

文章编号:1671-7147(2004)02-0115-06

基于 Matlab 永磁同步电机控制系统的仿真建模

李三东, 薛花, 纪志成

(江南大学 通信与控制工程学院, 江苏 无锡 214036)

摘要: 在分析永磁同步电机(PMSM)数学模型的基础上,提出了 PMSM 控制系统仿真建模的新方法.在 Matlab/ Simulink 中,建立独立的功能模块: PMSM 本体模块、矢量控制模块、电流滞环控制模块、速度控制模块等,同时进行功能模块的有机整合,搭建 PMSM 控制系统的仿真模型.系统采用双闭环控制:速度环采用 PI 控制,电流环采用滞环电流控制.仿真结果证明了该方法的有效性,同时该模型也适用于验证其他控制算法的合理性,为实际电机控制系统的设计和调试提供了新的思路.

关键词: 永磁同步电机;仿真建模;Matlab;矢量控制

中图分类号:TM 341

文献标识码:A

Modeling and Simulation of PMSM Control System Based on Matlab

LI San-dong, XUE Hua, JI Zhi-cheng

(School of Communication and Control Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China)

Abstract: Based on the mathematical model of the permanent-magnet synchronous motor (PMSM), a novel method for modeling and simulation of PMSM system in Matlab had been proposed. In Matlab/ Simulink, the independent functional blocks and such as PMSM block, vector controller block, hysteresis current controller block and speed controller, ect., had been modeled. By the organic combination of these blocks, the model of PMSM could be easily established. In the double loop of control system, a PI controller was adopted in the speed loop and a hysteresis current controller was adopted in the current loop. The reasonability and validity had been testified by the simulation results. The novel method offers a new platform for designing and debugging actual motors.

Key words: permanent-magnet synchronous motor (PMSM); modeling and simulation; Matlab; vector control

随着电力电子技术、微电子技术、新型电机控制理论和稀土永磁材料的快速发展,永磁同步电机(PMSM)得以迅速推广应用. PMSM 以其体积小、性能好、结构简单、可靠性高、输出转矩大等特点,得到了越来越广泛的应用和重视^[1~3].随着 PMSM 应

用领域的不断拓宽,对电机控制系统的设计要求也越来越高,既要考虑成本低廉、控制算法合理,又需兼顾控制性能好、开发周期短等特点.因此,如何建立有效的 PMSM 控制系统的仿真模型成为电机控制算法设计人员迫切需要解决的关键问题^[4~6].

收稿日期:2003-10-09; 修订日期:2003-11-06.

基金项目:教育部重点科技项目(03085)资助课题.

作者简介:李三东(1979-),男,安徽无为,控制理论与控制工程专业硕士研究生.

纪志成(1959-),男,浙江杭州人,工学博士,教授,硕士生导师.主要从事电力电子与电气传动的研究.

在 Matlab 中进行 PMSM 建模仿真方法的研究已受到广泛关注. 如采用节点电流法对电机控制系统进行分析, 通过列写 m 文件, 建立 PMSM 仿真模型^[7~9]. 这实质上是一种整体分析方法, 故在此模型基础上修改控制算法或添加、删除闭环就显得极不方便. 为了克服这一不足, 作者提出了一种新型的 PMSM 建模方法, 将控制单元模块化, 在 Matlab/Simulink 建立独立的功能模块: PMSM 本体模块、矢量控制模块、电流滞环控制模块、速度控制模块、转矩计算模块等, 对这些功能模块进行有机整合, 即可搭建出永磁同步电机系统的仿真模型. 这一方法简单快捷, 在原有的建模基础上添加、删除闭环或改变控制策略都十分简便, 仿真结果证明了该建模方法的快速性和有效性.

1 PMSM 的数学模型

以二相导通星形三相六状态为例, 分析 PMSM 的数学模型及转矩特性^[2]. 为便于分析, 假设:

- 1) 相绕组完全对称, 气隙磁场为方波, 定子电流、转子磁场分布皆对称;
- 2) 忽略齿槽、换相过程和电枢反应等的影响;
- 3) 电枢绕组在定子内表面均匀连续分布;
- 4) 磁路不饱和, 不计涡流和磁滞损耗.

