



多场耦合动力学

郭少华 著



科学出版社

多址



郭少华 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在总结经典多场耦合理论及其成果的基础上,分别介绍了弹性场、电磁场、热场和流场及它们之间的准静态耦合和全动态耦合波动力学过程,全面论述了多场耦合波形成的机理,并系统地给出了基于经典方法及本征方法理论框架描述的耦合波基本方程,以及相应的特征求解结果。本书首次给出了考虑全动态过程的耦合波传播图像,并阐述了宏观物质场的耦合波动现象。书中详细列出了包括孔隙介质在内的声弹性波、热声波、热弹性波、热电磁波、压电波、震电波、磁声波等复杂介质耦合波分别在各向同性及各向异性情况下的表征方程和传播规律。

本书适合地球物理、天体物理、材料物理、地震工程、声学工程与工程力学等领域的科技人员,以及高等院校相关专业的教师和研究生阅读,作者希望本书对提高人们对多场耦合动力学波动规律的认识有所帮助。

图书在版编目(CIP)数据

多场耦合动力学/郭少华著. —北京:科学出版社, 2017
ISBN 978-7-03-053420-0

I. ①多… II. ①郭… III. ①耦合-波动力学 IV. ①O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 135600 号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:王万红
责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华设计部

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏志印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2017 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017 年 7 月第一次印刷 印张: 13

字数: 252 000

定价: 70.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62130750

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

多场耦合及其现象是现代工程科学及高新技术领域的重要前沿问题。然而，工程科学对多场耦合现象的研究大都集中在静态问题上，即在特定域上求解耦合过程中的单场静力学响应；材料科学对多场耦合现象的研究则大都集中在准静态问题上，即在准静态假定下，对特殊结构求解耦合过程中的单场动力学响应，其中以声波最为常见。随着工程科学领域对极端物理现象的系统认识要求及材料科学领域对微纳米尺度上的复杂耦合过程的深入研究需要日益增长，基于全动态耦合过程的耦合波动规律的认识显得越来越重要，但至今还没有系统研究全动态多场耦合动力学的专著出现，这使得人们对多场耦合波的形成机理、波动过程及其传播规律的认识非常有限和模糊，甚至混淆了单场波和耦合波的本质区别。

作者从 21 世纪初开始研究多场耦合及其波动现象，并为此提出了热动力学方程。同时，作者在提出规范空间中的本征理论体系的基础上，系统研究了全动态压电波、热电磁波及孔隙介质固结理论和声弹性波等一系列现象。经过十余年的不懈努力，逐渐对多场耦合波动过程的形成机理、描述方程及特征求解有了全新的了解和认识，并逐渐建立了多场耦合动力学体系。通过本书，读者将看到作者所展现的多场耦合波传播过程的特殊规律。作者希望本书能够为多场耦合动力学理论研究领域注入一些新的生命力。

本书总结了经典多场耦合动力学理论及作者对多场耦合本征波动力学规律的研究成果，同时也加入了新的研究内容。本书内容安排大致如下：第 1 章，介绍多场耦合现象及研究历史；第 2 章，介绍弹性场及弹性波理论的经典描述与本征描述；第 3 章，介绍电磁场及电磁波理论的经典描述与本征描述；第 4 章，介绍热场及热波理论的描述；第 5 章，介绍流场及声波理论的描述；第 6 章，介绍热场与流场的耦合及超流动现象；第 7 章，介绍热场与弹性场的耦合及热弹性现象；第 8 章，介绍热场与电磁场的耦合及热电现象；第 9 章，介绍温度场与渗流场的耦合及热渗流现象；第 10 章，介绍应力场与渗流场的耦合及土体固结现象；第 11 章，介绍流场与弹性场的耦合及孔隙介质波动现象；第 12 章，介绍静电场与弹性场的耦合及压电声波现象；第 13 章，介绍弹性场与电磁场的耦合及弹电磁波现象；第 14 章，介绍热场与压电场耦合及热释电现象；第 15 章，介绍流场、弹性场和电磁场的输运型耦合及震电波现象；第 16 章，热场、流场和电磁场的耦合及磁声波现象。

