

基于 Metglas/PFC 磁电层状复合材料的 电能无线传输系统*

于歆杰[†] 吴天逸 李臻

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

(2012年7月8日收到; 2012年9月11日收到修改稿)

本文完整推导了无直流偏磁条件下, 磁致伸缩材料和压电材料黏接而得的磁电层状复合材料输出电压、电流、磁电系数表达式, 制备了多个样品并实现了电能无线传输系统. 对样品的测试结果验证了理论分析的正确性. 进一步试验结果表明: 磁电层状复合材料的输出具有倍频特性, 材料长度与谐振频率成反比, 谐振状态下样品可在 20 Oe 的磁场中输出接近 100 V (有效值) 开路电压, 样品最大传输功率为 520 mW (此为该传输方式下公开报道的最大功率), 功率密度为 1.21 W/cm^3 , 样品最大传输效率达 35%, 30° 以内的偏转角度对材料的输出无显著影响. 试验结果表明, 基于 Metglas/PFC 磁电层状复合材料是小体积、小功率、对传输效率不甚敏感的电能无线传输应用的一种非常有前景的实现方式.

关键词: 磁电复合材料, 无线能量传输

PACS: 85.70.Ec, 85.50.-n, 85.80.Jm, 88.80.ht

DOI: 10.7498/aps.62.058503

1 引言

磁电层状复合材料将压电材料和磁致伸缩材料黏接而成, 实现了从磁场到电场的物理联系. 由于 2-2 型磁电层合材料的磁电系数高达几百 $\text{V/cm}\cdot\text{Oe}^{[1]}$ ($\text{Oe} = 79.5775 \text{ A/m}$), 因此被广泛应用于交流和直流磁场的信号检测领域和相应的电流检测领域^[2]. 近年来国内外研究者对其特性进行了深入研究^[3-5].

电能无线传输具有广阔的应用前景^[6]. 当前主要的研究热点在于采用电磁感应^[7]或磁耦合谐振^[8]的方式. 前者基于法拉第电磁感应定律, 传输功率可超过 1 kW, 传输距离小于 1 m, 效率可超过 80%, 缺陷是对线圈对正有严格的要求. 后者基于磁谐振原理, 传输功率为几百 W, 传输距离大于 1 m, 效率约为 50%, 缺陷是线圈体积比较大. 因此这两种方式在实际应用中均受到一定限制.

磁电层合材料的体积很小, 同时位置偏移对磁电系数的影响不大. 这两个优点很适合将其应用于电能无线传输领域. 如果能够作为电能无线传输系统的接收端, 只要磁场足够大, 对电荷的收集电路效率足够高, 完全可以在小体积、小功率场合取得广泛应用. 但将磁电层合材料用于电能无线传输的研究很长时间以来未得到应有的重视. 直到 2008 年 O'Handley 课题组才完成 L-T 模式下 200 mW 的电能无线传输 (100 Ω 负载、60 kHz 激励、交流磁场 20 Oe)^[9]. 文玉梅课题组于 2010 年用 PZT 材料和 Terfenol-D 材料实现交流 1 Oe 磁场下 20 μW 的功率传输^[10], 并于 2012 年探讨了偏置电压对磁致伸缩/压电层合换能结构磁电性能影响^[11].

2 交流磁场作用下推拉结构层状复合磁电材料特性

将磁电层合材料应用于电流和磁场检测时需

* 国家自然科学基金 (批准号: 50877039) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: yuxj@tsinghua.edu.cn

要施加直流偏置磁场, 以充分利用磁致伸缩材料在形变特性曲线上的最大斜率. 但对于电能无线传输这一应用场合来说, 输出范围很大, 只能考虑在无

直流偏转磁场作用下材料的磁电特性, 故需要从本构方程开始推导其物理规律. 首先建立 L-L 型磁电层合材料坐标系如图 1 所示.

