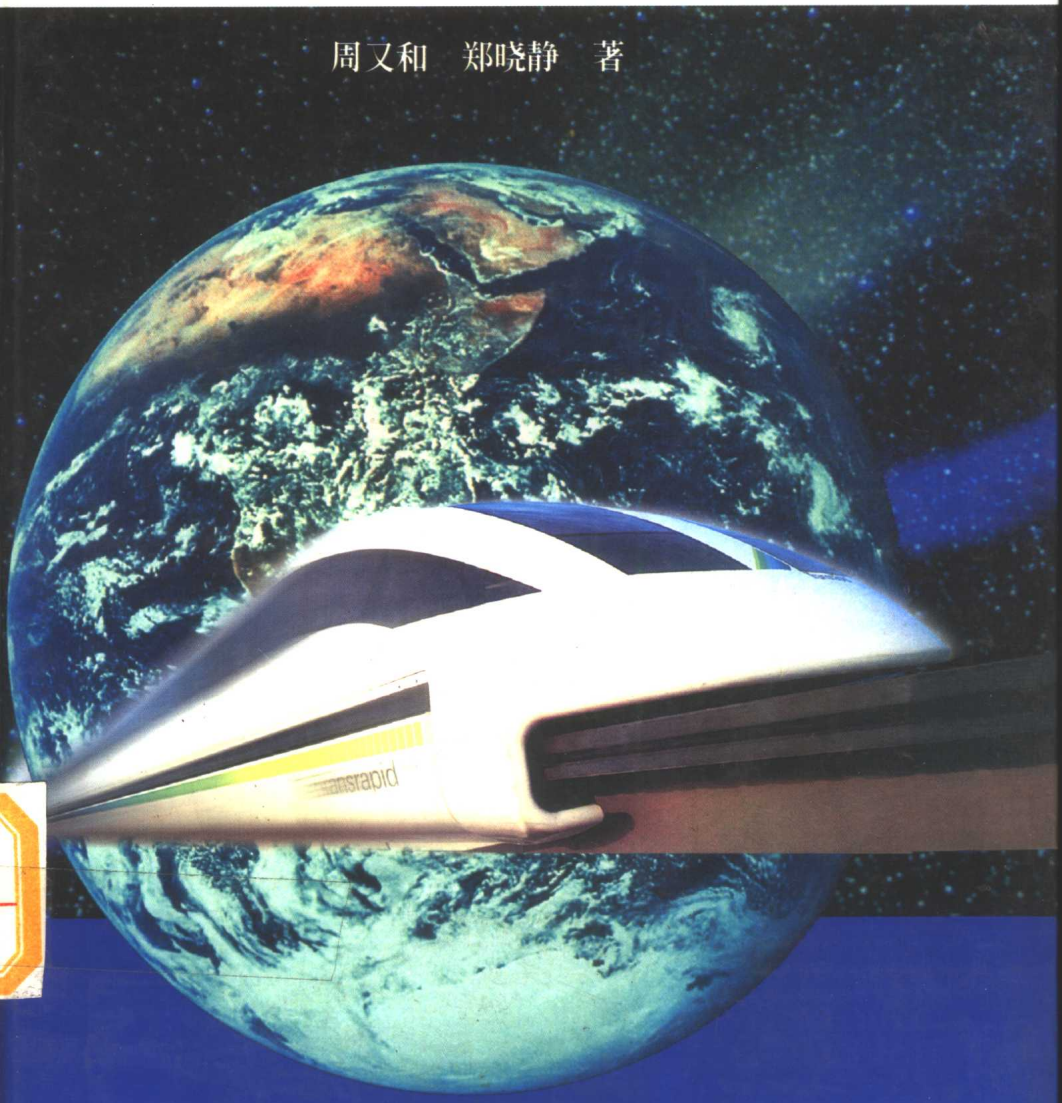
电磁固体结构力学

周又和　郑晓静　著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

电磁固体结构力学

周又和　郑晓静　著

科学出版社

1999

内 容 简 介

本书系统总结和介绍了电磁弹性理论及其应用——电磁弹性结构力学的理论模型、研究方法、定量分析程序以及最新研究成果等。电磁弹性力学研究电磁场与电磁固体结构变形相互耦合作用下固体结构的力学行为与特征，如强度、刚度、稳定性与振动等宏观力学行为，它是涉及电磁物理与力学的边缘交叉学科。本书在介绍电磁弹性理论(理论模型、定量分析方法和实验结果)的同时，着重介绍铁磁介质梁板壳结构、超导载流结构等与电磁储能装置、热核聚变反应堆、磁悬浮列车和压电智能结构的动力控制等高科技电磁装置有关的电磁结构的理论研究成果，其研究方法可直接应用于考虑结构变形影响的电磁结构的理论分析和设计。

本书可供从事电磁装置、仪器和电磁设备的研制人员和科研工作者以及力学工作者使用，也可作为电磁物理和力学等专业与学科的高校教师、研究生和高年级本科生的教学参考书。

电磁固体结构力学

周又和　郑晓静　著

责任编辑　王　军

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

湖北省新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

*

1999年5月第　一　版　开本：850×1168　1/32

1999年5月第　次印刷　印张：7 1/2

印数：1～1000　字数：193 000

ISBN 7-03-007539-0/O・1124

定价：22.00元

序

