

磁阻式无刷直流电机的工作 原理和参数分析

尹 力 明

提 要 本文主要介绍了磁阻式无刷直流电机的工作原理和参数分析。为了提高无刷直流电机的寿命,采用磁悬浮技术来支承电机转子。我们的磁悬浮动量矩飞轮的转子采用了硅钢片材料,所以,无刷直流电机选择了磁阻式电机形式。

因为我们已经成功地试制了逻辑电路和驱动电路,所以,磁悬浮动量矩飞轮的电机采用了两对极三相定子和 60° 电角的步进旋转磁场。

一、前 言

磁悬浮技术的发展,为不断提高无刷直流电机的使用寿命开辟了一条新途径。由于电机没有机械摩擦部件,使得电机寿命进一步接近电子器件和绝缘材料的寿命。

因为我们的原理性磁悬浮动量矩飞轮的转子选用的是硅钢片软磁材料,所以,驱动用的无刷直流电机采用了反应磁阻式电机形式。

为了借用我们已试验成功的逻辑电路和驱动电路,磁悬浮动量矩飞轮的驱动电机选用了两对极、三相星形定子电枢和以 60° 电角步进的旋转磁场。

下面就对磁阻式无刷直流电机的内部机电能量转换的本质和控制逻辑的特点,进行原理性分析。

二、磁阻式无刷直流电机的结构及气隙磁场的分布与等效

试验型磁悬浮动量矩飞轮的无刷直流电机的定、转子结构示意图见图1-1。飞轮的惯性轮即是电机的外环转子。它用高频硅钢片粘叠而成,并加工了两对凸极。同时,它也是磁悬浮支承系统的磁路。电机定子电枢有12槽、两对极,嵌有星形三相整距双层绕组,其展开图见图1-2。

鉴于磁悬浮径向支承的刚度有限,同时为了抑制定子绕组漏电感的漏感反电势对驱动电路的晶体管的危害,电机的气隙较大($1\sim 1.5\text{mm}$),槽口也较宽。

依电机的结构,我们选择了桥式三相晶体管逆变驱动电路,等效原理图见图1-3。

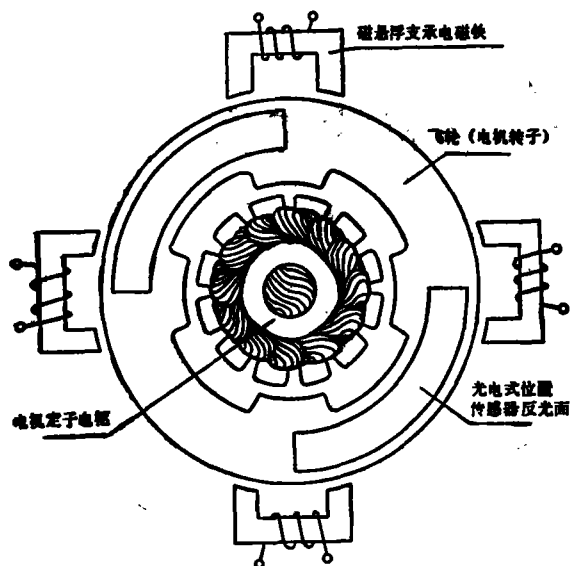


图 1-1 试验型磁悬浮动量矩飞轮的无刷电机结构示意图

如果认为图中的电流方向即是相绕组的磁场方向，则当晶体管 BG_A 与 BG_Z 在控制信号作用下导通时， A 、 C 相绕组产生的合成磁势方向如图 1-3(a) 所示。在一对晶体管导通期间，合成磁场是方向静止的恒定磁场。

若控制信号使 BG_A 截止， BG_B 导通， BG_Z 状态不变，则 B 、 C 相绕组产生的合成磁势如图 1-3(b) 所示。此时，磁势 F_{a2} 相对 F_{a1} 突跳转过 60° 电角。

