

公理设计

— 发展与应用



(美) 麻省理工学院 Nam Pyo Suh 著

谢友柏 袁小阳 徐华 董光能 等译

AXIOMATIC DESIGN
—ADVANCES AND APPLICATIONS



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



公 理 设 计

——发展与应用

(美) 麻省理工学院 Nam Pyo Suh 著
谢友柏 袁小阳 徐华 董光能 等译
谢友柏 审核

图书在版编目(CIP)数据

公理设计：发展与应用 / (美) 苏, 纳, 皮, 苏著; 谢友柏等译. — 北京: 机械工业出版社, 2004.12
ISBN 7-111-16000-0

Ⅰ. 公



机械工业出版社

Nam Pyo Suh

AXIOMATIC DESIGN—ADVANCES AND APPLICATIONS

ISBN: 0-19-513466-4 (alk. paper)

Copyright©2001 by Oxford University Press, Inc.

This translation of *Axiomatic Design*, originally published in English in 2001, is published by arrangement with Oxford University Press, Inc.

《公理设计》英文版在 2001 由牛津大学出版社出版。

北京市版权局著作权合同登记号: 01—2002—2876

图书在版编目 (CIP) 数据

公理设计: 发展与应用 / (美) 麻省理工学院 Nam Pyo Suh 著; 谢友柏等译. —北京: 机械工业出版社, 2004.5

ISBN 7-111-14329-9

I. 公... II. ①麻...②谢... III. 工艺学 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 030897 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李万字 责任编辑: 庞 晖 版式设计: 霍永明

责任校对: 张玉琴 封面设计: 解 辰 责任印制: 李 妍

北京蓝海印刷有限公司印刷 · 新华书店北京发行所发行

2004 年 9 月第 1 版 · 第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5 · 16 印张 · 2 插页 · 622 千字

0001~4000 册

定价: 56.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

MIT—Pappalardo 机械工程丛书

本书是机械工程领域 MIT - Pappalardo 丛书中的一本。该丛书是在 MIT 由 Neil 和 Jane Pappalardo 慷慨资助出版的。Neil Pappalardo 先生是 MIT 的毕业生，他在 32 年前创建了最早的软件公司之一——医学信息科技有限公司 (MEDITECH)，并将其建设成为在美国医药信息技术行业上领先的公司。Jane Pappalardo 女士毕业于波士顿大学。他们都坚信教育、艺术和公共服务的重要性，他们都是出类拔萃的人物。

MIT 机械工程系的教职员工都很感激 Neil Pappalardo 夫妇。他们不仅为 MIT 机械工程系提供了一个高级教授职位、一个优越的教学实验室和这套系列教材，而且为整个 MIT 奉献了时间和指导。他们为建成这所全美最好的机械工程系尽心竭力。他们对教职员工和学生的信心和信任，在加强学校基础设施、道德建设和未来的声誉等方面起了很大的作用。

大量有价值的教材，特别是由 14 位指定的教授执笔的一系列综合性大学教材，将作为这套丛书的一部分正在撰写。由于时间原因，本书作为第一本出版。

MIT 的编辑很荣幸能与剑桥大学出版社合作承担这套丛书。特别感谢剑桥大学出版社高级副总裁 Barbara Wasserman 和执行编辑 Peter Gordon。他们打算出版一套特色丛书的想法和我们想要提供最有影响教材的需要是这套丛书成功的保证。我们希望这一套丛书将来能在同类图书中成为最出色的。

Rohan C. Abeyaratne

Nam P. Suh

MIT 丛书编辑

译者序

这是一本在设计理论和方法领域中比较新的书。“设计”是人类一项极其重要但是又最为复杂的活动。不论是有意识的或者是无意识的，人在进行其他活动之前，总是要对自己的活动进行设计。活动成功的概率与设计是否正确有直接的联系。所以，设计并不仅仅是设计产品，还可以是设计过程、设计软件、设计材料、设计系统、或设计一个组织机构等。由于设计通常是与智力活动和创造联系在一起而且由于它的复杂性和不可捉摸性，人们往往认为它依靠人的直觉、天赋和经验。但是设计必须发展它的科学基础，这就是设计理论。本书论述了作者和他的同事们在这个方向上前进的一组重要成果。在设计学中存在若干如力学中的牛顿定律一样的公理，它们控制着设计活动的诸多方面而没有例外。遵循这些公理和由之而产生的定理和推理，在设计中就可以理性地思维并导向正确的结果而不必通过失败后的反复修正或在设计中留下不可挽回的后遗症。较之已有理论仅仅停留在物理的和技术的层面，公理设计触及设计活动更深层次的规律，即功能域和信息含量，从而可以控制更大范围的设计过程。这些成果应当认为是设计学在科学基础发展上前进的一大步。

