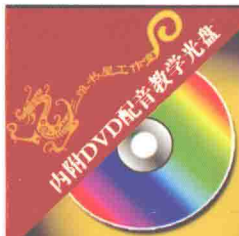


ANSYS工程应用系列丛书



# ANSYS

## 15.0 多物理耦合场有限元分析

### 从入门到精通

视频操作 ■ 源文件 ■ 最终效果

三维书屋工作室

胡仁喜 闫波 康士廷 等编著



全面完整的知识体系  
深入浅出的理论阐述  
循序渐进的分析讲解  
实用典型的实例引导



本丛书包含各书目分别由ANSYS工程应用领域的专家和学者执笔编写，书中融入了他们多年研究的经验和体会，为了便于读者快速掌握ANSYS工程开发技巧，书中引用大量的工程案例。

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# ANSYS 15.0 多物理耦合场有限元分析 从入门到精通

三维书屋工作室

胡仁喜 闫波 康士廷 等编著



机械工业出版社

全书共 10 章, 第 1 章介绍了 ANSYS 耦合场的基本知识; 第 2 章介绍了直接耦合场分析; 第 3 章介绍了直接耦合场实例分析; 第 4 章介绍了多场(TM)求解器-MFS 单代码耦合分析; 第 5 章介绍了使用代码耦合的多场求解器 MFX 求解过程以及启动和停止 MFX 分析; 第 6 章介绍了多场求解-MFS 单码的耦合实例分析; 第 7 章介绍了载荷传递耦合场物理分析; 第 8 章介绍了载荷传递耦合场物理实例分析; 第 9 章介绍了耦合物理电路分析; 第 10 章介绍了耦合物理电路模拟实例分析。各章都包含了相应的基本概念、理论以及利用 ANSYS 软件进行分析的基本过程, 还有对相关求解步骤的详细介绍。

本书可作为各大工程院校研究生和科研院所工程技术人员的耦合场分析自学辅导用书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 15.0 多物理耦合场有限元分析从入门到精通/胡仁喜等编著.  
—3 版.—北京: 机械工业出版社, 2014.12  
ISBN 978-7-111-48555-1

I. ①A… II. ①胡… III. ①有限元分析—应用软件  
IV. ①0241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 266202 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 曲彩云 责任印制: 刘 岚

北京中兴印刷有限公司印刷

2015 年 1 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·29.25 印张·713 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-48555-1

ISBN 978-7-89405-581-1 (光盘)

定价: 79.00 元 (含 1DVD)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件,由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 开发。它能与多数 CAD 软件接口,实现数据的共享和交换,如 Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor、I-DEAS、AutoCAD 等,是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。

ANSYS 软件可广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利和日用家电等工业制造及科学研究领域。ANSYS 软件的研究与开发不断汲取当今计算方法和计算机技术最新发展,领导着有限元发展的趋势,并为全球工业界广泛接受,拥有全球最大的用户群。

全书共 10 章。第 1 章介绍了 ANSYS 耦合场的基本概念、分析类型及单位制,使读者对 ANSYS 耦合场有初步的了解;第 2 章介绍了直接耦合场分析,主要包括集总电单元、热-电分析、压电分析、电弹分析、压阻分析、结构-热分析、结构-热-电分析、磁-结构分析以及电子机械分析的基本原理;第 3 章介绍了直接耦合场实例分析;第 4 章介绍了多场(TM)求解器-MFS 单代码耦合分析,主要包括 ANSYS 多场求解器和求解算法,ANSYS 多场求解器求解步骤等;第 5 章介绍了使用代码耦合的多场求解分析,包括 MFX 工作原理、MFX 求解过程以及启动和停止 MFX 分析;第 6 章介绍了多场求解-MFS 单码的耦合实例分析;第 7 章介绍了载荷传递耦合场物理分析,主要包括物理环境的概念、一般分析步骤、在物理分析之间传递载荷以及使用多物理环境进行载荷传递耦合物理分析;第 8 章介绍了载荷传递耦合场物理实例分析;第 9 章介绍了耦合物理电路分析,主要包括电磁-电路分析、电子机械-电路分析以及压电-电路分析;第 10 章介绍了耦合物理电路模拟实例分析。各章都包含了相应的基本概念、理论以及利用 ANSYS 软件进行分析的基本过程,还有对相关求解步骤的详细介绍及实例的命令流文件。

本书最大特点是所有实例均以图解的形式进行讲解,通过各种实例进行分类讲解。围绕耦合场分析精选了一系列实例,每个实例均配以真实的解析图形,并以最简练、直白的文字描述,使读者能够边学习边操作,充分享受阅读的乐趣和实用效果。

