

智能机器人先进技术丛书

 Springer

自组织机器人

Self-organizing Robots

[日]村田 智 (Satoshi Murata)

[日]黑河 治久 (Haruhisa Kurokawa)

李 原 译

著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

智能机器人先进技术丛书

自组织机器人

Self-organizing Robots

[日]村田 智 (Satoshi Murata)

[日]黑河 治久 (Haruhisa Kurokawa)

著

李 原 译



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

自组织机器人 / (日) 村田智, (日) 黑河治久著; 李原译. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 4

书名原文: Self-organizing Robots

ISBN 978 - 7 - 5682 - 0408 - 8

I. ①自… II. ①村…②黑…③李… III. ①机器人 - 研究
IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 069297 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01 - 2013 - 3947 号

Translation from English language edition:
Self-Organizing Robots
by Satoshi Murata and Haruhisa Kurokawa
Copyright © 2012 Springer Japan
Springer Japan is a part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 14

字 数 / 222 千字

版 次 / 2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 72.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



英译本前言

机器人在应用领域范围上正经历一个重大的变革。机器人技术从主要集中在工业领域，迅速扩展到人类环境，并积极应对面临的新挑战。与人互动、协助人、服务人、与人一起探索，新兴的机器人将越来越多地接触人和人们的生活。

除了对实体机器人的影响外，机器人产生的知识体系正揭示一个更广泛的跨越不同研究领域和科学学科的应用范围，如生物力学、触觉、神经科学、虚拟仿真、动画、手术和传感器网络等。反过来，机器人技术在这些新兴领域的挑战被证明是丰富的启发源，有助于洞察理解机器人领域。这种学科交叉能够真正产生显著的科技进步。

Springer 先进机器人丛书 (The Springer Tracts in Advanced Robotics, STAR) 致力于为研究界带来机器人领域重要的、高质量的最新研究进展。通过对机器人关键研究进展广泛和及时的传播，本丛书的目的是促进领域研究者之间更多的交流和合作，为这个快速增长领域的进一步发展做出贡献。

这本书是从日本近期出版的 Satoshi Murata 和 Haruhisa Kurokawa 的自组织机械系统一书英译过来的。这是一个相对较新的研究领域，研究集中在机器人和机器人系统的实现，生成具有一定的结构和功能的系统；这种系统真正能够适应突发情况，并且当出现误用或破坏时，能够自我重组。本书对研究自治分布式系统、模块化设计和生物启发机器人领域的学者具有参考价值。

这本书具有丰富的例子和研究案例，深入讨论自组织机械系统实现和器件的各种问题，旨在为下一代机器人设计师提出启发，是 Springer 先进机器人丛书一个很好的补充。

Bruno Siciliano
Springer 先进机器人丛书编辑

那不勒斯，意大利
2011 年 8 月



序*

自组织的概念最近已经被用于各种领域。它是指像生物有机体那样，一个实体产生自己的组织或结构的现象。例如，种子撒在土地里将会发芽长叶，然后开花，形成果实，最后繁育出种子。只要简单地把种子撒在地里，这些事情可以自然而然地发生，而无须任何外界的引导。这是一个多么有趣和迷人的过程！那么，换成机器的情况是怎样的呢？从来没有一个机器是由一个种子自己发育起来的。机器是使用外部的力量由许多零件在工厂中构造而成的。对装配的每一步都有从外部给定的指令。总之，机器都制成具有一定的结构。

如今，我们的日常生活中需要的机器变得越来越复杂。掌握这些机器的每一个细节和每一个工作机制变得更加困难。此外，当这些机器发生故障时，或是运行在意外的方式下，机器的行为可能变得不可预测或者实际上完全失效。在这种情况下，人们可能会希望机器能通过重组本身以某种方式适应情况。这就是自组织机械系统概念的由来。这意味着转变，由具有一定结构和功能的机器，变成那些以期望的方式进行重组的机器。

工程师们向生物学习可以追溯到很久以前。莱昂纳多·达·芬奇绘制飞行机器表明，生物力学与仿生学的起源至少可以追溯到那个时候。然而，为了创造一个具有适当组织结构的机器，仅仅复制生物的外观或表面的机制是不够的。有必要了解使生物有机体具有生理功能的背后机制。本书的主题是探讨在当前机械工程的技术条件下，建立这样人工系统的可行性，即本书的标题——自组织机器人。我们必须考虑如何构建这样的机器人，并为它们找到可能的应用。机器人学一般有很多不同的方面，如动力学、制造、控制、电子和软件实现。在本书中，除了这些内容外，机器人

