

Study of Giant Magnetostrictive Actuator Optimization PID Controller Based on System Identification Model

Xiaoyu Wang^{1,2}, Zhenyuan Jia², Sheng Lin¹

¹Dept. of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, China

²School of mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China

Email: walker_dlut@yahoo.com.cn

Abstract: Giant magnetostrictive actuator (GMA) can be used to produce the micro displacement motion up to order of micrometer scale. While limited to the complicated constitutive model of the Giant magnetostrictive material, it is hard to model and control the GMA system. The study employs the method of system identification, Takes the step response experimental data of GMA as system identification data to determine the system model of GMA, and analyses the credibility of the obtained system identification model. Utilizing the system identification model as the system model, It carries on the PID control for the GMA, meanwhile, it optimizes the parameters of the PID controller based on the GMA performance. The results indicates that The accuracy of GMA with optimal PID controller can be limited to 0.5 μm , The method of modeling and controlling is instructive for the GMA application which The GMM work in the linear behavior area, the method simplified the controller design and provide the enough accuracy.

Keywords: Giant magnetostrictive actuator; system identification; PID control; parameter optimization

基于系统辨识模型的超磁致伸缩微位移执行器优化 PID 控制研究

王晓煜^{1,2}, 贾振元², 林盛¹

¹大连交通大学机械工程学院, 大连, 中国, 116028

²大连理工大学机械工程学院, 大连, 中国, 116023

Email: walker_dlut@yahoo.com.cn

摘 要: 超磁致伸缩执行器可用于亚微米级的微位移运动, 但由于超磁致伸缩材料本构方程的复杂性, 使得超磁致伸缩执行器的建模与控制问题异常复杂。本研究利用系统辨识的方法, 以超磁致伸缩执行器的阶跃响应实验数据作为辨识数据, 确定超磁致伸缩执行器的系统模型, 并对辨识模型的可信性进行了分析, 同时以系统辨识模型作为超磁致伸缩执行器的系统模型对超磁致伸缩执行器进行 PID 控制, 并对 PID 控制参数进行优化, 研究结果可见优化后 PID 控制的控制精度能够达到 0.5 μm 以内。此系统模型与控制方法对于应用在超磁致伸缩材料线性工作区的超磁致伸缩执行器的精确位置控制具有很好的指导意义, 其方法简化了控制器的设计, 并能提供足够的控制精度。

关键词: 超磁致伸缩执行器; 系统辨识; PID 控制; 参数优化

1 引言

超磁致伸缩材料可制成微进给精度达亚微米级的微位移执行器。其本身具有高能量密度, 高磁机转换效率, 因此适合应用在精密超精密加工及进给领域。但超磁致伸缩材料的强非线性及受工作环境影响的特性, 使

得制成的执行器开环重复精度低, 不能满足精密加工及进给的场合, 因此研究建立高精度的控制策略是使超磁致伸缩微位移执行器产业化的关键所在。超磁致伸缩微位移执行器在工作行程较小, 轻载的情况下可近似为线性系统, 而工作在大工作行程, 重载的情况下, 则需用非线性系统对其描述。因此, 针对超磁致伸缩微位移执行器不同的工况可分别采取不同的控制律设计方法。在超磁致伸缩微位移执行器的线性工作区内实施快速简

国家自然科学基金(50775021), (51005029)资助项目

捷且成本低廉的线性控制策略,而在超磁致伸缩微位移执行器应用于重载,大工作行程的场合下实施对模型具有鲁棒性的或容差特性的控制策略^{[1][2]}。研究中则采用PID控制对执行器的线性工作区进行控制,而针对大行程的工作区域建立离散化模变结构控制大工作行程的场合下实施对模型具有鲁棒性的或容差特性控制策略。

