

三相永磁同步电动机起动性能分析

励鹤鸣 吴 凯 郭 芳

(西安交通大学 西安 710049)

Analysis of Starting Characteristic for Three Phase Permanent Magnet Synchronous Motor

Li Heming Wu Kai Guo Fang

(Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049)

【摘 要】 采用 d、q 座标系统,建立了三相永磁同步电动机的数学模型,并用叠加原理计算起动过程的电流波形、转矩波形及 M-S 曲线,分析了转矩的谐波分量。

【关键词】 永磁同步电动机 脉振转矩

【Abstract】 Mathematical model for three phase permanent magnet synchronous motor by using d, q, coordinates has been developed and presented in this paper. The model is applied to calculate the waveforms of current, torque and torque ~ speed curves for the starting conditions by using superimposed principle. The harmonic components of torque have also been discussed.

【Keywords】 permanent magnet synchronous motor pulsating torque

随着高能稀土材料的问世,对三相永磁同步电动机(PMSM)的开发应用引起了人们很大的关注。PMSM 由于转子边没有损耗,其总损耗比一般三相异步电动机减少约 30%,所以对 PMSM 的开发研究具有很大的现实意义。由于转子永磁体的存在以及 d、q 轴磁导不等,PMSM 起动过程的电磁关系十分复杂。本文采用 d、q 座标系统对 PMSM 的起动性能进行研究,揭示其在起动过程中所存在的脉振转矩。

1 d、q 座标系统下的数学模型

本文采用 d、q 座标系统,所有量均用标么值表示,电压、电流的基值取其最大值。在永磁转子上安放 d、q 轴,如图 1a 所示。在 d、q 座标系统下对一台具有起动绕组的 PMSM,用标么值表示的电压方程式为:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= p\psi_d - (1-s)\psi_q + r_d i_d \\ u_q &= p\psi_q + (1-s)\psi_d + r_q i_q \\ u_{kd} &= p\psi_{kd} + r_{kd} i_{kd} \\ u_{kq} &= p\psi_{kq} + r_{kq} i_{kq} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 下标 kd、kq 分别表示 d 轴和 q 轴的起动绕组,如图 1b 所示

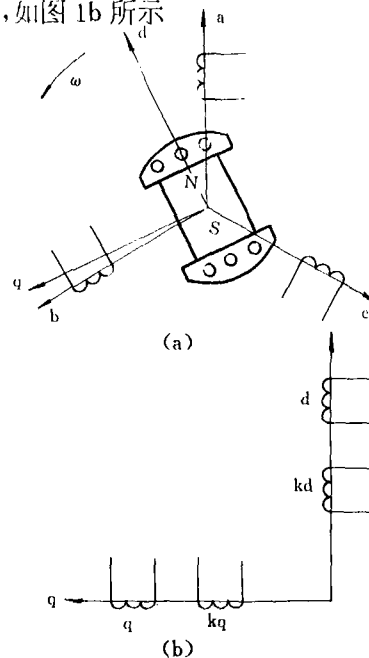


图 1

各绕组的磁链方程式为

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= x_d i_d + x_{akd} i_{kd} + \psi_r \\ \psi_q &= x_q i_q + x_{akq} i_{kq} \\ \psi_{kd} &= x_{kd} i_{kd} + x_{kqd} i_d + \psi_{ikd} \\ \psi_{kq} &= x_{kq} i_{kq} + x_{kqd} i_q \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 ψ_r —转子永磁体在 d 轴绕组所产生的磁链
 ψ_{ikd} —转子永磁体在 kd 绕组所产生的磁链
 在异步稳态运行时,把式(2)代入式(1),得

