

# 高强度聚焦超声肿瘤治疗仪控制系统 设计及功能测试

谢志行<sup>1</sup>, 李丽平<sup>1</sup>, 严加勇<sup>1</sup>, 寿文德<sup>1</sup>, 孙俊霞<sup>1</sup>, 林卫平<sup>1</sup>, 钱德初<sup>1</sup>  
王鸿樟<sup>1</sup>, 杨渊峰<sup>2</sup>, 徐叶青<sup>2</sup>, 王国民<sup>2</sup>, 沈祺茂<sup>3</sup>, 石珍龙<sup>3</sup>

(1.上海交通大学生物医学工程系,上海 200030; 2.复旦大学附属中山医院,上海 200032;

3.海鹰企业集团有限责任公司,无锡 214061)

**摘要:**用高强度聚焦超声(HIFU)治疗肿瘤近年来受到越来越多的关注。目前已有的 HIFU 肿瘤治疗仪采用的是湿式设计,将病灶部位浸入水槽内,探头由下至上进行治疗。这样不仅不方便且对一些特殊部位——如颈部无法进行治疗。文章介绍的 HIFU 肿瘤治疗仪成功采用干式设计,将探头放入一水囊内,由上至下经水囊耦合对病灶区进行治疗,增加了对控制系统的控制精度、速度与可靠性的要求。文章首次设计了一块 DSP 电路板作为可独立运行的 HIFU 前端控制器,在该板上集成了控制步进电机、脉冲编码器、超声功率放大器及实时控制策略运算等 HIFU 肿瘤治疗所有控制功能。DSP 板可通过 RS232 接口与后端 PC 主机通讯,并经过光电隔离、电平转换后与步进电机等外围器件连接。该仪器已通过了功能测定,并已进行了离体试验,测定与试验结果令人满意。

**关键词:**高强度聚焦超声(HIFU);肿瘤治疗仪;控制系统

**中图分类号:** TB559

**文献标识码:** A

## Design and test of hardware controller for a tumor therapy instrument using high intensity focused ultrasound

XIE Zhi-xing<sup>1</sup>, LI Li-ping<sup>1</sup>, YAN Jia-yong<sup>1</sup>, SHOU Wen-de<sup>1</sup>, SHUN Jun-xia<sup>1</sup>, LIN Wei-ping<sup>1</sup>  
QIAN De-chu<sup>1</sup>, WANG Hong-zhang<sup>1</sup>, YANG Yuan-feng<sup>2</sup>, XU Ye-qing<sup>2</sup>, WANG Guo-ming<sup>2</sup>  
SHEN Qi-mao<sup>3</sup>, SHI Zhen-long<sup>3</sup>

(1. Department of Biomedical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Zhongshan Hospital and Fudan Medical School, Shanghai 200032, China;

3. Haiying Group Ltd., Wuxi 214061, China)

**Abstract:** Treatment of tumor with high intensity focused ultrasound (HIFU) is a new method developed in recent years, which has received increasing attention. Presently available tumor therapy instruments treat patients by immersing the target into water and with the transducer deployed beneath the target and emitting upward. This is not only inconvenient, but also impractical in treating certain special body parts such as cervix. In this paper, a HIFU tumor therapy instrument is designed by placing the transducer into a water bag on top of the patient and transmitting downward. This requires higher precision, speed and reliability of the control system. A DSP based board is developed as an independent front-end controller. All the functions needed by the instrument including control of step-motors, pulse-coders and ultrasound power amplifiers, and computation of real-time control-strategy are integrated on the board. The DSP board communicates with the host PC via a standard RS232 interface, and is connected with peripherals such as step-motors, pulse-coders, etc., via photoelectric isolation and voltage conversion circuits. The instrument has passed both laboratory test and vitro-test in hospital with satisfactory results.