则三相绕组的电压平衡方程可表示为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $u_a、u_b、u_c$ 为定子相绕组电压 (V); $i_a、i_b、i_c$ 为定子相绕组电流 (A); $e_a、e_b、e_c$ 为定子相绕组电动势 (V); L 为每相绕组的自感 (H); M 为每两相绕组间的互感 (H); p 为微分算子 $p = d/dt$.

三相绕组为星形连接, 且没有中线, 则有

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2)$$

且

$$Mi_b + Mi_c = -Mi_a \quad (3)$$

将式 (2) 和式 (3) 代入式 (1), 得到电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

定子绕组产生的电磁转矩表达式为

$$T_e = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (5)$$

式中 ω 为电机机械角速度.

运动方程为

$$T_e - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} = J n_p \omega \quad (6)$$

式中: T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; B 为阻尼系数; J 为电机的转动惯量; n_p 为极对数.

2 基于 Matlab 的 PMSM 系统模型的建立

在 Matlab6.5 的 Simulink 环境下, 利用 SimPower System Toolbox2.3 丰富的模块库, 在分析 PMSM 数学模型的基础上, 提出了建立 PMSM 控制系统仿真模型的方法, 系统设计框图见图 1.

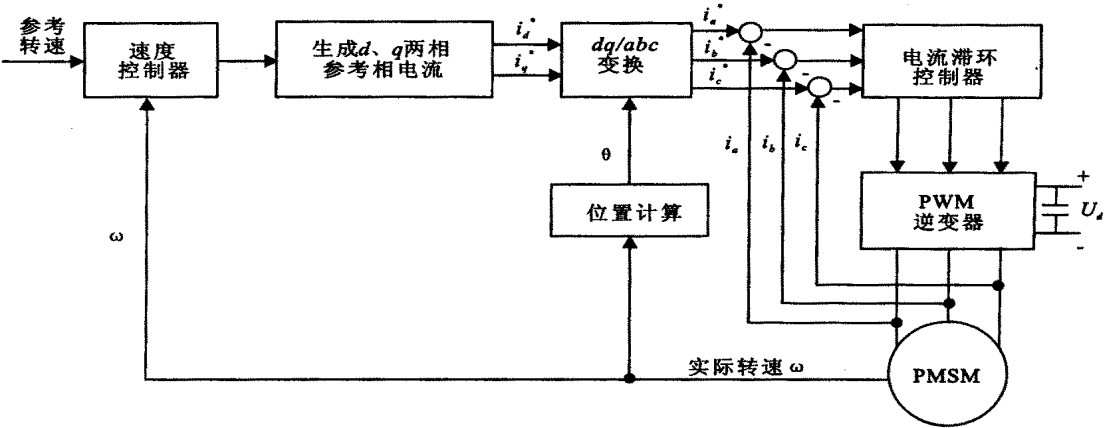


图 1 PMSM 控制系统仿真建模组成框图
Fig.1 Block diagram of PMSM system composing

PMSM 建模仿真系统采用双闭环控制方案:转速环由 PI 调节器构成,电流环由电流滞环调节器构成.根据模块化建模的思想,将图 1 中的控制系统分割为各个功能独立的子模块,图 2 即为 PMSM 建模的整体控制框图.其中主要包括:PMSM 本体模块、矢量控制模块、坐标变换模块、电流滞环控制模块、速度控制模块、转矩计算模块和电压逆变模块.通过这些功能模块的有机整合,就可在 Matlab/

Simulink 中搭建出 PMSM 控制系统的仿真模型,并实现双闭环的控制算法.

2.1 PMSM 本体模块

在整个控制系统的仿真模型中,PMSM 本体模块是最重要的部分,反映的是 PMSM 电机的本质属性.该模块的作用是根据矢量控制模块输出的 dq 两相相电压 U_d 、 U_q 求取 PMSM 的相电流 i_d 、 i_q ,PMSM 本体模块结构如图 3 所示.