2 超磁致伸缩微位移执行器系统的辨识

利用系统辨识的方法是最简单快速获取系统模型的方法,无需了解系统特性的细节,只需要确定模型的阶次和类型,就可以依据统计理论,由基础试验数据拟合出系统数学模型。由于系统辨识是基于统计理论建立的,因此系统辨识必须有试验数据作为基础数据。将磁致伸缩执行器看作单输入单输出系统(SISO),电流是输入量,位移为输出量。在这种假设下,采集电流输入和位移输出两个时间序列做为基础实验数据,进行系统辨识。系统辨识是指根据系统的输入和输出,在制定的一类系统中确定一个和被辨识系统等价的系统。通常系统辨识的步骤如下^[3]:

- (1) 确定输出输出变量,对输入输出实验序列进行数据处理,确定辨识和验证序列。
- (2) 选取模型类型和模型阶数,针对模型进行拟合。
- (3) 检验在输入信号的作用下,模型的输出和实际系统的吻合程度。
- (4) 检验残差的白色性。
- (5) 推理验证辨识模型和实际系统是否吻合。

2.1 辨识试验及信号处理

系统辨识要求输入信号必须充分激励过程的所有模态,但在实际的激励信号和响应信号中,这种要求是不可能实现的。应根据PID控制器工作时的系统状态,将所关注的系统特性激励出来,所辨识的系统就可以认为是我们所需要的近似系统。在本试验中超磁致伸缩微位移执行器用于精密位置控制,可采用系统开环的方波信号作为系统辨识的输入信号,响应信号作为输出信号。因为方波信号包含两个阶跃信号,且方向相反,同时方波可以分解为各频率正弦信号的叠加,具有较宽的频带,因此系统对于方波信号的激励可以满足超磁致伸缩微位移执行器工作条件下的模态特性。由于超磁致伸缩微位移执行器工作范围的线性区通常在临界场以上,因此在进行实验时对超磁致伸缩微位移执行器施加偏置22V电压,再应用15V激励电压,保证执行器工作在线性工作区内。信号的采样

间隔选取对模型辨识很重要,要求满足香农采样定理,对系统的过渡过程进行10到15次采样。通常采样周期的选取符合经验公式(1)。

$$T_0 \leq \frac{T_{95}}{10-15} \quad (1)$$

式中 T_0 为采样周期, T_{95} 表示过程阶跃响应达到稳态值95%所需要的调节时间。在试验中采样周期取0.0001秒,能够满足对采样周期的要求。系统的阶跃激励与响应信号如所示,从图中可知,系统的上升时间很短只有几十毫秒。

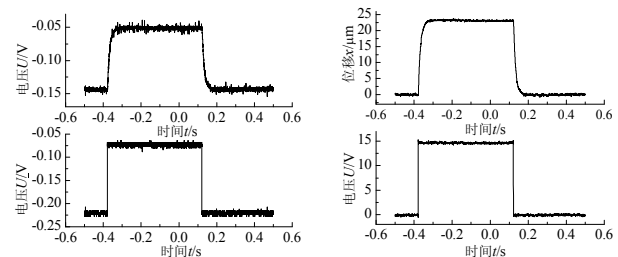


Fig.1 Signals of system identification
图 1 系统辨识信号

2.2 系统模型选择与模型参数估计

系统的参数模型须根据系统的特性来确定,考虑到超磁致伸缩微位移执行器的输入信号到输出信号之间的机理过程,出于模型简化及建模方便等方面考虑,利用线性时不变模型来近似超磁致伸缩微位移执行器的系统模型。并选用参数模型中的状态空间模型,模型阶数选用4阶。选定模型结构后,对模型参数进行辨识,模型参数的辨识方法采用PEM预测误差算法对输入输出的模型进行辨识,由于输入数据时离散时间序列,因此得出系统的离散系统状态方程:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2)$$

其中 x 是超磁致伸缩微位移执行器的端部位移,输入量 u 为外部驱动电压 U 。其中 A , B , C , D 矩阵如式(3)。

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0.9914 & 0.01206 & -0.002363 & 7.768e-005 \\ -0.01788 & 0.9084 & -0.4235 & 0.03997 \\ -0.0106 & 0.409 & 0.8545 & -0.3573 \\ -0.009003 & 0.05422 & 0.215 & 0.5123 \end{bmatrix} \\ B &= [0.0001131 \quad -0.009569 \quad -0.009937 \quad -0.01455]^T \\ C &= [-170.4 \quad -1.037 \quad 0.2913 \quad -0.05445] \\ D &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

