

乔治·P·雷恰逊 亚力大·L·浦Ⅲ 著
杨通谊 杨世胜 叶映虹 译

DYNAMO

系统动力学建模导论



责任编辑：范 源
封面设计：赵素萍

DYNAMO系统动力学建模导论

〔美〕 乔治·P·雷恰逊 等著

杨通谊 杨世胜 叶映虹 译

*

安徽科学技术出版社出版

（合肥市跃进路1号）

新华书店经销 安徽新华印刷厂印刷

*

开本：850×1168 1/32 印张：12.75 字数：339,000

1987年8月第1版 1987年8月第1次印刷

印数：00,001—1,500

统一书号：15200·92 定价：3.75元

INTRODUCTION TO
SYSTEM DYNAMICS MODELING
with DYNAMO

George P. Richardson
Alexander L. Pugh III

The MIT Press
Cambridge, Massachusetts, and
London, England

此书经原著出版社——美国麻省理工学院出版社获准出版

译者前言

可有四册系统动力学名著汉译本问世了。第一册《工业动力学》，是在1979年夏由我与胡汝鼎同学开始翻译的。但由于人事关系，迟至1985年底才出版，前后达六年之久，惜汝鼎已先逝，不及见了。第二册《系统学原理》，由我主译，开始于1982年春，两年内就出版了。这两册译本都是得到原作者福莱斯特教授的同意而后进行的。第三册那本书，亦由我主译，也系得到麻省理工学院出版社的许可后进行的。第四册《计算机仿真导论》，由杨世胜教授翻译，国外出版社的许可在协商中，亦即将出版。我一向主张能及时介绍和翻译国外智能开发新技术的名著，比自己写一本书更有意义，因为后者费时太长，往往出版后已落后于时代了。今能看到本册和其它三册汉译名著的先后问世，感到非常高兴。

系统动力学从工业模型的建模和改善企业经营管理策略的设计方法，逐步扩充到城市成长、经济行为、医药、环境及其它方面的应用，是在70年代发展起来的。从70年代中期至80年代初福莱斯特教授更集中力量发展了长波理论和国家模型，是对当前社会经济发展的行为进行分析和研究的有力工具。80年代以来，系统动力学有了新的内涵，下面向读者简单地作一介绍。

麻省理工史隆管理学院正在努力澄清商业和组织开发的类属动力学(Generic Dynamics)。这种努力的关键莫基于25年来对系统动力学的研究所获得的发现，即某些类属动力学趋向于在分散的组织处置中再度出现。因此“类属结构”(Generic Structure)可用相对简单的系统动力学模型在个人微机上进行仿真。运用这样模型的内部相互作用时，一个企业经理或院校师生，不必借助于资深的系统动力学建模者，就可以发现关于重要管理学理论的动力学。总的说

来，在一次深入理解后，就可以更易于认识在某一特殊组织中的过程。这会增加我们对在史隆管理学院发起的“系统思维和新型管理学”的推动中，为什么要限制商业单位的规模，要推进局部决策和发展有效的、非层次的、有酬劳的系统的理解。因为它对组织的革新和适应性，从长期来看，是维持一个组织生命活力所必需的。

上述系统动力学新的内涵对日渐增多的模型使用者带来了福音，但从系统动力学研究者和建模者的角度来看，则是对更多地发展类属结构和建立类属模型的贮存库增加了压力。本册和其它三册汉译书的问世，将对有志研究系统动力学的学者有所裨益，同时可供大专院校企业管理及系统学专业师生阅读，也可供各级管理干部参考。

杨 通 谊

一九八六年五月于上海交通大学管理学院

序 言

自《工业动力学》一书于1961年问世以来，系统动力学在不断发展，现在世界上已有三十多个国家把学术和应用活动列入了该领域。利用系统动力学的工具及其观点建立起来的计算机仿真模型形式繁多，既有直观的，也有极为高深的；有短至十个方程的，也有长达2000个或甚至更多个方程的；既涉及微观问题，如细胞生物学，也涉及宏观问题，如国家和世界经济。从事学习者包括公司研究人员、企业顾问、政府工作人员和学院师生。他们的研究范围极广：从基本观点和方法论的应用到解决问题和以策略为中心的研究。

