

新颖高性能电流传感器研究

唐立军^{1,2} 卢宋林¹ 李德明¹

1 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

2 (长沙电力学院 长沙 410077)

摘要 利用一种新的零磁通检测技术研制了一台 DC—100kHz 电流传感器样机。结果表明用这种技术制作的电流传感器具有性能指标高、磁芯易于选择、制作方便等特点。

关键词 电流传感器, 零磁通, 零磁通检测

中图分类号 TM835.2, TM452+.92, TL503.5

高稳定和高精度电流源在加速器、核磁共振(NMR)等领域有广泛的用途,其电流采样和检测必须用高性能的电流传感器,其稳定性要求达十万分之一,甚至更高。常用的霍尔传感器的长期稳定度只在千分之一左右,温度系数约万分之一^[1],不能满足上述领域的使用要求。国外利用零磁通检测原理检测磁化电流的二次谐波分量或磁化电流的正、负磁化电流峰值是否相等的办法研制出了满足这种要求的传感器^[2,3],近年来国内已有研究单位开始了这方面的研究工作^[4],但目前国内外对磁芯的挑选要求较高,设计电路也比较复杂。我们利用新的零磁通检测技术研制出了直流量程超过 200A、长期稳定度为十万分之一的电流传感器。

1 新颖高性能电流传感器的制作原理

1.1 结构

新颖高精度电流传感器由探头、零磁通检测器、放大电路及输出电路组成,其结构如图1所示。探头中包括三个磁芯、四个绕组线圈,其中 T_1 、 T_2 为截面积和磁路长度相等的同一种磁芯材料, T_3 为一般的电感磁芯, N_1 、 N_2 分别是 T_1 、 T_2 上的绕组, N_3 、 N_4 是 T_1 、 T_2 上的共同绕组, N_4 为交流感应线圈, N_3 为补偿线圈,被测电流 I_p 经过初级线圈 N_p 与所有磁芯相连,各线圈的连接方向见图1。

1.2 直流电流的检测信号

1.2.1 单一检测线圈 图2为单一检测线圈接线图,图中 $u = U_m \cos \omega t$ 为激励信号, I_p 为被测直流电流。为说明问题方便,用图3的磁化曲线来近似磁滞回

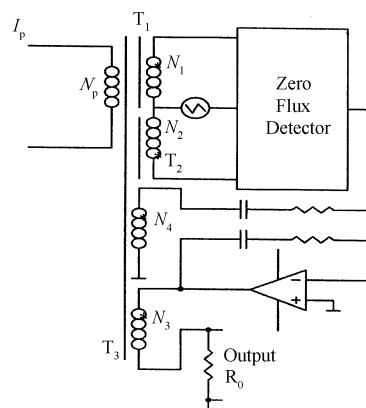


图1 新颖高性能电流传感器原理图

Fig.1 Block diagram of the high performance current transducer

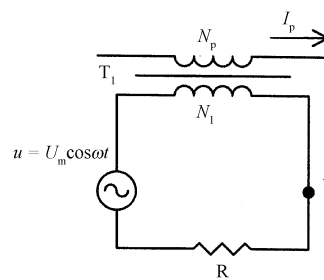


图2 单检测线圈接线图

Fig.2 The single sensing circuit diagram

线以图示在 u 的激励下 N_1 的磁化电流变化。在 u 激励下, T_1 的磁通密度为 $B = B_m \sin \omega t$, B_0 为直流磁通密度,当 $I_p = 0$ 时, $B_0 = 0$ 即零磁通,其磁通密度和磁化电流的波形如图3曲线(a)所示。从曲线(a)可知,磁化电流的波形与磁通密度 B 同相,且正负波形对称,可用 $i(t) = I_m \sin \omega t$ 表示。当 $I_p \neq 0$ 时, $B = B_0 + B_m \sin \omega t$, 对应磁化电流的波形如图3曲线(b)所示,

