

文章编号: 1006-1576(2002)04-0006-03

永磁无刷直流电机伺服系统全数字化设计

吴东苏, 马佳, 尹泉, 万淑芸

(华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于 DSP 的全数字化无刷直流电机伺服系统, 由包括 DSP 和片外存储器的以 TMS320F240 组成的小系统, 及反馈信号采集模块 2 部分组成。系统原理是: 三相交流输入经整流、稳压后为逆变电路提供直流电源, 逆变电路所需的触发信号则由 DSP 提供, 输出占空比可调的 PWM 信号通过调整的宽度控制功率管的开关时间, 实现对无刷电机的控制。其数学模型的建立条件为电动机的气隙磁场沿气隙方波分布、绕组通电时磁通忽略不计、功率管压降为恒值、各相绕组对称。伺服系统采用内环为电流环, 外为速度环, 最外为位置环的三环串级控制结构。运行结果表明, 采用这种控制方案可使系统取得良好的控制效果。

关键词: 伺服系统; DSP; TMS320F240; 全数字化; 无刷直流电机

中图分类号: TM921.541 **文献标识码:** A

The Full-Digital Design of BLDC Motor Servo System

WU Dong-su, MA Jia, YIN Quan, WAN Shu-yun

(Dept. of Control Science & Engineering, Huanzhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The servo system for full-digital BLDC motor consists of DSP, memory subsystem based on TMS320F240 and the module for feedback signal acquisition. After three-phase AC supply input was rectified, became DC power supply and then it was sent to counter-circuit. The striking signal that counter-circuit need was provided by DSP, and then adjustable PWM signal was outputted, the on/off time of power tube was controlled with adjusting the width of PWM signal, so, the control for BLDC motor was realized. The condition of establishing math model is that gas-gap magnetic field of motor distributed along gas-gap square-wave, the magnetic flux was ignored when current passed winding, the voltage of power tube was dropped to constant value, the winding of each phase was symmetrical. 3-ring serial control structure with current ring, speed ring and position ring was adopted in the servo system. The experiment result shows that excellent control effect of the servo system was obtained with the control scheme.

Key Words: Servo system; DPS; TMS320F240; Full-digital design; BLDC motor

1 引言

由于永磁无刷电机既具有交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等优点, 又具有直流电机的运行效率高、无励磁损耗以及调速性能好等特点, 故在国民经济各个领域, 如航空航天, 电动汽车、数控机床、精密电子产品等中得到广泛的应用。近来高性能 DSP 的出现则为系统全数字化的实现提供了可能, 为此, 介绍一种基于美国 TI 公司 TMS320X240 芯片构成的控制系统, 并重点论述了调节器的工程设计, 实验结果证明系统具有良好的动、稳态性能, 并已在实际中得到了应用。

2 永磁无刷系统控制方案

系统总体硬件框图如图 1 所示。整个系统控制单元可分为两大部分: 图 1 虚线框内功能由 DSPTMS320F240 组成的小系统实现, 它包括 DSP 和片外存储器。另一部分为反馈信号采集部分。电流反馈由霍尔元件测得, 通过 F240 的 A/D 模块转化为数字量。速度、位置反馈信号由脉冲编码器提供, 转子位置信号用以产生正确的电子换向, 位置、速度给定由上位机发出。功率部分由不控二极管构成整流电路, 三菱公司生产的 25A、1200V 智能功率模块 (IPM) 组成逆变电路。系统原理如下: 三相交流输入经整流、稳压后为逆变电路提供直流电源, 逆变电路所需的触发信号则由 DSP 提供, 控制系统的目的就是要输出占空比可调的 PWM 信号, 通过调整

