

文章编号 1004-924X(2003) 04-0343-06

管间机器人纵向移动平台模糊控制系统

李 旻, 章亚男, 龚振邦

(上海大学 精密机械工程系, 上海 200072)

摘要: 针对核电站蒸汽发生器热交换管道自动化视频检测的要求, 研制了管间机器人, 介绍了管间机器人结构和工作原理。检测模块安装在纵向移动平台上, 纵向移动平台由步进电机驱动沿导轨做间歇直线运动。在每个管间距行程中, 步进电机必须有升速和降速过程, 这样可以防止堵转、失步并提高效率。对无法精确建模的纵向移动平台系统, 用模糊控制原理设计了步进电机的升降速曲线, 给出了模糊推理的步骤。用单片机和外围电路制作了步进电机控制器, 将设计结果用于控制程序设计, 实验证明纵向移动平台升降速过程平稳, 从导轨始端移动到末端的位置总误差在允许范围内, 管间机器人样机在此基础上实现了对蒸汽发生器模型的自动化检测。

关键词: 机器人; 模糊控制; 蒸汽发生器; 移动; 检测

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Fuzzy control system for longitudinal mobile platform of in bundle robot

LI Min, ZHANG Yanan, GONG Zheirbang

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: An in bundle robot was developed to meet the requirement of automatic video inspection on the pipes in the steam generators of nuclear power plants. The structure and principle of the in bundle robot are presented. The longitudinal mobile platform with the inspection module in place is actuated by a stepping motor moves along a guide rail intermittently. There is an acceleration and a deceleration each movement between two tube columns to prevent step loss and to improve efficiency. For the longitudinal mobile platform system which can not be set up accurately, fuzzy control theory has been applied to design the acceleration and deceleration curves of the stepping motor, and the fuzzy inference process is provided. The stepping motor controller is composed of a single chip computer and its peripheral circuits. The inference results were used to design the control program. Experiments testify that while the longitudinal mobile platform remains stable during acceleration and deceleration with total position error within the allowance, the in bundle robot has realized automatic video inspection of a steam generator model.

Key words: robot; fuzzy control; steam generator; mobility; inspection

收稿日期: 2002-10-08; 修订日期: 2003-05-16.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No. 69889501)

1 引言

蒸汽发生器是核电站的关键设备, 里面有几千根传热管固定在管板上, 传热管是一回路压力边界最薄弱的环节, 长期使用后会产生裂纹、积垢和腐蚀。为了核电站的安全运营, 必须研制管道机器人对传热管及其附近区域进行无损检测^[1-4]。

2 管间机器人和纵向移动平台

管间机器人能对传热管束和管板相交处的狭

窄区域进行自动化视频检查, 由导轨、底座、定位模块、纵向移动平台、转动平台、伸缩模块和检测模块等组成, 如图 1 所示。传热管束在管板上呈正方形均匀分布, 传热管外径 22 mm, 管间间隙 15 mm, 管束间沿管板径向有条宽 120 mm 的管廊, 如图 2。检查前将机器人通过蒸汽发生器手孔伸入蒸汽发生器, 放置在管板上, 通过定位模块实现在管廊中的定位安装。纵向移动平台安装在导轨滑块上, 与同步齿形带固联在一起, 由步进电机驱动的同轴带轮带动沿导轨移动。每移动一个管间距, 纵向移动平台便停止, 伸缩模块将检测模块送入到管束间相关区域进行检查, 检测模块收回后纵向移动平台再运动到下一位置。

