

物理实验



# 基于剩余电流互感的漏电保护演示仪

戚慧珊 吴绪辉

(华南师范大学物理与电信工程学院 广东 广州 510006)

(收稿日期:2018-11-13)

**摘要:**以剩余电流互感为核心原理,使用零序电流互感器、信号调理电路和电磁铁等部件设计制作了漏电保护演示仪,并利用剩余电流模拟支路实现对漏电现象的模拟展示.当电流互感器测得的漏电电流大于设定的动作阈值电流时,信号处理电路将输出高电平,驱动电磁脱扣装置工作,实现对电路的切断.演示仪的工作电压被下调至人体安全电压范围内,其阈值动作电流与模拟支路漏电电流均可调节,满足了演示实验的需求.

**关键词:**漏电保护 剩余电流 电流互感 信号处理

漏电保护开关在日常中十分常见,它能够在电路发生漏电的瞬间切断回路,从而保护用户的人身安全.不过,有不少人会混淆空气断路器与漏电保护器的概念,以为二者是可以等效替代的设备.实则不然,空气断路器是利用大电流产生的强磁场来吸引衔铁推动脱扣装置实现电路的切断,或者是利用大电流使金属片发热形变而推动脱扣装置实现电路的切断,均无需额外的信号放大装置;而漏电保护器是利用回路剩余电流产生的磁场使次级线圈产生感应电流信号<sup>[1]</sup>,电信号经放大后驱动电磁铁推动脱扣开关,实现电路的切断.前者的阈值动作电流为安培级,后者的阈值动作电流为毫安级.为此,我们设计了一款能够在人体安全电压范围内工作的漏电保护演示仪,用于直观地展示漏电保护器的工作过程.

## 1 漏电保护器的原理

根据基尔霍夫电流定律<sup>[2]</sup>,工作正常的回路其输入线与输出线的电流大小相等、方向相反,即电流代数和为零.若回路存在导电的破损点,当破损点接触导体或被人触碰时,回路电流将在该破损点分流,漏电电流不经回路输出线而直接流入大地,此时回路的输入输出线的电流代数和不为零,即回路内存在剩余电流.如图1所示,漏电保护器正是通过零序电流互感器来检测回路中的电流代数和<sup>[3]</sup>,判断回

路是否发生漏电现象;当回路发生漏电时,由于电流互感现象使得互感器次级线圈上产生感应电流,感应信号经信号调理电路处理后,驱动电磁脱扣装置执行脱扣动作,实现对发生漏电的故障回路的即时切断.

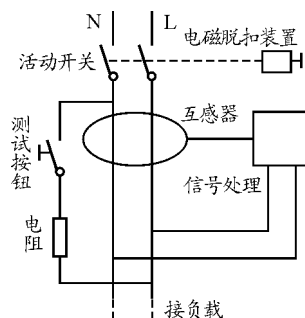


图1 常用的漏电保护器电气原理图

## 2 演示仪的设计制作

演示仪的组成结构示意图如图2所示.

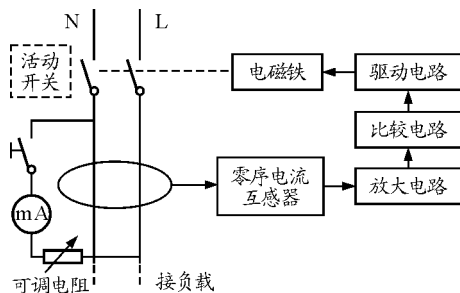


图2 演示仪的组成结构图

## 2.1 零序电流互感器

如图3所示,零序电流互感器<sup>[4]</sup>由磁芯和次级线圈组成,其初级线圈即被检测电路,将直接穿过互感器的中心通孔.初、次级电流与线圈匝数之间关系式为 $I_1 : I_2 = n_2 : n_1$ .如图3所示,演示仪所用的零序电流互感器为塑料封装,次级线圈与磁芯被包裹在塑料壳体内,其次级线圈共有1000匝,感应电流从 $S_1$ 引脚流出.当穿过中心通孔的工作回路内的电流代数和不为零时,磁芯的磁通量将发生变化,此时次级线圈因互感现象产生感应电流,感应电流流经采样电阻后转为电压并输出.



图3 零序电流互感器实物图

## 2.2 信号处理与驱动电路

由于零序电流互感器的次级线圈输出的感应电流很小,不足以直接驱动电磁铁工作,因此需要对感应电流进行放大与比较处理,图4是信号调理电路.

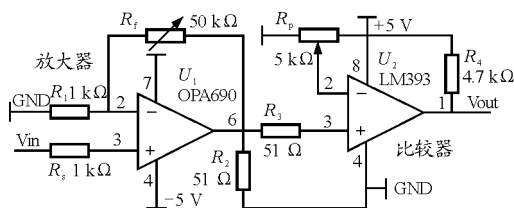


图4 信号调理电路

使用如图4所示信号调理电路,其中放大器电路<sup>[5]</sup>用于对感应电流进行放大,并输入到比较器电路内进行比较;当输入信号的电压高于参考信号电压时,比较器输出高电平,反之输出低电平.调节比较器的参考电压可实现对漏电保护器的动作阈值电流进行调整,图5是驱动电路.

