

基于Unity 3D 自旋磁矩共振虚拟仿真实验设计与实现

李喜玲^{1,2,3} 王振坤² 柴国志^{1,3} 王心华² 王建波^{1,3}

1.兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室 甘肃兰州 730000

2.兰州大学物理学国家级实验教学示范中心 甘肃兰州 730000

3.兰州大学特殊功能材料与结构设计教育部重点实验室 甘肃兰州 730000

摘要: 自旋磁矩共振属于磁学专业实验范畴, 基于Unity 3D, 利用矢量网络分析仪, 设计了虚拟仿真实验, 用于研究软磁薄膜材料中的电子自旋磁矩随外部交变磁场的动态响应机理, 分别从实验原理、物理模型、实验步骤、数据分析等方面进行了论述。该虚拟仿真实验具有强大的数据运算及结果处理功能, 不仅能仿真正确的测试过程, 而且对很多错误的操作也给出了相应的结果输出。其有效缓解了实验室压力, 还可惠及由于缺少设备而无法开展实验的高校。

关键词: 自旋磁矩共振; 虚拟仿真; 物理实验教学

DOI:10.13492/j.cnki.cmee.2022.11.002

核磁共振实验主要关注的是微波对原子核磁矩的影响, 然而近年来随着自旋电子学和微电子集成电路技术的发展, 越来越多的工作瞄准高频软磁薄膜在微波和磁场的变化下对其自旋动力学过程的影响, 因而从理论上结合著名的 Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程, 对不同磁性系统深入理解GHz频段磁谱特性如何人工可控调制至关重要。

核磁共振实验主要基于矢量网络分析仪, 然而由于其成本较高, 设备和连接装置也极易损坏, 无法达到大规模教学开发及让学生真正操作的目的, 因而对该实验进行虚拟仿真教学。这样既节约成本、操作灵活、安全性高、打破空间和时间限制, 又有利于调动学生积极性, 加深其对抽象物理图形的理解。本文将分别从模型建立、测试原理分析、虚拟仿真设计与实现进行详细论述。

1 自旋磁矩共振模型

为了理解电子自旋磁矩随MHz-GHz微波场的动态响应, 首先需要了解磁矩进动过程。根据经典电磁学, 电子绕原子核旋转会形成一个磁矩, 该磁矩的大小与电子的轨道角动量密切相关, 如图1所示。对于转动物体

来说, 其角动量随时间的变化率等于其所受的力矩。考虑到一个磁性系统中有无数的磁矩, 并且所有的磁矩都是一致进动的, 那么这个系统中的磁矩进动可表示为

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H} \quad (1)$$

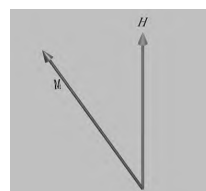


图1 磁矩绕磁场H进动示意图

式中磁矩进动方程描述的是一个理想的无阻尼进动过程。但是在实际情况中, 磁矩进动过程受到阻尼影响, 磁矩进动的幅度会逐渐变小并最终达到稳定, 其方向和有效场平行, 因此必然存在一个阻尼力矩, 其方向分别垂直于磁化强度和进动力矩。用 Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程表示, 即

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\vec{\mu} \times \vec{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \quad (2)$$

式中, α 为阻尼因子, 在这里是一个无量纲的系数。阻尼因子是一个有效的阻尼因子, 包含了本征的和非本征的因素。阻尼因子按物理机制可分为本征阻尼和非本征阻尼。本征阻尼主要来自磁子与晶格声子之间的

作者简介: 李喜玲, 理学硕士, 工程师; 王振坤, 理学博士, 工程师; 柴国志, 理学博士, 教授; 王心华, 理学博士, 高级工程师; 王建波, 理学博士, 教授。

