

# 微型断路器电动操作系统的 电磁兼容性设计

刘剑滨<sup>1</sup>, 姜岩峰<sup>2</sup>, 李 莎<sup>1</sup>, 张 喆<sup>1</sup>

(1. 无锡太湖学院江苏省物联网应用技术重点建设实验室, 江苏无锡 214064;  
2. 江南大学物联网应用技术教育部工程研究中心, 江苏无锡 214122)

**摘 要:** 为实现对微型断路器误动作的弥补, 本文设计了一种与微型断路器配套使用的电动操作系统. 该设计属于机电一体化产品, 测试标准对标欧盟家用电器、电动工具或类似器具的电磁兼容标准 EN55014. 本文重点关注其中4类指标: 发射干扰 EMI (Electron-Magnetic Interference), 抗干扰性 EMS (Electron-Magnetic Susceptibility), 谐波干扰 Harmonic, 电压扰动 Flicker. 通过设计高集成、谐波强衰减、高抗浪涌能力的低通滤波器, 采用准谐振软开关技术及分时变频的控制策略, 优化的 PCB (Printed Circuit Board) 布局布线, 实现对电磁兼容性的优化, 并在第三方检测机构测试通过, 获得 CE 认证.

**关键词:** 微型断路器; 电磁兼容性; 集成低通滤波器; 准谐振

**中图分类号:** TN86      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2020)05-0914-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.05.011

## EMC Design of Electric Operating System for Miniature Circuit Breaker

LIU Jian-bin<sup>1</sup>, JIANG Yan-feng<sup>2</sup>, LI Sha<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Construction Laboratory of Iot Application Technology, Wuxi Taihu University, Wuxi, Jiangsu 214064, China;  
2. Engineering Research Center of the Ministry of Education of Internet of Things Applied Technology,  
Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** An electric operation system matched with the miniature circuit breaker is designed in order to compensate for the mis-operation of miniature circuit breaker. The breaker is a kind of mechatronic products and European Union EMC standard EN55014 is required. For the design in the paper, four characteristics are mostly concerned: EMI, EMS, Harmonic and Flicker. The strategies in the design include three aspects. The first one is using the low-pass filter with high integration, strong harmonic attenuation and high surge resistance. The second one is the quasi resonant soft switch technology and time-sharing frequency conversion control strategy. The third one is optimizing the PCB layout and the wiring. Finally, the designed breaker reaches the critical standards and obtains the qualified CE certification.

**Key words:** miniature circuit breaker; electron-magnetic compatibility; integrated low pass filter; quasi-resonance

### 1 引言

微型断路器广泛用于供配电线路, 保障供配电的安全, 线路一旦出现故障, 微型断路器将自动分闸断开线路, 等待用户排除线路故障后, 再由操作人员现场进行人工合闸操作. 据统计, 80% 以上的微型断路器分闸, 是由于环境湿度过大, 微型断路器过热, 线路扰动等偶

然因素造成的误动作, 由线路永久性故障造成的分闸的比例不超过 20%, 该误动作引发的断电会造成不可预知的损失和提高企业的运行成本. 例如漏电型微型断路器, 雷电在线路中引起浪涌电压, 电子设备在线路中引起的高次谐波, 长导线对地的电容电流 (泄漏电流) 等都容易导致该设备误跳闸. 通过在微型断路器并联电动操作系统, 按照逻辑对误分闸的微型断路器重

合闸,可以保障线路的有效工作.中国铁塔公司,国家电网,地方路灯管理公司等对供电有较高要求的企业,都对该产品有较大需求,并制定了相应的标准或规范<sup>[1,2]</sup>.

该系统电磁环境恶劣,对供电线路大电流进行通断以及线路上其他大型用电器工作时会带来电磁干扰,野外使用过程中存在的雷击因素,使得电动操作系统本身需要承受较大的电磁干扰,简称 EMS;电动操作系统本身的工作还不能对线路其他设备造成影响,简称 EMI;EMI 和 EMS 总称 EMC (Electron-Magnetic Compatibility),即电磁兼容性,该产品需要具有较强的电

磁兼容性.

## 2 电动操作系统电磁兼容性分析

### 2.1 电动操作系统方案简介

电动操作系统与常规微型断路器配套,使得微型断路器具有自动分闸/合闸等功能.该系统外形如图 1,与微型断路器配套使用如图 2,电动操作系统通过手柄对微型断路器进行分/合控制.

电动操作系统内部结构如图 3,包含减速齿轮、高速马达、各类锁扣、控制电路等.

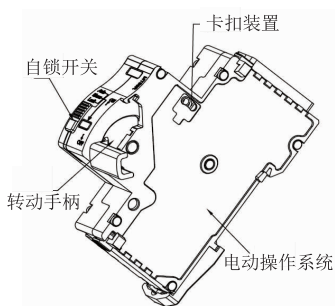


图1 电动操作系统外形图



图2 电动操作系统装配图

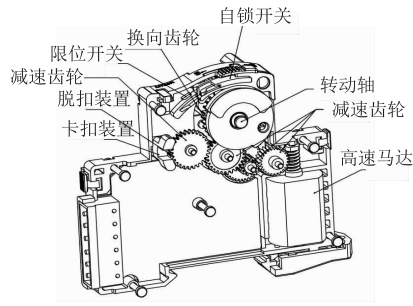


图3 电动操作系统内部结构图

电动操作系统 AC220V 供电,控制单元根据逻辑驱动 DC12V-1A 马达,系统框图如图 4.

