

WILEY

# Introduction to Evolvable Hardware:

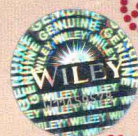
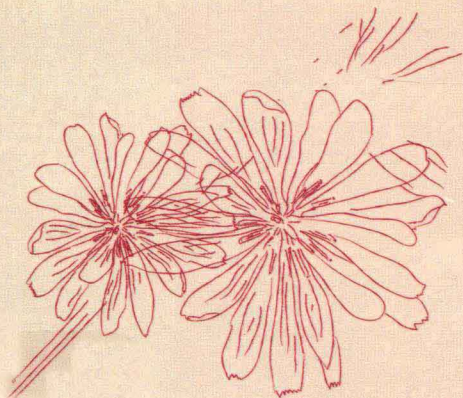
A Practical Guide for Designing Self-Adaptive Systems

# 演化硬件导论—— 自适应系统设计实践指南

Garrison W. Greenwood, Andrew M. Tyrrell

【美】加里森·格林伍德 【英】安德鲁·泰瑞尔 著

李杰 辛明瑞 译



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

# 演化硬件导论

——自适应系统设计实践指南

*Introduction to Evolvable Hardware: A Practical  
Guide for Designing Adaptive Systems*

[美] 加里森·格林伍德

[英] 安德鲁·泰瑞尔 著

李杰 辛明瑞 译



西安电子科技大学出版社

策 划 高 樱

责任编辑 张 玮 高 樱

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 [www.xduph.com](http://www.xduph.com) 电子邮箱 [xdupfxb001@163.com](mailto:xdupfxb001@163.com)

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 9.5

字 数 208 千字

印 数 1~3000 册

定 价 25.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3085 - 4/TP

**XDUP 3377001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

---

# INTRODUCTION TO EVOLVABLE HARDWARE

## A Practical Guide for Designing Self-Adaptive Systems

---

**GARRISON W. GREENWOOD**

Portland State University

**ANDREW M. TYRRELL**

University of York

IEEE Computational Intelligence Society, *Sponsor*



IEEE Press Series on Computational Intelligence  
David B. Fogel, *Series Editor*



**IEEE**

IEEE PRESS



**WILEY-  
INTERSCIENCE**

A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION

IEEE Press  
445 Hoes Lane  
Piscataway, NJ 08854

IEEE Press Editorial Board

Mohamed E. El-Hawary, Editor in Chief

J. B. Anderson

S.V. Kartalopoulos

N. Schulz

R. J. Baker

M. Montrose

C. Singh

T. G. Croda

M. S. Newman

G. Zobrist

R. J. Herrick

F. M. B. Pereira

Kenneth Moore, Director of IEEE Book and Information Services (BIS)

Catherine Faduska, Senior Acquisitions Editor, IEEE Press

Jeanne Audino, Project Editor, IEEE Press

IEEE Computational Intelligence Society, Sponsor

IEEE CI-S Liaison to IEEE Press, David B. Fogel

Technical Reviewers

Hugo de Garis, Utah State University

Jason Lohn, NASA Ames Research Center

Xin Yao, The University of Birmingham, UK

Ricardo S. Zebulum, Jet Propulsion Laboratory

Books in the IEEE Press Series on Computational Intelligence

Computational Intelligence: The Experts Speak

Edited by David B. Fogel and Charles J. Robinson

2003 0-471-27454-2

Handbook of Learning and Approximate Dynamic Programming

Edited by Jennie Si, Andrew G. Barto, Warren B. Powell, Donald Wunsch II

2004 0-471-66054-X

Computationally Intelligent Hybrid Systems

Edited by Seppo J. Ovaska

2005 0-471-47668-4

Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of

Machine Intelligence, Third Edition

David B. Fogel

2006 0-471-66951-2

Emergent Information Technologies and Enabling Policies for Counter-Terrorism

Edited by Robert L. Popp and John Yen

2006 0-471-77615-7

Copyright c\_2007 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers. All rights reserved.

Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Published simultaneously in Canada.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, scanning, or otherwise, except as permitted under Section 107 or 108 of the 1976 United States Copyright Act, without either the prior written permission of the Publisher, or authorization through payment of the appropriate per-copy fee to the Copyright Clearance Center, Inc., 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, (978) 750-8400, fax (978) 750-4470, or on the web at [www.copyright.com](http://www.copyright.com). Requests to the Publisher for permission should be addressed to the Permissions Department, John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, (201) 748-6011, fax (201) 748-6008, or online at

<http://www.wiley.com/go/permission>.

**Limit of Liability/Disclaimer of Warranty:** While the publisher and author have used their best efforts in preparing this book, they make no representations or warranties with respect to the accuracy or completeness of the contents of this book and specifically disclaim any implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose. No warranty may be created or extended by sales representatives or written sales materials. The advice and strategies contained herein may not be suitable for your situation. You should consult with a professional where appropriate. Neither the publisher nor author shall be liable for any loss of profit or any other commercial damages, including but not limited to special, incidental, consequential, or other damages.

For general information on our other products and services or for technical support, please contact our Customer Care Department within the United States at (800) 762-2974, outside the United States at (317) 572-3993 or fax (317) 572-4002.

Wiley also publishes its books in a variety of electronic formats. Some content that appears in print may not be available in electronic formats. For more information about Wiley products, visit our web site at [www.wiley.com](http://www.wiley.com).

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data is available.

ISBN-13: 978-0-471-71977-9

ISBN-10: 0-471-71977-3

## **ACKNOWLEDGMENTS**

The authors wish to thank the following people for their help, whether implicitly or explicitly, in the production of this book: Cesar Orega, Gordon Hollingworth, Renato Krohling, Will Barker, Crispin Cooper, Andy Greensted, Mic Lones, Alex Jackson, Richard Canham, Steve Smith, Gianluca Tempesti, Julian Miller, Yann Thoma, Manuel Moreno, Daniel Mange, Adrian Stoica, Ricardo Zebulum, David Fogel, Karlheinz Meier and Joerg Langeheine. A particular thanks goes to Hugo de Garis, for his thorough review of the first draft of this book, and to Paul Garner, for his patience with the numerous changes to the figures!

A. M. T

G. W. G

# 译者序

演化硬件是指在生物个体生长、发育、繁殖以及群体进化等自然现象的启发下发展起来的，通过与环境的交互作用，可以自主地、动态地改变自身结构和调整自身行为，具有自组织、自适应等特性的硬件。这是近年来兴起的结合了演化计算、电子及电路设计、芯片技术等多个领域技术的一门交叉学科。理想中的可演化硬件系统拥有类似生物体的适应环境、自组织、自我修复等能力，而这些能力可以使可演化硬件系统具备较强的容错性和鲁棒性，使之可以超越传统方法设计的硬件系统，应用于更为广阔的邻域，对于航空、航天以及海洋工程等特殊领域的电子设备及系统具有重大实用价值。

本书的翻译动机很简单：国内已陆续有多部关于仿生系统、演化算法等方面的学术论著问世，但关于演化硬件技术的书籍目前还未见出版，相关资料散布于各类学术会议论文集和期刊中。这不利于初学者尽快了解演化硬件这个领域的全貌和确定重点研究方向。因此，当译者第一次看到此书时，就有了要将它介绍给国内读者的想法。

本书按英文版第一版翻译，该英文版属 David B. Fogel 主编的 IEEE 智能计算系列丛书，由 Wiley 公司出版。书中内容丰富，覆盖面广，既有对演化算法的理论介绍，又有演化硬件应用实现的具体细节，没有复杂的数学推导和证明，便于读者较好地阅读和理解该书的内容。