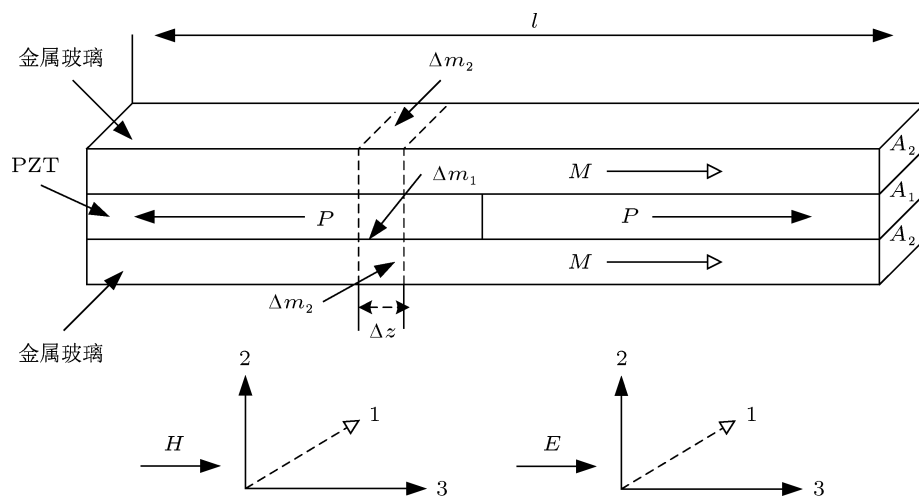


图 1 推拉结构下的复合磁电材料坐标系

2.1 磁电层合材料的输出电压电流

压电相的本构方程为

$$S_{3p}(z) = S_{33}^D T_{3p}(z) + g_{33,p} D_3, \quad (1a)$$

$$E_3(z) = -g_{33,p} T_{3p}(z) + \beta_{33}^T D_3, \quad (1b)$$

其中 D_3 是位移矢量, ϵ_{33}^T 是恒定压力下的介电常数, S_{33}^D 是恒定电场强度下的弹性系数, $g_{33,p}$ 是横向压电系数, T_{3p} 和 S_{3p} 是长度方向的压电相应力和应变.

磁致伸缩相的本构方程为

$$S_{3m}(z) = S_{33}^H T_{3m}(z) + f(H_3), \quad (2a)$$

$$B_3 = f_1(T_{3m}(z)) + \mu_{33}^T H_3, \quad (2b)$$

其中 H_3 是磁场强度, B_3 是磁感应强度, μ_{33}^T 是恒定压力下的磁导率, S_{33}^H 对应恒定磁场强度下磁电相的弹性系数, $d_{33,m}$ 是压磁系数, T_{3m} , S_{3m} 是长度方向的应力和应变, $f(H_3)$ 表示由外加较大的变化磁场引起的材料应变.

由牛顿第二定律得到系统的运动方程为

$$(\Delta m_1 + 2\Delta m_2) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \Delta T_{3p}(A_1) + \Delta T_{3m}(2A_2), \quad (3)$$

其中 $\Delta m_1 = \rho_p A_1 \Delta z$, $\Delta m_2 = \rho_m A_2 \Delta z$, ρ_p 和 ρ_m 分别是压电材料和磁致伸缩材料的密度, A_1 和 A_2 分别是压电相和磁致伸缩相的截面积. 总截面积

$A_{1am} = A_1 + 2A_2 = t_{1am} w$, $t_{1am} = t_p + 2t_m$, t_{1am} 是材料总厚度, w_{1am} 是材料宽度. 令 $n = 2A_2/A = 2t_m/t_{1am}$ 为磁致伸缩相的厚度比, $\bar{\rho} = \frac{\rho_p A_1 + \rho_m (2A_2)}{A}$ 为材料平均密度, (3) 式可表示为

$$\bar{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = n \frac{\partial T_{3,m}}{\partial z} + (1-n) \frac{\partial T_{3,p}}{\partial z}, \quad (0 < n < 1). \quad (4)$$

利用 (1a) 和 (2a) 式求出 $T_{3,p}$ 和 $T_{3,m}$, 将其代入 (4) 式, 可以得到

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \bar{v}^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (5)$$

其中 $\bar{v}^2 = \left(\frac{n}{s_{33}^H} + \frac{1-n}{s_{33}^E} \right) / \bar{\rho}$ 为波速. 不妨设磁电材料做简谐振动, 则 (5) 式的一般解形式为 $u = u(z) = A \cos kz + B \sin kz$. u 是一个在 z 方向上做简谐振动的向量, 可定义 $\dot{u} = j\omega u$. $\dot{u}_1 = j\omega u(0)$ $\dot{u}_2 = j\omega u(l)$. 把 \dot{u}_1 和 \dot{u}_2 当作已知量, 则可以得到特解

$$u(z) = \frac{\dot{u}_1}{j\omega} \cos kz + \frac{\dot{u}_2 - \dot{u}_1 \cos kl}{j\omega \sin kl} \sin kz. \quad (6)$$

