

大鼠硬膜上无线电刺激器 结题汇报

项目组成员：王菲 陈佳琦 任杰

指导老师：洪波

1 设计与方案

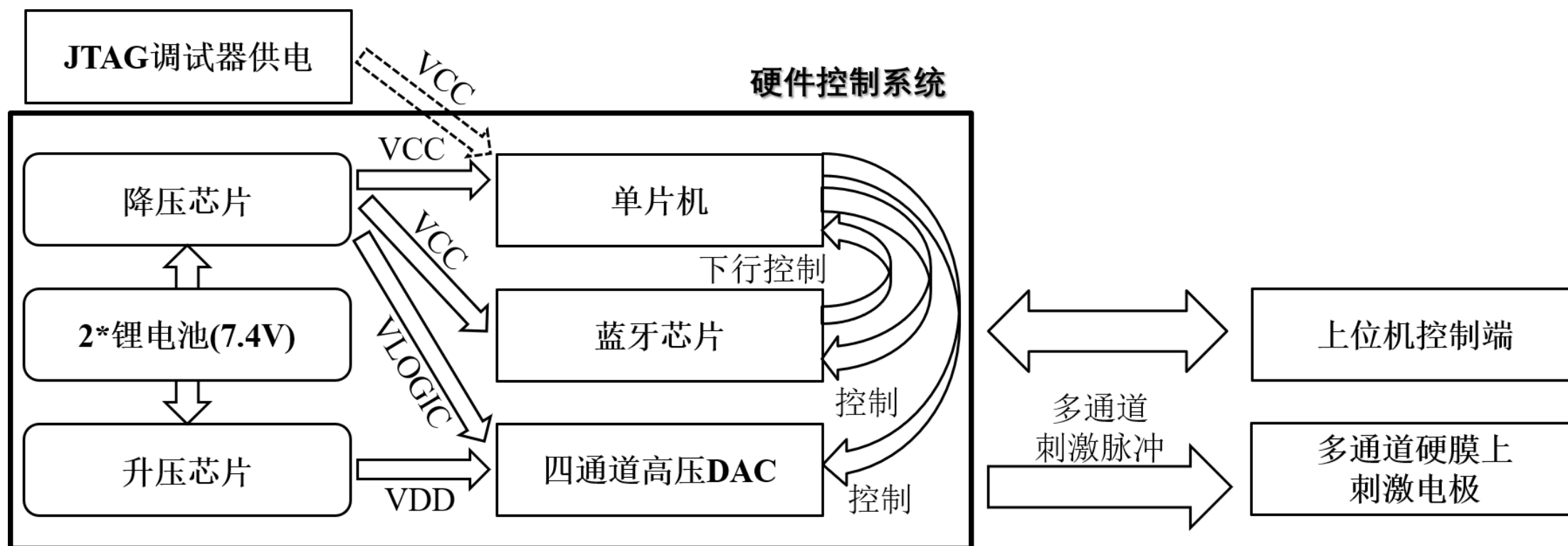
完成的设计内容，采用的方法和软硬件设计方案

完成的设计内容

- 刺激器硬件设计与制作
- 上位机软件设计与编写
- 电极阵列的设计与制作
- 大鼠服装设计与管理（用于背负硬件）
- 系统功能测试、性能测试的设计与执行



