

基于永磁恒定磁场激励的起始磁化曲线测量

邓东阁 武新军 左苏

Measurement of initial magnetization curve based on constant magnetic field excited by permanent magnet

Deng Dong-Ge Wu Xin-Jun Zuo Su

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 148101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.148101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.148101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于时空变换恒定磁化的起始磁化曲线推算方法

A calculation method for initial magnetization curve under constant magnetization based on time-space transformation

物理学报.2015, 64(23): 237503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.237503>

基于截断区域特征函数展开法的金属管材电涡流检测线圈阻抗解析模型

Analytical modeling of coil impedance based on truncated region eigenfunction expansion method in eddy current tube inspection

物理学报.2012, 61(8): 088105 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.088105>

$\text{Sm}(\text{Co}_{bal}\text{Fe}_{0.1}\text{Cu}_{0.1}\text{Zr}_{0.033})_{6.9}$ 高温永磁合金的矫顽力

The coercivity of the high temperature magnets $\text{Sm}(\text{Co}_{bal}\text{Fe}_{0.1}\text{Cu}_{0.1}\text{Zr}_{0.033})_{6.9}$ alloys

物理学报.2012, 61(18): 187503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.187503>

Gd,Co 共掺杂对 BiFeO_3 陶瓷电输运和铁磁特性的影响

Effects of Gd and Co doping on the electrical and ferromagnetism properties of BiFeO_3 ceramics

物理学报.2012, 61(17): 177501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.177501>

基于永磁恒定磁场激励的起始磁化曲线测量*

邓东阁 武新军[†] 左苏

(华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074)

(2016年1月31日收到; 2016年4月1日收到修改稿)

现有起始磁化曲线测量系统需绕制励磁线圈和感应线圈, 在线应用受限. 为此, 本文提出了一种基于永磁恒定磁场激励的起始磁化曲线测量原理并搭建了相应测量系统. 该系统采用永磁磁化器作为激励磁源, 以对称磁化方法在圆柱棒状构件上激励出随轴向位置变化的恒定磁场作为激励磁场; 采用阵列霍尔探头测量构件表面不同位置下的轴向和法向磁感应强度; 并基于多项式外推法和磁场高斯定理外推法, 推算构件与空气分界面上的轴向和法向磁感应强度; 进一步地, 根据分界面上的磁感应强度获取构件的起始磁化曲线. 系统测量结果表明, 在永磁恒定磁场激励下, 无须励磁线圈和感应线圈即可方便地获取棒状构件的起始磁化曲线, 测量误差小于10%, 测量误差标准差小于0.01, 重复性较好. 该系统可为便捷地在线测量棒状构件起始磁化曲线提供新途径.

关键词: 起始磁化曲线, 在线测量, 恒定磁场, 永磁体

PACS: 81.70.Ex, 75.60.Ej

DOI: 10.7498/aps.65.148101

1 引言

起始磁化曲线与铁磁材料应力状态密切相关^[1], 在线测量起始磁化曲线可用于铁磁结构件应力状态评估^[2]. 针对起始磁化曲线的测量, 国际电工委员会标准 IEC 60404-4 和国标 GB/T 13012 推荐了环样法和磁导计法两种方法. 环样法中, 软磁材料被加工成环形试样, 而实际应用中铁磁结构件多属棒状开环结构, 如钢丝、预应力钢棒和钢缆索等, 因此环样法不适用于该类铁磁构件起始磁化曲线的在线测量. 而磁导计法是一种适用于棒状试样起始磁化曲线测量的方法, 采用磁轭同试样一起构成闭合磁化回路; 磁导计法推荐了 A, B 两类磁导计, 其中 A 类磁导计的励磁线圈缠绕在试样上, B 类磁导计的励磁线圈缠绕在磁轭上; 相应地, 针对棒状构件, 相关研究人员开发了采用套筒类探头^[3]和磁轭类探头^[4-6]的两类在线磁参数测量系统.

采用套筒类探头的磁参数测量系统中, 套筒和构件一起组成闭合磁化回路, 励磁线圈和感应线圈

均缠绕在构件上, 测量前需采用绕线机将线圈均匀紧密地缠绕在构件上^[7], 现场绕制线圈较困难^[8,9], 且长时间激励线圈发热会引起构件温度变化, 需补偿由此带来的测量误差^[2]. 而采用磁轭类探头的磁参数测量系统中, 磁轭与构件一起组成闭合磁化回路, 励磁线圈缠绕在磁轭上, 此时线圈发热引起的构件温度变化较小, 感应线圈缠绕在磁轭或者构件上, 当感应线圈缠绕在磁轭上时, 其测量结果直接关联磁轭中的磁感应强度, 而非构件的本征磁特性^[10], 只有将感应线圈缠绕在构件上才能测得构件的磁化曲线等本征磁特性^[11], 所以在该测量系统中, 也不能避免感应线圈在线绕制的困难. 以上磁测量系统均采用时变磁场磁化构件, 这是必须采用感应线圈连接积分器测量构件磁感应强度的根本所在. 作者曾研究过采用空间变化恒定磁场代替时变磁场获取起始磁化曲线的方法^[12], 该方法采用直流线圈在棒状构件上激励出随轴向位置变化的恒定磁场作为激励磁场, 无须感应线圈测量构件内的磁感应强度, 而采用棒状构件与空气分界面上

* 国家自然科学基金 (批准号: 51477059) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xinjunwu@mail.hust.edu.cn

的法向和轴向磁感应强度推算起始磁化曲线, 但直流励磁线圈仍需缠绕在构件上, 这限制该方法的在线应用.

值得注意的是, 恒定磁场可用直流线圈获得, 也可由永磁激励产生^[13,14]. 永磁体一般与衔铁组成永磁磁化器, 利用其固有磁性励磁, 不存在通电励磁时的发热问题, 也比穿过式直流线圈便于现场安装, 且永磁体已被用于方便地获取铁磁材料的磁滞损耗^[15]. 基于此, 本文提出一种基于永磁恒定磁场激励的起始磁化曲线测量原理, 并搭建无须励磁线圈和感应线圈的起始磁化曲线测量系统, 该系统采用永磁磁化器在圆柱棒状构件中产生空间变化恒定磁场进行励磁, 采用阵列霍尔探头测量构件表面不同提高下的轴向和法向磁感应强度, 并推算构件与空气分界面上的磁感应强度, 以最终获取起始磁化曲线.

