

785257

332

7/2044

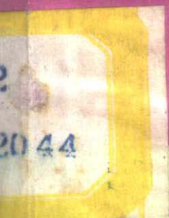
# 连续统物理的基本原理

现代连续统物理丛书

7

美 J. A.C. 爱林根 主 编

朱 照 宣 译



332

785257

7/2044

332  
7/2044

现代连续统物理丛书

第七分册

# 连续统物理的基本原理

〔美〕A. C. 爱林根 著

朱 照 宣 译

江苏科学技术出版社

# CONTINUUM PHYSICS

\*

A. C. Eringen

## Basic Principles of Continuum Physics

Academic Press, 1975

现代连续统物理丛书

第七分册

### 连续统物理的基本原理

〔美〕A. C. 爱林根 著

朱 照 宣 译

---

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：江苏新华印刷厂

---

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 5.8 字数 119,000

1985 年 9 月第 1 版 1985 年 9 月第 1 次印刷

印数 1—2,920 册

---

书号：13196·201 定价：1.24 元

责任编辑 王永发

## 《现代连续统物理丛书》译序

中国力学学会理性力学与力学中数学方法专业组,于一九七九年八月一日至十九日在兰州大学举办了第一次理性力学讲学讨论会。会上,来自全国二十七所高等院校和中国科学院力学研究所、计算中心的全体代表共同商定组织翻译由美国普林斯登大学A. C. Eringen教授主编的《连续统物理》(卷1—卷4)一书,共分十七分册,争取于一九八〇、八一年内陆续出版,以利于推进我国理性力学的发展。今得江苏科学技术出版社的大力支持,本《丛书》终于和读者见面了。原主编A. C. Eringen教授亲自撰就中文版序言,并为本《丛书》在我国翻译出版给予了热情的支持。

理性力学是在近代生产的大量经验事实的基础上,建立起较完备的公理体系,运用物质运动所必须遵循的基本定律,以严密的逻辑思维和推理方法去研究连续介质(简称连续统)的物质运动和变形的一般性规律的力学。它只有二十多年的历史。当然,关于用理性的方法对连续介质运动普遍规律的研究,最早应溯及贝努里、欧拉、柯西等著名的数学家和力学家;理性力学的学科名词也始见于该时。但从十九世纪末至二十世纪中,力学界主要着眼于传统力学在生产实际中的应用,而一度忽视了对连续介质力学的基础理论的探讨。人类工业生产的发展,引用了许多新材料,对原有材料的使用也大大地扩大了范围,只依靠象弹性材料这样简单材料的力学——弹性力学或一般流体力学,显然不能满足人们的生产要求了。这种情况从一九四五年起开始发生了变化,M. Reiner和R. S. Rivlin等人对橡皮物质大变形的研究,接着一九四八年J. D. Oldroyd对流变物质状态方程的研究,逐步为形成近代理性力学创造了条件。C. A. Truesdell, W. Noll和B. D. Doleman等人从一九五八年后提出了更加完善的关于构造物质运动本构方程的

公理体系,建立了各类物质本构方程的严密的数学模型,使理性力学形成了一个比较完美的理论体系,澄清了应用力学中关于应力、应变、应力率、应变率等含糊不清的基本概念。在此基础上,对物质进行了分类,确立了简单物质的谱系,并对谱系中各种物质(弹性物质、粘弹性物质、超弹性物质、次弹性物质)的本构方程进行了广泛深入的研究,用逆法或半逆法找到了在有限变形条件下不少问题的精确解,这就把二十世纪初期蓬勃发展起来的应用力学的研究范围大大地推进了一步,即把通常线性物性方程如Hooke弹性体,Maxwell, Voigt和Boitzmann线性粘弹性体,Newton粘性流体的研究范畴,推进到非线性物性方程的研究范畴,而且考虑了机械变形和热、电、磁各种非线性耦合效应。与此同时,提出了各种新型物质如液晶、微极物质、微态物质、非局部物质、位错连续统的数学模型,并进行了大力的研究。在此基础上,逐步形成了前途十分广阔的新学科、新方向。这一切使我们对客观世界的认识更加深了。理性力学也研究连续统在热、电、磁等和力学的耦合现象,因此,被称为连续统物理。

