

文章编号: 1001-0920(2010)02-0223-04

直线伺服系统非线性自适应鲁棒控制器的优化设计

蓝益鹏, 赵 辉, 孙文义, 郭庆鼎
(沈阳工业大学 电气工程学院, 沈阳 110178)

摘 要: 对永磁直线电动机伺服系统提出了非线性自适应鲁棒控制器的优化设计方法. 在系统非线性数学模型的基础上, 建立了误差系统的动态模型. 将跟踪和干扰抑制归结为非线性自适应鲁棒控制器的设计问题, 通过构造存储函数得到自适应鲁棒控制器的定理, 以及电阻和电感的辨识算法. 证明了定理给出的控制器能满足干扰抑制和系统渐近稳定, 并用遗传算法对控制器的参数进行优化. 仿真结果验证了该方法是有效的.

关键词: 直线电机; 自适应控制; 鲁棒控制; 遗传算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Optimize design of nonlinear adaptive robust controller for linear servo system

LAN Yi-peng, ZHAO Hui, SUN Wen-yi, GUO Qing-ding

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, China. Correspondent: LAN Yi-peng, E-mail: lanyipeng@163.com)

Abstract: This paper presents a nonlinear adaptive robust controller optimize design based on genetic algorithm for permanent magnet linear motor servo system. On the basis of the system nonlinear mathematical model, an error system dynamic equation is set up. The track and disturbance restraint are summed up to nonlinear adaptive robust control question. Furthermore, a theory including formulae of resistance and inductance identification used to describe nonlinear adaptive robust controller is obtained by defining storage function. The nonlinear adaptive robust control law which meets disturbance restraint and asymptotical stability is proved. Finally, genetic algorithm is used to optimize parameters of nonlinear adaptive robust controller. The simulation results show the effectiveness of the designed controller.

Key words: Linear serve motor; Adaptive control; Robust control; Genetic algorithm

1 引 言

永磁直线电动机在电枢铁心开断和定子绕组不连续时, 存在端部效应、参数摄动以及非线性等不确定性因素^[1-3]. 由于采用直接驱动, 负载扰动没有缓冲而直接作用于电动机, 进一步增加了控制的难度. 与旋转电动机相比, 永磁直线电动机的数学模型很难精确建立, 有其自身的特殊性^[4,5]. 因此, 需要针对永磁直线电动机这样一个非线性不确定伺服系统, 采用自适应鲁棒控制策略^[6-10].

为实现对速度和电流的准确跟踪, 本文以永磁直线电动机现有的非线性数学模型为基础, 结合矢量控制原理, 建立了误差系统的动态模型. 将跟踪和干扰抑制问题转化为非线性自适应鲁棒控制器的设

计问题. 通过构造适当的存储函数, 得到描述系统自适应鲁棒控制器的定理, 以及电阻和电感的辨识算法. 进而证明了定理给出的控制器能满足干扰抑制和系统渐近稳定. 最后通过遗传算法(GA)对控制器的参数进行优化, 用该方法设计的系统能使干扰抑制问题和跟踪问题在满足耗散不等式和渐近稳定的条件下同时得到解决, 以满足高性能数控机床永磁直线伺服系统的控制要求.

2 控制问题描述

2.1 永磁直线伺服电动机 d 和 q 轴数学模型

假定 d 和 q 轴电感 $L_d = L_q = L$, 则永磁直线电动机的数学模型可描述如下:

电流方程

收稿日期: 2009-02-26; 修回日期: 2009-05-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50975181); 辽宁省教育厅科学研究计划项目(2004D040).

作者简介: 蓝益鹏(1962—), 男, 陕西华县人, 副教授, 博士, 从事交流伺服系统、鲁棒控制等研究; 赵辉(1982—), 男, 辽宁鞍山人, 硕士生, 从事交流伺服、鲁棒控制的研究.

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_d + \frac{\pi}{\tau}vi_q + \frac{1}{L}u_d, \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_q - \frac{\pi}{\tau}vi_d - \frac{\pi\psi_f}{\tau L}v + \frac{1}{L}u_q; \quad (2)$$

运动方程

$$\frac{dv}{dt} = \frac{K_f}{M}i_q - \frac{B}{M}v - \frac{F_L}{M}. \quad (3)$$

其中: u_d 和 u_q 分别为 d 和 q 轴电压, i_d 和 i_q 分别为 d 和 q 轴电流, R_s 为定子相电阻, v 为直线电机运动速度, τ 为极距, ψ_f 为定子基波磁势链过定子绕组的磁链, F_L 为负载阻力, M 为动子质量, B 为粘滞摩擦系数, K_f 为推力系数(包含速度与电流乘积 vi_q 和 vi_d 的非线性项).

