

# 高温超导励磁低温超磁致致动器优化设计

蔡炯炯<sup>1</sup>, 葛惠民<sup>1</sup>, 曹志彤<sup>2</sup>, 张耀<sup>1</sup>

(1. 浙江机电职业技术学院, 浙江省 杭州市 310053; 2. 浙江大学, 浙江省 杭州市 310012)

## Design of a Cryogenic Giant Magnetostrictive Actuator Excited by HTS

CAI Jiong-jiong<sup>1</sup>, GE Hui-min<sup>1</sup>, CAO Zhi-tong<sup>2</sup>, ZHANG Yao<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Hangzhou 310053, Zhejiang Province, China;

2. Zhejiang University, Hangzhou 310012, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** An actuator of cryogenic giant magnetostrictive materials (CGMM) excited by high temperature superconductor (HTS) is designed, taking into account both the coupled field characteristics of the CGMM and the anisotropy of the investigated Bi2223/Ag HTS tapes. Then an optimal structure, which costs the least HTS tapes while still make the CGMM to the state of saturation, is realized by combining the genetic algorithm (GA) with the coupled field iteration of finite element method (FEM). The algorithm and corresponding CAD software proved a effective tool for designing and studying devices constructed by coupled field materials or HTS.

**KEY WORDS:** cryogenic giant magnetostrictive materials; coupled field iteration of FEM; high temperature superconductor; genetic algorithm

**摘要:** 在研究低温超磁致材料(cryogenic giant magnetostrictive materials, CGMM)磁-机-电的场强耦合特性和高温超导材料带(high temperature superconductor, HTS)各向异性的基础上, 设计了高温超导励磁的低温超磁致致动器。结合有限元场耦合计算方法, 利用遗传算法进行了优化计算, 计算结果表明, 可以找到一个最佳位置, 在超磁致材料性能充分发挥的同时, 使高温超导带的使用量最少。基于超导特性并结合 CGMM 耦合有限元分析模型的遗传算法以及 CAD 软件为以多场耦合转换材料为基础的微操作机构与器件的设计提供了有益的经验 and 可借鉴的方法。

**关键词:** 低温超磁致材料; 场耦合叠代有限元; 高温超导体; 遗传算法

## 0 引言

低温超磁致材料(cryogenic giant magnetostrictive

Materials, CGMM), 特别是 $Tb_xDy_yZn_z$ 系列材料, 居里温度在 200 K 左右, 其伸缩范围 $\delta$ 可达 5 000。与常规超磁致材料相比, 该类材料具有更好的加工性能, 伸缩范围大, 可承受较大切向负载, 为器件的设计应用提供了更大的灵活性, 可开发一大批低温应用的致动器、传感器, 尤其在低温下该类材料可以由高温超导带励磁, 更可大幅度提高换能器、传感器、致动器的控制精度、效率和功率密度<sup>[1]</sup>。

Bi2223/Ag 多层高温超导带的临界电流在外加磁场中具有强烈的各向异性<sup>[2]</sup>。研究 Bi2223/Ag 超导带磁体临界电流的工作<sup>[3]</sup>表明, 在设计超导带磁体时, 需要特别关注磁体上的磁场分布, 如在把超导带做成通常的圆柱形励磁线圈时, 就需要特别关注径向垂直于超导带表面的磁场分量<sup>[4]</sup>。

在本文设计中, 利用叠片的导磁回路, 大幅度减小了圆柱型超导磁体中的径向磁场。在相同大小的磁场下, 纵向磁场对超导临界电流影响较小。考虑到纵向励磁磁场相对较大(比径向磁场大数十倍), 在这个情况下, 纵向磁场对超导带临界电流的影响达到同样的重要性。在同时考虑这 2 个分量对超导带临界电流的影响下, 本文设计了一个圆柱型的超导磁体, 可以产生纵向一致性较好的磁场, 在最大电流下可以使磁致材料达到最大伸展。

Jiles 等人根据技术磁化理论给出了超磁致材料伸缩原理, Dapino 等人在此基础上给出了基于磁致伸缩原理的超磁致材料计算模型<sup>[5-7]</sup>, 国内也开展了此方法的研究<sup>[8-10]</sup>。本文在文献[11-14]的基础上, 以材料特性曲线族出发, 设计了一种场耦合计算有限元方法, 可以有效的用来计算如磁致、压电等智能耦合材料的变量。本文将场耦合计算有限元方法与遗传算法<sup>[15-18]</sup>相结合, 考虑超导材料临界电流的磁各向异

基金项目: 国家自然科学基金项目(50577057); 浙江省教育厅课题(20060023)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50577057).

