

机电设计自动化 新兴研究及其进展

范 衡 著
朱贵杰 王 攀 译



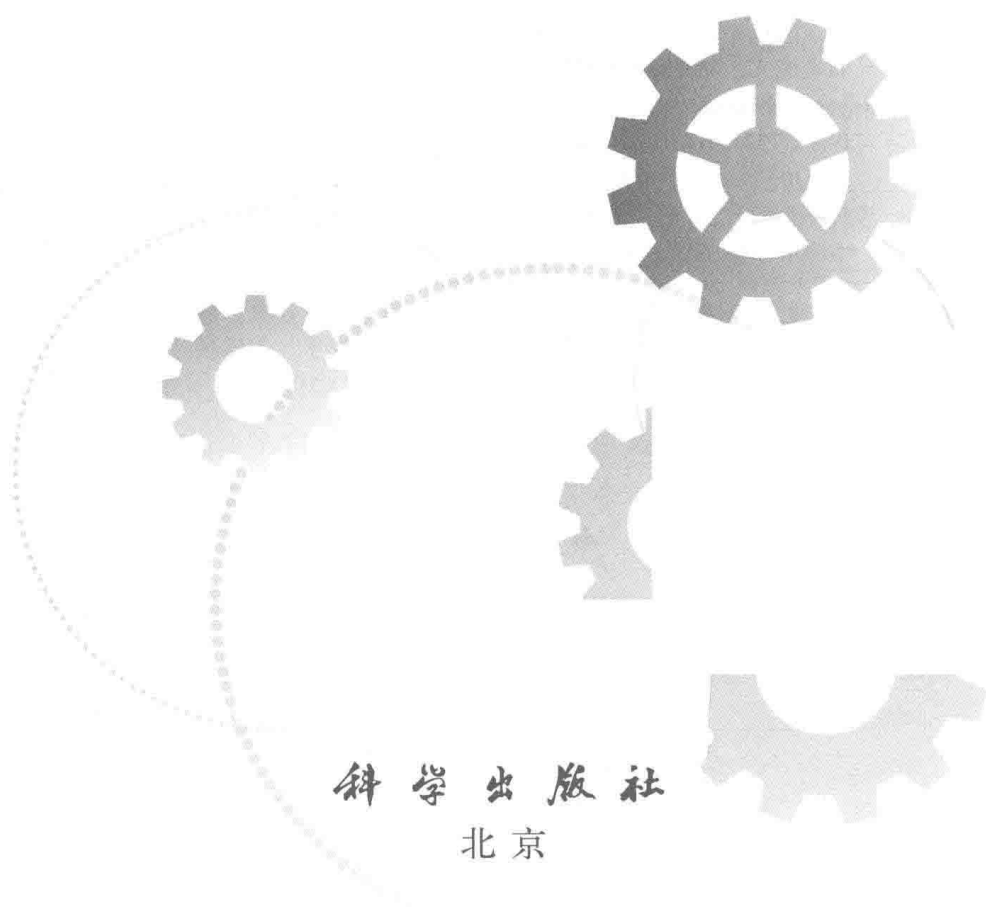
非外借



科学出版社

机电设计自动化 新兴研究及其进展

范 衡 著
朱贵杰 王 攀 译



科学出版社
北京

图字：01-2016-0926

内 容 简 介

本书主要介绍了键合图的基本理论和键合图在设计中的突出优势，重点介绍了基于键合图和遗传编程的进化设计方法。详细阐述了两个基于BG/GP的进化设计方法解决实际工程设计问题的案例，将BG/GP方法延伸到微观领域，讨论了MEMS层级进化合成的研究，并探讨了机电系统中肢-脑协同进化的并行设计问题，具有较强的理论和实践指导作用。