微特电机 1995 年第 1 期

本文 1994 年 10 月 5 日收到

$$\left. \begin{aligned} u_d &= p(x_d i_d + x_{akd} i_{kd}) - (1-s)(x_q i_q + x_{akd} i_{kd}) \\ &\quad + r_q i_q \\ u_q &= p(x_q i_q + x_{akq} i_{kq}) + (1-s)(x_d i_d + x_{akd} i_{kd}) \\ &\quad + r_q i_q + (1-s)E_0 \\ u_{kd} &= p(x_{kd} i_{kd} + x_{kqd} i_{dq}) + r_{kd} i_{kd} \\ u_{kq} &= p(x_{kq} i_{kq} + x_{kqd} i_{dq}) + r_{kq} i_{kq} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 E_0 —由 ψ_r 在 q 轴绕组中所产生的切割电势

$$E_0 = \psi_r$$

分析式(3)可知,当异步稳态运行时, d 、 q 轴绕组的量为 $s\omega_1$ 频率的交流电,而 E_0 则为直流量。因此对式(3)的求解需要应用叠加原理,把式(3)分为如下两组方程式,一组为交流源 \dot{U}_d 、 \dot{U}_q 激励,另一组为直流源 E_0 激励。

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_d &= js(x_d \dot{I}_{d1} + x_{akd} \dot{I}_{kd1}) \\ &\quad - (1-s)(x_q \dot{I}_{q1} + x_{akq} \dot{I}_{kq1}) + r_d \dot{I}_{d1} \\ \dot{U}_q &= js(x_q \dot{I}_{q1} + x_{akq} \dot{I}_{kq1}) \\ &\quad + (1-s)(x_d \dot{I}_{d1} + x_{akd} \dot{I}_{kd1}) + r_q \dot{I}_{q1} \\ \dot{U}_{kd} &= js(x_{kd} \dot{I}_{kd1} + x_{kqd} \dot{I}_{dq1}) + r_{kd} \dot{I}_{kd1} \\ \dot{U}_{kq} &= js(x_{kq} \dot{I}_{kq1} + x_{kqd} \dot{I}_{dq1}) + r_{kq} \dot{I}_{kq1} \\ 0 &= -(1-s)x_q I_{q0} + r_d I_{d0} - (1-s)E_0 \\ &= (1-s)x_d I_{d0} + r_q I_{q0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 下标 1—交流源产生的电流

下标 0—直流源产生的电流

分别求解式(4)和式(5),就可得到交流源 \dot{U}_d 和 \dot{U}_q 产生的电流 \dot{I}_{d1} 、 \dot{I}_{q1} 、 \dot{I}_{kd1} 和 \dot{I}_{kq1} 以及直流源 E_0 产生的电流 I_{d0} 和 I_{q0} 。

相应产生的磁链为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{d1} &= x_d \dot{I}_{d1} + x_{akd} \dot{I}_{kd1} \\ \psi_{q1} &= x_q \dot{I}_{q1} + x_{akq} \dot{I}_{kq1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{d0} &= x_d \dot{I}_{d0} + E_0 \\ \psi_{q0} &= x_q \dot{I}_{q0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

从式(4)第 3、4 式中,并设 $\dot{U}_{kd} = \dot{U}_{kq} = 0$,可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{kd1} &= \frac{-jsx_{sd}}{r_{kd} + jsx_{kd}} \dot{I}_{d1} \\ \dot{I}_{kq1} &= \frac{-jsx_{sq}}{r_{kq} + jsx_{kq}} \dot{I}_{q1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

把上式代入式(4)前二式,设 $\dot{U}_d = j1.0$, $\dot{U}_q = 1.0$,

三相永磁同步电动机起动性能分析

可求得

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{d1} &= I_{d1a} + jI_{d1r} \\ \dot{I}_{q1} &= I_{q1a} + jI_{q1r} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

把式(8)代入式(6),式(6)可改写为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{d1} &= \left[\frac{r_{kd}^2 x_d + s^2 (x_d x_{kd} - x_{sd}^2) x_{kd}}{r_{kd}^2 + s^2 x_{kd}^2} + j \frac{-s r_{kd} x_{sd}^2}{r_{kd}^2 + s^2 x_{kd}^2} \right] \dot{I}_{d1} \\ &= (A + jB) \dot{I}_{d1} \\ \psi_{q1} &= \left[\frac{r_{kq}^2 x_q + s^2 (x_q x_{kq} - x_{sq}^2) x_{kq}}{r_{kq}^2 + s^2 x_{kq}^2} + j \frac{-s r_{kq} x_{sq}^2}{r_{kq}^2 + s^2 x_{kq}^2} \right] \dot{I}_{q1} \\ &= (C + jD) \dot{I}_{q1} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

