

测试卫星姿控飞轮轴承摩擦力矩的 “端面永磁式电磁离合器”的设计和研制

范朝来

在研制卫星姿控飞轮时，精确测试出轴承摩擦力矩十分重要。测试的手段和原理虽有多种，但最常用的方法是“滑行法。”其原理是在真空条件下，让电机通过摩擦离合器带动飞轮高速旋转，当达到规定的转速后使电机的动力在高速下与飞轮脱离，以便让飞轮独立旋转，并逐渐在摩擦力矩的作用下自由减速，直到停止。在减速运转的同时，测试出飞轮的 $n = f(t)$ 滑行速度曲线图。然后再根据动量定理即可求出轴承摩擦力矩“ M ”。从上述测试原理可知，该测试手段要求电机与飞轮之间的连接应有特殊离合器装置，该装置必须要满足下列五个条件，方能测试出“真实”的滑行曲线：

- (1) 在离合器分离瞬间，飞轮最好不丢转速；
- (2) 分离后飞轮与电机之间，在机械上应无丝毫联系；
- (3) 离合器不允许与任何操纵件有摩擦；
- (4) 离合器的被动片要有最小的转动惯量；
- (5) 要能在真空室外进行遥控操作。

这五个理想条件对一般常见的机械、电磁、液压操纵的无论是爪型的或摩擦片式的或电磁滑差式的等等离合器都很难同时达到。如电磁滑差式离合器，第二条要求它能满足，但第四条又满足不了。为此我们研制了一种特殊的“单摩擦片端面永磁隔离式的电磁离合器”，能同时满足上述五个技术要求。该设备制成后已装备在飞轮环境模拟真空试验台上进行了试验和实际应用，效果良好。

一、构造和工作原理

如图1，整个装置由电机④、磁悬电磁离合器总成⑧、机架③三大部分组成。需要被精确测试出摩擦力矩的飞轮轴承⑥和飞轮⑩，一同组装在轴⑤上。该轴又是悬臂地固定在机架上。电机通过法兰(1)直接悬装在离合器总成上。总成的较精确的外圆表面与机架上的定位孔是以动配合装配的，所以它在孔内可轴向移动，以便调整它和飞轮之间的轴向尺寸，即要保证衔铁(7)与飞轮接头(9)之间的装配间隙 $\delta_0 = 0.30$ 毫米。调整后用锁定螺钉(3)将离合器总成和机架紧固为一体。飞轮总成就是通过装在飞轮端接头左端轴上的活动衔铁与离合器总成发生关系的。如衔铁以动配合装配在飞轮端接头上，并用两个对称安置的滑键(10)连结，这样衔铁不但可与飞轮一同转动，以传递扭矩，而且可以在接头上沿轴向左、右滑动。当线圈(5)通电时它向左方轴向移动，直到被电磁力吸引压紧在磁芯轴(6)的右端面上，与轴吸合为一体为止，并通过它把电机力矩传递给飞轮而一同转动起来。衔铁