尽管人们对压电和压磁现象早有发现，但关于电磁场和力学效应的相互影响，则是在核电站、磁悬浮列车等生产上有需要以后才有较多和较深入的研究。首先是磁流体力学的研究，它是和天体运动有关的，随后才有电磁弹性力学的兴起。近十多年来更由于超导新材料研究呈现的高潮、微电机械的实用化等应用，电磁结构力学的研究日益增多，这方面的论文散见于有关学术刊物，国际理论和应用力学联合会 IUTAM 就召开了两次国际学术研讨会，出版了文集，还出现了一些总结性论文，这方面的工作正处在方兴未艾的发展阶段。

我国在这方面的工作开始得较晚，进行研究的人较少。周又和、郑晓静在兰州大学力学系得益于 Eringen 教授来华讲授理性力学，建立了扎实的力学基础。他们有意于进行电磁结构力学的探讨，来征求我的意见，正逢瑞典工业大学的谢庆祥(R. K. T. Hsieh)教授组织 IUTAM 关于“新电磁材料的力学模型化”的研讨会发来通知，希望我推荐人参加，我就鼓励他们在这方面深入下去。近十年来，他们经过坚毅的摸索，已经深刻掌握了这门学科的全面情况，做出了许多有创造性的成果。为了使更多的人早些进入这个领域进行工作，为了使我国的高科技产品能在国际上占有一席之地，作者们花了许多精力整理出这本文稿，既保持了严格的理论基础，又深入浅出地全面介绍了电磁结构力学的问题，还结合本人的研究心得，给予读者很强的启发性。这方面的专著在国际上也少有，本书无疑将对我国开展这方面工作起到重要的作用，在国际上也将会受到欢迎。

我自己在这方面是很生疏的，翻阅本书的初稿也得到很大的启发。我想既然由于结构物体内部电磁力的分布不便测量，只能

靠构筑模型来进行计算，再通过表面测量结果进行拟合，这正是典型的力学反演问题，只是这里的规律更为复杂，因素更多，而且是一个非线性的反演问题。它不单是数学上的难题，还应该和实验力学工作者相配合，应用全表面的变形图像以及电磁场图像的测量来增加对反演结果的约束，使问题得到更好的解决。这个想法是否恰当，谨抛出这样一个愚见请教。

