

预测控制^的 理论与方法

第2版

丁宝苍 著



预测控制的理论与方法

第 2 版

丁宝苍 著



机械工业出版社

本书分为基础篇和漫谈篇。基础篇介绍三类经典的启发式预测控制算法（即模型算法控制、动态矩阵控制、广义预测控制）、输入非线性系统的两步法预测控制、具有稳定性保证的预测控制综合方法，并侧重于鲁棒预测控制和阐述启发式算法与综合方法的关系。漫谈篇从多个角度、各种算法出发，讲述状态可测和输出反馈两种情况下多胞描述模型的鲁棒预测控制。对初步接触预测控制的读者，可通过学习基础篇掌握一些学习和研究预测控制的基础工具和算法。漫谈篇适合于对预测控制进行较长时间学习和研究的读者，从中可以探索鲁棒预测控制的发展规律，对鲁棒预测控制还没有解决的问题产生研究兴趣等。

本书从介绍系统、模型和预测控制的一般概念开始，一直到提出预测控制中尚未解决的问题。全书辩证地看待预测控制的各种方法，为科研人员提供研究思路，为工程技术人员提供理解和应用预测控制的关键问题和解决方法。本书可作为自动化专业研究生教材，预测控制理论研究者 and 工程技术人员参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

预测控制的理论与方法/丁宝苍著. —2版. —北京：机械工业出版社，2017.3

ISBN 978-7-111-56002-9

I. ①预… II. ①丁… III. ①预测控制 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 023860 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：江婧婧 责任编辑：江婧婧 翟天睿

责任校对：佟瑞鑫 封面设计：鞠 杨

责任印制：李 飞

北京铭成印刷有限公司印刷

2017 年 5 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15.75 印张·378 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-56002-9

定价：69.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com



丁宝苍，男，2000年5月毕业于石油大学（北京），获得硕士学位，2003年6月毕业于上海交通大学，获得博士学位。于2005年9月赴加拿大阿尔伯塔大学做博士后1年，2006年11月赴新加坡南洋理工大学做博士后9个月。目前任职于西安交通大学，任教授/博导。

主要从事先进控制理论与工程应用、预测控制等研究工作，率先开展含有界噪声的多胞描述系统的输出反馈预测控制的稳定性设计，并给出系列解决方案。

曾担任多个国际SCI、EI期刊的首席客座编辑、客座编辑和协助编辑，是几乎所有控制理论类国际、国内期刊的评审人。发表论文160余篇，其中SCI收录50余篇，含第一和通讯作者的Automatica、IEEE Trans. Automatic Control和IEEE Trans. Fuzzy Systems论文共计17篇，出版《Modern Predictive Control》等专著3部，主持各类横向、纵向科研项目20余项，获国家发明专利4项，入选2008年教育部新世纪优秀人才支持计划。长期讲授《泛函分析》和《先进控制理论》等课程。

如果您有意写作图书、翻译图书或者
有好的外版书推荐，请联系我们。

邮箱: jjjblue6268@sina.com

编辑QQ: 372205490

电话: 010-88379764

本次再版包含了基础篇和漫谈篇——它们既是关联的、又有一定的独立性。基础篇是对2008版的继承，故作者没有刻意地改变2008版的结构和编排，尽量保持其原汁原味，以便对2008版的读者有个交代。漫谈篇是新版中增加的内容，但建立在基础篇的基础上。与此关联的是，2008年以来，作者沿着鲁棒预测控制的路线继续开展输出反馈预测控制的研究，同时系统地研究了以动态矩阵控制（包括状态空间实现）为主的工业双层结构预测控制和递阶工业预测控制（已出版《工业预测控制》一书）。

要细致理解预测控制学术理论和工程实践的差异，将涉及到控制理论的各个方面，包括系统辨识、模型近似和简化、状态估计、模型变换等。正是这种复杂性使得人们从不同角度对预测控制方法进行突破。研究预测控制，不仅仅是学会一两种算法或了解若干分析推导过程，而需要有广阔的视野和知识，在此基础上才能领悟到算法和理论中的真谛。通过本书的出版，希望能为读者提供这样一个平台，使读者准确认识工业预测控制、自适应预测控制和现代预测控制定性综合方法的特点和思路，加深领悟和研究能力，为推动我国预测控制的研究和应用做出贡献。

