关于硬磁软材料，近年来的许多研究成果已经实现了将高矫顽力的铁磁性材料，例如钕铁硼（NdFeB），嵌入软材料中，从而实现可编程或复杂形状的变化[1-3]。这些硬磁材料具有高剩磁特性[4]使得它们即使在无磁场的情况下也能保持较高的剩余磁感应强度。同时由于硬磁材料具有较高的矫顽力，另外，这些硬磁材料的高矫顽力也保证了在低于其矫顽力强度的磁场下，它们仍可以保持相对较高的剩余磁感应强度[4]。基于该材料近年提出了一种制造技术，使3D打印的磁性软材料实现复杂的可编程图案。[2]

为精确得到机械臂末端磁铁位置，本项目需要计算得到导丝在磁场作用下的变形后形状并进行逆向设计，需计算得到导丝的力学性能、永磁体磁场分布等信息。

对于磁性软材料，一些研究人员曾提出将其视为均匀化的连续体介质，其本构规律由亥姆霍兹自由能给出。[5]同时研究人员也通过向磁性软材料施加外部磁场对磁性软材料进行单轴加载、剪切以验证现有模型。[6, 7]

而目前关于磁性软材料的模型主要集中在磁流变弹性体或铁凝胶上，这并不适用于近年新开发的，基于程序化磁分布的硬磁软材料。对于这个问题，一些研究人员提出了一个系统的理论框架、本构关系以及计算方法。[1-3]麻省理工学院的赵选贺团队于2019年提出了一套更简便且合适的理论框架分析硬磁软材料，他们采用非线性场理论来描述与磁场耦合的有限形变，并提出了一种新的本构分类：理想硬磁软材料。该种材料满足两个条件：1、具有剩余磁感应强度2、感应磁通密度与外部施加的激励磁场的磁通密度成正比。赵选贺团队在有限元框架中实现了该理论与本构规律并在材料各种变形模式上发现了模拟预测与实验结果的显著一致性，从而实现了基于硬磁软材料实验的可实现复杂形状变形结构设计。[4]

图示

描述已自动生成

图1、硬磁材料与软磁材料的磁滞回线和B-H曲线[4]

对于永磁体磁场分布以及导丝弯曲的动力学模型，由于计算简单等优势，徐天添团队选用偶极子模型[8]，并将永磁体近似看作点源，即可得到磁场B的分布，配合导丝头部磁体的磁矩矢量计算得到磁驱动的力与力矩模型。对于导丝的形状预测，该团队首先采用了基于常曲率假设下的欧拉-伯努利梁模型，计算得到导丝头部刚度后，基于迭代求解即可得到常曲率的值。但常曲率并不符合实际情况，因而基于常曲率得到的预测效果并不非常显著，进一步得，徐天添团队为了更为精确得预测导丝头部的形状，抛开常曲率假设并引入Cosserat弹性杆理论将其与偶极子磁场模型相结合，以沿杆的弧长作为坐标，将各位置杆的位资设为未知变量。搭建在静力平衡下的非线性常微分方程组，并根据实际情况给出了对应的边界条件，在数值求解后得到了更为准确的预测结果。之后，徐天添团队又给出了导丝运动速度与电机转速之间的运动学关系，基于次进行轨迹规划等一系列后续操作[9]

图表, 折线图

描述已自动生成 图示

描述已自动生成

图2、偏转角与磁场强度的关系[9]  图3、COMSOL仿真下磁导丝偏转角[9]

随后又有文献提出了基于最小势能法的计算方法，此方法考虑到了磁势能、重力势能以及材料应变能，对每个微元的利用材料力学性能、磁场分布以及重力方向得到其势能并积分。对于总势能利用最小势能法得到导丝扭转角度以及中心线轴向应变关于导丝弧长坐标的常微分方程进行求解，完成对于导丝形状的预测。更进一步得，这一方法提出了一种逆向设计的思路。先给出导丝的期望位资，将外部磁场大小以及导丝充磁方向作为变量，优化函数设置为导丝的预测位资与期望位资之间的偏差，以最小化优化函数为目标，从而可以计算得到最优的外部磁场大小以及导丝充磁方向。[10]

图片包含 图示

描述已自动生成

图4、基于逆向设计的磁导丝机器人[10]

对于医用软件开发，我们希望可以尽可能得减少医生的学习成本，提升人机交互体验，使操作更为便利。但最为重要的是其安全保证。医疗器械与医疗机器人的设计可能会导致在使用过程中出现一系列的危险，例如医疗机械臂具有较大的扭矩，在工业使用中被要求安置在安全区域内并且组织人的介入，而医疗机器人则是直接于人类接触[11]，对此有一系列必要的用于保证安全性的准则与技术[12]。

对于医疗器械的人机交互开发，实际即使是现有的商用产品也依旧存在许多的问题[13]，这也是许多医疗软件开发着所关注的[14]。早年便有一系列对于人机交互其重要性以及提升人机交互体验的研究。并对其提出了一系列的标准。[15]而其中大多的标准都不是精确的规范而是基于需要应用的基础上产生的大致的标准有广泛的质量目标以及对使用者期望功能的预测等。并且也有大量文献研究如何开发与优化人机交互界面，如从设计等角度。

## 参考文献

[1] LUM G Z, YE Z, DONG X, et al. Shape-programmable magnetic soft matter [J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2016, 113(41): E6007-E15.

[2] KIM Y, YUK H, ZHAO R, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials [J]. Nature, 2018, 558(7709): 274-9.

[3] HU W, LUM G Z, MASTRANGELI M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion [J]. Nature, 2018, 554(7690): 81-5.

[4] ZHAO R, KIM Y, CHESTER S A, et al. Mechanics of hard-magnetic soft materials [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2019, 124: 244-63.

[5] DORFMANN A, OGDEN R W. Magnetoelastic modelling of elastomers [J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2003, 22(4): 497-507.

[6] DANAS K, KANKANALA S V, TRIANTAFYLLIDIS N. Experiments and modeling of iron-particle-filled magnetorheological elastomers [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2012, 60(1): 120-38.

[7] KANKANALA S. On finitely strained magnetorheological elastomers [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2004, 52(12): 2869-908.

[8] YANG Z, ZHANG L. Magnetic Actuation Systems for Miniature Robots: A Review [J]. Advanced Intelligent Systems, 2020, 2(9).

[9] FU S, CHEN B, LI D, et al. A Magnetically Controlled Guidewire Robot System with Steering and Propulsion Capabilities for Vascular Interventional Surgery [J]. Advanced Intelligent Systems, 2023, 5(11).

[10] WANG J, WANG D, DONG L, et al. Analytical Modeling and Inverse Design of Centimeter-Scale Hard-Magnetic Soft Robots [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023: 1-12.

[11] BAOWEI FEI, WAN SING NG, SUNITA CHAUHAN, et al. The safety issues of medical robotics [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 73(2): 183-92.

[12] ARCAINI P, BONFANTI S, GARGANTINI A, et al. Integrating formal methods into medical software development: The ASM approach [J]. Science of Computer Programming, 2018, 158: 148-67.

[13] ACHARYA C, THIMBLEBY H, OLADIMEJI P. Human Computer Interaction and medical devices, F, 2010 [C].

[14] BOND R R, FINLAY D D, NUGENT C D, et al. A usability evaluation of medical software at an expert conference setting [J]. Comput Methods Programs Biomed, 2014, 113(1): 383-95.

[15] MYERS B, HOLLAN J, CRUZ I, et al. Strategic directions in human-computer interaction [J]. ACM Computing Surveys, 1996, 28(4): 794-809.