性，找到超导材料最佳尺寸及其在致动器中的位置，使其在产生所需磁场的同时，材料耗费最少。该结合材料的场耦合特性和励磁材料各向异性的优化计算方法对高温超导带磁体、智能材料致动器、传感器的研究、设计具有一定的借鉴意义。

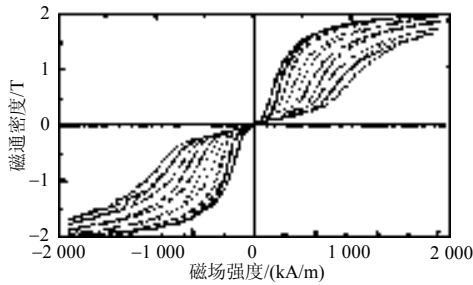
### 1 低温超磁致材料本征方程和有限元场耦合计算方法

CGMM 在弹性范围内，应变  $S$  和磁感应  $B$  与应力  $T$  和磁场强度  $H$  之间的本征方程如下所示：

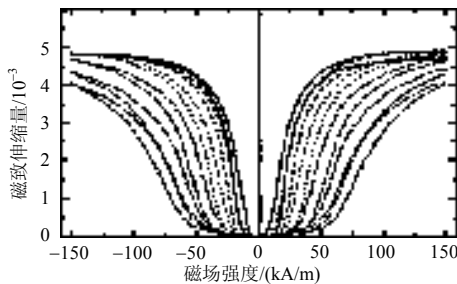
$$B = dT + \mu^T H \quad (1)$$

$$S = s^H T + dH \quad (2)$$

式中： $s^H$ 为弹性屈服系数； $\mu$ 为导磁系数； $d$ 为磁致率系数。式(1)第 1 项为在应力 $T$ 作用下所产生的磁感应强度 $B$ ，表征GMM力-磁耦合能量转换的维拉里效应；式(2)第 2 项为在磁场强度 $H$ 作用下产生应变 $S$ ，表征GMM磁-力耦合能量转换的焦尔效应。该材料实测特性如图 1 所示，图 1 上部表示不同压应力 $T$ 时的磁化曲线 $B$ - $H$ 族，即表征GMM力-磁耦合能量转换的维拉里效应，图 1 下部表示不同压应力 $T$ 时的磁场-应变特性曲线 $S$ - $H$ 族即GMM磁-机耦合的焦尔效应。由于CGMM各向异性以及非线性特征，要求解磁-机耦合能量转换效应的本构方程式(1)、(2)显得十分复杂。



(a)  $B$ - $H$  曲线族



(b)  $S$ - $H$  曲线族

图 1 77 K时 $Tb_{0.5}Dy_{0.5}Zn$ 在不同的轴向压力下场强度-磁通密度曲线族和磁场强度-磁致伸缩曲线族  
Fig. 1  $B$ - $H$  curves and  $S$ - $H$  curves of  $Tb_{0.5}Dy_{0.5}Zn$  in 77 K under different axial stress