本书系统地描述了系统动力学的研究方法，从问题识别的最初阶段到最终的策略分析的建议阶段为止。它的主要目的是为公司经理、政府策略制订人员、大学研究人员、职员以及那些对系统动力学在工作中的应用颇感兴趣的学生提供入门知识。因此，从这种意义上来说，本书是一本方法书。然而，有些人读这本书的目的不是为了成为模型制造者，而是为了获得有关系统动力学和其它定量的制模方法之间的关系的认识。为此，本书的第二个目的是使读者进一步认识定量的建模在社会科学和策略科学中的作用。

我们假定不同的读者将进行不同程度的研究。因此，第一、二章非定量地介绍了系统动力学研究法的基本概念，它们和第三章中的前三节、第四章中的第四节、第五章以及第六章的部分章节就一系统动力学模型的构成、方程的建立测试及其在策略分析中的运用作了概述。对那些准备自己建立模型的读者来说，三、四、五、六章中的其余部分是相当重要的。第七章则在前几章的基础上，为我们提供了极为有用的材料。

阅读此书时，也许你会持笔在手并偶尔作些练习或验证一下方

程的正确性。这样做固然有用，但本书更适宜于当作故事，而非当作范文或参考手册一般来阅读。然而，我们又认为单凭阅读此书是不可能学会根据系统动力学的建模观来研究问题的方法的。因此，笔者有时将中止其描述，并向读者提议一项有益的任务：以时间图解来定义某一问题，建立因果环图或编写有关特定结构的方程；用一给定模型做某些计算机实验，或者用一种方法来精炼某一模型。这类练习并非为理解以后章节之必须，但是对那些不只是满足于获得一般概况的读者来说，它们无疑有帮助作用的。读者可在书末的文献中找到更多的练习材料，尤其在Forrester(1968b)、Goodman(1974)、Alfeld Graham(1976)和 Lyneis(1980)所提供的材料中。

计算机仿真语言DYNAMO从开始起就与系统动力学联系在一起了，它的前身是一个叫SIMPLE(多方程的工业管理问题的仿真)的1958计算机程序。现行工具有DYNAMO II和II/F，DYNAMO III(能处理下标变量)以及Mini(小型)-DYNAMO(一种缩小了的DYNAMO II版本，它用小型计算机进行操作，磁心存贮器的容量仅为20K)。目前用于试验的有Micro(微型)-DYNAMO(在具有磁盘存贮器的极小的微型计算机上进行操作)和DYNAMO IV——现为最有效的执行工具，它具有DYNAMO III和高阶可变步长的集成方法。所有这些工具均由pugh-Roberts Associates, 5 Lee st., Cambridge, Massachusetts, 02139来开发和提供维修。

第三章中DYNAMO的入门知识适用于所有这些语言版本的核心。而且，略作改动后，也将适用于NDTRAN和DYSMAP(在DYNAMO之后流行的仿真语言)¹⁾。欲理解本书中的仿真概述，无须具备计算机语言的实践经验。不过，熟练的程序编制员能够很快理解如何用不同的计算机语言建立系统动力学模型的方法。也许在某些人

1) NDTRAN是在William Davison和John Uhran的指导下于Notre Dame建立起来的。而DYSMAP则是在R. Geoffrey Coyle的指导下，由英国Bradford大学的系统动力学研究小组设计而成。