收稿日期: 2001-11-09; 修回日期: 2002-03-27

作者简介: 吴东苏 (1978-), 男, 江苏人, 工学硕士, 华中科技大学助教, 从事电力电子与运动控制理论及其应用研究。

PWM 信号的宽度控制功率管的开关时间，从而实现对无刷电机的控制。

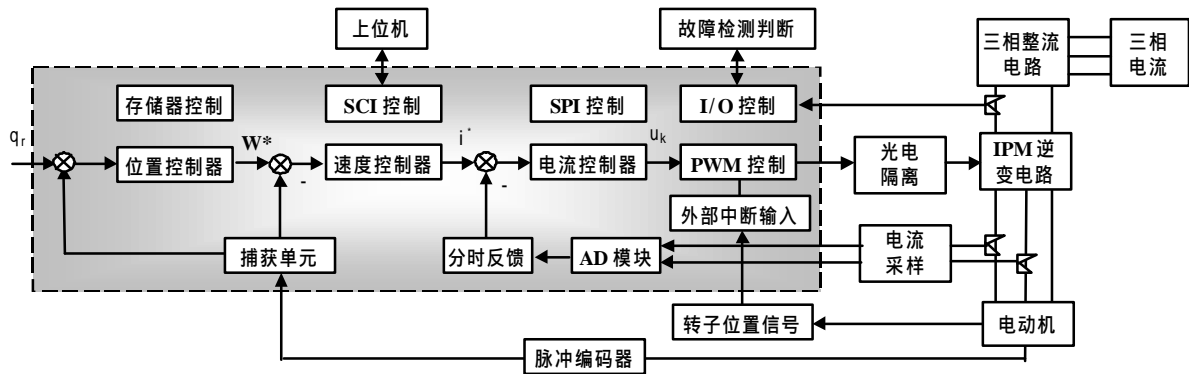


图 1 系统总体硬件框图

3 系统分析与设计

3.1 永磁无刷电机的数学模型

永磁无刷电机数学模型建立在如下的假设条件下：电动机的气隙磁场感应强度沿气隙按方波分布；绕组通电时，该电流所产生的磁通对气隙磁通的影响忽略不计；控制电路在开关状态下工作，功率管压降为恒值；各相绕组对称，其对应的电路单元完全一致。

无刷电机三相绕组的电压平衡方程

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \\ \dot{u}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

式中： u_a 、 u_b 、 u_c - 定子相绕组电压

i_a 、 i_b 、 i_c - 定子相绕组电流

e_a 、 e_b 、 e_c - 定子相绕组电动势

r - 每相绕组电阻

L - 每相绕组的自感

M - 每两相绕组间的互感

p - 微分算子 $p = d/dt$

电磁转矩为：

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega$$

主回路简图如图 2。

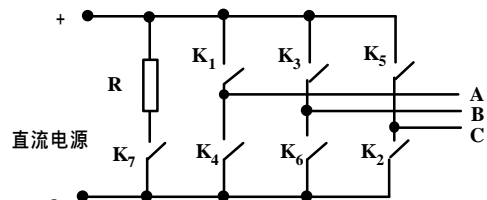


图 2 主回路简图

3.3 控制器的设计

永磁无刷电机加上传感器和控制器组成具有伺服功能的闭环驱动系统，构成了永磁无刷电机伺服系统。本伺服系统采用三环串级控制结构，内环为电流环，其外为速度环，最外为位置环。系统的基本框图如图 3。

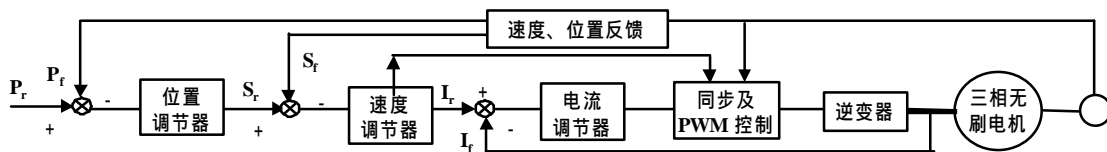


图 3 控制系统基本框图

本系统采用两两通控制方式，即任一时刻只有两个功率管导通，导通次序由三个转子磁极位置传感器信号 U 、 V 、 W 与速度调节器的输出共同决定。表 1 给出了速度调节器输出为正（即正转）时的位置传感器信号同导通功率管之间的对应关系。功率管标号参见图 2

着眼于 F240 在永磁无刷直流电动机上控制系统结构简单及合适的控制精度，本伺服系统速度、电流环按典型系统设计，采用 PI 调节器作

表 1 正转换相表

U	V	W	导通的开关管
1	0	1	K_1 、 K_6
1	0	0	K_1 、 K_2
1	1	0	K_2 、 K_3
0	1	0	K_3 、 K_4
0	1	1	K_4 、 K_5
0	0	1	K_5 、 K_6

为系统的调节器。电流调节器的比例系数 K_{p_i} ，

积分系数 Ki_i 如式(1)所示 :

$$\begin{aligned} Kp_i &= (h+1)R_s T_L / 2hK_s B T_i, \\ Ki_i &= Kp_i / h \end{aligned} \quad (1)$$

其中 : K_s - 放大系数

B - 电流反馈系数

T_i - 电流环时间常数

h - 中频宽, 工程上一般取为 5

速度调节器的比例系数 Kp_n 、积分系数 Ki_n 如式(2)所示 :

$$\begin{aligned} Kp_n &= (h+1)BC_e T_M / 2h R_s T_n, \\ Ki_n &= Kp_n / h \end{aligned} \quad (2)$$