电话服务

服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

策划编辑◎江靖婧 / 封面设计◎鞠杨

序

预测控制是20世纪70年代产生于工业过程控制领域的一类新型计算机控制算法。近30年来,预测控制理论和实践的发展都取得了丰硕的成果,不仅成为最有代表性的先进控制算法受到工业界的青睐,而且形成了具有滚动优化特色的不确定性系统稳定和鲁棒设计的理论体系。纵观预测控制的发展历程,大致经历了这样三个高潮阶段:一是20世纪70年代以阶跃响应、脉冲响应为模型的工业预测控制算法,其典型算法如动态矩阵控制等,这些算法在模型选择和控制思路方面十分适合工业应用的要求,因此从一开始就成为工业预测控制软件的主体算法并得到广泛应用,但理论分析的困难使它们在实际应用中必须融入对实际过程的了解和调试的经验;二是20世纪80年代由自适应控制发展而来的广义预测控制等自适应预测控制算法,相对于工业预测控制算法而言,这类算法的模型和控制思路都更为控制界所熟悉,因此更适合于理论分析,由此推动了预测控制的定量分析取得了一些新进展,然而,对于多变量、有约束、非线性等情况,解析上的困难成为定量分析中不可逾越的障碍,从而束缚了这一方向研究的深入发展;三是20世纪90年代以来发展起来的预测控制定性综合理论,在这一阶段,人们因为定量分析所遇到的困难而转变了研究的思路,不再束缚于研究已有算法的稳定性,而在研究如何保证稳定性的同时发展新的算法,这些研究可以针对最一般的对象,由于充分借鉴了最优控制、Lyapunov分析、不变集等成熟理论和方法,使预测控制的理论研究出现了新的飞跃,取得了丰硕的研究成果,成为当前预测控制研究的主流,但这些成果与实际工业应用仍存在着很大的距离。

预测控制经过上述几个阶段的发展,已成为一个多元化的学科分支,包含了具有不同目的和不同特色的诸多发展轨迹。从全局的角度对这些发展进行辩证的反思和总结,将有助于研究者在这一领域中准确定位、把握方向。我很高兴地看到,《预测控制的理论与方法》一书,正在尝试做出这方面的努力。该书作者丁宝苍博士早期曾参加过预测控制的工业应用项目,2000年至2003年在上海交通大学攻读博士学位期间,首先研究了广义预测控制系统的稳定性,然后以两步法预测控制的分析和设计为主完成了博士论文,而后又转向研究预测控制定性综合理论,特别是鲁棒预测控制的综合方法。尽管博士毕业后多次改变工作环境,但他始终坚持这一方向的研究,并且取得了丰硕的成果。因此,由他撰写的这本专著,必定能反映出他在涉足预测控制不同分支时对问题的深刻理解和丰富经验。事实上,从该书的内容和写作风格上我们很容易看到这一点。该书不仅介绍了预测控制不同发展轨迹的丰富知识,可以作为很好的入门书,而且特别注重阐明基本的思路 and 不同研究领域间的相互关系,包括在每一章中以注释和章末提示和理解给出的、只有经过深入研究和思考才能体会到的要点和细节。我想,这也许是该书不同于其他预测控制书籍的最大特色,这对于预测控制的研究者无疑是大有启发的。

预测控制包含了从原理、算法到理论、策略的极其丰富的内容。研究预测控制，不仅仅是学会一两种算法或了解若干分析推导过程，而需要有广阔的视野和知识，在此基础上才能领悟到算法和理论中的真谛。希望该书的出版能为读者提供这样一个平台，使读者准确认识工业预测控制、自适应预测控制和现代预测控制定性综合方法的特点和思路，加深领悟和研究能力，为推动我国预测控制的研究和应用做出贡献。

席裕庚
上海交通大学

前 言

从2008年出版《预测控制的理论和方法》(机械工业出版社)以来,预测控制研究领域发生了很多变化,网络环境下的预测控制和分布式预测控制的设计、综合成为研究热点,经济预测控制以及集成实时优化的预测控制得到了广泛的研究,在2000年前兴起的具有稳定性保证的预测控制(即预测控制综合方法)继续在稳定性研究中占据主要地位,但其服务的主流模型和系统发生较大的转移。但是,作者引用爱因斯坦的一句话来评价:“这正像我们坐在火车里远行一样,要是我们只低头观察靠近轨道的东西,那么我们似乎是在极速地向前奔驰,但当我们注视远处的山脉时,景色就变得完全不同了,哪里似乎变化得非常慢”——预测控制的基本问题也是这样。

