

设计科学前沿丛书

发育设计： 理论基础和算法

Developmental Design: Foundations and Algorithms

侯悦民 季林红 著



科学出版社

设计科学前沿丛书

发育设计：理论基础和算法

Developmental Design:
Foundations and Algorithms

侯悦民 季林红 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统阐述发育设计理论基础及算法。发育设计借鉴生物发育机理,研究具有生物自生长发育特性的设计原理,其本质是探索结构形成的内在规律,更加精确地解释和描述产品的形成过程,并使产品具有一定程度自行发育能力,从而实现设计过程自治或半自治。本书的核心是提出六阶段发育设计框架以及三个发育机制,并从亚里士多德科学分类、哈肯的协同学,以及动态系统多个层面论述发育设计的理论基础。全书结构框架以发育设计理论基础和算法为中心,阐述从产品需求到结构形成六个阶段的状态,以及从一个阶段到另一个阶段的发育机制,并建立各个阶段发育机制的数学模型。为了便于阅读,每章附有摘要和总结,书后附有中英文名词对照。

本书可供大专院校和科研机构的设计学科相关研究人员及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

发育设计:理论基础和算法=Developmental Design: Foundations and Algorithms/侯悦民,季林红著. —北京:科学出版社,2015.6

(设计科学前沿丛书)

ISBN 978-7-03-044555-1

I. ①发… II. ①侯…②季… III. ①机械学-研究 IV. ①TH11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 126270 号

责任编辑:牛宇锋 乔丽维 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

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>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张:17 3/4

字数:330 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《设计科学前沿丛书》编委会

顾 问

- | | |
|-------------------|------------|
| Ashok K. Goel | 美国乔治亚理工大学 |
| Giorgio Colombo | 意大利米兰工业大学 |
| Imre Horváth | 荷兰代尔夫特工业大学 |
| John Gero | 美国乔治梅森大学 |
| Michel van Tooren | 美国南卡罗来纳大学 |
| Offer Shai | 以色列特拉维夫大学 |
| Panos Papalambros | 美国密歇根大学 |
| Tetsuo Tomiyam | 英国克兰菲尔德大学 |
| Xiu-tian Yan | 英国思克莱德大学 |
| Yan Jin | 美国南加利福尼亚大学 |

主 编

- | | |
|-----|--------|
| 季林红 | 清华大学 |
| 韩 旭 | 湖南大学 |
| 陈立平 | 华中科技大学 |

编 委

- | | |
|--------------|-----------------------------|
| 侯悦民 | 清华大学 |
| 杜建滨 | 清华大学 |
| Zoltán Rusák | 荷兰代尔夫特工业大学 |
| 明新国 | 上海交通大学 |
| 刘玉生 | 浙江大学 |
| 陈 泳 | 上海交通大学 |
| 蒋技贇 | NOESIS Solutions N. V. 中国分部 |

作者简介

侯悦民,毕业于清华大学,工学博士,作为第一作者和独立作者发表相关学术论文 50 余篇,在中国、日本、美国、德国、意大利、法国等国际会议做英文报告 20 余次,被邀请担任“设计认知和设计计算”系列国际会议(先后在美国麻省理工学院、荷兰代尔夫特工业大学、美国佐治亚理工大学、德国斯图加特大学、美国德克萨斯 T&M 大学、英国伦敦大学院召开)国际顾问委员会成员及项目委员会成员(DCC08、DCC10、DCC12 和 DCC14),担任 TMCE2010(意大利)、TMCE2012(德国)、TMCE2014(匈牙利)分会主席和审稿,发起和组织系列国际会议 ADCP2011(北京)、ADCP2012(德国卡斯鲁厄)、ADCP2013(北京)、ADCP2014(德国斯图加特),担任多个国际会议和国际英文学术期刊审稿和客座编辑,承担国际会议组织者、秘书、分会主席,多次赴美国乔治梅森大学和荷兰代尔夫特工业大学进行合作研究,完成及在研 10 余个研究项目。主要研究领域:生物激发的设计理论和算法、设计认知和计算、神经网络控制、智能系统、动力学及优化。目前在研项目为生物激发的设计方法和算法及 IC 装备工艺腔室多场建模、仿真、优化及设计(国家重大专项、国家自然科学基金、北京市教委科研计划资助)。目前主要研究方向集中在生物激发的设计方法及算法。于 2013 年获国家科学技术进步一等奖。

