

# 中国力学学会优秀博士学位论文奖推荐表

( 2020 年度 )

填表日期：2021-07-02

论文题目	三维柔性神经电极与界面的力学设计与调控		
作者姓名	张迎超	获得学位所在单位	清华大学航天航空学院
答辩日期	2020-05-24	获得学位日期	2020-06-18
二级学科	固体力学	论文涉及研究方向	柔性神经电极、力学
导师	黄永刚、冯雪	导师研究方向	柔性电子，力学
作者手机		E-mail	
CSTAM会员	否	会员号	
推荐单位/理事 联系人	申胜平	联系人E-mail	
联系人手机		是否获校优秀博士 论文	是

攻读博士学位期间及获得博士学位后一年内获得与博士学位论文有关的成果（包括学术论文、专著、获奖项目和专利项目，限填8项）

1.	Zhang Y, Zheng N, Cao Y, et al. Climbing-inspired twining electrodes using shape memory for peripheral nerve stimulation and recording. <i>Science Advances</i> . 2019, 5(4): eaaw1066.	5.	Ma Y, Zhang Y, Cai S, et al. Flexible Hybrid Electronics for Digital Healthcare. <i>Advanced Materials</i> . 2019: 1902062.
2.	Zhang Y, Wu J, Ma Y J, et al. A finite deformation theory for the climbing habits and attachment of twining plants. <i>Journal of the Mechanics and Physics of Solids</i> . 2018, 116: 171-184.	6.	Zhang Y, Zheng N, Ma Y, et al., Bio-inspired 3D neural electrodes for the peripheral nerves stimulation using shape memory polymers, in: 2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), IEEE, 2018, pp. 29.23. 21-29.23. 24.
3.	Zhang Y, Wang F, Ma Y, et al. Buckling configurations of stiff thin films tuned by micro-patterns on soft substrate. <i>International Journal of Solids and Structures</i> . 2019, 161: 55-63.	7.	清华大学优秀博士学位论文，2020年，张迎超
4.	Zhang Y, Jiao Y, Wu J, et al. Configurations evolution of a buckled ribbon in response to out-of-plane loading. <i>Extreme Mechanics Letters</i> . 2020, 34: 100604.	8.	冯雪，张迎超，付际，曹宇，王峰乐. 柔性螺旋电极的制造方法及神经束检测治疗装置：中国，CN108784670A

### 论文的主要创新点及学术影响:

柔性神经电极在脑机接口中起着重要的桥梁作用，是当前的学术前沿研究之一。本博士论文围绕着电极神经界面的几何和力学失配问题，开展了相关的力学设计与界面调控研究，选题具有重要的学术价值和应用前景。论文取得的创新性成果如下：

- 1) 提出了缠绕植物攀爬变形理论，揭示了缠绕结构在攀爬过程中的界面粘附机理，为仿生缠绕电极提供了设计基础，并制备了一种基于攀爬仿生的三维缠绕电极，解决了神经电极与外周神经束间界面失配的问题；
- 2) 建立了软衬底表面微结构调控硬薄膜失稳构型的力学模型，设计了基于屈曲构型的柔性神经电极，解决了软衬底对神经界面的附加约束问题；
- 3) 建立了屈曲构型神经电极与神经界面之间的接触力模型，实现了神经界面接触力的可控化设计。



20201074090001017409

推荐意见: (不超过300字)

柔性神经电极在脑机接口中起着重要的桥梁作用，是当前的学术前沿研究之一。本博士学位论文围绕着电极神经界面的几何和力学失配问题，通过力学理论并与信息、材料、化学等学科深度交叉，提出了基于攀爬仿生的三维缠绕电极和基于向上屈曲构型的三维柔性神经电极，开展了相关的力学设计与界面调控工作，为神经调控技术的理论研究、器件创新以及临床应用提供了崭新的思路，选题具有重要的理论意义与实际应用价值。

该博士学位论文受到了同行专家的一致好评，论文涉及面广，知识点多，分析深入，逻辑严谨，结果可靠，成果丰富，创新性强，论文工作表明作者已掌握坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识，已具有独立从事科学研究的能力。

(推荐单位填写此栏)

声明：本单位承诺，所提供的推荐材料真实有效，愿意承担相应责任。如产生争议，保证积极调查处理。

学位评定委员会主席： \_\_\_\_\_

单位公章：

推荐单位负责人签字：

年 月 日

(中国力学学会理事推荐填写此栏)

