

文章编号 1004-924X(2002)03-0261-05

功率超声设备振幅模糊控制技术的研究

曹群,周兆英,罗晓宁,张毓笠,张东旭,徐海东
(清华大学 精仪系 微机械,北京 100084)

摘要:利用功率超声医疗设备对病人进行治疗的过程中,手术刀的振幅是一个关键的控制参数,它直接影响到手术的效果。由于手术刀的振幅随着环境的温度、时变非线性的负载、以及加压等因素的影响而变化,故此需要对振动系统的振幅进行稳定控制。首先分析了纵向复合棒大功率换能器加接刀具的振动系统的等效机电模型,根据等效机电模型提出了一种基于自调整PID模糊控制器的功率超声设备振幅控制方法。并分析了自调整PID模糊控制器的结构和原理,这种控制器同PID控制器相比较,既可以消除极限环振荡,又可以消除系统余差的优点。最后给出了一种实用的方法。实验表明采用该模糊控制技术提高了系统的鲁棒性和控制精度,为超声振动系统振幅的控制提供了新的思路。

关键词:超声吸引器;自调整PID;模糊控制器;功率超声

中图分类号:TP273.4 **文献标识码:**A

1 引言

功率超声医疗设备在治疗过程中,手术刀的振幅是十分关键的控制参数,它关系到超声乳化和切割的质量,影响手术的效果^[1-2]。在超声治疗过程中,由于振动系统的温度变化,负载时变非线性的特性,以及加压等因素的影响,使系统的振幅处于不稳定的工作状态,为了使振动系统有良好的治疗效果,需要对振动系统的振幅进行稳定控制^[3-4]。近年来随着功率超声医疗设备的发展,建立了多种控制方法,如PID控制器、自适应控制等,取得了一定的功效。但是由于建立一个输入电压、振动系统的温度、时变非线性的负载、时变的静压与振动系统的振幅之间的精确数学模型是十分复杂的问题,因此以经典控制理论、现代控制理论来解决这一问题时有一定局限性。由于此过程中具有大量的以定性形式所表达的经验知识和语言上规定的性能指标,若把人的经验知识归纳为定性描述的一组语言条件,利用模糊集合理论将它定量化,用模糊逻辑、模糊语言给出模糊算式,令控制器接受人的经

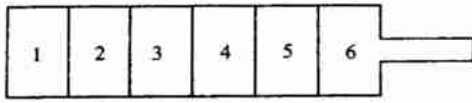
验,模仿人的控制策略,形成以模糊控制策略来控制超声振动的振幅,可以抛开复杂的精确数学模型,则有助于这类难题的解决^[5-7]。本文提出了一种基于自调整PID模糊控制器来控制超声振动系统的振幅,可解决理论建模的困难,提高系统的鲁棒性和控制精度,并取得良好的实验效果。

2 超声振动系统的结构

目前在功率超声医疗设备中大多采用纵向复合棒大功率换能器,这种结构的换能器是获得功率超声驱动源的最基本、最主要的方法。本文就以纵向复合棒大功率换能器加接刀具的振动系统(如图1)作为研究对象。它由后盖板I、压电陶瓷堆II、后盖板II、压电陶瓷堆I、前盖板和刀具组成。根据Manson机电等效模型,求得该结构机电等效图如图2所示。 R_L 为等效负载,当在压电陶瓷堆上加以一定超声频率的交变电压 U_i 时,在压电效应的作用下将在整个弹性体上产生驻波型的超声振动,在逆压电效应的作用下,压电陶瓷堆产生与振动振幅成比例的交变电压 U_o 。

收稿日期:2001-09-18;修订日期:2002-02-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 29833070)



1 Backboard 2 Ceramic 3 Backboard
4 Ceramic 5 Front board 6 Scalpel

图 1 超声振动系统

Fig. 1 Ultrasonic vibration system.

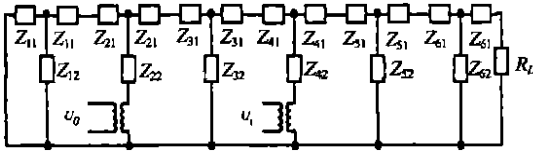


图 2 振动系统等效模型

Fig. 2 Equivalent model of the vibration system.

