

## · 基础研究 ·

## 脊柱刚度测试系统信度研究

孔令军, 元唯安, 程英武

(上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院推拿研究所 上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院推拿科, 上海 200437)

**【摘要】** 目的: 通过动物实验, 检测脊柱刚度测试系统(spine stiffness test system, SSTS)的信度。方法: 将 100 只 350~450 g 雄性 SD 大鼠随机分为 5 组, 分别饲养 1、2、4、8、12 周, 每只大鼠均使用棘突外部连接固定系统对其 L<sub>4</sub>、L<sub>5</sub> 和 L<sub>6</sub> 进行外部连接固定。在各自饲养期结束时, 使用 SSTS 进行固定节段的刚度检测, 并观察连接时间对大鼠造模节段刚度的影响; 为保证 SSTS 压力测量的准确性, 使用前对其压力探头进行标定。结果: SSTS 加载探头的实际误差小于 0.04%, 其误差范围符合实际测试要求; 刚度检测结果显示 SSTS 具有较好的可靠性, 组内相关系数 ICC=0.948 ( $P < 0.01$ ), 且大鼠造模节段的刚度随连接时间的延长而增加。结论: SSTS 具有较好的准确性和可靠性, 其控制软件操作简单、易于掌握, 可准确采集各点的压力载荷和脊柱运动节段产生的微小位移参数, 但在固定辅件的选择、测量范围的确定、干扰变量的区分等方面仍需改进, 以便 SSTS 适用于更多脊柱伤病模型。

**【关键词】** 脊柱; 压力; 动物实验; 脊柱刚度测试系统

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2012.01.014

**Reliability research of spine stiffness test system** KONG Ling-jun, YUAN Wei-an, CHENG Ying-wu. The Institute of Massage of Yueyang Hospital of Integrative Chinese & Western Medicines Affiliated to Shanghai University of TCM, Shanghai 200437, China

**ABSTRACT** **Objective:** To investigate the reliability of the spine stiffness test system (SSTS) by animal experiments. **Methods:** A hundred SD male rats with weight body of 350–450 g were divided randomly into 5 groups according to feeding time of 1, 2, 4, 8, 12 weeks. The externally linked fixation systems were implanted into all rats in L<sub>4</sub>, L<sub>5</sub>, and L<sub>6</sub>. At the end of every feeding time, the stiffness of the fixed segment was measured by SSTS, and the relationship between linking time and the stiffness were observed. The parameters of pressure sensor of SSTS were demarcated before measuring the stiffness in order to ensure the accuracy of SSTS. **Results:** The actual error of the spine stiffness test system was less than 0.04%. Its reliability was good, ICC=0.948 ( $P < 0.01$ ). And the stiffness of the fixed segment increased with linking times. **Conclusion:** The accuracy and reliability of SSTS were good. Its operating system was very simple to manipulate. And SSTS may accurately collect pressure load and infinitesimal displacement of the spinal motion segment. In order to fit more spinal injuries models, SSTS needs improvements in fixed accessories, measurement range, disturbance variable, and so on.

**KEYWORDS** Spine; Pressure; Animal experimentation; Spine stiffness test system

Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2012, 25(1): 51-54 www.zggszz.com

反复损伤和长期不良姿势导致的脊柱功能障碍——脊柱运动节段锁定状态, 已成为困扰人类的常见病痛。脊柱推拿是治疗此种脊柱功能障碍安全有效的疗法。脊柱推拿临床医生常通过触诊确定病变节段相对临近节段的活动度, 来完成此类功能障碍的评估, 并使用刚度(物体抵抗变形的能力)对其进行描述, 从而做出临床决策。但是, 由于脊柱结构

的复杂性和医生临床技能差异, 触诊在信度方面存在无法避免的缺陷。因此, 临床脊柱刚度检测系统已得到广泛的应用, 且具有较好的可靠性<sup>[1]</sup>。然而, 国内应用于基础研究的刚度检测装置仍较少。本文将介绍一种用于脊柱推拿基础研究动物实验的刚度检测工具——脊柱刚度测试系统(spine stiffness test system, SSTS), 并对其信度进行检验。

## 1 材料与方法

**1.1 实验动物** 选取 100 只雄性 SD 大鼠, 体重 350~450 g。依照随机数字表随机分为 5 组(分别为 1、2、4、8、12 周组), 每组 20 只。造模(具体方法见 1.3.1 节)后分别饲养 1、2、4、8、12 周。动物由上海中医药大学实验动物中心提供, 许可证号: SCXK(沪)

