

# 应用于高精度稳流电源的直流零磁通误差传感器

程 健,郝耀斗,张 旌

(中国科学院 高能物理研究所 北京 100039)

**摘要:**研究了采用温度系数较低的坡莫合金材料制作的电流采样装置——直流零磁通误差传感器,简要分析了它的基本工作原理。该器件重 200 g,功率损耗小于 1 W,无温度效应,结构简单,成本低廉。实测电源电流稳定度在 24 h 内  $1 \times 10^{-4}$ 。

**关键词:**高精度磁铁稳流电源;直流零磁通误差传感器;偶次谐波磁场

**中图分类号:** TL503.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2002)03-0250-03

## Development of a Zero Flux Error Transductor for the DC Power Supply With High Current Stability

CHEN G Jian, HAO Yao-dou, ZHANG Jing

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A zero flux error transductor for the DC power supply with high current stability is developed. The principle is analyzed. The transductor consists of four separate magnetic cores with perm ribbon. As a feed back component the transductor has the following advantages: a small volume and weight ( $< 200$  g), power loss  $< 1$  W, low cost, small temperature coefficients. The current stability of the power supply at 40 A is  $1 \times 10^{-4}$  for 24 h.

**Key words:** DC power supply; zero flux error transductor; second harmonic magnetic field

北京正负电子对撞机(BEPC)输运线共有 30 台四极聚焦磁铁稳流电源,额定输出参数为 50 A/40 V。为了保证电子束流能高效、稳定地通过输运线进入储存环,在物理设计上要求这 30 台四极聚焦磁铁电源在一定的时间内有较高的电流稳定度。在保证电源性能的前提下,提高电源效率、减小体积、减轻重量始终是加速器磁铁电源的发展方向。作为一台高精度磁铁稳流电源,其输出电流检测元件是保证该电源性能的关键部件。为此,本工作研制一种

高精度、结构简单、重量轻的电流检测元件——直流零磁通误差传感器(以下简称 DCCT)。

### 1 工作原理

DCCT 主要由 4 只高导磁率、磁特性一致的磁环以及相应的电子学线路组成,其结构示意图示于图 1<sup>[1]</sup>。这里:  $I_{\text{ref}}$  是由电源内部或外部提供的高精度参考电流;  $N_1 \sim N_4$  分别是绕在 4 只磁环上的激励绕组,由两组相位相差 90° 的电压  $V(t)$  激励;  $W$  是绕在 4 只磁环上的补偿

收稿日期:2001-05-08;修回日期:2001-11-23

作者简介:程 健(1955—),男,北京人,高级工程师,电机制造专业

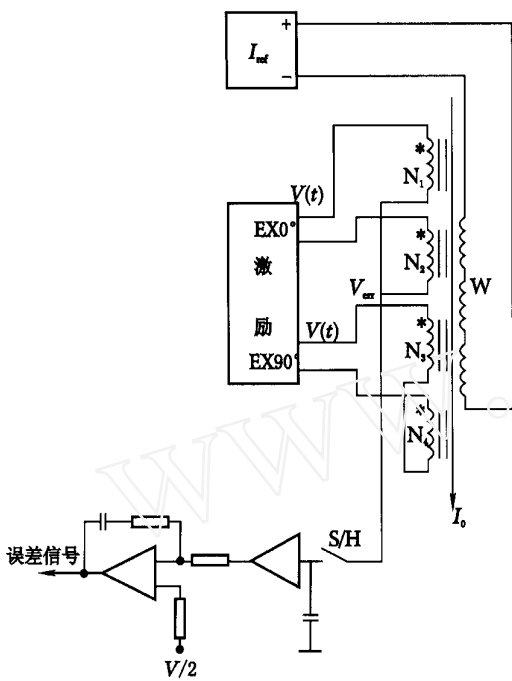


图1 DCCT 结构图  
Fig. 1 Block diagram of DCCT

绕组,并通有参考电流  $I_{ref}$ ;电源输出电流  $I_0$  穿过整个磁环,所有绕组接线方式如图 1 所示; $V_{err}$ 是由 DCCT 产生的反映  $I_0$ 和  $I_{ref}$ 间安匝数平衡的误差信号,电源通过检测这个信号,实现电流闭环控制。为分析方便,用两个磁环组成的 DCCT 进行分析。