感谢我的导师黄士坦先生，百忙之中对手稿进行校对和指导。同时也感谢西安电子科技大学出版社对翻译工作的帮助和支持。

由于我们的水平有限，翻译中的不足在所难免，请读者批评指正。

译者

2013年4月于山东航天电子技术研究所



# 原文序

电子系统和计算机系统的复杂程度在不断上升，其上升速度之快，让人不禁对设计者们能否轻松应对这样的局面产生疑虑。系统复杂程度的提高，让我们能够制造出对人们生活产生深远影响的工程产品，如飞机、汽车、手机、互联网、“智能”家庭等。不过，复杂程度的提升对设计和管理这些系统具有显而易见的负面影响。但与此形成对照的是，生物系统的复杂程度比我们当前所能制造出来的任何产品的复杂程度都要高出几个数量级。此外，随着复杂程度的提高，故障和错误发生的概率也在增大。对于无人控制系统，如卫星、深海探测器或太空飞船，故障和错误的会发生会破坏这些系统功能的有效性，使之变得毫无用处。是否存在着其他方式来制造现有的和未来的复杂工程系统呢？

演化硬件(Evolvable Hardware, EHW)是一个综合了可重构硬件、人工智能、容错和自主处理等多方面技术的活跃领域。演化硬件使用模拟的演化过程来搜索新的硬件配置；演化过程可以通过不同的复杂的搜索算法来实现，如遗传算法、演化规划或演化策略等；演化硬件则在可重构器件上实现，如现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Arrays, FPGAs)、现场可编程模拟阵列(Field Programmable Analog Arrays, FPAAs)、现场可编程晶体管阵列(Field Programmable Transistor Arrays, FPTAs)。这些器件都可通过配置信息流来确定它自身的内部结构(同时还有功能)。演化的目的就是为应用指定搜索性能最佳的电路。

演化硬件技术目前已在系统设计和在线自适应两个方面进行了成功的探索，其后续可能的应用领域引起了人们极大的兴趣。演化硬件技术使系统具有能够自主适应故障和工作环境出现不确定性变化的能力。这种能力引起了 NASA 和军事部门的关注，因为能够在恶劣环境下工作和具有高可靠性是这些部门对产品的基本要求。也正是因为这个原因，本书特别强调在容错应用中使用演化硬件技术。

本书为进行自适应系统和高可靠系统设计的研究人员、工程师、设计师和管理人员等提供有关演化硬件这一不断成长的领域的综合信息。通过本书，读者将了解到演

化硬件的基础术语及基本原则；了解进行模拟演化所需的可重构硬件及相关算法，演化硬件系统集成概念，包括实时系统和容错原则的背景知识等。本书还通过多个实际例子(包括数字电路和模拟电路)来阐述这些基本概念，同时突出强调演化硬件的强大能力及其多面性。

本书的写作目的，是将散布于各类学术期刊、会议论文集集中的演化硬件技术相关文献的主要观点收集并综合到一本书内，以便于读者能在短时间内了解和学到如何使用演化硬件技术。

G. W. Greenwood

A. M. Tyrrell

## 本书部分缩略词

ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CLB	Configurable Logic Block
CPLD	Complex Programmable Logic Device
COTS	Commercial-Off-The-Shelf
CGP	Cartesian Genetic Programming
DFT	Design-For-Test
EA	Evolutionary Algorithm
EDA	Electronic Design Automation
EHW	Evolvable Hardware
FPAA	Field Programmable Analog Array
FPGA	Field Programmable Gate Array
FPTA	Field Programmable Transistor Array
FSM	Finite State Machine
HDL	Hardware Description Language
OTP	One Time Programmable
PLD	Programmable Logic Device

# 目 录

<b>第一章 引言</b> .....	1
1.1 演化电路和系统的特点 .....	1
1.2 演化硬件的优势 .....	3
1.3 电子技术基础 .....	5
1.4 演化硬件与演化形成的硬件 .....	6
1.5 内部演化与外部演化 .....	8
1.6 在线演化与离线演化 .....	8
1.7 演化硬件的应用 .....	9
<b>第二章 演化算法的基础</b> .....	12
2.1 演化算法的概念 .....	12
2.2 演化算法的组成 .....	12
2.2.1 表达方式 .....	12
2.2.2 变化算子 .....	14
2.2.3 评估 .....	16
2.2.4 选择 .....	19
2.2.5 种群 .....	20
2.2.6 终止条件 .....	21
2.3 演化算法的运行 .....	21
2.4 演化算法的比较 .....	22
<b>第三章 可重构数字器件</b> .....	25
3.1 基本架构 .....	25
3.1.1 可编程逻辑器件 .....	27
3.1.2 现场可编程器件 .....	28
3.2 可重构硬件的应用 .....	32
3.2.1 设计阶段 .....	34
3.2.2 执行阶段 .....	35
3.2.3 小结 .....	37
3.3 实验结果 .....	37
3.4 POEtic体系功能概述 .....	39
3.4.1 有机子系统 .....	41
3.4.2 分子的描述 .....	42

