

永磁球形电机的自适应反演滑模控制

过希文^{1,2,4} 王群京^{2,3,4} 李国丽^{1,2,4} 钱喆^{1,2,4} 文彦^{1,2} 赵双双^{1,2}

1. 安徽大学电气工程与自动化学院,合肥,230601;
2. 安徽大学高节能电机及其控制技术国家地方联合工程实验室,合肥,230601;
3. 安徽大学教育部电能质量工程研究中心,合肥,230601;
4. 安徽大学工业节电与电能质量控制协同创新中心,合肥,230601)

摘要:针对非线性、强耦合、直驱型的永磁球形电机动力学系统,设计了一种自适应反演滑模控制器。首先,通过拉格朗日第二方程以及卡尔丹角坐标变换建立永磁球形电机的转子动力学方程。然后,将反演设计方法和滑模控制有机结合抑制外界扰动和参数摄动的影响。其中,基于类李雅普诺夫方法获得外界扰动上界的自适应律,并采用一种新颖的趋近律消除抖振问题。最后,仿真结果对比证实:该控制器不仅能保证永磁球形电机动力学系统高精度的轨迹跟踪、快速的动态响应,而且对外界扰动具有较强的鲁棒性。

关键词:永磁球形电机;自适应反演;滑模控制;动力学建模

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)01-0059-06

Adaptive Backstepping Sliding Mode Control in Permanent Magnet Spherical Motor

Guo Xiwen^{1,2,4}, Wang Qunjing^{2,3,4}, Li Guoli^{1,2,4}, Qian Zhe^{1,2,4}, Wen Yan^{1,2}, Zhao Shuangshuang^{1,2}

- (1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei, 230601, China;
2. National Engineering Laboratory of Energy-Saving Motor & Control Technology, Anhui University, Hefei, 230601, China;
3. Power Quality Engineering Research Center of China Ministry, Anhui University, Hefei, 230601, China;
4. Collaborative Innovation Center of Industrial Energy-Saving and Power Quality Control, Anhui University, Hefei, 230601, China)

Abstract: Due to the nonlinear and strong coupling dynamic model of a direct-drive permanent magnet spherical motor (PMSM) dynamics system, an adaptive backstepping sliding mode controller is developed. Firstly, by using the second Lagrange equation and the Carden angle coordinate transformation, the PMSM rotor dynamic model is achieved. Secondly, the proposed approach effectively combines the design techniques of backstepping and the sliding mode control in order to restrain the effects of the external disturbance and parameter variations. Adaptive law of the external disturbance upper bound can be derived based on the Lyapunov-like design. Moreover, a novel reaching law is used to overcome the chattering phenomenon. Finally, simulation studies prove that the control scheme has high accuracy, rapid response and strong robustness.

Key words: permanent magnet spherical motor (PMSM); adaptive backstepping; sliding mode control; dynamics modeling

基金项目:国家自然科学基金(51177001,51307001)资助项目;安徽省教育厅自然科学研究重点项目(KJ2013A012)资助项目;安徽省自然科学基金(1308085QE82)资助项目。

收稿日期:2013-10-28;**修订日期:**2013-12-28

通信作者:过希文,男,讲师,博士,1983年生,E-mail:xwguo2008@163.com。

伴随着现代工业技术的不断发展,机器人、机械手、雷达天线跟踪机构等多维空间伺服装置得到了广泛应用。这类装置通常由多台单自由度直驱电机以及复杂的机械传动机构组成。由于采用大量的减速齿轮,一方面导致系统体积增大、重量增加、刚度降低。另一方面,受外界扰动等不确定性因素的影响,运动控制系统响应迟缓、动态性能较差,严重时甚至影响整个系统的稳定性。为此,以多自由度球形电机为研究对象的单台多维控制系统概念一经出现,立刻引起学者们的广泛关注,相继提出步进式、磁阻式、轮式、直流无刷式、永磁式等球形电机。

作为一种全新概念的特种电机,永磁球形电机(Permanent magnet spherical motor, PMSM)既综合了模块化、高集成度等结构特点,又具有高性价比、低能耗的经济优势,近年来取得突飞猛进的发展。目前的研究热点主要集中在球形电机的结构设计及优化^[1-3]、电磁场分析与转矩建模^[4-6]以及转子位置检测^[7-9]等方面,并取得大量有价值的研究成果。但由于永磁球形电机特殊的三维结构以及运动机理,要想实现真正意义上的产品化、实用化,搭建合适的动力学模型以及提出动态性能良好的控制方案始终是困扰研究者的一个难点问题。