趁此机会向作者们表示真诚的祝贺，并期待他们取得更大的成绩和我国电磁结构力学工作的巨大进展。

北京大学力学与工程科学系教授
中 国 科 学 院 院 士 王 仁

1998 年 6 月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

前　言

电磁固体结构是指由那些对电磁场敏感的材料(如铁磁材料、压电材料、超导材料等,它们的性质将因电磁场的存在而发生变化)制成的结构。当这些电磁固体结构处在电磁场中时,将受到电磁力的作用,导致一系列与结构安全或设备装置品质有关的力学问题。自本世纪60年代以来,随着现代高新科学技术的迅猛发展,电磁固体结构在众多高科技装置与设备中得到广泛的应用。特别是近10年来,随着高温超导材料的发现与应用,已提出了许多大容量电能装置的研制构想,如超导发电机与超导电动机、超导储能装置、热核聚变反应堆的超导载流磁体等等。正是这些大型能源装置等高科技设备的需要,有力地促进了电磁固体结构力学的建立与发展,形成了涉及电磁物理与固体力学交叉的新兴研究领域。

我们知道:电磁物理与固体力学在各自的学科中已研究得相当完善,形成了成熟的理论体系。然而,当我们研究处在电磁场中的电磁结构的电磁弹性力学现象时,往往会遇到一些棘手的问题:(1) 电磁场与结构变形的相互作用在本质上是非线性的,这不仅给定量分析带来困难与不便,而且还引发了某些影响结构安全的力学现象如磁弹性失稳等等;(2) 对于某些电磁结构如可磁化的磁介质结构,当研究其在电磁力作用下的力学变形行为时,如何描述电磁力的分布便成为这类研究是否准确与合理的基本问题,而这种体分布的电磁力又是难以由实验直接测量的。伴随这些基本问题,电磁固体力学一方面展开了一些典型的基本实验研究,如横向均布磁场中铁磁悬臂板的磁弹性失稳、纵向面内磁场中铁磁板的固有频率上升、超导载流三线圈磁体与模拟Tokamak装置超导载流磁体的磁弹性失稳等等;另一方面则依照实验现象的特征与电磁学和力学的基本理论、方法来建立理论分析模型,如有以材料

力学方式建立的经验模型，有以理性力学与公理化方式建立的所谓严格理论模型，以及以变分原理方式建立的理论模型等。如前所述，除载流结构的电磁力有统一公式计算磁分布力外，对于可磁化电磁介质却存在着几种总体效果等效但磁力分布不同的电磁力计算模式，这给理论分析带来了采用哪一理论模型更为合理的问题，因为在不同电磁力计算公式基础上的理论模型将给出电磁弹性力学现象预测的不同。在国际上，美国康乃尔大学的 Moon 教授、鲍亦兴(Yishing Pao)教授与日本东京大学的 Miya 教授等人是这一领域理论与应用研究的知名学者；理性力学大师、美国普林斯顿大学的 Eringen 教授，美国国家工程科学院院士、康乃尔大学的鲍亦兴教授则是用理性力学与公理化体系方法建立电磁弹性力学理论的奠基者。他们的工作对于建立电磁弹性力学的理论体系与应用研究起到了有力的推动与促进作用，为电磁装置与设备的研制和设计提供了理论分析基础。

进入 90 年代以后，这一与高科技密切相关的应用基础研究受到国内力学工作者与电学工作者的重视，并开展了一些相关研究。本书作者自 1992 年起，在电磁固体力学领域的研究课题一直受到国家自然科学基金、国家教育部高校博士点专项基金、国家教育部留学回国人员基金、国家教育部高校优秀青年教师基金、国防科工委预研项目、国家杰出青年科学基金和国家教育部跨世纪人才培养基金等项目的资助。在中国力学学会及其老一辈科学家的关怀与支持下，通过与美国和日本等国电磁固体力学专家学者的合作研究，使得作者在电磁固体力学的基本理论模型、非线性定量求解的分析程序以及应用等方面的研究取得了一些实质性的进展，以完善和丰富电磁固体力学的理论与应用。本书在试图全面介绍电磁固体力学理论体系的同时，着重介绍了近几年来作者所取得的最新成果。考虑到电磁结构研制工作者与力学工作者对电磁固体力学理论的应用需求，本书将在保持严格的理论分析的同时，采用由浅入深、循序渐进的方式来介绍如何建立能模拟实验现象的电磁弹性力学基本理论模型，并给出了定量分析方法和解决实际问

