:

$$S_5(z) = \frac{3.125e - 10(z + 1)}{z^2 - 1.999z + 1} \quad (5)$$

一般采用超前环节  $z^{N_5}$  来补偿  $S_5(z)$  在谐振点的相移。因此,完整的补偿函数  $S(z)$  由各次谐波的谐振滤波器相加组成,其表达式为:

$$S(z) = z^{N_5} S_5(z) + z^{N_7} S_7(z) + \dots + z^{N_n} S_n(z) \quad (6)$$

式中:  $z^{N_n}$  为  $n$  次谐波的相位补偿函数,  $S_n(z)$  为对应的谐振滤波器。补偿函数可以保证  $S(z) P(z)$  在谐波的频率处具有足够高的增益,满足较高的稳定性要求。

此外,从式(6)中可以看出,补偿函数由各次谐波谐振滤波器叠加而成,意味着需要对各次谐波都设计补偿函数,这在工程中较难且不现实。在实际应用设计中,可以根据需要对主要次谐波采用所提的改进重复控制策略,而对于幅值较小的高次谐波则采用传统的单一 PI 控制策略。一般选择  $n = 5, 7, 9, 11, 13, 17$  等主要次谐波进行改进重复控制补偿,就能实现较好的谐波电流补偿效果。

### 3 仿真与实验分析

为验证所提控制方法的有效性,该文在 Matlab/Simulink 软件搭建了 1 台 400 V/50 A 的 APF 及其控制系统仿真模型,带 1 台 35 V/1500 A 的开关电源负载,由不可控制整流和阻感负载构成。分别进行了单一的 PI 控制和所提的改进重复控制方法的仿真和实验验证,仿真与实验样机的参数见表 1。

表 1 APF 仿真与实验系统参数

参数	数值
系统线电压 $U/V$	380
输出电感 $L/mH$	0.3
直流侧电容 $C/\mu F$	8100
开关频率 $F/kHz$	10
阻性负载 $R/\Omega$	30
感性负载 $X/mH$	0.1

加入 APF 补偿之前的网侧负载电流与 FFT 分析结果如图 4 所示。从图中的电流波形可以看出,三相电流波形含大量谐波,发生严重畸变。对单相电流做 FFT 频谱分析可知,总谐波畸变率(Total Harmonic

Distortion , THD) 达到 26.83 % ,尤其是 5 , 7 , 11 次的谐波含量均大于 5% 。

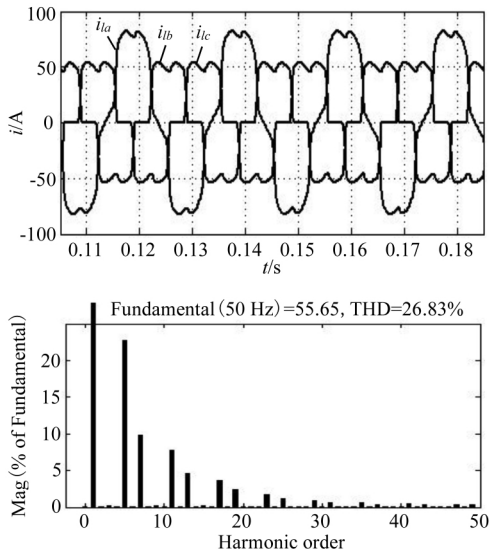


图 4 网侧的负载电流和 FFT 分析

图 5 为 APF 电流控制器仅采用 PI 控制对系统电流补偿后的网侧负载三相电流波形和 FFT 频谱分析结果。可见 , 电流波形明显得到改善 , THD 下降到 9.32% ; 但 5 , 7 , 11 次的谐波含量仍然很高。

