

磁镊系统搭建及其磁场分析

叶佳佳

(苏州大学物理科学与技术学院 江苏 苏州 215006)

(收稿日期:2020-06-19)

摘要:微操作生物或物理样品实验中使用单面磁镊来吸引样品,而实际应用中往往需要对样品进行双头牵引.对传统的磁镊平台进行改进,搭建了创新的双面磁镊系统,易于有相关科研需求的学生进行实验操作并根据不同实验需求改进系统.并采用 ANSYS 对磁场进行有限元模拟,使学生更直观地理解磁镊的工作原理.

关键词:双面磁镊 有限元 模拟

磁镊通过在连接有生物物理样品的磁性微粒环境中施加阶梯磁场来实现对磁珠的拉伸或旋转等控制^[1].磁镊的原理和操作都很简便,生物分子对磁场不敏感,捕获仅发生于导磁微粒,在生物物理实验中有着重要的使用地位.因此选定磁镊为拉伸生物物理样品的机械教学工具^[2].磁场的产生方式有两种,永磁体磁场和电磁场.传统的永磁体磁镊产生的磁场强度过大,范围过广,不利于精细操作.与永磁铁相比,电磁铁虽然会对信号采集产生一定的影响,但由于其磁场大小位置可控,加工成本低等优点.考虑到实验成本和实验需求,显然采用电磁铁代替永磁体是经济可行的.对采集信号产生的影响则可通过电磁铁接地等行为进一步消除.同时,绕制线圈的电磁铁也方便学生动手制作,而不必借助于机械加工的办法^[3].

1 双面磁镊系统平台的搭建

磁镊系统包括磁路系统、显微成像照明系统、数据采集分析系统、样品台等部分,如图 1 所示.为了避免外部信号干扰,往往辅之以屏蔽笼、防震台、机械微调装置等结构.其中,核心结构为磁路系统,用以产生稳定磁场控制磁珠;显微成像系统包括显微镜、光源和采集图像信息的 CCD 照相机;数据采集系统则是

拍摄记录 CCD 的计算机软件;微操纵器实现对磁路系统空间位置的控制,实现多维操作.

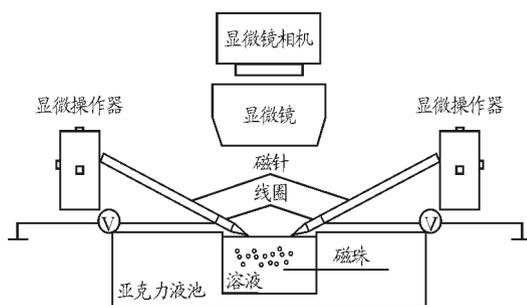


图 1 磁镊系统示意图

2 磁路计算

能产生稳定磁场的磁路系统是整个磁镊核心系统的核心部分.磁路系统由磁芯、通电线圈制作而成.

基于控制磁场强度的实验想法,综合考量材料性能和实验需求,在通电线圈产生的弱磁场中,磁针材料选用坡莫合金 1j85 具有极高的初始磁导率,极大的磁导率和高饱和磁化强度,易磁化;且在去掉磁场后磁感应强度 B 会很快消失,其矫顽力 H_c 为 0.8 A/m ,磁导率 μ 约为 $100\ 000$.考虑磁芯对磁场强度的影响因素,选择直径为 2 mm 的磁针,长度为 4 cm ,在磁针一端加工出长度为 7 mm 的锥度.

通电螺线管产生的磁场一般为弱磁场,磁针针尖的磁场不足以在溶液中克服本身重力和溶液的粘滞阻力将磁珠吸引到针尖上.增加磁场强度的方式还能通过增加电流来实现,但是磁镊要直接接触溶液,如果单纯考虑增加电流会产生热量

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

式中 R 为导线的电阻, t 为通电时间.参考传统磁镊实验,通电电流为 1 A ,电阻为 $20 \ \Omega$,通电时间为 60 s ,计算得热量 Q 为 $1\ 200 \text{ J}$.这部分热量不会全部传递到磁针上,会有很大一部分扩散到空气中,粗略估计传递到磁针上的热量 $Q_1 = 200 \text{ J}$,考虑热学公式

$$\Delta t = \frac{Q_1}{cm} \quad (2)$$

式中 c 为坡莫合金 1j85 的比热容, $c = 450 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; m 为磁针的质量, $m = 0.01 \text{ kg}$;算得磁针升温 $\Delta t = 44 \text{ }^\circ\text{C}$.

