

模糊 PID 控制在电磁悬浮平台中的应用

许良琼, 陆新江, 李群明

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 建立电磁悬浮平台的数学模型; 讨论系统的刚度阻尼与控制系统之间的关系; 利用此关系和稳态误差确定常规 proportional integral derivative (PID) 控制参数。采用常规 PID 控制与模糊控制相结合的控制策略, 在常规 PID 调节器的基础上运用模糊推理思想, 根据不同的偏差 E 、偏差变化率 E_c 对 PID 参数 K_P 、 K_I 和 K_D 进行自校正。实验结果表明: 系统的稳态误差约为 2%; 当平台被迫向下偏移 0.5 mm 时, 系统仍能快速回到平衡位置且稳定悬浮, 说明系统具有很好的刚度阻尼特性和鲁棒性。

关键词: 模糊 PID 控制; 电磁悬浮; 刚度; 阻尼

中图分类号: TM 273.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2005)04-0631-06

Application of fuzzy-PID control to electromagnetic suspension platform

XU Liang-qiong, LU Xin-jiang, LI Qun-ming

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The mathematical model of an electromagnetic suspension platform was built, the relation between the stiffness damping of the system and the controller system was discussed, and the PID control parameters were determined from their relations and the static errors. A control method based on fuzzy and PID control was presented. The new controller is based on the traditional PID controller, and employs fuzzy reasoning to accomplish the self-adjusting PID parameters K_P , K_I and K_D according to different deviations E and variation rates of deviation E_c . The results show that the steady state error of the system is about 2%, when the platform is deviated 0.5 mm, the system can return to the balance position and suspend stably, indicating that the system has good stiffness and damping trait, and the robustness of the system is also improved.

Key words: fuzzy-PID control; electromagnetic suspension; stiffness; damping

由于电磁悬浮系统为开环不稳定系统, 要实现稳定悬浮必须采用反馈控制, 因此, 电磁悬浮控制的基本要求是实现系统的稳定控制。电磁悬浮平台能承载一定荷载的必要条件是具有适当的刚度和阻尼, 而刚度和阻尼主要由控制器决定^[1-5]。H. L. Haberman^[6] 提出电磁轴承具有类似于“浴盆”的刚度曲线。1986 年, R. R. Humphris 等^[7] 由电磁轴承系统的传递函数导出等效刚度系数和等效阻尼

系数。系统能否稳定主要由控制器决定; 系统承载能力能否提高也取决于控制器。因此, 控制器的设计必须综合考虑系统的稳定性和系统的刚度及阻尼特性^[8-14]。常规的 proportional integral derivative (PID) 控制器不具有在线调整参数的功能, 不能满足在不同偏差 E 和偏差变化率 E_c 下系统对 PID 参数的自稳定要求, 从而影响控制效果的进一步提高。模糊 PID 是一种在常规 PID 控制器

收稿日期: 2005-04-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2003CB716206)

作者简介: 许良琼(1964-), 女, 云南思茅人, 讲师, 从事机械制造与自动化研究

论文联系人: 许良琼, 女, 讲师; 电话: 0731-8836858(0); E-mail: YLQ@mail.csu.edu.cn

的基础上应用模糊集合理论建立的 PID 参数与 E 和 E_c 之间的二元关系, 并根据不同的 E 和 E_c 在线调整 PID 的 3 个参数。为此, 作者建立电磁悬浮平台的数学模型; 根据系统闭环函数的特征方程, 利用劳斯判据确定 PID 参数的取值范围; 讨论系统的刚度阻尼特性及其与控制系统之间的关系; 利用此关系及静态误差确定 PID 参数。

1 电磁悬浮平台的数学模型

电磁悬浮平台简图如图 1 所示。其中, E 型电磁铁固定, 悬浮平台和转动臂通过螺钉连接, 并可以绕转轴转动, 转轴固定。

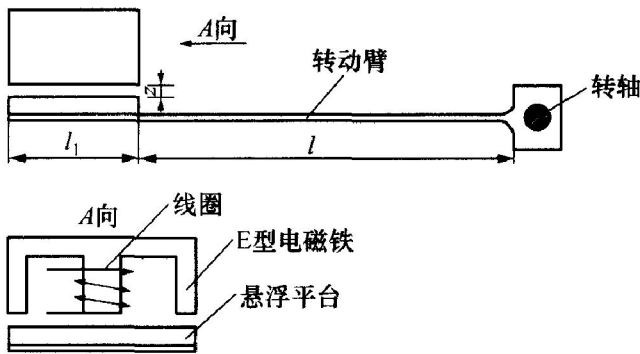


图 1 电磁悬浮平台简图

Fig. 1 Diagram of electromagnetic suspension platform

E 型铁对平台的电磁力 F 为:

$$F = \frac{\mu_0 N^2 I^2 (2A_1 + A_0)}{8z^2} \quad (1)$$

其中: μ_0 为空气磁导率; I 为线圈的电流; N 为线圈的匝数; A_1 为左(或右)边的极对面积; A_0 为中间的极对面积; z 为气隙高度。

电磁悬浮块的力学平衡方程为:

$$J \ddot{\alpha} = \frac{m_0 g l \cos \alpha}{2} - \frac{F - mg}{2} (2l - l_1) \cos \alpha \quad (2)$$

其中: J 为悬臂梁与悬浮平台的转动惯量; α 为悬臂梁与水平位置的夹角; m_0 为悬臂梁的质量; l 为悬臂梁的长度; m 为悬浮铁块的质量; g 为重力加速度; l_1 为平台的宽度。

在平衡位置 z_0 时, $a = 0$ 且 $\ddot{\alpha} = 0$, 将式(1)代入式(2)得:

$$\frac{\mu_0 N^2 I_0^2 (2A_1 + A_2)}{8z_0^2} = \frac{m_0 g l}{2l - l_1} + mg \quad (3)$$

当线圈匝数确定时, 由方程(3)可以确定平衡时的电流 I_0 。

由于转动角度 α 很小, 近似地可以认为:

$$\cos \alpha = 1, \text{ 且 } \ddot{\alpha} = \frac{\ddot{z}}{2l - l_1} \quad (4)$$

将方程(2)在平衡位置(I_0, z_0)附近利用泰勒展开式展开, 并忽略高阶项, 得到控制系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{-k_i}{s^2 - k_z} \quad (5)$$

其中: k_z 和 k_i 分别为位移刚度系数和电流刚度系数, 且

$$k_z = \frac{\mu_0 N^2 I_0^2 (2l - l_1)^2 (2A_1 + A_2)}{16Jz_0^3};$$

$$k_i = \frac{\mu_0 N^2 I_0 (2l - l_1)^2 (2A_1 + A_2)}{16Jz_0^2}.$$

2 模糊 PID 控制器的设计

根据模糊控制原理, 自适应模糊 PID 控制器以误差 E 和误差变化率 E_c 作为输入信号, 以满足不同时刻的 E 和 E_c 对 PID 参数自整定的要求, 利用模糊控制规则在线对 PID 控制器的 3 个控制参数 K_P , K_I 和 K_D 3 个参数进行调整。

2.1 常规 PID 参数的确定

图 2 所示为控制系统框图。首先, 根据系统的特征方程, 利用劳斯判据, 确定使系统稳定的参数范围; 然后通过系统的刚度、阻尼和稳态误差确定控制器的参数。外力 $F(s)$ 到气隙 $z(s)$ 的传递函数为:

$$\frac{z(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^2 - k_z + k_i G_c(s) G_w(s) G_t(s)} \quad (6)$$

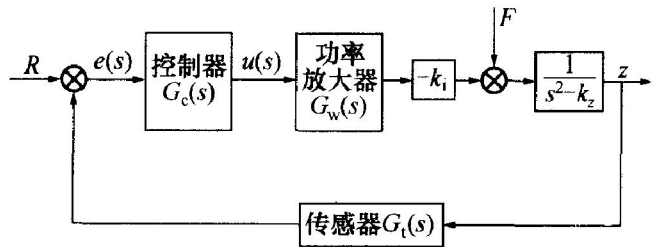


图 2 控制系统框图

Fig. 2 Diagram of control system

由振动学可得电磁悬浮平台的刚度 K 和阻尼 d 分别为:

$$\begin{cases} K = -k_z + k_i \operatorname{Re}[G_c(j\omega) G_w(j\omega) G_t(j\omega)]; \\ d = k_i \operatorname{Im}[G_c(j\omega) G_w(j\omega) G_t(j\omega)]. \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\operatorname{Re}(F)$ 表示 F 的实部; $\operatorname{Im}(F)$ 表示 F 的虚部。由于 PID 控制器中具有积分项, 若 $G(s)$ 为 n 型

