

科研级设备电磁铁在法拉第电磁感应定律教学中的应用

汤仙童 潘睿亨 李登峰 刘俊 李丽

(重庆邮电大学电子科学与工程学院, 重庆 400065)

摘要 针对当前大学物理法拉第电磁感应定律教学中存在的理论与实践脱节、学生前沿感知不足等问题, 本文提出一种以科研设备为载体的教学创新模式。该模式以科研级电磁铁 EM5 为核心, 构建“理论—设备—前沿”三位一体的教学体系, 有效突破传统教学的局限。通过引入 EM5 在有机电致发光器件磁场效应测量中的实际科研案例, 生动展示了设备在前沿研究中的应用价值。理论分析与教学设计表明, 该模式有助于学生建立动态物理图像, 深化对法拉第电磁感应定律核心内涵的理解, 显著提升科研兴趣与探索热情, 增强课程的高阶性与探究性。本研究为法拉第电磁感应定律的教学改革提供了可操作的实践方案, 也为将高端科研仪器转化为优质教学资源提供了新思路。

关键词 法拉第电磁感应定律; 电磁铁 EM5; 有机电致发光器件; 磁场效应

DOI: 10.27024/j.wlygc.2026.02.24.03

APPLICATION OF SCIENTIFIC-GRADE ELECTROMAGNET EQUIPMENT IN THE TEACHING OF FARADAY'S LAW OF ELECTROMAGNETIC INDUCTION

TANG Xiantong PAN Ruiheng LI Dengfeng LIU Jun LI Li

(School of Electronic Science and Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065)

Abstract To address the disconnect between theory and practice in the teaching of Faraday's law of electromagnetic induction in university physics, as well as students' limited exposure to frontier research, this paper proposes an innovative teaching model based on research-grade equipment. Taking the research-grade electromagnet EM5 as the core teaching platform, this model establishes an integrated “theory-equipment-frontier” teaching framework, which helps overcome the limitations of traditional instruction. By introducing a practical research case involving the use of EM5 to measure magnetic-field effects in organic light-emitting devices, the model demonstrates the application value of advanced research equipment in frontier scientific studies. Theoretical analysis and teaching design indicate that this approach helps students construct dynamic physical representations, deepen their understanding of the core principles

收稿日期: 2026-02-24; 修回日期: 2026-04-09; 出版日期: 2026-05-20

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-MSX0739, CSTB2024NSCQ-MSX0734); 重庆市高等教育教学改革研究项目(256055; 243118); 重庆市研究生教育教学改革研究项目(yjg250119); 重庆邮电大学“课程思政”示范项目(XKCSZ2519)。

通信作者: 潘睿亨, panrh@cqupt.edu.cn。

引文格式: 汤仙童, 潘睿亨, 李登峰, 等. 科研级设备电磁铁在法拉第电磁感应定律教学中的应用[J]. 物理与工程, 2026, 36(3): 185-190.

Cite this article: TANG X T, PAN R H, LI D F, et al. Application of scientific-grade electromagnet equipment in the teaching of Faraday's law of electromagnetic induction[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(3): 185-190. (in Chinese)

of Faraday's law, enhance their interest in scientific research and exploration, and strengthen the advanced and inquiry-based nature of the course. This study provides an operable practical scheme for the teaching reform of Faraday's law of electromagnetic induction and offers a new perspective on transforming high-end research instruments into high-quality teaching resources.

Key words Faraday's Law of Electromagnetic Induction; electromagnet EM5; organic light-emitting device; magnetic field effect

法拉第电磁感应定律是大学物理电磁学模块的核心基石,其教学效果直接影响学生对电磁现象本质的认知及后续专业学习。传统教学中,该定律的讲解多依赖条形磁铁与线圈的定性演示,虽能直观呈现电磁感应现象,但无法实现磁场的精密控制与感应规律的定量测量,更难以建立定律与现代科研实践的深度关联,导致学生普遍停留在公式记忆层面,对定律的物理内涵、技术实现路径及前沿应用场景缺乏系统且深刻的理解^[1-4]。当前,电磁感应原理已广泛渗透于有机电子学、磁传感、新能源技术等前沿领域,成为推动相关学科发展的核心支撑,而教学中仍缺乏有效载体衔接基础理论与前沿应用,理论与实践脱节的问题尤为突出。