看来,DYNAMO和系统动力学并无多大区别(事实上也确实如此),但是必须注意,系统动力学方法是不为语言所限制的。

本书集中了许多人的观点和意见。最主要的自然要属Jay Forrester。读者会多次发现有关模型概念化或格式化的某一准则经常来自《工业动力学》中的一条评论或附录。Forrester并没有直接参加本书的编辑工作,但是他在书中的影响却很大。此外,在同那些与Pugh-Roberts社和麻省理工学院的系统动力学组成员的长期接触中,我们也获得了不少知识。在此谨向Ed Roberts和David Andersen表示谢意。

同时,我们要感谢那些为本书的出版贡献了力量和聪明才智的人们。Bill Shaffer帮助开始了这项工作,并对早期的草稿作了评论。Cherie Wallett协助我们度过了几个难关,而且出色地完成了为IBM6670激光印刷机安排本书版式的极为单一的任务。Pilar Carrasco承担了最后的校对与修改工作。Diane Leonard-Senge以他特有的技术和细心,绘制了书中所有的图画,其间还得到了Nicole Harris的帮助。最后,Karl Clauset阅读了全书及其大部分的修改文稿,作了详尽的评论,提出了衷心的批评,并给予了热情的鼓励。因此,笔者愿借此机会向他表示深切的谢意。

本书旨在作向读者传授“艺术”训练的方法的尝试。毫无疑问,书中的方法不是唯一的。但是,与其是将一初露头角的“艺术家”置之一旁,任其盲目地选择画笔和颜料,倒不如为他提供一些力所能及的帮助。为此,我们在描述那些在我们看来是最有用的准则时,尽量做到直截了当,清晰明了。我们相信随着研究的深入,读者会形成各自的风格。我们真切地希望本书能促进这一过程的形成。

George P. Richardson

Alexander L. Pugh II

1981年6月于麻省剑桥

作 者 的 话

我们的在仿真建模方面书籍的翻译出版，使我们感到非常荣幸和高兴。本书的宗旨是交流探讨复杂动力学问题的方法。这个方法是建立在循环的因果关系环和计算机仿真基础上的，通称反馈环。当我们于1981年创造出这种方法时，就希望它能进一步推广应用仿真工具，以帮助人们完善各种复杂系统中的策略分析和策略设计。此中译书的出版，使我们感到原先的设想大有指望。我们仍然希望本书中所阐述的有关计算机仿真方法能达到促使人们研讨和掌握这些复杂系统的目的。此书的问世将形成更多的读者，因而具有极大的潜力。展望未来，我们期待着本书新的读者将在仿真研究和策略理解方面取得新的进展。

乔治·P. 雷恰逊

亚力山大·L. 浦Ⅱ

美国 麻省 剑桥

1987

目 录

第一章 系统动力学	1
1.1 问题和模型	1
1.2 反馈系统	3
1.3 系统动力学概述	12
第二章 问题的识别和系统概念化	17
2.1 动态地定义问题	18
2.2 反馈结构的表示法	23
2.3 模型的目的	34
2.4 模型概念化的一个实例	41
2.5 模型概念化阶段的总结	56
第三章 DYNAMO 入门	61
3.1 DYNAMO 概述	61
3.2 一个计算的例子	63
3.3 方程的类型	69
3.4 获得输出结果	84
3.5 延迟、平滑的平均数	97
3.6 函数	109
第四章 模型的格式化	125
4.1 流率方程	125
4.2 辅助方程	150
4.3 什么是流位	166
4.4 规划模型的格式化	179
4.5 文件编制	204
4.6 参数和初始值	220

4.7	调试	237
4.8	模型格式化的原则	252
第五章	模型测试及其进一步的开发.....	257
5.1	理解模型行为	257
5.2	灵敏度	268
5.3	改进和再公式化	283
5.4	有效性问题	300
第六章	策略分析.....	310
6.1	作为选择策略的参数改变	310
6.2	作为选择策略的结构改变	321
6.3	策略推荐与有效性问题	338
第七章	EDYNAMO 中的高级论题.....	349
7.1	用户定义的MACRO	349
7.2	MACROS的例子	358
7.3	DYNAMO II 中的数组	365
7.4	数组函数	379
7.5	打印和绘图数组	383
7.6	DYNAMO II 模型的调试	386
	DYNMO输出的标度字母.....	387
	对下列引用资料谨致谢意.....	389
	参考文献.....	392