文献[10]提出一种基于传感器信息的计算力矩法(Computed torque method, CTM)。首先对定子线圈中通过的电流进行冗余优化选择。然后,根据基于转子角位移建立的动力学模型以及位置检测装置检测到的反馈信息,实现球形电机的闭环控制。由于实际运行工况较为复杂,一般很难获取精确的动力学模型信息,导致CTM无法付诸实践。伴随着智能控制理论的发展,文献[11]提出两种基于模糊控制的动力学解耦控制器。其中,采用3个二维模糊控制器作为主控制器,并基于改进BP算法的神经网络辨识器和自适应神经模糊推理系统(Adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS),实时在线对系统的不确定性进行辨识和前馈补偿,实现较为理想的解耦控制效果以及动、静态性能,但由于其结构以及计算的复杂度,大大限制了其应用与推广。

众所周知,对于考虑外界扰动等不确定性因素的控制系统,滑模控制具有设计简单、鲁棒性强、快速响应等优点,因而在实际工程中获得了广泛应用^[12]。但它要求不确定性必须满足匹配条件,而自适应反演设计方法能很好地处理非匹配条件的不确定性问题^[13]。因此,本文考虑将两者的优点

结合起来,设计一种新颖的自适应反演滑模控制器,并基于典型工况进行仿真分析,证实了该方案的有效性。

1 永磁球形电机动力学系统建模

1.1 基本结构

永磁球形电机主要由定子球壳、转子球体两大部分组成。其中,定子绕组共24个,分为两层,关于转子赤道面对称分布。绕组匝数约为1200匝,采用空心结构,目的在于保证气隙磁场和线圈转矩的线性叠加。转子主体采用不导磁材料制造,呈中空或者实心结构,并嵌有40个采用柱状钕铁硼永磁体($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)加工而成的磁极。另外,在转子球体上安装输出轴,用以实现倾斜、俯仰、自旋的三自由度运动。该电机的显著特点是:永磁体的磁极数目较多,从而提高转矩输出。同时,通过永磁体的分布决定转子的运动范围,其中倾斜、俯仰角最大可达 67° 。实际样机的基本结构如图1所示^[7,14]。

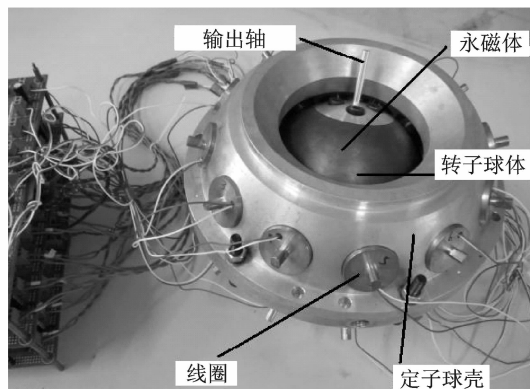


图1 永磁球形电机的基本结构

Fig. 1 Basic structure of PMSM

1.2 动力学建模

通过简化分析,发现球形电机转子的三维运动可以等效看作单刚体绕经转子球心坐标轴的3次顺次独立旋转。因此,首先定义静止坐标系XYZ——与定子球壳保持相对位置不变,以及动坐标系 dqp ——位于转子球体上并与3个惯性主轴重合。然后,基于图2中卡尔丹角 (α, β, γ) 的旋转变化以及拉格朗日第二方程,可将永磁球形电机的转子动力学模型表述成二阶微分方程形式

