

离体脊柱生物力学测试的加载方法研究进展

谢 勇, 晏怡果

(南华大学附属第一医院 脊柱外科, 湖南 衡阳 421001)

摘要:离体脊柱标本三维运动载荷-位移特性的描述是脊柱生物力学研究的基础,如何准确地模拟在体脊柱的载荷与运动情况是脊柱生物力学研究的难点。国内外学者从测试理论与测试工具上都进行了大量的研究。目前脊柱三维运动测试按照控制方法主要分为载荷控制、位移控制和混合控制。基于不同的控制方法,测试工具也在不断的发展与完善之中。总结目前国内外研制的脊柱离体加载装置的工作原理,并分析其主要优缺点,为离体脊柱生物力学加载装置研究提供参考。

关键词:脊柱;生物力学测试;加载;三维运动

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI:10.16156/j.1004-7220.2018.02.014

Advances in Loading Methods of *in vitro* Spinal Biomechanical Test

XIE Yong, YAN Yiguo

(Department of Spinal Surgery, the First Affiliated Hospital, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China)

Abstract: The description for load-displacement characteristics of *in vitro* spinal specimens in three-dimensional (3D) motion is the foundation of spinal biomechanical research. How to simulate the load and movement of spine *in vivo* as accurately as possible is the difficulty of *in vitro* spinal biomechanical research. Domestic and foreign scholars have carried out extensive research on theories and equipments of spinal biomechanical test. Currently, the spinal 3D motion test is mainly divided into load control, displacement control and hybrid control according to the control method. Based on different control method, the test equipments are also developing and perfecting constantly. The operation principle for current *in vitro* spinal loading devices are summarized, and their advantages and disadvantages are also analyzed, so as to provide references for the research on *in vitro* spinal biomechanical loading devices.

Key words: spine; biomechanical testing; loading; three-dimensional (3D) movement

脊柱运动是三维空间6个自由度的耦合运动,离体脊柱运动加载装置经历了从单自由度到多自由度、从手动控制到自动控制、从载荷/位移控制到混合控制、从静态逐级加载到动态连续加载的发展过程,如何精确模拟脊柱的负载和运动状态一直是脊柱生物力学研究的热点和难点。Wilke等^[1]早在

1998年指出,脊柱运动加载装置应满足下列要求:①标本能在所有6个自由度上自由运动;②加载装置能够分别加载6个负载分量;③提供所有可能的加载方式;④允许连续或逐步进行;⑤标本在正反方向上连续装载,以获得整个运动周期的载荷-位移曲线。季伟等^[2]提出,脊柱三维运动实验加载应

收稿日期:2017-02-22;修回日期:2017-02-25

基金项目:国家自然科学基金项目(31400802),湖南省卫生与计划生育委员会临床医学重点研究项目(A2017016)

通信作者:晏怡果,副主任医师,E-mail:yan_yiguo@qq.com

设计更科学、更精确、更多样的加载平台和控制模块;要更好地模拟在体脊柱的加载方式,进一步研究加载途径,以得到更接近临床实际情况的数据。杜仕骞等^[3]认为,脊柱三维运动实验加载应满足:① 设计合理、可靠,能模拟脊柱真实的生理载荷和反映脊柱真实的运动;② 功能齐全,能满足三维运动实验的各种加载需求;③ 操作简单,更智能。另外,Panjabi 等^[4]也认为,并不一定要使用新的、全面的测试加载装置,只需根据实际情况,设计出简单、经济、实用的加载装置,完成所需的测试即可。目前国内外已有多种离体脊柱加载装置,按控制方法主要分为载荷控制^[5-12]、位移控制^[13]和混合控制 3 种。

1 脊柱生物力学控制方法

1.1 载荷控制

载荷控制即柔性测试方法,这是基于使用纯力矩作为输入的协议^[7]。纯力矩具有两个重要优点:① 施加到脊柱标本的纯力矩同样可应用于标本的所有节段;② 在测试期间,纯力矩可保持与脊柱形变方向相同^[14]。其加载装置应具备以下 3 个基本条件:① 脊柱标本完全不受约束而允许自由移动;② 施加的力矩保持为纯力矩;③ 力矩大小及其方向保持与被施加力矩的末端椎体形变方向相同^[7]。