题的许多典型例子，以便于读者掌握、理解和认识电磁固体力学的理论体系、分析方法和基本的力学问题。

借本书出版之际，作者衷心感谢国家自然科学基金委员会、国家教育部、国防科工委和中国力学学会等部门对本领域课题研究所给予的持续支持和资助！要是没有这些科学基金的有力支持，作者很难想象能使有关的研究工作顺利展开。日本应用电磁材料与力学学会会长、国际电磁固体力学知名学者、日本东京大学核工程研究实验室主任教授 Miya 先生对本书作者在日本期间给予了热情支持，并为合作研究提供了优越条件，在作者回国后，仍通过日本应用电磁材料与力学学会在兰州大学捐资 300 万日元设立 Kenzo Miya 研究生奖励基金，奖励兰州大学以电磁固体力学研究方向为主的优秀研究生，依此来继续支持作者在这一领域的研究工作，作者对此表示感谢；感谢美国 Clarkson 大学的 J. S. Lee 教授和 Kentucky 大学的 H. S. Tzou 教授对本书作者在美期间从事电磁固体力学与压电智能结构的合作研究所给予的支持！作者始终深深地感谢导师叶开沅教授，由于他的指导，作者从事科学研究的能力获得极大提高；感谢母校华中理工大学力学系的黄玉盈教授等老师，他们给予作者在大学 4 年和研究生阶段以知识与从事科学研究的鼓励；作者特别感谢中国科学院院士、中国力学学会前任理事长、北京大学力学系王仁教授多年来对作者从事电磁固体力学研究所给予的引导、鼓励和支持，并特地从美国寄来为本书所作的序；感谢《固体力学学报》主编太原工业大学杨桂通教授、西安交通大学工程力学系沈亚鹏教授、兰州大学物理系段一士教授为本书申请国家科学技术学术著作出版基金所给予的大力推荐，并感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书的出版所给予的资助。最后，作者对于科学出版社给予本书以出版机会和热忱支持及严肃认真的编辑致以衷心的谢意！。

作者

1998 年 9 月

目　录

序 …… (i)
前　言 …… (iii)
第一章　绪论 …… (1)
1.1　概述 …… (1)
1.2　应用领域 …… (5)
1.3　内容安排 …… (8)
第二章　电磁理论基础 …… (11)
2.1　电磁场基本方程 …… (11)
2.2　电磁介质微观机制与宏观模型 …… (16)
2.3　载流磁体的磁场及矢量磁位 …… (22)
2.4　电场力与电场能 …… (25)
2.5　电感与磁场能量 …… (26)
2.6　能量耗散与 Poynting 定理 …… (27)
2.7　电磁场分析的势函数法 …… (29)
2.8　超导电现象 …… (33)
第三章　固体力学基础 …… (45)
3.1　连续介质固体力学理论 …… (45)
3.2　曲梁的一般理论 …… (52)
3.3　薄板的弯曲理论 …… (58)
3.4　薄壳方程 …… (61)
3.5　弹性系统的平衡稳定性 …… (65)
第四章　电磁介质的电磁弹性力学模型 …… (73)
4.1　Eringen-Maugin 理性力学模型 …… (74)
4.2　Pao-Yeh 公理化模型 …… (77)
4.3　磁体力偶模型与磁体力模型 …… (80)

4.4 铁磁体磁弹性相互作用的广义变分原理及其理论模型…… (83)
4.5 各模型异同点与适用性的讨论…… (89)
第五章 磁刚度与 Lagrange 动力学…… (97)
5.1 磁刚度的基本概念…… (97)
5.2 Lagrange 动力学方程 …… (98)
5.3 载流磁体磁弹性屈曲的动力法 …… (101)
5.4 铁磁弹性板磁弹性屈曲失稳的动力法 …… (107)
第六章 铁磁介质板的力学特征…… (111)
6.1 横向磁场中铁磁板的屈曲失稳 …… (111)
6.2 横向磁场中铁磁板的振动与动力失稳 …… (117)
6.3 复杂磁场环境中铁磁板的弯曲与失稳 …… (120)
6.4 面内纵向磁场中铁磁板的固有频率上升 …… (133)
第七章 载流磁体的电磁弹性力学分析…… (138)
7.1 三平行载流导线的电磁弹性失稳 …… (138)
7.2 超导线圈结构的材料常数 …… (142)
7.3 超导磁体磁弹性失稳的有限元分析 …… (143)
7.4 基于曲梁理论的非线性磁弹性弯曲与失稳 …… (148)
7.5 密绕螺旋线圈磁体的应力分析 …… (164)
第八章 电磁弹性动力学与智能结构初步…… (172)
8.1 薄壁结构中的涡电流分析 …… (172)
8.2 电磁阻尼与衰减振动 …… (174)
8.3 超导体的电磁悬浮现象 …… (181)
8.4 弹性轨道磁悬浮列车动力控制稳定性分析 …… (187)
8.5 压电智能结构的动力控制 …… (196)
附录 A 张量基础知识…… (210)
参考文献…… (216)