交流源激励下产生的平均转矩为

$$m_1 = \frac{R_e (\psi_{d1}^* \dot{I}_{q1} - \psi_{q1}^* \dot{I}_{d1})}{2} \quad (11)$$

式中 右上角“*”标记表示为其共轭复数

直流源激励下产生的平均制动转矩为

$$m_0 = \psi_{d0} I_{q0} - \psi_{q0} I_{d0} \quad (12)$$

从式(5)可求得 I_{d0} 、 I_{q0} 分别为

$$\left. \begin{aligned} I_{d0} &= \frac{-(1-s)^2 x_q E_0}{r^2 + (1-s)^2 x_d x_q} \\ I_{q0} &= \frac{-(1-s) r E_0}{r^2 + (1-s)^2 x_d x_q} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 $r = r_d = r_q$

把式(7)和式(13)代入式(12),得

$$m_0 = \frac{-(1-s)^3 r x_q^2 - (1-s) r^3}{[r^2 + (1-s)^2 x_d x_q]^2} E_0^2 \quad (14)$$

将上式对转差率 s 求导,可求得发生最大制动转矩时的转差率

$$s_m = 1 - \frac{r}{x_q}$$

$$\cdot \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{x_q - x_d}{x_d}} + \sqrt{\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{x_q - x_d}{x_d} \right)^2 + \frac{x_q}{x_d}} \quad (15)$$

2 脉振转矩的计算

从式(9),可写出在时域下的表达形式为

$$\left. \begin{aligned} i_{d1} &= I_{d1} \cos(s\omega_1 t + \varphi_1) \\ i_{q1} &= I_{q1} \cos(s\omega_1 t + \varphi_2) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中 $I_{d1} = \sqrt{I_{d1a}^2 + I_{d1r}^2}$

$$I_{q1} = \sqrt{I_{q1a}^2 + I_{q1r}^2}$$

$$\varphi_1 = \text{tg}^{-1} \frac{I_{d1r}}{I_{d1a}}$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_2 &= \text{tg}^{-1} \frac{I_{q1r}}{I_{q1a}} \\ \psi_{d1} &= M \cos(s\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_3) \\ \psi_{q1} &= N \cos(s\omega_1 t + \varphi_2 + \varphi_4) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中 $M = I_{d1} \sqrt{A^2 + B^2}$
 $N = I_{q1} \sqrt{C^2 + D^2}$
 $\varphi_3 = \text{tg}^{-1} \frac{B}{A}$
 $\varphi_4 = \text{tg}^{-1} \frac{D}{C}$

合成电流为

$$\left. \begin{aligned} i_d &= i_{d1} + I_{d0} = I_{d1} \cos(s\omega_1 t + \varphi_1) + I_{d0} \\ i_q &= i_{q1} + I_{q0} = I_{q1} \cos(s\omega_1 t + \varphi_2) + I_{q0} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

合成磁链为

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= \psi_{d1} + \psi_{d0} \\ &= M \cos(s\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_3) + x_d I_{d0} + E_0 \\ \psi_q &= \psi_{q1} + \psi_{q0} \\ &= N \cos(s\omega_1 t + \varphi_2 + \varphi_4) + x_q I_{q0} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

合成转矩为

$$m = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (20)$$

把式(18)和式(19)代入上式,求得合成转矩为

$$m = (m_0 + m_1) + m_2 + m_3 \quad (21)$$

式中 $(m_0 + m_1)$ —恒定分量,即等于式(11)和式(14)求得的平均转矩之和

m_2 — $2s\omega_1$ 频率的脉振分量

m_3 — $s\omega_1$ 频率的脉振分量

恒定分量 $m_0 + m_1$ 的表达式为

$$\begin{aligned} m_0 + m_1 &= [(x_d - x_q)I_{d0}I_{q0} + E_0I_{q0}] \\ &+ \left[\frac{1}{2}MI_{q1}\cos(\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3) \right. \\ &\left. - \frac{1}{2}NI_{d1}\cos(-\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_4) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

