

· 诊疗指南 ·

神经外科手术机器人辅助脑深部电刺激手术的中国专家共识

中国医师协会功能神经外科专家委员会;中华医学会神经外科学分会功能神经科学组;中国医师协会神经调控专业委员会;中国研究型医院学会神经微侵袭治疗专业委员会;国家神经外科手术机器人专家指导委员会

陶英群, 巩 顺 执笔

【关键词】机器人; 脑深部电刺激; 神经外科手术; 共识

中图分类号: R-39

文献标识码: A

doi: 10.11850/j.issn.1009-122X.2021.07.001

1 概述

脑深部电刺激(deep brain stimulation, DBS)手术是通过立体定向方法进行精确定位,在脑内特定靶点植入刺激电极进行电刺激,从而改变相应核团兴奋性,以达到改善帕金森病及肌张力障碍症状,控制癫痫发作,缓解疼痛、痴呆、精神疾病等的一种神经调控疗法,现已成为治疗神经外科功能性疾病的重要手段之一^[1-3]。在过去的 30 余年间,DBS 技术在国内外逐渐成熟,其治疗运动障碍性疾病的安全性、有效性和舒适性得到公认,其中 DBS 手术辅助设备的不断改进是提高电极植入精度、减小误差、保障手术安全的关键^[4-5]。近年来,神经导航技术与计算机的结合诞生神经外科手术机器人,其原理与三维立体定向框架不同,这项技术涉及多模态影像处理、自动识别注册、自由机械臂传感等^[6]。其比框架更擅长处理空间信息,在沿着精确规划路径引导 DBS 手术方面具有明显的精准优势,临床应用已证实机器人辅助 DBS 手术的精准度和安全性^[7-10],但目前,国内外缺少相关的临床指南与操作规范。据此,为进一步规范我国神经外科手术机器人辅助 DBS 手术的诊疗行为,结合国内外研究进展以及我国的实际应用情况,相关领域专家经过充分讨论,编写了《神经外科手术机器人辅助脑深部电刺激手术的中国专家共识》,以指导和规范机器人辅助 DBS 手术的临床实践和推广应用。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号:81870890)

通讯作者: 陶英群, Email: yingquntao@163.com; 牛朝诗, Email: niuchaoshi@163.com; 于炎冰, Email: yuyanbing123@126.com; 栾国明, Email: luangm3@163.com; 梁国标, Email: liangguobiao6708@163.com; 赵国光, Email: ggzhao@vip.sina.com

2 神经外科手术机器人的技术特点

2.1 机器人手术精准度高 神经外科机器人辅助 DBS 手术的优势主要在于手术精度的提高及自动化带来的相应受益。文献报道^[11-17]: 机器人辅助 DBS 手术的电极植入误差平均约 0.5 mm, 机器人突破制约立体定向框架手术精度提高的瓶颈。机器人具有精准度高、安全、高效,机械臂可从各个角度植入电极,更方便术中调整电极的优点。但其需要团队多人配合、学习曲线较长,智能化与均质化尚有待提高。

2.2 机器人相对于框架的优势 ①注册方式上机器人可融合多模态影像数据,校正金属伪影以及 MRI 图像边缘的变形失真^[13-14]。②术中机器人可以二次注册,模拟靶点验证^[15-16]。③机械臂术中运行范围大,具备 360°自由度和自动传感装置,可避免手术盲区或手术死角。④机械臂严格按照手术计划操作,避免人为干扰,其动作幅度可控精度为 0.1 mm,手术规划可以精准避开血管,术中易调整手术路径,手术时间短,安全隐患少,且微创^[17-20]。⑤机器人手术操作可重复性强,便于数据的储存与处理。

3 神经外科手术机器人辅助 DBS 手术流程

目前,国内各个神经外科中心根据自己应用的机器人型号,采用的 DBS 手术步骤大致相同,但不同神经外科中心会根据自己的经验和设备类型进行选择,在具体操作细节上存在差异。大多数报道基于回顾性研究,缺乏比较不同技术之间差异的研究,因此,专家对神经外科手术机器人辅助 DBS 手术的关键步骤达成共识,现推荐如下。

3.1 机器人辅助 DBS 手术的术前准备

3.1.1 病人准备: 机器人辅助 DBS 手术的临床治

疗主要用于运动障碍性疾病(以帕金森病为主,还有特发性震颤、肌张力障碍等)、药物难治性癫痫等,详细核查病人术前常规检查、实验室检验结果,询问是否服用影响凝血功能、血小板功能等药物,评估是否需要请内科医师会诊以排除内科手术禁忌证。其他术前准备按照 DBS 手术常规要求进行,签署手术知情同意书等术前医疗文书。