1.2 位移控制

位移控制即刚性测试方法,这种方法基于位移输入协议,但存在几个实际难点^[14]:① 在位移加载过程中,如何确定测试脊柱标本的瞬时旋转中心;② 即使找到瞬时旋转中心,在整个测试过程中,瞬时旋转中心不太可能保持在相同的位置;③ 如果瞬时旋转中心与标本的不一致,脊柱标本在这种非生理位移下可能会被损伤;④ 当标本有植入物时,其旋转中心也会随之改变。已有研究表明,瞬时旋转中心的变化,会导致测试标本的载荷-位移曲线的显著变化^[13]。

1.3 混合控制

Goel 等^[6]比较了用于脊柱样本生物力学测试的载荷控制和位移控制方法的相对优点和缺点。在脊柱的中性区,载荷控制比位移控制的控制效果差,大幅度的位移变化才能产生小的载荷变化;在脊柱的弹性区则相反,小幅度的位移变化能产生大

的载荷变化。因此,对于脊柱样本的体外生物力学测试,载荷控制和位移控制方法是互补的,在载荷-位移曲线的特定区域应该采用不同的控制方法,即混合控制。已有研究证实载荷-位移混合控制优于单独应用任何其中一种控制方法^[15]。

2 目前已有的离体脊柱加载装置

2.1 基于滑轮和线缆的加载装置

卢海俊等^[16]介绍了一种通过连于加载盘的滑轮砝码的装置,该装置支架由型钢制成,下部是供固定脊柱标本的工作台,上部装有 6 个滑轮,可在两个相互垂直的方向上随脊柱上端的运动而移动,以保证作用于加载盘上的力始终保持垂直方向。其中 2 个滑轮用于抵消加载盘的重量对脊柱产生的压力。将尼龙线缠绕在圆盘的 V 形槽中,并通过滑轮连于加载砝码,在加载盘上作用一对方向相反、大小相等、相互平行的力,形成作用在脊柱标本上的纯力矩,实现脊柱标本屈/后伸、左/右侧弯、和左/右旋转运动。该设备设计简捷,造价低,能实现相应的脊柱运动。但是该加载方式仍有几个问题需要解决:① 手动操作,精度不高;② 不能实现动态连续加载,只适合于静态加载;③ 不能进行运动加载位置的快速转换。

Crawford 等^[17]在以往报道的电缆和滑轮的测试装置的基础上,使用伺服液压驱动器取代先前的系统使用气动驱动器或自重方式,使加载力矩更为精确。Lysack 等^[18]使用微型高性能微步进驱动器控制加载实现了在一段脊柱样本上的连续纯力矩载荷加载(见图 1)。已有研究表明,增加测试时间及时间间隔引起蠕变会导致运动范围和中性区的测量偏差。季伟等^[19]设计的加载盘具有旋转锁定功能,可以使加载盘和内旋转框架进行 360°自由旋转,并于所需测试位置进行锁定,使脊柱标本在屈伸、左右侧弯及左右轴向旋转的测试位置间可以快速转换,而不需要重新拆卸脊柱标本,减少了测试时间及时间间隔,从而减小了实验误差。

Panjabi 等^[14]研究发现,使用“固定环”装置施加的力矩要小于理想中需要施加的纯力矩。Eguizabal 等^[20]使用“滑动环”方法代替传统的“固定环”,并对两种装置进行对比研究;结果表明,固定环系统施加屈曲-伸展力矩比预期值小 50%~60%。

