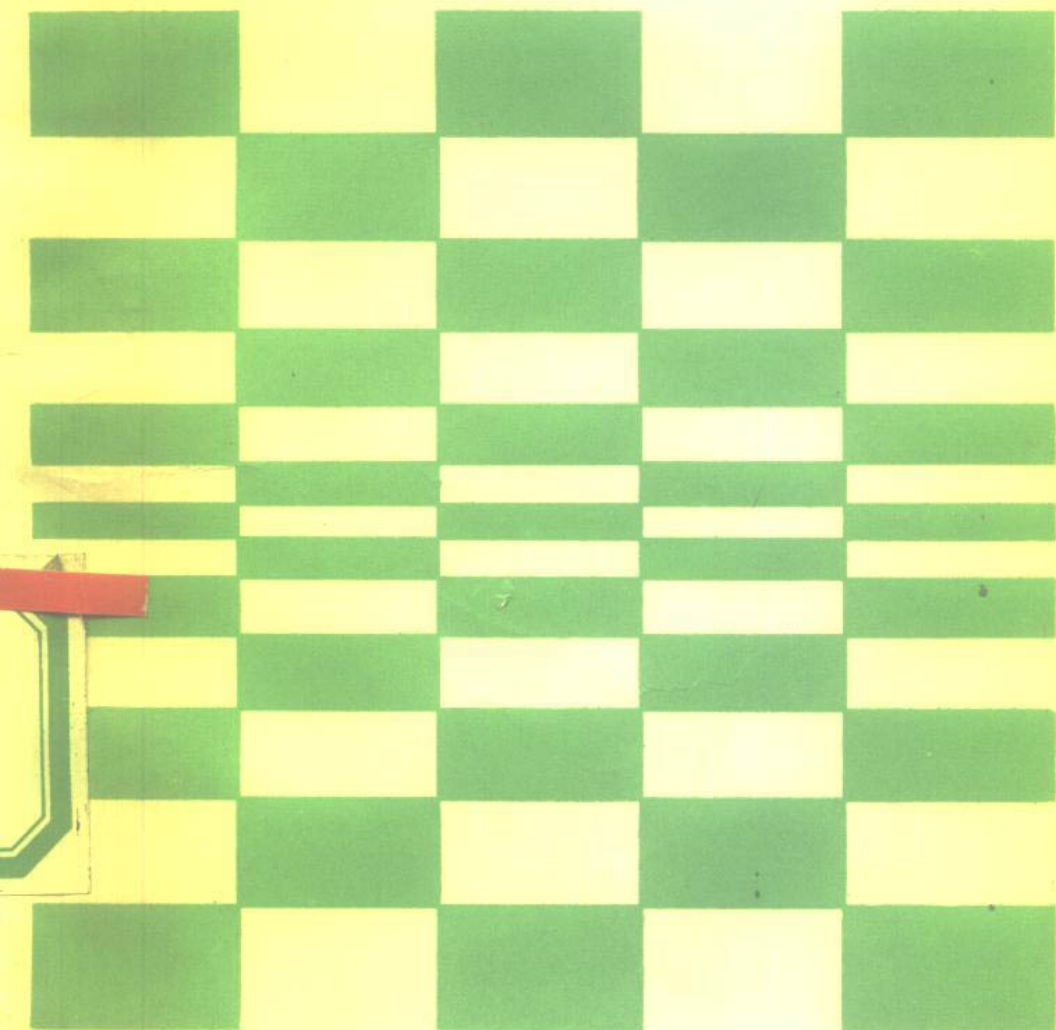


〔西德〕 H·哈肯

# 协同学讲座



[西德] H·哈肯

# 协 同 学 讲 座

宁存政 李应刚 整理翻译

江仁寿 张纪岳 审 校

陕 西 科 学 技 术 出 版 社

A Course of Lectures  
in Synergetics  
(Germany) Hermann Haken

(西德) H·哈肯

**协同学讲座**

宁存政 李应刚 整理翻译

江仁寿 张纪岳 审校

陕西科学技术出版社出版  
(西安北大街131号)