本文采用场耦合叠代有限元方法来计算超磁致材料的非线性耦合场变量<sup>[19]</sup>，其流程如图 2 所示。

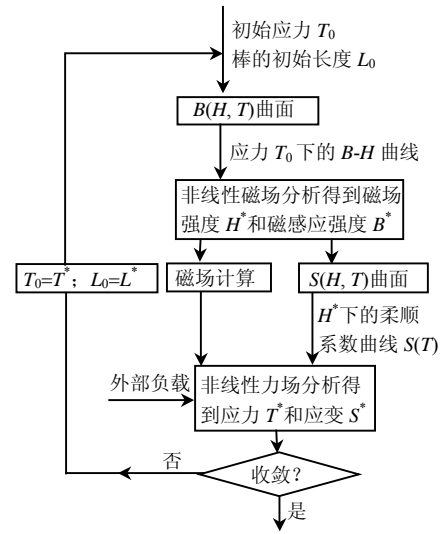


图 2 有限元场耦合计算流程图  
Fig. 2 FEM analysis model for coupled field calculation

### 2 超导材料临界电流的磁各向异性

对于使用Bi2223/Ag带材的强各向异性超导材料的高温超导磁体，超导体的临界电流 $J_c$ 较大程度的依赖垂直于带材表面的径向磁场。如日本Shin-ichi Kobayashi的研究表明，平行于带材表面的场 $B_{//}$ 与大小等于 $B_{//}\sin 8^\circ$ 垂直于带材表面的场对 $J_c$ 的影响效果相同<sup>[19]</sup>。Bi2223/Ag带材的强各向异性，使 $J_c$ 对垂直于带材表面的磁场比对平行于带材表面的磁场敏感的多，如图 3 所示。

因此，在磁体设计时，减小最大径向场、提高磁体的运行电流是高温超导磁体设计的一个关键。本文设计所用多芯超导带Bi2223/Ag的临界电流对磁场敏感度性能在不同温度、不同磁场强度下的差异较大<sup>[20]</sup>。针对 77 K情况下即液氮温度时的应用特性曲线如图 4 所示。

图 4 所示 2 条应用特性曲线的数学模拟表达式为

$$J_c(77K, B_{//}) / J_c(77K, 0) = -0.97B_{//}^3 + 1.9194B_{//}^2 - 1.5956B_{//} + 0.9751 \quad (\text{平行场}) \quad (3)$$

$$J_c(77K, B_{\perp}) / J_c(77K, 0) = 2.6021 \times 10^5 \times B_{\perp}^6 - 1.8576 \times 10^5 \times B_{\perp}^5 + 5.2756 \times 10^4 \times B_{\perp}^4 - 7.6118 \times 10^3 \times B_{\perp}^3 + 5.9553 \times B_{\perp}^2 - 27.1754 \times B_{\perp} + 1.0107 \quad (\text{垂直场}) \quad (4)$$

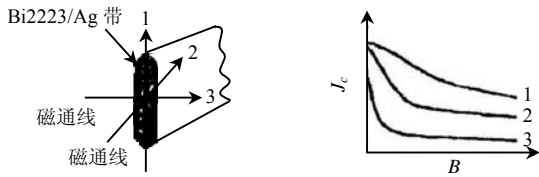


图3 Bi2223/Ag带材B-I曲线的各向异性示意图  
Fig. 3 B-I anisotropic characteristics of the Bi2223/Ag

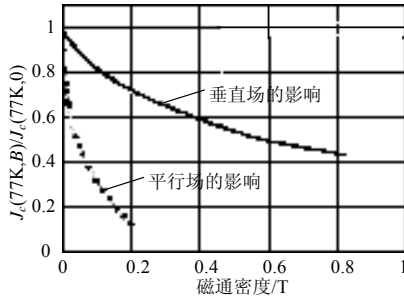


图4 Bi2223/Ag超导带77 K下应用特性曲线  
( $J_c(77\text{ K}, 0)=7\ 000\ \text{A}/\text{cm}^2$ )  
Fig. 4 Application data curves of Bi2223/Ag in  
77 K ( $J_c(77\text{ K}, 0)=7\ 000\ \text{A}/\text{cm}^2$ )

### 3 致动器结构和导磁回路对磁场分布的影响

图5是CGMA器件的分析模型，考虑到对称性仅需如图所示的1/4剖面图即可进行整个器件的分析，图5左侧线是轴对称的对称轴，下面边线是平面对称轴。设置3个设计变量，变量 $a$ 表示2个材料之间的横向距离，变量 $h$ 代表HTS的高度，变量 $l$ 代表HTS的宽度。轭的高度为6.5 mm，宽度为6.0 mm，CGMM的高度和宽度分别为16.5 mm和12.0 mm。

