

脊柱牵引设备控制方法及其实验研究

刘治华, 黄玉锋, 徐新伟

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 脊柱牵引系统是一种典型的非线性、时变的控制系统, 为了实现牵引力的精确控制, 提出了一种 PID 神经网络控制算法. 介绍了基于 PID 神经网络算法的脊柱牵引系统的原理, 分析了 PID 神经网络的算法结构、权重学习规律和初值的选择. 进行实际系统试验, 在不同的控制条件下比较了常规 PID 控制和 PID 神经网络控制对牵引力的控制效果, 实验结果表明: 采用 PID 神经网络控制, 牵引力的控制精度、抗干扰能力和适应参数变化的能力都优于常规 PID 控制, 达到了较好的控制效果, 证明了脊柱牵引系统和控制算法的正确性和可行性.

关键词: 脊柱牵引; 伺服控制系统; 神经网络; PID 控制

中图分类号: TP23 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.026

0 引言

在中国大陆, 10% 以上的成年人患有脊柱疾病, 目前患者的人数已经接近 8 000 万人, 且呈逐年递增的趋势^[1]. 牵引治疗是病人首选的治疗方式, 然而牵引力的控制精度直接影响牵引治疗的效果, 所以对牵引力控制系统及其控制算法进行深入研究是非常必要的.

我国的许多学者对脊柱牵引治疗系统进行了大量的研究, 2000 年以来, 我国根据腰椎间三维位移学说^[2-3], 研制了多台牵引床: 单片机控制的三维牵引床、PLC 控制的数控三维正脊仪等. 上述牵引治疗设备的控制系统注重了功能的实现, 但是其控制算法多为简单的 PID 控制, 虽然该算法具有控制简单、可靠等优点^[4-5], 但是针对牵引治疗过程中存在的非线性和时变性的特点, 该算法不能满足牵引力的控制精度, 会直接影响牵引治疗的效果. 针对此研究现状, 笔者提出了一种 PID 神经网络控制算法, 基于该控制算法设计了一种全新的牵引治疗控制系统, 并通过实验对比了 PID 神经网络控制和常规 PID 控制对牵引力的控制效果. 为新型脊柱牵引设备的研发提供了合理的理论基础和实验指导.

1 控制系统结构

针对脊柱治疗时牵引力的控制特点—非线性和时变性, 设计了基于 PID 神经网络的牵引力控制系统, 控制系统结构框图如图 1 所示.

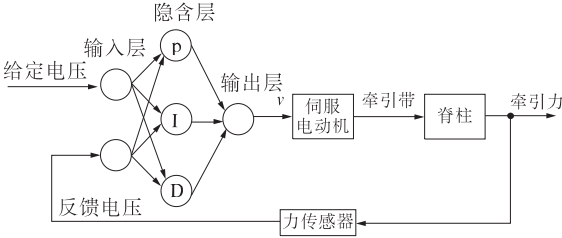


图 1 控制系统结构

Fig.1 Structure of control system

该系统控制器是一个三层前向神经网络, 为 $2 \times 3 \times 1$ 结构, 分别指输入层、隐含层和输出层神经元个数, 输入层的 2 个神经元用于接受设定信号和反馈信号; 隐含层的 3 个神经元分别是比例元、积分元和微分元, 对偏差信号完成比例、积分和微分计算; 输出层神经元用于综合控制规律, 输出控制信号.

2 控制算法

2.1 PID 神经网络的结构

笔者采用的 PID 神经网络结构如图 2, 其

收稿日期:2013-11-01; 修订日期:2013-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975262); 河南省产学研合作项目(132107000017)

作者简介: 刘治华(1971-), 男, 河北栾城人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事机电控制系统研究, E-mail: liuzhihua@zzu.edu.cn.

中牵引力期望输出值为 r , 牵引力的实际输出值为 y , 各层通过阈值函数的处理结果为 u , 各神经元节点的输入值为 net , 输出值为 x , 各层的连接权值为 w , 上标是指所在的层数.