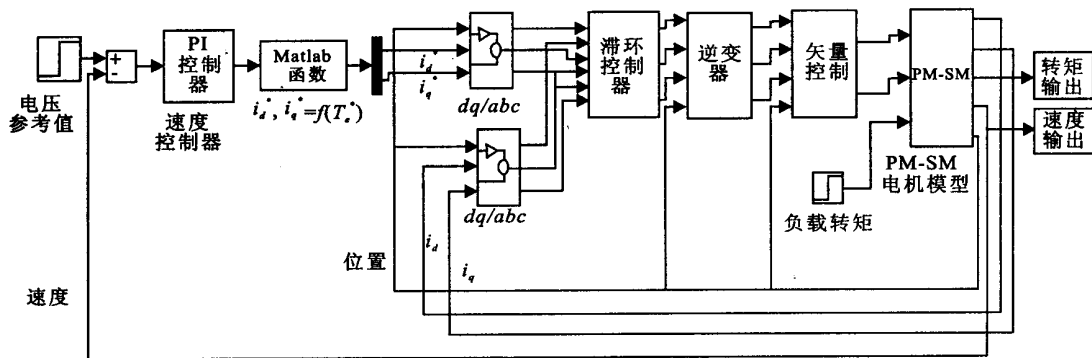


图 2 Matlab/ Simulink 中 PMSM 仿真建模整体控制框图

Fig.2 Block diagram for modeling and simulation of PMSM in Matlab/ Simulink

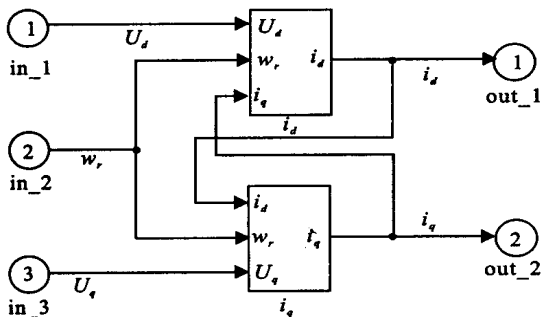


图 3 PMSM 本体模块结构框图

Fig.3 Block diagram of PMSM block architecture

对永磁同步电机(PMSM)数学模型的电压方程式(4)进行 abc/dq 坐标变换,可得 dq 坐标系下的电压方程式

$$\begin{cases} U_d = r i_q + p \Psi_q + \omega \Psi_d \\ U_q = r i_d + p \Psi_d - \omega \Psi_q \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\Psi_q = L_q i_q; \quad \Psi_d = L_d i_d + \Psi_{af}$$

式中: Ψ_d 、 Ψ_q 为 d 、 q 相定子磁链; Ψ_{af} 为转子磁场对定子的交链; L_d 、 L_q 为 d 、 q 相绕组电感. i_d 子模块的底层结构如图 4 所示.其中 i_d 、 i_q 子模块的功能是实现式(7), i_q 子模块的结构与 i_d 子模块相似.

