

文章编号 1004-924X(2011)11-2709-06

## 硅压力传感器在神经拉勾中的应用

刘 星<sup>1</sup>, 黄庆安<sup>1\*</sup>, 秦 明<sup>1</sup>, 陈 辉<sup>2</sup>

(1. 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 东南大学 医学院, 江苏 南京 210009)

**摘要:** 为了避免或减少脊柱外科手术中过度牵拉神经根造成的医源性神经功能损伤, 将硅压阻式压力传感器应用于手术器械神经拉勾上来量化术中神经根的牵拉程度, 以提高脊柱疾病的手术治疗成功率。在神经拉钩接触神经根的部位安装压力传感器, 测量神经根被牵拉时所受压力。利用白兔和山羊进行不同程度和时间的神经根牵拉实验, 并同时用肌电图监测不同牵拉情况下神经根电生理反应的变化。牵拉平均压力变化约 14 kPa 时, 潜伏期变化率为 1.12%, 波幅变化率为 21.21%, 表明被牵拉神经根的轴索部位有损伤; 牵拉平均压力基本相同时, 牵拉持续时间越长, 神经根功能受损程度越大。牵拉的时间和加载在神经根上的压力与神经功能损伤程度正相关, 表明通过实验建立了神经根所受压力与相应电生理反应的联系, 有助于在今后的研究中进一步明确神经根牵拉的安全阈值。

**关键词:** 压力传感器; 硅; 拉钩; 神经根; 牵拉损伤

**中图分类号:** TP212.3; R681.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111911.2709

## Application of silicon pressure sensor to nerve root retractor

LIU Xing<sup>1</sup>, HUANG Qing-an<sup>1\*</sup>, QIN Ming<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Medical College, Southeast University, Nanjing 210009, China)

\* Corresponding author, E-mail: hqa@seu.edu.cn

**Abstract:** For reducing or avoiding the iatrogenic nerve function injury due to the excessive retraction for a nerve root during a spine surgery, a silicon piezoresistive pressure sensor was employed in the nerve root retractor to quantitate the retraction for the nerve root and to improve the performance of spine surgery. To measure the pressure exerted upon the retracted nerve root, a pressure sensor was adhered to the nerve engagement surface of a nerve retractor. The rabbit and goat experiments were performed on nerve root retraction by different time durations and pressure extendings, while the nerve function injury was assessed by monitoring the electromyogram responses. Experiments show when the increase of average pressure is about 14 kPa, the change rates of latency and amplitude are 1.12% and 21.21%, respectively, which reveals that the retracted nerve root axonal is damaged. Furthermore, loading similar average pressure, the more the retrac-

收稿日期: 2010-09-27; 修订日期: 2011-04-11.

基金项目: 南京市科技局基金资助项目 (No. 201001093); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61076071)

tion time applies to the nerve root, the worse the nerve function is hurt. In conclusion, the relationship between the pressure exerted on the nerve root and the corresponding neuromuscular responses has been founded via the results of animal experiments, which shows the degree of nerve root impairment is positively correlated with the duration and extent of nerve root retraction, and can be used in the study of retraction threshold values.

**Key words:** pressure sensor; silicon; retractor; nerve root; retraction injury

## 1 引言

慢性腰腿痛是一种常见病,相当多的患者经过保守治疗(如卧床休养、物理治疗)症状没有明显改善,病情易反复。随着医疗技术和外科手术水平的不断提高,越来越多的患者选择手术治疗,然而,手术存在一定的风险<sup>[1]</sup>。手术的操作区域在脊神经和神经根附近,为了显露操作区域,需要用手术器械神经拉钩周期性地将对侧牵拉神经根<sup>[2-4]</sup>,牵拉的程度和持续时间一般由外科医生根据经验掌握。牵拉的程度过大或时间过久,都可能损伤神经根功能,引起术后患肢麻木或神经相应支配区肌力下降,需要较长的时间来恢复功能,甚至造成神经功能的不可逆损伤<sup>[5]</sup>;而牵拉不够,不仅使手术视野显露不充分,妨碍彻底清除病灶,还会因手术域过于狭小,在器械操作中不经意间触碰神经根产生损伤<sup>[6]</sup>。因此,判断神经根耐受牵拉的程度,防止神经根过度牵拉损伤,是脊柱外科迫切需要解决的问题之一。此外,若能够量化手术中神经根所受牵拉的情况,也有利于医疗事故鉴定和减少医患矛盾。