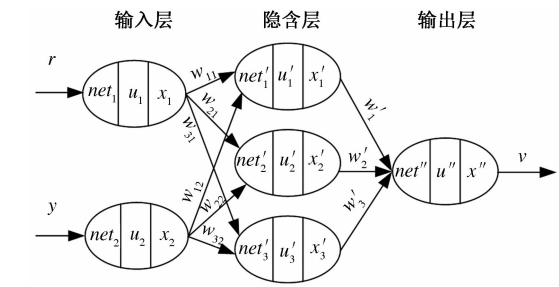


图 2 PID 神经网络结构图
Fig. 2 Structure of PID neural network

在任意采样时刻 k , 各层输入和输出的映射关系如下:

(1) 输入层

$$\begin{cases} net_1(k) = r(k) \\ net_2(k) = y(k) \end{cases}; u_i(k) = net_i(k);$$
$$x_i(k) = u_i(k); i = 1, 2.$$

(2) 隐含层

$$net'_j(k) = \sum_{i=1}^2 w_{ji} x_i(k);$$

比例元: $u'_1(k) = net'_1(k);$

积分元: $u'_2(k) = u'_2(k-1) + net'_2(k);$

微分元: $u'_3(k) = net'_3(k) - net'_3(k-1)$

$$x'_j(k) = \begin{cases} 1 & u'_j(k) > 1 \\ u'_j(k) - 1 & -1 \leq u'_j(k) \leq 1 \\ -1 & u'_j(k) < -1 \end{cases}$$
$$i = 1, 2, j = 1, 2, 3$$

(3) 输出层

$$net''(k) = \sum_{j=1}^3 w'_{ij} x'_j(k),$$
$$u''(k) = net''(k),$$
$$x''(k) = \begin{cases} 1 & u''(k) > 1 \\ u''(k) & -1 \leq u''(k) \leq 1 \\ -1 & u''(k) < -1, \end{cases}$$
$$v(k) = x''(k).$$

2.2 学习过程中权重改变规律

(1) PID 神经网络训练和学习性能指标

$$E = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l [r(k) - y(k)]^2 = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l e^2(k) \text{ 取最小.}$$

(2) 神经网络隐含层到输出层权重值修正

$$w'_{ij}(n_0 + 1) = w'_{ij}(n_0) + \frac{\eta}{l} \sum_{k=1}^l \delta'(k) x'_j(k),$$

$$\delta'(k) = 2[r(k) - y(k)] \operatorname{sgn} \frac{y(k+1) - y(k)}{v(k+1) - v(k)}.$$

(3) 神经网络输入层到隐含层权重值修正

$$w_{ij}(n_0 + 1) = w_{ij}(n_0) + \frac{\eta}{l} \sum_{k=1}^l \delta_j(k) x_i(k),$$
$$\delta_j(k) = \delta'(k) w'_j \operatorname{sgn} \frac{u'_j(k) - u'_j(k-1)}{net'_j(k) - net'_j(k-1)}.$$

式中: l 为采样点数; η 为学习因子; n_0 指经过 n_0 次训练和学习.

3 实验研究

3.1 实验系统

图 3 所示为牵引治疗系统的组成原理, 图 4 为根据该原理搭建的实验平台. 整个系统可以分为 4 部分.

(1) 控制部分. 主要包括计算机和运动控制卡, 根据腰椎病人的体重, 计算机中的牵引力控制软件自动计算出最大最小牵引力, 并自动生成相应的牵引治疗参考曲线, 经过计算机的 PCI 接口, 运动控制卡输出相应的模拟电压信号, 并通过伺服电机驱动器控制伺服电机输出相应的力矩.

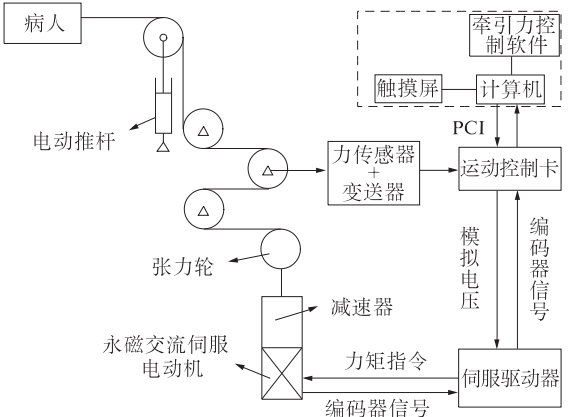


图 3 牵引治疗系统组成原理图
Fig. 3 Schematic of traction treatment system

(2) 检测部分. 主要通过力传感器和变送器完成. 牵引力的大小通过力传感器测量, 测量所得模拟电压信号经滤波、放大后通过运动控制卡传输给计算机, 在控制软件中与设定电压比较, 根据其差值决定运动控制卡的输出, 由此形成牵引力的闭环控制.