得出的离散系统的零极点分布图如图 0.4,可见系统的极点都在单位圆以内,所以系统是稳定系统。

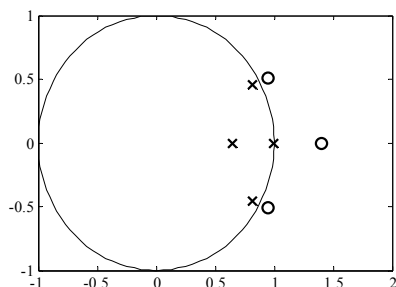


Fig. 2 Poles and zeros of discrete system
图 2 离散系统的零极点分布图

2.3 辨识模型验证

得出系统辨识模型后，须对辨识模型进行验证，检验辨识模型的准确性，试验中选用方波信号的下降沿作为验证信号，根据辨识模型，由方波信号下降沿的输入信号计算出的响应信号与实验值比较如图 0.5，仿真值与测量值吻合达 98.25%。表明辨识出的系统模型能够很好的描述系统的响应。

辨识的系统模型与试验值之间的残差如图 0.6 所示。图中给出了残差的自相关函数以及输入数据和残差的互相关函数。图中虚线表示模型的置信区间，即自相关与互相关函数在虚线以内则表明模型是可信的。从图中可知，辨识模型与验证数据的误差只与自身有关系，而且相关不明显，由于系统的辨识采用线性模型近似超磁致伸缩系统，因此误差可以接受，而输入数据与辨识模型残差的互相关函数表明输入与误差几乎不相关，表明了系统残差的白色性。说明辨识出的模型是可信的。

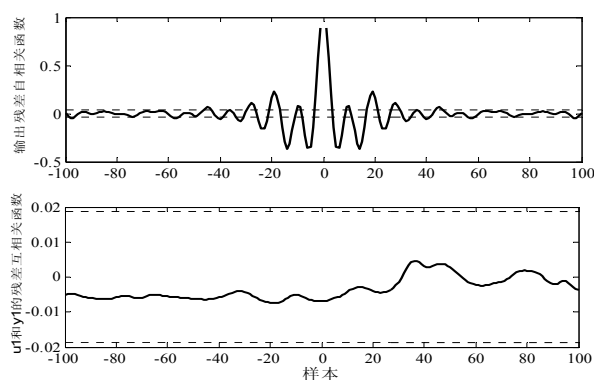


Fig.3 Error analysis of system identification
图 3 系统辨识的误差分析

2.4 系统辨识模型分析

采用离散事件序列辨识得出的是离散系统，为方便系统分析，整定控制器参数，将离散系统化为等价

的连续系统。得出等价连续系统模型，其中连续系统状态方程中的矩阵 A、B、C、D 如下：

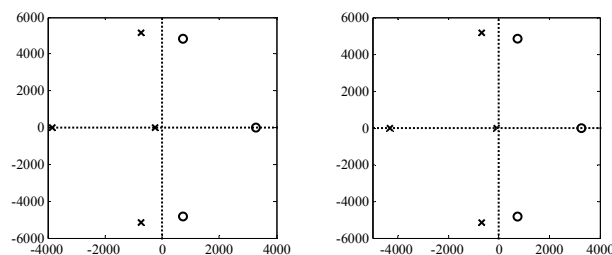
$$A = \begin{bmatrix} -85.67 & 124.3 & 3.149 & 1.16 \\ -204.4 & 14.23 & -4367 & -636.3 \\ -88.25 & 4302 & 64.03 & -4826 \\ -102.1 & 26.15 & -3003 & 5768 \end{bmatrix} \quad B = [1.811 \quad -123.2 \quad -113.8 \quad -174.2]^T$$

$$C = [-170.4 \quad -1.037 \quad 0.2913 \quad -0.05445] \quad D = 0$$

求解连续系统模型的零极点，得出系统的开环极点和闭环极点如表 1。相应零极点分布图如图 4。由表 1 和图 4 可知，模型的 4 个极点都在复平面的左半边，即所有极点都具有负实部。因此，其连续系统是 BIBO（有界输入，有界输出）稳定的，辨识系统的开环和闭环都是稳定的。