之后，再使 BG_Z 截止， BG_X 导通， BG_B 状态不变，则 B 、 A 相绕组产生又突跳转 60° 电角的合成磁势 F_{a3} ，见图 1-3(c)。

依此原理，控制信号依次截止、导通电路中各管，则电机气隙中就产生了步进角为 60° 电角的步进旋转磁场。

当电机的极对数为 p 时，旋转磁场的空间机械步进角与电角的关系为：

$$\xi = \theta / p \text{ 或电角 } \theta = p\xi \quad (1-1)$$

逆变桥各晶体管的控制信号电流波形见图 1-4。

在图 1-3(a) 的绕组供电状态下，电机气隙的相磁势和合成磁势的分布波形见图 1-5。

将图 1-5(c) 的合成磁势用富里哀级数展开，并取前几项的近似值，则气隙磁势可

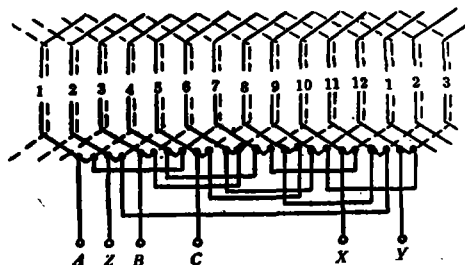


图 1-2 电机定子绕组展开图

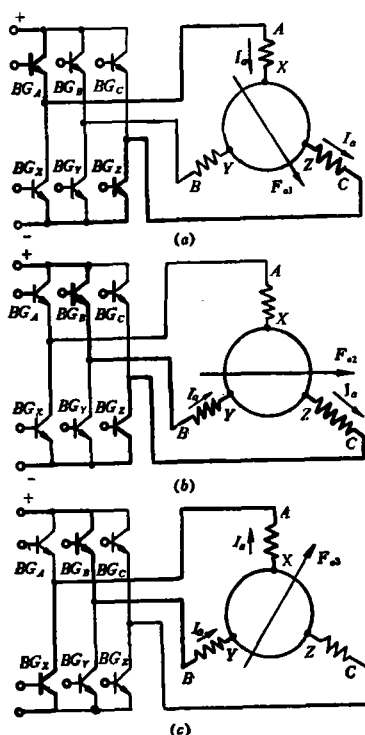


图 1-3 步进旋转磁场的形成示意图

写成

$$f(\theta) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} F_m \left[\sin \theta - \frac{1}{5} \sin 5\theta - \frac{1}{7} \sin 7\theta + \frac{1}{11} \sin 11\theta \right] \quad (1-2)$$

式中 F_m 为电枢合成磁势最大值。

由 (1-2) 式可见, 电机电枢合成磁势中, 以 5、7 次谐波的影响最大。

从图 1-5(c) 的波形及 $f(\theta)$ 的展开式基波来看, 电枢磁势分布角 θ 的起点, 应从相邻两条导通元件边的中点算起。以后, $\theta=0^\circ$ 的点, 也称工作轴角 θ 的起点。