本书附有多媒体学习光盘,包括全书实例的源文件和实例操作过程的录屏 AVI 文件,读者可以通过观看录像的方式,学习各类有限元分析的具体方法。这也相当于老师在旁边手把手地指导,可起到事半功倍的学习效果。

本书由三维书屋工作室策划,由石家庄三维书屋文化传播有限公司的胡仁喜博士和中国运载火箭技术研究院的闫波工程师以及石家庄三维书屋文化传播有限公司的康士廷老师编写。其中胡仁喜执笔编写了第 1~3 章,闫波执笔编写了第 4~8 章,康士廷执笔编写了第 9~10 章。李鹏、周冰、董伟、李瑞、王敏、刘昌丽、张俊生、王玮、孟培、王艳池、阳平华、袁涛、闫聪聪、王培合、路纯红、王义发、王玉秋、杨雪静、张日晶、卢园、王金环、王渊峰、王兵学、徐声杰、张琪、李亚莉参加了部分章节的编写。

由于编者的水平有限,且时间仓促,书中不足在所难免,望广大读者登录网站 [www.sjzswsw.com](http://www.sjzswsw.com) 或发送电子邮件到 [win760520@126.com](mailto:win760520@126.com),对本书提出批评和建议,以方便作进一步的修改。

编 者

# 目 录

前言

第1章 耦合场分析简介 .....	1
1.1 耦合场分析的定义 .....	2
1.2 耦合场分析的类型 .....	2
1.2.1 直接方法 .....	2
1.2.2 载荷传递分析 .....	2
1.2.3 直接方法和载荷传递 .....	3
1.2.4 其他分析方法 .....	6
1.3 耦合场分析的单位制 .....	6
第2章 直接耦合场分析 .....	11
2.1 集总电单元 .....	13
2.2 热-电分析 .....	14
2.2.1 热-电分析中用到的单元 .....	14
2.2.2 进行热-电分析 .....	14
2.3 压电分析 .....	15
2.3.1 注意要点 .....	16
2.3.2 材料特性 .....	17
2.4 电弹分析 .....	19
2.4.1 电弹分析中用到的单元 .....	19
2.4.2 进行电弹分析 .....	19
2.5 压阻分析 .....	20
2.5.1 注意要点 .....	21
2.5.2 材料特性 .....	21
2.6 结构-热分析 .....	22
2.6.1 结构-热分析中用到的单元 .....	22
2.6.2 进行结构-热分析 .....	23
2.7 结构-热-电分析及热-压-电分析 .....	24
2.7.1 结构-热-电分析 .....	24
2.7.2 热-压-电分析 .....	25
2.8 磁-结构分析 .....	25
2.9 电子机械分析 .....	26
第3章 直接耦合场实例分析 .....	30
3.1 热电冷却器耦合分析 .....	31
3.1.1 前处理 .....	32
3.1.2 求解 .....	42
3.1.3 后处理 .....	44

3.1.4	命令流 .....	46
3.2	热电发电机耦合分析 .....	48
3.2.1	前处理 .....	49
3.2.2	求解 .....	60
3.2.3	后处理 .....	62
3.2.4	命令流 .....	64
3.3	梁的结构-热谐波耦合分析 .....	68
3.3.1	前处理 .....	68
3.3.2	求解 .....	75
3.3.3	后处理 .....	76
3.3.4	命令流 .....	81
3.4	微型驱动器电热耦合分析 .....	81
3.4.1	前处理 .....	82
3.4.2	求解 .....	106
3.4.3	后处理 .....	107
3.4.4	命令流 .....	110
3.5	压电耦合分析 .....	110
3.5.1	前处理 .....	111
3.5.2	驱动模拟求解 .....	120
3.5.3	驱动模拟后处理 .....	120
3.5.4	感应模拟求解 .....	121
3.5.5	感应模拟后处理 .....	124
3.5.6	命令流 .....	126
3.6	科里奥利效应的压电耦合分析 .....	126
3.6.1	前处理 .....	127
3.6.2	求解 .....	139
3.6.3	后处理 .....	141
3.6.4	命令流 .....	143
3.7	绝缘弹性体耦合分析 .....	143
3.7.1	前处理 .....	144
3.7.2	求解 .....	150
3.7.3	后处理 .....	152
3.7.4	命令流 .....	154
3.8	固定梁的静电-结构耦合分析 .....	154
3.8.1	前处理 .....	154
3.8.2	求解 .....	164
3.8.3	后处理 .....	167
3.8.4	命令流 .....	170
3.9	压阻现象耦合分析 .....	170