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(编号: 2007CB512700); 国家杰出青年科学基金资助项目(编号: 81025022); 国家自然科学基金资助项目(编号: 81072891)

Fund programs: The National Basic Research Program of China (973 Program)(No. 2007CB512700)

通讯作者: 程英武 E-mail: chunyong01@163.com

2008-0016。饲养环境:SPF 级。

1.2 主要实验器械及试剂 脊柱刚度测试系统及软件(上海复旦大学力学系)、外部连接固定系统(上海浦卫医疗器械厂)、戊巴比妥钠(国药集团化学试剂有限公司)、硫酸庆大霉素注射液(上海中西制药有限公司)、复方对乙酰氨基酚片(上海罗氏制药有限公司)等。

1.3 实验方法

1.3.1 造模方法 术前 12 h 禁食水。大鼠腹腔 3% 戊巴比妥钠(30 mg/kg)注射麻醉后,手术区域及周边 3 cm 剃毛,碘伏消毒;定位 L<sub>4</sub>、L<sub>5</sub>、L<sub>6</sub> 棘突,切开皮肤,分离组织,充分暴露脊柱 L<sub>4</sub>-L<sub>6</sub> 区域;将体内棘突固定钢板连接到 L<sub>4</sub>、L<sub>5</sub>、L<sub>6</sub> 棘突上;清除伤口处异物、凝血块及坏死组织,间断缝合两侧竖棘肌和周围结缔组织;将外部连接钢板连于棘突钢板间;皮肤缝合。术后 3 d,肌注庆大霉素(0.2 ml·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>),饮水中加入复方对乙酰氨基酚片(300 ml·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)。大鼠饲养过程中脱落 3 只(1 周组 2 只,8 周组 1 只,具体死亡原因不详)。

1.3.2 SSTS 标定中砝码压力的测量 ①将 SSTS 压力探头水平倒置于实验平台上,打开脊柱刚度测试系统,将压力读数调零;②依次向测量压头上放置 100、200、300、400、500 g 砝码,分别读取和记录测试仪所显示的压力值(实际值)。

1.3.3 脊柱刚度的测量 各组大鼠饲养期结束时,使用脊柱刚度测试系统对大鼠造模节段脊柱刚度进行测量。测量方法如下:①大鼠腹腔 3% 戊巴比妥钠注射麻醉(30 mg/kg),待大鼠进入麻醉状态后,拆除外部连接钢板,将其俯卧位固定于水平固定台上;②将 SSTS 与棘突固定钢板相连接(图 1),并将 SSTS 调定为手动启动档,调整加载探头起始速度和压力(起始速度为 3.00 mm/s,起始压力为 0.00 N);③将 SSTS 调定为电脑控制档,通过计算机启动测试仪(加载力达到阈值 3 N 时,系统自动停止),自动读取并记录数据,形成载荷-位移曲线。每只大鼠依此测量 3 次刚度。

1.4 观察项目及方法

1.4.1 SSTS 的标定 为保证 SSTS 压力测量的准确性,使用前对其压力探头进行标定。根据标准砝码对 SSTS 加载探头进行标定的实际值和砝码所产生的重力来计算 SSTS 加载探头的测量误差,以确保 SSTS 测量的准确性。计算过程如下:根据公式 G=mg(其中 g 取 9.8 N/kg,m 单位为 kg)依次算出各个砝码所产生的重力(理论值)并与测试仪测量的实际值相比对,误差=[(实际值-理论值)/理论值]×100%。