3.1.2 影像学检查: 术前进行符合机器人系统应用要求的 MRI 扫描,进行核团靶点定位及手术计划。大多中心推荐 3-Tesla MRI 扫描,部分中心采用 1.5-Tesla MRI 扫描^[18-19]。部分中心为避免扫描过程中病人活动影响数据质量,采用全麻下 MRI 扫描^[9,18,20-21]。根据应用机器人注册方法的不同,数据采集前安装相应的立体定向框架,或带标记的无框架定向仪,或骨性标记螺钉^[13,22-23],然后进行薄层 CT 扫描。如果术前没有进行增强 MRI 扫描,也可以行增强 CT 扫描,以便于手术计划规避损伤血管的风险;CT 扫描范围包括框架、底座或螺钉,方便在必要时提供额外的配准点^[23-24]。建议:行 MRI 扫描(T_1 和 T_2 加权序列)+薄层增强 CT 扫描:以前连合(anterior commissure, AC)-后连合(posterior commissure, PC)为扫描平面,范围囊括框架、底座或螺钉,以便于系统自动融合,提高图像融合质量。有条件的中心可以选择一些辅助序列扫描(磁敏感加权成像 SWI、定量磁化率成像 QSM、时间飞跃法磁共振血管成像 TOF MRA、弥散张量成像 DTI),或者更高场强的 MRI 以提供更多核团细节信息。

3.1.3 机器人及手术设备准备: 机器人系统开机自检,检查配套器械是否齐全,功能是否良好,机器人软件操作系统是否正常,机械臂运动是否灵活。妥善固定各设备供电传输线路,避免出现意外。

3.2 机器人辅助 DBS 手术规划

3.2.1 图像融合: 大多数中心推荐术前 MRI 和 CT 融合定位核团靶点,部分中心采用术前 MRI 直接定位^[13,23,25-28]。术前 CT 与 MRI 影像数据融合时,可根据整体图像的自动融合和局部感兴趣区域中血管融合(尤其是 Willis 环的吻合),还可人工针对靶点核团周围的解剖结构,进行微调整^[9,20,24,29-30]。或融合多模态影像数据,包括 DTI 重建神经传导束指导靶点定位的影像学细节^[31]。MRI 直接定位存在 MRI 图像漂移问题,其精准度低于 MRI 和 CT 融合定位,建议:将术前 MRI 和 CT 所获得的图像数据导入机器人软件系统中,优先选择自动融合方式,在自动融合的基础上

再根据解剖关键点进行人工调整,精确融合图像。

3.2.2 靶点设计: 结合影像学检查结果,根据病人疾病种类和临床表现特点,依据文献推荐,选择大脑深部核团靶点并定位。常用的核团包括丘脑底核、苍白球内侧部、丘脑腹侧中间核、中脑脚桥核、中央中核-束旁核复合体等。建议:确定 AC、PC 和 AC-PC 线及其长度后,根据靶点坐标值,并参照病人头颅大小、脑萎缩程度及脑室宽度等,调整合适的靶点。

3.2.3 路径设计: 建议:根据核团位置和最佳皮质穿刺点设计手术路径^[32],利用机器人工作站软件系统中的 3D 旋转视角观察穿刺路径毗邻解剖结构,设计路径时避开颅内明确的动静脉血管、脑沟、脑室和脑功能区,减少并发症。

