

永磁无刷直流电动机的特性研究

山东工业大学(250014) 张庸 孙学礼 王慧

【摘要】 本文介绍了自行研制的 0.75KW 永磁无刷直流电动机的结构原理及性能参数,理论推导了转矩和转速关系式,结合实验分析了电机的工作特性和调速特性,并提出了改变换向触发角可以调速的新方法。

关键词: 直流电动机 工作特性 调速特性 静差率

一. 前言

稀土永磁无刷直流电动机是随着工业控制技术和电力电子技术发展而兴起的一种新型电机,它是由永磁同步电动机本体加上转子位置传感器和电子换向电路组成。它具有交流电机的结构简单、体积小、重量轻、永磁效率高等优点,又具有直流电机优良的调速特性。它的出现适应了当今工业自动控制总的发展趋势——交流化、高频化和数字化。因此广泛应用于对调速性能要求高的交流驱动系统,富有很强的生命力,有着广阔的发展前景。

二. 结构原理及控制系统

我们自行设计研制的 WSZD~0.75KW 稀土永磁无刷直流电动机样机技术数据为: $P_N = 0.75\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $T_N = 5\text{Nm}$, $I_N = 4.5\text{A}$, $n_N = 1500\text{r/min}$, 调速范围 1:10, 三相六状态工作方式。

无刷直流电动机的原理方框图如图 1 所示。

1. 电机本体: 采用永磁同步电机结构, 定子三相星接对称分步绕组, 转子为 4 极凸极式, 瓦形磁钢(Nd-Fe-B)粘接固定。

2. 位置传感器: 采用光电式位置检测器, 避免了不必要的磁干扰对位置信号的影响, 并将转速反馈信号与位置传感器加工在同一圆盘上, 结构简单, 成本低。

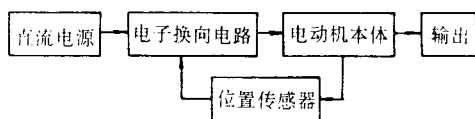


图 1 原理方框图

通电, 制动器工作。由于 T_1 的集电极为低电平, 所以 ZD_5 截止, T_7 仍处于截止状态, 这种状态一直持续到控制电压 u_i 由“1”态变为“0”态。改变电位器 W_1 的阻值, 从而改变 C_4 的充电速度, 达到改变离合器断到制动器通的间隔时间 t_2 。

强激电压的情况同控制电压 u_i 由“1”态变

《机床电器》1995 年 6 期

3. 电子换向电路: 主电路采用不可控整流、电容滤波、电压型逆变器。逆变器主开关采用功率场效应管(MOSFET)三向桥式结构三相六状态 120° 导通型。驱动回路采用 PWM 方式, 开关频率达 20KHZ, 实现调压调速。控制回路采用普通的双闭环结构, 转速外环, 电流内环。转速、电流调节器皆使用具有有限幅的 PI 调节器, 使转速稳态无静差, 并具有 n_{\max} 和 L_{\max} 限制。无刷直流电动机结构原理图如图 2 所示(虚线框部分)。

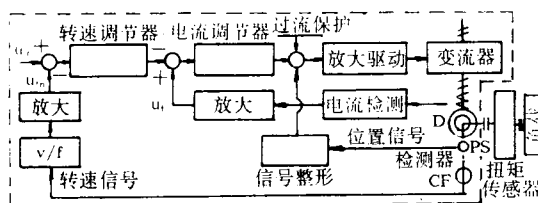


图 2 无刷直流电动机系统组成及实验线路

三. 工作特性与运行状态

无刷直流电动机由于控制要求其反电势为梯形波, 并且电机的电感为非线性的, 而磁钢的导磁率接近空气很低, 转子电感很高, 因此可忽略转子电流不计, 可列出状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

由电机结构决定, 在一个电气角 360° 周期内, 转子的磁阻不随转子位置变化而变化, 则

为“0”态时一样。

4. 结束语

该控制电源功能齐全, 实践证明, 工作可靠, 性能良好, 它不仅适用于离合制动器, 也可作为离合器或制动器以及电磁铁的控制电源, 为减小体积, 提高性能, 控制部分应采用集成电路。