$$\begin{cases} \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{T}_f = \mathbf{T} \\ \mathbf{T} = [T_\alpha, T_\beta, T_\gamma]^T \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} J_1 \cos^2 \beta + J_2 \sin^2 \beta & 0 & J_2 \sin \beta \\ 0 & J_1 & 0 \\ J_2 \sin \beta & 0 & J_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} (J_2 - J_1) \sin\beta \cos\beta \dot{\beta} & (J_2 - J_1) \sin\beta \cos\beta \dot{\alpha} + \frac{1}{2} J_2 \cos\beta \dot{\gamma} & \frac{1}{2} J_2 \cos\beta \dot{\beta} \\ (J_1 - J_2) \sin\beta \cos\beta \dot{\alpha} - \frac{1}{2} J_2 \cos\beta \dot{\gamma} & 0 & -\frac{1}{2} J_2 \cos\beta \dot{\alpha} \\ \frac{1}{2} J_2 \cos\beta \dot{\beta} & \frac{1}{2} J_2 \cos\beta \dot{\alpha} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{q} = [\alpha, \beta, \gamma]^T$ 为卡尔丹角位置; $\dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ 分别对应着相应的角速度以及角加速度; $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ 为球形电机转子惯性矩阵; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为哥氏力和离心力矩阵; J_1, J_2 分别为动坐标系下 d - q 轴与 p 轴的转动惯量; \mathbf{T} 为施加在 3 个惯性主轴上的控制力矩; \mathbf{T}_f 为外界扰动。

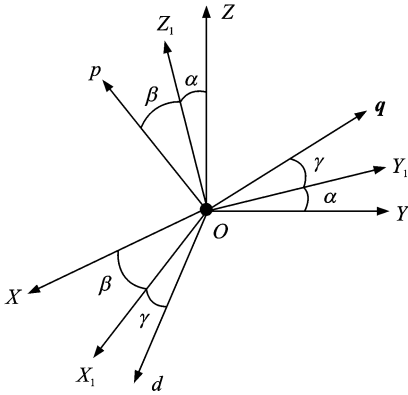


图 2 基于卡尔丹角的坐标变换

Fig. 2 Coordinate transformation based on Cardan angle

由式(1~3)可以看出,永磁球形电机是一个多输入-多输出、强耦合的非线性动力学系统。另外,本系统拟采用非接触式的位置检测装置,因而不会改变上述转子动力学模型。

为了便于后续的分析,这里给出永磁球形电机转子动力学模型的基本性质。

性质 1 由于惯性矩阵 $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ 是一个正定阵,其逆矩阵 $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})$ 存在,并且存在正数 \mathbf{J}_{\min} 和 \mathbf{J}_{\max} ,使得 $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ 满足 $0 < \mathbf{J}_{\min} \leq \mathbf{J}(\mathbf{q}) \leq \mathbf{J}_{\max}$ 。

假设系统状态可测,结合性质 1,式(1)可表述成以下状态变量形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = -\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \mathbf{x}_2 + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{T} - \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{T}_f \\ \mathbf{y} = \mathbf{q} = \mathbf{x}_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 分别表示永磁球形电机转子动力学系统的角位置和角速度。

2 永磁球形电机的自适应反演滑模控制器设计

永磁球形电机的设计初衷在于使转子输出轴

能实现从任意初始角位置 \mathbf{q}_0 出发都能到达给定轨迹 \mathbf{q}_d 的连续三维运动。从控制的角度看,连续轨迹控制问题属于跟踪控制。为此,本文采用自适应反演滑模设计方案实现控制目标。

首先按照反演法的一般设计过程^[13,15],定义系统的两个误差子系统分别为

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{e}_d \quad (5)$$

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \mathbf{a}_1 \quad (6)$$

式中 \mathbf{a}_1 为待设计的虚拟控制量。

步骤 1 对第 1 个误差子系统设计虚拟控制量

$$\mathbf{a}_1 = -k_1 \mathbf{e}_1 + \dot{\mathbf{q}}_d \quad k_1 > 0 \quad (7)$$

则第 1 个误差子系统的动态方程为

$$\dot{\mathbf{e}}_1 = \dot{\mathbf{x}}_1 - \dot{\mathbf{q}}_d = \mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{q}}_d = -k_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 \quad (8)$$

步骤 2 第 2 个误差子系统的动态方程为

$$\dot{\mathbf{e}}_2 = \dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{a}}_1 = -\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \mathbf{x}_2 + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{T} - \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{T}_f + k_1 \dot{\mathbf{e}}_1 - \ddot{\mathbf{q}}_d \quad (9)$$

并引入滑模切换面函数

$$\mathbf{s} = c_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 \quad c_1 > 0 \quad (10)$$

此时,系统到达滑模面的条件是 $\mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} < 0$ 。为了消除滑模控制自身不可避免的抖振现象,这里采用趋近律的方法设计滑模面 \mathbf{s} ,令

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} &= -\eta \mathbf{s} - \varepsilon |\mathbf{s}|^p \text{sgn}(\mathbf{s}) \\ \eta, \varepsilon &> 0 \text{ 且 } 0 < p \leq \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