表 1 系统特征值
Tab.1 System eigenvalue

开环极点	闭环极点
-88.692	-253.589
-4305.120	-3828.174
$-690.928 + 5141.153i$	$-744.742 + 5170.353i$
$-690.928 - 5141.153i$	$-744.742 - 5170.353i$



(a)开环系统零极点 (b)闭环系统零极点

Fig.4 Poles and Zeros of system open and close loop
图 4 系统的开、闭环零极点分布图

系统的能控性和能观性也是系统的两个基本结构特征。系统能控性是指控制作用对被控系统的状态和输出进行控制的可能性。而能观性则反映系统直接测量输入输出量的量测值以确定系统状态的可能性。由系统的系数矩阵可求得系统的能控性矩阵为：

$$Q_c = \begin{bmatrix} 1.81 & -16032.71 & 78392309.70 & -227082256822.77 \\ -123.24 & 605861.66 & -1732124933.27 & 4222600852175.48 \\ -113.82 & 303200.09 & -556837919.61 & 6394654450619.68 \\ -174.24 & 659860.53 & -2878192578.71 & 14876562862076.76 \end{bmatrix}$$

系统能控性矩阵 Q_c 的秩为 $\text{rank}(Q_c)=4$ ，则系统是可控制的。说明系统的内部状态变量由任意初始时刻的初始状态开始的运动都能由输入来影响。并能在有限时间内控制到系统原点。系统的能观性矩阵为：

$$Q_0 = \begin{bmatrix} -170.39 & -1.03 & 0.29 & -0.05 \\ 14788.85 & -19939.64 & 3846.60 & -629.78 \\ 2533627.04 & 18087783.12 & 85482531.58 & -2225305.09 \\ -11231045937.19 & 368300438611.47 & -80195343676.24 & -411193992808.41 \end{bmatrix}$$

系统的能观矩阵的秩 $\text{Rank}(Q_0)=4$, 则系统是可观的。说明系统的任何内部运动状态变化都可由系统地外部输出和输入唯一的确定, 那么称系统是能观的。由系统分析可知, 辨识的系统是可控、可观、且是开、闭环稳定的系统。

3. 基于系统辨识模型的离线优化 PID 控制研究

PID控制是工业系统中典型的控制方法, 被称为比例、积分、微分控制, 是机电系统的一种最有效, 最简易的控制方法。由于其算法简单、鲁棒性好、可靠性高, 被广泛应用于过程控制和运动控制中, 尤其适用于线性控制系统^[4]。超磁致伸缩微位移执行器是典型的强非线性系统, 具有饱和和滞回等非线性特性, 但超磁致伸缩材料在提供偏置磁场的状态下, 也具有近似的线性工作区, 当执行器用于静态或准静态场合, 而且工作行程不大的情况下, 可以利用线性模型近似系统模型^[5], 在此工作情况下, 使用PID控制器不仅可以简化控制策略, 而且硬件实现简单, 参数调节容易, 成本低廉。因此研究稳定, 高效的PID控制器, 将其应用于超磁致伸缩微位移执行器具有重要的实际意义。

PID 控制器是一种线性控制器, 也是一种误差驱动的控制方法。系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成它根据给定值 $rin(t)$ 与实际输出值 $yout(t)$ 构成控制偏差:

$$error(t) = rin(t) - yout(t) \quad (4)$$

理想的 PID 控制器的时域形式为式

$$u(t) = K_p \left(error(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t error(t) dt + T_d \frac{derror(t)}{dt} \right) \quad (5)$$