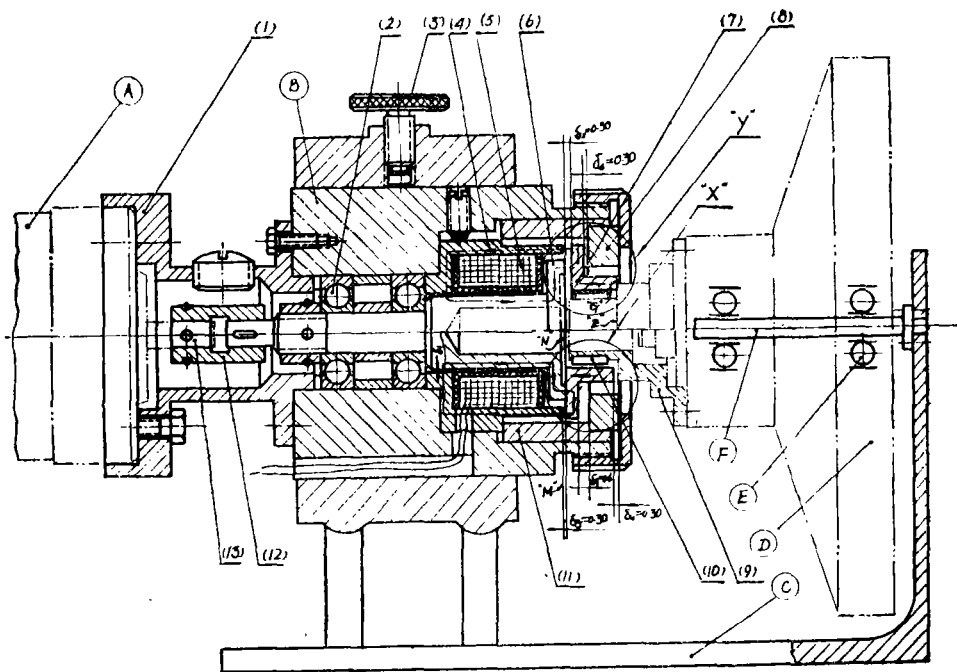


图1 端面永磁式电磁离合器的结构、构造和工作原理图

Ⓐ. 直流电机；Ⓑ. 端面永磁式电磁离合器的装配总成；Ⓒ. 机架；

Ⓓ. 卫星姿控零动量飞轮；Ⓔ. 被测试摩擦力矩的轴承；Ⓕ. 悬臂轴；

1. 法兰； 2. 轴承； 3. 锁紧螺钉； 4. 固定磁铁； 5. 线圈；
6. 磁芯轴； 7. 衔铁； 8. 永久磁铁； 9. 飞轮接头； 10. 平键；
11. 隔磁铜套； 12. 电机连结套； 13. 电机轴。

“X”局部视图说明：件5通电，件6将件7吸向左方←。

“Y”局部视图说明：件5断电，件8将件7吸向右方→。

吸合后的具体位置和相互间隙见图1中的“X”局部视图，如： $\delta_4 = 0.60$ ， $\delta_0 = 0.30$ ， $\delta_3 = 0.30$ ， $\delta_2 = 0$ 。当线圈断电时，则芯轴的电磁力消失，衔铁仅在永久磁铁（8）的吸引力作用下向右方轴向滑动。但千万不能让这个随飞轮一同旋转运动的衔铁与永久磁铁直接接触而产生摩擦阻力。因为磁铁是装在隔磁铜套（11）上，用背帽压紧在电磁离合器总成上而静止的。怎样做到衔铁既能与芯轴分离产生一定的间隙 δ_2 （ δ_2 取0.30毫米），又不允许它与磁铁接触，并要求它与件（8）也保持一个间隙 δ_4 （ δ_4 也可取0.30毫米）呢？其办法是让衔铁在向右滑动时，当它还没有接触到磁铁之前，即还留有一个 δ_4 的间隙时，它的右端面“G”，已提前接触到飞轮接头的凸台“Z”上，而停止它继续向右滑动了。这时衔铁在磁铁的磁力作用下稳定的位置正好磁悬在芯轴和永久磁铁之间，可自由转动。这时（7）的位置和与相关部件间隙如图1中的“Y”局部视图。如： $\delta_0 = 0$ ， $\delta_3 = 0.6$ ， $\delta_2 = 0.30$ ， $\delta_4 = 0.30$ 。

关于磁芯和衔铁之间电磁力的磁通回路问题分析如下：首先磁芯是用软磁材料制成悬臂地装在两个轴承（2）上，通过连轴套（12）与电机轴（13）直联，所以，磁芯轴是主动轴。在芯轴的外圆上套一个螺旋管式的磁力线圈（5），该线圈固定在圆形固定磁铁（4）的内孔里，该磁铁与芯轴之间有一周均匀的间隙 δ_1 （ $\delta_1 = 0.15$ 毫米），所以它们之间当轴旋转时并无摩擦。此外，为了防止衔铁被芯轴吸合后不与固定磁铁发生摩擦，所以磁铁的右侧端面“M”

一定要比芯轴的右侧端面“N”短一个距离 δ_3 (δ_3 取0.30毫米)。由此可知,当线圈通电后,其磁力线回路为:磁力线从芯轴出发,经端面气隙 δ_2 ,到达衔铁,又经端面气隙 δ_3 ,到达固定磁铁,再经径向气隙 δ_1 回到轴芯,从而形成一个完整的磁通回路。其气隙 δ_3 和 δ_2 在线圈通电前后,它们的数值是变化的,如 δ_3 从0.60 \rightarrow 0.30毫米, δ_2 从0.30 \rightarrow 0毫米。

关于永久磁铁的磁力线回路问题:因磁铁被固定在铜背帽和铜隔磁套(11)之间,它除了与衔铁有较小的端面气隙 δ_4 之外,与其它导磁体之间的气隙都很大,所以永久磁铁的磁力线只能通过气隙 δ_4 进入磁芯轴,再经过气隙 δ_4 进入磁铁形成回路。

