

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.02.019

# 基于数字直接频率合成的 B 型 剩余电流动作特性测试装置

杜 量<sup>1,2</sup>, 谢振华<sup>1,2</sup>, 王 尧<sup>3,4</sup>, 师顺泉<sup>5</sup>, 王天朔<sup>3,4</sup>

(1. 浙江省机电产品质量检测所, 浙江 杭州 310051; 2. 浙江省机电设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310051;  
3. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130; 4. 河北工业大学  
河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130; 5. 阿滨仪器(天津)有限公司, 天津 300401)

**摘要:**针对现有 B 型剩余电流动作特性测试装置适应性相对较弱的问题,对任意波形剩余电流动作特性测试技术进行了研究。在分析剩余电流动作保护电器测试要求的基础上,提出了一种基于直接数字合成(DDS)技术的 B 型剩余电流动作特性测试装置,该装置以 DSP 和 FPGA 为控制核心,采用数字直接频率合成技术产生了任意波形剩余电流信号,并用 PID 反馈控制方法实现了恒流输出。设计结果表明:剩余电流动作特性测试装置剩余电流频率范围可达 1 kHz,输出电流有效值达到 30 A,满足相关标准要求。

**关键词:**剩余电流保护;测试方法;任意波形恒流技术;直接数字合成器

中图分类号:TM933.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)02-0213-05

## Test equipment for type B residual current devices based on direct digital synthesizer

DU Liang<sup>1,2</sup>, XIE Zheng-hua<sup>1,2</sup>, WANG Yao<sup>3,4</sup>, SHI Shun-quan<sup>5</sup>, WANG Tian-shuo<sup>3,4</sup>

(1. Zhejiang Testing & Inspection Institute For Mechanical And Electrical Products Quality, Hangzhou 310051, China; 2. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310051, China;  
3. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 4. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;  
5. Arbin Instruments (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Aiming at the issue of less adaptability of conventional test equipment for type B residual current device, a direct digital synthesizer (DDS) based test equipment was put forward according to the test requirement. Arbitrary waveforms of residual current could be generated accurately benefit from the well-designed DDS signal generator, which was controlled by DSP and FPGA microcontrollers. In order to stabilize the output current, a PID based feedback control strategy was introduced. The results indicate that the test equipment can output arbitrary residual current with a frequency bandwidth of 1 kHz, and current range of 0~30 A, so as to meet the requirements of the relevant standards for residual current device.

**Key words:** residual current protection; test method; arbitrary waveform constant current technology; direct digital synthesizer (DDS)

收稿日期:2018-09-11

作者简介:杜 量(1966-),男,浙江杭州人,高级工程师,主要从事低压电器检测方面的研究。E-mail:liangd298@163.com

## 0 引 言

电气线路或用电设备绝缘破损而产生的漏电故障是人身触电及电气火灾事故的重要诱因,国内外普遍采用剩余电流保护电器(residual current device, RCD)进行漏电故障保护<sup>[1-5]</sup>。RCD 的剩余电流动作特性(主要包括剩余动作电流及动作时间)直接关系到漏电保护的有效性,是产品型式试验及出厂检验的重要考核项目,必须经过专用检测设备严格测试。根据剩余电流含有直流分量时 RCD 动作特性的不同,RCD 可分为 AC 型、A 型、F 型和 B 型。

随着电力电子技术的发展,越来越多的电气设备采用变频驱动技术,如电机变频调速系统、变频空调、变频洗衣机等。当这些设备发生漏电故障时<sup>[6]</sup>,传统的 AC 型或 A 型 RCD 不能起到保护作用,此时需要使用 B 型 RCD 进行保护。国外对 B 型漏电保护的研究与应用已相对成熟。国际电工委员会(IEC)早在 2007 年就发布了 B 型 RCD 相关标准<sup>[7]</sup>。ABB、Siemens 等国际电气厂商均已推出 B 型 RCD 产品,但因价格昂贵,一般用户很难承受。我国虽然等同采纳并颁布了 B 型 RCD 标准,但该项技术的研究尚处于起步阶段,尚未见相关产品面市。目前国内仍以 AC 型 RCD 应用为主。