* 本书是2009年日本Ohmsha出版《Jiko - soshiki kikai sisutemu no sekkeiron (自组织机械系统设计)》一书的英译本。本书的翻译和出版得到了日本文部科学省 (MEXT) 科研成果出版资助项目资助 (No. 226006)。



被看作是一个自主分布式系统。根据这样的观点，对创造具有自组织能力的机器人所需要考虑的问题进行了详细的讨论。

本书的章节大纲如下：第1章描述了自组织机械系统设计理念。这部分的讨论看起来有点抽象，但是它包含了对自主分布式系统概念的简单介绍，形成了自组织概念和自组织机械系统的基础。第2章考虑了一些在生物系统中不同层次的自组织的例子，这是我们设计自组织机器人和机器人灵感的来源。第3章回顾了自组织机械系统相关研究的历史。我们没有提供完整的研究历史，而是选择了几个适合把握本领域主流研究的主题进行介绍。第4章解释了一些必要的数学方法作为理解自组织现象的理论背景。第5章通过介绍我们自己的研究成果，一个能够自我组装和自我修理的实际的机器人，展示了构建自组织机器人的可行性。第6章讨论了被称为模块化机器人的自组织机器人实例，并给出了几个案例研究。读者将看到基于许多不同方法开发的各种各样的机器人。第7章和第8章主要阐释目前最先进的自组织机器人 M-TRAN，它可以创建自己的形状和创造机器人运动。第9章讨论自组织机器人实现和器件的各种问题，提出解决问题的思路。第10章展望自组织机器人的未来，尤其是分子水平的自组织机器人。*

阅读本书并不需要高深的数学知识，具有大学生理科知识就够了。本书假定读者是当前机器人相关学科的学生，包括机械、控制、电子、计算机科学，以及希望探索机器人技术领域研究人员，或是对自组织现象有兴趣应用的其他领域工作者。

本书可以用不同的方式阅读：希望学习基本概念的读者应该从第1章开始阅读。那些不关心哲学观点，而对自组织机械系统和机器人的基本原理感兴趣的读者，可以从第5章开始，然后继续读第6章，进而能够把握这方面的发展趋势和当前的研究活动。对实际机器人开发感兴趣的读者推荐阅读第7~9章，如果读者遇到不熟悉的数学问题可以参考第4章。

这里，我们想解释一下本书的背景。本书作者曾任日本通商产业省前工业技术研究院机械工程实验室（MEL）研究人员（Kurokawa 目前任职于日本国立产业技术综合研究所，MEL 也合并到该机构中；而 Murata 现在在东北大学任职）。自20世纪80年代初，MEL 设立了研究容错问题的研究组。小组成员包括 Kurokawa, Toshio Fukuda（现在名古屋大学**），以及 Shigeru

* 本书的额外补充材料，如实验视频，可在 Web 页面找到。这些材料可以通过访问网址 <http://extras.springer.com/> 和搜索本书的 ISBN 查到（请务必输入完整的 ISBN 号，包括连字符）。

** Toshio Fukuda 现任北京理工大学千人计划教授（译者注）。

Kokaji, 他实质上领导了本书中所讨论的所有研究工作。这个研究组是日本自组织机器人的发源地之一, 标志成果就是几年后 Fukuda 开创性的自组织机器人 CEBOT。1987 年当 Murata 加入 MEL 时, Kokaji 刚刚完成了他的创新型分布式机器, 称为 Fractal 机。当时, Kokaji 正从事构建并行计算机, 并完全由自己装配了由 64 个微处理器组成的并行计算机系统。这台计算机给 Kokaji 启发了 Fractal 机思想。这个机器是一个完全基于分布式原理的系统, 在许多方面提供了用于后续研究的模型。

在接下来的几年中, Kokaji 成立并领导了协同论研究组。该研究组最终被认为是 MEL 官方研究组之一。一些新成员, Kohji Tomita、Eiichi Yoshida 和 Akiya Kamimura 相继加入该研究组。作者想强调的是, 本书中的很多成果是我们组的成员所取得的。

作者收到了很多组外人员的帮助, 包括已故的东京都市大学 Kazuo Tanie, 名古屋大学 Toshio Fukuda, 他们给予我们鼓励, 提出了宝贵的意见。我们感谢立命馆大学的 Kohji Ito, 作者得以和各位研究人员进行交流, 包括东京大学已故的 Hideo Yuasa, 理化学研究所 Kazuo Hosokawa 和东北大学 Akio Ishiguro。

