

doi: 10.7690/bgzd.2014.05.017

相位差磁调制原理在直流小电流传感器中的应用

邹琼, 王嘉, 徐莎

(绵阳市维博电子有限责任公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对设备供电支路绝缘漏电流检测问题, 对相位差磁调制原理在直流小电流传感器中的应用进行研究, 采用相位差磁调制器工作原理实现了穿心直流小电流测量; 阐述了穿心直流小电流传感器设计的关键点, 交流激磁振荡电路的性能直接决定了整机的性能。穿心直流小电流传感器有效解决了设备绝缘漏电流检测问题。

关键词: 相位差磁调制原理; 方波振荡器; 特制电流互感器

中图分类号: TP206 **文献标志码:** A

The Application of Magnetic Phase Modulation Principle in Small DC Current Sensor

Zou Qiong, Wang Jia, Xu Sha

(Mianyang Weibo Electronics Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

Abstract: For insulating the leakage current detection problem of equipment supply branch, researching on the application of magnetic phase modulation principle in small DC current sensor, using magnetic phase modulator achieved a feedthrough small DC current measurement. This paper describes the key points of the feedthrough small DC current sensor designs. The performance of AC excitation oscillator circuit directly determines the overall performance. The feedthrough small DC current sensor can effectively solutioned the problem of the equipment insulation leakage current detection.

Keywords: magnetic phase modulation principle; square wave-form oscillator; the special current transformer

0 引言

相位差磁调制是一种磁测量传感技术, 由于它在动目标中可极敏感地感应磁场强度的变化, 所以测量电源系统或设备绝缘漏电流非常适宜有效。随着自动控制、工程检测、电子技术的快速发展, 特别是计算机技术、智能化、网络化的应用, 其特定的专业性技术得到迅速应用和推广; 因此, 笔者对其在直流小电流传感器中的应用进行了探索研究。

1 相位差磁调制原理

在交变对称电压或电流源激磁的铁心中, 若加进直流偏置磁场(见图 1), 铁心中交变磁通的对称性就会被破坏, 磁通波形的正负半波相位将发生变化, 相应地, 检测绕组输出电压中的正、负半波将发生相对位移。经理论分析和实践证明, 正、负半波相位变化量的大小和方向可以反映直流偏置电流的大小和方向, 利用这一特性测量直流电流, 就是相位差磁调制式直流电流测量方法的基本原理^[1]。

图 1 中, W_1 为直流信号绕组; W_2 为交流激磁绕组; W_3 为检测绕组。

以单铁芯磁调制器为例(见图 1), 假设相位差磁调制处于理想状态, 即在理想磁化曲线和三角波

交流激磁下(可以为方波), 其铁芯磁化波形如图 2。

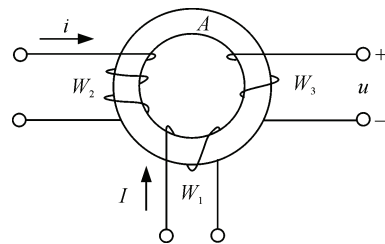


图 1 单铁芯相位差磁调制原理

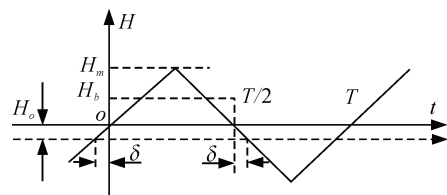


图 2 铁芯磁化波形

图 2 中, T 为激励周期; H_m 为激磁磁场强度幅值; H_0 为铁芯饱和和磁场强度。

t 正负为 W_3 端电压 u 中相邻正、负矩形脉冲之间的间隔。当直流电流为零时, 即 $H_0=0$, u 中正负脉冲列不移相, $t = \pm T/2$; 当直流电流大于零, 即 $H_0 > 0$, 铁芯中 H 的波形将向上平移 H_0 , 由于 $dH/dt = 4H_m/T$, H 波形中上升段和下降段过零点分别前移

收稿日期: 2013-12-08; 修回日期: 2014-01-23

作者简介: 邹琼(1965—), 女, 四川人, 本科, 高级工程师, 从事电量隔离传感器设计开发研究。

和后移 δ , $\delta=(H_0T)/(4H_m)$ 。

u 中正、负脉冲列发生相对移动^[1-2], 且移相角度相等, 都为 δ (见图 3)。

$$\Delta t = t_{\pm} - T/2 = 2\delta = \frac{W_1 I}{W_2 J_m} \cdot \frac{T}{2} \quad (1)$$