系统, 加 PID 控制后系统变为 $n+1$ 型, 根据给定的稳态误差指标 e_{ss} 可由下式确定参数 K_I 。

$$\lim_{s \rightarrow 0} s^n K_I G_c(s) G_w(s) G_t(s) = \frac{1}{e_{ss}} \quad (8)$$

由方程 (6), (7) 和 (8) 可以得出 PID 的 3 个参数 K_P, K_I 和 K_D 。

2.2 模糊 PID 控制器的设计

图 3 所示为模糊自调整 PID 控制结构图。模糊控制器的输入、输出变量及其语言描述 PID 参数模糊自整定的关键是确定 PID 3 个参数的变化量 $\Delta K_P, \Delta K_I$ 和 ΔK_D 与输入偏差值 E 及偏差变化率 E_C 之间的模糊关系, 在系统运行的过程中不断监测 E 和 E_C , 再根据模糊控制原理对 3 个参数进行在线修改, 然后, 分别与 K_P, K_I 和 K_D 相加, 以满足不同 E 和 E_C 对控制参数的不同要求。鉴于以上分析, 选择系统偏差 E 及偏差变化率 E_C 作为模糊控制器的输入变量, 将其精确量模糊化, 以 $\Delta K_P, \Delta K_I$ 和 ΔK_D 3 个参数作为输出变量。定义 $E, E_C, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 模糊量的模糊子集均为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。其中: NB, NM, NS, ZE, PS, PM 和 PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中和正大。根据论域的覆盖程度和灵敏度、稳定性与鲁棒性原则, 各模糊子集均选用三角形隶属函数。

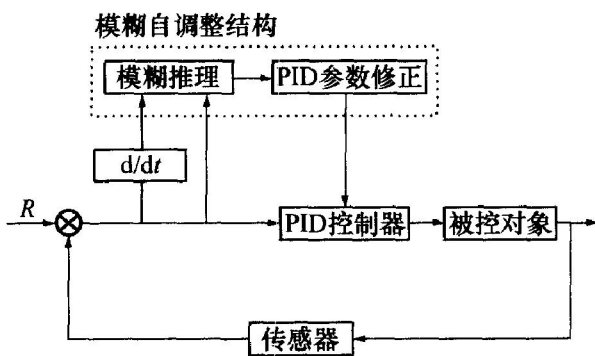


图 3 模糊 PID 控制框图

Fig. 3 Diagram of fuzzy PID

模糊控制器的核心是“IF-TNEN”形式的模糊控制规则。控制规则的选取直接决定系统控制性能的优劣, 是设计的关键。在 PID 控制中, K_P, K_I 及 K_D 具有以下特点:

a. 比例增益 K_P 增大可以加快响应速度, 减小系统稳态误差, 提高控制精度; 但是, 比例增益过大将使系统产生超调, 甚至导致不稳定。

b. 积分作用主要是消除系统静态误差, 加强积分作用, 有利于减小系统静态误差; 但是, 若 K_I 过大, 将加大超调, 甚至引起振荡。

c. 微分作用可以改善动态性能, 增大微分增益 K_D , 有利于加快系统响应, 使系统超调量减小, 稳定性增加, 但其抗敏感、抗外界干扰能力减弱; 若 K_D 过大, 则将出现超调减速现象, 调节时间增长; 反之, 若 K_D 过小, 则系统响应变慢, 稳定性变弱。

对于双输入、双输出的模糊控制器, 其控制规则可写成如下形式:

If $E = E_i$ and $E_C = E_{C_j}$ then $K_P = K_{Pij}$, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n;$

If $E = E_i$ and $E_C = E_{C_j}$ then $K_I = K_{Iij}$, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n;$

If $E = E_i$ and $E_C = E_{C_j}$ then $K_D = K_{Dij}$, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n.$

根据上述分析, 同时考虑 3 个参数之间的相互影响, 建立一系列的推理语言规则, $\Delta K_P, \Delta K_I$ 和 ΔK_D , K_D 与 E 和 E_C 的模糊关系分别如表 1, 2 和 3 所示。