把这本书介绍给我国的读者，是希望引起对理论研究的重视和兴趣。只重视方法和工具是不对的。只有在正确理论的指导下才能形成正确的方法，而工具只是实现方法的手段。

介绍这本书的另一个目的，是希望它能推动我国制造业在国际竞争中能取得更好的成绩。虽然如前面所说，人人都离不开设计，但是装备和产品制造的竞争重任，无疑是要落在装备和产品设计工程师的肩上。现在制造业的竞争是设计的竞争。我们现在是一个制造大国，但是却不是制造强国。问题就在设计！我们的制造业主要依靠引进技术制造，设计竞争能力差距很大。掌握正确的设计理论和方法无疑会加快设计能力的提升。由于长期靠引进技术制造，我们的工程师们（包括工程师教育）比较熟悉在物理域中思维，但是对于设计竞争，更重要的是在功能域中思维。希望这本本能有助于改进我们的思维习惯和教育传统。

介绍这本书的第三个目的是介绍一个范例，即科技工作者如何在理论上创新。正如作者在前言中所提到的，跟随公认的说法比与之对立有很多方便的地方，而老的科技工作者总是希望按照自己的样子来“克隆”年青的科技工作者，但是科学和技术总是要前进的，所以也不能认为这本书把设计理论和方法都说到了。设计涉及到三方面的问题：设计过程控制及其最重要的节点决策，设计中的

知识获取和获取知识所依赖的智力资源。这本书主要讨论了第一个方面。设计理论和方法进一步发展的空间是非常大的。

“公理设计”不是一个最好的书名译法，它不太符合汉语组词的习惯。不能将书名理解为讨论一种特殊的设计，实际上是发现了控制一切设计活动的公理，从而研究如何自觉地运用这些公理以实现正确地设计；也不能认为本书仅仅是讨论设计中的理论问题，实际上在设计公理的指导下，本书系统地介绍了许多行之有效的的设计方法，并附有大量的实例。所以它是一本实用价值非常高的书，可以作为设计工程师必读的材料和工作范本，也可以作为所有工学院学生学习设计课程的优秀教材或教学参考书。

这本书的翻译是集体完成的，其中，前言由陈渭翻译，第1章由谢友柏翻译，第2、4、9章由袁小阳翻译；第3、6章由徐华翻译；第5、7章由董光能翻译；第8章由朱爱斌翻译。全书由陈渭和童燕华进行校对。朱爱斌担任秘书。

全体译者衷心感谢帮助这本书出版的所有同志，没有他们的出色的工作，这本书的问世是不可能的。

中国工程院院士 谢友柏

2004年5月

前言

分析和综合构成了工程，而分析与综合这两者之间又通过反馈相辅相成。合理的综合简化了分析，对被综合的工程系统的严密分析可以从基本理解上提供改进和优化系统的方法。19世纪中叶以前，美国除了军事学校之外没有工程学校，工程是由那些没有正式工程教育背景的人来完成的。为了满足需要，人们以极高的智慧和技艺发明新产品和改进已有的工艺，所有这些智慧和技艺都是建立在他们的本能、训练和经验的基础之上的。

从19世纪中叶开始，建立了许多工程学校，用于培养在科学、数学和工程方面具有坚实基础的工程师。这些学校中的一部分而不是全部的目标之一是将科学原理引进到工程中，使工程实践更严密可靠。这需要通过引进数学和科学原理到所设计的系统来改进工程系统，这一需要支配了20世纪许多工程学校的发展，这些学校为今天的技术优先社会的产生作出了显著的贡献。