$2s\omega_1$ 频率脉振分量 m_2 的表达式为

$$\begin{aligned} m_2 &= \frac{1}{2}MI_{q1}\cos(2s\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) \\ &- \frac{1}{2}NI_{d1}\cos(2s\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_4) \end{aligned} \quad (23)$$

上式可改写为如下形式

$$m_2 = -\sqrt{F^2 + G^2} \sin(2s\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_2 - \beta) \quad (24)$$

$$\text{式中 } F = \frac{1}{2}MI_{q1}\cos\varphi_3 - \frac{1}{2}NI_{d1}\cos\varphi_4$$

$$G = \frac{1}{2}MI_{q1}\sin\varphi_3 - \frac{1}{2}NI_{d1}\sin\varphi_4$$

$$\beta = \text{tg}^{-1} \frac{F}{G}$$

$s\omega_1$ 频率的脉振分量 m_3 的表达式为

$$\begin{aligned} m_3 &= (x_d I_{d0} + E_0)I_{q1}\cos(s\omega_1 t + \varphi_2) \\ &+ MI_{q0}\cos(s\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_3) \\ &- x_q I_{q0}I_{d1}\cos(s\omega_1 t + \varphi_1) \\ &- NI_{d0}\cos(s\omega_1 t + \varphi_2 + \varphi_4) \end{aligned} \quad (25)$$

同样,上式经整理后可改写为

$$m_3 = \sqrt{R^2 + Q^2} \sin(s\omega_1 t + \alpha) \quad (26)$$

$$\text{式中 } R = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \cos(\varphi_2 + \alpha_1)$$

$$- \sqrt{P_3^2 + P_4^2} \sin(\varphi_1 - \alpha_2)$$

$$Q = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \sin(\varphi_2 + \alpha_1)$$

$$- \sqrt{P_3^2 + P_4^2} \sin(\varphi_1 - \alpha_2)$$

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{Q}{R}$$

$$\text{其中 } P_1 = (x_d I_{d0} + E_0)I_{q1} - NI_{d0}\cos\varphi_4$$

$$P_2 = NI_{d0}\sin\varphi_4$$

$$P_3 = MI_{q0}\cos\varphi_3 - x_q I_{q0}I_{d1}$$

$$P_4 = MI_{q0}\sin\varphi_3$$

$$\alpha_1 = \text{tg}^{-1} \frac{P_1}{P_2}$$

$$\alpha_2 = \text{tg}^{-1} \frac{P_3}{P_4}$$

从式(25)可见, $s\omega_1$ 频率的脉振转矩分量系由转子永磁体的存在而引起的,随着转速不断上升,其交变周期不断增大,在电机牵入同步时,该部分脉振转矩将协同电机平均转矩一起驱动电机进入同步。表1为异步运行时各部分转矩幅值与 s 的关系,各部分参数取值见后面计算实例。

表1 异步运行时转矩幅值与 s 的关系

转差率 s	平均转矩/Nm	$2s\omega_1$ 幅值	$s\omega_1$ 幅值
1.00	3.333	1.647	9.239
0.900	2.589	1.674	5.941
0.800	3.232	1.705	3.144
0.700	3.701	1.740	2.136
0.600	4.077	1.769	1.760
0.500	4.224	1.748	1.867
0.400	3.636	1.746	2.331
0.300	3.581	1.843	1.982
0.200	3.606	1.566	1.662
0.100	2.515	1.092	1.819

按座标变换公式,可求得定子每相绕组电流

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i_d \cos \omega t - i_q \sin \omega t \\ i_b &= i_d \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) - i_q \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ i_c &= i_d \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) - i_q \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