由上述粗略计算可知,如果单纯靠增加电流来增强电场,会影响溶液中的生物物理样品扩散,并且过强电流对电流信号的采集也会产生干扰.由此考虑增加线圈匝数来增强电磁场强度,磁针的体积有限,且实验需要高梯度磁场尽可能集中在磁针针尖处,选用直径为 0.04 mm 的超细漆包单晶铜飞线使得能够在磁针靠近针尖的范围绕制尽可能多的线圈.

为了方便后续磁场的模拟计算,选择在锥度上方 10 mm 的范围内多层绕制线圈.漆包线总长度为 3 m ,层数根据绕制过程的误差约为 $4 \sim 6$ 层,线圈匝数约为 500 ,使用万用表测得总电阻为 $50 \ \Omega$.

制作好磁路系统后,依托现有探针台系统,加载磁路系统和电源,实物如图 2 所示.

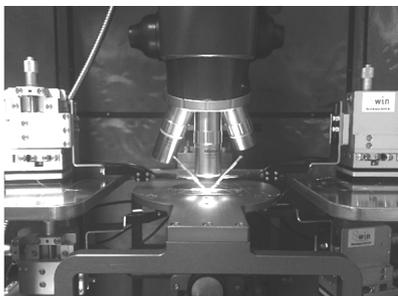


图2 磁镊系统实物图

3 双面磁镊系统磁场计算与模拟

由于模型的不准确性导致计算误差过大,因此选用 ANSYS 的有限元分析磁场. ANSYS 的电磁场分析^[4]和研究实际上是基于给定边界条件下的 Maxwell 方程组问题求解. Maxwell 由法拉第电磁感应定律、安培定律、高斯定律和磁场高斯 4 个定律组成,描述了磁场、电磁、电荷密度、电流密度之间的关系.

对于上述实验中的双面磁镊系统,模拟得到通电螺线管在溶液空间所产生的磁场强弱及磁场分布状况, ANSYS 选择 Magnetic - Nodal 模块,选用二维模型;磁镊系统高度对称,选取双面磁针的一半进行模拟.因此,本文的模拟属于二维静态电磁场分析.磁矢量位法(MVP),基于节点求解,各个节点在 x, y, z 方向都有磁矢量位 A_x, A_y, A_z ,自由度更多.但是对于二维静态电磁分析,主自由度只有 A_z .

在 ANSYS 中选择好电磁模块并绘制二维模型,选择四边形单元 PLANE13 表示,定义溶液、磁针的材料属性,主要为其磁导率,并将材料属性赋予相应的模型区域.然后采用等级 1 的智能网格自由划分.基于实验主要关注针尖磁极及其附近的磁场效应,而针尖的直径只有 $10 \ \mu\text{m}$ 左右,所以对针尖部分进行局部区域网格细化以得到更为精确的解,这部分的单个网格边长仅为 $2.5 \ \mu\text{m}$.

划分好网格之后选择线圈区域,对线圈单元加载电流.施加的电流以源电流密度形式表达

$$J_{\text{dens}} = \frac{NI}{A} \quad (3)$$

式中 $N = 500$,表示线圈匝数; $I = 60 \text{ mA}$,表示电流; A 为线圈横截面积.选定整个模拟区域的外围节点,指定磁矢量位定义磁力线平行($A_z = 0$)、远场为零等条件.做好上述处理之后选择电磁静态分析进行求解.

磁感线分布图如图 3 所示,磁感线的密集程度反映了磁场的强弱,可以看出在磁针针尖部分磁感线相

较于其他位置明显密集,说明这部分的磁场强度也远大于溶液中的其他部分.