由 $S = \frac{\partial u}{\partial z}$ 可算得 $S(0) = \frac{\dot{u}_2 - \dot{u}_1 \cos kl}{j\bar{v} \sin kl}$, $S(l) = \frac{\dot{u}_2 \cos kl - \dot{u}_1}{j\bar{v} \sin kl}$. 根据在材料边界处受力平衡这个条件可以得到边界外力方程

$$F_1 = -(A_1 T_{3p} + 2A_2 T_{3m})|_{z=0}, \quad (7a)$$

$$F_2 = -(A_1 T_{3p} + 2A_2 T_{3m})|_{z=l}. \quad (7b)$$

根据 (1a) 式和 (2a) 式, 用 S_{3p} 和 S_{3m} 来表示 T_{3p} 和 T_{3m} , 代入 (7a) 式和 (7b) 式可得

$$F_1 = - \left(\frac{A_1}{S_{33}^D} + \frac{2A_2}{S_{33}^H} \right) \frac{\dot{u}_2 - \dot{u}_1 \cos kl}{j\bar{v} \sin kl} + \frac{A_1 g_{33,p}}{S_{33}^D} D_3 + \frac{2A_2}{S_{33}^H} f(H_3), \quad (8a)$$

$$F_2 = - \left(\frac{A_1}{S_{33}^D} + \frac{2A_2}{S_{33}^H} \right) \frac{\dot{u}_2 \cos kl - \dot{u}_1}{j\bar{v} \sin kl} + \frac{A_1 g_{33,p}}{S_{33}^D} D_3 + \frac{2A_2}{S_{33}^H} f(H_3). \quad (8b)$$

推拉结构模式下压电材料是沿着长度方向进行极化的. 由 (1a) 式和 (1b) 式可得

$$E_3 = \frac{-g_{33,p}}{S_{33}^D} S_{3p} + \left(\frac{g_{33,p}^2}{S_{33}^D} + \beta_{33}^T \right) D_3.$$

令 $\bar{\beta}_{33} = \beta_{33}^T \left(1 + \frac{g_{33,p}^2}{S_{33}^D \beta_{33}^T} \right)$ 可化简为 $E_3 = \frac{-g_{33,p}}{S_{33}^D} S_{3p} + \bar{\beta}_{33} D_3$. 则推拉式压电材料的输出电压和输出电流为

$$V_{\text{out}} = \frac{1}{2} \left(\int_{l/2}^l E_3 dz + \int_{l/2}^0 -E_3 dz \right) = \frac{-g_{33,p}}{j2\omega S_{33}^D} (\dot{u}_1 + \dot{u}_2), \quad (9)$$

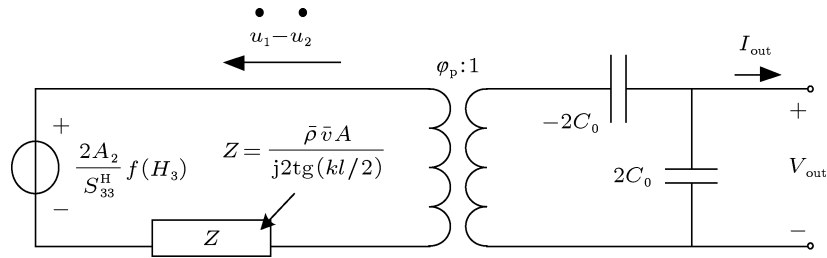


图2 推拉结构磁电材料自由振动等效电路图

根据图2可知, 对于 m 个推拉结构并联的层状复合磁电材料的输出电压为

$$|V| = \frac{nl g_{33,p}}{2m(n S_{33}^E (1 - k_{33,p}^2) + (1 - n) S_{33}^H)} f(H_3). \quad (13)$$

在谐振状态下, 必须考虑到损耗. 在忽略压电陶瓷的介电损耗和磁致伸缩层的涡流损耗的情况下, 材料的品质因数 Q 可以近似为材料的机械品质

$$I_{\text{out}} = j\omega(2C_0)V_{\text{out}} + \varphi_p(\dot{u}_2 - \dot{u}_1), \quad (10)$$

$$\text{其中 } C_0 = \frac{A_1}{\bar{\beta}_{33} l / 2}, \quad \varphi_p = \frac{A_1 g_{33,p}}{S_{33}^D \bar{\beta}_{33} l / 2}.$$

2.2 磁电层合材料的等效电路和磁电电压系数

为求推拉式磁电层合材料的等效电路模型, 可利用 $\frac{1}{\text{tg}\alpha} = \frac{1}{\sin\alpha} - \text{tg}\frac{\alpha}{2}$ 并令 $Z_1 = j\bar{\rho}\bar{v}A\text{tg}\frac{kl}{2}$,

$Z_2 = \frac{\bar{\rho}\bar{v}A}{j\sin kl}$, 可将 (8a) 式和 (8b) 式化简为

$$F_1 = Z_1 \dot{u}_1 + \left(Z_2 + \frac{\varphi_p^2}{j\omega(-2C_0)} \right) (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) + \varphi_p V + \frac{2A_2}{S_{33}^H} f(H_3), \quad (11)$$

$$F_2 = -Z_1 \dot{u}_2 + \left(Z_2 + \frac{\varphi_p^2}{j\omega(-2C_0)} \right) (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) + \varphi_p V + \frac{2A_2}{S_{33}^H} f(H_3). \quad (12)$$

把材料两端外力模拟为电路中的电压, 两端的速度模拟为电路中的电流, 并进一步认为当材料自由振动时, 两端受力为零 (即 $F_1 = F_2 = 0$), 可得此时的等效电路如图2所示.