2.2 直线伺服系统控制问题描述

为实现直线伺服系统对速度和电流的准确跟踪以及对干扰的抑制,作如下定义:

速度误差以及 d 和 q 轴电流误差为

$$e = v^* - v, \quad (4)$$

$$e_q = i_q^* - i_q, \quad (5)$$

$$e_d = i_d^* - i_d; \quad (6)$$

电阻和电感的参数误差为

$$e_R = R^* - R, \quad (7)$$

$$e_L = L^* - L. \quad (8)$$

其中: v^* , i_d^* 和 i_q^* 分别为速度的给定量以及 d 和 q 轴电流的给定量; R^* 和 L^* 为电阻和电感的标称值.

速度误差以及 d 和 q 轴电流误差为

$$\dot{e} = dv^*/dt - dv/dt, \quad (9)$$

$$\dot{e}_d = di_d^*/dt - di_d/dt, \quad (10)$$

$$\dot{e}_q = di_q^*/dt - di_q/dt; \quad (11)$$

电阻和电感参数误差的动态为

$$\dot{e}_R = dR^*/dt - dR/dt, \quad (12)$$

$$\dot{e}_L = dL^*/dt - dL/dt. \quad (13)$$

干扰抑制的评价信号为

$$Z = [Z_1 \quad Z_2]^T = [p_1e \quad p_2e_q \quad p_3e_d \quad p_4e_R \quad p_5e_L]^T. \quad (14)$$

其中 $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 > 0$ 均为加权系数.

非线性自适应鲁棒控制器的设计问题可描述为:对于给定的控制对象(9)~(14),求反馈控制律,使闭环系统满足:

1) 当干扰 $F_L = 0$ 时,系统在原点处全局渐近稳定,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_q(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_d(t) = 0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_R(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_L(t) = 0.$$

2) 当干扰 $F_L \neq 0$ 时,对于任意的有界扰动信号,闭环系统具有扰动抑制性能,即

$$\int_0^T \|Z(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|F_L(t)\|^2 dt. \quad (15)$$

其中: $T > 0$ 为有限时间, $\gamma > 0$ 为给定的干扰抑制度.

3 非线性自适应鲁棒控制器设计

对于系统(9)~(14),定义供给率

$$s(F_L, z) = \frac{1}{2}(\gamma^2 \|F_L\|^2 - \|z\|^2). \quad (16)$$

如果系统对上述供给率是耗散的,则存在正定函数 V ,使得

$$\dot{V} \leq s(F_L, z), \quad (17)$$

其中 V 为存储函数.从而将耗散性与 L_2 增益约束条件联系起来.

引理 1^[10] 对于系统(9)~(14),有

$$i_q = \frac{M}{K_f}(K_1 e + p_1^2 e + \frac{1}{4\gamma_1^2 M^2} e + \frac{B}{M} v). \quad (18)$$

其中: $K_1 > 0$ 为给定的增益系数, $\gamma_1 > 0$ 为给定的干扰抑制度.式(18)是该子系统的 L_2 控制器.

按矢量控制原理选择 d 和 q 轴参考电流

$$i_q^* = \frac{M}{K_f}(K_1 e + p_1^2 e + \frac{1}{4\gamma_1^2 M^2} e + \frac{B}{M} v),$$

$$i_d^* = 0.$$

以电流跟踪误差 e_d, e_q 和 e 为状态变量,将上式和(1)~(3)分别代入误差的动态方程(9)~(11),可推得

$$\dot{e}_d = \frac{di_d^*}{dt} - \frac{di_d}{dt} = -\frac{di_d}{dt} =$$

$$\frac{R_s}{L}i_d - \frac{\pi}{\tau}vi_q - \frac{1}{L}u_d, \quad (19)$$

$$\dot{e} = -\frac{dv}{dt} = \frac{B}{M}v + \frac{F_L}{M} - \frac{K_f}{M}i_q, \quad (20)$$