理性力学与近代数学有着密切的联系,在其发展过程中,用到了近代数学中包括张量分析、微分几何、不变量理论、群论、泛函分析、拓扑学、解析函数论等许多基础知识。目前,尤其在欧洲业已形成了用纯粹数学来研究力学理论的新学派。因此,理性力学在其发展过程中,虽曾经历了一段曲折的道路,但经过二、三十年的奋斗,作为连续介质力学的理论基础,业已牢牢地树立了自己的地位。在国际上,它强烈地影响着传统的力学教育和力学研究,也大大地增强了力学处理现实生产问题和近代新型工业材料的能力。

A. C. Eringen主编的《连续统物理》就包括了这一学科的几乎全部的现代成就,所以本《丛书》译名定为《现代连续统物理》。本《丛书》的译审小组成员:钱伟长(组长)、叶开沅、朱兆祥、朱照宣、汪家诤、苗天德、周煊文、张文、段祝平、戴天民。

钱 伟 长

一九七九年十二月八日于清华园

## I

## 中译本序

当前,在所有物理学理论的构造中,共有两种基本的数学模型:一是离散体模型,另一是连续统模型。离散体模型认为,物体是由大量具有确定物理性质(如质量、电荷),彼此又相互吸引而聚集在一起的几何点的集合所组成的。这方面最突出的例子莫过于原子模型了。虽然,对许多物质理论,牛顿力学仍然适用,但原子模型的基本定律则由量子力学所描述的。

连续统模型则引用场的概念去描述物体的几何点,不必去区分构成该物体的一个个粒子间的差异。在物体任一点上可以确定一个密度,例如质量密度、电荷密度和能量密度,不再把它们加以量子化。此外,表面上的点具有面密度,如应力和热流。在连续统模型中运用的物理定律是各种守恒律,此外还由本构方程予以补充。

一个数学模型,不论它是多么的严谨,也决不能真真实实地一丝不差地表达出物质的物理学规律的。外部特征长度(和/或时间)与物体内部特征长度(和/或时间)的比值决定了该物体对外界作用的反应。当外界作用的载荷给出的波长大大超过颗粒(原子)间的距离时,经典场论得到的结果和实验观测相符合。当该比值趋近1时,离散体模型便将取而代之了。但当特征长度的比值小于1时,点粒子(原子)可再度认为具有连续统的特性。这时,可把物体考虑成是由离散的连续体的集合组成的。在这里,我们明确地看到了离散体和连续体这两种模型交织在一起的混合模型。

量子力学是在一种尺度上建立起来的,而相对性场论用的是另一种尺度,这就足以使我们相信,一切离散体的模型和连续统的模型都具有它们理论自身适用的范畴,这种适用性取决于我们所要求的精度。

人们常说,原子模型描述了“真实的世界”。其实,这种说法仍然只

是一种个人的喜爱或抱有成见的观点,因为几何点没有尺度就不可能具有诸如质量、电荷这样的物理属性的。相反地,对连续统模型又怎样呢?这里,几何点是用场来描述的。按此逻辑,连续统模型要比离散体模型“更加真实”。其实,这个结论也会给人以一种错觉,因为不可能有纯粹是几何点构造的物体的。

一种理论当它能说明许许多多的物理现象而同时结构简单又具有完美的感染力时才是最有生命力的。

过去的二十年,连续统场论在两个基本方面取得了重大的进展:(一)建立了经典的线性和非线性场论的数学模型,(二)把微极场论和非局部场论引导到具有内部结构的物质研究中去。在第一方面,我们有:非线性弹性理论,流体动力学,与记忆有关的弹性体、与记忆有关的流体、混合物理论以及电磁场理论。我们已毫不含糊地确立了普遍适用于这些场的基本定律,同时本构方程也有了更加坚实牢靠的基础。