则获得相应的控制力矩 \mathbf{T}' 为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}' &= \mathbf{J}(\mathbf{x}_1) [-c_1 (\mathbf{e}_2 - k_1 \mathbf{e}_1) + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \cdot \\ &(\mathbf{e}_2 + \mathbf{a}_1) + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{T}_f - k_1 \dot{\mathbf{e}}_1 + \ddot{\mathbf{q}}_d - \\ &\eta \mathbf{s} - \varepsilon |\mathbf{s}|^p \text{sgn}(\mathbf{s})] \end{aligned} \quad (12)$$

步骤 3 考虑到实际控制中外界扰动 \mathbf{T}_f 上界通常未知,取其估计值 $\hat{\mathbf{T}}_f$ 的自适应律 $\dot{\hat{\mathbf{T}}}_f$ 为

$$\dot{\hat{\mathbf{T}}}_f = -\delta \mathbf{s}^T \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \quad \delta > 0 \quad (13)$$

参照式(12),可得实际控制力矩

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \mathbf{J}(\mathbf{x}_1) [-c_1 (\mathbf{e}_2 - k_1 \mathbf{e}_1) + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \\ &\mathbf{x}_2) (\mathbf{e}_2 + \mathbf{a}_1) + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \hat{\mathbf{T}}_f - k_1 \dot{\mathbf{e}}_1 + \ddot{\mathbf{q}}_d - \\ &\eta \mathbf{s} - \varepsilon |\mathbf{s}|^p \text{sgn}(\mathbf{s})] \end{aligned} \quad (14)$$

为了实现永磁球形电机转子动力学系统的稳定控制,选择 Lyapunov 函数为

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} (\mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1 + \mathbf{s}^T \mathbf{s} + \frac{1}{\delta} \hat{\mathbf{T}}_f^2) \quad (15)$$

其中估计误差为 $\tilde{\mathbf{T}}_f = \mathbf{T}_f - \hat{\mathbf{T}}_f$ 。取 $p = \frac{1}{2}$ ，对式

(15)求导并代入式(8,10,12),可得

$$\begin{aligned} \mathbf{V} = & -k_1 \mathbf{e}_1^\top \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1^\top \mathbf{e}_2 + \mathbf{s}^\top \{ [c_1 (\mathbf{e}_2 - k_1 \mathbf{e}_1)] - \\ & \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{C}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) (\mathbf{e}_2 + \mathbf{a}_1) + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{T} - \\ & \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) \hat{\mathbf{T}}_f + k_1 \dot{\mathbf{e}}_1 - \ddot{\mathbf{q}}_d \} - \\ & \tilde{\mathbf{T}}_f \left[\mathbf{s}^\top \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1) + \frac{1}{\delta} \dot{\mathbf{T}}_f \right] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{若取 } \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \eta c_1^2 + k_1 & \eta c_1 - \frac{1}{2} \\ \eta c_1 - \frac{1}{2} & \eta \end{bmatrix}, \text{ 由于 } |\mathbf{K}| =$$

$\eta(\eta c_1^2 + k_1) - \left(\eta c_1 - \frac{1}{2}\right)^2 = \eta(c_1 + k_1) - \frac{1}{4}$, 通过合理取 η, c_1 和 k_1 的值, 可使 $|\mathbf{K}| > 0$ 为正定矩阵。

故将控制力矩式(14)、自适应律式(13)代入式(16), 求导可得

$$\dot{\mathbf{V}} \leq -\mathbf{e}^\top \mathbf{K} \mathbf{e} - \varepsilon |\mathbf{s}|^{\frac{3}{2}} \quad (17)$$

再对式(17)积分, 得

$$\int_0^\infty (\mathbf{e}^\top \mathbf{K} \mathbf{e} + \varepsilon |\mathbf{s}|^{\frac{3}{2}}) dt \leq V(0) - V(\infty) \leq V(0) \quad (18)$$

借助 Barbalat 定理^[16]可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}_1 = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}_2 = 0$, 即永磁球形电机转子输出轴从任意初始条件 $(\mathbf{q}_0, \dot{\mathbf{q}}_0)$ 出发, 总有 $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \rightarrow (\mathbf{q}_d, \dot{\mathbf{q}}_d)$ 。