因数 Q_{mech} 因此可将图2中的 Z 考虑为

$$Z_{\text{mech}} = R_{\text{mech}} + j\omega L_{\text{mech}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{mech}}}. \quad (14)$$

进一步可推知, m 个推拉结构并联的层状复合磁电材料的输出电压为

$$|V| = \left| \frac{1}{2m} \frac{8Q_{\text{mech}}}{\pi^2} \times \frac{nl g_{33,p}}{n S_{33}^E (1 - k_{33,p}^2) + (1 - n) S_{33}^H} f(H_3) \right|. \quad (15)$$

3 推拉结构层状复合磁电材料电能无线传输试验

3.1 磁电层合材料的制备和电能无线传输系统的实现

为制备磁电层合材料, 购买了美国 Advanced Cerametrics 公司的压电陶瓷纤维片 (piezoelectric fiber composite, PFC) 作为压电相的材料 [12] (尺寸为 132 mm×14 mm×0.3 mm, 型号为 PFC-W14, 内部叉指电极的间距为 0.7 mm), 安泰科技的铁基非晶合金带材 Metglas 作为磁致伸缩相的材料 [13]. 先用两片 Metglas 片通过环氧树脂黏合成一层, 在 80 °C 烤箱中, 保温 3 h, 共制作 2 层, 厚度为 30 μm. 再将两层 Metglas 片和压电纤维片用环氧树脂黏合在一起, 制成三明治结构, 在 80 °C 烤箱中加压力保温 3 h. 最后在压电纤维片的电极上用导电银胶粘好引线. 最终得到的磁电层合材料如图 3 所示.



图 3 磁电层合材料

对于电能无线传输系统而言, 需要交流磁场发生装置将电能转换为磁场能, 然后由制备的磁电层合材料将磁场能转换为电场能并加以利用. 我们研制了直径为 5 cm、长度为 17 cm 的螺线管线圈, 用高功率放大器对其供电, 实测中心点最大磁场强度可达 60 Oe/A. 图 4 给出了构成的电能无线传输系统示意图. 其中 \dot{U}_1 表示电压 u_1 的向量, 其余支路量的含义可依此类推. 电容用于补偿无功电流. 测量负载电阻上的电压和电流可得磁电材料的输出.

总共制备了尺寸为 (32 mm×11 mm×0.3 mm), (130 mm×11 mm×0.3 mm) 和 (96 mm×11 mm×0.3 mm) 3 个磁电材料样品, 分别标记为样品 1, 2 和 3. 3 个样品均进行了开路电压试验和功率传输试验,

并用 (15) 式分析了理论开路电压并与试验结果进行比对. 比对结果均能说明理论分析的正确性. 下面给出样品 1 和 2 开路电压与功率传输等电气特性试验的结果和样品 3 理论与试验结果比对的结果. 所有磁电材料样品自由放置在螺线管线圈中间的光滑纸质的平台上.

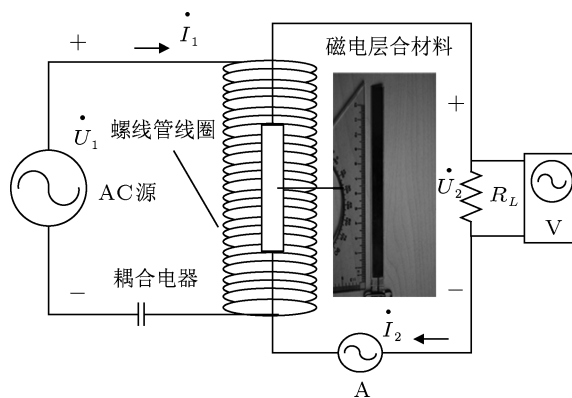


图 4 包含磁电层合材料的电能无线传输系统

3.2 磁电层合材料特性试验

为了得到理论输出电压, 需要对磁致伸缩材料的特性曲线进行拟合. 在图 5 包括的 Metglas 特性曲线 [14] 中, 用 Origin® 软件的 GaussAmp 函数可拟合出磁致应变曲线为 $f(H_3) = (41.67 - 41.87)e^{\frac{(H_3 - 0.0227)^2}{2 \times 10.9^2}}$. 图 5 给出了原始曲线和拟合曲线, 可见拟合度较高.

