



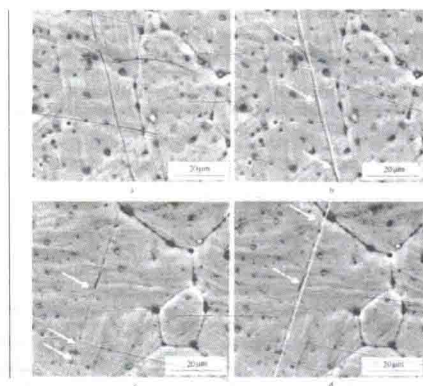
国防科技图书出版基金

Galfenol合金磁滞 非线性模型与控制方法

Nonlinear Hysteresis Modeling
and Control of Galfenol Alloy



舒亮 陈定方 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

Galfenol 合金磁滞非线性 模型与控制方法

Nonlinear Hysteresis Modeling and Control of Galfenol Alloy

舒 亮 陈定方 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

Galfenol 合金磁滞非线性模型与控制方法 / 舒亮,
陈定方著. —北京:国防工业出版社,2016.1

ISBN 978-7-118-10480-6

I. ①G… II. ①舒… ②陈… III. ①磁性合金—
磁滞—非线性控制系统 IV. ①TG132.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 270481 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 插页 6 印张 7 $\frac{3}{4}$ 字数 207 千字

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 50.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着

记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授、以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书 甘茂治

(按姓氏笔画排序)

甘晓华 卢秉恒 巩水利 刘泽金 孙秀冬

芮筱亭 李言荣 李德仁 李德毅 杨伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起 郭云飞

唐志共 陶西平 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前言

随着现代社会科技水平的进步和发展,人们对新材料的应用不断提出更多、更苛刻的要求。磁致伸缩材料作为传统智能材料中的一种,在我国先进制造、航空航天以及国防尖端技术发展过程中,扮演着重要的角色。依靠自身的磁致伸缩特性,磁致伸缩材料可以将电、磁、力三种物理信号进行相互转化,从而满足不同场合的应用需求。然而,目前绝大多数的磁致伸缩材料力学性能较差,特别是抗拉伸能力弱、脆性大,无法承受锻压、弯曲、冲击等机械载荷,无法满足航空航天、军事中的复杂、恶劣工况条件的应用需求。

20 世纪末,美国海军武器实验室的研究人员发现,在 Fe 中加入非磁性元素 Ga,其磁致伸缩率可以增加几十倍;纯铁的磁致伸缩率约为 20×10^{-6} ,加入 Ga 以后,其单晶体沿 $\langle 100 \rangle$ 晶向的饱和磁致伸缩率达到 400×10^{-6} 。该类材料被美国海军武器实验室命名为 Galfenol。与其他智能材料(Terfenol-D,压电陶瓷)普遍易脆不同,Galfenol 具有独特的力学性能,脆性小,可以热轧、焊接,具有良好的抗拉强度,能承受弯曲、冲击等机械载荷。

Galfenol 合金的出现,引起了国内外学术界和工业界的极大关注,吸引了大批的研究机构和人员投入到相关领域的研究,并取得了丰硕的成果。Galfenol 合金在磁致伸缩特性和机械强度方面表现出优良的复合特性,可以为精密位移驱动、冲击载荷传感、扭矩检测、主动减振等多个领域的应用提供新的解决途径。尤其是在复杂、恶劣工况条件下,可以解决冲击、大挠度等机械载荷带来的材料易断裂或者失效的应用难题。在美国、日本等发达国家,已经开发出针对不同场合的应用产

品,应用于微电机、精密机床加工、飞机机翼减振、扭矩传感等领域。这些产品和技术推广,将对 21 世纪工业界各种高新技术的发展,以及对传统工业技术的革新产生重大的影响。

Galfenol 合金具有各向异性特征,其磁化过程表现出磁滞非线性和饱和非线性,这些问题成为 Galfenol 合金应用以及相关器件设计、开发中的难点问题。本书从 Galfenol 合金的磁致伸缩机理和制备方法入手,针对合金的各向异性和磁化过程展开研究讨论,采用基于能量函数的三维建模方法描述了合金的各向异性特征,并研究了相关器件的三维耦合动力学建模方法,解决了 Galfenol 驱动型器件设计中的理论问题。书中同时阐述了器件的精密控制方法问题,并对 Galfenol 合金作为敏感元件在力传感中的应用问题进行了系统的论述。