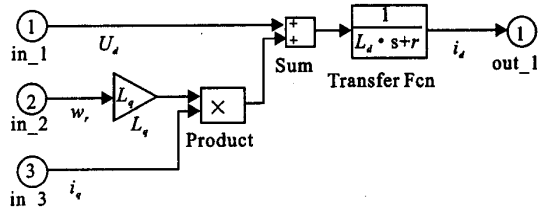


图 4 i_d 子模块结构框图

Fig.4 Block diagram of i_d subsystem block architecture

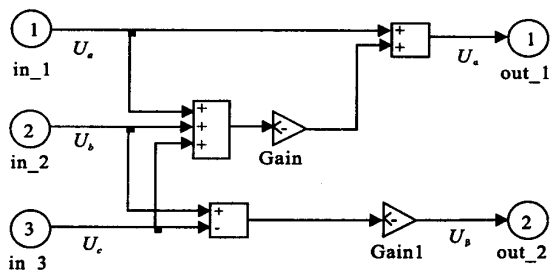
2.2 矢量控制模块

PMSM 的特点是转子激磁磁场为正弦波,电枢绕组中感应的反电动势为正弦波,逆变器提供给电机的三相相电流也为正弦波^[10],因此,可采用矢量控制方法,使非线性、强耦合、多变量的 PMSM 电机系统降阶、解耦,使之具有更优的动态品质.矢量控制的基本思想是:把三相静止坐标系下的定子交流电流 i_a 、 i_b 、 i_c ,通过三相/两相变换,等效成两相静止坐标系下的交流电流 i_α 、 i_β ,再经转子磁场定向的旋转变换,等效成两相旋转坐标系下的电流 i_d 、 i_q . i_d 相当于直流机的励磁电流, i_q 相当于直流机的电枢电流.

矢量控制模块实现的就是 PMSM 的矢量控制算法,将电流转换为电压,由两个子模块构成: abc/φ 模块和 φ/dq 模块. abc/φ 子模块实现的是 abc 三

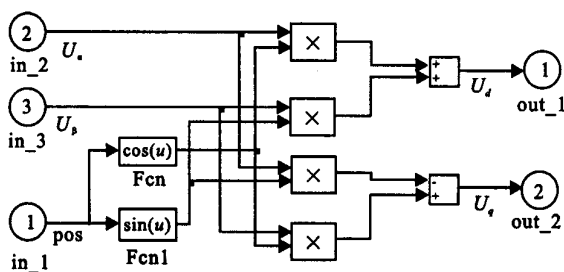
相向 $\alpha\beta$ 两相的变换,底层结构如图5所示,输入为 abc 三相电压 U_a 、 U_b 、 U_c (可由电压逆变模块给出的三相端电压信号计算得到),输出即为 $\alpha\beta$ 坐标系下的两相参考相电压 U_α 和 U_β ,这一功能由 $abc/\alpha\beta$ 电压变换式(8)实现

$$\begin{cases} U_\alpha = \frac{2}{3} [U_a - \frac{1}{2} (U_b + U_c)] \\ U_\beta = (U_b + U_c) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (8)$$

图5 $abc/\alpha\beta$ 的结构框图Fig. 5 Block diagram of $abc/\alpha\beta$ block architecture

$\alpha\beta/dq$ 子模块的作用是实现的是 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系向 dq 两相旋转坐标系的变换,底层结构如图6所示,输入为位置信号 θ 和 $abc/\alpha\beta$ 模块给出的 $\alpha\beta$ 两相相电压 U_α 和 U_β ,输出为 dq 坐标系下的两相相电压 U_d 和 U_q ,这一功能由 $\alpha\beta/dq$ 电压变换式(9)实现

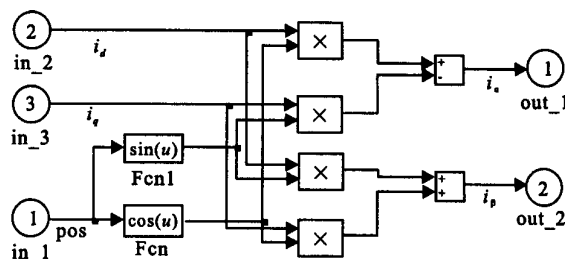
$$\begin{cases} U_q = U_\alpha \cos \theta + U_\beta \sin \theta \\ U_d = - U_\alpha \sin \theta + U_\beta \cos \theta \end{cases} \quad (9)$$

图6 $\alpha\beta/dq$ 的结构框图Fig. 6 Block diagram of $\alpha\beta/dq$ block architecture

