

含齿隙双电机伺服系统未知参数的两阶段辨识

王树波^{1,2†}, 任雪梅², 李斯琪²

(1. 青岛大学 自动化与电气工程学院, 山东 青岛 266071; 2. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

摘要: 针对含齿隙的双电机伺服系统, 提出一种两阶段辨识法辨识双电机系统未知参数以及齿隙非线性环节的死区参数. 针对电机转动惯量、等效粘性摩擦系数以及齿隙大小未知的情况, 运用 Legendre 多项式将双电机伺服系统中的齿隙模型分段化, 根据最小二乘法辨识双电机伺服系统参数. 最后, 通过仿真验证两阶段辨识法的有效性, 验证结果表明, 两阶段辨识法能够较准确地辨识电机参数和齿隙参数.

关键词: 双电机伺服系统; 齿隙; 非线性死区; 两阶段辨识

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Two-stage identification method for dual-motor with unknown parameters

WANG Shu-bo^{1,2†}, REN Xue-mei², LI Si-qi²

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper proposes a two-stage identification method for the dual-motor servo system with nonlinear dead-zone and backlash. For the situation that the motor inertia, the equivalent viscous friction coefficient and the size of the backlash are unknown, the Legendre polynomial is utilized to segment the backlash model of dual-motor servo system. The parameters of the dual-motor servo system are identified by using the least square method (LSM). Finally, a simulation experiment is carried out to verify the effectiveness of the proposed two-stage identification method, and the proposed method can accurately identify the motor parameters and backlash parameters.

Keywords: dual-motor servo system; backlash; nonlinear dead-zone; two-stage identification

0 引言

双电机伺服系统由于结构简单、运行可靠以及效率高等特点, 在工业过程和军事装备等领域得到了广泛的应用. 为了提高双电机伺服系统的控制精度, 需要对齿隙、死区非线性等系统参数进行辨识. 文献[1]利用最小二乘法辨识永磁同步电机的转动惯量和负载转矩, 并通过仿真验证了算法的有效性; 文献[2]针对含非线性间隙环节的 Wiener-Hammerstein 电机伺服系统, 提出了一种分段线性化的方法建立未知参数的整体估计模型; 文献[3]通过控制电流环辨识直流电机的电磁和电感, 并通过实验验证了该方法的有效性; 文献[4]研究了最小二乘两阶段辨识方法在无人直升机上的应用; 文献[5]利用最小二乘两阶段辨识方法来辨识非线性输出模型的参数. 但是, 这些方法没有考虑辨识齿隙以及死区等非线性环节的参

数. 此外, 神经网络^[6-8]、模糊逻辑系统^[9-11]及遗传算法^[12]也被用来辨识伺服系统的未知参数. 但是人工智能辨识方法计算时间较长, 降低了计算效率, 不利于实际应用.

本文针对含齿隙双电机伺服系统, 提出一种两阶段参数辨识方法辨识双电机伺服系统及齿隙的未知参数. 首先, 运用 Legendre 多项式将双电机伺服系统中的齿隙模型分段化; 然后, 利用两阶段辨识方法辨识双电机伺服系统参数; 最后, 通过仿真验证本文所提算法的有效性.

1 含齿隙双电机动力学模型

双电机驱动末级齿轮传动原理示意图如图1所示. 图1中的 r 和 R 分别为主动轮和从动轮的半径. 双电机伺服系统的间隙模型如图2所示.

间隙模型的数学表达式为

收稿日期: 2017-04-28; 修回日期: 2017-07-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61433003).

作者简介: 王树波(1983-), 男, 讲师, 博士, 从事参数估计、伺服系统控制及其应用等研究; 任雪梅(1967-), 女, 教授, 博士, 从事智能控制及伺服系统控制等研究.

†通讯作者. E-mail: wangshubo1130@126.com

$$\theta_m(t) = \begin{cases} \frac{1}{i}[\theta(t) - \alpha], & \dot{\theta}(t) > \alpha; \\ \frac{1}{i}[\theta(t) + \alpha], & \dot{\theta}(t) < -\alpha; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

其中*i*为传动比. 死区模型如图3所示.

