



# 环境模拟

## 环境系统的系统动力学模型导论

〔美〕 Andrew Ford 著  
唐海萍 史培军 译



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)



# 环境模拟

环境系统的系统动力学模型理论

[英] Andrew Hame 著  
张树华、张树华 译



清华大学出版社

# 环境模拟

## 环境系统的系统动力学模型导论

[美] Andrew Ford 著  
唐海萍 史培军 译

科学出版社

北京

图字:01-2008-0651号

## 内 容 简 介

环境问题的解决需要理解环境系统行为,而环境系统行为的研究离不开各种各样模拟方法的应用。本书详细讲解了系统动力学模型建立的过程、步骤与方法以及在模拟过程中可能遇到的问题与解决途径,并结合20世纪美国面临的一些生态和环境问题,运用系统动力学模型常用的一个有效工具——Stella进行了大量的实例演示与分析。本书附录还简略介绍、对比分析了六种目前常用的模拟软件,包括Stella、Dynamo、Vensim、Powersim软件、电子表格和特殊函数。环境系统模拟对于帮助理解社会、经济、环境等问题的过程、机制和关系,解决环境系统各层面尤其是复杂环境系统中的各种动力学关系具有重要作用。本书突出了模型在环境模拟中的作用,并且对模拟工具也有较完整的说明和应用,便于广大研究者与实践人员更好地掌握系统模拟工具,理解模型的运用,对于推动环境系统模拟在我国地球系统研究和实践领域特别是环境和生态系统中的应用均有积极作用。

本书可供高等院校相关专业的本科生、研究生参考,也可供相关领域的科研人员和教师参考。

Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Modeling of Environmental Systems/Andrew Ford

Copyright © 1999 by Island Press

Published by arrangement with Island Press

Translation copyright © 2009 by Science Press

All rights reserved

### 图书在版编目(CIP)数据

环境模拟:环境系统的系统动力学模型导论/(美)福特(Ford, A.)著;唐海萍,史培军译. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023849-8

I. 环… II. ①福… ②唐… ③史… III. 环境系统-系统动态学-环境模拟-研究 IV. X21

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第214310号

责任编辑:张震/责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009年5月第一次印刷 印张:26 1/2

印数:1—2 000 字数:629 000

定价:79.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

# 序 言

这本书是专门针对那些对系统和环境感兴趣的大学生编写的。本书主要介绍了系统动力学模型在理解和管理环境系统中的应用。本书可以作为两个学期的大学本科教材，也可以作为环境系统计算机模拟方向的研究生教材。

## 开卷有益

学习本书的前提是，读者具备初等代数的基础，懂得怎样统一计算过程中的单位。然而，通过本书的学习，也可能会使你在初等代数和统一计算单位这两个领域的一些最初观念得到更新。附录 A 介绍了如何定义和组合单位。附录 B 描述了两个在你先前数学学习中的重要主题：指数增长和指数衰减。

使用本书，你不需要知道微积分或者微分方程组。相反，你将学会如何在计算机上构建数学模型。你的工作要集中于模型结构；单调乏味的数值模拟将由计算机来完成。Stella（附录 C）、Dynamo（附录 D）、Vensim（附录 E）和 Powersim（附录 F）等软件，使得计算机模拟变得简单。本书用的是 Stella 软件，所以如果你使用 Stella，将会发现你的工作和本书所讲内容之间有最直接的匹配。然而，你也可以使用本书中提到的其他任何一个软件包。每个软件都很容易学习，而且都可以用来构建环境系统的强大模型。

## 第一部分 导论

第 1 章介绍了建模的一般过程以及系统动力学的具体应用领域。第 2 章解释了系统动力学模型的基本构建模块：库和流。第 3 章阐述了在计算机上完成模型的数值模拟。第一次构建和使用一个真实环境系统模型的机会出现在第 4 章，该章描述了一个加利福尼亚北部莫诺盆地（Mono Basin）的水流模型。