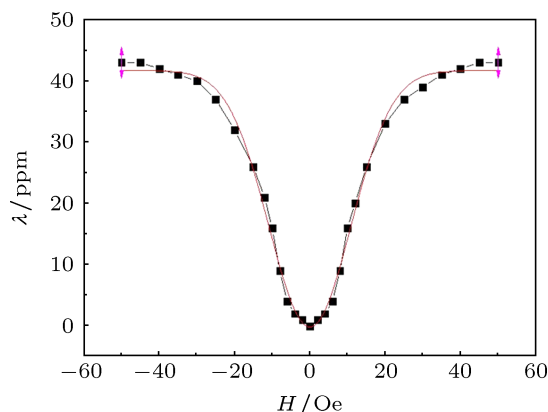


图 5 磁致伸缩材料应变特性的拟合

由于磁致伸缩曲线的对称性, 所以当磁场信号只有交流分量, 没有直流偏磁时, 致伸缩应变的

变化频率是交流磁场变化频率的 2 倍. 通过对信号的快速离散傅里叶分析也表明, 磁致应变的 2 倍频分量要远大于其他频率的分量. 设 $f(H_3) = A_0 + A_1 \sin \omega t + A_2 \sin(2\omega t) + \dots + A_n \sin(n\omega t)$, 其中除了 A_0, A_2 其余频率分量的系数都很小, 可以认为是零. 当 $2\omega = \omega_s$ 时, 磁电材料发生谐振, 输出电压和 A_2 幅值成正比. 针对图 5 所示曲线, 在实验室给定不同磁场 H_3 下, 通过快速离散傅里叶变换, 得到对应的 A_2 , 代入 (15) 式即可算出不同磁场激励下磁电材料的输出电压. 不同的磁电层合材料粘接工艺对材料的机械品质因数具有较大影响, 但 Q_{mech} 往往难以测量. 因此国内外文献采用的通行方式是估计某个 Q_{mech} , 利用该参数和 (15) 式和图 5 进行理论分析, 得到样片的理论输出电压, 再与实验测量结果比对. 图 6 给出 $Q_{\text{mech}} = 460$ 时, 理论计算的磁电输出电压和实验测得曲线 (样品 3) 对比图 (谐振频率 8.8 kHz, $S_{33}^H = 1/77 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$, $S_{33}^E = 41 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$, $k_{33,p} = 0.67$, $d_{33,p} = 550 \times 10^{-12} \text{ C/N}$, $g_{33,p} = d_{33,p}/1876 \times 8.85 \times 10^{-12}$, $m = 96$, $n = 0.1$, $l = 0.096 \text{ m}$. 所有参数均取自 Metglas 和 PFC 的 Datasheet 和对所制备材料的实际测量结果. H 从 2.59 Oe 变化至 26.04 Oe 的范围内, $f(H_3)$ 对应的系数 A_2 从 0.58×10^{-6} 变化至 18.59×10^{-6}). 可以看出, 理论计算值和实验测得值相比, 在前后两段符合得较好, 但在中间一段符合程度一般, 原因在于实验中的磁电电压输出饱和得较早. 这可能与 Metglas 应变曲线的测量误差有关. 对样片 1 和 2 的比对结果同样支持上述结论.

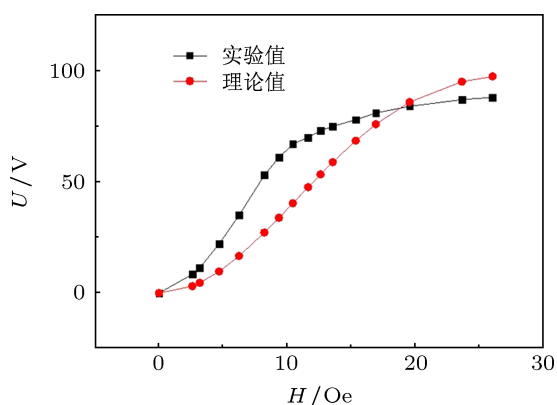


图 6 样品 3 理论输出电压与实际输出电压的比对

图 7 给出了不同交流磁场下, 谐振时样品 3 实测的磁电电压系数. 可见在相当大的磁场范围内,

该磁电层合材料均具有超过 100 V/cm·Oe 的磁电电压系数.

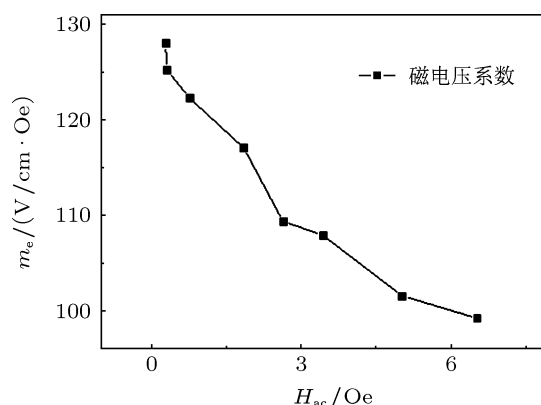


图 7 样品 3 的磁电系数

在 24 Oe 磁场 ($f = 8.8 \text{ kHz}$) 下, 测得样品 3 的短路电流是 90 mA, 开路电压是 170 V, 根据戴维南定理算得等效输出电容是 10 nF, 根据第 2 节推导的 $C_0 = \frac{A_1}{\beta_{33} l/m}$, 可以算得材料的输出电容是 13 nF. 二者符合程度可以接受.