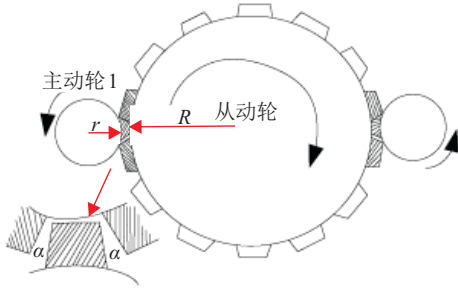


图1 双电机驱动原理

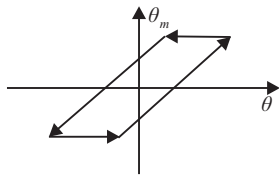


图2 间隙模型

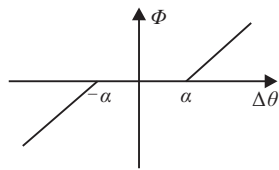


图3 死区模型

死区数学表达式为

$$\Phi(\Delta\theta) = \begin{cases} (\Delta\theta(t) + \alpha), & \Delta\theta < -\alpha; \\ 0, & |\Delta\theta| < \alpha; \\ (\Delta\theta(t) - \alpha), & \Delta\theta > \alpha. \end{cases} \quad (2)$$

因此,含齿隙的双电机动力学模型可以表示为

$$\begin{aligned} T_1 &= J_1\ddot{\theta}_1 + b_1\dot{\theta}_1 + T_{1m}, \\ T_2 &= J_2\ddot{\theta}_2 + b_2\dot{\theta}_2 + T_{2m}. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: T_1, T_2 分别为两电机的驱动电磁力矩; J_1, J_2 分别为两电机的转动惯量; b_1, b_2 分别为两电机转子等效粘性摩擦系数; θ_1, θ_2 分别为两电机的转角, $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ 分别为两电机的速度, $\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2$ 分别为两电机的加速度; T_{1m}, T_{2m} 分别为两电机对从动轮的传递力矩,其表达式为

$$T_{jm} = \begin{cases} k(\Delta\theta_j + \alpha), & \Delta\theta_j < -\alpha; \\ 0, & |\Delta\theta_j| \leq \alpha; \\ k(\Delta\theta_j - \alpha), & \Delta\theta_j > \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta\theta_j = \theta_j - i\theta_m. \quad (5)$$

其中: $j = 1, 2; \theta_m$ 为负载从动齿轮的转角; i 为传动比. 带齿隙的双电机数学模型为

$$\begin{cases} T_1 = J_1\ddot{\theta}_1 + b_1\dot{\theta}_1 + T_{1m}, \\ T_2 = J_2\ddot{\theta}_2 + b_2\dot{\theta}_2 + T_{2m}, \\ T_m = T_{1m} + T_{2m} = J_m\ddot{\theta}_m + b_m\dot{\theta}_m. \end{cases} \quad (6)$$

2 含齿隙双电机伺服系统参数两步辨识

电机转矩平衡方程为

$$M = J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + T. \quad (7)$$

其中

$$T = \begin{cases} k(x + \alpha), & x_1 \leq x < \alpha; \\ 0, & |x| \leq \alpha; \\ k(x - \alpha), & \alpha < x \leq x_2. \end{cases} \quad (8)$$

其中: J 为电机转动惯量; T 为电磁力矩; b 为电机等效粘性摩擦系数; x 为电机齿轮与从动轮的转动角度差; k 为齿隙弹性系数; α 为齿隙宽度; x_1 和 x_2 为常数,一般取 $x_1 = \min\{x\}, x_2 = \max\{x\}$.