3.9.1	前处理	171
3.9.2	求解	183
3.9.3	后处理	185
3.9.4	命令流	186
3.10	梳齿式机电耦合分析	186
3.10.1	前处理	186
3.10.2	求解	200
3.10.3	后处理	203
3.10.4	命令流	204
3.11	两个相反电极的内力计算	204
3.11.1	前处理	204
3.11.2	求解	212
3.11.3	后处理	212
3.11.4	命令流	213
第4章	多场(TM)求解器-MFS单代码耦合	214
4.1	ANSYS多场求解器和求解算法	215
4.1.1	载荷传递	216
4.1.2	映射	218
4.1.3	耦合场载荷	221
4.1.4	支持的单元	223
4.1.5	求解算法	223
4.2	ANSYS多场求解器求解步骤	225
4.2.1	创建场模型	225
4.2.2	标记场界面条件	225
4.2.3	建立场求解	226
4.2.4	获得解	233
4.2.5	对结果进行后处理	233
第5章	使用代码耦合的多场求解分析	235
5.1	MFX如何工作	237
5.1.1	同步点和载荷传递	237
5.1.2	载荷插值	237
5.1.3	支持的单元和载荷类型	239
5.1.4	求解过程	239
5.2	MFX求解过程	240
5.2.1	建立ANSYS和CFX模型	240
5.2.2	标记场界面条件	240
5.2.3	建立主人输入	240
5.2.4	获得解	246
5.2.5	多场命令	246



5.3	启动和停止 MFX 分析 .....	247
5.3.1	用启动台启动 MFX 分析 .....	247
5.3.2	由命令执行启动 MFX 分析 .....	249
5.3.3	手动停止 MFX 运行 .....	249
第 6 章	多场求解器—MFS 单代码的耦合实例分析 .....	250
6.1	厚壁圆筒的热应力分析 .....	251
6.1.1	前处理 .....	251
6.1.2	求解 .....	260
6.1.3	后处理 .....	265
6.1.4	命令流 .....	268
6.2	静电驱动的梁分析 .....	271
6.2.1	前处理 .....	271
6.2.2	求解 .....	285
6.2.3	后处理 .....	290
6.2.4	命令流 .....	295
6.3	圆钢坯的感应加热分析 .....	295
6.3.1	前处理 .....	296
6.3.2	求解 .....	311
6.3.3	后处理 .....	318
6.3.4	命令流 .....	323
第 7 章	载荷传递耦合物理分析 .....	324
7.1	物理环境的概念 .....	325
7.2	一般分析步骤 .....	326
7.3	在物理分析之间传递载荷 .....	327
7.3.1	兼容的单元类型 .....	327
7.3.2	可以使用结果文件类型 .....	329
7.3.3	瞬态流体-结构分析 .....	329
7.4	使用多物理环境进行载荷传递耦合物理分析 .....	330
7.4.1	网格升级 .....	331
7.4.2	使用多物理环境方法重启动一个分析 .....	334
7.5	单向载荷传递 .....	334
7.5.1	单向载荷传递方法: ANSYS 到 CFX .....	334
7.5.2	单向载荷传递方法: CFX 到 ANSYS .....	335
第 8 章	载荷传递耦合物理场实例分析 .....	337
8.1	使用间接方法进行热-应力分析实例 .....	338
8.1.1	前处理 (热分析) .....	339
8.1.2	求解 (热分析) .....	344
8.1.3	后处理 (热分析) .....	344
8.1.4	前处理 (结构分析) .....	346



8.1.5	求解 (结构分析)	350
8.1.6	后处理 (结构分析)	350
8.1.7	命令流	352
8.2	使用物理环境方法求解热-应力问题实例	354
8.2.1	前处理 (热分析)	355
8.2.2	前处理 (结构分析)	361
8.2.3	求解 (热分析)	364
8.2.4	后处理 (热分析)	365
8.2.5	求解 (结构分析)	367
8.2.6	后处理 (结构分析)	368
8.2.7	命令流	370
8.3	交流电磁谐波分析和瞬态热分析实例	370
8.3.1	前处理 (谐波电磁分析)	371
8.3.2	前处理 (瞬态热分析)	389
8.3.3	求解	395
8.3.4	后处理	399
8.3.5	命令流	400
第9章	耦合物理电路分析	401
9.1	电磁-电路分析	402
9.1.1	2-D 电路耦合绞线型线圈	403
9.1.2	2-D 电路耦合块导体	403
9.1.3	3-D 电路耦合绞线型线圈	404
9.1.4	3-D 电路耦合块导体	405
9.1.5	3-D 电路耦合源导体	406
9.1.6	充分利用对称性	407
9.1.7	串联导体	408
9.2	电子机械-电路分析	408
9.3	压电-电路分析	410
第10章	耦合物理电路模拟实例分析	413
10.1	机电-电路耦合分析实例	414
10.1.1	前处理	414
10.1.2	求解	422
10.1.3	后处理	425
10.1.4	命令流	427
10.2	压电-电路耦合分析实例	429
10.2.1	静态和模态分析	430
10.2.2	等效电路瞬态分析	442
10.2.3	等效电路谐波分析	452
10.2.4	命令流	457