诸多因素制约了我国剩余电流保护技术的发展,除了需要研究高精度 B 型剩余电流量测技术外,还需要突破 B 型剩余电流波形产生方法及相关测试技术。然而,在剩余电流动作保护电器试验测试技术研究方面,国内外研究相对较少。温州出入境检验检疫局低压电器实验室王建新等人<sup>[8]</sup>利用交流电压源配合负载电阻产生交流大电流进行了剩余电流保护器测试。河北工业大学张军伟等人<sup>[9]</sup>采用任意波形电压源配合负载电阻进行了 B 型 RCD 测试。上海电器科学研究所胡敏等人<sup>[10]</sup>设计并研制了一种用于 B 型剩余电流断路器,包含剩余不动作电流、剩余动作电流、脱扣时间等测试功能的测试仪器。但是,现有剩余电流产生方法和测试设备仅能满足 B 型 RCD 标准考核要求,无法适应未来发展趋势。因此,需要开展任意波形剩余电流产生方法及相关测试装置研究。

在分析剩余电流动作保护电器测试要求的基础上,本文提出一种基于直接数字合成(DDS)技术的 B 型剩余电流动作特性测试方法。

## 1 RCD 剩余电流动作特性测试要求

根据 GB 22794—2008《家用和类似用途的不带和

带过电流保护的 B 型剩余电流动作断路器(B 型 RC-CB 和 B 型 RCBO)》及 GB14048.2—2008《低压开关设备和控制设备第 2 部分:断路器》<sup>[11-12]</sup>,不同类型 RCD 剩余电流脱扣特性如图 1 所示。

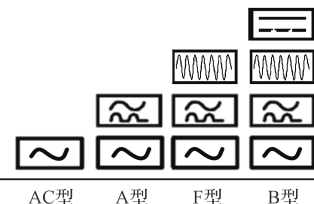


图 1 各类 RCD 剩余电流脱扣特性

由图 1 可以看出:B 型 RCD 可保护剩余电流波形范围最广,AC 型 RCD 可保护范围最差。这就意味着,剩余电流动作特性测试装置应能输出不同波形剩余电流测试信号,并能根据不同类别 RCD 产品准确判断其动作特性的正确性。可以预见,随着电子技术的发展,未来可能出现更复杂的剩余电流波形,因而剩余电流动作特性测试装置也应具有任意波形输出能力,以满足未来技术发展需要。

根据相关标准要求,B 型剩余电流动作特性测试装置应能产生正弦交流、脉动直流以及平滑直流剩余电流波形,其中正弦交流剩余电流应涵盖工频至 1 kHz 频率范围。交流剩余电流输出值以有效值表示,而直流剩余电流输出值则以平均值表示。根据 GB16917.1 ~ 2014 9.9.1,剩余电流在 30 mA 以下,测试装置测量精度应为  $\pm 3.5\%$ ;剩余电流在 30 mA 以上,测试装置测量精度应为  $\pm 5\%$ 。时间为 10 ms ~ 200 ms,测试装置时间测量精度为  $\pm 5\%$ ;时间为 200 ms ~ 1 s 之间,测量时间精度为 10 ms。

此外,为了便于测试人员操作,B 型剩余电流动作特性测试装置还应具有以下功能:

- (1) 剩余电流参数实时控制与显示;
- (2) 试验数据自动记录;
- (3) 具有通讯功能,能与上位机进行通讯,实现数据的传输和存储;
- (4) 具有波形编辑功能,能够产生任意波形的剩余电流。

## 2 基于 DDS 的剩余电流动作特性测试装置设计

### 2.1 DDS 技术原理

根据 B 型 RCD 剩余电流动作特性测试要求,要高保真输出不同波形剩余电流信号,需要研究具有一定

带宽的任意波形信号产生及功率放大方法。考虑到各类电力电子设备 PWM 开关频率一般在 30 kHz 以内,因此任意波形信号源及功率放大电路的带宽不应低于 30 kHz。为了满足信号精度、带宽及实时性要求,可以采用直接数字频率合成技术进行任意波形剩余电流信号发生。DDS 技术原理如图 2 所示。

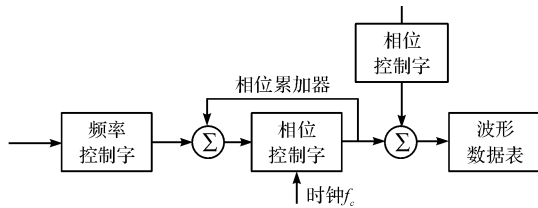


图 2 DDS 技术原理

剩余电流波形数据存储于系统 ROM 中,在系统时钟驱动下通过数字/模拟转换(DAC)生成所需剩余电流波形,其关键在于如何控制相位累加器工作时序,以保证剩余电流幅值与相位的准确性。