解决医生在术中了解被牵拉神经根是否受损的问题,国内外多采用引入传感器的方案,将传感器采集的信号与常用的医学检测方法建立联系后提供较为量化的手术操作参考来提高手术成功率。但现有研究中有有的系统复杂,成本较高,不便于使用、推广<sup>[7]</sup>;还有的采用间接测量监测神经根的牵拉程度,可能引入测量误差<sup>[8]</sup>。因此,迫切需要低成本、耐用、有效的方式来获取参考信息。但当前研究神经根牵拉损伤多通过分析临床资料,基础研究不足,现有的相关动物模型亦不理想<sup>[9]</sup>。

微机电(MEMS)技术的迅速发展使传感器具有了小尺寸、高灵敏度、低噪声等优点,目前已广泛应用于生物医用领域<sup>[10]</sup>,特别是压力传感器在医疗领域的应用已日趋成熟<sup>[11]</sup>。硅传感器质

量轻、功耗低,其制造工艺与集成电路制造工艺相兼容,便于批量生产,且性价比高,目前在医疗领域已有应用。脊椎外科手术操作区域狭小,要求手术器械轻便耐用,尤其是神经拉钩的特殊性,尺寸小、轻质的 MEMS 硅传感器更有优势。因此,本文将硅压阻式压力传感器安装在神经拉钩上,用于测量脊柱外科手术中量化牵拉时神经根所受压力。神经根牵拉性损伤可由单次作用在神经根上的压力引起,也可由随时间增加的累积压力引起。因此,分组进行了不同程度和时间的神经根牵拉动物实验,并同时监测被牵拉神经根的电生理改变,以便掌握神经根受损与否和受损程度。

## 2 研究方法及实验系统构成

用医用不锈钢制作神经拉钩,在拉钩前端侧面与神经根接触的部位开槽,安放硅压阻式压力传感器芯片。被牵拉神经根所受压力通过硅橡胶传递至芯片进行测量,便于更直接准确地了解手术中神经根受牵拉的状况(图 1)。传感器与计算机相连接,所测得的压力数据可通过软件实时显

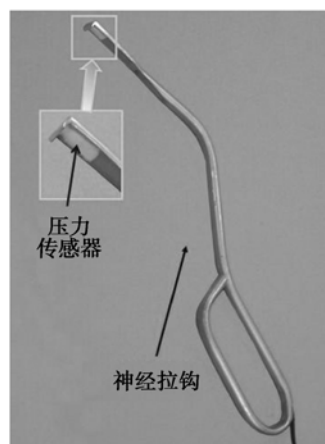


图 1 装有压力传感器的神经拉钩

Fig. 1 Nerve root retractor equipped with a pressure sensor

示和存储,能随时查阅当前和历史数据。

封装后的传感器用标准压力计量设备进行标定。压力传感器的供电电压为 15 V,量程为 0~100 kPa,对应放大后的输出信号为 0~5 V(图 2)。该传感器是用于手术器械而非植入式的,并且手术室环境温度较为恒定,故在室温下对传感器进行标定,传感器使用时温度因素对性能的影响较小。

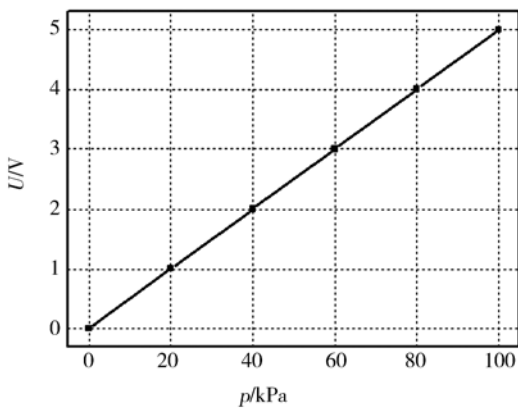


图 2 压力传感器性能

Fig. 2 Performance of pressure sensor

神经根所受机械损伤可表现为电生理传导的改变,可用肌电图(EMG)进行电生理检查。牵拉神经根后加载电刺激得到 EMG 信号,不同的牵拉情况对应不同的信号曲线,从 EMG 信号波幅和潜伏期的变化可获知各种牵拉下神经根功能的改变。一般 EMG 信号波幅降低,潜伏期延长,表明神经根受到损伤。测量 EMG 信号前设定仪器参数,显示在信号曲线上方两侧,如图 3 所示。设