3.3 机器人辅助 DBS 手术的操作流程

3.3.1 电极植入前准备: ①体位:病人取仰卧位,头稍抬高,颈略伸展,通过调整手术床的高度及手术床与机器人的距离找到最舒适的体位,锁定机器人,关闭操作床移动控制装置以防止意外操作,保证机器人与头部位置相对固定。②术前注册:不同型号机器人的注册方式不尽相同,其原理主要是机器人识别某些特征信息,进行三维空间坐标的注册,主要有骨性标记注册、激光表面识别注册、光学注册、框架注册等方式^[15,23,33-34]。多数中心应用骨性标记注册方式,可以是术前固定病人颅骨的骨性标记螺钉,也可以是固定在头架上的螺钉,将机器人注册探头与多个注册标记点严密贴合。一般注册的平均误差小于 0.5 mm,如标记点的注册误差不满意,校验头架、探头、注册设置后,再次重新注册直到达到标准。建议不同机器人系统术前注册时,需要考虑金属伪影及影像图像失真,根据不同的材料及影像扫描参数,推荐应用机器人校正注册法,可减小注册误差^[13,34]。③消毒、铺单与麻醉:常规消毒、铺单,套机器人专用无菌套。目前,国内外对于病人选择局麻还是全麻机器人辅助 DBS 手术没有统一的标准。局麻 DBS 术中可以测试病人对电极刺激的反应^[35]。随着技术提高,国内外应用全麻 DBS 手术增多,发现其优点是可以减少病人对手术的焦虑和恐惧等心理情绪,且手术时间更短^[7,36-37]。对于一些异动、震颤明显、高龄、难以配合局麻手术的病人,建议采取全麻手术^[7,18,20,29,36-37]。最近一项临床试验结果显示:全麻手术可以获得与局麻手术同样的临床疗效^[18]。建议:条件成熟的中心选择全麻机器人辅助 DBS 手术,更加精准、安全、舒适^[38]。④皮肤切口与骨孔:机械臂引导下设计手术切

口,切开皮肤,颅钻钻骨孔显露硬脑膜,确认无明显出血后封闭骨孔,纱布覆盖切口,对侧操作相同。

3.3.2 机器人辅助电极植入: ①电极植入:打开硬脑膜前,为减少不稳定因素,需要进行术中二次注册,使注册平均误差小于 0.5 mm,确保电极植入理论精度^[16,39]。注册完毕后,机械臂自动按手术计划运行至预定位置,安装微推进器,建议在打开硬脑膜前,将标记点(内径 D,代表误差最大值为 D/2)作为模拟的核团靶点,进行模拟打靶精准度验证^[13,15]。然后在硬脑膜上开硬膜孔,随后机械臂自动按手术计划运行至预设位置,再将微推进器位置设置为靶上 10~25 mm^[23],植入套管针并取出针芯。②术中电生理监测:大部分中心采用微电极记录,有助于定位靶点边界和确定电极植入深度^[13,22-23,26-29]。使用前确认微电极尖端退入其外套管内,以免损伤微电极,在微推进器辅助下缓慢植入,将微电极尖端推入指定位置,连接导线并固定。一般情况下,逐步推进微电极从靶上 10~15 mm 开始向靶点推进,记录不同位置神经元细胞的放电结果。医生可以根据单通道或多通道电生理信号记录结果判断电极位置或做出必要的调整。③术中应用微电极宏刺激:部分中心局麻手术中应用微电极距针尖 3 mm 处的宏刺激点进行测试^[40],宏刺激参数的设定尚无统一标准,主要以高频电刺激为主,用以评估电刺激对病人症状的疗效和不良反应,也可以根据不良反应,判断电极和核团的相对位置,调整电极。④术中电极位置的确认:应用 DBS 治疗电极进行手术中开机测试,治疗电极位置极个别情况下可能与微电极位置不一致,手术中测试结果同时受到多种因素影响。有部分中心使用术中 C 臂机透视、术中 CT、术中 O 臂、术中 MRI 等检查,在术中验证电极植入位置^[10,29-31,41]。建议:不同中心根据实际情况,手术中选择性应用微电极记录系统、宏刺激、开机测试等方式,依据术中电生理信号、开机测试、术中影像检查来确认术中电极植入的最终位置^[10,12-13,21-23,26,28-31,41]。

3.3.3 电极植入后操作: ①固定电极与关颅:确认电极最终植入位置,测试电阻无异常后,移开机械臂,妥善固定治疗电极,植入延伸导线和脉冲发生器(部分中心分期植入),常规逐层缝合皮肤切口。②术后检查与误差计算:建议术后常规复查薄层 CT,将术后 CT 图像传输至机器人工作站,结合术前融合图像确定电极植入误差。亦有应用 DBS 手术评分量表(电极植入时间、颅内积气体积和电极融合误差)来

评估机器人辅助 DBS 手术的质量并确保 DBS 手术的有效性^[42-43]。③术后程控与随访:术后程控是 DBS 手术疗效的保证,规范程控可以使病人长期获益,建议:参照相应疾病 DBS 术后程控的专家共识^[44-45]。

综上所述,神经外科手术机器人辅助 DBS 手术的关键在于:正确应用机器人软件处理影像数据,根据具体情况应用机器人校正注册法,完成手术规划;保证手术床、病人头部与机器人三者位置相对固定,空间坐标保持不变;机器人手术团队的建设与熟练配合至关重要。总之,机器人辅助 DBS 手术定位精准、创伤较小、时间短,并发症较少^[17,30,46]。

