

文章编号: 1671-7104(2007)01-0005-05

## 数字人体的针灸力感虚拟现实初步研究

【作者】程卓<sup>1</sup>, 王海生<sup>2</sup>, 闵友江<sup>2</sup>, 严振国<sup>2</sup>, 张虹<sup>1,3</sup>, 庄天戈<sup>1</sup>

1 上海交通大学生物医学工程系 (上海, 200240)

2 上海中医药大学解剖教研室 (上海, 201203)

3 美国普渡大学电气工程与计算机科学系

【摘要】讨论了虚拟现实技术在三维数字人体和穴位研究中的应用。在融合了腧穴组织结构信息的三维数字人体基础上, 根据各组织的物理特性, 分析针灸过程中针体与组织的相互作用力, 以及部分行针模式中的力感特征, 建立力学模型模拟针体受力, 并通过力反馈设备真实地传递给操作者, 为视觉和触觉信息融合一体的三维针灸人体建模作了初步探索, 为针灸教学提供了一种动态的仿真手段。

【关键词】三维数字人体; 针灸; 触觉模型; 力反馈

【中图分类号】R318.6

【文献标识码】A

## Preliminary Study on Force Feedback of Acupuncture in Virtual Reality Based on the Visible Human

【Writers】CHENG Zhuo<sup>1</sup>, WANG Hai-sheng<sup>2</sup>, MIN You-jiang<sup>2</sup>, YAN Zhen-guo<sup>2</sup>, Hong Z. Tan<sup>1,3</sup>, ZHUANG Tian-gē<sup>1</sup>

1 Department of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240

2 Anatomy Teaching Section, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai, 201203

3 Department of Electrical Engineering and Computer Science, Purdue University, Indiana, 47907-2035, U.S.A.

【Abstract】This paper discusses the application of virtual reality technology in the 3-D visible human body and acupuncture research. Based on the 3-D visible human fused with the localization information and hierarchy of acupoints, the paper analyzes the force against the needle and haptic rendering during the needle manipulation according to the physical properties of different tissues. A haptic model is constructed to demonstrate the force behaviors during acupuncture, and the force will be produced and passed to the manipulator by a force feedback device. It enriches the contents of 3-D visible human project, provides a dynamic simulation instrument for acupuncture teaching, and supplies a platform for acupuncture research.

【Key words】3-D visible human, acupuncture, haptic model, force feedback

美国可视人计划 (VHP) 数据的问世, 标志着现代医学影像学的发展进入了一个新的阶段, 人们已经能够系统地获取同源的 CT、MRI 和人体解剖切片数据, 从而建立一个具有丰富医学影像内容的三维人体数据模型<sup>[1][2]</sup>。以此为素材, 德国汉堡大学开发的 VOXEL-MAN 软件, 充分运用近二十年来在三维数据可视化领域的成果, 建立了带有完备的知识库系统的三维人体可视化模型<sup>[3]</sup>。依托德国汉堡大学 VOXEL-MAN 开发平台, 根据对穴位结构和三维数字人体研究的工作积累, 我们在虚拟人原始数据中融合了更细化的组织分割 (主要为肌肉、血管、神经) 数据以及腧穴定位和区域的层次结构数据, 为下一步的针灸力学研究奠定了模型基础。结合腧穴信息的三维数字人虽然有丰富的视觉信息, 但缺乏触觉方面的感知, 这无疑禁锢了数字虚拟人在针灸临床研究和针灸教学上更广泛的应

用。在虚拟现实 (virtual reality) 中, 在有视觉反馈的同时加入力反馈来模拟真实世界中的触觉, 能够极大增强操作者的真实感。力反馈的研究一直是虚拟现实技术的前沿之一。在力反馈与数字人结合方面, 国际上以德国汉堡大学为最早<sup>[6]</sup>, 他们尝试虚拟触觉的研究, 把力反馈融入颞骨手术系统中, 通过探头与虚拟物体表面的采样点的作用情况来计算力反馈的大小, 对颞骨手术进行了模拟。但他们的研究对象是颞骨, 力学参数易求, 其模型相对简单, 不能用于软组织, 更没有涉及穴位。本文的研究对象以软组织为主, 分析不同针灸模式下各软组织的变化, 建立全面丰富的力学模型。