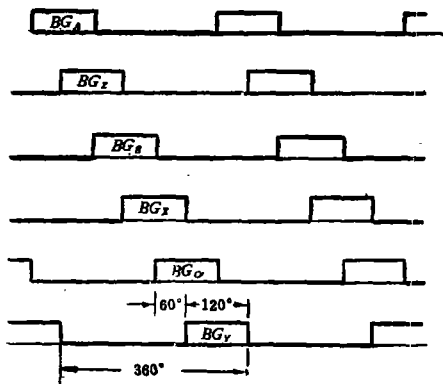


图 1-4 逆变桥晶体的管控制信号波形及顺序

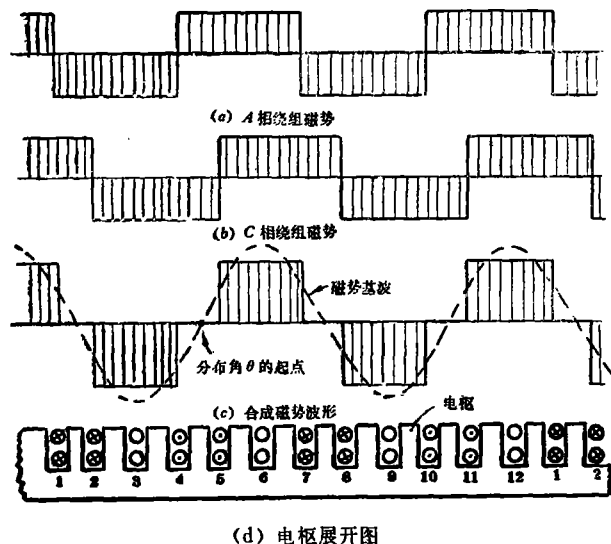


图 1-5 电机运行时的电枢磁势分布图

三、电机的运行原理和参数分析

为了分析电机的工作原理和电磁反应力矩方便, 我们可以把图 1-5(c) 的合成磁势等效成集中的独立凸极形式, 见图 2-1。结合图 1-1 的电机结构示意图, 定、转子都以凸极等效展开。前述的合成磁势的 60° 电角步跃, 可以认为是图 2-1 中的等效凸磁极在步进平移。

倘若等效磁极与转子的相对位置如图 2-1(a), 它们各自轴线间的夹角为 $\pi/2$, 我们定义此刻的电机运行轴角为 $\theta=0^\circ$ 。也可知, 定、转子之间在磁场力作用下, 状态最不稳定。

当转子凸极轴线与等效磁极轴线重合时, 在电磁力的作用下, 定、转子保持相对稳

定。此刻称为工作轴角 $\theta = 90^\circ$ 的时刻。

用磁阻电机的通常近似分析法, 电枢绕组电感在不同工作轴角时的变化规律, 可近似用余弦函数来示意, 见图 2-2。同样, 绕组电感也可以写成工作轴角 θ 的解析式:

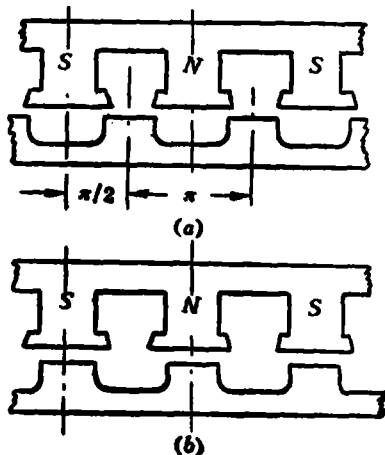


图 2-1 等效磁极与转子展开图

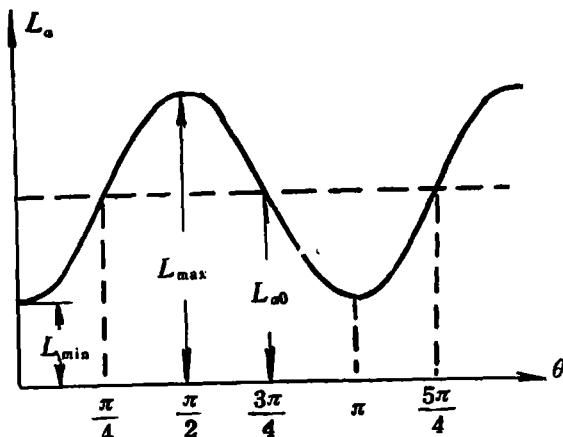


图 2-2 电枢绕组电感随工作轴角的变化曲线

$$L_a(\theta) = L_{a0} - \frac{(K-1)L_{\min}}{2} \cos 2\theta \quad (2-1)$$

式中

$$L_{a0} = (L_{\max} + L_{\min})/2 \quad (\text{电感平均值})$$

$$K = L_{\max}/L_{\min} \quad (\text{电感变化比})$$

因为电枢磁场在状态角内是恒定磁场, 从简化分析角度出发, 可以认为电枢电流是独立分量, 与工作轴角无关。当转子所受切向电磁力为 F_d , 受力半径为 r , 磁场储能为