第 5~9 章完成了导论的介绍资料部分。第 5 章描述的是平衡图，一个变化的库-流图，表明在动态平衡下维持系统的各种流。第 6 章描述的是看似不同的两个系统的模型，但是随时间的变化都展示出 S 形增长。它们行为的相似性是来源于其结构的相似性。第 7 章介绍了观察系统结构的另一种方法。书中介绍了因果回路图，并演示了这种图是怎样刻画系统的反馈结构的。第 8 章提供了应用新的图表形式来解释体内平衡的机会。第 9 章以“牛眼图”的一些介绍资料作为导论部分的结束。牛眼图是描绘模型边界条件的一种便捷方法。

## 第二部分 物质流模拟

环境学家和管理者对于物质流有特别的兴趣，并且系统动力学因其清晰的库-流方法而非常适合于模拟物质流。第 10 章描述了一种经常用在模拟流经系统的物质流的方法。第 11 章把我们的注意力引向快速移动的流，并解释了这些快速移动的流如何影响数值模拟中的步长大小的选择。

本书其后列举了真实环境系统中的 3 个应用实例。第 12 章描述了杀虫剂 DDT 以流的形式通过土壤、空气和海洋进入鱼体的过程。第 13 章描述的是幼鲑从斯内克河 (Snake River) 下行到哥伦比亚河 (Columbia River)，最终进入海洋的春季洄游。第 14 章描述了出生在华盛顿东部图坎嫩河 (Tucannon River) 的鲑鱼的整个生命周期。

## 第三部分 建模过程

第 15 章描述了构建和检验模型的过程，这是一个涉及将先前各章所学的所有技能组合在一起的一个试验和误差的不断反复调试的过程。你将读到，有经验的建模者不仅仅要关注模型本身，对模型建立的过程也要同样关注。本章最后通过许多案例给出结论，建模过程中的迭代特性是项目成功的关键。

第 16 章用一个亚利桑那北部凯巴布高原 (Kaibab Plateau) 上鹿群的具体案例演示了建模中的迭代过程。经过几次迭代计算后，最终得到了可以用来解释 20 世纪 20 年代鹿群快速增长随后崩溃的模型。凯巴布案例生动地说明了系统行为的“突破极限”模式，这个模式可以在许多种群系统中观察到。

## 第四部分 模拟周期系统

接下来的三章讲述的重点从那些随时间增长的系统转移到随时间振荡的系统。这些振荡波动相当大，从而揭示出严重的问题。也有可能这些振荡非常稳定，成为整个系统长周期稳定运行的关键。第 17 章引用第 6 章中的 S 形增长曲线来解释振荡行为的基本规律。你将读到怎样用延迟将前面章节中提到的稳定系统转变为高度振荡系统。

书中提供了两个案例，用来建立和检验具有振荡行为的模型。第一个案例是捕食者-猎物模型，这是生态学上讨论最广泛的主题之一。第 18 章描述了凯巴布高原美洲狮种群和鹿种群之间的周期格局。第二个案例是商品生产周期，这是经济学上最重要的主题之一。第 19 章介绍了世界铝业生产周期的模型。

## 第五部分 管理飞行模拟器

再接下来的两章介绍的是管理飞行模拟器。飞行模拟器是为了简化实验而设计出的高度交互式的模型。第一个案例是有关持续已久的城市空气污染问题。第 20 章将你置于“费用减免”管理者的角色中。出售不清洁排放车辆要征收费用并允许返还费用给购买清洁车辆的买主，通过上述做法，某个州可以在城市大气补给区内减少汽车尾气排放。第 20 章是个挑战，看看我们是否能够设计一项在财政上以慎重方式运行的“费用

减免”项目。

第二个案例是有关盖娅假说和雏菊世界的比喻。第 21 章简短地回顾了盖娅假说，并且指出了为仅由黑白雏菊组成的虚拟星球建立数学模型的目的。你可以用飞行模拟器来设计一个像雏菊世界中描述的那样有可持续前景的世界。

## 第六部分 结论

最后总结性的两章涉及的主题是模型的有效性和模型的应用。第 22 章介绍了关于模型有效性这个有争议主题的一些对立观点。采用了实用性的观点并且解释了阻碍模型建立置信度的五种具体检验。

当然，模型实用性的最终检验还是看它是否可以应用于实践。系统动力学模型在电力工业就得到了广泛的应用。第 23 章回顾了电力工业的发展历史，并且阐述了系统动力学是怎样从一个独特的角度来解决电力工业的诸多问题的。通过对电力工业案例的学习，你将学会怎样将这本书中的知识应用于自己所从事的领域。