根据 $\Delta K_P, \Delta K_I$ 和 ΔK_D 各个语言变量的模糊控制规则表, 可求出相应的模糊关系, 如 R_1, R_2, \dots, R_n 。因此, $\Delta K_P, K_I$ 和 K_D 的总的控制规则所对应的模糊关系 R 分别为:

$$R_P = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n = \bigcup_{i=1}^n R_i; \quad (9)$$

表 1 ΔK_P 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy rule table of ΔK_P

E	E_C						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_I 模糊控制规则表

Table 2 Fuzzy rule table of ΔK_I

E	E_C						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 ΔK_D 模糊控制规则表

Table 3 Fuzzy rule table of ΔK_D

E	E_C						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZE
NS	ZE	NS	NM	NM	NS	NS	ZE
ZE	ZE	NS	NS	NS	NS	NS	ZE
PS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

$$R_1 = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n = \bigcup_{i=1}^n R_i; \quad (10)$$

$$R_D = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n = \bigcup_{i=1}^n R_i. \quad (11)$$

应用模糊推理合成规则, 得到相应的 ΔK_P , ΔK_I 和 ΔK_D 的模糊集为:

$$\Delta K_P' = (E \times E_C) \cdot R_P; \quad (12)$$

$$\Delta K_I' = (E \times E_C) \cdot R_I; \quad (13)$$

$$\Delta K_D' = (E \times E_C) \cdot R_D. \quad (14)$$

分别计算用于确定 PID 参数调节器的输出, 即参数 $\Delta K_P'$, $\Delta K_I'$ 和 $\Delta K_D'$ 校正量的查询表; 然后, 将校正量表存入计算机内存。实时控制时, 首先根据 $|E(k)|$ 和 $|E_C(k)|$ 从表中查询校正量 $\Delta K_P'$, $\Delta K_I'$ 和 $\Delta K_D'$ 的值; 然后采用加权平均法将模糊集变换到精确的控制量, 即去模糊化, 求得最终的 ΔK_P , ΔK_I 和 ΔK_D ; 再仿真与常规 PID 的基值 K_P , K_I 和 K_D 分别相加, 从而得到在该状态下实施控制所对应的最佳 K_P , K_I 和 K_D 参数, 然后按照常规 PID 算法继续进行运算。

3 实验及分析

传感器为电涡流位移传感器, 控制器基于 DSP 的 TMS320LF2407 设计实现。被控对象的传递函数为:

$$G(s) = \frac{-186}{s^2 - 51197}. \quad (15)$$

根据系统的特征方程, 利用劳斯判据, 得到使系统稳定的 PID 参数的范围。计算结果表明, 使系统稳定的 PID 参数的范围由如下不等式确定:

$$\begin{cases} K_P > 0.83; \\ K_D(61128K_P - 51197) > K_I. \end{cases} \quad (16)$$

刚度为恒定值, 它不随频率的变化而变化, 若刚度为 15 kN/m, 当频率为 100 Hz 时, 阻尼为 186, 此时阻尼比 $\zeta = 0.71$, 静态误差为 0.05。从而得到常规 PID 的 3 个基准参数为: $K_P = 44$; $K_I = 10$; $K_D = 0.0037$ 。

模糊 PID 的论域选取如下:

$$E = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\};$$

$$E_C = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\};$$

$$\Delta K_P = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\};$$

$$\Delta K_I = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\};$$

$$\Delta K_D = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}.$$

图 4 所示为采用常规 PID 控制器时系统的位移波形; 图 5 所示为采用模糊 PID 控制器时系统的位移波形。可见, 采用模糊 PID 控制器时, 系统的位移波形起伏较采用常规 PID 控制器小, 控制精度高, 而且波形更平滑。

