

# 多功能电能表的电快速瞬变脉冲群问题处理方法研究

丁锦辉, 赵 阳, 张 杨, 张小飞, 郭凡铖

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对多功能电能表的电快速瞬变脉冲群(electrical fast transient, EFT)抗扰度问题, 分析了 EFT 产生和骚扰机理, 研究了 EFT 的处理方法, 提出了针对多功能电能表电源输入端口电快速瞬变脉冲群问题的解决方法. 试验结果表明, 所提方法可以有效提高多功能电能表的 EFT 抗扰度等级, 达到 GB/T 17626.4—2006 标准要求.

[关键词] 多功能电能表, 电源端口, 电快速瞬变脉冲群

[中图分类号] TM15 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2014)04-0006-05

## Study of the Treatment Method for EFT Noise Immunity Problem of Multifunctional Meter

Ding Jinhui, Zhao Yang, Zhang Yang, Zhang Xiaofei, Guo Fancheng

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** For the electrical fast transient (EFT) noise immunity problems of the Multifunctional Meter, the mechanism of production and harassment of EFT are analyzed, the treatment method of EFT is studied, and a solution to EFT problem of power input port of meter is put forward. The experimental results show that the EFT noise immunity level of multifunctional meter is efficiently improved, and the demands of GB/T 17626.4-2006 are reached.

**Key words:** multifunctional meter, power input port, EFT

在目前的电子产品中, 大量存在各种各样的电磁干扰. 这些电磁干扰不仅影响到电子设备的正常工作, 还会造成电子设备中某些元器件的损坏, 降低电子设备的 EMC 性能.

智能电能表作为用于电能计量和电费结算的计量产品, 不仅要求产品具有精确、稳定的计量性能, 而且要求产品有极强的抗电磁干扰、抗冲击、耐恶劣环境的能力, 确保在任何情况下用电信息均正确可靠, 保证用电、供电双方的利益不受损害. 智能电能表大都采用单片机技术设计而成, 电磁干扰是造成智能电能表故障或性能下降的主要原因之一.

本文结合多功能电能表, 从 EFT 试验出发, 分析 EFT 产生和骚扰机理, 研究了 EFT 的处理方法, 提出了针对多功能电能表电源输入端 EFT 问题的解决方法. 试验结果表明, 所提方法可以有效提高多功能电能表的 EFT 抗扰度等级, 达到 GB/T 17626.4—2006 标准要求.

## 1 EFT 产生和骚扰的机理分析

### 1.1 EFT 产生机理

接地故障或切换电感性负载等都会对电子系统产生电快速瞬变脉冲群骚扰. 该骚扰的特点是骚扰信号不是单个脉冲, 而是一连串的脉冲群. 一方面由于脉冲群可以在电路的输入端产生积累效应, 使骚扰电平的幅度最终可能超过电路的噪声容限. 另一方面脉冲群的周期较短, 每个脉冲波的间隔时间较短, 当第一个脉冲波还未消失时, 第二个脉冲紧跟而来. 对于电路的输入电容来说, 在未完成放电时又开始充电, 因

收稿日期: 2014-08-16.

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK2011789)、毫米波国家重点实验室开放基金 (K201309)、江苏省科技厅产学研联合创新资金 (BY2012004).

通讯联系人: 赵阳, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电磁兼容技术与应用. E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

此容易达到较高的电压,对电路的正常工作产生较大影响.

### 1.2 EFT 骚扰机理

所谓 EFT 干扰,是指电快速瞬变脉冲群干扰.在实际系统中,它是由电力电子开关器件如继电器、电磁阀等,在启动和关闭过程中,感性负载  $L$  上的电磁能量由于没有泄放通路,便开始向杂散电容  $C_0$  充电,当开关触头两端的电压大于介质的击穿电压时,触头间将出现“击穿”现象,开关触点重新导通,  $C_0$  放电,当电流小于维持电流时,触头间的电弧熄灭.上述过程重复发生,直至电容两端电压不能使开关动、静触头击穿为止.图 1 为 EFT 干扰产生的等效电路.在开关分断的过程中,随着开关触头之间的距离不断增大,触头间的介质击穿电压不断升高,开关触头间将产生电压幅值不断升高、周期不断变长的瞬态 EFT 干扰串.