## 附录

附录中提供了一些重要的材料，这些材料不需要按照通常的先后顺序来阅读。你应该挑选出其中最能帮助你的附录。前两个附录是综述性的材料。几乎每个读者都将会通过对单位（附录 A）和数学（附录 B）两部分的快速浏览而从中受益。

接下来的六个附录是关于软件的。由于本书案例采用的都是 Stella 模型，所以该模型在附录 C 中有详细的介绍。但是通过阅读附录 D~附录 F，你很快会发现 Stella 模型和其他的库-流程序之间有很大的相似性。如果你对电子表格比较熟悉，那么你将很快从附录 G 中获得更多有关电子表格建模的知识。附录 H 中的软件说明材料中提到，在通常的库和流之外，一些特殊函数将会扩展模型的功能。

最后的三个附录覆盖了环境专业的学生特别感兴趣的几个主题。环境学家和环境管理者往往非常关心空间格局，而附录 I 则用实例演示了怎样将空间维数引入系统动力学模型。这个实例演示了氮在一个集水区内的扩散。环境管理者会对附录 J 特别感兴趣，讲的是如何使用存在很多高度不确定参数的模型。文中介绍了我们应该怎样来计算模型模拟的置信范围。接下来又介绍了系统的反馈结构是怎样随时间变化来增加或缩减模型的置信范围的。附录 K 利用 Idagon 模型得出结论。这是一个管理飞行模拟器，允许你亲自体验管理一个复杂河流系统的挑战。你将会在附录 K 看到这个河流系统的概要介绍。详细的描述和飞行模拟器都在本书的主页（<http://www.islandpress.org/ford>）上。

## 练习和主页

书中每章的最后都设计了一些在课后完成的练习。可以看出，大多数练习都是证明题，所以你应该很清楚正确答案。一些更复杂练习的答案会在主页公布。作为本书的补充，主页可以提供：

- 为选择案例扩展背景资料 [如莫诺湖 (Mono Lake)];
- 与案例信息有关的其他网页相链接;
- 与系统动力学相关的网页链接;
- 与提供系统动力学软件的公司主页相链接;
- 用于下载练习所用的模型和飞行模拟器。

主页的主要用途是用来扩展本书中的练习集, 包括与书中各章结尾部分的练习题很相近的几个短练习, 还包括几个适合于课堂项目的长练习。你将发现以下领域的建模机会:

- 人类学 [赞巴加 (Tsembaga) 部落和他们的猪<sup>①</sup>];
- 流行病学 (黄热病的传播);
- 遗传学 (工业黑化现象);
- 湖泊学 (水体富营养化);
- 管理学 (增长极限的自我影响);
- 物理学 (热量平衡);
- 生理学 (模拟应激反应);
- 资源经济学 (天然气的开发和产量)。

## 给教师的提示

本书倾向于作为对系统学和环境学感兴趣的本科生的教材使用。该课程的“典型”安排是 16 周, 每周 3 学时。但是课程的形式和讲授内容可以灵活安排, 教师可以根据自己的具体情况, 充分利用本书设计成模块形式的优点, 重新安排教学内容。例如, 如果你只有 4 周的课程时间, 建议你按如下顺序讲授:

第 1 周: 导论和回顾 (第 1 章、附录 A 和附录 B)。

第 2 周: 软件 (从附录 C、附录 D、附录 E 或附录 F 中挑选)。

第 3 周: 建模和模拟 (第 2、3 章)。

第 4 周: 首次主要应用——以莫诺盆地为例 (第 4 章)。

这个教学内容是相对独立的, 以对一个重要的环境系统的实际应用来得出结论。如果你有 8 周的课程时间, 建议你增加如下讲授内容:

第 5 周: 平衡图和 S 形增长 (第 6 章)。

第 6 周: 因果回路图 (第 7、8 章) 和牛眼图 (第 9 章)。

第 7 周: 物质流简介 (第 10 章) 和步长的取值 (第 11 章) 的介绍。

第 8 周: 从第 12、13 或 14 章中选取一个案例。

第 14 章图坎嫩河鲑鱼案例也许是最佳选择, 因为其以假设学生充当渔业管理者角色的一个交互式模型得出结论。在第 8 周课程结束时, 学生将会掌握建模基础, 并学习两个主要的应用案例。