Tang 等^[21]采用“3D 浮动环”技术,解决了第1代滑动环设计的固定环技术的缺点,允许环在屈曲延伸所需的矢状面中浮动;该3D 浮动环设计允许在额状面中的附加浮动方向用于横向弯曲,施加的力矩更接近生理状态所受的力矩,产生的剪切力也更小。基于滑轮和线缆的加载装置可实现纯力矩加载,但是由于装置自身存在较大的摩擦力,可能会影响最终的测试结果。

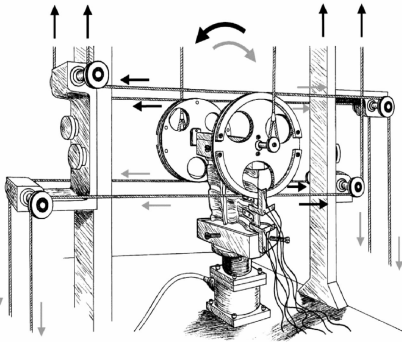


图1 基于滑轮和线缆的加载装置^[18]

Fig. 1 Loading device based on pulleys and cables

2.2 基于材料试验机的加载装置

Kunz 等^[22]构建了一种基于材料试验机 (mechanical testing system, MTS) 和弯曲控制器的脊柱生物力学加载平台,实现离体脊柱标本的轴向扭转、轴向压缩拉伸和屈伸测试,减少了测试标本在环境中的暴露时间以及标本受环境温度或湿度条件的影响。Tai 等^[23]基于 MTS 机设计了一套实现脊柱节段标本屈伸和轴向运动的加载装置,脊柱上端固定在一个特制的长方形金属板中心,在金属板上侧面分布着等距的小螺孔,可与 MTS 机铰链的支架通过螺钉与不同的小孔连接实现标本在屈伸和轴向运动状态下的加载。Zhu 等^[24]在 Tai 等^[23]设计的装置的基础上进行改进,将脊柱标本上端的固定长板改由可滑动的导轨取代,实现了标本屈曲和伸展运动加载的快速转换。基于 MTS 机的加载装置实现了力矩的精确加载,但依然无法实现脊柱标本在 6 自由度的耦合运动和屈伸两个方向的持续加载。

2.3 基于笛卡尔系统的加载装置

有研究者设计、编程和测试了具有级联控制算法的定制 6 自由度笛卡尔负载控制生物力学测试系统^[25-27] (见图 2),该装置由 6 自由度笛卡尔系统

和 6 轴力传感器组成,包括滚动万向关节的 3 个谐波驱动电机,该装置位移和旋转精度分别等于或小于 $6.35 \mu\text{m}$ 和 0.016° 。在 L4 ~ 5 和 L1 ~ S 尸体脊柱上的先导多向柔性测试表明,与非机器人标准测试相比,该装置具有稳定且准确的实时负载控制能力。级联算法简化了控制应用,而不需要样本建模,克服了常规跟随载荷限制,其主要缺点是:① 控制程序复杂,校准难度大;② 装置体积大且适用范围较窄。

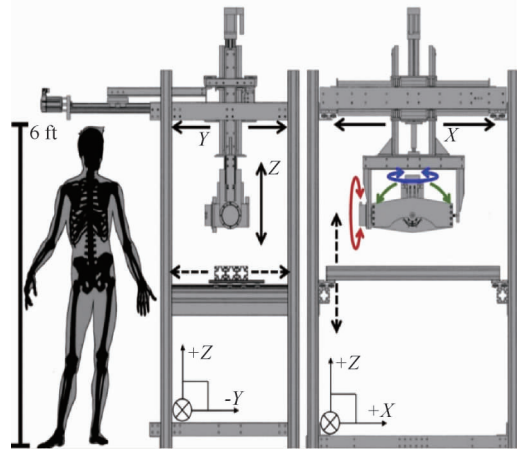


图2 基于笛卡尔系统的加载装置^[25-27]