1.1 电源工作在稳定状态

设在  $t$  时刻各绕组电流方向如图 2 所示。

从图 2 可以看出: $N_1$  和  $N_2$  在磁环 I、II 中产生的磁通(磁场)大小相等、方面相反,若无外来磁场干扰,磁环 I、II 间的等效磁通为零,且两磁环所围空间内的磁场也相应为零。这时,若电源输出电流为  $I_0$ ,补偿绕组 W 通过的电流为  $I_{ref}$ ,且电源处于稳定状态,那么,  $I_{ref}$  与  $I_0$  将满足下列关系:

$$I_{ref} \times N - I_0 = 0 \tag{1}$$

式中:  $N$  为补偿绕组 W 的匝数。

可以判断,电源工作在稳定状态时,磁环 I、II 间的等效磁通及所围空间内的磁场仍保持为零。此时,磁环 I、II 的磁化曲线对称于坐标原点,  $B(t)$ 、 $\phi(t)$  对称于坐标横轴(图 3),磁通间保持下列关系:

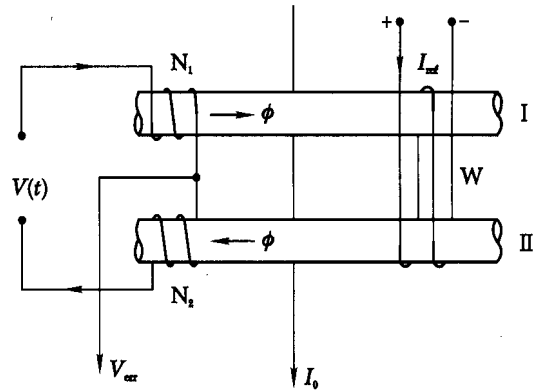


图2 电源稳定时磁环 I、II 中各磁通方向示意图  
Fig. 2 The direction of the magnetic flux in the magnetic rings I, II at stabilized power supply

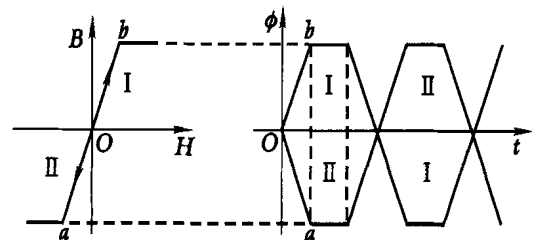


图3 电源稳定时磁环 I、II 磁化曲线及相应磁通波形图

Fig. 3 Magnetization curve and magnetic flux waveform in the magnetic rings I, II at stabilized power supply

$$\phi(t) + \phi(t) = 0 \tag{2}$$

图 4 为电源工作在稳定状态时磁环 I、II 在一个激励周期内激励回路的等效电路。已知磁环 I、II 的特性完全一致,通过相应的电子学电路,使得磁环 I、II 在一个激励周期内无论是处于饱和或非饱和状态,均能保持误差信号  $V_{err}$  为一恒定电平,且  $V_{err} = V/2$ 。这里,  $Z_1$ 、 $Z_2$  是磁环 I、II 在非饱和状态时呈现的阻抗,  $R_1$ 、 $R_2$  是磁环 I、II 激励绕组电阻。

1.2 电源处于调整状态或不稳定状态

设在  $t$  时刻各绕组间的电流仍如图 2 所示,且电源处在调整状态或不稳定状态。此时,补偿绕组 W 通过的电流  $I_{ref}$  与穿过磁环的输出电流  $I_0$  将不满足关系式(1),而有:

$$I_{ref} \times N - I_0 \neq 0 \tag{3}$$

这说明补偿绕组和负载电流产生的磁通必

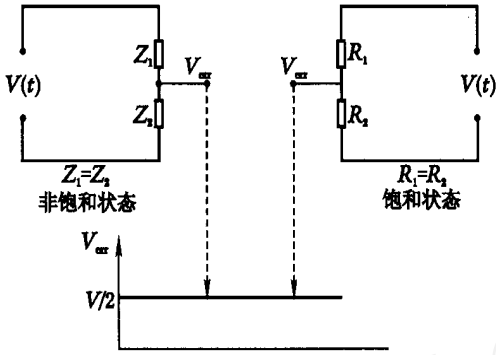


图4 电源稳定时DCCT激励回路等效电路

Fig.4 The equivalent circuit of the magnetization circuit for DCCT at stabilized power supply