2.1 最佳平方多项式近似

在式(8)中,采用归一化变化^[13],令

$$x = x_1 + \frac{x_2 - x_1}{2}(\eta + 1), \quad (9)$$

其中 η 为控制收敛的步长因子,可以得到

$$T(\eta) = \begin{cases} k\left(x_1 + \frac{x_2 - x_1}{2}(\eta + 1) + \alpha\right), & x_1 \leq x < \alpha; \\ 0, & |x| \leq \alpha; \\ k\left(x_1 + \frac{x_2 - x_1}{2}(\eta + 1) - \alpha\right), & \alpha < x \leq x_2; \\ \lambda(\eta - \eta_1), & -1 \leq \eta < \eta_1; \\ 0, & \eta_2 \leq \eta \leq \eta_2; \\ \lambda(\eta - \eta_2), & \eta_2 < \eta \leq 1. \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} \lambda = \frac{x_1 - x_2}{2}k, \\ \eta_1 = \frac{2}{x_2 - x_1}\left(-\frac{x_1 - x_2}{2} - \alpha\right), \\ \eta_2 = \frac{2}{x_2 - x_1}\left(-\frac{x_1 + x_2}{2} + \alpha\right). \end{cases} \quad (11)$$

可以算出Legendre多项式前5项为

$$\begin{cases} P_0(x) = 1, P_1(x) = x, \\ P_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1), P_3(x) = \frac{1}{2}(5x^2 - 3x), \\ P_4(x) = \frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3). \end{cases} \quad (12)$$

用Legendre多项式 $P_0(\eta), P_1(\eta), \dots, P_n(\eta)$ 作为基数,可得上式的最佳逼近多项式

$$T_\eta(\eta) = a_0 P_0(\eta) + a_1 P_1(\eta) + \dots + a_n P_n(\eta). \quad (13)$$

其中

$$\begin{cases} a_0(x) = -\frac{1}{4}\lambda(\eta_1 + 1)^2 + \frac{1}{4}\lambda(\eta_2 - 1)^2, \\ a_1(x) = \\ -\frac{1}{4}\lambda(\eta_1 - 2)(\eta_1 + 1)^2 + \frac{1}{4}\lambda(\eta_1 + 2)(\eta_2 - 1)^2, \\ \vdots \\ a_n(x) = \frac{\int_{-1}^1 T(\eta)P(\eta)d\eta}{\int_{-1}^1 [P(\eta)]^2 d\eta} = \\ \frac{2n + 1}{2} \int_{-1}^1 T(\eta)P(\eta)d\eta. \end{cases} \quad (14)$$

2.2 直接参数估计

将式(13)代入(7),可以得到

$$M = J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + a_0 P_0(\eta) + a_1 P_1(\eta) + \dots + a_k P_k(\eta). \quad (15)$$

令 $\beta_1 = J, \beta_2 = b, \beta_3 = a_0, \beta_4 = a_1, \dots, \beta_n = a_k (n = k + 3), x_1 = \ddot{\theta}, x_2 = \dot{\theta}, x_3 = P_0(\eta), x_4 = P_1(\eta), \dots, x_n = P_k(\eta).$

定义

$$\begin{aligned} \beta &= [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]^T, \\ M &= [M_1, M_2, \dots, M_m]^T; \end{aligned} \quad (16)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

由式(16)和(17)可得

$$M = X\beta. \quad (18)$$

假设 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ 的估计值分别为 $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3, \dots, \hat{\beta}_n$, 则有 $M_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 的估计值为

$$\hat{M}_j = \hat{\beta}_1 x_{j1} + \hat{\beta}_2 x_{j2} + \hat{\beta}_3 x_{j3} + \dots + \hat{\beta}_n x_{jn}. \quad (19)$$

定义估计误差 $e_j = M_j - \hat{M}_j$, 定义准则函数为

$$P = \sum_{j=1}^m e_j^2 = \sum_{j=1}^m [M_j - (\hat{\beta}_1 x_{j1} + \hat{\beta}_2 x_{j2} + \dots + \hat{\beta}_n x_{jn})]^2. \quad (20)$$

根据最小二乘法极小化准则函数, 参数估计为

$$\begin{aligned} \hat{\beta}(t) &= \hat{\beta}(t - 1) + L(t)[M(t) - X^T(t)\hat{\beta}(t - 1)], \\ L(t) &= P(t - 1)X(t)[1 + X^T(t)P(t - 1)X(t)]^{-1}, \\ P(t) &= [I - L(t)X^T(t)]P(t - 1), P(0) = pI. \end{aligned} \quad (21)$$

两阶段最小二乘法辨识步骤如下.