Fig. 2 Loading device based on Cartesian system

2.4 基于钟摆系统的加载装置

Crisco 等^[28]建立了一种新颖的钟摆加载装置 (见图 3)。该装置通过将脊柱标本下端固定在刚性平台上,上端连接可摆动的摆锤,通过增加摆锤的重量将轴向压缩载荷加载到脊柱标本上,将摆锤拉到适当的角度释放,从而使脊柱标本完成不受约束的持续加载的屈伸运动。但是该装置只能完成屈伸运动,而无法实现侧弯、旋转等运动加载,且施加的压缩载荷会限制脊柱节段的运动,且无法实现精准的纯力矩加载。

2.5 基于并联机器人的加载装置

Stokes 等^[29]基于 Stewart 平台构建的脊柱生物力学测试装置包括一个移动平台,由安装在固定基座上的 6 个线性促动器支撑,通过控制促动器长度,平台可以驱动到任何 6 自由度位置。在移动平台下面安装 6 自由度力传感器,实验标本安装在该测力传感器的下方。该装置平移和旋转精度分别为 $8 \mu\text{m}$ 和 0.004° 。Amin 等^[30]等提出了一种基于

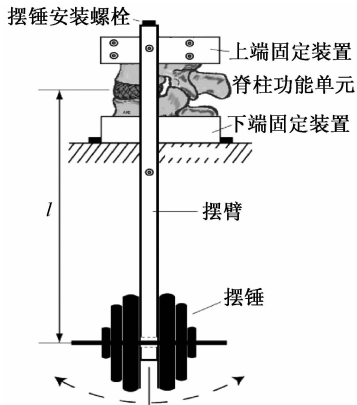


图3 基于钟摆系统的加载装置^[28]

Fig.3 Loading device based on pendulum system

Stewart 平台的新型操纵器(见图4),具有从致动器位置完全解耦到传感器位置的能力,以便被动地补偿负载框架柔韧性,从而提高了6自由度的操纵器的有效刚度。该方法可用于设计具有特定刚度要求的系统。模拟结果表明,与一般装置相比,该装置增加了约15倍的有效刚度;解决了以往装置当施加大的力矩或扭矩时,机器人对系统的总体精度的负面影响;增加刚性、精度和强度。而它的局限性包括工作空间小而复杂,其校准程序、控制方法和运动方法也相对复杂^[31]。

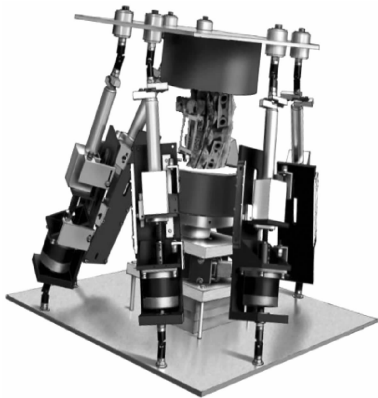


图4 基于 Stewart 平台的加载装置^[30]

Fig.4 Loading device based on Stewart platform

Goertzen 等^[32]构建了基于速度的力控制机器人生物力学测试平台,该装置与 Stokes 等^[29]设计的装置原理类似,但是将脊柱标本固定位置设置在上固定板之上,解决了上述 Stewart 平台加载装置工作空间小而复杂的缺点。

2.6 基于串联机器人的加载装置

2.6.1 基于关节臂的加载装置

Goertzen 等^[33]开发的基于关节臂的脊柱运动加载装置,该装置将伺服电机和 55:1 低反冲行星减速齿轮箱连接到关节臂,将力矩施加到试样的顶端。关节臂附接到滚珠花键一端的两个轻型万向接头上,同时将来自电机的力矩传递到标本,一个万向节将齿轮头连接到滚珠花键轴,滑动螺母经由花键轴上的中空铝管连接到第 2 个万向接头。将转矩测量负载单元固定在第 2 万向节和标本顶端的铝固定装置之间,再将标本底端固定装置连接到 6 轴负载传感器。该装置优点在于能够施加更接近生理负载的连续负载,从而减小摩擦力和惯性效应。方河炎^[34]搭建的生物力学加载平台也是基于此类关节臂的加载装置。林周胜^[35]使用上述装置对腰椎后路经椎弓根动态与柔性内固定的生物力学特性进行了相关研究。