# 第

# 1

# 章

## 耦合场分析简介

本章介绍了耦合场分析的基本概念、分析类型和单位制。

分析类型包括直接耦合分析、载荷传递分析以及其他分析方法。耦合场分析单位制主要通过表格方式给出了标准 MKS 单位到  $\mu\text{MKSV}$  和  $\mu\text{MSVfA}$  单位的换算因数。

学

习

要

点

- 耦合场分析的定义
- 耦合场分析的类型
- 耦合场分析的单位制

## 1.1 耦合场分析的定义

耦合场分析是指考虑了两个或多个工程物理场之间相互作用的分析。例如压电分析，考虑结构和电场的相互作用，求解由于所施加位移造成的电压分布或相反。其他耦合场分析的例子包括热-应力分析、热-电分析、流体结构耦合分析。

需要进行耦合场分析的工程应用包括压力容器（热-应力分析）、感应加热（磁-热分析）、超声波传感器（压电分析）以及磁体成形（磁-结构分析）等。

## 1.2 耦合场分析的类型

### 1.2.1 直接方法

直接方法通常只包含一个分析，它使用一个包含所有必需自由度的耦合单元类型，通过计算包含所需物理量的单元矩阵或单元载荷向量的方式进行耦合。使用 FLOTRAN 单元的 FLOTRAN 分析是另一种直接方法。

### 1.2.2 载荷传递分析

载荷传递方法包含了两个或多个分析，每一个分析都属于一个不同的场，通过将一个分析的结果作为载荷施加到另一个分析中的方式耦合两个场。载荷分析有不同的类型。

#### 1. 载荷传递耦合方法-ANSYS 多场求解器

ANSYS 多场求解器可用于多类耦合分析问题，它是一个求解载荷传递耦合场问题的自动化工具，取代了基于物理文件的过程，并为求解载荷传递耦合物理问题提供了一个强大、精确、易于使用的工具。每一个物理场都可视为一个包含独立实体模型和网格的场。耦合载荷传递要确定面或体。多场求解器命令集使问题成形，并定义了求解先后顺序。通过使用求解器，耦合载荷会自动地在不同的网格中传递。求解器适用于稳态、谐波以及瞬态分析，这取决于物理需求。以顺序（或混合顺序同步）方式可以求解许多场。ANSYS 多场求解器的两种版本是为了不同应用场合而设计的，它们拥有不同的优点及程序。

(1) MFS-单代码：基本的 ANSYS 多场求解器，如果模拟包含带有所有物理场的小模型时就可以使用它。这些物理场包含在一个软件包内（如 ANSYS 多场）。MFS-单代码求解器使用迭代耦合，其中每一个物理场要顺序求解，并且每一个矩阵方程要分别求解。求解器在每个物理场之间迭代，直到通过物理界面传递的载荷收敛为止。

(2) MFX-多代码：高级 ANSYS 多场求解器，用于模拟分布在多个软件包之间的物理场（如在 ANSYS 多场和 ANSYS CFX 之间）。MFX 求解器比 MFS 版本提供了更多的模型。MFX-多代码求解器使用迭代耦合，其中每一个物理场可以同时求解，也可以顺序求解，

而每一个矩阵方程要分别求解。求解器在每一个物理场之间迭代，直到通过物理界面传递的载荷收敛为止。

## 2. 载荷传递耦合分析——物理文件

对于一个基于物理文件的载荷传递，必须使用物理环境明确地传递载荷。这类分析的一个例子是顺序热-应力分析，其中热分析中的节点温度作为“体力”施加到随后的应力分析中。

物理分析基于一个物理场中的有限元网格之上。要创建用于定义物理环境的物理文件，这些文件形成数据库，并为一个给定的物理模拟提供单一网格。一般过程为读入第一个物理文件并求解，然后读入下一个物理场，确定将要传递的载荷并求解第二个物理场。使用 LDREAD 命令连接不同的物理环境，并将第一个物理环境中得到的结果数据作为载荷，通过节点-节点相似网格界面传递到下一个物理环境中求解。也可以使用 LDREAD 从一个分析中读取结果并作为载荷施加到随后的分析中，而不必使用物理文件。