第一章 系统动力学

1.1 问题和模型

系统动力学是认识某类复杂问题的一种方法学。它创始于30多年前，当时主要用于解决企业中出现的一些有关经营管理的问题。例如，产量和雇佣的不稳定性，企业发展中的波动和萧条现象，以及股票市场上出现的跌落现象。在短短的几年中，工业动力学的方法已得到了广泛的应用：经营管理某个“研究与开发”规划；解决城市的萧条和衰退问题；认识有限的正在减少的自然资源中出现的指数增长的含义。甚至对糖尿病理论的检验也用到了工业动力学。

因此，“工业动力学”很快就改用了“系统动力学”这一更广义的名称。我们不想对“系统”一词作任何定义。但是，读者须知它在这里的含义是，代表着适用范围的广泛性、问题的复杂性以及观点概括性——即一种用于解决某一特定问题的系统的研究方法。还有，系统动力学着重研究的并不是一个系统，而是一个问题，以后有机会我们将重复这一点。

动态问题

系统动力学所探讨的问题，至少有两个共同的特性。第一，它们都是动态的，就是说包含的量具有随时间而变化的特性。如工业上雇佣人员的波动，城市中税收和生活水准的降低以及医疗费明显的上涨。此外，建筑工程经费的超支、政府的发展过程（对某些人来说是个问题）、癌症、对国立或州立公园的利用和滥用现象甚至心理上的抑郁症，这些都是动态问题，而且都可以用变量随时间变化的

图形来表示。总之，学习系统动力学首先要建立一个动态的概念。第二个特性是：反馈。这一概念将在1·2节中讨论并作出定义。在此仅概括其一般的思想。对伺服机构及闭环控制系统中的工程师以及生理学家来说，它是自动调节的动态平衡；对社会科学家来说，它是一个恶性循环及自行实现预言的概念；对那些设计高度灵敏的扩音器和那些耳闻扩音系统刺耳声的人来说它就是反馈。

系统动力学应用于解决反馈系统中的动态问题。我们认为团体、机构、经济、社会……事实上所有的人类系统，都是反馈系统。这一观点有助于理解社会问题。

正规的模型

也许系统动力学方法最显著的特点，是对正规的、定量的计算机模型的运用。这里所指的“模型”是某一现实的简化及代表。系统动力学模型是一种实验工具。有了它人们就能对系统反复进行试验、检验假设或改变经营决策。当然主要目的是获得认识，使模型所代表的问题得以解决或将问题减少到最低限度。

与大多数作为决策依据的非正规的模型相比，即与所谓的思维模型相比，正规模型具有以下两大优点：

第一，正规模型更明确，也更善于表达。系统动力学模型提出它对问题的假设，供人们评论、实验和再格式化¹⁾。然而一个思维模型却较为模糊而不明确。它的模糊不清来自于其丰富的直觉性，而这同时也决定了它的运用范围和适用性。有时，思维模型的不明确性却是误解、词不达意、误用的起因。

第二，正规模型更便于处理复杂问题。不同于思维模型，系统

1) 然而，在更深一点的程度，模拟方法学的普遍假设很少是明确的。系统动力学包括若干个关于人类系统结构的假设和研究特性的假设等等(此书不可能逐一讨论)。其它方法学通常有各自未经说明的长处。让引进者注意见Meadows(1980)。

动力学的计算机模型能可靠地追踪任何复杂的假定和相互作用的含义，而不受术语、情感或直观差异的阻碍。计算机模型之所以具有这两大优点，并不是因为计算机的灵活性而是因为从某种意义上来说计算机是愚蠢的：它们喜爱跟踪模型做那些泛味的重复运算，而且它们要求每一个模型都以计算机代码的形式清楚地表示出来。