感谢罗建阳博士、滕一峰博士和冯晓东博士在计算和绘图上给予的帮助。本书涉及领域广泛，加之作者的水平、学识有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

郭少华

2016年12月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 多场耦合及其现象	1
1.2 多场耦合理论研究	4
第 2 章 弹性场	9
2.1 弹性现象及弹性波	9
2.2 弹性力学张量描述	10
2.3 弹性力学标量描述	11
2.4 弹性波	12
2.4.1 经典各向同性弹性波	12
2.4.2 本征各向异性弹性波	14
第 3 章 电磁场	16
3.1 电磁现象及电磁波	16
3.2 电磁学矢量描述	16
3.3 电磁学标量描述	18
3.4 电磁波	20
3.4.1 经典各向同性电磁波	20
3.4.2 本征各向异性电磁波	20
第 4 章 热场	23
4.1 热现象及其传播特性	23
4.2 导热方程及温度场	24
4.3 热波	25
4.4 热动力学	26
第 5 章 流场	30
5.1 流场及其运动描述	30
5.2 渗流方程及压力场	31
5.3 流场动力学	33

5.4	声波	33
第6章	热场耦合流场	35
6.1	超流动现象	35
6.2	超流场方程	36
6.3	热声波	37
6.4	热声波的传播特性	37
6.4.1	耦合模方法	37
6.4.2	耦合场方法	39
第7章	热场耦合弹性场	41
7.1	热弹性耦合现象	41
7.2	热弹性场方程	42
7.2.1	经典方法	42
7.2.2	本征方法	42
7.3	热弹性波	44
7.3.1	各向同性	44
7.3.2	各向异性	45
7.4	热弹性波的传播特性	46
第8章	热场耦合电磁场	60
8.1	热电耦合现象	60
8.2	热电磁场方程	60
8.3	热电扩散	62
8.4	热电扩散的传播特性	63
第9章	温度场耦合渗流场	65
9.1	热渗流现象	65
9.2	热渗流场方程	66
9.3	热渗流	67
9.4	热渗流的扩散特性	67
第10章	应力场耦合渗流场	70
10.1	土体固结现象	70
10.2	拟静态固结方程	71
10.2.1	经典方法	71

10.2.2 本征方法	72
10.3 固结压力	73
10.3.1 各向同性	73
10.3.2 各向异性	78
10.4 固结系数的各向异性变化	79
第 11 章 流场耦合弹性场	83
11.1 流体饱和孔隙介质波现象	83
11.2 水饱和孔隙介质场方程	83
11.2.1 经典方法	83
11.2.2 本征方法	84
11.3 声弹性波	87
11.3.1 各向同性	87
11.3.2 各向异性	88
11.4 声弹性波的传播特性	89
11.5 黏性流场中的声弹性波	93
第 12 章 静电场耦合弹性场	103
12.1 压电声波现象	103
12.2 拟静态压电方程	104
12.2.1 经典方法	104
12.2.2 本征方法	104
12.3 压电声波	106
12.3.1 耦合模方程	106
12.3.2 本征模方程	106
12.4 压电声波的传播特性	107
12.4.1 耦合模解	107
12.4.2 本征模解	111
第 13 章 弹性场耦合电磁场	120
13.1 力电磁耦合现象	120
13.2 全动态压电磁方程	120
13.2.1 经典方法 (I)	121
13.2.2 经典方法 (II)	121
13.2.3 本征方法	122
13.3 弹电磁波	124
13.3.1 耦合模方程	124

13.3.2	耦合场方程	124
13.3.3	本征模方程	125
13.4	弹电磁波的传播特性	127
13.4.1	耦合模解	127
13.4.2	耦合场解	132
13.4.3	本征场解	138
第 14 章	热场耦合压电场	143
14.1	热释电现象	143
14.2	热压电场方程	143
14.2.1	经典方法	144
14.2.2	本征方法	145
14.3	热压电波	146
14.3.1	压电热弹性波	147
14.3.2	压电热电波	148
14.4	压电陶瓷介质中的热波	150
第 15 章	流场耦合弹性场与电磁场	160
15.1	孔隙介质震电现象	160
15.2	震电场方程	160
15.3	震电波	162
15.4	震电波的传播特性	165
15.4.1	耦合场方法	165
15.4.2	耦合模方法	166
第 16 章	热场耦合流场与电磁场	176
16.1	电磁流体力学	176
16.2	热电磁流场方程	176
16.3	不可压缩磁流场力学近似	178
16.4	阿尔文波	179
16.5	理想磁流场耦合波	182
主要参考文献		189
附录 A	多场耦合系数张量	194
附录 B	多场物理量与材料系数纲	199