3.4.3 路由层描述.....	44
3.4.4 动态路由.....	44
3.5 小结.....	44
<b>第四章 可重构模拟器件.....</b>	<b>46</b>
4.1 基本架构.....	46
4.2 晶体管阵列.....	47
4.2.1 NASA的FPTA.....	49
4.2.2 海德堡大学的FPTA.....	58
4.3 模拟阵列.....	65
4.4 小结.....	67
<b>第五章 使用演化硬件.....</b>	<b>69</b>
5.1 综合与自适应.....	69
5.2 自适应系统设计.....	70
5.2.1 容错系统.....	70
5.2.2 实时系统.....	72
5.3 使用演化硬件构造容错系统.....	73
5.4 在线系统使用内部重构的原因.....	74
5.5 量化内部重构时间.....	75
5.6 理论结合实践.....	78
5.6.1 最小化可预测故障风险.....	78
5.6.2 最小化不可预测故障风险.....	80
5.6.3 实践建议.....	81
5.7 基于演化硬件的故障恢复实例.....	82
5.7.1 基于种群的设计与基于适应度的设计.....	82
5.7.2 基于演化硬件的补偿器.....	84
5.7.3 机器人控制.....	90
5.7.4 POETic项目.....	100
5.7.5 胚胎发育.....	113
5.8 小结.....	124
<b>第六章 未来工作.....</b>	<b>129</b>
6.1 电路综合.....	129
6.1.1 数字电路设计.....	129
6.1.2 模拟电路设计.....	133
6.2 电路自适应.....	134
<b>原作者简介.....</b>	<b>137</b>

# 第一章 引言



**目标** 本章对演化硬件作简要概述，解释何为演化硬件，以及它是如何被应用的。更多细节将在随后的章节里展开讨论，此处我们力图让读者对演化硬件有一个初步的认识。本章还将给出演化系统的一些基本特点，以及关于演化系统好或不好的特性的例子。

## 1.1 演化电路和系统的特点

近十年来，电子与计算机系统的复杂程度急剧上升。随着对系统功能需求的增加，越来越多的复杂系统被制造出来以满足多种需求。电子与计算机系统复杂程度的提高，使人们有能力制造出对于我们大多数人的生活而言具有重要影响的工程产品，如飞机、轿车、手机、互联网、“智能”家庭等。然而，复杂度的提高也存在着一些潜在的负面影响，最显而易见的是如何设计和管理这样的复杂系统。有一种很有趣的对比，那就是生物系统的复杂程度要比我们目前所能制造出来的任何产品的复杂程度都要高出几个数量级。此外，随着复杂程度的上升，故障和错误也会不可避免地随之出现在这些系统中。对于不可维护系统，即由于代价高昂而无法进行维修的系统，如卫星、深海探测器或太空飞船，故障和错误的出现会破坏这些系统的功能，使之变得毫无用处。

更多有关系统故障的细节将在后面的章节里讨论，这里我们仅简单提及一些相关内容。在高度集成的计算机系统中，故障是可以被检测到并通过维修加以修复的。采用容错技术可以使系统在发生一个或多个冗余部件失效的情况下仍能继续正常工作。而在不可维护系统中，一旦系统的特定单元发生了故障，并通过容错技术对之进行了隔离，该故障单元就会因不能被修复而无法再次投入使用。当所有可用的冗余单元均被不同故障所破坏后，整个系统就会失效。

举一个极端的例子：飞往最近的恒星的百年任务。在一百多年的漫长航行过程中，飞船的电子系统将会逐渐老化，其最初的组成部件中，到后期可能只有一小部分硬件还能继续正常工作。在这种情况下，如果系统完全失效了，就意味着整个任务的失败，不可能还有派出工程师去维修飞船电子系统的机会。