通过运用适当的计算机模型进行实验，我们有可能获得解决或缩小复杂问题所必须的认识，这的确是有吸引力的。可是，正规模型在决策问题中的应用史并不给人以巨大的信心²⁾。计算机模型犹如孩子：多数人总是喜欢自己的模型。有些模型看上去要比它们的行为好得多，而且我们不得不承认它们行为不好的时候是可怕的。我们认为，在对反馈观念理解及应用的基础上，计算机模型设计、仿真和策略分析的潜力将得到很大的发挥。

1.2 反 馈 系 统

简而言之，反馈是信息的传送和返回³⁾。“反馈”一词的重点是在“返回”上。

一个取暖系统产生热量来温暖房间。屋内一个和它相联的恒温器将室温的信息返回给取暖系统，以控制此系统的开关，因此也控制了屋内的温度。恒温器是反馈装置。它和炉子、抽气机、散热器或管道一起组成了一个反馈系统。

仓存控制系统也是一个反馈系统。货运使仓存量减少。当仓存降低到低于某一期望值时，仓存部门的人员就向生产者订货，使仓存回升。因此，现有仓存多少的信息就得到了传送，先传送到定货部门，再到生产者那里，最后以入仓产品的形式返回。图1-1反映了这一简单的仓存订单系统的实质。

2) 概论，见Greenberger等(1976)。

3) Wiener(1961)，第96页。

当反馈系统用图(如图1-1)表示时,便形成了互连环,即因果环。撇开以上反馈定义中信息一词的隐含意义,我们非正式地定义:反馈环是一个封闭的因果序列,作用力与信息的闭路。一组互连的反馈环是一个反馈系统。生物、环境、工业、经济与社会的系统都是反馈系统,这已为越来越多的人所认识。要理解这些系统的动态行为,首先要肯定反馈的作用。

