

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

Mechatronic Systems Design: Methods, Models, Concepts

机电系统设计方法、模型及概念 实现、控制及分析

[德] Klaus Janschek 著

张建华 译



清华大学出版社



Springer



信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

Mechatronic Systems Design: **Methods, Models, Concepts**

机电系统设计方法、模型及概念 **实现、控制及分析**

[德] Klaus Janschek 著

张建华 译



清华大学出版社
北 京

 Springer

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2016-9512

Originally published in the German language: "Systementwurf mechatronischer Systeme" by Klaus Janschek. Translation from the English language edition: Mechatronic Systems Design by Klaus Janschek. Copyright © 2012 Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Springer-Verlag Berlin Heidelberg is a part of Springer Science+Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字翻译版由德国施普林格公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

机电系统设计方法、模型及概念:实现、控制及分析/(德)克劳斯·杨申克(Klaus Janschek)著;张建华译.一北京:清华大学出版社,2017

书名原文:Mechatronic Systems Design: Methods, Models, Concepts

(信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列)

ISBN 978-7-302-45735-0

I. ①机… II. ①克… ②张… III. ①机电系统—系统设计—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 290295 号

责任编辑:梁颖 柴文强

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17.25

字 数:410千字

版 次:2017年5月第1版

印 次:2017年5月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:69.00元

产品编号:069397-01

谨以此书献给 Ruth, 并纪念 Martin Beck

Preface for the Chinese Translation Edition

This is the translated Chinese edition of the book “Systementwurf mechatronischer Systeme” (in German) published by Springer in 2010 and the English edition “Mechatronic Systems Design” published by Springer in 2012. For the motivation, background and concept of presentation, the obliging reader is referred to the preface of the German edition.

As the reader will recognize, the main goal of this book is to provide a comprehensive systems view on mechatronics from the model point of view, allowing understanding of basic concepts and design solutions from a rigorous physical and mathematical point of view. What distinguishes this monograph from many others is a consistent mathematical, physical and model notation throughout the different chapters and topics, from modeling and simulation up to controller design and methods for system performance evaluation. For students this textbook could serve as a reference for a rigorous treatment of abstract models of technical systems. Thus, it was also a didactic exercise for me constructing the logic behind the many topics covered in this book. I hope very much that the respected readers will recognize and appreciate these goals.

I am using this book as basic reference for undergraduate and graduate courses at my home university, Technische Universität Dresden (TU Dresden), as well as for short graduate courses delivered at other universities, e. g. the Universidad de Málaga, Spain, the Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brazil or the East China University of Science and Technology (ECUST), Shanghai, China. Interestingly a considerable portion of students attending my mechatronics courses so far has been Chinese students (TU Dresden, ECUST), dealing with German or English language barriers in addition to the common engineering hurdles for understanding mechatronics. Now, what I never expected or dreamed when starting my German book project, this book offers many, many more Chinese students access to my understanding and my thoughts on mechatronics in Chinese language. What a big step, what a great perspective!

Making the Chinese edition come true is the sole merit of Professor Dr. -Ing. Jianhua Zhang from East China University of Science and Technology (ECUST), Shanghai, China. I am most grateful to Professor Zhang for initiating, performing and successfully finalizing this challenging project. We have known each other well since 2002, when I hosted and supervised Professor Zhang during his PhD. research project at the Institute of Automation, TU Dresden. In 2012, he invited me as a guest professor of ECUST to introduce my views on mechatronics to his students. It was a big honor for me, when Professor Zhang came up with the challenging idea of translating the book into Chinese and

thus giving direct access to a tremendous scientific community without any language barriers anymore. As a westerner, the Chinese language, in particular the written one with these artful characters and symbols, always was and still is a big mystery for me and I am admiring Chinese people for being skillful artists beside their main profession. Now Professor Zhang has succeeded in completing the Chinese edition, what a great moment, what a beautiful result!