2.3 坐标变换模块

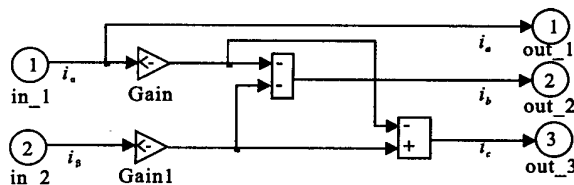
坐标变换模块实现的是 dq 旋转坐标系下的两相相电流 i_d 、 i_q 向 abc 静止坐标系的三相相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 的等效变换.与矢量控制模块类似,由两个子模块构成: $dq/\alpha\beta$ 模块和 $\alpha\beta/abc$ 模块. $dq/\alpha\beta$ 模块实现的是 dq 两相向 $\alpha\beta$ 两相的变换,模块的底层结构如图7所示,功能由 $dq/\alpha\beta$ 电流变换方程式(10)实现

$$\begin{cases} i_\alpha = i_d \cos \theta + i_q \sin \theta \\ i_\beta = i_d \sin \theta + i_q \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

图7 $dq/\alpha\beta$ 的结构框图Fig. 7 Block diagram of $dq/\alpha\beta$ block architecture

$dq/\alpha\beta$ 模块的作用是实现的是 $\alpha\beta$ 两相向 abc 三相的变换,模块的底层结构如图7所示,功能由 $\alpha\beta/abc$ 电流变换方程式(11)实现:

$$\begin{cases} i_a = i_\alpha \\ i_b = -\frac{1}{2} (i_\alpha - \sqrt{3} i_\beta) \\ i_c = -\frac{1}{2} (i_\alpha + \sqrt{3} i_\beta) \end{cases} \quad (11)$$

图8 $\alpha\beta/abc$ 的结构框图Fig. 8 Block diagram of $\alpha\beta/abc$ block architecture

2.4 电流滞环控制模块

电流滞环控制模块实现的是PMSM的滞环电流控制方法,输入为三相参考电流 i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 和三相实际电流 i_a 、 i_b 、 i_c ,输出为逆变器控制信号,模块结构如图9所示.当实际电流低于参考电流且偏差大于滞环比较器的环宽时,对应相正向导通,负向关断;当实际电流超过参考电流且偏差大于滞环比较器的环宽时,对应相正向关断,负向导通.选择适当的滞环环宽,即可使实际电流不断跟踪参考电流的波形,实现电流闭环控制.

2.5 速度控制模块

速度控制模块的结构较为简单,如图10所示,单输入:参考转速和实际转速的差值;单输出:三相参考相电流的幅值 I_s .其中, K_p 为PI控制器中P(比例)的参数, K_i/T_i 为PI控制器中I(积分)的参数,Saturation饱和限幅模块将输出的三相参考相电流的幅值限定在要求范围内.

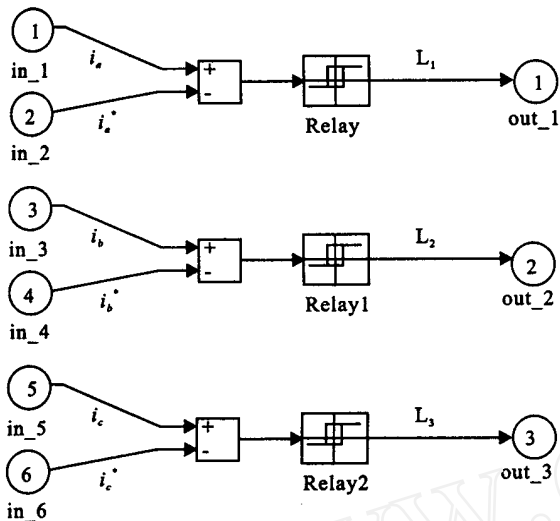


图9 电流滞环控制模块结构框图

Fig. 9 Block diagram of hysteresis current controller block architecture

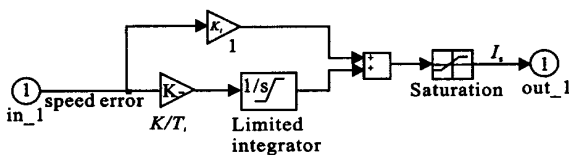


图10 速度控制模块结构框图

Fig. 10 Block diagram of speed controller block architecture

2.6 转矩计算模块

PMSM 数学模型中的电磁转矩式(5)进行 abc/dq 变换,可得电磁转矩

$$T_e = 3 n_p [(\Psi_{af} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)] / 2 \quad (12)$$