具体的控制方案如图3所示。首先, 向控制器输入给定轨迹 \mathbf{q}_d 。根据反演控制器的一般设计步骤, 通过两个误差子系统 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ 以及滑模切换面函数 \mathbf{s} 的共同作用, 保证系统到达理想的滑动模态。同时, 通过 η, ε 等参数构造趋近律式(11)消除滑模控制器自身的抖振问题。然后, 通过参数 δ 、永磁

球形电机转子动力学惯性逆矩阵 $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_1)$ 以及滑模切换面函数 \mathbf{s} 获得自适应律(13), 解决外界扰动 \mathbf{T}_f 上界未知的问题。最后, 通过构造实际控制力矩 \mathbf{T} , 驱动永磁球形电机 (Permanent magnet spherical motor, PMSM) 转子输出轴实现跟踪控制任务。

3 仿真分析

章动运动是一种类似于陀螺的运动, 即永磁球形电机转子输出轴围绕其上的3个惯性主轴 dqp 做三自由度运动。具体来说就是采用卡尔丹角旋转 $(\sin(\pi t), \cos(\pi t), \frac{\pi}{5} t)$ rad 描述转子输出轴的给定轨迹 \mathbf{q}_d , 这是最能检验永磁球形电机具有转矩全可控的运行工况^[11,14]。

由机械系统动力学自动分析软件 ADAMS 获得永磁球形电机转子的转动惯量参数 $J_1 = 1.3682 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_2 = 1.3469 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。外界扰动 $T_f = 0.2 \sin(2\pi t)$ 。假设: 系统的初始条件设置为 $\mathbf{q}(0) = [\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, \gamma, \dot{\gamma}]^\top = [0.2, 0, 0.3, 0, 0.1, 0]^\top$, 表示转子输出轴从初始的卡尔丹角位置 $\mathbf{q}_0 = [0.2, 0.3, 0.1]^\top$ 静止出发。取控制器参数: $k_1 = 15$ 构造虚拟控制量 \mathbf{a}_1 ; $c_1 = 30$ 构造滑模切换面函数 \mathbf{s} ; 取 $\eta = 5, \varepsilon = 15, p = \frac{1}{2}$ 构造趋近律函数; $\delta = 5$

构造自适应律 $\dot{\hat{\mathbf{T}}}_f$ 。图4,5分别表示 β, γ 角的动态响应曲线, 其中跟踪误差能在0.5 s内迅速收敛到0.02 rad以内, 可见该控制方案能实现高精度的轨迹跟踪以及具有较快的动态响应。另外, 由于受外界扰动的影响, 还存在较小的振荡。

为了证实趋近律的有效性, 仍然采用上述的参

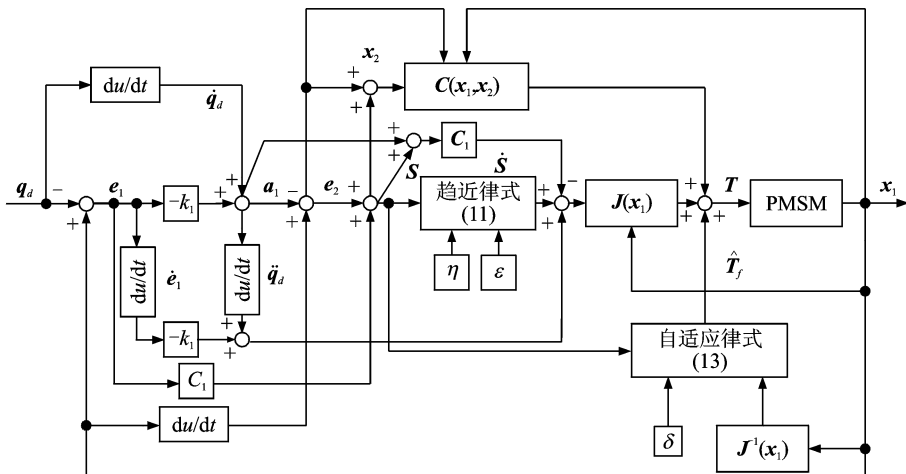
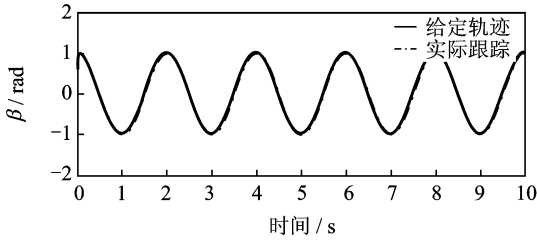
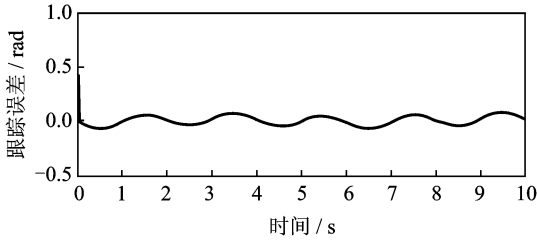