基金项目: 兰州大学中央高校基本业务费资助项目、兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室开放课题资助项目“基于布里渊散射低温测试系统研究与搭建”(编号: LZUMMM2021002); 教育部高等教育司2018年第二批产学研合作协同育人项目“磁性微器件的制备及其高频性能表征平台建设”(编号: 201802019003)。

散射及与电子之间的散射。非本征阻尼一般有很多种,包括双磁子散射模型、层间耦合、自旋泵浦,等等。

在实际的实验测量中,需要提供一个微波能量来激励磁矩进动。当微波能量足够大时,便可以形成磁矩共振。将软磁材料对微波磁场的响应称为微波磁导率,因为它与频率相关,所以又称为磁谱,用公式表示为

$$\mu = 1 + \chi_0 \cdot \frac{1 + i\alpha \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right) \frac{1}{\sqrt{\chi_0 + 1}}}{1 - (1 + \alpha^2) \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 + i\alpha \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right) \sqrt{\chi_0 + 3 + \frac{1}{\chi_0 + 1}}} \quad (3)$$

式中, $\chi_0 = 4\pi M_s / H_k$, $\omega_r^2 = \gamma^2 4\pi M_s H_k$ 。

1.1 微波传输理论

凡是用来引导电磁波沿着一定方向传播的导体、介质或由它们共同组成的导波系统,均称为传输线。传输线不仅能传输电磁能量,还可作阻抗元件。当频率提高后,传输线将出现新的物理效应:导线中所流过的高频电流会由于趋肤效应使导线的有效面积缩小、高频电阻加大,称为分布电阻效应;通过高频电流的导线周围存在高频磁场,出现了分布电感效应;由于两线间有电压,存在高频电场,出现了分布电容效应;两线间的介质并非理想介质,因而存在漏电流,这相当于并联了一个电导,出现了分布电导效应。在低频时这些物理效应都可以忽略不计,当频率提高到微波波段时,这些分布参数效应就不能忽略了。据此分析,可得均匀传输线及其等效电路,如图2所示。

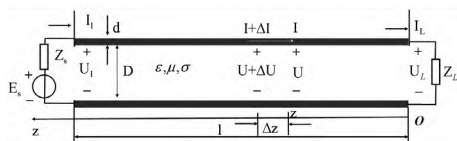


图2 均匀传输线示意图

设距离终端z处的复数电压和复数电流的振幅分别为U和I,则经过线元Δz段后复数电压和复数电流的振幅分别为U + ΔU和I + ΔI,线元Δz可视为无源二端口网络,均匀传输线等效电路图如图3所示。

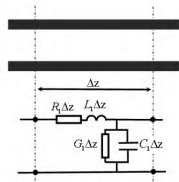


图3 均匀传输线等效电路图

当Δz→0时,根据基尔霍夫定律,有

$$dI = UYdz, dU = (I + dI)Zdz \approx IZdz \quad (4)$$

$$\text{其中, } Z = R + j\omega L, Y = G + j\omega C \quad (5)$$

另外,在终端z = 0处的电流和电压分别用 I_L 和 U_L 表示。

通过(4)式和(5)式可以得到

$$I = \frac{1}{2} \left(I_L + \frac{U_L}{Z_c} \right) e^{\gamma z} + \frac{1}{2} \left(I_L - \frac{U_L}{Z_c} \right) e^{-\gamma z} = I_i + I_r \quad (6)$$

$$U = \frac{1}{2} Z_c \left(I_L + \frac{U_L}{Z_c} \right) e^{\gamma z} - \frac{1}{2} Z_c \left(I_L - \frac{U_L}{Z_c} \right) e^{-\gamma z} = U_i + U_r \quad (7)$$