根据式(12)可建立如图11所示的转矩计算模块,模块输入为两相相电流 i_d 、 i_q ,通过加乘模块即可求得电磁转矩信号 T_e ,图11中的 F_{af} 指代 Ψ_{af} 。同时根据式(6),由电磁转矩、负载转矩以及摩擦转矩,通过加乘、积分环节,即可得到转速信号,求得的转速信号经过积分就可得到电机位置信号,可用于矢量控制模块、坐标变换模块中相电压或相电流的计算,以及电压逆变模块中电机运行状态的确定。

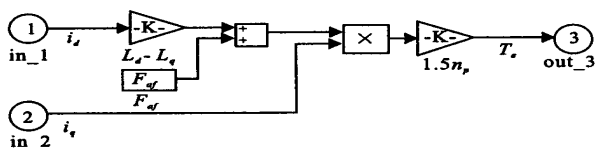


图11 转矩计算模块结构框图

Fig. 11 Block diagram of torque calculator block architecture

2.7 电压逆变模块

电压逆变模块实现的是逆变器功能,输入为位

置信号和电流滞环控制模块给出的逆变控制信号,输出为三相端电压。该模块可采用 Matlab6.5 中 SimPowerSystem Toolbox2.3 提供的通用逆变模块搭建,只需3对 IGBT 功率开关器件,反向并联续流二极管,根据电流滞环控制模块给出的控制信号,控制6个开关器件顺序导通和关断,从而产生三相端电压输出。

3 仿真结果

作者基于 Matlab/ Simulink 建立了 PMSM 控制系统的仿真模型,并对该模型进行了 PMSM 双闭环控制系统的仿真实验。PMSM 电机参数设置为:电机功率 $P = 1.2 \text{ kW}$,直流电压 $U = 220 \text{ V}$,定子相绕组电阻 $R = 4.2 \Omega$,定子 d 相绕组电感 $L_d = 0.026 \text{ H}$, q 相绕组电感 $L_q = 0.065 \text{ H}$,转动惯量 $J = 0.0018 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,额定转速 $n_e = 1800 \text{ r/min}$,极对数 $n_p = 2$ 。

为了验证所设计的 PMSM 控制系统仿真模型的静、动态性能,系统空载启动,待进入稳态后,在 $t = 0.4 \text{ s}$ 时突加负载 $T_L = 1 \text{ Nm}$,可得到系统转速、转矩、 a 相电流和 a 相反电动势仿真曲线如图12~图15所示。

由仿真波形可以看出:在 $n_e = 1800 \text{ r/min}$ 的参考转速下,系统响应快速且平稳,相电流和反电动势波形较为理想;启动阶段系统保持转矩恒定,因而没有造成较大的转矩和相电流冲击,参考电流的限幅作用十分有效;空载稳速运行时,忽略系统的摩擦转矩,因而此时的电磁转矩均值为零;在 $t = 0.4 \text{ s}$ 时突加负载,转速发生突降,但又能迅速恢复到平衡状态,稳态运行时无静差。仿真波形图13中,突加负载后,电磁转矩略有增大,这主要是由电流换向和电流滞环控制器的频繁切换造成的。仿真结果证明了本文所提出的这种新型 PMSM 仿真建模方法的有效性。

4 结论

在分析 PMSM 数学模型的基础上,提出了一种 PMSM 控制系统仿真建模的新方法,将该方法应用于 Matlab/ Simulink 环境下 PMSM 模型的设计,采用矢量控制与经典的速度、电流双闭环控制方法对该建模方法进行了测试,仿真实验结果表明:波形符合理论分析,系统能平稳运行,具有较好的静、动态特性。采用该 PMSM 仿真模型,可以便捷地实现、验证控制算法,只需对部分功能模块进行替换或修改,就可实现控制策略的改换或改