2 恒定磁场下起始磁化曲线测量原理

图 1 为恒定磁场下起始磁化曲线测量原理框图. 恒定磁场下起始磁化曲线测量包括恒定磁场激励、分界面上磁感应强度推算和起始磁化曲线计算三部分. 首先, 采用恒定磁场磁化器在棒状构件中激励出沿轴向位置 L 变化的恒定磁场 $H_s = f_s(L)$, 当该恒定磁场满足构件与空气分界面上的法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$ 沿分界面周向分布均匀, 且构件内的轴向磁感应强度 B_{fer}^z 在构件横截面内分布均匀时^[12], 由距构件表面不同提高 L_o 下的法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, L_o)$ 和轴向磁感应强度 $B_{\text{air}}^z(L, L_o)$ 可推算分界面上的法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$ 和轴向磁感应强度 $B_{\text{air}}^z(L, 0)$, 进一步地, 将 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$ 和 $B_{\text{air}}^z(L, 0)$ 输入微分磁导率曲线计算模型, 根据磁场高斯定理、磁场强度切向分量连续定理、瑞利区经验公式和趋近饱和磁化定理, 计算出构件起始微分磁导率 $\mu'_{\text{in}}(H_{\text{fer}}^z)$ ($0 \leq H_{\text{fer}}^z \leq H_{\text{sa}}$)^[12], 其中 H_{fer}^z 为构件内的轴向磁场强度, H_{sa} 为饱和磁化构件所需的外加磁场强度. 最后, 在 $[0, H_{\text{sa}}]$ 区间上对微分磁导率 $\mu'_{\text{in}}(H_{\text{fer}}^z)$ 逐点积分, 如 (1) 式所示, 即可获取被测构件的起始磁化曲线 $B(H)$. (1) 式为一积分变限函数, 其中 H 为函数变量, H_{fer}^z 为积分变量.

$$B(H) = \int_0^H \frac{dB_{\text{fer}}^z}{dH_{\text{fer}}^z} dH_{\text{fer}}^z$$

$$= \int_0^H \mu'_{\text{in}}(H_{\text{fer}}^z) dH_{\text{fer}}^z, \quad H \in [0, H_{\text{sa}}]. \quad (1)$$

由上述分析可知, 恒定磁场下测量起始磁化曲线的关键是: 1) 激励出满足磁感应强度均匀分布条件的恒定磁场, 2) 推算出构件与空气分界面上的法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$ 和轴向磁感应强度 $B_{\text{air}}^z(L, 0)$. 故下面以两米长 $\Phi 7$ mm 钢丝为被测对象, 深入研究永磁恒定磁场激励方法以及分界面上磁感应强度推算方法, 然后以此为基础搭建实验系统, 测量其起始磁化曲线.

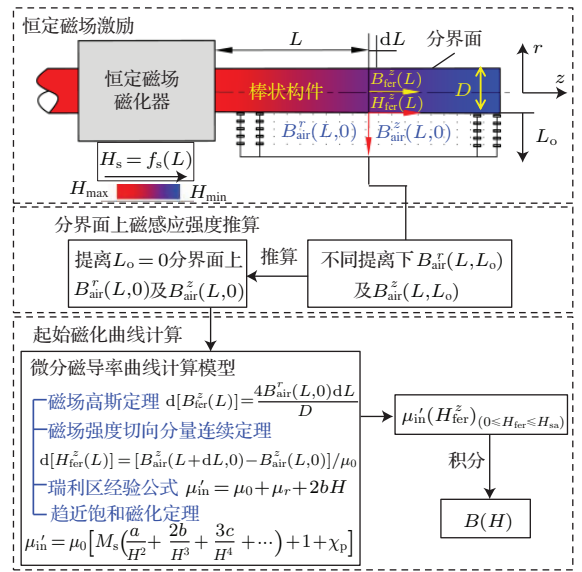


图 1 (网刊彩色) 恒定磁场下起始磁化曲线测量原理框图
Fig. 1. (color online) The principle of measuring initial magnetization curve under a constant magnetic field.

3 永磁恒定磁场激励方法

单一永久磁铁磁化能力有限, 且其周围磁场是不均匀的. 为实现铁磁构件的饱和均匀磁化, 现有研究多将永久磁铁和低磁阻衔铁组成磁化器以提高磁化能力, 采用多个磁化器阵列的方法实现铁磁构件的均匀磁化^[16]. 本文亦采用上述磁化方法在 $\Phi 7$ mm 钢丝中激励符合条件的恒定磁场.

3.1 永磁恒定磁场激励模型

永磁恒定磁场激励布置简图如图 2 所示, 两永磁磁化器关于轴线对称布置在钢丝中部, 以在钢丝内部产生随轴向位置变化的恒定磁场. 永磁磁化器由 NdFeB N35 永久磁铁和衔铁构成, 磁化器的具体尺寸在图 2 中详细标出, A-A 视图被放大以清楚

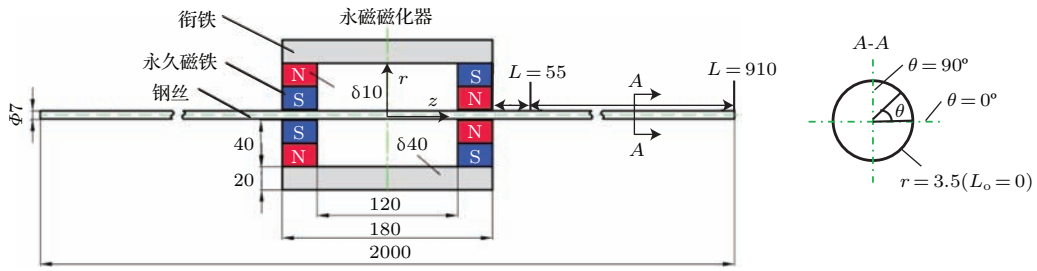


图2 永磁恒定磁场激励布置简图及相应的有限元模型 (单位为 mm)

Fig. 2. The Layout diagram for exciting a constant magnetic field on a steel wire by permanent magnetizers and the corresponding FEM model (in mm).

