

基于神经网络给定补偿的永磁同步直线 交流伺服系统 H 控制

郭庆鼎 迟林春 王成元
(沈阳工业大学电气工程系 110023)

摘要 以永磁同步直线伺服电机为被控对象,应用 H 控制理论设计了一种具有强鲁棒性的速度控制器。首次提出了基于神经网络给定补偿的 H 控制策略。仿真实验结果表明,该方案有效地克服了永磁直线电机参数变化及特有的端部效应等对系统的影响,提高了系统的性能指标。

关键词 永磁同步直线电机, 交流伺服系统, 神经网络, H 控制

分类号 TP 301.5

H Control for Linear Permanent Magnet Synchronous AC Servo System with a Command- compensator Based on Artificial Neural Network

Guo Qingding, Chi Linchun, Wang Chengyuan
(Shenyang Polytechnic University)

Abstract A robust speed controller for a linear permanent magnet synchronous motor (LPSM) AC servo system based on H control theory is designed. The H control strategy with a feed-forward-command- compensator based on artificial neural network (ANN) is proposed first time. Simulation and experiment results verify that the proposed control strategy not only solve the thrust ripple problem of LPSM because of end effect, but also make the direct-drive system have strong robustness to parameter variation and external disturbances.

Key words linear permanent magnet synchronous motor (LPSM), AC servo system, artificial neural network, H control

1 引 言

近十余年来,直线伺服电机得到了快速发展,其中,永磁同步直线伺服电机由于具有精度高、噪音低、效率高、控制容易等优点,发展尤为迅速。但永磁同步直线电机的一个固有的缺点是受端部效应的影响而产生较强的转矩波动,从而影响了伺服性能的进一步提高。此外,动子质量变化、摩擦系数变化等造成的机械扰动,以及电机运行期间磁密分布变化、时间谐波等产生的谐波转矩,都可造成伺服系统性能变坏。

H 控制理论是近年发展起来的一种鲁棒控制理论,它在设计中就考虑了系统数学模型在一定范围内存在的不确定性误差^[1]。本文把经内环整定后的伺服电机扩展为增广对象 $P(s)$, 对其求解标准 H 设计问题,从而得到速度控制器。利用 H 控制理论设计的控制器具有很强的鲁棒性,但是标准 H 设计问题求出的控制器是随扰动抑制水平 γ 而定的次优解,这在一定程度上影响了伺服精度。为使系统能有效地克服端部效应产生的转矩波动,具有更高的伺服精度及自学习能力,引入基于网络的给定补偿控制器,用来及时补偿系统中存在的扰动。 H 控制器保证了系统的鲁棒性,神经网络补偿器则进一步提高了系统的性能指标。这种前馈加反馈的控制方法,能同时提高系统鲁棒性和性能指标。

* 国家自然科学基金项目(59875061)

1998 - 07 - 28 收稿, 1998 - 12 - 08 修回

2 d - q 坐标系下的数学模型与推力表达

仅考虑基波分量时,可以使用 $d - q$ 轴模型。注意到磁动势为定值(由永磁体产生),并且在次极上无阻尼绕组,故 $d - q$ 轴电压方程及磁链方程为^[2]

$$u_d = R_s i_d + P \lambda_d - \omega \lambda_q \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + P \lambda_q + \omega \lambda_d \quad (2)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{PM1} \quad (3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (4)$$

其中, $u_d, u_q, i_d, i_q, L_d, L_q$ 分别为 $d - q$ 轴电压, 电流和电感, R_s 为定子相电阻, λ_{PM1} 为定子基波磁势链过定子绕组的磁链, $\omega = \pi v / \tau$ 为等效的旋转电机转速 (v 为直线电机运动速度, τ 为极距), P 为微分算子。

