

同步电动机位置模态 L^∞ 预测控制的研究*

葛宝明 蒋静坪 孙鹤旭
(浙江大学电机系·杭州, 310027) (河北工业大学电气工程与自动化系·天津, 300130)

摘要: 研究将同步电动机位置控制问题转化为一个带约束的基于模型的 L^∞ 预测控制问题, 解决同步电动机步进运动的动态跟踪特性. 仿真与实验结果证明了其可行性和控制特性的优良.

关键词: 同步电动机; 步进控制; L^∞ 预测控制

Study of L^∞ Predictive Control for Synchronous Motor with Position Mode

Ge Baoming and Jiang Jingping

(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University·Hangzhou, 310027, P. R. China)

Sun Hexu

(Department of Electrical Engineering and Automation, Hebei University of Technology·Tianjin, 300130, P. R. China)

Abstract: This paper solves the dynamic following characteristics of synchronous motor stepping drive by transforming synchronous motor position control into L^∞ predictive control with restrictions based on the model. The experiment and the simulation results show that the proposed strategy is effective and best.

Key words: synchronous motor; stepping control; L^∞ predictive control

1 引言(Introduction)

现代控制理论的应用推动了许多新型交流电机控制方法的诞生. 70 年代中期出现的预测控制算法^[1], 在经历了近 20 年的发展后, 已以其强大的生命力而为控制界所瞩目, 建立在模型预测、滚动优化、反馈校正这三条原理基础上的预测控制, 在工业过程中已有许多成功应用. 同步电动机是一个多变量、非线性、强耦合的控制对象, 存在着建模复杂的问题, 而预测控制三大机理之一的预测模型只强调功能而非结构, 这恰好能克服同步机建模复杂的困难. 本文提出的同步电动机预测控制, 是汲取步进控制思想^[2], 在预测控制概念下, 使同步电动机步进运动, 并依靠其特有的定位转矩将转轴准确地锁定在指定的空间位置上, 实现高精度位置控制. 另外, L^∞ 范数性能指标考虑最大偏差极小化, 因此, 按其设计的同步电动机预测控制系统不但具有强的鲁棒性与适应性, 而且动态响应快、动态偏差小.

2 同步电动机位置模态 L^∞ 预测控制的实现 (Implementation of L^∞ predictive control for synchronous motor with position mode)

同步电动机位置模态 L^∞ 预测控制是将位置最

优控制问题转化为带约束的基于模型的预测控制问题, 确定与之对应的转矩控制规律, 使同步机运动步进化, 从而实现快速、准确的位置控制^[3]. 将电机定子圆周 b_{HP} 等分, 得到 b_{HP} 个定位点, 定子磁势矢量每跨进一步, 转子跟随一步的过程中, 进行若干次预测, 如图 1 所示.

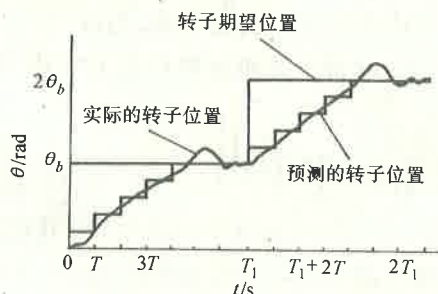


图 1 同步电动机转子位置的预测特性

Fig. 1 Predictive characteristic on rotor position of synchronous motor

图 1 中, 步进角 $\theta_b = \frac{2\pi}{b_H}$, $T_1 = mT$, m 为整数, T 为采样周期. 每次采样的同时, 应用预测控制理论确定此后定子磁势控制量在什么位置, 才能使转子在满足性能指标的情况下, 最快地到达指定位置. 每 T_1 秒内有 m 次预测, 控制量更新 m 次.

* 浙江省自然科学基金(595051)和辽宁省博士科研启动基金(941074)资助项目.
本文于 1997 年 2 月 3 日收到. 1998 年 1 月 7 日收到修改稿.

为有效实施上述控制策略,首先需要信息建模,该模型应能够全面反映同步机转子位置的动态特性.具体到同步机 L^∞ DMC 控制则应以定子磁势前进一步,转子相应跟随一步的动态响应作为其建立非参数模型的模型参数.