显示钢丝横截面尺寸参数. 为定量分析该磁化布置下钢丝内部的恒定磁场, 利用 Ansys 软件建立了相应尺寸的有限元模型, 并在外层添加足够大的空气场. 求解完成后, 提取钢丝轴线上的轴向磁感应强度 B_{fer}^z .

图3为钢丝轴向磁感应强度 B_{fer}^z 沿轴线分布图, 根据相对磁化器位置的不同, 钢丝被分为了三个区域: 磁化器左、右侧钢丝区域和两磁极间钢丝区域. 靠近磁铁钢丝区域处于近饱和磁化状态, 钢丝端部远离磁铁区域处于起始磁化状态; 磁化器两侧钢丝区域的磁感应强度变化量远大于两磁极间钢丝区域磁感应强度变化量, 且左右两侧钢丝区域的磁感应强度关于中心对称分布, 故下面只研究磁化器右侧钢丝区域中的恒定磁场空间分布特征, 观察其是否符合第2节所述的两个磁感应强度均匀分布的条件.

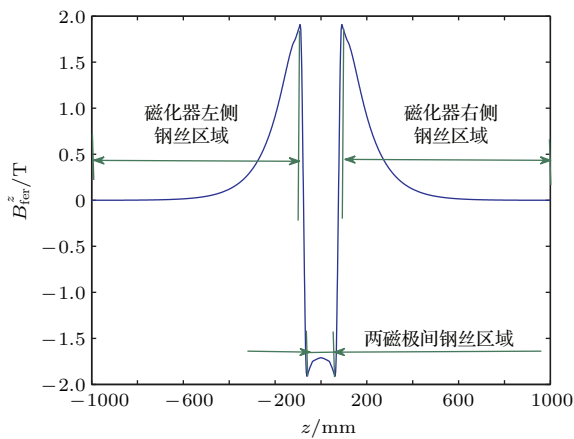


图3 (网刊彩色) 钢丝轴向磁感应强度沿轴线分布图

Fig. 3. (color online) The distribution of the axial magnetic flux density along the axial line of the steel wire.

3.2 永磁恒定磁场激励空间分布特征

取图2所示的距离磁化器右端部 $L = 55$ mm 到 $L = 910$ mm 范围内的钢丝进行分析, 图4(a)为

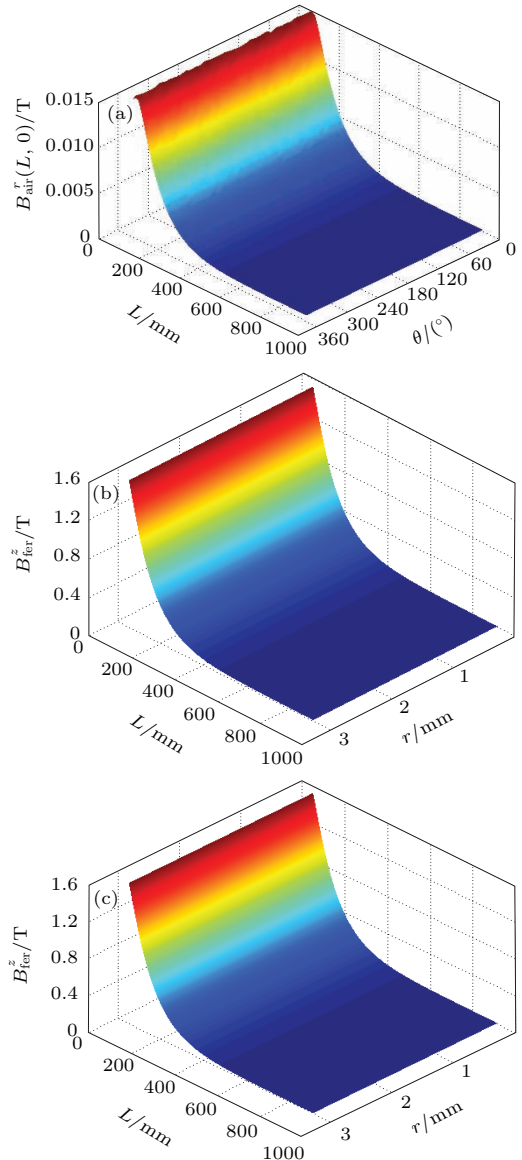


图4 (网刊彩色) (a) 法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$ 在分界面 $r = 3.5$ mm 上的分布图; (b) 轴向磁感应强度 B_{fer}^z 在平面 $\theta = 0^\circ$ 上的分布图; (c) 轴向磁感应强度 B_{fer}^z 在平面 $\theta = 90^\circ$ 上分布图

Fig. 4. (color online) (a) The distribution of the radial magnetic flux density $B_{\text{air}}^r(L, 0)$ in the interface $r = 3.5$ mm; (b) the distribution of the axial magnetic flux density B_{fer}^z in the plane $\theta = 0^\circ$; (c) the distribution of the axial magnetic flux density B_{fer}^z in the plane $\theta = 90^\circ$.

法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$ 在分界面 $r = 3.5 \text{ mm}$ 上的分布图, 图 4(b) 为钢丝内部轴向磁感应强度 B_{fer}^z 在平面 $\theta = 0^\circ$ 上的分布图, 而图 4(c) 为钢丝内部轴向磁感应强度 B_{fer}^z 在平面 $\theta = 90^\circ$ 上的分布图.

如图 4(a) 所示, 当轴向位置 L 一定时, 分界面圆周方向上的法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$ 基本相同. 另如图 4(b) 和图 4(c) 所示, 当轴向位置 L 一定时, 不同半径 r 和不同角度 θ 上的轴向磁感应强度 B_{fer}^z 也基本相同. 因此, 基于永磁磁化器对称磁化方法, 具体地采用如图 2 所示的永磁磁化器尺寸和布置方式, 可在钢丝上产生满足第 2 节所述磁感应强度均匀分布条件的恒定磁场, 故采用图 2 所示磁化器磁化钢丝.