我们也要感谢国外的同事, 包括约翰霍普金斯大学 Gregory Chirikjian, 麻省理工学院 Daniela Rus。作者也开展了包括研究生交流在内的各种极具建设性的合作研究工作, 合作伙伴有丹麦技术大学 Henrik Lund, 苏黎世大学 Rolf Pfeifer, 南加州大学 Wei - Min Shen, 宾夕法尼亚大学 Mark Yim。在本书中出现的很多照片和图表由这些学者提供, 感谢他们的慷慨相助。

作者非常感谢 Ohmsha 出版社的 Motoko Takenishi 帮我们写这本书的日文版, 感谢 Kazuhiko Ogawa 和他的同事们在 NBT 公司为本书完成翻译工作。如果没有他们的帮助, 这本书是不可能完成的。

本书中的研究工作一直得到各种基金资助, 包括机械工程实验室专项经费, 前工业技术研究院基础研究资助, NEDO 机器人发展计划, 文部科学省科研补贴资金。作者希望借此机会向所有的资助表示感谢。

最后, 作者衷心希望这本书能够帮助学生和研究人员了解自组织机器人的思维方式, 并希望有些读者会受此激励创造下一代这类机械系统。

[日] 村田 智 (Satoshi Murata)

[日] 黑河 治久 (Haruhisa Kurokawa)

2011 年 7 月



目 录

第 1 章 自组织设计	1
1.1 还原法设计及其局限	1
1.1.1 机械系统的部件	2
1.1.2 机械系统的还原设计理论	2
1.1.3 建模和优化	4
1.1.4 还原设计的问题	5
1.2 分布自主系统和自组织	6
1.2.1 从还原论到自组织	6
1.2.2 分布自主系统和自组织设计理论	7
1.2.3 自组织设计机械系统的优点	10
1.3 自组织机械系统的类型	13
1.3.1 系统及其部件	13
1.3.2 部件数量复杂性和连接复杂性	14
参考文献	16
第 2 章 生物系统的自组织	18
2.1 生物系统中的层级结构	18
2.2 核酸: 杂交双螺旋形态	20
2.3 蛋白质折叠问题	21
2.4 中心法则	22
2.5 生物的发育: 细胞水平的装配	23
2.6 生物自修复	26
2.6.1 重构	27
2.6.2 生理性再生	27
2.6.3 补偿性再生	27
2.6.4 伤口愈合	27
2.6.5 真正的再生	27



2 自组织机器人

2.7 一组个体的自组织	29
2.7.1 细胞黏菌	29
2.7.2 社会性昆虫	29
2.7.3 动物的种群	29
参考文献	30
第3章 自组织机的历史	31
3.1 冯·诺依曼的工作	31
3.1.1 冯·诺依曼的两个问题	32
3.1.2 冯·诺依曼自复制自动机	33
3.1.3 通用的自动机：动力学模型	34
3.1.4 通用的自动机：细胞模型	36
3.2 Penrose 的研究	38
3.3 自我繁殖的数学模型	41
3.3.1 Langton 的自复制环	41
3.3.2 图自动机	42
3.4 自复制的物理模型	43
3.4.1 Hosokawa 的磁系统	44
3.4.2 Klavins 机电自装配系统	45
3.4.3 Griffith 自繁殖系统	47
参考文献	48
第4章 数学基础和分布式算法	50
4.1 分布系统和部件	50
4.2 扩散	52
4.2.1 扩散方程	52
4.2.2 梯度场	53
4.2.3 反应扩散系统的模式形式	54
4.3 细胞自动机	58
4.3.1 扩散区	58
4.3.2 流场	59
4.3.3 生命的博弈	60
4.4 分布式算法	61
4.4.1 首领的选举	61
4.4.2 生成树构建问题	62
4.4.3 排他控制	63