季林红,毕业于日本东京大学,工学博士,现担任清华大学机械系教授、系副主任、机械工程实验教学中心主任、摩擦学国家重点实验室智能与生物机械实验室主任,清华大学机械、光学及仪器分学位委员会委员。社会兼职:中国康复医学学会常务理事及康复医学工程专业委员会主任委员,残疾人康复协会常务理事及康复工程专业委员会副主任委员,《机械工程学报》董事等。研究领域:机械设计及理论(机械性能分析及系统优化设计)、康复医学工程(人体运动协调检测与评价、神经康复训练技术与装备、运动辅助技术及装备)。已负责并完成了 863、973、国家自然科学基金、国家科技支撑计划课题等 20 余项课题研究工作。10 余年来在国内外杂志上发表学术论文 140 余篇,其中 SCI 收录 30 余篇,EI 收录 50 余篇,已公开和获授权国家发明专利 27 项、实用新型专利 5 项。目前主持的在研项目包括国家重大科技专项、国家自然科学基金、国家科技支撑计划课题等,研究方向有 IC 装备工艺腔室多场建模、仿真、设计和优化,人体协调运动机理,智能化康复机器人设计技术及产业化开发等。2002 年获得北京市第九届教学名师奖。

前 言

发育设计属于生物激发的设计。生物激发的设计一般指由生物的特性启发的设计思想和方法。在生物激发的设计领域,目前的研究侧重于借鉴生物功能原理实现产品功能结构,即研究模拟生物功能结构的产品,其本质是探索功能载体的结构。与此不同,发育设计借鉴生物发育机理,以此为启发研究设计机理,即研究具有生物自生长发育特性的设计原理,其本质是探索结构形成的内在规律。发育设计是在设计科学语境下进行的科学探索,可以定义为:模拟生物发育机制,具有自治生长特性的设计原理和算法。在发育设计领域,目前研究侧重于模拟生物发育过程以及生物发育机制探究设计机理,建立可计算的生长型设计过程模型,更加精确地解释和描述产品的形成过程,并使产品或者系统具有一定程度的自行发育能力,从而实现设计过程自治或半自治。设计过程是一个从需求到结构、从抽象概念到详细结构的渐进过程,与生物发育过程具有相似性,因此发育的思想从认知上体现了工程设计的本质。发育设计是实现自治设计的极具潜力的研究方向,可为新一代开放、自治、智能设计建立理论和算法框架。

本书的核心是提出六阶段发育设计框架以及三个发育机制,并从亚里士多德科学分类、哈肯的协同学以及动态系统多个层面论述发育设计的理论基础,这均为本书作者提出的原创性研究成果。

全书结构框架以发育设计理论基础和算法为中心,阐述从产品需求到结构形成六个阶段的状态以及从一个阶段到另一个阶段的发育机制,并建立各个阶段以及发育机制的数学模型。第1章是全文的研究背景,论述近50年设计研究从优化走向自治的发展轨迹,以技术系统进化模式为分析框架论述发育设计的研究意义。第2章阐述生物激发的设计,并论述进化设计、仿生设计与发育设计的核心思想以及差异。第3章以亚里士多德的科学分类为分析框架,论述设计的科学属性,提出宏观设计框架,论述从发育观点研究设计过程的理论依据。第4章阐述发育设计理论基础,论述可资借鉴的发育生物学原理和概念,总结生物发育原理以及生物发育机制。第5章论述抽象特性阶段演变过程,从功能到特性的演变及建模。第6章论述抽象特性的物化过程,从特性到结构的演变及建模。第7章论述发育设计数学建模及算法。第8章是发育设计应用实例,以小卫星多功能结构系统设计为例,示例发育设计过程。第9章论述发育设计系统框架,以宏观设计框架为系统框架,以发育生物学发育原理为借鉴,论述发育设计、发育阶段以及发育机制,给出发育设计应用实例;以系统观点论述发育设计宏观变量;以动态的观点论述发育设计

动态设计过程,包括传递函数和测量函数。第 10 章总结发育设计的思想、方法以及算法,并论述发育设计研究以及应用前景。本书各章内容基于作者十余年的研究成果,核心内容已经发表于期刊及国际会议,第 1 章和第 2 章基于作者本人的“现代设计理论和方法”课程的讲稿。为了便于阅读,每章附有摘要和总结,书后附有中英文名词索引。

本书涉及的研究成果由国防科工委航天支撑技术基金、国家自然科学基金(51175284)、国家重大专项基金(2011ZX02403)、北京市教委科学计划基金(SQKM201211232002)资助,本书出版由国家自然科学基金(51175284)资助,特此致谢。

本书所涉及研究始于 2001 年作者攻读博士学位期间,衷心感谢作者的博士生导师、清华大学金德闻教授多年来的指导、支持、关心和帮助。

侯悦民

2015 年 5 月

于清华园

Preface

This book presents foundations and algorithms of a new design field: developmental design.