研究这些基础理论产生了丰硕的成果,人们不但揭示了在这些乍看上去互不相同的物理场之间存在着基本的结构和统一的原理,而且能够更加深入和广泛地把我们的研究范畴扩大到包括复合介质(固体和流体的混和物、多孔介质)和有电磁场作用的变形介质中去。本专著第二卷和第三卷分别讨论了由单一物质和混合物组成的基本原理和本构理论。

经典场论不包含有内在的特征长度,所以它只限于在宏观物理学的范畴内应用。随着微极场论和非局部场论的发展,我们进入了具有内部结构的物质领域。属于微极理论和非局部理论应用范畴的例子有:颗粒固体、非结晶材料、复合材料、多孔材料、各向异性流体、悬浮体、血液、液晶和磁性材料等等。诚然,数学上已有了相当多的解可以作为我们的证明,但人们还在期待着有更多的解的到来。非局部场论实际上具有一种潜在的力量,它可以解释和预言在分子和原子尺度范围内发生的物理现象。对这一点,看一看近来在波的传播、位错理论、断裂力学(例如,裂纹尖端问题)等领域内获得的结果便会深信无疑了。本专著第四卷对微极理论和非局部理论进行了讨论,第三卷讨论微磁场理论。可惜的是,在本专著出版的时候,尚无这一方面的更多解法和其他的结果,

因而只能暂付阙如。

毫无疑问，一切理论随着时间的流逝，都会对其作出修改，同时会给出更加满意的证明。尽管如此，所有的物理学理论，倘若得以生存，还必须经受住来自实验的严峻考验。有些时候，实验期待着上升到理论的高度(例如液晶)，有时，为提出一个决定性的实验却需要得到一些更新的数学解法。

在连续统场论发展的过程中，数学的许多分枝起到了重要的作用。本专著第一卷包含的数学内容就是根据编者在撰稿时的喜爱选择的。由于篇幅有限，无奈有不少重要的其他的数学分枝都不在本卷选编之列。

这四卷专著译成中文，本人感到极为荣幸。现代连续统场论能和这样广大的中国读者见面，这在开拓其他理论领域和发展科学及技术的应用方面必将产生重大效果。我们希望，中译本的出版也将为加强中美之间的友谊作出贡献。

A. C. 爱林根

一九八〇年五月



## 主 编 者 原 序

在过去十年里,连续统场论的基础和有关应用都得到了一些明确而又重大的进步,变形介质的几何学和运动学都已严格地建立起来了。单一介质,材料的混合物和具有微结构的材料的平衡定律已经形成了。具有单一材料的连续介质的热力学取得了牢固的基础,而且,在建立混合物和具有化学反应的介质的热力学方面,也取得了重大的进步。我们已经有了一个包罗万象的而且严格的本构方程理论,它已成功地应用于许多特殊类型的材料,例如,非线性弹性体、非牛顿流体、记忆性材料、混合物以及电磁固体和流体等。除此而外,还认真地用不同的几何学在各种不同类型的介质中寻找过非线性静力学和非线性波动力学问题的各种解。

面对着这类研究工作的爆炸性的快速发展,即使专家也很难跟上去、理解它,并把它用在各自的研究工作中去。由于这个领域的文献既广泛又分散,搜寻、阅读和理解这些文献的确存在着困难。许多在古典领域中进行研究工作的人员,都遇到了上述实际困难;不少新形成的学派,还是孤立地工作着的。

三卷本①的《连续统物理》就是为各个互不联系的专家和学者提供必要的基础来阅读连续统物理各个方面的最新文献。这样,我们希望不同领域的研究工作者能够携起手来,共同工作,而且从其它领域发展的一些强有力的方法中,各自有所借镜。

