

文章编号 1004-924X(2002)02-0135-04

功率超声系统负载的检测及模糊控制

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

摘要:功率超声医疗设备在治疗的过程中,为了取得良好的超声乳化效果,要求振动系统在不同的负载下都具有较大的输出振幅,这就要求振动系统在不同的负载下都工作在匹配状态下。文章首先分析了纵向复合棒大功率换能器加接变幅杆和刀具的振动系统的等效机电模型,然后根据等效机电模型分析了功率超声振动系统动态阻抗匹配的基本原理。同时针对功率超声系统的工作特点设计了一种动态负载在线检测方法,得到反映负载状态及其变化趋势的参数,并根据识别出的动态负载确定出模糊控制器的输入输出参数。最后给出了一种实用的模糊控制算法进行振动系统的动态阻抗匹配。实验结果表明,利用模糊控制器进行动态阻抗匹配能保证振动系统在变负载的情况下仍然获取较高的电功率和较好的超声乳化效果。

关键词:模糊控制;检测;电功率;阻抗匹配
中图分类号:TH773 文献标识码:A

1 引言

功率超声医疗设备在治疗的过程中,为取得良好的超声乳化效果,要求振动系统具有较大的振幅。在手术中由于振动系统的负载是时变的,在不调整系统的结构时,系统工作在非匹配状态,电声转换效率随负载而变,从而使振动系统的输出振幅减小^[1-2]。近年来随着功率超声医疗设备的发展,主要建立了静态阻抗匹配方法,但是时变负载要求系统进行动态阻抗匹配^[3]。如果能够进行负载的在线检测,进而对系统进行模糊匹配控制,则有助于这类问题的解决^[4-5]。因此,本文首先设计超声振动系统负载的检测方案,经过理论分析,将超声振动系统负载转化为模糊控制器的输入,然后通过模糊控制器调整系统的结构,对振动系统进行动态阻抗匹配。实验表明,这一方法使系统在动态负载下也能获取较大的电功率。

2 超声振动系统的分析

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,本文以纵向复合棒大功率换能器加接刀具的振动系统作为研究对象。根据

Mason 机电等效模型可知在谐振下振动系统的等效电路如图1虚框中所示,其中 L_1 为换能器的动态等效电感, C_1 为换能器的动态等效电容, R_1 为换能器的机械损耗阻, C_0 为压电堆的静态电容, R_L 为负载阻抗, L 为串连匹配电感。

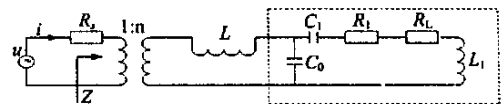


图1 超声电源的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of the ultrasonic power.

超声电源的等效电路如图1所示,源电压为 $u = Ue^{j\omega t}$, 内阻为 R_s , 其电流为 $i = Ie^{j(\omega t + \phi)}$ 。变压器的次级负载阻抗等效到初级的阻抗为:

$$Z = \frac{u}{i} - R_s = \frac{U}{I}e^{j\phi} - R_s。$$

假设系统已经在电感串连匹配和锁相环控制下工作在谐振状态,这时阻抗 $Z = U/I - R_s$ 。同时由电工原理知道当阻抗 Z 与信号源内阻 R_s 相等时,负载获得最大功率,根据这一条件可得变压器的变比为: $n = \sqrt{Z/R_s} = \sqrt{U/(IR_s) - 1}$ 。当电源内阻已知,负载阻抗可以通过在线测量响应电流进行识辨,根据识辨的负载变化,实时调整变压器变比,使振动系统在不同负载下都有较大的电功率。

3 模糊控制方法的分析

3.1 负载的检测

在治疗过程中负载最有可能为以下三种情形:空载、水负载和组织负载,不同负载下电流波形的幅值不同,若只考虑电流的正半周波形,如图 2 所示。由于负载的随机性,工作电流的波形不一,单位时间内各种电流状态交替出现的比例差别很大,因此,仅对一个电流脉冲来说,很难说它是带有何种负载,如果采用统计的方法,考察一连串的电脉冲状态,就能从宏观上把握当前的负载状态和变化趋势。

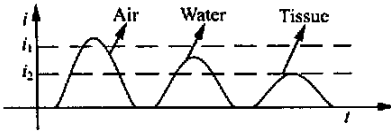


图 2 不同负载下电流脉冲

Fig. 2 Current pulse under different loads.