该系统包含 6 个子系统,以马达的精准定位、精确控制为核心,辅以开关电源、人机界面、远程通信、MCU (Micro Control Unit) 主控部分,电磁兼容性要求高.该系统功率峰值 30W,功率密度大,热阻大;马达启停冲击电流大;结构紧凑,工作环境恶劣,电磁兼容性处理困难.

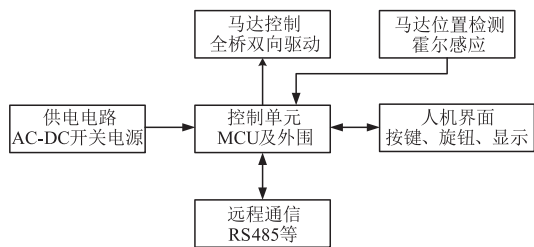


图4 电路系统框图

### 2.2 电磁兼容性设计目标

电磁兼容性 EMC 包括两部分:(1)系统对外界的干扰 EMI:在马达启停或换向的瞬间,会产生电磁脉冲,对周边电网造成污染;开关电源部分工作频率在数十 KHz 到数百 KHz,对外产生谐波干扰.(2)外界对系统的干扰 EMS:电网其他用电器的谐波会干扰本系统;野外环境下雷击浪涌会给系统带来破坏性损伤.在参考通用标准 CE 或 CCC 的基础上,结合系统应用特殊性,制定本系统电磁兼容性设计目标.

本设计属于机电一体化产品,测试标准参考 CE 针

对家用电器、电动工具或类似器具的电磁兼容标准 EN55014,包含 4 个标准:

- (1) 发射干扰 EMI<sup>[3]</sup>:EN 55014-1:2006 + A1:2009.
- (2) 抗干扰性 EMS<sup>[4]</sup>:EN 55014-2.
- (3) 谐波干扰 Harmonic<sup>[5]</sup>:EN 61000-3-2.
- (4) 电压扰动 Flicker<sup>[6]</sup>:EN 61000-3-3.

参考上述标准,结合现场环境,对关键指标加严,得到本设计目标:

(1) 电压扰动 (Flicker):兼容全球电网,应对野外极不稳定的供电环境,需要实现宽电压输入 AC85 ~ 300V.

(2) 电快速瞬变脉动群 (EFT):为确保控制系统、传感器等在中高频干扰下不得死机或异常,EFT 需要达到 4KV.

(3) 浪涌 (Surge):应对野外多发雷击及电网其他大型电器的启停,浪涌需要达到 6KV.

(4) 静电放电 (ESD):保护弱电通信接口安全,ESD 需要达到 8KV.

(5) 传导 (Conduction)、辐射 (Radiation):为减少对电网其他产品干扰,需符合标准 EN 55014-1.

### 2.3 电磁兼容性设计要点分析

如前所述,本设计结构紧凑,工作环境恶劣,电磁兼容性设计有如下要点<sup>[7,8]</sup>:

(1) 电源输入滤波设计

电源输入部分为干扰的耦合路径,既要防止外界

干扰进入,也要防止系统产生的干扰污染外网.采用多种滤波形态结合,阻断双向干扰通路,对抗各类谐波、浪涌等.

### (2) 电源控制策略

电磁干扰的强度会根据功率器件的开关频率变化,干扰能量主要集中在开关频率点上.优化电源控制策略,一方面进行频率管理,将开关信号的能量调制在一个宽频带上,通过产生离散频带的方法,将干扰频谱展开,分散干扰能量,降低开关频率点上的电磁干扰强度,以此降低整体的电磁干扰强度.一方面进行时间隔离,将强干扰产生的时间和易受干扰信号产生的时间错开.

在设计的实现上,根据 EMC 设计规范及工程经验,在 PCB 的布局、走线上进行优化,达到干扰源和敏感设备的空间隔离、电气隔离<sup>[9]</sup>.

## 3 电动操作系统电磁兼容性设计

### 3.1 电源输入滤波设计<sup>[10]</sup>

干扰分传导、辐射两类,本设计许多指标与传导干扰相关,因此控制传导干扰是本设计的重点.传导干扰分为差模干扰和共模干扰,如图 5 所示.

