

高等协同学

H. 哈肯 著

科学出版社

高等协同学

H. 哈肯 著

郭治安 译

赵惠芝 校

科学出版社

1989

内 容 简 介

协同论是本书作者 H. 哈肯 1977 年提出的, 协同的含意在于子系统之间的协同合作形成结构, 序参量之量的协同构成有序, 竞争促进发展。协同论抓住了子系统合作性质的条件和规律而使非平衡理论远远超出了原学科界限, 广泛应用于工程技术甚至社会科学领域。

本书是作者进一步全面阐述协同论的专著, 适于大学物理、化学、生物等学科教师学生以及从事铁路运输、环境保护、城市规划等部门的技术人员阅读参考。

H. Haken
ADVANCED SYNERGETICS
Springer-Verlag, 1983

高等协同学

H. 哈肯 著

郭治安 译

赵惠芝 校

责任编辑 张邦固

科学出版社出版

北京朝内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1989 年 3 月第一版 开本: 850×1168 1/32

1989 年 3 月第一次印刷 印张: 11 1/2

印数: 0001—8,280 字数: 297,000

ISBN 7-03-000789-1/O·206

定 价: 7.10 元

中译本序言

对各种系统的系统研究在现代科学和技术中起着日益重要的作用,在中国,目前也已经清楚地认识到了这个领域的重要性,系统无所不在。由大量细胞和器官构成的动物是一个系统,发动机或国民经济也是一个系统。我写的《高等协同学》一书研究各种系统的一个重要方面,即“自组织”。这本书译成中文¹⁾是我的极大荣幸,并使我非常高兴。希望本书对很多中国科学家和大学生的研究和学习有所裨益。也希望本书有助于加强中华人民共和国和德意志联邦共和国之间的联系。我特别感谢郭治安教授在翻译本书时所付出的巨大辛劳。

H. 哈肯

1986, 10, 19 于上海

1)书中章节上加*者,表明是较难的部分。——译者注

12402 (52/11)

• • •

前 言

这部涉及多学科领域的《高等协同学》将会引起物理、化学、数学、生物、电子、建筑工程、机械工程以及其它领域的广大学生和科学家的兴趣。本书仍将以我写的《协同学导论》(该书已译成英文、俄文、日文、中文¹⁾和德文)一书中的基本概念和方法为纲。本书的大部分内容,毋需参阅前书便可阅读,尽管偶尔也要用到那本书的某些内容。

为什么这些书的读者范围如此之大?为什么如此广泛地存在着不稳定性?各种装置和自组织系统有哪些共性?在回答这些问题之前,应该知道,自组织系统是在没有外界环境的特定干预下产生其结构或功能的。生物学中细胞的变异和演化过程均为自组织的例证。而诸如无线电发射过程中使用的电子振荡器之类的装置则是人造的。但人们常常忽视了各种装置所产生的功能作用往往是以自组织过程为基础的。在电子振荡器中,电子运动所以成为相关的,并不是由于外部同步驱动力的作用,而是由于振荡器本身结构能够导致电子的这种集体运动。显然,在自组织系统和人造装置之间并不存在不可逾越的鸿沟。人们在各种装置中设置了某种边界条件,从而使器件能够产生自组织的功能,而在生物系统中引起并支配自组织过程的则是一系列自复制条件。因此,从共同观点出发,研究各种装置和自组织系统,尤其是研究生物学的自组织系统是很有价值的。

为了充分说清楚本书中小标题的含意,我们首先要说清楚什么是不稳定性。大概最好的办法是举例来说明。一种处在静止状

1) 中译本系指张纪岳、郭治安合译(江仁寿教授审阅)的《协同学导论》。该译本曾在“1980年全国第二届非平衡统计物理学学会”上交流讨论,1981年由西北大学科研处出版,内部发行。——译者注

态的液体,一旦出现了宏观振荡,液体就从原来的状态进入了新的状态,从而失去了原来的稳定性。当我们改变某些条件(譬如输入功率)时,一个系统可能要经历引起完全不同模式特征的一系列不稳定性。