第一作者:唐立军,男,1963年出生,1989年于中国科学院上海原子核研究所核技术及应用专业获硕士学位,现为在职攻读博士生

收稿日期:2003-03-18,修回日期:2003-04-16

从曲线(b)可看出,由于磁芯材料的非线性特性,当 $B_0 > 0$ 时,磁化电流前半周期的幅度要比后半周期的幅度大,同样的道理,当 $B_0 < 0$ 时,磁化电流前半周期的幅度要比后半周期的幅度小,即不管其是否饱和,磁化电流的波形幅度都随 B_0 变化(即 I_p 的变化)而单调变化。

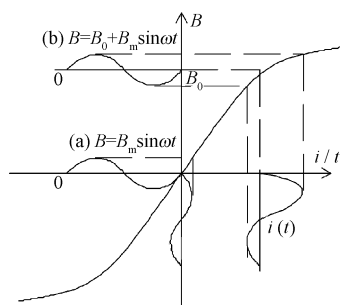


图3 单匝线圈的磁化电流波形随直流 I_p 的变化

Fig.3 The change of magnetic current wave form of single sensing winding with DC I_p

1.2.2 双检测线圈 单的检测线圈虽然可以检测出被测电流的信号,但调制波 u 会在被测线圈上产生感应电流,从而影响被测电流。为了消除此影响,我们采用双探测线圈,并将电阻 R 用脉冲变压器代替,构成了零磁通检测器,接线图见图4,图中 $N_1 = N_2$, N_1 、 N_2 的绕向相反,在理想情况下, T_1 、 T_2 对称,这样使得两线圈上的调制信号在被测线圈上产生的感应电流大小相等、方向相反而抵消。

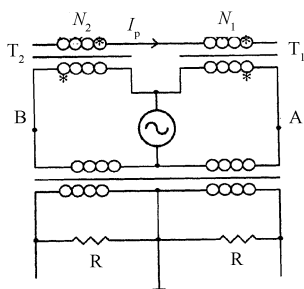


图4 零磁通检测示意图

Fig.4 The schematic diagram of zero-flux sensing

根据上面的分析,在被测电流 $I_p = 0$ 时,线圈 N_1 、 N_2 的磁化电流大小相等,方向相反,此时 A、B 两点的电位相等,脉冲变压器无输出信号。 N_1 、 N_2 的磁化电流的波形图见图5。

当被测电流 I_p 流过 N_1 时,设 I_p 为正,使 T_1 的磁通量增加, T_2 的磁通量减少,则 N_1 、 N_2 的磁化电流的波形图见图6。从图6可知, N_1 、 N_2 的磁化电流阴影部分面积的和为正并随 I_p 的增大而增大。

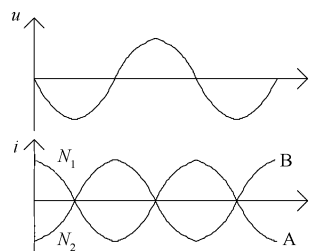


图5 零磁通 N_1 、 N_2 的磁化电流波形

Fig.5 The magnetic current wave forms of N_1 and N_2 at Zero-flux

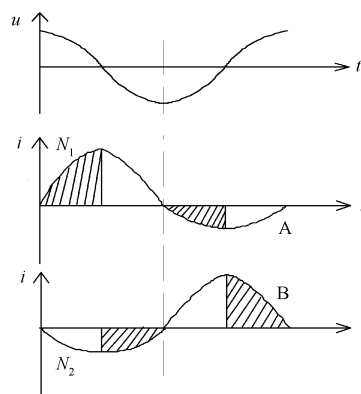


图6 $I_p > 0$ 时, N_1 、 N_2 的磁化电流波形

Fig.6 The magnetic current wave forms of N_1 and N_2 when $I_p > 0$

当 I_p 为负时,使 T_2 的磁通量增加, T_1 的磁通量减少,则 N_1 、 N_2 的磁化电流的波形图见图7。由图7知,此时阴影部分面积的和为负。因此,可以通过相敏检波来检出直流引起的信号。此信号经处理后由零磁通检测器输出。