图 8 给出了样品 3 的实测波形, 其中 u_1 和 u_2 分别为图 4 中电源电压和负载电压波形. 可见纯交流激励下, 磁电层合材料的输出确有倍频特性, 验证了本文此前的推断.

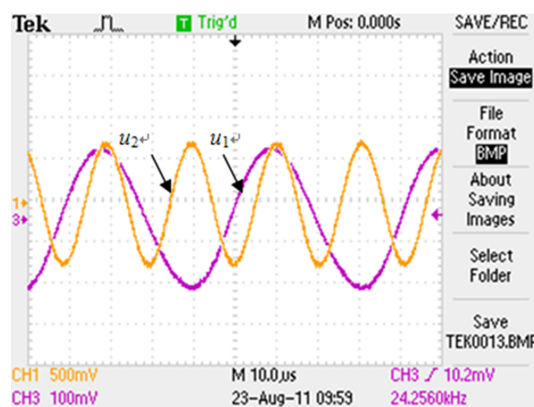


图 8 磁电层合材料的倍频特性 (u_1 和 u_2 分别为图 4 中电源电压和负载电压波形)

3.3 磁电层合材料电气性能试验

图 9 给出样品 1 和 2 开路输出电压与频率的关系. 由图可知样品 1 和 2 的一阶谐振频率分别是 24.9 kHz, 6.9 kHz. 较长的复合材料具有较低谐振频率. 根据前面的推导不难得知, 磁电层合材料的

一阶谐振频率 $\omega_s = \frac{\pi \bar{v}^{[12]}}{l}$, 其中 \bar{v} 是复合材料的声速, l 是复合材料的长度. 试验结果与理论分析吻合度良好. 材料的 Q 值较大, 故输出电压在谐振频率点附近对频率变化非常敏感.

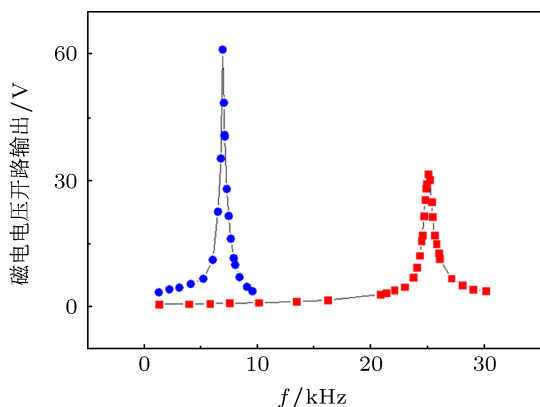


图9 磁电电压开路输出的频率特性

图 10 给出谐振状态下, 样品 1 和 2 的输出电压随螺线管线圈中磁场强度的变化. 该图表明, 开路输出电压随着线圈的电流的增加而逐渐达到饱和, 这是由于图 5 中 Metglas 的饱和磁致伸缩效应所致. 当复合磁电材料达到输出电压的饱和区时, 增加螺线管线圈的电流对输出电压和输出功率没有太大作用.

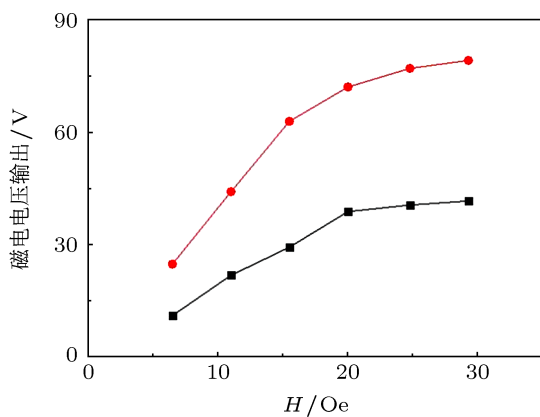


图 10 磁电电压输出随磁场强度变化曲线

图 11 给出了谐振频率下, 两个样品的负载功率输出特性. 样品 1 在 20 Oe, 24.9 kHz 的磁场下, 当负载电阻 5.6 kΩ 时, 达到了 147 mW 的峰值功率. 样品 2 在 24 Oe, 6.9 kHz 的磁场下, 当负载电阻为 3.3 kΩ 时, 达到 520mW 的峰值功率. 样品 2 体积为 0.429 cm³, 功率密度为 1.21 W/cm³. 与磁谐振电能

无线传输相比, 磁电层合材料具有体积小, 功率密度高的特点.