### 三维数字人的腧穴定位和组织分割

腧穴定位和组织分割工作主要基于 VHP 男性数据集。该数据集包括 1878 幅人体解剖断面照片, 一组尸体冰冻前获得的 CT 数据, 一组尸体冰冻后获得的

收稿日期: 2006-07-14

基金项目: 本课题受国家自然科学基金项目资助, 项目批准号 30428016

CT数据和一组MRI图像数据。将经过预处理的从头顶到骶部的1049幅切片图像进行空间堆叠,可以得到分辨率为 $1.0\text{mm}^3/\text{voxel}$ ,空间大小为 $573 \times 330 \times 1049$ 体素的VOXEL-MAN可处理的三维图像人体数据集。

腧穴在三维数字人上的定位,采用标准化二维描述的腧穴三维定位方法<sup>[4]</sup>,运用相应的腧穴定位模型在过渡坐标系中进行描述,然后计算为特定数据的三维坐标,并显示到人体三维医学图像中。肌肉分割在躯干和手臂两处,分别采用双色度椭球和结合曲面拟合信息的色度椭球的多步分割方法完成<sup>[5]</sup>。血管和神经在针灸过程中也具有非常重要的作用。血管神经建模通过可局部控制的样条函数插值完成,建模管道连接平滑,细小的血管神经也清晰可见。通过三维重建,肌肉分割和神经血管建模的效果非常理想,完全满足丰富的视觉感知。

通过在数字人体上的腧穴定位和组织分割,在显示图上可以清楚地看到针灸过程中毫针经过的组织,并可通过着色来标注重要的组织部位。如图1所示。在整个针灸过程的演示中,随着针体进入人体组织,可以层层剥离穿过的组织和器官,了解进针路径的走向。在三维显示的同时,还可以看到两个横截面的针体位置情况,使针灸学习者更详尽地了解穴位针灸区域的组织构成,掌握准确的腧穴位置和进针角度。

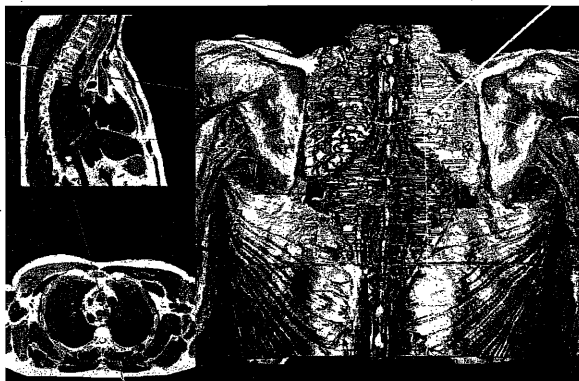


图1 针灸过程示意图

Fig.1. Procedure of acupuncture

### 支持力反馈的针灸触觉再现系统

针灸触觉再现系统依据穴位区域组织结构的力学物理特性,建立适合针灸过程的力学模型,模拟施针过程力学和视觉的变化,并通过力反馈接口把数据传递到力传感器,从而让操作者感知。力传感器采用的是瑞士Force Dimension公司生产的Omega 3dof力反馈装置。它提供了三个空间自由度的定位,最大测力为12牛顿,空间位置精度为0.009毫米,刚度为 $0 \sim 14.5$ 牛顿/毫米,

完全适用于软组织的力学模拟,符合实验的需要。力反馈系统结构见图2。

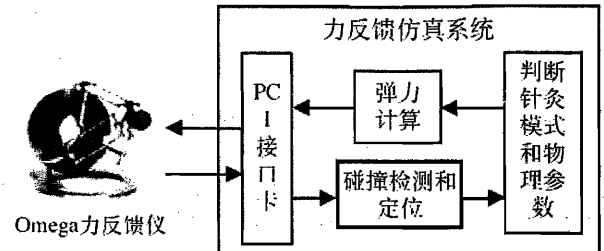


图2 力反馈仿真结构框图

Fig.2. The structural block diagram of force feedback simulation

我们在Visual C++的编程环境中,通过C++程序来模拟针灸环境。视觉显示和触觉实现分别采用可视化工具包和Chai3D开源软件包两个库。程序从力反馈仪获取实时的位置和方向信息,并根据信息在虚拟环境中绘制毫针。同时,利用组织参数计算针体受力,并传递给仪器。毫针进入不同的人体组织,由于各组织的物理特性和形变状态的差异,产生作用力的机理不同,力的大小也将产生变化。基于以前对腧穴区域人体组织的研究,我们将针灸过程中发生作用的组织分为四类:皮肤、皮下组织(模型中设定为脂肪)、肌肉和骨头。沿毫针插入人体的方向,针体依次与这四类组织相互作用。针灸过程从针尖接触皮肤开始,到针体完全抽离人体组织意味着一次针灸过程的完成。针灸模拟测试安排见图3。