本书适合机械工程、计算机科学等学科的研究人员及工程技术人员参考，也可作为高校相关专业博士、硕士研究生的专业辅导书籍。

图书在版编目(CIP)数据

机电设计自动化新兴研究及其进展/范衡著；朱贵杰，王攀译. —北京：科学出版社，2018.1

书名原文：Mechatronic Design Automation: A Emerging Research and Recent Advances

ISBN 978-7-03-055452-9

I. ①机… II. ①范… ②朱… ③王… III. ①机械设计—计算机辅助设计—研究 IV. ①TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第283668号

责任编辑：郭勇斌 邓新平 欧晓娟 / 责任校对：樊雅琼

责任印制：张克忠 / 封面设计：蔡美宇 闵琪琪

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

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2018年1月第一次印刷 印张：8 3/4

字数：141 000

定价：58.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

译者序

机电一体化产品的创新设计能力是国家核心竞争力的一个重要体现，而传统的机电一体化产品创新设计通常依赖于工程人员长期的渐进式的经验积累和搜索，故探索具有提升机电产品创新设计能力的方法或工具对社会的发展具有十分重大的实际意义。在 21 世纪，机电一体化已成为一门独立和综合的学科，原书作者致力于解决机电一体化系统设计自动化中具有挑战性的问题，在书中提出了基于键合图和遗传编程的机电系统设计自动化进化方法。该方法采用键合图统一描述机电系统，采用遗传编程进行开放式空间搜索。设计自动化进化方法的优势在于其内在不局限于现有专家知识的创新性，通过开放式设计空间的搜索来发现最优的解决方案。书中还通过案例分析的方式，重点阐述了基于键合图和遗传编程的设计方法在实际工程设计问题上的应用。

本书主要由朱贵杰翻译并对原著中的大部分图表进行了重新绘制，由武汉理工大学的王攀教授进行审校和整理。汕头大学的谢淑香、姚利、游煜根、莫嘉杰、卢杰威、周飞等也参与了部分翻译工作，译者在此一并向他们表示感谢。

衷心感谢科学出版社的编辑在本书翻译过程中给予的指导和帮助。

本书具有较强的理论和实践指导作用，对于机械工程、计算机科学等学科的研究人员及工程技术人员具有较高的参考价值，也可作为高校相关专业博士、硕士研究生的专业辅导书籍。

尽管译者做出了最大努力，但限于译者的经验和水平，书中难免存在一些疏漏之处，敬请广大读者提出宝贵的建议。

译者

前 言

机电产品设计是一类不同于常规机械、电子和液压系统设计的多能域系统设计。在此类系统的设计过程中,需要融合多种类型的能量转换行为,而多能域系统设计的困难在于此类系统通常非常复杂,并且大多数系统仿真工具都局限于一个能域。在实际的工程设计中,设计人员常常面临如何提出一个创新性的设计方案来最完美地达到多个系统设计目标并满足相关的约束条件的问题。传统的机电产品的创新设计通常依赖于工程人员长期的经验积累和探索。故探索一种新的设计方法,以改进上述多能域系统的传统设计方法是一项富有价值和意义的工作。本书是作者及其研究团队对前期相关研究工作的成果的总结,涉及键合图理论、系统功率键合图建模与仿真、遗传编程、动态系统的进化设计方法等多个领域和相关的概念,提出了基于键合图仿真和遗传编程的机电产品设计自动化进化方法。该方法采用键合图统一描述机电产品的模型,采用遗传编程进行设计空间的开放式搜索。设计自动化进化方法的优势在于其内在不局限于现有专家知识的创新性,通过开放式设计空间的搜索来发现满足设计约束的最优或全新的设计方案。

本书的研究涉及大规模科学计算、机电与控制系统仿真、计算智能和遗传编程技术、设计自动化和参数优化等,研究基于遗传编程的控制方框图、电路图和键合图的混合拓扑搜索算法的优点,该混合拓扑算法的优点在于其开放式的结构搜索及参数协同进化。这种方法能够突破现有自动进化设计研究的局限,实现复杂系统的自动进化设计。本书研究的基于进化计算和系统仿真的设计自动化进化方法为传统的机电产品的创新设计提供了新的思路;同时对改进的各种现有设计方案也具有广泛的应用潜力,必将加快我国机电产品知识产权创新的步伐。

本书共分为8章,第1章介绍了研究背景,简述了机电一体化系统的一些研究工作,如键合图、设计自动化等,提出了结合键合图和遗传编程进行机电系统设计自动化的一般流程;第2章详细阐述了键合图的基础理论知识,并指出了键合图在设计中的优势;第3章重点介绍了基于键合图和遗传编程的进化设计方法;