术语“工程科学”是用来描述将科学原理和严密的数学工具应用到各种工程问题和系统的工程学科。工程科学通常暗指分析。由于没有科学原理可用于综合过程，工程蕴含的假设之一是工程系统的综合最好也仅能以经验的或试探的方式来完成。这一类想法可以追溯到科学中普遍采用的方法——归纳法。科学的驱动力是为了了解自然的工作原理，通过分解问题直到它可以清楚地被分析和理解来完成。但是，由于综合需要不同的思考方式及不同的原理，归纳法不能扩展到综合过程。

设计作为工程的基础包含综合和分析。在设计中，人的创造性将继续起着重要的作用，但是为使其在教育工程的学生取得工业目标方面更有效，设计必须更加科学化。因此综合过程也需要科学原理。我们需要“分析的工程科学”和“综合的工程科学”。正像物理学、信息学和生物学提供给工程的科学基础，如果设计也能够建立在科学原理和范例的基础之上，设计学科将更强。这样，作为工程的最终目标，除了具有改进工业开发过程的效力外，还能使设计在知识上和教育上更加丰富。

自从首先涉及公理设计的论著《设计原理》出版10年以来，设计的教育、研究和实践都取得了很大的进展。美国的很多大学已经将设计教育引入到他们的工程训练中。其结果是我们可以现在可以在设计领域见到许多活跃的研究者和关于设计的期刊和会议。公司也认识到需要基本的设计方法。由于激烈的竞争，工业界开始认识到手上的设计过程的不可靠、高成本和高风险。当修改不良设计中的问

题和症状导致硬件、软件和系统的低质量、低可靠性及高成本的时候,这种没有经过训练的实践已导致了工期的延误、成本的超出和产品的失败。为了克服这些问题,一些公司已经积极用对基本设计原理的基本理解来训练和充实工程师和设计师。

尽管有了这些进步,但要将设计领域带到能以合理的科学知识来加强基于经验的设计专业知识的水平还需要做许多工作。只有通过不断的努力,我们才能不断提高工业产品的质量和减少通常不良设计带给社会的潜在损害。不幸的是,一些公司的文化仍然是由这样的观点统治,即可以基于经验进行设计,通过样品试验来修改产品和调试软件直到开发出一个可行的方案。我们必须以另一个观点来替代这一错误想法,即从开始就做出正确的设计决策,以消除大量的试验和调试以及服务期中不可预见的产品失效。大学可以通过教给学生能以用于全部科学和技术过程的设计基础知识来完成自己部分的工作。

本书是教授麻省理工学院研究生和全世界许多国家工业公司的工程师以公理设计的成果。实际上,这些学生和工程师通过将理论应用到他们新的设计任务为丰富公理设计作出了很大的贡献。书中给出的例子几乎全部是在教授该课程时产生的,许多情况是由学生在课程和学期自修项目中解出的。他们丰富了作者的經驗,增强了作者对本课题的理解。

本书与《设计原理》在内容上和方法上有实质上的不同。《设计原理》一书写成专题论文形式,而本书更倾向于如高级学院和研究生以及职业工程师的一本教科书。本书总结了过去十年的进展,还包括了新获得的知识和范例研究。在前三章涵盖了公理设计的基本原理后,本书安排了系统、软件、材料和材料处理、制造系统以及产品的设计。

根据作者在给许多工程师和学生授课的经验不难发现,大概是因为这门课的概念性质,公理设计不是一门容易学的课,更不要说精通,没有经过努力就更不容易掌握。为了真正的理解公理设计,学生必须通过应用基本原理到许多设计任务和问题,而将理论引入实践中。学习公理设计的困难可能与学习热动力学的困难在某些方面有些类似。然而一旦学生理解了公理设计,他们就有能力轻松地设计产品、制造系统、软件和新工艺。通过正确的设计,像稳定性和收敛性这类工程问题就变得不成问题或极大的简化,而且优化所需的大量分析与建模也就减少了。