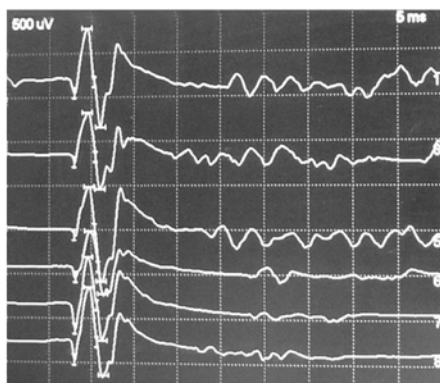


图 3 不同牵拉情况下 EMG 信号的变化

Fig. 3 EMG response signals for varied retractions

定灵敏度为 500  $\mu$ V/cm,扫描速度为 5 ms/cm,则背景网格线中横线每格代表 5 ms,竖线每格代表 500  $\mu$ V,从而可大致看出信号的波幅和潜伏期,仪器会给出每个 EMG 信号波幅和潜伏期的具体数值。

依据神经根牵拉的程度和持续时间分组进行动物实验,实验框图如图 4 所示。使用带有压力传感器的神经拉钩,按术前定位暴露手术域,解离相应区段的神经根,用神经拉钩进行牵拉,如图 5 在牵拉后的不同时间间隔加载电刺激于被牵拉的神经根节段,测量电生理反应。通过动物实验将加载于神经根上的压力和神经电生理反应相联系,辅以神经根损伤实验研究的观察方法如组织学观察,就能以牵拉的压力和时间为参数确定神经根牵拉的安全阈值,提供量化的操作参数,以便在手术中周期性放松神经根,使被牵拉神经根的功能得以及时恢复,避免造成长期性或不可逆的神经功能损伤。通过实验结果亦能建立具有良好重复性和稳定性的不同程度神经根牵拉性损伤动物模型,有助于研究损伤的机制。

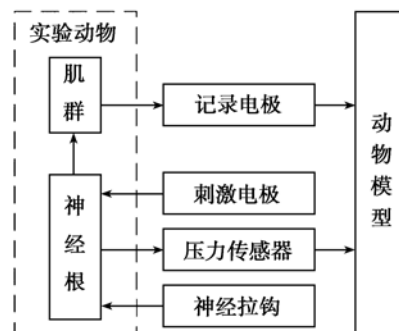


图 4 动物实验框图

Fig. 4 Block diagram of animal experiment process

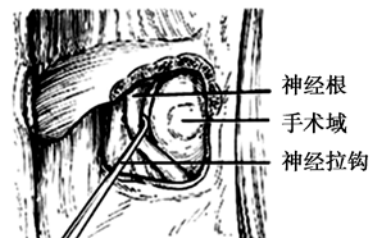


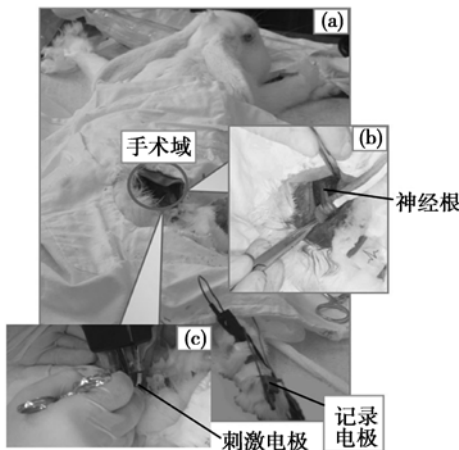
图 5 牵拉神经根并露出手术域

Fig. 5 Schematic of nerve root retraction and surgery target display

### 3 动物实验与结果分析

#### 3.1 白兔实验

选用重 2.5 kg 的健康白兔进行实验。白兔取俯卧位固定在操作台上,按术前标记显露出待牵拉神经根,如图 6(a);牵拉神经根时传感器测量出所受压力,如图 6(b);用刺激电极给神经根加载电刺激,记录电极放置在被牵拉神经根对应肌节测量反应信号,如图 6(c)。实验结束后白兔神经功能受损,已不能站立。