When I am looking at the result, I am overwhelmed and grateful, but somewhat helpless; for the first time, mechatronics seems being a mystery for me! Only after a second glance, I get back my confidence; gladly figures and mathematical models I can recognize very well, they are invariant to languages and in fact, they form the international language of engineers. I hope very much that the explanatory text will help the Chinese readers to follow the ideas and concepts behind the models and thus to explore the interesting mechatronics universe, thanks to the great job done by Professor Zhang.

Last, but not least, I am very grateful to the publishers behind the book. First, my thanks go to Springer publishing house for arranging in a very constructive way the license issues. Second, my special thanks go to Tsinghua University Press for the confidence on this project and managing the publication issues in such an excellent way.

Dresden, July 2016

Klaus Janschek

中文版序

这是 2010 年和 2012 年分别由 Springer 出版社出版的《机电系统设计》德文和英译版的中译本。关于本书写作的动机、背景以及构想,感兴趣的读者可以参考德文版的序言。

读者将会发现,本书的主要目标是从建模的观点出发,提供关于机电一体化的全面、系统观点,从而使读者能依据严格的物理和数学观点理解基本概念和设计解决方案。这本专著与很多其他同类书籍相比的特色在于不同章节和主题之间(从建模与仿真直至控制器设计与系统性能评价方法)统一的数学、物理以及建模概念。这本教材可以用作学习技术系统抽象模型严格处理的参考书。所以,这也是我构建本书包括的许多主题背后的逻辑的一种教学训练。我非常希望尊敬的读者认识和欣赏这些目标。

我目前将本书用作德累斯顿工业大学本科生和研究生课程以及其他大学(例如,西班牙 Málaga 大学、巴西圣卡塔琳娜大学、中国的华东理工大学等)短期研究生课程的基本参考书。有趣的是,至今参加我的机电一体化课程的相当一部分学生来自中国(特别是在德累斯顿工业大学与华东理工大学)。除了理解机电一体化课程的一般工程专业障碍之外,他们还必须应对德语或英语的语言障碍。当我开始写德语版时,从未梦想和期待的是:现在该中译本为许许多多的中国学生提供了直接用中文了解我对机电一体化的理解和思想的途径。这是一个多么大的进步和伟大视角啊!

该中译本成为现实完全归功于华东理工大学的张建华教授。我深深感谢张教授启动、执行并成功完成了这个富有挑战性的项目。当 2002 年张教授在我指导下在德累斯顿工业大学从事博士课题研究时,我们就彼此相识了。2012 年他邀请我为华东理工大学客座教授,第一次为他的学生们介绍我对于机电一体化的观点。当张教授提出富有挑战性的想法,想将我的书翻译成中文,使人数众多的科学界不再有任何语言障碍地直接理解我的书时,我感到十分荣幸。作为一个西方人,中文(特别是使用那些艺术性的文字和符号的书面语)对于我是很神秘的,我也羡慕中国人除了其主要专业外还是熟练的艺术家。现在张教授成功完成了中译本,这是一个多么伟大的时刻和多么漂亮的成果啊!

看到这项成果时,我感激难言,同时又感到有点无助:机电一体化第一次对于我是如此神秘!但再看一眼之后,我便恢复了自信,因为我还可以清楚认出那些图形和数学模型,它们不因语言的不同而变化,事实上它们是工程师的国际语言。由于张教授所做的极佳工作,我非常希望解释性文字有助于中文读者理解模型背后的思想和概念,并探索有趣的机电一体化领域。

最后但同样重要的是,我非常感谢本书的出版社。首先,感谢 Springer 出版社以建设性的方式安排版权问题。其次,特别感谢清华大学出版社对该项目的信任和对出版事宜的极佳管理。

