

# 数字化CPS的射频电磁场辐射抗扰度试验及整改

柯伯湘<sup>1</sup> 郭其一<sup>1</sup> 黄世泽<sup>1</sup> 周孜超<sup>2</sup>

(1.同济大学 电子与信息工程学院,上海 200331;2.北京邮电大学 电子工程学院,北京 100876)

**摘要** 数字化控制与保护开关(CPS)是在传统控制与保护开关的基础上,采用数字式代替传统热磁式控制与保护器而产生的新型CPS。数字化CPS中电子线路的存在需要通过射频电磁场辐射抗扰度试验。为提高数字化CPS对射频电磁场辐射的抗干扰水平,在对某个未通过试验的数字化CPS产品进行诊断分析并整改成功的基础上,提出了一些针对性的解决措施,对增强数字化CPS抗干扰水平具有指导意义。

**关键词** 数字化控制与保护开关 射频电磁场 辐射抗扰度 整改方案

中图分类号 :TM74

文献标识码 :A

文章编号 :1001-1390(2012)09-0001-04

## Rectification of Radio Frequency Electromagnetic Field Radiated Immunity Test for Digital Control and Protective Switch

KE Bo-xiang<sup>1</sup>, GUO Qi-yi<sup>1</sup>, HUANG Shi-ze<sup>1</sup>, ZHOU Zi-chao<sup>2</sup>

(1.Electronic and Information Engineer College, Tongji University, Shanghai 200331, China.

2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** : Digital CPS is a new type of CPS, which is designed by the use of digital control and protection device to replace the thermal-magnetic one on the basis of traditional CPS. The electronic circuit in it makes it necessary to go through the radio frequency electromagnetic field radiated immunity test. Based on the diagnosis and successful rectification for a digital CPS which fails the test, we have proposed some relevant solutions which will have great significance for the enhancement of the immunity levels of digital CPS.

**Key words** : digital CPS, radio frequency electromagnetic field, radiated immunity, rectification

### 0 引言

数字化控制与保护开关是新型的CPS产品,因其内部含有电子线路,要求进行一系列电磁兼容试验。射频电磁场辐射抗扰度试验由于缺少定性的研究成果,使其成为最难通过的一项。为提高数字化CPS对射频电磁场辐射干扰水平,本文针对一款未通过试验的数字化CPS产品,对射频电磁场对CPS的影响机理进行分析研究,并进行成功整改,总结提出了一些具有普遍意义的解决方案。

### 1 数字化控制与保护开关

控制与保护开关是低压电器中的新型产品。它采用模块化的单一结构型式,集成了传统断路器、继电器、接触器、保护继电器、起动机、隔离器等主要功能,取得了广泛的应用。

低压配电系统的迅速发展,使得CPS所需处理的数据量越来越大,对处理精度和实时性的要求也越来

越高。随着专用集成电路和高性能微处理器的出现,CPS逐步朝数字化发展。数字化CPS将传统CPS的功能和结构特征与相关的数字化技术相结合,使得CPS的基本特征发生变化,特别是在高性能、高可靠性、模块化、通信、网络化等方面有较大的发展<sup>[1]</sup>。

与传统CPS相比,数字化CPS的主体、操作机构、辅助触头等并未发生改变。只是将传统的控制与保护装置改为数字式控制与保护装置。数字式控制与保护装置是数字化CPS的核心控制部件,它采用微处理技术和通信技术,用数字化测控保护方式取代过去的热磁式控制与保护,不但使原有保护和控制功能的精确度、可靠性大大提高,而且还包含了通信、报警、显示等多样化功能。