第4章基于BG/GP方法研究了两个不同物理领域的问题：一个是电学领域的滤波器设计问题，另一个是机械领域的打印机设计问题；第5章研究了一个MEMS进化设计实例，提出了关于MEMS自动合成的分层设计的设计方法；第6章研究了一个微机电系统（micro electro mechanical system, MEMS）的鲁棒性优化设计实例；第7章研究了一种机电系统的肢-脑协同进化设计方法，并通过一个1/4汽车悬挂系统的进化设计实例对该方法进行了剖析；第8章对本书进行了简要总结及对后续研究的建议。

本书所涉及的工作得到了美国国家科学基金和丹麦科技部的大力支持，在此对他们的支持表示感谢。

当然，还要感谢Erik Goodman教授带领我进入机电设计自动化研究领域。他不仅是我的学术导师，也是一位良师益友。同时也非常感谢Ronald Rosenberg、Kisung Seo、Jianjun Hu、Jiachuan Wang、Jannis Terpenney、Pan Wang、Jinchao Liu和Torben Sørensen，他们和我共同完成了这本书中的研究工作，与他们的密切合作对推进机电产品创新设计研究的进展帮助很大。同时感谢Yuan Li和Jean-Francois Dupuis对本书的审阅，感谢汕头大学人工智能与机器人实验室的朱贵杰、李文姬、王晟、谢淑香等为本书所做的许多工作，感谢书中引用文献作者的辛勤劳动。

最后要感谢的是我的家人——我的父母、我的妻子及我的妹妹，为了让我完成本书的编写，他们给予了我很多建议、支持和帮助。

作 者

目 录

译者序

前言

第 1 章 导论	1
1.1 设计自动化	1
1.2 多学科机电一体化系统的表述	4
1.3 相关工作	6
1.4 本书的贡献	11
1.5 组织架构	12
第 2 章 键合图	13
2.1 键合图的因果关系	14
2.2 键合图的评估	15
2.3 键合图的简化	18
2.4 键合图的优势	21
第 3 章 进化设计	22
3.1 基于键合图的进化设计	22
3.2 总体设计流程	29
第 4 章 BG/GP 方法的案例分析	31
4.1 模拟滤波器的设计问题	31
4.2 机械打印机减震器的设计	37
4.3 讨论	46
第 5 章 MEMS 的进化设计	47
5.1 MEMS 设计的介绍	48
5.2 MEMS 设计的前景与挑战	48
5.3 分等级的 MEMS 设计方法	50

5.4 MEMS 系统级设计	51
5.5 第二级物理布局设计	65
5.6 结论	69
第 6 章 MEMS 的鲁棒性设计	71
6.1 鲁棒性优化问题简述	72
6.2 MEMS 制造过程中不确定性的建模	74
6.3 采用改进微分进化算法的鲁棒性优化	75
6.4 案例分析	79
6.5 实验	82
6.6 结论	89
第 7 章 机电系统的肢-脑协同进化设计	90
7.1 引言	90
7.2 统一物理系统建模与控制	91
7.3 键合图与遗传编程	94
7.4 协同进化设计	96
7.5 案例分析: 汽车悬挂系统	98
7.6 结论	110
第 8 章 总结	112
8.1 贡献	112
8.2 工作展望	113
参考文献	115
附录 A 因果约束	123
附录 B 键合图模型的状态空间描述	126

第1章 导 论

目前设计中的几个问题需要特别注意，包括多能域和混合能域动态系统、设计自动化和开放式拓扑设计（图 1.1）。

首先，改进性能对设计出高性能的多能域动态系统来说存在着巨大的需求，尤其是在机电一体化领域。对包含多能域（如电气、机械、液压、热和磁）的组件和对性能的严格要求及对成本限制的考虑，使得这些多能域动态系统的设计非常具有挑战性。

其次，设计自动化的需求越来越强。这种复杂系统的设计通常是在一个非常大的解空间中进行，包含多目标的迭代过程。传统的计算机辅助设计（computer-aided design, CAD）过程烦琐、效率低下，非常耗时。

最后，与参数化设计相比，开放式拓扑设计更加具有挑战性。因为它具有大得多的不明确的搜索空间。为了达到复杂机电系统所需的性能，需要进行开放式的拓扑空间搜索，使得系统设计包含足够多的拓扑变化。