1.4.2 SSTS 的信度 采用每只大鼠刚度的 3 次测

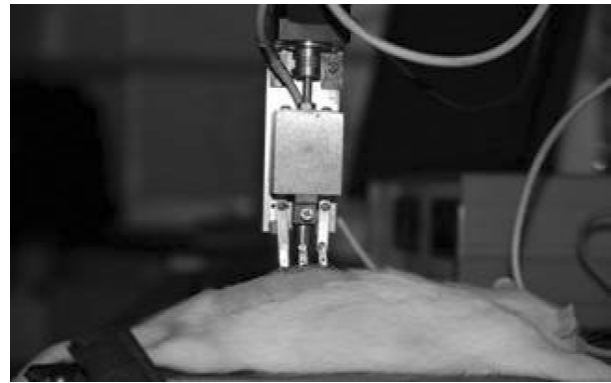


图 1 加载探头连接图 Fig.1 Linking mode of Loading probe

量结果(97 只),对脊柱刚度测试系统的信度(组内相关系数)进行检验。刚度是物体抵抗变形的能力,通常用使物体产生形变的力除以该力产生的形变(单位:N/mm),在力-位移曲线图上,刚度可以用曲线任意点上的斜率描述<sup>[2]</sup>。在实际计算中,通常采用载荷-位移曲线中近似线性区域进行直线拟合<sup>[3]</sup>,用拟合直线的斜率表示刚度。因此,本研究将测量得到的近似直线区域载荷和位移数据导入 Excel,利用其最小二乘法计算程序算出刚度直线的斜率(假设直线方程为 y=a+bx,斜率 b=[∑(x<sub>i</sub>- $\bar{x}$ )(y<sub>i</sub>- $\bar{y}$ )]/∑(x<sub>i</sub>- $\bar{x}$ )<sup>2</sup>,x 轴为位移,y 轴为载荷)。

1.5 统计学处理 采用 SPSS 16.0 统计软件,SSTS 检测刚度结果进行一致性(组内相关系数)检验,计量资料以  $\bar{x} \pm s$  形式表示,检验水准  $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 SSTS 标定 脊柱刚度测试系统加载探头标定结果显示,实际误差不超过 0.04%(表 1)。其误差范围符合实际测试要求<sup>[4]</sup>。可用于相关脊柱刚度的检测研究。

表 1 砝码对 SSTS 压力传感器标定结果

Tab.1 Calibrate parameters of pressure sensor of SSTS by weights				
砝码重量(g)	理论值(N)	实际值(N)	误差值(N)	误差(%)
100	0.98	0.98	0	0
200	1.96	1.96	0	0
300	2.94	2.94	0	0
400	3.92	3.93	0.01	0.03
500	5.00	5.02	0.02	0.04

2.2 SSTS 信度检验 信度是对同一事物进行重复测量时,所得结果的一致性程度。它反映了测量工具的稳定性或可靠性。在检测实验中,研究人员对每只造模成功大鼠进行 3 次刚度检测(表 2),依据检测结果进行 SSTS 信度检验,结果显示脊柱刚度测试系统具有较好的可靠性,组内相关系数为 0.948 (F=

表 2 大鼠脊柱刚度测量值(N/mm)  
Tab.2 Data of spine stiffness of rats(N/mm)

大鼠	第 1 次测量	第 2 次测量	第 3 次测量	均数
1 周组第 1 只	3.95	3.96	3.77	3.89
1 周组第 2 只	1.77	1.88	2.35	2.00
1 周组第 3 只	3.07	3.14	2.81	3.01
1 周组第 4 只	1.95	1.99	2.16	2.03
...	...	...	...	...
12 周组第 18 只	10.12	10.02	10.35	10.16
12 周组第 19 只	10.80	10.73	10.37	10.63
12 周组第 20 只	11.15	11.74	10.87	11.25

55.383,  $P < 0.01$ )。

在对 SSTS 信度检验的同时,本研究也观察了连接时间对大鼠造模节段刚度的影响,发现大鼠造模节段的刚度随连接时间的延长(1、2、4、8、12 周)而增加(表 3)。这也和相关报道是吻合的,Henderson 等<sup>[5]</sup>发现造模后大鼠脊柱造模节段刚度固定 1 周增加 245%,固定 16 周时已增加 323%;Lee 等<sup>[6]</sup>认为病变导致脊柱背-腹方向刚度变化,是一种时间依赖性反应。

表 3 各组大鼠平均刚度( $\bar{x} \pm s$ , N/mm)  
Tab.3 Average of stiffnesses of every groups( $\bar{x} \pm s$ , N/mm)

测量次数	平均刚度				
	1 周组 (18 只)	2 周组 (20 只)	4 周组 (20 只)	8 周组 (19 只)	12 周组 (20 只)
第 1 次	2.78±0.83	3.01±0.49	3.85±0.81	5.01±1.06	8.51±1.65
第 2 次	2.81±0.91	2.78±0.46	3.92±0.86	4.97±0.96	8.67±1.76
第 3 次	2.49±0.68	2.33±0.58	3.88±1.20	4.98±1.08	8.39±1.93
总体均值	2.71±0.76	2.71±0.41	3.88±0.80	4.99±0.88	8.52±1.72