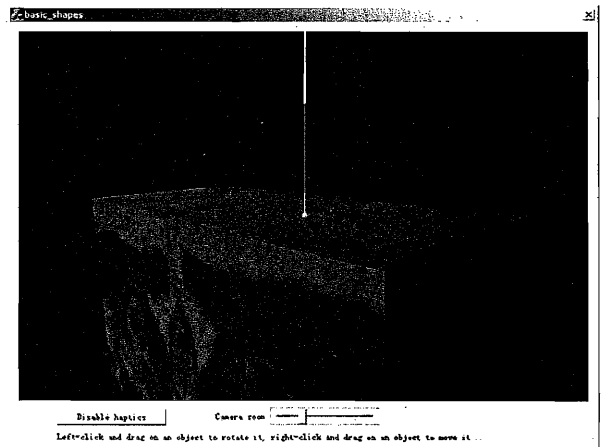


图3 针灸模拟测试图

Fig.3. Testing pattern for acupuncture simulation

### 针灸力学模型的研究

在针灸治疗的过程中,施针者对力的掌握非常重要,因此力反馈的真实感对于针灸力学仿真来说也相当关键。为了模拟针体上的作用力,我们着重研究了各相关组织的物理特性以及针体与组织之间的相互作

用,将针灸过程中毫针针体的受力分为三个部分:针尖作用力、轴向摩擦力和箝位力<sup>[7]</sup>。针体作用力是针尖作用力、轴向摩擦力和箝位力的总和。针体受力图如图4所示。

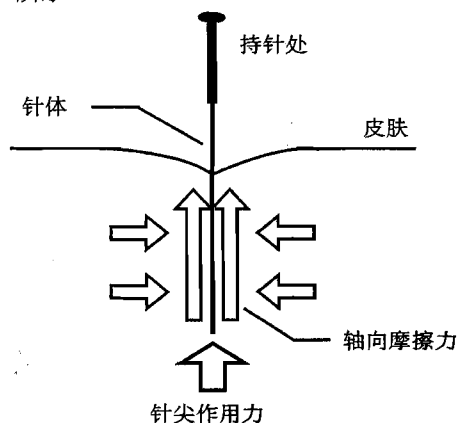


图4 针体受力图

Fig.4. The forces acting on a needle in tissues

### 3.1 针尖作用力和轴向摩擦力

针尖作用力是毫针进入人体组织时,针尖与组织接触产生的轴向作用力。针体的不同行针状态以及所接触组织的类型,决定了针尖作用力的不同类型和大小变化。

毫针进入皮肤,一个很明显的特征就是破皮进针处产生的力的近似脉冲。皮肤组织具有粘弹性,可采用弹簧-振子模型<sup>[8]</sup>表示破皮进针点之前的皮肤的力学特性。模型计算公式为:

$$F_{tip,skin} = k_{skin} \cdot x - \rho_{skin} v \quad (1)$$

其中,  $k_{skin}$  和  $\rho_{skin}$  分别为皮肤的弹性系数和粘性系数,  $x$  为皮肤组织的形变量。

破皮进针后,针尖作用力减小,形成脉冲式的力感。针尖在组织中运动,针体受力以摩擦力为主。轴向摩擦力方向沿针体向上传递,经由针体持针处传递给施针者。针体在组织中的摩擦力分为静摩擦力和动摩擦力两种。针尖在组织中,从静止到与组织发生相对运动,这个过程中,针体受到了针尖作用力和针壁的粘滞力。因为针体与组织处在相对静止的状态,没有发生相对运动,我们将这个状态的针体受力视为静摩擦力。当静摩擦力增加到一定的大小,针体与组织产生相对位移,轴向摩擦力就转变为动摩擦力。我们参考 Karnopp 模型<sup>[9]</sup>来模拟组织在针灸中的轴向摩擦力。模型公式如下:

$$F_{friction} = \begin{cases} \rho v l, & 0 < v \leq \Delta v \\ C_n \text{sgn}(v) + \rho v l, & v \geq \Delta v \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $C_n$  为针尖所在组织的动摩擦力,  $\rho$  为针尖所在组织的粘性系数,  $l$  为针体位于人体内的长度,  $v$  为针体和组织的相对运动速度,  $\Delta v$  是速度的临界值。针尖速度小于  $\Delta v$ , 则视为与组织无相对位移,在本文中该临界值经过实验分析,确定为 0.014 m/s。