科研级电磁铁 EM5 是现代实验物理学的核心基础设施。作为典型的桌面型强磁场设备,其采用比例—积分—微分控制(Proportional-Integral-Derivative Control, PID)闭环反馈控制技术,可实现对磁感应强度的毫特斯拉级精度调控(误差 $<1\%$),解决了传统教学中磁场无法定量测量的难题;EM5 支持自定义磁场时间变化模式,使学生能够系统探究感应电动势与磁通量变化率的关系,将定性演示升级为定量验证;EM5 作为凝聚态物理、材料科学等领域的通用科研设备,其“教学—科研”双重属性为衔接基础理论与前沿应用提供了天然载体。因此,将 EM5 作为教学载体,既是对传统教学短板的精准弥补,更是贯通经典理论与现代科研的有效路径。

本文系统阐述以科研级电磁铁 EM5 为核心的“理论—设备—前沿”三位一体教学新模式。首先,通过剖析 EM5 磁场强度连续可调、空间分布均匀等核心技术特性,明确其在法拉第电磁感应定律定量验证中的创新实验路径;进而,系统评估该模式在激发学生学习兴趣、深化物理概念理解

等方面的综合成效,为其推广应用提供实践依据;此外,以有机电致发光器件的磁场效应测量为例,展示 EM5 在微观器件物理研究中的前沿应用,使学生直观感受高端设备在科学前沿中的核心价值,体现课程的高阶性与探究性。综上所述,本研究将高端科研设备 EM5 有效转化为优质教学资源,为大学物理电磁学教学改革提供了可复制的新范式,助力学生实现从知识被动接受者向科学前沿主动探索者的转变。

1 法拉第电磁感应定律与电磁铁的工作原理

1.1 法拉第电磁感应定律的核心内涵

法拉第电磁感应定律的数学表达式^[5,6]为

$$\epsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

这一简洁而深刻的公式是电磁学理论的基石之一。其中, ϵ 表示在闭合回路中产生的感应电动势,其大小反映了电磁感应现象的强弱程度; Φ_B 为通过该回路所围面积的磁通量,定义为磁感应强度 $\mathbf{B}$ 与垂直于磁场方向的面积 $\mathbf{A}$ 的乘积($\Phi_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$),它综合体现了磁场强弱、回路面积及回路与磁场相对取向等几何关系的共同影响;式(1)中的负号是楞次定律的数学表征,明确感应电动势(及所激发的感应电流)的方向始终倾向于阻碍磁通量的变化,这一方向性约束深刻印证了能量守恒定律在电磁现象中的普适性。该定律的微分形式在物理学史上具有里程碑意义:它首次定量揭示了“变化的磁场激发电场”这一本质,突破了静电场与静磁场相互独立的传统认知,实现了电与磁的动态统一。在应用上,它不仅是发电机、变压器等电力设备的基本原理,支撑现代电力工业;更为麦克斯韦电磁场理论奠定了关键基础——其微分形式^[5](如下)正是麦克斯韦方程组的核心来源

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

结合教学实践来看,该定律的理解是电磁学教学的核心难点:学生往往止步于公式记忆,难以建立“磁通量变化”的动态物理图像。因此,通过科研仪器将抽象公式转化为可测、可探的物理现象,引导学生深入本质并联系前沿应用,正是本研究的出发点。

1.2 电磁铁 EM5 的基本结构与工作原理

科研级电磁铁 EM5(图 1(a))集成磁场生成、精确控制与实时监测三大模块,为法拉第电磁感应定律的定量验证及“磁通量变化”动态演示提供可靠硬件支撑。其磁场生成模块采用高磁导率坡莫合金 C 型铁芯(极面直径 100mm,极间距 10~100mm 可调)与 800~1000 匝激励线圈,确保磁场集中均匀;精确控制模块通过可编程电源输出稳定励磁电流,实现磁场连续可调;集成传感模块内置霍尔传感器,实时反馈磁感应强度以闭环调节。辅助系统包括 500A/±60V 电源(图 1(b))及 15kW 闭循环水冷(图 1(c)),控温精度 ±0.1℃,保障设备长期稳定运行。