协同学的中心议题是,探讨是否存在支配生物界和非生物界结构和(或)功能的自组织形成过程的某些普遍原理。十多年前,我从大量各类系统的考察中得到了肯定的答案,并建议把这些问题纳入协同学这个多学科间的探索领域来研究,这在当时的许多科学家看来似乎是荒唐的。为什么由如此不同成分(诸如电子、原子、分子、光子、细胞、动物乃至人类)所组成的系统,当它们自身组织起来形成电子振荡、流体的模式、化学波、激光束、器官、动物群体以至社会集团时,却由相同的原理支配呢?但由过去十年所获得的丰富资料表明,情况的确是这样,而且在文献中早就记载的许多具体例子,均可纳入统一的协同学概念。这些例子涉及的范围极广:从生物学的形态形成和脑功能作用到飞机机翼的颤动;从分子物理到恒星的巨变;从电子装置到社会舆论的形成;以及从肌肉的收缩到固体结构的皱折。此外,各个学科中关于空间、时间和功能结构形成的基本概念表现出惊人的相似。

从协同学与其他领域的广泛联系来看,你可能认为协同学要使用各个学科中的大量完全不同的概念。实际上并不是这样,我们通过类比就能把问题说得一清二楚。解释发动机的功能并不困难,至少在原理上来说是这样。然而要制造一辆简单汽车、竞赛汽车或现代飞机的发动机,就需要越来越多的专门技术知识了。同理,解释协同学的基本概念相当简单,但要用这些概念去处理实际系统时就需要大量的专门技术(如数学)知识了。本书准备达到两个目的:(1)扼要描述不稳定性、序参量和伺服过程的基本原理。这些原理阐明了当代协同学的“硬核”,并使我们能够处理从“硬”科学到“软”科学的各种复杂系统。(2)通过从简单到复杂的基本方法,循序渐进,介绍必要的数学知识,从而使读者能够应用这些方法研究各自领域中的具体问题,或者在不同领域之间作进一步

的类比。

现代科学几乎总是采用大量专业术语。我力求尽量少用各种专业术语，并在需要时对新词作出解释。给出的原理和方法是为了解决具体的问题，我们只对原理和方法作必要的说明，而不进行推导和证明。为使用一种广义系统理论的概念来进行统一的叙述，我想提出一种可供使用的算子方法。在本书的大部分章节里，使用这种方法是行得通的，然而在处理准周期过程的问题上也出现了一些困难。我在本书中写到了这些错综复杂的问题（如环的分岔）及其求解方法，这不仅因为它们处于现代数学探索的新领域，也因为它们在自然系统和人造系统中一再出现。涉及到这种问题的章节也和其他费解的章节一样，用星号标出，在第一次阅读本书时可以暂且不读。

由于本书已列入 Springer 出版公司的协同学丛书中，所以应该介绍一下本书和丛书中其他书的关系。第一卷《协同学导论》，主要论述导致空间模式或振荡的第一个不稳定性，而本书论述各种各样的不稳定性及其序列。虽然前书也介绍了随机过程，但 C. W. Gardiner 在《随机方法手册》中作了更为详尽的推导，该手册还为继而出版的由 W. Horsthemke 和 R. Lefever 编写的《噪声诱发转变》以及由 H. Risken 编写的《Fokker-Planck 方程·求解和应用》提供了一般基础知识。就“涨落”而论，这三本书包括了有关协同学发展的重要内容。本书仅以简短的篇幅讨论了倍增噪声问题及其最有趣的结果，对此感兴趣的读者请参看 Horsthemke 和 Lefever 编写的那一卷。《协同学导论》和本书均讨论了 Fokker-Planck 方程。这个方程是处理处于转变点的各种系统的最有效的方法，而使用其他方法就可能失灵。若读者需要了解更多现代的知识，请参看由 Risken 编写的那一卷。为了使本书保持适当的篇幅，我没有深入地讨论各种方法的应用。协同学概念和方法在社会学和经济学中的应用，在 W. Weidlich 和 G. Haag 编写的《定量社会学的概念和模型》一书中作了详细的分析。最后，由 Klimotovich 编写的《电磁过程运动理论》一书，出色地讨

论了带电粒子和电磁场的相互作用，以及由这种相互作用所产生的各种集体现象。

虽然本书和以上提及的几本书给我们提供了协同学的基础和数学基础，然而对自组织系统所进行的实验研究至少是同等重要的。迄今为止，这类实验研究仅在 Springer 协同学丛书研讨会上讨论过，但愿将来也能收进这套丛书的专辑中。总之，应当指出，协同学为实验研究和理论研究提供了广泛的领域。