皮下组织的主要组成部分为脂肪组织。脂肪的物理特性以粘性为主,且毫针的横截面积较小,针体进入脂肪组织之后,针尖所受阻力很小,针体作用力以脂肪粘性特征引起的摩擦力为主。肌肉的物理特性与皮肤类似,因此其力学模型可依照皮肤的模式来构建。

在针灸的过程中,针体是不应该接触到人体骨骼的,否则不但会危害受针者的健康,而且容易引起毫针的断裂,造成严重的后果。针对这种特殊情况,我们构建了一个弹性力学模型。当针尖碰到骨头后,会受到一个与进针方向相反的排斥力,针尖插入的距离越深,排斥力越大,从而阻止针体进入骨组织内部。由于骨头的硬度很高,弹性系数大,针尖在骨组织中移动极短的距离将产生很大的反作用力,力学表现为针尖碰到骨头表面即不能继续深入。计算公式如下:

$$F_{tip,bone} = -k_{bone} x \quad (3)$$

其中,  $k_{bone}$  为骨组织的弹性系数,  $x$  为针尖进入骨头的深度。

通过相关生物力学实验结果的参考和数值拟合,皮肤、脂肪、肌肉、骨四种组织的相关物理特性如表1所示。

表1 四种组织的各项物理系数  
Tab.1. The physical characters of tissues

组织类型	弹性系数 (N/m)	粘性系数 (N·s/m <sup>2</sup> )	动摩擦力 (N)
皮肤	327	3.21	0.5
脂肪	-	2.98	0.5
肌肉	561	4.06	0.8
骨	2370	0	0

### 3.2 箝位力

箝位力是垂直于针体的作用力。在针体进入人体组织之前,进针的位置(即穴位位置)和进针的角度已经确定,一定程度上决定了毫针在人体内的运行轨道。若操作者在针灸过程中使针尖偏离预先的轨道,人体组织会产生垂直于针体的作用力限制针体的移动,如图5所示。箝位力的大小,由针体进入人体组织的深度和组织物理特性决定。

持针处和针尖分别位于毫针的两端,因此当操作者在持针处施加非轴向力时,针尖的移动方向与持针处的方向相反。此时的针体受力情况比较复杂,我们

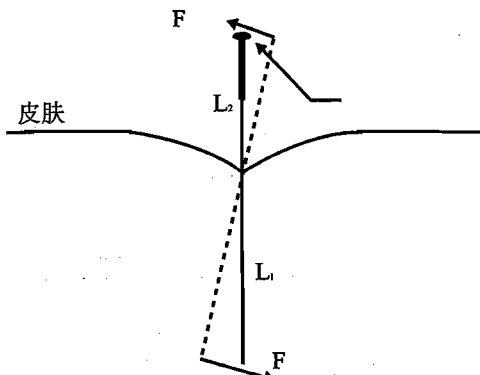


图5 箝位力示意图

Fig.5. Clamping force acting on the needle

简化该力学模型,使其在力感上表现为阻止针尖偏离进针轨道的效果。模型在针尖处建立线性弹簧来限制针尖的偏移,将针尖的受力利用杠杆原理传递到持针处,则操作者会感受到与运动相反的作用力,且进针越深,偏移越大,受力越强,与针灸现实相符。计算公式如下:

$$F_{feedback} = -k\omega \frac{l_1^2}{l_2^2} \quad (4)$$

其中:  $k$ 为针尖所处组织的弹性系数,  $\omega$ 为持针处的位移量,  $l_1$ 为进入人体组织的针体长度,  $l_2$ 为人体组织外的毫针长度。

### 3.3 针灸过程中的特殊力学模型

针灸技术中,除了进针手法、出针手法,还有很多其他重要的针灸手法。同样,在针灸过程中,也会遇到一些特殊的状态。这些都是针灸学习中非常重要的部分,构建这些特殊情况的力学模型将会极大地丰富针灸虚拟现实系统。本文将对均匀提插手法以及针灸过程中常见的滞针现象进行力学建模。