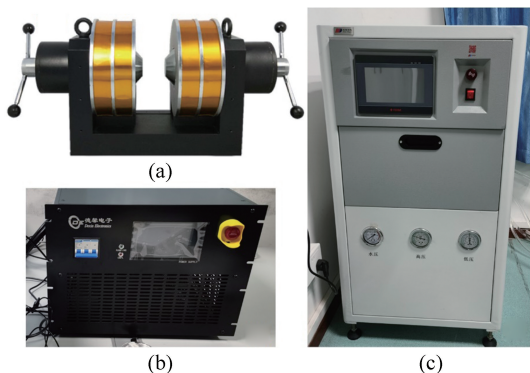


图 1 电磁铁测试系统实物图

(a) 电磁铁 EM5 实物图;(b) 电磁铁电源;(c) 水冷机

EM5 工作原理为“指令输入-磁场生成-实时反馈-精准调控”闭环过程:用户设定目标磁场后,控制模块输出对应励磁电流,流经线圈时依据安培定律产生最高 2.4T 以上的均匀强磁场;霍尔传感器采集数据并传回控制电路,与目标值对比后,通过 PID 算法微调电流,实现磁场高精度维持,误差低于 1%。如图 2 所示,实测结果表明,磁极间距固定时,磁感应强度随驱动电流先线性增加后饱和;同一电流下,磁极间距越小,磁场越强。其控制软件支持自定义磁场时间变化模式,使磁通量变化率成为可调控参数,可让学生直观探究感

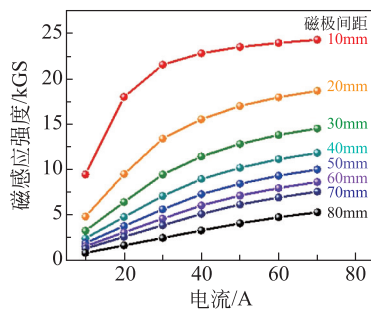


图 2 室温下不同磁极间距下磁场随电流的变化关系

应电动势与磁通量变化率的关联,深刻理解核心物理思想,弥补传统教学短板。

1.3 实验设计方案

利用科研级电磁铁 EM5 开展法拉第电磁感应定律探究实验,核心在于借助其高精度可控磁场,将抽象的“磁通量变化”转化为直观可测的物理现象。实验时,将 EM5 的 C 型铁芯气隙调整为固定间距,以产生均匀磁场;将探测线圈置于气隙中央,并连接至数据采集系统。通过可编程电源精确调节励磁电流,改变磁感应强度,实时观测探测线圈两端感应电动势的变化,定量验证感应电动势与磁通量变化率的关系。可在气隙中移动探测线圈的位置或改变其有效截面积,探究磁场空间变化对磁通量的影响。利用 EM5 的霍尔探头的实时反馈,学生可同步监测磁场动态,清晰理解“变化”与“抵抗变化”的物理过程——即楞次定律中“负号”所代表的能量约束关系。该方案通过 EM5 的精准调控与实时监测能力,将传统定性演示提升为定量探究实验,帮助学生建立清晰的动态物理图像。

2 “理论—设备—前沿”三位一体的教学改革讨论

将“理论—设备—前沿”三位一体教学模式(图 3)引入电磁学课堂,核心是以 EM5 为设备枢纽,重构经典定律与前沿科学的教学链路。实际教学中,该模式分为三个有机衔接的阶段:第一阶段理论溯源,引导学生结合已学电磁学知识,以法拉第电磁感应定律为切入点,通过课前导读与小组研讨,自主建构“磁通量变化率”及楞次定律的物理内涵,为后续实验探究筑牢概念基础。第二阶段设备探究,在传统讲授基础上增设 2~4 学时