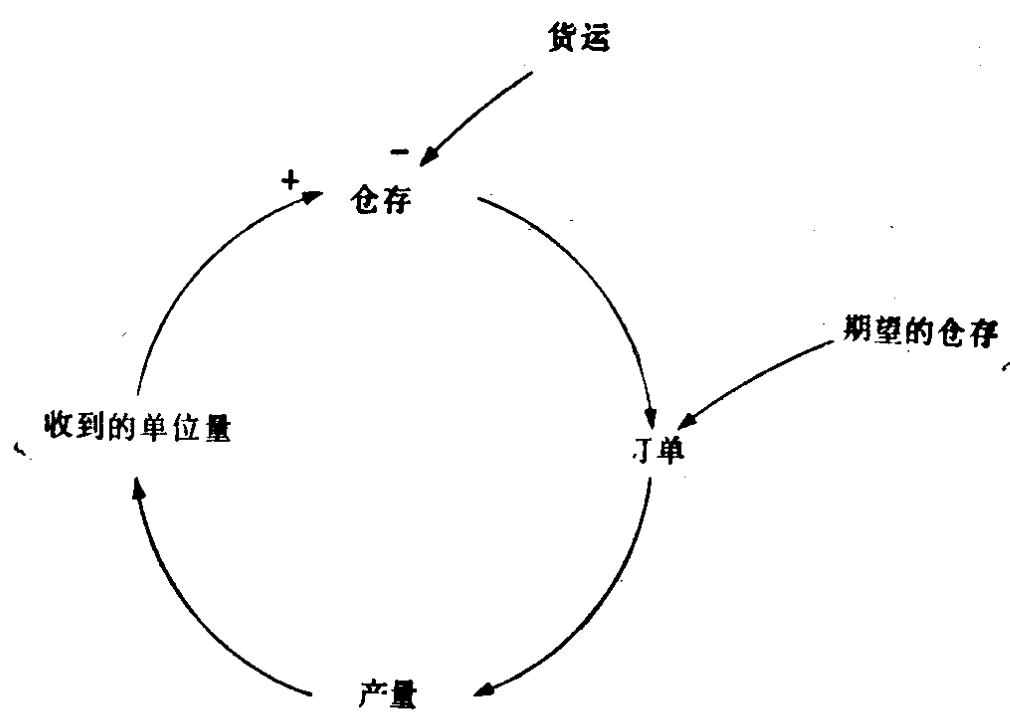


图1-1 一个简单的仓存反馈环

开环思维

不用反馈的概念来研究问题。往往称为开环思维⁴⁾。

发现一个问题后,我们通常总是先思考一番,确定一个处理问题的方案,然后按此方案行动,并认为解决问题的过程就此了结。这一模式很象图1-2中用实线箭头表示的问题——方案——行动的序列。这里忘记了一点:我们的行动会改变系统的状态(图1-2中用

4) 开环实际上是误称,因为所谓开环事实上就不成为环。但是,它却包含了正确的概念:缺少了一些东西。

虚线箭头表示)。因为，我们可能对问题会有更新的理解，作出新的定义或发现一些必须解决的新问题。

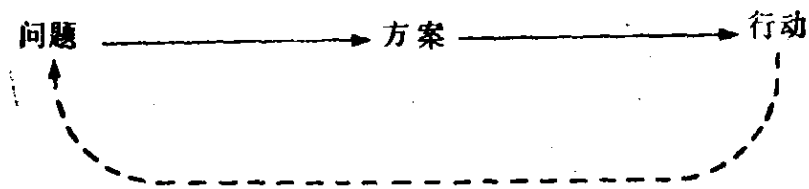


图1 2 开环法与反馈作解决问题的比较

反馈观点就是要使开环变成闭环。举个例子：经营公共娱乐场所例如国家公园、湖泊地区或者人们喜欢攀登的山脉，越来越多的人发现了在这些场所的野营、徒步旅行或游览的乐趣。因此，公园的经营管理面临了一个棘手的问题，这就是：既要保护和保持地区的自然景色，又要向游客开放。有人也许会用图 1-3 来描述此种情形。

图 1-3 表明拥挤是游览者与面积的函数，每一季节在某一交际场所的游客越多，该场所也就越拥挤。拥挤减少了地区荒芜的感觉，但同时又进一步破坏了环境。如乱扔果皮纸屑、砍树以及糟蹋侵蚀土壤。公园的经营管理可采取各种各样的措施，来抵销游客所带来的副作用：运走乱扔物，保留崎岖小道，分散拥挤的人群等等。