审稿专家:牛朝诗(中国科学技术大学附属第一医院),王伟民(南部战区总医院),刘宏毅(南京脑科医院)。

专家组核心成员:于炎冰(北京中日友好医院),栾国明(北京三博脑科医院),赵国光(北京宣武医院),梁国标(北部战区总医院),张剑宁(中国人民解放军总医院),牛朝诗(中国科学技术大学附属第一医院),王伟民(南部战区总医院),刘宏毅(南京脑科医院),王学廉(空军军医大学唐都医院),张世忠(南方医科大学珠江医院),吉宏明(山西省人民医院),陶英群(北部战区总医院)。

专家组成员(按汉语拼音排序):鲍民(中国医大盛京医院),蔡晓东(深圳市第二人民医院),高燕华(南部战区总医院),巩顺(北部战区总医院),关文明(吉林大学第二医院),关宇光(北京三博脑科医院),郭华(南昌大学二附院),郭冕(哈医大二院),韩帅(中国医大一院),杭春华(南京鼓楼医院),侯立军(上海长征医院),黄国栋(深圳市第二人民医院),吉宏明(山西省人民医院),蒋伟(武汉同济医院),李少一(中国医大盛京医院),李廷阳(百色市人民医院),李卫国(山东大学齐鲁医院),李岩峰(辽宁省人民医院),李智勇(北部战区总医院),李忠华(百色市人民医院),梁国标(北部战区总医院),林元相(福建医科大学附属第一医院),刘宏毅(南京脑科医院),刘卫平(空军军医大学西京医院),龙浩(南方医科大学南方医院),栾国明(北京三博脑科医院),雒仁玺(宁波市鄞州第二医院),马久红(山西省人民医院),牛朝诗(中国科学技术大学附属第一医院),邱吉庆(吉林大学第一医院),单永治(北京宣武医院),史怀璋(哈医大一院),舒凯(武汉同济医院),孙洪涛(武警特色医学中心),陶英群(北部战区总医院),王刚(沈阳市第一人民医院),王伟民(南部战区总医院),王雪峰(哈医大四院),王学廉(空军军医大学唐都医院),魏明海

(大连医科大学附属第二医院), 邱巍(吉林大学第一医院), 吴安华(中国医大一院), 杨军(北京大学第三医院), 杨亦春(大连大学附属新华医院), 尹剑(大连医科大学附属第二医院), 于炎冰(北京中日友好医院), 余化霖(昆明医科大学第一附属医院), 俞文华(杭州市第一人民医院), 张剑宁(中国人民解放军总医院), 张金男(吉林大学中日联医院), 张世忠(南方医科大学珠江医院), 张勇(广东省第二人民医院), 丛培雨(大连市中心医院), 章文斌(南京脑科医院), 赵国光(北京宣武医院), 赵海康(西安医学院第二附属医院), 赵虎林(中国人民解放军总医院), 朱邦鉴(黑龙江省第三医院), 朱敏伟(哈医大一院)。