因此,作者还是决定修订《预测控制的理论和方法》,以弥补原来的不足,并增加自己在此领域的新见解。2008年版是一本试图继承和发扬的书,因此第1章的前4节参考了本书作者的硕士生导师袁璞教授的专著,1.5节和1.7节则参考了博士生导师席裕庚教授的专著,1.6节采用了作者的博士论文的写法,1.8节则是和博士副导师李少远教授合作的一篇论文,第1章剩下的努力是试图将预测控制的诸多发展轨迹联系起来;接下去,第2章参考了袁璞教授的专著和作者的硕士论文,第3章参考了席裕庚教授的专著,第4、5章参考了作者的博士论文等,第6章以后则更多地体现作者在博士毕业后的研究成果。本次修订包含了基础篇和漫谈篇,它们既是关联的又有一定的独立性。基础篇是对2008年版的继承,故作者没有刻意地改变2008年版的结构和编排,尽量保持其原汁原味。漫谈篇是新版中增加的内容,但建立在基础篇的基础上。由于基础篇尽量保持了原汁原味,所以漫谈篇中稍微有一些重复的细节,但那应该不是主要的。

与此关联的是,2008年以来,作者沿着鲁棒预测控制的路线继续开展输出反馈预测控制的研究,同时系统地研究了以动态矩阵控制(包括状态空间实现)为主的工业双层结构预测控制和递阶工业预测控制(已出版《工业预测控制》一书),前者使得本书的“基础篇”不再包含输出反馈鲁棒预测控制(2008年版第10章),后者使得对2008年版第3章(动态矩阵控制)大大简化后合并到第2章。由于输出反馈鲁棒预测控制研究更加复杂,作者觉得可以不放在“基础篇”中,而是放在“漫谈篇”中。此外,作者在基础篇中还做了若干删除、添加和修正。请读者注意:本书同一个斜体字符在下标时可能变为正体,这时它所代表的物理意义和斜体字符相同。

预测控制的主要应用对象是有约束、多变量系统。一般认为预测控制是20世纪70年代后期产生的计算机控制算法,那时出现的动态矩阵控制和模型预测启发控制受到的认可度一直很高。但在此之前,早在20世纪70年代初期就有关于滚动时域控制的研究。20世纪80年代,对自适应控制的研究很热,英国学者Clarke又适时地提出了广义预测控制。广义预测控制在当时的背景下比动态矩阵控制和模型预测启发控制更适合理论分析。到20世纪90年代,国际上对预测控制的理论研究主要转向预测控制综合方法,并逐渐形成以最优控制为理论基础的具有稳定性保证的预测控制的概略性思路。并且,综合型预测控制的早期形式就是20世纪70年代初的那些滚动时域控制。到目前为止,预测控制综合方法基本上无法应用到

实际工程中,原因在于它难以被完好地嵌入到递阶结构工业预测控制的框架中——即使是双层结构预测控制也没有顺利地采用综合方法。

要细致理解预测控制学术理论和工程实践的差异,将涉及控制理论的各个方面,包括系统辨识、模型近似和简化、状态估计、模型变换等等。正是这种复杂性使得人们从不同角度对预测控制方法进行突破。对一个系统采用简单的控制器,如动态矩阵控制、模型预测启发控制,可得到“难以琢磨”的闭环系统;对一个系统采用复杂的控制器,如预测控制综合方法,却可得到容易分析的闭环系统;广义预测控制采用了不太简单的控制器(考虑辨识在内),得到了更加“难以琢磨”的闭环系统,但这是自适应控制不可避免的。预测控制的科研人员要理解各种方法的差异,深知差异的根源,采用辩证的眼光看待。对一个工程技术人员,要理解任何一种方法都不是万能的,其成功和失败都可有深刻的理论原因;要理解模型的选择在预测控制实施中的重要性,不能概括为模型越准确越好,还有很多的理论支撑。

感谢上海交通大学席裕庚教授、上海交通大学李少远教授、中国石油大学袁璞教授、加拿大 Alberta 大学黄彪教授、新加坡南洋理工大学谢利华教授对我科研工作的支持和指导!博士生胡建晨、杨原青和研究生王彭军、谢亚军、陈桥参与了文稿校对工作。此外,著者的研究工作受到国家自然科学基金(编号 61573269)和陕西省自然科学基金基础研究计划(编号 2016JM6049)的资助,在此一并表示感谢。