声明：本人承诺，所提供的推荐材料真实有效，愿意承担相应责任。如产生争议，保证积极调查处理。

推荐人1 (签名)：申胜平

电话：13772015652

电子邮箱：ssh@xjtu.edu.cn

推荐人2 (签名)：郭旭

电话：13940854729

电子邮箱：guoxu@dlut.edu.cn

推荐人3 (签名)：曲绍兴

电话：13777576453

电子邮箱：squ@zju.edu.cn

推荐人4 (签名)：宋吉舟

电话：18757118983

电子邮箱：jzsong@zju.edu.cn

推荐人5 (签名)：张兴义

电话：18919923064

电子邮箱：zhangxingyi@lzu.edu.cn



## 博士学位论文综合介绍材料

### 一、选题意义:

#### 1. 论文选题的理论意义及实用价值

神经系统,包括中枢神经系统与外周神经系统,直接或间接控制和支配着人类机体的一切生理功能活动,从无意识的心脏搏动、胃部消化,到主动的肌肉收缩以及思考、学习、记忆等高级行为。从细胞层面来看,机体功能正常的神经系统是电信号与化学信号所构成的一个固有平衡系统。此平衡一旦被打破,如先天或后天性疾病因素造成的神经束损伤、神经系统的紊乱,往往会引起认知、感觉或运动损伤等方面的药物难治性疾病,如帕金森、癫痫、老年痴呆、抑郁、瘫痪等。以全球最常见的神经系统疾病之一,癫痫病为例,据世界卫生组织(World Health Organization, 简称 WHO) 统计表明,世界范围内大约有 5000 万癫痫患者,而其中有 20%-30% 的患者所患为药物难治性癫痫。

治疗上述药物难治性疾病的一个重要手段便是借助神经电调控技术恢复和重建神经系统的平衡状态。目前,经美国食品和药物管理局(The Food and Drug Administration, 简称 FDA) 批准的神经电调控技术主要有,脑深部刺激治疗帕金森,脊神经电刺激治疗慢性疼痛,迷走神经电刺激治疗癫痫,骶神经电刺激治疗尿失禁等。神经电调控技术,包括电刺激与电信号采集,为研究人体神经系统提供了一个接口,可用于信号的写入与读取,因而也被称为神经接口。该神经接口的一侧为生物信息系统,另一侧为电子信息系统(刺激发生器或信号采集器)。神经电极作为电子信息系统的末端,直接与神经软组织接触并形成神经界面,将刺激发生器的电学信号输入至神经组织,或将神经电信号从神经组织中抽离至外界的信号采集器中,在生物信息系统与电子信息系统间信息交换起着重要的桥梁作用。神经电极及其与神经组织形成的神经界面的质量将直接影响到神经调控的质量,即神经电刺激的效率及神经电信号采集的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, 简称 SNR)。

然而,神经电极与神经组织接触界面却存在诸多不匹配。在几何结构上,神经组织整体上多为三维结构,如球状的大脑,三维圆柱形的脊髓和外周神经束;从局部上来看,神经组织表面也多为复杂的曲面,如大脑皮层表面起伏不平的脑沟及脑回;而现有的神经电极在几何上多为二维平面状。在力学性质上,神经束软组织弹性模量仅 kPa 量级,而常用的金属或硅基神经电极的弹性模量高达数百 GPa,神经电极所用衬底或绝缘材料也在 MPa 量级。电极神经界面的失配问题不仅会降低神经调控的质量,还会对神经组织造成不同程度的损伤,严重时还会引起生命危险。

围绕着现有电极神经界面的几何和力学失配的这一关键科学问题,本论文通过力学理论并与信息、材料、化学等学科深度交叉,提出了基于攀爬仿生的三维缠绕电极和基于向上屈曲构型的三维柔性神经电极,开展了相关的力学设计与界面调控工作,为神经调控技术的理论研究、器件创新以及临床应用提供了崭新的思路,因而选题具有重要的理论意义与实际应用价值。



