

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.007

可穿戴式腰背部治疗仪的机构设计 及其运动学分析*

罗庆生¹, 肖中阳², 鲁盼³, 张焯煌⁴, 赵磊²

(1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

3. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081;

4. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 针对可穿戴式腰背部牵引治疗仪的结构设计问题, 提出了一种在使用舒适性、安全性、可靠性等方面具有突出效果的新型双平面铰接结构, 并利用空间解析几何方法对治疗仪的机构进行了详细的数学推导, 利用Matlab软件对样机进行了运动学仿真, 了解其运动学关键指标, 并对其运动空间和运动效果进行了分析和评价。在可穿戴式腰背部治疗仪样机实验台上对机构关键点的运动空间进行了测量, 并由志愿者对治疗仪进行了实际穿戴测试。研究结果表明, 该可穿戴式腰背部牵引治疗仪具有良好的治疗效果, 其设计思路与分析方法可为其他产品的研发提供参考。

关键词: 可穿戴式腰背部牵引治疗仪; 机构设计; 运动学分析; 虚拟样机

中图分类号: TH122; TP242 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)12-1547-05

Mechanical design and kinematic analysis of wearable lumbodorsal therapeutic instrument

LUO Qing-sheng¹, XIAO Zhong-yang², LU Pan³, ZHANG Zhuo-huang⁴, ZHAO Lei²

(1. School of Mechatronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

4. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the problems about mechanical design of the wearable lumbodorsal therapeutic instrument, a new dual plane hinge structure was put forward, which makes the instrument markedly more comfortable, more reliable and safer. The detailed deduction of the mechanism was executed based on mathematical method. The prototype was simulated with Matlab, so that the kinematics of key indicators can be obtained and the movement space and effect can be evaluated. Based on experiments on the experiment table of wearable lumbodorsal therapeutic instrument, experiments of measuring and wearing by volunteers were conducted. The results indicate that the treatment effect of this wearable lumbodorsal therapeutic instrument is satisfactory. The development of ideas and analysis method can be used for other products.

Key words: wearable lumbodorsal therapeutic instrument; mechanical design; kinematic analysis; virtual prototype

收稿日期: 2014-07-30

基金项目: 国家教育部大学生创新创业训练计划资助项目(201210007007)

作者简介: 罗庆生(1956-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 主要从事特种机器人技术、机电一体化技术方面的研究。E-mail: luoqsh@bit.edu.cn

edu.cn

0 引 言

随着人类生活方式的改变和生活节奏的加快,人们患与腰椎、脊椎有关疾病的发病率有所上升。腰背部肌肉训练结合药物治疗作为一种有效治疗腰椎、脊椎各类疾病的方法^[1],为多数人接受。然而现有的牵引治疗机械普遍存在锻炼部位单一、柔顺性差、治疗效果不佳等缺点。

基于上述考虑,本研究以腰背部肌肉训练结合药物治疗为背景^[2],设计一种可穿戴式新型腰背部牵引治疗仪^[3]。通过建立其空间几何模型,对治疗仪的运动原理和工作特性展开系统研究与深入分析,利用 Matlab 对该样机进行运动学仿真,了解位移、速度、加速度等指标。最后通过验证实验,证实该可穿戴式新型腰背部牵引治疗仪具有一定的治疗效果和舒适性、安全性。

1 治疗仪的双平面铰接结构设计

该治疗仪的结构示意图如图1所示。其中电动推杆1、2(电动推杆3后文中记作“推杆GE”)、承重摇杆3、4和横向杆5、6构成第一运动平面,该平面内存在一个由承重摇杆3、4、底座及横向杆5、6组成的平面四连杆机构,平面四连杆机构能够在该平面内完成向左或向右的摇摆动作,机构所在平面定义为摇摆平面;纵向背部板9、横向背部板10构成第二运动平面,因平面做俯仰运动,称其为俯仰平面。两运动平面通过7、8处的转动副铰接,形成双平面铰接结构;第一运动平面通过13、14两处的转动副与底座连接,实现整个治疗仪的固定。