第一章 绪 论

1.1 概 述

在近代高新科学技术的发展与推动下，电磁结构（通常由压电、铁磁、导体等材料构成）成为许多高新技术装置的主要结构元件，如：热核聚变反应堆中的第一壁结构和超导载流磁体、超导发电机与超导储能装置、高速磁悬浮列车、微电子集成电路、大型发电机以及各种电磁传感器和执行器等。在这些高科技装置中，其结构在电磁场作用下的力学行为直接影响着这些装置的安全性与品质因素，并由此促成电磁固体力学在近 30 年中形成了一门新兴的交叉学科。

电磁固体力学研究电磁结构在电磁场中的力学行为，如结构的变形、强度、振动以及结构的稳定性等力学特性，它涉及电磁物理和固体力学等学科。当电磁结构处在外加电磁场环境中时，一方面电磁结构受到电磁力的作用产生变形（对于载流导电体，其电磁力为 Lorentz 力；对于可极化或可磁化的电磁介质材料，电磁力是通过电极化或磁化与外界电磁场相互作用而产生的）；另一方面结构的变形又导致电磁场发生改变进而使电磁力的分布发生变化（对于超导材料，结构的变形还可以引起超导体临界电流的变化）。这种电磁场与力学场相互耦合的一个基本特征就是非线性，亦即，即使将电磁场与力学场分别处理为线性的，经耦合后的电磁弹性力学边值方程仍呈现非线性，这无疑给电磁固体结构力学行为的定量分析带来难度，使它成为近代力学研究中的一个极富挑战性的课题。

众所周知，人们对于电磁力学行为与特征的分析给终伴随着对电磁现象的发现和认识，如我国早先发明的指南针、19 世纪发

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

电机和电动机原理的建立等然而，在早期，由于受技术水平的限制，人们往往只关注电磁力作用下的整体效果，如电动机转子在电磁力作用下的转矩、电磁起重机的起重力等，研究的重点也只局限在电磁力整体效果的分析与计算上。由于电磁分布力不能直接由实验测量，人们往往借助于唯象理论方式建立有关电磁力分布的理论模型，通过电磁力的整体效果如主矢或主矩来进行有关电磁力及其所引起的力学现象的分析，通过对比可测力学量的实验值与理论预测值后，判断其理论模型的合理程度。目前，对于载流或导电结构，应用 Lorentz 电磁力公式可以计算作用在结构上的分布电磁力；对于超导体，电磁力计算的困难性是由超导体电磁场分布的复杂性所致，目前大多采用 Bean(1962)对 II-型超导体提出的临界电流的经验模型来进行电磁场的计算；而对于可磁化的铁磁结构，由于它的电磁力与材料的磁化以及结构的变形有关，其正确描述吸引了众多学者的注意力，特别是进入本世纪 60 年代后，随着大量高新科技装置的研制与开发，电磁结构的变形对电磁装置品质的影响及其安全性愈来愈被人们所关注，促使人们去思考建立能反映力学特征的电磁弹性力学模型。