4 分界面上磁感应强度推算方法

恒定磁场下测量起始磁化曲线另一关键是推算构件与空气分界面上的轴向磁感应强度 $B_{\text{air}}^z(L, 0)$ 和法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$. 为获取分界面上磁感应强度, 现有研究将磁敏感传感器尽可能贴近构件表面进行测量 [17], 然而, 磁敏感传感器不可能无限小, 实际测点与构件表面间不可避免地存在着几个毫米的提离, 直接将测量点的磁感应强度作为分界面上的磁感应强度会引入误差. 因此, 相关学者推荐用构件表面不同提离下的轴向磁感应强度测量值外推分界面上的轴向磁感应强度 [18]. 故制作阵列霍尔探头, 研究在空间变化恒定磁场磁化下, 用不同提离下的磁感应强度测量值推算分界面上磁感应强度的方法.

4.1 阵列霍尔探头

图 5 为阵列霍尔探头示意图, 探头基座由非导磁的铜质材料制作, 探头凹槽中封装有 a, b 两组霍尔元件阵列, a 组霍尔元件敏感面垂直于 r 方向, b 组霍尔元件敏感面垂直于 z 方向, 分别用来测量钢丝表面不同提离下的法向磁感应强度和轴向磁感应强度. 采用的霍尔元件为 Micronas 公司研制的 HAL 1823 型线性霍尔元件, 灵敏度为 2.5 mV/G , 敏感面积为 $0.2 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$. 霍尔元件尽可能地贴近钢丝布置: a 组霍尔元件距钢丝表面最小提离为 1.5 mm , 最大提离为 6 mm , 相邻两法向霍尔元件间距为 1.5 mm ; b 组霍尔元件距钢丝表面最小提离为 2.5 mm , 最大提离为 14.5 mm , 相邻两轴向霍尔元件间距为 4 mm . 该霍尔探头可测量提离为

$2.5, 6.5, 10.5, 14.5 \text{ mm}$ 时的轴向磁感应强度和提离为 $1.5, 3, 4.5, 6 \text{ mm}$ 时的法向磁感应强度, 提离 $L_o = 0 \text{ mm}$, 即分界面上的磁感应强度不能实际测得. 因此下面仿真研究以上各提离下的轴向和法向磁感应强度推算分界面上磁感应强度的准确性.

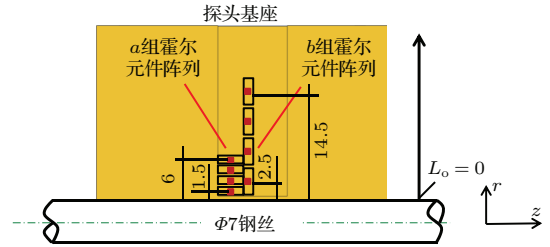


图 5 (网刊彩色) 阵列霍尔探头示意图 (单位为 mm)
Fig. 5. (color online) The schematic diagram of the testing probe including Hall chip array (in mm).

4.2 分界面上轴向磁感应强度推算方法

仿真提取 $L = 55 \text{ mm}$ 到 $L = 910 \text{ mm}$ 范围内钢丝外表面 $2.5, 6.5, 10.5, 14.5 \text{ mm}$ 提离下的轴向磁感应强度 $B_{\text{air}}^z(L, L_o)$, 如图 6(a) 所示. 当轴向位

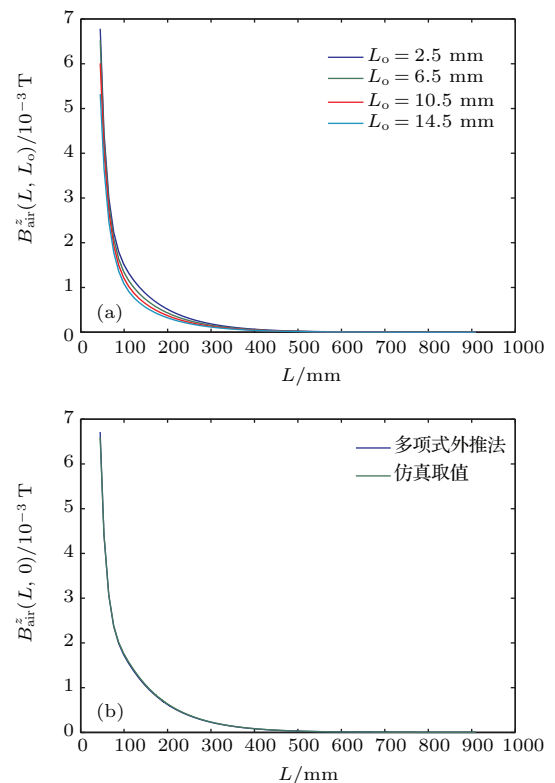


图 6 (网刊彩色) (a) 不同提离下轴向磁感应强度; (b) 多项式外推法及仿真得到的分界面轴向磁感应强度
Fig. 6. (color online) (a) The axial magnetic flux densities at different lift-offs from the surface of the steel wire; (b) the axial magnetic flux densities at the interface obtained by simulation and extrapolation method utilizing polynomial function fitting.

置 L 一定时, 采用三阶多项式 $B_{\text{air}}^z(L, L_o) = P_1 L_o^3 + P_2 L_o^2 + P_3 L_o + P_4$ 拟合不同提离 L_o 下的轴向磁感应强度值, 获取各拟合系数 $P_1, P_2, P_3, P_4, L_o = 0$ 时的多项式取值 P_4 即为该处分界面上的轴向磁感应强度 $B_{\text{air}}^z(L, 0)$. 变换轴向位置 L 逐点拟合, 即可得到各轴向位置 L 处分界面上的轴向磁感应强度. 该方法采用多项式函数拟合来推算分界面上的轴向磁感应强度, 所以称为多项式外推法. 该方法推算出的 $B_{\text{air}}^z(L, 0)$ 和仿真取值结果如图 6 (b), 对比可知, 在轴向变化恒定磁场作用下, 利用该方法可准确地推算出 $L = 55 \text{ mm}$ 到 $L = 910 \text{ mm}$ 范围内钢丝分界面上的轴向磁感应强度 $B_{\text{air}}^z(L, 0)$.