第1章介绍了公理设计理论的关键概念。第2章通过研究仅涉及单功能需求且可以仅仅用信息公理来处理的设计,探讨了强健设计。第3章提出了一些常被纯粹只靠经验工作的人忽视的设计原理及其本质,它涵盖了必须同时满足的多功能需求设计的基本问题。在第1章到第3章的材料基础上,第4章详细说明了复杂系统设计方法。它提出了许多新的想法,例如分解功能需求和设计参数来建立

分层结构的方法和表示系统构架的流程图。因为大部分工程问题都涉及系统，所以第4章对许多工程师来说应该很重要。此外第4章中介绍的系统设计的基本概念还可作为后继章节的讨论基础。

集中于软件设计的第5章显示了采用公理设计理论可以使系统地设计软件变得多么容易。一种专门生成软件的方法——称之为面向目标的软件系统的公理设计(Ado-oSS)——应成为软件设计的新范例。第6章主要讨论制造系统。通过显示如何严格设计制造系统，澄清了“推”和“拉”型制造系统的作用。第7章讨论了公理设计如何被用来将用户的需求转变成新材料和新的材料加工技术的开发。第8章是关于产品的设计，显示如何系统地进行产品设计。最后第9章涉及了复杂性问题，它提出一种理论假设并且揭示了四种不同的复杂性——时间独立的真实和虚拟复杂性与时间依赖的组合与周期复杂性。对于这四种复杂性的理解可能会对关于如何看待设计任务和自然现象产生深远的影响。

作为一名终生教员，在智慧的天堂MIT宽松和支持的环境下，作者在发展公理设计理论上一直得到了极大的优先。作者特别感谢MIT包容挑战广泛接受的观念的新思想新文化。对于所有的大学来讲，最重要的是扶植新的思想和理论。然而当年轻的教授必须在相对短的时间内显示他们能做什么以获得终生教职的环境下，特别是当他们的工作是对权威高级教授已建立的概念挑战时，做到这点是很困难的。即使在学术界，和提出与同时代人所接受的传统理论完全不同思想的人相比，那些跟随已建立的理论和观念的人会得到更多的保护和提升。高级教授按他们自己的模式复制年轻教员的诱惑对于任何一所大学是最严重的威胁之一。

即使在MIT那些出色的系中，MIT的机械系是唯一的和非常强的系。它有很多在许多不同的领域能力出众的人，从经典物理到设计、制造、力学、生物工程、非线性光学、计算机、材料、热和流体科学、网络、控制和精密工程。在过去的十年间，机械系一直致力于三个方面工作，重点改进大学生的教育，改革机械工程的训练，进行对科学知识基础和技术产生深远影响的研究。机械系通过开发新课程来提供合适的内容给学生学习，它已经改进了机械工程的训练从主要基于物理学到基于物理学、信息科学和生物学。它的研究目标着重于研究范围的两个终点（而不是中点）——基础研究和技术发明——其结果对人类和基础知识影响往往最大。公理设计的发展已经实现在研究范围的两个终点有所贡献的希望。

本书的写作是相信它能够不断进化的理性设计科学提供一块小的垫脚石。如果本书能够为学习设计的年轻的头脑提供帮助，如果它能够帮助工业公司提高效能和效率，如果它最终有利于人类，那么就超越了本书的目标。

Nam P. Suh

塞德堡，马塞诸塞州

致 谢

我们都是家族、时间、空间和历史连续中的一部分。在家庭、朋友、同事和更大的社团内在那些丰富了我们的思想和精神的人的眷顾上，我们有一些人较之他人更幸运。我就是这些在职业和个人生活上得益于许多出类拔萃的人的幸运者之一。

由于人太多不能一一列出，但下面这些人必须提到（任一顺序）：Nathan H. Cook, Milton C. Shaw, Herbert H. Richardson, Ernest Ribinowicz, John Hollick, Water L. Abel, Ralph E. Cross, Alex d' Arbeloff, Elmer Schweartz, Neil Pappalardo, Papken Der Torossian, George N. Hatsopoulos, Edwin H. B. Pratt, Sung - Kyu Kim, Sung - Joon Huh, Woo - Choong Kim, Erich Bloch, B. J. Park, Matt Pallaver。虽然有些人可能已不记得我，但他们全都以不同方式影响了我的工作、事业和生活。有一位是小学老师，一位是高中老师，一位是学前班的头，两位是大学的辅导教师，两位是我在工业界工作的上司并慷慨地资助了我的博士教育。其他的是我职业上和工业界的朋友和同事。我十分感谢他们。