继电器断开时,因为电感上的电流不能突变,为了释放其能量,电流对杂散电容  $C_0$  充电,电容和开关两端所加电压不断变大.当开关两端的电压大于触头间介质的击穿电压时,触头出现“击穿”现象,开关间电压迅速下降到零.随着开关距离的增大,电弧熄灭,电感重新向电容  $C_0$  充电,重复以上过程直至开关不能被击穿为止.随着开关距离的不断增大,开关两端便会产生周期不断变长、幅值不断增大的瞬态 EFT 脉冲干扰串.以上为传统的 EFT 产生机理分析,可以等效为以下两个过程:(a)主回路导通过程,此时  $C_0$  可以忽略;(b)继电器完全断开,电感电容充放电过程;图 2 为其等效电路示意图.

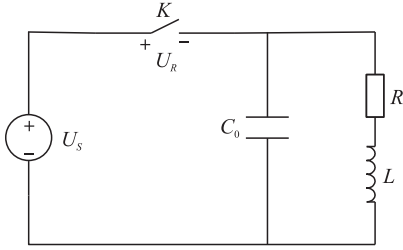


图 1 继电器断开感性负载等效电路

Fig. 1 The equivalent circuit of the relay disconnect the inductance

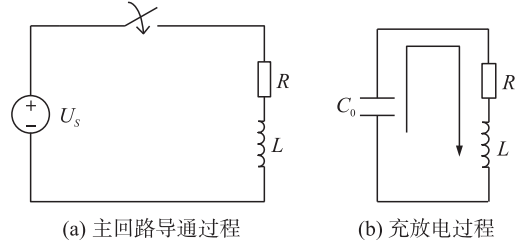


图 2 继电器断开感性负载暂态过程等效电路示意图

Fig. 2 The transient process equivalent circuit of relay disconnect the inductive load

继电器分断感性负载产生的 EFT 瞬态电压可以通过对图 2 电路进行暂态求解得到.根据流过电感上的电流不能突变,并忽略  $C_0$  对初始电压的影响,则由初始条件和基尔霍夫电压定律对电感电容回路列写二阶动态电路方程:

$$\begin{cases} u_c(0_+) = u_c(0_-) = 0, \\ \frac{du_c}{dt}(0_+) = \frac{du_c}{dt}(0_-) = I_s, \\ LC_0 \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC_0 \frac{du_c}{dt} + u_c = 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $I_s = \frac{U_s}{R + j\omega_1 L}$  为开关闭合时回路中的电流;  $\omega_1$  为电源  $U_s$  的角频率.

解上述电路方程,则电容  $C_0$  两端的暂态电压为:

$$u_c = \frac{U_s}{\omega C_0 (R + j\omega_1 L)} e^{-\sigma t} \sin(\omega t) = \frac{I_s}{\omega C_0} e^{-\sigma t} \sin(\omega t), \quad (2)$$

式中,  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC_0} - \frac{R^2}{4L^2}}$  为自由谐振频率;  $\sigma = \frac{R}{2L}$  为衰减系数.

则可得到继电器  $K$  两端的电压为:  $U_r = U_s + u_c$ , 当此值大于触头间的介质击穿电压时,开关导通.

