

大鼠坐骨神经固有频率测定

尹露¹, 安云¹, 杨斌堂², 杨诣坤², 卢新刚¹, 严隽陶¹

1. 上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院推拿科, 上海 200437; 2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240

【摘要】目的: 确定实验大鼠坐骨神经的固有频率, 观察不同状态下神经固有频率的变化, 为神经再生修复研究中康复治疗仪器的频率选择提供参考。**方法:** 将18只SD大鼠随机分为正常组、SNI 7 d组、SNI 28 d组, 每组各6只, 正常组不予干预, 模型组行坐骨神经钳夹伤术。于造模后第7天通过振动平台对正常组、正常组的离体神经(即离体组)、SNI 7 d组, 以及造模后第28天对SNI 28 d组大鼠施加振动频率源, 在振动响应检测模块测得的数据基础上, 根据频率特性曲线确定大鼠坐骨神经固有频率。**结果:** 正常组、离体组、SNI 7 d组、SNI 28 d组大鼠坐骨神经频率特异性曲线均显示单一峰值; 组间固有频率比较差异均无统计学意义($P=0.156$); 组间两两比较显示, 正常组与离体组、SNI 7 d组、SNI 28 d组比较, SNI 7 d组与SNI 28 d组比较, 差异均无统计学意义($P>0.05$)。固有频率检测值总体均数为9.635 Hz。**结论:** 实验大鼠坐骨神经固有频率约为9.635 Hz, 且固有频率是相对稳定的, 不会因其所处状态不同而发生较大变化。

【关键词】 固有频率; 坐骨神经; 神经损伤; 机械振动

【中图分类号】 R35

【文献标志码】 A

【文章编号】 1005-202X(2021)05-0638-05

Determination of natural frequency of sciatic nerves in rats

YIN Lu¹, AN Yun¹, YANG Bintang², YANG Yikun², LU Xin'gang¹, YAN Juntao¹

1. Department of Tuina, Yueyang Hospital of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 200437, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Objective To determine the natural frequency of sciatic nerves in experimental rats, and to observe the changes of natural frequency under different states, thereby providing a certain reference for the frequency selection of rehabilitation treatment instruments for the study on nerve regeneration and repair. **Methods** Eighteen SD rats were randomly divided into normal group, SNI 7 d group, and SNI 28 d group, with 6 rats in each group. The rats in normal group received no intervention, while those in model groups suffered from sciatic nerve clamp injuries. On the 7th day after modeling, the rats in normal group, isolated group (sciatic nerve isolation in normal group) and SNI 7 d group were subjected to a vibration frequency source on a vibration platform, and the same vibration frequency source was applied to SNI 28 d rats on the 28th day after modeling. Based on the data measured by the vibration response detection module, the natural frequency of sciatic nerves in rats was determined according to frequency characteristic curves. **Results** The frequency-specificity curves of sciatic nerves in normal group, isolated group, SNI 7 d group and SNI 28 d group all showed a single peak. No statistical significance was found in natural frequency among different groups ($P=0.156$). Pairwise comparison showed that there was no significant difference between normal group and isolated group, SNI 7 d group, SNI 28 d group, and that the difference between SNI 7 d group and SNI 28 d group was trivial ($P>0.05$). The overall mean natural frequency was 9.635 Hz. **Conclusion** The natural frequency of sciatic nerves in experimental rats is about 9.635 Hz, and the natural frequency is relatively stable and will not change greatly due to different states.

Keywords: natural frequency; sciatic nerve; nerve injury; mechanical vibration

【收稿日期】 2020-11-30

【基金项目】 SMC联合研究项目(KY111.40.147); 国家自然科学基金青年科学基金(81603713)

【作者简介】 尹露, 博士, 研究方向: 传统康复与脑功能的相关性, E-mail: yinlu6978@126.com

【通信作者】 严隽陶, 教授, 博士生导师, 研究方向: 传统康复与脑功能的相关性, E-mail: doctoryjt@sohu.com

前言

固有频率也称为自然频率, 指结构系统受到外界激励产生响应时, 在其平衡位置附近作往复运动, 其运动的频率仅取决于系统本身的物理特性(如质量、刚度), 与外界激励无关, 此频率称为固有频