人们早先发现，采用不同物理机制可以建立分布磁力不同但整体力效果相同的等效模型，如分子电流模型、磁极子模型和磁偶极子模型等。然而，Brown(1965)首先指出：对于可变形体或结构，不同的电磁力分布方式将导致对电磁弹性力学行为理论预测的不同。不久，在美国康乃尔大学攻读博士学位的 Moon 和他的导师 Pao(1968)开展了均匀横向磁场中铁磁悬臂板磁弹性屈曲的实验研究，这为检验有关理论模型的合理性奠定了基础。随后，他们采用材料力学的直观方法，在磁偶极子模型基础上，假定磁介质内的磁感应强度与外加均匀磁场相等，提出了磁力分布为体力偶的磁弹性板的理论，并在不考虑端部磁场效应的情形下，通过磁场摄动技术，导出了预测其磁弹性屈曲实验临界磁场的解析式。与实验比较发现：在板的长厚比很大的情形下，他们的理论预测才与实验测量值相接近；而在长厚比不太大时，二者定量上相差很大，且长厚

比越小，相差越大。这一理论预测值与实测值的差异曾在本世纪70年代引起广泛关注，Miya 等人(1978，1980)对此进行了较为系统的研究，他们补充了长厚比不太大时的磁弹性悬臂板的实验，在数值模拟时，他们仍采用 Moon 和 Pao 的磁力计算模型，只是磁场计算采用了包含端部效应的有限元法，使理论预测的临界磁场值有所减小，但并没有使这一差别完全消除。值得指出的是，他们的数值程序未能反应出磁场与力学场之间的非线性耦合。在理论模型的研究方面，Pao 和 Yeh(1973)采用了公理化方法，通过预先引入一 Maxwell 应力张量，在考虑非性线变形及非线性耦合后导出了作用在铁磁体上的磁体力与边界磁力的磁弹性力学模型，其中所得到的磁体力比由磁偶极子模型给出的磁体力小 μ_r 倍(μ_r 为相对磁导率，对于通常的铁磁材料，μ_r 可达到 10^2 以上)，而边界磁力只与铁磁体表面的磁化强度矢量的法向分量有关，在经过繁杂的推导与磁场摄动处理后，对 Moon-Pao 实验给出了与 Moon-Pao 理论相同的预测结果。Eringen(1980，1989)和 Maugin(1981，1982)则采用另一形式的 Maxwell 应力张量，运用理性力学方式导出了不同于 Pao-Yeh 模型的磁弹性力学模型，其中磁体力与磁偶极子模型的结果相同，但边界磁力却只与铁磁体表面的磁化强度矢量的切向分量有关。van de Ven(1984)和 van Lieshout 等人(1987)从变分原理出发，在预先引入与 Pao-Yeh 模型完全相同的 Maxwell 应力张量后，得到了与 Pao-Yeh 模型完全相同的理论模型。由于电磁固体力学问题在本质上涉及电磁场与力学场的非线性耦合，相应的定量分析结果一直很少，直到90年代才逐步开始进行反映磁场与力学场之间非线性耦合的定量分析(Zhou and Zheng，1994；Zhou et al.，1995；Zhou and Zheng，1996)，这为定量检验各模型的适用性提供了有效的依据。譬如，通过定量分析发现，前面提到的关于铁磁材料磁弹性相互作用的各种理论模型均不能模拟出铁磁材料的另一类典型实验(Takagi et. al.，1993，1995)，即位于面内纵向磁场中具有低磁极化系数的铁磁悬臂板的固有频率上升实验，这些模型给出的是与实验相反的结果，即此时