二、关于本装置的性能分析

总结上述构造和工作原理可知,其性能可完全满足前述的五个理想条件,如:①本装置虽然有磁滞现象,即当线圈停电后,其电磁力不能立即消失,而造成释放衔铁的时间较长(约在一秒~二秒之间),假若电机停电的时间与线圈停电的时间相同,则就会使飞轮丢转速。但只要注意让电机停电的时间滞后于线圈停电时间,并大于2秒以上,或者电机一直不停电,则这样衔铁释放的时间长或短,都可保证飞轮不丢转速了,从而满足了第(1)条要求。②,衔铁在线圈停电后,被永久磁铁吸向右方,就被悬浮在芯轴和磁铁之间,与电机已毫无联系,也不与其它零件相接触,所以既满足了第(2)条要求,又同时满足了第(3)条要求。③,因衔铁是一个圆形薄片,外径相对于飞轮直径而言是较小的,所以转动惯量也很小,因此满足了第(4)个条件。④,因离合器电机的动力靠线圈的通电和断电来控制,所以很容易实现在真空室外进行遥控操作。这样也满足了第(5)个条件。由此可见,本装置在性能上是满足前述的五个特殊要求的。

三、关于电磁磁路和吸引力计算

在进行磁路设计时,首先是根据电磁铁的工作任务——电磁吸力和衔铁运动行程去确定它的初步结构尺寸和线圈的参数,但这样计算出的尺寸和参数还要受模拟真空试验室的尺寸限制。所以,在设计时,还要对这些尺寸和参数进行合理的调整修改。这样修改后,还要进行验算。所以,在设计过程中,要进行反复多次的磁路的设计和验算,进行多次的结构尺寸和线圈参数的试凑、平衡调整,最后才能求出既能满足电磁吸力和衔铁运动要求,又能满足一定尺寸范围限制条件的一组较为满意的合理参数。下面分四个问题来论述磁路的计算。

1. 实际已知条件

本磁悬式电磁离合器经多次设计和验算,最后的实际尺寸结构参数见图2。其线圈参数为:线径 $d = \phi 0.15$ 毫米;断面积 $F = 0.0176$ 毫米²;电阻系数 $\rho = 0.993$ 欧姆/米;匝数 $W = 4.400$ 匝;总电阻为472欧姆;选用直流电压 $V = 24$ 伏;电流 $I = \frac{24}{472} = 0.0508$ 安;线圈磁势 $IW = 0.0508 \times 4400 = 223.5 \approx 224$ 安匝。关于各部分气隙实际值和平均气隙面积如下(见图1和图2):

① 磁芯轴和固定磁铁之间气隙: $\delta_1 = 0.015$ 厘米,气隙平均面积 $S_1 = \phi 19.7 \times \pi \times 8 = 495$ 毫米² = 4.95厘米²

② 磁芯轴和衔铁之间气隙:当闭路(吸合)时 $\delta_2 = 0$;当开路时 $\delta_2 = 0.03$ 厘米

③ 总磁阻 R_{Σ} 的计算:

$$R_{\Sigma} = R_{\delta_1} + R_{\delta_2} + R_{\delta_3} = 2.42 \times 10^6 + 5.62 \times 10^6 + 21 \times 10^6 = 29.04 \times 10^6 \text{ (1/亨)}$$

④ 求主磁通 Φ_{δ} :

$$\Phi_{\delta} = \frac{IW}{R_{\Sigma}} \times 10^8 = \frac{224}{29.04 \times 10^6} \times 10^8 = 7.71 \times 10^3 \text{ (麦)}$$

⑤ 求 δ_2 和 δ_3 处的磁感应强度 B_{δ_2} 和 B_{δ_3} :

$$B_{\delta_2} = \frac{\Phi_{\delta}}{S_2} = \frac{7.71 \times 10^3}{4.27} = 1806 \text{ (高斯)}$$

$$B_{\delta_3} = \frac{\Phi_{\delta}}{S_3} = \frac{7.71 \times 10^3}{2.23} = 3457 \text{ (高斯)}$$

⑥ 分别求磁芯轴和固定磁铁对衔铁的电磁吸引力 F_{δ_2} 和 F_{δ_3} :

$$F_{\delta_2} = \left(\frac{B_{\delta_2}}{5000} \right)^2 \times S_2 = \left(\frac{1806}{5000} \right)^2 \times 4.27 = 0.557 \text{ (公斤)}$$

$$F_{\delta_3} = \left(\frac{B_{\delta_3}}{5000} \right)^2 \times S_3 = \left(\frac{3457}{5000} \right)^2 \times 2.23 = 1.06 \text{ (公斤)}$$

⑦ 对衔铁总的吸引力 F_{Σ} :

$$F_{\Sigma} = F_{\delta_2} + F_{\delta_3} = 0.557 + 1.06 = 1.61 \text{ (公斤)}$$

⑧ 验算电磁线圈通电后,能否把衔铁吸合到磁芯轴上:

