

## 恒流源刺激下大鼠的转向行为研究

刘虎<sup>1,2</sup>, 赵瑞芳<sup>1,2</sup>, 成珂<sup>1,2</sup>, 咎翔<sup>3</sup>, 崔浩然<sup>1,2</sup>, 何剑<sup>1,2</sup>, 马久红<sup>4</sup>,  
侯晓娟<sup>1,2</sup>, 张乐<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 铁电物理微纳器件与系统山西省重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 山西医科大学附属山西省人民医院 神经外科, 山西 太原 030012;

4. 山西省人民医院 神经外科, 山西 太原 030012)

**摘要:** 大鼠转向行为控制研究中多采用电压调控的方式, 而恒压源无法自动适应大鼠脑区阻抗的变化, 导致刺激效果不稳定从而限制了其实际应用。本文开发了一种恒流源刺激模块, 可实现输出电流不随脑区阻抗变化而波动, 同时具有正极和负极输出, 可减少大鼠脑区的电荷积累。以大鼠丘脑腹后外侧核(Ventral Posterolateral Nucleus, VPL)和丘脑腹后内侧核(Ventral Posteromedial Nucleus, VPM)脑区作为恒流源调控下的转向行为调控研究对象进行了实验研究。结果表明: 刺激VPL脑区, 大鼠表现为明显的转头动作, 刺激VPM脑区, 大鼠表现为明显的偏身动作。在转向角度对比中, VPL大鼠的最小转向角度显著高于VPM大鼠, 平均差异达+18°; 而VPM大鼠的最大转向角度显著高于VPL大鼠, 平均差异达+16°。

**关键词:** 恒流源; 转向调控; 调控参数; 转向角

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.08.0007

**引用格式:** 刘虎, 赵瑞芳, 成珂, 等. 恒流源刺激下大鼠的转向行为研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 753-762.

LIU Hu, ZHAO Ruifang, CHENG Ke, et al. Research on turning behavior of rat under constant-current source stimulation[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(6): 753-762.

## Research on Turning Behavior of Rat Under Constant-Current Source Stimulation

LIU Hu<sup>1,2</sup>, ZHAO Ruifang<sup>1,2</sup>, CHENG Ke<sup>1,2</sup>, ZAN Xiang<sup>3</sup>, CUI Haoran<sup>1,2</sup>, HE Jian<sup>1,2</sup>,  
MA Jiuhong<sup>4</sup>, HOU Xiaojuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Le<sup>1,2</sup>

(1. Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory,  
North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Ferroelectric Physical Micro-nano Devices and Systems,  
North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. The Neurosurgery Department of Shanxi Provincial People's Hospital, Shanxi Medical University, Taiyuan 030012, China;

4. The Neurosurgery Department of Shanxi Provincial People's Hospital, Taiyuan 030012, China)

**Abstract:** Voltage regulation is the main method for turning behavior in rats. However, constant voltage sources cannot automatically adapt to the changes of brain impedance, resulting in the unstable stimulation

收稿日期: 2025-08-21

作者简介: 刘虎(1998-), 男, 硕士生, 主要从事动物机器人方面的研究。

通信作者: 张乐(1987-), 男, 副教授, 博士, 主要从事脑机接口方面的研究。E-mail: zhangle@nuc.edu.cn.

effects and limiting practical application. The constant current source stimulation module that ensures output current remains stable despite changes in brain impedance was developed in this study. It was also featured with both positive and negative outputs, which could minimize the charge accumulation in the rat brain. The manipulation of turning behaviors of the rat in ventral posterolateral nucleus (VPL) and ventral posteromedial nucleus (VPM) regions were investigated using constant current source. It was found that the stimulation of the VPL region resulted in pronounced head turn, while the stimulation of the VPM region resulted in pronounced body deviation. In terms of turning angle, the minimum turning angle of VPL rats was significantly higher than that of VPM rats, with an average difference of  $+18^\circ$ . The maximum turning angle of VPM rats was significantly higher than that of VPL rats, with an average difference of  $+16^\circ$ .

**Key words:** constant current source; steering control; control parameter; steering angle

## 0 引言

动物是仿生机器人研究的自然参考源<sup>[1]</sup>, 经脑科学研究发现, 对特定脑区施加一定的电刺激可以使动物产生类似自然刺激的虚拟感知, 并产生相应的活动行为<sup>[2]</sup>, 利用这一原理, 可以在一定程度上实现对动物行为的机器指令控制。与传统仿生机器人和经过人工训练的动物不同, “动物机器人”既可以服从人类下达的机器指令, 实现机器语言行为转换, 又具备动物的生态特征, 较好地保留了动物自身的运动技能, 其结合了计算机智能和动物本身的生物智能<sup>[3-4]</sup>, 具有很大优势。

随着脑机接口 (Brain-Computer Interface, BCI) 技术的发展, 各类动物机器人层出不穷。大鼠是实验室最常见的动物, 具有明确的神经解剖结构和丰富的行为模式, 因而被作为“大鼠机器人”应用于各类脑机接口实验研究。为了控制大鼠的运动, 可以将大鼠的运动行为拆解成前进、停止、左转以及右转。在长期的研究中发现, 刺激内侧前脑束<sup>[5-7]</sup> (Medial Forebrain Bundle, MFB) 可以控制大鼠前进运动; 刺激背侧中脑导水管周围灰质<sup>[8]</sup> (Dorsal Periaqueductal Gray Matter, dPAG) 可以控制大鼠停止; 刺激丘脑腹后外侧核 (Vestibular Lateral Nucleus, VPL) 和丘脑腹后内侧核 (Vestibular Paramedian Nucleus, VPM) 可以控制大鼠转向<sup>[9-13]</sup>。其中, VPL 和 VPM 脑区研究集中在感知学习和疼痛回避等神经机制领域<sup>[14]</sup>, 对大鼠转向行为的研究相对较少。