根据以上分析,可采用如下负载检测方法:通过设定高低两个电平门槛值,把任何一个电流脉冲区分为空载,水负载和组织负载之一。对一串电流脉冲连续统计,即得到电流状态百分率。例如,若以 1000 个电流脉冲为统计单位,将上述三种状态的百分率记为 a 、 w 、 l ,它们应满足 $a + w + l = 1$ 。根据文献[6]进一步分析可以认为:假定时间足够短,在一次统计的时间内,当空载与组织负载同时存在时,它们所占比重必然很低且基本相等,表明当前负载状态主要为水负载。若取 $e = a - l$,则有: $e > 0$,负载出现空载; $e = 0$,负载主要为水; $e < 0$,负载为组织。因此,可以认为, e 和 w 可用一个类似于图 3 所示的函数关系来表示。根据 e 对零的偏差表示出当前负载的性质。若再取 $ec(t) = e(t) - e(t - 1)$,还可得到当前负载的变化趋势, e 和 ec 能够比较客观的反映出负载变化的现象,作为模糊控制器的输入参数。

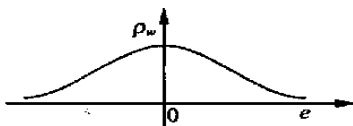


图 3 e 和 p_w 的近似函数关系图

Fig. 3 Approximate function of e and w .

3.2 模糊控制器的实现

根据以上分析,作者应用模糊控制器对超声电源变压器的变比进行控制,以解决电功率转换问题,其系统控制原理如图 4 所示。包括换能器、模糊控制器、电流反馈装置和统计环节等,核心部分是二维模糊控制器如图 4 中的虚框所示。

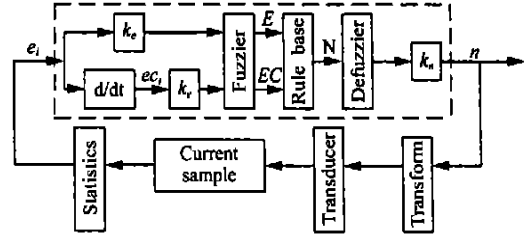


图 4 系统控制原理图

Fig. 4 Diagram of the control system.

模糊控制器的输出为变压器变比 n ,输入是经电流反馈装置检测并且经过统计得出反映当前负载状态的值,这里用 e 来表示, ec 为 e 的变化。定出输入量 e 的基本论域为 $[-e_{max}, e_{max}] = [-1.0, 1.0]$,对于相邻的两次输入量 $e(k)$ 、 $e(k - 1)$,取差值得到负载的变化 $ec(k) = e(k) - e(k - 1)$,并给出其基本论域 $[-ec_{max}, ec_{max}] = [-2.0, 2.0]$ 。同时根据输出控制量 n 的最大可能变化范围定出基本论域 $[1.0, 7.0]$ 。考虑控制精度及操作经验,将负载、负载的变化、输出控制量的实际数值量化为 13 级,即取 $E = EC = N = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

对于 e 和 ec ,其量化为等级数值的公式如下:
 $L_e = \lfloor k_e e \rfloor$, $L_{ec} = \lfloor k_{ec} ec \rfloor$;其中 $k_e = 6/e_{max} = 6$, $k_{ec} = 6/ec_{max} = 3$ 称为量化因子。输出 n 为:
 $n = k_n L_n + 4$,比例因子 $k_n = 3/6 = 0.5$ 。

各个论域 E 、 EC 和 N 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 $E = EC = N = \{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}$ 。各模糊子集的隶属度取值如下图 5 所示。

将量化等级数值通过隶属函数模糊化,可得到负载和负载变化的模糊量 E 、 EC 。根据操作经验,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。

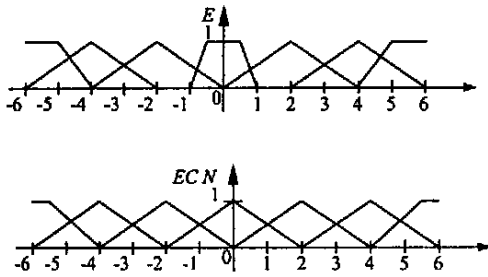


图 5 E、EC 和 N 的隶属函数

Fig. 5 Membership function of E, EC and N.