### 3 讨论

**3.1 脊柱刚度的复杂性** 人体脊柱生物力学系统有着复杂的几何形态和组织特性,使其具有非线性的、不均匀的、各向异性的刚度<sup>[7]</sup>。同时,脊柱的刚度由脊柱各运动节段的刚度共同构成。临床脊柱功能受限的患者也常感觉到脊柱某一节段的功能受限,活动被卡住<sup>[8]</sup>。因此,研究人员通常选择具有代表性的脊柱运动节段进行刚度研究。脊柱运动节段的非线性刚度取决于构成运动节段的所有成分,包括关节突关节、椎间盘、关节囊、椎间韧带、肌肉及运动节段几何对称等方面<sup>[9]</sup>。因此,这种非线性的刚度在起始阶段区域(toe zone),随着力的增加,形变迅速增加,表明此时标本的刚度很低,继续增加负荷,刚度会逐渐恒定,呈近似线性关系,当到达弹性极限时,刚度开始下降,意味着组织开始受损,当刚度降到零时,终极损伤发生<sup>[10]</sup>。因此,使用 SSTS 评估各种模型脊柱运动节段刚度时,应首先确定加载力的范

围(本研究 0~3 N)<sup>[11]</sup>,防止测量时造成再次损伤,影响测量结果。

同时,脊柱运动节段刚度变化是一个复杂的过程。脊柱承受背-腹方向力学载荷时,发生的是一种极其复杂的运动,包括脊柱的背伸、骨盆的前旋、腹部的收缩及一系列的椎间运动<sup>[6]</sup>。研究表明呼吸肌等肌肉活动也对背-腹方向刚度检测产生明显的影响<sup>[12]</sup>。SSTS 检测的差异可能与这些复杂的因素相关。因此,如何区分这些复杂变量对刚度变化的影响,将成为今后 SSTS 改良的方向之一。

**3.2 脊柱刚度测试系统** 临床上,脊柱推拿医生通过触诊测定脊柱对力学载荷诱导的位移反应,从而确定脊柱运动节段锁定状态的评估方法也已被证明是可靠的<sup>[13]</sup>。因此,本研究运用可控装置在某一脊柱运动节段上施加逐渐增大的定向力,同时记录此力导致该运动节段相对于其前后节段的位移。从而得到该运动节段载荷-位移曲线,并通过软件拟合与该曲线最相近的直线,用拟合成直线的斜率表示此脊柱运动节段的刚度。

脊柱刚度测试系统由加载装置、控制装置和系统软件 3 部分组成。加载装置主要功能是实施加载力、测定加载力诱导的位移;控制装置可控制加载速度、实施计算机与手动控制的转换等;采用 Visual C++ 6.0 编写的系统软件可实现对每个时间节点的载荷与位移的数据管理,并可以导出 Excel 格式数据和载荷-位移曲线图,通过曲线斜率描述脊柱运动节段刚度变化,便于计算与分析。

SSTS 具有较好的准确性和可靠性。其控制软件操作简单、易于掌握,可准确采集各点的压力载荷和脊柱运动节段产生的微小位移参数,数据可通过 Excel 导出,便于统计处理;同时,可输出载荷-位移曲线图,便于观察。但是,SSTS 在固定辅件的选择、测量范围的确定、干扰变量的区分等方面仍需改进,以便 SSTS 适用于更多脊柱伤病模型。

#### 参考文献

- [1] Edmondston SJ, Allison GT, Gregg CD, et al. Effect of position on the posteroanterior stiffness of the lumbar spine[J]. Man Ther, 1998, 3(1): 21-26.
- [2] 刘献祥,尉禹,王志彬,等.骨伤科生物力学研究[M].北京:北京科学技术出版社,2006:29.  
Liu XX, Wei Y, Wang ZB, et al. Biomechanical study of bone traumatology department[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing House, 2006: 29. Chinese.
- [3] Nicholson L, Maher C, Adams R. Hand contact area force applied and early non-linear stiffness(toe) in a manual stiffness discrimination task[J]. Man Ther, 1998, 3(4): 212-219.
- [4] 李永霞,曾衍钧,张维波.生物软组织刚度测量仪的研制及其对人体穴位的测量[J].实验力学,1999,14(1): 89-95.  
Li YX, Zeng YJ, Zhang WB. Research on the instrument for survey-

ing the stiffness of biological soft tissue and its application to Chinese traditional medicine[J]. Shi Yan Li Xue, 1999, 14(1): 89-95. Chinese.

[5] Henderson CN, DeVocht JW, Kirstukas SJ, et al. In vivo biomechanical assessment of a small animal model of the vertebral subluxation[C]. Bloomington; Proceedings of the International Conference on Spinal Manipulation, 2000; 193-195.

[6] Lee M, Steven GP, Crosbie J, et al. Towards a theory of lumbar mobilisation - the relationship between applied manual force and movements of the spine[J]. Man Ther, 1996, 1(2): 67-75.