4.3 分界面上法向磁感应强度推算方法

仿真提取 $L = 55 \text{ mm}$ 到 $L = 910 \text{ mm}$ 范围内钢丝外表面 1.5, 3, 4.5, 6 mm 提离下的法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, L_o)$, 如图 7 (a) 所示. 分析可知, 在该轴向变化恒定磁场作用下, 钢丝表面法向磁感应强度随提离 L_o 变化较快, 即钢丝表面法向磁感应强度梯度较大. 如图 7 (b) 所示, 当采用上述多项式外推法推算分界面上的法向磁感应强度时, 在法向磁感应强度梯度较大处, 推算出的法向磁感应强度与仿真取值结果相差较大.

为此, 本文基于磁场高斯定理推算钢丝分界面上法向磁感应强度, 简称该方法为高斯定理外推法. 取距磁化器轴向距离 L 处一段长 dL 的空气段作分析, 如图 8 (a) 所示, 该空气段为圆环形状, 用透明绿色标出. 沿轴向进入和穿出该空气区域的磁通量分别记为 $\Phi_{\text{air}}^z(L)$ 和 $\Phi_{\text{air}}^z(L + dL)$, 沿法向进入和穿出空气区域的磁通量分别记为 $\Phi_{\text{air}}^r(L, 0)$ 和 $\Phi_{\text{air}}^r(L, L_o)$. 由磁场高斯定理可知, 进入和穿出密闭区域的磁通量应相等, 故可得 (2) 式,

$$\begin{aligned} & \Phi_{\text{air}}^z(L) + \Phi_{\text{air}}^r(L, 0) \\ &= \Phi_{\text{air}}^z(L + dL) + \Phi_{\text{air}}^r(L, L_o). \end{aligned} \quad (2)$$

当长度 dL 和提离 L_o 较小时, (2) 式中的磁通量可分别由 (3)—(6) 式得出:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{air}}^z(L) &= \pi [(D/2 + L_o)^2 - (D/2)^2] \\ &\quad \times B_{\text{air}}^z(L, L_o), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Phi_{\text{air}}^r(L, 0) = \pi D dL B_{\text{air}}^r(L, 0), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{air}}^z(L + dL) &= \pi [(D/2 + L_o)^2 - (D/2)^2] \\ &\quad \times B_{\text{air}}^z(L + dL, L_o), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Phi_{\text{air}}^r(L, L_o) = \pi (D + 2L_o) dL B_{\text{air}}^r(L, L_o). \quad (6)$$

由 (2)—(6) 式可推算出轴向位置 L 处分界面上的法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$, 如 (7) 式所示:

$$\begin{aligned} & B_{\text{air}}^r(L, 0) \\ &= \frac{D + 2L_o}{D} B_{\text{air}}^r(L, L_o) - \frac{L_o(D + L_o)}{D dL} \\ &\quad \times [B_{\text{air}}^z(L, L_o) - B_{\text{air}}^z(L + dL, L_o)]. \end{aligned} \quad (7)$$

分析可知, 分界面上的法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$, 也可由钢丝表面同一提离下的法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, L_o)$ 和轴向磁感应强度 $B_{\text{air}}^z(L, L_o)$ 推得. 此处取 $L_o = 1.5 \text{ mm}$, $dL = 1 \text{ mm}$ 推算得到分界面上法向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$, 如图 8 (b) 所示. 钢丝表面法向磁感应强度梯度较大时, 同多项式外推法相比, 利用高斯定理外推法得到的 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$ 与仿真结果相差更小.

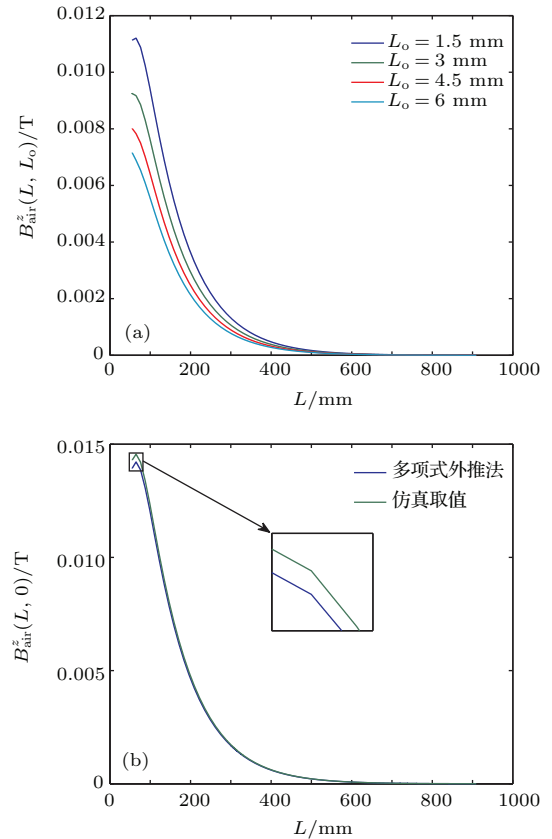


图 7 (网刊彩色) (a) 不同提离下法向磁感应强度; (b) 多项式外推法及仿真得到分界面上法向磁感应强度

Fig. 7. (color online) (a) The radial magnetic flux densities at different lift-offs from the surface of the steel wire; (b) the radial magnetic flux densities at the interface obtained by simulation and extrapolation method utilizing polynomial function fitting.

由上述分析可知, 分界面上磁感应强度不能直接测得, 但可通过图 5 所示的阵列霍尔探头测量构

件表面不同提高下的轴向和法向磁感应强度, 并进一步推算得到分界面上的磁感应强度. 其中分界面上轴向磁感应强度可用多项式外推法准确推算, 而

由于钢丝表面法向磁感应强度梯度较大, 采用高斯定理外推法比多项式外推法能更准确地推算分界面上的法向磁感应强度.