$$\frac{de_q}{dt} = \frac{di_q^*}{dt} - \frac{di_q}{dt} =$$

$$\left[\frac{B}{K_f}(K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4\gamma_1^2 M^2} - \frac{B}{M}) + \right.$$

$$\left. \frac{\pi\psi_f}{\tau L} \right] v + \left(\frac{BK_f}{M^2} + \frac{R_s}{L} - K_1 - \right.$$

$$\left. p_1^2 - \frac{1}{4\gamma_1^2 M^2} \right) i_q + \frac{\pi}{\tau}vi_d + \left[\frac{1}{K_f}(K_1 + \right.$$

$$\left. p_1^2 + \frac{1}{4\gamma_1^2 M^2} - \frac{B}{M} \right] F_L - \frac{1}{L}u_q. \quad (21)$$

定理 1 对于系统(12),(13),(19)~(21),有

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{p_5^2 e_L^2}{L} - \frac{\pi\psi_f}{\tau L^2} v e_q, \quad (22)$$

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{p_4^2 e_R^2}{R} - \frac{1}{L}i_d e_d, \quad (23)$$

$u_q =$

$$-L \left(\frac{B}{K_f}(K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4\gamma_1^2 M^2} - \frac{B}{M}) v + \right.$$

$$\left(\frac{B}{M} - K_1 - p_1^2 - \frac{1}{4\gamma_1^2 M^2}\right) i_q - \frac{R}{L} i_q e_q + \frac{\pi}{\tau} v i_d + K_2 e_q + p_2^2 e_q + \frac{1}{4\gamma_2^2 K_f^2} \left(K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4\gamma_1^2 M^2} - \frac{B}{M}\right)^2 e_q, \quad (24)$$

$$u_d = -\frac{\pi}{\tau} L v i_q + L p_3^2 e_d + L K_3 e_d. \quad (25)$$

其中: $K_2 > 0$ 和 $K_3 > 0$ 为给定的增益系数, $\gamma_2 > 0$ 为给定的干扰抑制度. 式(22) 是系统的电感辨识函数, 式(23) 是系统的电阻辨识函数, 式(24) 和 (25) 是系统的非线性自适应鲁棒控制器.

证明 1) 首先证明式(22) ~ (25) 满足耗散不等式. 为保证系统整体满足耗散不等式, 构造系统的存储函数

$$V = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2} e_q^2 + \frac{1}{2} e_d^2 + \frac{1}{2} R^2 + \frac{1}{2} L^2, \\ \dot{V}_2 = e \frac{de}{dt} + e_q \frac{de_q}{dt} + e_d \frac{de_d}{dt} + R \frac{dR}{dt} + L \frac{dL}{dt}.$$

上式两边加上 $\|Z\|^2 - \gamma^2 \|F_L\|^2$, 并用式(14) 代入右端, 得

$$\dot{V}_2 + \|Z\|^2 - \gamma^2 \|F_L\|^2 = e \frac{de}{dt} + \|Z_1\|^2 - \gamma_1^2 \|F_L\|^2 + e_q \frac{de_q}{dt} + e_d \frac{de_d}{dt} + R \frac{dR}{dt} + L \frac{dL}{dt} + \|Z_2\|^2 - \gamma_2^2 \|F_L\|^2 \leq -(\gamma_1 \|F_L\| - \frac{1}{2\gamma_1 M} \|e\|)^2 - K_1 e^2 - \left[\gamma_2 \|F_L\| - \frac{1}{2\gamma_2 K_f} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4\gamma_1^2 M^2} - \frac{B}{M}) \|e_q\|\right]^2 - K_2 e_q^2 - K_3 e_d^2 < 0.$$

为使上式成立, 只要令

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{p_4^2 e_R^2}{R} - \frac{1}{L} i_d e_d, \quad (26)$$

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{p_5^2 e_L^2}{L} - \frac{\pi \phi_f}{\tau L^2} \omega e_q, \quad (27)$$

由式(24) 和(25) 即可得式(22) ~ (25).

2) 然后证明稳定性.