### 1.3 电快速瞬变脉冲群的耦合分析

#### 1.3.1 电感性耦合

图 3 所示为电感性耦合的耦合电路和等效电路.在进行电快速瞬变脉冲群试验时,当被测电路中的导线上出现电快速瞬变脉冲群电流时,由于该电流是瞬变形态的,会引起电路 1 周围的磁场发生变化,从而

使电路上其他处于这个变化着的磁场中的导线电路 2 感应出电动势,由此导线电路 1 的信号就耦合进入了导线电路 2,对导线电路 2 产生了干扰。

### 1.3.2 电容性耦合

在进行电快速瞬变脉冲群抗扰度试验时,被测电路中的两根导线之间的寄生电容使得干扰源产生的电快速瞬变脉冲群通过这个电容把能量从电路 1 耦合到电路 2 上.其耦合电路模型和等效电路如图 4 所示。

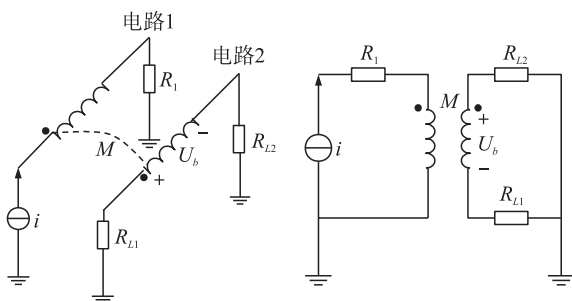


图 3 电感性耦合的耦合电路与等效电路

Fig. 3 The coupled circuit and equivalent circuit of inductance coupling

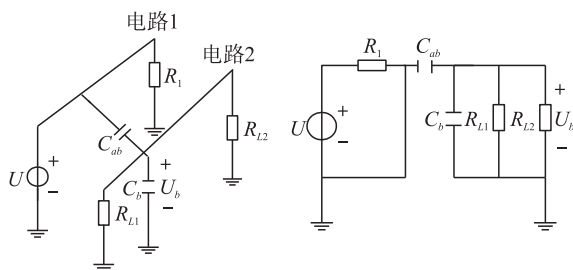


图 4 电容性耦合的耦合电路与等效电路

Fig. 4 The coupled circuit and equivalent circuit of capacitive coupling

假设电路 1 为骚扰源电路,电路 2 为敏感电路, $C_{ab}$ 为导线 1 和导线 2 间的分布电容.由等效电路可计算出在回路 2 的感应电压为:

$$U_2 = \frac{R_2}{R_2 + X_c} U_1 = \frac{j\omega C_{ab} R_2}{1 + j\omega C_{ab} R_2} U_1. \quad (3)$$

式中,  $R_2 = \frac{R_{L1} R_{L2}}{R_{L1} + R_{L2}}$ ,  $X_c = \frac{1}{j\omega C_{ab}}$ .

当耦合电容较小及  $\omega C_{ab} R_2 \ll 1$  时,式(3)可以简化为

$$U_2 \approx j\omega C_{ab} R_2 U_1. \quad (4)$$

### 1.3.3 辐射耦合

辐射耦合是干扰源通过辐射方式(一般为电磁场形式)将电磁干扰能量耦合到敏感电路,从而引发电磁兼容问题。

其模型如图 5 所示,线缆 1 引起的射频电磁场  $E$  以空间位移电流  $\partial D/\partial t$  形式耦合至线缆 2,在线缆 2 中产生感应电流  $I$ ,从而影响敏感器件的正常工作。

## 2 EFT 防护方法

了解 EFT 敏感元器件和电快速瞬变脉冲群产生的机理后,可以通过一定的方法措施,将 EFT 骚扰控制在一定范围内,使其不足以对电子产品造成更大的危害.基于 EFT 的机理,本文提出 2 种常规的 EFT 防护方法:

(1)在电源设计中,抑制电快速瞬变脉冲群干扰的主要措施是滤波,在实际设计滤波器时采用共模扼流圈与差模电容组合的方式构成滤波器.共模扼流圈是由铁氧体磁珠和铜导线绕制而成.铁氧体磁珠的抗干扰能力与其本身的磁珠特性及几何尺寸有关,对于同种磁芯的磁珠而言,其长度越长,内径越小,外径越大,抑制效果越好.因此随频率增加铁氧体磁珠阻抗不断增加,在低频段其阻抗主要由电感分量构成,且阻抗非常小;而在高频段,其阻抗主要由电阻分量决定,此时感性分量仍很小.因此铁氧体磁珠可以很好地抑制 EFT 的高频干扰,并将其能量转化为热量散发出去。