其传递函数形式为

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (6)$$

式中 $K_p = K_p$; $K_i = K_p/T_i$; $K_d = K_p T_d$ 。这里 K_p 、 K_i 和 K_d 分别是比例系数, 积分系数和微分系数。 $error(t)$ 是误差, 它是指预期位移和测量位移之间的差值。通过合理调整 K_p 、 K_i 和 K_d 的值获得优化的闭环性能^{[6][7]}。PID 控制器对线性系统具有较好的控制作用, 因此, 在设

计PID控制器之前, 要确定执行器的线性系统模型, 这里根据超磁致伸缩微位移执行器的输入输出信号, 通过系统辨识的方法得到超磁致伸缩微位移执行器的线性系统数学模型, 然后进行PID控制器的仿真设计。

3.1 串联 PID 补偿器参数整定

Ziegler 与 Nichols 提出了一种著名的 PID 控制器参数整定的经验公式, 将系统的开环阶跃响应曲线近似为系统响应如式(7), 其中 L 被称为延迟时间 (delay time), T 为时间常量 (Time constant), K 为稳态值, 而 PID 调解器的各参数按照表 1 确定。

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} \quad (8)$$

式中 T 和 L 的确定可以通过最小二乘拟合的方法由系统的阶跃相应数据拟合得出。式(9)所对应的解析解为(10)。因此使用最小二乘法利用式(11)进行拟合, 拟合得出 K 值为 23, T 值为 0.00253, L 值为 0.000638。

$$\hat{y}(t) = \begin{cases} K(1 - e^{-(t-L)/T}), & t > L \\ 0, & t \leq L \end{cases} \quad (12)$$

Tab.1 Ziegler-Nichols method setting parameters

表 1 Ziegler-Nichols 参数调整表

控制器类型	KP	KI	KD
P	T/L	0	0
PI	0.9T/L	0.27T/L ²	0
PID	1.2T/L	0.6T/L ²	0.6T

利用 Ziegler-Nichols 的整定方法, 确定串联 PID 校正环节的传递函数为:

$$C = 3963.2 \times \frac{1 + 0.0012s + (0.00062s)^2}{s}$$

则可得 $KP=4.756$, $KI=3963.2$, $KD=0.00152$ 。系统串联了PID控制器后的系统得阶跃响应, 脉冲响应和零极点分布图如图 5, 由图可知系统增加了一对零极点, 构成的系统是渐进稳定的。校正后的系统具有很快的响应速度, 但是超调量过大, 接近 50%。这对于超磁致伸缩位置控制应用来说并不适合, 在精确位置控制应用场合, 过大的超调量可能引起刀具的损坏, 位置控制过大的误差及引起系统冲击, 引起系统高阶未建模动态等一系列问题, 因此这里重新优化PID参数, 根据系统响应的准则来重新优化PID 参数。

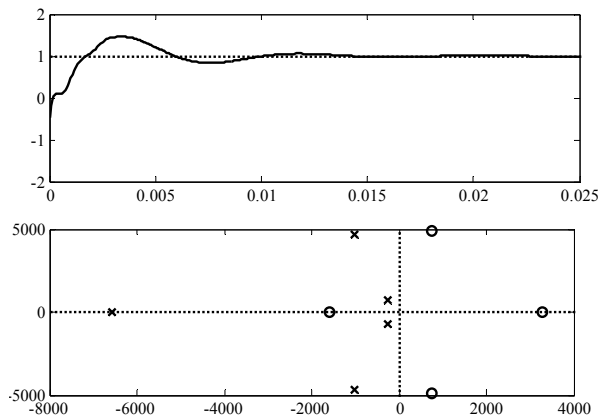


Fig. 5 characteristics analysis graph of System with PID controller whose parameters setted by Ziegler-Nichols method
图 5 Ziegler-Nichols 方法整定后的控制器的系统特性分析图

3.2 PID 控制器参数的闭环优化

根据辨识模型建立系统的闭环控制策略, 在系统输出部分加上阶跃响应特性 (Step Response Specification) 模块, 利用模型闭环控制的输出表现来对超磁致伸缩微位移执行器的PID控制参数进行优化整定。PID参数优化的Simulink仿真框图如图 6所示。