(3) 执行部分. 包括伺服驱动器、永磁交流伺服电动机、减速器及张力轮装置. 通过设置伺服驱动器, 使交流伺服电动机工作在力矩模式, 根据输入到伺服驱动器的模拟电压来控制交流伺服电动机的输出力矩, 经过减速器、张力轮装置及牵引带

将牵引力作用到病人腰椎部位。



图4 实验平台

Fig. 4 Experimental platform

(4)辅助装置.包括电动推杆角度调节机构、牵引带及病人身体固定带等.图3中的电动推杆角度调节机构可以通过上升或下降运动改变牵引力的施加角度,从而使牵引力作用到病人腰椎的病变部位,实现针对性治疗。

伺服电动机为松下 MDME102G1C,额定力矩为 $4.77 \text{ N} \cdot \text{m}$,对应的伺服驱动器为松下 MD-DHT3530;运动控制卡为 PCI-8253,输入与输出电压范围为 $0 \sim 10 \text{ V}$;传感器为 TSC-200 kg,量程为 2000 N ,输出电压信号经变送器处理后,范围变为 $0 \sim 10 \text{ V}$;减速器的减速比为 8。

3.2 实验步骤

分别采用常规 PID 控制和 PID 神经网络控制作为该牵引治疗系统的控制器,实验中设定牵引治疗曲线的最大牵引力为 800 N ,最小牵引力为 400 N ,成周期性指数曲线规律变化,通过传感器输出观测牵引力的跟踪效果。

(1)调节电动推杆,选择水平牵引即牵引角度为 0° ,手动整定一组 PID 参数,其中 $K_p = 5$, $K_i = 0.1$, $K_d = 0.8$. 观测牵引力的跟踪效果。

(2)离线训练 PID 神经网络,使神经网络初始输出为上述手动调试整定的一组 PID 参数, $K_p = 5$, $K_i = 0.1$, $K_d = 0.8$. 将训练后的神经网络接入控制系统中,在线调整神经网络的权值,观察控制效果的变化,并将其与 K_p , K_i , K_d 参数相同的常规 PID 控制器的控制效果相比较得到图 5。

(3)牵引过程中加入干扰信号,重复步骤(1)(2),得到图 6。

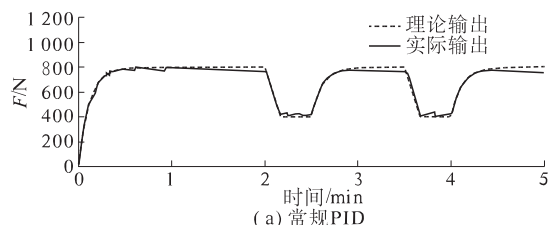
(4)调节电动推杆,选择牵引角度为 15° ,重复步骤(1)、(2),得到图 7。

3.3 实验结果分析

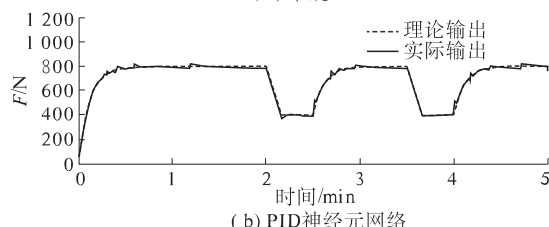
(1) 水平角度牵引

从图 5 中可以看出:在水平角度进行牵引治

疗时,虽然两种控制器都能满足牵引力的跟踪效果,但是采用 PID 神经网络控制的牵引力跟踪效果要稍微优于常规 PID 控制。



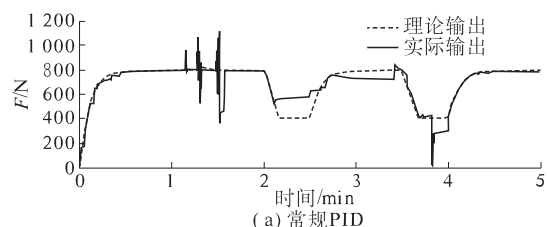
(a) 常规PID



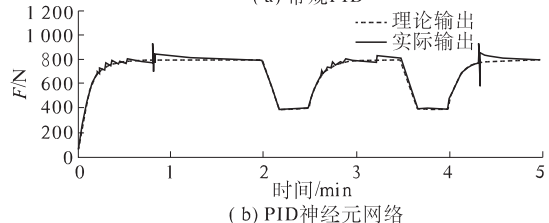
(b) PID神经网络

图5 水平牵引时控制效果对比

Fig. 5 Comparison of control effect with horizontal traction



(a) 常规PID



(b) PID神经网络

图6 有外界干扰时控制效果对比

Fig. 6 Comparison of control effect as interference exists

(2) 外部干扰

牵引治疗的整个过程时间比较长,中间的干扰信号也比较多,其中影响比较明显的就是病人的移动,病人稍微移动,就会给系统引入一个比较强的干扰信号.从图 6 中可以看出:系统中引入干扰信号后,PID 神经网络控制能够快速的消除干扰,继续保持良好的牵引力跟踪效果,但是常规 PID 控制器在干扰信号的作用下,牵引力逐渐偏离设定的曲线。

(3) 牵引角度变化

病人不同,其体重、身高和腰椎的病变部位等信息都会有所不同,该系统必须适用于所有的病人,此时假设病人的身高,体重等信息不变,而病变的腰椎部位不同,牵引角度选择了 15° . 从图 7

中可以看出,牵引治疗的参数发生变化时,采用 PID 神经网络控制的牵引力跟踪效果依然保持良好,但是采用常规 PID 控制的牵引力完全不能跟踪设定曲线.