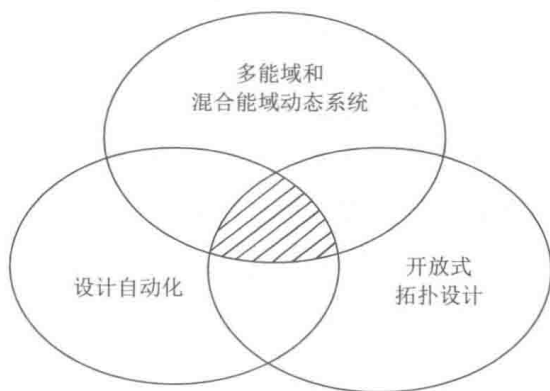


图 1.1 混合能域系统设计自动化的需求

1.1 设计自动化

由于高性能计算机的出现，计算机辅助设计和计算机辅助工程（computer-

aided engineering, CAE) 已经成为功能强大的工具, 它们彻底改变了工程实践和教育。CAD 和 CAE 最大的影响是使工程师可以在制造产品或系统之前使用计算机仿真试验台对其设计和测试。这种功能具有深远的影响, 特别是当制造产品或系统费时且昂贵的时候。归功于计算机的数字仿真功能, 工程师可以在更多的设计概念与原型间进行比较, 做出判断和权衡, 从而确保最终产品在实际制造出来之前更满足设计要求。

上面讨论的计算机工具, 包括可以模拟和测试设计性能的分析工具, 都属于被动设计工具。使用这些工具时, 设计者是整个设计工作的核心, 控制设计过程的所有方面。设计工具只是提供设计者想要或需要的信息, 如把计算机仿真出来的设计结果反馈给设计者。这些角色相对于设计者是被动的, 仅在设计者“问”一个问题或提出一种设计时设计工具才会进行“回答”或反馈。

我们可以描绘另外一种主动的计算机工具。当设计者“问”时它进行“回答”, 而且当设计者“思考”时它也在“思考”。换句话说, 这种工具不仅可以进行分析, 而且可以在设计者从一个更加抽象的层面提供指导的前提下自动对如何进行设计提出建议。因此, 它不仅能收集和评估概念设计, 而且可以分析和处理信息, 帮助做出决策, 产生设计知识, 指导设计过程。

虽然计算机的计算速度和准确性相对于人类具有绝对优势, 但是人们通常认为计算机仍然缺少人类用来进行创新设计和发明的认知能力。本书不对此观点进行评论。同样也有人认为: 为了达到设计过程中任何阶段的自动化, 首先必须理解人类是如何设计认知理论。如果真是这样, 那么现有的计算机工具几乎是不可能成功的, 因为建立这样的人类设计认知理论仍然是一个非常遥远的目标。虽然这种说法听起来非常合理, 但是仍然存在一个应该小心处理的假设: 即在这一论点中假设人类设计师是唯一进行了成功设计的设计者。然而, 其他成功的设计者确实存在, 自然就是其中之一。甚至在人类历史产生之前, 自然界就产生了许多绝妙的物种设计, 在没有任何人类干预的情况下“设计”出复杂性远远超出了任何人类设计的物种(即大自然的设计), 虽然大自然花费了一段漫长的时间(相对人类设计师)“进化”它的设计。当前计算机技术不断提高的运算速度和性能, 可能会使按照自然界进化原则进行设计的人造系统所花费的时间缩短到一个可以接受的范围。

可以看到,在过去20年里,根据查尔斯·达尔文提出的进化论产生的计算机算法已经由学术探索的好奇发展为科学家和工程师所广泛使用的有效的优化工具。进化计算指的是一类按照(公认不完善的)生物进化和自然选择的原则抽象得到的通用搜索算法。这些算法通过对候选解(“父代”)的群体的操作产生新的变种(“子代”)来完成生物启发式计算。在计算的每一步(或“代”),群体中相对较差的一些候选解被舍弃并用新的候选解替代(“适者生存”)。这个过程一直持续到发现了问题的满意解。在本书中,遗传编程(genetic programming, GP)作为一种进化计算的特殊形式,被选来作为设计自动化框架中对设计空间进行自动搜索的基本机制。尽管基于进化原则的系统不一定就能保证获得创新设计,但也不能否认这样的系统可能在不重复或模仿人类设计过程的条件下产生满足设计要求的创新型设计。