[7] Haldeman S. Principles and Practice of Chiropractic (third edition) [M]. New York; McGraw-Hill, 2005; 340.

[8] 缪鸿石. 康复医学理论与实践(下册)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000; 1703-1706.  
Miao HS. Rehabilitation medicine theory and practice (Rudin) [M]. Shanghai; Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000; 1703-1706. Chinese.

[9] Nordin M, Frankel VH. 肌肉骨骼系统基础生物力学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008; 172.  
Nordin M, Frankel VH. Biomechanics base of musculoskeletal system[M]. Beijing; People's Medical Publishing House, 2008; 172. Chinese.

[10] Adams MA, Bogduk N, Burton K. 腰痛的生物力学[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2005; 6.  
Adams MA, Bogduk N, Burton K. The biomechanics of back pain [M]. Beijing; Beijing Medical University Press, 2005; 6. Chinese.

[11] Henderson CN, Cramer GD, Zhang Q, et al. Introducing the external link model for studying spine fixation and misalignment: part 2, biomechanical features[J]. J Manipulative Physiol Ther, 2007, 30(4): 279-294.

[12] Shirley D, Hodges PW, Eriksson AE, et al. Spinal stiffness changes throughout the respiratory cycle[J]. J Appl Physiol, 2003, 95(4): 1467-1475.

[13] Pearcy MJ, Hindle RJ. New method for the non-invasive three-dimensional measurement of human back movement[J]. Clin Biomech, 1989, 4(1): 73-79.

(收稿日期: 2011-08-16 本文编辑: 王宏)

### 致谢《中国骨伤》杂志 2011 年度审稿人和受邀撰稿人

《中国骨伤》编辑委员会及杂志社对 2011 年度的审稿人和受邀撰稿人表示衷心地感谢!

(以姓氏汉语拼音字母为序)

- |                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| 董福慧 中国中医科学院望京医院        | 王序全 第三军医大学第一附属医院西南医院  |
| 董健 复旦大学附属中山医院          | 王岩 中国人民解放军总医院         |
| 范顺武 浙江大学附属邵逸夫医院        | 王拥军 上海中医药大学附属龙华医院     |
| 房世源 中国中医科学院望京医院        | 卫小春 山西医科大学第二医院        |
| 高伟阳 温州医学院附属第二医院        | 吴泰相 四川大学华西医院          |
| 郭卫 北京大学人民医院            | 伍骥 北京空军总医院            |
| 胡良平 军事医学科学院生物医学统计学咨询中心 | 徐荣明 宁波市第六医院           |
| 蒋青 南京大学医学院附属鼓楼医院       | 徐向阳 上海交通大学医学院附属瑞金医院   |
| 蒋协远 北京大学积水潭医院          | 许硕贵 第二军医大学附属长海医院      |
| 李为农 中国中医科学院望京医院        | 杨自权 山西医科大学第二医院        |
| 吕智 山西医科大学第二医院          | 俞光荣 上海同济大学附属同济医院      |
| 刘亚波 北京大学积水潭医院          | 袁文 第二军医大学附属长征医院       |
| 刘智 北京军区总医院             | 詹红生 上海中医药大学附属曙光医院     |
| 刘仲前 四川省人民医院            | 张保中 中国医学科学院北京协和医院     |
| 马远征 中国人民解放军 309 医院     | 张功林 兰州军区总医院创伤骨科研究所    |
| 邱勇 南京大学医学院附属鼓楼医院       | 张建政 北京军区总医院全军创伤骨科研究所  |
| 阮狄克 中国人民解放军海军总医院       | 张磊 中国中医科学院望京医院        |
| 桑志成 中国中医科学院望京医院        | 张世民 中国中医科学院望京医院       |
| 沈霖 武汉同济大学附属协和医院        | 张兴平 中国中医科学院望京医院       |
| 孙常太 北京医院               | 张英泽 河北医科大学第三医院        |
| 孙天胜 北京军区总医院            | 赵建宁 南京军区南京总医院         |
| 孙铁铮 北京大学人民医院关节病诊疗研究中心  | 赵平 中国人民解放军空军总医院       |
| 谭明生 中日友好医院             | 赵勇 中国中医科学院望京医院        |
| 王爱民 第三军医大学第三附属医院大坪医院   | 周卫 中国中医科学院望京医院        |
| 王宸 东南大学附属中大医院          | 朱振安 上海交通大学医学院附属第九人民医院 |
| 王军强 北京大学积水潭医院          | 周跃 第三军医大学新桥医院         |
| 王坤正 西安交通大学第二临床医学院      |                       |