利益冲突:全体专家声明不存在利益冲突

【参 考 文 献】

- [1] LOZANO A M, LIPSMAN N, BERGMAN H, et al. Deep brain stimulation: current challenges and future directions [J]. *Nat Rev Neurol*, 2019, 15(3): 148-160.
- [2] 中华医学会神经外科学分会功能神经外科学组, 中华医学会神经病学分会帕金森病与运动障碍疾病学组. 中国帕金森病脑深部电刺激疗法专家共识(第二版) [J]. *中华神经外科杂志*, 2020, 36(4): 325-337.
- [3] 梁国标, 陶英群. 功能神经外科精准时代的助推器—ROSA 手术机器人 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2017, 22(2): 49-50.
- [4] 于炎冰. 功能神经外科主要疾病的治疗策略与展望 [J]. *中华神经创伤外科电子杂志*, 2020, 6(1): 1-3.
- [5] KRAUSS J K, LIPSMAN N, AZIZ T, et al. Technology of deep brain stimulation: current status and future directions [J]. *Nat Rev Neurol*, 2021, 17(2): 75-87.
- [6] 陶英群. 从头部立体定向框架到神经外科机器人系统辅助脑深部电刺激术 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2021, 26(4): 145-147.
- [7] JIN H, GONG S, TAO Y, et al. A comparative study of asleep and awake deep brain stimulation robot-assisted surgery for Parkinson's disease [J]. *NPJ Parkinsons Dis*, 2020, 6: 27.
- [8] LEFRANC M, CAPEL C, PRUVOT-OCCEAN A S, et al. Frameless robotic stereotactic biopsies: a consecutive series of 100 cases [J]. *J Neurosurg*, 2015, 122(2): 342-352.
- [9] MORAN C H, PIETRZYK M, SARANGMAT N, et al. Clinical outcome of "asleep" deep brain stimulation for parkinson disease using robot-assisted delivery and anatomic targeting of the subthalamic nucleus: a series of 152 patients [J]. *Neurosurgery*, 2020, 88(1): 165-173.
- [10] von LANGSDORFF D, PAQUIS P, FONTAINE D. *In vivo* measurement of the frame-based application accuracy of the Neuromate neurosurgical robot [J]. *J Neurosurgery*, 2015, 122(1): 191-194.
- [11] ELJAMEL M S. Robotic neurological surgery applications: accuracy and consistency or pure fantasy [J]? *Stereotact Funct Neurosurg*, 2009, 87(2): 88-93.
- [12] FURLANETTI L, ELLENBOGEN J, GIMENO H, et al. Targeting accuracy of robot-assisted deep brain stimulation surgery in childhood-onset dystonia: a single-center prospective cohort analysis of 45 consecutive cases [J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2021, PMID: 33862592.
- [13] XU F, JIN H, YANG X, et al. Improved accuracy using a modified registration method of ROSA in deep brain stimulation surgery [J]. *Neurosurg Focus*, 2018, 45(2): E18.
- [14] BUI H P, TOMAR S, COURTECUISSE H, et al. Controlling the error on target motion through real-time mesh adaptation: Applications to deep brain stimulation [J]. *Int J Numer Method Biomed Eng*, 2018, 34(5): e2958.
- [15] 许峰, 陶英群, 金海, 等. 两种注册方式对 ROSA 精准度的影响 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2017, 22(2): 80-82.
- [16] 杨兴旺, 陶英群, 金海, 等. ROSA 辅助脑深部电刺激术的精准性研究 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2017, 22(2): 60-62.
- [17] 徐明, 陶英群, 金海, 等. 丙泊酚瑞芬太尼全麻对机器人辅助丘脑底核脑深部电刺激术的影响 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2021, 26(4): 163-166.
- [18] ENGELHARDT J, CAIRE F, DAMON-PERRIÈRE N, et al. A phase 2 randomized trial of asleep versus awake subthalamic nucleus deep brain stimulation for Parkinson's disease [J]. *Stereotact Funct Neurosurg*, 2021, 99(3): 230-240.
- [19] CANDELA S, VANEGAS M I, DARLING A, et al. Frameless robot-assisted pallidal deep brain stimulation surgery in pediatric patients with movement disorders: precision and short-term clinical results [J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2018, 22(4): 416-425.
- [20] MORAN C, SARANGMAT N, GERARD CS, et al. Two hundred twenty-six consecutive deep brain stimulation electrodes placed using an "asleep" technique and the NeuroMate™ robot for the treatment of movement disorders [J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2020, 19(5): 530-538.
- [21] VANSICKLE D, VOLK V, FREEMAN P, et al. Electrode placement accuracy in robot-assisted asleep deep brain

