Open Access
DOI:10.3724/zdxbyxb-2025-0521

智能医药

·专题报道·

闭环脊髓神经接口联合康复训练治疗不完全性脊髓损伤患者一例

冯　琛[1],朱君明[2],张建民[2],许科帝[1]

1. 浙江大学生物医学工程与仪器科学学院,浙江 杭州 310027
2. 浙江大学医学院附属第二医院神经外科,浙江 杭州 310009

［摘　要］ 一例因高处坠落致胸段脊髓损伤4个月的患者,虽经手术和康复治疗,下肢肌力仍只有美国脊髓损伤协会(ASIA)损伤分级C级,遂接受闭环脊髓神经接口硬膜外电刺激(EES)干预。患者在连续刺激、空间靶向配置和多模态闭环康复训练下,逐步恢复了自主单关节运动、站立以及在辅助下步行的能力。随访至2025年7月(即闭环脊髓神经接口植入术后16周),患者ASIA分级由C级提升至D级,运动功能恢复的同时感觉和自主神经功能也有改善。该患者整体康复效果明显优于既往文献报道的慢性期患者康复水平,且未发生与植入相关的感染或神经并发症,提示闭环脊髓神经接口EES辅助康复的治疗方案具有潜在优势。

［关键词］ 脊髓损伤;硬膜外电刺激;闭环脊髓神经接口;神经重塑;运动功能;病例报告
［中图分类号］ R49;R744　　［文献标志码］ A

Closed-loop spinal neural interface combined with rehabilitation training for incomplete spinal cord injury: a case report

FENG Chen[1], ZHU Junming[2], ZHANG Jianmin[2], XU Kedi[1] (*1. College of Biomedical Engineering & Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Department of Neurosurgery, the Second Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310009, China*)
Corresponding author: XU Kedi, E-mail: xukd@zju.edu.cn, ORCID: 0000-0002-9059-3860

［**Abstract**］ Spinal cord injury (SCI) is a major cause of motor disability. Epidural electrical stimulation (EES) has emerged as a promising neuromodulation technique and

收稿日期(Received):2025-07-10　修改返回日期(Revised):2025-11-06　接受日期(Accepted):2025-12-10　网络预发表日期(Online):2026-01-01
基金项目(Funding):浙江省自然科学基金(LR23H180002);浙江省"尖兵领雁+X"科技计划(2026C01009)
第一作者(First author):冯　琛,博士研究生,主要从事植入式脑机接口技术及其临床应用研究;E-mail:feng_chen_@zju.edu.cn;ORCID:0000-0003-1629-6929
通信作者(Corresponding author):许科帝,教授,博士生导师,主要从事植入式脑机接口技术、设备开发及其临床转化研究;E-mail:xukd@zju.edu.cn;ORCID:0000-0002-9059-3860

has been extensively investigated in recent years for promoting functional recovery after SCI. This case report describes a patient who sustained a thoracic SCI four months ago due to a fall from height. Following surgical intervention and conventional rehabilitation, the patient's lower limb muscle strength remained at grade C on the American Spinal Injury Association (ASIA) impairment scale. After implantation of a closed-loop spinal neural interface for EES, the patient underwent a regimen of continuous stimulation with spatially targeted configurations and multimodal rehabilitation training. This intervention led to progressive recovery, including the achievement of voluntary single-joint movements, independent standing, and assisted walking. At the 16-week follow-up, the patient's ASIA grade improved from C to D. Improvements were also noted in sensory and autonomic functions in addition to motor recovery. The overall rehabilitation outcomes were substantially better than those typically reported for chronic-phase SCI patients in the literature. Importantly, no implant-related infections or neurological complications were observed. These results indicate that the combination of closed-loop spinal neural interface-enabled EES and structured rehabilitation holds significant potential as a therapeutic strategy.

[**Key words**]　Spinal cord injury; Epidural electrical stimulation; Closed-loop spinal neural interface; Neural remodeling; Motor function; Case report

[J Zhejiang Univ (Med Sci), 2026, 55(1): 72-76.]