#### 3.3.1 均匀提插手法的力学模型

均匀提插手法是针灸疗法中非常常见的手法。施针者进针后,经过短时间的运针调节适应,感觉得气后,针体的提插幅度增大并且具有周期性<sup>[10]</sup>。从力学角度来说,针体沿相同的轨迹做重复周期的运动,使得针尖不需要接触未进入的组织,针尖作用力忽略不计,因此针体受力主要为动摩擦力。由于行针中提插速度均匀,针体受力呈周期性,可参照粘滞力产生的动摩擦力公式,计算如下:

$$F_{i,r} = \text{sgn}(v) \cdot \rho_{i,r} \cdot v \lambda \quad (5)$$

其中,  $\rho_{i,r}$ 为均匀提插时的粘性系数,  $\lambda$ 为针尖与进针点之间的位移,  $v$ 为针体提插速度,规定插针时

取正值,提针时为负。由于均匀提插过程中,针下感觉得气,粘性系数  $\rho_{i,r}$ 就不能简单地看作是针尖所在组织的粘性系数,而需要作相应的数据调整。通过对模型的反复试验,并参考均匀提插时的生物力学波形,本文将  $\rho_{i,r}$ 设定为  $3.14 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

#### 3.3.2 滞针状况的力学模型

在针刺行针及起针时,操作者手上对在穴位内的针体有涩滞、牵拉、包裹的感觉称滞针。滞针使针体不易被提插、捻转,不易起针,是针刺治疗过程中经常出现的异常情况。滞针的主要原因是针刺手法不当,使患者的针刺处发生肌肉强直性收缩,致肌纤维缠裹在针体上。这种状态与骨骼的力学模型相近,可在针尖周围建立球形约束力场,在各个方向上阻止针体的移动。

$$F_{sphere} = -\epsilon \cdot (P_1 - P_0) \quad (6)$$

其中,  $P_0$ 和  $P_1$ 分别表示针尖的起始位置和偏移位置,  $\epsilon$ 为一个控制系数。控制系数  $\epsilon$ 即为弹性模型的弹性系

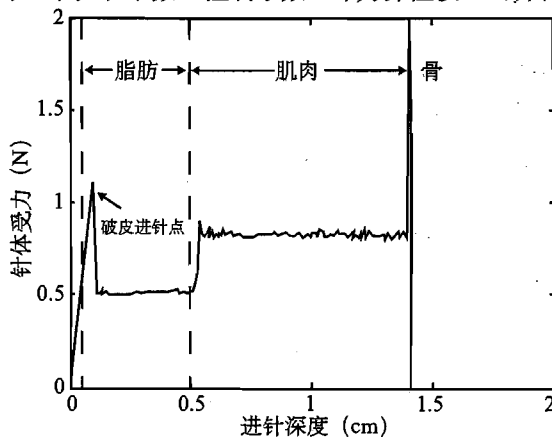


图6 进针过程力学波形图

Fig.6. Force vs. displacement during the needles insertion into the haptic model

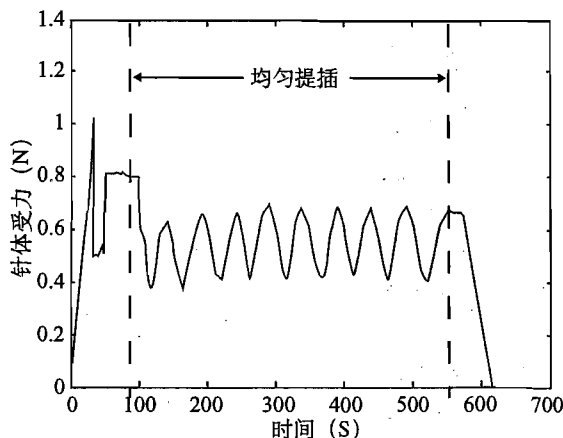


图7 均匀提插过程力学波形图

Fig.7. Force vs. time during lifting and thrusting

数。由于在滞针状态时,肌肉收缩剧烈,因此弹性系数发生改变,本文通过模拟试验,将 $\epsilon$ 值设定为724N/m。

### 实验结果和展望

基于文中所构建的模型,我们对支持力反馈的针灸虚拟现实系统进行了一定的探讨和模拟,并对实验结果进行了评估。实验的效果得到了针灸研究人员的认同。在进针状态和均匀提插状态时的力学波形图分别如图6、图7所示。