图3 永磁球形电机的自适应反演滑模控制方案框图

Fig. 3 Block diagram of adaptive backstepping sliding mode control scheme



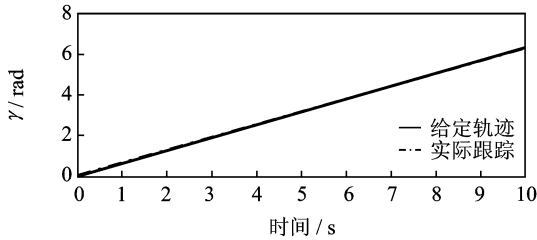
(a) 卡尔丹角 β 的轨迹跟踪曲线



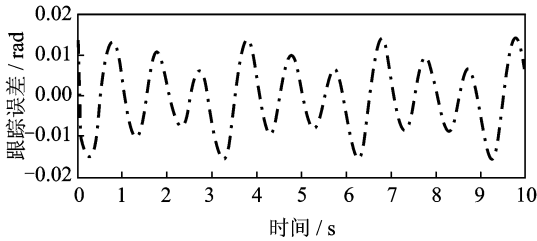
(b) 卡尔丹角 β 的跟踪误差曲线

图 4 卡尔丹角 β 的动态响应

Fig. 4 Dynamic response of Cardan angle β



(a) 卡尔丹角 γ 的轨迹跟踪曲线



(b) 卡尔丹角 γ 的跟踪误差曲线

图 5 卡尔丹角 γ 的动态响应

Fig. 5 Dynamic response of Cardan angle γ

数设置,分别对常规滑模控制^[15]以及本文所提出的自适应反演滑模控制方案进行对比分析。图 6, 7 分别表示这两种方案所需要的控制力矩 T_c , 可见该趋近律方法能有效消除滑模控制的抖振问题。

最后,为了检验该控制方案的鲁棒性,假设外界扰动 $T_f=0.5\sin(2\pi t)$,同时将各惯性主轴的转动惯量提高一倍。图 8 表示的是改变初始条件的控制力矩 T_c 。对比图 7 不难发现,当外界扰动增大且系统转动惯量发生变化时,本文所提出的自适应反演滑模控制方案基本无振荡,只是需要更大的起动力矩($>20 \text{ N}\cdot\text{m}$),相应地增加了该电机控制方案的计算负担。

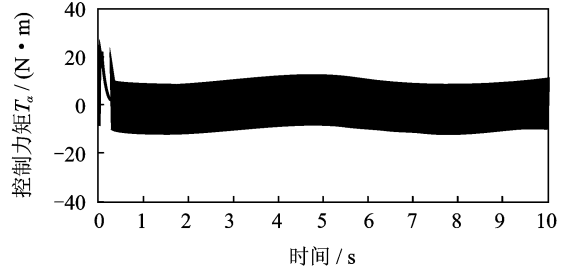


图 6 常规滑模控制力矩 T_c

Fig. 6 Control torque T_c of conventional sliding mode controller

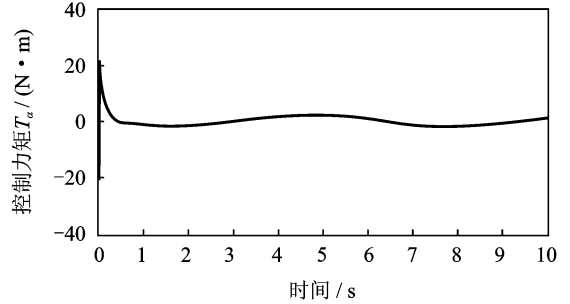


图 7 自适应反演滑模控制力矩 T_c

Fig. 7 Control torque T_c of adaptive backstepping sliding mode controller

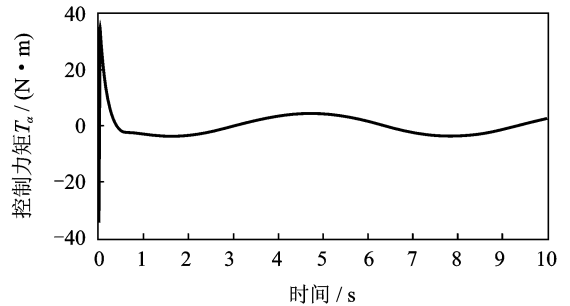


图 8 改变初始条件的自适应反演滑模控制力矩 T_c
Fig. 8 Control torque T_c of proposed controller under modified initial condition