4.4.4 死锁	63
4.4.5 可靠性	63
参考文献	64
第5章 人工自组装和自修复	65
5.1 自组装与自修复方法：同质系统方法	65
5.2 二维单元硬件	67
5.3 自组装算法的前提条件	70
5.3.1 单元标识号	70
5.3.2 通信的方法和范围	70
5.3.3 时空对称性破坏	71
5.4 自组装算法 I	72
5.4.1 目标配置描述	72
5.4.2 自组装策略	74
5.4.3 仿真和实验	77
5.5 分段自组装和自修复算法 II	78
5.5.1 逻辑类型和描述矩阵	79
5.5.2 洋葱方法	81
5.5.3 自组装仿真（算法 II）	82
5.5.4 自修复仿真（算法 II）	83
5.6 细胞自动机模型	85
参考文献	86
第6章 自组织机器人原型	87
6.1 模块机器人类型	87
6.2 格型和链型	88
6.3 格型机器人模块硬件设计的约束条件	89
6.3.1 有限的设计空间	89
6.3.2 对称性	90
6.3.3 运动自由度	90
6.3.4 连接器（连接机构）	91
6.3.5 驱动器	92
6.4 模块机器人原型	92
6.4.1 CEBOT	92
6.4.2 桁架式：Fractal 机器	94
6.4.3 桁架式：TETROBOT	95

6.4.4	晶格类型：变形机器人	95
6.4.5	格型：晶格	96
6.4.6	格型：微模块	96
6.4.7	格型：CHOBIE	98
6.4.8	格型：三维通用连接系统	98
6.4.9	格型：Molecule	100
6.4.10	格型：ATRON	100
6.4.11	格型：Molecube	101
6.4.12	链型：PolyPod 和 PolyBot	102
6.4.13	链型：CONRO 和 SuperBot	104
6.4.14	格型：Catom	104
6.4.15	无定形型：SlimeBot	105
6.5	格型和链型混合类型	106
	参考文献	107
第7章	机器人形态变化	109
7.1	系统设计	109
7.1.1	M-TRAN 模式	109
7.1.2	基本运动	112
7.1.3	极性	114
7.1.4	通用装配和自重构	115
7.2	变形过程规划	116
7.2.1	变形过程搜索	116
7.2.2	移动机器人结构配置之间的变形	118
7.3	分布式变形	120
7.3.1	分布式系统及分组	120
7.3.2	元模块仿真虚拟模块	122
7.3.3	规则结构	124
7.3.4	平面规则结构的运动	128
7.3.5	细胞自动机模型的分布式变形	133
7.4	各种变形	137
7.4.1	从规则结构生成机器人	138
7.4.2	对接与融合	138
7.4.3	自我复制	140
7.5	M-TRAN 群体	141

参考文献	141
第8章 自组织运动	144
8.1 机器人运动控制	144
8.1.1 机械手的末端控制	144
8.1.2 腿式步行机器人	146
8.1.3 整个身体的运动	149
8.1.4 运动控制系统的设计	153
8.1.5 模块化机器人分布式运动控制	154
8.2 耦合振荡器	154
8.2.1 扩散同步	154
8.2.2 夹带	157
8.2.3 如何引入相位偏移	160
8.3 利用耦合振荡器的运动控制	162
8.3.1 物理系统的连接	162
8.3.2 全局夹带	163
8.3.3 神经振荡器	164
8.4 遗传算法	165
8.5 运动控制的机器人 M-TRAN	167
8.5.1 CPG 控制系统	167
8.5.2 适应度和动力学仿真	168
8.5.3 GA 优化	169
8.5.4 优化结果和再现实验	170
8.5.5 CPG 实时控制	172
8.5.6 CPG 控制问题	174
8.6 评论	175
参考文献	175
第9章 硬件和软件	178
9.1 硬件	178
9.1.1 结构与机制	180
9.1.2 连接机构	181
9.1.3 电路	184
9.1.4 可选模块	188
9.2 软件	188
9.2.1 M-TRAN 模拟	188

9.2.2 板载程序	190
9.2.3 程序集中变形	190
9.2.4 程序分布式变形	194
9.3 误差与可靠性	194
9.3.1 尺寸误差	194
9.3.2 构造变形	195
9.3.3 错误处理	195
参考文献	196
第10章 自组织机器人的未来	197
10.1 自组织机器人面临的挑战	197
10.1.1 模块尺寸	197
10.1.2 模块的数量	198
10.1.3 自配置和自组装之间的选择	198
10.2 从机电一体化到分子机器	199
10.2.1 基于DNA纳米技术的分子机器	199
10.2.2 DNA纳米结构的自组装	200
10.2.3 DNA逻辑门	202
10.2.4 DNA传感器和DNA执行器	203
10.3 纳米技术的分子机器人	204
10.4 层级的出现：终极问题	206
参考文献	206