Klaus Janschek

2016 年 7 月,德累斯顿

译者序

本书全面、系统、深入地阐述了基于模型的机电系统设计方法,讨论了机电系统设计的诸多关键问题,主要包括:与领域无关的建模与性能分析方法,多域建模(基于能量、端口或者信号),仿真(ODE-DAE 混杂系统),鲁棒控制方法,随机动态分析以及基于系统预算的设计定量评价。本书英文版共计 805 页,包括 380 余幅插图,给出的 50 余个设计示例(均有完整解答)不仅清晰说明了机电系统设计的基本方法和概念,而且便于读者自学这些概念和方法。本书由 Springer 出版社 2010 年出版德文原版,2012 年出版英文翻译版,已受到国际学术界广泛好评。考虑到原书篇幅较长,中译本分为内容相对独立的两本:《机电系统设计方法、模型及概念:建模、仿真及实现基础》(原书第 1~5 章,以下简称“建模与仿真篇”)和《机电系统设计方法、模型及概念:实现、控制及分析》(原书第 6~12 章和附录,以下简称“控制与分析篇”)。译者认为,这是关于机电系统设计和分析的一本不可多得的权威著作,有很高的学术水准,内容全面丰富。书中不少内容基于作者研究组的最新研究成果,有很强的创新。例如,基于通用机电变送器建模(建模与仿真篇第 5 章),给出了静电(控制与分析篇第 6 章)、压电(控制与分析篇第 7 章)、电磁以及电动力变送器(控制与分析篇第 8 章)的形式化描述。建模与仿真篇第 5 章介绍的通用机电变送器模型框架为一般了解电力耦合变送器的原理以及不同类型变送器物理原理的表示提供了方法论。与其他同类书籍相比,这种具有广泛适用性的模型表示是全新的。本书还使用解析动态模型实现了许多物理与技术领域的机电一体化功能,例如多体动力学(建模与仿真篇第 4 章)、电磁动作变送器(控制与分析篇第 8 章)以及数字信息处理(控制与分析篇第 9 章)。

本书是 Klaus Janschek 教授在多年讲授的自动化专业主干课程“建模与仿真”和“机电一体化系统”的基础上写成的。Janschek 教授是自动化工程与机电系统领域国际著名专家,在航天制导、导航与控制等自动化领域取得了突出科研成就。他曾在德国戴姆勒-奔驰公司从事航天机电系统研发十余年,1995 年至今任德国德累斯顿工业大学自动化研究所所长、自动化工程讲席教授,既有精深的理论水平,也有丰富的实际系统研发经验。

译者在德国攻读博士学位期间,2002—2003 年在 Janschek 教授的自动化研究所任 Gast Wissenschaftler(客座科学家)一年,在他的指导下从事脑电信号处理的研究,敬服这位国际知名自动化专家的丰富理论与实际经验以及独到的应用问题分析和解决思路。14 年来,我们之间的学术交往一直不断。特别是我 2007 年从英国引进回国到华东理工大学任教授以来,我们的学术交流更加密切。Janschek 教授 2012 年 6 月被聘为华东理工大学客座教授,以后多次应邀来我校讲学。近年来我也多次应邀去德国柏林工业大学做访问教授,期间都会专程从柏林到德累斯顿为他的研究所师生做学术讲座。

Janschek 教授 2012 年 9 月首次来我校讲学时,将该书英文版赠送于我和我校图书馆。认真阅读该书之后,我产生了将其译成中文的想法,主要目的是想将 Janschek 教授关于机电系统设计与分析的思想与方法完整介绍给国内读者,使得国内机电一体化领域的广大研究生、科研以及技术人员全面了解和掌握书中阐述的一系列重要概念和方法。出版中文翻

译版的设想一开始就得到了 Janschek 教授的热情鼓励和支持,以及清华大学出版社的积极回应,因而就顺利启动了该书的中译工作。

本书的一个突出特色是理论方法和实际应用的紧密结合,对于许多应用领域的实际机电系统研发而言是必备参考书。目前国内机电一体化专业教学面临一个窘境,学生往往缺乏应有的机电过程或系统知识基础(如工业或航天系统的原理和背景知识),很难深入进行机电系统设计与分析,而独立设置这些应用类课程,对自动化和机械工程等专业又不实际。Janschek 教授在这本专著中对许多机电系统建模、控制及分析实例所需的背景知识进行了全面讲述,读者无须另外参考有关应用系统的专门书籍,这也构成了该书的另一个特色——系统性和自足性。