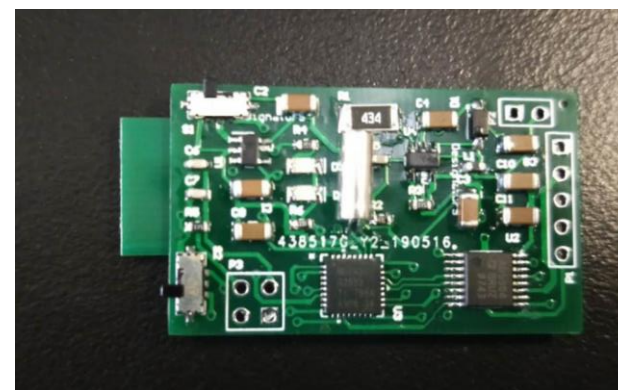
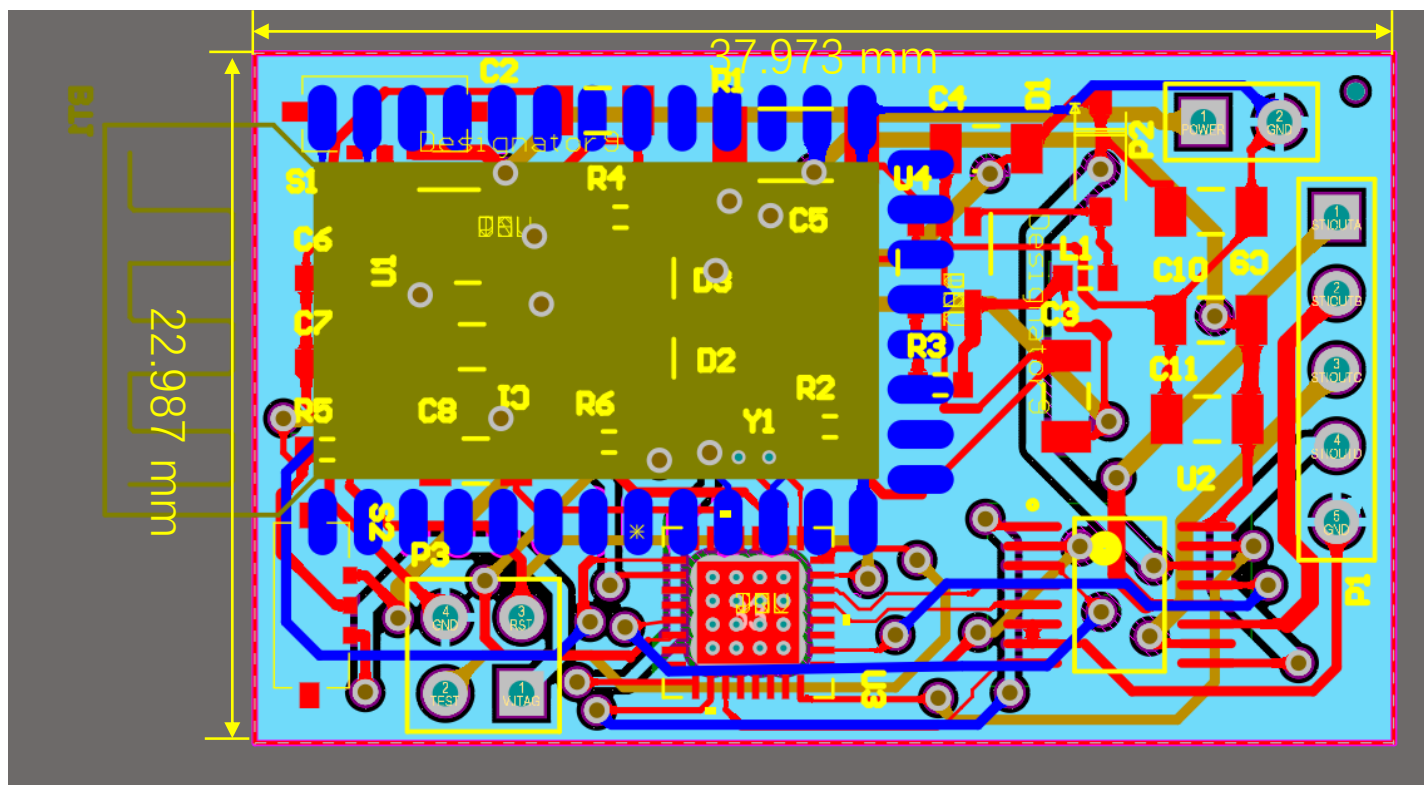
硬件电路设计方案



硬件电路设计方案

核心元器件	型号	封装
单片机	MSP430G2553	RHB_32
高压DAC	AD5504BRUZ	TSSOP16
降压芯片	TPS70933QDBVR	DBV0005A_N
升压芯片	LMR64010	DBV0005_N
蓝牙芯片	DX-BT18	邮票孔封装