全书共分 8 章。第 1 章介绍了磁致伸缩材料的历史、分类以及与 Galfenol 合金的对比;第 2 章介绍了合金的制备方法与物理属性;第 3 章介绍了磁致伸缩材料的相关建模方法,并讨论了 Galfenol 合金的三维磁化非线性建模理论;第 4 章介绍了 Galfenol 驱动器件设计理论与方法;第 5 章介绍了 Galfenol 智能器件的耦合动力学建模方法;第 6 章介绍了 Galfenol 合金的三维磁-机全耦合非线性模型;第 7 章介绍了 Galfenol 合金驱动器件的精密控制方法;第 8 章介绍了 Galfenol 合金的应用研究及其典型工程应用,并将之与 Terfenol-D、PZT 等功能材料进行了对比。

本书是作者多年来紧密围绕“Galfenol 磁致伸缩微致动与传感技术的研究与开发”的研究成果,这些研究工作得到了高等学校博士学科点专项科研基金项目“基于磁各向异性的 Galfenol 本征非线性模型及其应用研究(20090143110005)”(2009—2011)、国家自然科学基金项目“Galfenol 智能悬臂梁非线性耦合动力学模型研究(51175395)”(2012—2015)、“超磁致伸缩 Fe-Ga 合金薄膜成分及结构的预测模型构建(51161019)”(2012—2015)、“面向交变载荷的 Galfenol 合金力传感模型与测量方法研究(51205293)”(2013—2015)和浙江省自然科学基金“具备可裁剪和可植入功能的冲击力检测新方法研究

(LY15E050011)”(2015—2017)等科研项目的资助,作者对于这些项目的支持表示衷心的感谢。

同时,此次图书的顺利出版,得到了国防工业出版社的大力支持。作者感谢国防科技图书出版基金对图书出版的资助,同时还要感谢国防工业出版社的领导和编辑在图书出版过程中付出的辛勤劳动!

作者

2015年11月

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 磁致伸缩机理	1
1.2 磁致伸缩材料类型	4
1.2.1 传统磁致伸缩材料	4
1.2.2 稀土超磁致伸缩材料	5
1.2.3 铁磁性形状记忆合金	7
1.3 Galfenol 合金材料	9
1.3.1 Galfenol 合金磁特性	10
1.3.2 Galfenol 合金非线性特征	11
第 2 章 制备工艺与方法	13
2.1 母合金的制备	13
2.2 定向凝固法	15
2.2.1 提拉法	17
2.2.2 悬浮区熔法 (Floating-zone method)	18
2.2.3 布里奇曼法 (Bridgman 法)	20
2.2.4 高温梯度真空定向凝固法	21
2.3 快速凝固法	22
2.3.1 甩带快淬法	22
2.3.2 吹铸法	25
2.4 其他制备方法	26
2.4.1 轧制	26

2.4.2	粉末冶金法	27
2.4.3	电化学沉积法	29
第3章	磁化非线性模型	30
3.1	磁滞非线性建模理论	30
3.1.1	Preisach 模型	30
3.1.2	Jiles - Atherton 模型	35
3.1.3	Prandtl-Ishlinskii 模型	37
3.1.4	自由能磁滞模型	40
3.1.5	神经网络模型	49
3.1.6	各种模型特性对比	52
3.2	考虑各向异性的三维磁化非线性模型	54
3.2.1	各向异性	55
3.2.2	磁畴	56
3.2.3	能量公式	57
3.2.4	特性测试	70
第4章	Galfenol 驱动器设计理论及方法	74
4.1	悬臂梁驱动器优化设计	74
4.1.1	悬臂梁驱动器结构	76
4.1.2	结构优化设计	77
4.1.3	驱动器特性测试	82
4.2	驱动器动力学模型	84
4.2.1	控制方程	84
4.2.2	弱形式及其离散化	87
4.3	模型数值求解方法	90
4.3.1	有限元模型的数值求解	90
4.3.2	动力学模型验证	91
第5章	磁滞非线性动力学建模方法	99
5.1	驱动器有限元模型	99

» Galfenol 合金磁滞非线性模型与控制方法

5.1.1	几何结构	100
5.1.2	虚功原理	100
5.1.3	弱解方程有限元离散化	105
5.2	非线性动力学模型	110
5.2.1	单向磁致伸缩应变	110
5.2.2	模型非线性数值解法	112
5.2.3	数值算法的验证	113
5.3	实验结果与讨论	123
第 6 章	三维磁-机全耦合非线性模型	127
6.1	磁-机耦合模型	127
6.1.1	电磁场方程	128
6.1.2	动力学控制方程	130
6.1.3	弱解形式	131
6.1.4	弱解方程的离散化	134
6.1.5	系数矩阵求解	137
6.2	模型求解及实验测试	143
6.2.1	模型求解	143
6.2.2	仿真结果及实验测试	145
第 7 章	Galfenol 驱动器控制技术	152
7.1	多自由度动力学模型	154
7.1.1	有限元模型	154
7.1.2	状态空间模型	155
7.2	滑模变结构控制	157
7.2.1	等效控制	157
7.2.2	系统健壮性控制设计及稳定性分析	160
7.3	基于遗传算法的非线性参数识别	165
7.4	滑模变结构健壮性控制仿真研究	169
7.5	滑模变结构健壮性控制实验研究	173