衔铁在线圈刚通电的时刻,是开磁路状态,此时,其受两个轴向外力:一个向左的 $F_{\Sigma} = 1.61$ (公斤),一个向右的永久磁铁的吸引力 $F_{\text{永}} = 0.110$ (公斤),显然 $F_{\Sigma} > F_{\text{永}}$,所以,衔铁将迅速向左滑动,能被磁芯轴吸合,验算合格。

4. 关于磁路为闭路时磁芯轴对衔铁的吸引力“ $F_{\text{闭}}$ ”计算和可能承受最大扭矩“ $M_{\text{闭}}$ ”计算

磁路为闭路时的特点:当线圈通电后,衔铁已被磁芯轴吸合,此时 δ_2 和 δ_3 气隙最小,如 δ_2 在0~0.03毫米之间, δ_3 为0.3毫米,所以,此时衔铁被吸合后对芯轴的压力最大,可传递的摩擦力矩“ $M_{\text{闭}}$ ”也最大。

关于“ $F_{\text{闭}}$ ”和“ $M_{\text{闭}}$ ”值计算如下:

① 等值磁路图:基本与图3相似,仅气隙磁阻值不一样,则 Φ_{δ} 值也不一样。

② 计算磁阻 R_{δ_1} 、 R_{δ_2} 、 R_{δ_3} 值:

已知: $\delta_1 = 0.015$ 厘米

$\delta_2 = 0.003$ 厘米

$\delta_3 = 0.03$ 厘米

$$R_{\delta_1} = \frac{0.8 \times \delta_1 \times 10^8}{S_1} = \frac{0.8 \times 0.015 \times 10^8}{4.95} = 2.42 \times 10^6 \text{ (1/亨)}$$

$$R_{\delta_2} = \frac{0.8 \times \delta_2 \times 10^8}{S_2} = \frac{0.8 \times 0.003 \times 10^8}{4.27} = 0.56 \times 10^6 \text{ (1/亨)}$$

$$R_{\delta_3} = \frac{0.8 \times \delta_3 \times 10^8}{S_3} = \frac{0.8 \times 0.03 \times 10^8}{2.23} = 10.8 \times 10^6 \text{ (1/亨)}$$

③ 总磁阻 R_{Σ} 的计算:

$$R_{\Sigma} = R_{\delta_1} + R_{\delta_2} + R_{\delta_3} = 2.42 \times 10^6 + 0.56 \times 10^6 + 10.8 \times 10^6 = 13.78 \times 10^6 \text{ (1/亨)}$$

④ 求闭路时的总磁通 Φ_{δ} :

$$\Phi_{\delta} = \frac{IW}{R_{\delta}} = \frac{224 \times 10^8}{13.78 \times 10^6} = 16255 \text{ (麦)}$$

考虑各处的漏磁影响打10%折扣, 所以实际:

$$\Phi_{\delta} = 16255 \times 0.90 = 14629 \text{ (麦)}$$

⑤ 求 δ_2 和 δ_3 处对衔铁的吸引力 F_{δ_2} 和 F_{δ_3} :

$$F_{\delta_2} = \left(\frac{\Phi_{\delta}}{5000} \right)^2 \cdot \frac{1}{S_2} = \left(\frac{14629}{5000} \right)^2 \times \frac{1}{4.27} = 2.00 \text{ (公斤)}$$

$$F_{\delta_3} = \left(\frac{\Phi_{\delta}}{5000} \right)^2 \cdot \frac{1}{S_3} = \left(\frac{14629}{5000} \right)^2 \times \frac{1}{2.23} = 3.8 \text{ (公斤)}$$

⑥ 对衔铁的总吸力 $F'_{\text{总}}$:

$$F'_{\text{总}} = F_{\delta_2} + F_{\delta_3} = 2.0 + 3.8 = 5.8 \text{ (公斤)}$$

⑦ 衔铁与磁芯轴吸合后可能传递的摩擦力矩“ $M_{\text{阻}}$ ”值: 已知: 衔铁的平均摩擦半径 $R_{\text{..}} = 1.7$ 厘米取衔铁和磁芯轴间摩擦系数 $f = 0.1$

所以:

$$\begin{aligned} \text{“}M_{\text{阻}}\text{”} &= F'_{\text{总}} \times f \times R_{\text{..}} = 5.8 \times 0.1 \times 1.7 \\ &= 0.986 \text{ 公斤—厘米} = 986 \text{ 克—厘米} \end{aligned}$$

该“ $M_{\text{阻}}$ ”值远远大于电机的最大起动转矩值, 所以验算合格。

参 考 文 献

- [1] 于东英, 光学机械, 1981, 2, 11.
 [2] 蔡国廉, 《电磁铁》, 上海科学技术出版社, 1966.