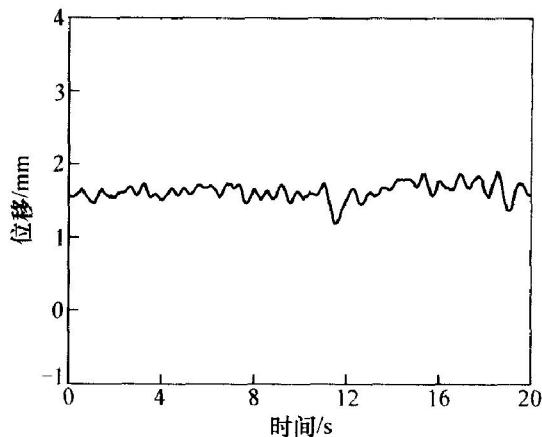


图 4 常规 PID 控制时位移波形图

Fig. 4 Displacement graph when using traditional PID controller

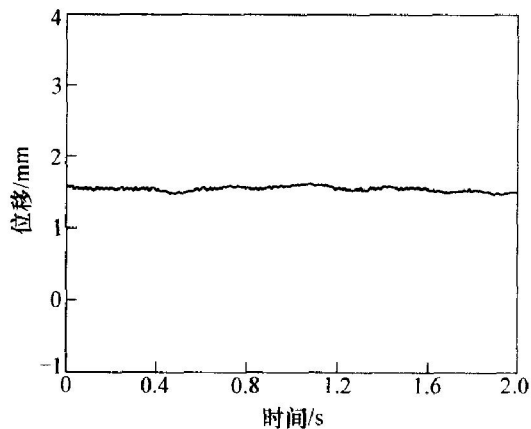


图 5 模糊 PID 控制时位移波形图

Fig. 5 Displacement graph when using fuzzy PID controller

图 6 和图 7 所示分别为系统起浮时的位移波形和停止时的位移波形。可见, 系统起浮时几乎没有超调量, 上升时间为 0.1 s, 稳态误差约为 2%; 系统停止时位移平稳下降, 从而可避免对支撑架的冲击。因此, 系统具有快速且超调量小的起浮性能和平稳的下降性能。

图 8 所示为系统受到外加干扰时的位移波形。当系统受到外加干扰时, 平台被迫向下偏移 0.5 mm,

系统仍能快速返回平衡位置且稳定悬浮,说明系统具有较强的刚度、鲁棒稳定性和较好的阻尼特性。

4 结 论

a. 利用刚度和阻尼确定的 PID 参数能够设计性能优越的控制器,而且设计简单。

b. 该控制器能使系统稳定悬浮,刚度阻尼特性好,且控制精度高,实时性好。

c. 该控制器能使系统对阶跃响应具有很好的瞬态性能和稳态性能,能够承受外加干扰,系统对外加干扰具有很强的鲁棒稳定性。

参考文献:

- [1] 赵 雷,从 华,赵鸿宾. 可控磁悬浮轴承刚度与阻尼特性研究[J]. 清华大学学报, 1999, 39(4): 96-99.
ZHAO Lei, CONG Hua, ZHAO Hong-bin. Study on stiffness and damping characteristic of active magnetic bearing [J]. Journal of Tsinghua University, 1999, 39(4): 96-99.
- [2] Changhwan C, Kyihwan P. Self-sensing magnetic levitation using a LC resonant circuit [J]. Sensors and Actuators, 1999, 72(3): 169-177.
- [3] Lin C S, Lay Y L, Chen P W. Research on magnetic bearing flywheels for attitude control of spacecraft [J]. Comput Methods Appl Mech Eng, 2000, 190: 25-34.
- [4] Mgnfred E, Wahner U. Linear magnetic bearing and levitation system for machine tools [J]. Annals of the CIRP, 1998, 47(1): 311-314.
- [5] WANG Zhang-hai, WANG De-jun. Dynamic characteristics of a rolling mill drive system with backlash in rolling slippage [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 97(1): 69-73.
- [6] Haberman H L. An active magnetic bearing system [J]. Tribology International, 1980, 12(4): 85-89.
- [7] Humphris R R, Kelm R D, Lewis D W. Effect of control algorithms on magnetic journal bearing properties [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1986, 6(33): 624-632.
- [8] 宋方臻,宋 波,刘鲁宁. 电磁悬浮轴承刚度和阻尼设计[J]. 济南大学学报, 2002, 16(2): 121-123.
SONG Fang-zhen, SONG Bo, LIU Luning. Design of electromagnetic bearing stiffness and damping [J]. Journal of Jínan University, 2002, 16(2): 121-123.
- [9] Bar A. Parametrical excitement vibration in tandem mills: mathematical model and its analysis [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129