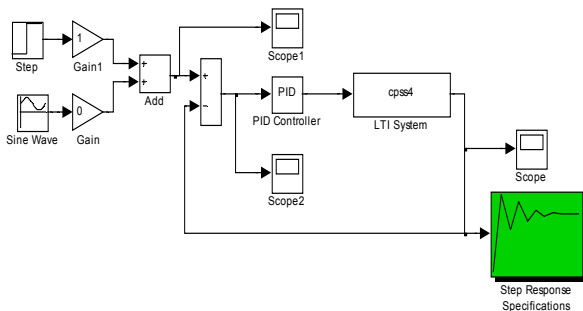


Fig.6 PID controller parameters setting simulink diagram
图 6 PID 参数优化整定 Simulink 框图

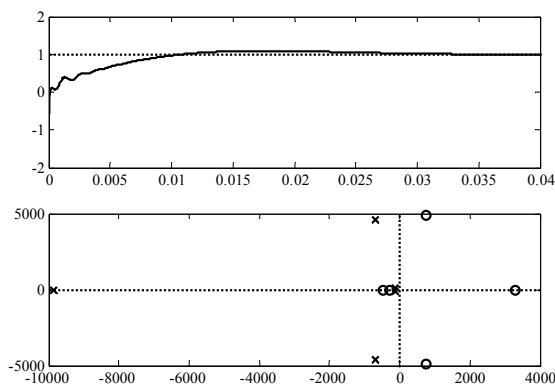


Fig.7 Charateristics analysis of system with optimized PID controller parameters
图 7 PID 参数优化整定后系统特性分析图

确定 K_p , K_I , K_D 为优化变量, 阶跃响应特性优化准则为: 初值: $K_p=4.756$, $K_I=3963.2$, $K_D=0.00152$; 上升时间小于 0.05s; 调整时间小于 0.1s; 超调量小于 5%; 给定优化准则, 阶跃响应特性(SRS)模块会根据系统的输出信号自动寻找优化结果。最终得出的迭代结果为 $K_p=1.0620$, $K_I=19.8947$, $K_D=0.0015$ 。整定后的系统阶跃响应, 脉冲响应及零极点分布如图 7所示。

3.3 优化前后控制参数比较

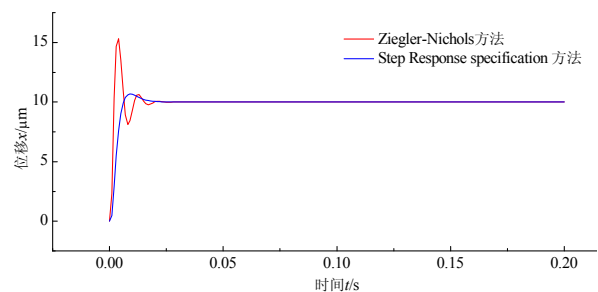


Fig.8 Step response curves of system with two groups PID controller parameters
图 8 两组参数的阶跃响应曲线

对Ziegler-Nichols整定方法确定的PID参数与使用阶跃响应特性模块 (SRS) 优化出的PID参数进行仿真比较。从图 8可见应用SRS模块优化后的控制器较Ziegler-Nichols整定方法确定的控制器减小了系统的超调量, Ziegler-Nichols方法控制的超调量高达 45.9%, 系统的上升时间较短仅有约 0.00136ms, 调整时间为 0.0133 秒, 而应用SRS模块确定的控制器超调量约为 5%, 但系统的上升时间约为 20ms。图 9图 10分别是应用Ziegler-Nichols方法整定与应用SRS模块优化的PID控制器对系统进行控制仿真图。从两图中可见, Ziegler-Nichols方法整定的PID控制器使系统的超调量过大, 但在正弦信号追踪时, 期望曲线与追踪曲线的相位差很小, 因此系统地稳态误差较小。而SRS模块优化的控制器控制系统使系统的超调量减小, 但对正弦信号的轨迹追踪时, 相差较Ziegler-Nichols方法大。从图中可见, 优化后的PID参数减小了超调, 但在正弦信号追踪上, 稳态误差要大于优化前的控制器, 原因是优化后的积分环节远小于优化前, 因此, 系统地上升时间增长, 存在相差, 由此可见在PID控制中要完全消除相差是不可能的, 因此必须在超调量和相差之间作权衡。