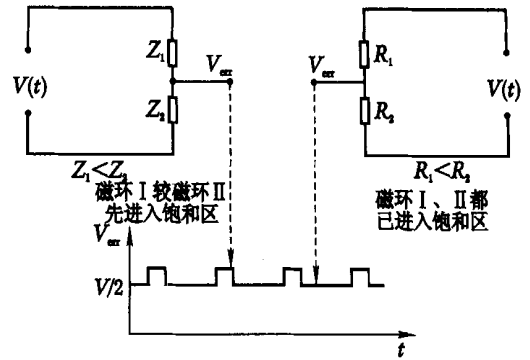


图6 电源在调整时激磁回路等效电路

Fig.6 The equivalent circuit of the magnetization circuit at unstabilized power supply

然要对两磁环中的磁通产生影响,造成两磁环间的等效磁通不为零。假设  $I_{ref} \times N - I_0 = H$ , 因  $H$  的存在,磁环、的磁化曲线将不对称于坐标原点,导致  $\phi(t) + \phi(t) \neq 0$ 。从时间上看,将引起某一磁环较另一磁环先进入饱和状态(图5)。

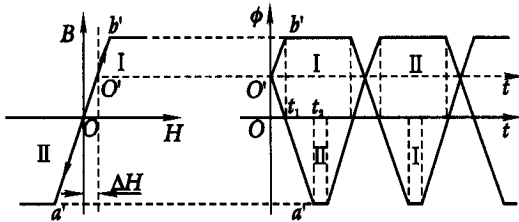


图5 电源在调整时磁环、磁化曲线及相应磁通波形图

Fig.5 Magnetization curve and magnetic flux waveform in the magnetic rings at unstabilized power supply

假设在  $t_1$  时刻磁环 比 先进入饱和状态,这时,激励回路的等效电路示于图6。可见,  $V_{err}$  在直流电平  $V/2$  上叠加了一脉冲信号。通过采样保持电路,将该脉冲信号电平送到调节器进行电源闭环控制,重新使  $I_{ref} \times N - I_0 = 0$ , 电源回到新的稳定状态。

从图5中的两磁环  $\phi(t)$  波形可以看出  $\phi(t)$  与  $\phi(t)$  之间有如下关系:

$$\phi(t) + \phi(t) = \phi(t) + \phi(t + \Delta t) \quad (4)$$

可以证明:

$$\phi(t) + \phi(t + \Delta t) = \sum_{n=2k}^{\infty} n(n + \Delta t + \phi_n) \quad (5)$$

$k = 1, 2, 3, \dots$

这说明当电源处在不稳定状态时,磁环、间存在偶次谐波磁场。实践证明,当电源进行较大幅度调整时,该偶次谐波磁场将使磁环、进入过饱和状态,造成DCCT不能正常工作。为消除偶次磁场,在DCCT中再增加磁环、(图1)。磁环、的工作原理与磁环、相同,但激励电压的相位与后者相差  $90^\circ$  (基波)。这样,磁环、与磁环、产生的偶次磁场(相位相差  $180^\circ$ )将被有效抑制,保证DCCT在任何情况下都能正常工作。

## 2 结论

直流零磁通误差传感器重 200 g,功率损耗小于 1 W,无温度效应,结构简单,成本低廉;作为输出电流检测元件,实测电源电流稳定度在 24 h 内  $1 \times 10^{-4}$ 。目前,30 套传感器已累计工作 5 万多小时,故障率为零。

## 参考文献:

[1] Hartill DL, Rice DH. The CESR Magnet Power Supply System [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1979, NS-26(3): 4 078 ~ 4 079.