由于著者水平有限,本书会有很多不尽如人意之处,衷心希望读者给予批评指正。

著者 丁宝苍

2016 年 10 月于 西安交通大学

目 录

序
前言

基 础 篇

第 1 章 系统、模型与预测控制	3
1.1 系统	3
1.2 数学模型	5
1.3 状态空间模型与输入输出模型	6
1.3.1 状态空间模型	6
1.3.2 传递函数模型	7
1.3.3 脉冲响应与卷积模型	8
1.4 连续时间系统的离散化	8
1.4.1 状态空间模型	9
1.4.2 脉冲传递函数模型	9
1.4.3 脉冲响应与卷积模型	10
1.5 预测控制及其基本特征	10
1.5.1 轨迹和发展历史	10
1.5.2 基本特征	11
1.5.3 工业预测控制的“三大原理”	13
1.6 三种典型的预测控制优化问题	14
1.6.1 无穷时域	15
1.6.2 有限时域：经典预测控制	15
1.6.3 有限时域：综合型预测控制	15
1.7 有限时域控制：采用“三大原理”的例子	16
1.8 无穷时域控制：双模次优控制的例子	18
1.8.1 三个相关控制问题	18
1.8.2 次优解	18
1.8.3 可行性与稳定性分析	20
1.8.4 数值例子	21
1.9 从经典预测控制到综合型预测控制	23
第 2 章 基于非参数化模型的预测控制	26
2.1 模型算法控制原理	26
2.1.1 脉冲响应模型	26
2.1.2 模型预测与反馈校正	27
2.1.3 优化控制：单入单出情形	28
2.1.4 优化控制：多变量情形	30
2.2 模型算法控制中约束的处理	32
2.3 动态矩阵控制原理	34

2.3.1 单入单出情形	35
2.3.2 单入单出情形：另一种推导方式	37
2.4 预测控制的递阶实施方式	40
第3章 广义预测控制	42
3.1 算法原理	42
3.1.1 预测模型	42
3.1.2 丢番图方程的解法	43
3.1.3 滚动优化	45
3.1.4 在线辨识与校正	47
3.2 一些基本性质	48
3.3 与模型系数无关的稳定性结论	49
3.3.1 广义预测控制向线性二次型问题的转化	49
3.3.2 稳定性证明的工具：Kleinman 控制器	50
3.3.3 与 Kleinman 控制器形似的广义预测控制律	52
3.3.4 基于 Kleinman 控制器的广义预测控制的稳定性	53
3.3.5 与 Ackermann 关于 deadbeat 控制的公式的等价性	54
3.4 加入终端等式约束的广义预测控制	55
3.5 多变量系统和约束系统情形	57
3.5.1 多变量广义预测控制	57
3.5.2 约束的处理	59
第4章 两步法预测控制	61
4.1 两步法广义预测控制	61
4.1.1 无约束情形	62
4.1.2 有输入饱和和约束情形	62
4.2 两步法广义预测控制的稳定性	64
4.2.1 基于 Popov 定理的结论	64
4.2.2 寻找控制器参数的两个算法	66
4.2.3 实际非线性界的确定方法	67
4.3 两步法广义预测控制的吸引域	67
4.3.1 控制器的状态空间描述	68
4.3.2 吸引域相关稳定性	68
4.3.3 吸引域的计算方法	70
4.3.4 数值例子	71
4.4 两步法状态反馈预测控制	72
4.5 两步法状态反馈预测控制的稳定性	75
4.6 基于半全局稳定性的两步法状态反馈预测控制的吸引域设计	78
4.6.1 系统矩阵无单位圆外特征值的情形	78
4.6.2 系统矩阵有单位圆外特征值的情形	80
4.6.3 数值例子	82
4.7 两步法输出反馈预测控制	84
4.8 两步法输出反馈预测控制的稳定性	85
4.9 两步法输出反馈预测控制：中间变量可得到情形	89
第5章 预测控制综合方法概略	91