第1章 绪 论

1.1 多场耦合及其现象

实际工程中存在许多物理场，如温度场、应力场、湿度场、电磁场和化学场等。多场耦合是指由两个或两个以上的场通过交互作用形成的新的物理现象，它在客观世界和工程应用中广泛存在。传统的多场耦合问题大多涉及热-电-磁-力等物理场的耦合作用，这种多个物理场相互叠加的问题称为多场耦合问题。随着现代工业和科学技术的飞速发展，力、电、磁、热等多场耦合的问题不断涌现，如磁浮超导、智能材料与结构和核动力结构等多场耦合下的问题，促进了新的学科交叉。许多大型电磁装置和结构在工作中处于复杂的电磁场环境，这些装置常常受到磁场和高温作用而发生弹塑性变形和动力响应。例如，核聚变反应堆防护装置的第一壁结构，由于壁厚小、工作温度高和受到强脉冲磁场的作用，结构将会产生很大的磁弹性力，甚至导致结构丧失防护能力。此外，在磁致成形、磁悬浮列车、电磁传感器和非接触减震等领域的装置中，其结构的力学行为要受到外加磁场和温度场的作用，同时这些力学行为还会影响到结构上电磁场的分布，导致一系列与结构安全或装置运行有关的力学问题。再如，随着制造工业对热能和机械能的应用量级不断突破极限，如电磁能、微波能、化学能和生物能等超越传统领域的能量形式相继被引入工业过程，多场耦合现象表现得越来越显著。

自然界中的多孔介质通常由含许多孔隙的固体骨架和自由流动的间隙流体组成，是多相物质共存的一种组合体。一些天然介质（如土壤和油气层等）、人造材料（如活性炭、木材、混凝土和人造水凝胶等）和生物材料（如生物软组织、细胞和微细血管网络等）均属于多孔介质的范畴。多孔介质在渗流、迁移、传质及力学或化学作用下通常会产生电-热-化-力等多场耦合作用。从现象上看，这些多孔介质通过多场耦合与能量转换，能够感知外界环境的变化，并能够自动进行调整以适应外界的变化，从而表现出多场耦合与智能材料的性能特点。对这种耦合特性的研究广泛涉及地质、环境、材料、生物、医学、物理和化学等多个学科领域，如土壤的化-热-湿-力耦合过程，响应性水凝胶的化-力-电耦合及生物软组织的多场耦合机理等。这些材料兼具结构和功能的双重特性，能够实现非机械能（热、电、化）与机械能之间的能量转换。例如，多场耦合理论常用来分析均匀骨质材料的内部重组问题，即研究多场耦合作用产生的非均匀应力场的作用下，原本均匀的骨质材料的结构不断适应外部环境而不断重组的变化过程，从而可以考察外

加载荷（如热、力、电、磁等）影响骨骼结构的变化机理。通过对智能生物材料的研究，可以加深人们对热-力-电-磁作用对骨骼进化与演变的影响的理解，从而用以指导骨组织疗伤过程，达到恢复或改善骨骼组织的功能，将压电生物智能材料与生物医学和康复工程联结起来。我们知道，生物组织（如软组织和骨等）在机械载荷作用下会产生热-力-电-磁等多物理场的耦合效应，这种耦合效应对于组织的生长和重建具有重要作用。作为生命体的重要组成部分，生物组织（如关节软骨）可看作由带电固体网络、孔隙液体和自由离子组成的多孔介质。在神经、体液和代谢作用的调控下，生物组织常表现出化-力等多物理场耦合行为。生长在液体环境中的软组织在化学势驱动下产生力学变形，其膨胀和收缩主要依赖于固定电荷密度、固体网络的弹性性能和孔隙流体中的离子浓度。生物组织等作为特殊的孔隙材料，具有导电性、膨胀性和高分子兼容性。这类多孔介质不仅发生力学过程，而且在很多情况下还同时存在其他复杂的物理过程、化学过程和生物学过程，并且这些过程往往是相互影响和相互制约的。生物材料通常具有复杂的介质环境，如渗流场、温度场、应力场、电场和化学场等，这些环境相互作用、相互影响，从而构成了相互制约的动态平衡体系的复杂状态。多孔介质可以看作由带电可渗透性固体构成且固体间充满电解质的溶液，生物材料是一种特殊的多孔介质，黏土、页岩和生物软骨组织等都可以近似看成多孔介质。