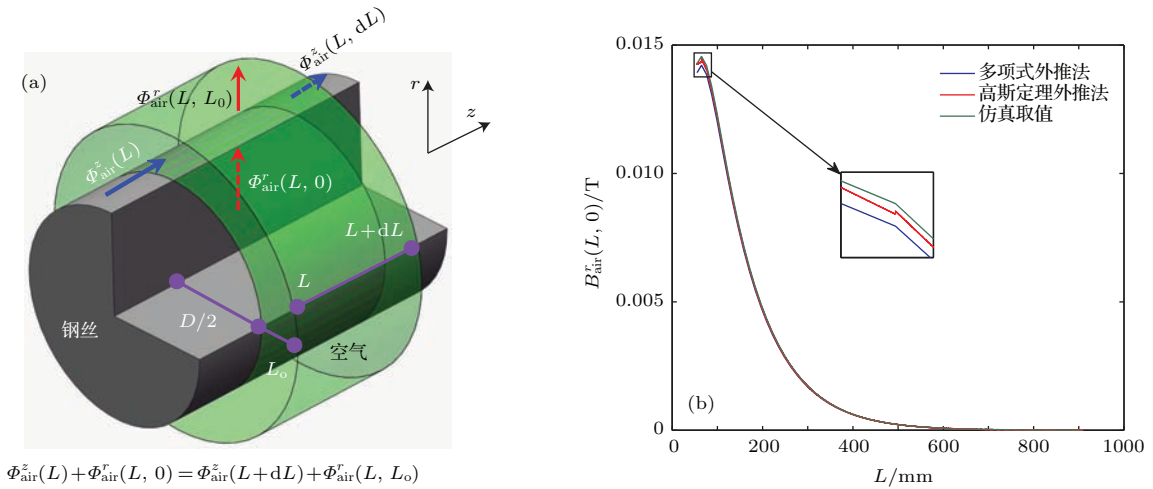


图8 (网刊彩色) (a) 单位长度 dL 空气中磁场高斯定理; (b) 两种外推法及仿真得到的分界面法向磁感应强度
 Fig. 8. (color online) (a) The Gauss's law for magnetism for the air with the unit length of dL ; (b) the radial magnetic flux densities at the interface obtained by simulation and extrapolation method utilizing polynomial function fitting and Gauss's law for magnetism.

5 起始磁化曲线测量实验及结果

基于图2所示的永磁恒定磁化器和图5所示的阵列霍尔探头, 搭建起始磁化曲线测量实验系统, 以研究永磁恒定磁场激励下起始磁化曲线测量的可行性.

5.1 实验系统

图9为起始磁化曲线测量实验系统布置图, 图中只截取了部分实验用钢丝以便完整显示实

验系统, 实验前对钢丝进行热处理以使其处于磁性中性状态. 永磁恒定磁化器用于在 $\Phi 7$ mm 钢丝上激励出随轴向位置变化的恒定磁场. 阵列霍尔探头连接在铝合金制平行导轨的滑块上, 可沿平行导轨左右滑动以感应钢丝不同轴向位置处的表面磁感应强度, 平行导轨的轨道左右两端分别与磁化器和支架相连, 磁化器与支架同钢丝的接触面处于同一平面内, 使得轨道方向与钢丝轴线平行, 从而可保证探头在各个轴向位置进行测量时, 其封装的霍尔元件与钢丝表面的提高保持不变.

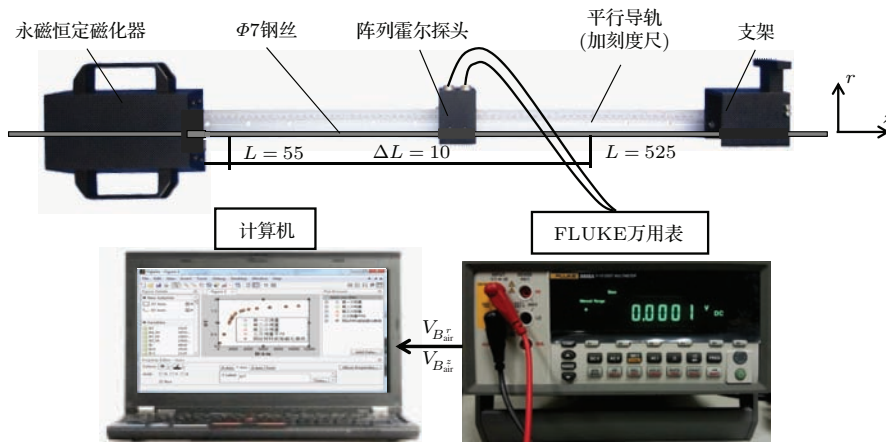


图9 起始磁化曲线测量实验系统布置图 (单位为 mm)
 Fig. 9. The layout diagram for the initial magnetization curve measurement system (in mm).

实际测量时选取轴向位置 $L = 55 \text{ mm}$ 到 $L = 525 \text{ mm}$ 作为测量区域, 因为由图 6(b) 和图 7(b) 可知, 当轴向位置 $L = 525 \text{ mm}$ 时, 分界面上的法向和轴向磁感应强度均趋近于零, 钢丝已处于起始磁化状态. 霍尔探头在测量区域内沿轴向移动, 每隔 $\Delta L = 10 \text{ mm}$ 作为一个测点, 重复测量三次. 探头中的霍尔芯片将钢丝表面各提离下的磁感应强度信号转换为电压信号, 并将其传送给 FLUKE 五位半万用表, 用计算机记录各测点万用表的电压值读数 VB_{air}^r 和 VB_{air}^z , 再结合 HAL 1823 霍尔芯片的灵敏度, 即可获取钢丝表面不同提离下的法向和轴向磁感应强度 $B_{\text{air}}^r(L, L_0)$ 和 $B_{\text{air}}^z(L, L_0)$. 根据第 2 节所述恒定磁场下起始磁化曲线测量理论, 由钢丝表面不同提离下的 $B_{\text{air}}^r(L, L_0)$ 和 $B_{\text{air}}^z(L, L_0)$ 推算出分界面上的 $B_{\text{air}}^r(L, 0)$ 和 $B_{\text{air}}^z(L, 0)$, 进一步计算即可得到钢丝材料的起始磁化曲线.

