

自适应调节器的伺服系统位置控制

何献忠

(湖南工业大学电气与信息工程学院, 株洲 412011)

摘要: 根据伺服系统的特点, 采用模型参考自适应的广义时变系统控制策略, 利用控制系统响应特性以一定的规律自动调整调节器的 PID 参数, 当工况、干扰或负载改变时, 通过给定值扰动可得到对象输出波形, 由波形辨识器获得特征参数向量, 然后由专家系统求得 PID 调节器参数更新值, 使可调系统的输出响应波形逐步趋于理想的响应波形。模拟结果表明, 该系统输出能够快速、平稳而又准确地跟踪输入位置变化, 抗扰能力强。

关键词: 混合式步进电机, 自适应调节器, 广义时变系统, 辨识模型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.038

中图分类号: TM383.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0200-05

何献忠. 自适应调节器的伺服系统位置控制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 200-204.

He Xianzhong. Adaptive regulator control of the servo system location[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 200-204. (in Chinese with English abstract)

0 引言

随着工业应用的不断深入和相关技术的发展, 人们对步进电动机应用系统提出了越来越高的性能要求。目前混合式步进电动机伺服系统控制策略的研究相对滞后, 这是由于混合式步进电动机结构特殊, 不同于一般类型的电动机。因为步进电动机内部控制变量高度非线性且相互耦合, 难以用易于控制应用简单的数学模型表述。它的精确描述, 以及非线性参数的精确测定, 都存在很多实际困难, 往往要做很多简化和假定。因而, 如何获取混合式步进电动机内部机理的数学模型一直是研究者努力探求的目标。史敬灼、徐殿国等人提出了二相混合式步进电动机的矢量控制^[1-2]; 韩光鲜、王宗培等人采用自感和互感非线性特性的研究方法推出混合式步进电动机非线性仿真模型^[3]。但随着工业应用的不断深入和相关技术的发展, 人们对混合式步进电动机应用系统提出

了越来越高的性能要求, 本文以文献[1-3]所提方法为基础, 针对混合式步进电机控制的难点, 提出采用模型参考自适应的广义时变系统控制策略对系统的不确定因素进行实时补偿, 通过利用控制系统的响应特性整定 PID 参数的方法, 以实现混合式步进电机的高效能控制。

1 系统控制策略

具有参考模型的 PID 自适应调节器控制系统结构如图 1 所示, 它是一种模型参考自适应控制系统。它是由参考模型、可调系统和专家系统组成。利用可调系统(包含被控对象)的各种信息, 度量或测出某种性能指标, 把它与参考模型期望的性能指标相比较, 产生广义误差 e 。当被控对象因各种原因而特性有所改变时, 在原有控制器参数作用下, 可调系统输出的响应波形 θ 将偏离理想的动态特性。这时, 利用专家系统以一定的规律调整控制器的 PID 参数, 使 $y(t)$ 的动态特性恢复到理想状态。

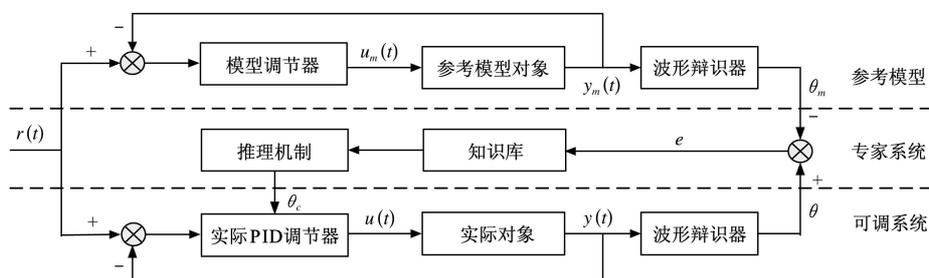


图 1 PID 自适应调节器原理图

Fig.1 Schematic diagram of adaptive PID regulator

收稿日期: 2010-05-28 修订日期: 2010-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60774069); 湖南省自然科学基金资助项目(07JJ3118)

作者简介: 何献忠(1963-), 女, 湖南人, 学士, 副教授, 主要从事电气自动化的教学与研究。株洲 湖南工业大学电气与信息工程学院, 412000。Email: hxzcxh@163.com