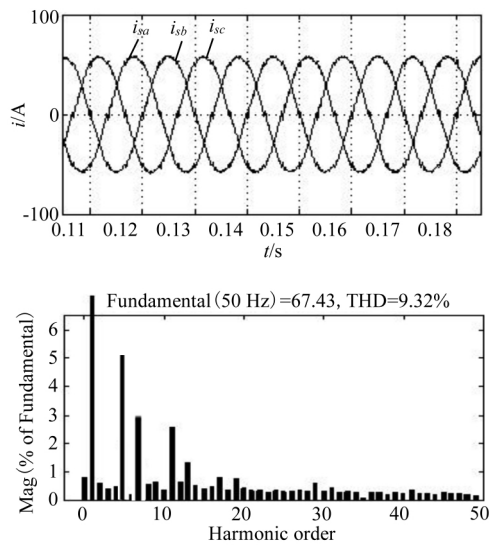


图 5 PI 控制补偿后的负载电流波形和 FFT 分析

图 6 为 APF 电流控制器采用所提控制方法对系统电流补偿后的结果。从图 6 中可以看出 , 相对于单一的 PI 控制 , 采用所提的 PI 前馈控制的重复控制方法 , 网侧负载电流的畸变率显著降低 , 电流 THD 下降到 2.55 % , 满足国家标准。各次谐波含量均显著减少 , 且各主要次谐波分量均降到 1% 以下。可见 , 电流环采用所提的改进重复控制策略设计的 APF 对谐波电流补偿效果很好。

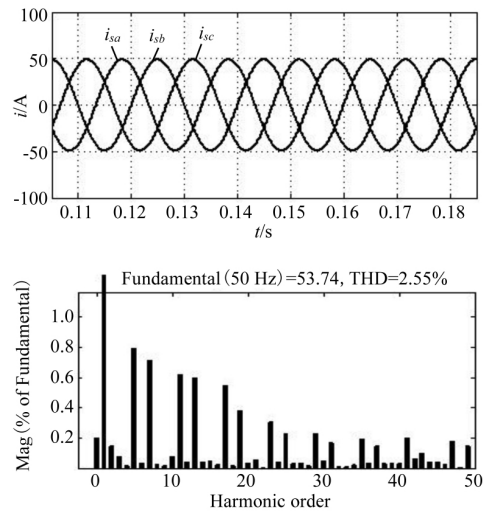


图 6 所提控制策略补偿后电流波形和 FFT 分析

图 7 为所提控制策略的动态性能测试波形。从图中可以看出 , 在负载突增一倍的情况下 , APF 能够在 一个周波内跟踪负载电流变化且无明显超调 , 具有较快的电流跟踪速度和较好的系统动态性能。

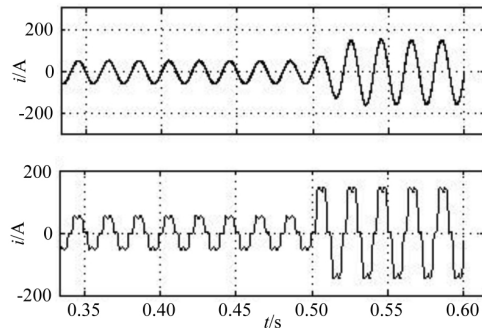
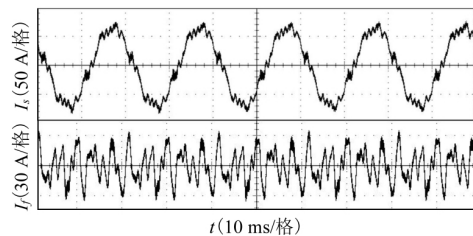
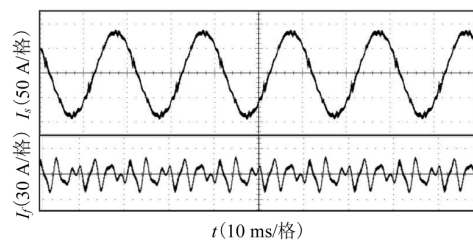


图 7 负载变化情况下的电流波形

为了验证所提控制策略的正确性 , 搭建了 APF 装置实验平台 , 其实验参数与仿真一致。



a 单纯 PI 控制的网侧电流和 APF 电流波形



b 改进的重复控制网侧电流和 APF 输出波形

图 8 两种控制方法补偿后的网侧电流实验波形

图 8 为分别采用两种控制方法补偿后的网侧电流  $I_s$  和 APF 装置输出电流  $I_f$  的实验波形图。从图 8 中可以看出, 电流环仅采用 PI 控制方法, 补偿后网侧电流谐波含量较大, 达不到要求; 而采用所提的改进重复控制方法对电流补偿精度较高。综上可知, 实验与仿真结果相吻合, 进一步验证了 APF 装置采用该文提出的改进重复控制方法比仅采用 PI 控制控制方法对电流有更强的补偿能力, 且动态性能较好。