3 超声振动系统振幅的模糊控制

3.1 超声振动系统振幅模糊控制的结构

为解决超声振动系统中振幅控制这一问题,作者应用自调整 PID 模糊控制器实现对超声振动系统的振幅进行控制,其控制原理如图 3 所示。该结构包括超声振动系统、自调整 PID 模糊控制器、振幅反馈装置、比较环节和功放环节等,其核心部分是自调整 PID 模糊控制器,它是基于模糊知识表示和规则推理的语言型智能控制器,其基本思想是设计出一种知识表达方法和推理机制,通过理论和实验分析,并根据实际输入和输出结果应用模糊规则,产生控制振幅的信息,从而提高整个系统的鲁棒性和控制精度。

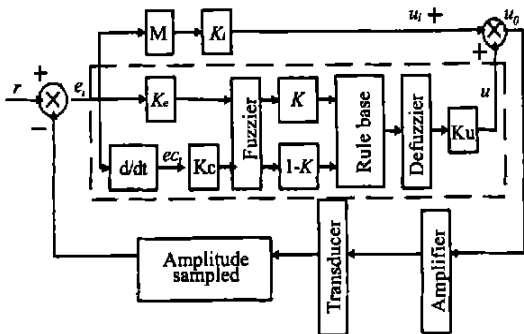


图 3 基于自调整 PID 模糊控制器的振幅控制系统

Fig. 3 Amplitude control system based on the self-modifying PID fuzzy controller.

3.2 自调整 PID 模糊控制器的设计

自调整 PID 模糊控制器如图 3 的虚框内所示,其中控制量为电压 u ,被控制量是经压电陶瓷堆检测所得到的反映输出振幅的一个电压当量与预设值的误差值,这里用 e 来表示, ec 为误差 e 的变化。 k_e 和 k_c 为误差和误差变化的量化因子, k_u 为控制量的比例因子,它们与变量的基本论域和模糊集合的论域有关。

该模糊控制器包含一个常规二维模糊控制器和一个积分控制器,其中积分控制器的输出为 $u_i = k_i e_i$,它与二维模糊控制器输出控制量 u 的叠加,作为模糊 PID 控制器的总输出,即 $u_o = u + u_i$ 。这种控制器同 PID 控制器相比,既可以消除极限环振荡,又可以消除系统余差。图中的 k 为权重系数,它是一个可调因子。一般地说,误差和误差变化在不同的控制阶段对控制器有不同影响。在误差较大时,控制系统主要目的是尽快消除误差,这时误差的权重系数取大一些;而当误差较小时,为防止超调,保持系统稳定,则误差变化的权重系数取大一些。当误差和误差变化都比较小时,两者的权重系数大致相同。在本文中,采用按误差大小自动在线调整权重系数 k 的模糊控制规则,采用这种规则符合人在控制决策过程中的思维特点^[8-9]。模糊控制规则如下:

$$U = - \langle kE + (1 - k) EC \rangle$$

$$k = 0.05 / |E| + 0.5, \quad (1)$$

其中 $\langle \rangle$ 表示对其中的数值取整。根据检测值与预设值的差值变化范围,定出输入量误差 e 的基本论域为 $[- e_{\max}, e_{\max}]$,对于相邻的两次误差 $e(k)$ 、 $e(k - 1)$,取差值得到误差的变化 $ec(k) = e(k) - e(k - 1)$,并给出其基本论域 $[- ec_{\max}, ec_{\max}]$ 。同时根据输出控制量 u 的最大可能变化范围定出基本论域 $[- u_{\max}, u_{\max}]$ 。考虑控制精度及操作经验,将误差、误差的变化、输出控制量的实际数值量化为 13 级,即取 $E = EC = U = \{- 6, - 5, - 4, - 3, - 2, - 1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。对于实时采样得到的 e 以及误差变化 ec ,将其量化为等级数值的公式如下:

$$L_e = \langle k_e e \rangle$$

$$L_{ec} = \langle k_c ec \rangle$$

其中 $k_e = 6/ e_{\max}$, $k_c = 6/ ec_{\max}$,称为量化因

子。输出 u 为:

$$u = k_u L u$$

其中比例因子 $k_u = u_{\max}/6$

k_e, k_c 和 k_u 对模糊控制系统的动静态性能有较大的影响。 k_e 越大,稳态误差越小,系统响应越快,但超调量也越大; k_c 越大,系统快速性降低,超调量减小;在上升阶段, k_u 取得越大,上升越快,但易引起超调, k_u 越小,则系统反应较慢;在稳定阶段, k_u 过大会引起振荡。结合本实验实际情况,取 $k_e = 3, k_c = 15, k_u = 0.04$ 。各个论域 E, EC 和 U 的语言变量用负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)各模糊子集描述,即 $E = EC = U = \{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}$ 。各模糊子集的隶属度分别取值如下:

$$E: PB = (0.1/ + 3) + (0.4/ + 4) + (0.8/ + 5) + (1.0/ + 6)$$

$$PM = (0.2/ + 2) + (0.7/ + 3) + (1.0/ + 4) + (0.7/ + 5) + (0.2/ + 6)$$

$$PS = (0.8/ + 1) + (1.0/ + 2) + (0.7/ + 3) + (0.2/ 4)$$

$$ZO = (0.5/ - 1) + (1.0/ 0) + (0.5/ + 1)$$

$$NS = (0.2/ - 4) + (0.7/ - 3) + (1.0/ - 2) + (0.8/ - 1)$$

$$NM = (0.2/ - 6) + (0.7/ - 5) + (1.0/ - 4) + (0.7/ - 3) + (0.2/ - 2)$$

$$NB = (1.0/ - 6) + (0.8/ - 5) + (0.4/ - 4) + (0.1/ - 3)$$

$$EC: PB = (0.1/ + 3) + (0.4/ + 4) + (0.8/ + 5) + (1.0/ + 6)$$

$$PM = (0.2/ + 2) + (0.7/ + 3) + (1.0/ + 4) + (0.7/ + 5) + (0.2/ + 6)$$

$$PS = (0.9/ + 1) + (1.0/ + 2) + (0.7/ + 3) + (0.2/ + 4)$$

$$ZO = (0.5/ - 1) + (1.0/ 0) + (0.5/ + 1)$$

$$NS = (0.2/ - 4) + (0.7/ - 3) + (1.0/ - 2) + (0.9/ - 1)$$

$$NM = (0.2/ - 6) + (0.7/ - 5) + (1.0/ - 4) + (0.7/ - 3) + (0.2/ - 2)$$

$$NB = (1.0/ - 6) + (0.8/ - 5) + (0.4/ - 4) + (0.1/ - 3)$$

$$U: PB = (0.1/ + 3) + (0.4/ + 4) + (0.8/ + 5) + (1.0/ + 6)$$

$$PM = (0.2/ + 2) + (0.7/ + 3) + (1.0/ + 4) + (0.7/ + 5) + (0.2/ + 6)$$

$$PS = (0.2/ + 0) + (0.8/ + 1) + (1.0/ + 2) + (0.8/ + 3) + (0.2/ + 4)$$

$$ZO = (0.5/ - 1) + (1.0/ 0) + (0.5/ + 1)$$

$$NS = (0.2/ - 4) + (0.8/ - 3) + (1.0/ - 2) + (0.8/ - 1) + (0.2/ 0)$$

$$NM = (0.2/ - 6) + (0.7/ - 5) + (1.0/ - 4) + (0.7/ - 3) + (0.2/ - 2)$$

$$NB = (1.0/ - 6) + (0.8/ - 5) + (0.4/ - 4) + (0.1/ - 3)$$

将量化等级数值通过隶属函数模糊化,得到误差和误差变化的模糊量 E, EC 。例如若取误差量化数量为 4,按最大隶属度原则,其对应的模糊量为 PM。依此类推,每一量化数值都对应某一模糊量,这就是模糊化过程。

根据实验及人工操作经验,考虑系统响应速度和稳定性两个因素来确定语句规则,总结出的模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rules

$U_i \backslash EC_j$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NM	NB	NB	NB