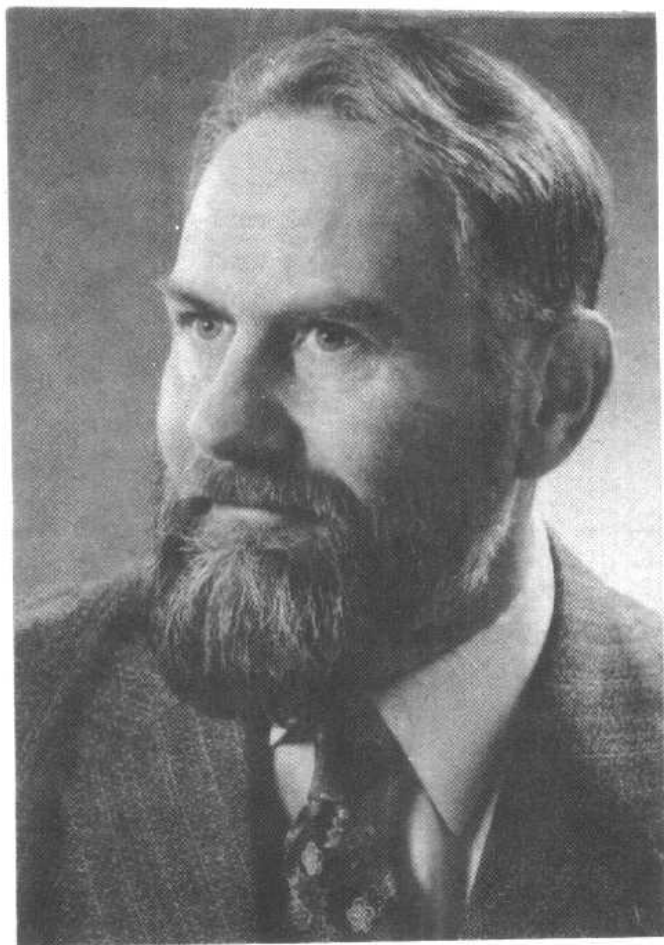
陕西省新华书店发行 陕西安康印刷厂印刷

850×1168毫米 32开 6.25印张 插页6 字数133.000

1987年4月第1版 1987年4月第1次印刷

印数1—7.000

统一书号: 13202·66 定价: 1.95元



H·哈肯教授

GDF 12/23  
18

## 前 言

1982年10月，国际上杰出的西德理论物理学家、协同学的创始人H·哈肯教授，来到西北大学，向我们中国科学界同行做了极为精彩的演讲，系统地介绍了协同学这门新学科。

协同学(Synergetics)是哈肯教授于本世纪七十年代创立的一门横跨自然科学和社会科学的所谓横断学科。它研究系统从无序到有序转变的规律和特征，既适用于非平衡系统中发生的有序结构或功能的形成，又包括平衡态中发生的相变过程。由于协同学不受一些热力学概念的束缚，一开始就得到了广泛的应用。诸如激光、非线性光学、半导体物理学、流体力学、静力学、化学、气象学、天体物理学、等离子体物理学、人口动力学、社会学、生物学、生态学、经济学、管理学、心理学等学科都用到了该理论的方法和结论。对有关的自然科学问题，协同学一般能给出定量结果，对有关的社会科学问题，它也能在科学分析的基础上给予定性说明。协同学在其发展进程中直接推动着另一门横断学科——系统工程学的发展。因此，这门学科刚一诞生，便很快受到各方重视，在国际上引起了强烈的反响。哈肯教授所领导的斯图加特学派也因此而成为目前世界上非平衡统计物理的主要学派之一。

哈肯教授早年曾就学于爱尔兰根(Erlangen)大学。1951年，在他24岁时，曾获得该校数学哲学博士学位，这为他

日后从事理论物理学研究奠定了雄厚的数学基础。1956年起，他任爱尔兰根大学理论物理学讲师。1960年成为斯图加特大学理论物理学教授。从此，他开始了激光理论研究。几十年来，哈肯教授对群论、固体物理学、激光物理学、非线性光学、理论物理学、化学反应模型等领域的研究都做出了贡献。尤其是他创造性地运用统计学和动力学相结合的方法，建立了一整套激光理论。正是从激光理论出发，通过与平衡相变、非平衡的无序—有序转变的类比，哈肯发现了这类转变与子系统的性质无关，便于1973年正式提出了“协同”的概念。他汲取了平衡相变理论中的序参量概念和绝热消去原理，采用随机理论建立起序参量演化的主方程，并以信息论、控制论为基础建立起自组织理论的框架，于1977年形成了协同学理论体系。由于哈肯对理论物理学和激光理论贡献突出，自1976年以来，他先后在美、英、法、日、苏等国的一些著名大学里获得荣誉教授称号。1976年，他荣获英国物理研究院和德国物理学会的玻恩（Max Born）奖金和奖章。1981年，由于他在协同学的创立及发展方面的突破性成就，荣获美国富兰克林研究院的迈克耳逊（A·Michelson）奖章。