(收稿日期: 1995-08-01)

$$L_a=L_b=L_c=L, L_{ab}=L_{ba}=L_{ac}=L_{ca}=L_{bc}=L_{cb}=M$$

再由 $i_a+i_b+i_c=0$, (1)式可写为

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

电磁转矩

$$\begin{aligned} T_e &= (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \Omega \\ &= (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \cdot p / \omega \end{aligned} \quad (3)$$

任一相绕组, 定子在一个电气周期内, 有 120° 是正向导通, 然后 60° 不导通, 再 120° 反向导通, 60° 不导通。若导通范围内, 定子相电流为 I , 绕组反电势为恒值 E , 则

$$T = EI / \Omega = K_E I \quad (4)$$

考虑到反向导通的 120° 时的电磁转矩, 则在一个 360° 电气周期内该相平均电磁力矩为

$$T = (2 \times 120 / 360) K_E I = 2 / 3 K_E I \quad (5)$$

其中 $K_E = E / \Omega$ 。

三相合成转矩为

$$T_e = 3T = 2K_E I \text{ 或 } T_e = K_T I \quad K_T = 2K_E \quad (6)$$

式中 转子角转速(rad/s);

每相反电势系数(r/rads-1);

电机的转矩系数(Nm/A)。

可见在理想情况下, 无刷直流电机交流伺服系统具有线性的转矩电流特性。

图 3 是 0.75KW 无刷直流电机实测的工作特性曲线, 其实验线路如图 2 所示。图 3 中, 实线表示系统工作在三相六状态下, $M2, n, P1, I_{cp} = f(P2)$ 的工作特性 $U_N = 220V \quad I_N = 4.5A$ 。虚线表示系统工作在三相三状态下的工作特性, $U_N = 110V, I_N = 10.5A$ 。

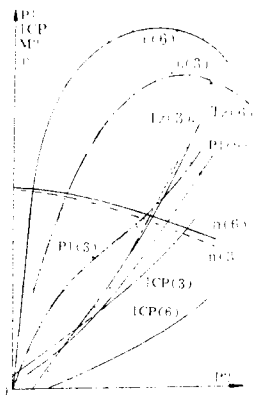


图 3 无刷直流电机的工作特性

由图 3 可看出: 1. 无刷直流电动机有与直流电动机相似的工作特性, $T = K_T I$ 。2. 在恒功率输出情况下, 三相三状态与三相六状态的比较, 实验曲线表明输出转矩 T_2 与转速基本不变, 而输入功率三状态较六状态大, 效率则相反。这是由于三相三状态时反电势(因电源电压)低一半, 而每

相电流高一倍, 其乘积与三相六状态基本一致, 因而 T_2 不变。又 P_2 不变, 则 n 基本不变。但 $I(3)$ 大于 $I(6)$, 使铜耗大大增加, 因而效率降低。

四. 调速特性及调速方法

1. 转速公式: 从图 2 所示回路 MOS 管工作在逆变状态, 设整流桥输出直流电压 U_d' , 逆变桥电压 U_d , 则有

$$U_d = U_d' - \Sigma RI \quad (7)$$

式中 ΣR ——直流回路的等效电阻, 包括 MOS 管导通压降, 换流压降引起的等效电阻。由可控硅整流理论, 逆变桥电压有相似表达式:

$$U_d = 2.34 U_m \cos(\gamma - \beta/2) \cdot \cos(\beta/2) \quad (8)$$

$$U_m = C \Phi \omega \quad (9)$$

式中 r ——换向触发角;

β ——逆变元件换流重叠角;

Φ ——电动机气隙合成每极磁通;

ω ——电动机转子电角速度;

C ——系数。

$$\omega = \frac{2\pi P \cdot n}{60} \quad (10)$$

由(7)~(10)式, 得转速公式:

$$n = \frac{U_d' - \Sigma R \cdot I}{K \cdot \Phi \cdot \cos(\gamma - \beta/2) \cdot \cos(\beta/2)} \quad (11)$$

式中 $K = 2.34 \times 2\pi \cdot P \cdot C / 60 = 0.078\pi \cdot P \cdot C$;

P ——电机极对数。

由公式(11)看出无刷直流电动机的转速公式与直流电动机转速公式:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

十分相似, 可知其调速特性也相似。

2. 调速方法: 无刷直流电动机的调速方法, 由(11)式看出有两种方法:

①调压调速, 可以通过改变整流器的导通角实现, 也可通过 PWM 斩波调压实现。

②调节换向触发角 γ , 它相当于改变直流电动机的电刷位置, 利用电枢反应的去磁效应, 可实现弱磁调速。

表 1 是 0.75KW 样机在恒转矩条件下, 调速特性实验数据。其调速方法采用 PWM 斩波调压调速。

表 1 调速范围测试 ($U=220V \quad T=2N \cdot M$)

n (转/分)	1597	1500	1300	1100	900	700	500	400	200	150
I_{cp} (安)	1.9	2.1	2.25	2.52	2.58	2.73	2.85	2.88	3.01	3.08

电器弹簧的设计(三)

甘肃长城电器工业公司(741018) 陈绍魁

(三)拉伸弹簧

1. 概述

拉伸弹簧一般做成圈并紧并有一定初始力,但也有做成并圈没有初始力。做成圈间有间距的情况是少有的。当弹簧在轴向受到一个挂力,弹簧金属丝受一个扭曲应力。

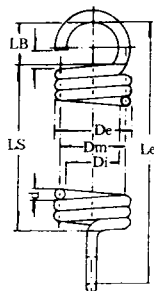


图 78 拉伸弹簧

2. 特性参数

(1) 尺寸特性

d = 钢丝直径;

D_i = 弹簧内径;

D_o = 弹簧外径;

D_m = 弹簧中径;

$$D_m = D_i + d = \frac{D_i + D_o}{2}$$

L_i = 弹簧自由长度 = $L_s + 2L_B$;

n = 有效匝数;

m = 环展开长度;

绕向(左、右)

(2) 挂环的形状

① 正常环扣,或叫英国环,这种环如图 79 所示。

$$L_B = D_i$$

② 半环扣,或叫德国环,这种环扣如图 80 所示。

$$L_B = 0.6 \sim 0.8 D_i$$

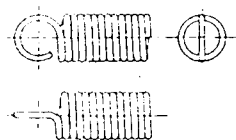


图 79 正常环扣

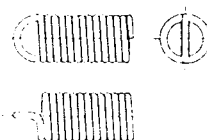


图 80 半环扣

③ 侧面环扣

侧面环扣如图 81 所示。

$$L_B = D_i$$

④ 封闭环扣

$$\text{实测调速范围 } D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1597}{150} \approx 11$$

表 2 是 0.75KW 样机静差率测试数据

$$U_N = 220V, n_N = 1500 \text{ rpm}$$

表 2 静差率

电流(A)	0.6	1.1	1.6	2.0	2.7	3.13	3.9	4.25	4.4
转矩(N·M)	0	0.8	1.28	1.72	2.8	3.36	4.4	4.8	5.0
转速(rpm)	4500	1500	1508	1504	1497	1500	1497	1498	1498

$$\text{静差率 } \delta = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100\% \leq 0 \quad (\text{无静差})$$

表 3 和表 4 是 0.75KW 样机调节换向触发角 γ 的调速特性。

1. 空载: $T = 0$ $U = 220V$

表 3 调速特性

r (度)	+15	0°	-15°	-30
n (rpm)	1718	1715	1728	1889
I_{cp} (A)	0.32	0.23	0.23	0.33

2. 负载: $T = 5N \cdot M$ $U = 220V$

《机床电器》1995 年 6 期

表 4 调速特性

r (度)	+15°	0°	-15°	-30°
n (rpm)	1406	1434	1450	1534
I_{cp} (A)	4.15	3.85	3.88	4.18
η (%)	76.2	83.4	83.7	82.2

表中 γ 为负值表示超前调节。 γ 为正值表示滞后调节。电枢反应助磁效应由表 3 看出:超前调节时,相当于弱磁调速方式,使电机转速增高。

五. 结论

本文以自行研制的 0.75KW 永磁无刷直流电机的机理性研究,从理论和实验证明了无刷直流电动机,具有交、直流电动机的优点,是目前交流伺服控制系统中值得推广的新型电机。

参考文献

- [1] 贾正春等. 永磁同步电动机弱磁控制的实验研究. 北京科海培训中心 1992. 147
- [2] 郭庆鼎等. 高性能交流伺服系统中的设计,控制及应用问题. 北京科海培训中心. 1992 92~93

(收稿日期:1995-06-27)