由此可得:

$$I = \frac{2W_2 J_m}{W_1 T} \Delta t \quad (2)$$

可见 Δt 大小及正负反映了被测直流电流大小和方向(见图 3)。

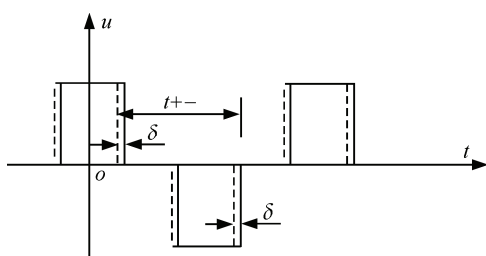


图 3 磁场强度和输出电压波形

单铁心磁调制器在三角波恒定交流激磁下, 铁心磁化波形为对称的三角波, 检测绕组端电压的波形为正、负相间的矩形脉冲波。当被测直流电流 I 为零时, 该电压中相邻的正、负矩形脉冲之间的间隔 t 为 $\pm T/2$, T 为激励电源的周期。当被测直流电流不为零时, 检测绕组端电压中的正、负矩形脉冲相对发生反方向移相, 且移相幅度相等, 此时脉冲间隔正、负的变化量 Δt 与直流信号成正比, 与交流激磁信号成反比。激励源可以采用其他波形, 如正弦波、方波、梯形波等^[2-3]。因此, Δt 的大小及正负就可以反映直流被测电流的大小和方向, 可以通过检测 Δt 来测量直流电流, 直流 I 与 Δt 间的关系为标准的线性关系。

2 相位差磁调制直流小电流传感器

2.1 穿心直流小电流传感器原理

笔者设计的穿心直流小电流传感器采用方波作为交流激磁器, 如图 4 所示, 采用运放和 R、C 网络组成一个滞回比较器型 RL 方波振荡电路, 用特制电流互感器 CT 充当振荡器反馈回路中的电感, 振荡频率主要取决于 CT 的电感量和电阻的大小; 运放工作在电压比较器状态, 所以输出正负对称的双极性方波。如果电流互感器的磁环接收到被测直流电流的磁场, 则振荡器的状态会受到某种影响, 其输出信号会发生改变, 出现一定的直流成分, 反映出被测直流电流的大小和方向。方波经无限增益

滤波器求出输入信号的平均值; 经调零电路、放大电路和低通滤波电路, 输出 0~5 V 的标准直流电压信号, 若需要传感器输出为电流信号, 再经 V/I 转换电路, 便可提供 0~20 mA 的直流电流输出。若需要传感器输出为数字信号, 可经 A/D 转换、RS485 接口电路输出。

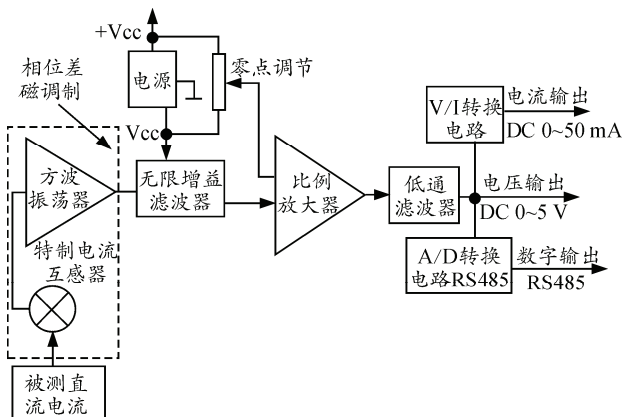


图 4 直流小电流传感器原理框图

2.2 穿心直流小电流传感器主要性能特点

体积小、精度高、功耗低、稳定性好, 耐冲击能力、抗干扰能力强, 采用穿孔结构输入, 孔径为 $\phi 48$ 、 $\phi 35$ 、 $\phi 20$, 输出接线采用弹簧端子接线, 既可以采用标准 DIN 卡槽安装结构, 又可以使用螺钉固定安装, 操作简单方便, 便于现场安装, 应用方便。测量信号范围为 0~300 mA 时, 检测精度为 1%~2%, 同时还能够检测出漏电流的方向。传感器响应时间为 350 ms, 静态工作电流小于 20 mA, 绝缘隔离耐压大于 3 000VAC 1 min 漏电流 1 mA。传感器输出 0~5 V、0~20 mA 或 RS485 总线输出。

3 穿心直流小电流传感器关键技术

3.1 交流激磁电路设计

由传感器原理框图可以看出, 能够对传感器的功能实现和性能参数起最大作用的核心部分, 是含特制电流互感器的方波振荡电路, 即相位差磁调制电路。方波振动电路如图 5。

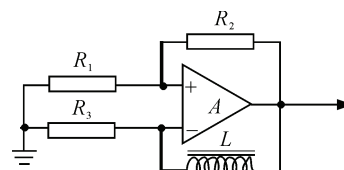


图 5 方波振动电路框图

理想运放在双电源供电的电压比较器模式下,

输出只有 2 种状态：接近 $+V_{cc}$ 或接近 $-V_{cc}$ ，只要运放两输入端电压差 ΔV 稍微大于 0，就会迅速输出正向饱和电压值 $+V_m$ (V_m 略小于 V_{cc} ，也就是运放能够输出的最大幅值)，反之就输出负向饱和电压值 $-V_m$ ，不存在中间稳态。