动力方面,电动推杆1、2带动摇摆平面内四连杆的运动,实现治疗仪的左右摇摆;电动推杆11、12(电

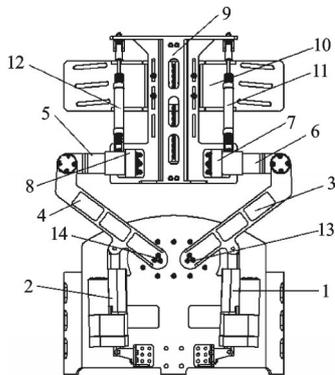


图1 可穿戴式腰背部治疗仪结构示意图

1,2—电动推杆;3,4—承重摇杆;5,6—横向杆;7,8—背部俯仰轴承座;9—纵向背部板;10—横向背部板;11,12—电动推杆;13,14—臀部轴承座

动推杆12后文中记作“推杆RP”)带动纵向背部板的绕横向杆5、6的转动,实现治疗仪的前后俯仰。

2 治疗仪运动学的几何分析

本研究通过对机械结构的抽象简化,绘制出的机构简图如图2所示。

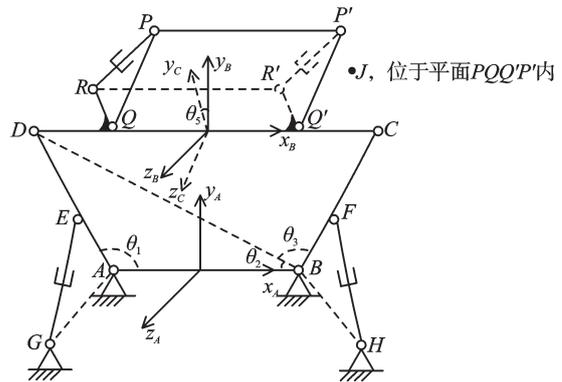


图2 可穿戴式腰背部治疗仪机构运动简图

在机构上建立3个坐标系,其中坐标系{A}与大地ground固连,为研究方便,将零点设在AB中点。坐标系{B}固连于摇摆平面,其零点设在DC中点。坐标系C固连于俯仰平面,其零点与{B}重合。各坐标系方向如图2所示。

由图2可以看出,{B}坐标系在{A}中的运动可以分解为平动和绕Z轴的转动,根据坐标系映射原理^[4]可得出{B}到{A}映射。

$${}^A_B T = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\sin \theta & 0 & x_0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

用相同的方法很容易地得出{C}到{B}的映射:

$${}^B_C T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_5 & \sin \theta_5 & 0 \\ 0 & -\sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于治疗仪通过位于平面PQQ'P'内的J点与人体连接,该点为研究者感兴趣的点。

由上述映射关系以及J点在坐标系{C}中的坐标 ${}^C J = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$,坐标系{A}下J点的坐标可以得出:

$${}^A J = {}^A_B T {}^B_C T {}^C J \quad (3)$$

现结合图2中摇摆平面内的四连杆机构,说明如何确定映射关系中的位置参数θ和θ₅,根据边角关系:

$$\theta_1^0 = \angle GAB - \angle GAE = \angle GAB - \cos^{-1} \left(\frac{AG^2 + AE^2 - GE^2}{2AG \cdot AE} \right) \quad (4)$$

由于实际机械中的零件并非理想的无粗细的线,经测定修正后的 θ_1 为:

$$\theta_1 = \theta_1^0 - 0.6 \text{ rad} \quad (5)$$

由此得 D 点坐标:

$$\begin{cases} x_D = x_A - AD \cdot (-\cos \theta_1) \\ y_D = AD \cdot \sin \theta_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$BD = \sqrt{AB^2 + AD^2 - 2AB \cdot AD \cdot \cos \theta_1} \quad (7)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \frac{BD^2 + BC^2 - CD^2}{2BD \cdot BC} \quad (8)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{AD}{BD} \cdot \sin \theta_1 \right) \quad (9)$$

得到 C 点坐标:

$$\begin{cases} x_C = x_B + BC \cdot [-\cos(\theta_3 + \theta_2)] \\ y_C = BC \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{cases} \quad (10)$$

由此可得 DC 中点的坐标 O :

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{2} [AD \cos \theta_1 - BC \cos(\theta_2 + \theta_3)] \\ y_0 = \frac{1}{2} [AD \sin \theta_1 + BC \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3)] \end{cases} \quad (11)$$

向量 \overline{DC} 与 X 正方向的夹角为:

$$\theta = \arctan \frac{BC \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) - AD \cdot \sin \theta_1}{x_B - BC \cdot \cos(\theta_3 + \theta_2) - x_A - AD \cdot \cos \theta_1} \quad (12)$$

垂直于 DC 视角观察所得到的俯仰平面示意图如图3所示。

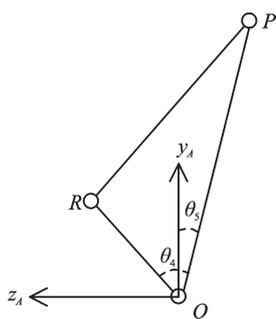


图3 俯仰平面示意图

易求得:

$$\theta_4 = \arccos \frac{RQ^2 + PQ^2 - RP^2}{2RQ \cdot PQ} \quad (13)$$

$$\theta_5 = \theta_4 + \angle RQz_1 - \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