(a) 显露手术域 (b) 牵拉神经根 (c) 加载电刺激  
 (a) showing surgery target (b) retracting nerve root  
 (c) loading electrical stimulation

图 6 白兔实验的主要步骤

Fig. 6 Process of rabbit experiment

表 1 显示了实验中 EMG 波幅和潜伏期的变化。实验结果初步表明神经根所受压力与相应电生理反应的关系,随着加载压力的增加,波幅降低,潜伏期延长,显示神经功能受损。神经根所受压力与相应电生理反应的关系在接下来的山羊实验中做了进一步研究。

表 1 不同操作下 EMG 波幅和潜伏期的变化

Tab. 1 Amplitudes and latencies of EMG response signals

实验操作	波幅 / $\mu\text{m}$	潜伏期 / $\text{ms}$
皮肤	74	6.4
神经根	1 900	6.8
神经根牵拉 1(平均压力 15 kPa)	1 480	10.6
神经根牵拉 1 (2 min 后)	1 700	8.5
神经根牵拉 2(平均压力 20 kPa)	1 420	11.2
神经根牵拉 2(2 min 后)	1 510	8.8

#### 3.2 山羊实验

重 19.5 kg 的山羊清洁后俯卧位固定在操作台上,主要的实验设备和步骤如图 7 所示。用神经拉钩上安装的传感器测量牵拉压力,并将数据传输到计算机。被牵拉神经根所受的压力通过软件显示并保存,给神经根加载电刺激后用肌电图监测相应肌节电生理信号。实验中先定位手术域,显露相应节段神经根,用带有压力传感器的神经拉钩以不同的压力和持续时间牵拉神经根,并在每次牵拉结束后的 1,3,5 min 测量被牵拉神经根的电生理反应。

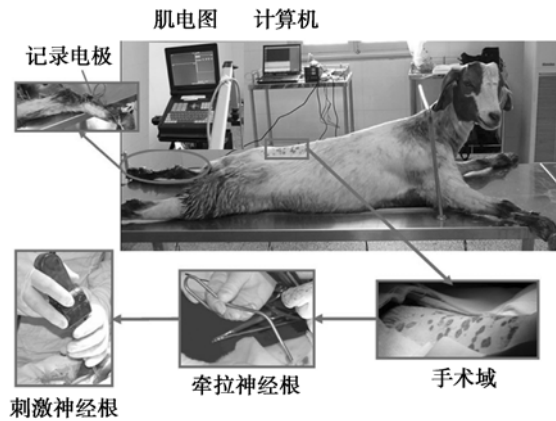


图 7 山羊实验的主要设备和实验步骤

Fig. 7 Main equipment and process of goat experiment

牵拉持续时间的增加,也会加重神经功能的损伤程度<sup>[12]</sup>。图 8 显示了 EMG 信号波幅与神经根所受压力的关系。最初两组牵拉的平均压力近似,但牵拉的持续时间不同。平均压力为 16.2 N

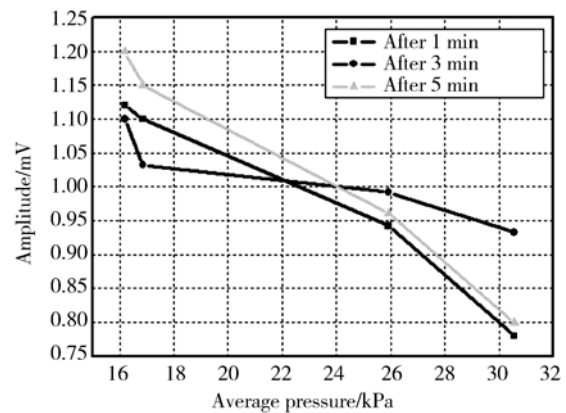


图 8 EMG 波幅与神经根所受压力的关系

Fig. 8 Amplitudes of EMG response signals

的牵拉过程持续约 1 min,而平均压力为 16.8 N 牵拉过程持续约 2 min。持续 2 min 的牵拉组在牵拉 1,3,5 min 后测得的波幅均更小。这一结果表明在相近的平均压力牵拉下,牵拉持续时间越长,对神经根造成的伤害越大。图 8 中波幅随着加载于神经根上的压力增加而降低,神经根所受的损伤程度也相应增大。