率^[1-2]。不管外界有无激励,结构的固有频率始终存在,只是当外界有激励时,结构能按其固有频率产生振动响应。如果从生物力学角度将人体视为一个机械振动模型,各部分器官、组织都是一个振动系统,都有其相应的固有频率。当机体受到的外界激励频率与机体组织的固有频率接近或相等时,能引发共振从而激活组织系统的兴奋性,此时组织受迫振动的幅度最大^[3-4]。基于共振现象,有研究者提出了多种固有频率的测算方法^[2,5],且既往研究提示外在频率源作用于机体时,频率是影响神经肌肉系统兴奋性的主要因素^[6-8]。因此,本研究通过检测相关实验中关注较多的大鼠坐骨神经的固有频率,观察神经正常状态、损伤状态以及离体状态下固有频率的变化,以期康复治疗仪器频率的选择提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 实验动物及分组

选取成年健康 Sprague-Dawley 大鼠 18 只,体质量 220~250 g,由上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院实验动物中心提供并饲养。饲养条件:温度 24~26℃,湿度 55%~65%,12 h 光照 12 h 黑暗交替,自由摄食和饮水。将实验大鼠按体质量大小编号,采用随机数字表法分为正常组、坐骨神经损伤(SNI) 7 d 组、SNI 28 d 组,每组各 6 只。实验检测中增加离体组,即正常组的离体神经检测,详见 1.4 检测方法。实验过程中对大鼠的处置严格遵守动物伦理准则和指南的相关规定。

1.2 主要仪器及试剂

SXP-1C 手术显微镜(上海医光仪器有限公司),10% 水合氯醛(上海西唐生物科技有限公司),手术剪、止血钳、组织镊、持针器(上海金钟),显微剪、显微镊、显微持针器(上海金钟),11-0 显微外科带针缝合线、3-0 带针缝合线(宁波灵桥),固有频率检测平台(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室)。

1.3 SNI 模型制备

参照课题组前期模型制备方法^[9]:a.术前 24 h 禁食水;b.10% 水合氯醛腹腔注射麻醉,剂量 0.3 mL/100 g;c.取右下肢备皮,俯卧位固定于操作台上,常规消毒;d.无菌状态于右侧坐骨切迹下约 5 mm 处沿坐骨神经走向做臀部横向切口,切口约 1.5 cm,钝性分离筋膜及肌肉组织,撑开皮肤及肌肉后充分显露坐骨神经,显微手术器械将坐骨神经游离;e.在梨状肌下约 10 mm 处使用 JZ06Cr 14 cm 止血钳 3 扣的压力,以止血钳前 1/3 处完全闭合钳夹神经干,钳夹 3 次,每次 10 s,中间间隔 10 s,全程共 50 s,造成宽约 2 mm 的神经损伤。松开血管钳后见钳夹段神经完全透明,但神经外膜处未见出血,造成 Sunderland III 度损伤^[10]。钳

夹后于显微镜下在损伤点上 1 mm 处用 110 缝合线进行外膜标记(图 1);f.术后使用注射用青霉素钠消炎并缝合肌肉和皮肤。为保证实验的均一性,肌肉均缝一针,皮肤均缝两针,所有的钳夹及缝合均由同一操作人员完成。正常组不予处理。



图 1 大鼠坐骨神经钳夹伤模型

Fig.1 Rat model with sciatic nerve clamp injuries

1.4 检测方法

于造模后第 7 天,将正常组大鼠麻醉后行坐骨神经剥离术(如 1.3 部分步骤 a~d),将大鼠左侧卧位放置于振动测试平台,充分暴露坐骨神经。在大鼠坐骨神经自梨状肌下 10 mm 处,沿神经走向放置约 1 mm×2 mm、厚约 10 μm 的反光膜(铝箔纸),振动台上放置一激光传感器,使激光光源向反光膜射出激光信号。应用振动平台施加扫频激励,使用 Labview 软件编写上位机界面,对数据进行分析与处理,可对采集的响应时域信号进行快速傅里叶变化,因频率源的输出能够在测量所需的范围内连续扫描,因此可以连续测出各频率点上的频率特性结果并立即显示特性曲线。通过 OriginPro 软件分析频率特性曲线的峰值处频率,即为固有频率(图 2)。每只大鼠坐骨神经测量 6 次,取平均值确定为固有频率。然后逐一将正常组大鼠坐骨神经自梨状肌下 10 mm 处切除长约 10 mm 远端神经段,以同样方法进行离体坐骨神经段的固有频率测定(即 1.1 的离体组)。随后取 SNI 7 d 组大鼠,于 SNI 标记点下端沿神经走向放置反光膜,如上述操作进行固有频率检测。造模后第 28 天,将 SNI 28 d 组大鼠以同样方法进行坐骨神经固有频率检测。