5.2 实验测量结果

由 4.3 节可知, 分界面上法向磁感应强度有两种推算方法: 多项式外推法和高斯定理外推法, 以下分别在上述两种方法下获取钢丝起始磁化曲线. 多项式外推法及高斯定理外推法下起始磁化曲线测量结果如图 10 所示. 其中, 两种方法的起始磁化曲线均是对三次重复测量信号处理后得到的, 其上下限分别对应着不同磁场强度下磁感应强度测量值的最大、最小值; 而缠绕线圈时变磁场励磁下测

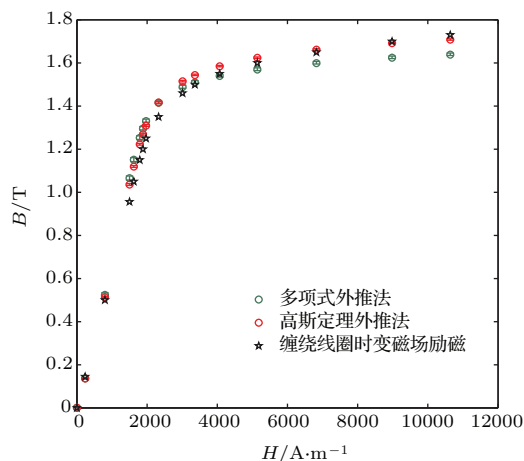


图 10 (网刊彩色) 两种外推法下起始磁化曲线测量结果及同缠绕线圈时变磁场励磁下起始磁化曲线测量结果对比分析

Fig. 10. (color online) Comparison of the initial magnetization curves obtained from time-varying magnetic field excited by wound coils with the measured initial magnetization curves based on the two extrapolation methods.

得的起始磁化曲线, 是将励磁线圈和感应线圈均缠绕在钢丝上, 采用时间变化磁场作为激励磁场测得 [19], 具体实验装置及测量过程详见文献 [19]. 缠绕线圈时变磁场励磁是一种常用的获取开环钢丝试件起始磁化曲线的方法, 这里将其结果作为钢丝真实起始磁化曲线. 定性分析图 10 可知, 高斯定理外推法下起始磁化曲线测量结果更接近于钢丝真实起始磁化曲线. 接下来, 进一步对两种推算方法下测量结果进行定量分析, 以深入比较两种方法的优劣性.

5.3 两种推算方法下测量结果对比分析

图 11 (a) 和图 11 (b) 分别表示多项式外推法和高斯定理外推法下三次重复测量的相对误差及相对误差标准差. 其中, 图 11 (a) 中误差为同等磁场强度时, 永磁恒定磁化下磁感应强度测量值与缠绕线圈时变磁场励磁下磁感应强度测量值的相对误差, 误差棒是对重复测量信号的相对误差处理后得到的, 其上下限分别对应着磁感应强度相对误差的最大、最小值.

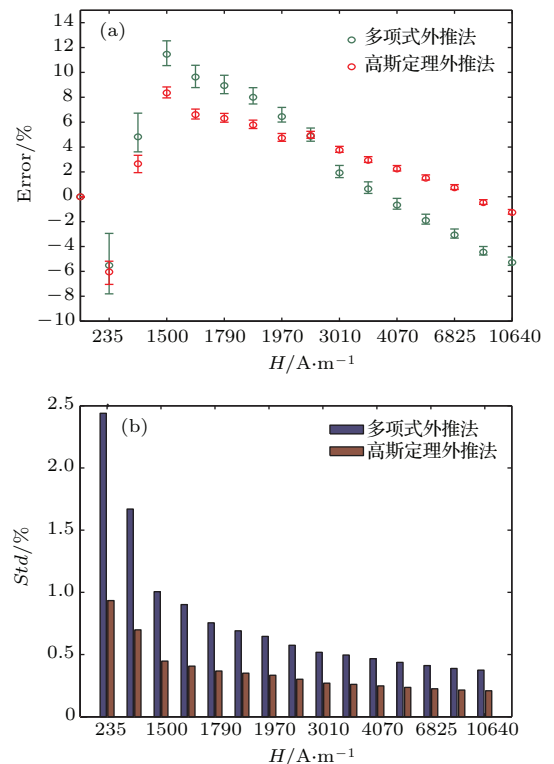


图 11 (网刊彩色)(a) 两种方法三次重复测量的起始磁化曲线相对误差; (b) 相对误差标准差

Fig. 11. (color online) (a) The relative error of three times repeated measurement of the initial magnetization curve based on the two extrapolation methods; (b) the standard deviation of the relative error.

分析图 11 (a) 可知, 多项式外推法和高斯定理外推法下磁感应强度相对误差随磁场强度的变化趋势大体相同, 不同磁场强度下相对误差不同, 磁场强度 1500 A/m 时两种方法的相对误差均较大. 而对比两种方法相对误差可知, 高斯定理外推法测量误差较小, 其不同磁场强度下的磁感应强度相对误差均小于 10%, 这是因为高斯定理外推法下得到的分界面上法向磁感应强度偏差较小. 进一步分析图 11 (b) 可知, 高斯定理外推法的相对误差标准差同样小于多项式外推法, 其不同磁场强度下的相对误差标准差均小于 1%, 即高斯定理外推法下, 起始磁化曲线测量重复性也较好.

综上所述, 实际测量时宜采用高斯定理外推法获取构件起始磁化曲线. 此时, 基于永磁恒定磁场激励的测量系统可在保证多次测量重复性的情况下, 获取相对误差小于 10% 的起始磁化曲线.