基于三维数字人模型,综合运用虚拟现实技术,构建完善、逼真的针灸力反馈仿真系统,能更好地满足针灸医师的教学和指导训练要求。在整个系统的构建上,本文的工作是初步的,尚有许多待深入完善的地方。例如,力学模型的针感效果仍需要进一步的改进,以增强逼真性;再如,现阶段所使用的力反馈仪为三自由度的,不能满足针灸中的捻转部分的模拟。我们将逐步解决有关问题,使系统更完善、实用。

### 参考文献

- [1] M.J. Ackerman. The Visible Human Project. J. Biocommun., 1991, 18(2): 14
- [2] V.M. Spitzer, D.G. Whitlock. The visible Human dataset: the ana-

- tomical platform for human simulation. Anat Rec., 1998, 253(2):49
- [3] T. Schiemann, U. Tiede, K.H. Höhne. Segmentation of the Visible Human for high quality volume based visualization. Med. Image Anal., 1997, 1(4): 263-271
- [4] 郑雷, 赵静, 庄天戈, 等. 基于三维可视人的胸穴解剖结构描述. 中国生物医学电子学学术年会(无锡), 2003: 84-85
- [5] Yilin Qin, Zhuo Cheng, Tain-ge Zhuang, et al. Interactive Segmentation of Muscles and 3D Representation of Meridians Based on Visible Human. Proceedings of the 27th Annual International Conference of the IEEE EMBS (Shanghai), 2005
- [6] Bernhard Pflesser, Andreas Petersik, Ulf Tiede, et al. Volume cutting for virtual petrous bone surgery. Computer Aided Surgery, 2002, 74-83
- [7] Kataoka, H, Washio, T, Chinzei, K, et al. Measurement of the Tip and Friction Force Acting on a Needle during Penetration. Proc. MICCAI 2002, 216-23
- [8] Findley, W. N. 1976. Creep and relaxation of non-linear viscoelastic materials: with an introduction to linear viscoelasticity. In Series in Applied Mathematics and Mechanics, vol. 18. North Holland, Amsterdam.
- [9] M. D. O' Leary, C. Simone, T. Washio, et al. Robotic needle insertion: Effects of friction and needle geometry. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003
- [10] 丁光宏, 沈雪勇, 陶岳辉, 等. 针刺手法与针体受力参数的对比研究. 中国生物医学工程学报, 2004, 8: 334-341

### 作者简介

治疗过程中,通过检测预压力的大小作为反馈信号,与微机计算的数值进行比较来控制预压电机的动作。此外,微机可以接收控制面板的指令,控制其它机构电机的动作,从而实现全方位的自动控制。微机的数字信号与外部输入、输出信号之间采用AD/DA进行数据的转化。控制系统的结构简图如图3所示。

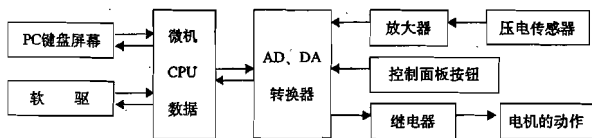


图3 控制系统框图

Fig.3. The control system's block diagram

治疗时,通过X片等方法确定病变部位的具体情况,并与其它所需数据,如性别、年龄等一起输入微机。患者俯卧在牵引床上,固定纵轴牵引带于胸背及骨盆部,在上述预操作完成后,即可进行治疗。

### 结论

(1) 基于Pro/Engineer的三维整复按摩机开发系统可实现产品的优化设计,降低材料的消耗或成本,减

少试验时间和经费,缩短设计周期,能在产品制造前,预先发现潜在的问题,提高产品的质量和寿命,获得产品的一次开发成功。因此,Pro/Engineer软件是缩短产品开发周期的有力工具,被越来越多地应用到产品的设计与生产环节中,大大提高了产品的竞争力。

(2) 采用VC6.0语言,开发了腰椎病整复按摩机应用软件,不仅完成了对电机的启、停、正反转控制,而且实现了对牵引和预压机构位置的精确控制,提高了设备的自动化水平。该按摩机减轻了医生的劳动强度,具有良好的应用前景。

### 参考文献

- [1] 王玉新, 邵晓梅, 姜杉. 三维虚拟环境下的机械产品概念设计. 中国机械工程, 2001, 12(3):24-27
- [2] 王峰, 俞新陆. 产品级三维参数化设计系统的研究与开发. 计算机辅助设计与图形学报, 2001, 13(11):1012-1018
- [3] 高秀华等. 机构三维动态设计仿真技术. [M]北京:化学工业出版社, 2003
- [4] 文怀兴, 刘正. 微机控制整复按摩机的研制. 轻工机械, 2004 (4):104-105