2.6.2 基于 6 轴机器人的加载装置

基于 6 轴机器人的加载系统主要包括:① 6 自由度串联机器人;② 程序控制主机和数据采集计算机;③ 6 自由度力/扭矩传感器。该装置可以实现位移控制与载荷控制相结合的混合控制,弥补了以往单纯使用载荷控制或位移控制的加载装置的不足,除可以高精度的完成 6 个自由的运动以外,还能完成多轴联合的复杂运动,如前屈/右侧屈的同时右旋转等,更好地模拟人体脊柱的三维运动。

Fujie 等^[36]利用混合控制方法,其使位置控制的机器人能够通过逐步施加的位移以叠加的方式实现指定的载荷目标,并将机器人应用于人体关节生物力学测试。该系统设计构造为一个 6 自由度运动功能的机械臂,关节的力及位置均可被数字化记录,并能通过硬件与软件控制施加于关节的力与位移,并可以通过机器人模拟关节的复杂运动与载荷。Thompson 等^[37]使用 Kawasaki 机器人,对羊腰椎进行前曲/后伸、侧向弯曲和轴向旋转的动态脊柱运动测试,并对椎间关节的中性区进行实验评估;结果表明,中性区域存在于椎间关节动态运动期间的屈曲/伸展中,并且是关节运动的自然范围。Visser 等^[38]研究一种用于研究复杂生物关节力学的新型 6 自由度机器人测试设备,该设备能够产生更大的载荷和位移,同时保持相似的精确度;使用 ABB IRB 4400/60 工业机器人实现了 6 自由度加

载。Schulte 等^[39]通过基于 KUKA 工业机器人实验装置分析动态半刚性植入物以及彻底减压对人腰椎节段的运动范围(range of motion, ROM)和中性区在体外环境中的影响,但并未详细介绍该实验系统的控制精度及控制方案。Schulze 等^[40]提出了一种基于 KUKA/KR125 机器人的设备,其精确度较高,并将该设备用于测试多节段脊柱单元运动分析,评估和验证了该系统的可靠性和可重复性,提供了单和多节段测试的 ROM 结果,与已有文献报道的结果一致。研究发现,使用具有常规控制频率(60~100 Hz)的机器人可以显著影响系统的稳定性,基于此, Martínez 等^[41]开发了具有高控制频率的6个轴的直接力控制装置(RX 90-B, Stäubli 公司,瑞士),并成功实现了生物力学测试的过程,样本可以在自由空间中移动。邓国勇等^[42]设计了一套基于计算机控制的6自由度机器人全新实验装置(Tx90, Stäubli 公司,瑞士)(见图5),采用混合

力/位移控制方法对实验对象进行加载。陈艺等^[43]使用基于计算机控制的6自由度机器人,比较经骨折 L3 椎体4枚、5枚与6枚椎弓钉固定术治疗胸腰椎爆裂性骨折的生物力学稳定性效果。

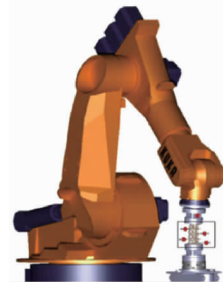


图5 基于6轴机器人的加载装置^[42]