## 3. 载荷传递耦合分析——单向载荷传递

也可以通过单向载荷传递的方法耦合流-固相互作用的分析，这种方法要求确定流体分析结果并没有严重影响固体载荷，反之亦然。ANSYS 多物理分析中的载荷可以单向地传递到 CFX 流体分析中，或者 CFX 流体分析中的载荷可以传递到 ANSYS 多物理分析中。载荷传递发生在分析的外部。

### 1.2.3 直接方法和载荷传递

当耦合场之间的相互作用包括强烈耦合的物理场，或者是高度非线性的，直接耦合较具优势，它使用耦合变量一次求解得到结果。直接耦合的例子有压电分析，流体流动的共轭传热分析，电路-电磁分析。这些分析中使用了特殊的耦合单元直接求解耦合场的相互作用。

对于多场的相互作用非线性程度不是很高的情况，载荷传递方法更有效，也更灵活。因为每种分析是相对独立的。耦合可以是双向的，不同物理场之间进行相互耦合分析，直到收敛到达一定精度。

例如在一个载荷传递热-应力分析中，可以先进行非线性瞬态分析，接着再进行线性静力分析。可以将热分析中任一载荷步或时间点的节点温度作为载荷施加到应力分析中。在一个载荷传递耦合分析中，可使用 FLOTRAN 流体单元和 ANSYS 结构、热或耦合场单元进行非线性瞬态流体-固体相互作用分析。

直接耦合需要较少的用户干涉，因为耦合场单元会控制载荷传递。进行某些分析时必须使用直接耦合（例如压电分析）。载荷传递方法要求定义更多细节，并要手动设定传递的载荷，但是它会提供更多灵活性，这样就可以在不同的网格之间和不同的分析之间传递载荷了。各种分析方法的应用场合见表 1-1。各种物理场可用的分析方法见表 1-2。

表 1-1 各种分析方法的应用场合

方法	应用场合
载荷传递方法	
热-结构	各种场合
电磁-热, 电磁-热-结构	感应加热、RF 加热、Peltier 冷却器
静电-结构, 静电-结构-流体	MEMS
磁-结构	螺线管、电磁机械
FSI, 基于 CFX-和 FLOTRAN-	航空航天、自动燃料、水力系统、MEMS 流体阻尼、药物输送泵、心脏阀
电磁-固体-流体	流体处理系统、EFI、水力系统
热-CFD	电子冷却
直接方法	
热-结构	燃气涡轮、MEMS 共鸣器
声学-结构	声学、声纳, SAW
压电	传声器、传感器、激励器、变换器、共鸣器
电弹	MEMS
压阻	压力传感器、应变仪、加速计
热-电	温度传感器、热管理、Peltiere 冷却器、热电发电机
静电-结构	MEMS
环路耦合电磁	发动机, MEMS
电-热-结构-磁	IC、PCB 电热压力、MEMS 激励器
流体-热	管网、歧管

表 1-2 各种物理场可用的分析方法

耦合物理场	载荷传递	直接	注释
热-结构	ANSYS 多场求解器	PLANE13, SOLID5, SOLID98, PLANE223, SOLID226, SOLID227	也可以使用 LDREAD, 但是如果采用载荷传递方法就推荐使用 ANSYS 多场求解器
热-电		PLANE223, SOLID226, SOLID227 (Joule, Seebeck, Peltier, Thompson)	
热-电-结构		PLANE223, SOLID226, SOLID227	也可以使用 LDREAD, 但是如果采用载荷传递方法就推荐使用 ANSYS 多场求解器。直接和载荷传递方法都支持焦耳加热。只有直接方法才能使用 Seebeck, Peltier 和 Thompson 效应
压电	-	PLANE13, SOLID5, SOLID98, PLANE223, SOLID226, SOLID227	
电弹	-	PLANE223, SOLID226, SOLID227	



(续)

