

· 临床研究 ·

脊髓运动神经元谐振频率的电生理分析

张文通 许光旭 王红星 陈文红 杜梅 李林

【摘要】 目的 通过对正常人体下肢施加不同频率振动刺激,观察其脊髓运动神经元是否存在谐振频率。**方法** 共选取 20 例健康成年人作为研究对象,于仰卧位下分别给予 20 Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz 及 60 Hz 振动刺激,振动刺激部位统一为左侧下肢腓骨远端,每种频率振动持续时间均为 5 min。于振动刺激前行胫神经 F 波、M 波检测,于各种频率振动结束后立即行胫神经 F 波检测,计算 F 波平均波幅及 F/Mmax,以观察机体脊髓运动神经元在不同频率振动下其兴奋性变化。**结果** 在基础状态下和经 20 Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz、60 Hz 振动刺激后,受试者 F 波平均波幅分别为 $(149.49 \pm 53.05) \mu V$ 、 $(169.67 \pm 63.33) \mu V$ 、 $(199.27 \pm 85.20) \mu V$ 、 $(160.77 \pm 62.09) \mu V$ 、 $(146.92 \pm 59.69) \mu V$ 、 $(131.07 \pm 66.17) \mu V$, F/Mmax 分别为 $(0.856 \pm 0.270)\%$ 、 $(0.962 \pm 0.290)\%$ 、 $(1.143 \pm 0.453)\%$ 、 $(0.924 \pm 0.341)\%$ 、 $(0.844 \pm 0.336)\%$ 、 $(0.748 \pm 0.312)\%$ 。经统计比较后发现,以 30 Hz 振动时机体 F 波平均波幅及 F/Mmax 最显著,与基础值及 50 Hz、60 Hz 振动时检测结果间差异均具有统计学意义 ($P < 0.05$);受试者 F 波平均波幅及 F/Mmax 在 20 Hz、30 Hz、40 Hz 频率振动条件下其间差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。**结论** 正常人体脊髓运动神经元存在谐振频率,该频率可能位于 30 Hz 附近。

【关键词】 振动; 脊髓运动神经元; 谐振; F 波

An electrophysiological study of resonant frequency in human spinal motor neurons ZHANG Wen-tong, XU Guang-xu, WANG Hong-xing, CHEN Wen-hong, DU Mei, LI Lin. Department of Rehabilitation Medicine, First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China

Corresponding author: XU Guang-xu, Email: xuguangxu1@126.com

【Abstract】 Objective To explore the resonant frequencies of human spinal motor neurons. **Methods** Twenty healthy college students were recruited as the subjects. Each was put in a supine position and administered vibratory stimulation at 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz and 60 Hz on the left distal fibula just above the lateral malleolus for 5 minutes. M-waves and F-waves were recorded before each intervention. F-waves were also recorded immediately after each intervention. **Results** The F-wave amplitude and the F/Mmax ratio after the 30 Hz stimulation were significantly larger than those at baseline and after stimulation at 50 or 60 Hz. However, 20 Hz, 30 Hz and 40 Hz stimulation produced no significantly different F-wave amplitudes or F/Mmax. **Conclusion** Human spinal motor neurons may have a resonant frequency around 30 Hz.

【Key words】 Vibration; Spinal motor neurons; Resonance; F-waves

谐振是指当激励的频率接近系统固有频率时出现的最大响应,此时激励的频率称为谐振频率。正常青年人以慢速、自然、快速三种不同步频行走时,以自然步频行走时的耗氧量最低,慢速及快速步频行走时的耗氧量均呈现增加趋势,提示步行运动存在固有频率^[1]。目前关于振动刺激能否与脊髓运动神经元达成谐振状态,国内、外均鲜见报道。本研究通过在正常人体下肢施加不同频率振动刺激,利用 F 波观察其脊髓运动神经元兴奋性变化,从而探讨脊髓运动神经元是否存在谐振频率。

对象与方法

一、研究对象

共选取自愿参加本研究的健康成年在校大学生 20 例,均无神经、肌肉系统疾患(包括骨折、腰椎病、外周神经损伤等),均为右利手。上述入选对象中,男性学生共有 10 例,年龄 (23.22 ± 1.80) 岁,身高 (173.78 ± 4.24) cm;女性学生共有 10 例,年龄 (22.78 ± 2.14) 岁,身高 (160.00 ± 2.00) cm。