感谢物理系毕业生 Karl Zeile 以及 Arne Wunderlin 博士提出的宝贵建议，并感谢他们对原稿和计算所进行的仔细校正。感谢 Herbert Ohno 博士为本书作了插图，感谢我的秘书 U. Funke 夫人不辞辛劳的精心为包括公式在内的若干修改稿打字，没有她的孜孜不倦的努力，这本书就不可能完成。感谢在本书出版过程中 Springer 出版公司成员所进行的杰出合作。感谢汉诺威 Volkswagenwerk 基金会对协同学科目的有效资助，本书中所列举的大量结果是在该会资助下经过了四年之久的辛劳所取得的。

H. 哈肯
斯图加特
1983 年 1 月

目 录

第一章 引论	1
1.1 协同学的研究对象	1
1.2 物理学	1
1.2.1 流体: 动力学模式的形成	1
1.2.2 激光: 相干振荡	6
1.2.3 等离子体: 大量的不稳定性	9
1.2.4 固体物理学: 多重稳定性、脉冲、混沌	9
1.3 工程	11
1.3.1 建筑、机械和航天工程: 后期压曲模式、颤动等	11
1.3.2 电子工程和电子学: 非线性振荡	11
1.4 化学: 宏观模式	12
1.5 生物学	14
1.5.1 几点述评	14
1.5.2 形态形成	15
1.5.3 群体动力学	16
1.5.4 演化	16
1.5.5 免疫系统	16
1.6 计算机科学	16
1.6.1 计算机网的自组织, 并行计算	16
1.6.2 机器识别模式	17
1.6.3 由不可靠元件构成的可靠系统	17
1.7 经济学	18
1.8 生态学	19
1.9 社会学	19
1.10 上述诸例的共同特点是什么?	20
1.11 我们要研究的方程形式	20

1.11.1	微分方程	21
1.11.2	一阶微分方程	21
1.11.3	非线性	22
1.11.4	控制参量	22
1.11.5	随机性	23
1.11.6	多分量和中观方法	24
1.12	如何找直观解	26
1.13	定性变化: 一般方法	38
1.14	定性变化: 典型现象	43
1.14.1	单结点(或单焦点)分岔为双结点(或双焦点)	44
1.14.2	单焦点分岔为一个极限环(Hopf 分岔)	45
1.14.3	单极限环分岔	46
1.14.4	一个环面分岔为其它环面	50
1.14.5	混沌吸引子	50
1.14.6	Lyapunov 指数*	51
1.15	涨落(噪声)的冲击. 非平衡相变	54
1.16	空间模式的演变	56
1.17	离散映象. Poincaré 映象	58
1.18	离散噪声映象	68
1.19	通向自组织的途径	68
1.19.1	改变控制参量引起自组织	69
1.19.2	改变组分数引起自组织	69
1.19.3	瞬变引起自组织	70
1.20	我们如何着手	70
第二章	线性常微分方程	73
2.1	线性微分方程的几个例子: 单变量情形	73
2.1.1	常系数线性微分方程	73
2.1.2	周期系数的线性微分方程	74
2.1.3	准周期系数的线性微分方程	75
2.1.4	有界实系数线性微分方程	79
2.2	群和不变性	81
2.3	被驱动系统	84

2.4	代数方程和微分方程的几个一般定理	88
2.4.1	方程的形式	88
2.4.2	Jordan 简正形式	89
2.4.3	关于线性微分方程的几个一般定理	90
2.4.4	广义特征指数和 Lyapunov 指数	92
2.5	正向和逆向方程: 对偶解空间	94
2.6	常系数线性微分方程	96
2.7	周期系数线性微分方程	102
2.8	群论解释	105
2.9	微扰近似	108
第三章	准周期系数的线性常微分方程*	115
3.1	问题和定理 3.1.1 的表述	115
3.2	辅助定理(预备定理)	118
3.3	定理 3.1.1 推论 a) 的证明: 三角矩阵的结构: 一个 2×2 阶矩阵的例子	123
3.4	证明三角矩阵 C 的矩阵元是 τ 的准周期函数(且为 φ_j 的周期函数, 而对 φ 是 C^k): 一个 2×2 阶矩阵的例子	125
3.5	三角矩阵 C 的结构及其矩阵元是 τ 的准周期函数的证明(且为 φ_j 的周期函数, 而对 φ 为 C^k): 一个所有 λ 都不同的 $m \times m$ 阶矩阵的情况	128
3.6	近似方法. 滤波法	131
3.6.1	变分法	132
3.6.2	滤波法	132
3.7	三角矩阵 C 及其约化	135
3.8	一般情况: 若干广义特征指数相同	142
3.9	用迭代法求 (3.1.1) 的显解	148
第四章	随机非线性微分方程	156
4.1	一个例子	156
4.2	Itô 微分方程和 Itô-Fokker-Planck 方程	159
4.3	Stratonovich 算法	163