式中, $\gamma = \sqrt{ZY}$ 称为传播常数, $Z_c = \sqrt{Z/Y}$ 称为特性阻抗。

1.2 有效磁导率测量

根据传输线的电磁波传输理论,可以得到矢量网络分析仪的 S_{11} 参数与等效介电常数和磁导率的关系,去除介电常数信号后可得到磁导率的数值,即磁导率通过计算不同步骤下的矢量网络分析仪 S_{11} 参数而得到。第一步,矢量网络分析仪空载时测得整个系统的 S_{11} ,即只有探头与矢量网络分析仪连接。第二步,放置样品时得到一个 S_{11} ,有效磁导率和介电常数都被改变了。第三步,为了消除衬底介电常数的影响,在垂直于微带线的方向施加一个大于薄膜饱和场的磁场,这时磁性薄膜没有高频响应。第四步,测量加强磁场后的空载微波探头的 S_{11} ,磁场施加的方式与第三步完全一致。磁导率可以通过这四个 S_{11} 推导出来。

$$\mu_{eff} = \left[\frac{l_0 \ln(-S_{11}^{film}) - l_{emp} \ln(-S_{11}^{emp})}{l_0 \ln(-S_{11}^{film-mag}) - l_{emp} \ln(-S_{11}^{emp-mag})} \right]^2 \quad (8)$$

式中,测量空载时短路微带线的端口反射参数为 S_{11}^{empty} ,测量外加强磁场时空腔短路微带线夹具的端口反射参数为 $S_{11}^{emp-mag}$,强磁场的大小要远大于样品的饱和场,测量放入软磁薄膜样品时短路微带线的端口反射参数为 S_{11}^{film} ,测量外加强磁场时载有软磁薄膜样品的短路微带线夹具的端口反射参数为 $S_{11}^{film-mag}$,强磁场大小与第二步中的相同。

2 基于Unity 3D虚拟仿真实验设计与实现

Unity 3D是实时互动内容创作和运营平台。基于此平台,本文仿真了一个微波测试实验。进入实验界面之后,犹如身临其境,置身于仪器设备面前,即可开始跟真实体验一样的实验操作。其近乎真实的仿真与互动体验,可以模拟实验的全部过程;其强大的数据运算与处理能力,可以结合实验过程给出真实的实验结果,当然也包括错误操作所模拟得出的错误结果。

2.1 仿真的必要性

电子自旋磁矩随MHz-GHz频率变化的微波场动态响应机制的物理过程较为抽象,因此有必要进行虚拟仿

真实实验。通过虚拟仿真实验,学生可以直观地观察到磁矩在外加微波场时不同频率状态的进动模式以及磁矩随频率变化的响应机制。虚拟仿真实验高度再现了磁矩随外加微波场的动态响应过程,实时反映了磁矩进动与微波频率的相位关系,便于学生观察实验过程中的物理现象,理解其内在的物理机制。所涉及的仪器设备具有耐高温和微波辐射等特征,且操作过程较为复杂,操作时极易发生意外,从而造成人员伤害。而且实验室可容纳的空间非常有限,由于时间关系及操作的复杂性,无法实现每个学生都动手操作的目的。通过虚拟仿真实验,可以加大实验的承载量,让每个学生都可以动手操作,也不用担心对自身造成伤害,从而掌握相关测试方法和技术。

2.2 实验设计

矢量网络分析仪采用的是Agilent PNA E8363B,频率范围为10 MHz~40 GHz,这个频率范围正好是磁矩的进动频率,因此笔者选用此分析仪来研究软磁材料的高频磁性能。利用此矢量网络分析仪及其附属配件,根据前文论述的自旋磁矩共振模型及测试原理,基于Unity 3D虚拟仿真软件模拟开发了高频磁谱测试虚拟仿真实验(简称虚拟仿真实验),如图4所示。



图4 矢量网络分析仪虚拟仿真实验

虚拟仿真实验不仅包括所使用的仪器设备,而且包括具体的实验操作过程,如参数设置、设备校准、样品放置、样品测试、结果展示等。

2.3 实验过程与结果

进入操作界面,可以看到各个操作的细节展示,如图5所示。虚拟仿真实验选用85052D选件进行校准,使用Short, Open, Load校准件进行校准,从而将参考平面校准到测试夹具端面。以端口2为例,校准完成之后,端口2加载Load校准件,测试结果如图6所示,S22的值为-80 dB~-90 dB;否则需要重新校准。