单自由度系统在简谐激振力的动力学方程为: $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t)$,其中 F_0 为激振力的幅值, ω 为激振力的圆频率, m 为质量, c 为阻尼系数, k 为刚度, x 为相对平衡位置的位移。有阻尼系统在简谐激励下,运动微分方程的全解: $x = x_1(t) + x_2(t)$,其中: $x_1(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi)$, $x_2(t) = B \sin(\omega_d t - \psi)$, $x_1(t)$ 为阻尼衰减瞬态响应, A 为衰减幅值, ω_n 为无阻尼固有频率, ω_d 为有阻尼固有频率, ζ 为阻尼比, t 为

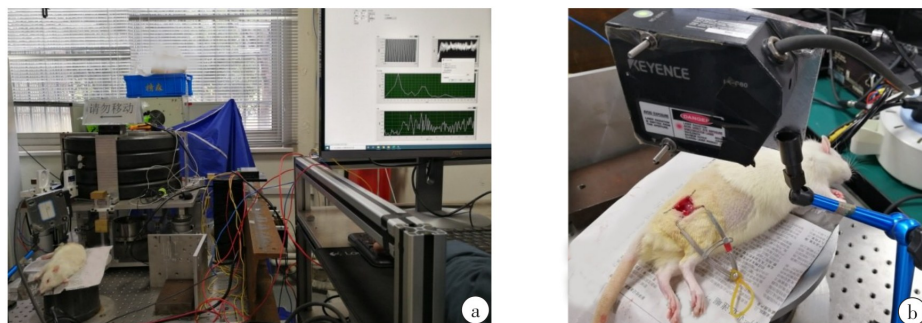


图2 坐骨神经固有频率检测

Fig.2 Sciatic nerve natural frequency detection

图b是图a的局部放大图

时间, φ 为衰减相位, $x_2(t)$ 为稳态响应, B 为稳态响应幅值, ψ 为稳态相位。快速傅里叶变化得到的频率特性曲线中的幅频特性曲线即反应了稳态响应的幅值 B , 当系统发生共振时 B 值最大。因此通过分析幅频特性曲线峰值处的频率即可得到固有频率。固有频率检测系统功能结构见图3。

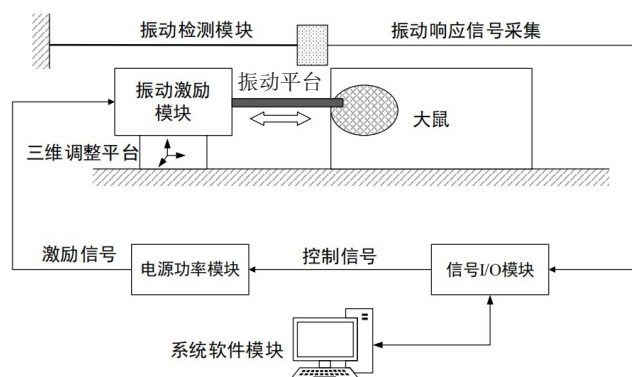


图3 系统功能框解图

Fig.3 System function block diagram

1.5 统计学方法

采用SPSS25.0软件进行数据分析处理。符合正态分布的计量资料用均数 \pm 标准差表示,数据比较采用单因素方差分析,各组间两两比较采用LSD- t 检验。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 各组大鼠坐骨神经频率特异性曲线

正常组、离体组、SNI 7 d组、SNI 28 d组大鼠坐骨神经频率特异性曲线均显示单一峰值,见图4。

2.2 4种状态下大鼠坐骨神经固有频率比较

正常组、离体组、SNI 7 d组、SNI 28 d组固有频率(Hz)分别为 9.666 ± 0.113 、 9.840 ± 0.390 、 9.668 ± 0.303 、 9.366 ± 0.474 。4组坐骨神经组间固有频率比较,经检验数据服从正态分布且方差齐,使用单因素方差分