## 2. 对本学科及相关领域的综述与总结

本博士论文深入探讨了神经电生理信号的产生机制和电极神经界面的电化学反应机理，并以此为基础，从材料到结构，从大脑皮层电极到外周神经电极，从侵入式神经电极到非侵入式神经电极，从传统的二维与三维电极到现有的柔性薄膜电极等多个角度，深入调研和综述总结了现有神经电极的发展现状，指出了材料和力学结构设计是推动其不断向前发展的双驾马车，并以此提出了在未来的研究中，提高神经调控质量应特别关注电极神经界面的几何结构与力学性质的匹配性，具体如下：

(1) 从神经组织的整体几何结构上来看，神经组织整体上多为三维结构。以外周神经束为例，其整体上可视为圆柱形结构。无论是现有的三维神经电极(如卡夫电极)或二维电极(如PI薄膜电极)都无法兼顾提高界面贴合与降低对神经束约束损伤两方面。因此，亟需发展新型的三维柔性神经电极。

(2) 从电极与神经的局部接触界面来看，良好的共形贴合往往需要神经电极具有超薄的特性(极低的弯曲刚度)，但超薄的柔性神经电极不仅在制备中存在诸多困难，在实际临床应用中操作起来也极其不方便，且其长期稳定性也有待进一步考察。因此，借助近年来的三维电子的设计思想，发展新型结构的三维柔性神经电极与界面可为解决电极神经界面的局部贴合问题提供崭新的思路。

(3) 从电极神经界面的力学性质失配角度来看，现有的神经电极与神经软组织的弹性模量间往往存在着两个数量级以上的失配。此外，神经组织始终处于运动与变形中，如大脑处于微运动中，而脊神经，特别是外周神经束会随着人体的运动而处于拉伸、弯曲、膨胀等变形中，现有的柔性神经电极仍无法适用神经动态变形的特点。因此，理想的神经电极应具有足够低的刚度，包括与拉伸变形相关的拉伸刚度，与弯曲变形相关的弯曲刚度，以及与神经或界面相互作用等其他变形模态相关的等效刚度，以适应神经动态变形的特性。

(4) 此外，除了上述的力学与结构上考量，引入新型的智能材料，如形状记忆聚合物、水凝胶等，并发展与新型材料和传统微电子加工工艺兼容的制备工艺，对解决电极神经界面的几何与力学失配同样至关重要。

## 二、成果创新性：

### 1. 论文在理论或方法上的创新性

围绕着三维柔性神经电极与界面的力学设计与调控，本文结合理论分析、实验研究、数值模拟、在体动物实验，为解决电极神经界面的几何与力学失配问题提供了系统的解决方案，理论和方法的创新如下：

(1) 针对亟需创新新型的三维柔性电极结构问题，本文首先从界面力学角度探讨缠绕植物的攀爬行为和界面粘附机理，为设计和制备基于攀爬仿生的三维缠绕电极提供理论基础。利用固体力学中有限变形理论，对缠绕植物的变形进行了分解，给出了缠绕植物的变形度量；通过引用不可压本构模型，给出缠绕植物的变形能，并根据能量驻值原理确定最优缠绕角，



进而给出缠绕物与支撑物界面间的相互作用。并以此探讨缠绕植物攀爬的内在机理，给出缠绕结构稳定相图。

(2) 针对适配外周神经的三维柔性神经电极的制备问题，本文基于对自然界缠绕植物的攀爬与粘附机理的深入研究，提出了基于攀爬仿生的三维缠绕电极。针对实验制备的两种不同性质的形状记忆聚合物材料，分别提出了基于 PI 掩膜法和基于转印方法的缠绕电极制备方法。通过力学原理，建立了可恢复性能优化理论，并对电极结构进行了网络蛇形化的优化，以降低拉伸和弯曲刚度。借助有限元模拟，详细对比了缠绕电极和传统电极对神经束在拉伸、弯曲、和膨胀变形下的约束作用。开展三组动物实验，包括迷走神经电刺激调控心率，坐骨神经电信号采集，以及坐骨神经电刺激与脑电信号采集研究脑回路控制，验证了缠绕电极在外周神经调控领域的广阔应用前景。

(3) 针对电极与神经的局部接触问题，本文进一步提出了基于向上屈曲构型的三维柔性神经电极。为诱导微结构表面的薄膜电极发生特定的屈曲构型，借助实验和理论系统讨论了软衬底表面微结构对其上硬薄膜失稳构型的影响。针对实验中观测到的三种不同的失稳构型，即经典的一维褶皱失稳、向上和向下失稳；进一步的，基于能量竞争原理建立了不同失稳构型间相互竞争的控制方程，绘制了相应的失稳相图，用以指导基于屈曲构型的三维柔性神经电极的设计与制备。