我们一定要在非线性和发展得很完善的古典线性理论以及近似理论之间,建立种种桥梁。通过谨慎地选择问题和选择解法,非线性

---

① 译注 后来又出了第四卷,主要介绍了在广义连续统理论的研究基础上建立起来的微极场论、非局部场论和非局部极性场论。

场论和线性场论在某些应用中将能带来有意义的启发。

这个规划是宏伟的。在建立过程中,常常诱使人们追求详尽。力求完备的心情是不小的。如果我们不注意克服这种意图,常常会使我们偏离基本目标,不仅不能保持头脑清醒,反而引起更多的混乱和失望。所以,我们不得不在许多重要的领域内采取简述,在另一些领域内,力求严加选材。

在第一卷内,我们致力于讨论一些选用的数学方法。每个方法都只能有精简的分量。在连续统物理研究工作中,几乎要用到所有数学领域,那怕只用一点点,但都有一席之地。我们只选取了数学的六个领域,在连续统物理的发展中,它们都曾占有了中心地位,并曾反复使用过的。它们是张量分析,群论、不变量理论、泛函分析、解析函数论、随机过程。它们都纳入第一卷的第一至第四部分。不幸的是,还有许多数学领域同样地是基础,但只好割爱了。它们包括偏微分方程、积分方程、可微的和拓扑的流形等诸重要领域。

本书的第二卷,致力于单一材料连续统的非线性理论,讲述了变形的几何学和运动学,讨论了平衡定律、热力学和本构理论。第二卷第一部分是基础理论,它专门处理热弹性固体,热粘性流体,塑性力学以及与记忆有关材料。第二卷第二第三部分涉及固体介质和流体介质的非线性静动力学诸问题的解法。为了阐明使用积分方程和解析函数论的基本数学方法,这里也处理了线性理论和一些重要的线性混合边界值问题。近似法和数值法同样是重要的,但并未包括在本卷之内。

本书的第三卷致力于混合物、位错和电磁相互作用的连续统理论。

我必须声明:本书得到了许多作者愉快的合作,没有他们的贡献,本书的目的就无法实现。为此,我向他们致谢。我和我的同事之间的友好的讨论、耐心的修订和热忱的工作,经常给我不断的鼓励。

许多文章不仅是已知材料的重新组织,而且包括着作者们的新发现。我们诚恳希望,这些工作不仅对研究人员有帮助,而且也可以供工程和应用科学、应用数学和数学物理的研究生教学学习之用。

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 《现代连续统物理丛书》译序 .....         | I  |
| 中译本序 .....                  | II |
| 主编者原序 .....                 | VI |
| 第 1 章 变形和运动 .....           | 1  |
| 1. 1 本章的范围 .....            | 1  |
| 1. 2 坐标 .....               | 2  |
| 1. 3 运动、变形和应变的量度 .....      | 10 |
| 1. 4 长度和角的变化 .....          | 23 |
| 1. 5 柯西应变椭球面 .....          | 29 |
| 1. 6 应变不变量 主方向 .....        | 34 |
| 1. 7 转动 .....               | 44 |
| 1. 8 面积和体积的变化 .....         | 50 |
| 1. 9 协调条件 .....             | 53 |
| 1. 10 运动学 张量的时率 .....       | 58 |
| 1. 11 变形率 自旋 涡量 .....       | 65 |
| 1. 12 应变率和转动率 .....         | 70 |
| 1. 13 物质流形和空间流形 .....       | 74 |
| 1. 14 线积分、面积分和体积分的运动学 ..... | 78 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| <b>第 2 章 平衡定律</b>   | 89  |
| 2.1 本章的范围           | 89  |
| 2.2 全局平衡定律          | 90  |
| 2.3 局部平衡的主定律        | 95  |
| 2.4 局部平衡定律          | 99  |
| 2.5 应力二次曲面 应力不变量    | 111 |
| 2.6 应力通量            | 113 |
| <b>第 3 章 连续统热力学</b> | 116 |
| 3.1 本章的范围           | 116 |
| 3.2 热力学过程           | 117 |
| 3.3 热力学第一和第二定律      | 121 |
| 3.4 对某些简单物质的热力学限制   | 126 |
| 3.5 不连续热力学过程        | 137 |
| 3.6 带记忆物质的热力学       | 143 |
| 3.7 翁萨格力和通量         | 151 |
| 3.8 翁萨格力势 变分原理      | 165 |