当 $F_L = 0$ 时, 将式(22) ~ (25) 代入 \dot{V}_2 , 得

$$\dot{V}_2 = e \frac{de}{dt} + e_q \frac{de_q}{dt} + e_d \frac{de_d}{dt} + R \frac{dR}{dt} + L \frac{dL}{dt} = -\left(K_1 + p_1^2 \frac{1}{4\gamma_1^2 M^2}\right) e^2 - \left[K_2 +$$

$$p_2^2 \frac{1}{4\gamma_2^2 K_f^2} \left(K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4\gamma_1^2 M^2} - \frac{B}{M}\right)^2 e_q^2 - (K_3 + p_3^2) e_d^2 - p_4^2 e_R^2 - p_5^2 e_L^2 < 0. \quad (28)$$

其中: $K_1 > 0, K_2 > 0, K_3 > 0$.

当 $e \neq 0, e_d \neq 0, e_q \neq 0, e_R \neq 0, e_L \neq 0$ 时, $\dot{V}_2 < 0$; 当 $\|(e \ e_q \ e_d \ e_R \ e_L)^T\| \rightarrow \infty$ 时, $V_2 \rightarrow \infty$, V_2 径向无界. 因此系统全局渐近稳定. \square

4 基于遗传算法的控制器优化设计

自适应鲁棒控制器加权系数的选择尚无统一的方法. 在此采用遗传算法对控制器参数进行优化.

4.1 参数编码

对于待整定的 $K_1, K_2, K_3, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$ 共 8 个参数, 每个参数用 10 位无符号的二进制码表示, 8 个参数串接在一起构成一个样本, 每个样本串长度为 80, 样本个数取 $N = 80$. 设参数变化范围为 $[\min \ \max]$, 则参数的译码公式为

$$r = \frac{(\max - \min)K}{2^{10} - 1} + \min, \quad (29)$$

其中 K 为 r 的二进制码. 其余 7 个参数也可类似处理.

4.2 适应度函数

选取适应度函数

$$F = 1/J, \quad J = \int_0^\infty q_1 |e(t)| dt + q_2 t_u. \quad (30)$$

其中: J 为目标函数, $e(t)$ 为系统误差, t_u 为上升时间, q_1 和 q_2 为权值. 取 $q_1 = 0.8, q_2 = 0.2$.

遗传算法通过适应度函数值的大小进行遗传操作, 对群体予以评价.

4.3 计算过程描述

1) 随机产生 $N = 80$ 个长度为 80 的串, 依次取出 10 位解码, 根据式(28) 依次求出 $K_1, K_2, K_3, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$ 的值, 根据目标函数(30) 计算出目标函数值 J 和相应的适应度. 待优化的参数选取 $K_1 \in [80, 120], K_2 \in [50, 150], K_3 \in [300, 370], p_1 \sim p_5 \in [0.09, 0.11]$ 范围内的随机值.

2) 计算出初始种群的适应度总和、最大值、平均值、最小值及最大值样本序号, 以供下面各操作所用.

3) 选择操作: 根据优胜劣汰原则, 计算出每个样本的适应度与平均适应度之比, 将其四舍五入取整, 小于 1 则被淘汰掉, 大于 1 则用于最大适值的样本繁殖, 最终保持种群样本个数 $N = 80$ 不变.

4) 交叉和变异操作: 首先从上一代种群中随机地两两配对, 以交叉概率 $P_c = 0.8$ 随机选取交叉位进行交叉操作, 以变异概率 $P_m = 0.01$ 随机产生变

异操作,这样便产生了新一代种群;然后计算出各样本的目标函数值 J 和适应度 F .

5) 计算新一代种群的适应度总和、最大值、平均值、最小值及最大值样本序号.

6) 判断是否满足终止条件,通常迭代 50 次种群便可稳定,因此选择迭代 50 次终止;否则,转步骤 3).

7) 将最大适应度的样本解码,求出 8 个参数值并输出.