1.1 自适应调节

图 1 中参考模型由模型调节器、参考模型被控对象和波形辨识器组成。利用参考模型期望特性与实际特性之间的误差, 来调整控制器的参数, 使输出特性达到理想的状态。

可调系统由数字式 PID 控制器、实际被控对象和波

形辨识器组成。控制器的 PID 参数可以任意加以调整，专家系统由知识库和推理机制两部分组成，它首先检测参考模型和可调系统输出波形特征参数差值即广义误差 e 。PID 自整定的目标就是调整控制器 PID 参数矢量 θ ，使 θ 值逐步趋近于 θ_m （即 e 值趋近于 0）。该系统由于采用闭环输出波形的模式识别方法来辨别被控对象的动态特性，不必加持续的激励信号，因而对系统造成的干扰小。另外，采用参考模型自适应原理，使得自整定过程可以根据参考模型输出波形特征值的差值来调整 PID 参数^[4-5]，这个过程物理概念清楚，并且避免了被控对象动态特性计算错误而带来的偏差。

模型调节器传递函数为

$$G_{cm}(s) = K_{pm} \left(1 + \frac{1}{T_{im}s} + T_{dm}s \right) \quad (1)$$

式中， K_{pm} 为最佳调节过程下的比例增益； T_{im} 和 T_{dm} 分别为积分时间和微分时间的最优值。在最优的调节器参数作用下，参考模型输出 $y_m(t)$ 可得到一个理想的响应波形，可以此响应波形作为目标来调节可调系统，使它的输出 $y(t)$ 的响应波形接近或完全达到 $y_m(t)$ 的响应波形。

可调系统由数字式的 PID 调节器和实际被控对象组成。PID 调节器的传递函数 $G_c(s)$ 为

$$G_c = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

式中 K_p 、 T_i 和 T_d 则分别为 PID 调节器的比例增益、积分时间和微分时间常数。

调节器 PID 参数应能任意加以调整，当步进电机因工况或环境等原因而使特性有所改变时，在原有调节器参数作用下输出 $y(t)$ 的响应波形将偏离理想的响应波形

$y_m(t)$ 。这时，利用专家系统以一定的规律调整调节器的 PID 参数，使 $y(t)$ 的响应波形恢复到接下来近于理想的状态。

1.2 专家系统

为使 $y(t)$ 的动态特性达到理想状态，图 1 中引入了专家系统，以模拟人类专家的知识 and 推理方法求解复杂的混合式步进电机控制问题。该专家系统由知识库和推理机构两部分组成，它首先要检测参考模型和可调系统输出波形特征参数的差值 e ， e 为广义偏差，可以表示为

$$e = \theta - \theta_m \quad (3)$$

θ 与 θ_m 可由波形辨识器求得。PID 自整定的目标就是调整可调系统调节器的 PID 参数向量，使特征参数 θ 值逐步趋近于 θ_m 。式 (9) 中的特征参数向量 θ ， θ_m 和调节器 PID 参数向量 θ_c 分别为

$$\begin{cases} \theta = [T_L, M_p, T_s]^T \\ \theta_m = [T_{Lm}, M_{pm}, T_{sm}]^T \\ \theta_c = [K_p, T_i, T_d]^T \end{cases} \quad (4)$$

式中， T_L 和 T_{Lm} 称为上升时间，它表征系统输出响应波形 $y(t)$ 和 $y_m(t)$ 的响应速度，由响应波形达到设定值阶跃扰动量 $\Delta r(t)$ 的 75% 和 25% 时间差表示； M_p 和 M_{pm} 分别为响应波形 $y(t)$ 和 $y_m(t)$ 的超调量； T_s 和 T_{sm} 为响应波形的调节时间。这些特征参数大小的确定方法如图 2 所示。

专家系统所建立的自整定规律是根据大量仿真研究得到。由仿真结果可知，当延迟 τ 在一定的变化范围内，上升时间 T_L 、超调量 M_p 和调节时间 T_s 分别跟调节器的比例增益 K_p 和积分时间 T_i 成线性关系，其参考模型输出波形如图 3 所示。

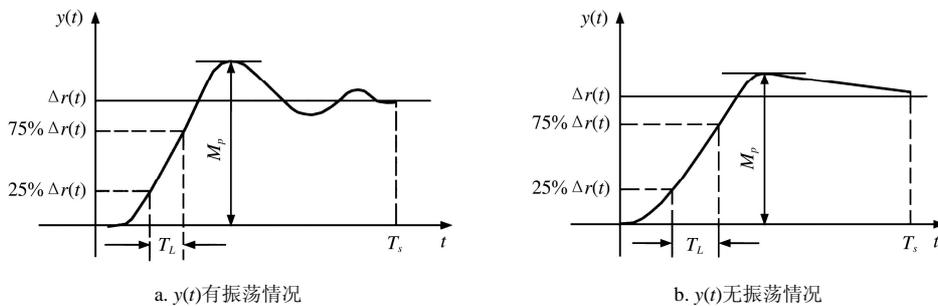


图 2 可调系统输出 $y(t)$ 的响应波形
Fig.2 Response waveform of adjustable system output $y(t)$