第1章 自组织设计

摘要：设计机械系统时，人们经常采用还原法进行设计。还原法是一种简单而有效的方法，这种方法是基于所要求的功能和系统必要的部件之间一一对应来实现的。而且，还原法和集中控制的概念很自然地彼此适合，因为在集中控制系统中可以清晰地看到系统的功能和部件。本书的主题是与还原法设计相对的自组织设计理论。在进行自组织设计时，不是将系统功能直接分配给部件，而是设定部件之间的关系，使得部件本身能够组织出整个结构，从而实现整体系统功能。通过这种方式构建出来的系统没有中心部件，而是分散的、分布式结构。尽管用这种方法构建系统看起来是一种迂回的方式，但是这是超越还原法设计极限的关键，因为还原法设计在满足不断增加的系统复杂性和规模时越来越困难。工程是一种研究创造有用东西的方法的学科，自组织设计理论正是试图建立一种创造这类方法的新的概念基础。

1.1 还原法设计及其局限

系统方法学不仅是对机械系统，还是对大型复杂人工制品进行构造的基础^[1]。这类方法学中最普通的是基于一般科学方法的笛卡儿还原法，该方法主张人们可以通过分解的方法理解一个复杂对象；将复杂对象分解成不可再分的部件，这些部件简单到不可再分，并可以被很好地理解，然后将这些部件装配成一个整体。当然，效仿某些对象（这里我们称之为系统）的功能设计一个人工制品，包括决定怎样构建它，然后简单地进行分解，这样做是不够的。如果系统所要求的功能是简单的，通常存在显而易见的解决方案，可以将几个很好理解的部件合并构建系统。但是，当要求的功能复杂时，则所需要部件的数量和类型是不明晰的。在后一种情形中，必须将所要求的功能进行分解或者缩减成可以通过简单部件直接实现的功能。一旦必要的部件确定下来，就可以把它们装配成一个预期的系统。如果合成的系统不满足要求，则原因可能在于分解方法有误或合成装配方法有误。在这两种情况下，均需要做出调整，然后重新开始。简而言

之，设计一个系统的过程就是在分解与装配两个相反的任务中反复探索，找到构建系统的方法。我们称之为“还原设计”方法学。

1.1.1 机械系统的部件

在本书中，我们将机械系统定义为“一个物理部件的集合，物理部件通过外部或内置的能量源驱动，部件之间有机械相互作用、相互通信，或者两种作用兼而有之，导致部件之间相对运动以及内部状态的改变”。

既然机械系统的部件是具体的物理部件，一个系统只能包含有限数量、特定尺寸的部件，因此整个系统是有限维数的。系统的内部和外部两者之间存在区别。系统的外部称为环境，指的是系统的周围事物，有时包括人和其他机械系统。

机械系统的部件不仅包括典型的机械零件，例如齿轮和螺栓，还包括电气部件，如三极管、电线和电动机，甚至处理信息的微处理器。每一个部件必须有清晰的显式定义或由输入输出对应关系给出的隐式定义，一个特定的输入（一个部件被另一个部件或环境所激励的作用量）导致特定的输出（对其他部件或环境产生的作用量）。

机械系统的部件可以分成以下 5 类：

- （1）结构部件：类似于机架或容器，规定系统的结构和形状。
- （2）传感器：可以检测系统外部（环境）的状态，把检测量转化成信息，并传递到系统中的其他部件。它们可以接收从其他系统的信息生成部件传来的信号。
- （3）执行器：接收其他部件的信息并根据这些信息直接作用于外部环境。执行器包括产生力和运动、发射声光、产生热和化学物质等的部件。
- （4）信息处理部件：从传感器和其他信息处理部件接收信号，执行某种计算任务。一些信息处理部件包含用于计算的内部状态（存储器）。
- （5）能量源：执行器所需的能量源。

机械系统由以上 5 类部件以某种方式连接而成，设计机械系统的主要问题是选择适当的部件和规定其连接方式。

1.1.2 机械系统的还原设计理论

设计是一个创造新东西的过程，因此，设计的出发点一定是为什么需要创造一个新东西的问题。如果一个人不清楚设计的目的，他就不能做出好的设计。另一方面，如果设计目的是清楚的和有价值的，很多人就会参与其中，结果会做出优秀的工作。接下来我们将给出一个设计过程的