5.1 一般思路：离散时间系统情形	91
5.1.1 改造的优化问题	91
5.1.2 “三要素”和统一的稳定性证明思路	92
5.1.3 稳定性证明的直接法	92
5.1.4 稳定性证明的单调性法	93
5.1.5 反最优性	95
5.2 一般思路：连续时间系统情形	96
5.3 稳定性要素的实现	98
5.3.1 采用终端零约束	98
5.3.2 采用终端代价函数	98
5.3.3 采用终端约束集	99
5.3.4 采用终端代价函数和终端约束集	99
5.4 一般思路：不确定系统情形	100
5.4.1 开环 min-max 单值优化预测控制	101
5.4.2 闭环 min-max 优化鲁棒预测控制	102
第 6 章 状态反馈预测控制综合	104
6.1 多胞描述系统和线性矩阵不等式	104
6.2 基于 worst-case 性能指标的在线方法：零时域	105
6.2.1 性能指标的处理和无约束预测控制	106
6.2.2 约束的处理	107
6.3 基于 worst-case 性能指标的离线方法：零时域	110
6.4 基于 worst-case 性能指标的离线方法：变时域	112
6.5 基于标称性能指标的离线方法	117
6.5.1 零时域	117
6.5.2 启发式变时域	118
第 7 章 有限切换时域的预测控制综合	123
7.1 标称系统的标准方法	123
7.2 用预测控制方法求无穷时域约束线性二次型控制的最优解	125
7.3 标称系统的在线方法	127
7.4 用预测控制方法求无穷时域约束线性时变二次型控制的准最优解	130
7.4.1 整体思路	131
7.4.2 min-max 约束线性二次型控制的求解	132
7.4.3 有限时域无终端加权情形（问题 7.8 的求解）	133
7.4.4 有限时域有终端加权情形（问题 7.9 的求解）	134
7.4.5 准最优性、算法与稳定性	135
7.4.6 数值例子	136
7.4.7 与 6.2 节方法的比较	137
7.5 多胞描述系统的在线方法	139
7.5.1 部分反馈方法	139
7.5.2 参数依赖开环方法	142
第 8 章 预测控制综合的开环优化与闭环优化	147
8.1 一种简单的部分闭环优化预测控制	147

8.1.1 切换时域为0的在线和离线方法	148
8.1.2 切换时域非0的一个有效算法	149
8.2 三模预测控制	151
8.3 混合型预测控制	153
8.3.1 算法	153
8.3.2 联合优势	156
8.3.3 数值例子	157
8.4 开环优化预测控制及其特点	159
8.4.1 单值开环优化预测控制	159
8.4.2 参数依赖开环优化预测控制	160
8.5 切换时域为1的预测控制	163

漫 谈 篇

第9章 一种基于开环优化的预测控制	167
第10章 基于多胞描述模型成为热点	172
第11章 不变集陷阱	177
第12章 时域 N 为0 或者为1	183
第13章 变体反馈预测控制	187
第14章 关于最优性	196
第15章 最大化可应用模型范围	199
第16章 状态不可测时的开环优化预测控制	201
第17章 输出反馈不能来源于简单地推广状态可测时的结果	207
第18章 动态输出反馈和二次有界性方法	212
第19章 采用范数定界技术处理有界噪声	218
第20章 状态估计误差的滚动更新	224
第21章 结束语	227
参考文献	230

基 础 篇

第 1 章 系统、模型与预测控制

在 20 世纪 70 年代，工业界（而不是控制理论界）首先构思出预测控制。在 20 世纪 80 年代，预测控制受到越来越广泛的重视。到现在，毫无疑问预测控制是化工和其他一些领域里应用最多的多变量控制算法。预测控制几乎可以用于任何控制问题，在如下一些问题中预测控制优势明显：

- 1) 操作变量和被控变量的维数很高；
- 2) 操作变量和被控变量都需要满足物理约束；
- 3) 控制指标经常变化和/或设备（传感器/执行器）易出现故障；
- 4) 时滞系统。

预测控制中一些著名的算法包括动态矩阵控制（DMC）、模型算法控制（MAC）以及广义预测控制（GPC）等。这些算法虽在某些细节上有所不同，但是主要思想都是类似的。最基本的线性无约束预测控制算法与线性二次型控制很接近，具有解析解。在考虑约束时，一般在每个采样时刻在线实时求解一个优化问题。预测控制充分利用当今计算机的强大运算功能，来达到其优良的控制效果。