把式(18)代入式(27),可得

$$\begin{aligned}
 i_a = & [I_{d1}\cos(s\omega_1 t + \varphi_1) + I_{d0}]\cos\omega t \\
 & - [I_{q1}\cos(s\omega_1 t + \varphi_2) + I_{q0}]\sin\omega t \\
 = & \frac{I_{d1}}{2}\cos(\omega_1 t + \varphi_1) - \frac{I_{q1}}{2}\sin(\omega_1 t + \varphi_2) \\
 & + \frac{I_{d1}}{2}\cos[(2s-1)\omega_1 t + \varphi_1] \\
 & + \frac{I_{q1}}{2}\sin[(2s-1)\omega_1 t + \varphi_2] \\
 & + I_{d0}\cos[(1-s)\omega_1 t] - I_{q0}\sin[(1-s)\omega_1 t]
 \end{aligned} \quad (28)$$

同样,可求得 i_b 和 i_c 。从式(28)可以看出,在定子每相电流中,除了基频分量外,还存在着 $(2s-1)\omega_1$ 和 $(1-s)\omega_1$ 频率的分量。

3 计算举例

一台三相永磁同步电动机, Y 接法, 3kW, 380V, 6极, 其标么值参数为 $r=0.02527$, $x_1=0.0439$, $x_{ad}=0.353$, $x_{aq}=0.71$, $x_{kql}=0.0346$, $r_{kq}=0.0358$ 。图 2 为 $\frac{x_{kql}}{x_{kdl}} = \frac{r_{kq}}{r_{kd}} = 2.0$, $E_0=0.85, 0.90, 0.95, 1.0$ 时的 $m_0, m_1=f(s)$ 的关系曲线。 x_1 为定子绕组漏抗, x_{kql} 为 q 轴阻尼绕组漏抗。

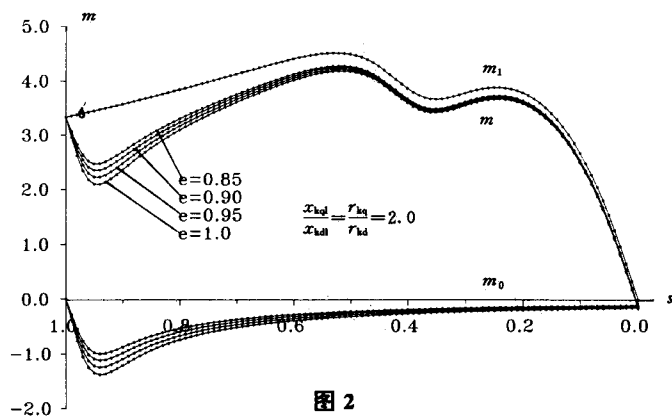


图 2

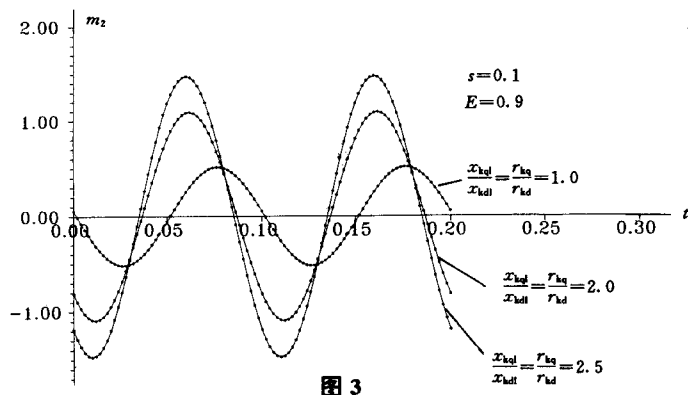


图 3

图 3, 4 为 $s=0.1$, $E_0=0.90$, $\frac{x_{kql}}{x_{kdl}} = \frac{r_{kq}}{r_{kd}} = 1.0$,