经过对实体样机测量,得出如下关键尺寸参数:

$AG = 156.7 \text{ mm}$, $AE = 113 \text{ mm}$, $\angle GAB = 4.3 \text{ rad}$, $AD = 260.0 \text{ mm}$, $AB = 64.0 \text{ mm}$, $x_a = -32.0 \text{ mm}$, $BC = 260.0 \text{ mm}$, $CD = 422.0 \text{ mm}$, $x_b = 32.0 \text{ mm}$, $PQ = 230.8 \text{ mm}$, $RQ = 73.8 \text{ mm}$, $\angle RQZ = 0.631 \text{ rad}$.

$${}^c J = \begin{bmatrix} 215 \\ 200 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

至此本研究已建立了可穿戴式腰背部治疗仪的运动学模型,该模型输入量为 GE 、 RP 两个推杆的长度参数,输出量为末端执行机构任意点的位置坐标。反之,研究者输入末端执行机构要求达到的点的坐标,即可解出 GE 、 RP 气缸的长度。

3 治疗仪运动学仿真分析

3.1 工作空间分析

工作空间是衡量腰背部诊疗仪性能好坏的一项重要参数^[5-6],以治疗仪与人体肩部的连接点为例,该点的运动轨迹只能落在其工作空间中。

该连接点的运动空间应该与人体肩部实际运动的空间相对应。肩部连接点的左右、前后方向运动如图4所示。根据常识,人取坐姿时,其肩部的运动可近似为:在左右方向上,为一以脊部某点为中心的圆弧,;在前后方向上,为一以脊部同一点为中心的圆弧。

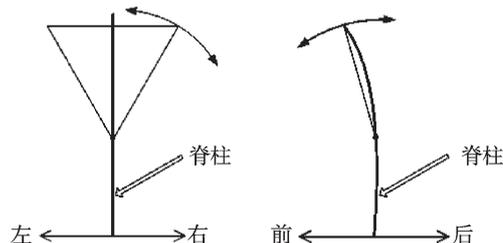


图4 肩部连接点的左右、前后方向运动

根据该治疗仪所选电动推杆的型号, GE 在 $[150, 195]$ 范围内取值, RP 在 $[190, 220]$ 范围取值,本研究在 Matlab 中计算出了肩部连接点的所有可能出现的位置^[7-8],即工作空间^[9](肩部连接点的工作空间如图5所示)。

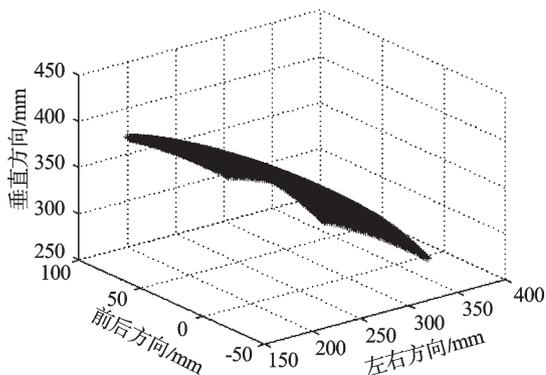


图5 肩部连接点的工作空间

由图5可见,肩部连接点 J 在空间中的运动范围是一个曲面,其左右运动(摇摆)的范围是 $[152.32 \text{ mm}, 359.09 \text{ mm}]$,前后运动(俯仰)的范围是 $[-18.94 \text{ mm}, 63.55 \text{ mm}]$,上下运动的范围是 $[257.56 \text{ mm}, 414.28$

mm]。如果以垂直于Y轴的平面去截工作空间曲面,可得到与图4吻合的肩部在左右方向上的运动轨迹。同理,如果以垂直于X轴的平面去截工作空间曲面,可得到与图4吻合的肩部在前后方向上的运动轨迹。由以上工作空间分析可见,腰背部治疗仪的运动与人体的运动吻合,完全符合模拟人体运动的要求。另外,运动空间各方向的极限位置均位于人体可承受范围之内,即使治疗仪发生故障也不至对人体造成损伤,从而保证了治疗仪的安全性。