4.4	Langevin 方程和 Fokker-Planck 方程	167
第五章	耦合非线性振子的世界	168
5.1	耦合在一起的线性振子	169
5.1.1	线性耦合的线性振子	169
5.1.2	非线性耦合的线性振子。一个例子。频率移动	170
5.2	对幅度与时间无关的准周期运动的扰动(准周期运动将持续)	172
5.3	有关步骤收敛性的一些探讨*	179
第六章	振子的非线性耦合: 准周期运动的持续情况	186
6.1	问题	186
6.2	Moser 定理(定理 6.2.1)	193
6.3	迭代法*	195
第七章	非线性方程。伺服原理	202
7.1	一个例子	202
7.1.1	绝热近似	203
7.1.2	精确消元法	204
7.2	伺服原理的一般形式。基本方程	210
7.3	形式关系式	213
7.4	迭代法	218
7.5	剩余项的估算。可微性问题	220
7.6	离散噪声映象的伺服原理*	222
7.7	形式关系式*	223
7.8	离散情况的迭代法*	230
7.9	随机微分方程的伺服原理*	232
第八章	非线性方程。宏观性质上的各种变化	239
8.1	单结点或焦点的分岔。基本变换	239
8.2	单个实本征值变为正	242
8.3	多个实本征值变为正	245
8.4	单个复数本征值穿越虚轴。Hopf 分岔	247
8.5	Hopf 分岔(续)	249

8.6	两振子之间的频率锁定	256
8.7	极限环分岔	259
8.8	极限环分岔: 几种特殊情况	263
8.8.1	分岔为两个极限环	263
8.8.2	周期加倍	265
8.8.3	次谐波	266
8.8.4	分岔为环面	268
8.9	一个环面的分岔(准周期运动)	270
8.10	环面分岔: 几种特殊情况	274
8.10.1	单个实数本征值变为正	274
8.10.2	一个复数非简并本征值穿越虚轴	277
8.11	不稳定性的层次、几种图景和通向湍流的道路 ..	281
8.11.1	Landau-Hopf 图象	281
8.11.2	Ruelle 和 Takens 图象	282
8.11.3	环面分岔. 准周期运动	283
8.11.4	通向混沌的倍周期道路. Feigenbaum 序列	283
8.11.5	经过间歇现象的道路	284
第九章	空间模式	285
9.1	基本微分方程	285
9.2	一般解法	288
9.3	对有限几何结构的分岔分析	290
9.4	广义 Ginzburg-Landau 方程	292
9.5	广义 Ginzburg-Landau 方程的简化形式. Bénard 对流中的模式形成	296
第十章	噪声的作用	300
10.1	一般方法	300
10.2	一个简单的例子	301
10.3	单复数序参量 Fokker-Planck 方程的计算机解 ..	304
10.4	有关 Fokker-Planck 方程解的几个有用的一般定理	311
10.4.1	当漂移系数是坐标的线性函数, 而扩散系数是常数 时, Fokker-Planck 方程的含时解与时间无关解	311

10.4.2	细致平衡系统的 Fokker-Planck 方程的精确稳定解···	313
10.4.3	一个例子·····	317
10.4.4	几种有用的特殊情形·····	319
10.5	接近临界点的非线性随机系统: 小结·····	320
第十一章	离散噪声映象 ·····	321
11.1	Chapman-Kolmogorov 方程·····	321
11.2	边界的影响. 一维例子·····	322
11.3	联合几率和转移几率. 前向方程和逆向方程·····	323
11.4	与 Fredholm 积分方程的关系·····	324
11.5	路径积分解·····	325
11.6	平均第一次推移时间·····	326
11.7	线性动力学和 Gaussian 噪声. Chapman-Kolmogorov 方程的精确含时解·····	328
第十二章	动力学中一种不可解问题的例子 ·····	330
第十三章	评论协同学与其它科学的关系 ·····	332
附录	Moser 定理的证明 ·····	336
A.1	Fourier 级数的收敛性·····	336
A.2	定理 6.2.1 问题的最一般解·····	338
A.3	收敛结构·····	340
A.4	定理 6.2.1 的证明·····	351