硬件电路设计方案

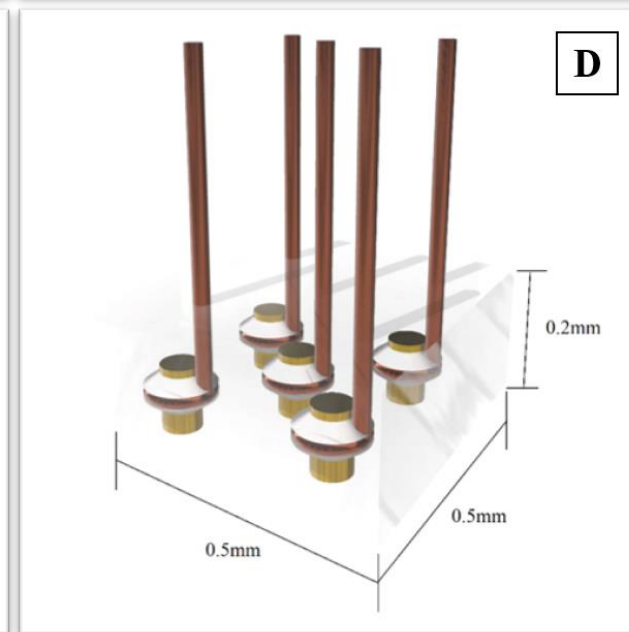
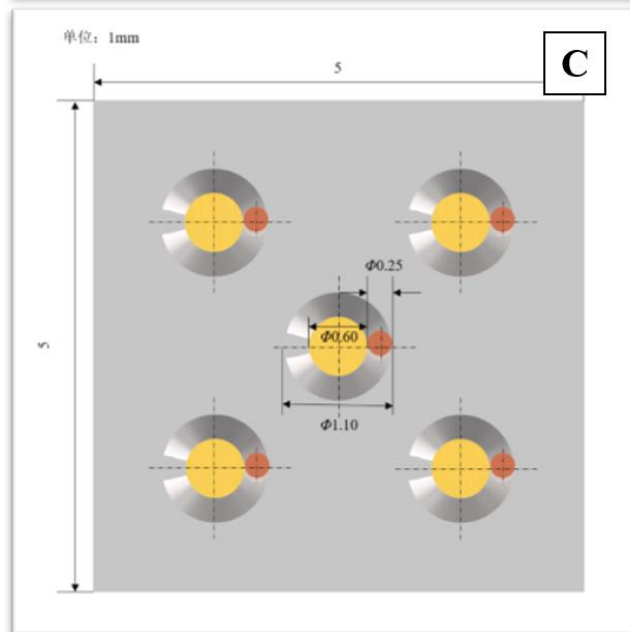
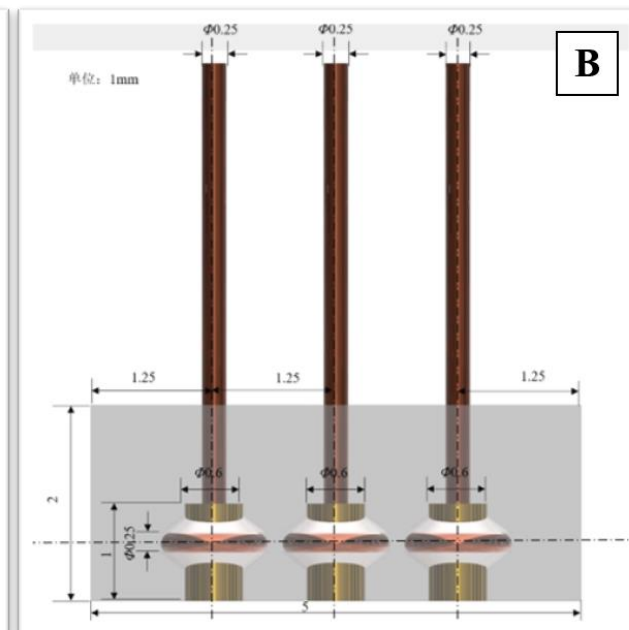
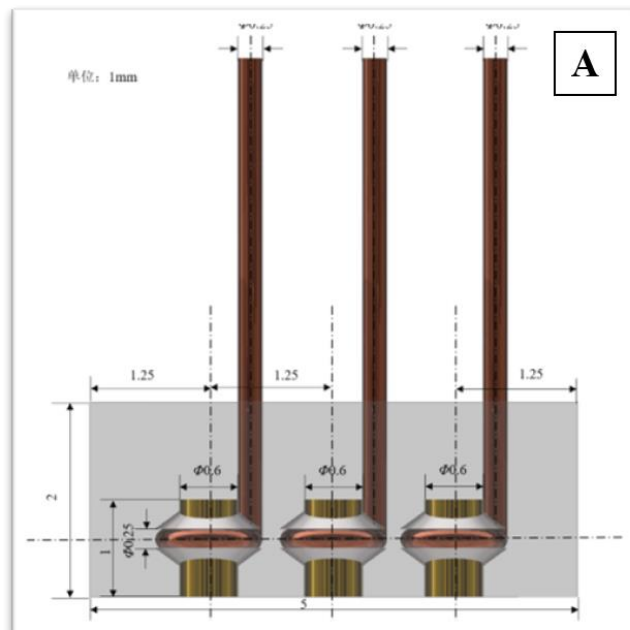