哈肯教授学识渊博、造诣精深、涉猎广泛。他是一位多产的科学家，平均两、三年就有一部著作问世。在他十几部主要著作中，最著名的有《激光理论》（Laser Theory）、《协同学导论》（Synergetics—An Introduction）和《高等协同学》（Advanced Synergetics）等。此外，他还担任著名的《斯普灵格协同学丛书》的主编，该丛书已出版二十卷。

哈肯教授对我们中国有着特殊的感情，他对中国的古代文化极为欣赏。在讲学期间，他主动提出要同西北大学、与中国

科学家进行长期的合作交流。现在，我们高兴地看到，我们的合作已有了良好的开端，并在逐步深入。对于哈肯教授在我们两校间的合作中所做出的贡献，我代表西北大学表示深切的谢意。

哈肯教授的讲学引起了我国学术界的极大兴趣，促进了协同学在中国的传播，从那时到现在，协同学在我国的研究又有了新的进展。我相信，通过哈肯的讲学，通过本书的出版，通过我们中国科学工作者的努力，我们定会取得更加丰硕的成果。

哈肯教授在讲学时没有成文的讲稿，本书是由宁存政、李应刚二同志根据录音、幻灯片对记录进行反复校对、补正而成的。最后，由我和张纪岳副教授审校。

为帮助大家理解协同学中一些基本概念和方程、了解哈肯教授有关学术思想，我们选译了哈肯的两篇论文，作为附录。

在讲学期间，陈水教授担任翻译，万发宝同志负责录音。对此，我们表示感谢。

由于协同学是一门较新的学科，我们理解不深，整理的这部书稿中谬误遗漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

江 仁 寿

1984. 4. 于西安

## 序 言

H·哈肯

为此书写序是一件令人十分愉快的事，对此，我感到不胜荣幸。

1982年10月，我在西北大学作了协同学演讲，受到了该校师生的热情款待，这使我万分感动。不仅如此，我的中国同行及其学生们的科学知识和科学兴趣也给我留下了难以忘怀的印象。

在科学上，我们可以看到两个主流。一方面，人们发现了大量新的、细致的效应，并发展了解释这些效应的合适的理论。对于一个单个研究工作者来说，要掌握如此大量的信息愈来愈加困难了。另一方面，尤其是在物理学领域，我们正在寻求着普适规律，这些普适规律能够将许多不同方面和不同结果纳入它们的框架之中。牛顿力学、麦克斯韦电磁理论和爱因斯坦的相对论都是这方面的例子。对统一规律的探索不仅在哲学上饶有兴趣（它与我们的自然观紧密相关），而且具有重要的实践意义，因为它能够使我们以最经济的方式处理许多不同的问题。我们所追求的协同学的目的同样具有两重性。我们为求统一，我们希望尽可能多地使基本规律应用于实际问题。



协同学处理由许多子系统组成的系统。通过先研究子系统的性质而揭示系统的性质，这是一种典型的科学手法，这种方法人们称之为分析法。但是，要从子系统的性质构造出整个系统的性质乃是一项非常困难的工作，其原因之一就是整个系统这样的宏观尺度上可能会出现一些新量，这些新量不能用于子系统的语言来描述，因而另一个在中国人思想中源远流长的观点就显得非常重要了，这就是综合的观点。协同学的研究就在于探索统一性原理，它能使我们发现合适的量，用来描述以新的方式发展着的、宏观尺度上的质的特征。为此，协同学将注意力集中于许多单个部分构成的系统在宏观尺度上经历着质变的情况。

在过去几年中，我们已经建立了一些一般原理，它们能够使人们理解极不相同的系统中的质变。这样一类新的现象包含非平衡相变。这种相变不仅在许多运转装置（如激光器、隧道二极管、耿氏振荡器）中，而且在化学反应所形成的宏观图样、生物的形态发生学模型、以及经济学上的变迁现象中都起着一个基本作用。我们一旦找到了这样的普遍原理，作为一个副产品，就有可能发现极不相同的领域中相似现象之间的类似性。比如，通过在序参量（协同学中引入的一个概念）尺度上与湍流运动的类比预言混沌激光就是这方面的一个例子。