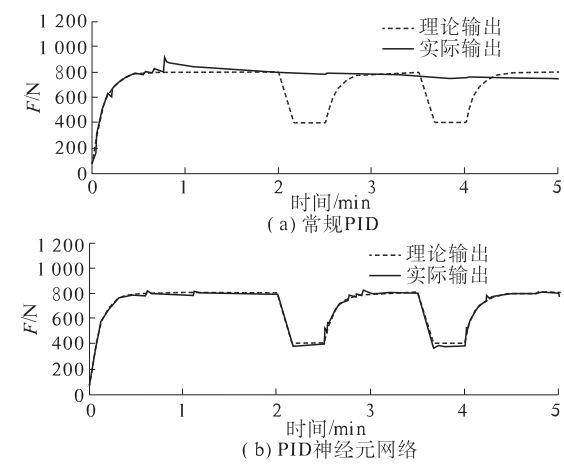


图 7 参数变化时控制效果对比
Fig.7 Comparison of control effect as parameters change

通过以上实验可知:系统参数不变且不存在干扰的情况下,常规 PID 控制和 PID 神经网络控制都能满足对牵引力的控制效果,但是一旦系统的参数发生变化或者存在外部干扰,常规 PID 控制对设定牵引力曲线的跟踪效果变差,而 PID 神经网络控制可以很好的克服参数变化和干扰信号的影响,保持较好的牵引力跟踪效果,使脊柱牵引系统具有较强的鲁棒性和稳定性.

4 结论

笔者针对脊柱牵引治疗系统的特点,设计了

PID 神经网络控制器,并搭建了脊柱牵引系统实验平台,通过实验对比了该控制器和常规 PID 控制器对牵引力的控制效果,结果表明:采用 PID 神经网络控制可获得比常规 PID 控制更高的牵引力跟踪精度和抗干扰能力,同时具有更高的适应参数变化的能力.从实验的角度验证了该脊柱牵引系统和控制算法的可行性和正确性.

参考文献:

[1] 管文浩.腰椎有限元模型的建立与脊柱牵引过程中的仿真研究[D].郑州:郑州大学机械工程学院.2012.

[2] 李震.新型多功能牵引床创新设计[D].济南:山东大学机械工程学院.2006.

[3] 朱松青,史金飞,伍斌,等.数控纤维缠绕机精密张力控制系统[J].自动化仪表,2004,25(5):59-64.

[4] 张爱丽,祝天龙,蔡武珍.基于 PLC 及伺服控制器的自动卷绕控制设计[J].郑州大学学报:工学版,2012,33(2):99-102.

[5] NIASAR A, VAHEDI A, MOGHBELI H. Torquecontrol of brushless DC motor drive based on DSP technology[C]. Proceeding of International Conference Electrical Machines and Systems, 2007:524-528.

[6] 房俊全,朱从乔.柴油机调速系统的模糊自适应 PID 控制[J].微计算机信息,2005,25(1/9):55-56.

[7] 李亚伟.非手术脊柱减压治疗设备神经网络控制系统开发[D].郑州:郑州大学机械工程学院,2012.

[8] 舒怀林.基于 PID 神经网络的倒立摆控制系统[J].机床与液压,2008,36(3/3):141-144.

The Control Method and Its Experimental Research for the Spinal Traction Device

LIU Zhi-hua, HUANG Yu-feng, XU Xin-wei

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Spinal traction system is a non-linear and time-varying control system. In order to control the traction force accurately, the PID neural network algorithm is put forward in this paper. Firstly, the principle of the spinal traction control system based on PID neural network algorithm is introduced. Then the structure and the initial values as well as the learning rule of the weights of the PID neural network are analyzed. Finally, the PID neural network was compared with conventional PID control under the different control conditions in the experiments. The experimental results showed that the PID neural network had the property of high force tracking accuracy and anti-interference ability, as well as the better adaptability to parameter change, compared with conventional PID control. The feasibility and correctness of the spinal traction system and the control algorithm were verified.

Key words: spinal traction, servo-control system, neural network, PID control