[**缩略语**]　美国脊髓损伤协会(American Spinal Injury Association,ASIA);硬膜外电刺激(epidural electrical stimulation,EES)

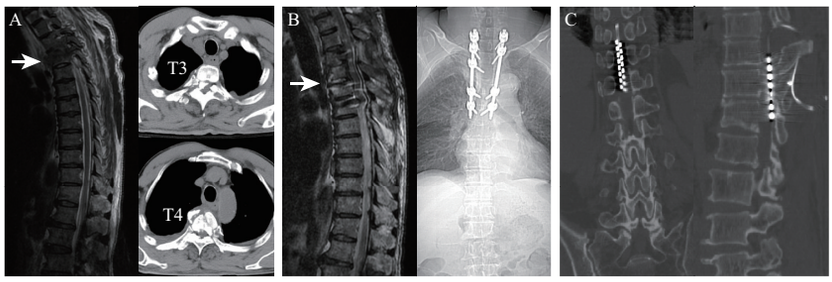
脊髓损伤是一类高度致残的神经系统疾病,其中以胸段损伤最为常见,常导致严重的运动、感觉及自主神经功能障碍。尽管传统的康复治疗方式(如物理训练、药物治疗和辅助支具)对脊髓损伤患者有一定疗效,但对于ASIA分级A~C级的严重损伤患者,其功能恢复有限,患者因长期卧床导致生活质量严重受损。EES作为近年来兴起的神经调控技术,通过刺激脊髓背根区的本体感觉输入通路,激活脊髓神经网络中的残余功能,有望重建脊髓损伤患者的下肢运动功能[1-2]。2018年,Wagner等[3]首次实现脊髓损伤患者在EES辅助下自主行走,引发了该领域的研究热潮。目前研究集中在刺激参数优化、运动任务驱动的个性化刺激模式开发,以及上肢功能和非运动功能协同恢复等多个方向[2-4]。然而,现有临床研究多针对脊髓损伤超过1年的慢性期患者,尚缺乏在损伤6个月内(即神经可塑性窗口期)进行干预的疗效验证。本文报道一例损伤后4个月的不完全性脊髓损伤患者(在接受常规手术和康复治疗后,ASIA分级仍只有C级),其接受了闭环脊髓神经接口EES干预,在连续刺激、空间靶向配置和多模态闭环康复训练下,逐步实现自主单关节运动、站立以及辅助步行,功能恢复效果明显优于既往文献报道。

1　病历摘要

患者男性,61岁,无慢性病史。2024年11月因高处坠落致T3–T4节段爆裂性骨折合并脊髓受压(图1A),行椎体切除减压术后被诊断为不完全性脊髓损伤(图1B)。术后4个月内虽接受常规康复训练,但双下肢运动能力无明显改善。2025年3月患者入浙江大学医学院附属第二医院接受闭环脊髓神经接口植入术,术前评估显示患者ASIA分级C级,双下肢深浅感觉均丧失,排尿通过留置导尿管、排便依赖灌肠辅助;术中,于T12–L1节段植入国产16通道双排硬膜外刺激电极阵列(图1C),并通过术中电生理映射确定各电极触点对应激活的肌群分布(图2)。