接下来, 计算并测量了无线能量传输系统的效率. 效率计算公式为

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{\dot{U}_1 \dot{I}_1 \cos \varphi_1} = \frac{U_2 I_2}{I_1^2 \text{Re}(Z_1)} \quad (16)$$

我们在实验前用阻抗分析仪测量了激励线圈的阻抗. 图 12 给出了样品 1 和 2 的传输效率. 可以看到, 由于逆磁电效应对输入的影响很小, 可以忽略不计, 故功率输出最大点也是传输效率最大点. 此外, 样品 1 的效率比样品 2 低了很多, 这有两方面的原因造成. 其一激励线圈阻抗的实部从 6.9 kHz 到 24.9 kHz 增加了很多, 导致输入功率增大了很多; 其二, 样品 2 的输出功率比样品 1 大了将近 3 倍. 因此两者的效率差距非常大. 样品 2 的最高效率可以达到 35%. 对于小功率应用来说, 对小体积的需求往往会比对效率的需求更大, 因此该材料可适用于小体积、小功率对传输效率不甚敏感的场所.

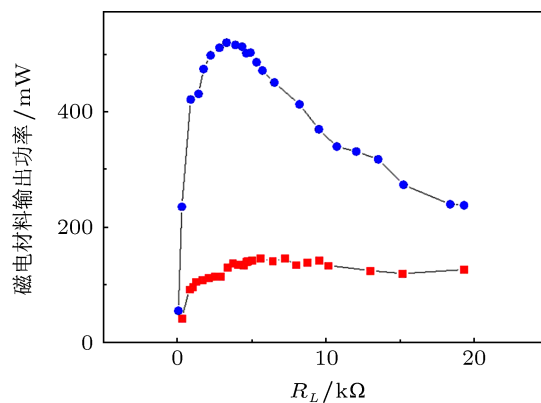


图 11 磁电材料输出功率负载特性

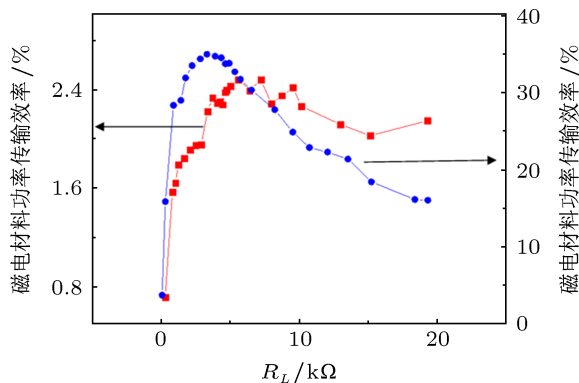


图 12 磁电材料功率传输效率负载特性

上述实验说明, 增大该磁电复合材料的长度,

可以降低谐振频率, 增大输出功率, 提高传输效率. 然而, 当磁电材料的谐振频率降到人耳可以听到的频率范围内时会引起噪声. 因此需要结合应用场合的尺寸需求, 进行优化设计.

最后研究位置偏转对传输效率的影响. 图 13 是磁场方向和材料摆放位置示意图, 复合磁电材料和磁场方向的夹角为 θ . 我们用细胶带将材料中间固定, 然后测试不同夹角时的空载电压输出.

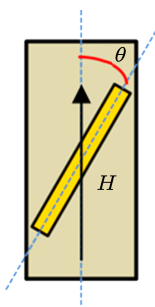


图 13 磁电材料相对磁场角度偏移

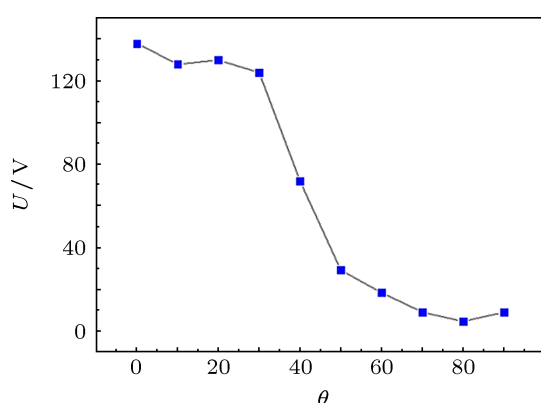


图 14 磁电材料样品 2 输出电压随偏转角度变化曲线图

图 14 是样品 2 开路输出电压随角度变化曲线.

可以看到在 0° — 30° 时, 输出电压基本保持不变, 当大于 30° 时输出电压明显下降, 当角度增大到 50° 时, 输出电压峰峰值维持在较低水平, 且变化幅度很小. 相对于电磁感应型电能无线传输来说, 30° 的无损偏转角度是很大的改进.