(4) 针对所提出的三维柔性神经电极与神经间的局部相互作用问题，本文建立了屈曲电极与神经组织间相互作用的力学模型。以欧拉屈曲条带为研究对象，系统研究了其在受到面外压缩作用下的构型演化与转变、不同分叉路径的选择与竞争，以及相应的载荷位移响应。基于有限变形理论以及几何分解方法建立了求解条带大挠度后屈曲变形的基本方程，为基于屈曲构型的三维柔性神经电极的设计提供了理论基础，对于今后求解更加复杂形式的初始屈曲条带在受面外压缩载荷作用下的失稳问题也具有一定的指导和借鉴意义。

## 2. 创造性成果及效益

论文作者已发表 SCI 论文 13 篇，第一作者论文 4 篇，共同第一作者论文 1 篇，包括国际顶级期刊 Science 子刊《Science Advances》(1 篇)，固体力学领域顶级期刊《Journal of the Mechanics and Physics of Solids》(1 篇)，固体力学重要期刊《International Journal of Solids and Structures》(1 篇)，固体力学重要期刊《Extreme Mechanics Letters》(1 篇)，微电子领域顶级会议期刊 EI 会议论文 1 篇，并受邀参加在美国旧金山举办的 2018 IEEE International Electron Devices Meeting (2018)，材料领域顶级期刊《Advanced Materials》(1 篇，封面文章，第二作者)，《Advanced Function Materials》(1 篇，第三作者)等。申请发明专利 10 余项，其中已授权专利 6 项。

论文的研究工作受到国内外同行学者广泛关注。关于三维缠绕电极与神经调控的研究发表于国际顶级期刊 Science 子刊《Science Advances》。该研究通过力学理论并与信息、材料、化学等学科深度交叉，发展了一种能够在体温驱动下自动攀爬至外周神经束上的三维螺





旋形缠绕电极，依靠自然粘附形成稳定且柔性的电极-神经束界面，为外周神经调控技术在临床上的应用提供了崭新的思路。该文章在同行评议时获得了审稿人的高度评价，“This paper presents a very novel design for a nerve electrode. The electrode presents a novel interpretation of cuff electrode... The material property in 100-300 kPa is very appropriate, and also a big plus. Particularly novel is the self-climbing property of the shape memory material-based design through clever fabrication. The design is quite clever... The basic idea, and the materials used, particularly the twinning and the self-attachment is demonstrated uniquely.”。相关的研究受到了“清华大学新闻网”、“国家自然科学基金委”、“IEEE SPECTRUM 杂志”等多家媒体网站的在线报道。在 2019 年 4 月发表以来，已被引用 30 余次（来源:Web of Science），包括国际顶级期刊《Cell》、《Nature Materials》、《Nature Communications》、《Advanced materials》、《National Science Reviews》等。柔性电子领域开创者之一、美国三院院士 John A Rogers 在其发表在《Cell》上的综述中高度评价到，“Substrates formed from stimuli-responsive materials provide means for shaping devices to match geometries of complex tissues without external application of force. The system of Figure 3F exploits a climbing-inspired twinning stimulation system for peripheral nerves... These mechanisms minimize tissue injury during implantation and subsequent use.”（Cell, 2020）；在其发表在《Nature Materials》上的综述中再次评价到“Tissue-compliant sheets formed from stimuli-responsivematerials are also of interest. ... shows as an example a climbing-inspired twinning system for neural recording and stimulation... Current efforts focus on these types of technologies for nerve stimulation, with the potential for use in chronic therapeutic strategies for conditions such as heart failure and epilepsy”（Nature Materials, 2020）。

相关的研究还曾在 2019 年 6 月 12 日的中央电视台综合频道推出的科普类电视节目《走近科学》中进行了有关报道（探秘柔性电子技术），反响强烈。此外，申请人的导师还曾多次被邀请在国内外多所大学、医院以及重要学术会议上作了与作者研究相关的学术报告，包括韩国科学技术院（Korea Advanced Institute of Science and Technology）、清华大学协和医院、2018 年全国固体力学学术会议（哈尔滨，大会特邀报告）、2019 年中国力学大会（杭州，大会特邀报告）、2019 年 International Conference on Biomedical Engineering（新加坡，分论坛特邀报告）等，受到了国内外同行的一致好评。