**Key words:** HIFU; tumor therapy instrument; hardware controller system

## 1 引言

肿瘤的超声热疗包括温热疗法(hyperthermia)与高强度聚焦超声(high intensity focused ultrasound)两种。超声温热疗法的治疗原理是基于加温

时细胞缓慢死亡的现象<sup>[1]</sup>。现在,一般用于人体肿瘤治疗的加热温度是 43℃~46℃ 之间<sup>[2]</sup>,并维持较长的时间(每次治疗一般为 30min~60min)。高强度聚焦超声的概念于 1942 年由 Lynn<sup>[3]</sup> 首先提出;此后, Fry 提出用高强度聚焦超声进行外科手术。1956 年 Burov 首次提出:治疗癌症时,短时间高强度超声辐射比长时间低强度超声辐射效果更好。其原理是:通过声聚焦在治疗区产生高能量,从而使病

收稿日期:2002-03-01;修回日期:2002-09-07

作者简介:谢志行(1971-),男,江苏无锡人,副教授,主要从事生物医学超声、生物光学、声空化与声致发光领域研究。

变组织温度在短时间内升高至 70℃ 以上,使病变组织直接消融。

在肿瘤的热疗中,理想的状况是,精确地定位所需要加热的区域,迅速彻底地杀灭肿瘤,尽量少甚至不伤及周围的正常组织。这一点,温热疗法难以做到,而高强度聚焦超声(HIFU)却有着得天独厚的优势。在肿瘤的热疗方面,与微波和射频相比,超声具有穿透性好、能加热深部大块肿瘤、脂肪不过热、测温容易、聚焦好等优点。

HIFU 治疗仪目前有湿式和干式两种,湿式装置是将人体待治疗部分浸入水中,而在干式装置中,人体及待治疗部分都不浸入水中,声能由水囊耦合进入人体内。重庆医科大学采用湿式装置制造出了 HIFU 肿瘤治疗仪,临床上反映不错<sup>[4,5]</sup>。本文所述

为采用干式装置的高强度聚焦超声对肿瘤进行消融治疗,这在国内外还未见相应的文献报道,为首次采用。由于干式装置进行高强度聚焦超声肿瘤消融治疗面临系统结构复杂、定位技术要求高等难题,所以整个系统的控制部分就显得尤为重要。由于 WINDOWS 操作系统的非实时、非安全性,本文首次采用一块可独立运行的 DSP 板作为前端控制器对超声探头的运动和定位以及超声功率放大器进行控制,充分考虑了系统的安全性和实时性的要求。系统的中央控制台由 PC 机实现,操作人员通过 PC 机上的人机交互界面对整个系统进行控制。DSP 板与 PC 机之间通过标准 RS232 串行口通讯,DSP 板与步进电机以及脉冲编码器之间的连接通过外围接口电路实现。

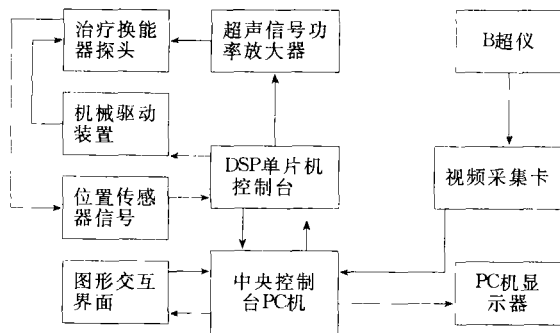


图 1 HIFU 肿瘤治疗仪系统框图

## 2 HIFU 肿瘤治疗仪系统结构

本文所述的 HIFU 肿瘤治疗仪系统结构框图如图 1 所示,下面就 DSP 单片机控制台部分和 PC 机中央控制台部分分别加以介绍。

### 2.1 DSP 单片机控制台

此方案采用美国 TI(德州仪器)公司的 TMS320F206 DSP 芯片作为单片机控制台的微处理芯片。TMS320F206 DSP 为增强型 Harvard 结构,具有程序、数据和 I/O 三个相互独立的存储空间。

DSP 控制台作为前端控制器,是整个控制系统

较为核心的部分,DSP 单片机控制台的原理框图如图 2 所示。用它来实时控制换能器探头上下、左右、前后、旋转等四个方向的运动,即 X、Y、Z、 $\theta$  四个自由度上的运动。控制信号由中央控制台根据实际需要发出,并由 TMS320F206 DSP 实时处理后通过 16 通道中的 12 路数字量输出端口输出,经光电隔离后,再经电平转换及限位保护等外围电路,最后到达电机驱动模块,再由电机驱动模块驱动步进电机控制探头机械运动。对探头运动方向的控制由于采用了 DSP 智能控制,故可让探头沿某一角度平面(如 B 超平面以及与 B 超平面垂直的平面)运动。同时,四自由度探头定位信号由脉冲编码器输