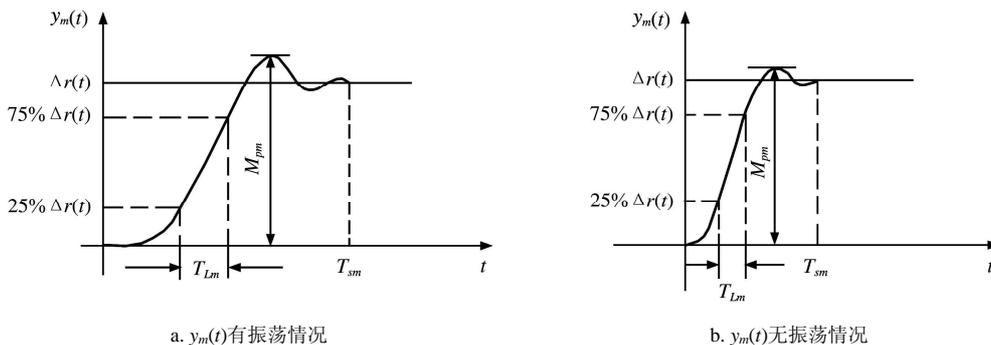


图 3 参考模型输出 $y_m(t)$ 的响应波形
Fig.3 Response waveform of reference model output $y_m(t)$

1.3 广义时变系统的辨识模型

为建立一个能模仿真实系统行为的模型,用当前可测量的系统的输入和输出预测步进电机的未来演变,以根据输入时间函数和系统的特性来确定步进电机的位置信号,使所行位置满足预先规定的要求。图 1 中引入了广义时变系统的辨识。该系统的辨识由波形辨识器组成,它是在输入和输出数据的基础上,从给定的模型类别中,确定与所研究系统等价的数学模型,以实现输出位置的快速跟踪。

1.3.1 时变参数

许多工业系统可用时变参数模型描述为^[4-6]

$$A(t,z)y(t) = B(t,z)u(t) + v(t) \quad (5)$$

$$A(t,z) = 1 + \alpha_1(t)z^{-1} + \dots + \alpha_{na}(t)z^{-na}$$

$$B(t,z) = b_1(t)z^{-1} + b_2(t)z^{-2} + \dots + b_{nb}(t)z^{-nb}$$

或

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta(t) + v(t) \quad (6)$$

$$\varphi^T(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a); u(t-1), \dots, u(t-n_a)]$$

$$\theta^T(t) = [a_1(t), \dots, a_{na}(t); b_1(t), \dots, b_{nb}(t)]$$

式中, $y(t)$ 为系统输出; $u(t)$ 为系统输入; $v(t)$ 为系统噪声(可认为是零均值和有界方差的); z^{-1} 为单位后移算子。

实际中有一类工业过程的时变参数 $\theta(t)$ 可以表示为另一些变量的函数,即

$$\theta(t) = f(\theta(t-1), t, \omega(t), \psi(t)) \quad (7)$$

式中, $\omega(t)$ 是随机噪声, $\psi(t) \in R^p$ 是由系统扰动变量构成的可测向量。如果参数 $\theta(t)$ 是以确定性(非随机性)方式变化的,则 $\omega(t)=0$ 。

把参数 $\theta(t)$ 仅是系统可测扰动量 $\psi(t)$ 的函数,即

$$\theta(t) = f[\psi(t)] \quad (8)$$

此一类时变参数系统为广义时变系统。

1.3.2 混合式步进电机对象模型辨识

二相混合式步进电动机对象模型^[3]状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{(v_a - i_a r_a - u_a)l_{bb} - (v_b - i_b r_b - u_b)l_{ab}}{l_{aa}l_{bb} - l_{ba}l_{ab}} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{(v_b - i_b r_b - u_b)l_{aa} - (v_a - i_a r_a - u_a)l_{ba}}{l_{aa}l_{bb} - l_{ba}l_{ab}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, l_{aa} 、 l_{bb} 、 l_{ab} 和 l_{ba} 是绕组的增量电感, mH, 为需要测定的电动机参数; V_a 、 V_b 为给定的条件; 仿真的输出根据需求可以获得绕组电流 i_a 、 i_b 和转子运动的参数 θ 、 ω 等。

设采样周期为 T_0 , 电枢回路电感很小, 随动系统回路公式经离散化后得到运动方程^[6]

$$\omega(t) = [1 - \frac{T_0}{J} f] \omega(t) - \frac{T_0 k}{RJ} i_f(t) \omega(t) + \frac{T_0 k}{RJ} i_f(t) u(t) + v(t) \quad (10)$$