建立在教师与学生之间的不可分割的联系使教师职业成为与众不同，这至少是在教师心里。我过去的在摩擦学、设计、制造和材料处理专业的学生都是出色的。我的第一个在公理设计方面的研究生是 Jim Rinderle，然后是 Len Albano, Shinya Sekimoto, Mats Nordlund, Derrick Tate, K. Kaneshige, Jack Smith, Sun - Jae Kim, Hiroshi Igata, Y. Yasuhara, Tae - Sik Lee, Jin Pyung Chung, Yun Kang 和 John Szatkowski. David Wilson 和 Yasuo Suga 也是公理设计研究组的重要成员。我在其他领域的学生，包括 Sang - Gook Kim, Dan Baldwin, Chul Bum Park, Vipin Kumar, Turker Oktay, Sung Won Cha, Jonathan Colton, Jason Melvin, Amir Torkaman 和 Yoddhojit Sanyal, 应用公理设计到他们的项目。我同时也幸运地拥有出色的博士后研究生 Sung - Hee Do 和 Hod Lipson，他们全都在这个领域作了他们自己独特的贡献。许多访问教授 G. Sohlenius, H. Nakazawa, Susan Finger, Kyung - Jin Park, 和 Karim Ker 使得这个研究领域成为令人兴奋的、刺激的和成果丰富的领域。我将珍惜我和 Gunnar Sohlenius 首先通过公理设计而发展的长期友谊。我也分享我与 David Cochran 的相互影响，他在发展基于公理设计的制造系统设计的坚实基础上作了许多贡献。

在 NIST 关于质量控制的研讨会上，一次与 Hilarrio L. "Larry" Oh 的偶然相遇开始了我们之间长期的工作关系和友谊。他和我一起在 MIT 和许多工业公司

教公理设计。他对公理设计和强健设计作出了许多重要贡献并且解决了许多重要的工业问题，其中一些在本书中进行了描述。

我最幸运的是遇到了 Carol A. Vale，一个出色的统计学家和极好的编辑。她审阅了全部手稿，使得本书更易读，提出了许多有价值的修改和增加的建议，找出了我的全部错误。我非常地感谢她。我也非常地感谢 Peter Gordon，牛津大学出版社的责任编辑，他提出了许多有益的编辑上的意见和建议。我很高兴地向 G. Sohlenius, Jon Colton, Milton Shaw, Tae - Sik Lee, 和 Anna Thornton 致谢，他们在本书写作的早期阶段也阅读了一些章节并且提供了有益的意见。牛津大学出版社的 Karen Shapiro 承担了发行本书的编辑责任。

在 MIT 教公理设计总是具有挑战性。MIT 的学生总是好奇的、聪明的和勤奋的。对他们的想象和思想进行挑战不是一件轻松的事。我感谢那些选修这门课的学生，是他们使得写这本书的任务变得愉快。我和几个从前的学生和同事从教研研究生的公理设计课程中得到享受。我要感谢 Larry Oh, Mats Nordlund, Leonard Albano 和 Hod Lipson 对这门课的有价值的意见。

世界各地许多公司好意邀请我到他们中间给他们的工程师教公理设计。他们给了我强有力的支持，使得我在他们公司的教学经历成为乐趣，我欠他们很多。我特别地感谢 Papken Der Torossian, William Hightower, Jeff Kowalski, Dan Cote, Boris Lipkin 和硅谷集团公司的 Reese Reynold, 大字集团高级工程研究所的 Jin - Kyun Kim, 福特汽车公司的 Larry Smith, Carol Vale 和 Nathan Soderborg, Saab 动力学的 Billy Frederickson 和 Mats Nordlund。

MIT 的 Pamela McCarthy 给了我所需要的全部支持，使得写这本书成为可能。她是那种不平常的人，积极地促进事务和出色地完成工作，而且总是带着微笑。与她一起工作是我的幸运。