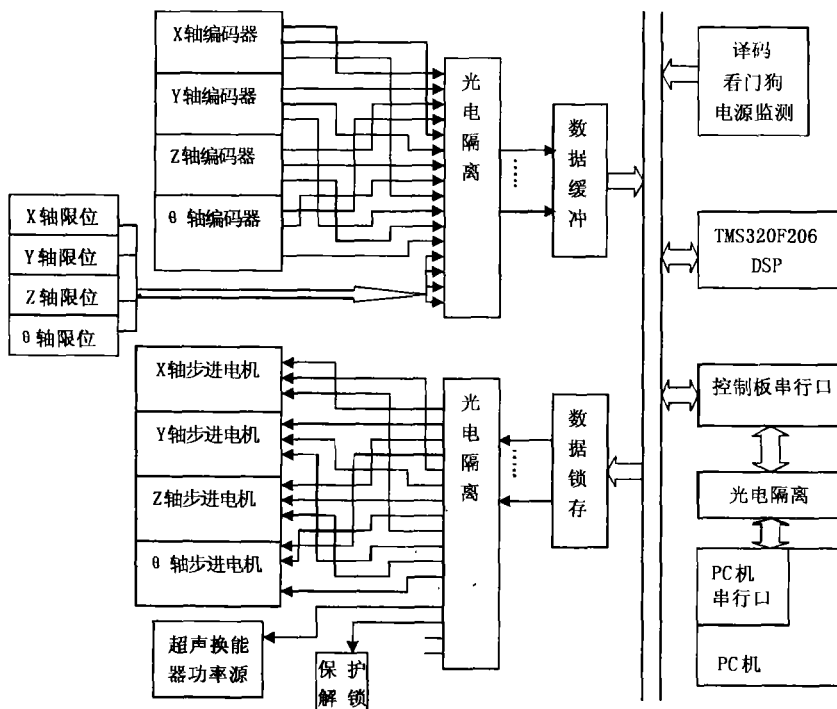


图 2 DSP 单片机控制台原理图

出,经电平转换电路后,通过 DSP 板的数字量输入端口输入,再经光电隔离后输入 DSP 控制板的数据缓存区。TMS320F206 DSP 对输入的定位信号进行实时处理,转换为探头四自由度的位置坐标值,并通过串行口输入中央控制台,在人机交互界面上显示出来。DSP 板还控制了超声功率源,使其发射脉冲组的个数以及每组脉冲的高电平数( $T_{on}$ )和低电平数( $T_{off}$ )均可根据具体需要而定。考虑到系统需要绝对的安全保障,机器设有保护开关和解锁开关,在紧急状态下使用。

## 2.2 中央控制台

操作人员是通过中央控制台对整个系统进行控制的。中央控制台由 PC 机平台实现,在其上编写了友好的图形人机交互界面,探头位置可在空间三维及剖面视图上进行观察。探头可在上、下、左、右、前、后及旋转等各方向上接受控制。在整个人机交互界面上,B 超探头的所有运动均可直观地显示出来。图形界面上还可以显示对功率源发射脉冲组数、每一个脉冲组的  $T_{on}$  以及  $T_{off}$  的设定与控制。同时,我们还直接利用 PC 机控制视频采集卡,采集 B 超成像仪的视频信号,在 PC 机上实现了对 B 超图像显示、冻结及存储等功能。各种功能控制都可方便地由鼠标和键盘进行操作,整个界面直观、友好,易于使用。PC 平台软件采用多线程编程技术,支持允许多处理器操作系统的 SMP 功能,可选配多处理器计算机来提高系统的处理能力。

## 3 系统各部分之间的通讯或接口

### 3.1 中央控制台与 DSP 控制台之间的通讯

操作人员通过中央控制台向 DSP 控制板发送控制命令,由 DSP 板实现对系统的控制功能。因此,中央控制台与 DSP 板之间的通讯是不可或缺的。在此方案中,中央控制台与 DSP 控制板之间采用标准 RS232 串行口进行通讯。中央控制台与 DSP 板之间采用特定协议传输信息,协议中规定了通讯失调保护与校验等功能,提高了系统可靠性和实时性,也节省了 PC 机总线带宽。通讯命令协议包含了初始化协议、控制步进电机协议、发射脉冲协议、反馈位置协议、限位保护协议、失调同步协议等功能。