Fig. 5 Loading device based on 6-axis robot

综上所述,目前国内外已有众多离体脊柱生物力学运动加载装置,各装置的优缺点总结如下(见表1)。

表1 不同加载装置比较

Tab. 1 Comparison of different loading devices

加载装置	研究团队	装置组成	控制方法	自由度	智能控制	加载方式
基于滑轮和线缆的加载装置	卢海俊等 ^[16]	滑轮、线缆、砝码	载荷控制	1(位置转换后可达3自由度)	否	静态逐级
	Crawford 等 ^[17]	滑轮、线缆、伺服液压驱动器			否	静态逐级
	Lysack 等 ^[18]	滑轮、线缆、微型高性能微步进驱动器			否	动态连续
	季伟等 ^[19]	360°旋转滑轮和线缆框架			否	静态逐级
	Eguizabal 等 ^[20]	滑动滑轮装置			否	静态逐级
	Tang 等 ^[21]	3D浮动滑轮装置			否	静态逐级
基于 MTS 机的加载装置	Kunz 等 ^[22]	MTS 机、弯曲控制器	载荷/位移控制	2(位置转换后可达3自由度)	否	动态连续
	Tai 等 ^[23]	MTS 机、多孔金属板	载荷/位移控制		否	动态连续
	Zhu 等 ^[24]	MTS 机、滑动导轨	载荷/位移控制		否	动态连续
基于笛卡尔系统的加载装置	Kelly 等 ^[25]	笛卡尔系统	载荷控制	2	是	动态连续
基于钟摆系统的加载装置	Crisco 等 ^[28]	钟摆系统	载荷控制	1	否	静态逐级
基于并联机器人的加载装置	Stokes 等 ^[29]	Stewart 平台	混合控制	6	是	动态连续
	Goertzen 等 ^[32]	基于速度的力控制机器人				
基于关节臂的加载装置	Goertzen 等 ^[33]	关节臂的加载装置	混合控制	3	是	动态连续
	Thompson 等 ^[37]					
基于6轴机器人的加载装置	Visser 等 ^[38]	6轴机器人、程序控制主机和数据采集计算机、6自由度力/扭矩传感器	混合控制	6	是	动态连续
	Schulte 等 ^[39]					
	Schulze 等 ^[40]					
	Martínez 等 ^[41]					
	邓国勇等 ^[42]					

3 结语

脊柱离体加载装置的研究是脊柱生物力学的基础,目前使用的基于6轴机器人的加载装置能有效模拟6自由度上的运动,并能完成多轴联合

的复杂运动,同时,采用混合控制方法,能满足不同要求的测试。目前仍可以在以下几个方面改进:①提高仿生度和多维耦合运动控制能力,使其能满足更加复杂的测试要求;②加载装置控制程序可更加简洁、方便;③生物力学与分子生物学

相结合,实现组织水平,甚至细胞水平的生物力学研究。随着目前科技的飞速发展,人工智能技术日新月异,相信在不久的将来定会有更智能、更合理、更精确、更全面的离体脊柱生物力学加载装置出现。

参考文献:

- [1] WILKE HJ, WENGER K, CLAES L. Testing criteria for spinal implants: Recommendations for the standardization of *in vitro* stability testing of spinal implants [J]. *Eur Spine J*, 1998, 7(2): 148-154.
- [2] 季伟,王向阳. 脊柱离体运动加载方法研究进展 [J]. *医用生物力学*, 2012, 27 (4): 464-469.
JI W, WANG XY. Advances on loading methods for spinal movement *in vitro* [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27 (4): 464-469.
- [3] 杜仕骞,黄学进,李晋川,等. 脊柱三维运动离体实验加载技术研究进展 [J]. *实验科学与技术*, 2012, 10(3): 27-30.
- [4] PANJABI MM, KATO Y, HOFFMAN H, et al. A study of stiffness protocol as exemplified by testing of a burst fracture model in sagittal plane [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2000, 25(21): 2748-2754.
- [5] GOEL VK, GOYAL S, CLARK C, et al. Kinematics of the whole lumbar spine. Effect of discectomy [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1985, 10(6): 543-554.
- [6] GOEL VK, WILDER DG, POPE MH, et al. Biomechanical testing of the spine. Load-controlled versus displacement-controlled analysis [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1995, 20 (21): 2354-2357.
- [7] PANJABI MM. Biomechanical evaluation of spinal fixation devices: I. A conceptual framework [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1988, 13(10): 1129-1134.
- [8] PANJABI MM. Experimental determination of spinal motion segment behavior [J]. *Orthop Clin North Am*, 1977, 8 (1): 169-180.
- [9] PANJABI M, MALCOLMSON G, TENG E, et al. Hybrid testing of lumbar CHARITE discs versus fusions [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2007, 32(9): 959-966.
- [10] WILKE HJ, CLAES L, SCHMITT H, et al. A universal spine tester for *in vitro* experiments with muscle force simulation [J]. *Eur Spine J*, 1994, 3(2): 91-97.
- [11] WILKE HJ, ROHLMANN A, NELLER S, et al. Is it possible to simulate physiologic loading conditions by applying pure moments? A comparison of *in vitro* and *in vivo* load components in an internal fixator [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26(6): 636-642.
- [12] NIOSI CA, ZHU QA, WILSON DC, et al. Biomechanical characterization of the three-dimensional kinematic behaviour of the Dynesys dynamic stabilization system: An *in vitro* study [J]. *Eur Spine J*, 2006, 15(6): 913-922.
- [13] EDWARDS WT, HAYES WC, POSNER I, et al. Variation of lumbar spine stiffness with load [J]. *J Biomech Eng*, 1987, 109(1): 35-42.
- [14] PANJABI MM. Hybrid multidirectional test method to evaluate spinal adjacent-level effects [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2007, 22(3): 257-265.
- [15] BELL KM, HARTMAN RA, GILBERTSON LG, et al. *In vitro* spine testing using a robot-based testing system: comparison of displacement control and "hybrid control" [J]. *J Biomech*, 2013, 46(10): 1663-1669.
- [16] 卢海俊,黄继锋,吴增辉. 一种脊柱运动的加载装置和测量方法 [J]. *中国临床解剖学杂志*, 1993, 11(2): 147-148.
- [17] CRAWFORD NR, BRANTLEY AG, DICKMAN CA, et al. An apparatus for applying pure nonconstraining moments to spine segments *in vitro* [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1995, 20(19): 2097-2100.
- [18] LYSACK JT, DICKEY JP, DUMAS GA, et al. A continuous pure moment loading apparatus for biomechanical testing of multi-segment spine specimens [J]. *J Biomech*, 2000, 33(6): 765-770.
- [19] 季伟,王向阳,徐华梓,等. 脊柱三维运动测试实验装置的研制 [J]. *医用生物力学*, 2011, 26(5): 454-459.
JI W, WANG XY, XU HZ, et al. Development of an experimental device for measuring three-dimensional movement of the spine [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(5): 454-459.
- [20] EGUIZABAL J, TUFAGA M, SCHEER JK, et al. Pure moment testing for spinal biomechanics applications: Fixed versus sliding ring cable-driven test designs [J]. *J Biomech*, 2010, 43(7): 1422-1425.
- [21] TANG JA, SCHEER JK, AMES CP, et al. Pure moment testing for spinal biomechanics applications: Fixed versus 3D floating ring cable-driven test designs [J]. *J Biomech*, 2012, 45(4): 706-710.
- [22] KUNZ DN, MCCABE RP, ZDEBLICK TA, et al. A multi-degree of freedom system for biomechanical testing [J]. *J Biomech Eng*, 1994, 116(3): 371-373.
- [23] TAI CL, HSIEH PH, CHEN WP, et al. Biomechanical comparison of lumbar spine instability between laminectomy and bilateral laminotomy for spinal stenosis syndrome. An experimental study in porcine model [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2008, 9(1): 1-9.
- [24] ZHU Q, LANE C, CHING RP, et al. Translational constraint influences dynamic spinal canal occlusion of the thoracic spine: An *in vitro* experimental study [J]. *J Biomech*, 2008, 41(1): 171-179.