3.2 运动学仿真

通过分析动力原件(电动推杆)的运动规律,列出如下两个推杆运动方程:

$$GE = \begin{cases} -\frac{4}{3}t^3 + 4t^2 + 152, t \leq 1 \\ 4t + 150.7, 1 < t \leq 3 \\ -\frac{4}{3}t^3 + 12t^2 - 32t + 186.7, 3 < t \leq 4 \end{cases} \quad (16)$$

$$RP = \begin{cases} -\frac{4}{3}t^3 + 4t^2 + 187, t \leq 1 \\ 4t + 189.7, 1 < t \leq 3 \\ -\frac{4}{3}t^3 + 12t^2 - 32t + 221.7, 3 < t \leq 4 \end{cases} \quad (17)$$

笔者进而绘制出肩部连接点J在坐标系中的位置变化以及坐标系3个投影方向的运动参数曲线如图6所示。

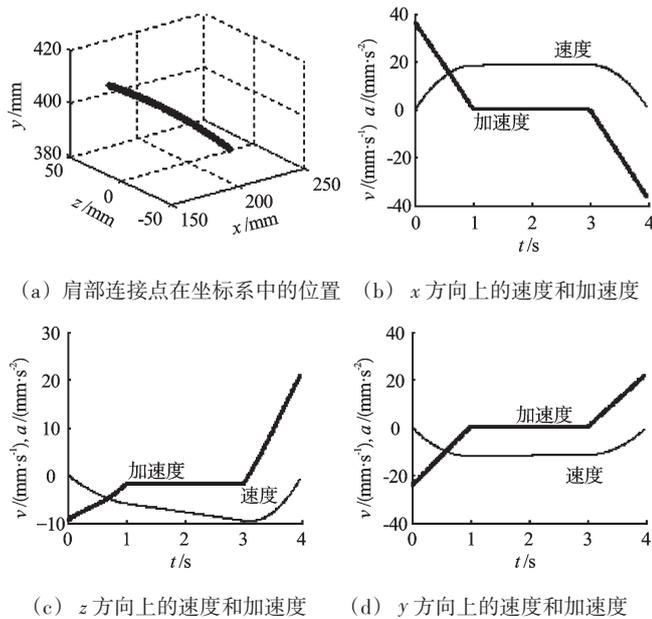


图6 肩部连接点的运动轨迹及运动学参数曲线图

通过分析图6所示肩部连接点的具体运动路径和坐标系各投影方向的运动学参数,即速度、加速度的

参数值变化情况可知,可穿戴式腰背部治疗仪可以很好地带动肩部运动,完成腰背部的俯仰、摇摆运动,且治疗仪在运动过程中的位移、速度、加速度曲线整体平滑,没有数值发生突变的现象。从而得出,可穿戴式腰背部治疗仪的机械结构设计合理,有良好的运动性能^[10]。

4 实验及结果分析

笔者所在项目组在如图7所示可穿戴式腰背部治疗仪样机实验台上对肩部连接点的运动极限位置进行了测量,并开展了志愿者穿戴实验。

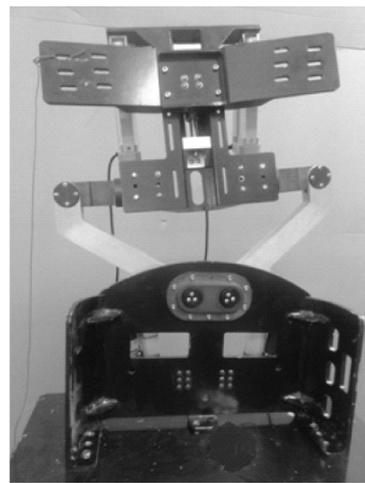


图7 可穿戴式腰背部治疗仪样机实验台

实际测得的肩部连接点的极限位置如表1所示。通过分析可见连接点的极限位置与运动空间的模拟结果相符。模型工作空间几何学分析的可靠性得到证实。

表1 实际实验测量得到的肩部连接点极限位置

	极限位置1/mm	极限位置2/mm
X方向	150	320
Y方向	283	390
Z方向	-12	72

在样机测试中,25名志愿者对样机进行了穿戴试验。由志愿者反馈的体验情况可以获知,志愿者在试验过程中没有感到明显的顿挫感,腰背部运动柔和、舒适,经过一段时间的治疗能体会到明显的腰背部肌肉的锻炼效果。可穿戴式腰背部治疗仪牵引治疗效果良好。

(下转第1554页)

本文引用格式:

罗庆生,肖中阳,鲁盼,等. 可穿戴式腰背部治疗仪的机构设计及其运动学分析[J]. 机电工程,2014,31(12):1547-1550,1554.
 LUO Qing-sheng, XIAO Zhong-yang, LU Pan, et al. Mechanical design and kinematic analysis of wearable lumbodorsal therapeutic instrument [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(12): 1547-1550, 1554.
 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>