### 3.2 DSP 控制板与步进电机外围接口电路原理框图及概述

作为控制系统核心部分的 DSP 控制台通过 RS232 接口与中央控制台相

连以接收操作人员的控制指令,同时又通过外围接口电路与步进电机和脉冲编码器相连,对探头的移动进行控制以及接收探头的位置信息(见图 3)。

DSP 通过步进电机完成对换能器探头的控制。DSP 的输出与步进电机驱动模块的输入之间以及脉冲编码器的输出与 DSP 的输入之间的电平不匹配,需进行电平转换。

DSP 的输出与步进电机驱动模块的输入之间的电平转换是通过电阻分压实现的,并在其后加上跟随器以实现阻抗的匹配。

在设计的过程中,充分考虑了安全的要求,在电路中加了限位保护。

## 4 系统测试结果

我们的系统在实验室内已进行了功能测试,并进入了临床试验阶段。

控制系统方面,我们在实验室利用数字示波器对发射脉冲的高低电平宽度及脉冲数进行了验证,其结果非常精确与稳定,时间精确度可达到 0.001ms,并不随使用时间而发生精确度下降。利用百分表测定了计算机控制移动扫描的单向移动误差和正反行程内的回差,各扫描方向为一组,每组包含了 60 次测量数据。测量结果为单向移动误差平均值为  $3 \times 10^{-6}$  m,偏差为  $2 \times 10^{-5}$  m。正反行程内的回差平均值为  $3 \times 10^{-4}$  m,偏差为  $1 \times 10^{-4}$  m。调试结果令人满意,达到了设计要求。

对于整个系统,我们在实验室用猪肝做了试验。如图 4 所示,从对猪肝的解剖结果可以看出换能器焦点处的焦斑,而猪肝的表面并没有受到明显损伤。基本达到了我们对焦点处进行消融的目的。

我们在上海市中山医院对透明细胞型肾腺癌进行了离体试验。如图 5 所示,透明细胞型肾腺癌经治疗仪热疗后,受热区肿瘤结构基本消失,呈嗜碱性均质无结构物,部分区残留少量细胞核影。受热边缘区细胞变性,凝固性坏死。癌内丰富的血管网破坏,血管壁透明性血栓形成。周围区,肾小球萎缩,肾小管细胞膨胀,小血管内透明血栓形成。试验的结果基本达到了对肿瘤组织进行破坏的目的。

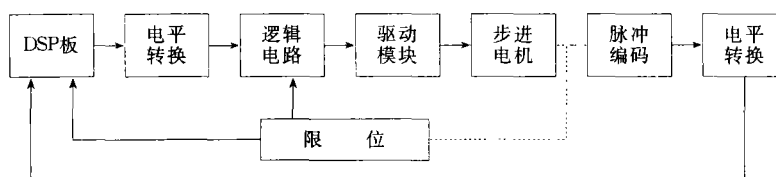


图 3 步进电机外围接口电路原理框图

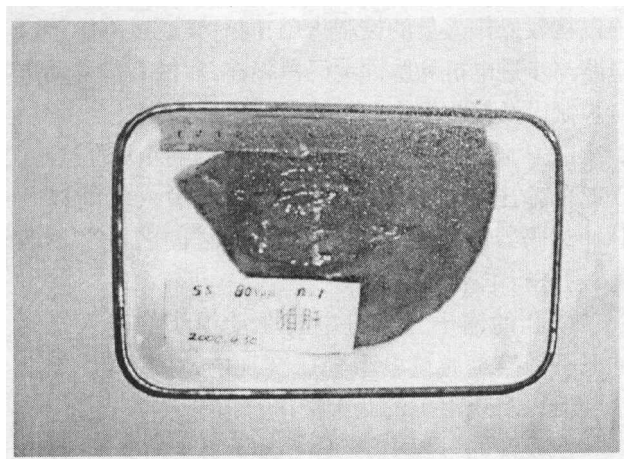


图4 离体猪肝试验结果:用上述肿瘤治疗仪系统对猪肝进行试验,在猪肝内所形成的消融区解剖图

参考文献:

- [1] Hahn. G M. Hyperthermia for the engineer: a short biological primer[J]. Biol. Med. Eng. ,1984,31(1):3-8.
- [2] 金井宽. 温热疗法之难点与展望[J]. 国外生物医学工程分册,1993,16(3):144-150.
- [3] Lynn J G, Zwemer R L, Chick A J, et al. A new method for the generation and use of focused ultrasound in experimental biology[J]. J. Gen. Physiol. ,1942,26: 179-193.
- [4] Wang Zhi-biao, Wu Feng, Bai Jin, et al. The concept of biological focal field(BFF) and the Therapeutic HIFU Dose [A]. Proceedings of First International Workshop on the Application of High Intensity Focused Ultrasound in Medicine[C], 2001:61-64.
- [5] Chang Shu-fang, Gu Mei-li, Wang Zhi-biao, et al. The experiment study of high intensity focused ultrasound in the

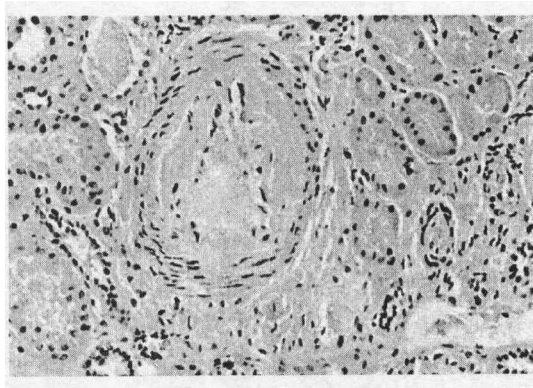


图5(a) 受热及受热边缘区结构

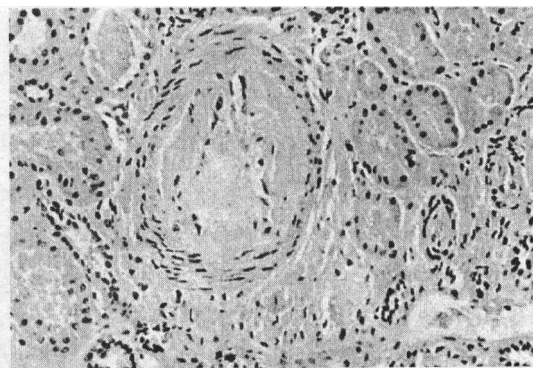


图5(b) 周围区结构

图5 HIFU 肿瘤治疗仪临床离体试验结果:透明细胞型肾腺癌用治疗仪热疗后的受热及受热边缘区与周围区结构

treatment of uterine leiomyoma[A]. Proceedings of First International Workshop on the Application of High Intensity Focused Ultrasound in Medicine[C], 2001:64-66.

(上接第 142 页)

参考文献:

- [1] Tachiana. Mechancement of cell killing of HL-60 cells by ultrasound in the presence of the photosensitizing drug photofrin II [J]. Cancer Letters,1993,72 (2):195-199.
- [2] Umemura Shin-inchiro. Enhacement of ultrasonically induced cell damaged by A Ga-Porphyrin complex, ATX-70 [J]. JPN. J. Cancer Res. ,1993,84(2):582-588.
- [3] Yumita Nagahiko. Hematorophyrin as a sensitizer of cell

damaging effect of ultrasound[J]. JPN. J. Cancer Res. , 1989,80(1):219-222.

- [4] Umemura Shin-inchiro. Mechanism of cell damaged by ultrasound in combination hematorophyrin[J]. JPN. J. Cancer Res. ,1990,81(3):962-966.
- [5] Umemura Shin-inchiro Sonochemical activation of hematorophyrin: A potential modality for cancer treatment[C]. America, IEEE Ultrasonic Symposium, proc. ,1989. 955-960.
- [6] 马玉英. 声化学激活血卟啉对 S<sub>180</sub>肿瘤作用的研究[J]. 中国生物医学工程,1995, 14 (4):374-377.