在同步电动机三相定子绕组中,输入三相电流

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos(\theta_b k), \\ i_b = I_m \cos\left(\theta_b k - \frac{2\pi}{3}\right), \\ i_c = I_m \cos\left(\theta_b k + \frac{2\pi}{3}\right). \end{cases} \quad (1)$$

其中 θ_b 为步进角, k 为主令脉冲拍数, $k = 1, 2, \dots$.

随着 k 的增加,定子磁势将一步一步前进,若定子与转子磁势的位置分别用 θ_s 和 θ_r 表示,则矩角 $\delta = \theta_s - \theta_r$,复位转矩 T_e 将力求迫使转子磁势跟随定子磁势,使 $\delta \rightarrow 0^\circ$.空载情况下,设定子与转子磁势的初始位置均为 0,令 $k = 1$,则定子磁势前进一步,且定位于 θ_b 处,复位转矩驱使转子由 0 位到 θ_b 的运动过程,即为转子位置的单位阶跃响应,它代表了同步电动机转子位置的动态特性.同步机步进运动中,定子磁势在空间的位置是离散的,但转子是不受约束的,它可以停在空间任何一点上,转子位置是连续函数.

在 $t = iT$ ($i = 1, \dots, N$) 时刻,对转子位置的单位阶跃响应采样,得一采样序列,用动态系数 $a_1, a_2, \dots, a_N$ 表示,集合 $\{a_i\}$ ($i = 1, \dots, N$) 描述了各采样时刻,同步机定子磁势和转子磁势位置关系的过程特性.定义转子前进 θ_b 为走一步,则以“步”为单位时,集合 $\{a_i\}$ 构成同步机位置模态 L^∞ DMC 的模型参数,其中

$$\hat{a}_1 = \frac{a_1}{\theta_b}, \dots, \hat{a}_N = \frac{a_N}{\theta_b}. \quad (2)$$

令 $\tilde{y}_0(k+i|k)$ 为 kT 时刻同步机转子位置的初始预测值,则当 kT 时刻有一控制增量 $\Delta u(k)$ 作用于同步机时,转子未来各时刻的输出值(单位:步)为

$$\begin{cases} \tilde{y}_1(k+i|k) = \\ \tilde{y}_0(k+i|k) + \hat{a}_i \Delta u(k), \\ i = 1, \dots, N. \end{cases} \quad (3)$$

式(3)即为同步机位置模态预测控制的非参数模型.

据此非参数模型, kT 时刻同步机在 M 个连续的控制增量 $\Delta u_M(k)$ 作用下,未来 P 个时刻

转子位置的输出预测值为

$$\tilde{y}_{PM}(k) = \tilde{y}_{P0}(k) + A \Delta u_M(k). \quad (4)$$

考虑 L^∞ 范数性能指标,当 $M = 1$ 时即可满足该系统性能要求,则

$$J = \min \|e - A \Delta u(k)\|_\infty. \quad (5)$$

式中 $A = [\hat{a}_1 \dots \hat{a}_P]^T$; $e = w_P(k) - \tilde{y}_{P0}(k)$ 为 $P \times 1$ 位置的预报误差向量; $w_P(k), \tilde{y}_{P0}(k)$ 为未来 P 个时刻转子位置的期望跟踪值和零输入预测值; P, M 分别为优化和控制时域; $\Delta u(k)$ 为 kT 时刻的控制增量.

将 L^∞ 预测控制化成有限个 L^2 预测控制问题^[4],则可得下列预测控制器:

$$\Delta u(k) = \Delta u_{LS}(k) + \Delta \bar{u}(k), \quad (6)$$

$$\Delta u_{LS}(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T e, \quad (7)$$

$$\Delta \bar{u}(k) = \text{sgn}(\gamma_k) \text{sgn}(a_k) \frac{|\gamma_k| - |\gamma_m|}{|a_k| + |a_m|}, \quad (8)$$

$$|\gamma_k| = \max_{1 \leq i \leq P} \{|\gamma_i| / \gamma_i = (e - A \Delta u_{LS}(k))_i\}, \quad (9)$$

$$|\gamma_m| = \max_{\substack{1 \leq i \leq P \\ j \neq k}} \{|\gamma_j| / \text{sgn}(\gamma_j) = -\text{sgn}(\gamma_k)\}. \quad (10)$$