遗传编程是基因算法的拓展,它采用进化来优化实际的计算机程序或者算法,以解决一些任务(Holland, 1975; Goldberg, 1989),通常设计图标类型(或其他变长形式)的表述。表1.1总结了GP和遗传算法(genetic algorithm, GA)的差异。遗传编程最常见的形式是由(Koza, 1992, 1994; Koza et al., 1999)提出的,用树来表示实体的演变。由于GP可以操作可变字符串,所以它非常便于表示实体的演变过程。大部分的设计方法需要一个初步的设计,这个设计尽管不是一个完整的设计方案,但却是一个含有足够部件和有效装配信息的解决方案,并且含有用于定义出一个好的解决方案所需要的特性。一个进化设计过程不一定需要一个初步设计,而只要一个设计的“胚胎”。这个“胚胎”不需要包含所有必要的部件,或者必要部件的数目,或者一个有效的配置,只需要足够的信息来确定系统应该拥有的装配行为(如通过定义设计目标和约束条件等)。

表 1.1 GP 和“经典”GA 的比较

特性	GA	GP
染色体表示	字符串	树
染色体大小	固定长度	可变长度
操作	针对随机表述的	针对指定表述的

特别需要指出的是,在使用被动式设计工具时,设计者通过仿真工具的功能和设计者的经验和直觉做出的决策是有偏见的。设计者很难从一种设计方案

通过“富有想象力的跳跃或创造性的飞跃”得到另一种方案。但是主动的设计工具可以从这种“设计枷锁”和传统观念的局限中解放出来,使得他们可以探索出设计问题大量的可能解决方案,从而有可能发现在人类探索中未知的新颖设计。

1.2 多学科机电一体化系统的表述

一个值得注意的事实是,由基于多分支工程科学组成的系统模型可以用能量流和信息流的键合图的符号来描述。利用键合图的语言,可以用相当小的一部分理想元素作为积木来构建电气、机械、磁、液压、气动、热动力学和其他各类系统。

键合图是一种建模工具,它为物理动态系统的建模和分析提供了一种统一的方法。键合图按照能量守恒定律,由一些理想化的集总参数元素连接起来表述物理系统的动态行为。键合图由键合图元和键组成。键合图元有很多类型,其中每种元在能量域扮演一定的角色。第一种类型,也是最简单的形式, C 、 I 和 R 元件,是不包含电源的被动一通口元件,分别代表电容器、电感器和电阻器(电力领域)。第二种类型, Se 和 Sf ,属于主动一通口元件,是能量源或边界条件,分别代表势源和流源(如在电力领域分别指定电压或电流的电源)。第三种类型, TF 和 GY ,是最简单形式的二通口元件,分别代表变换器和回转器,能量存储在这些元件中。第四种类型,在键合图中记为 0 和 1 ,表示通道,它是三通口元件(或更多)的能量存储元。它们可以与其他元素相互连接构成子系统或系统模型。使用这些基本的元件可以自定义其他类型的多通口元件,在本书中暂不使用。

对键合图模型的一些案例介绍如下。图 1.2 由左侧的机械系统、右侧的电气系统和中间的键合图组成,它们表示的是具有相同动力学特性的系统。键合图表示包括 Se , 1 -结, C 元件, I 元件, R 元件,相同的键合图可以表示机械质量块、弹簧和阻尼系统,或一个 RLC 电路。 Se 对应机械系统的力和电气系统的电压。在机械系统中, 1 -结表示弹簧的末端、阻尼器的末端和机械系统的质量块,这三者具有相同的速度,而在电气系统中, 1 -结表示 RLC 电路共有的电流。 R 、 I 和 C 元件在机械系统中表示阻尼、(质量的)惯性和弹簧,在电气系统中表示电阻器、电感器和电容器。