第一章 引 论

1.1 协同学的研究对象

协同学是研究由完全不同性质的大量子系统（诸如电子、原子、分子、细胞、神经原、力学元、光子、器官、动物乃至人类）所构成的各种系统。本书将研究这些子系统是通过怎样的合作才在宏观尺度上产生空间、时间或功能结构的。我们尤其要集中研究以自组织形式出现的那类结构，从而寻找与子系统性质无关的支配着自组织过程的一般原理。在引论中，将介绍从物理学到社会学的许多领域中发生的无序-有序、有序-有序转变的各种典型例子，并对协同学的基本概念和数学方法作一概述。

1.2 物理学

在各种热平衡物理系统中发生的一切相变过程（例如液态-气态转变、铁磁转变或突然出现超导性），原则上归属于协同学所涉及过程的普遍定义的范畴。另一方面，人们曾用相变理论深入地研究过这些现象，尤其是当今用重整化群技术处理了这些现象，有关书籍和评论文章是可以找到的（有关章节建议读者参照书末的文献索引）。因此，本书不再讨论这类现象，而集中探讨相变理论未曾涉及的协同学的那些现代发展。

1.2.1 流体：动力学模式的形成

流体动力学为我们提供了几个形成越来越复杂模式的极好例子。因为一种模式形成过程的本身就说明原来的液体状态不能维持下去了，也就是说，原来的液体状态变为不稳定的了，所以人们往往把模式产生的这类现象叫做“不稳定性”。首先考察的例子是 Taylor 不稳定性以及随之出现的不稳定性序列。这类实验（图

1.2.1) 研究同轴内圆柱体和外圆筒间液体的运动。通常让内圆柱体旋转而固定外圆筒不动，但也做过让内圆柱体和外圆筒都旋转的实验。在此，我们描述外圆筒固定不动而内圆柱体以各种转速旋转时所发生的现象。转速慢时，液体中形成同轴流线。这完全可以理解，因为内圆柱体和流体间的摩擦力力图使流体和它一起运动。转速增加（通常以无量纲的 Taylor 数测量转速）时，一种新的运动出现了。流体的运动变成了图 1.2.2 (a)、(b) 所示的组织形式，横向层中，流体周期地向内和向外的运动形成了滚动。