其中 : - 转速反馈系数

T_n - 速度环时间常数

C_e - 电势常量

设计位置调节器时, 可将内环简化处理, 即速度环可简化为一阶环节。

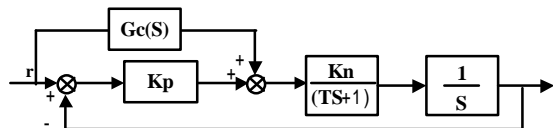


图 4 位置调节器框图

设前馈通道的传递函数为 $Gc(S)$, 由图 4 知, 要使 实现对输入信号 r 的完全复现, 只需令 $Gc(S)$ 为其后各环节传递函数乘积的倒数, 即

$$Gc(S) = (TS+1)S / Kn = TS^2 / Kn + S / Kn$$

鉴于工程上实现困难, 可将其简化为

$$Gc(S) = S / Kn,$$

则可实现对阶跃、斜坡信号的无差跟踪。由于速度是位置的导数, 故在工程上对前馈通道的处理可用前馈系数与速度的乘积来代替, 位置环比例系数的计算公式如下 :

$$KpKn = 1 / 2T$$

$$Kp = 1 / 2TKn$$

式中 : Kp —位置环比例系数

4 系统运行结果

本系统电流环的采样周期为 $125 \mu s$, 速度环为 $1.0ms$, 速度环的输出限幅值为额定电流的 3 倍, 电流环的输出限幅为额定电压的 1.2 倍, 系统的 PWM 频率为 $10k$. 电机为 $500W$ 、 1500 rpm 、4 极交流永磁方波电机。运行结果如下 :

速度响应曲线

图 5 为给定 100 转/分 的速度响应曲线。上升时间 : $8ms$, 超调量 : 19% , 稳定时间 : $45ms$ 。
图 6 为给定 1200 转/分 的速度响应曲线。

上升时间 : $55ms$, 超调量 : 5% , 稳定时间 : $84ms$ 。

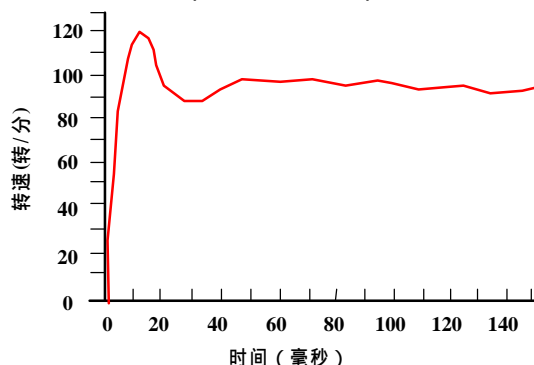


图 5 100 转/分 时的速度响应曲线

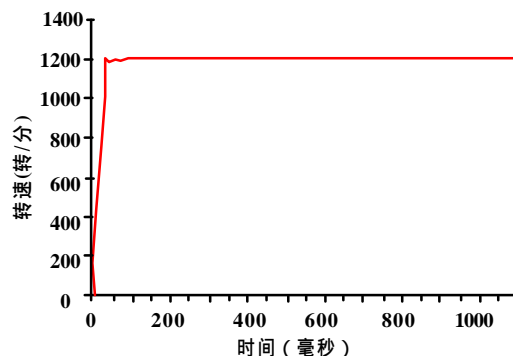


图 6 1200 转/分 时的速度响应曲线

位置脉冲

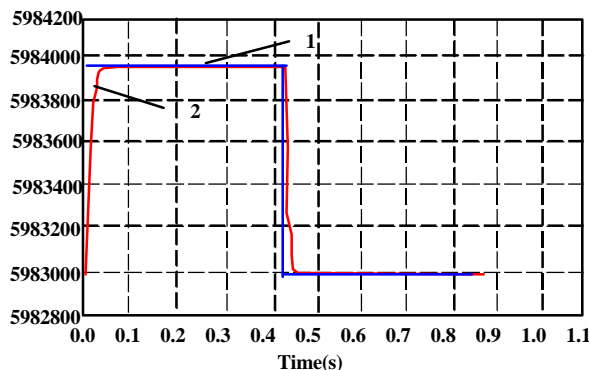


图 7 位置响应曲线

位置响应曲线

系统给定脉冲个数为 1000 个 (4 倍频后, 下同)。图 7 中曲线 1 为位置给定, 曲线 2 为位置反馈。从图中可以看出系统阶跃输入下, 上升时间为 $30ms$, 位置超调量为 0, 位置稳态误差为 0。

参考文献 :

- [1] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] 王离九. 电力拖动控制系统[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1990.
- [3] C S Berendsen, G Champenois, J Pavoine. Commutations Strategies for Brushless DC Motor Influence on the Instant Torque [J]. IEEE, 1990.