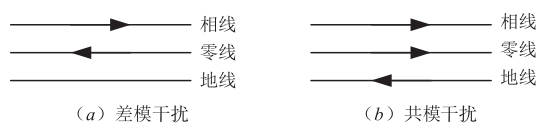


图5 传导干扰类型

差模电流流过导线环路时,导线环路相当于小环天线,具有辐射磁场和接收磁场的能力.设环路电流为  $I_{dm}$ ,电流频率  $f$ ,环路面积为  $S_{dm}$ ,在距离  $r$ ,测量天线和辐射平面的夹角为  $\theta$  情况下,电场强度  $E_{dm}$  计算如式(1):

$$E_{dm} = 131.6 \times 10^{-16} (I_{dm} \cdot f^2 \cdot S_{dm}) \frac{\sin\theta}{r^2} \quad (1)$$

由式(1)可见,控制差模干扰可以采用下面 3 种措施:

- (1) 减小电流幅度  $I_{dm}$ ,意味着需减小电源功率.
- (2) 减小频率  $f$ ,通过优化电源控制策略实现.
- (3) 减小环路面积  $S_{dm}$ ,优化 PCB 布线实现.

共模干扰用对地线,长度小于  $1/4$  波长的短单极子天线模拟.设环路电流为  $I_{cm}$ ,电流频率  $f$ ,天线长度  $L$ ,在距离  $r$ ,测量天线和辐射平面的夹角为  $\theta$  情况下,电场强度  $E_{cm}$  计算如式(2):

$$E_{cm} = 4\pi \times 10^{-7} (I_{cm} \cdot f \cdot L) \frac{\sin\theta}{r} \quad (2)$$

由式(2)可见,除了前述抑制差模干扰的 3 种方法,抑制共模干扰可新增 3 种措施:

- (1) 减小天线的源电压,即地电位.
- (2) 在线路中串联高共模阻抗,即共模扼流圈.

(3) 将共模电流旁路倒地.

通过上述 6 种方案,可以抑制传导干扰的产生,但对于已经产生的传导干扰,需要滤波器进行消除.滤波器是抑制传导干扰,提高电磁兼容性的重要措施,可以使频率范围在通带内的能量无衰减通过,使频率范围在阻带内的能量衰减而无法通过,从而起到传递信号、滤除干扰的作用.

本设计中,滤波器需要抑制开关电源产生的中高频谐波对外界的干扰,也抑制外界中高频干扰进入本系统,尤其野外雷击多发的场合下浪涌要求较高.因此需要设计一款结构紧凑,抗浪涌能力强,中高频谐波衰减大的低通滤波器作为电源输入部分.经分析,本设计采用图 6 所示的二阶低通无源滤波器.

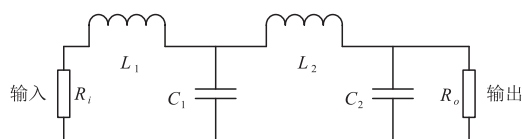


图6 二阶低通滤波器

低通滤波器中,  $L, C$  的计算如式(3)、(4),  $R_i$  是输入阻抗,  $R_o$  是输出阻抗,  $f_s$  是截止频率.

$$L = \frac{R_i}{2\pi \cdot f_s} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot R_i \cdot f_s} \quad (4)$$

经计算及工程修正,本设计中  $L_1, L_2$  取值 10mH,  $C_1, C_2$  取值 220nF,实现 0 ~ 300Hz 的低通滤波.

该设计要求在  $8/20\mu\text{s}$  波形雷电流冲击下,浪涌达到 6KV,瞬间通流能力 100A.常规防浪涌方案,在电源输入端并联氧化锌(ZnO)压敏电阻,其响应时间为 ns 级,比气体放电管快,比 TVS 管慢,结电容约几百到几千 pF.实际使用中,压敏电阻即使通过了  $8/20\mu\text{s}$  波形雷电流冲击,还是存在响应速度慢导致后续电路损毁的情况,为此考虑将防雷电路和滤波电路结合设计.

电源输入端需串联保险丝,传统熔断保险丝、NTC (Negative Temperature Coefficient)、PTC (Positive Temperature Coefficient) 等都无法承受瞬间 100A,  $8/20\mu\text{s}$  大电流冲击.本设计摒弃传统保险丝设计,将大电流熔断指标纳入滤波电路设计中<sup>[11,12]</sup>.

依据上述要求,输入滤波部分如图 7,压敏电阻  $VR_1$  与  $C_1$  并联,  $L_1$  设计为具有工频电流熔断能力,抗  $8/20\mu\text{s}$ 、100A 大电流冲击的 10mH 电感.

导线通过电流时会产生热量,热量积累到导线熔点时熔断,导线达到熔点温度所需时间通过式(5)计算:

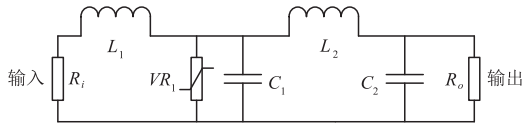


图7 防浪涌滤波电路

$$\theta_i = \frac{m \cdot c}{\int_0^t i \cdot R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta) dt} \quad (5)$$

$\theta_i$ 是导线达到熔点即熔断所需时间, $i$ 是导线流过的直流电流,工频 50Hz 电流可近似代入, $R_0$ 为 25℃ 下导线电阻, $\alpha$ 为电阻温度系数, $\theta$ 为电阻温升, $m$ 为导线质量, $c$ 为导线比热. 常规情况下,保险丝的熔断时间、熔断电流的计算可以根据式(5)计算,导线电流越大,熔断时间越短,但在极端瞬间,却存在超大电流不能熔断的情况.