患者在闭环脊髓神经接口植入术后入住康复科,进行系统化康复训练。根据不同关节运动所需的肌群控制需求,给予连续空间靶向的刺激

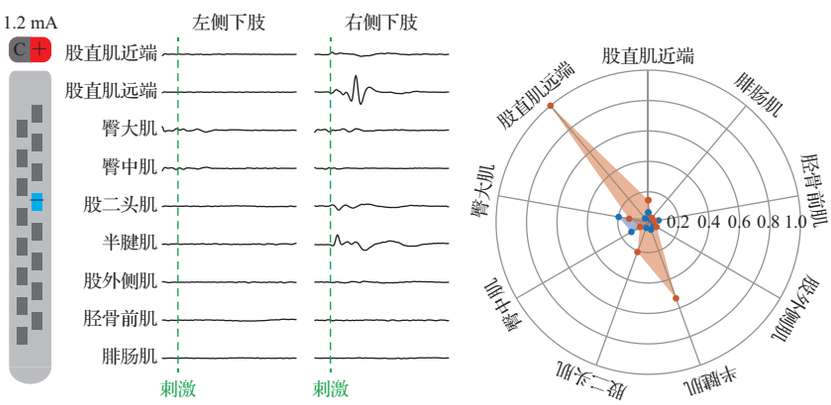
(参数:频率15~60 Hz,脉宽300 μs,电流1~5 mA),并基于肌电反馈进行个性化参数调节,以实现不同关节的自主主动运动控制功能。术后第3天,患者在EES刺激下诱发出双下肢屈髋、伸膝、屈踝趾等单关节被动运动(肌肉强直收缩驱动的关节运动);术后第10天实现单关节肌电驱动控制连续运动;术后第15天实现治疗师辅助下站立;术后第23天实现自主独立站立,最大静止站立时间超过10 min,具备平衡维持能力;术后第25天可进行双下肢自主迈步。术后第5~8周开展步行训练,通过程序化EES实现连续摆腿和辅助步行,患者行走能力持续提升:术后第6周患者可在助行器辅助下完成10 m直线步行,耗时274 s;术后第8周患者已能完成S型路线步行训练,并具备初步的环境适应能力。闭环脊髓神经接口植入术后患者康复训练进展时间轴见图3。截至随访终点(术后16周),患者ASIA评级由C级上升至D级。总体而言,闭环脊髓神经接口植入术后康复训练有助于提升患者双下肢肌力(表1)。



A:创伤后胸椎CT检查(左),可见T3(右上)、T4(右下)爆裂性骨折;B:椎体切除减压术后胸椎CT检查(左)和X射线检查(右)示减压术后内固定结构稳定;C:闭环脊髓神经接口植入术后CT检查示电极位置覆盖椎体T12–L1节段(左为冠状位,右为矢状位). CT:计算机体层成像.

图1　创伤后、椎体切除减压术后和闭环脊髓神经接口植入术后患者影像学检查结果

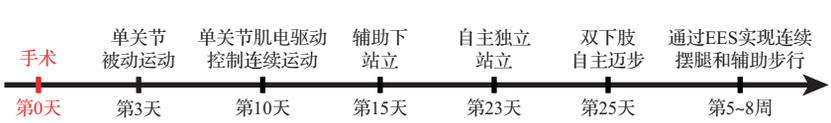
Figure 1　Imaging findings of the patient after trauma, corpectomy and decompression, and closed-loop spinal neural interface implantation



以刺激器壳体作为阳极,选取电极片特定触点(左)作为阴极进行单脉冲电刺激(中),计算目标肌群的相对响应强度及肌群响应选择特异性(右). 在刺激图示触点时,患者的右侧股直肌和半腱肌激活效应较为明显,而对应的左侧肌群则几乎没有激活.

图2　脊髓硬膜外电极特定触点单脉冲刺激与肌肉响应的关系

Figure 2　The relationship between specific contact single-pulse stimulation of spinal epidural electrodes and muscle response



EES:硬膜外电刺激.

图3　闭环脊髓神经接口植入术后患者康复训练进展时间轴

Figure 3　Timeline of rehabilitation training progress after closed-loop spinal neural interface implantation

患者运动功能恢复的同时,感觉和自主神经功能得到改善。具体表现为:术后第5周起,双下肢深浅感觉逐渐恢复,重新感知温度、钝触和针刺觉;术后1个月内恢复自主排便能力;术后1~2个月,导尿依赖减少、偶有自主排尿,且膀胱容量明显增加。

随访持续至闭环脊髓神经接口植入术后16周(2025年7月),整个干预及随访期间,患者无植入相关感染或神经并发症发生,依从性良好,情绪稳定。

2　讨　论

EES可分为侵入式和非侵入式两类。侵入式

表1　闭环脊髓神经接口植入术前及术后4个月时患者下肢徒手肌力评定分级

Table 1　Manual muscle testing grading of lower limb muscle strength of patients before and 4 months after closed-loop spinal neural interface implantation

评估时间	左　侧					右　侧				
	屈髋	伸膝	屈踝趾	屈踝跖	伸趾	屈髋	伸膝	屈踝趾	屈踝跖	伸趾
术前	2	3	1	2	2	2	3	1	3	2
术后4个月	4	5	3	3	3	4	5	3	4	3

