

信息物理系统计算基础

概念、设计方法和应用

[德] 迪特玛 P. F. 莫勒 (Dietmar P. F. Möller) 著

张海涛 罗丹琪 译

Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems
Concepts, Design Methods, and Applications

Computer Communications and Networks

Dietmar P.F. Möller

Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems

Concepts, Design Methods, and
Applications

Springer



机械工业出版社
China Machine Press

计 算 机 科 学 丛 书

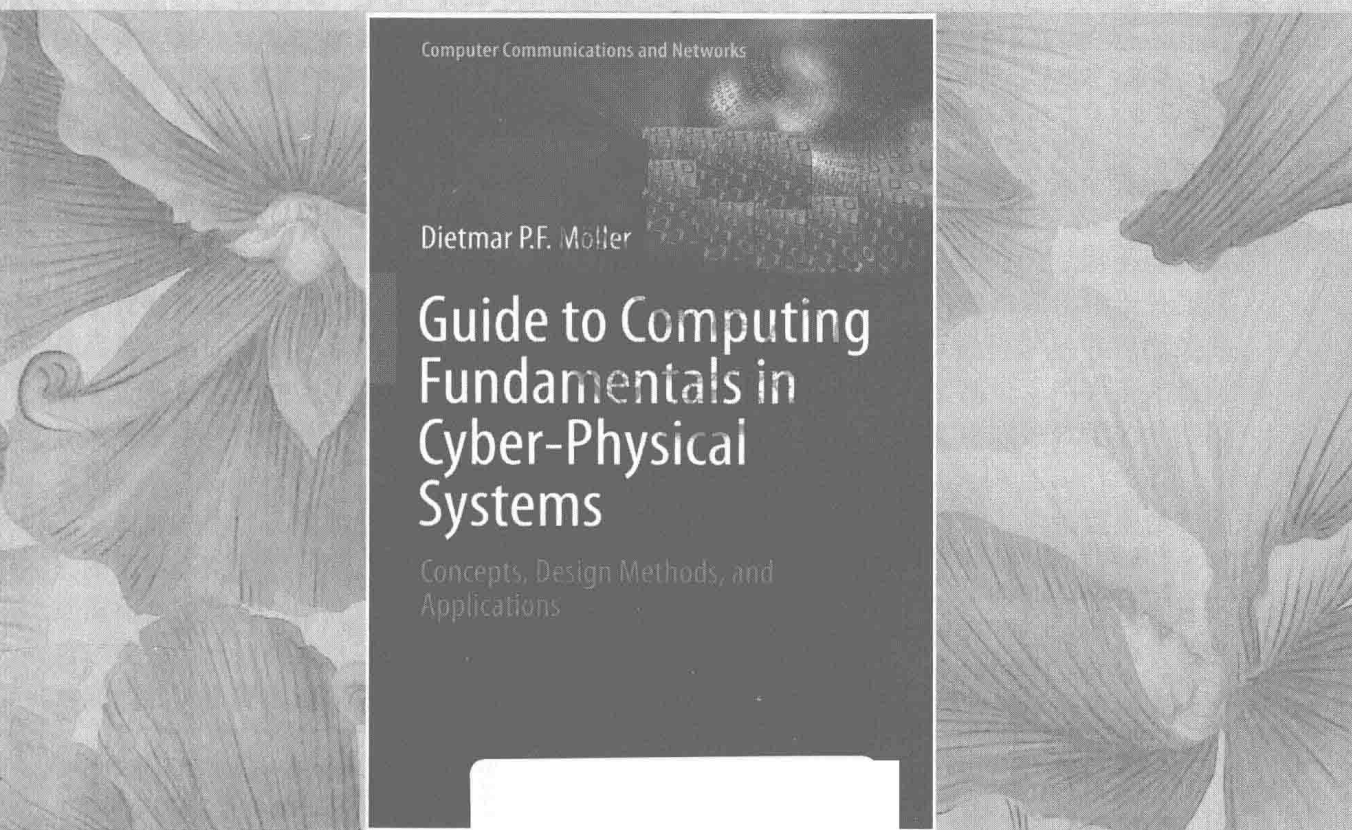
信息物理系统计算基础

概念、设计方法和应用

[德] 迪特玛 P. F. 莫勒 (Dietmar P. F. Möller) 著

张海涛 罗丹琪 译

Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems
Concepts, Design Methods, and Applications



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

信息物理系统计算基础：概念、设计方法和应用 / (德) 迪特玛 P. F. 莫勒 (Dietmar P. F. Möller) 著；张海涛，罗丹琪译. —北京：机械工业出版社，2018.2

(计算机科学丛书)

书名原文：Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems：Concepts, Design Methods, and Applications

ISBN 978-7-111-59145-0

I. 信… II. ① 迪… ② 张… ③ 罗… III. ① 互联网络—应用 ② 智能技术—应用
IV. ① TP393.4 ② TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 030451 号

本书版权登记号：图字 01-2017-2014

Translation from the English language edition: *Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems: Concepts, Design Methods, and Applications* by Dietmar P. F. Möller.

Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2016.

This Springer imprint is published by Springer Nature.

The registered company is Springer International Publishing AG.

Allrights reserved.