图 1.1 所示是一个存在于所有生命中相当程式化的演化循环过程。关于这个循环是如何与工程系统，尤其是演化硬件相结合的，会在后面的章节中介绍。图 1.1 中，将选择一对夫妻作为循环的开始。由这对夫妻生育的后代，将被其所生存的环境所选择，即对环境的适应与否决定其能否成为下一代的父母。

此处最重要的一点是，我们拥有一个包含双亲的群体，他们将繁衍出构成下一代的新群体。某种形式上的选择将会发挥作用，群体中被甄选出来的成员将参与下一代的创造过程。

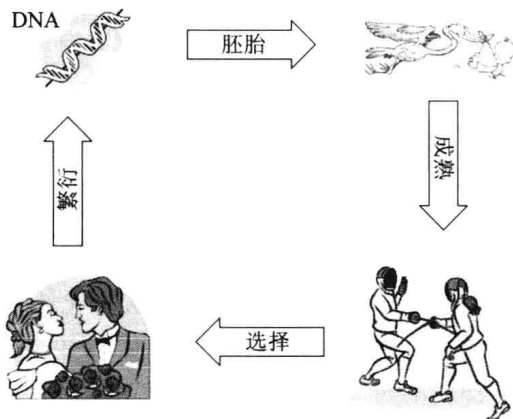


图 1.1 演化循环

我们怎样才能将这种自然演化转换成演化硬件系统呢？图 1.2 所示的群体是一组用来尝试解决同一个问题的电子系统。假设可以把对问题解的优劣程度的评价转化为一种可度量的值来进行评估——在图 1.2 中它被称为适应度——在循环的选择阶段我们可以借助这个量来进行选择操作。那些被选中的系统将会参与到构造下一代问题可能解的过程中去。图 1.1 左上角所示的脱氧核糖核酸(DNA)现在变成了一个二进制串(不一定非二进制不可，但在讨论的初期阶段，二进制比较具有代表性)，这个二进制串用来“配置”我们的系统。如图 1.2 所示，该过程循环往复，可能直到永远，而更为常见的情况是，在适应度达到其最大值后或者在我们感到厌倦后，循环被终止。

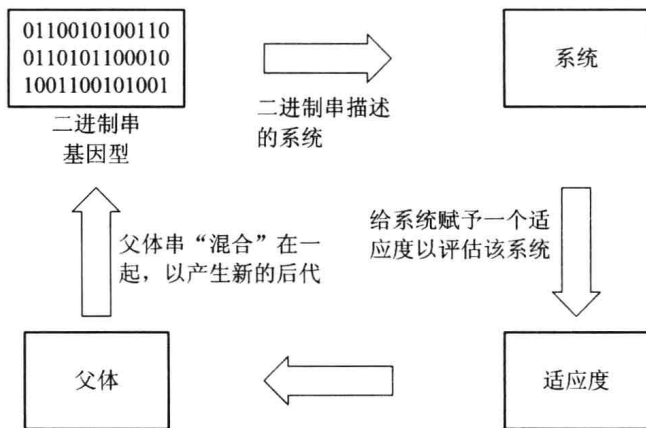


图 1.2 通用的电子演化循环

图 1.3 再一次描述了这个过程，其表达方式与硬件电路近乎一致。该图同时描述了本领域中常见的在整个过程中引入一些随机特性的基本思路：图例中的交叉操作和变异操作(详细内容将在第二章介绍)。

上述这些内容都是演化硬件的基础。当然，还有很多的细节这里没有提到，但是会在随后的章节中进行讨论。作为简述，本章仅介绍演化硬件的基本思想。

在演化硬件中人们设想会发现一些什么样的特性呢？这个问题很难笼统地回答，因为答案跟演化初始阶段的很多因素是相关的。不过，这里可以举例说明：

- (1) 系统是演化出来的而不是设计出来的(这点很明显)。

(2) 系统可能不是最优化的结果，但是可以满足需求(与演变过程有关，这在生物系统中很普遍)。

(3) 演化出来的系统表现出某种程度的容错特性，这在常规设计中是看不到的(这是在生物系统中很普遍的现象)。

(4) 演化系统对环境变化具有适应性(这取决于系统的演化过程何时终止，对于达到了目标后就终止演化进程的系统而言，这点不再成立。同样，这也是所有生物系统的一个特征)。