第 8 章 Galfenol 合金应用研究	179
8.1 Galfenol 合金在微位移执行器中的应用	179
8.1.1 磁致伸缩致动技术	179
8.1.2 致动器应用领域	182
8.2 Galfenol 合金在传感器中的应用	188
8.3 典型工程实例	191
8.3.1 典型工程实例一:悬臂梁结构驱动器	191
8.3.2 典型工程实例二:Galfenol 交变载荷力传感技术	201
参考文献	218

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Magnetostrictive mechanism	1
1.2	Magnetostrictive materials	4
1.2.1	Traditional magnetostrictive materials	4
1.2.2	Rare earth giant magnetostrictive materials	5
1.2.3	Ferromagnetic shape memory alloys	7
1.3	Galfenol alloy	9
1.3.1	Magnetic properties	10
1.3.2	Nonlinear characterization	11
Chapter 2	Preparation of Galfenol	13
2.1	Preparation of master alloy	13
2.2	Directional solidification	15
2.2.1	The Czochralski method	17
2.2.2	The floating-zone method	18
2.2.3	The Bridgman method	20
2.2.4	High temperature vacuum directional solidification	21
2.3	Rapid solidification	22
2.3.1	The melt-spun method	22
2.3.2	The blown cast method	25
2.4	Other preparation methods	26

2. 4. 1	Rolling	26
2. 4. 2	Powder metallurgy	27
2. 4. 3	Electrochemical deposition	29
Chapter 3	Nonlinear magnetization model	30
3. 1	Hysteresis model	30
3. 1. 1	Preisach model	30
3. 1. 2	Jiles-Atherton model	35
3. 1. 3	Prandtl-Ishlinskii model	37
3. 1. 4	Free energy model	40
3. 1. 5	Neural network model	49
3. 1. 6	Comparison of different models	52
3. 2	Hysteresis model considering anisotropy	54
3. 2. 1	Anisotropy	55
3. 2. 2	Magnetic domain	56
3. 2. 3	Energy equations	57
3. 2. 4	Characterization measurement	70
Chapter 4	Design theory and method of Galfenol actuators	74
4. 1	Optimization of beam actuator	74
4. 1. 1	Structure	76
4. 1. 2	Optimization design	77
4. 1. 3	Actuating characteristics	82
4. 2	Linear dynamic model	84
4. 2. 1	Governing equation	84
4. 2. 2	Weak form and the discretization	87
4. 3	Numerical solver and the measurements	90
4. 3. 1	Numerical solver	90
4. 3. 2	Measurements and verifications	91

Chapter 5	Dynamic model considering nonlinear hysteresis	99
5.1	Finite element model	99
5.1.1	Actuator geometry	100
5.1.2	Virtual work principle	100
5.1.3	Finite element discretization	105
5.2	Nonlinear dynamic model	110
5.2.1	Unidirectional magnetostriction	110
5.2.2	Nonlinear numerical solver	112
5.2.3	Verifications of the solver	113
5.3	Experimental measurements	123
Chapter 6	The 3-D magneto-mechanical model	127
6.1	Magneto-mechanical model	127
6.1.1	Electromagnetic equations	128
6.1.2	Structural equations	130
6.1.3	Weak form solution	131
6.1.4	Discretization	134
6.1.5	Coefficient matrix	137
6.2	Solver and measurements	143
6.2.1	Numerical solver	143
6.2.2	Simulations and measurements	145
Chapter 7	Control design of the Galfenol actuator	152
7.1	Multi-DOF dynamic model	154
7.1.1	Finite element model	154
7.1.2	State space form	155
7.2	Sliding mode variable structure control	157
7.2.1	Equivalent control	157
7.2.2	Robust control design and stability	160

7.3	Nonlinear parameter identification	165
7.4	Simulations of robust sliding mode control	169
7.5	Experimental results of robust sliding mode control	173
Chapter 8	Galfenol applications	179
8.1	Applications in micro-displacement actuation	179
8.1.1	Magnetostrictive actuation technology	179
8.1.2	The actuator applications	182
8.2	Applications of Galfenol sensor	188
8.3	Typical examples in engineering	191
8.3.1	Example I : Galfenol unimorphs	191
8.3.2	Example II : Force sensing of alternating loads	201
References		218