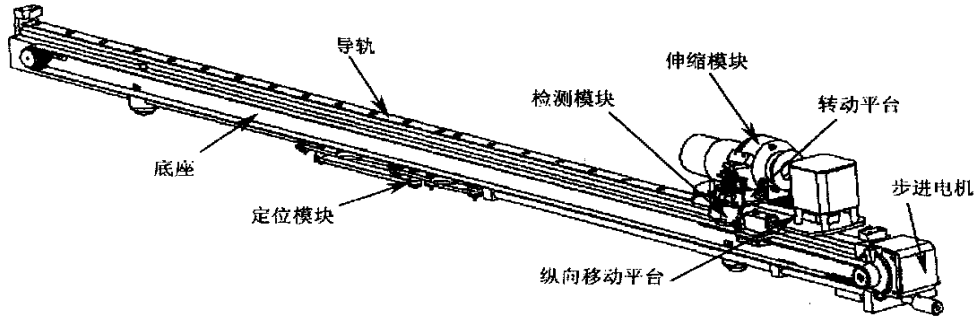


图 1 管间机器人结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tube bundle robot

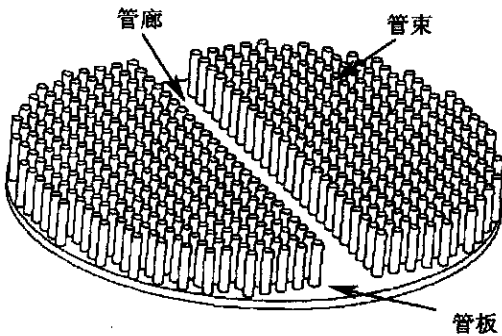


图 2 蒸汽发生器实验模型

Fig. 2 Experimental model of steam generator

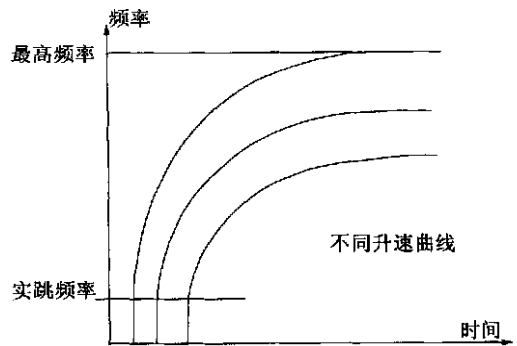


图 3 步进电机升速曲线

Fig. 3 Acceleration curves of stepping motor

3 纵向移动平台模糊控制系统

3.1 纵向移动平台升降速要求

移动平台在导轨上沿管廊纵向做间歇直线运动, 每移动一个管间距(37mm)后必须停下。由

于步进电机和移动平台具有较大的惯性, 故作用在步进电机上的脉冲信号不能变化太快, 否则由于惯性步进电机将跟不上脉冲信号的变化就会产生堵转和失步现象, 移动平台也可能产生振荡。在每个管间距行程中, 步进电机和移动平台都必

表 2 语言变量 f 的隶属度

Tab. 2 Membership value of linguistic variable f

模糊集合	f								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
F_1	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0
F_2	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
F_3	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
F_4	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
F_5	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1

3.2.3 模糊控制规则的建立

根据上述输入、输出模糊集合的划分和机器人的具体控制要求,可以建立以下 5 条模糊控制规则。 n 和 f 分别表示转化后的脉冲数和频率^[7]。

- 规则 R_1 : If $n \in N_1$, Then $f \in F_1$;
- 规则 R_2 : Else if $n \in N_2$, Then $f \in F_2$;
- 规则 R_3 : Else if $n \in N_3$, Then $f \in F_3$;
- 规则 R_4 : Else if $n \in N_4$, Then $f \in F_4$;
- 规则 R_5 : Else if $n \in N_5$, Then $f \in F_5$;

3.2.4 模糊推理过程

通过控制系统的输入输出关系可以求得系统的模糊关系。

对规则 R_1 而言,已知系统输入为

$$N_1 = 1/0 + 0.5/1 + 0/2 + 0/3 + 0/4 + 0/5 + 0/6 + 0/7 + 0/8$$

$$\text{控制量为 } F_1 = 1/0 + 0.5/1 + 0/2 + 0/3 + 0/4 + 0/5 + 0/6 + 0/7 + 0/8$$

则规则 R_1 相对应的模糊关系 $R_1 = N_1 \times F_1$ 是一个二维的模糊集,被定义为

$$\mu_{R_1}(n, f) = \min[\mu_{N_1}(n), \mu_{F_1}(f)]$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

同理可求得 $\mu_{R_2}(n, f)$ 、 $\mu_{R_3}(n, f)$ 、 $\mu_{R_4}(n, f)$ 和 $\mu_{R_5}(n, f)$ 。

总的模糊推理关系为 $\mu_R(n, f) = \bigcup_{i=1}^5 \mu_{R_i}(n, f)$, 如表 3 所示。

表 3 模糊推理关系总表

Tab. 3 Relationship of fuzzy inference

f	n								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0
1	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0
2	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
3	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0
4	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
5	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0
6	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
7	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5
8	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1

3.2.5 输出数据解模糊

模糊推理后获得的是模糊量,但执行机构获得的只能是精确量。因此必须对推理结果解模糊。本控制系统使用重心法进行清晰化运算。

即分别对 $n = 0, 1, \dots, 8$, 求 $f_n = \frac{\sum_{i=0}^8 f_{n_i} \mu(f_{n_i})}{\sum_{i=0}^8 \mu(f_{n_i})}$

可获得以下推理关系表,如表 4。

表 4 解模糊后的推理关系表

Tab. 4 Relationship after defuzzification

n_0	0	1	2	3	4	5	6	7	8
f_0	0.33	1.5	2	3	4	5	6	6.5	7.67

3.2.6 输入、输出量的量程转换

解模糊后的推理关系仍不能直接作为控制步进电机输入输出关系的物理量, 必须通过相反的

量程转换方法变成实际系统的输入量和控制量。因此不难获得表 5 所示的控制关系。

表 5 实际物理量控制关系表

Tab. 5 Relationship between pulse number and frequency

脉冲数 N	频率 F	脉冲数 N	频率 F	脉冲数 N	频率 F
0~ 151	362	456~ 606	863	911~ 1062	1425
152~ 303	581	607~ 758	1050	1063~ 1213	1519
304~ 455	675	759~ 910	1238	1214	1738