耦合物理场	载荷传递	直接	注释
压阻	-	PLANE223, SOLID226, SOLID227	
电磁-热	ANSYS 多场求解器	PLANE13, SOLID5, SOLID98	也可以使用 LDREAD, 但是如果采用载荷传递方法就推荐使用 ANSYS 多场求解器
电磁-热-结构		PLANE13, SOLID5, SOLID98	
声学-结构 (无粘性 FSI)	-	FLUID29, FLUID30	
电路-耦合电磁	-	CIRCU124+PLANE53, 或 SOLID117, CIRCU94	
静电-结构	ANSYS 多场求解器	TRANS109, TRANS126	也可以使用 LDREAD, 但是如果采用载荷传递方法就推荐使用 ANSYS 多场求解器
电磁-结构-流体 (基于 FLOTRAN-)		-	
磁-结构		PLANE13, SOLID62, SOLID5, SOLID98	
流体-热 (基于 FLOTRAN-)	ANSYS 多场求解器 MFS	FLOTRAN 共轭传热	
流体-热 (基于 CFX-)		CFX 共轭传热	
FSI (基于 FLOTRAN-)		-	
FSI (基于 CFX-)	ANSYS 多场求解器 MFX, 单向 ANSYS 到 CFX 载荷传递 (EXPROFILE), 单向 CFX 到 ANSYS 载荷传递 (MFIMPORT)	-	如果需要在单独的代码间进行迭代可以使用 MFX 求解器。否则使用适当的单向选项
磁-流体	ANSYS 多场求解器	-	也可以使用 LDREAD, 但是如果采用载荷传递方法就推荐使用 ANSYS 多场求解器。LDREAD 能够将 Lorentz 力读入 CFD 网格中, 也可以通过将 CFD 计算出来的速度分布输入到电磁模型中模拟发电来说明常规速度效应 (PLANE53, SOLID97, SOLID117)

## 1.2.4 其他分析方法

### 1. 降阶模拟

降阶模拟描述了一种有效求解包含柔性结构的耦合场问题的求解方法。降阶模拟 (ROM) 方法基于结构响应的模态表现之上。

由模态振型 (特征向量) 的因素之和描述变形结构区域, 产生的 ROM 从本质上说是一个系统对任一激励的响应的分析表达。这种方法已经用于耦合静电-结构分析, 并且已应用到微型电子机械系统 (MEMS) 中。

### 2. 耦合物理电路分析

通常使用电路模拟进行耦合物理分析。例如, “集总” 电阻器、源极、电容器和感应器之类的组件能够代表电设备, 等效电感和电阻能够代表磁设备, 弹簧、质量和节间能够代表机械设备。

ANSYS 提供了一套在电路中进行耦合模拟的工具。Circuit Builder 可以很方便地对电、磁、压电和机械设备创建电路单元。

ANSYS 电路功能允许在区域中的适当地方用“分布式”有限元模型连接两个集总单元, 此区域需要一个全有限元解表征。公共自由度组可以把集总和分布式模型连接起来。

## 1.3 耦合场分析的单位制

在 ANSYS 中必须确保输入的所有数据用相同的单位制, 可使用任何一个相同的单位制。对于微型电子机械系统 (MEMS), 元件尺寸可能只有几微米, 最好用更方便的单位建立问题。

表 1-3~表 1-16 列出了从标准 MKS 单位到  $\mu$ MKS 和  $\mu$ MSVfA 单位的换算因数。

表 1-3 从 MKS 到  $\mu$ MKS 的磁换算因数

磁参数	MKS 单位	量纲	乘以换算因数	$\mu$ MKS 单位	量纲
通量	Weber	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{A} \cdot \text{s}^2)$	1	Weber	$\text{kg} \cdot \mu\text{m}^2 / (\text{pA} \cdot \text{s}^2)$
通量密度	Tesla	$\text{kg} / (\text{A} \cdot \text{s}^2)$	$10^{-12}$	TTesla	$\text{kg} / (\text{pA} \cdot \text{s}^2)$
场强	A/m	A/m	$10^6$	pA/ $\mu\text{m}$	pA/ $\mu\text{m}$
电流	A	A	$10^{12}$	pA	pA
电流密度	A/m <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup>	1	pA/ $\mu\text{m}^2$	pA/ $\mu\text{m}^2$
渗透性 <sup>①</sup>	H/m	$\text{kg} \cdot \text{m} / (\text{A}^2 \cdot \text{s}^2)$	$10^{-18}$	TH/ $\mu\text{m}$	$\text{kg} \cdot \mu\text{m} / (\text{pA}^2 \cdot \text{s}^2)$
感应系数	H	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{A}^2 \cdot \text{s}^2)$	$10^{-12}$	TH	$\text{kg} \cdot \mu\text{m}^2 / (\text{pA}^2 \cdot \text{s}^2)$

① 自由空间渗透性为  $4\pi \times 10^{-25}$  TH/ $\mu\text{m}$ , 只有常数渗透性才能和这些单位一起使用。



表 1-4 从 MKS 到  $\mu$  MKSV 的压电换算因数

压电矩阵	MKS 单位	量纲	乘以换算因数	$\mu$ MKS 单位	量纲
应力矩阵 [e]	C/m <sup>2</sup>	A · s/m <sup>2</sup>	1	pC/ $\mu$ m <sup>2</sup>	pA · s/ $\mu$ m <sup>2</sup>
应变矩阵 [d]	C/N	A · s <sup>3</sup> /(kg · m)	10 <sup>6</sup>	pC/ $\mu$ N	pA · s <sup>3</sup> /(kg · $\mu$ m)