## 参考文献

# 第一章 变形和运动

## 1.1 本章的范围

本章涉及连续统的变形和运动学。开始九节给出物质体的变形分析，并导出当物体位移逐点给出时变形物体和未变形物体各子流形之间的关系。本章其余各节讨论连续统的运动学和它们的量度。

在 1.2 节引进坐标系、基矢量和度量张量。于是物体的任何物质点  $X$  在时刻  $t$  的运动可由一个从  $X$  到空间点  $x$  的单参数可逆映射来描述。当这个映射在(至少)一个时刻给出时,我们就有一个变形场,它将未变形体各点在该时刻映射到空间一个区域,即变形体所占据的区域。用以表征形状和大小变化的各种量度在 1.3 节介绍,它们的几何意义则在 1.4 节讨论。1.5 节讨论一点无限小邻域的局部变形,这方面由柯西物质椭球面和空间椭球面显示出来。它们也自然地引向确定应变不变量和主方向,即其中应变矩阵成为对角型矩阵的各方向。接着在 1.6 节通过物质椭球面主轴和空间椭球面主轴之间的变换,自然导出有限局部转动的概念。以上各节为 1.7 节证明转动的基本定理作了准备。1.8 节确定了面积变化和体积变化。“已知应变场是否对应于一个单值的位移场?”这一问题提出了应变场的不协调性问题,它在 1.9 节讨论。

物体各有关张量的时间变率对于物体变形随时间的演变

过程以及连续统的动力学都很重要，这些在 1.10 节介绍，并在 1.11 节用以计算变形率、自旋和涡旋度，在 1.12 节用以计算应变和转动，在本章最后两节(1.13 和 1.14)里，我们计算在物质流形上和空间流形上积分的变率，并证明一些定理。当流形包含活动间断面或间断线时，这些定理对计算体积或表面积的时间变率、张量场的线积分很重要。这些对于推演平衡定律和跳跃条件是必要的。

本章旨在为讨论简单物质局部连续统理论提供基础，它们对于第三卷中讨论的混合物的理论和非局部连续统理论<sup>①</sup>也是根本的。

## 1.2 坐 标

为了对物质体内发生的任何物理现象建立数学程式，需要先建立起物理实体各要素和数学理论根据中各基本记号之间的对应关系。这等效于用一个理想的“数学物体”代替真实的物体。接着可用数学公理和数学运算研究各种问题，再用建立起的对应关系翻译成为真实的物理现象。这样所得的预见，可和观察结果比较以检验理论的限制条件。当然，观察本身就构成真实物理现象的一种理想化。然而它们正是技术发展的根据。一方面实验验证和理论预见的精度越来越高，另一方面人们希望把更广泛范围的物理现象纳入理论；两者相互作用，结果是需要更好的精确数学模型。

在经典物理学范围内，物体当作由有质量有电荷的“粒子”组成。于是一切物理现象可认为是这些粒子在各种外界

---

① 译注 分别见本丛书第十三分册和第十六分册。

条件下运动的结果。在最广泛的意义下，对物体可作这样的数学理想化：由物体的各“物质点”<sup>①</sup>  $\{P\}$  作为元素组成一个集合，称为物质体  $B$ 。这里的元素从某种物理考虑来说当作事先已知的，而在对所研究的物理现象作出理论结构时总要求这种根本的物理考虑。集合  $B$  当作是全域集 (universal set)  $U$  的一个子集。这是讨论  $B$  时所需的参照架或者全域 (universe)。  $B$  的余集是不在  $B$  中元素的集合，用  $B'$  表示 (图 1.2.1)。可以把  $B'$  看成是围绕物体的空间，其中可能还包含别的物体。  $B$  和  $B'$  都可以含有子集。另外，还将对这些集合的元素