概述。

设计一个物体或系统的最初想法对如何实现这一问题提供了模糊的前景。基于这个前景，设计过程开始了。首先，决定系统的整体特性和期望的功能，这将决定你想达成的目标。接下来，你必须整合构建计划。对构建进行仿真，检查构建的结果。如果结果令人满意，则开始实际制造过程。最后，检查实际产生的结果是否满足目标标准（图 1.1）。

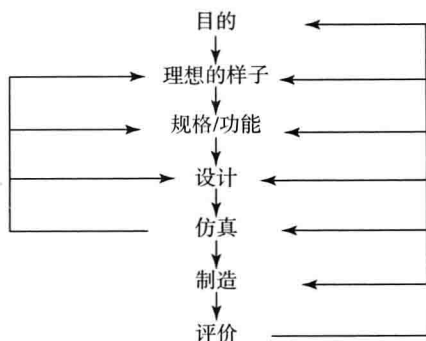


图 1.1 人工创造的过程

实际上，在第一次尝试中，产品很少能够完美地满足所要求的特性，这意味着整体或部分设计过程需要调整。通过几次这样的循环过程，设计变得越来越精细。有时为了修改原始系统的特性，可能会返回到设计的出发点。

接下来，我们的重点是在生产之前的“设计”阶段。这个阶段可划分成以下 3 个步骤：

- (1) 概念设计，决定系统的整体特性。
- (2) 初始设计，决定实现所要求特性的系统的基本结构和形状。
- (3) 细节设计，决定尺寸、形状和所有部分的材料。

通过这样的方式，可以决定系统的属性和结构，从抽象到具体，从整体到部分（图 1.2）。

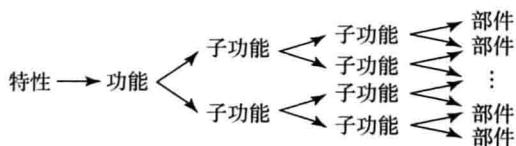


图 1.2 还原设计（箭头表示分解，反方向表示综合）

当然，把设计的过程思考成将系统要求的特性还原（分解）成组成部



件的功能，这样有些过于简单。第一步是在尽可能充分考虑哪些部件是必要的情况下把系统分解成各部分，下一步是将这些部分组合成一个系统。不同的方法组合这些部件可实现相同的功能；不同的方法组合部件也可能表现出功能上的差异。因此，即使部件被组装之后，仍然需要评估系统是否达到了预期的功能。这种评估涉及复杂的系统分析，在这方面，一些一般的科学方法，如还原方法是适用的。如果系统没有表现出期望的功能，表明系统部件组合过程存在问题，必须进行修改，重新进行评估和分析。我们称这个方法为还原设计（尽管通常被称为设计的方法几乎都是基于这一方法，在本书中，我们明确地使用这个术语与本书后面介绍的自组织概念进行对比）。

还原设计的一个重要原则是实现功能和部件一一对应的关系。换句话说，一个特定的部件实现一个特定的功能，并没有其他功能取决于该部件。如果一个部件被用于不同功能，在设计中该部件功能的任何改变将在系统中产生不良的影响。成功的还原设计的关键是使一个部件只有一个单一的功能，如果这一点能够满足，那么确定部件的装配将自动确定整个系统的功能。

1.1.3 建模和优化

将设计问题分割成若干子问题具有较大的好处，过去和现在的大多数人工复杂系统已经通过这种还原设计方法得以实现。但是，分割一个问题可能会导致其他方面的问题，如保持不同功能之间的平衡。

对于满足要求的特性的系统配置是没有限制的，人们必须在可能的配置中选择相对于特定的标准（评价标准）看起来较好的一个。简单地说，确定系统的配置有两个阶段：第一阶段是构建系统架构，也称为设计模型，这部分确定该模型部件的连接方式或相对位置（拓扑）；第二阶段是确定该模型参数的值（也称为模型的设计变量）。

因此，解决一个设计问题涉及确定一个设计模型，然后按照给定的评价标准确定最优设计变量。例如，在设计行进在地面上的车辆的案例中，首先要决定使用哪种设计模型；车辆是否会设计成像一匹马一样具有四条腿，或像昆虫有六条腿，或是带轮子的机器。（请注意，设计模型不能通过还原方法确定；无法通过将目标功能分解成子功能来找到设计模型。）

优化设计变量的过程如下：首先，建立一个模型（描述性模型），对系统是否满足评价标准进行定量评价。各种类型的描述性模型都可以使用，例如，一个运动方程的数学公式，描述状态转换和输入-输出关系的