本书是在我领导 MIT 机械工程系期间完成的，MIT 机械工程系是美国此类系中排名最前的系。此时，系正处在一个转移到许多新的令人激动的教育和智力领域的过渡时期。我最幸运的是与许多在他们自己学科领先的出色的同事一起工作。他们是有竞争力和多才多艺的，但是同时，我发现我的每个同事又是公正、献身、人道和人性的，他们形成了一个强大的学者社团，这很难在任何其他地方找到。我特别幸运的是与 Rohan Abeyarantne 和 Bora Mikie 一起担任系的领导工作。我感谢我的所有同事的学院精神。

在我的生活和个性形成和成长上，任何人都没有我妻子 Young Ja 更值得我信赖和感谢。她是我的激励和精神支柱。她远超过我的生活伙伴，她的爱一直支撑和鼓励着我。她为我牺牲了很多，容忍我的缺点，将她最好的年华用来抚育我们四个可爱的女儿，现在她们都有了她们自己合适的职业。现在她又承担了新的任务，忙于照顾孙儿 Kristian, Nicholas, Madeleine 和 Henry，确保他们成长和追

寻他们的梦。她使我们的家庭成为幸福和兴旺的家庭。我真的很幸运。最后，有四个最可爱和不平常的女儿和两个女婿，我大概是世界上最骄傲的父亲。

Nam P. Suh 塞德堡, 马塞诸塞州

关于 CIRP 设计丛书的介绍

当第二次世界大战摧毁了欧洲国家的生产能力后，一个国际性的学术组织——国际产品工程研究协会（International Institution for Production Engineering Research, CIRP）在 1950 年成立，从事以研究和教育来促进产品工程的发展。现在 CIRP 由来自每个成员国的 15 个正式成员组成，目前拥有来自全球的工业化国家的大约 250 名正式成员和 250 名通讯会员。

为了促进全球范围内的设计研究和教育，牛津大学出版社和 CIRP 签订合同建立 CIRP 设计丛书。本书《公理设计——发展和应用》最初是同意由 CIRP 设计丛书负责。然而，在麻省理工学院关于机械工程的《MIT - Pappalardo》丛书建立后，牛津大学出版社决定在两者共同负责下出版。

Torsten Kjellberg

For CIRP

斯德哥尔摩，瑞典

目录

MIT—Pappalardo 机械工程丛书

译者序

前言

致谢

关于 CIRP 设计丛书的介绍

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 设计的现状	1
1.3 谁是设计师? 如何设计? 什么是设计?	2
1.4 公理设计的终极目标是什么?	5
1.5 公理在科技发展中的作用: 历史的透视	6
1.6 公理法与计算法的关系	8
1.7 公理设计的框架	9
1.7.1 域的概念	9
1.7.2 定义	11
1.7.3 由用户需要到功能需求的映射	13
1.7.4 第一公理: 独立公理	15
1.7.5 理想设计、冗余设计和耦合设计: DPs 和 FRs 的相对数目问题	21
1.7.6 关于耦合设计解耦的例子	22
1.7.7 分解、反复迭代和层次	28
1.7.8 并行工程的要求	36
1.7.9 第二公理: 信息公理	37
1.7.10 降低信息含量: 强健设计	43
1.7.11 通过 DPs 集成来减少信息含量	49
1.7.12 不完全信息的设计	49
1.8 设计师经常犯的错误	51
1.9 公理设计与其他方法论之间的比较	56
1.10 小结	57
参考文献	58
附录 1A 推理和定理	59