$W_m = \frac{1}{2} L_a I_a^2$, 则转子所受的电磁力矩为

$$\begin{aligned} M_d &= \frac{\partial W_m}{\partial \xi} = \frac{\partial W_m}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = p \frac{\partial W_m}{\partial \theta} = \frac{1}{2} p I_a^2 \frac{\partial}{\partial \theta} \left[L_{a0} - \frac{(K-1)L_{\min}}{2} \cos 2\theta \right] \\ &= \frac{1}{2} p I_a^2 (K-1) L_{\min} \sin 2\theta = M_{\max} \sin 2\theta \end{aligned} \quad (2-2)$$

式中 $\theta = p\xi$, ξ 为机械转角。

从式(2-2)可知:

(1) 电枢电流恒定时, 电磁力矩随工作轴角作正弦变化, 见图 2-3, 其中 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ 。

(2) 力矩与电流的平方成正比。

(3) 力矩与最大的电枢绕组电感和最小的电枢绕组电感之比 K 成正比。

(4) 当转子从轴角 $\theta = 0^\circ$

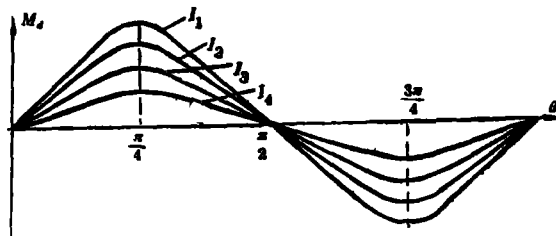


图 2-3 电磁力矩与工作轴角的关系曲线

向 $\theta=90^\circ$ 运动 (即定、转子两凸极相靠近时), 转子受到正力矩。当转子从轴角 $\theta=90^\circ$ 向 $\theta=180^\circ$ 运动 (即定、转子两凸极离开时), 转子受到负力矩。试验已经证明了这一点。

由于这台飞轮电机的电枢步进旋转磁场的步进角为 60° 电角, 因此, 从取得最大平均电磁力矩的角度来讲, 转子凸极轴线与等效磁极轴线的夹角取 75° ($\theta=15^\circ$) 至 15° ($\theta=75^\circ$) 之间运动为最佳, 从图2-3中可以清楚地看出来。不过, 工作轴角取上述区间, 不易正反转兼顾。

为了保证电机正反转力矩特性一致, 磁阻式无刷直流电机的工作轴角应取在 $\theta=0^\circ \sim 60^\circ$ 之间 (反转即在 $\theta=0^\circ \sim -60^\circ$ 之间)。

当然, 单向运行电机的工作轴角还是取 $\theta=15^\circ \sim 75^\circ$ 之间为好。

当电机工作轴角取 $\theta=0^\circ \sim 60^\circ$ 之间时, 平均反应力矩为

$$\bar{M}_1 = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} M_m \sin 2\theta d\theta = \frac{9}{4\pi} M_m \quad (2-3)$$

当电机工作轴角取 $\theta=15^\circ \sim 75^\circ$ 之间时, 平均反应力矩为

$$\bar{M}_2 = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/12}^{5\pi/12} M_m \sin 2\theta d\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M_m \quad (2-4)$$

$\bar{M}_1$ 与 $\bar{M}_2$ 之比为

$$\bar{M}_1 / \bar{M}_2 = \frac{9}{4\pi} M_m \bigg/ \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M_m = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866$$

可见, 工作轴角取 $\theta=0^\circ \sim 60^\circ$ 之间时, 平均反应力矩只比最大平均反应力矩小了百分之十几, 也同样可以保证电机有一定的电磁出力。

以上分析是基于一定的近似条件做出的。但从实际的电机试验数据来看, 还是具有一定实际指导作用的。

我们用不同的工作轴角范围, 在电枢电压一致的条件下, 得到了图2-4的电机电力矩曲线。可见, 力矩变化规律与前面的理论分析一致。而且,

$\theta=0^\circ \sim 60^\circ$ 时的曲线与 $\theta=15^\circ \sim 75^\circ$ 的曲线纵坐标之差的比值, 也约在百分之十几。