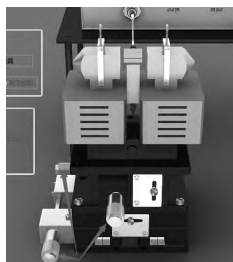


图5 矢量网络分析仪实验操作

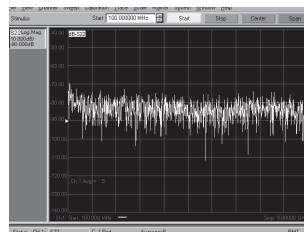


图6 矢量网络分析仪校准结果

校准完成之后,采用有效磁导率测量的四步法对样品进行分析,磁性薄膜测试结果如图7所示。以FeNiMnO薄膜为例,测试了不同外场下的高频磁谱,如图8所示。随着外场的增加,磁谱的共振频率也逐渐增大。当外场从0 Oe增加到200 Oe时,共振频率的值从1.8 GHz提高到3.8 GHz,从而实现了利用外场对磁性薄膜磁特性的调控。

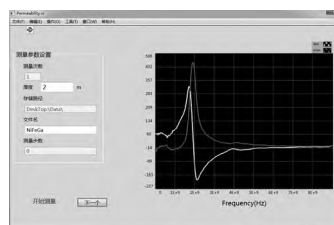


图7 矢量网络分析仪测试结果

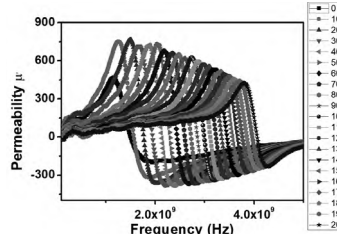


图8 FeNiMnO薄膜磁导率随磁场变化曲线图

3 结语

本文基于Unity 3D仿真了自旋磁矩共振实验,利用虚拟仿真具有低成本、灵活性高、容纳性强、安全度高、不易造成仪器损坏等特点,实现让每个学生都有机会进行复杂仪器操作的目的。该虚拟仿真实验具有很好的仿真性、设计性、交互性,从而达到与真实操作几乎一样的感受。其突破时间和空间的限制,让更多的学生了解科学前沿高精尖的设备,开阔眼界、提升学生动手能力、激发学生创新思维。该虚拟仿真实验不仅可以有效缓解实验室压力,还可惠及由于缺少设备而无法开展实验的高校,让更多想要了解相关信息的科研人员随时随地通过网络来完成实验,提高资源共享、提升科研能力、促进科研合作。

(下转34页)

学方式,能够培养学生实际电路设计与分析能力。采用在线实境实验教学方式,减少了新型冠状病毒肺炎疫情防控期间学生不能到实验室进行实验对教学质量的影响,达到了替代实验室实物实验的目的。

参考文献

- [1] 张华强,李东兴,孙砚飞.高校测控专业电路课程及其实验现状分析[J].现代职业教育,2018(1):178.
- [2] 杜义浩,马俊霞,郝晓辰,等.测控专业课程项目式教学模式改革探索[J].电气电子教学学报,2020,42(2):120-123.
- [3] 韩军良,汤乐,唐传胜,等.面向应用型人才培养的《测控电路》教学改革研究与探索[J].时代汽车,2019,305(2):72-73.