协同学这一新的研究领域能在中国引起人们如此大的兴趣，我感到很高兴。我满腔热情地支持中国科学家、西北大学与斯图加特大学，特别是与斯图加特大学理论物理研究所之间未来的合作。1982年我在西北大学的讲学已经完成了这个合作的第一步。现在，西北大学张纪岳教授在我的研究所进行为期一年的工作，正在进行合作的第二步。我真诚地希望我们今后

的联系能不断加强。借此机会，我要感谢西北大学对我的邀请以及该校校长和全体工作人员对我的热情招待。特别是江仁寿、张纪岳二位教授所给予的帮助更使我对中国之行终生难忘。

---

## 目 录

---

前 言

序 言

第一讲 背景 例子 基本概念····· ( 1 )

第二讲 基本方程····· ( 23 )

第三讲 一个详细的例子——单模激光····· ( 35 )

第四讲 一般方法 ( I )····· ( 68 )

第五讲 一般方法 ( II )····· ( 75 )

第六讲 非平衡相变····· ( 91 )

第七讲 空间结构的演化····· ( 103 )

第八讲 广义金兹堡—朗道方程····· ( 121 )

第九讲 在经济学和社会学上的应用····· ( 134 )

第十讲 混乱现象····· ( 148 )

附录 1 广义金兹堡—朗道方程、支配原理及中心  
流形定理····· ( 163 )

附录 2 二十世纪八十年代的物理思想····· ( 183 )

# 第一讲

## 背景 例子 基本概念

大家看到，我们的宇宙充满着各种各样的结构。其中有些是人工形成的，如房屋、机器等，而另一些则是自然形成的，如图 1.1 中所示的银河系的结构。还有一些结构就出现在我们的日常生活中，如图 1.2 所示的雪花的结构。图 1.3 所示的是一个热带苍蝇的眼睛，我们看到里

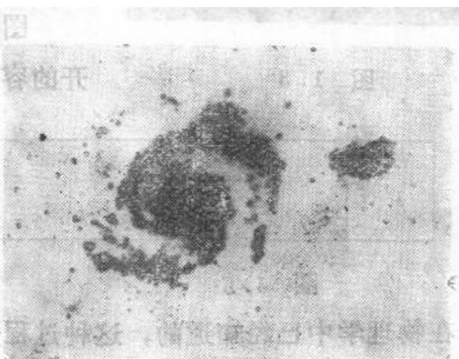


图 1.1

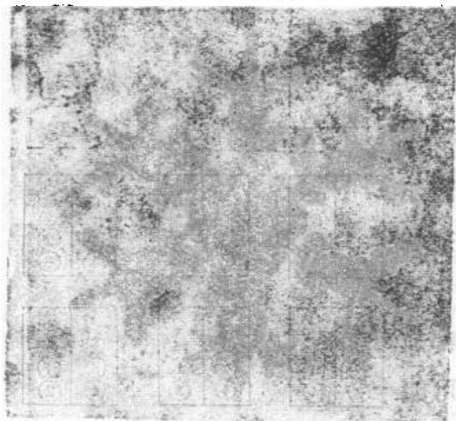


图 1.2

面有很多六角形。假若在十五年以前有人问你，物理学家能否用物理知识来解释这些结构，回答是否定的。因为在当时对物理学家来说，这些结构还是比较神秘的。让我们回忆一下当时物理学家为什么还有这样的想法吧。图 1.4 是一个非常简单的实