图 9 显示了 EMG 信号潜伏期与神经根所受压力的关系。图 9 中潜伏期变化在(8.01±0.09 ms),变化率为 1.12%。潜伏期与神经传导速度成正比,所以实验中神经传导速度的变化也较小。而图 8 中波幅变化范围是(0.99±0.21)mV,变化率为 21.21%。波幅明显降低但潜伏期变化不大时,表明牵拉过程使神经根轴索部位受损。随着加载于神经根上压力的增大,被牵拉神经根的轴索损伤程度加重。

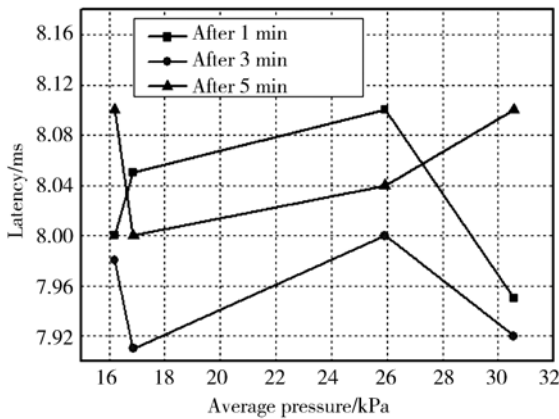
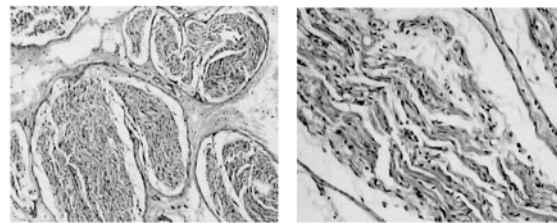


图 9 EMG 潜伏期与神经根所受压力的关系  
Fig. 9 Latencies of EMG response signals

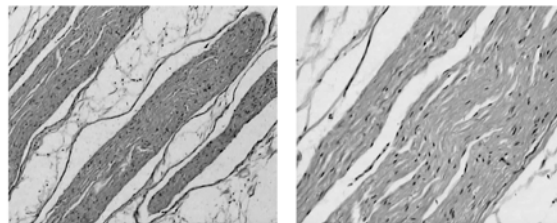
牵拉过程结束后缝合切口,山羊蜷伏无法站立,将其送至动物房饲养观察。饲养一周后,山羊可基本站立。为进一步了解受损神经根的恢复情况,将山羊麻醉处死,取被牵拉神经根损伤节段作为牵拉组进行切片,还取另一侧未牵拉神经根节段作为对照组进行切片。两组切片制作成电镜标本,在 100 倍镜下观察比较。图 10 和图 11 是牵拉组和对照组神经根切片的病理图。牵拉组神经根受到过度牵拉性损伤,而后功能虽得到一定的恢复,但仍可见神经元纤维细胞水肿,神经纤维排列紊乱,部分神经纤维萎缩;对照组的神经根没有被牵拉,神经纤维排列整齐,轴索无断裂,髓鞘排

列紧密。病理分析进一步明确了被牵拉神经根所受压力与神经功能损伤的关系。



(a)横切面 (b)纵切面  
(a) Transverse section (b) Longitudinal section

图 10 牵拉组神经根病理图(苏木精-伊红染色,×100)  
Fig. 10 Pathological images of retracted nerve root (Hematoxy-eosin staining, ×100)



(a)横切面 (b)纵切面  
(a) Transverse section (b) Longitudinal section

图 11 对照组神经根病理图(苏木精-伊红染色,×100)  
Fig. 11 Pathological images of control group (Hematoxy-eosin staining, ×100)