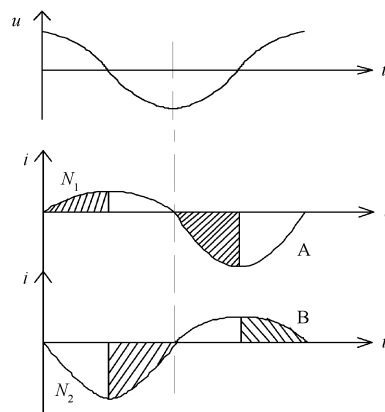


图7 $I_p < 0$ 时, N_1 、 N_2 的磁化电流波形

Fig.7 The magnetic current wave forms of N_1 and N_2 when $I_p < 0$

1.3 基本原理

由上面的分析可知,当被测直流电流 I_p 流经探头时,在磁芯 T_1 、 T_2 上产生磁通,利用磁芯的非线性特性由零磁通检测器检测出相关的信号,此信号经放大后产生补偿电流 I_c ,反馈到补偿线圈 N_3 ,以抵消由 $I_p N_p$ 在磁芯 T_1 、 T_2 上产生的磁通,使 $B_0 = 0$,从而使零磁通检测器输出的信号减小,结果使 I_p 、 I_c 在磁芯 T_1 、 T_2 上产生的磁通量达到平衡,即: $N_p I_p = N_3 I_c$ 。如图 1 所示,通过输出电阻 R_0 测量出 I_c ,即可得到被测电流 I_p :

$$I_p = \frac{N_3 I_c}{N_p}$$

当被测交流电流 I_p 流经探头时,直接由 N_4 感应出感生电压信号输入到放大器的输入端,同样产生补偿电流 I_c ,使磁芯 T_1 、 T_2 上的磁通量达到平衡,从而得到 I_p 。

由于补偿线圈 N_3 的外电路阻抗太小,近于短

路,这将使检测线圈 N_1 、 N_2 的阻抗变小,导致调制信号加不到两检测线圈上,为了解决上述问题,增加一铁芯 T_3 ,以提高其高频阻抗。

在实际应用中, T_1 、 T_2 并不对称,由于利用材料的非线性特性采样,经过适当磁芯组合和电路的设计,不会对测量结果产生较大的影响。另外,考虑到高稳定的正弦波发生电路的复杂性,用三角波来驱动零磁通检测线圈更方便。

2 新颖高性能电流传感器的测试分析

由于实验器材限制,目前的实验样机量程(直流)只做到 200A,以下是样机的几项指标测试结果。

2.1 线性度^[5]

使样机通过 240A 的测试电流,结果如表 1。线性度为: $\tilde{a} = (y \square y_i)_{\max} / y_{240} = 7.2 \times 10^{-5}$,即传感器的线性度优于万分之一。

表 1 线性度测量结果

Table 1 Linearity measurements

次数 No (i)	被测电流 Current measured x_i / A	输出信号 Output signal y_i / mV	线性拟合值 Linear regression value y / mV	误差 Error $y \square y_i / mV$
1	0	1.259	1.291	0.032
2	40	202.426	202.337	0.089
3	80	403.367	403.384	0.017
4	120	604.439	604.430	0.009
5	160	805.390	805.476	0.086
6	200	1006.468	1006.523	0.055
7	220	1107.077	1107.046	0.031
8	240	1207.63	1207.569	0.061