在大鼠仿生电刺激实验中, 脑区阻抗会随时间、温度和实验条件变化<sup>[15]</sup>, 恒压源无法自适应这些变化, 导致刺激效果不稳定。其次, 恒压源

可能导致电极极化现象加剧, 影响刺激的准确性和重复性。再次, 由于脑区阻抗的不均匀性, 恒压刺激在不同部位可能导致不同的电流, 从而影响实验结果的准确性和可重复性。因此, 在大鼠仿生电刺激实验中使用恒流源电刺激具有必要性。恒流源模块能够提供稳定的电流输出, 确保刺激的精确性和一致性, 减少电极极化现象, 提高电极使用寿命和信号清晰度, 同时可以适应大鼠脑区阻抗变化, 自动调整输出电压, 保持刺激稳定, 降低对大鼠伤害的风险。在恒流源控制大鼠转向的研究中, Li 等<sup>[16]</sup>通过电刺激腹侧被盖区 (VTA) 控制倾斜运动, 并刺激黑质纹状体通路 (NS) 控制转向行为, 实现倾斜和转向的独立参数化调控。Koh 等<sup>[17]</sup>通过恒流源电刺激调控大鼠 NS 脑区, 实现大鼠转向运动的高精度即时控制。朱浩然等<sup>[18]</sup>利用非侵入式的时间干涉电刺激技术调控大鼠的 VPL 脑区, 实现对大鼠左、右转向运动的无创控制。

基于电刺激丘脑腹后外侧核 (VPL) 和腹后内侧核 (VPM) 可以诱导大鼠转向的理论<sup>[19-20]</sup>, 本研究开发了一种双极性恒流源模块, 在变化负载下输出稳定电流, 其双极性的特点可有效减少脑区电荷积累, 在此实验方法的基础上, 将其作为电刺激源应用于目标脑区, 探究了大鼠在电刺激不同脑区诱导转向行为中的差异。

## 1 实验准备

### 1.1 手术准备

实验挑选 8~10 周、体重为 300~350 g 的健康成年雄性 SD (Sprague-Dawley) 大鼠作为实验对象, 购自山西医科大学实验动物中心, 实验动物

生产许可证号为 SCXK(晋)2024-0004。大鼠的饲养环境为温度(23±2)℃、湿度 50%~60%、12 h 光照/黑暗循环,实验动物使用许可证号为 SYXK(晋)2024-0007。在手术前,准备全套无菌手术器械,包括气麻机(通用型, RWD, 中国)、脑立体定位仪(71000, RWD, 中国)、刺激电极、质量浓度为 9 g/L 的生理盐水以及消毒剂等。手术在干净整洁的实验台上进行,术前将剪刀、剃毛器等工具进行消毒处理,减少术后感染风险。本研究已获得中北大学生物与医学伦理委员会批准(批准文号: 20221103),所有动物实验均遵循《GB/T 35892-2018 实验动物 福利伦理审查指南》进行,在达到实验目的的前提下,尽量减少动物的使用数量。

### 1.2 实验材料

为提高实验的成功率及准确率,本实验使用了 VPL 一体化双极电极和 VPM 一体化双极电极,委托专业厂家严格按照直径 75 μm、单电极阻抗约 10 kΩ 且材质为镍钛合金的要求制作电极丝,这种电极丝具有良好的生物相容性、导电性和韧性。其中,电极母座为 2×10 排母,在排母铜针处连接电极丝,并使用紫外线固化胶封固。制成的一体化双极电极成品如图 1 所示,尺寸为 13 mm×7 mm×3 mm,重约 0.5 g。将电极通过手术植入大鼠头部,并根据《大鼠脑图谱(第 6 版)》中 VPL 和 VPM 的脑区靶点坐标确定电极丝的位置和长度。

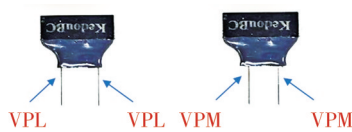


图 1 一体化双极电极

Fig. 1 Integrated bipolar electrode

### 1.3 手术造模

大鼠电极植入手术全程在麻醉状态下进行,且电极植入点位根据《大鼠脑图谱(第 6 版)》中各个核团的分布情况确定,尽量选择靠近核团中心或落入空间较宽的区域。在确定坐标时,以经过前囟和耳间线的冠状面为中线,确定前后(Anterior-Posterior, AP),前为正,后为负;以经过矢状缝的矢状面为正,中矢状面,确定旁开(Medial-Lateral, ML),左为正,右为负;以经过前囟和后囟尖处颅骨最高点的水平

面为零水平面,确定深度(Dorsal-Ventral, DV),上为正,下为负。本实验所选取的脑区坐标(AP, ML, DV)为 VPL(-2.4, ±3.4, -6), VPM(-2.8, ±2.6, -6),坐标单位均为 mm。将电极植入点位为 VPL 的大鼠命名为 VPL 大鼠,植入点位为 VPM 的大鼠命名为 VPM 大鼠。

大鼠经过一周术后恢复,开始进行转向电刺激训练。将刺激背包固定于大鼠背部,连接电极接口与背包中的刺激模块,如图 2 所示。刺激背包安装了大鼠刺激电路系统,集成了主控电路、双极性恒流源运放电路、模拟开关电路、无线传输电路和能源管理电路。该系统可以将上位机的电刺激信号通过无线传输的方式输入大鼠脑区,实现对大鼠行为的调控。



图 2 大鼠装配刺激背包示意图

Fig. 2 Diagram of the rat stimulation backpack assembly

## 2 刺激电路系统设计

### 2.1 主控电路

根据大鼠神经调控电刺激的要求,刺激模块需产生不同幅值、频率和时间的波形,因此选用了 STM32F103RCT6 作为主控芯片。STM32F103RCT6 是意法半导体生产的一款 32 位 ARM Cortex-M3 内核微控制器芯片,最高频率为 72 MHz,可以执行复杂算法和实时处理任务。

主控电路如图 3 所示,为节省空间及简化结构,使用 8 MHz 高频外部晶振,通过芯片内部分频操作实现 72 MHz 的工作频率。BOOT0 和 BOOT1 引脚通过 10 kΩ 电阻与地连接,芯片从主程序存储器中启动,存储器以普通模式工作。电源和地之间并联 4 个 0.1 μF 电容和 2 个 10 μF 电容,滤除高频和低频噪声。将一个 LED 灯与 STM32 芯片电源连接,通过 LED 灯亮灭的情况判断芯片是否在额定电压工作以及电路板是否成功上电。