其中

$$Q = \text{diag}[q_1, q_2, \dots, q_P],$$

$$R = \text{diag}[r_1, r_2, \dots, r_M].$$

当 kT 时刻把控制增量 $\Delta u(k)$ 加于同步机时,由非参数模型式(3)给出的转子位置预测值可能偏离实际值.为此,利用实时信息进行反馈校正.即

$$\tilde{y}_{\text{cor}}(k) = \tilde{y}_{N1}(k) + H e(k+1), \quad (11)$$

$$e(k+1) = \frac{\gamma(k+1)}{\theta_b} - \tilde{y}_1(k+1|k). \quad (12)$$

其中 $H = [1 \ h_2 \ \dots \ h_N]$,

$$\tilde{y}_{N1}(k) = [\tilde{y}_1(k+1|k) \ \dots \ \tilde{y}_1(k+N|k)]^T.$$

将 $\tilde{y}_{\text{cor}}(k)$ 移位,设置为下一时刻同步机转子位置的预测初值,即

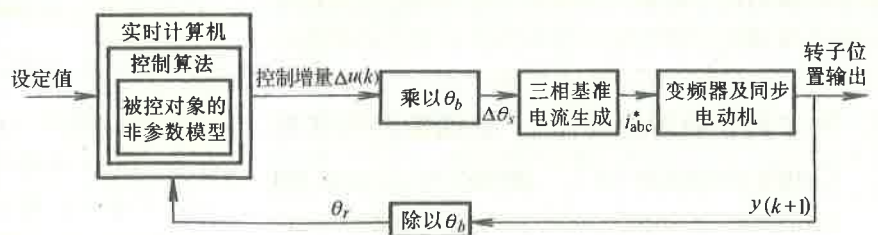


图2 同步电动机位置模态预测控制原理图

Fig. 2 Block diagram of predictive control for synchronous motor with position mode

$$\bar{y}_{N0}(k+1) = \bar{S} \bar{y}_{\text{cor}}(k), \quad (13)$$

其中

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ & \ddots & \ddots \\ & & 0 & 1 \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

图 2 给出了控制系统方框图。

3 仿真研究(Simulation and study)

针对图 2 所示控制系统,应用 SIMNON 程序对同步电动机步进运动的位置跟踪特性进行了仿真试验.同步电动机的有关参数见附录 A.仿真中,取 $N = 20, h_i = 0.9 (i = 2, \dots, N), M = 1, P = 16, T_L = 10N \cdot m$.图 3 给出了转子前进 2 步时,同步电动机

L^∞ DMC 控制系统的响应曲线.为比较,图 4 给出了采用 L^2 DMC 控制策略时系统的响应曲线,图 5 给出了采用矢量控制时系统的响应曲线.可见,由 L^∞ DMC 控制的系统动态响应快、动态偏差小,无超调,系统能较快且平稳地趋于稳态. L^2 DMC 控制的系统动态偏差大,响应慢.矢量控制的系统在相近的定子电流下,动态响应较慢.若想加快响应速度,则每前进一步的瞬时,定子电流与电磁转矩 T_e 都有较大冲击.本文对同步电动机 L^∞ DMC 控制系统进行了实验研究,得到了优良的动、静态特性.图 6 给出了同步机转子位置的示波器实测曲线.实验结果与仿真结果相吻合,证明了该理论的正确性.