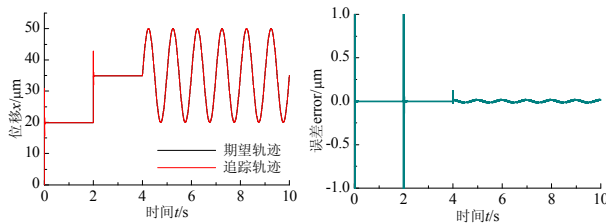


Fig. 9 Simulation of controlled system by Ziegler-Nichols method setted PID controller

图 9 Ziegler-Nichols 方法控制仿真图

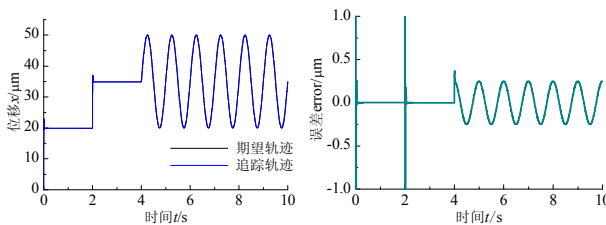


Fig.10 Simulation of controlled system by Step response specification module setted PID controller

图 10 Step response specification 模块优化控制仿真图

4. 结论

利用系统辨识方法建立了系统的状态方程,并对辨识模型进行了线性系统分析。以状态方程作为系统模型对超磁致伸缩微位移执行器设计 PID 控制器,应用 Ziegler-Nichols 方法和 SRS(Step Response Specification)模块分别整定了 PID 控制参数,对两组不同参数的 PID 控制器构成的控制系统进行了系统分析。采用 Simulink 对超磁致伸缩微位移执行器系统进行轨迹追踪仿真。从仿真结果看来,Ziegler-Nichols 方法整定的 PID 控制系统具有较快的响应时间和较小的稳态误差,但系统的超调量过大,而利用 SRS 模块整定的参

数具有较理想的超调量,但稳态误差较 Ziegler-Nichols 方法整定的系统大,响应时间也相对长。

致谢

感谢国家自然科学基金委国家自然科学基金项目(50775021)和(51005029)对本项研究的资助。

Reference (参考文献)

- [1] Marcelo J. Dapino, Alison B. Flatau and Frederick T. Calkins. Statistical Analysis of GMM Material Properties.[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2006, 17(7): 1134-1140
- [2] R.C. Smith. Smart Material Systems: Model Development, SIAM, Philadelphia, PA, 2005.
- [3] Yanjun Li, Ke zhang. The theory and application of system identification[M]. Beijing: National Defence Industry Press. 2003
李言俊, 张科. 系统辨识理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [4] Dingfang Chen, liang Shu, Quanguo Lu. Modeling And Control Simulation Of Giant Magnetostrictive Actuator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2007, 8: P12-16
陈定方, 舒亮, 卢全国等. 超磁致伸缩致动器建模与控制仿真[J]. 机械工程学报. 2007, 8: P12-16
- [5] Zhenyuan Jia, Xing Yang. Theories and methods of design- ing microdisplacement actuator based on giant magnetostrictive materials[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2001, 11: 46-49
贾振元, 杨兴. 超磁致伸缩材料微位移执行器的设计理论及方法[J]. 机械工程学报. 2001, 11: 46-49.
- [6] Jinkun Liu. Advanced PID control Simulation with Matlab[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2004
刘金琨. 先进 PID 控制 Matlab 仿真. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [7] Dingyu Xue. Computer aided control systems design using Matlab language[M]. Beijing: China machine Press, 2004
薛定宇. 控制系统仿真与计算机辅助设计. 北京: 机械工业出版社, 2004.