本书可用作电气工程、机械工程、机电一体化、计算机科学、控制科学与工程、机器人学、自动化、信号与信息处理等专业高年级本科生、研究生的教材或主要参考书,也适于机电一体化领域(如汽车工程、铁道工程、航海工程、航天、自动化、机床、机器人、医疗设备、微系统等)的科研或工程技术人员参阅。对于从事机电系统教学的教师来说,即使你可能欠缺实际的机电一体化系统研发经验,参考本书也会使你取得更好的教学效果。对于在机电系统控制与分析问题上遇到疑难的机电系统研发工程师而言,本书是一本极佳的参考手册,从中可直接获得解决实际应用问题所需的最重要基础知识、理论及方法,尤其会对不同技术领域的机电系统建模与控制问题带来有益的启发。古人云“处处留心皆学问”,对于有心的读者,本书论述的每条机电系统设计的定性法则或经验也都可能发展出更严格的理论或数学分析。

本人翻译了本书建模与仿真篇全部和控制与分析篇第 9~12 章,并负责全书统稿和校对,包括专业术语和语言风格的统一及少量注解。我指导的三位博士生杨少增(2014 年夏毕业)、尹钟(2015 年夏毕业)和夏家骏协助进行了控制与分析篇第 6~8 章的初译和初步校对工作,在此向他们表示诚挚感谢。特别感谢本书责任编辑——清华大学出版社电子信息事业部主任梁颖先生,他一直鼓励和支持译者完成这个艰巨的翻译项目。在本书翻译过程中,译者和作者 Janschek 教授一直保持 Email 沟通,他的高度信任以及热情鼓励、期盼和支持是我在合理时间内完成这本译著的最大动力。

为了忠于原文,保证对原著技术内容的精准理解和传达,并考虑到本书许多内容的跨学科(数学、物理、电子工程、机械工程、控制系统、信号处理、航天、材料等)性质,中文译本以直译为主。对于有些较难或需要精准理解的术语,同时给出了中译和英文原文,供读者交叉参照。最后,限于译者水平和时间,中译本中可能存在错误纰漏之处,敬请有关专家和读者批评指正。

译者 张建华
于华东理工大学
2016 年 4 月

Klaus Janschek

Mechatronic Systems Design

Methods, Models, Concepts

Translation by
Kristof Richmond

*To my respected colleague
Professor Jianhua Zhang
with all my best wishes*

Klaus Janschek

Shanghai, 12-sep-2012

 Springer

2012年9月本书作者 Janschek 教授来华东理工大学访问时给译者的赠书留言：

“对我尊敬的同事张建华教授致以最美好的祝愿，Klaus Janschek 2012年9月12日于上海”

英文版序

这是 2010 年 1 月由 Springer 出版社出版的《机电系统设计》一书的英译本。关于本书的动机、背景以及概念阐述,读者可以参考德文原版的序。

在准备德文版以及进行该领域的大量文献调研过程中,我认识到在国际机电一体化领域,仍有不少内容需要这本专著来阐述。而且,很多同事和学生对德文版的积极评价促使我考虑准备其英文版。

我从一开始就清楚,只有通过母语为英文且具有广泛良好工程学知识(特别是机电一体化知识)的人的翻译支持,这个项目才能成功。幸运的是,我以前在斯坦福大学航天机器人实验室的访问经历使我得以认识最好的合作伙伴 Kristof Richmond 博士。Richmond 博士是母语为英文并精通德文的斯坦福大学优秀毕业生,也是有高度智慧和批判精神的学术伙伴,他具有我并不期望在一个人身上发现的全部才能。因此,英文版的合作极其顺利,双方都感觉很充实,而且在互联网和 Skype 时代,这种合作并未受德国与美国之间大西洋的阻隔。我非常感谢 Kristof 的这项伟大工作。