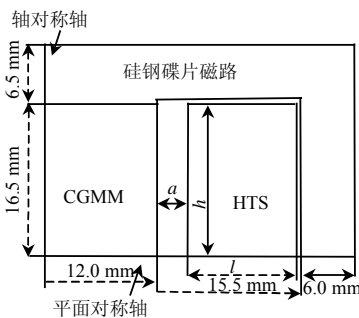
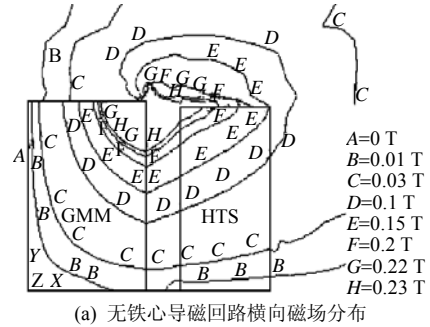


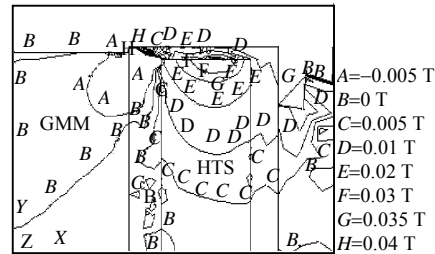
图5 优化计算结构示意图及其约束条件  
Fig. 5 Sketch map of structure model and constraints for optimization

采用FEM对CGMA不带导磁铁芯结构与带导磁铁芯结构的磁场分布进行分析，如图6所示。经过分析比较，设置导磁铁芯路径可大大减小垂直于HTS的磁通密度(即图上水平方向)，这个方向正好是HTS敏感度比较大的方向。另一方面虽然超导带的平行方向磁场敏感度相对较小，但在加入导磁回

路以后，其值比水平方向上垂直HTS的磁场大得多(数十倍)。使2个方向的磁场对超导体临界电流的影响在同一个数量级上，这就要求在结构优化计算时，对2个方向的磁场综合考虑，以确定是哪个方向的场约束了临界电流。



(a) 无铁心导磁回路横向磁场分布



(b) 带铁心导磁回路横向磁场分布

图6 不同磁路横向磁场分布比较  
Fig. 6 Comparison for contour lines of perpendicular component under different magnetic conducting circuits

### 4 优化计算实现

#### 4.1 优化目标和约束条件

优化目标：确定HTS的位置参数( $a, h, l$ )和大小尺寸，使耗材料最少。

优化条件：①可通入的最大电流密度可以使低温超磁致材料达到饱和(即CGMM的磁场最小值处的 $B_y|CGMM \geq 2.000\ 0\ \text{T}$ )；②确保通入的最大电流小于各个磁场方向上的临界电流，即保证不失超，其中 $J_c(77\ \text{K}, 0) = 7\ 000\ \text{A}/\text{cm}^2$ 。

#### 4.2 CGMA优化实现

优化过程通过遗传算法实现，如图7所示为优化算法示意图。在目标函数的计算中，涉及超磁致材料的场耦合能量转换特性，所以在优化计算中需要结合FEM耦合迭代算法进行。

实现步骤：

(1) 二进制编码，对设计变量即超导宽度高度和超导带与低温超磁致材料棒的距离各用五位二进制位表示，串接得一个染色体。

(2) 种群规模的数目10。

(3) 对某个结构参数组, 评价的过程如图 8 所示。实际通入的电流密度越大, 超导磁体产生的磁场就越强, 但超导带的临界电流就越小。计算在某个种子代表的结构参数组下, 可保证高温超导材料不失超的最大输入电流  $J_{max}$ , 并且记录这时在 CGMM 中的最小磁通密度和相应的超导材料面积。若允许通入的最大电流密度可使低温超磁致材料饱和和即可以最大程度的伸展, 结构参数的评价指标为最小面积, 超导材料的面积最小者最优; 若至最大电流密度仍无法使低温超磁致材料饱和, 则评价指标为低温超磁致材料中的最小磁场, 最小磁场最大者最优。