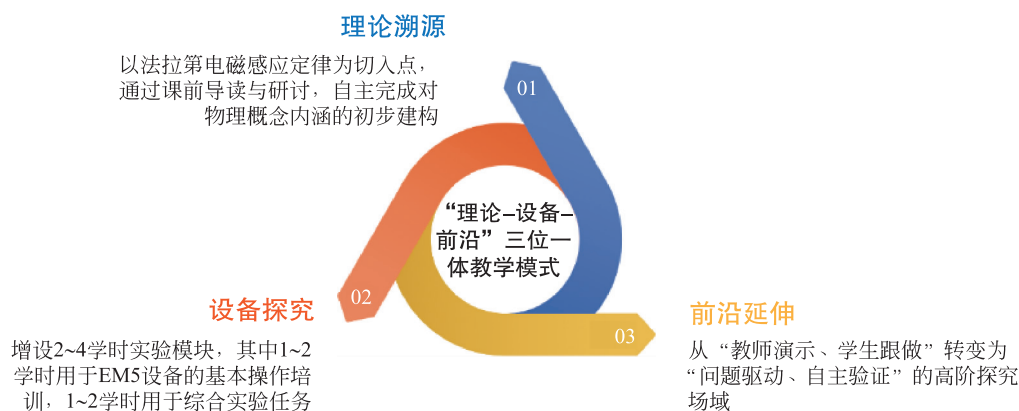


图3 “理论—设备—前沿”三位一体的教学模式示意图

实验模块，1~2学时用于EM5基本操作培训，使学生熟练掌握磁场设定、探测线圈响应测试、数据采集与曲线拟合等核心技能；另1~2学时为综合实验，学生分组完成动生、感生电动势定量验证，自主拟合公式关系曲线，将抽象定律转化为可测可视可探究的物理实在。教师可通过EM5控制软件预设磁场变化模式，标准化探测线圈接口，使学生无需调试硬件，专注于变量控制与数据分析。第三阶段前沿延伸，将EM5迁移至有机电致发光器件磁场效应测量，引导学生发现，教学中习得的EM5磁场调控能力，正是研究有机半导体自旋动力学的关键前提（下一节内容将详细介绍）。教师可将器件认知与磁场效应曲线分析作为课后作业，鼓励学生查文献、分析数据，使课堂从“教师演示、学生跟做”转变为问题驱动的高阶探究。

该教学改革旨在以同一设备贯通经典理论与现代前沿，实现三重目标：在认知维度，学生通过亲手验证法拉第定律并测量微观磁电导响应，真正建立“变化产生感应”的动态物理图像，破除公式记忆与物理直觉之间的壁垒；在能力维度，从设备操作、变量控制到数据解释的完整科研流程训练，使学生形成可迁移的科学思维范式；在情感维度，目睹教学级EM5设备在前沿领域的直接应用，有效缩短基础物理与尖端科技的心理距离，激发学生的学术志趣与创新自信。

3 有机电致发光器件磁场效应的应用

有机电致发光器件（又称有机发光二极管，Organic Light-Emitting Diode, OLED）是现代显示技术的核心，其性能受外部磁场的显著影响。

研究表明，在恒定外加电流驱动下，对于不含任何磁性功能层的OLED器件，器件的电流和电致发光强度会随外加磁场变化的现象称为有机磁场效应。其中，通过器件的电流会随外加磁场变化而发生改变，这一效应称为磁电导（Magneto-conductance, MC）^[7,8]。MC可定义为

$$MC = \frac{I(B) - I(0)}{I(0)} \times 100\% \quad (3)$$

其中， $I(B)$ 、 $I(0)$ 分别为有、无外加磁场时器件中的电流；器件的电致发光强度随外加磁场的变化称为电致发光磁场效应（Magneto-electroluminescence, MEL）^[9,10]。MEL可定义为

$$MEL = \frac{EL(B) - EL(0)}{EL(0)} \times 100\% \quad (4)$$

其中， $EL(B)$ 、 $EL(0)$ 分别为有、无外加磁场时器件的电致发光强度。典型MC和MEL测量装置示意图如图4所示。

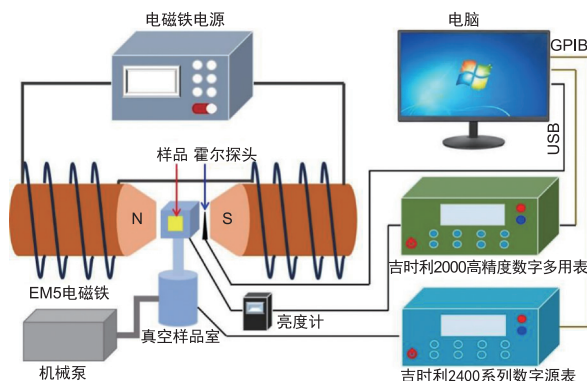


图4 OLEDs的有机磁场效应测量实验装置示意图

电磁铁EM5的闭环磁场控制技术，可提供高度均匀、长期稳定且连续可调的磁场环境。得益于EM5对磁场的精确调控能力，可系统建立磁感

应强度 B 与 MC、MEL 之间的对应关系。在教学实施中,学生以小组为单位参与完整的数据采集与分析流程:①首先在教师指导下操作 EM5,设定磁场扫描范围、扫描速率等关键参数,完成器件供电与信号采集设备的连接;②随后启动 Labview 磁场扫描程序,实时记录不同偏置电流下器件的电流与发光强度数据;③最后将原始数据导入 origin 绘图软件,完成 MC、MEL 曲线绘制。