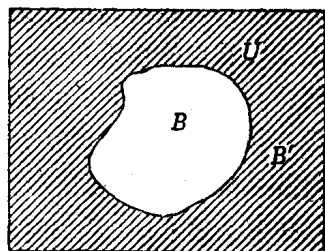


图 1.2.1 物体  $B$  及其余集  $B'$

引进某些凝聚部 (即几何结构)，使这些集合能组成为一个空间。从数学运算说，还需要建立运算规则。它相应于物理定律。用这样的程序后，可以建立起相应于物理体的理想数学体。总起来，我们有：

- (i) (a) 物理体  $\longleftrightarrow$  集合  $B$
- (b) 物质点  $\longleftrightarrow$  集  $B$  的元素  $\{P\}$
- (c) 参照架  $\longleftrightarrow$  全域集  $U$
- (d) 物体的结构  $\longleftrightarrow B$  的拓扑结构
- (ii) 物理定律  $\longleftrightarrow \{P\}$  之间以及  $B$  和  $U$  或  $B'$  之间的运算规则

① 原注 这个名词比牛顿概念下的“粒子”好，因为它还可进一步推广，可把粒子作为若干物质点组成的集体，这种概念对于极性原子和分子理论有用。

一个物理理论所关心的，是物体拓扑结构的演变以及物体和外部世界  $B'$  之间的相互关系。各种物理现象性质不相同，是由于集合  $B$  的结构和对  $B$  的元素所作运算的性质不相同而引起的。

在第二卷<sup>①</sup> 我们考虑单种材料所组成连续统的力学，材料的质量只是经典场论意义下的，因为这种较紧的限制可以加之于物质点的性质和  $B$  的结构上。其实，下面将引进一种几何，一种度量空间，并提出若干平衡定律(见第 2 章)作为公设。最后，计入  $B$  和  $U$  (或  $B'$ ) 时采用的是等价的物理和几何效果(例如，体载荷和面载荷、约束等)。

按照上述程序，我们将物体在时刻  $t=0$  的每一个物质点  $P$  与所有三元数组  $(X^1, X^2, X^3)$  的集合  $E^3$  之间建立起一一对应：

$$(1.2.1) \quad P = P(X^1, X^2, X^3), \quad X^K = X^K(P), \\ K = 1, 2, 3$$

其中  $X^1, X^2, X^3$  或即  $X^K (K=1, 2, 3)$  是实数。以后除非有需要，不再分辨  $P$  和  $X^K$  (或  $X$ )。对集合  $E^3$  可以赋予各种数学结构。例如，它可以是某一类度量空间。其实，我们把  $E^3$  当作是三维欧氏空间中的一个坐标流形。有时把曲线坐标写成  $Z^K (Z^1, Z^2, Z^3)$  以区别于直角坐标的显式写法  $(X, Y, Z)$ ，这种描述和经典连续统力学中的相同。我们还约定物体在时刻  $t=0$  的这个状态取作为未经畸变的参照态。

从直角坐标到曲线坐标是通过下述一对一映射<sup>②</sup> 沟通

① 译注 指本丛书第七到第十二分册。

② 原注 为简单起见，映射和它的值采用同样的记号。如有必要分清，则将改变函数所用主要字母。



$$= X^K(Z^1, Z^2, Z^3)$$

$$J \equiv \det(\partial Z^K / \partial X^L) \neq 0$$

### 标准 $Z^R$ 和 $V^R$



可占 物休 B 亦