<sup>①</sup> 译者注: 赞巴加部落相信养猪是对先祖的供奉, 部落内的猪有较大的种群规模。



如果你的课程时间为 12 周，可以增加以下 4 周的内容：

第 9 周：建模步骤（第 15 章）。

第 10 周：用凯巴布鹿群的案例来说明建模过程（第 16 章）。

第 11 周：振荡导论（第 17 章）和一个案例（第 18 或 19 章）。

第 12 周：管理飞行模拟器（第 20 或 21 章）。

这样，12 周结束时，学生们已经打下了应用自己的模型进行实验的坚实基础。我认为一个课堂项目的练习是结束这一学期课程的最好方法。推荐您给学生 4 周时间来建立一个新模型，或改善本书中的任意一个模型。

# 致 谢

本书的完成离不开南加利福尼亚大学（USC）和华盛顿州立大学（WSU）同事们的支持和帮助。他们曾鼓励我进行系统动力学的教学工作，并与我分享他们对于授课和著书的一些看法。我要特别感谢南加利福尼亚大学的 Peter Gardiner 与华盛顿州立大学的 Bill Budd 和 Eldon Franz 等对我的鼓励。同时也要感谢来自南加利福尼亚大学和华盛顿州立大学的学生们提供的诸多有趣的想法、练习和课堂项目。

书中数章内容来自于两位杰出的教授 Dennis Meadows 和 Donella Meadows 当年的授课内容。这两位教授 20 世纪 70 年代在达特茅斯学院（Dartmouth College）公共管理政策和技术的课程中教授系统动力学。他们的课堂是学习和思考系统的一个特别的地方，我从中受益终身。

跟大多数从事系统动力学研究和实践的人一样，通过系统动力学在专业领域的应用，我收获颇多。在此非常感谢来自纽约州立大学（State University of New York）奥尔巴尼（Albany）分校公共管理学院的 David Andersen 和曼彻斯特技术学院（Massachusetts Institute of Technology）管理系的 John Sterman 等在专业上的支持。

我还要特别感谢那些帮我审核草稿，并在课堂上试用本书早期版本的老师们。他们分别是爱达荷大学（University of Idaho）森林管理学院的 Ted Bjornn、达特茅斯学院生态环境研究所的 Donella Meadows、科罗拉多州立大学（Colorado State University）建筑规划院的 Fahriye、内华达大学拉斯维加斯分校（University of Nevada, Las Vegas）生态环境研究所的 Krys Stave 以及加利福尼亚大学圣巴巴拉分校（Santa Barbara）生态环境研究所的 Robert Wilkinson。这本书的出版同样得益于与邦纳维尔（Bonneville）电业局的 Mike Bull 的许多有趣的讨论，同样也接受了爱达荷狩猎与渔业部 Charles Pretoskowi 的一些建议。

书中的许多案例，来自于西部能源与生态环境方面的科研项目，这些项目都应用了系统动力学的知识。还要感谢邦纳维尔电业局、加利福尼亚能源高效利用研究所、爱达荷国家工程和生态环境实验室的资金支持。本书的出版还得到了 Weyerhaeuser 环境教育工程项目和华盛顿州立大学教学中心的经费资助，在此一并表示感谢。

本书的文本组织工作相当艰巨。Island 出版社的编辑 Todd Baldwin 帮助最初的草稿成型，并为最终出版发行的定稿做了大量准备工作。来自华盛顿州立大学教学中心的 Peg Collins 和 Greg Turner-Rahman 帮助检验习题。我充分利用伦敦商业学校的假期，将自己的成果进行了汇总，并写入本书。感谢 Derek Bunn 和 John Morecroft 为我提供了这样一个宝贵的假期。

最后要感谢我的两个天真烂漫、聪明活泼的女儿 Amanda 和 Emilee。同样要感谢 Amy——我的妻子，也是我最好的朋友，她的支持、她的想法和对一些重要问题的感知帮助我顺利地完成了本书。