当 Taylor 数进一步增加到第二个临界值时，滚动便以一基频开始振荡，而在较高的 Taylor 数时，便以两个基频振荡。有时

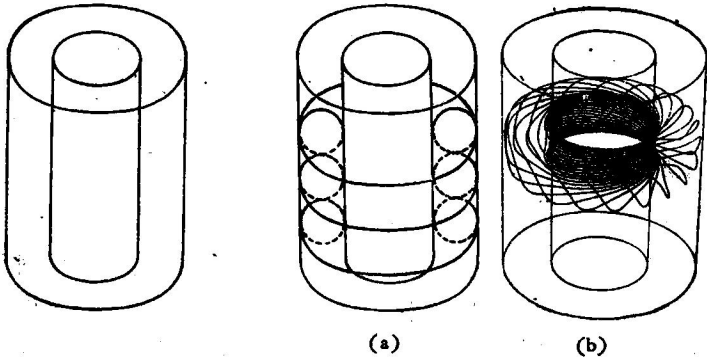


图 1.2.1 研究 Taylor 不稳定性的实验装置示意图。在透明的外圆筒和内圆柱面间充满了液体。内圆柱体能用固定的速度滚动

图 1.2.2 (a) 滚动形成的图示；(b) 由计算机计算的在一次滚动中一个液体粒子的轨道。该图表示形成了两个滚动，但只画出了粒子在上部滚动中的运动

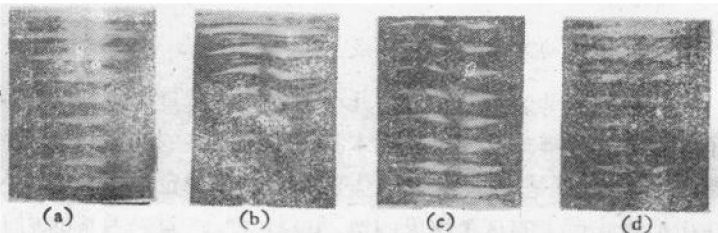


图 1.2.3 Taylor 稳定性的不稳定性序列：(a) 滚动形式；(b) 滚动开始振荡；(c) 一种比较复杂的滚动振荡运动；(d) 一种混沌运动

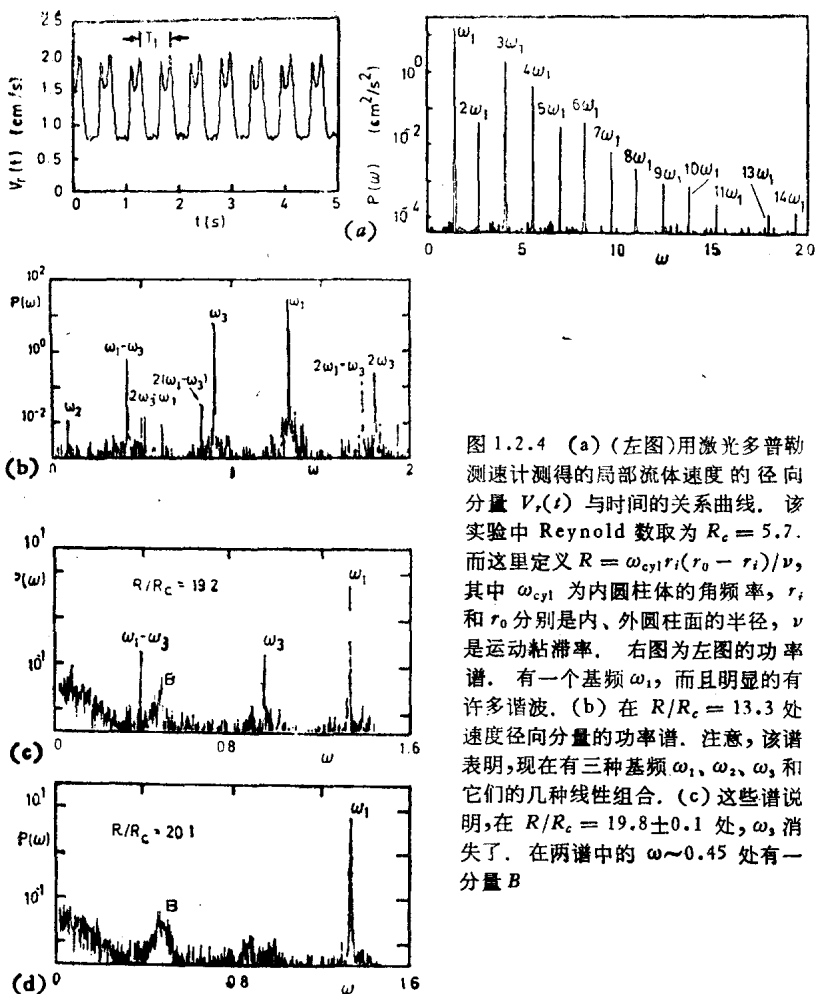


图 1.2.4 (a) (左图)用激光多普勒测速计测得的局部流体速度的径向分量 $V_r(t)$ 与时间的关系曲线。该实验中 Reynolds 数取为 $R_c = 5.7$ 。而这里定义 $R = \omega_{cy1} r_i (r_0 - r_i) / \nu$ ，其中 ω_{cy1} 为内圆柱体的角频率， r_i 和 r_0 分别是内、外圆柱面的半径， ν 是运动粘滞率。右图为左图的功率谱。有一个基频 ω_1 ，而且明显的有许多谐波。(b) 在 $R/R_c = 13.3$ 处速度径向分量的功率谱。注意，该谱表明，现在有三种基频 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 和它们的几种线性组合。(c) 这些谱说明，在 $R/R_c = 19.8 \pm 0.1$ 处， ω_3 消失了。在两谱中的 $\omega \sim 0.45$ 处有一分量 B

可观察到更为复杂的频率模式。最后，在更高的 Taylor 数时出现了混沌运动。如图 1.2.3 所示，可以直接看到各个演化模式。另外，人们已经通过激光散射测量了速度分布和它的 Fourier 谱 [图 1.2.4 (a)–(c)]。在特殊情况下，随着 Taylor 数的增加，可观察到一序列新出现的频率，它们恰好是基频的 $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/16$ 。