(2)除了对干扰直接传输通道采取脉冲吸收与滤波措施,为了防止 EFT 干扰通过空间辐射到其他端口,从而侵入到敏感设备,应对干扰端口和其他端口进行空间分割,并对其他端口也采取适当屏蔽措施来对共模干扰进行抑制。

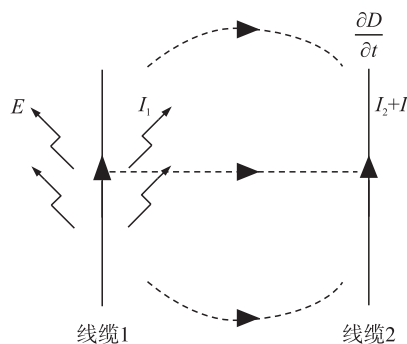


图 5 辐射耦合模型

Fig. 5 The model of radiation coupling

### 3 基于多功能电能表的 EFT 问题实验分析

在 GB/T 17626.4 标准中规定 EFT 试验等级为三级,即电压峰值为 2 kV,脉冲上升时间为 5 ns,持续时间为 50 ns,重复频率为 5 kHz. 实际测试中,为了全面了解该电能表抵抗 EFT 干扰电流骚扰的能力,从 0.5 kV、1 kV、2 kV 开始测试,表 1 为具体测试结果. 试验发现,只有在电压为 0.5 kV 时,被测设备正常工作. 在测试等级 1 kV 和 2 kV 的测试下,电能表工作不正常,主要表现为读数显示为乱码,且示数乱跳.

#### 3.1 针对电源线 EFT 问题的共模滤波器设计

针对电源线上的 EFT 共模干扰电流,通常采取的方法是采用共模电感即共模扼流圈来抑制. 共模扼流圈中有两个共模电感线圈,分别接电源线的 L 线和 N 线. 两线圈的绕向和匝数相同,由于共模电流具有同相性特点,依据电磁场理论和麦克斯韦方程组可知,两线圈产生的磁场相互叠加,则线圈的感抗也相应增加,呈现高阻抗,将共模电流以热能的形式耗掉.

由于将共模扼流圈和电容配合使用,组成低通滤波器,能够针对共模 EMI 干扰信号有较好的抑制效果,结合以往的整改经验设计了如图 6 所示的 EFT 滤波器结构,具体实物图如图 7 所示. 其中  $L_{X1}$ ,  $L_{X2}$ ,  $L_{X3}$  分别用外径为 35 mm,内径为 25 mm,高 12 mm 的铁氧体磁环绕制. 线圈采用两根铜导线,并绕铁氧体磁环 25、20、15 圈. 电容值如表 2 所示.

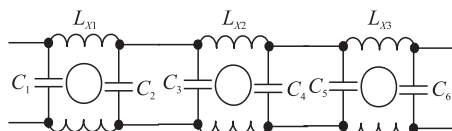


图 6 共模滤波器结构示意图

Fig. 6 The structure of common mode filter

表 1 不同等级试验电压的测试结果

Table 1 The testing results under the different grade test voltage

测试等级/kV	测试模式	结果
0.5	仅共模	通过
1	仅共模	未通过
2	仅共模	未通过

表 2 电容值

Table 2 The value of capacitance

电容	电容值/ $\mu\text{F}$	电容	电容值/ $\mu\text{F}$
$C_1$	1	$C_4$	1
$C_2$	0.1	$C_5$	0.1
$C_3$	1	$C_6$	1

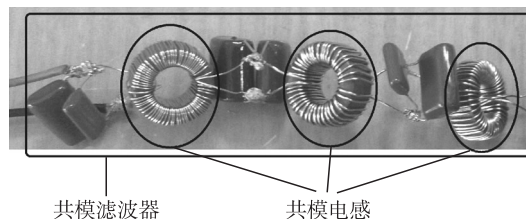


图 7 共模滤波器实物图

Fig. 7 The real product photo of common mode filter

#### 3.2 屏蔽的应用

屏蔽的作用是限制电磁波从电路或设备的一个区域感应或辐射到其他区域. 干扰源被屏蔽后不能向外辐射扩散干扰脉冲;敏感体被屏蔽后可以防止受到外部电磁场的影响.