如果用 $A_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 表示 E 的模糊子集, $B_j (j = 1, 2, \dots, 7)$ 表示 EC 的模糊子集, C_{ij} 表示 U 的模糊子集,则模糊关系可写成下列通式:

$$R = A_i \times B_j \times C_{ij}$$

$$(i = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2, \dots, 7), (2)$$

根据误差与误差变化的模糊值 A, B 和规则模糊关系 R 进行合成推理运算,可以得到相应的输出控制量模糊值:

$$C = (A \times B) \cdot R. (3)$$

式中算符 \cdot 代表 sup - min 合成推理,应用式(3)计算时需结合式(1)来进行。考虑到系数已有积分控制器,解模糊时采用最大隶属度模糊决策。

这样,根据采样得到的误差 e_i 和误差变化 ec_j 可以计算相应的控制量变化值 u_{ij} ,对所有 E, EC

中元素的组合计算相应的控制量变化值,就可写出控制规则表矩阵 $(u_{ij})_{7 \times 7}$ 。实时控制过程中,根据模糊量化后的误差、误差变化,直接查表就可得控制量。

以上就是超声振幅模糊控制器算法的建立过程,这里的难点是隶属函数的建立,它依据以往的经验 and 实验获得。

4 实验结论

为了验证所设计的自调整 PID 模糊控制器的性能,在此应用先锋型超声吸引器进行了实验。图 4 为实验曲线, U_o 为与振动振幅成比例的电压, 为自调整 PID 模糊控制器作用下的跟踪轨迹, 为常规 PID 控制器作用下轨迹,结果表明采用模糊控制技术可有效提高振幅的控制精度,控制系统体现出了较强的鲁棒性,有较好的乳切割效果。

参考文献:

- [1] Cao Q, Zhou Z. Frequency tracking automatically based on self - Optimizing approach [A]. *The 4th International Symposium on Test and Measurement* [C]. 2001,1(1):299 - 302.
- [2] Shi W Y, Zhou Z Y, Zhang Y L. Optimum design of power ultrasonic transducer system using S - matrix Method[A]. *CESA '96, IMACS Multi - conference* [C]. France. 1996.
- [3] Sun D, Zhou Z Y, Liu Y H, et al. Development and application of ultrasonic surgical instruments[J]. *IEEE Trans. Biomedical Eng*, 1997,44(6):462 - 467.
- [4] 1990 任金莲,牛勇. 功率超声设备振幅自动控制的研究[J]. *陕西师范大学学报*,1998,26(2):111 - 112.
- [5] 张庆,程维明. 模糊控制在硫化温度控制中的应用[J]. *光学 精密工程*,2001,9(4):385 - 387.
- [6] 石孝文,荆涛. 混沌序列的神经网络实现[J]. *光学 精密工程*,2000,8(3):231 - 233.
- [7] 刘维东,曹光宇. 超声马达模糊控制系统的理论研究[J]. *压电与声光*,1998,20(4):272 - 275.
- [8] 高向东,黄石生. 步进电机模糊控制技术的研究[J]. *微特电机*,1999,3:3 - 5.
- [9] 李士勇. 模糊控制、神经控制与智能控制论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1996.

Study of the fuzzy control technique for the amplitude of the power ultrasonic instrument

CAO Qun, ZHOU Zhao-ying, LUO Xiao-ning, ZHANG Yu-li, ZHANG Dong-xu, XU Hai-dong

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The effect of operation is directly determined by the vibration amplitude of the ultrasonic scalper, which is a key control parameter on the treatment for the patient by using the power ultrasonic medical instrument. Because the vibration amplitude of the scalper changes with multiple factors such as environmental temperature, time variance nonlinear load and static state press, a vibration amplitude control technique is

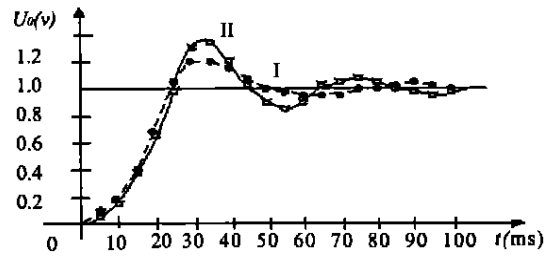


图 4 实验曲线

Fig. 4 Curves of experiments.

在超声振动系统的振幅控制过程中,当模型参数与实际参数不匹配时,应用传统控制算法会产生较大误差。本文针对被控对象的时变非线性的特点,引入了自调整 PID 模糊控制器这一调节方法,仅通过被控对象的输入/输出变量的检测,进行人工智能型模糊推理和判断,即可作出适应性的最优化控制,有效地提高了系统的控制精度,为超声振动系统振幅控制提供了新的思路。