电极设计方案

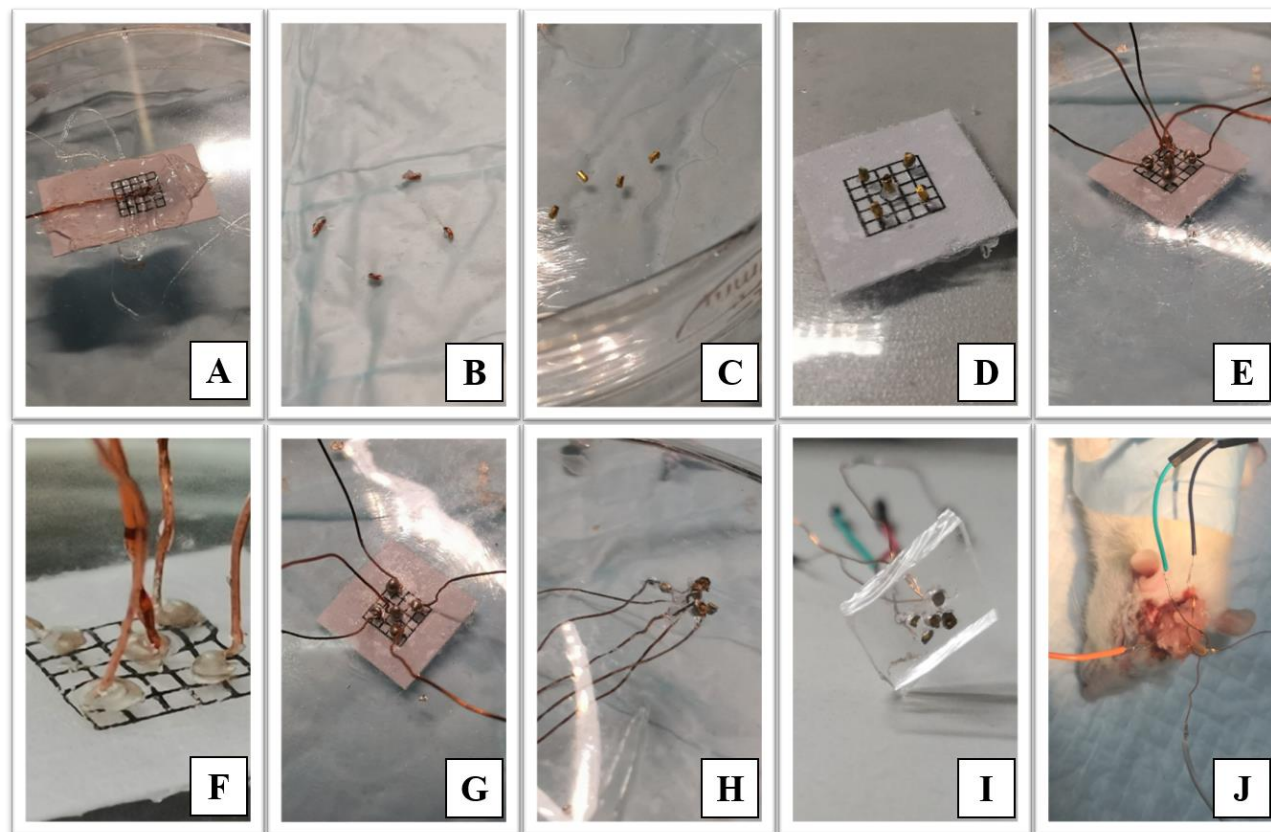
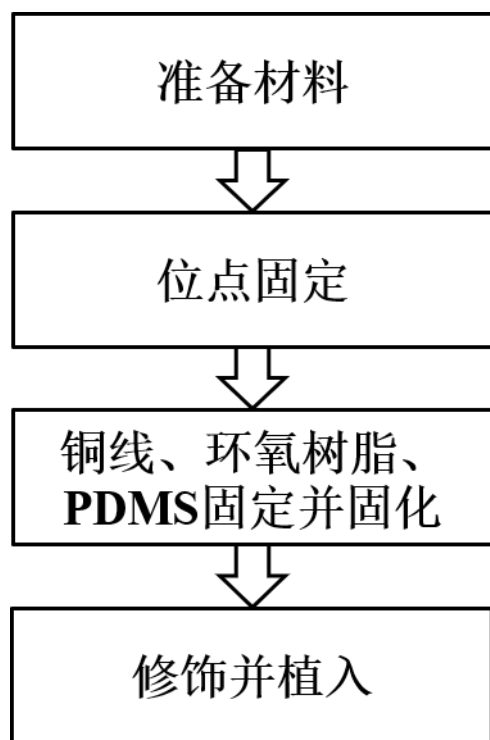
尺寸标注:

$0.5 \times 0.5 \times 0.2 \text{ mm}$

中心电极为接地端



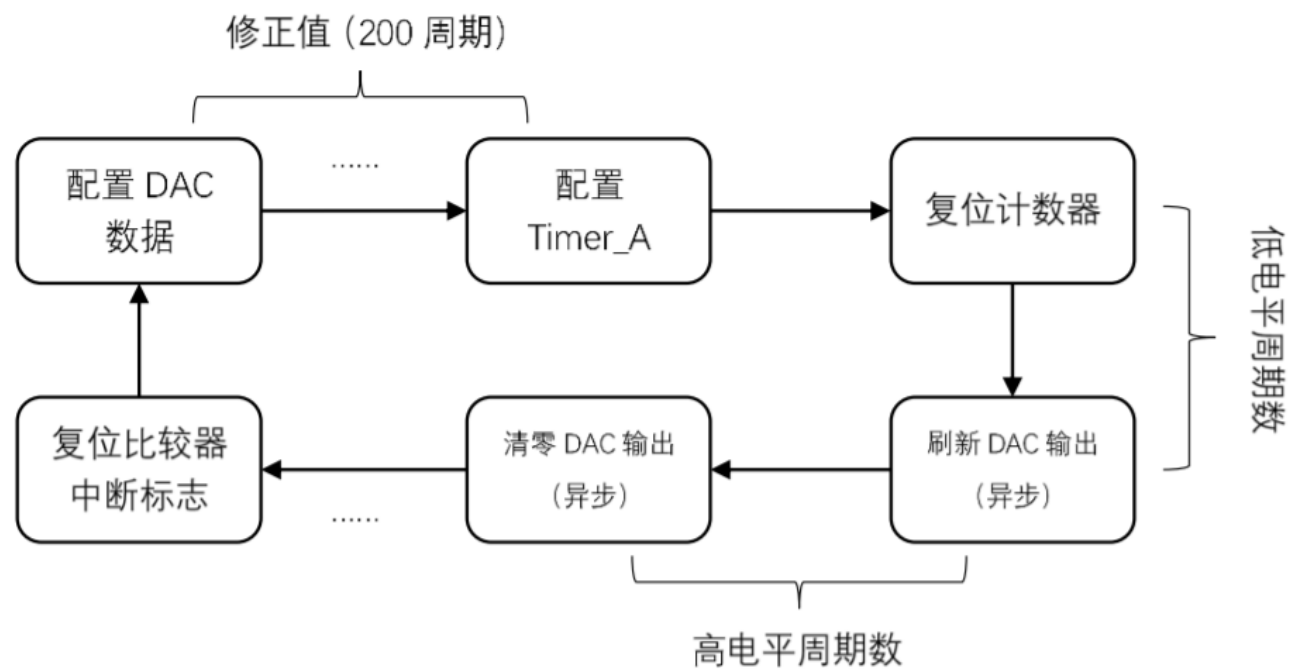
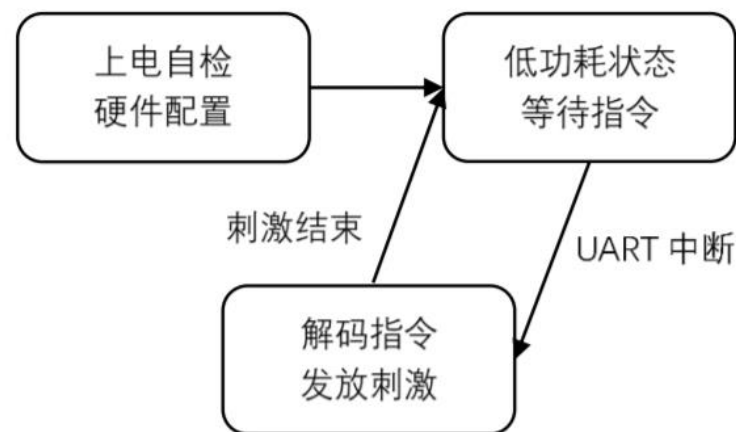
电极阵列制作



电极制作流程。A. 金柱切割方法; B. 切割后的金箔; C. 去除胶水电极; D. 电极固定方法; E. 铜线缠绕电极; F. 加入PDMS后; G. PDMS固化后; H. 分离电极阵列; I. 电极阵列修饰; J. 植入后的效果。