二、F 波检测

上述受试者在 F 波检测前 24 h 内不进行大运动量体育活动,避免疲劳。正式进行 F 波检测时环境温度控制在 $24 \sim 30^\circ\text{C}$,关闭门窗及周边无关电子设备,嘱受试者取仰卧位,保持安静及放松状态,选取左侧下

表 1 不同频率振动条件下男、女受试者 F 波波幅及 F/Mmax 比较($\bar{x} \pm s$)

性别	例数	F 波波幅(μV)					
		基础状态	20 Hz 振动	30 Hz 振动	40 Hz 振动	50 Hz 振动	60 Hz 振动
男性	10	172.22 $\pm$ 59.58	200.11 $\pm$ 70.86	31.78 $\pm$ 84.59	187.44 $\pm$ 63.69	170.22 $\pm$ 55.71	165.00 $\pm$ 49.40
女性	10	126.77 $\pm$ 35.62	139.22 $\pm$ 37.64 ^a	166.78 $\pm$ 76.79	134.10 $\pm$ 50.35	123.62 $\pm$ 56.98	97.13 $\pm$ 40.50 ^a
性别	例数	F/Mmax(%)					
		基础状态	20 Hz 振动	30 Hz 振动	40 Hz 振动	50 Hz 振动	60 Hz 振动
男性	10	0.932 $\pm$ 0.280	1.071 $\pm$ 0.308	1.233 $\pm$ 0.343	1.200 $\pm$ 0.290	0.901 $\pm$ 0.287	0.901 $\pm$ 0.287
女性	10	0.784 $\pm$ 0.283	0.853 $\pm$ 0.238	1.053 $\pm$ 0.548	0.847 $\pm$ 0.388	0.763 $\pm$ 0.365	0.593 $\pm$ 0.267

注:与男性对象比较,^a $P < 0.05$

肢为被检肢体。采用我科自主研发的振动器(实用新型专利号:zl201220062503.8),其振动频率范围为10~200 Hz,振幅调节范围为1~5 mm。将振动器用弹力带固定于左侧下肢腓骨远端,设定振幅为5 mm,振动频率分别设定为20 Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz及60 Hz。受试者在检查床上休息10 min后即开始F波检测,首先检测受试者在安静放松状态下胫神经最大复合肌肉动作电位(compound motor action potential, CMAP)波幅与F波,然后按照频率由低到高顺序依次对受试者进行振动刺激,每种频率振动持续时间均为5 min,并于该频率振动结束后立即进行F波检测,待检测结束20 min后再进行下一频率振动刺激及F波检测。

本研究F波检测选用Keypoint-4型肌电图诱发电位仪(丹麦产),刺激电极选用电位仪自带双极电极,记录电极及参考电极均采用氯化银表面电极。将记录电极置于腓展肌肌腹运动点部位,参考电极置于该肌肉肌腱处,刺激电极置于内踝后方胫神经处,地线置于参考电极与刺激电极之间。从10 mA强度开始刺激,每次增加1 mA至CMAP波幅不再增加为止,记录此时CMAP波幅即为Mmax。检测胫神经F波时刺激电极及记录电极放置位置同上,以获取最大M波时的刺激强度再增加10%作为刺激强度,连续刺激20次,记录F波平均波幅。

三、统计学分析

采用SPSS 16.0版统计学软件包进行数据分析,计量资料如符合正态分布则以($\bar{x} \pm s$)表示;采用两因素方差分析评估不同频率振动条件与不同性别间的交互作用是否有统计学意义;使用最小显著差异法(least significant difference, LSD)对不同频率振动条件下神经电生理参数进行多重比较;相同频率振动下不同性别间电生理参数比较使用两独立样本 t 检验, $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。

结 果

所有受试者均完成全部检测,检测过程中无不良反应发生。对F波波幅及F/Mmax分别进行两因素方差分析,发现不同频率振动条件与不同性别之间均无

交互作用(均 $P > 0.05$),振动频率的主效应均有统计学意义(均 $P < 0.05$),性别差异的主效应均有统计学意义(均 $P < 0.05$),具体数据见表1。

