

# 涡流式转速测量传感器

刘文豹 李和平

**摘要：**卫星姿控反作用飞轮的控制系統，要求对飞轮转速进行精确的测量，并给星载计算机提供反馈信号。我们研制的涡流转速测量传感器，基于通以高频电流的线圈附近产生高频磁场，当有金属导体靠近这个线圈端部时，将感生电涡流。又由于电涡流的作用使线圈的Q值下降这一基本物理现象，经过电子线路以得到与飞轮转速相对应的方波信号。涡流式传感器具有灵敏度高、结构简单、抗干扰性强。安装调整方便、体积小、重量轻等优点。

卫星姿控系统要求对反作用飞轮的转速，在0—3000转/分范围内进行精确测量，并给星载计算机提供反馈信号。目前国内外姿控飞轮所选用的测速传感器大致有四种形式，即光电式、霍尔式、磁电式、涡流式。由于光电式、霍尔式对元件要求严格，要满足长寿命有些困难，因此，我们仅对磁电式和涡流式进行了实验对比。由于磁电式（图1）传感器的输出与转速快慢有关，在低速时（如20转/分），输出很低，需高增益放大器；而在高速（大于2000转/分）时输出较大，这就使得线路复杂。又由于磁电式传感器要求被测飞轮具有导磁体标志，这就给钛合金飞轮轮体设计带来新的麻烦。同时，磁电式传感器在飞轮低速运转时，磁拉力明显地反映出来，增加了低速的不平稳性和功率损耗。基于磁电式传感器这些不足之处，我们最后选用了涡流式传感器作为姿控反作用飞轮的转速测量传感器。

涡流式传感器早在五十年代中期美国BenHy Nevada公司就已经有商品出售，但一直到七十年代才由于测试技术的迅速发展，被广泛地用于振动测量上。涡流式传感器具有灵敏度高、结构简单、抗干扰性强、安装调整方便、体积小、重量轻等优点。我们已经研制出的二个涡流式传感器是用于飞轮模型地面实验的。因此，在元件、材料选择上没有依空间环境要求进行，当然，这主要是出于经济上的考虑。

## 一、涡流传感器的工作原理和结构

涡流传感器实际上是一个扁平空心线圈，电感量为 $L$ ，当其中通过高频电流时，线圈周围空间产生高频交变磁场，当有金属导体靠近线圈端面时，在金属导体表面将产生感应电涡流，电涡流的形状是以线圈中心线为中心的同心圆环（图2）

涡流的渗透深度，

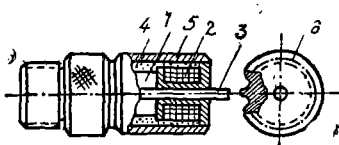


图1 开式磁电转速计的结构

1—磁钢；2—线圈；3—芯轴；4—导磁体；5—壳体；6—齿轮

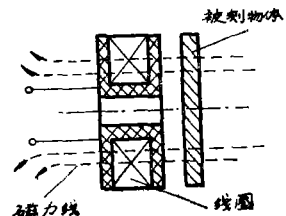


图2 电涡流的形成

可由下式决定:

$$h = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_s f}} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  —— 金属导体的电阻率,

$\mu_s$  —— 导体的相对导磁率,

$f$  —— 交变磁场的频率。

这个涡流又产生一同频交变磁场,其磁力线方向与原线圈磁力线方向相反。从而减少了原线圈磁通量,也就是减少原线圈的电感量,金属导体离线圈越近,电感量减少越多,也即电感量的变化是金属导体与线圈端面距离的函数。

$$\Delta L = F(d) \quad (2)$$

但是,要精确计算线圈阻抗与金属导体至线圈端部距离之间的函数关系,是比较困难的。但可以采用简化方法,将金属导体视为一等效圆环,其尺寸与线圈直径比例是固定的,其等效电路如(图3)所示。图中将线圈看作是一变压器的原边,其阻抗为:

$$Z_0 = R_1 + j\omega L_1 \quad (3)$$

而金属导体中的涡流回路作为变压器的副边。根据克希荷夫定律,可写出如下电压平衡方程式

$$\begin{cases} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{u}_1 \\ -j\omega M \dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

解方程得到。

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{\dot{u}_1}{\left[ R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 \right] + j \left[ \omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2 \right]} \\ \dot{I}_2 = \frac{M \omega^2 L_2 \dot{I}_1 + j \omega M R_2 \dot{I}_1}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \end{cases} \quad (5)$$

可计算阻抗

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{\dot{u}_1}{\dot{I}_1} \\ &= \left[ R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 \right] + j \left[ \omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2 \right] \quad (6) \end{aligned}$$