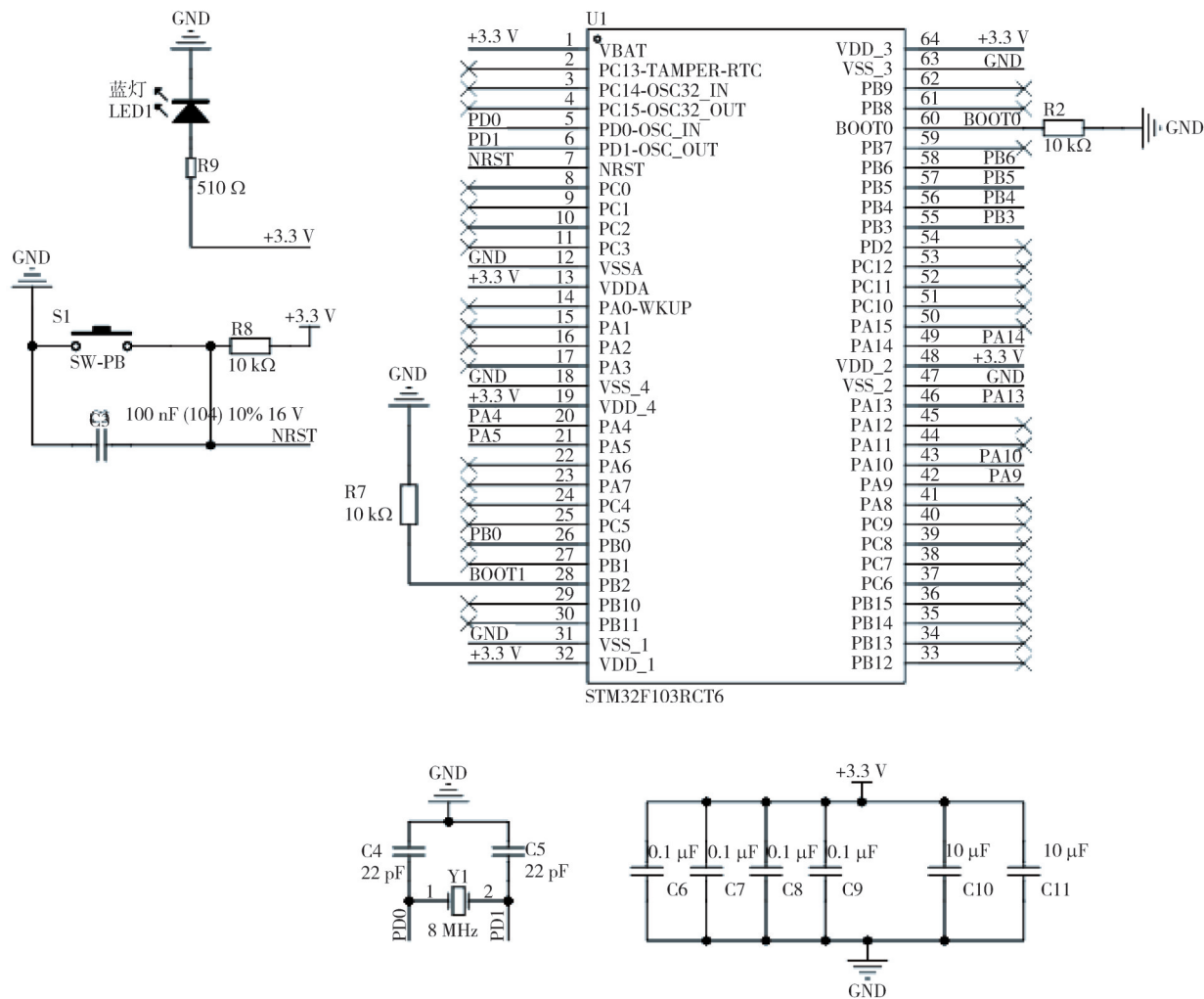


图3 主控电路图

Fig. 3 Main control circuit diagram

2.2 双极性恒流源运放电路

双极性恒流源运放电路选用思瑞浦公司生产的TPA1286U-SO1R芯片和亚诺德公司生产的OP37GS芯片。TPA1286U-SO1R和OP37GS是面向工业与医疗的精密仪表放大器，具有零漂移、低噪声、宽电压的优势。

双极性恒流源运放电路如图4所示，根据运放电路“虚短”和“虚断”的电路规则，通过设置IN+、IN-引脚输入和电阻R4来控制芯片输出，利用偏置电路达到输出电流不随外部负载阻抗变化而改变的目的，此时，电路输出I<sub>out</sub>为

$$I_{out} = \frac{(V_{IN+} - V_{IN-})}{R_4}, \quad (1)$$

式中：V<sub>IN+</sub>由上位机指令控制输出值；V<sub>IN-</sub>为1.2V；R<sub>4</sub>取值为20kΩ。

双极性恒流源输出波形如图5所示，波形同时具有正极和负极输出，可减少刺激产生的电荷积累对大鼠的伤害。

2.3 模拟开关电路

为实现大鼠转向行为的多通道控制，采用了4个独立通道的模拟开关DG411，电路如图6所示。

使用±12V电源为芯片供电，将5V电压接入模拟开关的控制逻辑引脚VL，确保芯片正确识别逻辑电平，保证通道开/断。将双极性恒流源运放电路输出I<sub>OUT</sub>接入DG411的S1、S2、S3、S4引脚，通过IN1、IN2、IN3、IN4引脚输入高/低电平来控制模拟开关的截止/导通，最后通过D1、D2、D3、D4输出波形信号，实现大鼠转向行为的多通道控制。