导线除了上述热熔断,在磁场环境下,导线中载流子受安培力作用,会与导线晶格的正离子碰撞,当力足够大会导致导线崩断. 根据冲击电流流过导体的质动力机理,冲击电流通过一段长  $L$ , 电流  $I$  的导线,在均匀磁场  $B_0$  中所受的有质动力  $F$ ,可通过式(6)安培力公式确定,因此在磁场环境下,瞬态大电流通过导线,将使导线崩断而非熔断.

$$F = I \cdot L \cdot B_0 \quad (6)$$

前述分析, $L_1$ 采用在铁氧体磁芯上多层绕制可熔断合金丝漆包线方案. 磁芯选用 PC40 高磁场感应强度的棒状磁芯,尺寸  $\varnothing 5\text{mm} \times 10\text{mm}$ ,漆包线选用一种铅铝合金材质,直径 0.06mm,绕制 820 圈. 在 1KHz 下测试  $L_1$  静态参数,电感量  $10\text{mH} \pm 10\%$ , $Q$  值 30,工频额定电流 0.5A,直流电阻  $20\Omega$ .

$L_1$ 用工频电流做通流测试,熔断电流为 1A/60S, 2A/5S, 10A/50ms,基本符合式(5)所述.  $8/20\mu\text{s}$  大电流冲击测试中,冲击电流约 120A,时间约  $30\mu\text{s}$ ,如下图 8 所示,则符合式(6)所述. 在瞬态时间内,热量无法有效积累,大电流冲击下  $L_1$  断路为崩断,而非熔断.

综上, $L_1$ 兼具 1A 熔断器、10mH 电感、 $20\Omega$  电阻功能. 滤波电路其他器件, $VR_1$ 选择 10D561,即 560V,5KA 的高能压敏电阻, $C_1$ 、 $C_2$ 为 220nF 安规电容, $L_2$ 为普通电感,上述参数代入图 7 得到图 9.

图 9 输入滤波的传递函数  $G(s)$  为式(7):

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} \quad (7)$$

在计算滤波效果中,工程近似忽略  $F_1$ ,  $R_i$  无穷大,  $R_o$  为纯阻抗负载,得到传递函数为式(8):

$$G(s) \approx \frac{R_1}{(C_1 + C_2) \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot s^3 + (C_1 + C_2) \cdot L_1 \cdot R_1 \cdot s^2 + (L_1 + L_2) \cdot s + R_1} \quad (8)$$

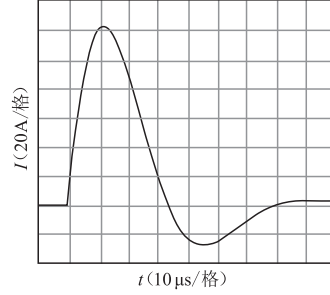
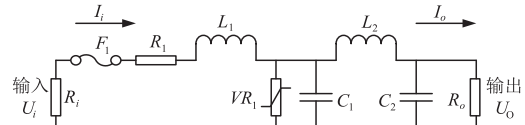
图8  $L_1$ 冲击电流测试

图9 电源输入滤波等效电路

滤波器的重要性能指标为插入损耗,插入损耗是引入滤波器所带来的功率损耗,要求通带插入损耗低,阻带插入损耗高,插入损耗  $IL$  计算为式(9):

$$IL = \frac{P_{in}}{P_{out}} = \frac{U_i I_i}{U_o I_o} \quad (9)$$

$I_i$ 和  $I_o$ 构成回路,不考虑漏电情况下  $I_i = I_o$ ,因此插入损耗  $IL$  和传递函数  $G(s)$  关系如下:

$$IL = \frac{U_i(s)}{U_o(s)} = \frac{1}{G(s)} \quad (10)$$

$IL \approx$

$$\frac{(C_1 + C_2) \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot s^3 + (C_1 + C_2) \cdot L_1 \cdot R_1 \cdot s^2 + (L_1 + L_2) \cdot s + R_1}{R_1} \quad (11)$$

本设计为低频滤波器,在低频通带内,希望  $L_1$ 、 $L_2$  感量, $C_1$ 、 $C_2$  容值, $R_1$  阻值越低越好,减少电路的损耗;在中高频阻带内,希望  $L_1$ 、 $L_2$  感量, $C_1$ 、 $C_2$  容值, $R_1$  阻值越高越好,增强滤波效果. 设计方案, $L_1$ 、 $L_2$  感量 10mH,  $C_1$ 、 $C_2$  容值 220nF,  $R_1$  阻值  $20\Omega$ ,滤波效果需通过样品测试进行验证.