式中, $i_f(t)$ 为励磁回路电流, A; $\omega(t)$ 为角速度, rad/s; $u(t)$ 为电枢电压, V; R 为电枢回路电阻, Ω ; J 为转动惯量, kg/m^2 ; k 为常数, 由电机参数决定; $v(t)$ 为离散化后引起的误差, 这里是

$$\begin{cases} \theta(t+1) = A\psi(t+1) \\ \omega(t+1) = \varphi^T(t+1)\theta(t+1) + v(t) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \varphi^T(t+1) = [\omega(t), u(t)] \\ A = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_0}{J} f & \frac{T_0 k}{RJ} \\ 0 & \frac{T_0}{RJ} \end{bmatrix} \\ \psi(t) = [1, i_f(t)]^T \end{cases} \quad (12)$$

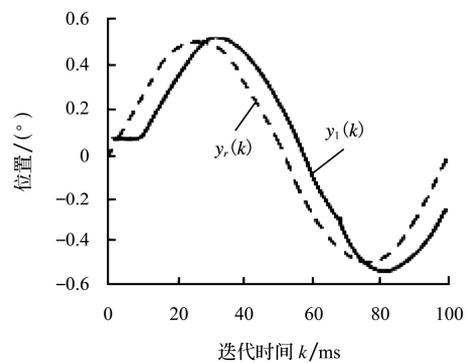
为分析简单, 假设 $i_f(t)$ 为常数。

由上述角速度 $\omega(t)$ 与时间关系则可推出位置信号 $y_m(t)$ 。

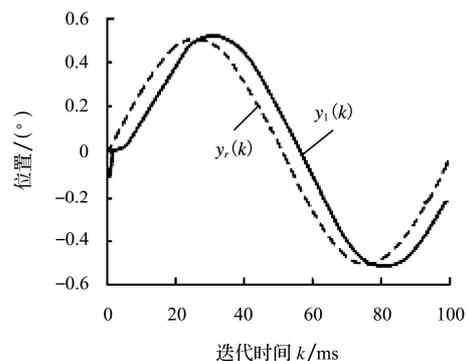
上式(9)和(10)构成二相混合式步进电动机的对象模型。

2 仿真与性能分析

设对应的电机模型参数为: $l_{aa}=11.68$ mH, $l_{ab}=1.85$ mH, $l_{bb}=1.07$ mH, $l_{ba}=0.69$ mH, $k=1.1755$, 绕组电阻为 0.4Ω , 系统采用上述自适应调节器的伺服系统控制。对正弦信号进行测试, 比较常规控制与自适应调节器控制, 其跟踪测试如图 4 所示。图中 $y_r(k)$ 为理想输出, $y_1(k)$ 为实际输出。测试信号 $f=1$ Hz, 幅值 18° , 对应电压 0.5 V。图中表明, 具有自适应调节器的伺服系统对 4 个频点信号均不同程度地降低了跟踪误差, 提高了系统的动态精度。



a. 常规控制跟踪曲线

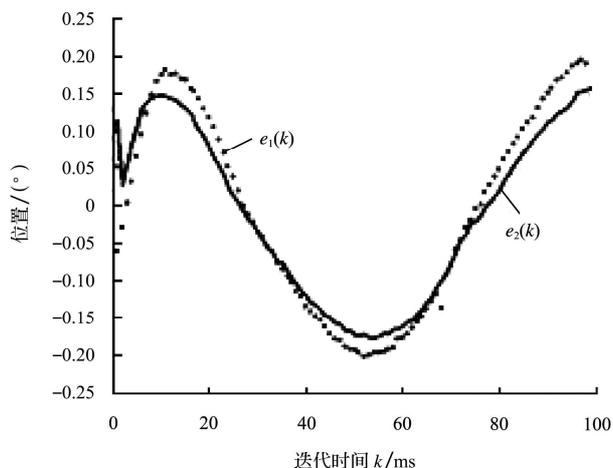


b. 自适应控制跟踪曲线

图 4 位置跟踪曲线

Fig.4 Position tracking curves

位置误差如图 5 所示。很明显具有自适应调节器的伺服系统控制提高了位置的定位精度。



注: $e_1(k)$ 为常规控制跟踪误差; $e_2(k)$ 为自适应控制跟踪误差

图 5 位置误差曲线

Fig.5 Position error curves

由于内部及外部的电磁干扰, 位置反馈信号中会出现尖峰干扰, 这必然会使位置出现偏差, 导致计算得到的电角度出现大的波动。这种波动不会产生累积误差即不影响最终的定位精度, 但会影响当时的电流给定值, 影响系统动态过程^[7-8]。自适应调节器的伺服系统控制干扰误差跟踪仿真如图 6 所示。由曲线图可见, 采用具有自适应调节器的伺服系统控制, 能有效地抑制尖峰干扰, 使系统能很好地跟踪位置输入, 系统响应速度快, 稳态精度高, 满足实时控制的要求。