5 仿真研究

采用自行研制的直线电机参数进行仿真研究. 电机参数为

$$M = 11 \text{ kg}, B = 1.1 \text{ N} \cdot \text{s/m}, \tau = 36 \text{ mm},$$

$$K_f = 25 \text{ N/A}, L_q = 9.0 \text{ mH}, R_s = 1.2 \Omega,$$

$$\Psi_f = 0.00144 \text{ Wb}, \gamma_1 = 0.1, \gamma_2 = 0.1.$$

采用多次试凑确定的控制器增益为

$$K_1 = 100, K_2 = 97, K_3 = 300,$$

$$p_1 = 0.1, p_2 = 0.1, p_3 = 0.1,$$

$$p_4 = 0.1, p_5 = 0.1.$$

优化后的控制器增益为

$$K_1 = 115.23, K_2 = 99.6, K_3 = 345.37,$$

$$p_1 = 0.095, p_2 = 0.072, p_3 = 0.087,$$

$$p_4 = 0.11, p_5 = 0.10.$$

图 1 为速度阶跃响应曲线. 其中:① 为遗传算法参数优化后的响应曲线,② 为试凑法确定参数的速度曲线. 在 $t = 0.2 \text{ s}$ 时刻分别对系统施加相同的扰动,在 $t = 0.3 \text{ s}$ 时卸去扰动. 由图可见,参数优化前系统的超调量为 3.3%,调节时间为 0.1s,扰动产生的速降为 4.2%;参数优化后系统响应的超调量为 0.8%,调节时间为 0.05s,扰动产生的速降为 2.3%. 基于遗传算法的自适应鲁棒控制系统响应较快,超调小,系统阶跃响应过渡时间明显缩短.

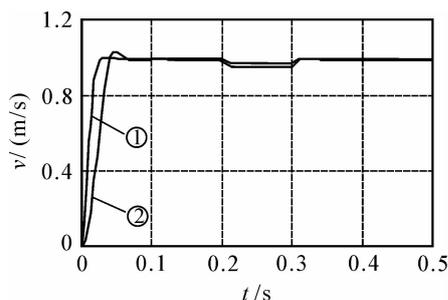


图 1 速度响应曲线

图 2 和图 3 分别为电阻和电感辨识曲线. 其中:① 为电阻和电感变化曲线,② 为系统的辨识曲线. 在 $t = 0.2 \text{ s}$ 时,电感值由 9 mH 突降为 4 mH,辨识时间为 0.13s,误差为 1.5%. 电阻值由 1.2 Ω 上升为 2.4 Ω ,辨识时间为 0.13s,误差为 2%. 由图可见,辨

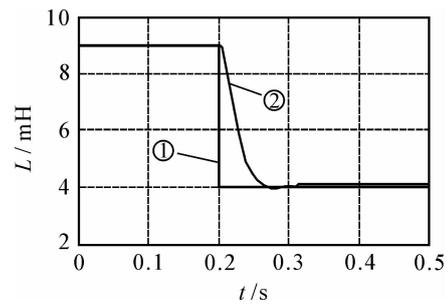


图 2 电感辨识曲线

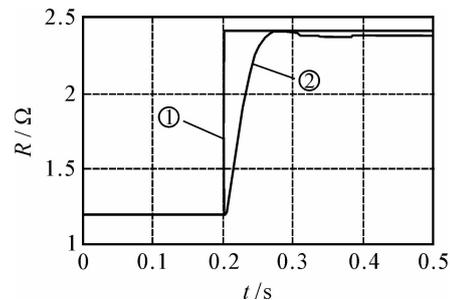


图 3 电阻辨识曲线

识算法能较好地反映参数变化,伺服系统具有较强的鲁棒性.

6 结 论

本文针对永磁直线伺服系统非线性不确定数学模型,采用非线性自适应鲁棒控制器的优化设计方法,实现了对参考信号的准确跟踪和对干扰的抑制. 利用辨识算法对电枢电阻和电感进行在线辨识,减小了系统模型的参数误差;利用遗传算法整定非线性自适应鲁棒控制器的参数. 仿真结果表明,用该方法设计的系统能很好地跟踪给定并抑制扰动,满足高性能永磁直线伺服系统的控制要求.

参考文献 (References)

- [1] Braembussche P V, Swevers J, Brussel H V, et al. Accurate tracking control of linear synchronous motor machine tool axes[J]. Mechatronics, 1996, 6(5): 507-521.
- [2] Rahman M A, Vilathgamuwa M, Uddin M N, et al. Nonlinear control of interior permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Trans on Industry Application, 2003, 39(2): 408-416.
- [3] Taylor D J. Nonlinear control of electric machines: An overview[J]. IEEE Control System Magazine, 1994, 14(12): 41-51.
- [4] Yao B, Li X. Adaptive robust motion control of linear motors for precision manufacturing[J]. Mechatronics, 2002, 12(4): 595-616.
- [5] 冯光, 黄立培, 朱东起. 采用自抗扰控制器的高性能异步电机调速系统[J]. 中国电机工程学报, 2001, 16(4): 30-33.