三相永磁同步电动机起动性能分析

2.0、2.5 时的 $m_2 = f(t), m_3 = f(t)$ 的关系曲线。

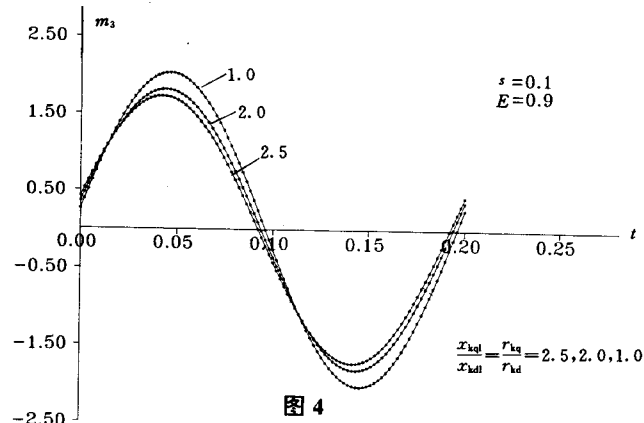


图 4

图 5, 6 为 $E_0=0.90$, $\frac{x_{kql}}{x_{kdl}} = \frac{r_{kq}}{r_{kd}} = 2.0$, $s=0.1$,

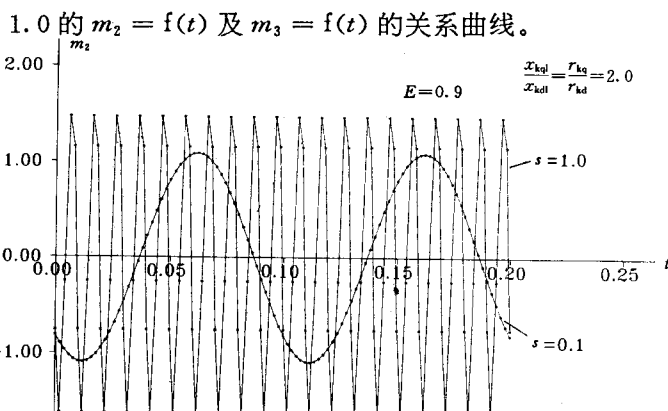


图 5

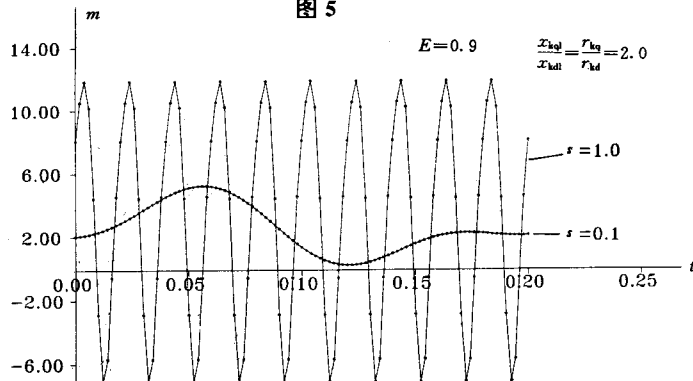


图 6

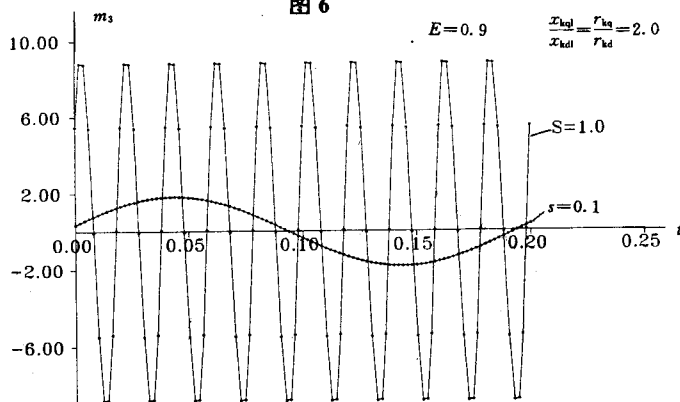


图 7

(下转第 38 页)

一般为 0.005~0.01、直线度一般为 0.02、表面粗糙度为 Ra0.8。

(2) 国内三厂的技术装备相差不大,主要是利用普通的无心磨床加上自动送料装置进行磨削加工,不同的是前工序的下料方法。目前下料工序主要有两种:一种利用冲床剪断下料;另一种是使用机床切断下料。两种方法各有长处,冲床剪切效率高但需要留较多的平端面余量,切断下料效率虽低但省料。