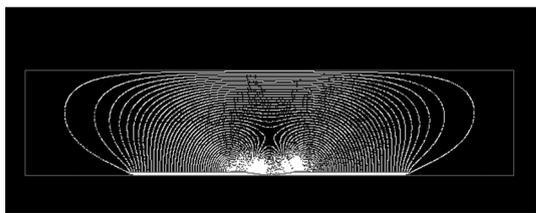
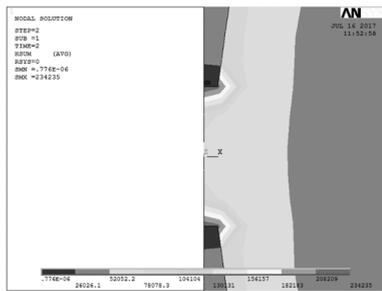
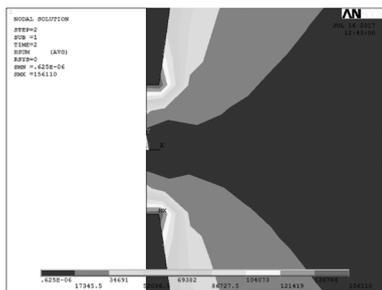


图 3 双面磁针磁感线分布图

接着对磁场强度 H 和磁化强度 B 进行模拟,考虑到 $B = \mu_0 H$ (这里将溶液中的磁导率暂定为空气中的磁导率 μ_0 ,二者相差不多,具体差距可根据后续模拟结果调整), $\mu_0 \ll 1$, 所以 H 的数值远远大于 B , 因此选择磁场强度为模拟分析对象可以从模拟云图中得到更为清晰直观的结果,给出磁场强度的模拟结果如图 4 所示.



(a)



(b)

图 4 磁场强度模拟

为了简化计算,将针尖圆弧简化成了直线,磁针锥度部分相当于一个梯形.分别模拟两磁针磁场方向不同的情况,图 4(a) 为 N-S,图 4(b) 为 N-N.相反电流方向产生的磁场方向不同,在尖端轴线上 N-S 情况磁场方向会叠加,而 N-N 方向磁场方向会抵消.但是从模拟结果来看,在两磁针尖端较小的范围内,磁场强度并没有很大的区别,说明一个磁针产生的磁场

并不会对另一个磁针产生过大的影响,而这个影响对于磁极本身的磁场可以忽略不计,而这恰恰是实验中控制磁珠的主要区域.除此之外也对单个磁针产生的磁场进行了模拟,在磁针尖端小范围内结果与双磁针模拟的结果并无明显差别,模拟结果证明在双磁针磁场的空间内,使用单个磁针控制此磁针吸引住的磁珠的运动,而不受另一磁针的影响.

模拟结果还可以得到磁感应强度 B 的具体数值,定量描述磁场.鉴于 ANSYS 网格模拟的精确性,只能得到每间隔 $2.5 \mu\text{m}$ 的数值,分别计算尖端相距为 $50 \mu\text{m}$, $60 \mu\text{m}$, $70 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m}$ 这 4 种间距的磁场分布,如图 5 所示,坐标 $x = 0$ 表示轴线的中央,两端分别为针尖位置,可以看出在靠近针尖的地方有相当强的磁场,而随着距离的增加,磁场强度急剧下降.

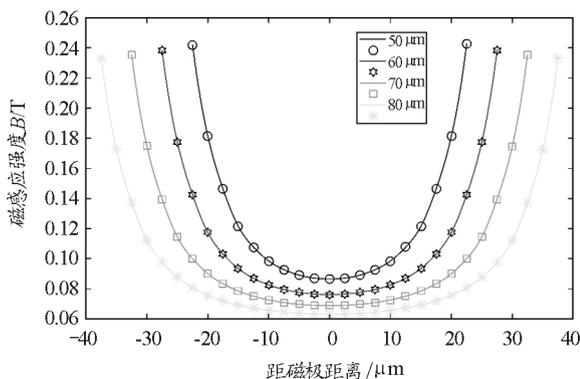


图 5 双面针尖轴线磁感应强度变化

磁场强度急剧下降.在不考虑水的粘滞系数和磁珠本身在重力场中的影响,磁珠直径为 $2.8 \mu\text{m}$,内部为氧化铁,外部为 PDMS,均为分布,因此可以把磁珠在磁场中的运动看为质点,只考虑质心的运动.磁珠在阶梯磁场中受力 $F = m \frac{dB}{dx}$, $m = M_{\text{max}} V = 1.42 \times 10^{-13} \text{ A} \cdot \text{m}^2$, 为磁珠的磁矩, $\frac{dB}{dx}$ 磁场梯度,即图 5 曲线的斜率,由此算得磁珠在溶液中的受力如图 6 所示.可以看出在靠近磁针的区域内磁珠受力相当大,且远远大于 DNA 拉伸所需要的力 50 pN ,这个区域的范围也比磁珠本身的直径要大;而在中间区域,磁针距离越大,磁场梯度越小,几乎趋近于零,这也从图 6 中