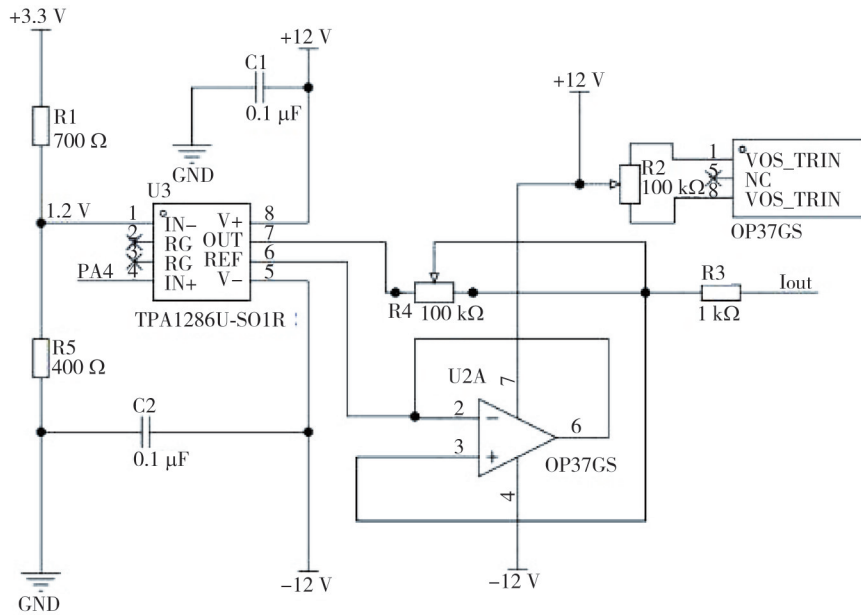


图 4 双极性恒流源运放电路图

Fig. 4 Circuit diagram of bipolar constant current source operational amplifier

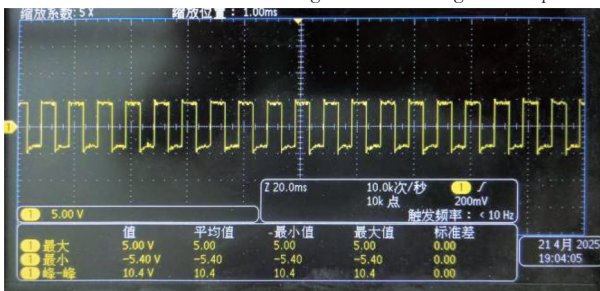


图 5 双极性恒流源输出波形图

Fig. 5 Output of bipolar constant current source

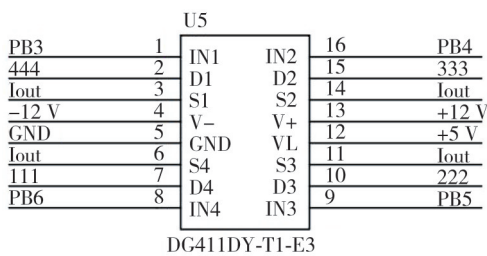


图 6 模拟开关电路图

Fig. 6 Circuit diagram of analog switching

### 2.4 无线传输电路

在 BCI 技术中,传统有线系统因物理线缆束缚易引发组织位移损伤,导致信号失真及长期稳定性下降,从隐蔽性及现实情况考虑,使用数据线传输信号存在诸多局限。LoRa 模块具有低功耗、远距离、高精度的无线通信优势,因此本系统使用了 LoRa 模块配合电路来实现信号的无线传输,无线传输电路如图 7 所示。

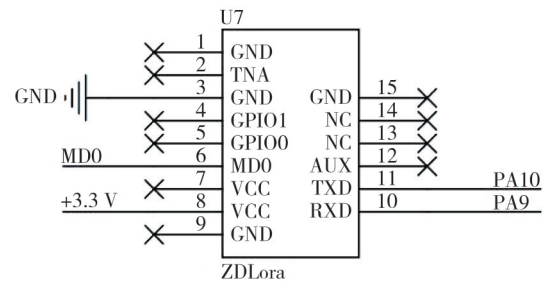


图 7 无线传输电路图

Fig. 7 Circuit diagram of wireless transmission

### 2.5 能源管理电路

能源管理电路为整个系统提供稳定的电压和电流,确保各模块正常运行。本系统使用 3.7 V 锂电池作为供电电源,由于 STM32 主控电路需要 3.3 V 电压供电,运放电路和模拟开关需要 ±12 V 电压供电,逻辑电平需要 5 V 电压供电,因此,能源管理电路包括升压和降压电路。

升压电路如图 8 所示,TPS65130RGER 是一款双路输出直流转换芯片,可输出 ±15 V 电压,通过设置相关电阻比例来控制升压输出,满足本系统 ±12 V 的电源需求。在本电路系统中,输出电压  $V_+$  和  $V_-$  由电阻  $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_8$  和  $R_{10}$  的阻值决定,计算公式为

$$R_6 = R_7 \times \left( \frac{V_+}{V_{REF}} - 1 \right), \quad (2)$$

$$R_{10} = -R_8 \times \left( \frac{V_-}{V_{REF}} \right), \quad (3)$$

式中： $V_{REF}$ 的值默认为1.213 V； $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_8$ 和 $R_{10}$ 的阻值 $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_8$ 和 $R_{10}$ 分别为20、2.2、2.7和26.7 k $\Omega$ ；通过公式计算出 $V_+$ 和 $V_-$ 的值分别为+12 V和-12 V，符合电路系统的供电需求。