### 3.2 电源控制策略

开关电源工作过程中, MOSFET 的每次开关就是一次电流冲击,产生一次电磁干扰;开关频率越快,电磁干扰的产生就越密集. 控制开关电源产生电磁干扰,需减少 MOSFET 每次开关产生的电磁干扰,控制 MOSFET 的开关频率,从两方面解决问题:

#### (1) 开关电源软开关技术<sup>[13,14]</sup>

MOSFET 开关瞬间产生的尖峰电压和尖峰电流是电磁干扰的主要来源,采用准谐振方式,使 MOSFET 在过零点导通,如图 10 所示.

该电路检测每一个谐振周期的谷底位置,使 MOSFET 在谷底导通,即在过零点进行开关,可有效

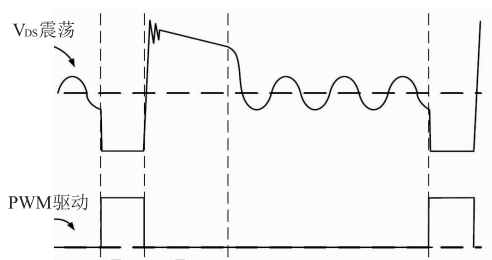


图10 软开关控制波形图

抑制电磁干扰. 软开关技术既减少 MOSFET 的开关损耗, 同时还使开关频率在不同的开关周期之间轻微的变化, 提高 EMI 的裕量. 软开关技术通过减少 MOSFET 每次开关产生的电磁干扰幅度, 来减少损耗和改善 EMC 特性.

软开关设计中, 输入端口的差分噪声通过式 (12) 的电流谐波的最大值确定:

$$\Delta I_{\max} = \frac{V_{\text{out}}}{8 \cdot f_s \cdot L} \approx 1.13 \text{ A} \quad (12)$$

假设电流谐波是占空比可变的三角波信号, 可以找出不同占空比情况下谐波成分的最大值.

#### (2) 开关电源频率控制

降低开关电源的频率会降低电磁干扰产生的密度, 但会导致电源性能下降, 因此需要平衡电源性能和电磁干扰两者的关系, 根据负载的情况自动调整开关电源的频率, 从而降低电磁干扰总量. 本设计中:

(1) 当马达转动, 开关电源功率较大, 需要提高开关频率, 从而提升电源效率以提高电源转换效率, 但开关频率的升高会导致电磁干扰会变大. 当然, 马达每次转动时间在 1s 以内, 因此短期加大的电磁干扰对整个电网系统的干扰有限.

(2) 开关电源大部分剩余时段维持控制系统的运行, 功率极低, 可以降低电源开关频率, 以减少电磁干扰的产生. 频率降低后, 电源转换效率会降低, 但此时电源的总功率很小, 电源效率的降低并不会产生多少功率损耗, 也不会产生多少热量. 通过降低开关电源的工作频率, 可以有效减少开关电源对外界的电磁干扰.

基于前述两点电源控制策略设计得到图 11, 该电源为单端反激电路 (FLYBACK), 输入 AC85 ~ 300V, 输出峰值功率 DC12V ~ 2A, 待机功耗 < 0.5W, 功率因素 PFC > 0.5, 电源转换效率  $\eta > 0.85$ .

马达启动及转动时, 电源功率最大  $P_{\max} = 30\text{W}$ , 开关频率最高,  $f_{\text{H}} = 50 \sim 200\text{kHz}$ , 产生较大的中高频谐波干扰, 控制系统暂停通信、霍尔检测等需要优良电磁环境的部分工作, 但该过程持续时间很短至 1s 以内, 对系

统影响忽略不计. 其他绝大部分时间, 仅控制电路工作或待机,  $P_{\min} = 0.5\text{W}$ , 开关电源工作在极低频率,  $f_L = 1 \sim 10\text{Hz}$ , 此时谐波含量和电磁干扰极低, 控制系统在良好电磁环境下工作.

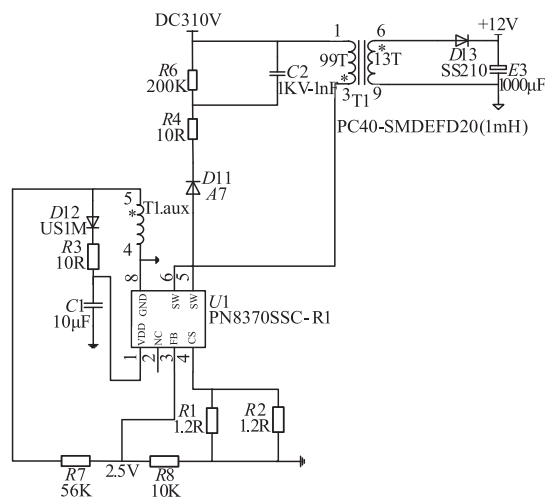


图11 电源控制电路图

电磁兼容性设计与具体电路实现也有关系, 一般从元器件的布局和 PCB 板的走线两方面来考虑, 可以有效降低传导干扰和辐射干扰.