- [25] KELLY BP, BENNETT CR. Design and validation of a novel Cartesian biomechanical testing system with coordinated 6DOF real-time load control: Application to the lumbar spine (L1-S, L4-L5) [J]. J Biomech, 2013, 46(11): 1948-1954.
- [26] BENNETT CR, KELLY BP. Robotic application of a dynamic resultant force vector using real-time load-control: Simulation of an ideal follower load on cadaveric L4-L5 segments [J]. J Biomech, 2013, 46(12): 2087-2092.
- [27] BENNETT CR, DIANGELO DJ, KELLY BP. Biomechanical comparison of robotically applied pure moment, ideal follower load, and novel trunk weight loading protocols on L4-L5 cadaveric segments during flexion-extension [J]. Int J Spine Surg, 2015, 9(1): 33.
- [28] CRISCO JJ, FUJITA L, SPENCINER DB. The dynamic flexion/extension properties of the lumbar spine *in vitro* using a novel pendulum system [J]. J Biomech, 2007, 40(12): 2767-2773.
- [29] STOKES IA, GARDNER-MORSE M, CHURCHILL D, *et al.* Measurement of a spinal motion segment stiffness matrix [J]. J Biomech, 2002, 35(4): 517-521.
- [30] AMIN DB, LAWLESS IM, SOMMERFELD D, *et al.* The effect of six degree of freedom loading sequence on the *in-vitro* compressive properties of human lumbar spine segments [J]. J Biomech, 2016, 49(14): 3407-3414.
- [31] WALKER MR, DICKEY JP. New methodology for multi-dimensional spinal joint testing with a parallel robot [J]. Med Biol Eng Comput, 2007, 45(3): 297-304.
- [32] GOERTZEN DJ, KAWCHUK GN. A novel application of velocity-based force control for use in robotic biomechanical testing [J]. J Biomech, 2009, 42(3): 366-369.
- [33] GOERTZEN DJ, LANE C, OXLAND TR. Neutral zone and range of motion in the spine are greater with stepwise loading than with a continuous loading protocol. An *in vitro* porcine investigation [J]. J Biomech, 2004, 37(2): 257-261.
- [34] 方河炎. 基于 LabVIEW 的脊柱三维运动试验机控制系统研. 广州: 华南理工大学硕士学位论文, 2012.
- [35] 林周胜. 腰椎后路经椎弓根动态与柔性内固定的生物力学研究. 广州: 南方医科大学博士学位论文, 2013.
- [36] FUJIE H, MABUCHI K, WOO SL, *et al.* The use of robotics technology to study human joint kinematics; A new methodology [J]. J Biomech Eng, 1993, 115(3): 211-217.
- [37] THOMPSON RE, BARKER TM, Pearcy MJ. Defining the Neutral Zone of sheep intervertebral joints during dynamic motions: An *in vitro* study [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2003, 18(2): 89-98.
- [38] VISSER H, ROWE C, Pearcy M. A robotic testing facility for the measurement of the mechanics of spinal joints [J]. Proc Inst Mech Eng H, 2007, 221(3): 221-227.
- [39] SCHULTE TL, HURSCHLER C, HAVERSATH M, *et al.* The effect of dynamic, semi-rigid implants on the range of motion of lumbar motion segments after decompression [J]. Eur Spine J, 2008, 17(8): 1057-1065.
- [40] SCHULZE M, HARTENSUER R, GEHWEILER D, *et al.* Evaluation of a robot-assisted testing system for multisegmental spine specimens [J]. J Biomech, 2012, 45(8): 1457-1462.
- [41] MARTÍNEZ H, OBST T, ULBRICH H, *et al.* A novel application of direct force control to perform in-vitro biomechanical tests using robotic technology [J]. J Biomech, 2013, 46(7): 1379-1382.
- [42] 邓国勇, 田联房, 陈艺, 等. 基于关节机器人的人体脊柱生物力学试验装置设计 [J]. 医用生物力学, 2008, 23(6): 446-453.
- [43] DENG GY, TIAN LF, CHEN Y, *et al.* Joint-robotics-based design of biomechanics testing device on human spine [J]. J Med Biomech, 2008, 23(6): 446-453.
- [43] 陈艺, 白波, 孙辉, 等. 短节段椎弓根钉固定术的生物力学研究 [J]. 中华创伤杂志, 2010, 26(1): 39-43.