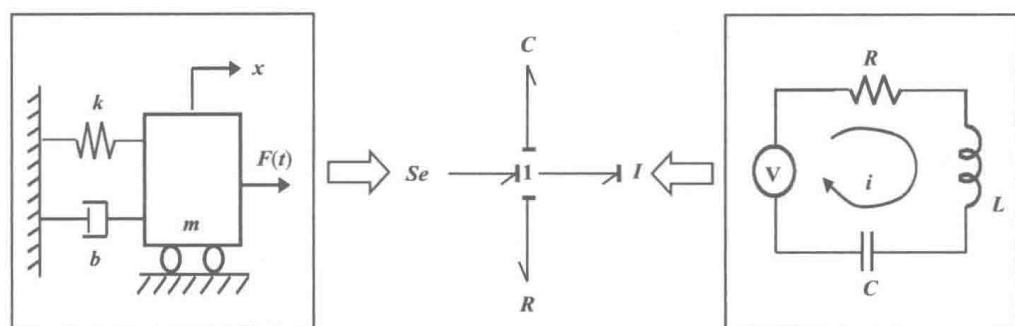


图 1.2 混合域系统的键合图表示

键合图在设计应用方面有两个主要优点：评价设计方案的高效率，以及采用键和节点的组合生成新的设计方案的高效率。

能够对键合图模型进行高效分析是因为元与子系统之间的因果关系和功率流非常有效地揭示了某些系统的属性和内在特征。另外，很容易系统地确定一组状态变量并产生状态方程进行求解。

键合图的其他特性如图 1.3 所示。正是它们的图形（拓扑）结构，使得对它们的结构操作可以从方程式中分离出来。这意味着通过键和节点的组合可以产生任何庞大或者复杂的系统模型，因为它们可以任意定义，并且具有无限制的扩充能力。因此可能会展开一个巨大的搜索空间，通过增加需要的规模和复杂度来提升先前获得的简单设计，以满足日益复杂的设计要求。

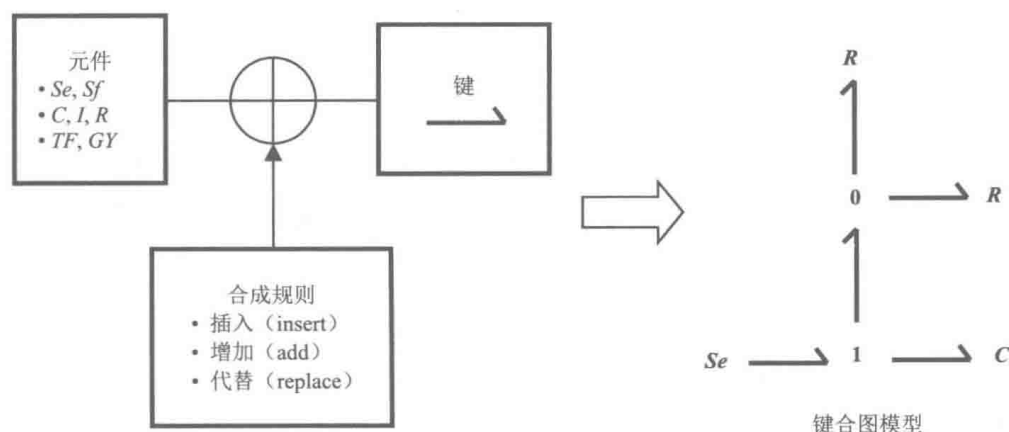


图 1.3 键合图生成的组合性质

1.3 相关工作

1.3.1 键合图

Rosenberg 和其他的一些研究者都详细地介绍了键合图方法文献 (Karnopp et al., 2000; Rosenberg et al., 1992, 1996; Rosenberg and Wang, 1993; Rosenberg, 1993, 1996)。Prabhu 和 Taylor (1989) 提出了一套在设计中使用键合图的变体的基本定理, 他们利用键合图的图形性质进行设计。Hoover 和 Rinderle (1989) 提出了一套图形修改规则来产生可以表示现实中物理系统的键合图模型, 这项工作一个重要的特征是搜索一个元件可能有的所有行为。Stein 和 Louca (1995) 开发了一种两层的组件建模方法, 以很好地利用一些现有模型顺序推理算法的能力, 这种方法可在计算机程序 CAMBAS 上得以实现。CAMBAS 使用扩展的键合图模型, 按照设计工程师选择的模块自动地建立系统的全局键合图。Bracewell 和 Sharpe (1995) 提出将键合图推理用于跨学科方案设计, 他们阐述了概念方案如何通过基于键合图的启发式规则建立的功能-实现树来帮助产生和构成的。Coelingh 等 (1998) 提出了一种基于计算机的机电系统概念设计工具。Youcef-Toumi 等 (1999) 提出了一种自动识别形成零动态的物理组件和 (或) 子系统的算法。Redfield (1999) 通过一个变速箱设计的例子, 展示了使用键合图作为动态系统的概念或结构设计工具的价值。