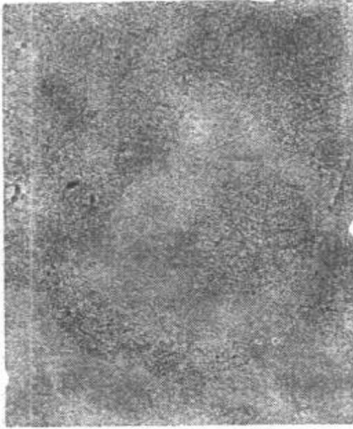


图 1.3

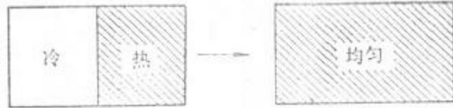


图 1.4

验，当我们把两个热冷不同的物体接触后，最后达到了一个均匀的热平衡状态，而相反的过程是从来不会在自然界出现的。

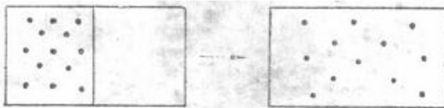


图 1.5

图1.5是一个用隔板从中间隔开的容器，一半有气体，另一半没有气体，当抽去隔板后，气体就会弥散到整个容器中。同样，相反的过程也是不会发生的。正如我们

在物理学中已经知道的，这种过程是不可逆的。在上一世纪，玻尔兹曼 ( Boltzmann ) 曾经给出了这个过程的解释。玻尔兹曼方程是：

$$S = K \cdot \ln W \quad (1.1)$$

其中S是熵，K是玻尔兹曼常数，W是热力学几率。为了理解玻尔兹曼公式的物理意义，我们来看一看图 1.6，图中有四个分子，两个小盒，如果将四个分子都放在一个小盒子中，只有一种可能的放法。但如果每个盒子中各放

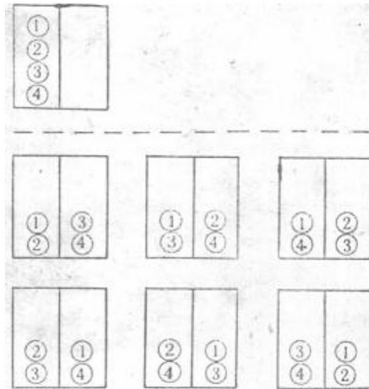


图 1.6

两个，则有六种可能的放法。玻尔兹曼指出，宏观上所出现的

结构对应于热力学几率最大的那种结构。

图 1.7 是一个类似的例子，其中四个磁铁指向都向上的只有一种可能性；有一半向上，另一半向下的，有六种可能性。

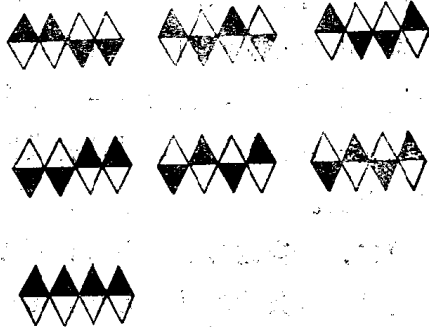


图 1.7

在做了以上考虑之后，如果我们再考虑到一些守恒的性质，就可以导出相变的性质。这样一来，

我们就可以理解晶体形成的道理了。但是我们要记住，象磁铁、晶体等，这些都是死的东西。而活的东西总是通过物质或能量的不断交换来维持的。

这与死的东西有着很大的差别。对于活的东西的处理就导致了

Syn-ergetics = science of  
Co-operation  
子系统

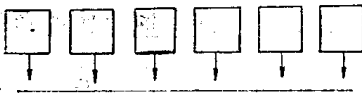


图 1.8

了我所定义的协同学。让我们考虑一下一般的情况。图 1.8 中的协同学 Synergetics 是从希腊文来的，意思是协同的科学。实际上，所有的系统，我们都可以将它分为子系统，而我们经常观察到的系统的行为，往往并不是子系统行为的简单叠加。相反地，由于所有子系统相互作用对总系统贡献的结果，总系统的行为好象是有调节地、有目的地自组织起来的。在协同学中，我们考虑的子系统可以是各种各样的，如原子、分子、质子等，也可以是生物体中的细胞、器官、自然界的动物以及社会上的人，甚至可以包括计算机中的相互作用、工业上

工厂之间的相互竞争。对此，我想提出下面的问题：

第一，这里是否存在着一个一般的原理，它支配着所有这些协同作用着的子系统？如果这样的原理存在的话，它是很有价值的。因为它对我们理解自然界来说是很重要的。比如说有两个领域  $F_1$  和  $F_2$ ，我们可通过这个一般原理在这两个领域之间建立起一种类似性，通过这种类似性把第一个的结果应用到第二个上去。