模型实验电机的实测电气参数为: $L_{a \max} \approx 0.383H$; $L_{a \min} \approx 0.32H$; $K \approx 1.2$ (比值小主要是因为电机取的气隙较大的缘故); $p=2$ 。

当电机工作轴角取 $\theta=15^\circ \sim 75^\circ$, 电枢电压在 $27V$, 合外力矩为 1162 克·厘米时, 电枢电流有效值为 $1.6A$ 。以测得的电枢电流值代入式(2-2), 可得计算的电磁反应力矩 $M_{d \max} \approx 1670$ 克·厘米。代入 $\bar{M}_2$ 中, $\bar{M}_2 \approx 1380$ 克·厘米, 与实测值比较接近。

在不同的负载力矩下, 电机的调节特性曲线的斜率不相同。但从特性的形状看, 负载不变时, 基本上还是线性的。本电机采用脉冲调宽的电枢电压调速法, 逆变驱动电路

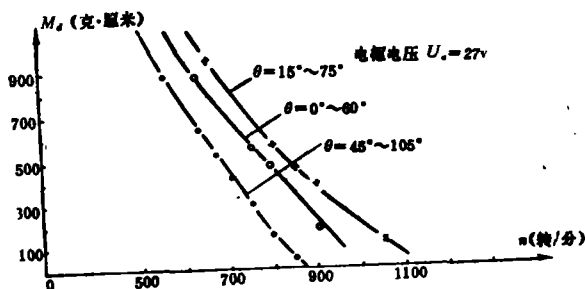


图 2-4 不同工作轴角范围的电机电力矩特性曲线

的参数固定,所以,当电源电压降低时,改变了驱动三极管的基极电流,曲线就弯曲了。当然,用调宽脉冲调速时,电源电压恒定,就可以保证完全线性了。

磁阻式无刷直流电机具有常规直流电机的基本特性,但某些地方又不大一致。限于篇幅,电机的力矩特性和调节特性的理论推导就不介绍了,以后专文叙述。从试验数据来看,理论分析是完全相同的。

值得注意的一个问题是电机恰在 $\theta=0^\circ$ 时起动。从理论上讲,该处起动的反应电磁力矩应等于零,至少相当小。不过,电机的加工安装都有一定的误差,绝对在 $\theta=0^\circ$ 时起动的几率不大。模型样机多次起动,都没有出现起动困难的现象。客观地讲,这种原理性的弱点难以克服,可以从使用条件和供电方式上解决。例如,将电机应用在阻力矩与转速成正比例的情况下,起动时用调宽恒频信号来对电枢电压斩波,以增加机电磁共能交换而产生附加力矩。实际使用时,我们也正是这样实施的。许多资料也有这方面的报导。

倘若把电机的供电状态角减少至 30° 电角(三相十二状态),就可以把磁阻式无刷直流电机的力矩波动达到永磁三相六状态的无刷直流电机水平。

由于电枢绕组有电感,当逆变驱动晶体管导通,并电源电压加至电枢绕组时,电枢电流的增长要有一个过渡过程。逆变驱动晶体管截止后,电枢电流经削尖峰电压的稳压管续流时,又有一个下降的过渡过程。所以,实际的电枢电流相对于电枢电压,有一个延迟角 μ ,见图2-6(a)。

电枢电流的延迟,使合成磁场在空间建立的时间滞后,相对于工作轴角来说,即起始角滞后。当 $\mu \ll T$ (电机工作时的电周期),这种滞后对电机的工作特性影响不大。而当起始工作轴角 θ_0 与滞后角 μ 之和等于或大于 45° 时 [$(\theta_0 + \mu) > 45^\circ$ 或 $\mu > (45^\circ - \theta_0)$], 电机的电磁反应力矩为零或为负,电机将达到转速极限(相当于可控硅电机的换流失败的时刻)。为了削弱电枢电流的滞后作用,可以对电枢绕组实行线性补偿。我们的试验电机经补偿后,在 2000 转/分工作时,滞后现象仍不严重。图2-6(b)是电枢绕组没有