本文以典型红荧烯掺杂器件^[11,12]为例,其结构如图 5(a)所示,室温下的光电特性如图 5(b)、(c)所示。图 5 作为课堂教学课件,用于帮助学生认识器件基本结构与性能参数,训练学生从特性曲线中读取开启电压、亮度、外量子效率等关键指标的能力。器件在室温不同偏置电流下的 MEL 和 MC 曲线如图 6(a)、6(b)所示,图 6 作为探究性作业载体,用于引导学生观察曲线低场、高场变化规律,结合 EM5 磁场调控原理分析响应特征。从图 6 可以看出,MEL 与 MC 曲线均呈现明显的低场、高场分段变化特征,且随偏置电流不同呈现规律性差异。借助 EM5 亚毫特斯拉级磁场分辨率与可编程扫描模式,可精准捕捉曲线的细微变化,保证测量结果稳定可靠。

综上所述,该前沿实例是科研级电磁铁 EM5 的典型前沿应用。在教学过程中,学生通过完整参与设备操作、数据采集与曲线分析,既能巩固 EM5 磁场调控的操作技能,又能直观认识该设备在前沿科研中的实用价值。这一设计有效打通了基础物理教学与前沿科研之间的壁垒,有助于提升学生的科学探究能力与学术前沿视野,充分体现了课程的高阶性与探究性。

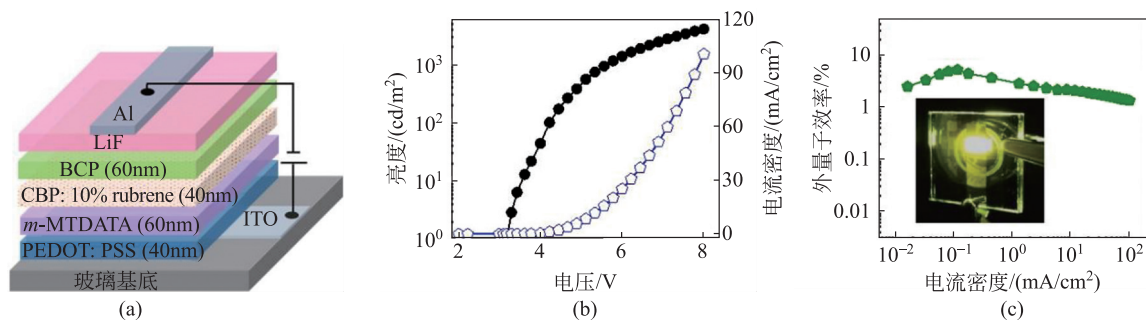


图 5 红荧烯掺杂器件的基本结构和光电性能

(a) 红荧烯掺杂器件的结构图; (b) 红荧烯掺杂器件的亮度-电压-电流密度特性曲线; (c) 红荧烯掺杂器件的外量子效率-电流密度特性,插图为发光红荧烯掺杂器件的实物图

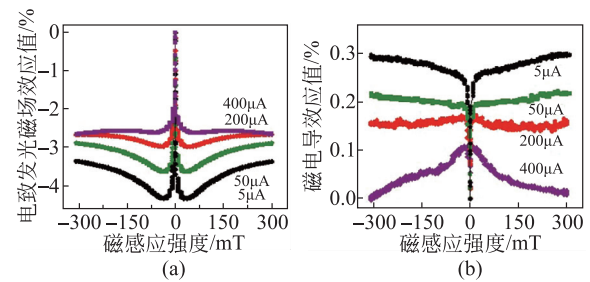


图 6 红荧烯掺杂器件在室温不同偏置电流下的磁场效应曲线
(a) MEL 曲线; (b) MC 曲线

4 教学评价

本研究构建了“过程+结果”相结合的形成性教学评价机制。过程评价主要围绕学生课前研讨中的概念建构、实验操作阶段的设备使用与变量控制能力、小组讨论中的原理分析与逻辑表达能力展开;结果评价则包括 OLED 磁场效应实例的曲线分析与原理阐释作业等内容。教学评价结果表明,该模式能够有效检验学生对核心物理概念的理解程度与科研设备操作能力,促进学生主动完成从理论认知到实践探究的转化。学生反馈显示,该教学模式使抽象的电磁感应定律变得可测、可探,有效突破“磁通量变化”这一理解难点,帮助学生直观感受科研设备在前沿研究中的应用价值,显著提升对大学物理的学习兴趣与科研探索意愿,也为后续开展更多科研设备融入物理教学的实践奠定了良好基础。