$d - q$ 轴上的电流方程为

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & \cos\left(-\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(-\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(-\theta) & \sin\left(-\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, θ 为磁极位置角, i_a, i_b, i_c 为三相电流。从而推导出推力表达式为

$$F = \frac{3\pi}{2\tau} \lambda_{PM1} i_q \quad (6)$$

由(6)式可以看出, 推力仅由 i_q 决定。本文中电流内环采用磁场分量 $i_d = 0$ 的控制策略, 使定子电流矢量与定子永磁体磁场在空间上正交。其运动方程表达式为

$$F = K_f i_q = F_L + D v + M \dot{v} \quad (7)$$

其中, F 为电磁推力, F_L 为负载阻力, v 的导数 \dot{v} 为直线电机运动的加速度。

3 基于 H 控制理论的速度控制器设计

设计思路是把设计好的内环作为伺服系统中的一个等效开环传递函数 $S(s)$, 其实质为一个整形函数。利用 $S(s)$ 对原电机本身的 $P_0(s)$ 进行内环改造, 以满足理想的开环特性, 改造后的电机模型为 $P_0(s)S(s)$ 。考虑干扰输入信号 ω 和评价信号 z , 由输入信号 u, ω 到输出信号 z, y 的传递函数矩阵构成了增广被控对象。对于给定的增广对象 $P(s)$ 和干扰抑

制水平 γ , 求反馈控制器 $K(s)$ 使得闭环系统内部稳定, 且满足 $T_z \omega(s) < \gamma$ 其原理如图 1 所示。

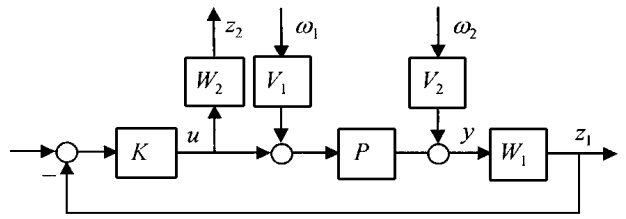


图 1 H 控制原理框图

设电机模型为

$$P_0(s) = \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}$$

增广被控对象 $P(s)$ 的状态空间实现由下式给出。

$$\dot{x} = A x + B_1 \omega + B_2 u \quad (8)$$

$$z = C_1 x + D_{11} \omega + D_{12} u \quad (9)$$

$$y = C_2 x + D_{21} \omega + D_{22} u \quad (10)$$

其中

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$$

对于任意

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi & \phi \\ \phi & \phi \end{bmatrix} RH, \quad \phi < 1$$

通过求解两个代数黎卡提方程^[3]

$$\begin{cases} X = Ric(A_{H_x}) & 0 \\ Y = Ric(A_{H_y}) & 0 \end{cases} \quad (11)$$

可求得速度控制器的表达式

$$K = CSD_r(\Pi, \Phi) = (\Pi_{12} + \Pi_{11} \Phi) (\Pi_{22} + \Pi_{21} \Phi)^{-1} \quad (12)$$

$\Pi =$

$$\begin{bmatrix} A + H_y C - H_y D_{22}^{-1} D_{21} F_{v1} & B_2 + H_y D_{12} - H_y D_{21} D_{12}^{-1} D_{11} W_{x22} & - H_y D_{21} W_{y22} \\ F_{v1} & W_{x22} & 0 \\ F_{v2} & D_{21} D_{11}^{-1} W_{y1} D_{12} W_{x22} & W_{y22}^{-1} \end{bmatrix}$$

详细论述参见文献[4]。

本文选定 $V_1(s) = V_2(s) = I, W_1(s) = W_2(s) = I$, 则

$$B_1 = [B \quad 0], \quad B_2 = B, \quad C_1 = \begin{bmatrix} C \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = C, \quad D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$$

$$D_{21} = [0 \quad I], \quad D_{22} = 0$$

设 $K(s)$ 的状态空间实现为 $K = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix}$, 其中

$$A_k = \begin{bmatrix} A + \frac{1-\gamma^2}{\gamma^2} BB^T X - \frac{\gamma^2}{\gamma^2-1} ZC^T C - & - (ZXB + B)C\phi \\ \frac{\gamma^2}{\sqrt{\gamma^2-1}} (ZXB + B)D\phi & \\ \frac{\gamma^2}{\sqrt{\gamma^2-1}} B\phi & A\phi \end{bmatrix}$$

$$B_k = \begin{bmatrix} -\sqrt{\gamma^2-1} (ZXB + B)D\phi - \gamma^2 ZC^T \\ \sqrt{\gamma^2-1} B\phi \end{bmatrix}$$

$$C_k = \begin{bmatrix} B^T X + \frac{\gamma^2}{\sqrt{\gamma^2-1}} D\phi & C\phi \end{bmatrix}$$

$$D_k = D\phi$$

4 基于 BP 神经网络的给定补偿控制

实际上, 精确的 H 控制器很难获得, 所有 H 控制器的求解几乎都是次优解。按第 3 节的设计步骤, 得到的也是 H 最优控制器的逼近解。为了满足高精度伺服系统的要求, 本文提出基于神经网络给定补偿的 H 控制策略, 以进一步提高系统的伺服精度。