2.2 频率特性

在 100 kHz 范围内输入 1 安匝的电流,观察输出的安匝数与频率的关系,结果如表 2 所示。从表

2 可以看出,频率在 0—100 kHz 范围内,输出安匝数的平均值为 1.058,其最大偏差为: $\pm 3.23\%$ 。

表 2 输入 1 安匝电流,频率在 0—100kHz 变化时,输出的安匝数

Table 2 The change of output ATs with frequency at 1AT input-current

输入频率 Input frequency/Hz	0.1	1	10	100	1k	10k	100k
输出安匝数 Output ATs/AT	1.071	1.060	1.024	1.079	1.068	1.050	1.055

2.3 稳定性

被测电流保持 120AT,测量 7h,稳定性在十万

分之一内,结果见表 3(其中,两次测量电流的信号差别是由电流源的开机重复性误差引起的)。

表 3 测量 120A 电流 7h 传感器输出信号的稳定性
Table 3 Measuring result of stability in 7h at 120 A current

第一次测量 The first time		第二次测量 The second time	
测量时间 Measuring moment	输出信号 Output signal/mV	测量时间 Measuring moment	输出信号 Output signal/mV
16:55	604.600	10:35	604.351
18:05	604.595	11:10	604.351
18:40	604.595	11:35	604.351
20:05	604.595	13:10	604.351
21:20	604.605	15:30	604.351
21:55	604.605	16:00	604.351
22:55	604.605	16:50	604.346
23:45	604.595	17:16	604.346
平均 Average	604.599	平均 Average	604.349
最大相对误差 Maximum relative error	$\pm 9.3 \times 10^{-6}$	最大相对误差 Maximum relative error	$\pm 1.9 \times 10^{-6}$

2.4 抗干扰能力

用 5 寸扬声器磁铁作为干扰源来观察环境恒定磁场对电流传感器性能的影响：扬声器磁铁从不同方向紧靠线圈时，误差小于万分之二；扬声器磁铁在不同方位离线圈 1cm 时，误差小于十万分之二；扬声器磁铁离线圈 5cm 时，测量不出对传感器的影响。这主要是因为传感器所用磁芯均为闭合高 μ 材料，受外磁场的干扰小。此外，地磁场的干扰实验表明，地磁场对本电流传感器的影响可以忽略。

3 结论

对样机的测试电流(直流)只到 240A，主要是受磁芯孔径大小的限制，进一步提高测试电流，目前还未见有何困难(现已研制出直流量程为 500A、精度为 5×10^{-5} 的样机)。从样机的测试特性来看，用新的零磁通检测技术来制造电流传感器的方法可以达到高精度、高稳定性、抗干扰能力强的要求，制作电路简单且所用磁芯可以不经严格挑选，实验样机所用的磁芯就是一般的工业磁芯。由于缺少高

精度的标准电流源等原因，还没法测定样机实际能达到的极限精度、稳定性等指标，进一步的工作正在进行中。

参考文献

- 1 北京莱姆电子有限公司，LEM 电流电压传感器模块应用手册
BJ - LEM electronic Ltd , App Manual of LEM Current Voltage Sensor Block
- 2 Holech, Zero-flux current transformers (exponent)
- 3 Danfysik, Current Transducer Program (manual)
- 4 程健, 郝耀斗, 张旌. 原子能科学技术, 2002, 36(3): 250 - 252
CHENG Jian, HAO Yaodou, ZHANG Jing. Atomic Energy Science and Technology, 2002, 36(3): 250 - 252
- 5 强锡富. 传感器. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社出版, 2001. 1—31
QIANG Xifu. Sensor. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2001. 1—31

A new high performance current transducer

TANG Lijun^{1,2} LU Songlin¹ LI Deming¹

¹ (Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

² (Changsha University of Electric Power, Changsha 410077)

Abstract A DC—100kHz current transducer is developed using a new technique on zero-flux detecting principle. It was shown that the new current transducer is of high performance, its magnetic core need not be selected very stringently, and it is easy to manufacture.

Key words Current transducer, Zero-flux, Zero-flux sensing

CLC TM835.2, TM452+.92, TL503.5