4 结束语

本文针对永磁球形电机非线性、强耦合的动力学系统,提出一种新颖的自适应反演滑模控制方案。通过设计虚拟控制,将输出误差限制在很小的范围内。同时,采用趋近律的设计方法消除抖振问题,并获取最终稳定的控制力矩。理论分析和仿真实验均证明所提出方案的有效性,这也为后续永磁球形电机实现连续、稳定、高精度的运动控制提供了理论基础。

参考文献:

[1] 宋鹏,夏长亮,李洪凤,等. 永磁球形电动机转矩特性

- 的数值计算与分析[J]. 天津大学学报, 2009, 42(7): 608-613.
- Song Peng, Xia Changliang, Li Hongfeng, et al. Calculation and analysis of torque characteristics of a permanent magnet spherical motor[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(7): 608-613.
- [2] Lee H J, Park H J, Ryu G H, et al. Performance improvement of operating three-degree-of-freedom spherical permanent-magnet motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 4654-4657.
- [3] Yan L, Chen I M, Yang G L, et al. Modeling and iron-effect analysis on magnetic field and torque output of electromagnetic spherical actuators with iron stator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(6): 1080-1087.
- [4] Xia C L, Li H F, Shi T N. 3-D magnetic field and torque analysis of a novel halbach array permanent-magnet spherical motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(8): 2016-2020.
- [5] Xia C L, Song P, Li H F, et al. Research on torque calculation method of permanent-magnet spherical motor based on the finite-element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(4): 2015-2022.
- [6] Chen I M, Yang G L, Yan L, et al. Electromechanical modeling of a permanent-magnet spherical actuator based on magnetic-dipole-moment principle[J]. IEEE/ASME Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1640-1648.
- [7] 王群京, 钱喆, 李争, 等. 基于机器视觉的永磁球形步进电动机转子位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 74-79.
- Wang Qunjing, Qian Zhe, Li Zheng, et al. Method of measuring the rotor position of permanent magnetic spherical stepper motor based on machine vision[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2008, 28(36): 74-79.
- [8] Yan L, Chen I M, Yang G L, et al. A three degree-of-freedom optical orientation measurement method for spherical actuator applications[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2011, 8(2): 319-326.
- [9] Son Hungsun, Lee K M. Two-DOF magnetic orientation sensor using distributed multipole models for spherical wheel motor[J]. Mechatronics, 2011, 21(1): 156-165.
- [10] Chen W H, Zhang L, Yan L, et al. Design and control of a three degree-of-freedom permanent magnet spherical actuator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 180: 75-86.
- [11] Xia C L, Guo C, Shi T N. A neural network identifier and fuzzy controller based algorithm for dynamic decoupling control of permanent magnet spherical motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2868-2878.
- [12] 高有涛, 陆宇平, 徐波. 非合作目标编队飞行耦合动力学建模与六自由度控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2): 159-165.
- Gao Youtao, Lu Yuping, Xu Bo. Modeling and six-degree-of-freedom control for non-cooperative satellite formation flying[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(2): 159-165.
- [13] Shieh H J, Shyu K K. Nonlinear sliding-mode torque control with adaptive backstepping approach for induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(2): 380-389.
- [14] 过希文, 王群京, 李国丽, 等. 基于摩擦补偿的永磁球形电机自适应模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 75-81.
- Guo Xiwen, Wang Qunjing, Li Guoli, et al. Adaptive fuzzy control for permanent magnet spherical motor based on friction compensation[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2011, 31(15): 75-81.
- [15] Lin F J, Shen P H, Hsu S P. Adaptive backstepping sliding mode control for linear induction motor drive[J]. IEE Pro-Electr Power Appl, 2002, 149(3): 184-194.
- [16] Slotine J J E, Li W P. Applied nonlinear control[M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1991.