### 三、综合能力：

#### 1. 论文体现的理论基础与专门知识

本论文作者在五年的博士求学生涯中，学习科研，勤奋刻苦，善于钻研，多门力学专业



学科取得了优异的成绩，如固体力学（A）、高等固体力学（A<sup>-</sup>），实验固体力学（A<sup>-</sup>）等，打下了坚实的力学理论基础；同时注重学科交叉，选修了跨学科专业课并取得优异成绩，如 MEMS 材料微细制备技术（A<sup>-</sup>），微纳尺度力学行为表征与实验（A）、新型有机电子器件（A）等，拓宽了知识的广度。博士期间的研究，面向国家重大需求，从理论分析、实验研究、数值模拟、到在体动物实验，为解决电极神经界面的几何与力学失配问题提供了系统的解决方案，做到了基础理论与应用并重。

本博士论文受到了同行评议专家和答辩委员会老师的一致好评，答辩主席魏悦广院士在点评本博士论文时指出：“该博士论文涉及面广，知识点多，分析深入，逻辑严谨，结果可靠，成果丰富，创新性强，论文工作表明作者已掌握坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识，已具有独立从事科学研究的能力”。

## 2. 论文体现作者独立从事科学研究的能力

本论文作者在读博期间，受到了导师黄永刚老师和冯雪老师的严格指导，着重培养了作者善于思考、勤于钻研的研究习惯，具有较好的独立从事科学研究的能力。在博士研究进入高年级阶段，作者还曾协助导师申请多个项目，并指导低年级的学生开展研究。作者着重培养团队合作能力，与同实验组的成员，以及浙江大学谢涛教授团队等有多项合作，并有多篇合作的学术文章发表在国际顶级期刊上，包括 Science Advances（2019），Advanced Functional Materials（2018），Macromolecular rapid communications（2018）等。

此外，在攻读博士期间，论文作者还积极参与各项学术交流与讨论，着重培养自身的沟通交流能力和口头表达能力。多次参加了国内国际会议，并做口头报告以及海报展示，包括：2018 IEEE International Electron Devices Meeting（2018，微电子领域顶级会议，美国旧金山），2018 年全国固体力学学术会议（哈尔滨，口头报告），2019 年中国力学大会（杭州，口头报告），The 2nd International Conference on Flexible Electronics（2019，杭州，最佳海报张贴奖），The 5th International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environmen（2019，韩国济州岛，海报张贴）。曾连续两年荣获清华大学航天航空学院研究生学术论坛一等奖（2018, 2019，北京，口头报告），并在 2020 年清华大学航天航空学院研究生学术论坛做特邀报告，清华大学第 541 期“柔性电子技术”交叉领域博士生论坛（2018，北京，最佳口头报告奖）等。

论文作者在读博期间曾受到了多项荣誉，包括清华大学优秀博士论文（2020），清华大学优秀毕业生（2020），北京市优秀毕业生（2020），清华大学优秀研究生共产党员（2020），清华大学蒋南翔奖学金（2019，每年仅 15 人），清华大学研究生国家奖学金（2019），清华之友-III 特等奖学金（2019），研究生杜庆华奖学金（2019），清华大学综合优秀一等奖学金（2018）等。

论文作者在科研工作中取得的优秀成绩和丰富成果，充分说明作者具有独立从事科学研究的能力。



## 中国力学优秀博士学位论文奖推荐表附件材料

### 1、博士学位论文（共3个附件）

（1）张迎超博士论文-Part1.pdf

（2）张迎超博士论文-Part2.pdf

（3）张迎超博士论文-Part3.pdf

### 2、学位证书（共1个附件）

（1）学位证书.jpg

### 3、CSTAM会员证（共0个附件）

### 4、获得成果栏中学术论文的刊物封面、目录及论文首页（共1个附件）

（1）学术成果首页.pdf

### 5、专著封面和版权页（共0个附件）

### 6、获奖证书及专利证书（共2个附件）

（1）获奖证书.pdf

（2）专利证书.pdf

### 7、其他有助于评选的材料（共1个附件）

（1）其他证明材料.pdf