(4) 变异过程根据迭代循环的次数, 进行一定的适应性调整, 循环次数小于 20 时叠代概率是 0.6, 循环次数在 20~80 时叠代概率为 0.4。图中 MutationProMain 为变异操作的子程序名称, 对确定的一个种子进行变异操作, 并保证变异结果在解范围内。由于是采用二进制编码, 变异操作为取反特定的二进制位。根据循环的进行次数确定变异操作的程度, 程序的开始阶段进行较剧烈的变异, 即取反较多的二进制位, 有利于扩大解的搜索空间。随着优化的深入, 应减小变异的剧烈程度, 即较少变异的二进制位数, 有利于程序的收敛。

(5) 杂交方法如图 9 所示, 把 10 个染色体随机配成 5 对, 把每个染色体分成 4 段, 然后抽取其中 2 段进行交换。

(6) 根据评价的结果, 在交叉后的新种群里先选取 8 个较优秀的种子。然后在新种群里剩下的两个和原种群共 12 个种子里面选择 2 个最优种子。选择优先原则为: ①若结构数据均可使低温 GMM 饱和, 则留下消耗高温超导材料最少的结构参数组; ②若有饱和和不饱和的, 则饱和优先; ③若都不能饱和, 则使低温 GMM 区域中的最小磁场值最大者优先。

(7) 结构约束的处理。由于本文的优化计算中对 3 个结构设计参数均用五位二进制数表示, 同时把各个结构参数的取值范围分成 32 个离散点, 理论上应该没有单个冗余码存在。只要满足  $0 < a + l < 0.0155$  及 3 个设计参数均不取零 ( $a \neq 0, l \neq 0, h \neq 0$ ) 即可。

对于约束的处理问题, 理论上可以有多种方法实现。虽然罚函数是遗传算法中最常用的方法, 但是考虑到本文在对新种群的评价是通过有限元方

法来计算一定结构形状下的耦合场, 为了不破坏原形状结构, 使用了最简单、效率相对较低的拒绝抛弃方法, 随机抽取原种群中的染色体来替代被抛弃的新种群中的染色体。

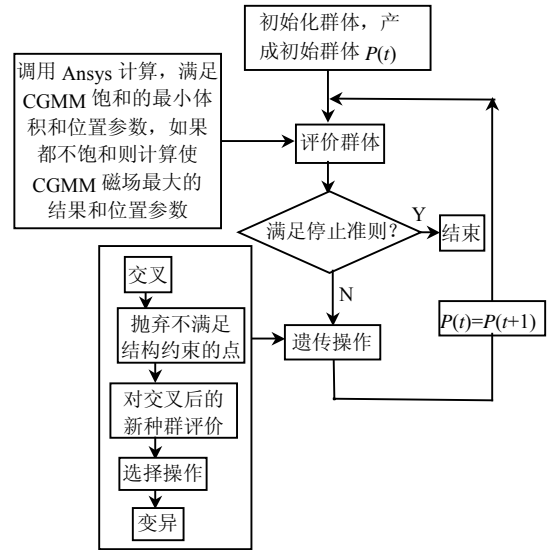


图 7 优化算法的实现  
Fig. 7 Realization of the GA

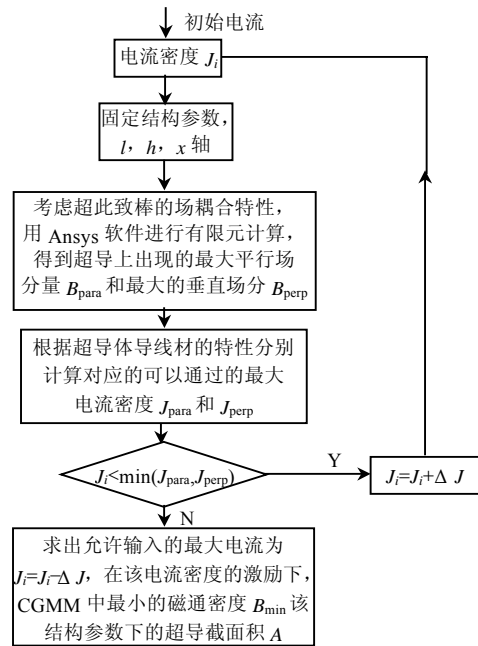
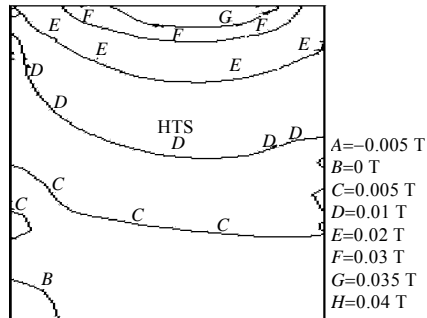