依据系统按给定作用的不变性条件, 对于伺服系统引入前馈补偿环节, 若补偿环节引入神经网络 ANN1 对 $P(s)$ 进行逆向建模, ANN2 作为给定补偿控制器, 它与 ANN1 具有相同的结构和联接权值, 二者仅输入输出量不同。ANN1 起系统辨识的作用, 其输入为系统的输出 $y(k)$ 及 $y(k-1)$ 。ANN2 作为给定补偿控制器, 其输入为给定信号 $r(k)$ 及 $r(k-1)$ 。系统结构如图 2 所示。

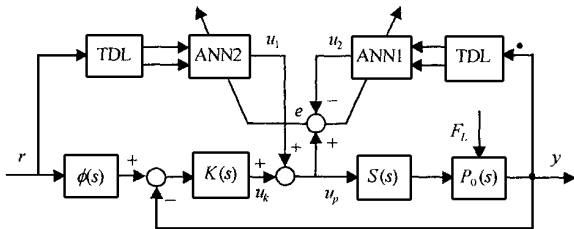


图 2 基于神经网络给定补偿的 H 控制

显然, ANN2 精确地模拟了微分装置, 我们正是利用 ANN2 任意逼近非线性函数的能力, 对伺服系统进行给定补偿。直线伺服电机的端部效应对系统

推力的影响可等效为负载阻力扰动 F_L 。由图 2 知, F_L 位于 ANN1 对系统的辨识环, 并且由于端部效应产生的推力纹波变化比较缓慢, 故 ANN2 完全可对 F_L 进行实时补偿。神经网络选择三层的误差反向传播网络, 输入节点 2 个, 隐层节点 8 个, 输出节点 1 个。

针对 BP 算法收敛速度慢的缺点, 本文采用加动量项的 BP 算法, 即

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \eta \delta_j y_j + \alpha (W_{ij}(t) - W_{ij}(t+1))$$

若 j 为输出节点, 则

$$\delta_j = y_j(1 - y_j)(\hat{y}_j - y_j)$$

若 j 为隐层节点, 则

$$\delta_j = y_j(1 - y_j) \sum_k \delta_k W_{jk}$$

神经网络的训练分为离线和在线训练两个阶段。离线训练时, 电机参数已知且固定, 即以不变的 $P(s)$ 为学习对象。离线训练后, 即可用 ANN2 对 $P(s)$ 进行在线给定补偿控制。为了保证神经网络的收敛性, 在线补偿不是在每个采样周期都进行, 而是每隔 QT_0 ($Q \geq 1, T_0$ 为系统建模的采样周期) 时间进行一次。这与电机实际运行情况是相符的。

5 仿真实验

首先由 MATLAB control toolbox robust toolbox qfttoolbox 求出鲁棒控制器 $K(s)$ 。以我们制做的一台永磁同步直线电机为研究对象, 其参数为: 极距 $\tau = 36\text{mm}$, $M_e = 10\text{kg}$, $D = 1.2\text{N} \cdot \text{s/m}$, $K_F = 25\text{N/A}$ 。则 $P_0(s) = \frac{25}{10s + 1.2}$ 。选择适当内环改造函数 $S(s)$, 对原电机模型 $P_0(s)$ 进行整形, 使 $P(s)$ 满足品质指标。鲁棒性由 H 控制器保证。这里选择整定后 $P(s)$ 的状态空间实现为

$$P = \left[\begin{array}{ccc|c} -0.121 & -0.000 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & & 0 \\ \hline 1.125 & 5.625 & & 0 \end{array} \right]$$

低通滤波器 $\phi(s)$ 的状态空间实现为

$$\phi = \left[\begin{array}{ccc|c} -33 & 33 & 1 & \\ \hline 62 & 500 & 37 & 500 \end{array} \right]$$