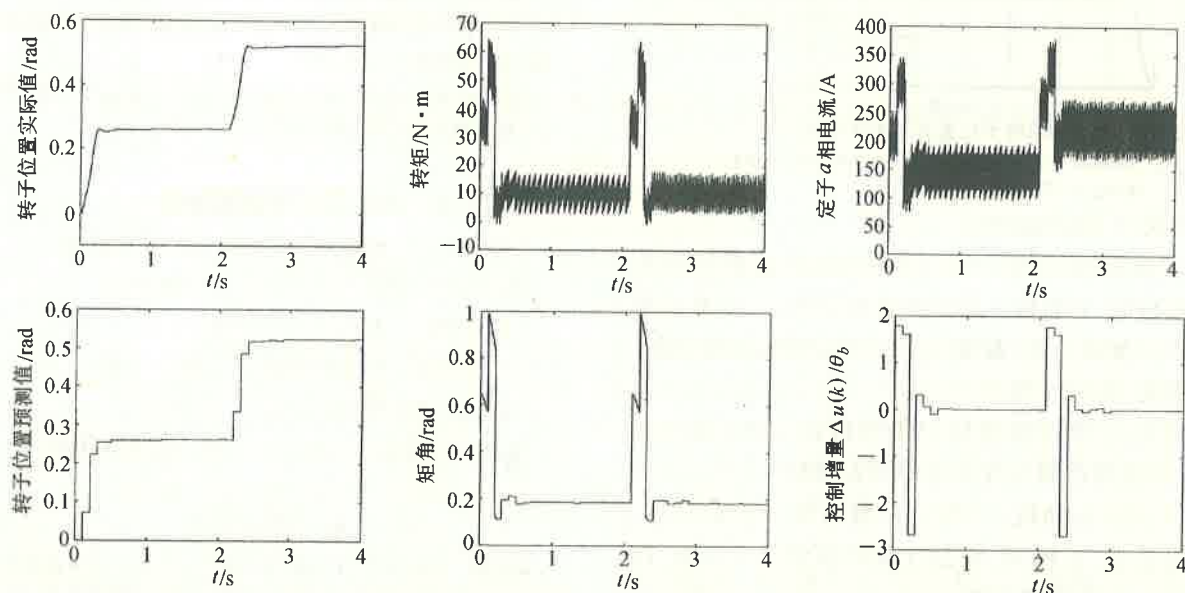


图 3 同步电动机位置模态 L^∞ DMC 控制系统的 SIMNON 仿真曲线

Fig. 3 Responses of L^∞ DMC control system for synchronous motor with position mode

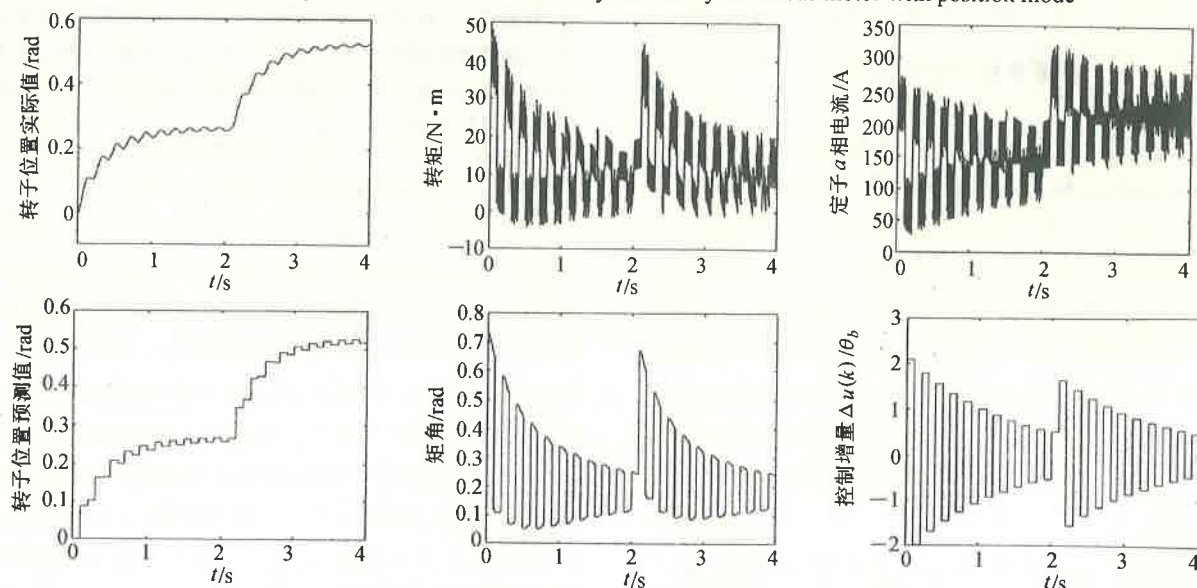


图 4 同步电动机位置模态 L^2 DMC 控制系统的 SIMNON 仿真曲线

Fig. 4 Responses of L^2 DMC control system for synchronous motor with position mode