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rules

Ni ECi	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
Ei	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 N 的模糊子集, 则模糊关系可写成下列通式:

$$R = A_i \times B_j \times C_{ij} (i = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2, \dots, 7), \quad (1)$$

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:

参考文献:

[1]Cao Q, Zhou Zh Y. Frequency tracking automatically based on self-optimizing approach[A]. 4th International Symposium on Test and Measurement [C]. 2001,299 - 302.
 [2]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.
 [3]朱武,金长善. 超声换能器振动系统控制的研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,1999,4(3):46 - 49.
 [4]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.
 [5]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.
 [6]罗元丰,赵万生. 电火花加工放电状态的检测及神经模糊控制[J]. 高技术通讯,2001,11(11):72 - 74.

$$C = (A \times B) \ R, \quad (2)$$

式中算符 \times 代表 sup - min 合成推理,解模糊时采用最大隶属度模糊决策。这样,根据采样得到的负载 e_i 和负载变化 ec_j 可以计算相应的控制量变化值 n_{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 $(n_{ij})_{7 \times 7}$ 。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。

4 实验结论

我们应用先锋 II 型超声吸引器进行了实验,超声电源电压为 48V,内阻为 8 Ω 。比较在采用和不采用模糊控制器下,振动系统在不同负载下的电功率如表 2 所示。它表明了了在变负载下,负载能够获取较大的电功率。

表 2 振动系统在不同控制方法下的电功率

Table 2 The electric powers under different control means

Load	No fuzzy controller			Fuzzy controller		
	Air	Water	Tissue	Air	Water	Tissue
Ratio	1:3			1:4	1:4.5	1:5
Power(W)	52	44	39	70	72	73

本文作者针对功率超声系统的工作特点设计了一种负载检测方法,得到反映负载状态及其变化趋势的参数,并把它作为模糊控制器的输入参数,利用模糊控制器实现变压器变比的自适应控制,能保证振动系统在动态负载下也能获取较大的电功率。

Load detection and fuzzy control in the power ultrasonic system

CAO Qun , ZHOU Zhao-ying , LUO Xiao-ning , ZHANG Yu-li

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

Abstract : To acquire approved ultrasonic emulsification effects while using the power ultrasonic medical treatment instrument to cure patients , an ultrasonic vibration system is always needed to operate at a high vibration amplitude under different load conditions and to work in the electromechanical matching state under all load conditions. Firstly , the paper focuses on the equivalent electromechanical model to the power ultrasonic vibration system made up of a longitudinal composite-bar high-power transducer , a horn and a scalpel. Secondly , depending on the model , it analyzes the fundamental principles of dynamic impedance matching in the power ultrasonic vibration system. At the same time , according to the operating characteristics of the system , an approach to dynamic impedance on-line detecting has been devised and the parameters reflecting load state and change trend are obtained. Based on the identified dynamic load , the input and output parameters of the fuzzy controller can be determined. Finally , it presents an applied fuzzy control algorithm , which can be used as a dynamic impedance matching approach for the power ultrasonic vibration system. The experiment results show that when the power ultrasonic vibration system operates at the state of dynamic impedance matching by using the fuzzy control technique , the system can always have high electric power and good effects of the ultrasonic emulsification under the changing load.

Key words : fuzzy control ; detection ; electric power ; impedance matching

作者简介:曹 群(1971 -) ,男 ,浙江缙云人 ,清华大学在读博士研究生 ,主要从事医学超声研究工作 ;
周兆英(1937 -) ,男 ,江苏镇江人 ,清华大学精仪系微机械教研室教授 ,主要从事微机械研究工作。