根据第 3 节讨论, 由 MATLAB 5.0 进行仿真, 得出速度控制器 $K(s)$ 的状态空间实现为

$$K(s) = \left[\begin{array}{ccc|c} -29\ 030\ 028 & -1\ 451\ 499\ 306\ 7 & -1\ 986\ 603\ 31 & -178\ 400\ 32 \\ -132\ 319\ 03 & -6\ 616\ 001\ 79 & -9\ 054\ 97 & -813\ 16 \\ \hline 243\ 54 & 12\ 177\ 09 & -33\ 33 & 1\ 49 \\ \hline 9\ 133\ 041\ 22 & 456\ 649\ 023\ 71 & 625\ 000 & 56\ 124\ 86 \end{array} \right]$$

考虑到计算精度,其频域表达为

$$K(s) = \frac{0.0035s^2 + 0.3321s + 7.1661}{0.0036s^2 + 0.3521s + 8.6921}$$

然后由 MATLAB nnettoolbox controltoolbox identtoolbox 对神经网络 ANN1 进行离线训练,最后利用上述结果进行仿真实验。

在阶跃给定作用下,电机启动后 0.3s 时加负载 $F_L = 80\text{N}$, 动子质量变化 $M = 5M_e$, 摩擦系数 $D = 11.3\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ 。采用 3 种不同的控制策略,系统的速度响应如图 3 所示。其中,曲线 ① 为 PI 控制,曲线 ② 为 H 控制,曲线 ③ 为基于神经网络补偿的 H 控制。可以看出,当直线电机动子质量和摩擦系数等参数变化大,端部效应产生的推力波动及突加负载力强时,基于神经网络补偿的 H 控制策略比其他两种控制策略表现出更好的性能和更强的鲁棒性。

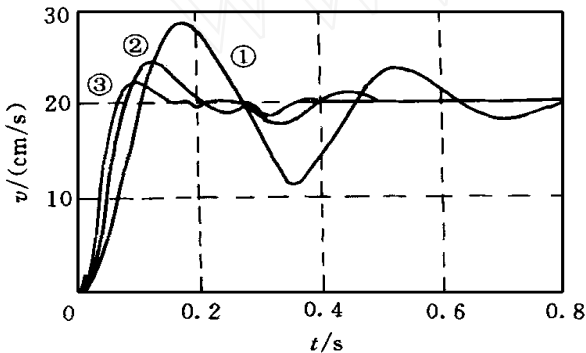


图 3 3 种控制策略的速度响应

6 结 语

仿真实验结果表明,本文提出的控制策略是行

之有效的, H 速度控制器能有效保证经适当内环改造后的永磁同步直线伺服系统的鲁棒性。虽然 H 控制理论比较复杂,但设计出的控制器的结构却比较简单。基于神经网络的给定补偿控制能充分保证系统的伺服精度,提高系统的性能指标。这种控制策略可同时提高系统的鲁棒性和性能指标。

参 考 文 献

- 1 申铁龙. H 控制理论及应用. 北京: 清华大学出版社, 1996
- 2 焦李成. 神经网络的应用与实现. 西安: 西安科技大学出版社, 1996
- 3 K Glover, J C Doyle. State- space formulate for all stabilizing controller that satisfy an H - norm bound and relation to risk sensitivity. System & Control Letters, 1988, 11(2): 167_ 172
- 4 M C Tsai, C S Tsai. A chain scattering- matrix description approach to H control. IEEE Trans on Autom Contr, 1993, 38(9): 1416_ 1423

作 者 简 介

郭庆鼎 男, 1940 年生, 1964 年毕业于哈尔滨工业大学自动化专业, 现为沈阳工业大学电气工程系教授, 主要研究方向为交流伺服, 数控技术, 鲁棒控制, 智能控制。

迟林春 男, 1974 年生, 沈阳工业大学硕士生, 主要研究方向为交流永磁同步伺服系统, 系统辨识, 智能控制。

王成元 男, 1946 年生, 1967 年毕业于哈尔滨工业大学电机系, 1982 年获电机专业硕士学位, 现为沈阳工业大学校长, 教授, 主要研究方向为电机动态分析, 交流伺服, 智能控制。