进入纳米尺度，很多物质展现出新奇的物理特征。在这一尺度下，由电荷、分子轨道、电子结构和自旋态构成的低维材料的局域场与力学变形、机械运动和物理生化环境等外场间存在强烈耦合，使得传统的器件原理和工艺技术遭遇严重挑战。但同时，这种纳米尺度多场耦合使得在宏观尺度下只有少量智能材料才具有的力-电-磁-光-热耦合性质在一般纳米材料中广泛存在，出现普遍的纳米智能性质，成为新型器件的基础。针对低维材料结构的力-电-磁-热-流耦合特性，不少学者开展基于量子力学、连续体力学和材料物理的纳米尺度物理力学理论、计算与实验研究，在纳米智能结构系统，纳米器件原理设计和能量转换、能量耗散及驱动原理的纳米技术研究方面取得了一些进展。具有多场耦合性能的材料种类很多，最常见的有电驱动压电材料，还有热驱动、磁驱动、水驱动及化学驱动材料等。由于某些具有耦合性能的材料力学性能不是很好（如脆性、易断裂和强度较低等），因此这些材料往往与其他材料复合，形成多功能复合材料。这些具有多物理耦合性能的复合材料往往表现出组分材料所没有的附加性能。

天然岩体及土体总是赋存于一定的地质系统中。地下水、地应力和温度是该物理地质环境中的三个主要因素。工程研究内容不仅是应力场和变形场，还涉及温度场和渗流场等。工程实践表明：岩石与土体中温度场、渗流场和应力场之间相互依存、相互联系、相互影响，形成耦合效应。该问题目前已经涉及了地下工程、采矿工程、水电工程、边坡工程、隧道工程、能源开采、地震预测及核废料

处理等。一般来讲,温度场、渗流场和应力场都是随时间和空间变化的场变量,三者的耦合作用处于一种复杂的动态变化中。岩体多场耦合通常指岩体应力场、渗流场、温度场及化学场之间的相互影响和相互作用。岩体多场耦合存在于岩体形成及整个演化过程,具有复杂的耦合机制,并受岩体地质特征及赋存环境的影响。现代岩土工程将爆破开挖、锚固支护、固结灌浆及库水位骤降等工程作用纳入岩体多场耦合分析体系,认为工程作用在岩体多场耦合过程中对岩体地质特征、力学特性及工程性质产生了强烈的改造作用,更加注重岩体工程作用效应研究,更加突出利用和改造岩体的工程目标,对于揭示岩体变形破坏机制和稳定性演化规律具有重要的科学意义,并在各类岩石工程中具有广阔的应用前景。电渗是一种采用电能进行地基加固的技术,该技术于1939年首次被应用于岩土工程中,现已应用到斜坡、堤坝和软土地基加固等岩土工程中。近几年,国内主要将其应用到围海造地、袋装吹填淤泥土加固、基坑降水和高速公路地基处理等工程中。复杂的大系统由相对简单的子系统组合或耦合而成,这是客观世界的普遍规律。采用经典物理场进行耦合分析时,岩体应力场、渗流场和温度场之间的相互作用是双向耦合,但工程作用参与的多场耦合大多是单向的。事实上,工程作用引起的岩体物理场变化可以通过现场监测得到,对监测信息进行及时的反馈分析,当确认工程作用引起的这种变化将危及岩体稳定和工程安全时,就必须对相应的工程措施进行调整和优化。在这个意义上,工程作用参与多场耦合也是双向的。因此,采用岩体多场耦合理论和方法进行边坡工程、地下工程岩体稳定性研究时,可以更好地将岩体工程动态设计、监测反馈分析和信息化施工结合起来,以达到既安全可靠又经济合理的目标。