本书中文简体字版由 Springer 权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书从基本概念、设计方法和应用实例三个方面入手，系统全面地介绍了嵌入式系统、信息物理系统、物联网、普适计算等方面的基础知识和基本原理，并介绍了信息物联网融合系统在数字制造 / 工业 4.0 方面的应用场景和社会影响。

本书既可以作为相关专业高年级本科生和研究生的教材，也适于相关领域的学者和工业界人士阅读。

出版发行：机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码：100037）

责任编辑：唐晓琳

责任校对：李秋荣

印 刷：北京瑞德印刷有限公司

版 次：2018 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

开 本：185mm×260mm 1/16

印 张：18

书 号：ISBN 978-7-111-59145-0

定 价：99.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

客服热线：(010) 88378991 88361066

投稿热线：(010) 88379604

购书热线：(010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱：hzsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问：北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的优势，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，计算机学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的计算机产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对计算机教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其计算机科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀计算机教材将对我国计算机教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与Pearson, McGraw-Hill, Elsevier, MIT, John Wiley & Sons, Cengage等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出Andrew S. Tanenbaum, Bjarne Stroustrup, Brian W. Kernighan, Dennis Ritchie, Jim Gray, Alfred V. Aho, John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman, Abraham Silberschatz, William Stallings, Donald E. Knuth, John L. Hennessy, Larry L. Peterson等大师名家的一批经典作品，以“计算机科学丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。大理石纹理的封面，也正体现了这套丛书的品位和格调。

“计算机科学丛书”的出版工作得到了国内外学者的鼎力相助，国内的专家不仅提供了中肯的选题指导，还不辞劳苦地担任了翻译和审校的工作；而原书的作者也相当关注其作品在中国的传播，有的还专门为其书的中译本作序。迄今，“计算机科学丛书”已经出版了近两百个品种，这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也被越来越多实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着计算机科学与技术专业学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外计算机教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzsj@hzbook.com

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

近年来，全球的制造业强国都在全面推动以数字化、网络化、智能化为特征的新一轮工业革命，德国的“工业 4.0”和我国的“中国制造 2025”国家战略就是其中的典型代表，其核心目标都是利用信息技术提升当前制造业的智能化水平，而信息物理系统（Cyber-Physical Systems, CPS）则是实现这一目标的核心技术手段。基于 CPS 的设计思想，制造企业首先在制造设备层面实现互联互通和信息共享，然后在此基础上实现生产过程的智能化管控，最终实现各个生产环节的协同运作，从而提升生产效率，打通整个价值链，实现社会化生产。

信息物理系统是信息资源和物理世界有机融合和深度协作的新一代网络化智能系统，它集成计算、通信与控制能力于一体，使物理系统具有动态感知、实时分析、科学决策、精准控制和远程协作等功能，解决生产制造、应用服务过程中的复杂性和不确定性问题，提高资源配置效率，实现资源优化，具有重要而广泛的应用前景，尤其在智能制造、智能交通、智能家居、智能电网、远程医疗、航空航天等领域。虽然信息物理系统的概念来源于嵌入式计算系统和网络计算的融合，但其涉及的技术涵盖了嵌入式计算、传感器、通信、网络、控制、软件工程等信息技术领域的诸多方面，因此，信息物理系统在推动新一轮工业革命的同时，也带来了新的技术融合挑战。

本书是一本介绍信息物理系统相关概念和技术的基础教材，内容基本涵盖了信息物理系统的所有方面。本书首先介绍了系统的基本概念、数学模型、分析方法以及嵌入式计算系统等，然后，在此基础上对信息物理系统进行了详细的描述和深入的分析，接着对物联网和普适计算这两个跟信息物理系统非常相关的概念和技术进行了介绍，并从软件工程的视角分析了信息物理系统的设计流程，最后，本书介绍了信息物理系统在数字制造/工业 4.0 以及未来社会生活中的应用情况。另外，本书非常注重理论与实践相结合，在每章介绍完基本技术内容后，都有实际的应用案例分析，使读者能从具体的应用中更好地理解书中所介绍的技术原理。本书既可以作为相关专业高年级本科生和研究生的教材，也适用于相关领域的学者和工业界人士。

感谢薛玉磊、耿欣、徐政钧、孙滋唱、杜沛伦同学，他们在本书翻译过程中帮助校对了部分书稿，感谢机械工业出版社的编辑在本书翻译过程中提供的帮助。由于时间仓促以及译者能力所限，翻译过程中的瑕疵和错误在所难免，欢迎各位读者批评指正。

张海涛

2017 年 11 月

北京邮电大学

不断变化的市场需求推动着制造业和汽车业的发展。当前，消费者追求的不仅是某件单一的商品（例如一辆汽车），而更多的是寻求一种打包式的综合体验。制造商的生产过程也正在转向自动化，在降低成本的同时提高产品的质量、生产率、安全性、生产速度和竞争力。不断变化的技术投资环境深深地影响着商品价值链、内部协作以及客户对产品与服务的体验。汽车行业在制造业定义的自动化生产范式中一直走在最前列。本书概述了在制造业数字化进程中获得的研究成果和经验。

数字制造/工业 4.0 是在充分适应自动化生产系统条件下的制造业技术转型。因此，数字化技术的发展趋势正集中在制造自动化的新方法上。本书涉及数字化模型的使用、面向制造业的过程规划和控制方法，并将它们与实际的制造子系统、制造部件（硬件）和工具（软件）联系起来。

本书的主要特点是通过信息物理系统建立网络化的虚拟计算机（信息世界）和制造零部件（物理世界）之间的联系。在某种意义上，信息物理系统可以作为一个强大的数字化平台，其具有结构良好、集成度高的特点，而且在制造业的特定使用环境中具有有限的复杂性。因此，以信息物理系统为基础形成的制造系统能够根据外部要求自主地控制、优化和配置特定的物理部件。

本书的核心研究内容涉及一套先进的方法学，该方法学将制造系统部分作为信息物理系统中的物理组件，而将因特网作为信息物理系统中必不可少的信息部分。本书介绍了一系列关于信息物理系统的创新方法，包括当前正在进行的系统和软件工程等方面的研究工作。本书介绍了如何准确地分析信息物理系统的内在复杂性，以及如何在不同的操作条件和场景下预测系统的工程行为，从而在数字制造/工业 4.0 背景下，为当前新兴的技术问题提供充分的学术性解决方案。本书的章节组织合理，表现出作者对学术的严谨性和专业性。因此，本书可以作为相关人员进入信息物理系统研究领域的重要读物，为数字制造/工业 4.0 技术的普及和发展提供了新的参考资料。