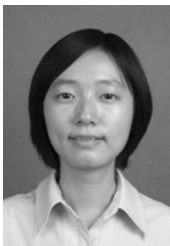
### 4 结 论

本文应用硅压力传感器,将医学监测手段与传感器提供的量化牵拉参考数据相结合来提高脊柱外科手术的质量。将硅压力传感器置于神经拉钩上,以不同的牵拉时间和牵拉程度分组进行动物实验,测量被牵拉神经根所受压力值,同时用肌电图监测受到牵拉神经根的电生理反应。实验结果显示,牵拉平均压力变化约为 14 kPa 时,潜伏期变化率和波幅变化率分别为 1.12%和 21.21%,说明被牵拉神经根的轴索受损。牵拉时间越长、牵拉程度越大,可造成神经根长期甚至不可逆的功能损伤。因此,通过动物实验建立了被牵拉神经根所受压力和相应电生理反应的关系,为后续实验确定神经根安全牵拉阈值奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] TAYLOR R, RYAN J, O'DONNELL R, *et al.*. The cost-effectiveness of spinal cord stimulation in the treatment of failed back surgery syndrome [J]. *Clinical Journal of Pain*, 2010, 26(6): 463-469.
- [2] BOSNJAK R, MAKOVEC M. Neurophysiological monitoring of S1 root function during microsurgical posterior discectomy using H-Reflex and spinal nerve root potentials [J]. *Spine*, 2010, 35(4): 423-429.
- [3] KELLEHER M, TIMLIN M, PERSAUD O, *et al.*. Success and failure of minimally invasive decompression for focal lumbar spinal stenosis in patients with and without deformity [J]. *Spine*, 2010, 35(19): E981-E987.
- [4] PAPAVERO L, THIEL M, FRITZSCHE E, *et al.*. Lumbar spinal stenosis: prognostic factors for bilateral microsurgical decompression using a unilateral approach [J]. *Neurosurgery*, 2009, 65(6):182-187.
- [5] PARK P, LEVEQUE J, MARCA F L, *et al.*. Dural closure using the u-clip in minimally invasive spinal tumor resection [J]. *Journal of Spinal Disorders & Techniques*, 2010, 23(7): 486-489.
- [6] WOOD K, DEVINE J, FISCHER D, *et al.*. Vascular injury in elective anterior lumbosacral surgery [J]. *Spine*, 2010, 35(9S): S66-S75.
- [7] GHARIB J, FARQUHAR A, MARTINELLI S, *et al.*. System and methods for performing neurophysiologic assessments with pressure monitoring: US,2007/0021682 A1[P]. 2007.
- [8] 崔志明, 保国锋, 张金波, 等. 测力神经根拉钩的实验应用[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2008, 30(12): 5857-5860.
- CUI ZH M, BAO G F, ZHANG J B, *et al.*. Experimental application of auxometric nerve root retractor [J]. *Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2008, 30(12): 5857-5860. (in Chinese)
- [9] BRAU S A, SPOONAMORE M J, SNYDER L, *et al.*. Nerve monitoring changes related to iliac artery compression during anterior lumbar spine surgery [J]. *The Spine Journal*, 2003, 3(5): 351-355.
- [10] 马建旭, 王立鼎, 吴一辉. 微电子机械系统在生物医学领域中的应用[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(1): 1-6.
- MA J X, WANG L D, WU Y H. Application of micro electro mechanical system on medicine and biology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(1): 1-6. (in Chinese)
- [11] 舒晶, 颜德田, 颜国正. 生物反馈式括约肌的研制[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1): 43-46.
- SHU J, YAN D T, YAN G ZH. Development of constrictor with bio-feedback function [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2004, 12(1): 43-46. (in Chinese)
- [12] MATSUI H, KITAGAWA H, KAWAGUCHI Y, *et al.*. Physiologic changes of nerve root during posterior lumbar discectomy [J]. *Spine*, 1995, 20(6):654-659.

## 作者简介:



刘 星(1982-),女,安徽六安人,博士研究生,主要从事 MEMS 医用传感器的设计及研究。E-mail: xingliu@seu.edu.cn



黄庆安(1963-),男,河南洛阳人,教授,博士生导师,1991年于东南大学获博士学位,主要从事 MEMS CAD、CMOS MEMS 和新兴 MEMS 器件的研究。E-mail: hqa@seu.edu.cn



秦 明(1967-),男,江苏扬州人,教授,博士生导师,1997年于东南大学获得博士学位,主要从事 MEMS 传感器与微系统、MEMS 材料与加工工艺等方面的研究。E-mail: mqin@seu.edu.cn



陈 辉(1966-),男,江苏丹阳人,副主任医师,硕士生导师,1997年于东南大学获得医学硕士学位,主要从事脊柱外科的临床和教学工作。E-mail: chenhu@seu.edu.cn