在天体物理环境中的宇宙学领域普遍存在着导电流体和星系磁场,多场耦合动力学也展现出强大的生命力。例如,电磁流体力学就是其中较为活跃的一支。随着能量状态的不断增加,物质形态分别处于固态、液态、气态和等离子体状态。后三种状态的物质都是流体;前三种状态的物质既可以是导体,也可以是绝缘体。电磁流体力学所研究的介质主要是导电液体、电离气体和等离子体,宇宙环境中的导电流体主要是等离子体。宇宙磁场是普遍存在的一种物质形式,它的位形和运动将影响天体的平衡、稳定、运动和演化。总之,在宇宙各种尺度的天体中,气体和等离子体到处存在,在一些行星内部还存在着固体和导电液体。这些导电液体和电离气体的平衡和运动是宇宙动力学的主要研究内容,而它们与磁场的相互作用就构成了宇宙磁流体力学。电磁流体力学是研究导电流体和电磁场之间的相互作用规律的科学。一般而言,电磁场和导电流体是彼此耦合的。一方面,电磁流体的行为遵循物质的质量守恒、动量守恒和能量守恒的关系,但除流体的贡献以外还应计入电磁动量、电磁动量流、电磁能量和电磁能量流的贡献。另一方面,电磁场遵循经典的电动力学规律,但还需要包括由运动的导电流体所感生的电磁效应。正是这种导电流体和电磁场之间的相互制约,产生了许多新的物理现象。

1.2 多场耦合理论研究

自 20 世纪 60 年代以来, 应微电子工业发展和未来新能源与高速陆地交通的需要, 电磁介质结构作为基本构件得到广泛应用。围绕这些电磁结构的功能性特性和安全设计的强度、稳定性特性, 研究人员建立力学变形场与多物理场相互耦合的非线性力学理论框架与有效的定量分析方法。20 世纪 90 年代初, 周又和、郑晓静等开展了对电磁材料结构多场耦合非线性力学行为的理论研究, 对铁磁材料、超导材料、磁致伸缩材料和压电材料等具有广泛应用的电磁材料及其结构在电磁场作用下的弯曲、失稳、振动与动力控制等基本力学行为展开了理论与有效计算方法的研究。要研究磁场中可变形体的磁场和应力场, 需要先确定磁场对可变形固体的力的作用形式。最早在麦克斯韦时代人们就提出了磁场对铁磁体的作用力问题, 但由于磁体内部的磁力分布不能直接测量, 因此铁磁体上磁力的分布问题一直在研究中。1973 年美国康奈尔大学的 Pao 和 Yeh 深入研究了磁弹性问题, 通过引入麦克斯韦应力张量, 采用公理化方法, 在考虑非线性变形介质与磁场之间的耦合效应后, 建立了便于应用的磁弹性力学模型。也有很多学者针对软铁磁结构建立了力-磁-热多场耦合问题的理论分析模型和有限元定量分析模型, 对铁磁梁式板的磁弹性屈曲、磁热弹性屈曲及温度对磁弹性屈曲影响等问题, 以及在静磁场中振动时力-电-磁的耦合作用进行了分析研究。此外, Moon 等研究了导电线圈结构在电磁力作用下的变形问题, 建立了磁场与变形之间的非线性耦合基本方程, 它全面反映了结构的拉伸、扭转和弯曲等各种变形模式, 同时给出了受到脉冲电流作用时结构的动力失稳判据。针对铁磁介质结构在电磁场中的力学分析, 20 世纪 60 年代, Eringen 等从连续介质力学角度对处于电磁场中可变形的铁磁材料结构建立了一般理论框架。但由于这一理论框架在实际应用中的复杂性和困难性, 人们一直无法从定性和定量上对电磁场中的电磁固体结构的电磁弹性耦合行为产生比较清晰的认识。van Lieshout 等提出了基于宏观 Maxwell 应力张量的公理化模型, 对包含磁场、温度场和结构变形场的力-磁-热多场耦合问题建立了力-磁-热多场耦合的广义能量变分模型, 解决了梁式板在不同支撑条件与不同磁场环境下的磁弹性屈曲失稳和后屈曲等一系列问题。