3.2.7 模糊速度控制系统结构

图 5 为纵向移动平台模糊速度控制系统结构框图。其中 K_N 、 K_F 分别表示脉冲数和脉冲频率的尺度变换和量化算子。

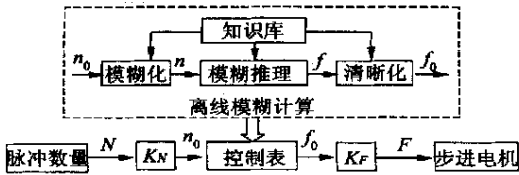


图 5 模糊速度控制系统结构框图

Fig. 5 Block diagram of fuzzy velocity control system

对于每个管间距行程的减速段, 可取总脉冲数(2 428)与当前脉冲数的差值作为输入量, 脉冲频率作为输出量, 按照上述类似方法设计模糊控制系统。这样就可获得步进电机在每个管间距行程的升降速曲线。

4 实验与结论

模糊速度控制系统的具体实现方法是, 将各个脉冲频率倒数(即脉冲周期)的最大公约数(单位为 μs) 设定为单片机定时器的溢出时间, 把已

获得的脉冲频率值转换成相应的定时器溢出循环次数常数表保存在单片机系统的程序存储器中, 程序执行时指定一个寄存器存储定时器溢出循环次数来控制脉冲频率, 根据已发出的脉冲数通过查表的方式将对应的循环次数赋值给该寄存器就可获得相应的脉冲频率^[8-9]。

纵向移动平台控制系统选用北京斯达特机电科技有限公司的 17HS101 步进电机和 SH-2H042Mb 驱动器, 驱动器工作在 20 细分状态下, 步距角为 0.09° 。驱动器的步进脉冲信号 CP 和方向电平信号 DIR 采用共阳接法。单片机选用 AT89C51, 控制电路元件有逻辑非门 74LS05, 光电耦合器 4N25 和达林顿晶体管阵列 MCT 1413 等。

将管间机器人样机在蒸汽发生器模型上进行实验, 结果表明纵向移动平台升降速过程平稳, 从导轨始端移动到末端的位置总误差在允许范围内, 管间机器人在此基础上实现了对蒸汽发生器模型自动化检测。采用将精确点模糊化为模糊单点的模糊控制系统简化了步进电机升降速曲线的设计, 解决了纵向移动平台在每个管间距行程上的升降速问题, 保证了运动精度, 提高了工作效率, 满足了管间机器人的要求。

参考文献:

- [1] 刁慎. 核电站蒸汽发生器二次侧远距离目视检查[J]. 无损检测, 2001, 23(6): 266-268.
DING X S. Remote visual inspection of the steam generator secondary side in nuclear power plant[J]. *Nondestructive Test*, 2001, 23(6): 266-268. (in Chinese)
- [2] 孙麟治, 孙萍, 秦新捷, 等. 细小管道内爬行的微机器人[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(5): 57-63.
SUN L Z, SUN P, QIN X J, et al. Mobile micro robot in small pipe[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(5): 57-63. (in Chinese)
- [3] 钱晋武, 章亚男, 孙麟治, 等. 螺旋驱动的细小管内移动机器人技术[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(4): 41-45.
QIAN J W, ZHANG Y N, SUN L Z, et al. On micro robot in small pipes based on screw motion wheels[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(4): 41-45. (in Chinese)
- [4] SUB L Z, ZHANG Y N, SUN P, et al. Study on robots with PZT actuator for small pipes[A]. *Proceedings of the 2001 International Symposium on Micromechatronics and Human Science* [C]. 2001. 149-154.
- [5] 武纪燕, 刘振东, 杨润生, 等. 现代控制元件[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.
WU J Y, LIU Z D, YANG R S, et al. *Modern control elements* [M]. Beijing: Publishing House of Electric Industries, 1995. (in Chinese)
- [6] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
SUN Z Q. *Intelligent control theories and techniques* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [7] 吴光琳, 林建平, 李从心, 等. 模糊逻辑在高速数控中的应用[J]. 机床与液压, 2000, (6): 45-46.
WU G L, LIN J P, LI C X, et al. Application of fuzzy logic to high speed numerical control[J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2000, (6): 45-46. (in Chinese)
- [8] 张友德, 赵志英, 涂时亮. 单片微型机原理、应用与实验[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
ZHANG Y D, ZHAO Z Y, TU S L. *Theories, applications and experiments of single chip computer* [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1996. (in Chinese)
- [9] 陈荣刚, 沈建华, 黄文浩. 一种用于激光加工系统的智能化精密平台的研制[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(3): 304-306.
CHEN R G, SHEN J H, HUANG W H. Design and manufacture of the intelligent precision platform for a laser processing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 304-306. (in Chinese)

作者简介: 李 旻(1974-), 男, 江西南昌人, 上海大学机电工程与自动化学院精密机械工程系机械电子工程专业博士研究生, 研究方向为机器人与微机械技术。