图 8 评价过程的流程图  
Fig. 8 Flowchart of the valuation procedure

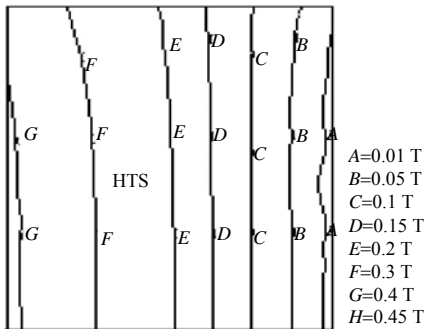
### 5 优化结果分析

经优化计算的结构的最佳参数组为  $a = 0.0034 \text{ m}$ ,  $h = 0.0159 \text{ m}$ ,  $l = 0.0092 \text{ m}$ 。超导带上垂直分量即径向分量的等值线如图 9(a)所示, 平行分量即纵向分量的等值线如图 9(b)所示。

HTS区域中最大的平行分量值为 $b_{y_{\max}}=0.4087\text{T}$ ，最大垂直分量为 $b_{x_{\max}}=0.0406\text{T}$ ，程序计算所得最大可行通入电流密度为 $J_{\text{permissive}}=3700\text{A/cm}^2$ 。由超导带在外磁场中临界电流的各向异性，根据2个分量的最大磁场值，在超导带特性曲线上计算可得相应的最大可通入电流密度为 $J_{c\perp}=J_{b_{x_{\max}}}=3708\text{A/cm}^2$ ， $J_{c\parallel}=J_{b_{y_{\max}}}=4041\text{A/cm}^2$ ，可以看出， $J_{\text{permissive}}<\min(J_{c\perp}, J_{c\parallel})$ 要求得到满足。



(a) 垂直分量等值线



(b) 平行分量等值线

图9 超导带横向和纵向等值线分布

Fig. 9 Distribution of contour lines for perpendicular component and parallel component

## 6 结论

高温超导与低温超磁致功能材料的交叉是一种优势互补的优化组合。低温超磁致材料、高温超导材料均有比较特殊的磁、电、机械特性，如低温超磁致材料具有强的磁机械耦合特性，而高温超导材料其导电性能受磁场影响较大，有效的设计比较复杂。本文结合遗传算法和有限元耦合迭代方法进行低温超磁致器件的优化设计，用遗传算法进行了全局优化计算，应用FEM耦合迭代数值方法解决耦合场计算问题，并对2个算法的配合进行了分析计算，设计了满足要求的致动器优化结构。通过设计合理的导磁回路，大幅度减小了超导带的垂直磁场，但是纵向磁场对超导带临界电流的影响具有同等重要性，需要同时考虑。确保最大电流密度可以使低

温超磁致致动器饱和的耗材料最少的结构参数为 $a=0.0034\text{m}$ ， $h=0.0159\text{m}$ ， $l=0.0092\text{m}$ 。最大允许通入的电流密度为 $3700\text{A/cm}^2$ 。