多孔介质的多场耦合力学问题的研究始于土力学中的饱和土流固耦合问题。Biot 针对饱和土的变形和固结现象, 首先建立了考虑固体和流体相互作用的饱和土固结方程和理论框架, 将经典渗流力学与弹性力学或塑性力学结合, 用于描述孔隙流体与多孔介质的相互作用, 采用宏观连续介质方法处理多孔介质流固耦合问题。Bowen 基于混合物理论系统地建立了土力学中的多场耦合力学体系, 混合物理论在多场耦合领域受到广泛关注, 并得到迅速发展。混合物理论以热力学理

论为基础,用于研究混合物组分运动规律、相互作用规律和相互转化规律,以及混合物整体运动和变化与外界对混合物作用之间的关系,是对单相物质连续统理论的拓展,具有很好的自治性和系统性。多孔介质的经典理论最初只涉及流体和固体的耦合作用,没有考虑热-电-化等物理场的效应。出于实际问题的需要,国内外学者通过对经典流固耦合模型加以扩展以考虑其他复杂场的耦合作用。例如, Luikov 针对混凝土等非饱和含湿多孔介质在高温下的热-湿传输过程,提出湿分的传输是由湿分含量、温度和压力梯度控制的,并基于各相的质量守恒方程、能量守恒方程和达西定律,推导了各场耦合的微分方程; Bazant 等提出把混凝土中孔隙水和孔隙混合气体的质量处理为含水量的简化传热传质耦合模型,探讨了化学束缚水在高温下脱水过程的热量损失; Ahmed 等建立了以温度、气体压力和水蒸气摩尔比为主要基本未知量的耦合模型,利用水蒸气和混合气体的质量守恒和能量守恒建立耦合偏微分方程组; Tenchev 等则提出了在质量扩散过程中把孔隙水和孔隙水蒸气分别处理,建立以温度、水蒸气含量和混合气体压力为基本量的耦合模型; Dal Pont 等发展了混凝土热-力-化耦合模型,但没有考虑混凝土骨架的力学行为; Obeid 等基于非饱和和介质理论也建立了一个热-湿-力耦合模型,假定固体骨架表现为热弹性,传热和传质过程是解耦的; Gawin 等考虑了各流体相之间的相互作用,同时考虑了相变和水合-脱水效应。需要指出的是,以上模型都没有考虑高温下混凝土存在的耦合化学反应与传输过程。实际上,高温作用下混凝土这种非饱和和介质会发生脱水、基质溶解现象,即伴随化学传输过程。Li 等考虑高温引发的化学脱水和化学脱盐过程,建立了高温条件下混凝土化-热-湿-力耦合模型,其数学模型由控制干空气、湿分及化学基质溶解物的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程等耦合偏微分方程组成,并考虑了高温下脱水和脱盐过程引起的化学软化和损伤。混凝土中水泥的水化和老化过程同样伴随化学过程。Cervera 等提出一个研究早期混凝土性能的热-化-力耦合模型,用于研究混凝土的水化程度及水化热的变化过程,并研究了化-力耦合作用下的损伤和蠕变问题。Gawin 等提出完全耦合的湿-热-化-力耦合模型,通过混合理论得到了耦合场控制方程。饱和土、黏土等多孔介质的多场耦合力学问题,多采用混合物理论进行处理。混合物理论的基本思想是把多孔介质看作由多相物质组成的混合物,假定每一相都均匀分布在固体骨架上而形成的控制域空间,而多孔介质是由所有相在控制域空间重叠分布形成的,即控制域空间中的每一点都包含了所有相。混合物的运动遵守基本的运动规律,即质量守恒、动量守恒、能量守恒和熵不等式。Hueckel 等把土体看作两相混合物(含有水的固体相作为一相,界面质量传递层作为一相)。采用混合物理论研究了湿黏土在热和化学载荷作用下的耦合问题,利用化学软化的概念来描述土体中的一种化学污染物引起孔隙水介电常数或离子浓度变化而导致的土体变形情况,建立了饱和土化-力耦合模型。其后,他们又利用多尺度模型