我强烈推荐 Dietmar P. F. Möller 教授的这本学术著作，它适合学生、相关领域的学者和热衷于学习先进制造方法学的工业界人士阅读。我相信本书所介绍的方法将在某种程度上改变传统制造与汽车行业中的基本理念，从而带来更好的创新与数字化革命。由于受到大数据、高性能计算、云计算、移动技术和社交媒体的影响，数字化将引领新一波的消费浪潮。尤其对于汽车企业，无论是生产方面，还是客户管理方面，都将开拓新的业务模式，并获取不同的机会。我认为将会有许多读者通过阅读本书而在数字制造和信息物理系统原理上拓宽视野。

K. B. Akhilesh

印度科学院，管理学系

印度班加罗尔

本书的目标是提供全面的、深入的、先进的信息物理系统基本原理及其应用的综述，介绍信息物理系统的基本方法，清楚地展示大量的信息物理系统在整个生产制造工作中的重要位置，并为理解信息物理系统的复杂性提供一个理想的框架。为了这个目标，在处理本书的材料时做了一些选择。本书采用自顶向下的方法介绍系统和嵌入式计算系统的基本原理，并重点讨论信息物理系统和物联网的需求。此外，本书还介绍了普适计算的概念，并描述了一系列基于当前数字化技术的信息物理系统相关的智能产品和服务，这些技术涉及嵌入式、微型计算机、传感器、标签、网络、智能设备等。本书还提供了一个学习框架，使读者可以从中学习到互相关联的知识体系。如果没有这样的参考学习框架，读者就要分别考虑那些彼此孤立和晦涩的术语、标准及工程实践案例。因此，本书的内容涵盖了信息物理系统的所有方面，并为数字制造/工业 4.0 中与信息物理系统相关的诸多问题提供一个技术框架。书中的主题包括作为信息物理系统典型应用场景的定制化生产、网络化制造、开放式和封闭式生产线等，以及它们在系统和软件工程中的相关技术方法。

首先，本书介绍了系统研究的概况，并介绍了其四个基本步骤：（1）建模；（2）建立数学方程，使用输入、输出和状态变量的标准形式描述系统；（3）分析系统；（4）设计系统。此外，还介绍了在嵌入式计算系统中系统扩展的数学背景。嵌入式计算系统是针对特定应用或产品的基于计算机的专用系统，书中对其作为信息物理系统平台的重要性进行了讨论。

然后，本书详细地描述了新一代的工程系统——信息物理系统，它和物联网是数字制造/工业 4.0 范式中最重要的重要组成部分。物联网是一个使用标准因特网协议簇（TCP/IP）为全球数十亿用户提供服务的互联计算机网络系统。在此基础上，本书还介绍了普适计算（也称为泛在计算），并对当前相关技术（智能物体）进行了介绍，包括嵌入式、传感器、标签、网络、其他（移动、可穿戴、无线）智能设备，以及智能环境（嵌入式计算系统、传感器执行器网络）和智能交互（设备、环境和任何事物之间的紧密集成与协作）等。针对上述方法本身的复杂性，系统和软件工程是一种基于特定的思维模式及基本原理设计复杂技术系统的跨学科方法，它将信息物理系统作为数字化制造系统/工业 4.0 中智能化和网络化的组件，称为智能工厂方法。

然而，本书不能详细地描述信息物理系统和数字制造/工业 4.0 中所有的创新内容。因此，读者可以参考每章后列出的补充材料，例如教材、参考指南、用户手册等，以及书中涉及的几个主题的网络资料。

最后，本书从不同的工业实践和学术研究中总结了一些实际的案例研究，以说明数字制造/工业 4.0 背景下的信息物理系统相关技术的实际应用情况和正在进行的研究工作。

本书可作为信息物理系统相关大学课程的教材或参考书，也可供计算机科学、电子与计算机工程、信息技术和信息系统、应用数学、运筹学以及商务信息和管理等相关专业的学生阅读。这本书的内容对于那些对信息物理系统设计感兴趣的研究人员也非常有用。公

司中相关部门的工程师也可以使用书中描述的原则来进行产品设计。

如果读者从未接触过信息物理系统相关的技术方法,可能很难快速阅读和理解书中的材料,因为信息物理系统和数字制造/工业 4.0 是一个建立在计算机科学、工程、数学、运筹学等学科之上的多学科交叉领域。具体的案例研究已经包括在相关的主题中,以帮助读者理解和掌握书中的技术内容。读者需要对概率统计和微积分有一定的了解,最好具有一些系统和软件工程方面的经验。

本书可以作为一门课程的主教材,其内容可以覆盖一个季度(30 小时)或一个学期(45 小时)的课程。教师可以自主选择主题,并添加自己的案例研究。本书还可用于自学,供相关领域工程师和科学家进行在职培训,以及作为信息物理系统与数字制造/工业 4.0 的从业人员和研究人员的参考书。

对于使用本书作为教材的教师,可以从 www.springer.com/book/9783319251769 下载各种教学辅助材料,包括一整套用于讲课的幻灯片和所有课堂录像^①。

本书分为 8 章,每章可以独立阅读,也可以连续阅读。

第 1 章介绍了系统研究的基本内容,包括四个基本步骤:(1)建模;(2)建立数学方程,使用输入、输出和状态变量的标准形式描述系统;(3)分析系统;(4)设计系统。该章还基于可控性、可观测性和可识别性理论介绍了线性系统中成分分析的概念,并通过分析其行为或复合结构介绍了线性系统的解析方法。最后,给出了确定系统稳态误差的方法,该分析方法描述了一个系统随着时间推移到无穷时输入和输出之间的差异。

第 2 章介绍了嵌入式计算系统的相关概念及其硬件结构,以及一种确定嵌入式计算系统设计指标的方法,该方法定义了特定需求规格下的设计准确性。此外,该章详细地介绍了针对不同控制规律的数学符号以及软硬件协同设计的主要方法。