所预测的固有频率随外加面内磁场值的增加而下降，这足以说明现有理论的不足。

本书作者除了在磁弹性非线性耦合问题定量分析方面开展了一系列工作外，在磁弹性相互作用的理论模型建立方面也进行了深入研究。Zhou 等(1995)运用三维弹性体的应变能与磁能之和的能量泛函对于横向磁场中的铁磁板导出了与磁偶极子模型相同的磁体力模型(Zhou and Zheng，1996)，从理论上证实了斜磁场中的铁磁板将先发生磁弹性弯曲，而后失稳，首次揭示出微小倾斜的安装误差对横向磁场中铁磁悬臂板磁弹性失稳临界值的影响为使临界磁场减小这一涉及结构安全设计的重要规律。Zhou 和 Miya (1998)应用同一变分原理导出了处于面内纵向磁场铁磁板的另一特殊的磁弹性力学模型，使得 Takagi 等人的固有频率上升的实验现象在理论上得以模拟。理论分析表明：在将所有磁力向板的中面进行简化后，从等效横向磁力的观点来看，这一模型与原有其他理论模型是不相同的，然而它也有其局限性，即不能用于模拟横向磁场中铁磁板的磁弹性失稳现象，这样，我们就有分别用于描述已有的两类典型实验现象的两类不同的磁弹性相互作用的理论模型(一类是对横向磁场，另一类是对面内磁场)。而在实际应用中，结构往往处于复杂的磁场环境中，如斜磁场，这样，就需要一个能同时模拟两类典型不同实验现象的理论模型。Zhou 等(1996)，Zhou 和 Zheng(1997)，周又和、郑晓静(1999)建立了适用于任意磁场的铁磁板和三维铁磁体的磁弹性耦合作用的模型，其中包括磁场方程、力学方程以及连接磁场和力学场的磁力表达式。

从上面介绍的关于铁磁介质电磁弹性力学理论模型的研究，读者可以发现，电磁固体力学的理论仍处在建立与发展之中，还有许多亟待解决的问题。仅理论模型建立方面，就有如高温超导体的磁弹性力学模型，其材料多数是可磁化的，这时，其电磁力同时涉及到 Lorentz 力和磁化引起的电磁力，目前，这方面的模型是相当不完善的。再如，对于运动介质的电磁弹性力学问题，目前存在许多不同描述方式的模型，Pao(1978)总结了这方面的研究状况，认

为有 4 种模型是可行的，然而这些理论均是基于 Maxwell 应力张量建立的，这对于铁磁介质，如前所述，也可能是有缺陷的，等等。读者还可以发现，在理论模型的建立过程中，除了理论分析和推导外，实验检验与定量计算是不可缺少的，它们是建立合理理论框架的必要手段，只有三者有机结合，才可望建立与实际更接近的理论模型，才可望模拟实际情形中的热、电、磁等效应与力学效应耦合的复杂系统。

1.2 应用领域

电磁固体力学在能源、交通、国防等重要部门有着广泛的应用，这里我们将给予简要介绍。

作为未来新型的清洁能源，热核聚变反应堆的研制已进行了数十年，并可望在下一世纪上半叶进入商业化阶段。它是利用超导强磁场将温度高达 10^8K 的类似太阳热核反应的等离子体约束在一反应堆中进行。对于如此高温的热核反应，除了涉及聚变反应堆的超真空、结构材料的良好导热性质等众多技术问题外，产生强磁场的超导磁体与第一壁电磁结构在强(稳恒与脉冲)磁场下的力学行为，就成为热核反应堆安全设计关注的焦点之一。

电磁固体力学的另一个应用领域是磁悬浮技术。其中一类是作为未来新型高速运载工具的磁悬浮列车，它正在被各发达国家竞相开发。我国的磁悬浮列车样车已在国防科技大学和西南交通大学研制成功。德国和日本是这一技术开发的领先国家，它们已在实验线上成功实现了速度高达每小时 500km 的实体车，这是目前陆地上运载工具所能达到的最快速度。由于它为非接触悬浮式，具有速度快、耗能低和噪音小等优点，是未来陆地上理想的运载工具之一。磁悬浮技术的另一类应用是作为非接触机械，目前正成为研究的热点。特别对于高速转轴，利用这一技术可以消除因摩擦引起轴承结构损坏的弊端。高温超导材料的发现，更激发了对这一领域的研究热情。

超导材料的应用将伴随大量的电磁固体力学问题，如由于多数超导材料的强度与韧性都不高，超导结构或超导磁体往往以强度与韧性良好的金属材料如铜和铝等为基体，将超导纤维线固化在金属基体材料中制成商用化的超导线与超导磁体。由于超导材料均处在低温环境和强电流、强电磁场中，其热弹性、电磁弹性和超导失超等现象引起的力学特征是超导材料进入实用化要首先解决的课题之一。