对土壤中矿物质溶解的化-力耦合问题及土壤、沉积物压实化-力耦合模拟中的反馈机制进行了深入研究。另外, Loret 等对化学作用下的饱和黏土膨胀等问题进行了系统研究, 重点考虑了电-化-力耦合问题, 分析了液相中离子通过多孔介质时的扩散和电位移现象, 推导了弹塑性饱和黏土的电-化-力耦合方程及本构关系。

生物组织在多场作用下的耦合力学模型也主要从混合物理论出发, 将组织中的固相、液相和离子相分别考虑, 假定各相不存在相变, 分别建立各相的控制方程进行耦合场分析。1991 年, Lai 等在对含水软骨组织的研究中, 基于混合物理论, 最早提出了软骨组织是由固相、液相和离子相组成的三相模型, 并采用三相理论对软骨组织在多场作用下的膨胀问题进行了研究, 后来深入研究了软骨等含水组织的电-化-力耦合行为。Gu 等在 Lai 的三相模型的基础上提出了多场耦合的本构关系。Huyghe 等和 Frijins 等利用分层结构多孔体的质量及动量守恒定律和本构关系采用简化的一维有限元模型, 对椎间盘组织的膨胀和压缩行为进行了数值模拟。Leveston 等采用 Lagrange 乘子法和变分原理研究了水合生物组织的准静态问题, 构造了三场耦合有限元模型, 并应用轴对称四边形单元对软骨等生物组织进行模拟。Loret 等和 Loix 等以生物关节软骨为基体, 在多离子种类和多相介质的情况下, 考虑了不同相间的动量与能量交换, 建立了固、液和离子三相模型(由胶原质纤维组成的固相, 由纤维内部水和溶解盐组成的一个液相和由纤维外部、水溶解盐和蛋白聚糖组成另一个液相), 讨论了电-化-力耦合关系, 系统地阐述了多孔介质电-化-力耦合模型中的热力学理论框架。2010 年, Lu 等引入摄动方法和势函数将 Lai 等提出的三相混合理论进行了简化, 用于分析软骨组织的电-化-力耦合变形, 并通过压痕实验与数值结果进行了比较。最近, Yang 等利用热力学定律, 建立了完全耦合的热-电-化-力理论的一般框架, 并利用能量原理构造泛函, 利用变分原理导出了完全耦合的线性本构关系和有限元列式, 分析了化-力耦合介质的离子浓度改变所引起的变形及外力作用导致的离子重分布现象。Qin 等则分析了多场耦合骨质材料的表面和内部重组行为。虽然生物软组织和离子聚合物及响应性水凝胶在多物理场作用下的耦合特性存在相似性, 但前者在微观结构和生理环境等方面要比后者更加复杂。因此, 活体生物软组织的多场耦合问题仍是一个开放的问题, 也是当前软组织力学领域的研究热点。

在岩石力学的发展过程中, 20 世纪 70 年代起步的岩土体介质应力(变形)、渗流及温度等多场耦合研究, 特别是 Jing 等在 20 世纪 80 年代中期开始的裂隙岩体热-水-力-化 (THMC) 耦合问题的研究, 凝练了岩土体变形和破坏的关键科学问题, 使得岩石力学研究建立在更加坚实的物理和力学基础上, 极大地丰富了岩石力学的理论、方法和技术。现代岩石力学已发展成为以连续介质力学为基础, 运用连续和非连续介质力学的基本概念、模型和方法, 研究岩体的应力、强度、变形和破坏及流-热-化传输等物理力学特性, 并形成了解决工程岩体稳定性问题的新的应