第 3 章总结了第 1 章和第 2 章的技术内容,并在此基础上介绍了信息物理系统的相关概念,该章的目标是确保不同工程和学科背景的读者对信息物理系统有相同的理解。信息物理系统通过在物理系统中添加信息功能,将计算和通信能力嵌入物理过程,并与物理过程进行交互。因此,第 3 章专注于信息物理系统的设计建议,根据信息物理系统的需求突出相应的设计方法。信息物理系统涵盖了极其广泛的应用领域,通过采用抽象的技术知识和设计工具,能够更方便地对系统进行设计,并通过将最佳实践应用于信息物理应用程序,设计更可靠的信息物理系统。技术和经济方面的驱动力创造了一个能够实现一系列新功能的信息物理环境。同时,该章还详细地描述了智慧城市和大量信息物理系统应用主题。智慧城市以数字化技术为基础,介绍了如何利用互联网来建立更有效的智慧城市基础设施和服务。

第 4 章介绍了使用标准互联网协议簇(TCP/IP)为全球数十亿用户提供服务的互联计算机网络系统,并介绍了其使用的相关技术,然后详细地介绍了无线射频识别技术(RFID)、无线自动识别技术以及无线传感器网络技术,这些技术在远程环境监测和目标跟踪等方面有着重要的应用。这些应用是由更小、更便宜、更智能的传感器所实现的。该章还介绍了电力线通信技术在智能家居领域的应用情况。

第 5 章对普适计算相关技术(智能物体)进行了介绍,包括嵌入式技术、传感器、标签、

① 关于本书教辅资源,需要的教师可与施普林格亚洲有限公司北京代表处联系,电话:010-8267 0211-895,电子邮件:parick.chen@springer.com。——编辑注

网络、其他（移动、可穿戴、无线）智能设备，以及智能环境（嵌入式计算系统、传感器执行器网络）和智能交互（设备、环境和任何事物之间的紧密集成和协作）等。因此，该章涵盖了普适计算和相关应用中涉及的标签、传感和控制等重要主题（例如自治系统），并对其复合结构和容错行为进行了分析。

第6章介绍了系统和软件工程的基本概念及相关技术。作为一种跨学科的工程技术方法，其主要侧重于在系统的生命周期中如何成功地设计、实施、评估和管理复杂的工程系统。该章还讨论了信息物理系统的设计挑战以及如何使用 Cradle 进行需求定义和管理。Cradle 是一个系统工程和需求管理工具，可将整个项目生命周期整合到一个大规模的、可扩展的、集成的多用户软件中。此外，该章还介绍了软件工程的相关概念，尤其是 V 模型和敏捷软件开发方法，以及信息物理系统中软件设计的不同要求。

第7章首先简要介绍了制造业和能源技术及其在工业革命方面的机会，还介绍了智能制造、敏捷制造和智能工厂相关的数字制造技术，它们是数字制造/工业 4.0 的重要基础。根据这些知识，该章还介绍了个性化生产的概念，这是智能工厂领域的重要应用，也涉及网络制造一体化行业 and 智能供应链的理念，介绍了产品数据在互联网上共享的服务宗旨。此外，还讨论了开放式和封闭式生产线的范例，以及数字制造/工业 4.0 的网络安全方面的重要议题。最后，该章用 6 个在工业和学术研究领域的案例来深入探讨数字制造/工业 4.0 项目。

第8章介绍了由现代全球化的数字化工作环境与制造业的发展带来的技术变化，并介绍了技术在未来工作生活中的社会影响。因此，该章涉及数字化和自动化对未来经济、社会和组织挑战。该章还介绍了在数字制造/工业 4.0 方面的工作领域中不断变化的需求。同时，向读者介绍了更多的产品个性化定制以及全球数字化转型的主要概念。

除了方法和技术内容外，本书中的所有章节均包含了章节相关的深入理解问题（练习），以帮助读者确定是否获得了所需的知识，判断可能的知识差距，并解决存在的问题。此外，所有章节还包括了进一步阅读的参考文献和阅读建议。

我要特别感谢内布拉斯加大学林肯分校的 Patricia Worster 对校对工作提供的帮助，感谢 Springer 出版社的 Simon Rees 帮助协调出版社和作者之间的工作。此外，还要感谢 Simulation Science Center Clausthal-Göttingen 的 Alexander Herzog，根据我的草图画出本书的插图。同时，我衷心地感谢已发表的信息物理系统相关材料的所有作者，书中直接或间接引用了他们的材料，感谢他们为本书做出的贡献。

最后，我要深深地感谢我的妻子 Angelika、女儿 Christina 以及孙子 Hannah 和 Karl，感谢他们的鼓励、耐心和理解。

Dietmar P. F. Möller

德国，克劳斯塔-采勒费尔德

出版者的话	
译者序	
序言	
前言	
第 1 章 系统概述	1
1.1 系统研究	1
1.2 标准的系统描述形式	6
1.2.1 输入输出描述	6
1.2.2 状态变量描述	7
1.3 可控性、可观测性和可识别性	11
1.4 线性系统模型的分析方案	14
1.4.1 使用拉普拉斯变换的状态方程的解	16
1.4.2 线性向量方程组的特征值	17
1.5 系统稳态误差	18
1.6 系统稳定性分析案例研究	19
1.7 练习	21
参考文献	21
第 2 章 嵌入式计算系统概述	22
2.1 嵌入式计算系统	22
2.2 嵌入式计算系统的硬件架构	25
2.2.1 可编程逻辑器件	26
2.2.2 可编程门阵列	28
2.3 设计指标	32
2.4 嵌入式控制系统	34
2.4.1 控制	35
2.4.2 反馈控制	35
2.4.3 嵌入式控制系统的反馈组件	38
2.5 软硬件协同设计	42
2.6 案例研究：基于 FPGA 的 CPU 内核	45
2.7 练习	49
参考文献	50
第 3 章 信息物理系统概述	51
3.1 信息物理系统	51
3.2 信息物理系统设计建议	55
3.3 信息物理系统需求	59
3.3.1 需求工程	59
3.3.2 互操作性	60
3.3.3 实时系统	60
3.3.4 GPU 计算	61
3.4 信息物理系统应用	62
3.4.1 通信	64
3.4.2 消费者交互	64
3.4.3 能源	65
3.4.4 基础设施	67
3.4.5 健康保障	69
3.4.6 制造	71
3.4.7 军事	73
3.4.8 机器人	74
3.4.9 交通	76
3.5 智慧城市和万联网	78
3.6 案例研究：信息物理车辆跟踪系统	80
3.6.1 车辆跟踪系统	80
3.6.2 基于 RFID 的车辆跟踪系统	81
3.6.3 需求分析	82
3.6.4 进一步的研究	83
3.7 练习	84
参考文献	84
第 4 章 物联网概述	89
4.1 物联网	89
4.2 射频识别技术	92
4.3 无线传感器网络技术	96
4.3.1 传感器技术	96
4.3.2 传感器网络	97
4.3.3 无线传感器网络	100
4.4 电力线通信	102
4.4.1 物联网和电力线通信	104
4.4.2 智能电网	105
4.4.3 智能家居能源管理	107
4.5 RFID 应用	107
4.6 案例研究：行李跟踪系统	110
4.7 练习	114