英文版涵盖了德文版的全部内容,但在表述上做了小的改善,并更新了英文参考书目,也有机会纠正德文版中的一些错误。

关于对本书反映的所有材料的致谢,读者可以参考德文版的序。但是,对于英文版我还需要感谢两个人。首先感谢我的爱妻 Ruth,她以极佳的不断鼓励心态支持并陪伴我第二次爬山远征(幸运的是,这次的山峰远比前次的低,参见德文版的序)。我也感谢并怀念 Martin Beck,他于 2011 年 2 月在即将取得博士学位前不幸离世。他是最有才干的博士生之一,也是我讲授机电一体化课程的最密切助手,他对本书的主要贡献包括对本书原始素材的批评性校对,合理的批判性技术与学术讨论以及对改进本书教学表述的诸多建议。他的精神体现在英文版的字里行间。

最后,如果没有以 Eva Hestermann-Beyerle 为代表的 Springer 出版团队的宝贵支持、信任以及优质服务,光有前面提及的努力也不会产生本书。

Klaus Janschek

2011 年 6 月,德累斯顿

德文版序

动机

为什么要出版另一本机电一体化的书？为什么本书如此大部头，并有这么多描述性文字？

在开始写这本书时，我已经回答了第一个问题，原因是“我想再当一次学徒”，由此形成了我完成本书的动机，那时当然还不能猜测其涵盖的范围。在写作过程中，才出现了第二个问题，依据“不要将任何东西隐藏在字里行间和公式中”的范式，我倾向于使用更多的文字阐述。

现在讲述一下我的“学徒”故事。我在格拉茨工业大学(TU Graz)电气工程专业学习时，打下了数学与自然科学的坚实基础(这对于一所大学的工程学课程当然是应该期待的)。控制理论专业学习及此后的博士学位攻读为我揭开了“系统”及“面向系统的解决方案”的视角。

此后的机械工程与航天开发工程师的“学徒身份”将我引入了以前学习中从未涉足的一个应用领域——复杂非纯一(或异构)系统，如今也称为“机电一体化系统”。我成功地涉足该领域可能得益于两件事：一是大学教育提供的宽广基础，二是面向系统的问题求解方法。

这些年的“学徒”生涯除了使我获得对于富有挑战性的新应用的极佳经验之外，也形成了一个重要认识——必须学会将教育获得的众多方法恰当结合起来。当然，找到正确的路常常是工程师自己的事，但是乐于助人、经验丰富的导师(很幸运，我有很多这样的导师)会使这一过程变得更容易。在整个过程中，我经常思考“作为研发工程师的我所期望的是什么”这一问题，至今仍保留在我的脑海中。

1995年以来在德累斯顿工业大学做“学术学徒”^①期间，我有机会将对于“作为一名研发工程师，我的学习和研究期待的是什么？”这一问题的经验传授给工程学生(除了电气与机械工程的经典课程外，也包括部分机电一体化跨学科专业)。这样一来，我的个人教学环路得以闭合(或者更确切地说，我的教与学环路得以闭合)，因为教与个人自学紧密相关。

这本书的成形源于多年来我讲授的主干课程“建模与仿真”和“机电一体化系统”。

然而，最后我发现，在一门学时有限的课程中，将复杂异构系统问题求解知识传授给学生的愿望只能近似实现。讲授基本方法和概念及其简单应用例子是比较容易的，但是在有限的课时中并不能做到更广、更深的技术处理。通过引用更多的科技论著(但很少注解)来补充过于简单的课程大纲，并不能使学生和教师满意。这些原因促使我最终考虑再当“学徒”，其结果将体现在本书中。首先，简要阐明本书的基本结构。