用力学学科。岩体多场耦合研究以岩体为研究对象；以岩体地质特征及赋存环境研究为基础；以室内外试验、数值模拟为主要研究手段；以岩体的应力和变形、地下水和其他流体在岩体介质中的运动，以及地温及化学场之间的相互作用和相互影响为主要科学问题；以揭示多场耦合条件下岩体变形破坏、流体运动和岩体稳定性的状态和演化规律为主要研究目标。岩体多场耦合研究采用的是系统方法，强调系统的内在联系和系统各部分之间的相互作用和相互影响，注重在定性的层面上描述岩体多场耦合的地质背景，在定量的层面上揭示岩体多场耦合机制，在应用的层面上进行多场耦合效应分析和模拟，以期在整体上把握岩体变形特征、稳定性状态和演化趋势。在岩体多场耦合体系中，“多场”中的各场是个体，如应力场、渗流场和温度场等，描述耦合系统包括描述整体和个体两方面，需要将两者有机结合起来。在耦合系统整体目标下建立对个体的描述，综合所有个体描述以建立关于耦合系统整体的描述，是复杂岩体多场耦合分析与模拟的基本方法。

法拉第最早在一百多年前就研究过导电液体与电磁场的相互作用。但是，系统研究电磁流体力学的基本特征并使之形成一门学科的，还是 20 世纪三四十年代前后，其中的代表性人物有 Chapman、Cowling、Alfven 和 Ferraro 等。1937 年 Ferraro 提出了理想轴对称等离子体的等旋转定理。1942 年，在应用电磁感应定律分析太阳等离子体时，Alfven 提出了磁冻结的概念，进而发现了一种新型的波动模式，即阿尔文波。这个发现标志着人们对导电流体与磁场的相互作用规律有了本质的认识，也是多场耦合动力学的标志性理论成果之一。

目前使用数值算法求解多场耦合问题的方法通常分为直接法和间接法。前者在一个单元内将所有的偏微分方程集成一个单元方程求解，通过计算所需物理量的单元矩阵或载荷向量的方式进行耦合，适用于多个物理场间相互影响、相互依赖的情况，但由于平衡状态要满足多个准则，而直接耦合分析往往是非线性的，因此每个节点上的自由度越多，矩阵方程就越庞大，计算越复杂。后者采用分区算法的思想对某个场进行分析，然后在耦合区域内通过映射和插值外场的影响，通过反复迭代，得到耦合系统的响应。

另外，从多场耦合问题的动态性质出发，发现了对准静态耦合场和动力学耦合场问题的求解方法。对于准静态耦合场问题，可以使用通用算法（松弛迭代法和添加辅助算法的牛顿迭代法）和专用算法（牛顿迭代法）来求解。它通过单一能量场求解器实现，其中松弛迭代法的主要步骤是依次求解每一个单一能量场，然后把求得的结果和其他已知的数据一起代入下一个求解器直到收敛至许可精度内。这种方法的特点是非常方便，能最大限度地使用商业化的 CAD 系统，且把许多单一能量场求解器连接在一起，但是在某些时候（如强耦合问题）有可能不收敛。于是又发展了几种基于牛顿迭代法的迭代方案（表面牛顿法和多级牛顿法）来解决收敛性问题。专用算法直接使用牛顿迭代法一次性求解所有非线性耦

合方程，然后修正所获得的结果再进行循环迭代，直到收敛至许可精度内。它的特点是收敛速度很快，但不能通过商品化的软件来获得方程组的 Jacobi 矩阵，因此如果不编写程序，就不能使用牛顿法求解多场耦合问题，并且对于特定的问题必须编写特定的算法，如一些特殊高效的牛顿法求解器被开发并用于 MEMS 的多场耦合仿真。对于动力学耦合问题，通常把动力学形式的方程化成准静态形式后使用松弛法和牛顿法计算时间场内的耦合偏微分方程。

综上所述，可以看出：至今为止，人们对多场耦合问题的研究无论是理论模型研究，还是计算方法设计，都基本在静力学或准静态力学的层面进行，极少涉及全动态多场耦合动力学问题，涉及多场耦合波现象的研究也十分有限。因此，本书将总结现有这方面的理论成果，首次系统地对这一十分重要而又非常新颖的物理现象进行全面的论述，力图为科学界及工程界提供一个全面了解多场耦合动力学的途径。