从前面的耦合途径可知,EFT 干扰信号通过辐射会影响到别的敏感电路. 为了减弱干扰源的辐射和增强敏感体抗扰度,可将电路板上的干扰源和敏感体进行屏蔽,具体措施如图 8 所示. 综合上述两种措施,再进行试验后,电能表能够正常工作,显示屏正常.

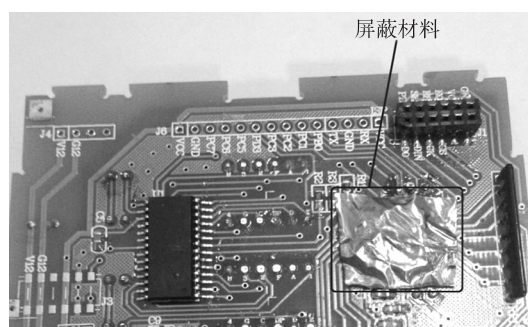
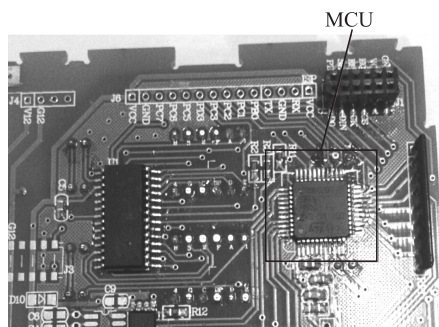


图 8 对 PCB 上敏感器件的屏蔽防护措施

Fig. 8 Shielding protection measures of sensitive components on the PCB

## 4 结论

针对多功能电能表产生的 EFT 抗扰度问题,本文分析了 EFT 的产生和骚扰机理,建立了 EFT 的耦合模型,提出了两种抑制 EFT 骚扰的措施,并进行了试验验证.结果表明,采用本文所提方法能有效提高多功能电能表的 EFT 抗扰度等级,并达到 GB/T 17626.4—2006 标准要求.

### [参考文献](References)

- [1] 王玉峰,邹积岩,廖敏夫.一次回路形成电快速瞬变脉冲群骚扰的研究及防护[J].电力自动化设备,2007,27(9):22-27.  
Wang Yufeng,Zou Jiyan,Liao Minfu. Study of EFT/B generated in primary circuit and its counter measure[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(9):22-27. (in Chinese)
- [2] Xu L,Wang S,Zhai G,et al. Study on EMS of DC SSR under interference of EFT burst[C]//Industrial Electronics and Applications(ICIEA),2011 6th IEEE Conference on. Beijing:IEEE,2011:1 938-1 942.
- [3] Zhou Z, Quanxing J. Analysis of the effectiveness of ferrite core for improving EFT immunity [C]//Electromagnetic Compatibility,2002 3rd International Symposium on. IEEE,2002:718-721.
- [4] 王尧,李奎,郭志涛,等.智能漏电断路器抗电快速瞬变脉冲群干扰研究[J].电力自动化设备,2012,32(4):129-133.  
Wang Yao,Li Kui,Guo Zhitao,et al. Electrical fast transient/burst interference of intelligent residual-current-operated circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):129-133. (in Chinese)
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 17626.4—2006 电磁兼容试验和测量技术:电快速瞬变脉冲群抗扰度试验[S].北京:中国标准出版社,2007.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. GB/T 17626.4-2006 Testing and measurement techniques of electromagnetic compatibility:electrical fast transient/burst immunity test[S]. Beijing:Standards Press of China,2007. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]