^① 译者注：这是自谦之词，作者1995年起任德累斯顿工业大学自动化工程讲席教授和自动化研究所所长。

方法、模型、概念

现在说明一下本书副标题“方法、模型及概念”的起源。

模型：基于自己的职业经验，我意识到模型在系统开发中的极端重要性。航天应用（例如航天飞机的轨道与姿态控制、高精度定向及仪表主动隔振）处理的是复杂非纯一系统，在如今的观念中，这些系统是机电一体化系统的最佳代表。显然，这些系统的开发和测试往往是基于模型的。系统测试与可靠的行为投射（预测）主要是基于预测模型。因此，基于模型的系统开发与设计意味着模型的使用。有趣的是，近年来，基于模型的开发方法也出现在很多地面（非航天）应用（如汽车工业）中，两者同时构成了机电一体化工业中系统开发的发展现状和动态。

方法：为了得到可信的基于模型的行为预测，模型和动态分析必须建立在合理的基础上。系统设计要求恰当的建模方法和全面的整体系统（由非纯一的子系统组成）动态分析方法。因此，我们特别追求的是那些方法，它们能够提供清晰、可靠且易于检验的动态预测，从项目早期阶段的可行性预测以至对计算机辅助设计过程所得结果的检验（永远不要轻信计算机）。

概念：顾名思义，系统“设计”包含高度创造性的活动。在系统设计中，有很多宝贵机会来利用可用的设计自由度，直至这些自由度的条件和边界已知。一本专著肯定不可能提供这种意义下的全部资料 and 观点，但是本书尽可能尝试有选择地给出一些得到成功应用的物理结构和求解概念，以使读者形成自己解决方法的核心思路。基于面向方法的概念和思路，本书基于数学模型阐述了很多专题，并揭示了不同概念的量化评估方法。

本书尝试在同一个框架下系统、自洽地阐述机电系统的重要建模、分析及设计方法。

致谢

“路径即为目标”，即使最初的目标似乎是清晰描述的。与登山一样，找到正确的路径、追随它并最终到达原来的目标需要一个可信的登山绳队（rope team），这里我要衷心感谢他们（登山队队员）。

首先，感谢我的家庭，特别是我的妻子 Ruth Janschek-Schlesinger（哲学）博士。在这个登顶尝试期间，她以极大的理解和坚强的精神支持陪伴我。我特别高兴的是，我们数十年的伴侣关系也产生了相互之间的职业协同。例如，她成功地将面向系统的问题求解方法集成到艺术治疗与监督任务中，而且她自发、艺术性、打破边界的视野也开阔了我的眼界。

诚挚感谢我的同事——德累斯顿工业大学 Helmut Bischoff 教授、Kurt Reinschke 教授以及德累斯顿 Fraunhofer 集成电路研究所设计自动化部 Peter Schwarz 工学博士——的许多技术讨论和鼓励。

八百多页的手稿当然会包括一些危险的陷阱和绊脚石。特别感谢我的助手——Dipl.-Ing. Martin Beck^①（他多次校稿，因而需要特别致谢），讲师 Annerose Braune 工学博士，Eckart Giebler 工学博士，Dipl.-Ing. Sylvia Horn，Dipl.-Ing. Thomas Kaden，Dipl.-Ing. Evelina Koycheva，Dipl.-Ing. Arne Sonnenburg 及 Dipl.-Ing. Edgar Zaunick——对我的手稿所做的仔细、知识渊博的校对和合理的修改建议。

^① 1978—2011 年。

我也感谢我的研究团队的其他成员,此项目占用了我不少时间,他们一直都表示理解。我也衷心感谢 Petra Moege 女士,她的尽责和技能使我能在最近两年不受管理事务的干扰,为本项目成功创造了前提条件。