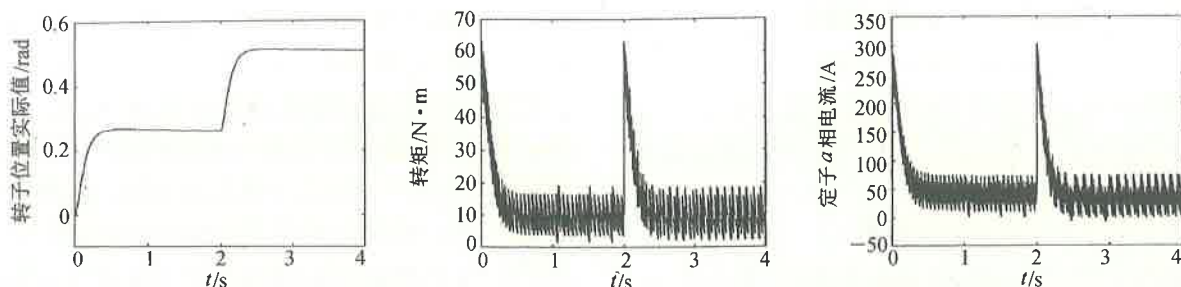


图5 同步电动机位置模式矢量控制系统的SIMNON仿真曲线

Fig. 5 Responses of vector control system for synchronous motor with position mode

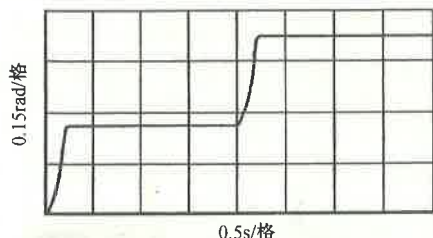


图6 同步电动机转子位置的示波器实测曲线

Fig. 6 Measured rotor position of synchronous motor using oscilloscope

4 结论(Conclusions)

1) 将预测控制应用于同步电动机位置控制是完全可行的,它打破了传统的控制方法,使用基于阶跃响应的预测模型,避免了同步机建模复杂的问题,实施简易、控制方便。

2) 将预测控制应用于传动控制系统,尚属首次,这为预测控制开辟了新的研究领域。

3) 同步电动机 L^∞ DMC 控制系统动态响应快,动态偏差小,无超调,控制性能明显优于 L^2 DMC 控制系统和矢量控制系统。

4) 系统对给定值具有良好的动、静态跟踪能力。

参考文献(References)

- 1 Culter C R and Ramaker B L. Dynamic matrix control—a computer control algorithm. Proc. Joint Automatic Control Conference, San Francis-

co, 1980

- 2 Sun Hexun, et al. Torque vector control for The step motion of synchronous motor. The First Int. Power Electronics and Motion Control Conference, Beijing, 1994, 1: 414–419
- 3 葛宝明. 同步电动机多模态预测控制的研究:[硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 1996
- 4 王永骥, 徐桂英, 涂健. 水轮发电机组 L^∞ 范数性能指标预测控制. 控制理论与应用, 1991, 8(4): 386–392

附录 A IPM 同步电动机参数

(Appendix A IPM Synchronous Motor Parameter,

$P_e = 70$ 马力, $p = 2$, $\omega_b = 710.48 \text{ rad/s}$,

$I_{rs} = 340 \text{ A}$, $\omega_b L_{qs} = 0.0189 \Omega$,

$V_B = 204 \text{ V}$, V_B 的可调范围: $135 \text{ V} \sim 260 \text{ V}$,

$\omega_b L_{dm} = 0.0785 \Omega$, $\omega_b L_{qm} = 0.1747 \Omega$,

$\omega_b \Psi_f = 40.2 \text{ V}$, $\omega_b \Psi_{sr} = 58.5 \text{ V}$, $R_s = 0.00443 \Omega$.

本文作者简介

葛宝明 1971 年生. 于 1997 年在辽宁工程技术大学获得硕士学位. 现在浙江大学电机系攻读博士学位. 主要研究领域为电气传动及其自动化, 预测控制, 鲁棒控制等理论与应用。

蒋静坪 1935 年生. 1958 年毕业于浙江大学电机系. 现为浙江大学电机系教授, 博士生导师. 长期从事工业电气自动化及计算机实时控制教学与研究工作. 主要研究领域为电气传动及其自动化, 智能控制和计算机控制等。

孙鹤旭 1956 年生. 于东北大学获得博士学位. 现为河北工业大学电气工程与自动化系自动化研究所所长, 教授。