# 目 录

序言

致谢

## 第一部分 导论

第 1 章 概述	3
第 2 章 库和流	13
第 3 章 数值模拟	23
第 4 章 莫诺盆地的水流模型	30
第 5 章 平衡图	49
第 6 章 S 形增长	56
第 7 章 因果回路图	66
第 8 章 因果回路与体内平衡	84
第 9 章 牛眼图	92

## 第二部分 物质流模拟

第 10 章 物质流简介	99
第 11 章 步长的取值	110
第 12 章 模拟 DDT 流	115
第 13 章 幼鲑的春季洄游	130
第 14 章 图坎嫩河鲑鱼模型	143

## 第三部分 建模过程

第 15 章 建模步骤	165
第 16 章 凯巴布高原鹿群模型	176

## 第四部分 模拟周期系统

第 17 章 振荡导论	207
第 18 章 凯巴布高原上的捕食者-猎物振荡	221
第 19 章 铝生产的波动性	233

## 第五部分 管理飞行模拟器

第 20 章 空气污染、清洁车辆和费用减免	249
第 21 章 雏菊世界的气候控制	265

## 第六部分 结论

第 22 章 验证	281
第 23 章 来自电力工业的教训	287

<b>回顾</b>	
附录 A 计量单位 .....	303
附录 B 数学回顾 .....	308
<b>软件</b>	
附录 C Stella .....	315
附录 D Dynamo .....	325
附录 E Vensim .....	330
附录 F Powersim .....	337
附录 G 电子表格 .....	342
附录 H 特殊函数 .....	346
<b>专题</b>	
附录 I 空间动态 .....	357
附录 J 综合灵敏度分析 .....	366
附录 K Idagon .....	373
<b>参考文献</b> .....	378
<b>译者编目</b>	
图中变量的中英文对照 .....	389
地名和机构名的中英文对照 .....	408
<b>译后记</b> .....	410

# 第一部分 导 论



# 第 1 章 概 述

模型是用来代替真实系统的。当对实际系统进行操作比较困难时，就需要用模型这个替代系统。建筑师的蓝图、工程师的风洞和经济学家的图表都是模型。它们代表了一个真实系统的某些方面——建筑物、航空器或国家经济。当这些模型能够帮助我们学到一些关于它们所代表的真实系统的新知识时，模型就是有用的。

我们当中的许多人已经建立和使用过模型。最初的经验可能已经涉及物理模型，如纸飞机或纸板滑翔机，这些模型易于组装和使用，使实验操作变得有趣。我们进行实验，观察实验结果，然后再尝试。通过这种方法，我们了解了飞行动力学。如果我们的经验一致，就会知道，要想使纸飞机飞得更远，不能简单地用力投掷，每只飞机在空中飞行时似乎都遵循其自然滑翔路径。通过实验，我们了解到飞行的自然轨迹能在多大程度上得到改进。

本书侧重于环境系统的数学模型。数学模型用方程来表示系统内的相互联系。我们将集中关注一类特殊的数学模型，它们是在计算机上进行“模拟”的。因为大量繁琐的计算交由计算机来执行，故称其为计算机模拟模型。我们的工作就是思考建立描述环境系统模型的最佳途径。如果工作做得很好，就能利用模型来进行实验。我们尝试实验，观察实验结果，然后再重复实验。通过这种方法，将会提高我们对于环境系统里自然轨迹的理解。通过使用计算机模型的模拟实验，我们将了解到系统运行的自然轨迹能在多大程度上得到改进。

## 非正规模型

我们随时都在使用模型，但大部分时候用的都不是正规的模型。我们脑海中浮现的是一个简化了的复杂系统图像，有时称之为“心理模型”。Senge (1990) 这样描述心理模型：“根深蒂固的假设、概括，甚至图像，影响我们如何认识世界，如何采取行动。”我们常用心理模型来解释周围的世界，但通常自己意识不到。

为了理解我们是如何快速和无意识地利用心理模型，首先进行两个简单实验。观察图 1.1，告诉自己看到了什么；然后再看图 1.2，并解释你所看到的。

如果你的反应和大家一样，你将“看到”的是一个白色三角叠加在图 1.1 上。你会得出结论，白色三角就是在那里——这是与众人一致地解释整个图画的最简单方式。当问及图 1.2 的漫画时，许多人的反应