## 4 测试结果

该设计对标 CE 认证, 在第三方实验室进行电磁兼容即 EMC 测试, 包括 EMI 和 EMS 两大类. EMI 包括传导 (Conduction), 辐射 (Radiation), 谐波 (Harmonic), 电压扰动 (Flicker), 骚扰功率 (Power Clamp), 电磁骚扰 (Magnetic); EMS 包括静电放电 (ESD), 辐射敏感度 (RS), 电快速瞬变脉动群 (EFT), 浪涌 (Surge), 传导敏感度 (CS), 工频磁场 (PFM), 电压跌落 (DIPS), 该设计根据需求对部分项目进行删减或加强.

### 4.1 电磁兼容性测试结果

参考下列标准 EN 55014-1:2006 + A1:2009 + A2:2011, EN 55014-2:2015, EN 61000-3-2:2014, EN 61000-3-3:2013 进行测试, 结果如表 1, 符合 CE 要求.

基于  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $VR_1$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  的低通滤波器, 构成了对 KHz 谐波的有效滤除, 解决了传导干扰、连续辐射干扰、电压扰动、群脉冲、电压跌落等问题. 尤其是  $L_1$  的设计, 等效与 FRL, 大幅提高电路的抗浪涌能力, 8/20 $\mu\text{s}$  浪涌测试达到 10KV. 电源控制部分采用基于准谐振工作模式的软开关技术, MOSFET 在过零点导通, 减少了中高频干扰脉冲的产生, 有效降低谐波的峰值. 电源控制采用可变开关频率, 压缩干扰产生时间, 并将干扰产生时间和易受干扰信号工作的时间错开. 如表 1 所示.

表 1 电磁兼容测试结果

测试项目 Description of Test Item	测试标准 Standard	测试结果 Results
Conducted disturbance at mains terminals 主电源终端干扰	EN 55014-1:2006 + A1:2009 + A2:2011	PASS
Continuous conducted disturbance 连续传导干扰	EN 61000-4-6:2014	PASS
Continuous radiated disturbance 连续辐射干扰	EN 61000-4-3:2006 + A1:2010	PASS
Harmonic current emissions 电流谐波	EN 61000-3-2:2014	PASS 12%
Voltage fluctuations & flicker 电压扰动	EN 61000-3-3:2013	PASS
Electrostatic discharge (ESD) 静电干扰	EN 61000-4-2:2009	PASS 8KV
Electrical fast transient (EFT) 群脉冲	EN 61000-4-4:2012	PASS 6KV
Surge (Input a. c. power ports) 浪涌	EN 61000-4-5:2014	PASS 10KV
Power frequency magnetic field(PFM) 工频磁场干扰	EN 61000-4-8:2010	PASS
Voltage dips,60% reduction60% 电压跌落	EN 61000-4-11:2004	PASS
Voltage dips,30% reduction30% 电压跌落	EN 61000-4-11:2004	PASS
Voltage interruptions 电压突降	EN 61000-4-11:2004	PASS

4.2 传导特性

电源线传导干扰为本设计重点,主要做好电源输入端的滤波,以及开关电源的频率控制,测试方式如图 12 所示.

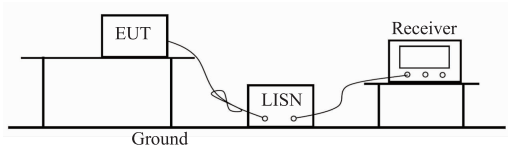


图12 传导测试示意图

被测产品 (EUT, Equipment Under Test) 放置在绝缘的松木桌面;EMC 分析仪 (Receiver) 给 EUT 供电,并测量 EUT 工作过程中在供电线路上产生的干扰;为了保障测试的准确性,在 EUT 和 Receiver 中间加入线路阻抗稳定网络 (Line Impedance Stabilization Network, 简称 LISN). LISN 是电力系统中电磁兼容测试中的一项重要辅助设

备,它可以隔离无关电波干扰,提供稳定的测试阻抗,并起到滤波的作用,否则电网将会向 EUT 注入干扰,EUT 也会向电网馈入干扰,这就会在 EMC 分析仪上搞不清哪些是 EUT 上的干扰,哪些是电网自身带来的干扰.

参照发射干扰 EMI 的最新测试标准 EN 55014-1:2006 + A1:2009 + A2:2011,对频段信号 0.15MHz ~ 30MHz 进行测试,该频段也是电网常见干扰,标准如表 2.

表 2 EN 55014-1 对传导干扰要求

谐波频率/ MHz	电场强度上限值/dBμV	
	准峰值	平均值
0.15 ~ 0.50	66.0 ~ 56.0	59.0 ~ 46.0
0.50 ~ 5.00	56.0	46.0
5.00 ~ 30.00	60.0	50.0

测试得到火线 L 的传导特性图 13,零线 N 的传导特性图 14,符合标准.