5 结语

本文将科研级电磁铁 EM5 深度融入法拉第

电磁感应定律教学,构建了“理论—设备—前沿”三位一体创新模式,实现了高端科研设备向优质教学资源的转化。该模式中,EM5 既是经典理论的验证平台,也是衔接前沿的认知桥梁:学生在操作中定量探究定律内涵,通过红荧烯掺杂器件磁场效应的前沿案例感知其应用价值,并在实践中初步构建科研思维。该模式为大学物理课程改革提供了可迁移范式——将科研装备与前沿议题融入基础教学,是贯通理论与应用、衔接基础与前沿的有效路径。未来,我们将持续开发系列化教学案例库,建设虚实融合实验平台,让更多学生在基础学习阶段触摸科研前沿,为培养创新型人才奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 杨综纬. 大学物理教学中对“法拉第电磁感应定律”实验改进[J]. 课程教育研究, 2018, 37: 135-136.
YANG Z W. Improvement of the Experiment on “Faraday’s Law of Electromagnetic Induction” in University Physics Teaching[J]. Curriculum Education Research, 2018, 37: 135-136. (in Chinese)
- [2] 盖艳琴, 唐刚. 在讲授《法拉第电磁感应定律》中实施“课程思政”示范教学[J]. 教育教学论坛, 2019, 48: 37-38.
GAI Y Q, TANG G. Demonstration Teaching of “Ideological and Political Education” in the Lecture of Faraday’s Law of Electromagnetic Induction[J]. Education Teaching Forum, 2019, 48: 37-38. (in Chinese)
- [3] 张婷, 吴伟, 张仕海. 用大学物理知识诠释前沿科技——从光的偏振到量子通信[J]. 物理与工程, 2024, 34(2): 19-24.
ZHANG T, WU W, SUN S H. Elaborating frontier technologies using college physics knowledges—From polarization of light to quantum communication[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(2): 19-24. (in Chinese)
- [4] 刘秀敏, 张娥, 杨奔腾子, 等. ETA 物理教学法在大学物理教学中的应用——以光电效应 爱因斯坦光子假设教学为例[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 72-79.
LIU X M, ZHANG E, YANG B T Z, et al. Application of ETA physics teaching method in college physics teaching: Taking the teaching of photoelectric effect Einsteins photon hypothesis as an example[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 72-79. (in Chinese)
- [5] 胡其图, 刘世勇, 李晟. 大学物理教程(下册)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2024.
HU Q T, LIU S Y, LI S. University Physics Course (Volume II)[M]. Beijing: People’s Posts and Telecommunications Press, 2024.
- [6] 马文蔚, 周雨青, 解希顺. 物理学(上册)[M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2020.
MA W W, ZHOU Y Q, XIE X S. Physics (Volume I)[M]. 7th ed. Beijing: Higher Education Press, 2020.
- [7] 汤仙童, 潘睿亨, 邓金秋, 等. 利用有机磁电导分析红荧烯发光器件中陷阱辅助的三重态激子淬灭作用[J]. 科学通报, 2018, 63(1): 1-10.
TANG X T, PAN R H, DENG J Q, et al. Analysis of trap-assisted triplet exciton quenching by magneto-conductance in rubrene-based organic light-emitting diodes[J]. Chin Sci Bull, 2018, 63: 1-10. (in Chinese)
- [8] JANSSEN P, WOUTERS S H W, COX M, et al. Unraveling the temperature and voltage dependence of magnetic field effects in organic semiconductors[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114: 174909.
- [9] WANG Z, JIANG X Q, XIONG J Y, et al. Understanding spin-orbit-coupling-induced reverse intersystem crossing in DMAC-TRZ-doped organic light-emitting diodes via magnetic-field-effect measurement[J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2024, 15, 9630-9636.
- [10] TANG X T, PAN R H, ZHU H Q, et al. Achievement of High-level reverse intersystem crossing in rubrene-doped organic light-emitting diodes[J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2020, 11: 2804-2811.
- [11] TANG X T, PAN R H, ZHAO X, et al. Full confinement of high-lying triplet states to achieve high-level reverse intersystem crossing in rubrene: a strategy for obtaining the record-high EQE of 16.1% with low efficiency roll-off[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30, 2005765.
- [12] JIA W Y, CHEN Q S, CHEN L X, et al. molecular spacing modulated conversion of singlet fission to triplet fusion in rubrene-based organic light-emitting diodes at ambient temperature[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2016, 120: 8380-8386.