(5) 产生的系统不可验证。事实上在很多情况下，要想分析最终演化形成的系统如何完成任务是很困难的。

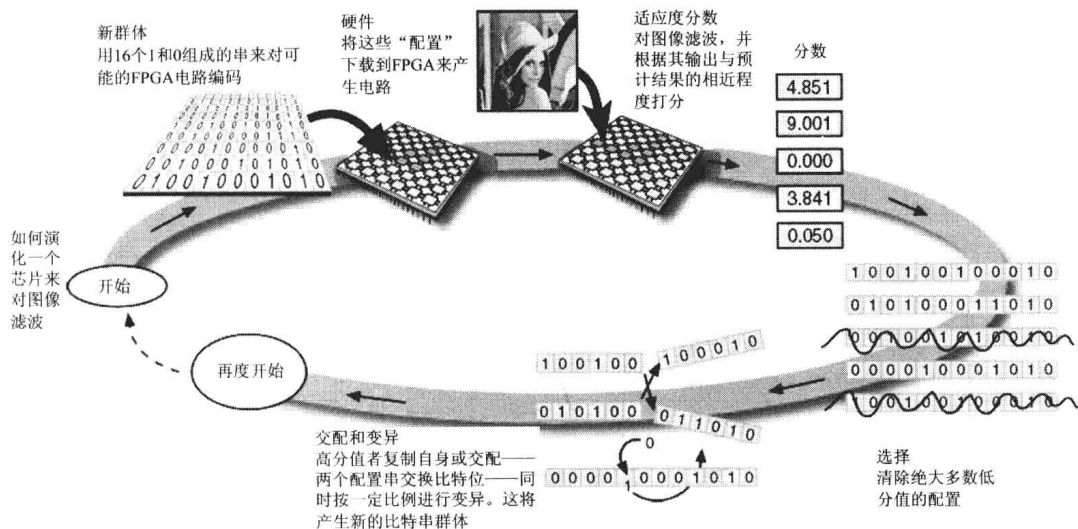


图 1.3 硬件演化循环

可以肯定的是，演化硬件中还有更多与具体应用相关的特性，这里我们暂且不提。本书列举了很多演化硬件的例子，希望读者自己去尝试归纳演化硬件的特点，逐渐形成自己关于演化硬件特性的理解。

## 1.2 演化硬件的优势

正如我们所看到的，演化硬件技术是一种受生物系统启发去演化硬件而不是设计硬件的电路设计方法。这一点看起来很吸引人。考虑以下两种不同的系统：一种是源于自然的人体免疫系统，另一种是人工设计的计算机系统。我们面临的问题是哪一种系统更复杂、更可靠、更优化、对外界变化的适应性更强。

毫无疑问，几乎所有问题的答案都是人体免疫系统，人工设计唯一可能占优势的地方是在“哪一个更优化”这个问题上。显然我们现有的设计方法还不能与大自然的方式相提并论，但后者实现起来并没有想象的那么简单。大自然有很多超越目前人工设计系统的优点，尤其是在时间(大多数生物系统能够存活相当长的时间)和资源(大部分生物系统能够自行供给所需的新资源，如新细胞)方面。

然而，这并不意味着采用演化概念的设计没有用途。我们编写本书的目的是为了阐明在何时何处采用演化设计方式是有利的，以及如何以最佳方式利用它们。使用演化设计的



首要目标是要让电子系统能够在不可预测的环境中持续工作并长期运行。

演化算法的基础(见第二章)是一个由相互竞争繁衍机会的不同系统组成的群体, 因为群体中的每一个系统都是不同的, 所以该算法蕴含了某种形式的冗余。由于解决方案的多样性, 当系统中出现一个故障时, 可能是因为外部条件改变(传感器失效或给出错误读数), 也可能是因为内部电路故障。对于不同的系统, 不同的解决方案会产生不同的效果, 使得某些特定的个体不会受到故障的影响, 从而为系统提供了对故障的容错能力。