#### 4 结语

该文分析了 PI 控制和重复控制的优缺点, 结合了重复控制与 PI 控制的各自优势, 提出了一种 PI 前馈控制与重复控制相结合的改进重复控制方法。APF 装置采用所提的改进重复控制方法设计电流控制器, 能够较好地抑制工频谐波电流, 且对电流能够实现无静差跟踪。通过仿真和 APF 装置, 验证了所提改进重复控制策略对电流具有较好的补偿效果, 且动态性能较快。

参考文献:

[1] 付青, 罗安, 王莉娜. 基于自适应智能控制的混合有源

(上接第 29 页)

找到一个已经存在的源端点到目的地址的绑定记录 BindingEntry\_t \* bindFindExisting( )。

#### 3 结论

ZigBee 灵活多样的组网方式以及近距离、自组织、低功耗、低成本的特点, 使其在各种控制领域得到广泛的应用, 也是物联网实现的重要技术。多种不同的通信模式使得 ZigBee 无线网络具有灵活的通信方式和控制方式, 熟练掌握并运用这些通信模式, 将更加广泛地推动 ZigBee 技术的发展和运用。

参考文献:

[1] 杜军朝, 刘惠, 刘传益, 等. ZigBee 技术原理与实践 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.  
 [2] 江华丽, 王平, 冯志斌, 等. 基于 ZigBee 应用的技术研究与设计[J]. 计算机系统应用, 2016, 25(2): 272-277.  
 [3] 黄太波, 赵华伟, 潘金秋, 等. ZigBee 协议栈的安全体系综述[J]. 山东科学, 2012, 25(2): 59-66.  
 [4] 王骥, 林杰华, 谢仕义. 基于无线传感网络的环境监测系统[J]. 传感技术学报, 2015, 28(11): 1732-1740.  
 [5] 徐丽萍. ZigBee 技术浅析[J]. 南京工业职业技术学院学报, 2011, 11(4): 28-31.

电力滤波器复合控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 46-51.  
 [2] 张树全, 戴珂, 谢斌, 等. 多同步旋转坐标下指定次谐波电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 55-62.  
 [3] 唐欣, 罗安. 基于递推积分 PI 的混合型有源电力滤波器电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 23(10): 38-41.  
 [4] 王智强. 基于重复控制的大容量并联型有源电力滤波器的几个关键技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
 [5] 杨新华, 谢兴峰, 马建立, 等. 并联有源滤波器的一种高可靠性控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 128-133.  
 [6] Zeliang S, Shaofeig X, Qunzhar L L. Single-Phase Back-To-Back Converter for Active Power Balancing, Reactive Power Compensation, and Harmonic Filtering in Traction Power System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 334-343.  
 [7] 张兴, 汪杨俊. LCL 并网逆变器改进型重复控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 101-107.  
 [8] 王斯然, 吕征宇. LCL 型并网逆变器重复控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 69-75.

[6] 金诗博. 无线传感器网络的多种通信方式综述[J]. 船舶职业教育, 2014, 2(3): 41-43.  
 [7] 彭燕. 基于 ZigBee 的无线传感器网络研究[J]. 现代电子技术, 2012, 34(5): 49-51.  
 [8] 徐振峰, 尹晶晶, 陈小林, 等. 基于 ZigBee 协议栈的无线传感器网络的设计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(5): 75-81.  
 [9] 饶达琴, 张文超. 基于 ZigBee 的自愈自组网的设计与应用[J]. 电子设计工程, 2012, 20(23): 111-116.  
 [10] 路染妮, 张刚. ZigBee 无线传感网络的路由协议研究[J]. 电子设计工程, 2010, 18(11): 182-185.  
 [11] 郝永亮, 杨铁梅. 基于 CC2430 的 ZigBee 无线通信模块设计[J]. 机械工程与自动化, 2012, 8(4): 198-200.  
 [12] 丁雪莲. ZigBee 协议栈浅析[J]. 电脑与信息技术, 2013, 21(5): 18-21.  
 [13] 喻涛, 熊智鹏, 朱述敏, 等. 基于 ZigBee 的无线通信技术的研发与应用[J]. 电气与自动化, 2016, 45(3): 217-219, 223.  
 [14] 童英华. 基于 Z-Stack 的无线温湿度采集系统[J]. 现代电子技术, 2012, 35(23): 115-117.  
 [15] 朱恒军, 张玉龙, 靳展, 等. 基于 ZigBee 的室内空气环境监控系统设计[J]. 电子技术应用, 2015, 41(2): 86-88.