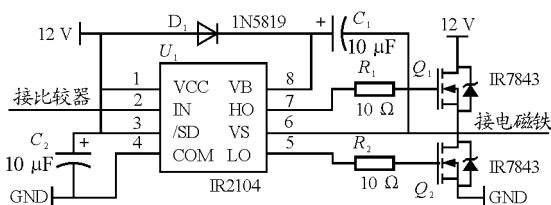


图5 电磁脱扣装置驱动电路

比较器输出端与驱动电路连接,当比较器输出端为高电平时,如图5所示的电磁脱扣装置驱动电路的上半桥处于导通状态,电磁脱扣装置通电工作,工作回路将被及时切断.

## 2.3 电磁铁与活动开关

由于市面上所销售的漏电保护器中的电磁脱扣装置结构紧凑、设计巧妙,难以手工复制,故使用推拉式电磁铁与钮子活动开关来代替电磁脱扣装置,以实现回路开关的通断控制.

## 2.4 剩余电流模拟支路

由于回路的工作电压较低,当回路破损点接地或被人触摸后,从故障点分流出去的漏电电流较小,导致零序电流互感器内的剩余电流很小,不足以使次级线圈产生感应电流.为使演示仪的实验现象更加明显,可跨越零序电流互感器增加模拟支路来实现模拟漏电,电路接线布置如图2所示.如图6所示,工作回路总输入电流 $I_N$ 与总输出电流 $I_L$ 相等,由于总输入电流 $I_N$ 在破损点处分流后得到的模拟漏电电流 $I_1$ ,经模拟支路直接流入回路的输出线,此时零序电流互感器平面内的输出线电流 $I_L$ 大于输入线电流 $I_2$ ,即电流代数和不再为零,互感器平面的剩余电流值即模拟支路的电流值,以实现漏电现象的模仿.剩余电流模拟支路串联了交流毫安电流表,可实时监测模拟支路内的电流值,同时调节滑动变阻器可改变模拟支路的电流,通过对支路开关的开合来实现对回路“漏电现象”的控制.

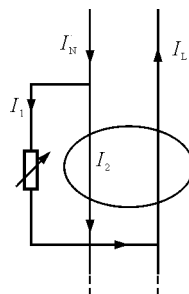


图6 漏电模拟支路某时刻电流方向图

## 3 演示仪器的操作

漏电保护演示仪实物图为图7所示.



图7 漏电保护演示仪实物图

### 3.1 互感器的漏电电流响应性能

为了得到与市电类似的单相交流信号,可利用函数信号发生器产生频率为 50 Hz, 峰值为 20 V 的正弦信号. 断开电流互感器与放大电路的连接, 使用交流毫伏电压表测量互感器的输出信号. 将模拟支路变阻器的阻值调至最大, 接通工作回路与模拟支路, 调节模拟支路的变阻器使支路电流增大, 记录此时电流表与电压表测量所得的数据. 将电流电压数据绘制成如图 8 所示的关系曲线.

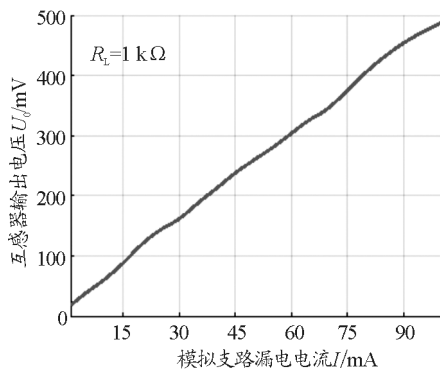


图8 漏电电流与互感器输出电压的关系曲线

由关系曲线图可知, 当漏电电流小于 30 mA 时, 互感器输出电压随漏电电流增大的增速较小, 电流响应速度低; 当漏电电流大于 40 mA 时, 互感器输出电压随漏电电流增大的增速上升, 电流响应速度较快, 响应滞后现象有所减弱.

### 3.2 模拟漏电测试

#### (1) 设定漏电保护动作电流阈值

在进行模拟漏电测试前, 需对漏电保护动作电流阈值进行设定. 首先接通所有电路模块, 调节模拟

支路变阻器使交流毫安表的示数为 30 mA, 观察此时电磁脱扣装置是否动作. 若未执行脱扣动作, 则需适当地增加信号放大器的增益和降低比较器电路的参考电压, 直至电磁铁通电工作. 此时, 漏电保护演示仪的动作电流阈值被设定成 30 mA.