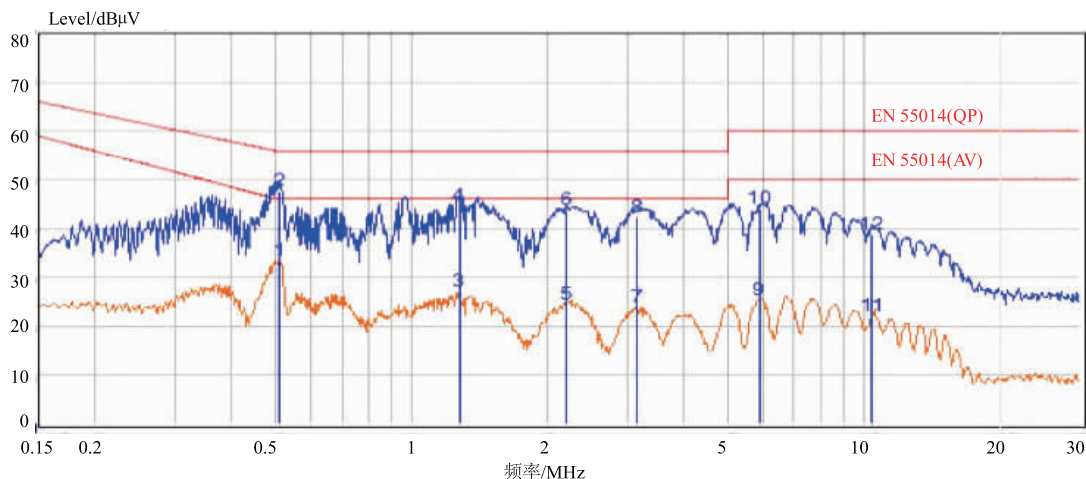


图13 L相传导测试波形图

L相测试中,最上方折线 EN 55014(QP)是高频谐波的准峰值标准,实际测量值为蓝色纹波,可见全部在标准之内,符合要求.在2号峰值点0.5MHz位置,该频

率是电源电路工作的最高开关频率点,有7个dB $\mu$ V的余量.同理 EN 55014(AV)是高频谐波的平均值标准,实测值有10个dB $\mu$ V的余量.

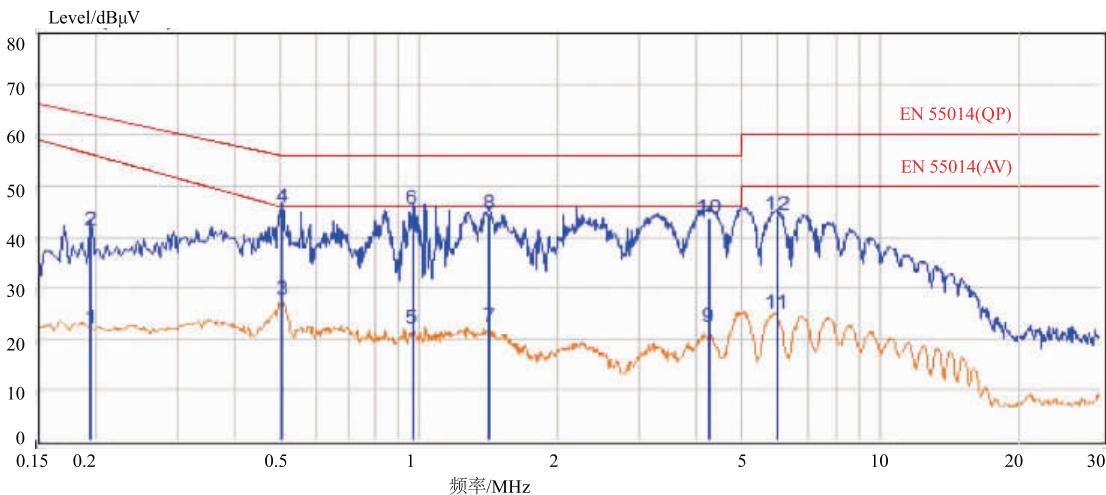


图14 N相传导测试波形图

N相测试中,EN 55014(QP)在4号点有9个dB $\mu$ V的余量,其他频率点的余量更大.

综合图13、图14可见,该设计对外界线路的传导干扰很小,所有频点至少低于标准7个dB $\mu$ V,即使考虑到量产过程中元器件及生产工艺的劣化偏差,仍可保证每个产品满足标准要求.

## 5 总结

本文对微型断路器电动操作系统的电磁兼容性进行了优化设计,其核心是电源输入滤波器的设计,电源控制策略,以及PCB布局布线优化.通过一个结构简单紧凑,抗浪涌能力强,中高频谐波衰减大的低通滤波器,大幅度降低谐波幅度,尤其是 $L_1$ 的设计,等效与FRL,使得8/20 $\mu$ s浪涌能力达到10KV.在电源控制策

略上,采用基于准谐振工作模式的软开关技术,使得MOSFET在过零点导通,减少了中高频干扰脉冲的产生,有效降低谐波的峰值;同时还采用可变电源开关频率,压缩干扰产生时间,并将干扰产生的时间和易受干扰信号工作的时间进行错开.在PCB布局布线上,则根据工程经验进行优化.