使用LSD法进行多重比较发现,入选对象在30 Hz振动条件下其F波波幅、F/Mmax最显著,与50 Hz、60 Hz振动条件下检测结果及基础值间差异均具有统计学意义(均 $P < 0.05$);其它频率振动条件下F波波幅、F/Mmax与基础值进行比较,发现其间差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$);20 Hz、30 Hz及40 Hz振动条件下受试者F波波幅、F/Mmax其间差异亦无统计学意义(均 $P > 0.05$),具体数据见表2。

表 2 不同频率振动条件下受试者 F 波波幅及 F/Mmax 比较($\bar{x} \pm s$)

检测条件	例数	F 波波幅(μV)	F/Mmax(%)
基础状态下	20	149.49 $\pm$ 53.05 ^a	0.856 $\pm$ 0.270 ^a
20 Hz 振动刺激	20	169.67 $\pm$ 63.33	0.962 $\pm$ 0.290
30 Hz 振动刺激	20	199.27 $\pm$ 85.20	1.143 $\pm$ 0.453
40 Hz 振动刺激	20	160.77 $\pm$ 62.09	0.924 $\pm$ 0.341
50 Hz 振动刺激	20	146.92 $\pm$ 59.69 ^a	0.844 $\pm$ 0.336 ^a
60 Hz 振动刺激	20	131.07 $\pm$ 66.17 ^a	0.748 $\pm$ 0.312 ^a

注:与30 Hz振动刺激时的检测结果比较,^a $P < 0.05$

讨 论

谐振是指当激励的频率接近系统固有频率时,振动系统的响应幅度最大,此时激励的频率称为谐振频率^[2]。固有频率通常由系统本身质量、刚度等因素决定,为了研究人体机械特性,可将人体等效为由弹簧、阻尼等物质构成的机械系统^[3-4],采用阻抗一致的方法来研究其各器官间固有频率。如次声波就是利用频率低于20 Hz的声波与人体发生共振效应,使共振的器官或组织发生位移和变形。有研究表明,人体宏观运动(如步行等)也具有固有频率,如正常青年人在慢速、自然、快速三种不同步频模式下,以自然步频时的耗氧量最低,慢速及快速步频行走时的耗氧量均呈现增加趋势^[1]。由于脊髓前角 α 运动神经元是神经系统调节肌肉活动的最后环节,而人体宏观运动具有固有频率特性,故推测脊髓运动神经元也可能存在其固有频率^[5]。

F 波是外周神经在接受超强刺激后逆向传导的结果,其传入、传出纤维均为运动神经纤维。相关研究指出,F 波是检测运动神经元兴奋性的敏感指标^[6-8],如 F 波平均波幅、F/Mmax 比值越大,则脊髓运动神经元兴奋性越强。本研究结果显示,正常青年人 F 波波幅存在性别差异,以男性 F 波波幅略高于女性。通过两因素方差分析发现,入选对象 F 波波幅及 F/Mmax 在不同频率振动下其间差异均具有统计学意义($P < 0.05$),并且以 30 Hz 振动刺激对机体脊髓运动神经元兴奋性的影响作用最显著,此时受试者 F 波波幅及 F/Mmax 均处于峰值水平,与基础值及 50 Hz、60 Hz 振动条件下检测值间差异均具有统计学意义(均 $P < 0.05$)。本研究受试者 F 波波幅及 F/Mmax 在 20 Hz、30 Hz、40 Hz 振动刺激时其间差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$),可能与入选对象人数偏少有关,需进一步扩大样本数量来进行验证。本研究受试者在给予高频段(如 50 Hz、60 Hz)振动刺激时,发现其 F 波波幅及 F/Mmax 均出现一定程度降低,可能与运动神经元冲动发放频率及同步性下降、中间神经元抑制作用增强有关。虽然此时受试者 F 波波幅及 F/Mmax 与基础值间差异无统计学意义($P > 0.05$),但更高频率振动刺激是否能显著下调脊髓运动神经元兴奋性还有待进一步验证;若出现显著性差异,就可利用该频率振动刺激降低上运动神经元综合征患者过度兴奋的脊髓运动神经元功能,从而达到降低肌张力、改善肌痉挛等目的。