日本西武厂的技术装配比国内目前的状况先进许多,主要体现在以下几点:

- 计算机的应用,所用设备均以数控或计算机控制。

- 机床的多功能化,其所用的小型 NC 自动数控车床、集车、铣、钻一体化,并自动换刀、增值补偿、紧急报警等相当于一个机械加工中心。

- 连接、运转的自动控制化。

由于工艺条件的差异,生产工艺流程各有特点,国内三厂流程较长分工较细,以发挥其专机的特色,求得高效率及高质量。西武厂工艺流程短工序集中,以发挥其数控、计算和管理的先进技术。下表是四个工厂主要工序生产效率比较。

需要指出的是光轴表面高频淬火,不仅是提高了光轴的品质,而且对工艺流程也有较大的影响,两者的工艺流程是不相同的,目前国外许多光轴是不进行表面高频淬火处理的(参考文献略)。

工 厂	下 料		校 直		粗 磨	精 磨
	方式	效率	方式	效率		
某刀具厂	冲剪	1 万根/1.5 小时				1 万根/班
某缝纫机厂	冲剪	60~80 根/分	机校	50~80 根/分	500~600 根/班	300~4200 根/班
成都电机厂	切断	800~1200 根/班	手校	600~800 根/班	3500~4500 根/班	2500~3500 根/班
日本西武厂					780 根/小时	12 根/分

(上接第 5 页)

图 7 为 $E_0 = 0.90$, $\frac{x_{kql}}{x_{kdl}} = \frac{r_{kq}}{r_{kd}} = 2.0, s = 0.1$ 、1.0 时的 $m = f(t)$ 关系曲线,图 8 为 $E_0 = 0.90$, $\frac{x_{kql}}{x_{kdl}} = \frac{r_{kq}}{r_{kd}} = 2.0, s = 0.1$ 时的 A 相绕组电流与时间关系曲线。

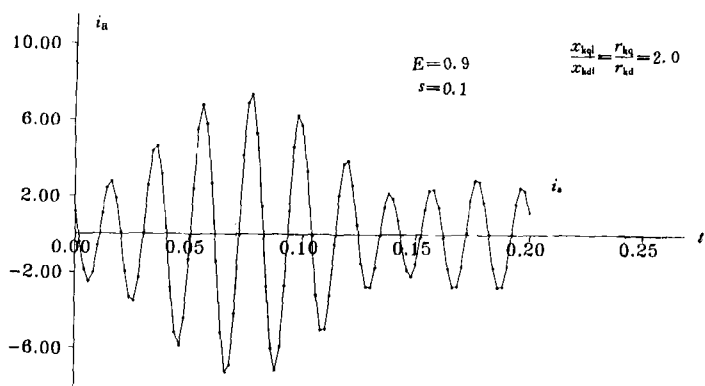


图 8

4 结 论

本文用 d、q 座标系统及叠加原理计算

PMSM 在起动过程中的 $M-S$ 曲线。从曲线可见,由于起动过程中转子永磁体的存在而产生的制动转矩,使 $M-S$ 曲线中出现了凹处。另外分析表明,由于转子永磁体的存在以及 d 、 q 轴磁导的不等,在起动过程中还出现了以 $2s\omega_1$ 和 $s\omega_1$ 频率交变的脉振转矩分量,而 $s\omega_1$ 频率交变的脉振转矩分量的幅值较大,随着转子转速的不断上升,其交变周期不断增大。在电机牵入同步时,该部分转矩将协同平均转矩一起加速电机牵入同步。

参 考 文 献

- 1 [英] B·阿德金斯, R·G 哈利著. 交流电机统一理论—在实际问题上的应用
- 2 励鹤鸣, 励庆孚著. 电磁减速式电动机. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- 3 陈文纯主编. 电机瞬变过程. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- 4 高琳. 单相永磁式低速同步电动机的稳态计算. 西安交通大学硕士论文, 1989.