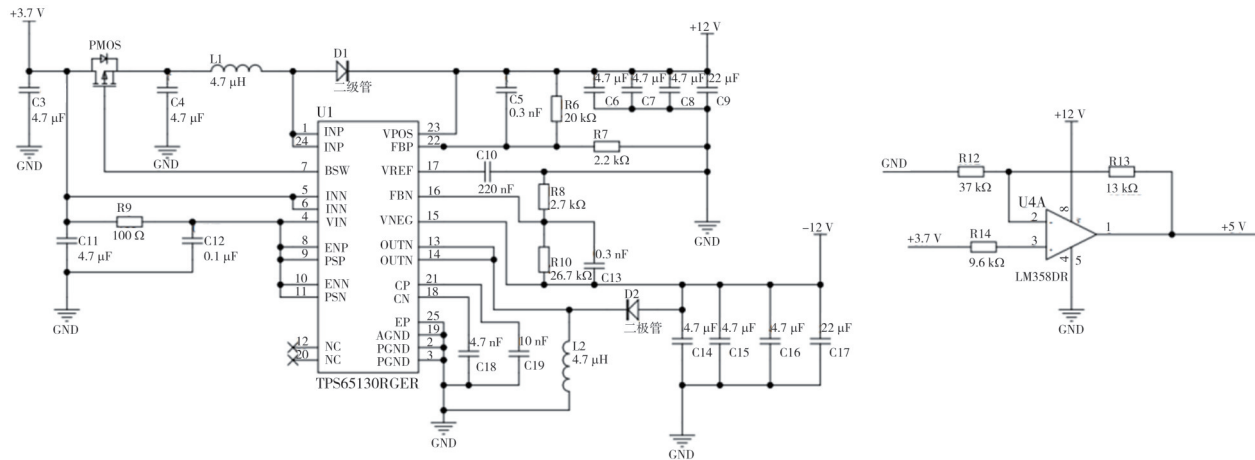


图8 升压电路图

Fig. 8 Boost circuit diagram

使用LM358芯片搭建同相放大电路，根据运放电路“虚短”和“虚断”的电路规则，调整电阻比值实现+3.7 V升压至+5 V，为控制逻辑引脚供电，计算公式为

$$V_{IN-} = V_{IN+}, \tag{4}$$

$$V_{IN-} = \frac{R_{12}}{R_{13} + R_{12}} V_{OUT}, \tag{5}$$

式中： $V_{IN+}$ 为+3.7 V， $V_{OUT}$ 为+5 V，计算得出 $R_{12}$ 和 $R_{13}$ 的阻值 $R_{12}$ 和 $R_{13}$ 分别为37 k $\Omega$ 和13 k $\Omega$ 。

降压电路选用TPS7333芯片，该芯片由德州仪器生产，采用PMOS器件作为通路元件，内部集成了基准电压源、误差放大器、反馈电阻网络等电路模块。基准电压源产生一个稳定参考电压，误差放大器将输出电压与参考电压进行比较，根据比较结果控制PMOS管的导通程度，使输出电压稳定在3.3 V，电路如图9所示。

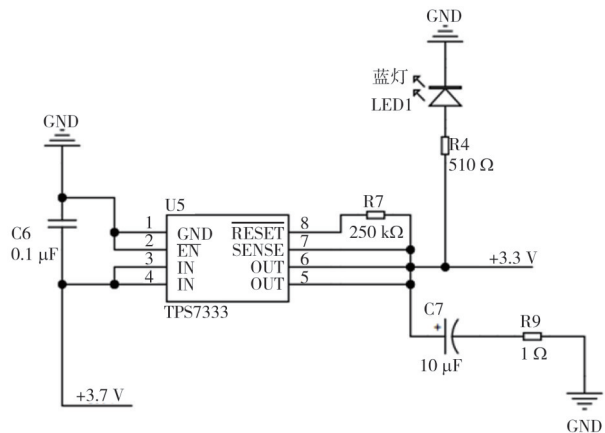


图9 降压电路图

Fig. 9 Buck circuit diagram

### 2.6 整体电路系统

大鼠刺激背包整体电路系统结构如图10所示。能源管理电路为整体系统供电；主控电路与无线传输电路通过交换信号实现双向通信；主控电路接受上位机发出的指令，向双极性恒流源运放电路输出相应波形，并转换为双极性恒流源电信号，然后进入模拟开关分四通路输出，从而实现对大鼠转向行为的多通道控制。

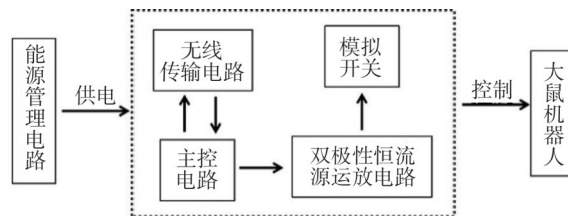


图10 整体电路系统结构示意图

Fig. 10 Structure diagram of overall circuit system

刺激电路系统实物如图11所示，尺寸为4 cm×3.5 cm×2 cm，质量为19.8 g，体积和质量均较小，有利于大鼠背负。刺激电路系统上电后，经功能测试验证，能够根据上位机发出的指令输出正确波形。

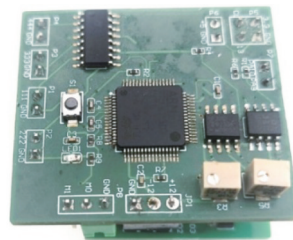


图11 刺激电路系统实物图

Fig. 11 Physical diagram of stimulation circuit system

装有刺激电路系统的背包如图 12 所示,该背包使用弹性的尼龙材质,长 20 cm,宽 10 cm、厚 4 cm,背包和电路系统的整体质量为 29.7 g。

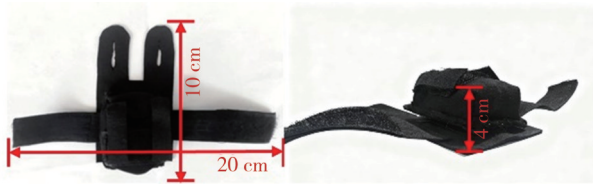


图 12 大鼠刺激背包示意图

Fig. 12 Schematic of rat stimulated backpack

### 3 实验分析

#### 3.1 实验设计

实验前,对电极植入点位进行阻抗测试并初步筛选:将术后恢复一周的大鼠置于圆形旷场,挑选在上位机发送指令后做出相应动作的 VPL 和 VPM 大鼠各 5 只。

本实验以大鼠转向角度为评判标准来分析电刺激参数对大鼠转向行为的调控效果。使用手持 Go Pro 摄像设备记录电刺激引起的大鼠转向行为,确保画面清晰平稳。拍摄完成后,使用电脑自编程序识别大鼠头部刺激电极中点到鼻尖线段,计算线段在刺激前和刺激后的偏转角度。如图 13 所示,刺激前为红色线段,刺激后为蓝色线段,以大鼠躯干为中心进行叠加,计算出刺激前、后的转向角度。双极性波的正、负相波形幅值相等,有助于减少大鼠脑内的电荷积累。为排除干扰且防止大鼠受到过量刺激伤害,在同一参数下连续刺激 5 次,每次间隔 1 min,可有效避免波形的叠加效应。