析,结果显示差异无统计学意义($F=1.937$, $P=0.156$);进一步组间两两比较显示,正常组与离体组、SNI 7 d组、SNI 28 d组比较, SNI 7 d组与 SNI 28 d组比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。固有频率测量值总体均数为9.635 Hz。

4组坐骨神经组内固有频率比较,正常神经、离体神经及SNI 7 d组神经3种状态下组内数据差异均无统计学意义($P>0.05$), SNI 28 d组内固有频率数据比较差异有统计学意义($P=0.009$)。见表1。

3 讨论

SNI是常见的下肢周围神经损伤,坐骨神经钳夹伤模型因保存有神经干的连续性、操作简便、术后瘢痕组织较少等优点,被广泛应用于周围神经损伤后运动、感觉等功能短期修复的实验研究^[11]。根据大鼠坐骨神经III度损伤恢复情况,实验研究应用物理治疗时一般选择损伤7 d后开始干预,且维持至损伤后28 d左右。因此,本实验选择坐骨神经III度钳夹伤模型,以正常神经、SNI 7 d神经、SNI 28 d神经以及离体神经4种状态进行固有频率检测。

实验结果显示给予大鼠坐骨神经施加振动频率源后,不同状态下的组间固有频率均值略有差异,但经检验差异无统计学意义;组内固有频率比较中,正常神经、SNI 7 d神经以及离体神经3种状态下固有频率值差异不大,而SNI 28 d神经组内比较有差异,考虑可能为神经损伤28 d后损伤表面瘢痕组织的形成造成一定干扰,但组内个体固有频率仍维持在8.722~10.533 Hz。因此可认为实验大鼠坐骨神经固有频率约为9.635 Hz,且神经组织固有频率是其本身的特有属性,不会因所处状态不同而发生很大变化,对今后物理治疗仪器频率的选择有一定参考意义。