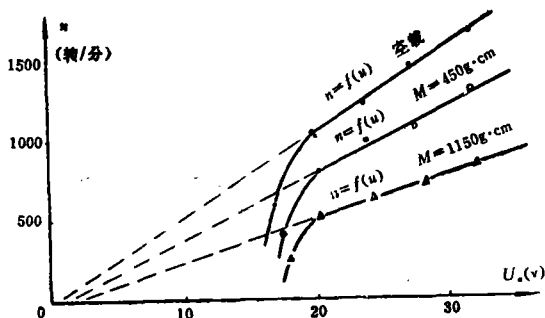


图 2-5 在不同负载力矩下的电机调节特性曲线

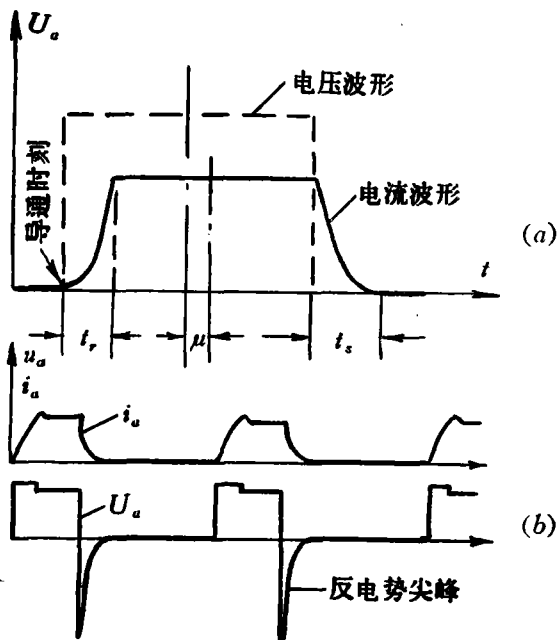


图 2-6 电枢电压与电流的波形图

补偿时的电枢电压和电流波形, 可以看到明显的滞后作用。

由式(1-2)可知, 电枢合成磁场中 5、7 次谐波的幅值较大, 必须抑制它们的干扰。5 次谐波在空间的分布也可以等效成独立的集中凸极形式, 见图 2-7。

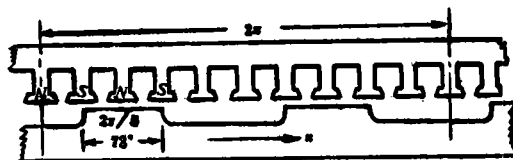


图 2-7 5 次谐波对转子的影响示意图

当转子凸极极宽为 $2\pi/5$ 时(即两倍于 5 次谐波的等效极距), 转子凸极一侧对等效磁极是靠近运动, 而另一侧呈离开运动。可见, 转子受到的 5 次谐波反应力矩正负相消。

可以推论, 转子凸极宽为 γ 次谐波等效磁极极距的偶数倍的话, 都可以削弱 γ 次谐波的干扰力矩。

相对于基波而言, 5 次谐波的等效磁极极距是 36° 电角, 7 次谐波的等效磁极极距是 25.7° 电角。兼顾削弱 5、7 次谐波的干扰力矩, 转子凸极应该加工成 $51.4^\circ \sim 72^\circ$ 电角之间的弧长宽, 试验电机的转子凸极实取 60° 电角宽。

四、电机运转逻辑状态的产生与对准

为了使电机能够准确地工作在出力较大, 同时又保证工作轴角稳定、准确, 检测转子运行的空间位置是非常必要的。试验电机采用了差动变压器式的位置传感器, 磁悬浮飞轮模型则采用了反射式光电位置传感器, 见图 3-1。各种位置传感器所产生的位置信号见图 3-2(a)、(b)。