1.3.2 GA/GP

遗传算法研究及其应用团队 (genetic algorithms research and applications group, GARAGe) 成员 Goodman 教授和他的合作者 (Raymer et al., 1996; Goodman et al., 2002; Goodman et al., 1997a; Wang et al., 1997; Eby et al., 1998) 提出了许多使用 GA 和 GP 设计生成的工具。其中, 最强大和应用最广泛的 GP 系统之一 Lil-gp 是 GARAGe 开发出来的。Carlson-Skalak 等 (1998) 开发了一种使用进化算法的目录设计方法, 应用于生产车间的管道网设计, 这种方法可以同时改变结构和组件。Koza 等 (1997a, 1997b) 提出了一种使用 GP 对典型的模拟电路进行拓扑结构和参数自动综合的统一方法, 包括低通滤波器和运算放大器。Koza 等

(1999) 还提出了一种同时对控制器的拓扑结构和参数值进行自动设计的通用方法。如果整体控制器块之间存在内反馈, 该方法自动做出有关控制器使用的处理块总数、每个块的类型、块之间拓扑联系、块的所有参数值的决策。现在已经证明这种方法是很有发展前景的, 产生了许多可以进行专利申请的有效设计, 是和本书中的工作最为相关的方法。但是, 它只在单一物理领域进行工作, 是该方法的一个缺陷。Danielson 等 (1998) 用键合图和遗传算法设计了二冲程内燃机, 从初步设计开始, 为内燃机的 15 个物理参数找到最优值, 但该方法不允许改变拓扑结构。Tay 等 (1998) 使用遗传算法改变键合图模型, 该方法采用变量化设计方法, 这意味着他们首先建立一个完整的键合图模型, 然后用 GA 改变键合图的拓扑结构, 产生新的设计方案, 他们的目标是提供尽量广泛的可能的设计方案, 与本书提出的方法也密切相关, 但该方法只能在更加有限的拓扑搜索空间中使用。

1.3.3 设计自动化理论与实践

Reich (1995) 介绍了通用设计理论 (general design theory, GDT) 的述评, GDT 是一种关于设计的数学框架。他评述了设计方面的 GDT 假设 (公理) 和预测 (定理), 并用一些简单的例子做了说明。Gero (1996a) 研究了进化系统作为创新设计的计算模型, 并研究了基因工程、风格展现和复杂进化的关系。Kota 和 Lee (1993) 提出了一种采用功能推理方法的外形设计技术, 在传统的产品样本目录设计中, 由功能决定结构, 然后选择元器件。Chakrabarti 和 Bligh (1994, 1996a, 1996b) 描述了一类机械设计问题解的综合方法, 包括机械力和运动的传送和转换, 可由一组输入和输出表示。该方法包括: ①确定一组基本功能元素和它们的组合规则; ②获得合适的表示和推理流程以使用这些元素和它们的组合规则合成有效的解的概念。Schmidt 和 Cagan (1997) 将基于语法的系统用于设计, 其中语法词汇表示函数或子函数。Rosen 和 Peters (1996) 试图证明在工程设计中拓扑结构应用的普遍性。一个互补的目标是把拓扑学这样一门丰富的、正式的、行之有效的经典的学科作为一种值得进行更广泛研究的领域介绍给工程设计界。Whitney (1996) 提出了基于自然现象的功能推理, 这些自然现象使得机械设计接近当代 VLSI 设计方法的理想。Campbell 等 (1999) 介绍了一种称为