图 1.4<sup>[1]</sup>给出了在现场可编程门阵列(FPGA)上设计一个简单的频率发生器的成功演变结果。其中的细节无关紧要, 有趣的是这些不同的图案, 每个亮的方块代表一个在演变过程中具有某种功能的 FPGA 的功能单元(暗的方块则表示没有使用的单元)。该图显示了群体中的 8 个成员个体, 均为同一演化进程中所产生。我们所能看到的是, 尽管这 8 个成员都有效地工作着, 但不同的成员使用了 FPGA 不同部位的资源。因此, FPGA 局部性的故障可能只会影响到其中某个电路的运行, 而不会影响到其他电路, 于是一个适应性更强的设计就此产生。

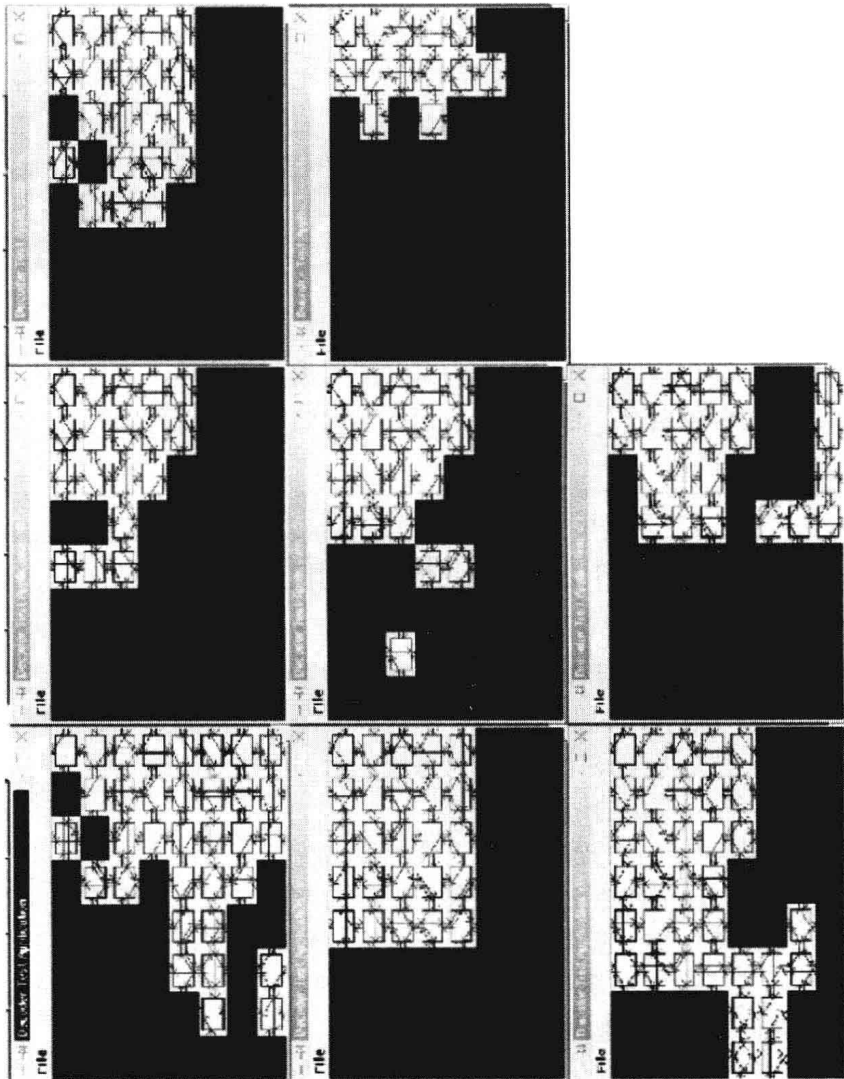


图 1.4 一个演化设计的结果