我诚挚感谢 Springer 出版社成员的精诚合作,他们周详考虑和处理了本书的内容和进度计划。

Klaus Janschek

2009 年 10 月,德累斯顿

难词与缩略语

ADC: 模-数转换器

cf: 比对, 参照

CBE: 基本本构方程

DAC: 数-模转换器

DAE: 微分代数方程

DYMOLA: Dynasim 公司注册商标

ELM: 电子机械的

FEM: 有限元模型

LABVIEW: NI 公司注册商标

LTi: 线性时不变(定常)

LTV: 线性时变

MAPLE: Waterloo Maple 公司注册商标

MATHEMATICA: Wolfram Research 注册商标

MATLAB: MathWorks 公司注册商标

MBS: 多体系统

MEMS: 微电子机械系统

MIMO: 多输入多输出

MODELICA: Modelica 协会注册商标

ODE: 常微分方程

OSI: 开放系统互连(OSI 参考模型)

PID: 比例-积分-微分

SA: 结构化分析

SIMULATIONX: ITI 公司注册商标

SIMULINK: MathWorks 公司注册商标

UML: 统一建模语言

ZOH: 零阶保持

目 录

译者引言(第 1~5 章简介)	1
第 6 章 功能实现: 静电变送器	6
6.1 系统工程背景	6
6.2 物理基础	7
6.3 通用静电变送器	9
6.3.1 系统结构	9
6.3.2 静电变送器本构方程	9
6.3.3 ELM 二端口模型	11
6.3.4 负载静电变送器	12
6.3.5 结构原理	13
6.4 具有电压驱动与可变电极间距的变送器	15
6.4.1 一般动态模型	15
6.4.2 使用串联电容增大运动范围	18
6.4.3 使用串联电阻的被动阻尼	20
6.5 具有可变电极间距和电流驱动的变送器	24
6.6 差动变送器	25
6.6.1 通用变送器配置	25
6.6.2 推推控制: 机械对称结构	26
6.6.3 推推控制: 横向梳形变送器	27
6.6.4 推挽控制: 静电轴承	30
6.6.5 推挽控制: 轴对称双梳变送器	32
6.7 具有恒定电极间距的变送器	34
6.7.1 一般动态模型	34
6.7.2 纵向梳形变送器	35
6.7.3 采用线性级齿的梳形变送器	38
本章参考书目	39
第 7 章 功能实现: 压电变送器	41
7.1 系统工程背景	41
7.2 物理基础	42
7.3 通用压电变送器	47
7.3.1 系统结构	47
7.3.2 压电变送器的本构方程	47
7.3.3 ELM 二端口模型	49
7.3.4 负载压电变送器	50

7.3.5 结构原理	53
7.4 带阻抗反馈的变送器	58
7.5 机械谐振器	62
7.5.1 比例工作和谐振工作	62
7.5.2 超声压电电机	62
本章参考书目	66
第8章 功能实现：电磁作用变送器	67
8.1 系统工程背景	67
8.2 物理基础	69
8.3 通用电磁变送器：可变磁阻	75
8.3.1 系统结构	75
8.3.2 电磁变送器的本构方程	76
8.3.3 ELM 二端口模型	78
8.3.4 负载电磁变送器	79
8.3.5 结构原理	81
8.3.6 具有可变工作气隙的电磁变送器	85
8.3.7 差动电磁变送器：磁轴承	94
8.3.8 具有恒定工作气隙的电磁变送器	97
8.3.9 磁阻步进电机	100
8.4 通用电动力变送器：洛伦兹力	105
8.4.1 系统配置	105
8.4.2 电动力变送器的本构方程	105
8.4.3 ELM 二端口模型	107
8.4.4 负载电动力变送器	108
8.4.5 结构原理	110
本章参考书目	115
第9章 功能实现：数字信息处理	116
9.1 系统工程背景	116
9.2 定义	118
9.2.1 参考结构	118
9.2.2 建模方法	118
9.3 采样	120
9.4 混叠	123
9.5 保持器	125
9.6 采样对象的频率响应	127
9.7 振荡系统中的混叠	129
9.8 数字控制器	131
9.9 变换频域	133
9.10 信号转换	139