Four dimensions are used to this research. ① Macro-level. Design is categorized as Productive Science by philosophizing the nature of design. ② Systematical level. The concepts in Synergetics and embryogenesis are used to explain and describe the design process. This approach results in a Six Stage Design Model. Three developmental mechanisms in Embryogenesis are used to map functions onto structures, and the Order Parameters in Synergetics are used to describe the key factors that govern the growth of the structure. ③ Methodology level. To model the design concepts at different stages and to formularize the transformation of design concepts between stages, matrix theory, graph theory, induction rules, neural networks, game theory and optimization theory are used to represent design concepts and to develop the design concepts step by step. ④ Application level. A multidisciplinary (including vibration control and attitude control) design framework for the structure system of small satellite is presented to illustrate the application of the Six Stage Design Model.

The outcomes of the research can be summarized as three points and one model. Firstly, design can be categorized as Productive Science. Secondly, the design can be described as a developmental process using concepts from embryogenesis. Thirdly, the Order Parameters of the design of artifacts are the properties and property relationship. The model is a Six Stage Design Model, named as Developmental Design. The Six Stage model encompasses 6 stages: Function stage, Surrogate state, Property stage, Specification stage, Feature stage, and Parameter stage. Design concepts are developed from abstract properties to concrete structural parameters step by step. The control of the system is achieved using neural networks and it is concurrently generated with the structural development. Two basic neural network patterns are proposed based on neural pathways of organisms: Reflex Arc Model and Four Loop Control Model (the cerebellum loop, the basal ganglia loop, the thalamus loop, and the spinal cord loop) .

There are four features of the proposed design model. ① The design process is formalized and formulized so that the design process can be analyzed using mathematics. ② The boundary of design stage is clear so that it serves teamwork and computer design agent. ③ Control systems and structures are concurrently generated. ④ The growth form information representation of this model benefits the interaction of multiple design agents.

This research distinguishes itself by transforming design concepts from abstract concepts to concrete structural parameters step by step by simulating the developmental process of organisms, and representing the design process using graph theory and game theory. This research

lays foundation for autonomous design as well as autonomous artifact.

The book is arranged as follows. Chapter 1 reviews and analyzes the design research in the past half century and discusses the importance of a new design research pattern based on systems evolution theory. Chapter 2 discusses the difference between biology inspired design and the developmental design. Chapter 3 investigated the nature of design in terms of Aristotle's science classification. Chapter 4, 5, 6 and Chapter 7 present foundations and algorithms of developmental design and advance a six stage design model. The model represents the design process at six stages and transform the design concepts between them using three developmental mechanisms. Chapter 8 presents a design case of a small satellite. Chapter 9 systematically summarizes the six stage design model and algorithms. Finally, Chapter 10 presents a summary and discussion for the future research.

目 录

前言

第 1 章 现代设计:从优化走向自治	1
1.1 引言	1
1.2 设计研究的发展过程	2
1.3 设计研究方法	3
1.3.1 优化:从参数优化到多学科协同优化	3
1.3.2 功能结构匹配:从归纳工程实践到探究自然原理	7
1.3.3 生物激发的设计	15
1.3.4 设计模式	18
1.3.5 设计表述	21
1.3.6 设计代理	23
1.3.7 基于代理的多学科协同优化	26
1.4 研究对象:物理结构→虚拟→智能	28
1.5 技术工具	30
1.6 设计进化	30
1.6.1 系统进化理论	30
1.6.2 未来的设计需求:开放+个性+通信+自治	32
1.6.3 设计系统进化	32
1.7 总结	34
第 2 章 生物激发的设计	36
2.1 生物激发的设计	36
2.2 生物激发设计的基本方法	37
2.3 发育设计	39
2.3.1 发育设计起源和基本思想	39
2.3.2 基于细胞自动机的发育设计	39
2.3.3 发育设计研究内容和研究方法	40
2.4 总结	41
第 3 章 宏设计框架	42
3.1 设计定义	42
3.2 设计的科学属性	44