目前局部振动疗法已广泛应用于体育训练及部分康复治疗领域,具有提高肌力^[9]、改善平衡^[10]、缓解肌痉挛^[11]等多种作用;但对于不同振动刺激条件(如频率、振幅等)下神经肌肉组织的反应尚缺乏系统研究。振动刺激作为一种较强的躯体感觉刺激,能够引起多种感受器(包括尼氏体、环层小体、肌梭等)兴奋。Snyder 等^[12]对手指及手掌部位施加 2~40 Hz 振动刺激,于受试者躯体感觉头皮投影区可记录到体感诱发电位变化,并以 26 Hz 振动刺激时记录到的信号强度最大,推测该频率振动能够最大程度兴奋皮质初级感觉区。Tobimastu 等^[13-14]同样在手掌部位施加振动刺激,发现以 21 Hz 振动刺激时体感诱发电位波幅最大。有研究通过功能磁共振检查发现,健康人手部经 25 Hz 振动刺激 20 min 后,在执行对指任务时其初级皮质运动区/感觉区、辅助运动区激活面积均较振动前明显增加,且该现象持续 1 h 以上^[15]。上述研究结果表明,频率为 25 Hz 左右的振动刺激能最大限度兴奋初级感觉运动皮质,本研究结果提示 30 Hz 振动刺激能最大限

度兴奋脊髓运动神经元,二者间频率范围较接近,其差异可能是由于刺激部位不同所引起。

综上所述,本研究结果表明,正常人体脊髓运动神经元存在谐振频率,该频率可能位于 30 Hz 附近。我们下一步的研究将重点关注不同部位、不同频率振动刺激对神经肌肉系统的影响作用,为加速推广振动疗法的临床应用提供参考资料。

参 考 文 献

- [1] 许光旭,顾绍钦,孟殿怀,等. 健康青年人步行效率分析-肌肉谐振规律的前驱研究. 中华物理医学与康复杂志,2009,31:253-257.
- [2] 刘延柱,陈文良,陈立群. 振动力学. 北京:高等教育出版社,1998:31-50.
- [3] Nigg BM, Wakeling JM. Impact forces and muscle tuning: a new paradigm. Exerc Sport Sci Rev, 2001, 29:37-41.
- [4] Nigg BM. Impact forces in running. Curr Opin Orthop, 1997, 8:43-47.
- [5] 姚泰. 生理学. 北京:人民卫生出版社,2005:464-468.
- [6] Milanov I. Clinical and neurophysiological correlations of spasticity. Funct Neurol, 1999, 14:193-201.
- [7] Fox JE, Hitchcock ER. F wave size as a monitor of motor neuron excitability: the effect of differentiation. J Neurol Neurosurg Psychiatry, 1987, 50:453-459.
- [8] Noma T, Matsumoto S, Etoh S, et al. Anti-spastic effects of the direct application of vibratory stimuli to the spastic muscles of hemiplegic limbs in post-stroke patients. Brain Inj, 2009, 23:623-631.
- [9] Issurin VB, Lieberman DG, Tenenbaum G. Effect of vibratory stimulation training on maximal force and flexibility. J Sports Sci, 1994, 12:561-566.
- [10] Qu X. Low-level noise affects balance control differently when applied at different body parts. J Biomech, 2010, 43:2936-2940.
- [11] Noma T, Matsumoto S, Shimodozono M, et al. Anti-spastic effects of the direct application of vibratory stimuli to the spastic muscles of hemiplegic limbs in post-stroke patients: a proof-of-principle study. J Rehabil Med, 2012, 44:325-330.
- [12] Snyder AZ. Steady-state vibration evoked potentials: descriptions of technique and characterization of responses. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1992, 84:257-268.
- [13] Tobimatsu S, Zhang YM, Kato M. Steady-state vibration somatosensory evoked potentials: physiological characteristics and tuning function. Clin Neurophysiol, 1999, 110:1953-1958.
- [14] Muller GR, Neuper C, Pfurtscheller G. "Resonance-like" frequencies of sensorimotor areas evoked by repetitive tactile stimulation. Biomed Tech, 2001, 46:186-190.
- [15] Christova M, Golaszewski S, Ischebeck A, et al. Mechanical flutter stimulation induces a lasting response in the sensorimotor cortex as revealed with BOLD fMRI. Hum Brain Mapp, 2012, 19:567-567.

(修回日期:2013-03-16)

(本文编辑:易 浩)