参考文献	116	6.5.1 在港口和船舶上跟踪和监测集装箱	189
第5章 普适计算	119	6.5.2 跟踪和监测从海港运输到无水港的集装箱	190
5.1 普适计算发展史	119	6.6 练习	193
5.2 普适计算基础	121	参考文献	194
5.2.1 在普适空间中学习	122	第7章 数字制造和工业4.0	196
5.2.2 智能家居和电力线通信	125	7.1 制造业简介	196
5.2.3 普适计算的核心特性	128	7.1.1 智能和敏捷制造	198
5.2.4 普适计算形式化用例	130	7.1.2 智能工厂	201
5.3 智能设备：组件和服务	131	7.1.3 工业4.0	206
5.4 标记、传感和控制	133	7.2 个性化生产	209
5.4.1 标记	133	7.3 网络制造一体化工业	210
5.4.2 传感	135	7.4 开放式和封闭式生产线	212
5.4.3 控制	138	7.5 数字制造/工业4.0的信息安全	213
5.5 普适计算中的自治系统	141	7.6 数字制造/工业4.0案例研究	216
5.6 案例研究：机器人操纵器	143	7.6.1 汉诺威中心的生产工程（PZH）方法	216
5.7 练习	146	7.6.2 钢铁行业的方法	221
参考文献	147	7.6.3 博世软件创新方法	224
第6章 系统和软件工程	150	7.6.4 保险业务方法	228
6.1 系统工程简介	150	7.6.5 德国工业4.0工作组方法	231
6.1.1 系统工程标准 ISO/IEC 15288	153	7.6.6 美国数字制造与创新设计研究所方法	234
6.1.2 自顶向下的系统工程方法	160	7.7 练习	236
6.1.3 开放式机电一体化自动化工程平台	163	参考文献	236
6.2 信息物理系统中的设计挑战	164	第8章 未来社会生活中的影响	239
6.2.1 使用 Cradle 的需求定义和管理	166	8.1 简介	239
6.2.2 需求定义与管理活动	167	8.2 经济、社会和组织方面的挑战	240
6.2.3 INCOSE 系统工程手册（3.2.2 版本）可追溯性	178	8.3 在工作中改变需求	241
6.3 软件工程简介	181	8.4 产品个性化和全球影响力的变化因素	243
6.3.1 V 模型	182	8.5 练习	245
6.3.2 敏捷软件开发方法	184	参考文献	246
6.3.3 V 模型与敏捷软件开发方法的比较	185	术语表	247
6.4 信息物理系统软件设计需求	186	索引	254
6.5 海域案例研究	189		

系统概述

本章首先简要介绍系统的研究概况。1.1节介绍建模、建立数学方程、分析和设计四个步骤。1.2节介绍系统研究的第二步，参照输入、输出的标准形式和系统的状态变量建立描述系统的数学方程。1.3节介绍基于系统可控性、可观测性和可识别性的理论线性系统的组件分析的主要概念，它们以数学符号形式显示了在其假设下可以实现的内容。1.4节介绍线性系统的解析方法，通过分析它们的行为或复合结构来检查系统对输入需求的响应。1.5节介绍确定系统的稳态误差的方法，这种分析方法定义了随着时间的推移，系统在输入和输出之间的差异。1.6节提供了一个关于系统稳定性分析概念的案例研究。1.7节包含了系统主题相关的综合问题，并提供了进一步阅读的参考文献和建议。

1.1 系统研究

物理系统和信息物理系统的研究和设计包括以下基础步骤：

- 建模；
- 建立数学方程式；
- 分析；
- 设计。

它代表了一种新的工程和科学方法，研究组件与组件之间的关系如何影响系统的整体行为，以及系统如何与其环境相互作用并形成一定的关系。

第一步建模，涉及识别确定一个易于学习且描述了系统显著特征的模型。一般来说，系统根据固定计划（Kamal 2008）进行工作，组织或执行一项或多项任务。此外，系统可以作为现实世界中的对象被引入，其精确特性通常是未知的。将测试信号应用于系统的输入，通常可以根据测量的系统输出数据确定系统的特性。因此，存在两种确定性测试信号，即单位阶跃和斜坡函数，它们的关系如以下表达式所示（Moeller 2003）。

- 单位阶跃：

$$u_w(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ 1, & t_0 < t < t_1 \\ 1, & t > t_1 \end{cases}$$

- 斜坡函数：

$$U_R(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ a \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}, & t_0 < t < t_1 \\ a, & t > t_1 \end{cases}$$

单位阶跃和斜坡函数以及许多其他函数在连续的分段特征的问题中被证明是非常有价值的。如上述等式所述，可以指定切换事件的顺序。当给定的功能在时间上延迟时，输出结果将是一样的。