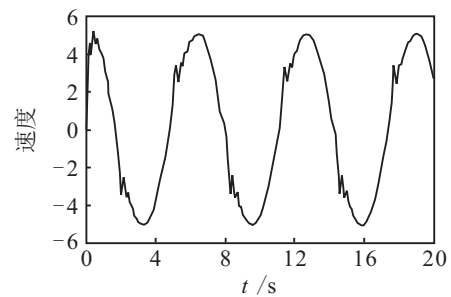
1) 初始化: 设定初始值 $P(0) = pI, M = 0, X = 0$, 令 $t = 1$, 置初值 $\hat{\beta}(0) = 1/p, P(0) = p(0)I, p(0) = 10^6$;

- 2) 根据输入输出序列构造 $X(t)$;
- 3) 根据式(21)计算增益向量 $L(t)$ 和协方差 $P(t)$;
- 4) 更新参数估计率 $\hat{\beta}(t)$;
- 5) 计算参数估计值 $\hat{\beta}$;
- 6) t 增加 1, 转步骤 2), 继续递推计算.

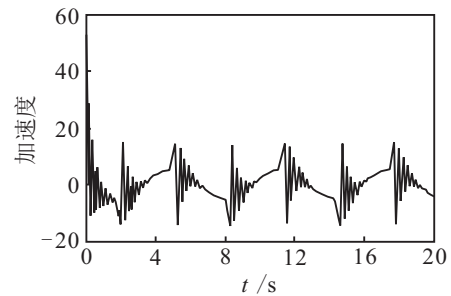
通过以上步骤求解可得 $\hat{\beta}$, 继而可以得到 $J = \hat{\beta}_1, b = \hat{\beta}_2, a_0 = \hat{\beta}_3, a_1 = \hat{\beta}_4, a_2 = \hat{\beta}_5$.

3 仿真研究

在该部分中, 以含齿隙的双电机伺服系统作为控制对象, 针对式(8)选择参数如下: $x_1 = -0.31, x_2 = 0.35, k = 1.3, \alpha = 0.2$; 电机惯量 $J = 0.26$, 粘性摩擦系数 $b = 0.19$. 图4描述了电机速度输出和电机加速度输出曲线; 图5描述了电机齿轮与从动轮转动角度差输出曲线及电机驱动力矩输出曲线.



(a) 电机速度输出



(b) 电机加速度输出

图4 电机速度及加速度输出

对图4和图5(a)进行数据采样, 每幅图采集第651~700个点的数值, 可以得到3个变量的采样数据组, 每个变量含有50组数据. 根据变量 $P_0(\eta), P_1(\eta), P_2(\eta)$ 可以写出式(17)的值.

对图5(b)进行数据采样, 选取其中第651~700个点得到的力矩数据. 由力矩的50组数据可以得到 $M = [M_1, M_2, \dots, M_{50}]^T$.

将获取的数据代入式(19), 可得 $\beta = [0.2591, 0.1909, 1.000, -0.3132, -0.0156]$, 代入式(14), 利用Matlab非线性方程组解析函数Fsolve得到 $\hat{k} = 1.32, \hat{\alpha} = 0.21$.