根据 DDS 工作原理可以得到:

$$f = \frac{F \times f_c}{2^N} \quad (1)$$

式中: $f_c$ —时钟信号; $N$ —相位累加器控制字; $F$ —频率控制字。

由式(1)可知,调整输出控制字  $F$  即可改变输出频率;相位控制字  $N$  直接控制波形数据输出,可调整输出波形相位。上述算法实现了幅值、频率、相位的任意可调。

### 2.2 基于 DDS 的剩余电流测试装置工作原理

基于 DDS 的剩余电流测试装置工作原理如图 3 所示。

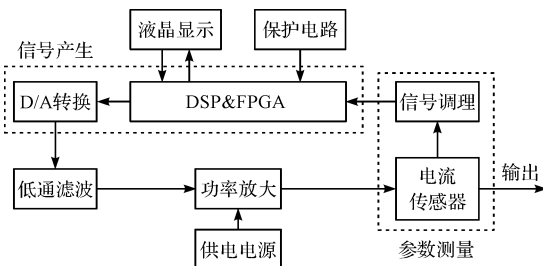


图 3 剩余电流测试装置工作原理

该装置以 DSP 和 FPGA 为控制核心<sup>[13]</sup>,主要包括剩余电流信号发生、功率放大、参数测量以及显示和保护部分。

该装置利用精密电流传感器进行输出电流测量<sup>[14]</sup>,经信号调理电路将采样信号反馈给 DSP 进行恒流控制。此外,为了便于用户操作,该测试装置具有液晶触摸屏,通过 RS-232 串口通讯方式与 DSP 进行实

时通信,实现试验过程监控及试验数据显示与存储。

为了便于测试,本文设计了基于任意波形发生功能。用户可以通过串口通讯将特定格式的剩余电流波形数据输入到上位机数据库中,下位机读取剩余电流波形数据文件后测试仪器就可以选择输出该波形剩余电流。

剩余电流信号输出误差主要来自于信号源、放大电路及测量电路误差。由于本研究采用 DDS 信号产生与控制技术,以及高精度电流互感器及低失调模拟前端放大电路,该设计方案具有电流输出精度高、波形失真度低、动态响应速度快等优点;同时设计了数字校准接口,进一步保证了设备输出精度。

### 2.3 功率放大电路设计

为了提高输出信号平滑性,本研究在 DAC 之后设计了低通滤波环节,同时采用线性功率放大电路进行剩余电流信号放大<sup>[15-16]</sup>。

### 2.4 基于 PID 的恒流控制

剩余电流信号输出响应速度和输出电流稳定性是剩余电流动作特性测试装置动态性能的关键指标。为保证其动态响应满足相关标准要求,本研究采用 PID 反馈控制方法进行稳流。系统控制原理如图 4 所示。

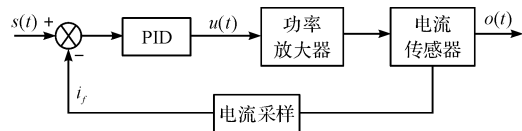


图 4 系统控制原理

为了提高控制实时性,笔者采用 PID 增量算法进行电流调控。该算法通过对采样数据和预设数据进行比较得到误差值,并将误差值带入算法公式中,以得到相应的控制量。

### 2.5 剩余动作电流测量

根据相关标准,剩余动作电流测量方法为:剩余电流动作特性测试装置以一定速率匀速输出剩余电流信号,验证被测试品剩余动作电流的正确性。通常设备输出电流的上升速率为在 30 s 内从不大于  $0.2I_{\Delta n}$  开始平稳增加到  $I_{\Delta n}$ 。再设计中,考虑到用户操作的便捷性,测试设备允许用户自定义电流上升速率。

假定  $x(\omega t + \varphi)$  为随时间周期变化的剩余电流信号, $X(t)$  为相应的缓慢上升的输出波形,则  $X(t)$  可表示为:

$$X(t) = Ax(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

基中: $t$ —输出时间; $A$ —振幅; $\omega$ —周期函数角速度; $\varphi$ —初始相位。

式(2)中振幅表示为:

$$A = \frac{0.8I_{\Delta n}T}{30}k \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