由于周围神经损伤后的神经功能障碍和失神经支配的骨骼肌萎缩是目前神经科学、康复医学以及相关学科共同关注的难题^[12-13]。随着中西医结合康

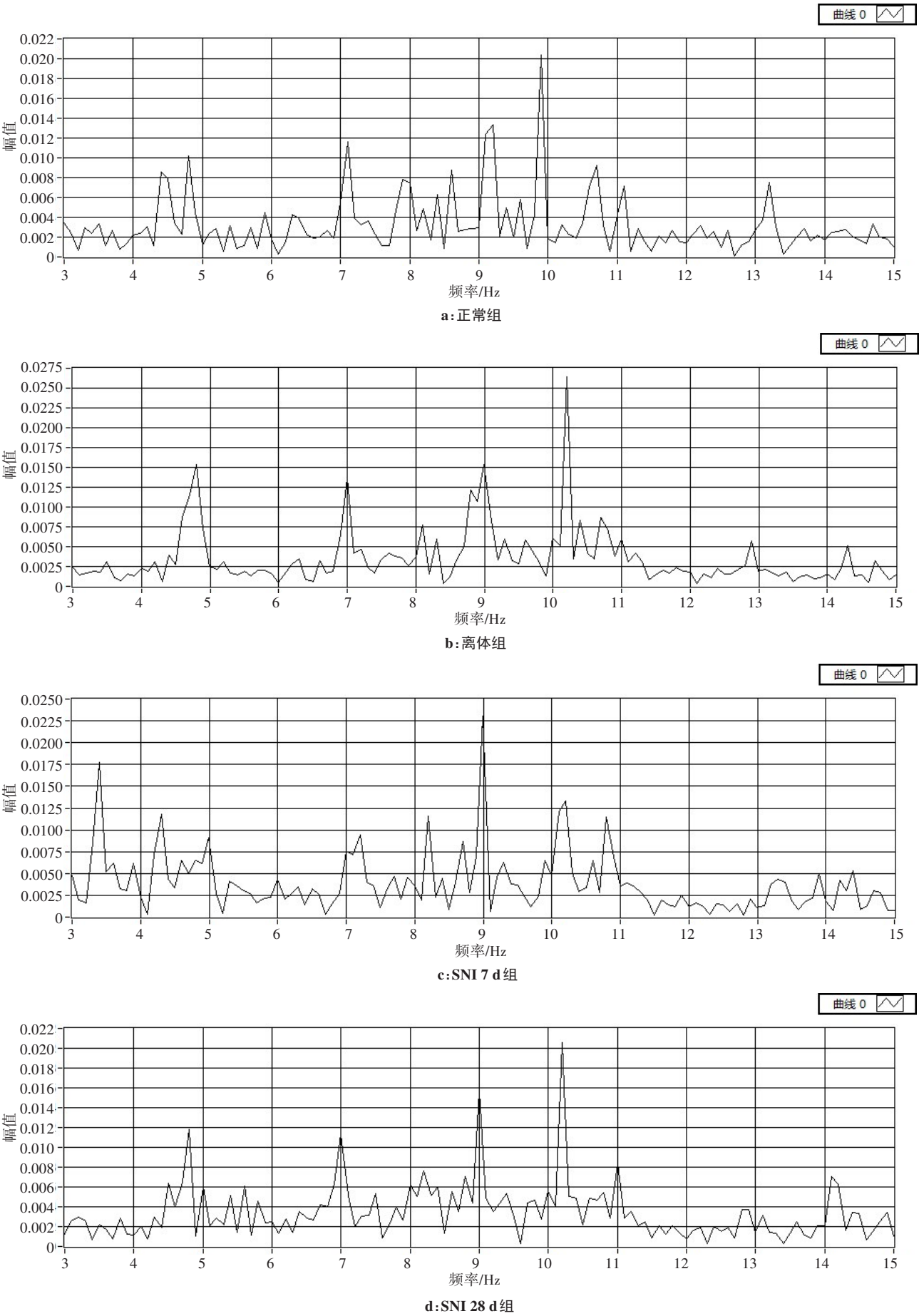


图4 各组大鼠坐骨神经频率特异性曲线
Fig.4 Sciatic nerve frequency-specificity curves in different groups

表1 各组组内个体固有频率比较(Hz)

Tab.1 Comparison of individual natural frequency among 4 groups (Hz)

组别	动物序号						F值	P值
	1	2	3	4	5	6		
正常组	9.812	9.604	9.669	9.778	9.508	9.626	0.159	0.976
离体组	10.533	9.754	9.566	9.969	9.416	9.800	2.377	0.063
SNI 7 d组	9.195	9.806	9.819	9.402	10.001	9.782	1.611	0.187
SNI 28 d组	9.120	8.722	9.590	10.123	9.222	9.416	3.773	0.009

复学的发展,多种物理治疗技术相继在临床中得以应用,其中振动疗法作为一种临床预防和康复治疗工具,在周围神经损伤后神经功能恢复、神经性疼痛的缓解以及肌肉骨骼系统调节等方面均显示出优势^[14-16]。但最佳干预参数的选择以及振动干预的相关作用机制仍没有一致结论。研究发现除颅骨和眼球外,人体各器官固有频率一般为0~20 Hz^[3],已有研究提示在适宜频率作用下能最大限度地激活神经肌肉系统的兴奋性,使得病理状态下的神经肌肉恢复正常生理功能;应用物理治疗时优选共振频率,必将增强该组织对能量的吸收,提高临床治疗效果^[17-19]。因此,基于神经组织的固有频率研究振动疗法在坐骨神经损伤后神经再生修复的影响,以及探寻共振效应促进神经修复的潜在机制将是今后研究的方向。

【参考文献】

[1] 王亚平. 医用物理学[M]. 北京:人民军医出版社,2013: 34, 40-42.
WANG Y P. Medical physics [M]. Beijing: People's Military Medical Press, 2013: 34, 40-42.

[2] 闻邦椿, 刘树英, 陈照波, 等. 机械振动理论及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 11-16, 29-35.
WEN B C, LIU S Y, CHEN Z B, et al. Mechanical vibration theory and application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 11-16, 29-35.

[3] 苏晓琴, 姜其畅, 苏艳丽, 等. 共振的研究及应用[J]. 运城学院学报, 2011, 29(2): 30-35.
SU X Q, JIANG Q C, SU Y L, et al. Research and application of resonance[J]. Journal of Yuncheng University, 2011, 29(2): 30-35.

[4] 李力. 谈谈"共振"的定义[J]. 物理教师, 2008, 26(6): 41-42.
LI L. Talk about the definition of 'resonance'[J]. Physics Teacher, 2008, 26(6): 41-42.