3.2.1	设计是人工科学	44
3.2.2	设计作为创制科学	44
3.2.3	设计方法学与科学研究方法	45
3.2.4	设计过程与科学研究过程	46
3.3	设计的三重性	47
3.3.1	人工制品二重性	47
3.3.2	设计的三重性	47
3.4	设计作为创制科学的内涵	48
3.5	一般设计过程分析	50
3.6	作为创制科学的宏设计框架	51
3.7	概述和结论	52
第4章	发育设计理论基础	54
4.1	协同学基本思想	54
4.1.1	系统相似性	54
4.1.2	序参量的概念	54
4.1.3	序参量的数学描述	55
4.2	物理系统和生物系统的相似性和序参量	56
4.3	生物胚胎发育的基本要素	58
4.3.1	胚胎发育过程	58
4.3.2	胚胎发育特点	62
4.3.3	胚胎发育机制	63
4.4	生物神经系统特点	64
4.4.1	神经系统简述	64
4.4.2	神经系统特点	64
4.5	设计早期阶段与胚胎发育过程相似性	67
4.6	生物胚胎发育对设计过程建模的启示	69
4.6.1	全能结构—多能结构—专能结构的演化	69
4.6.2	诱导	70
4.6.3	基因逐渐补充	70
4.6.4	创造性设计	70
4.7	生物神经系统对控制模型的启示	71
4.8	设计过程建模	71
4.8.1	设计过程建模原则	72
4.8.2	神经模型建模原则	72
4.9	生长型设计模型	74

4.9.1	生长过程	74
4.9.2	发育模式	75
4.9.3	结构级层	76
4.9.4	遗传和转决定	76
4.9.5	序参量	77
4.10	总结	77
第5章	基于代理阶段的功能—特性映射	79
5.1	功能阶段	79
5.1.1	功能	79
5.1.2	功能分解和功能结构	79
5.1.3	基本功能结构	80
5.1.4	功能阶段表述和发育模式	81
5.2	代理阶段	82
5.2.1	代理阶段依据	82
5.2.2	代理阶段的概念	82
5.2.3	界面特性的提取	82
5.2.4	代理阶段表述	85
5.3	人工制品基因	86
5.4	诱导	86
5.4.1	产生式系统基本结构	87
5.4.2	基本术语	87
5.4.3	诱导基本原则	88
5.4.4	子结构诱导规则	89
5.4.5	计算机实现	91
5.4.6	神经诱导—控制设计	92
5.5	特性阶段	94
5.5.1	表述	95
5.5.2	原基分布图和自治程度	95
5.5.3	与一般功能—行为映射模式的比较	95
5.6	实例	95
5.6.1	支撑载荷	96
5.6.2	运动控制	97
5.6.3	振动控制	100
5.6.4	程序设计	102
5.7	总结	103

第 6 章 特性—结构映射	104
6.1 定型阶段	104
6.2 部件特性	108
6.3 神经网络模型	109
6.4 反射运动	110
6.4.1 反射弧结构	110
6.4.2 神经反射弧神经网络数理模型	110
6.4.3 反射弧神经网络模型	111
6.4.4 学习算法	112
6.5 4 回路控制网络	113
6.5.1 神经元分类	113
6.5.2 神经网络	114
6.5.3 原型网络	116
6.5.4 变形网络	116
6.5.5 神经元数理模型	116
6.5.6 网络学习和训练	117
6.5.7 网络特点	118
6.6 特征阶段	121
6.6.1 子结构特征表述	121
6.6.2 建立映射关系	122
6.6.3 构型和材料设计方程	122
6.6.4 博弈论基本概念和模型	123
6.6.5 结构和材料博弈模型	124
6.6.6 连接特征	126
6.7 参数阶段	126
6.8 总结和讨论	127
第 7 章 发育设计建模:数学表述和特点	128
7.1 图论基本概念	128
7.2 代理阶段和特性阶段表述	128
7.3 测试平面性	129
7.4 特征阶段—对偶图	130
7.5 子结构迁移	132
7.6 子结构特征表述	133
7.7 多功能结构表述	133
7.7.1 点边赋权图	133
7.7.2 点边面赋权图	135

7.8	参数化模型表述	137
7.9	发育设计特点	138
7.10	序参量分析	140
7.11	与其他设计模型的比较	140
7.12	总结	142
第8章	小卫星结构系统发育设计	143
8.1	小卫星多学科设计特性	143
8.1.1	小卫星技术发展对多学科设计的需求	143
8.1.2	定义	144
8.1.3	基本组成	145
8.1.4	运行环境	147
8.1.5	小卫星主要失效形式	149
8.1.6	在支持技术方面	150
8.1.7	小卫星材料和 Smart 结构	150
8.1.8	多学科设计	152
8.2	发育设计过程	153
8.3	产品特性分析	154
8.4	功能阶段、代理阶段和特性阶段	155
8.4.1	运动控制	155
8.4.2	振动控制	156
8.4.3	特性阶段	157
8.5	定型	160
8.5.1	刚度特性计算	160
8.5.2	振动信号处理器转换系数计算	161
8.5.3	姿态信号处理器转换系数计算	165
8.5.4	效应器能量转换系数计算	171
8.5.5	感受器能量转换系数计算	173
8.5.6	传感结构和致动结构特性计算	174
8.5.7	连接刚度特性计算	174
8.5.8	驱动特性和能源特性计算	174
8.6	特征阶段	175
8.6.1	子结构和特性连接关系的消失和衍生	175
8.6.2	对偶图表征特征	176
8.6.3	子结构迁移形成初始布局	179
8.7	赋权图	179
8.7.1	面权	179