经过测试,符合欧盟CE下列标准:EN55014-1:2006+A1:2009+A2:2011、EN 55014-2:2015、EN61000-3-2:2014、EN 61000-3-3:2013,获得CE证书.本文为国内电力电子相关产品的电磁兼容性改善提供了参考方案及参考数据.

## 参考文献

[1] GB/T 32902-2016. 具有自动重合闸功能的剩余电流保

- 护断路器(CBAR)[S].
- [2] 李兴文,王云峰,原帅,屈建宇. 微型断路器短路开断过程中电极烧蚀特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(04):1080-1088.  
Li X W, Wang Y F, Yuan S, Qu J Y. Simulation research on electrode erosion characteristics of miniature circuit breaker during short circuit interruption process[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(04):1080-1088. (in Chinese)
- [3] EN 55014-1-2009, 电磁兼容性. 家用电器, 电动工具和类似用途器具要求. 第 1 部分: 发射 EN 55014-1-2006 + A1-2009[S].
- [4] DIN EN 55014-2-2009, 电磁兼容性. 家用器具, 电子工具和类似装置用要求. 第 2 部分: 抗扰性产品类标准[S].
- [5] DIN EN 61000-3-2-2010, 电磁兼容性(EMC). 第 3~2 部分: 限值. 谐波电流发射限值(设备输入电流 $\leq 16\text{A}/\text{相}$ )(IEC 61000-3-2:2005 + A1:2008 + A2:2009); 德文版本 EN 61000-3-2:2006 + A1:2009 + A2:2009[S].
- [6] DIN EN 61000-3-3-2002, 电磁兼容性(EMC). 第 3~3 部分: 限值. 不受连接条件限制的额定电流为每相位 16A 的设备用公用低压供电系统中电压变化、电压波动和闪变的限制(IEC 61000-3-3:1994 + A1:2001); 德文版本 EN 61000-3-3:1995 + 勘误表:1997 + A1:2001[S].
- [7] 张卫苓, 孟云侠. 基于高次谐波干扰的计算机电源净化技术[J]. 电源技术, 2013, 37(01):138-140.  
Zhang W L, Meng Y X. Research on computer power purification technology of high harmonic disturbance[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(01):138-140. (in Chinese)
- [8] 田锦, 谢拥军, 辛红全, 邱扬, 柯仲明. 复杂系统电磁兼容评估的改进 TOPSIS 方法[J]. 电子学报, 2013, 41(1):105-109.  
TIAN J, XIE Y J, XIN H Q, QIU Y, KE Z M. A synthetical EMC evaluation method for a complicated system based on a novel TOPSIS approach[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1):105-109. (in Chinese)
- [9] 张宜涛, 杜明星, 魏克新. 基于谐振理论的 PCB 电磁兼容优化设计方法[J]. 电力电子技术, 2019, 53(02):58-61.  
Zhang Y T, Du M X, Wei K X. PCB electromagnetic compatibility optimization design method based on resonance theory[J]. Power Electronics, 2019, 53(02):58-61. (in Chinese)
- [10] 梁海波, 姜苹, 董世茂, 孟恭. 基于相关性模型的电源滤波组合测试性设计[J]. 航天控制, 2017, 35(06):80-84.  
Liang H B, Jiang P, Dong S M, Meng G. Testability design for power filter based on relevance model, aerospace control[J]. 2017, 35(06):80-84. (in Chinese)
- [11] Zhang D, Fu Z C, Zhao G, Sun W. Protection distance of surge protective devices in low voltage distribution systems[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2008(04):477-481.
- [12] 李祥超, 周中山, 王成芳, 陈戎健, 陈璞阳. 8/20 $\mu\text{s}$  雷电冲击下熔断器开断性能[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24):61-66.  
Li X C, Zhou Z S, Wang C F, Chen R J, Chen P Y. 8/20 $\mu\text{s}$  Lightning current impulse fuse breaking performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24):61-66. (in Chinese)
- [13] 王强, 岳远韶, 王天施, 刘晓琴. 无源器件辅助换流的单相全桥软开关逆变器[J]. 电子学报, 2018, 46(9):2295-2298.  
WANG Q, YUE Y S, WANG T S, LIU X Q. Single-phase full-bridge soft-switching inverter with passive device-assisted commutation[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(9):2295-2298. (in Chinese)
- [14] Mangesh Borage, Sunil Tiwari, Swaran Kotaiah. A passive auxiliary circuit achieves zero-voltage-switching in full-bridge converter over entire conversion range[J]. IEEE Power Electronics Letters, 2005, 3(4):141-143.

#### 作者简介



刘剑滨 男, 1978 年于湖南邵阳, 硕士, 现为无锡太湖学院江苏省物联网应用技术重点建设实验室高级工程师, 硕士研究生导师, 主要研究方向为开关电源、LED 照明、物联网应用技术。

E-mail: 1905447@qq.com

姜岩峰(通讯作者) 男, 1972 年出生, 博士, 现为江南大学物联网工程学院教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为集成电路设计、测试技术。

E-mail: jiangyf@jiangnan.edu.cn