图 13 大鼠转向角度计算示意图

Fig. 13 Schematic diagram of rat steering angle calculation

#### 3.2 电刺激参数设置

在电刺激实验中,为避免较大电流损坏大鼠脑区,刺激参数遵循由低到高的顺序。设定初始刺激电流为 10  $\mu$ A,刺激频率为 100 Hz,为确保有

效诱发转向反应且避免长时间刺激损害,刺激时长为 1 s,并以 10  $\mu$ A 的步长递增。将大鼠第一次稳定反应(连续刺激 5 次均有明显转向动作,且转向角度大于 20°)的参数定义为最小有效参数;增大刺激电流,当大鼠转向角度基本不变或大鼠被刺激后身体出现抽搐、痉挛等不适症状时,将上次刺激参数定义为最大有效参数。

#### 3.3 刺激转向实验

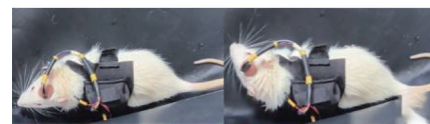
本实验通过刺激 VPL 和 VPM 脑区,观察大鼠转向行为中的区别。在刺激实验前,为保证刺激结果有效(刺激参数与脑区阻抗的乘积需小于供电电压),对参与实验的大鼠进行脑区阻抗测试,VPL 和 VPM 脑区阻抗如表 1 所示。

表 1 实验大鼠的 VPL 和 VPM 脑区阻抗

Tab. 1 VPL and VPM brain region impedance of experimental rats

脑区	方向	大鼠阻抗/k $\Omega$				
		编号 1	编号 2	编号 3	编号 4	编号 5
VPL	左	137	58	78	114	108
	右	101	74	44	97	63
VPM	左	77	86	106	86	78
	右	103	83	144	83	92

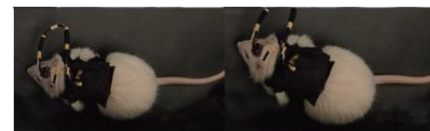
测试大鼠脑区阻抗后,将其置于圆形旷场,开始进行恒流刺激转向实验。结果表明 VPL 和 VPM 大鼠转向动作调控机制存在差异,刺激 VPL 大鼠多表现为头部转动,刺激 VPM 大鼠多表现为身体偏转,转向行为如图 14 所示。



(a) VPL 大鼠小幅度转头行为



(b) VPL 大鼠大幅度转头行为



(c) VPM 大鼠小幅度偏身行为



(d) VPM 大鼠大幅度偏身行为

图 14 两种转向行为

Fig. 14 Two steering behaviors

刺激 VPL 和 VPM 脑区诱发不同转向行为的可能原因是 VPL 接收电刺激后, 将这种感觉投射至大脑前庭皮层参与自身运动方向感知, 使得大鼠头部转动<sup>[21]</sup>; VPM 接收电刺激后, 将这种感觉投射至大脑桶状皮层, 从而激活胡须触觉-运动通路, 诱发身体转向行为<sup>[22]</sup>。

### 3.4 实验结果分析

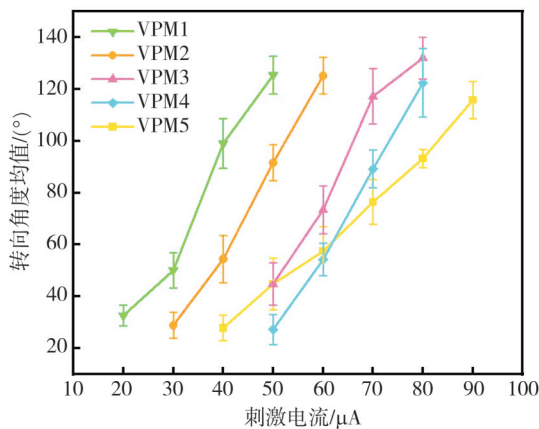
为了控制与年龄相关的生理和行为变量, 选择年龄一致、体重在一定范围的大鼠进行实验, 大鼠信息如表 2 所示。

表 2 实验大鼠信息

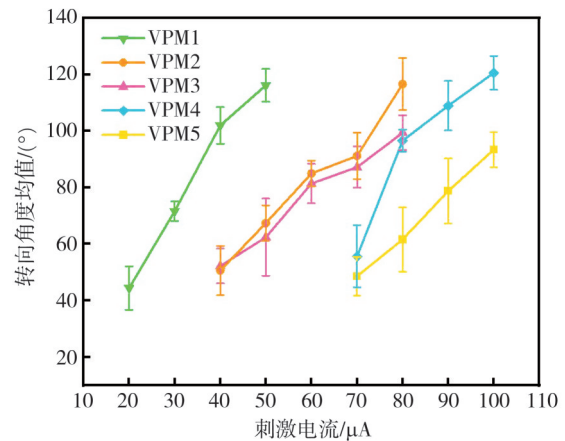
Tab. 2 Experimental rat information

VPL	年龄/周	体重/g	VPM	年龄/周	体重/g
1	9	316	1	9	322
2	9	318	2	9	334
3	9	315	3	9	319
4	9	327	4	9	314
5	9	323	5	9	320

大鼠大脑在脑图谱上呈基本对称结构, 其中 VPM 和 VPL 脑区功能表现为交叉控制, 在刺激脑区产生左转或右转行为的对比实验中并无明显差异, 因此仅呈现右转数据, 刺激 VPL 与 VPM 脑区的转向结果如图 15 所示。从图中可以看出, VPL 大鼠在最小有效参数刺激下, 头部的转动角度较大, 通常为 50°左右, 而 VPM 大鼠在最小有效参数刺激下的转向角度较小, 仅是身体略微倾斜, 通常为 30°左右, VPL 大鼠的最小转向角度显著高于 VPM 大鼠, 平均差异为 +18°; VPL 大鼠在最大有效参数刺激下, 由于身体构造不允许头部转动较大角度, 通常为 110°左右, 而 VPM 大鼠在最大有效参数刺激下身体会偏转较大角度, 通常为 125°左右, VPM 大鼠的最大转向角度显著高于 VPL 大鼠, 平均差异达 +16°。