从图 1-4 可知, 产生 60° 电角步进的旋转磁场, 是由六个宽 120° 电角, 互差 60° 电角的控制方波信号, 对逆变桥六个晶体管适时控制而在电枢气隙中产生的。这六个信号, 可以经图 3-3 的位置—控制信号变换的逻辑电路, 对 A、B、C 三个位置信号综合处理来实现。同样, 这六个控制信号也必然与转子空间转动位置相同步。为了使电机具备正反转电动和正反转制动的四象限运行效果, 控制信号与逆变桥晶体管有着逻辑对准关系。当位置传感器相对于电机定子电枢的安装位置如图 3-4 时, 控制信号与逆变桥晶体管的逻辑对准关系见表 I 和表 II。

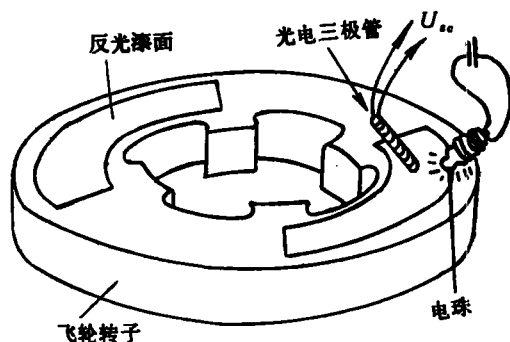


图 3-1 光电位置传感器示意图

正转电动和反转制动

表 I

$^s BG_A$	BG_Z	BG_B	BG_X	BG_C	BG_Y
$\overline{AB}$	$\overline{CA}$	$\overline{BC}$	$\overline{AB}$	$\overline{CA}$	$\overline{BC}$

反转电动和正转制动

表 I

BG_A	BG_Z	BG_B	BG_X	BG_C	BG_Y
$\bar{B}C$	$A\bar{B}$	$\bar{C}A$	$B\bar{C}$	$\bar{A}B$	$C\bar{A}$

表 I 与表 II 还表明, 反转电动 (正转制动) 和正转电动 (反转制动) 之间, 只是向左平移两格, 逻辑顺序相同。

为了使正反转电动和正反转制动的控制信号与逆变桥晶体管的逻辑对应, 实现无接触的快速切换, 我们也使用了数字逻辑电路, 见图 3-5。当运转状态某指令端处在低电平时, 就封锁了一路控制信号, 并且无接触, 无火花, 快速可靠。