A-设计的新设计方法,它结合了多目标优化、多智能体系统和自动设计综合等方面的内容。

毫无疑问设计自动化是一项非常艰难的工作。然而,我们已经在具体领域看到一些非常成功的应用。例如,在学术界和工业界模拟/混合信号设计都是非常有力和重要的研究领域。工业上,两个领先的公司——加拿大的 ADA 公司和美国的 Neolinear 公司在这个领域做了很多突破性的研究,并成功地把他们的研究成果应用到电子设计自动化 (electronic design automation, EDA) 产业。笔者认为,这两家公司都有一个关键技术,即他们的产品的计算智能技术。以 ADA 公司为例,该公司聚集了许多著名的研究人员,专门从事计算智能和模拟电路 CAD。Madan M. Gupta 是 IEEE 会员,是模糊和神经系统方面的开拓者,也是顾问委员会的成员之一。Trent McConaghy 是 ADA 公司的首席科学家,也是人工神经网络、模糊逻辑、进化算法、模式识别等领域的著名学者。另外,Neolinear 公司拥有 Rob Rutenbar 作为他们的研究指导委员会成员。卡内基梅隆大学电子设计自动化中心的主任 Rutenbar 教授是在模拟/混合电路 CAD 领域内最具影响力的人物之一,在他的一篇论文中,他明确地提出了一种称之为并行组合模拟退火 (parallel recombinative simulated annealing, PRSA) 的方法。该方法的思想来自于 Goldberg 教授的集成基因算法和模拟退火的优化方法。尽管在早期的应用中这些方法取得了很大的成功,但这些应用于工业的方法最大的局限性在于它们仅接受固定的拓扑结构。在学术领域,更多的研究则关注于在单个物理领域系统中采用进化计算的方法实现对拓扑结构的搜索。它们可以被分为两类:基于 GA 的方法和基于 GP 的方法。大多数基于 GA 的方法采用 GA 来实现拓扑优化,并使用数值优化算法来实现参数优化 (Grimbleby, 2000)。也有一些基于 GA 的方法可以同时进化拓扑结构和参数,但是它们一般只允许对拓扑结构中非常有限的一些元素进行进化 (Lohn and Colombano, 1999)。Koza 教授使用网表文件 netlists 作为电路的表示,基于 GP 的方法作为进化工具,开发了非常成功的方法来解决电路综合的问题,他的方法能够同时对电路的拓扑结构和参数进行优化 (Koza et al., 1999)。尽管他的工作在模拟电路的自动设计中取得了很好的结果,但是该方法却不容易扩展到多能域系统如机电系统中。

机电系统设计和传统的电路系统设计、机械系统设计及液动系统设计等不一

样,部分原因是因为在设计过程中需要将不同形式的能量集中在一起进行研究 (Coelingh et al., 1998)。多能域系统之所以困难,是因为它们大多比较复杂,大多数仿真工具只仿真单一物理领域的系统。因此为了自动设计多能域系统,如机电系统,需要采用新的方法。本书的主要目标就是开发一种自动设计机电系统的流程和方法,使用该方法可以自动获取满足事先给定的设计指标和约束条件的设计方案。在该项研究中,最为困难的点就是如何在开放式的设计空间中以足够高的效率获得可用的合适的系统拓扑结构。

1.3.4 BG/GP方法

本书的目的在于为多能域系统的自动化和开放式拓扑合成开发出一套集成设计工具。为达到这个目的,需要一种创新的方法,并且该方法需要满足三个主要的需求:多能域设计、自动化合成和开放式拓扑设计。截至目前,大多数设计方法不能完全满足这些特征:可以同时设计多个物理子领域,可以进行高效的分析,以及可以进行拓扑结构和设计参数的并行搜索。有些设计方法做了很好的搜索过程但弱化了分析,有些做了很好的分析却弱化了搜索过程。键合图是能域独立和能进行有效分类的分析模型,它可以快速测定不同类型的可接受或可行的候选设计,从而极大地减少了那些不可行的或不具吸引力的设计所需的分析时间。遗传编程被认为是一种对开放式搜索的强有力工具。键合图和遗传编程这两种方法的结合,被称为 BG/GP 方法,是一种对复杂机电系统设计的更好的方法。BG/GP 方法的一般性流程如图 1.4 所示。其中,设计规范是首先要确定的,包括问题描述、设计对象和设计约束等,然后,键合图被用于动态系统设计的建模和描述。在 BG/GP 方法中,动态系统的键合图描述被用于表示在遗传编程运行过程中每一代设计种群中的每一个候选设计。遗传编程技术是为实现设计自动化的 BG/GP 的组合基础,它具有如下机制:即生成候选设计的初始种群,描述根据指定的适应度函数来评估的每一个设计个体,在种群中重新配置候选设计(通过键合图表示的)的拓扑结构和(或)参数,以及通过在下一代中产生一个候选设计的新的种群来指导设计过程,通常新的种群具有更好的平均性能。