EES通过在脊髓背侧硬膜外植入多通道电极阵列，精准调控特定节段神经网络，已广泛应用于下肢运动功能重建[2-6]；非侵入式EES（如ARC^{EX}系统）则采用皮肤表面电极进行刺激，在部分颈段脊髓损伤和中风患者中观察到上肢功能改善[7]。EES作用机制主要是通过激活Ia型本体感觉传入纤维，间接兴奋脊髓前角运动神经元，唤醒中枢模式发生器，从而在缺乏脑源输入时也可生成节律性运动输出[8-9]。刺激参数对EES效果影响显著，其中频率是关键因素。低频（20~60 Hz）有助于促进中枢模式发生器功能重建、改善下肢节律性控制，适用于主动训练；高频（>1 kHz）则在抑制异常反射通路、缓解痉挛及稳定肌张力方面表现突出。Romeni等[5]提出在脊髓损伤康复训练中可分阶段应用高频和低频刺激，前期高频刺激抑痉，后期低频刺激促动，两者联合可协同改善患者步态稳定性和自主控制能力，而脉宽和电流须依据肌群激活阈值进行个体化设定。该研究针对两例脊髓损伤伴病理性痉挛患者，采用低频EES和高频EES联合的方案，经过6个月训练，明显提升患者6分钟步行距离并降低痉挛评分，验证了EES刺激在运动功能和痉挛控制方面的双重优势。此外，Wagner等[3]通过磁共振成像构建个性化靶点图谱并配合多动作程序（如站立、迈步、转弯），明显缩短康复适应期；Wenger等[4]提出的“时空编码刺激”则通过模拟步态周期中肌群的自然激活顺序，实现了精确的多关节协同控制。

目前，EES多应用于损伤超过1年的慢性期脊髓损伤患者，研究对象以脊髓完全损伤或严重不完全损伤患者为主，且刺激方案大多依赖预设程序，并非闭环控制系统[2-6]。受限于伦理和手术风险，针对损伤不超过6个月的急性或亚急性期患者的EES研究较少。本研究病例为损伤后4个月的ASIA分级C级患者，在接受闭环脊髓神经接口植入术后第10天实现下肢单关节肌电驱动控制连续运动，第6周完成辅助步行，其恢复速度明显快于既往EES治疗慢性期脊髓损伤患者。而且，患者在EES关闭后仍能完成部分下肢运动，提示脊髓可能发生突触水平的生理性重塑。该现象与Urbin等[10]提出的脉冲时序依赖可塑性机制相符，即在训练驱动下诱导局部神经网络重建；同时也与Dietz[11]提出的“去抑制”状态促进神经功能重建的观点一致。

值得注意的是，该患者还表现出感觉和自主神经功能（如自主排便或排尿）改善。由于本研究未直接刺激自主神经环路，提示EES可能通过调节脊髓交感通路间接促进括约肌功能恢复，这一间接调节机制与Zhou等[12]在动物实验中发现的脊髓–肌肉双重电刺激增强交感神经调节的结果相符。

本研究的局限性为单病例观察，随访期较短，且刺激参数仍根据术中映射结果和临床医生经验进行调整，缺乏实时反馈系统。对于EES的即时刺激效果、长期刺激效果以及神经重塑效果评估，后续研究可通过定量化电生理评估（如运动诱发电位、躯体感觉诱发电位以及经颅磁刺激）实现。未来研究应致力于进一步验证损伤后早期进行EES干预的安全性及长期疗效，优化刺激参数设置，并深入探讨其在感觉–运动及自主神经环路重建中的作用机制。

本文附加文件见电子版。

志谢　本研究得到浙江省自然科学基金（LR23H180002）和浙江省“尖兵领雁+X”科技计划（2026C01009）支持。浙江大学生物医学工程与仪器科学学院倪昊祺博士研究生和金华市中医院康复科施爱群主任医师参与患者康复治疗过程

Acknowledgements　This study was supported by Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LR23H180002) and “Pioneer” and “Leading Goose” R&D Program

of Zhejiang (2026C01009). NI Haoqi from the College of Biomedical Engineering & Instrument Science of Zhejiang University and SHI Aiqun from the Department of Rehabilitation of Jinhua Hospital of Traditional Chinese Medicine participated in the rehabilitation process of patient