表 1-5 从 MKS 到  $\mu$  MKSV 的机械换算因数

机械参数	MKS 单位	量纲	乘以换算因数	得到 $\mu$ MKSV 单位	量纲
长度	m	m	10 <sup>6</sup>	$\mu$ m	$\mu$ m
力	N	kg · m/s <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup>	$\mu$ N	kg · $\mu$ m/s <sup>2</sup>
时间	s	s	1	s	s
质量	kg	kg	1	kg	kg
压力	Pa	kg/(m · s <sup>2</sup> )	10 <sup>-6</sup>	MPa	kg/( $\mu$ m · s <sup>2</sup> )
速度	m/s	m/s	10 <sup>6</sup>	$\mu$ m/s	$\mu$ m/s
加速度	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup>	$\mu$ m/s <sup>2</sup>	$\mu$ m/s <sup>2</sup>
密度	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	10 <sup>-18</sup>	kg/ $\mu$ m <sup>3</sup>	kg/ $\mu$ m <sup>3</sup>
应力	Pa	kg/(m · s <sup>2</sup> )	10 <sup>-6</sup>	MPa	kg/( $\mu$ m · s <sup>2</sup> )
杨氏模量	Pa	kg/(m · s <sup>2</sup> )	10 <sup>-6</sup>	MPa	kg/( $\mu$ m · s <sup>2</sup> )
功率	W	kg · m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	10 <sup>12</sup>	pW	kg · $\mu$ m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>

表 1-6 从 MKS 到  $\mu$  MKSV 热换算因数

热参数	MKS 单位	量纲	乘以换算因数	$\mu$ MKS 单位	量纲
传导率	W/(m · °C)	kg · m/(°C · s <sup>3</sup> )	10 <sup>6</sup>	pW/( $\mu$ m · °C)	kg · $\mu$ m/(°C · s <sup>3</sup> )
热通量	W/m <sup>2</sup>	kg/s <sup>3</sup>	1	pW/ $\mu$ m <sup>2</sup>	kg/s <sup>3</sup>
比热容	J/(kg · °C)	m <sup>2</sup> /(°C · s <sup>2</sup> )	10 <sup>12</sup>	pJ/(kg · °C)	$\mu$ m <sup>2</sup> /(°C · s <sup>2</sup> )
热通量	W	kg · m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	10 <sup>12</sup>	pW	kg · $\mu$ m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
单位容积的生热	W/m <sup>3</sup>	kg/(m · s <sup>3</sup> )	10 <sup>-6</sup>	pW/ $\mu$ m <sup>3</sup>	kg/( $\mu$ m · s <sup>3</sup> )
对流系数	W/(m <sup>2</sup> · °C)	kg/s <sup>3</sup>	1	pW/( $\mu$ m <sup>2</sup> · °C)	kg/s <sup>3</sup>
动力粘度	kg/(m · s)	kg/(m · s)	10 <sup>-6</sup>	kg/( $\mu$ m · s)	kg/( $\mu$ m · s)
运动粘度	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /s	10 <sup>12</sup>	$\mu$ m <sup>2</sup> /s	$\mu$ m <sup>2</sup> /s

表 1-7 从 MKS 到  $\mu$  MKSV 的压阻换算因数

压阻矩阵	MKS 单位	量纲	乘以换算因数	$\mu$ MKS 单位	量纲
压阻应力矩阵 [ $\pi$ ]	Pa <sup>-1</sup>	m · s <sup>2</sup> /kg	10 <sup>6</sup>	MPa <sup>-1</sup>	$\mu$ m · s <sup>2</sup> /kg

