**硬磁导丝大变形数学建模**

导丝头部用于在血管的分叉口通过转向完成导向任务。转向程度过大或过小，均可能导致任务失败。因而为了更好地完成导向任务，需要在一定的磁场条件下，预测硬

磁软体导丝的变形情况。进一步可以完成逆向设计，根据所需要的转向需求，提供对应的磁场强度。

本项目导丝头部有两种设计方案，其一是使用嵌套着同向排列小块圆柱铷磁铁的硅胶管，其二是使用硬磁软体材料即将NdFeB微米颗粒均匀混合至未固化的硅橡胶弹性体。

对于硬磁软体导丝的形状预测，整体是基于连续介质假设。首先需要确定磁化状态（材料各处的剩余磁通密度矢量）、外部磁场、材料弹性模量、材料密度以及导丝长度与转动惯量。

磁化状态以及材料密度：剩余磁通量的方向由充磁时所使用的模具决定。由于硬磁软体导丝的充磁方式为整体充磁，并且各部分材料一致，因而材料剩余磁通密度量的大小处处相等且由NdFeB颗粒剩余磁感应强度的大小以及其体积比决定，同时材料的杨氏模量也由颗粒体积比决定。[9]

外部磁场：基于永磁体的位置决定。

可以基于最小势能法的理论框架完成控制方程的搭建，基于一定的简化与边界条件的设定即可完成导丝形状的预测。其中势能主要由三部分组成：磁势能、重力势能以及应变能。

材料单位体积所具有的磁势能:

对于3维空间

对于简化为二维的导丝，F也可以简化为2\*2的变形梯度矩阵,之后考虑的问题都限制导丝的运动在二维平面内，并建立坐标系，y坐标正方向与重力方向相反，x坐标垂直于y坐标。导丝在处的位置为坐标原点。

对单位体积磁势能进行积分，即可得到导丝的磁势能。

对于应变能，由于导丝在变形时，轴向变形较小而以弯曲变形为主导，因此可以在计算应变能时利用小应变假设：

对于重力势能，令导丝在方向上的坐标为v

利用最小势能法，有

化简后可以得到的常微分方程，根据实际情况设立边界条件进行求解。从而计算得到导丝的变形形状。

而对于排列圆柱铷磁铁的形状预测，与硬磁软体导丝相似，其中应变能由硅胶管提供而磁势能由磁块提供。

基于以上推导，我们可以再提出一个逆向设计的思路。

导丝变形后形状在边界条件不变的情况下，是由导丝的剩余磁通密度的大小与方向以及外部磁通密度的大小与方向决定的，而我们可以将考虑的变量简化为的方向以及的大小。

我们在导丝上等间距取n个点，给出导丝的目标形状。将优化函数设置为n个点预测位置与目标位置之间的距离和，优化目标为,从而便可以得到逆向设计的结果即导丝充磁方向以及外部磁通密度的大小。

**基于机械臂控制的硬磁导丝机器人的软件平台**

本项目希望可以基本完成全自动化，但是依旧提供了手动操作的模块。为便于医生进行操作，需要开发一款PC端软件，目前拟基于Qt平台开发。

软件功能主要为控制模块。为减少医生学习成本以及使用便利性与集成度，该软件基于手柄完成对于机械臂以及送丝机构的控制，并且可以自行设定末端执行器的转速，从而提供不同的磁场。这部分主要需要完成的是不同平台之间的通信问题以及机械臂控制逻辑的搭建。

上述为软件的基本功能，而在完成这些基本功能之后，进一步得，可以在软件中添加显示模块，进一步提升操作便利性。显示模块的呈现内容可以由相机拍摄画面、导丝末端姿态及其期望姿态等信息。