#### (2) 回路电流的改变对剩余电流的影响

断开漏电模拟支路开关, 逐渐增大负载电路的负载, 观察电磁脱扣装置是否被触发工作. 经测试, 当工作回路电流逐渐增大到 200 mA 时, 活动开关仍处于闭合状态; 当漏电模拟支路被闭合时, 工作回路被电磁铁即时切断. 这说明工作回路电流的增大对互感器平面内的剩余电流值的影响很小.

#### (3) 电路热噪声对动作电流阈值的影响

保持放大电路增益与比较电路参考电压不变, 闭合漏电模拟支路开关, 调节模拟支路变阻器来改变漏电电流, 记录能使电磁铁恰好触发工作的漏电电流, 重复多次, 并绘制如表 1 所示的数据记录表.

表1 动作电流阈值数据记录表

序数	1	2	3	4	平均值	波动值
$I/\text{mA}$	33	31	36	34	33.5	5

分析数据记录表, 可知当模拟支路电流值在 31 mA ~ 36 mA 范围波动时, 活动开关都存在被切断的可能性, 这是由于信号放大电路与比较电路当中存在电路热噪声, 而电流热噪声将会影响比较电路的判断结果, 故动作电流阈值会在一定范围内波动. 因此, 为使实验效果明显, 在进行微弱漏电测试时, 可将模拟支路的电流值设为 30 mA 以下, 用来演示回路发生“漏电”但活动开关未跳闸的现象; 在进行正常漏电测试时, 可将模拟支路的电流值设为 40 mA 以上, 用来演示回路发生漏电并被即时切断的现象.

## 4 结束语

漏电保护演示仪以剩余电流互感现象为核心原理, 采用剩余电流模拟支路的方式对漏电现象进行模拟展示. 当漏电电流大于 40 mA 时, 剩余电流互感器的电流响应速率较高, 电路开关将被即时切断.

演示仪的核心器件零序电流互感器的灵敏度高、性能稳定,满足了演示实验对控制变量的需求.回路电流的改变对剩余电流的影响较小,电路热噪声会对动作阈值电流带来波动干扰,但波动影响在5 mA范围内.同时,演示仪将漏电保护器的额定工作电压从220 V下调至人体安全电压范围内,既打破了演示实验的场所限制,又有效地保护了实验操作者的人身安全.模块化的设计可充分地展示出漏电保护器的工作过程,有助于向学生普及漏电保护器的原理与安全用电知识.演示装置实验现象直观,教学效果显著,具有良好的推广价值.

## 参考文献

- 1 贺杨. 剩余电流动作保护器(RCD)综述. 电气应用, 2016,35(17):38 ~ 43
- 2 李瀚荪. 电路分析基础上册(第5版). 北京:高等教育出版社,2017.12 ~ 14
- 3 高瑜,赵建文,宋璐雯,等. 漏电断路器性能测试实验台研制. 实验技术与管理,2018,35(07):86 ~ 89
- 4 物理课程教材研究开发中心. 高中物理选修1-1. 北京:人民教育出版社,2007.61 ~ 62
- 5 康华光. 电子技术基础模拟部分. 北京:高等教育出版社,2013.22 ~ 25

# Leakage Protection Demonstrator Based on Mutual Inductance of Residual Current

Qi Huishan Wu Xuhui

(College of Physics and Telecommunications Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006)

**Abstract:** Based on the residual current mutual inductance as the core principle, the leakage protection demonstration instrument was designed and fabricated by using zero - sequence current transformer, signal conditioning circuit and electromagnet. The residual current simulation branch was used to simulate the leakage phenomenon. When the leakage current measured by the current transformer is greater than the set action threshold current, the signal processing circuit will output a high level to drive the electromagnetic trip device to work, thereby cutting off the circuit. The working voltage of the demonstrator is lowered to the safe voltage range of the human body, and the threshold operating current and the leakage current of the analog branch can be adjusted to meet the requirements of the demonstration experiment.

**Key words:** leakage protection; residual current; current mutual inductance; signal processing

(上接第86页)

## 7 板书设计

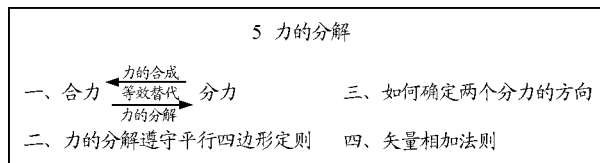


图1 “力的分解”板书设计

## 8 教学反思

对于力的分解,学生比较容易理解,而对于力的分解要根据实际情况进行分解这一点,较难理解,所

以这节课多处增加了学生参与,并通过亲身体验,激发学生的学习兴趣,培养学生动手操作、观察实验现象和分析实际问题的能力.

通过分析日常生活中应用力的分解的现象,让学生知道物理与生活是息息相关的,培养学生观察生活现象、发现问题、建立物理模型、用物理模型解决问题、用物理语言解释现象的能力.

## 参考文献

- 1 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版). 北京:人民教育出版社,2018
- 2 孙爱兵. 例析物理学科核心素养的培养. 中学物理, 2016(20):24 ~ 25