第二，这样的方法是否可行呢？我们不但需要一般的概念，而且要有具体的计算方法。考虑到我们所研究的系统的广泛性，可能我们的期望有些不尽现实。因此，我们需要加上某种限制，这个限制不是要加到我们所考虑的子系统的种类上，而是加到我们所考虑的现象上。我们所感兴趣的只是一种质的变化。首先，让我们看个图片。图 1.9 是两种鱼，有人曾说过

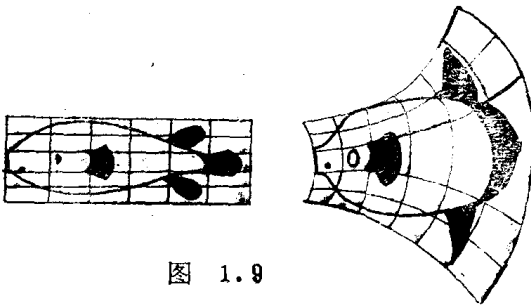


图 1.9

可以把左边的鱼转变为右边的鱼。这意思就是说，将左边鱼的眼睛转变成右边鱼的眼睛，把左边鱼的鳍转变成

右边鱼的鳍，尽管发生了这样的变化，但是，在变化前后二者的结构是一样的。这表示它们的结构是稳定的，用数学上的语言来说，这两个鱼是等价的。在协同学中，我们对这样的变化不感兴趣，我们感兴趣的是质的变化。在生物学的发展中充满着很多这样的例子。图 1.10 是某种动物的生长过程，是从一个蛋到一个小动物的发展阶段。在这里，每一个相对于上一个都有质的变化。

为了寻找一个一般性的原理，我们最好还是不要从这样复杂的现象入手。让我们从一个无生命的简单现象出发吧。

图1.11给出了有些人已熟悉的空问结构。这是在前一世纪人们就知道的贝纳（Bénard）流。将液体从下面加热，当上下温差小于某个值时，热交换主要是靠热传导方式来进



图 1 10

系统	无序	有序
贝纳流体		
台劳流体		
化学反应		

图 1.11

行的，这时没有宏观的运动发生；然而，当温差超过某个临界值时，就会出现许多新的现象，有液体的上下运动，即出现了宏观上的运动。有趣的是所形成的

卷的大小比分子之间的距离大很多。这说明，分子之间相互作用的范围比它们本身的尺度大得很多。

图中的另一个例子是台劳（Taylor）不稳定性的图象。这



里有一个同心圆柱状的容器，内外圆筒之间装有液体，当里面圆筒旋转时，我们发现有一个层状的流动。在转速小于某个阈值时，液体沿圆周运动；然而，当转速超过这个阈值时，出现了全新的现象，即产生了如图1.11所示的圆圈状的转动。

图1.11中第三格是化学反应中的一个例子——别洛索夫—扎鲍庭斯基（Belousov—Zhabotinsky，以下简称B—Z）反应。在通常情况下，当把这几种物质放在一起时，它们达到一个均匀的状态，但是在这里的B—Z反应中，出现了图中所示的一条一条的结构。我们知道，化学过程是生命过程的基础。所以，当我们知道了化学上的结构后，我们就有了了解生物学上结构的途径。类似的现象在我们日常生活中也可观察到。

图1.12是天空中云彩的照片。从上面可看到空气的运动情况和云的结构。

图1.13是从上面往下看到的贝纳不稳定性的情形。其中有很多小六边形，在每个小六边形中心，液体往上流，在周围液体往下流。

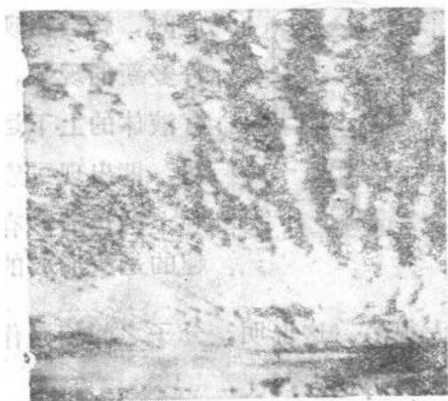


图 1.12

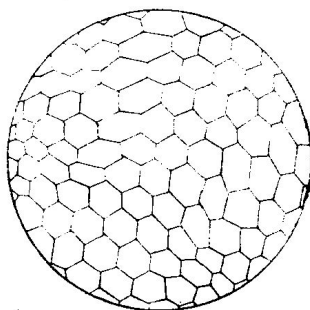


图 1.13