表 1-8 从 MKS 到  $\mu$ MKS 的电换算因数

电参数	MKS 单位	量纲	乘以换算因数	$\mu$ MKS 单位	量纲
电流	A	A	$10^{12}$	pA	pA
电压	V	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{A} \cdot \text{s}^3)$	1	V	$\text{kg} \cdot \mu\text{m}^2 / (\text{pA} \cdot \text{s}^3)$
电荷	C	$\text{A} \cdot \text{s}$	$10^{12}$	pC	$\text{pA} \cdot \text{s}$
传导率	S/m	$\text{A}^2 \cdot \text{s}^3 / (\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	$10^6$	pS/ $\mu\text{m}$	$\text{pA}^2 \cdot \text{s}^3 / (\text{kg} \cdot \mu\text{m}^3)$
电阻率	$\Omega \cdot \text{m}$	$\text{k} \cdot \text{gm}^3 / (\text{A}^2 \cdot \text{s}^3)$	$10^{-6}$	T $\Omega \cdot \mu\text{m}$	$\text{kg} \cdot \mu\text{m}^3 / (\text{pA}^2 \cdot \text{s}^3)$
介电系数 <sup>①</sup>	F/m	$\text{A}^2 \cdot \text{s}^4 / (\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	$10^6$	pF/ $\mu\text{m}$	$\text{pA}^2 \cdot \text{s}^4 / (\text{kg} \cdot \mu\text{m}^3)$
能量	J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$	$10^{12}$	pJ	$\text{kg} \cdot \mu\text{m}^2 / \text{s}^2$
电容	F	$\text{A}^2 \cdot \text{s}^4 / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$10^{12}$	pF	$\text{pA}^2 \cdot \text{s}^4 / (\text{kg} \cdot \mu\text{m}^2)$
电场	V/m	$\text{kg} \cdot \text{m} / (\text{s}^3 \cdot \text{A})$	$10^{-6}$	V/ $\mu\text{m}$	$\text{kg} \cdot \mu\text{m} / (\text{s}^3 \cdot \text{pA})$
电通量密度	$\text{C}/\text{m}^2$	$\text{A} \cdot \text{s} / \text{m}^2$	1	$\text{pC} / \mu\text{m}^2$	$\text{pA} \cdot \text{s} / \mu\text{m}^2$

①自由空间介电系数为  $8.854 \times 10^{-6}$  pF/ $\mu\text{m}$ 。

表 1-9 从 MKS 到  $\mu$ MSVfA 的机械换算因数

机械参数	MKS 单位	量纲	乘以换算因数	$\mu$ MSVfA 单位	量纲
长度	m	m	$10^6$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$
力	N	$\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$	$10^9$	nN	$\text{g} \cdot \mu\text{m} / \text{s}^2$
时间	s	s	1	s	s
质量	kg	kg	$10^3$	g	g
压力	Pa	$\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s}^2)$	$10^{-3}$	kPa	$\text{g} / (\mu\text{m} \cdot \text{s}^2)$
速度	m/s	m/s	$10^6$	$\mu\text{m}/\text{s}$	$\mu\text{m}/\text{s}$
加速度	$\text{m}/\text{s}^2$	$\text{m}/\text{s}^2$	$10^6$	$\text{m}/\text{s}^2$	$\mu\text{m}/\text{s}^2$
密度	$\text{kg}/\text{m}^3$	$\text{kg}/\text{m}^3$	$10^{-15}$	$\text{g}/\mu\text{m}^3$	$\text{g}/\mu\text{m}^3$
应力	Pa	$\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s}^2)$	$10^{-3}$	kPa	$\text{g} / (\mu\text{m} \cdot \text{s}^2)$
杨氏模量	Pa	$\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s}^2)$	$10^{-3}$	kPa	$\text{g} / (\mu\text{m} \cdot \text{s}^2)$
功率	W	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3$	$10^{15}$	fW	$\text{g} \cdot \mu\text{m}^2 / \text{s}^3$

表 1-10 从 MKS 到  $\mu$ MSKVfA 的磁换算因数

磁参数	MKS 单位	量纲	乘以换算因数	$\mu$ MSKVfA 单位	量纲
通量	Weber	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{A} \cdot \text{s}^2)$	1	Weber	$\text{g} \cdot \mu\text{m}^2 / (\text{fA} \cdot \text{s}^2)$
通量密度	Tesla	$\text{kg} / (\text{A} \cdot \text{s}^2)$	$10^{-12}$	-	$\text{g} / (\text{fA} \cdot \text{s}^2)$
场强	A/m	A/m	$10^9$	fA/ $\mu\text{m}$	fA/ $\mu\text{m}$
电流	A	A	$10^{15}$	fA	fA
电流密度	$\text{A}/\text{m}^2$	$\text{A}/\text{m}^2$	$10^3$	$\text{fA} / (\mu\text{m})^2$	$\text{fA} / \mu\text{m}^2$
渗透性 <sup>①</sup>	H/m	$\text{kg} \cdot \text{m} / (\text{A}^2 \cdot \text{s}^2)$	$10^{-21}$	-	$\text{g} \cdot \mu\text{m} / (\text{fA}^2 \cdot \text{s}^2)$
感应系数	H	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{A}^2 \cdot \text{s}^2)$	$10^{-15}$	-	$\text{g} \cdot \mu\text{m}^2 / (\text{fA}^2 \cdot \text{s}^2)$