作者贡献 冯琛、朱君明、张建民和许科帝参与论文选题和设计或参与资料获取、分析或解释,起草研究论文或修改重要智力性内容.所有作者均已阅读并认可最终稿件,并对数据的完整性和安全性负责.具体见电子版

Author Contributions FENG Chen, ZHU Junming, ZHANG Jianmin and XU Kedi participated in brewing and designing experiments, or acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; drafting the work, or revising it critically for important intellectual content. All authors have read and approved the final manuscript, and take responsibility for the integrity and security of the data. See the electronic version for details

数据可用性 本研究的相关数据可根据合理请求从通信作者(E-mail:xukd@zju.edu.cn)处获得

Data Availability All relevant data supporting the findings of this study can be accessed upon reasonable request from the corresponding author at xukd@zju.edu.cn

医学伦理 本研究通过浙江大学医学院附属第二医院人体研究伦理委员会审查[(2025)伦审研第(0252)号]并符合1964年《赫尔辛基宣言》及之后的修订版或类似的伦理标准.患者签署知情同意书

Ethical Approval All procedures performed in this study involving human participants were in accordance with the ethical standards of the Ethics Committee of the Second Affiliated Hospital of Zhejiang University School of Medicine (2025-0252), and with the 1964 Helsinki declaration and its later amendments or comparable ethical standards. The participant had signed an informed consent form

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

©The author(s) 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

参考文献(References)

[1] BEHRMAN A L, ARDOLINO E M, HARKEMA S J. Activity-based therapy: from basic science to clinical application for recovery after spinal cord injury[J]. **J Neurol Phys Ther**, 2017, 41 Suppl 3(Suppl 3 IV STEP Spec Iss): S39-S45.

[2] ANGELI C A, BOAKYE M, MORTON R A, et al. Recovery of over-ground walking after chronic motor complete spinal cord injury[J]. **N Engl J Med**, 2018, 379(13): 1244-1250.

[3] WAGNER F B, MIGNARDOT J B, LE GOFF-MIGNARDOT C G, et al. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury[J]. **Nature**, 2018, 563(7729): 65-71.

[4] WENGER N, MORAUD E M, GANDAR J, et al. Spatio-temporal neuromodulation therapies engaging muscle synergies improve motor control after spinal cord injury [J]. **Nat Med**, 2016, 22(2): 138-145.

[5] ROMENI S, LOSANNO E, EMEDOLI D, et al. High-frequency epidural electrical stimulation reduces spasticity and facilitates walking recovery in patients with spinal cord injury[J]. **Sci Transl Med**, 2025, 17(780): eadp9607.

[6] GILL M L, GRAHN P J, CALVERT J S, et al. Neuromodulation of lumbosacral spinal networks enables independent stepping after complete paraplegia[J]. **Nat Med**, 2018, 24(11): 1677-1682.

[7] POWELL M P, VERMA N, SORENSEN E, et al. Epidural stimulation of the cervical spinal cord for post-stroke upper-limb paresis[J]. **Nat Med**, 2023, 29(3): 689-699.

[8] FORMENTO E, MINASSIAN K, WAGNER F, et al. Electrical spinal cord stimulation must preserve proprioception to enable locomotion in humans with spinal cord injury[J]. **Nat Neurosci**, 2018, 21(12): 1728-1741.

[9] DIMITRIJEVIC M R, GERASIMENKO Y, PINTER M M. Evidence for a spinal central pattern generator in humans[J]. **Ann N Y Acad Sci**, 1998, 860: 360-376.

[10] URBIN M A, OZDEMIR R A, TAZOE T, et al. Spike-timing-dependent plasticity in lower-limb motoneurons after human spinal cord injury[J]. **J Neurophysiol**, 2017, 118(4): 2171-2180.

[11] DIETZ V. Behavior of spinal neurons deprived of supraspinal input[J]. **Nat Rev Neurol**, 2010, 6(3): 167-174.

[12] ZHOU K, WEI W, YANG D, et al. Dual electrical stimulation at spinal-muscular interface reconstructs spinal sensorimotor circuits after spinal cord injury[J]. **Nat Commun**, 2024, 15(1): 619.

[本文编辑 余 方 沈 洁]