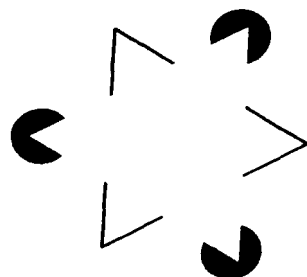


图 1.1 你在这张图中看到了什么？



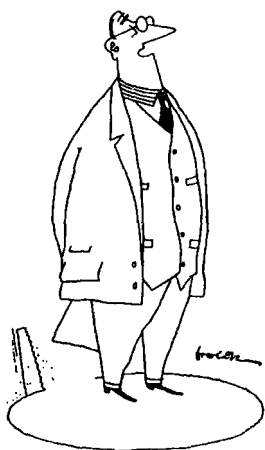


图 1.2 你在这张漫画中看到了什么？尤其注意，图底部的曲线是圆还是椭圆

是，底部的曲线是一个圆。当被问及如何解释，往往用一个相当复杂的理论。例如，有人正通过在地板上挖个洞耍花招戏弄演讲者，那么效率最高的挖洞方法就是一个圆。当被告之图 1.2 的曲线实际上是一个椭圆时，许多人会立即反应过来，他们是在用三维视角看这个圆。诸如此类的讨论揭示出，我们具有形成理论来解释周围世界的惊人能力。这些理论便是心理模型。

## 对环境的思考

尽管思考几何形状时我们表现得很聪明，但当思考环境中出现的严重问题时常常会感到非常困惑。无论是面对诸如城市空气污染等地区性的问题，抑或全球性问题，例如，温室气体的累积，心理模型此时就显得不足以完成任务。我们听到关于问题的诸多方面、有争议的解释，但不能确定哪种解释更可信。如果有权采取行动，我们也可能不知道该采取什么行动。对复杂系统的第一直觉可能会引导我们走向错误方向。我们可能会想，答案在于通过对过去有成效的一个特定项目的扩展而更进一步地“努力推动”，但该系统的反应可能会像我们年轻时代玩过的纸飞机。努力推动就像努力投掷飞机一样——可能会使情况比以前更糟。在第 14 章有关鲑鱼捕捞的案例中，将会看到鲑鱼的种群数量随时间变化的“自然轨迹”，发现鲑鱼的数量能够支持年复一年的大丰收。但如果你想通过“努力推进”来增加总产量，即每年捕捞更多的鲑鱼，你会发现从长期捕捞过程看，收获量实际上会降低。

本书介绍的每一个新环境系统中，都有系统行为不按预期趋势发展的例子。一些系统会有令人惊讶的、异常迟缓的反应（如第 12 章的 DDT 累积案例），而其他系统将会展现出出乎意料的快速反应，似乎要导致系统失控（如第 20 章中费用减免政策的现金流案例）。每个新章节的目的都是通过计算机模拟实验让我们了解系统的自然发展趋向。

计算机模拟实验的学习使我回想起第一次学习操控渔船的经历。最初采取的是在渔船尾部控制马达，直觉告诉我可以通过马达扳手来控制船的行驶方向。让船向右行驶，就向右扳动，但实际上这一操作使渔船开始向左行驶。我的下一个反应就是继续向右扳动，当然，船继续向左。当我终于意识到自己的想法需要纠正时，随即向左大幅度扳动扳手，于是船急速向右转动。然而，随着时间推移和实践积累，我对渔船系统有了深入的了解并能用正确的方法操控它。在平静的湖上练习操控渔船时，可以允许操作的失误发生并由此发现自己想法上的错误。但在复杂的环境系统中，我们很少能够奢望在实际系统中进行操练。那么，如何才能对复杂环境系统的自然发展趋向形成本能的直觉呢？

本书的前提是计算机模拟模型能够帮助我们形成环境系统管理的直觉。我们建立一个数学模型用以捕捉系统内的关键相互联系；然后用计算机模型进行实验来使我们管理模拟系统的直觉更加敏锐。但必须了解，计算机模型需要严密的规则，要求给出清晰明