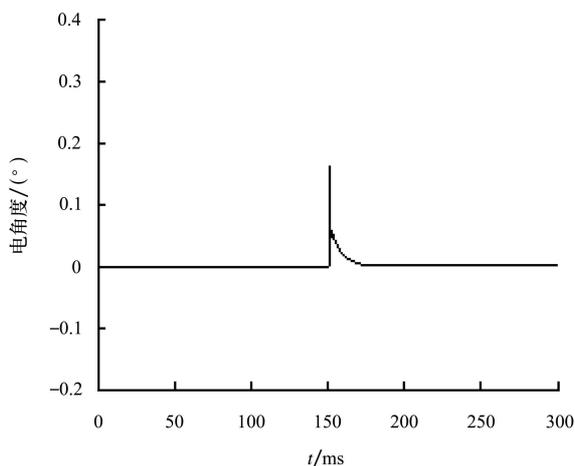


图 6 电角度尖峰干扰误差跟踪

Fig.6 Peak disturbance error tracks of electrical angle

3 结 语

本文采用的自适应调节器的伺服系统控制, 利用控

制系统响应特性以一定的规律自动调整调节器的 PID 参数, 当工况、干扰或负载改变时, 通过给定值扰动可得到对象输出波形, 由波形辨识器获得特征参数向量, 然后由专家系统求得 PID 调节器参数更新值, 使可调系统的输出响应波形逐步趋于理想的响应波形, 从而使输出能够快速、平稳而又准确地跟踪输入位置变化, 其抗扰能力强, 并具有较强性能的鲁棒性。通过模拟测试, 其结果表明, 系统对二相混合式步进电机可实现目标位置的快速和准确的定位。此方法不仅在二相混合式步进电动机伺服控制系统控制中具有良好的定位控制效果, 还可应用于测控系统中信号的采集与处理, 具有一定的工程使用价值。

[参 考 文 献]

- [1] 史敬灼, 徐殿国, 王宗培, 等. 二相混合式步进电动机矢量控制伺服系统[J]. 电机与控制学报, 2000, 4(3): 135-139.
Shi Jingzhuo, Xu Dianguo, Wang Zongpei, et al. Vectoreontrol servosystem for phasehybridste pmotor[J]. Electric Machines and Control, 2000, 4(3): 135-139. (in Chinese with English abstract)
- [2] 史敬灼, 徐殿国, 王宗培. 二相混合式步进电机模型参数的辨识[J]. 电工技术学报, 2001, 16(4): 12-15, 38.
Shi Jingzhuo, Xu Dianguo, Wang Zongpei. Model parameter identification of 2-phase hybrid stepping motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(4): 12-15, 38. (in Chinese with English abstract)
- [3] 韩光鲜, 王宗培, 程智, 等. 混合式步进电动机非线性仿真模型的精确化[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 116-120.
Han Guangxian, Wang Zongpei, Cheng Zhi, et al. Research on refinement of nonlinear simulation model for hybrid stepping motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 116-120. (in Chinese with English abstract)
- [4] 谢新民, 丁锋. 自适应控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [5] 徐湘元. 自适应控制理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [6] 史敬灼. 步进电动机伺服控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] 张莉松, 胡佑德, 徐立新. 伺服系统原理与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [8] 程国扬, 曾佳福. 快速定位伺服系统的控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 52-56.
Cheng Guoyang, Zeng Jiafu. Controller design for fast positioning servo systems[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(1): 52-56. (in Chinese with English abstract)

Adaptive regulator control of the servo system location

He Xianzhong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Industry, Zhuzhou 412011, China)

Abstract: According to the characteristics of the servo system, and based on the control strategy of generalized time varying systems (4695) of model reference adaptive, a method was realized to adjust parameters of PID controller automatically. As the condition, disturbing, loads changed, the output waveform could be obtained according to the disturbance of the given value. Therefore the vector of characteristic parameters was got by the waveform identification device, and the parameters of PID controller could be updated through expert system, and the output response waveform of adjustable system was tending to ideal waveform. Simulation results show that the output can follow the input position change rapidly, steadily and accurately, and it has strong anti-interference ability as well.

Key words: hybrid motors, self-adaptive regulator, generalized time-varying system, identification models