更一般来说，建模涉及系统模型的开发过程，这个过程是现实世界对象的抽象。大多数数

学模型用于研究针对各种不同目的的系统，以解释系统的行为或数据，并提供数据的紧凑表示等。因此，建模是处理物理和信息物理系统中复杂问题的有效方法。用于建模系统的各种方法通常需要结合以下信息：

- 目标和宗旨；
- 边界；
- 必要的细节水平；
- 先验知识；
- 不可测数据和/或状态空间变量；
- 实验数据集；
- 相关组件；
- 系统输入和输出。

2

重要的是要注意，当今科学和工程学科的系统模型的使用范围可能会有所不同。控制系统工程涉及理解和控制系统部分，以便为社会提供有用的经济产品。这主要是要求系统综合和优化。工程师主要对在正常条件下运行的系统的数学模型感兴趣。工程师使用模型的目标是让控制系统最优化或至少使其不会偏离安全操作条件的边缘。相比之下，在生命科学中，医学科学家并不完全关心在正常条件下运行的维持生命运转的系统如循环系统的数学模型。研究生命科学的科学家更喜欢充分描述在正常工作范围外的系统行为的数学模型，这在医学上可以解释为疾病的指标，例如在循环系统处于高血压情况下。因此，高血压是一种正常情况外的系统状况。

关于可用模型的范围，适当的概念和数学表示水平取决于模型的目标、先验知识的可用性、通过实验和系统测量收集的数据、系统参数的初始估计和其他约束以及系统状态。因此，系统的数学表示取决于所需级别的限制，它们是：

- 行为级别。可以以表示系统行为的一组轨迹按时间顺序记录测量的形式来描述系统的行为级别。因此，行为级别是很重要的，因为系统的实验就处于这一级别，输入输出关系可以用以下方式表示：

$$\underline{y}(t) = F(\underline{u}(t), t)$$

其中 $\underline{u}(t)$ 表示输入集， $\underline{y}(t)$ 作为输出集， F 表示传递函数，描述了状态结构级别。这个结果是通过迭代，在一组称为系统行为的轨迹中产生的。内部状态集表示状态转换函数，它提供了依据当前的状态计算将来状态的规则，如下所示：

$$\underline{y}(t) = G(\underline{u}(t), \underline{x}(t), t)$$

因此，系统状态表示在时间 $t = t_0$ 时指定的最小数值集合，以便为属于给定输入集合的任何输入在 $t \geq t_0$ 时唯一地预测系统的行为，只要 $t \geq t_0$ 时，输入集合的每个元素都是确定的。这样的数值称为状态变量。

3

- 复合结构级别。在此级别中，通过连接可以作为网络描述引入的基本黑盒来描述系统。基本黑盒是组件，每一个都必须通过系统描述在状态结构级别中引入。此外，每个组件必须具有输入和输出变量以及确定组件互联的规范，并将输入和输出变量进行对接。

因为系统非常复杂，并且可能由于数据集不足而不能对系统进行精确描述 (Mitchel 2009)，所以开发数学系统模型时会存在很多困难。因此，在建立一个真实世界系统的数学模型时，首先需要选择一个模型结构，然后选择一些形式的参数估计来确定模型的参数值。正是由于这个原因，有时候忽略系统本身的一些特性而开发简化的模型可能会是一种更好的选择。一个过于复杂的数学模型会造成很多困难。一般来说，在开发现实世界系统的数学模型时，两

个主要因素是重要的：

(1) 一个模型总归是现实事物的简化，但是不能太简单以至于得出的答案是不正确的。

(2) 一个模型必须要简单到易于使用和学习。

因此，一个合适的系统模型是复杂方程中数学难度与最终结果准确性的折中。相应的关系如图 1.1 所示。

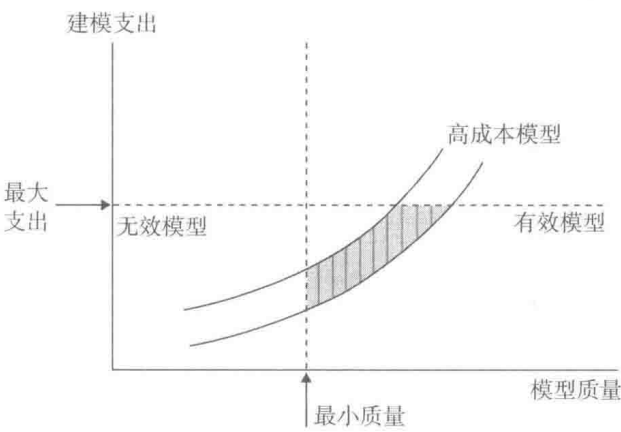


图 1.1 建模支出（成本）与准确度（模型质量）的关系（Möller 2014）

4

从图 1.1 中可以看出，开发成本昂贵的模型是没有充分理由的，因为开发得到的质量不及成本的付出。这一点是很重要的，因为数学模型是一个描述复杂现实系统的非常紧凑的方式。复杂的模型不仅描述了系统输入和输出之间的关系，还提供了对系统结构和内部关系的详细讲解。这是因为要建模的现实世界系统的变量之间的主要关系要被映射到适当的数学表达式中。例如，系统的输入和输出变量之间的关系可以通过一组普通微分方程来描述，并且这取决于系统的复杂性。

一般来说，获得现实世界系统的数学模型有两种不同的方法：

- 理论或公理化建模的演绎法，一种自下而上的方法，从一个比较成熟的代表数学模型的系统对象的先验知识开始。在现实情况下，在评估这些模型的适用范围时会出现问题。如图 1.2 所示，演绎建模方法通过经验模型验证证明步骤。之后，可以将模拟结果与系统的已知数据进行比较，验证模型是否符合误差标准。
- 实验建模的经验方法，实验建模的经验方法是基于对系统输入和输出的测量而建立的。基于这些测量，经验模型可以实现现实世界系统的模型，如图 1.3 所示。基于先验知识，实验建模过程的特征信号流序列用于确定数学描述的模型结构，所用知识必须与所使用的误差准则相一致，并选择相同方式作为演绎建模方法的性能标准。