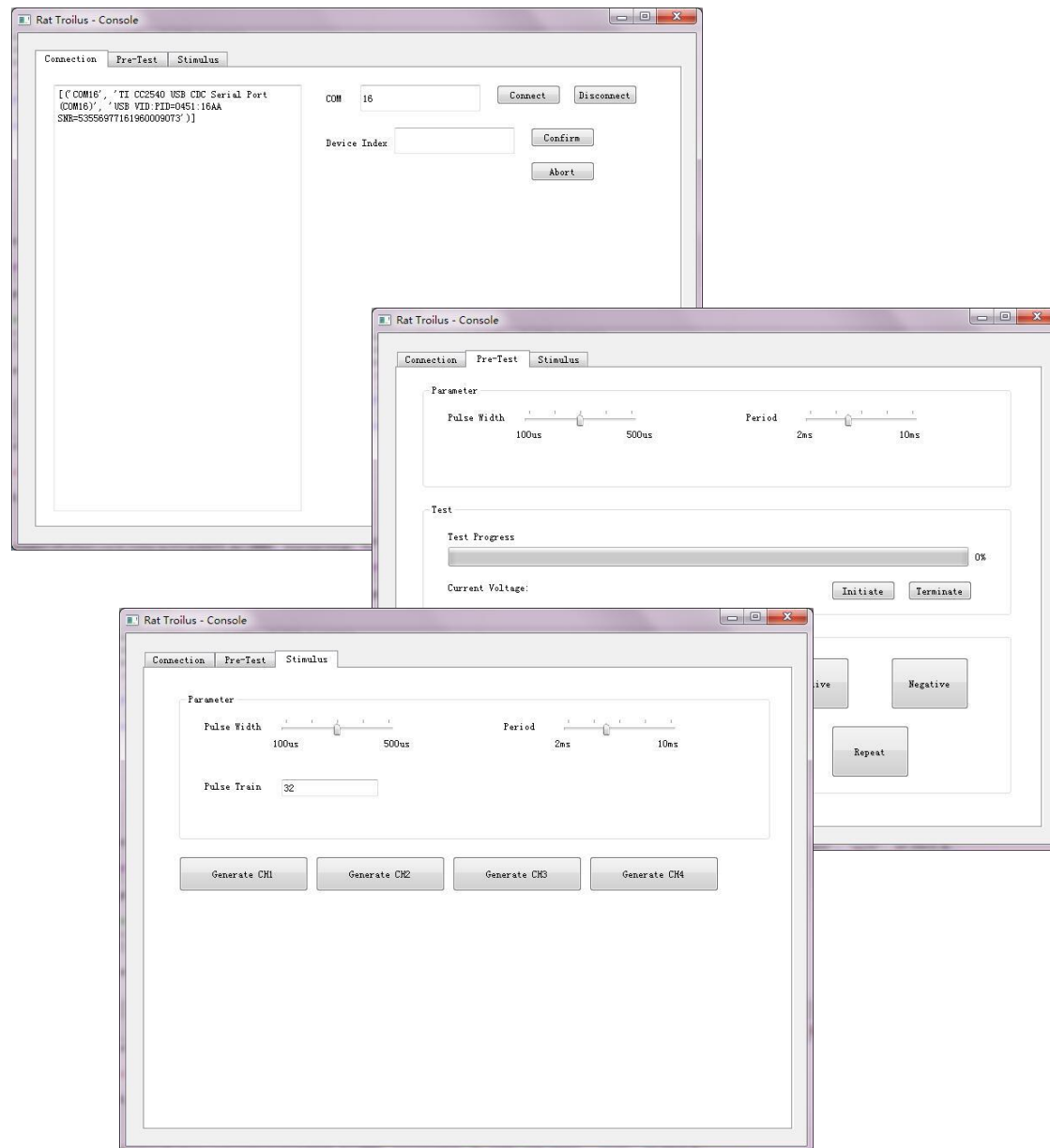
软件设计方案

- 单片机软件基本构架为一状态机：
- 为精确控制脉宽与周期，采用以下控制时序，其特点为：
 - SPI通讯全部安排在低电平时进行
 - 脉冲触发与停止采用异步信号控制
 - 低电平延时扣除200周期的修正值，以补偿SPI通讯时延



软件设计方案

- 上位机软件提供了一个交互界面，其逻辑基于面向对象编程，结构为简单的主函数+大量事件响应函数。
- 上位机由 Python 语言编写，交互界面利用 QT Designer 工具设计。



2 创新性与实用性评价

实现的设计结果，创新性、实用性评价

实现的设计结果

- 刺激器硬件、电极阵列及上位机控制软件构成的完整的刺激系统
- 功能测试
 - 自动进行预测试，获得刺激电压阈值
 - 对大鼠M1运动皮层发放随意刺激，促其背部、后肢、嘴角等部位肌肉收缩，且运动方式与刺激通道相关，幅度与刺激强度相关
- 性能指标
 - 正确制作的电极阻抗约为**0.03Ω**，最坏情况小于1Ω
 - 刺激电压范围**1-40V**，脉宽100-500微秒可调，周期2-10毫秒可调，脉冲序列长度1-127可调
 - 输出压摆率 **7.843×10^5 V/s**，基线漂移约400mV
 - 典型输出状态系统功耗**0.303 W**，典型静息状态系统功耗**0.222W**；使用实验所用Li-ion电池时，估算最坏情况下工作时间可达**1小时**