在国防工业中，利用强脉冲电流产生的强大脉冲电磁推力，已研制出具有远射程的电磁炮或电磁枪，有的射程可达到 10km 左右，远远大于常规炮的射程。在这一研究领域中，涉及到电磁脉冲力的产生原理与技术实现、炮管弹性变形对炮弹射程的影响等电磁固体力学问题。

在医疗器械方面，利用超导材料特性建造的核磁共振仪是目前用于检查癌症等疾病的高新技术医疗设备，其磁场是由直径大约为 1m 的超导磁体产生。而微电机械是当前高新技术中关注的另一重要课题，它除了在医用上可望能生产出进入人体内进行手术的微电机械（如消除血管的动脉硬化引起的心血管疾病）外，还可望在结构控制、远距离信息传送等方面获得应用。目前，除了制造工艺上的难度外，其微电磁力与微机械力运动的机理仍不十分清楚。

超大规模集成电路是信息时代硬件设施的基础性元器件。由于多层电路薄膜的采用，电路中的微电力与热效应是导致其集成电路膜片破坏的主要原因，这种破坏严重地制约了超大规模集成电路板的产品质量和生产成本。目前，这种电致破坏行为已引起广泛重视，获得了一些初步认识，但尚需彻底弄清其破坏机理。

在加工工艺中，磁成形技术被采用以代替传统的接触式冲压成形。在待成形的工件附近放置一线圈，施加一脉冲磁场在被加工件中产生涡电流，由此产生强脉冲磁推力将工件推离线圈至模具上，进而使工件成形。显然，这种加工工艺至少避免了由冲头与工件的接触所引起的表面损坏。这里工件冲向模具的速度与磁场的

强度、脉冲磁场的脉冲时间以及工件的涡电流趋肤深度等因素有关，涉及对磁感应力和磁感应电流的研究以及材料在电磁力作用下的大变形研究。用高频电流对金属结构的电磁感应热加工是电磁固体力学在加工工艺中的另一应用，它可以使构件均匀加热并有效保护构件的表面和形状。这里涉及的理论问题是热电磁弹性的理论分析和计算，如，用高频电流对基体进行感应加热时，感应电流和相应热源的分布特征实质上取决于基体的几何尺寸、材料的特征、材料的导电率、外电磁场源的分布和频率等等。

在超声和电声学技术中，许多装置的结构元件由偏振压磁材料制成。运用电磁固体力学理论，合理设计出的声发射、声接收元件可以应用到无损探伤、超声技术、电声技术等领域中。另外，当超声无损探伤无法达到有效目的时，可利用涡电流进行无损探伤，确定出结构内部裂纹的位置和尺寸；以磁致伸缩和弹性晶格应变之间的磁滞相互作用为基本设计原理的磁弹性法可用来对构件的表面残余应力进行无损探伤，同时还可对结构或构件内部的裂纹进行探测。已经发现，在磁场作用下，将脉冲电流通入带有裂纹的结构中，利用电磁和热磁效应，可使裂纹尖端的曲率半径增大、应力集中减小，因此可利用这种磁场与脉冲电流技术抑制结构内部或结构连接部位出现的裂纹扩展。

在材料科学领域，将某些自身具有可完成控制系统中的全部或部分功能并自发地产生所需响应，或通过反馈信息来调整初始参数，给出适当响应而无需外界帮助的材料称为智能材料，如压电材料、压磁材料、压敏材料、铁电体、铁磁体、电流变体等等，这些材料最显著的特点是电、磁、热、机械运动等之间的耦合行为。由于这些材料具有自我选择、自我诊断、自我调节、自我恢复等功能，引起理论界和工程界的广泛重视。另外，在新型材料和智能材料的设计与制作方面，利用加磁手段改善金属的力学性能是当前国际材料科学的重要发展方向之一。由于金属铁磁材料在不同的温度区间具有不同的磁性，如奥氏体为顺磁相、马氏体为铁磁相，人们可以利用外加磁场来促使相变量发生变化。在材料处理的不同过程中，

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com