定义 e 表示误差范围，这取决于实际系统输出 y_{RWS} 的测量值与数学模型输出 y_{MM} 的模拟数据之间的差异，如下所示：

$$e := e(y_{RWS}(t), y_{MM}(t))$$

误差标准可以通过最小化性能标准来确定：

$$J = \int_0^t e^2 \cdot dt \rightarrow \text{Min}$$

将从仿真获得的结果与系统数据的结果相比，当在误差标准范围内时，我们认为该模型符合所选择的性能标准。如果开发的模型不符合所选的性能标准，就需要在不同级别中进行修改，演绎建模方案如图 1.2 所示。修改的结果可以理解为模型验证的具体形式，也是一种比以前的开

5

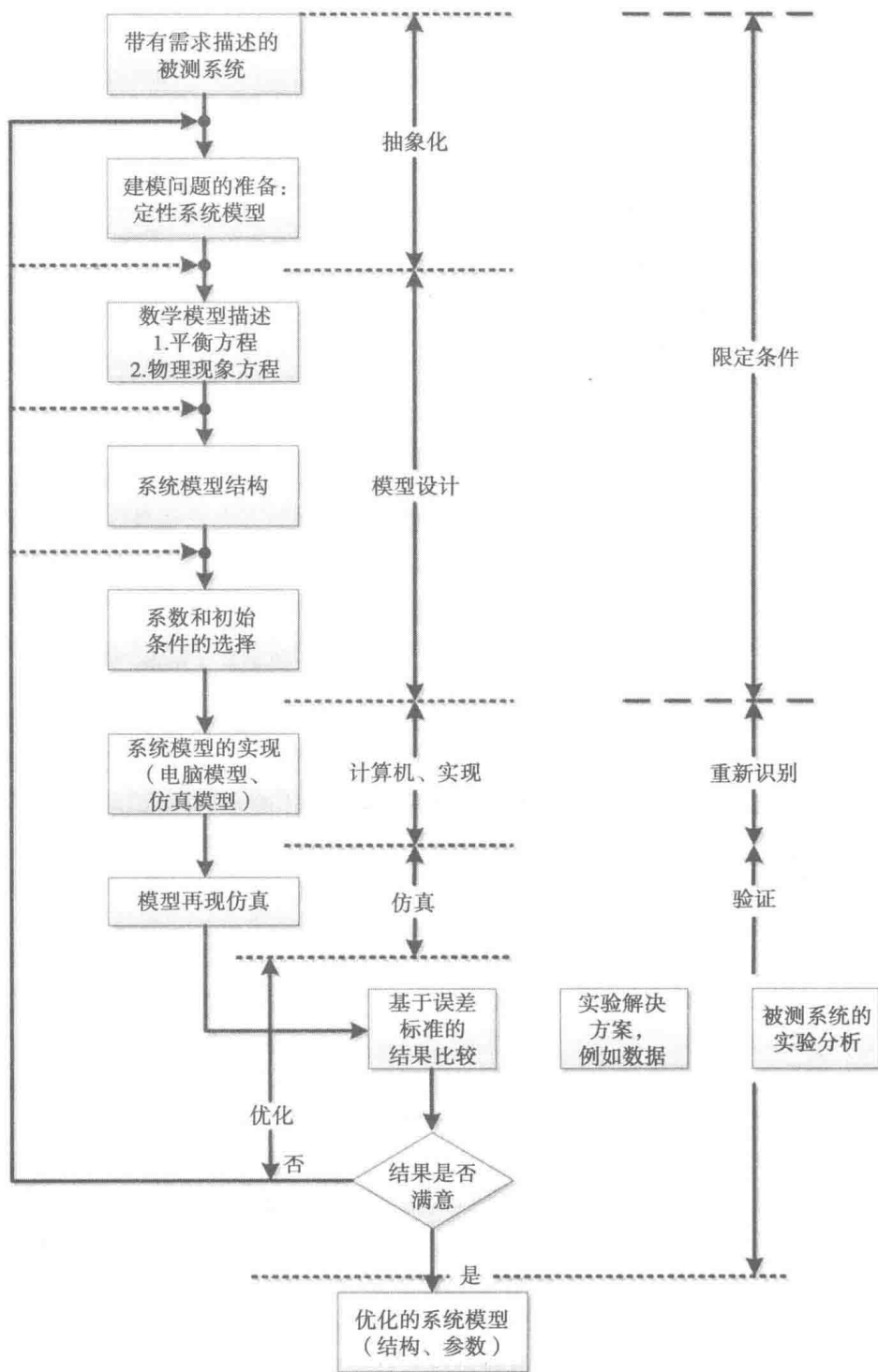


图 1.2 由演绎建模法扩展的经验建模框图 (Möller 2014)

发模型更好的模型。必须提及的是, 系统模型不仅描述了其输入和输出之间的关系, 例如黑盒模型, 还可以了解系统结构以及非黑盒模型各表示层级的内部和内部系统之间的关系。这是由于系统变量之间的关系被映射成适当的数学表达式。例如, 系统输入、输出变量间的关系根据其复杂性, 通过普通微分方程组或者代表系统数学符号的偏微分方程组而描述系统。