根据所要实现的功能,数字式控制与保护装置主要有以下几个模块组成:电源模块、信号处理模块、微处理模块、开关量输入模块、开关量输出模块、通讯模

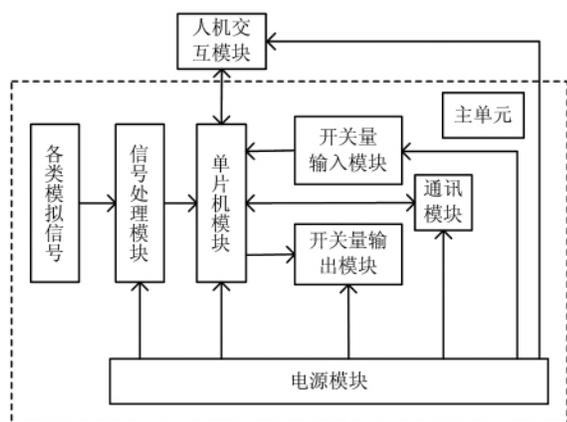


图1 数字式控制器结构框图

Fig.1 Block diagram of the digital controller

块、人机交互模块。数字式控制器的结构框图如图1所示。

数字式控制器结构图中的电源模块大多采用开关电源,开关电源电路和其他模块数字电路中的时钟电路容易受到电磁干扰的影响,从而数字化CPS需要进行电磁兼容设计与测试。在分析电磁干扰对数字式控制器的影响机理的基础上,寻找可行有效的抗干扰措施,提高数字化CPS的抗干扰性能,以保证数字化CPS正常工作<sup>[2]</sup>。

## 2 数字化CPS的射频电磁场辐射抗扰度试验机理与试验要求

在众多电磁干扰中,射频电磁场辐射对电子产品有很大的影响,轻则使设备性能、功能暂时降低或丧失,重则造成设备永久损坏。因此,射频电磁场辐射抗扰度试验是数字化CPS需要重点考虑的电磁兼容试验<sup>[3]</sup>。

射频电磁场辐射对电子产品的干扰方式主要为电磁耦合。通过磁场产生的干扰由导体间的互感引起。当回路中的电流发生突变时,交链到回路的磁通也随之发生变化,进而感应出干扰电压。暂态电流幅值越大,频率越高,回路间的磁通联系越强,则感应耦合造成的干扰就越大。

试验中的数字化CPS,在射频电磁场辐射扫频时,其内部一些敏感电路的固有频率与辐射电磁场的干扰频率接近或这些电路的长短、方向与干扰频率的波长和方向相适应时,就会在这些频点附近产生谐振,被敏感电路接收、放大,进而对数字化CPS产生影响。

根据国标GB14048.9-2008<sup>[4]</sup>关于控制保护开关电器的射频电磁场辐射抗扰度试验的规定,试验需按GB/T17626.3-2206的要求进行并满足可接受判据。

受测试设备(EUT)应在自由空气中按水平和垂直两个极化方向进行以下两个试验,试验等级为10V/m。

(1)为防止脱扣,EUT应通以0.9倍设定电流,试验

频率在80~100MHz范围内,每一频率停留时间在500~1000ms之间,步长为前一个频率的1%。

(2)为验证时间-电流特性,EUT应通以2倍设定电流,测量相应脱扣时间。在频点80MHz,100MHz,120MHz,180MHz,240MHz,320MHz,480MHz,640MHz,960MHz进行试验。试验电流应在每一频率的扫描场稳定后施加。

## 3 射频电磁场辐射抗扰度试验过程及整改方案

### 3.1 首次试验情况

以某一数字化CPS产品为试验对象,该产品控制器的设定电流为 $I_r=32A$ 。

试验中利用电流源给数字式控制器通以 $0.9I_r$ 电流,射频电磁场频率范围为80~100MHz,每一频率的停留时间为1s。根据可接受判据,试验期间,数字化CPS不应该脱扣。

给数字式控制器通以 $2 * I_r$ 电流,在规定的各频点进行正确动作实验,在 $T_r=45s$ 后,脱扣器应脱扣。

试验过程中,通过录像观察控制器的脱扣器很快脱扣,试验未通过。

### 3.2 原因分析与诊断

考虑电流源是否受到影响。将摄像头对准“钳形电流表”,试验期间,通过摄像头观察,电流表并未发生变化,试验环境问题未受到影响。

试验中,数字式控制器的人机界面、驱动电路、晶振电路等均测试正常。因此将问题定位为信号采集模块受到影响。射频电磁场辐射干扰信号采集模块,使进入单片机A/D通道的信号提升,使采集的信号变大,造成产品误动作。该产品的信号采集电路如图2所示。

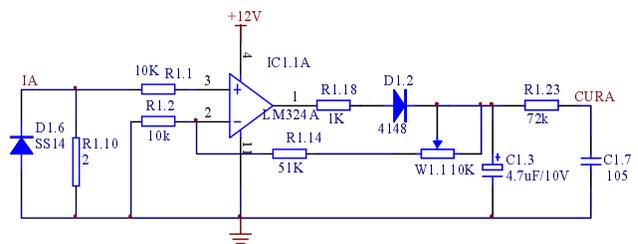


图2 数字控制器信号采集电路

Fig.2 Signal acquisition circuit of the digital controller

通过分析该信号采集电路,射频电磁场辐射的影响主要集中在 $\pi$ 形滤波器与运放电路上。综合考虑射频电磁场辐射抗扰度试验的相关技术要求,试验未通过可能的原因有:

- (1)滤波器电路参数不匹配;
- (2)运算放大电路参数不合理;
- (3)开关电源受到干扰;

(4)PCB设计存在缺陷。

### 3.3 整改方案分析

结合上述分析诊断,有针对性的提出以下整改方案。

#### 3.3.1 增加屏蔽铝箔

增加屏蔽可以有效抑制射频辐射电磁场对数字式控制器中电子电路的影响。

#### 3.3.2 调整信号采集电路元件参数

##### (1)调节滤波器电阻

在不影响采集精度的情况下将滤波器电阻调整到最小,同时匹配输入端的电阻,使正反相平衡,从而消除射频电磁场辐射干扰的影响。

##### (2)调整运算放大器电路<sup>[3,5]</sup>

含有运算放大器的集成电路产品会在许多频点上受到射频电磁场辐射的干扰。由于射频电磁场辐射的干扰信号是一种共模信号,若运算放大器输入回路参数不对称,会导致该共模信号转换成差模信号而改变运算放大器的输出,影响数字式控制器的正常工作。通过更改运放型号,调整限流电阻、钽电容、滤波电容的参数使得运算放大器输入回路参数平衡,消除射频辐射电磁场干扰的影响。

#### 3.3.3 电源模块分析

射频电磁场辐射对开关电源的影响机理,是在一些频点影响开关电源的反馈回路,此外开关电源的高频变压器及保护电路对干扰信号比较敏感,会造成输出电压的波动,从而影响产品的正常工作。通过采用不同的电源模块,可以起到消除干扰影响的作用。

#### 3.3.4 更改PCB布线,重新制作样机

电路的PCB布局对于产品的电磁兼容性有很大的影响。相同的电路设计,会因PCB布线的不同而导致产品的电磁兼容性完全不同<sup>[6-7]</sup>。优化PCB布线可以大大改善产品的电磁兼容性。

结合几次试验现象分析,导致试验未通过的主要原因是主板布线。表现在缺少铺地与部分走线不合理。很多底线与运放输出线在电阻之间穿行,如图3所示。

### 3.4 最终整改方案与结果

分别对上述整改方案进行试验验证,方案1~3均起到一定的改善作用,但未能从根本上解决问题。因此,对试验的数字式控制器采用双面板优化布线,增加铺地,并加入完整信号放大电路,在继电器电路、通讯电路均调试正常后,重新进行试验。实验结果如下。

通以0.9I<sub>e</sub>电流,脱扣器未脱扣,试验通过。通以2I<sub>e</sub>电流的单频点正确动作试验结果为如表1所示。

通过以上实验结果可知,在进行重新布线,优化

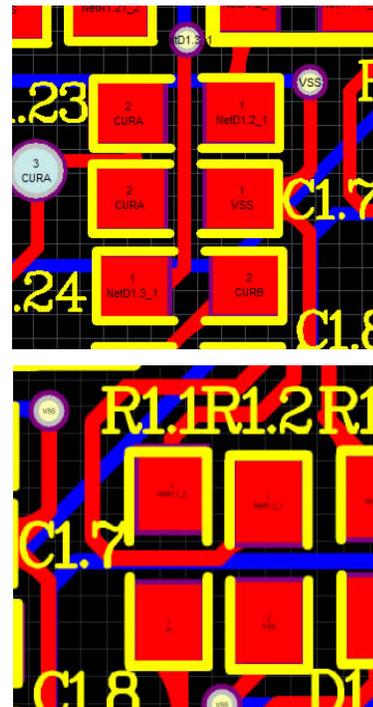


图3 不合理的PCB布线

Fig.3 Irrational wirings of the PCB

表1 整改后的时间-电流特性试验结果

Tab.1 Experiment results after rectification

频率/MHz	脱扣时间/s	水平方向	垂直方向
80	37~54	45	44
100	37~54	44	44
120	37~54	43	43
180	37~54	41	41
240	37~54	44	43
320	37~54	42	44
480	37~54	42	42
640	37~54	43	42
960	37~54	44	45

设计后,数字化控制器的射频电磁场辐射抗扰度试验通过。

### 3.5 整改方案小结

通过对数字化CPS控制器的反复RS试验,结合几次试验的现象,得出以下结论:

(1)产品的铺地及布线对RS试验影响较大,甚至是颠覆性的影响。不铺地的电路板,无论采取如何措施,电流都会出现较大变化。对于要进行射频电磁场辐射抗扰度试验的电路板,特别是芯片板,务必增加铺地。

(2)运算放大器的型号及运算放大电路的参数匹配对射频电磁场辐射抗扰度试验结果有一定影响,但

不起决定性作用。

(3)使用屏蔽胶带,对120MHz以下频率有作用,对高频无明显作用。

(4)电源系统对于数字化CPS产品的射频电磁场辐射抗扰度试验影响不大。

(5)在PCB设计中,不能擅自更改封装库中的元器件封装,特别是贴片0805、0603封装。更改封装后,虽然方便布线,但电气间隙相应减少、干扰作用增加。此外,贴片元器件,特别是焊盘之间不能走线,宁肯多放一些过孔。

#### 4 结束语

数字化CPS产品的射频电磁场辐射抗扰度试验,目前定性的研究成果很少。电磁辐射是如何干扰CPS工作,对CPS哪些部件与线路容易产生干扰,应采用哪些措施进行整改等问题都还没有明确的研究结论。因此,只能通过试验摸索,逐步探索可行的抗干扰方案。

本文在对数字化CPS的数字式控制器的射频电磁场辐射抗扰度试验进行分析、整改的基础上,总结并提出一些针对性的解决方案,要求在PCB板设计初期,就要注重对数字化控制器的开关电源、时钟晶振电路及辅助电路等进行优化设计。对其他数字化CPS产品的生产和设计,提高电CPS产品质量,增强数字化CPS运行的可靠性,具有指导意义。

#### 参考文献

- [1]姚丁丁.低压电器数字化控制与保护技术研究[D].上海:同济大学学位论文,2009.  
Yao Ding-ding. Research on the digital control and protection technology of low-voltage apparatus [D]. Shanghai: Tongji University master's degree thesis, 2009.
- [2]Igarashi S.,Takizawa S.,Kuroki K.,et al. Analysis and Reduction Methods of EMI Radiation Noise from Converter System [J].IEEE.PESC'98 Conference Proceedings, 1998, 1152- 1158.
- [3]杨大林,张占营.射频电磁场辐射抗扰度试验-对量度继电器及保护装置的影响[J].认证与电磁兼容卷,2007 (2).  
Yang Da-lin, Zhang Zhan-ying. RF electromagnetic field immunity test impact for measuring relays and protection equipment [J]. Certification&EMC, 2007,(2).
- [4]GB14048.9-2008, 低压开关设备和控制设备第6-2部分:多功能电器(设备)控制与保护开关电器(设备)(CPS)[S].  
GB14048.9-2008.Low-voltage switchgear and controlgear-Part 6-2: Multiple function equipment- Control and protective switching devices(or equipment)(CPS)[S].

[5]李明,朱中文.电能表射频电磁场辐射抗扰度试验技术研究[J].电测与仪表,2010,47(2):48-51.

Li Ming, Zhu Zhong-wen. Research on Radio Frequency Electromagnetic Field Radiated Immunity Test Technology for Electricity Meter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(2): 48- 51.

[6]龚成龙,韩晓春,陈佳建.电子仪器PCB设计中的EMC技术的应用[J].电测与仪表,2005,42(5):32-36.

Gong Cheng-long, Han Xiao-chun, Chen Jia-jian. Application of EMC Technique in Electric Instrument PCB the Design of the Layout [J]. Electrical Measurement&Instrumentation, 2005, 42(5): 32- 36.

[7]徐丹.印刷电路板布线技术对电磁兼容性的影响[J].无锡职业技术学院学报,2008,7(4):47-49.

Xu Dan. The Affection of PCB Layout Technology to EMC [J].Wuxi: Journal of Wuxi Institute of Technology, 2008, 7(4): 47- 49.

作者简介:



柯伯湘(1988-),男,安徽人,同济大学在读硕士研究生。研究方向为低压电器。Email:seniale@163.com



郭其一(1961-),男,浙江人,同济大学教授,博士生导师,国家标准化委员会牵引电气专委会委员和下设的电子信息组组长。研究方向为信息自动化及电气自动化领域的检测、控制、故障诊断与分布式测控系统等。



黄世泽(1983-),男,河南人,博士,副教授,博士后。从事控制与保护开关电器的设计和研发。



周孜超(1990-),男,湖南人,北京邮电大学在读本科生。

收稿日期 2012-03-11

(田春雨 编发)