4 结论

本文推导了无直流偏磁条件下磁电层状复合材料输出电压、输出电路、磁电电压系数表达式, 得到了相应的等效电路. 制备了 3 个长度不同的 Metglas/PFC 层合样品, 验证了理论分析过程中输出电压、倍频、等效电容的正确性, 进行了频率特性试验、开路电压试验、功率特性试验、效率特性试验和偏转角度试验, 结论如下:

1. 样品长度与谐振频率成反比, 3 个尺寸为 ($32 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$), ($130 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$) 和 ($96 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$) 样品的谐振频率分别为 24.9 kHz, 6.9 kHz 和 8.8 kHz;

2. 谐振状态下, 样品可在 20 Oe 磁场中输出接近 100 V(有效值) 开路电压, 随螺线管线圈激励电流的增加, 开路输出电压有饱和趋势;

3. 在 24 Oe, 6.9 kHz 谐振状态的磁场下, 当负载电阻为 3.3 k Ω 时, 样品 2 达到 520 mW 的峰值功率, 功率密度为 1.21 W/cm³(体积为 0.429 cm³), 说明磁电层合材料具有体积小、功率密度高的特点;

4. 谐振状态下, 样品的传输效率可达 35%, 说明磁电层合材料基本可满足小体积、小功率、对传输效率不甚敏感的电能无线传输应用的需求;

5. 30° 以内的偏转角度对样品的开路输出电压(等同于传输的功率)无明显影响, 说明磁电层合材料对位置不敏感.

- [1] Dong S X, Li J F, Viehland D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2265
- [2] Nan C W, Bichurin M I, Dong S X, Viehland D, Srinivasan G 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 031101
- [3] Wen Y M, Wang D, Li P, Chen L, Wu Z Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 097506 (in Chinese) [文玉梅, 王东, 李平, 陈蕾, 吴治峰 2011 物理学报 **60** 097506]
- [4] Bao B H, Luo Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017508 (in Chinese) [鲍丙豪, 骆英 2011 物理学报 **60** 017508]
- [5] Bi K, Ai Q W, Yang L, Wu W, Wang Y G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 057503 (in Chinese) [毕科, 艾迁伟, 杨路, 吴玮, 王寅岗 2011 物理学

报 **60** 057503]

- [6] Stewart W 2007 *Science* **317** 55
- [7] Casanova J, Zhen N, Lin J 2009 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **56** 830
- [8] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, Joannopoulos J D, Fisher P, Soljacic M 2007 *Science* **317** 83
- [9] O'Handley R C, Huang J K, Bono D C, Simom J 2008 *IEEE Sens. J* **8** 57
- [10] Li P, Wen Y, Liu P, Li X, Jia C 2010 *Sensor Actuat. A-Phys* **157** 100
- [11] Dong S X, Zhai J Y, Li J F, Viehland D 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 062502

- [12] Li P, Huang X, Wen Y M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 137504 (in Chinese) 252904
[李平, 黄娴, 王玉梅 2012 物理学报 **61** 137504]
- [13] Dong S X, Zhai J Y, Li J F, Viehland D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 351
[14] Zhai J, Xing Z, Dong S, Li J, Viehland D 2008 *J. Am. Ceram. Soc.* **91** 351

Wireless energy transfer system based on metglas/PFC magnetoelectric laminated composites*

Yu Xin-Jie[†] Wu Tian-Yi Li Zhen

(State Key Lab. of Power System, Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 8 July 2012; revised manuscript received 11 September 2012)

Abstract

Wireless energy transfer has broad prospective applications. Current researches focus on electromagnetic induction and magnetic resonance. The former approach is sensitive to position and the latter has larger size, both of which affect the broad application of wireless energy transfer. Two layers of magnetostrictive effect materials and one layer of piezoelectric effect material are bound by epoxy resin, which generates magnetoelectric laminated composite. It is the first time that the output voltage, current and magnetoelectric factor have been deduced without DC magnetic bias. Three samples are implemented and the wireless energy transfer system based on them is developed. The tests on the samples verify the correctness of the theoretic analysis. Further experiments illustrate that there are double frequency characteristics for the magnetoelectric laminated composites; the resonant frequency is proportional to the reciprocal of the length of the composite; the open circuit voltage of the composite could reach 100 V (rms) under a magnetic field of 20 Oe; the maximum energy transferred is 520 mW, which is the highest record reported up to now, with the energy density 1.21 W/cm³ and maximum transfer efficiency 35%; the rotation less than 30° has little effect on the output of the composites. Theoretical analyses and experimental results suggest that the magnetoelectric laminated composite based on Metglas/PFC is a very interesting approach to small volume and small power wireless energy transfer applications.

Keywords: magnetoelectric laminated composites, wireless energy transfer

PACS: 85.70.Ec, 85.50.-n, 85.80.Jm, 88.80.ht

DOI: 10.7498/aps.62.058503

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50877039).

[†] Corresponding author. E-mail: yuxj@tsinghua.edu.cn