习题	63
第2章 单功能需求设计、信息公理和强健设计	65
2.1 引言	65
2.2 单功能需求设计的概述	65
2.2.1 单功能需求设计与多功能需求设计	66
2.2.2 信息量最小化	67
2.3 单功能需求设计的设计论点	70
2.4 单功能需求设计与信息量	71
2.4.1 无约束的单功能需求设计	71
2.4.2 带约束的单一 FR 设计	83
2.4.3 带约束的非线性的单 FR 设计	84
2.5 消除偏差与减小方差	91
2.6 强健设计	92
2.6.1 强健设计的公差确定	92
2.6.2 设计和制造中的噪音对 FRs 的影响	93
2.6.3 非线性设计的强健性和响应率	96
2.7 设计过程	97
2.8 小结	98
参考文献	98
附录 2A 厚壁管中的应力	99
附录 2B 离散随机变量: 期望值、方差和标准偏差	101
附录 2C 连续随机变量: 期望值、方差、标准偏差和多元随机变量	102
习题	104
第3章 多功能需求设计	106
3.1 引言	106
3.2 多 FR 设计公理理论的简述	109
3.3 独立公理与信息公理及其在多 FR 设计中的应用	111
3.4 理想的多 FR 设计	112
3.5 无耦合和解耦的多 FRs 设计	121
3.5.1 公差在无耦合的、解耦的和耦合设计中的传递及其在设计强健性中的应用	121
3.5.2 多 FR 设计范例	123
3.6 多 FR 设计的信息量、复杂度和噪声	139
3.6.1 复杂性与信息量之间的关系	140
3.6.2 确定无耦合设计、解耦设计与耦合设计的信息量	143
3.6.3 设计过程的容许噪声	149

3.7 集成 DP 以减少信息量	150
3.8 非线性多 FR 设计	151
3.9 调度规则与进程的设计: 避免发生交叉冲突	153
3.9.1 调度规则与独立公理	155
3.9.2 日程规划	155
3.10 强健设计的公理设计基础	159
3.10.1 单 FR 设计	159
3.10.2 多 FR 设计	162
3.10.3 多 FR 设计的信息量	164
3.11 小结	170
参考文献	170
附录 3A 两个设计公理的独立性	170
附录 3B 关于信息量与复杂性的推理和定理	173
附录 3C 无偏差情况下解耦设计与无耦合设计的成功率	174
附录 3D 为什么要避免耦合设计	180
习题	182
第 4 章 系统设计	187
4.1 引言	187
4.2 系统设计的相关问题	189
4.3 系统的分类	190
4.4 固定系统的公理设计理论	191
4.5 大系统的设计和操作	195
4.5.1 大系统问题的引入	195
4.5.2 什么是大系统?	195
4.5.3 大柔性系统的定义	196
4.5.4 大柔性系统的公理设计	197
4.5.5 通过 DP 的物理集成来进行系统综合	199
4.5.6 最佳大柔性系统的设计	199
4.5.7 大系统设计的相关定理	200
4.6 固定系统结构的表征	200
4.6.1 设计域中 FRs, DP 和 PVs 分解的层次: 系统结构的第一种表示法	201
4.6.2 设计矩阵和模块连接图: 系统结构的第二种表示法	203
4.6.3 流程图: 系统结构的第三种表示法	204
4.6.4 系统控制命令 (SCC)	206
4.7 系统的数学建模、仿真和优化	227

4.8 系统结构流程图的应用	228
4.9 关于人机界面	229
4.10 小结	229
参考文献	230
习题	231
第5章 软件的公理设计	232
5.1 引言	232
5.2 软件设计的公理设计理论	236
5.2.1 软件公理设计过程回顾	238
5.2.2 流程图的应用	241
5.3 软件设计过程	241
5.4 面向对象的软件系统的公理设计	258
5.4.1 面向对象技术	258
5.4.2 修订 OOT 与公理设计的兼容性	262
5.4.3 面向对象软件系统的公理设计基础	263
5.5 设计师用的面向对象软件系统的公理设计: Acclaro 软件	271
5.5.1 概述	271
5.5.2 Acclaro 软件的公理设计	272
5.5.3 FR ₁₁₄₁ 分支的公理设计	273
5.5.4 面向对象模型: 自下而上的方法	275
5.5.5 用系统构架编程	276
5.6 硬件/软件系统实时控制的快速成型软件设计	277
5.7 一个理想的软件系统	282
5.8 与软件设计相关的其他问题	284
5.8.1 可重用性	284
5.8.2 扩展性	284
5.8.3 软件设计中的知识和信息需求	284
5.9 软件设计中信息公理的含义	286
5.9.1 信息公理的定性执行	286
5.9.2 信息量的定量测量	286
5.10 小结	287
参考文献	288
习题	289
第6章 制造系统的公理设计	292
6.1 引言	292