式中： $T$ —周期； $k$ —周期数。即振幅  $A$  按周期数  $k$  线性增长。

缓慢上升的正弦交流剩余电流波形及 RCD 脱扣时的波形随时间变化的曲线如图 5 所示。

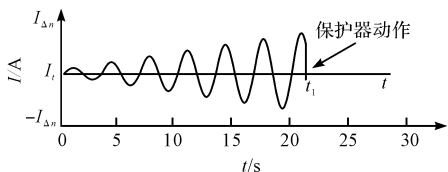


图 5 平稳上升剩余电流波形示意图

试验过程中,剩余电流幅值按周期平稳上升,如被测试品脱扣,系统记录脱扣时刻剩余电流。本文根据剩余电流瞬时值来判断保护器是否动作,在系统检测的最新电流周期内,若所有电流采样数据均小于设定阈值,则系统判定被测保护器脱扣。在动作电流测试过程中,在一个周期内电流幅值上升幅度很小,因此可以将脱扣前一周期剩余电流有效值作为剩余动作电流,其有效值  $I$  表达式为:

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_j^2} \tag{4}$$

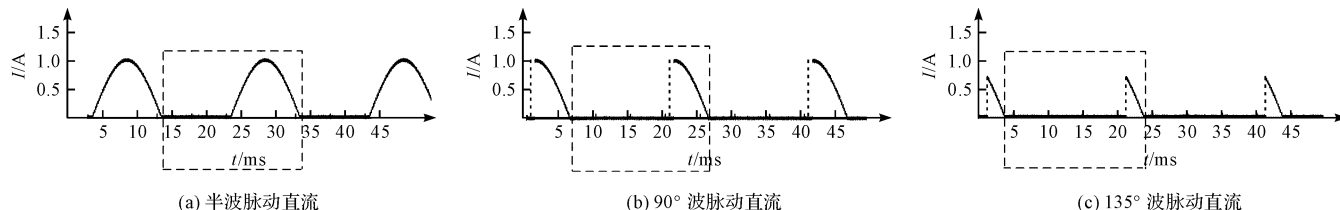


图 6 剩余电流波形

可以看出:该装置输出脉动直流剩余电流波形平滑度较高、稳定性较强,满足设计要求。

### 3.2 输出误差分析

操作设备输出有效值 0 ~ 10 A、频率为 1 kHz 正弦交流剩余电流,通过 5 位半数字万用表进行误差对比。其输出有效值误差如图 7 所示。

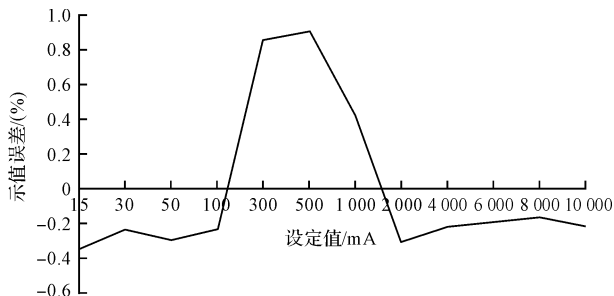


图 7 输出电流有效值误差

可以看出:该装置最大误差小于 0.2%,且 1 A 以下电流有效值误差值不超过 1%,该误差值远远小于标准所规定的误差范围,表明所设计的剩余电流动作

特性测试装置具有较高的电流输出精度。

本文中单周期采样点  $N$  为 360,所得结果  $I$  为当前被测试品的剩余动作电流。上述算法计算的是脱扣前一周期剩余电流有效值,引入了最大为单周期上升幅值的误差。该误差百分率可表示为:

$$e = \frac{0.8T}{30} \tag{5}$$

式中： $e$ —误差百分率； $T$ —周期。

其中,取  $T$  的最大值为 0.02 s,可计算误差百分率  $e$  最大为 0.05%,该误差在允许范围内。

## 3 试验验证与分析

### 3.1 输出特性测试

本研究所设计的试验装置最大可输出 30 A 正弦交流、脉动直流及平滑直流剩余电流。以脉动直流剩余电流输出为例,通过面板设置分别输出 1 A 半波、90°波和 135°波的脉动直流剩余电流,并与示波器测量结果相对照,结果如图 6 所示。