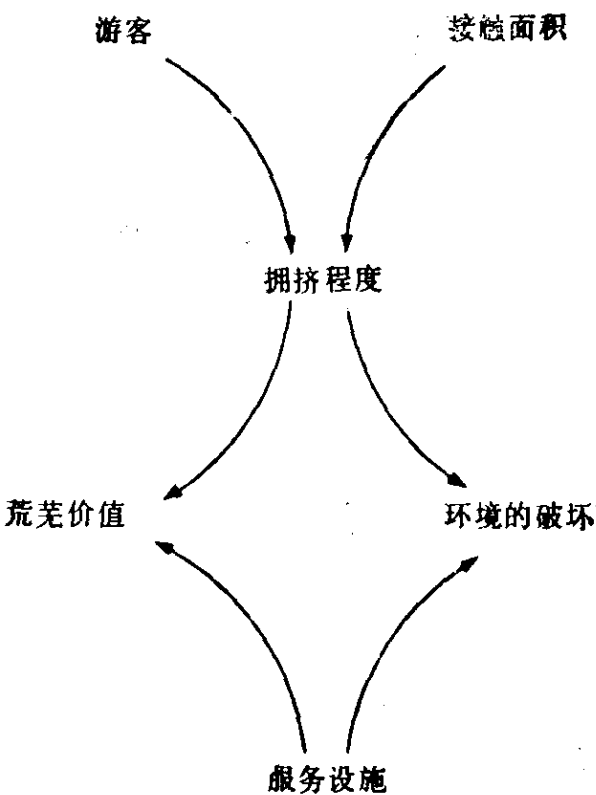


图1-3 公共娱乐场所中有关问题的开环图

图1-3(忽略了反馈观点的回环特性)中的开环表明，一个合理的减少环境破坏、保持游览地质量的经营决策就是，尽量扩大交际场

所并增加园内服务设施。如多开辟和开放游客稀少的小路，多建一些附有厕所和扔废物设备的野营场所，设立适当的宣传机构，如由有知识的管理人员负责的公园中心。

上述的一些决策是必要的，但是所引用的开环观点却是不适当的。因为它忽略了反馈的作用。如，荒芜价值的信息(反馈)对游客人数的增减有着很大的影响，见图1-4。

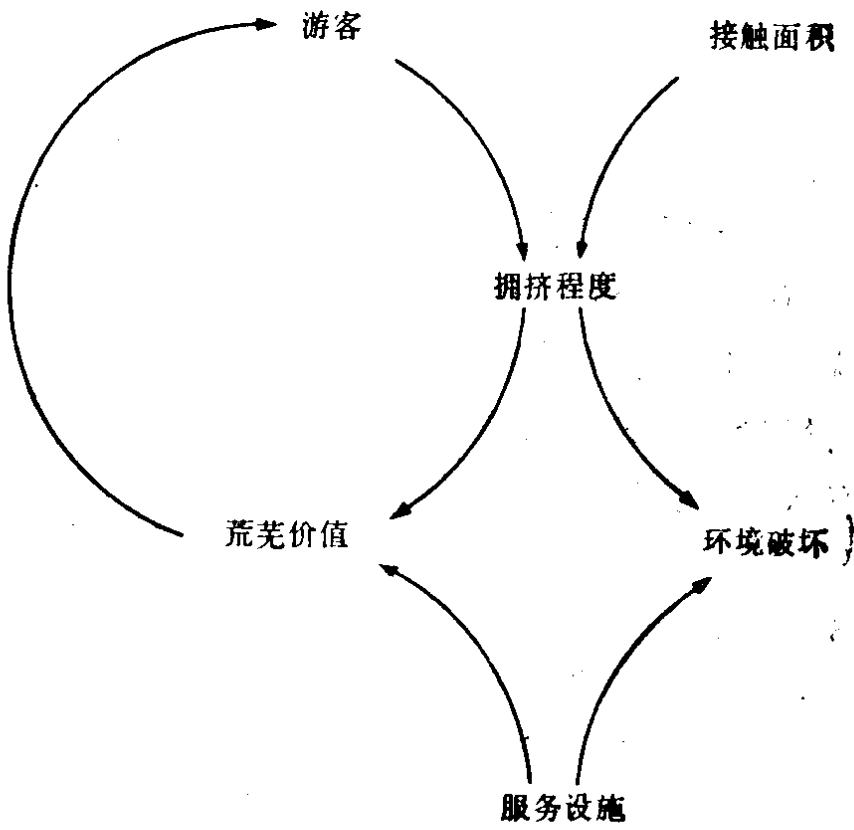


图1-4 公共娱乐场所系统中的反馈环

图中增加了从价值到游客的箭头连接，它代表关于该地区吸引力的一个假设：游客通过游览得到的价值越大，每年的游客就越多。这一系统中，还有其它类似的连接，但这一附加的作用就是用以说明开环观点的不足。现在，增加服务设施的结论就不那么明显了。因为增加服务设施就增加了游览价值，进而又增加了每年的游客数量。因而游览地更为拥挤，导致进一步破坏了环境，从而降低了游览的价值。由此可见，增添服务设施这一决策所带来的长远的影响