8.7.2	边权	186
8.7.3	面权	187
8.7.4	点权	187
8.7.5	布局图	188
8.8	参数化模型	189
8.9	总结	190
第9章	发育设计系统框架	191
9.1	设计属性	191
9.2	设计空间	192
9.3	数学模型	193
9.4	发育过程	194
9.5	发育机制算法	195
9.5.1	基于规则的诱导	196
9.5.2	基于规则和推理的基因转录	197
9.5.3	仿生算法	199
9.5.4	基于对偶理论的基因转录	206
9.5.5	定型	210
9.6	设计过程宏观变量	212
9.7	设计过程控制	216
9.8	总结	218
第10章	总结与展望	219
10.1	总结	219
10.2	研究概述	220
10.3	本书特点	221
10.4	展望	222
参考文献		226
附录A	博弈论基本概念和术语	242
A.1	效用	242
A.2	博弈论基本术语	242
附录B	图论基本术语	246
B.1	图论基本术语	246
B.2	平面性算法	247
附录C	单纯形法	249
附录D	名词汉英对照	251
附录E	名词英汉对照	257

Contents

Preface

Chapter 1 Modern Design: From Optimization to Autonomy	1
1.1 Introduction	1
1.2 Design Studies	2
1.3 Design Research Methods	3
1.3.1 Optimization; from Parametric Optimization to Multidisciplinary Optimization	3
1.3.2 Mapping Functions and Structures; from Engineering Rules to Science Principles	7
1.3.3 Biology Inspired Design	15
1.3.4 Design Ways	18
1.3.5 Design Representation	21
1.3.6 Agents	23
1.3.7 Agent Based Multidisciplinary Optimization	26
1.4 Objects Designed; Physical structures→Virtual object→ Intelligent products	28
1.5 Design Tools	30
1.6 Design Evaluation	30
1.6.1 System Evolution theory	30
1.6.2 Design Requirements in the Future; Open+Personality+Communication+ Autonomy	32
1.6.3 Design Evaluation	32
1.7 Summary	34
Chapter 2 Biology Inspired Design	36
2.1 Biology Inspired Design	36
2.2 Methodology	37
2.3 Developmental Design	39
2.3.1 Origin and Principles	39
2.3.2 Cellular Automate	39
2.3.3 Research Goals and Methods	40
2.4 Summary	41

Chapter 3 Macro Design Framework	42
3.1 Definition of Design	42
3.2 The Nature of Design as Science	44
3.2.1 Artificial Science	44
3.2.2 Production Science	44
3.2.3 Design Methodology and Science Research Methods	45
3.2.4 Design Process and Science Research Process	46
3.3 Triple Nature of Design	47
3.3.1 Duan Nature of Artifacts	47
3.3.2 Triple Nature of Design	47
3.4 Implication of Design as Production Science	48
3.5 Typical Design Process	50
3.6 Macro Design Framework	51
3.7 Summary	52
Chapter 4 Foundations of Developmental Design	54
4.1 Synergetics	54
4.1.1 Similarity of Systems	54
4.1.2 Order Parameters	54
4.1.3 Equations of Order Parameters	55
4.2 Similarity Between Physical Systems and Biology Systems	56
4.3 Basics of Embryogenesis	58
4.3.1 Developmental Process	58
4.3.2 Developmental Characteristics	62
4.3.3 Developmental Mechanisms	63
4.4 Characteristics of Neurogenesis	64
4.4.1 Development of Neural Systems	64
4.4.2 Characteristics	64
4.5 Similarity Between the Early Stage of Design and the Early Development of Embryo	67
4.6 Implication for the Design Process	69
4.6.1 Totipotent Cells-Pluripotent Cells-Specialized Cells	69
4.6.2 Induction and Cell Differentiation	70
4.6.3 Gene transcription	70
4.6.4 Creative Design	70
4.7 Implication for the Design of Control System	71
4.8 Modelling Design Process	71