[5] 熊伟华, 郭春雷, 徐俊杰. 振动台对夹具固有频率测试的影响分析[J]. 环境技术, 2019, 37(1): 115-119.
XIONG W H, GUO C L, XU J J. Analysis of the influence of shaking table on fixture natural frequency testing [J]. Environmental Technology, 2019, 37(1): 115-119.

[6] 史智君, 严隽陶, 孔亚敏. 振动疗法在康复中的应用及其影响因素[J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(1): 108-113.
SHI Z J, YAN J T, KONG Y M. Application of vibration therapy in rehabilitation and its influencing factors [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(1): 108-113.

[7] HUANG M, PANG M Y. Muscle activity and vibration transmissibility during whole-body vibration in chronic stroke[J]. Scand J Med Sci Sports, 2019, 29(6): 816-825.

[8] ALIZADEH M M, MASANI K, ZARIFFA J, et al. Effect of whole-body vibration on lower-limb EMG activity in subjects with and without spinal cord injury [J]. J Spinal Cord Med, 2014, 37(5): 525-536.

[9] 史智君, 严隽陶, 杨斌堂, 等. 坐骨神经损伤后大鼠臀大肌、小腿三头肌固有频率测定的实验研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(6): 721-726.
SHI Z J, YAN J T, YANG B T, et al. Experimental study on determination of natural frequencies of gluteus maximus and calf triceps in rats after sciatic nerve injury[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(6): 721-726.

[10] SUNDERLAND S. Rate of regeneration of sensory nerve fibers[J]. Arch Neurol Psychiatry, 1947, 58(1): 1.

[11] 孔亚敏, 严隽陶. 动物实验周围神经损伤模型的研究进展[J]. 中国现代医学杂志, 2020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1225.R.20200108.1542.050.html>.
KONG Y M, YAN J T. Research progress of peripheral nerve injury models in animal experiments[J]. China Journal of Modern Medicine, 2020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1225.R.20200108.1542.050.html>.

[12] SCHEIB J, HÖKE A. Advances in peripheral nerve regeneration[J]. Nat Rev Neurol, 2013, 9(12): 668-676.

[13] MENORCA R M, FUSSELL T S, EL FAR J C. Nerve physiology: mechanisms of injury and recovery [J]. Hand Clin, 2013, 29(3): 317-330.

[14] 梅荣军, 肖显坤, 李旗, 等. 机械振动推拿对大鼠臂丛神经损伤恢复作用机理研究[J]. 针灸临床杂志, 2007, 23(12): 33-35.
MEI R J, XIAO X K, LI Q, et al. Study on the mechanism of mechanical vibration massage on the recovery of brachial plexus nerve injury in rats[J]. Journal of Acupuncture and Moxibustion, 2007, 23(12): 33-35.

[15] GUIEU R, TARDY-GERVET M F, ROLL J P. Analgesic effects of vibration and transcutaneous electrical nerve stimulation applied separately and simultaneously to patients with chronic pain[J]. Can J Neurol Sci, 1991, 18(2): 113-119.

[16] STRECKMANN F, LEHMANN H C, BALKE M, et al. Sensorimotor training and whole-body vibration training have the potential to reduce motor and sensory symptoms of chemotherapy-induced peripheral neuropathy-a randomized controlled pilot trial [J]. Support Care Cancer, 2019, 27(7): 2471-2478.

[17] 乔志恒, 华桂茹. 理疗学[M]. 北京: 华夏出版社, 2006: 22-23.
QIAO Z H, HUA G R. Physiotherapy[M]. Beijing: Huaxia Publishing House, 2006: 22-23.

[18] 许光旭, 顾绍钦, 孟殿怀, 等. 生物谐振规律对步行效率影响的前驱研究[J]. 中国康复医学杂志, 2008, 23(12): 1092-1094.
XU G X, GU S Q, MENG D H, et al. Pilot study on the effect of bioresonance laws on walking efficiency [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2008, 23(12): 1092-1094.

[19] 张文通. 生物谐振影响脊髓运动神经元兴奋性的电生理研究[D]. 南京: 南京医科大学, 2013.
ZHANG W T. Electrophysiological study of bioresonance affecting spinal motor neuron excitability [D]. Nanjing: Nanjing Medical University, 2013.

(编辑:黄开颜)