- [4] 张玉萍,李辰.“测控电路”课程的教学改革[J].电气电子教学学报,2018,40(6):44-46,99.
- [5] 周围,甘凯,肖艳军,等.基于模块化设计的测控电路实训平台应用研究[J].科技视界,2020(3):11-13.
- [6] 刘国忠,刘刚,那云毓.理论和实验混合式教学模式在测控电路课程教学中的应用[J].中国现代教育装备,2017(19):52-55.
- [7] 付晓辉,姜钧,付军荣.基于LabVIEW的课程设计虚拟实验环境研究[J].教育现代化,2019,6(97):159-162.
- [8] 王莉,刘楠峰,牛群峰,等.测控技术与仪器专业实践教学方法探索与应用[J].中国电力教育,2014(2):170-171.
- [9] 王荣秀,曹晓莉,李明.“对分课堂”教学模式在“测控电路”教学实践中的运用[J].教育教学论坛,2020(4):270-272.
- [10] 张玉萍,郭云翔.《测控电路》课程考试方式改革之探讨[J].黑龙江科技信息,2013(36):110-110.

Research and Discussion on Experimental Teaching Reform of Measurement and Control Circuit Based on Online Reality

Bai Yiming, Liu Lichuan, Tian Yuan, Zhang Mengjiao

Experimental Teaching Center of Control Engineering, School of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University,
Dalian, 116026, China

Abstract: Measurement and control circuit is a professional course independently opened by measurement and control technology and instrument major. it is difficult for the practical courses on account of lack of laboratory equipment. It cannot replace the laboratory experiment completely only relying on software virtual simulation. Therefore, a teaching reform is proposed for the practice teaching of measurement and control circuit course in this paper. An online experiment system for measurement and control circuit is designed. The application is given by using online reality technology, which plays a very good teaching effect.

Key words: virtual simulation; measurement and control circuit; online reality

(上接30页)

参考文献

- [1] 林曼虹,张诚,刘朝辉,等.基于LabVIEW的霍尔效应仿真实验设计与实现[J].大学物理,2015(7):26-29.
- [2] 杜玉宝,孙淑强,开文涛.虚拟仿真实验教学信息化平台的建设与思考[J].中国现代教育装备,2016(17):26-28.
- [3] 杨东侠,刘安平,韩忠,等.核物理虚拟仿真实验教学平台搭建:基于开放式实验教学[J].物理与工程,2018(5):106-109,113.

- [4] 李喜玲,乔亮,郭党委.薄膜电感测试原理及方法[J].实验技术与管理,2015(11):47-50.
- [5] 宫伟力,张奇,赵帅阳,等.大学霍尔效应实验的拓展:基于加速电场下等离子体发电机实验模型的研究[J].大学物理,2015,34(1):45-48.
- [6] 孙艳娜,赵鸿铎,孙大权.基于Unity3D的MTS虚拟仿真实验系统设计[J].实验室研究与探索,2020(7):103-105.
- [7] 嵇萍,刘泗岩.虚拟仿真实验在单片机教学中的应用[J].中国现代教育装备,2009(17):94-96.

Design and Implementation of Spin Magnetic Moment Resonance Dynamics Virtual Simulation Experiment Based on Unity 3D

Li Xiling^{1,2,3}, Wang Zhenkun², Chai Guozhi^{1,3}, Wang Xinhua², Wang Jianbo^{1,3}

1. Key Lab for Magnetism and Magnetic Materials of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China

2. National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China

3. Key Laboratory for Special Function Materials and Structural Design of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou,
730000, China

Abstract: Spin magnetic moment resonance belongs to the category of magnetic experiment. Based on Unity 3D, using the vector network analyzer, the dynamic response mechanism of the electron spin magnetic moment in soft magnetic thin film material with the external alternating magnetic field is studied, from the experimental principle, physical model, experimental procedure, data analysis and other aspects. Powerful data operation and result processing functions, can simulate the correct test process, and a lot of wrong operations are also given the corresponding result output. The virtual simulation experiment can not only effectively relieve the pressure of the laboratory, but also benefit the universities that cannot carry out the experiment due to the lack of the equipment.

Key words: spin magnetic moment resonance; virtual simulation technology; physics experiment teaching