6 结 论

本文提出了一种基于永磁恒定磁场激励的起始磁化曲线测量原理, 并据此搭建了相应的起始磁化曲线测量系统. 该系统采用永磁磁化器产生空间变化恒定磁场而非通电线圈产生的时间变化磁场作为激励磁场, 因此无须在磁轭或者构件上缠绕励磁线圈, 采用阵列霍尔探头测量构件不同位置下的磁感应强度, 再通过多项式外推法和磁场高斯定理外推法, 来推算构件与空气分界面上的轴向和法向磁感应强度以获取起始磁化曲线, 而无须通过缠绕在构件上的感应线圈测量磁感应强度. 测量系统结构简单, 操作方便. 实际测量结果表明, 利用该系统测量圆柱形棒状构件的起始磁化曲线是可行的. 本文测量钢丝起始磁化曲线时, 认为其测量区域内的材料组织状态和结构参数如横截面积是相同的, 而实际中钢丝的材料组织状态和横截面积可能会因腐蚀等破坏而有所不同, 因此在线测量时应选取钢丝中状况较良好区域进行测量, 同时需研制嵌入式便携测量系统, 以更方便准确地获取钢丝等圆柱棒状铁磁构件的起始磁化曲线.

参考文献

- [1] Bozorth R M 1993 *Ferromagnetism* (Piscataway: IEEE Press) p602
- [2] Lloyd G M, Singh V, Wang M L, Hovorka O 2003 *IEEE Sens. J.* **3** 708
- [3] Tang D D, Huang S L, Chen W M, Zhang J 2006 *J. Sci. Instrum.* **27** 1695 (in Chinese) [唐德东, 黄尚廉, 陈伟民, 张洁 2006 仪器仪表学报 **27** 1695]
- [4] Stupakov O, Tomáš I, Kadlecová J 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 248
- [5] Karimian N, Wilson J W, Peyton A J, Yin W, Liu J, Davis C L 2014 *J. Magn. Magn. Mater.* **352** 81
- [6] Liu J, Wilson J, Strangwood M, Davis C L, Peyton A, Parker J 2015 *Int. J. Pres. Vess. Pip.* **132–133** 65
- [7] Sumitro S, Kurokawa S, Shimano K, Wang M L 2005 *Smart Mater. Struct.* **14** S68
- [8] Huang D Y 2012 *Ph. D. Dissertation* (Jilin: Jilin University) (in Chinese) [黄东岩 2012 博士学位论文 (吉林: 吉林大学)]
- [9] Tang D D, Huang S L, Chen W M, Jiang J S 2008 *Smart Mater. Struct.* **17** 025019
- [10] Huang D Y, Han B, Zhang T 2014 *J. Magn. Mater. Devices* **45** 55 (in Chinese) [黄东岩, 韩冰, 张涛 2014 磁性材料及器件 **45** 55]
- [11] Stupakov O, Wood R, Melikhov Y, Jiles D 2010 *IEEE Tran. Magn.* **46** 298
- [12] Deng D G, Wu X J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 237503 (in Chinese) [邓东阁, 武新军 2015 物理学报 **64** 237503]
- [13] He Y Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084105 (in Chinese) [何永周 2013 物理学报 **62** 084105]
- [14] Xu J, Cheng C, Wu X J, Shen G T 2012 *J. Huazhong Univ. Sci. Tech.* **40** 12 (in Chinese) [徐江, 程丞, 武新军, 沈功田 2012 华中科技大学学报 **40** 12]
- [15] Garshelis I J, Tollens S P L, Kari R J, Vandenbossche L P, Dupré L R. 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 08D910
- [16] Ben A R 2012 *M. S. Thesis* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [贲安然 2012 硕士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [17] Hu L, Zou J, Fu X, Yang Y H, Ruan X D, Wang C Y 2009 *Meas. Sci. Technol.* **20** 015103
- [18] Perevertov O 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 104701
- [19] Yuan J M 2012 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [袁建明 2012 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]

Measurement of initial magnetization curve based on constant magnetic field excited by permanent magnet*

Deng Dong-Ge Wu Xin-Jun[†] Zuo Su

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 31 January 2016; revised manuscript received 1 April 2016)

Abstract

The initial magnetization curve is closely related to the stress in ferromagnetic material, thus it could be used to evaluate the stress in ferromagnetic member online. However, the initial magnetization curve measurement system recommended by the technical standard IEC 60404-4 is not suitable for online application. It is inevitable to use excitation coils to generate the excitation field and induction coils to obtain the magnetic flux density, however winding coils closely and uniformly online is not easy to operate. To obtain the initial magnetization curve easily, a calculation method for initial magnetization curve under constant magnetization based on time-space transformation is put forward in this paper. The theoretical correctness of this method is validated through simulation with the constant current coil magnetization. Considering the fact that the constant magnetic field could also be provided by permanent magnets and that magnetizing ferromagnetic members online by permanent magnets are convenient to achieve, in this paper, we put forward the measuring principle of initial magnetization curve based on a constant magnetic field excited by permanent magnets further and set up the corresponding measurement system. This system employs permanent magnetizers as the excitation magnetic source, and adopts symmetric magnetization methods to produce a constant magnetic field on a cylindrical rod-shaped member. The excited constant magnetic field changes along the axial position of the member. Under this exciting field, the axial and radial magnetic flux densities at different lift-offs from the surface of the member are measured by a testing probe including Hall chip array. Then, the axial and radial magnetic flux densities at the interface between the member and air are calculated based on the extrapolation method through utilizing polynomial function fitting and the Gauss's law for magnetism. Furthermore, the axial magnetic field strength within the member is calculated from the axial magnetic flux density at the interface according to the continuity of the tangential magnetic field strength. On the other hand, the induced magnetic flux density within the member is calculated from the radial magnetic flux density at the interface on the basis of the Gauss' law for magnetism, the basic equation of magnetization curve in Rayleigh region and the law of approach to saturation. Finally, the initial magnetization curve could be measured. System measurement results show that with no excitation coils nor induction coils, the initial magnetization curve of the cylindrical rod-shaped member can be easily obtained from the axial and radial magnetic flux densities at the interface of the member under the constant magnetic field excited by permanent magnetizers. The measurement error is less than 10%, and the standard deviation of the error is less than 0.01, which shows that the measurement repeatability is good. Therefore, this proposed system could provide a new approach to measuring the initial magnetization curve of cylindrical rod-shaped members online conveniently.

Keywords: initial magnetization curve, on-line measurement, constant magnetic field, permanent magnets

PACS: 81.70.Ex, 75.60.Ej

DOI: 10.7498/aps.65.148101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51477059).

[†] Corresponding author. E-mail: xinjunwu@mail.hust.edu.cn