特性测试装置具有较高的电流输出精度。

### 3.3 动作时间测量误差分析

根据相关标准规定的试验方法,验证该装置动作时间测量准确性,经与示波器测量结果对比,该装置动作时间测量误差如图 8 所示。

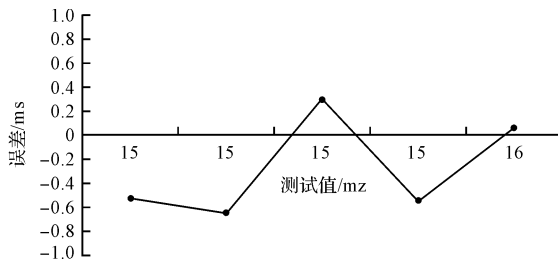


图 8 动作时间测试误差

可以看出:所设计的剩余电流动作特性测试装置动作时间测量误差小于 1 ms,优于相关标准要求。实验结果表明,该测试装置满足剩余电流动作特性试验要求。



## 4 结束语

本文在分析了剩余电流动作保护电器测试要求的基础上,提出了一种基于直接数字合成技术(DDS)的B型剩余电流动作特性测试方法及装置,该装置方法通过PID算法实现任意波形剩余电流的恒流控制,所产生的波形频率为DC~1 kHz、电流幅值为0~30 A,并可记录剩余电流保护器的脱扣电流及动作时间。

试验结果表明:所研制的测试设备稳定性高,在输出电流波形、输出误差和动作时间测量误差等方面均优于相关标准。此外该装置还具有一定功能扩展能力。

### 参考文献 (References):

- [1] 国家能源局. 2013年全国电力安全生产情况[EB/OL][2013-01-01]. <http://www.nea.gov.cn>.
- [2] 任长宁. 国内外电气防火检测规范比较及分析[J]. 建筑电气,2011(8):47-53.
- [3] 陈磊. 电气火灾监控系统的设置[J]. 现代建筑电气,2011(2):43-45.
- [4] 公安部消防局. 中国火灾统计年鉴[M]. 北京:中国人事出版社,2016.
- [5] 公安部消防局. 中国火灾统计年鉴[M]. 北京:中国人事出版社,2017.
- [6] 李 霏,顾 含,董庆丰. 电特性检测在电机预防性检修和故障诊断中的应用研究[J]. 机电工程,2018,35(4):402-406.
- [7] IEC62423-2009. Type F and type B residual current operated circuit-breakers with and without integral overcurrent protection for household and similar uses[S]. Geneva: IEC,2009.
- [8] 王建新,林时放,胡乐晨. AC型剩余电流保护器大电流特性试验装置的研制[J]. 低压电器,2010(13):52-55.
- [9] 张军伟,李 奎,王卿粹. 复杂波形剩余电流波形保护器的设计[J]. 电器与能效管理技术,2012(20):20-24.
- [10] 胡 敏,高孝天. B型剩余电流动作断路器测试仪的研究与设计[J]. 电器与能效管理技术,2016(13):28-32.
- [11] GB 22794. 家用和类似用途的不带和带过电流保护的B型剩余电流动作断路器(B型RCCB和B型RCBO)[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [12] GB/T 14048. 2-2008. 低压开关设备和控制设备第2部分:断路器[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [13] 李安阳,杨文生,何 敏. 基于FPGA和DSP的高精度多通道信号检测系统硬件设计[J]. 机电工程,2016,33(10):1277-1282.
- [14] 王 尧,李 奎,任伯飞,等. 基于全相位傅里叶变换的磁调制交直流漏电流检测方法[J]. 电工技术学报,2015,30(18):254-260.
- [15] FAGER C, HALLBERG W, ÖZEN M, et al. Design of linear and efficient power amplifiers by generalization of the Doherty theory[C]. 2017 IEEE Topical Conference New York: IEEE, 2017.
- [16] JEONG G, JOO T, HONG S, et al. A highly linear and Efficient COMS power amplifier with cascode-cascade configuration[J]. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, 2017,27(6):596-598.

[编辑:张 豪]

### 本文引用格式:

杜 量,谢振华,王 尧,等. 基于数字直接频率合成的B型剩余电流动作特性测试装置[J]. 机电工程,2019,36(2):213-217.

DU Liang, XIE Zheng-hua, WANG Yao, et al. Test equipment for type B residual current devices based on direct digital synthesizer[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(2):213-217.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>