创新性

- 自主设计、自主器件选型、能产生高电压脉冲、小尺寸的硬件控制电路
- 可靠的无线控制与友好的人机交互界面
- 基于人为反馈的通道刺激阈值测试（自动预测测试）
- 新型硬膜上刺激电极的实现与验证

实用性

- 可直接应用于大鼠运动皮层相关实验
 - 硬件电路紧凑轻巧，大鼠可轻易背负；无线控制方便实验
 - 通道数和刺激电极阵列电极数可扩展性
 - 功耗控制良好，一组电池至少可支持1小时连续刺激发放，发热控制理想
 - 易用的控制软件和自动预测试功能
 - 性能理想的刺激电极阵列
- 经过改进后可作为人用硬膜上刺激器开发的验证机

3 问题与解决

设计中遇到的问题及其分析与解决

硬件设计与制作

问题

- 布线：PCB板尺寸小引脚密集，难以完成自动布线
- 封装：制作PCB板后发现DAC芯片、蓝牙芯片封装或引脚映射与实际不符
- 制作：SMT焊接需要较长工期不易协调

解决

- ✓ 优化布局，规则设置焊盘处线宽收缩，自动布线之后手动调整线宽
- ✓ 及时更改，重新布线与制作
- ✓ PCB板制作与SMT制网板同时进行

电极阵列制作与生理实验

问题

- 尺寸：由于电极过小带来的一系列操作、固定上的难题
- 麻醉：动物房给出的麻醉药浓度差别很大，大鼠之间的个体差异也大
- 固定：制作时、植入时、植入后的固定。

解决

- ✓ 搭建“土装置”，通过反复练习加强手工操作的稳定性和准确度，调整PDMS比例
- ✓ 在使用麻醉药时，以30%安全剂量为注射单位，虽然大鼠不能被频繁注射
- ✓ 探索了一系列不稳固的固定方法，暂时未找到更好的方法

软件设计与调试

问题

- 蓝牙5.0兼容性问题：使用BT-20蓝牙5.0模块进行调试时，只能建立连接而无法建立通道
- 4MHz晶振无法为单片机正常提供时钟：G2553不支持高频外部晶振
- 单片机指令时延导致脉宽周期控制不准确

解决

- ✓ 更换BT-18LE蓝牙4.2模块：封装一致，通讯功耗接近
- ✓ 更换内部DCO作为时钟。缺陷是无法利用ACLK，最深只能进入LPM0
- ✓ 重新设计控制时序：采用异步触发控制与延时修正值两者结合

软件设计与调试

问题

- AD5504建立SPI通讯后，存在一系列未知原因错误：
 - ①寄存器读回数据无意义；
 - ②写入数据与输出电压不严格对应；
 - ③电压控制范围为实际能达到范围的1/2。

解决

- ✓设置CKPH=1
- 造成SPI相位配置错误的原因：
- ①AD5504数据手册的描述模糊且前后矛盾，导致误解
 - ②MSP430G2553与AD5504对于主从机读写相对时序的定义不同

4 评价与展望

与预期目标的对比，经验与教训分析；进一步优化设计的方向与计划

与预期目标的对比

- 实现了开题时规划的3个基本功能：
 - ✓ 利用控制器控制刺激强度和位置；
 - ✓ 对大鼠硬膜上部分相关核团进行刺激；
 - ✓ 人机交互显示刺激情况并调整。
- 达成了开题时预期的6个系统特性：
 - ✓ 无线控制
 - ✓ 小型化；
 - ✓ 步进控制；
 - ✓ 使用更合理的电极解决方案；
 - ✓ 闭环；（人工反馈）
 - ✓ 硬膜上刺激。
- 开题时提出的关于肌电检测与反馈的2个拓展功能（可选）留待将来实现

经验与教训分析

- 在实践中发现，SMT焊接工期较长，可与PCB板印制同步进行以减少制作的周期
- 嵌入式系统的开发中，软件与硬件的结合相当紧密，简单地割裂两部分工作是不可行的，需要两部分负责人员密切合作
- 电极属于消耗品，无法重复植入，大鼠良好的麻醉状态很难达到，以上两项都需要备选方案