- stimulation [J]. *Ann Biomed Eng*, 2019, 47(5): 1212-1222.
- [22] HO A L, PENDHARKAR A V, BREWSTER R, et al. Frameless robot-assisted deep brain stimulation surgery: an initial experience [J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2019, 17(4): 424-431.
- [23] FARAJI A H, KOKKINOS V, SWEAT J C, et al. Robotic-assisted stereotaxy for deep brain stimulation lead implantation in awake patients [J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2020, 19(4): 444-452.
- [24] 许峰, 陶英群, 金海, 等. CTA 在 ROSA 辅助脑深部电刺激术应用 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2017, 22(2): 63-65.
- [25] de BENEDICTIS A, TREZZA A, CARAI A, et al. Robot-assisted procedures in pediatric neurosurgery [J]. *Neurosurg Focus*, 2017, 42(5): E7.
- [26] PILLAI A, RATNATHANKOM A, RAMACHANDRAN S N, et al. Expanding the spectrum of robotic assistance in cranial neurosurgery [J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2019, 17(2): 164-173.
- [27] VADERA S, CHAN A, LO T, et al. Frameless stereotactic robot-assisted subthalamic nucleus deep brain stimulation: case report [J]. *World Neurosurg*, 2017, 97: e11-e14.
- [28] LEFRANC M, ZOUITINA Y, TIR M, et al. Asleep robot-assisted surgery for the implantation of subthalamic electrodes provides the same clinical improvement and therapeutic window as awake surgery [J]. *World Neurosurg*, 2017, 106: 602-608.
- [29] NEUDORFER C, HUNSCHE S, HELLMICH M, et al. Comparative study of robot-assisted versus conventional frame-based deep brain stimulation stereotactic neurosurgery [J]. *Stereotact Funct Neurosurg*, 2018, 96(5): 327-334.
- [30] GOIA A, GILARD V, LEFAUCHEUR R, et al. Accuracy of the robot-assisted procedure in deep brain stimulation [J]. *Int J Med Robot*, 2019, 15(6): e2032.
- [31] PETRY-SCHMELZER J N, DEMBEK T A, STEFFEN J K, et al. Selecting the most Effective DBS contact in essential tremor patients based on individual tractography [J]. *Brain Sci*, 2020, 10(12): 1015.
- [32] 杨兴旺, 陶英群, 金海, 等. 应用 ROSA 机器人优化 STN-DBS 手术的皮质穿刺点 [J]. *中华神经外科杂志*, 2018, 34(3): 282-285.
- [33] BRANDMEIR N, SAVALIYA S, ROHATGI P, et al. The comparative accuracy of the ROSA stereotactic robot across a wide range of clinical applications and registration techniques [J]. *J Robot Surg*, 2018, 12(1): 157-163.
- [34] 许峰, 杨兴旺, 孙霄, 等. ROSA 机器人骨性标记点矫正注册法在脑深部电刺激术中的应用 [J]. *中华神经外科杂志*, 2019, 35(1): 56-58.
- [35] HIREMATH G K. Robotic deep brain stimulation (R-DBS) - "awake" deep brain stimulation using the neuro-mate robot and O-arm [J]. *Neurology India*, 2020, 68 (Supplement): S328-S332.
- [36] CHIRCOP C, DINGLI N, AQUILINA A, et al. MRI-verified "asleep" deep brain stimulation in Malta through cross border collaboration: clinical outcome of the first five years [J]. *Br J Neurosurg*, 2018, 32(4): 365-371.
- [37] BLASBERG F, WOJTECKI L, ELBEN S, et al. Comparison of awake vs. asleep surgery for subthalamic deep brain stimulation in Parkinson's disease [J]. *Neuromodulation*, 2018, 21(6): 541-547.
- [38] 金海, 陶英群, 巩顺, 等. 全麻下机器人辅助脑深部电刺激术治疗帕金森病 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2021, 26(4): 148-151.
- [39] LIU L, MARIANI SG, de SCHLICHTING E, et al. Frameless ROSA® robot-assisted lead implantation for deep brain stimulation: technique and accuracy [J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2020, 19(1): 57-64.
- [40] 许峰, 姚晨, 李晓秋, 等. 微电极记录和宏刺激丘脑底核在脑深部电刺激术治疗帕金森病中的应用 [J]. *中华神经外科杂志*, 2017, 33(6): 578-581.
- [41] SHARMA M, RHIEW R, DEOGAONKAR M, et al. Accuracy and precision of targeting using frameless stereotactic system in deep brain stimulator implantation surgery [J]. *Neurol India*, 2014, 62(5): 503-509.
- [42] GONG S, TAO Y, JIN H, et al. Assessment of Deep Brain Stimulation implantation surgery: a practical scale [J]. *World Neurosurg*, 2020, 134: e1121-e1129.
- [43] 巩顺, 陶英群, 金海, 等. 陶氏 DBS 手术评分法在帕金森病疗效评估的应用 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2021, 26(4): 155-158.
- [44] 中华医学会神经外科学分会功能神经外科学组, 中华医学会神经病学分会帕金森病与运动障碍疾病学组. 帕金森病脑深部电刺激疗法术后程控中国专家共识 [J]. *中华神经外科杂志*, 2016, 32(12): 1192-1198.
- [45] 袁立佳, 陶英群, 金海, 等. 脑深部电刺激术后首次精准程控的临床应用 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2021, 26(4): 159-162.
- [46] RIBAUT S, SIMON E, BERTHILLER J, et al. Comparison of clinical outcomes and accuracy of electrode placement between robot-assisted and conventional deep brain stimulation of the subthalamic nucleus: a single-center study [J]. *Acta Neurochirurgica*, 2021, 163 (5): 1327-1333.

(收稿日期:2021-05-01; 修回日期:2021-06-10)