在识别出物理或信息物理系统的系统模型之后, 下一步是识别基本关系, 即描述系统的数

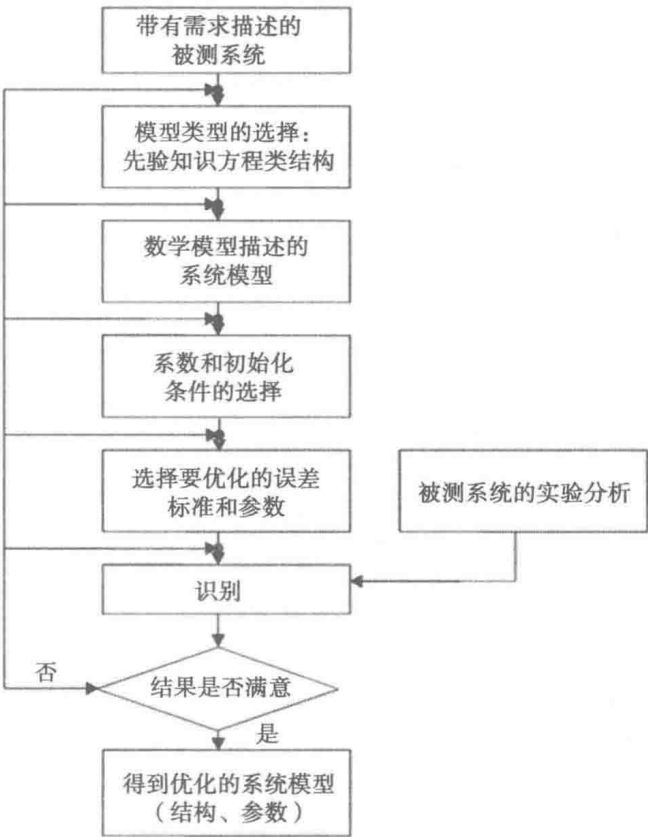


图 1.3 经验建模方法的框图（Möller 2014）

学方程。关于特定领域的物理定律，例如基尔霍夫电压（Kirchhoff's voltage）、电流定律或机械工程中的牛顿定律，可以设置相应的数学方程式。描述系统的方程可以用多种形式表示，例如：

- 线性方程；
- 非线性方程；
- 积分方程；
- 微分方程；
- 差分方程。

根据系统分析的调查重点，在描述同一个系统时，一种形式的数学方程可能比另一种更为可取（Moser 1974）。因此，一个系统可以有多种不同的数学方程形式，物理或信息物理系统可以具有不同的模型。

一旦获得了系统模型的数学描述，下一步是定量或定性地进行系统分析。在定量分析的情况下，重点是确定系统对某些输入和初始条件的确切响应。在定性分析的情况下，重点是确定系统的一般属性，例如：

- 可控性；
- 可识别性；
- 可观测性；
- 稳定性。

因此，定性分析非常重要，因为系统设计往往从这项研究演变而来。

下一步是系统设计，通常称为系统工程。它定义了以下要求，并且这些要求是系统设计的先决条件。

- 架构：包含系统特定组件、满足系统功能或目的的行为等的结构；
- 组件：在特定系统中直接或间接相关的部件；
- 数据：抽象概念，信息及其后隐藏的知识可以从中抽象出来；
- 接口：系统的单独组件交换信息的共享边界；
- 模块：与系统的其他组件具有接口的系统的自包含组件。

系统设计也可以作为系统理论在产品开发中的应用。

如果发现设计系统的响应不能令人满意，则必须改进或优化系统。在某些情况下，可以通过调整某些参数来改善或优化系统的响应；在其他情况下，必须重新设计系统组件或模块，以便改进或优化系统性能（Meadows 2009）。

8

关于系统研究的第一步，应该注意的是，系统设计是在物理或信息物理系统开发的模型上进行的。然而，如果选择了合适的模型，则应通过所需的调整或重新设计来相应地改善物理或信息物理系统的性能。

1.2 标准的系统描述形式

系统研究的第二步是建立描述系统行为的数学方程。由于分析方法或目标不同，在描述相同的系统时可以使用不同的数学方程。这些方程属于数学系统表示的两种标准形式：（1）描述系统的外部或输入输出属性的传递函数；（2）描述一个系统内部和输入输出行为的微分方程组，也称为系统的内部或状态变量描述。

1.2.1 输入输出描述

系统输入输出描述的概念涉及系统输入和输出之间的数学关系。因此，可以认为输入输出关系是一个多变量系统（MVS），由线性的、具有因果关系的松弛系统的输入输出说明描述，公式如下：

$$Y(t) = \int_{-\infty}^t G(t,\tau), U(\tau) d\tau$$

其中 U_i 和 Y_i 是输入和输出， G_i 是系统的脉冲响应矩阵，可以写为如下形式：

$$G(s) = \frac{Y_i}{U_i}; i = 1, \cdots, n$$

如图 1.4 所示，系统有 n 个输入和 m 个输出。输入由 $u_1, u_2, \cdots, u_n$ 或 $n \times 1$ 列向量 $u = [u_1, u_2, \cdots, u_n]'$ 表示。输出由 $y_1, y_2, \cdots, y_m$ 或 $m \times 1$ 列向量 $y = [y_1, y_2, \cdots, y_m]'$ 表示。在一段时间间隔内输入和输出取值为 $(-\infty, \infty)$ 。使用 u 或 $u(\cdot)$ 表示在 $(-\infty, \infty)$ 上定义的向量函数，使用 $u(t)$ 表示在时间 t 对应的 u 值，如果仅通过 (t_0, t) 定义函数 u ，则可以表示为 $u(t_0, t)$ 。

9

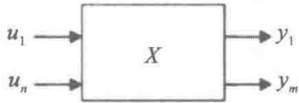


图 1.4 n 个输入与 m 个输出的系统

如果系统在时间 t 的输出仅取决于在时间 t_1 的输入，则称为瞬时或零存储系统。仅由电阻器组成的网络就是这样的系统。然而，大多数感兴趣的系统具有存储行为，即时间 t_1 的输出不仅取决于在 t_1 的输入，而且还取决于在 t_1 之前或之后的输入。如果 $u_{(t_0,t)}$ 作为系统的输入，则除非我们知道在 t_1 前的输入，否则输出 $y_{(t_1,\infty)}$ 通常不能确定。使用缺少唯一关系的输入输出描述来确定输入输出描述是没用的。在提供输入之前，必须假定系统是松弛的或静止的，并且输