进一步优化方向

- 硬件设计方面：提高硬件电路的抗干扰能力和各层之间的屏蔽能力，改进硬件电路元件布局。
- 系统功能方面：可与肌电信号采集功能相结合，形成基于肌电信号的闭环自动反馈功能，使电刺激系统可以应用于更广泛的刺激场合并自动寻找刺激阈值，使刺激阈值的寻找更加准确可信。
- 系统扩展方面：可基于译码器和多个多通道高压DAC，在小幅度扩大硬件控制电路尺寸的基础上，实现更多通道的电刺激系统（如32通道），达到商品级别。
- 软件方面：改善上位机控制软件的控制逻辑与交互界面，增加更多实用功能（记录、保存）；改善系统工作的稳定性：增加通讯数据校验和应答；通过配置外部低频晶振使单片机能够达到更深的低功耗状态。
- 电极阵列方面：利用机械的力量进行工业化生产，增加电极的可靠性和定位准确性。另外，可以增加电极的通道数，可以通过弧线设计加强生物兼容性。

5 总结与建议

课程总结、体会、意见与建议

课程总结-硬件设计与制作

- PCB设计：
 - 元件封装绘制与选择；各层板屏蔽隔离问题；多层布线问题。
- PCB制作：
 - 安排上如何缩短工期，工艺设计。
- 软硬件联调：
 - 软硬件联调问题排查方法。

课程总结-电极阵列制作与大鼠实验

- 电极阵列制作：
 - 细心的精细操作；固定土装置搭建方法；材料处理方法。
- 大鼠实验：
 - 麻醉剂量控制；具体实验操作；实验流程设计。
- 意见：
 - 规范化大鼠麻醉剂量——动物房应提供浓度更加稳定的麻醉药品，或者采用气麻机实现更灵活的麻醉控制
 - 需要更成熟先进的制作设备以实现电极小型化、稳定化。

课程总结-软件设计

- 嵌入式系统设计：
 - 软件与硬件设计的紧密结合；
 - 软件开发者前期对硬件设计的深度介入；
 - 软硬件联调问题排查方法。
- 集成电路芯片利用：
 - 充分熟悉数据与用户指南内容；
 - 多利用TI、Analog等厂商官方论坛上的讨论信息。
- 意见：
 - 实验室可排查一下硬件故障或损坏情况。本次实验中遇到了许多个无法正常工作的MAX232芯片和一个不能正常驱动Spy-bi-wire的JTAG调试器，造成了一定进度拖延

6 分工与经费

分工、合作、经费使用等情况

分工与合作

项目	成员
PCB板设计布线	陈佳琦、任杰
软件设计	任杰
电极制作与手术进行	王菲
硬件电路功能与性能实验	任杰、陈佳琦
Poster制作	王菲、陈佳琦
展示视频制作	任杰
报告撰写	陈佳琦、王菲、任杰

经费使用情况

商品	单价	数量	单位	小计/元
生理盐水	41.4	1	三瓶	41.4
培养皿	36.5	1	10个	36.5
导电银胶	73	2	10g	146
工业蒸馏水	42	1	3000mL	42
UHU胶水	17.9	1	125mL	17.9
铜线	52	1	1卷	52
蓝牙模块1	105	1	2只	105
蓝牙模块2	51.5	1	2只	51.5
PCB印制	152	1	10块	152
电池1	100	1	20个	100
电池2	154	1	20个	154
总计		12	张	898.3

7 致谢与参考文献

致谢、参考文献等

致谢

- 感谢腾轶超老师在项目推进过程中的指导与关照。
- 感谢洪波老师在项目立项、构思方面的指导以及资金、设备方面的大力支持。
- 感谢付明珠助教、李文正助教、王朝助教、张清清学姐在项目规划、执行中的无私帮助。

参考文献

- Molina-Luna, K., Buitrago, M.M., Hertler, B., Schubring, M., Haiss, F., Nisch, W., Schulz, J.B., Luft, A.R., 2007. Cortical stimulation mapping using epidurally implanted thinfilm microelectrode arrays. *J. Neurosci. Methods* 161, 118–125.
- Fonoff, Pereira, Camargo, Dale, Pagano, Ballester, & Teixeira, 2009. Functional mapping of the motor cortex of the rat using transdural electrical stimulation. *Behavioural Brain Research J*, 202(1): 138-141.
- 张韶岷, 王鹏, 江君, 刘富鑫, 叶学松, 陈卫东, 2007. 大鼠遥控导航及其行为训练系统的研究[J]. *中国生物医学工程学报*. 26(6): 830-836.
- Brown, J., & Pilitsis, J., 2006. Motor cortex stimulation. *Pain Medicine J*, 7, S140-S145.
- 李建华, 万红, 2010. 大鼠刺激器遥控系统的设计与实现[J]. *计算机工程*, 36(18): 288-290.
- Russell C, Kissane R W P, Steenson D P, Chakrabarty S. 2019. A novel simplistic fabrication technique for cranial epidural electrodes for chronic recording and stimulation in rats *J. Journal of Neuroscience Methods*, 311: 239-242.