假设运放在电路通上电源的瞬间，两输入端电压差微大于 0，这时运放应输出 $+V_m$ ，于是这时加在 R_1 、 R_2 两端以及 R_3 和 L 两端的电压就是 $+V_m$ 。又因为运放输入端阻抗非常高，可认为不会吸入电流，所以 $I_{R1}=I_{R2}$ ， $I_L = I_{R3}$ ，这时运放同相端的电压：

$$U_{R1} = \frac{V_m R_1}{R_1 + R_2} \tag{3}$$

同样的，反相端电压也是由通过 R_3 的电流决定的，但因为 R_3 前面串着互感器 L ，通过电感的电流不能突变， I_{R3} 只能按电感的正阶跃响应(充电)规律逐渐增加，运放反相端电压 $U_{R3}=R_3 I_{R3}$ ，也只能按同样的规律逐渐增加，当运放反相端电压 U_{R3} 增加到微大于同相端电压 U_{R1} 的时候，运放输出翻转，立刻由 $+V_m$ 变为 $-V_m$ ，这段 U_{R3} 增加的时间即这种方波振荡器的正半周期。翻转后，运放同相端电压：

$$U_{R1} = -\frac{V_m R_1}{R_1 + R_2} \tag{4}$$

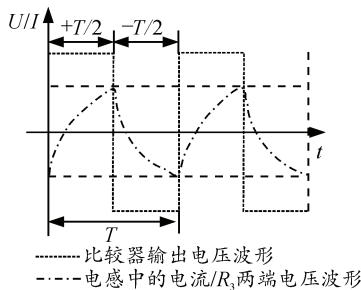


图 6 振荡电路波形

R_3 和 L 两端电压为 $-V_m$ ，而 I_{R3} 及 U_{R3} 也只能按电感的负阶跃响应(放电)规律逐渐递减(反向增加)，当反向增加到微大于 U_{R1} 时，运放输出又翻转为 $+V_m$ ，这段 U_{R3} 递减的时间就是振荡的负半周期，与前面的正半周期合起来构成了 1 个完整的周期 T ，这 2 种过程如此周而复始，运放输出端就得到了幅度为 $\pm V_m$ 的方波，当振荡稳定后，正负半周期是相等的，而该方波的频率是由 R_3 和 L 的 R_L 时间常数直接决定的，振荡波形见图 6 所示，其中 L 、 R_3 串联支路中的电流波形是典型的 RL 积分波形。这里运放作为电压比较器，翻转的阈值电压 V_T 就是由 R_1 、 R_2 分压所确定的：

$$\pm V_T = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_m \tag{5}$$

3.2 电流互感器选型

使这个方波振荡器起振并稳定地振荡是实现穿心直流小电流测量的第一步。要完成传感器的功能，电流互感器的选型及加工也特别重要，需采用特制电流互感器。

设互感器线圈有 N 匝，磁芯磁导率为 μ ，形状是闭合的圆环，内外平均直径为 d ，截面积为 S ，见图 7，线圈导线的粗细可以忽略不计，则线圈中通入大小为 I 的电流，在磁芯中产生的磁感强度

$$B = \mu NI / \pi d \tag{6}$$

其中 πd 即是磁芯的平均磁路长度。

这个式子成立的条件是电流较小，产生的磁感强度远未达到电感磁芯的磁饱和区。根据理想软磁性材料的磁化曲线，只有在靠近磁化曲线零点的部分，励磁电流和磁感强度的值才有近似的线性关系。

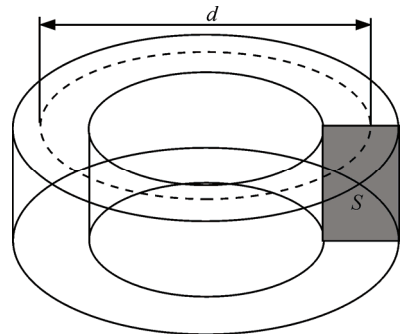


图 7 电流互感器外形

如果电感线圈中通的是交流电流 $i(t)$ ，要使电感磁芯中得到与电流成线性关系的交变磁场，则交流电流的幅值 A 不能过大，以免磁感强度进入或接近磁芯的饱和区，如图 8 所示，交流电流的幅值范围是 $\pm I_T$ ，对应的磁感强度幅值范围是 $\pm B_T$ 。

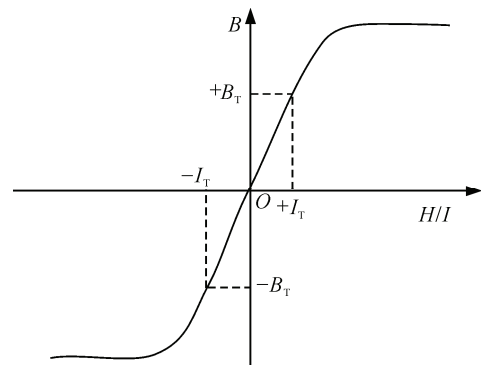


图 8 交流幅值与磁感应强度幅值关系