比较  $Z_0$  和  $Z_1$  可以看到,由于涡流影响的结果,线圈阻抗实数部分增大,虚数部分减小,从而线圈的品质因数也下降。这从下式中可明显的看出来

$$Q = \frac{L\omega}{R} \quad (1)$$

Q值的减小,是由于涡流损耗功率增加的结果,涡流损耗功率可用下式估计。

$$P_s = \int_{r_0}^{r_m} dp_s = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2 h}{4\rho} (r_m^4 - r_0^4) \quad (8)$$

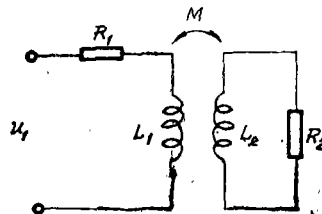


图3 电涡流线圈的等效电路

式中 $r_m$ 、 $r_o$ 为涡流形成范围的内外半径。

我们研制的传感器，连同后面的线路部分，实际上是一个变压器反馈LC振荡器。将空心线圈和谐振电容固封在有机玻璃套内（以减少由于引线分布电容带来的影响），制成传感器，其结构示意图如下：

传感器作为LC振荡器的谐振回路，当无金属导体靠近时，振荡器振荡，其振荡频率为。

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9)$$

而当金属导体逐渐靠近时，由于涡流的影响，Q值下降，使得振荡频率和振荡电压幅值发生变化。当Q值下降到一定程度（金属导体与线圈端面之间距离 $d$ 小到一定程度），振荡条件式(10)

$$\beta \geq \frac{r_{be} R' C}{M} \quad (10)$$

$r_{be}$ ——放大器的输入电阻，

$R'$ ——将变压器副边回路参数，折合到谐振回路以后的参数，

$M$ ——同极性端两绕组间等效互感

得不到满足，即停振，这样就可以以振荡、停振两种状态来表示金属导体是否靠近，通过电子线路就可以进行纪录。

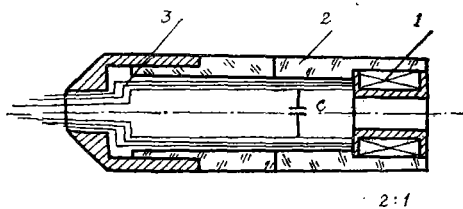


图4 传感器 1—线圈，2—壳体，3—引线

## 二、用涡流传感器进行飞轮转速测量

将传感器安装在钛合金飞轮轮辐附近，随着飞轮的旋转，轮辐和辐隙将交替从传感器端面附近通过，振荡器将振荡、停振两种状态交替变化。将此信号通过变压器副边输出，经过放大、整流滤波、整形就得到一组与飞轮转速成正比的方波信号。其频率等于轮辐数与转速的乘积。(图5)是传感器及其线路部分的电原理图，虚线框内为传感器部分。

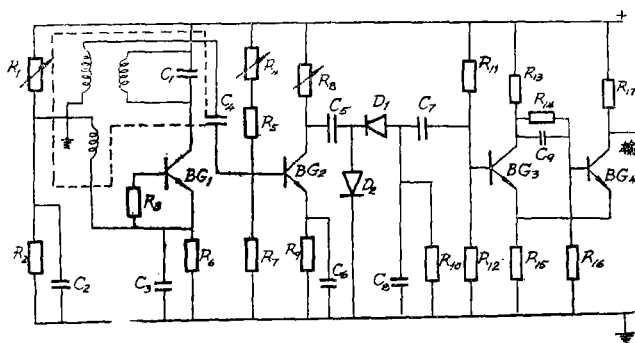


图5 电路原理

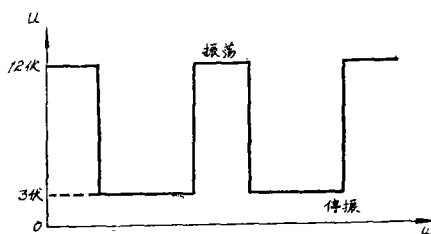


图6 输出波形

传感器线圈用多股漆包线绕制，电感量约为0.4毫亨。

线路的输出波形图如图6

将这组与飞轮转速成正比的方波信号，送给飞轮的控制系統（星载计算机）作为飞轮转

速的反馈信号。

目前制作的两个地面模型实验用传感器其技术指标如下：

振荡器振荡频率		~170千周
传感器与辐条间安装距离		< 2毫米
方波输出		
	高电平	+12伏
	低电平	+ 3 伏
供电电源		+12伏
总损耗功率		170毫瓦

#### 参 考 文 献

[1] 南京航空学院，北京航空学院，传感器原理，国防工业出版社，1980年。