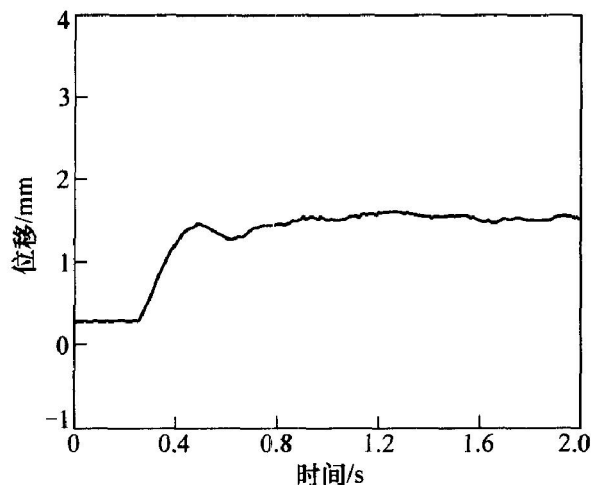


图 6 系统起浮时的位移波形图

Fig. 6 Displacement graph of system when suspended

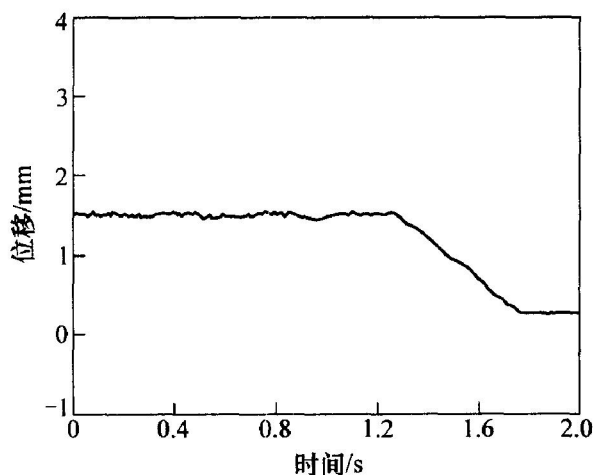


图 7 系统停止时的位移波形图

Fig. 7 Displacement graph of system when ceased

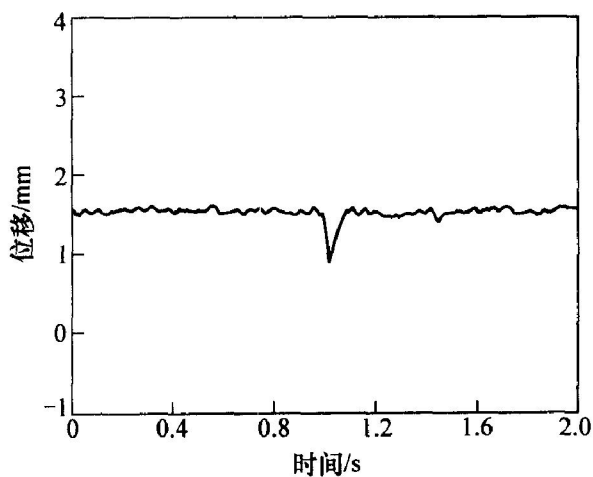


图 8 外加干扰时的位移波形

Fig. 8 Displacement graph when disturbed

- (1): 148 - 151.
- [10] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 15 - 25.
LIU Jin-kun. Advanced PID control and its Matlab emulation [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003: 15 - 25.
- [11] Gasparic J J. Vibration analysis identifies the cause of mill chatter [J]. AISE Year Book, 1991, 56(3): 25 - 29.
- [12] 潘祥亮, 罗利文. 模糊 PID 控制在工业锅炉控制系统中的应用[J]. 工业炉, 2004, 26(3): 38 - 40.
PAN Xiang-liang, LUO Li-wen. Application of the Fuzzy-PID control in industrial boiler control system [J]. Industrial Furnace, 2004, 26(3): 38 - 40.
- [13] Wu Y X, Duan J A. Frequency modulation of high-speed mill chatter [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(2): 214 - 224.
- [14] 顾生杰, 刘春娟. 基于模糊自整定 PID 控制器的非线性系统仿真[J]. 兰州交通大学学报, 2004, 23(3): 62 - 64.
GU Sheng-jie, LIU Chun-juan. Simulation of nonlinear control system based on self-adjusting PID controller of fuzzy inference [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2004, 23(3): 62 - 64.