(下转第 118 页)

由图可知,教师可以从图中获得班级的作业平均分、最高分及最低分这些基础的数据统计,还能反馈出每道题的得分情况、每个学生的总分及耗时等详细信息,全面、清晰的数据帮助教师从各个方面对自己任教的班级有一个非常具体的了解,做到了如指掌、心中有数。

4.3 教学分层 针对性强

传统的课堂教学后,教师往往只是统一布置全班的课后作业,每个学生的作业千篇一律,无法体现不同学生的差异性。而在信息技术支持下,通过在“智学网”上答题,平台自动会对学习者长时间的学习表现进行记录,无需教师在课堂教学中及课后批改作业中花过多时间进行记录,使得教师能够对学生在最近一段时间的学习效率和学习成果有一定的了解。教学者借助网络教学平台上统计出来的每个学生的错题,更有针对性地进行布置作业和知识讲授,也可以更加关注到每个学生的差异性。同时经过一段时间的积累,平台还会根据这段时间内每个学

生对这块内容的掌握情况自动推送不同的个性化手册。个性化手册中包括学生最近几次作业的得分情况、薄弱知识点以及错题解答和相应的变式训练。通过以上方式,真正做到了个性化教学的目的。

以上是笔者在基于“智学网”支持下的“云课堂”模式下的精准教学中的一些做法和体会。通过“智学网”平台的支持,使我们能在教学中充分了解教情和学情,犹如给我们的教学装上了导航系统,使得教学更加精确、精细和精准。

参考文献

- 1 彭红超,祝智庭.面向智慧学习的精准教学活动生成性设计[J].电化教育研究,2016(8):53~62
- 2 聂胜欣,蔡裕方.基于大数据的精准教学应用初探[J].英语教师,2017(24):74~80
- 3 邱晓峰,林冰冰.智学网教学数据环境下高三物理复习教学策略——以“多物体相对运动问题研究”复习课为例[J].福建基础教育研究,2018(10):111~112

(上接第112页)

反映,这个区域磁珠的受力无限趋近于零。

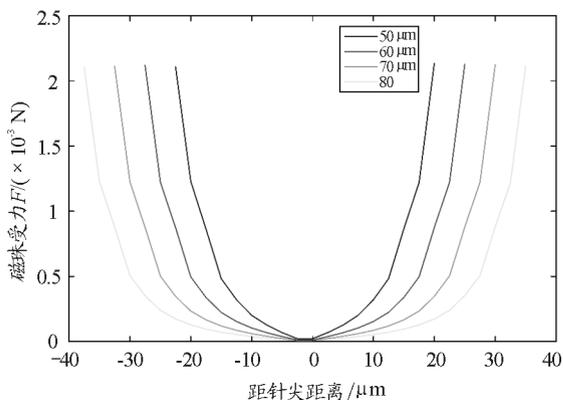


图6 磁珠在双磁极磁场中受力图

4 结束语

本文依托于探针台系统搭建了一套简易的双面磁镊系统,方便学生对于磁镊实验的有进一步了解。

磁路系统的制作也培养了学生的动手能力,并能根据实验条件的不同进行磁镊系统的调整。在磁镊实验教学中还引入了 ANSYS 软件对整个磁场进行模拟,将抽象问题具体化,使得学生能更好地理解磁镊系统的工作原理,提高磁镊实验的教学效果,为后续科研打好基础。

参考文献

- 1 林舒轩,王硕,石赞琥,等.单分子磁镊测量 Lambda DNA 的拉伸曲线[J].物理与工程,2019(5):105~110
- 2 冉诗勇.谐振势阱中的布朗运动——磁镊实验与模拟[J].物理学报,2012(17):66~72
- 3 彭华,吴世春.大学生物理实验能力培养模式的改革与实践[J].大学物理实验,2012(3):112~114
- 4 丁健.浅议 ANSYS 在电磁场分析中的应用[J].科技创业月刊,2010,23(4):330