(a) VPL 大鼠转向结果均值

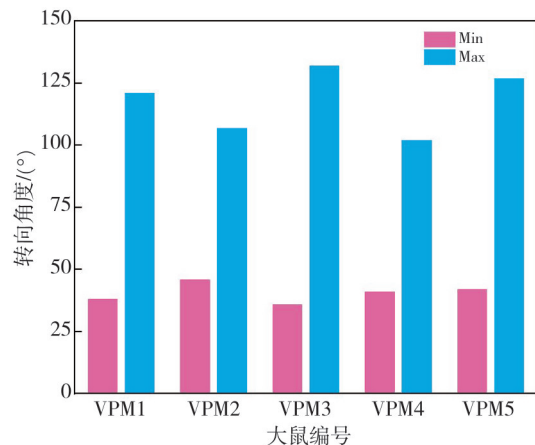


(b) VPM 大鼠转向结果均值

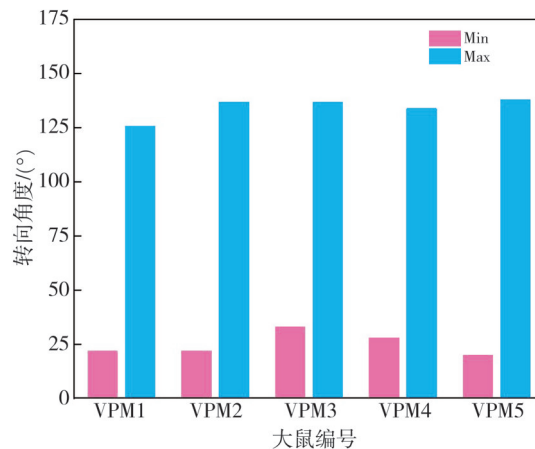
图 15 大鼠转向实验结果

Fig. 15 Rat turning experimental results

VPL 和 VPM 大鼠各自的最小、最大转动角度对比分别如图 16(a) 和图 16(b) 所示。从图中可以看出, VPL 大鼠转动角度的范围为 36°~132°, VPM 大鼠转动角度的范围为 22°~141°。因此, VPM 大鼠转动角度的范围更大, 更适用于行为控制导航。



(a) VPL 大鼠转动角度范围



(b) VPM 大鼠转动角度范围

图 16 VPL 和 VPM 大鼠转动角度的范围

Fig. 16 The rotation angle range of VPL and VPM nuclei in rats

采用不同刺激参数进行转向行为比较实验,可以避免大鼠间存在的个体差异及电极植入点位可能存在的误差对实验结果的影响。

电刺激实验中,除幅值外,频率也会影响实验结果<sup>[23]</sup>。本实验选择表现较好的 VPL 和 VPM 大鼠各两只,在最优刺激幅值下(一般选择中等电流强度的刺激幅值),测试频率变化对大鼠转向行为的作用效果。设定初始频率为 50 Hz.,通过以步长 25 Hz 的频率增长的方式测试不同脑区在频率变化时的转向角度,实验结果如图 17 所示。

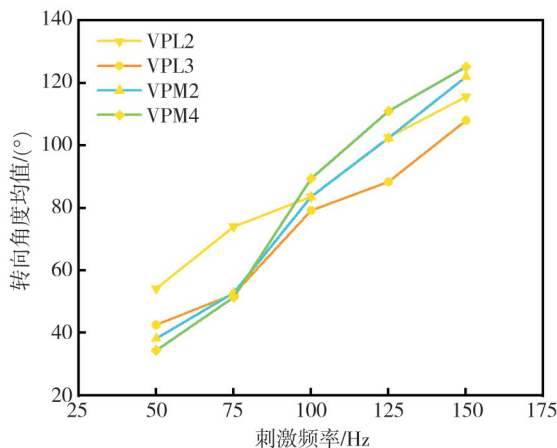


图 17 大鼠转向角度随频率的变化

Fig. 17 Change of rat steering angle with frequency

由图 17 可以看出,在电流幅值不变的情况下,大鼠转动角度随频率的提高而增大,且在 75~100 Hz 之间转向角度增幅最大。该现象反映了不同刺激频率对大鼠神经调节的影响:70~80 Hz 电刺激通过  $\gamma$  振荡同步化和突触可塑性调节表现为适度增强状态<sup>[24]</sup>,而 90~100 Hz 则因突破神经代偿阈值,引发谷氨酸能兴奋超载及行为紊乱,表现为过度激活状态<sup>[25]</sup>。

本实验中,选择脑区阻抗在 40~200 k $\Omega$  内的大鼠,以确保输入恒流源电刺激有效。实验过程中发现,刺激大鼠 VPL 脑区时,大鼠表现为转头运动,刺激 VPM 脑区时,大鼠表现为身体偏转,并且在刺激参数与行为输出的关系上,VPL 和 VPM 大鼠转向角度随刺激强度变化的关系呈相反模式,低电流刺激 VPL 的转向角度更大,而高电流刺激 VPM 的转向角度更大。在电流幅值恒定的情况下,转向运动表现为显著的频率增益效应,即大鼠转向角度随电刺激频率的提高而增加<sup>[26]</sup>。

## 4 结 论

本研究在刺激 VPL 和 VPM 脑区可控制大鼠

转向行为理论的基础上,利用恒流源不随外界阻抗变化的特性,使用电流幅值阶梯增长的方式刺激两个脑区,观察大鼠不同的转向行为。实验过程中发现,刺激 VPL 大鼠,转向行为多表现为头部转动,刺激 VPM 大鼠,转向行为多表现为身体偏转,进一步分析大鼠的转向角度可知,在最小有效刺激参数下,VPL 大鼠的转向角度大于 VPM 大鼠,而在最大有效刺激参数下,VPM 大鼠转向角度大于 VPL 大鼠。同时,在电流幅值不变的情况下,大鼠转向角度随频率的提高而增大,在 75~100 Hz 之间转向角度增幅最大。本研究的结果揭示了 VPL 和 VPM 脑区在控制大鼠转向运动中的区别,有助于在复杂环境中选择合适的脑区进行导航控制,同时有望服务于神经系统疾病的精准干预。由于 VPL 和 VPM 两个脑区间距很小,电极植入手术难度较大,未能在同一只大鼠上对比刺激两个不同脑区时的转向行为。未来可以通过精细手术流程,研制相应电极,在大鼠 VPL、VPM、MFB 脑区同时植入电极,验证电刺激 VPL 和 VPM 脑区时大鼠转向行为的差异以及刺激这 3 个脑区时大鼠执行迷宫任务的表现及成功率,从而为电刺激大鼠的行为控制导航提供更为准确的数据。

## 伦理批准和动物权利声明/Ethics Approval and Animal Right

本研究涉及的所有动物实验均已通过中北大学生物与医学伦理委员会审批(批准文号:20221103)。所有实验过程均遵照《GB/T 35892—2018 实验动物 福利伦理审查指南》进行。

All experimental animal protocols in this study were reviewed and approved by the Biological and Medical Ethics Committee of North University of China (No. 20221103). All experimental animal protocols were carried out by following “GB/T 35892—2018 Laboratory animal—Guideline for ethical review of animal welfare”.