为了对预测控制的算法基础和意义有个完整的认识（尤其是针对初学控制理论的读者），本章简单介绍系统、模型和预测控制的一些概念。本章 1.1 ~ 1.4 节主要以文献 [6] 为基础；1.5 节和 1.7 节主要参考了文献 [5]；1.6 节参考了文献 [1]；1.8 节参考了文献 [53]。

1.1 系 统

在预测控制研究中，系统通常指被控系统、被控对象或者包含预测控制器在内的闭环系统。

系统是相对于其“环境”而独立存在的；一个系统尽管受到环境的影响，但它具有自己的特性而独立存在，并且对环境产生影响。系统与环境的相互影响如图 1.1 所示，环境对系统的影响表现为系统的输入，系统对环境的影响表现为系统的输出，系统输入输出之间的关系是由系统本身特性决定的。随时间变化的系统的输入输出称为输入输出变量。如果系统的输入和输出变量只有一个，则这样的系统称为单入单出（SISO）系统；如果系统有多于一个输入和/或多于一个输出，则这样的系统称为多变量（Multi - Variable）系统；如果系统有多于一个输入且多于一个输出，则称为多人多出（MIMO）系统。

系统的边界是由系统的功能和研究分析的目的决定的。因此，系统与其组成部分（称为子系统）是相对的。在研究系统时，为了更清晰地表示组成该系统的各子系统之间的关系，常常用单向信息流方式表示。如图 1.2 所示的控制系统，由被控对象和控制器两个子系统组成；被控对象的输出是控制器的一个输入，常常称为被控变量；被控变量的期望值（称为设定值或给定值）是控制器的另一个输入变量，这是控制器以外的环境对系统的作

用；控制器的输出作用到被控对象，是被控对象的一个输入变量；外界的干扰是被控对象的另外的输入变量。各输入输出变量均标有箭头，表明其作用方向，使各系统和环境间的相互作用一目了然。

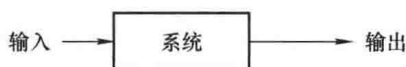


图 1.1 系统与环境相互影响

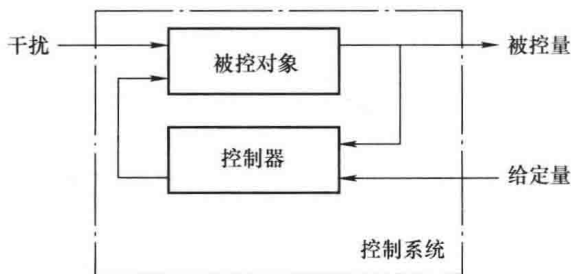


图 1.2 控制系统和环境的相互作用

需要注意的是，由于系统的边界不同，同一个实物可以有不同的输入输出变量。以化学反应器为例，若考察反应器的能量（热）平衡关系，进入反应器的热量常常是系统（反应器）的输入，从反应器带出或取走的热量，则是系统的输出。但是，当反应器作为控制系统中的被控对象时，若用自反应器取出的热量作为调节的手段，以维持反应温度为期望的数值，则反应温度为反应器的输出，自反应器取出或带走的热量则是反应器的输入。

对于一个特定的系统，如果确定了其各组成部分及其每部分的输入输出变量，形成类似图 1.2 所示的框图（注意，图 1.2 中被控对象和控制器也分别是由它们的子系统组成的，确定了这些子系统和它们的输入输出变量，可以得到更细致的框图），即可简单明了地说明各子系统之间的关系。

系统可根据不同的规则划分为：

- 1) 线性系统与非线性系统；
- 2) 标称系统与不确定系统；
- 3) 确定系统与随机系统；
- 4) 时不变系统与时变系统；
- 5) 约束系统与无约束系统；
- 6) 连续状态系统与离散状态系统；
- 7) 连续时间系统与离散时间系统；
- 8) 时间驱动系统与事件驱动系统；
- 9) 集中参数系统与分布参数系统；
- 10) 含计算机网络的系统（网络系统）与不含计算机网络的系统；等等。

此外，兼具连续状态和离散状态，或兼具连续时间和离散时间，或兼具时间驱动和事件驱动的系统称为混杂系统。这是一种非常重要的系统。但应注意的是，本书主要研究连续状态、时间驱动、集中参数、不含计算机网络的系统。

流程工业中的大部分系统都具有非线性、不确定、时变、有约束和分布参数等特点，并以连续时间系统为主；在当前环境下，由于计算机参与过程控制，大都涉及采样系统；在未来的发展中，一般认为都要涉及计算机网络。