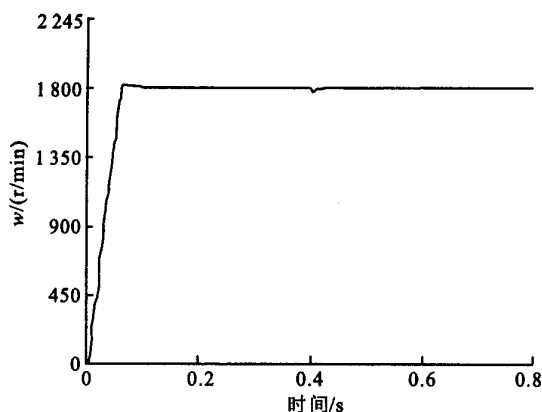


图 12 转速响应曲线

Fig.12 Speed response waveform

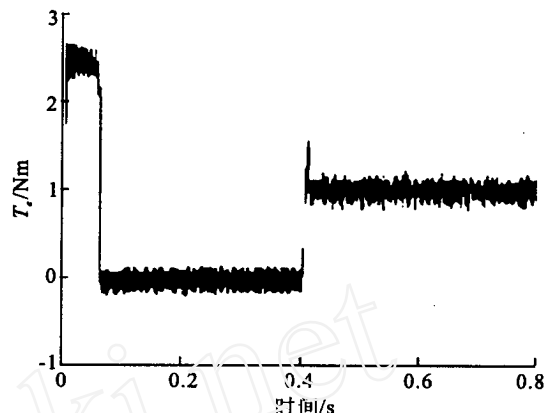


图 13 转矩响应曲线

Fig.13 Torque response waveform

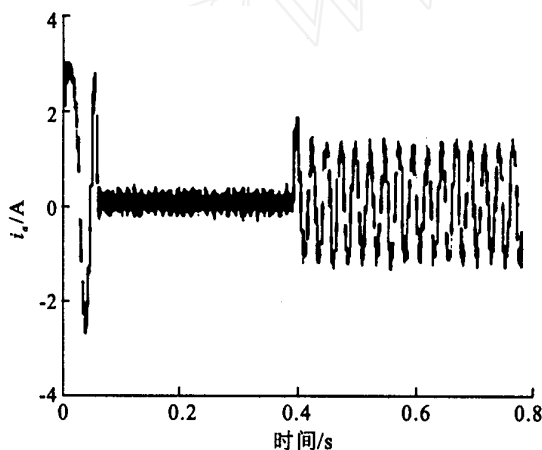


图 14 a 相电流波形

Fig.14 Current waveform of a phase

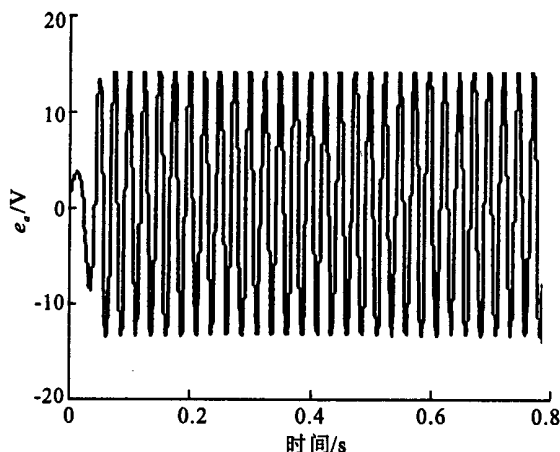


图 15 a 相反电动势波形

Fig.15 Emf waveform of a phase

进,不仅可以节省控制方案的设计周期,快速验证所设计的控制算法,更可以充分利用计算机仿真的优越性,通过修改系统参变量或人为加入不同扰动因素来考察不同实验条件下电机系统的动、静态性

能,或者模拟相同的实验条件,比较不同控制策略的优劣,为分析和设计交流异步电机控制系统提供了有效地手段和工具,也为实际电机控制系统的设计和调试提供了新的思路。

参考文献:

- [1] MILLER T J E. Brushless Permanent-Magnet, Reluctance Motor Drives[M]. Oxford New York: Clarendon Press, 1989.
- [2] PILLAY P KRISHNAN R. Modeling, simulation and analysis of permanent magnet motor drives, Part I: The permanent-magnet synchronous motor drive [J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 1989, 25(2): 265 - 273.
- [3] PILLAY P KRISHNAN R. Modeling, simulation, and analysis of permanent magnet motor drives, Part II: The brushless DC motor drive [J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 1989, 25(2): 274 - 279.
- [4] PRAGASAN PILLAY KRISHNAN R. Modeling of permanent magnet motor drives[J]. *IEEE Trans on Industry Electronics*, 1988, 35(4): 537 - 541.
- [5] IRFAN GUNEY, YUKSET OGUZ, FUSUN SERTELLER. Dynamic behavior model of permanent magnet synchronous motor fed by PWM inverter and fuzzy logic controller for stator phase current, flux and torque control of PMSM[J]. *IEEE Proceeding from Electric Machines and Drives Conference*, 2001, 12 - 17: 479 - 485.

(下转第 126 页)

要的贡献,但以此必要条件作为蕴涵成立的充分条件来使用却是不适当.

与 Lewis 提出的严格蕴涵概念相比,上述关于实质蕴涵意义及其问题的解释是直观和明确的,并具有更为普遍的意义. Lewis 试图通过增加模态词必然与可能来改进实质蕴涵关于蕴涵意义的解释,但文中的分析却表明他的严格蕴涵概念与亚里士多

德基于命题间内容联系的推断是有本质区别的.在此基础上,文中提出了一种新的意义蕴涵概念.根据这一概念,亚里士多德基于命题间内容联系的推断可以得到合理解释,而另一方面,那些困扰实质蕴涵概念的蕴涵怪论在这里却不会出现.鉴于蕴涵是逻辑学里一个十分重要的概念,因此,该工作对逻辑理论研究具有十分重要的意义.

参考文献:

- [1] BRADSHAW M. An introduction to software agents [A]. In: Bradshaw M ed, Software Agents [C], Menlo Park, CA: AAAI Press, 1997.
- [2] SINGH M P. Multiagent System: a Theoretical Framework for Intention [M]. Know-How, and Communication. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- [3] WOOLDRIDGE M J, JENNINGS N R. Intelligent Agents: Theory and practice [J]. Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 115 - 152.
- [4] 刘大有, 杨鲲, 陈建中. Agent 研究现状与发展趋势[J]. 软件学报, 2000, 11(3): 315 - 321.
- [5] 郑文辉, 梁庆寅, 吴志雄, 等. 逻辑导论[M]. 广州: 中山大学出版社, 1996.
- [6] 陆汝钤. 人工智能[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [7] 阿·谢·阿赫曼诺夫. 亚里士多德逻辑学说[M]. 马兵译. 上海: 上海译文出版社, 1980.
- [8] 格雷林. 哲学逻辑引论[M]. 牟博译. 北京: 中国社会科学出版社, 1990.

(责任编辑:戴陵江,邢宝妹)

(上接第 120 页)

- [6] BOLOPION A, JOUVE D, PACAUT R. Control of permanent magnets synchronous machines a simulation comparative survey [J]. IEEE Proceeding from Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1990, (11 - 16): 374 - 383.
- [7] HOANGLE HUY. Modeling and simulation of electrical drives using Matlab simulink and power system blockset [J]. IEEE Proceeding from Industrial Electronics Society, 2001, 3(2): 1603 - 1611.
- [8] LUK P C, KLEE C K, KWOK N M. Development of a low cost software package for the design of a brushless DC motor controller [J]. Proceeding from Electrotechnical Conference, 1994, (12 - 14): 1306 - 1309.
- [9] LUK P C, KLEE C K, KWOK N M. Efficient modelling for a brushless DC motor drive [J]. Proceeding from Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1994, 1(5 - 9): 188 - 191.
- [10] JEON Y S, MOK H S, CHOE ET AL G H. A new simulation model of PMSM motor with real back EMF waveform [J]. Proceeding from Computers in Power Electronics, 2000, (16 - 18): 217 - 220.

(责任编辑:邢宝妹)