## 参考文献:

- [1] 方轲,梅皓,宋逸,等. 动物机器人:研究基础、关键技术及发展预测[J]. 科学通报, 2022, 67(21): 2535-2552. FANG Ke, MEI Hao, SONG Yi, et al. Animal robots: Research foundation, key technologies and development forecasts[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(21):

- 2535-2552. (in Chinese)
- [2] ALDARONDO D, MEREL J, MARSHALL J D, et al. A virtual rodent predicts the structure of neural activity across behaviours[J]. *Nature*, 2024, 632: 594-602.
- [3] 张佳呈. 大鼠机器人转向及探嗅行为控制与机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [4] 刘昌昊. 基于小鼠钙成像的光学脑机接口实验平台及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [5] YUN S, KOH C S, JEONG J, et al. Remote-controlled fully implantable neural stimulator for freely moving small animal[J]. *Electronics*, 2019, 8(6): 706.
- [6] TALWAR S K, XU S, HAWLEY E S, et al. Behavioural neuroscience: Rat navigation guided by remote control[J]. *Nature*, 2002, 417(6884): 37-38.
- [7] HUO J, ZHANG L, LUO X, et al. Motor behavior regulation of rat robots using integrated electrodes stimulated by micro-nervous system [J]. *Micromachines*, 2024, 15(5): 587.
- [8] CHEN S, QU Y, GUO S, et al. Encode the "STOP" command by photo-stimulation for precise control of rat-robot[C]//2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). IEEE, 2013: 2172-2175.
- [9] XU K, ZHANG J, ZHOU H, et al. A novel turning behavior control method for rat-robot through the stimulation of ventral posteromedial thalamic nucleus[J]. *Behavioural Brain Research*, 2016, 298: 150-157.
- [10] KHAJEI S, SHALCHYAN V, DALIRI M R. Ratbot navigation using deep brain stimulation in ventral posteromedial nucleus[J]. *Bioengineered*, 2019, 10(1): 250-260.
- [11] STUDDTMANN C, LADISLAV M, SAFARI M, et al. Ventral posterolateral and ventral posteromedial thalamocortical neurons have distinct physiological properties [J]. *Journal of Neurophysiology*, 2023, 130(6): 1492-1507.
- [12] TAN Q, WANG Z, SASAKI Y, et al. Category-induced transfer of visual perceptual learning[J]. *Current Biology*, 2019, 29(8): 1374-1378.
- [13] HAYAMA T, OGAWA H. Contralateral representation of tongue thermal information in the rat thalamus[J]. *Brain Research*, 2003, 991(1/2): 245-248.
- [14] BIRAN R, MARTIN D C, TRESKO P A. Neuronal cell loss accompanies the brain tissue response to chronically implanted silicon microelectrode arrays[J]. *Experimental Neurology*, 2005, 195(1): 115-126.
- [15] ZHANG Q, HU S, TALAY R, et al. A prototype closed-loop brain - machine interface for the study and treatment of pain[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2023, 7(4): 533-545.
- [16] LI B, LIU H, LI G, et al. A novel method for the locomotion control of a rat robot via the electrical stimulation of the ventral tegmental area and nigrostriatal pathway[J]. *Brain Sciences*, 2025, 15(4): 348.
- [17] KOH C S, PARK H Y, SHIN J, et al. A novel rat robot controlled by electrical stimulation of the nigrostriatal pathway[J]. *Neurosurgical Focus*, 2020, 49(1): E11.
- [18] 朱浩然, 槐瑞托, 张平丘, 等. 基于时间干涉的小鼠运动行为调控研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2024, 41(2): 342-350.
- ZHU Haoran, HUAI Ruituo, ZHANG Pingqiu, et al. A study on the regulation of motor behavior in mouse based on temporal interference[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2024, 41(2): 342-350. (in Chinese)
- [19] DOOLEY J C, SOKOLOFF G, BLUMBERG M S. Movements during sleep reveal the developmental emergence of a cerebellar-dependent internal model in motor thalamus[J]. *Current Biology*, 2021, 31(24): 5501-5511.
- [20] CHEN X, XU K D, YE S M, et al. A remote constant current stimulator designed for rat-robot navigation[C]//35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS). IEEE, 2013: 2168-2171.
- [21] DALE A, CULLEN K E. The ventral posterior lateral thalamus preferentially encodes externally applied versus active movement: implications for self-motion perception [J]. *Cerebral Cortex*, 2019, 29(1): 305-318.
- [22] FANSELOW E E, NICOLELIS M A L. Behavioral modulation of tactile responses in the rat somatosensory system[J]. *Journal of Neuroscience*, 1999, 19(17): 7603-7616.
- [23] FANG K, WANG Z, TANG Y, et al. Dynamically controlled flight altitudes in robo-pigeons via locus coeruleus neurostimulation[J]. *Research*, 2025, 8: 0632.
- [24] SÁNCHEZ-GARRIDO CAMPOS G, ZAFRA Á M, ESTÉVEZ-RODRÍGUEZ M, et al. Preclinical insights into gamma-tACS: Foundations for clinical translation in neurodegenerative diseases [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2025, 19: 1549230.
- [25] 李东明. 电刺激对小鼠学习与记忆功能的影响和机制研究[D]. 保定: 河北大学, 2022.
- [26] CHEYNE D, BELLS S, FERRARI P, et al. Self-paced movements induce high-frequency gamma oscillations in primary motor cortex[J]. *NeuroImage*, 2008, 42(1): 332-342.