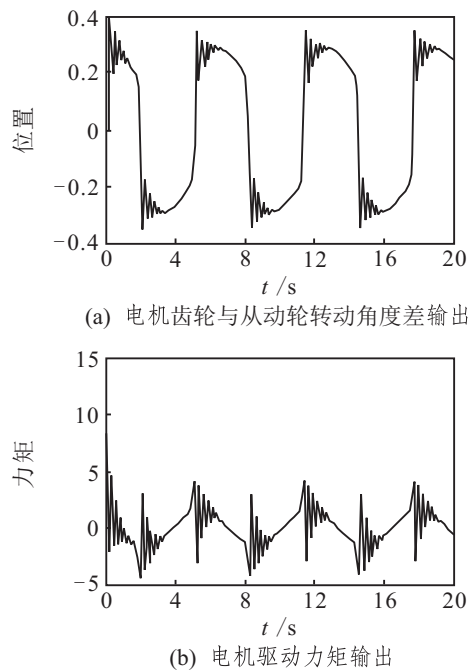


图5 电机齿轮与从动轮转动角度差及电机驱动力矩输出

参数辨识结果与实际值对比如表1所示。

表1 参数辨识结果

	J	b	k	α
实际值	0.26	0.19	1.3	0.2
辨识值	0.2591	0.1909	1.32	0.21

从表1可以看出,本文采用的两阶段参数辨识方法能够有效地辨识双电机伺服系统的未知参数。

4 结论

本文针对含齿隙的双电机伺服系统,提出了一种两步辨识法辨识伺服电机系统参数以及齿隙非线性环节的死区参数。首先,运用Legendre多项式将双电机伺服系统中的齿隙模型分段化;然后,根据最小二乘法辨识双电机伺服系统参数。仿真结果表明,两步辨识法能够较准确地辨识出齿隙参数。

参考文献(References)

- [1] 荀倩,王培良,李祖欣,等.基于递推最小二乘法的永磁伺服系统参数辨识[J].电工技术学报,2016,31(17):161-169.
(Xun Q, Wang P L, Li Z X, et al. PMSM parameters identification based on recursive least square method[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 161-169.)
- [2] 李冬伍,任雪梅,吕晓华.含间隙非线性的Wiener-Hammerstein系统复合补偿控制[J].控制理论与应用,2016,33(1):54-61.
(Li D W, Ren X M, Lv X H. Combined compensation control for Wiener-Hammerstein systems with backlash nonlinearities[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(1): 54-61.)

- [3] 邵明强,李广文,徐恒.基于子空间和PEM的无人直升机两阶段参数辨识[J].飞行力学,2013,31(4):367-371.
(Shao M Q, Li G W, Xu H. Two-stage parameters identification method of unmanned helicopter based on subspace and PEM[J]. Flight Dynamics, 2013, 31(4): 367-371.)
- [4] 贾杰,范奎伟.非线性输出误差模型的两阶段递推辨识算法[J].南昌航空大学学报:自然科学版,2014,28(2):24-31.
(Jia J, Fan K W. The two-stage recursive identification algorithm for the model of the nonlinear output error[J]. J of Nanchang Hangkong University: Natural Sciences, 2014, 28(2): 24-31.)
- [5] Yang S M, Lin K W. Automatic control loop tuning for permanent-magnet AC servo motor drives[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1499-1506.
- [6] Na J, Ren X, Herrmann G, et al. Adaptive neural dynamic surface control for servo systems with unknown dead-zone[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(11): 1328-1343.
- [7] Wang S, Ren X, Na J, et al. Robust tracking and vibration suppression for nonlinear two-inertia system via modified dynamic surface control with error constraint[J]. Neurocomputing, 2016, 203: 73-85.
- [8] Lin F J, Wai R J. Robust control using neural network uncertainty observer for linear induction motor servo drive[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(2): 241-254.
- [9] Wang S, Ren X, Na J. Adaptive dynamic surface control based on fuzzy disturbance observer for drive system with elastic coupling[J]. J of the Franklin Institute, 2016, 353(8): 1899-1919.
- [10] Li Y, Tong S, Li T. Hybrid fuzzy adaptive output feedback control design for uncertain MIMO nonlinear systems with time-varying delays and input saturation[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2016, 24(4): 841-853.
- [11] Cao X, Bi M. Extended Luenberger observer based on dynamic neural network for inertia identification in PMSM servo system[C]. Fifth Int Conf on Natural Computation. Tianjin: IEEE, 2009: 48-52.
- [12] 肖曦,许青松,王雅婷,等.基于遗传算法的内埋式永磁同步电机参数辨识方法[J].电工技术学报,2014,29(3):21-26.
(Xiao X, Xu Q S, Wang Y T, et al. Parameter identification of interior permanent magnet synchronous motors based on genetic algorithm[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 21-26.)
- [13] 赵海全,张家树,曾祥萍.混沌通信系统中非线性信道的自适应神经Legendre正交多项式均衡[J].物理学报,2007,56(4):1975-1982.
(Zhao H Q, Zhang J S, Zeng X P. Adaptive neural Legendre orthogonal polynomial nonlinear channel equalization for chaos-based communications systems[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(4): 1975-1982.)

(责任编辑:闫妍)