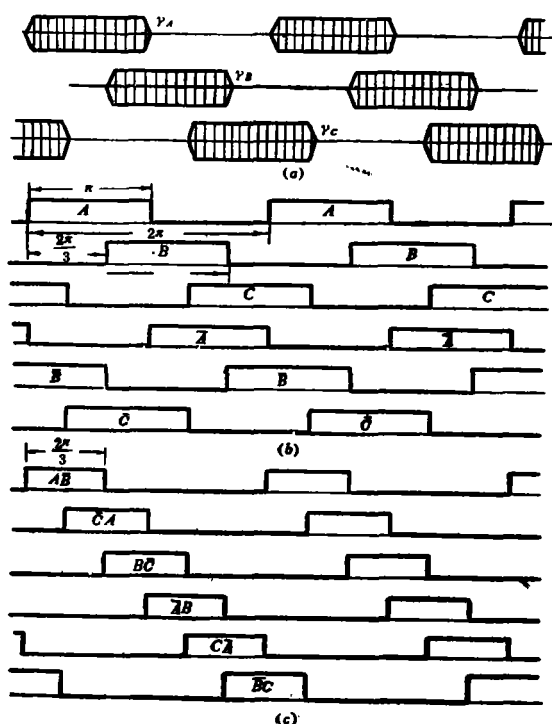


图 3-2 位置传感器信号波形及逆变桥控制信号波形

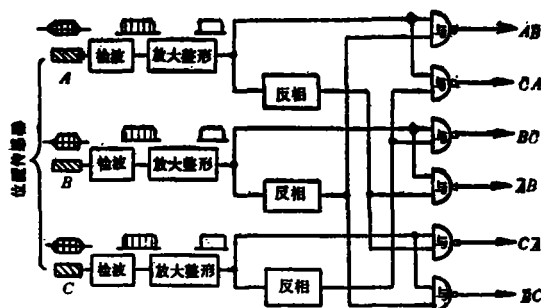


图 3-3 位置—控制信号变换逻辑电路

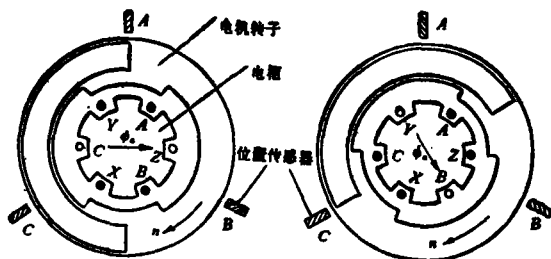


图 3-4 一对极模型示意电机

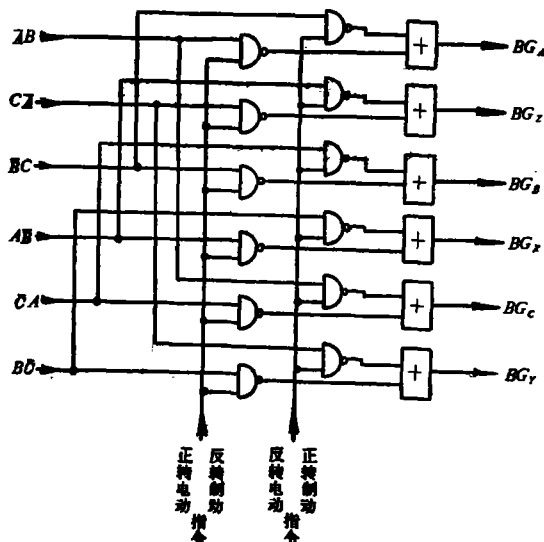


图 3-5 正反转控制逻辑电路原理图

五、结 束 语

从磁悬浮动量矩飞轮模型的驱动电机——磁阻式无刷直流电机的研制过程来看，这种电机也可以做成内转子的常规电机形式。磁阻式无刷直流电机没有采用永磁材料，成本低，而且工艺性好，性能也较稳定。模型电机的试制，也为进一步向普及型电机发展，积累了经验和提供了技术参数。

电机的试制工作还是初步的，本文只简单叙述了工作原理和参数分析。鉴于篇幅所限，我们将在经过大量试验和改型的基础上，与三相零式三状态磁阻式无刷直流电机和磁阻式直流直线电机一起，专门就磁阻式无刷直流电机的控制特性和力矩特性，进行一次系统分析。

本文曾经南京航空学院 303 教研室丁道宏副教授和严仰光主任批阅，并提出宝贵意见。在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 南京航空学院 303 教研室, 可控硅电动机原理, 1976.
- [2] 合肥工业大学机电能量转换研究室, 盘形磁阻式电动机, “中小型电机”技术情报, 1979年第4期。
- [3] 哈尔滨工业大学姚纪文编, 自动控制元件及线路, 1980.
- [4] J.Hindmarsh, Electrical Machines and Their Application, Third edition, 1977.

The Operating Principle and Parameter Analysis of the Reluctance Brushless D C Motor

Yin Li-ming

Abstact

This paper mainly describes the operating principles and parameter analysis of the reluctance brushless dc motor. The magnetic suspension technique is used to support the rotor shaft in order to increase the lifetime of the brushless d c motor. The rotor of our magnetic suspension momentum wheel is made of silicon steel pieces, so that the brushless d c motor chooses the reluctance-motor form.

As the logistic circuit and the driving one are successfully developed by us, the motor of the magnetic suspension momentum wheel selects the three-phase stator of two pairs pole and the step spinning magnetic field at an electric angle of 60 degrees.