## 参考文献

- [1] Voccio J P, Joshi C H, Lindberg J F, et al. Application of high-temperature superconducting wires to magnetostrictive transducers for underwater sonar[J]. IEEE Trans. on Magnetic, 1994, 30(4): 1693-1698.
- [2] Pitel J, Kovac P, Melisek T, et al. Influence of the winding geometry on the critical current and magnetic fields of cylindrical coils made of Bi(2223)/Ag anisotropic tapes[J]. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2000, 10(1): 478-481.
- [3] Fabbriatore P, Priano C, Testa M P, et al. Field distribution effect on the performances of coils wound with Ag/Bi-2223 tape [J]. Superconductor Science Technology, 1998, 11(1): 304-310.
- [4] So N, Makoto Y, Hideo Y, et al. An optimal design method for superconducting magnets using HTS Tape[J]. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2001, 11(1): 2308-2311.
- [5] Calkins F T, Smith R C, Flatau A B. Energy-based hysteresis model for magnetostrictive transducers[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2000, 36(2): 429-439.
- [6] Jiles D C. Theory of the magnetomechanical effect[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(8): 1537-1546.
- [7] Jiles D C. Introduction to magnetism and magnetic material[M]. New York: Chapman and Hall, 1991.
- [8] 曹淑瑛, 王博文, 闫荣格, 等. 超磁致伸缩致动器磁滞非线性动态模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 145-149.  
Cao Shuying, Wang Bowen, Yan Rongge, et al. Dynamic model with hysteretic nonlinearity for giant magnetostrictive actuator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 145-149(in Chinese).
- [9] 闫荣格, 王博文, 曹淑瑛, 等. 超磁致伸缩致动器磁-机械耦合模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 107-111.  
Yan Rongge, Wang Bowen, Cao Shuying, et al. Magneto-mechanical strong coupled model for a giant magnetostrictive actuator [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 107-111(in Chinese).
- [10] 曹淑瑛, 王博文, 郑加驹, 等. 应用混合遗传算法的超磁致伸缩致动器磁滞模型的参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 127-132.  
Cao Shuying, Wang Bowen, Zhen Jiaju, et al. Parameter identification of hysteretic model for giant magnetostrictive actuator using hybrid genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 127-132(in Chinese).
- [11] Cao Zhitong, Cai Jiongjiong, Fang Youtong. FEM analysis and design optimization of an actuator made of GMM[C]. The ASAEM'2003, Seoul, Korea, 2003.
- [12] 曹志彤, 何国光, 陈宏平. 超磁致微位移直线驱动器[J]. 压电与声光, 2002, 24(5): 358-351.  
Cao Zhitong, He Guoguang, Chen Hongping. Micro-linear actuator with the rare earth giant magnetostrictive material[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2002, 24(5): 358-351(in Chinese).
- [13] 曹志彤, 何国光, 陈宏平, 等. 新型超磁致球电机的研究[J]. 中国机械工程, 2002, 15(13): 1128-1132.  
Cao Zhitong, Chen Hongping, He Guoguang, et al. Novel spherical motor made of giant magnetostrictive material[J]. China Mechanical

- Engineering, 2002, 15(13): 1128-1132(in Chinese).
- [14] 曹志彤, 何国光, 陈宏平, 等. 一种组合超磁致振子的椭圆驱动微执行器[P]. 中国专利: 02259970, 2003-03.
- [15] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [16] Annicchiarico W, Cerrolaza M. Finite elements, genetic algorithms and b-splines: a combined technique for shape optimization[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1999, (33): 125-141.
- [17] Annicchiarico W, Cerrolaza M. Optimization of finite element bi-dimensional models: an approach based on genetic algorithms [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1998, (29): 231-257.
- [18] Eduardo M R, Marcos M S, Romildo D T, et al. Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms[J]. Computers and Structures, 2004, (82): 281-299.
- [19] 曹志彤, 蔡炯炯, 方攸同. 椭圆驱动超磁致电动机设计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 1(1): 92-96.  
Cao Zhitong, Cai Jiongjiong, He Guoguang, et al. Design of a giant magnetostrictive motor driven by elliptical motion[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 1(1): 92-96(in Chinese).
- [20] 张京业, 许爱霞, 陈敬林. Bi2223/Ag带小型高温超导实验磁体设

计[J]. 低温物理学报, 2003, 25(2): 141-146.

Zhang Jingye, Xu Aixin, Chen Jinglin. Design of Bi2223/Ag HTS experimental magnet[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2003, 25(2): 141-146(in Chinese).



蔡炯炯

收稿日期: 2007-07-05.

作者简介:

蔡炯炯(1979—), 男, 硕士, 助教, 主要从事磁致材料、超导材料、电力电子技术研究及应用器件开发, jiongjiong@gmail.com;

葛惠民(1965—), 男, 副教授, 主要从事电力电子, 超导材料研究;

曹志彤(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能材料及其应用器件研究;

张耀(1962—), 男, 教授, 主要从事新材料机电设备研究开发。

(责任编辑 王剑乔)