

《自动控制原理》课程改革的若干思考

吴刚，石春，王大欣，秦琳琳，黄玉莎

(中国科学技术大学自动化系，安徽省合肥市，230027)

摘要：本文回顾了中国科学技术大学自动化系 60 余年《自动控制原理》课程建设的实践。依据作者从事自动化技术应用 35 年的经验，提出了对《自动控制原理》授课内容改革的若干思考。

关键字：自动控制原理，时域，频域，复频域，根轨迹，Bode 图，PID 控制器，超前滞后校正网络

中图分类号：G642.0

文献标识码：

文章编号：

Some Thoughts on the Curriculum Reform of "Principles of Automatic Control"

Gang Wu, Chun Shi, Daxin Wang, Linlin Qin, Yusha Huang

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui Province, 230027)

Abstract: This paper reviews the curriculum development practice for the course of "Principles of Automatic Control" in the Department of Automation, University of Science and Technology of China over the recent 60 years. Based on the authors' 35 years of practical experience in the applications of automation technology, some thoughts on reforming the course content and teaching practice are discussed.

Key words: Principle of automatic control, Time domain, Frequency domain, Complex frequency domain, Root locus, Bode diagram, PID controller, Lead-lag network

1 中国科学技术大学自动化系的《自动控制原理》

1.1 中国科学技术大学自动化系的诞生

1958 年 6 月中共中央书记处通过建立中国科学技术大学的决定，1958 年 9 月 20 日开学，设：原子核物理和原子核工程系；技术物理系；化学物理系；物理热工系；无线电电子学系；自动化系；力学和力学工程系；放射化学和辐射化学系；地球化学和稀有元素系；高分子化学和高分子物理系；应用数学和计算技术系；生物物理系；应用地球物理系。

中国科学技术大学自动化系是钱学森倡议成立的，是中国第一个自动化系。系主任武汝扬（中国科学院自动化所所长，后任中国科学技术大学党委书记、副校长），总支书记刘宏，副主任陆元九、杨嘉墀（均为中国科学院自动化所副所长），总支副书记张春江。自动化系设三个专业：一专业控制

理论，专业主任童世璜；二专业运动物体控制，专业主任屠善澄；三专业自动化元件，专业主任杨嘉墀。三专业又分三个专门化：原子能反应堆控制，主任杨嘉墀；远动学，主任王传善；磁放大器，主任杨守庚。

由此可见，中国科学技术大学（包括自动化系）建校时，系、专业设置的指导思想非常明确：发挥中国科学院的优势，紧紧围绕决定国家安全的高科技（当时就是两弹一星一艇），以任务带学科，以学科建专业。体现了“红专并进，理实交融”的校训。

1.2 《自动控制原理》的历史发展情况

文革前在北京办学时期，1958 级-1961 级 06 系（自动化系）、1962 级-1965 级 06 系 5 专业（无线电电子学系自动控制专业），开设《自动调节原理》，主讲张念村，教材《自动调整原理》^[1]，上下两册，前苏联 B.B.索洛多夫尼科夫主编，大连工学院王众讷译。

1970 年南迁合肥，6 系 5 专业 1972 级、1974

第一作者：吴刚（1964-），男，硕士，教授，本文受中国科学技术大学 2020 年校级本科质量工程项目支持：串联多容系统建模与预测控制（2020xjyxm029）。

级工农兵学员，开设《自动控制原理》，主讲张念村、曹雅君等，教材用自编油印讲义，40学时。

1975级工农兵学员，6系5专业开设《自动控制原理》，主讲涂其桷，无教材。

1977级-1979级6系5专业、1980级-1983级10系（系统科学与管理科学系）自动控制专业、1984级-2006级10系（自动化系）自动化专业开设《自动控制原理》，主讲张念村、涂其桷、彭立信、庞国仲、王裕群、蒋德珍、薛福珍等。前期教材采用《现代控制工程》^[2]，尾形克彦著，卢伯英译；1993年-2008年采用《自动控制原理》^[3]，庞国仲编，中国科学技术大学出版社。学时经历多次调整，先后采用过120学时、100学时、80学时。

2007级-2018级，自动化系开设《自动控制原理》，不分班，每年全校选课人数在100-140人，主讲吴刚，教材采用Modern Control Systems^[4]，by Richard C. Dorf, Robert H. Bishop，电子工业出版社，先后采用第11、12、13版英文版，80学时。

《自动控制原理》配套实验：采用模拟机、小功率随动系统（清华大学）开设实验，以后拟增加单容水箱控制系统、多容水箱控制系统、硬件在环系统。

1.3 中国科学技术大学自动化系《自动控制原理》的历史经验与传承

1、选择工程和教学经验最丰富、授课效果最好的教员担任本课程主讲教师。

2、担任本课程主讲教师，与金钱、地位无关，而是荣誉。

3、保证充裕的课时。

4、尽可能采用国际著名教材，不得已时宁可自编讲义，却不出版，以便随时更新教材、授课内容。老一辈人的理念是：“写书的人不干活，干活的人不写书”。

2 选用 Modern Control Systems 做为教材的原因

近12年来，我们选用由Pearson Education（培生教育出版集团）授权电子工业出版社出版的英文教材，Richard C. Dorf 和 Robert H. Bishop 所著Modern Control Systems^[4]，先后使用了第11、12、13版，只讲授1-2、4-10章，不讲3、11-13章。

2.1 选用本教材的主要原因

2.1.1、本书从第一章就开始讲控制系统设计，每一章都以控制系统设计为中心，从最简单的比例控制器讲起，循序渐进地讲授控制系统设计。传统教材是先讲控制系统分析，到最后一章才讲控制系统设计，而此时已经临近期末，其它课程开始考试、交大作业和实验报告，学生的注意力已经分散，最终学生往往长于分析、短于综合。本书的教学体系避免了传统教材和授课体系过分注重控制系统分析、忽视控制系统设计的痼疾。

2.1.2、例题和习题都来自于实际的工程和科研，不是抽象的数学问题。每道题先介绍工程背景，从工程中抽象出物理模型，再从物理模型抽象出数学模型，并利用数学模型分析、设计控制系统。一些教材往往直接给出数学模型，不讲或少讲工程背景，忽视由工程中抽象出物理模型、再从物理模型抽象出数学模型的过程，很容易把《自动控制原理》变成一门应用数学课程。

2.1.3、贯穿全书各章设计了一个序贯设计案例：磁盘驱动器读取系统。在每一章结束时，都会结合本章的基本概念、基本方法对这个案例进行分析、设计，逐步加深学生对控制系统的理解。

2.1.4、本门课程涉及的多数概念、方法已经有近百年的发展历史，许多教科书中都有详细介绍。但是，本书能够紧密结合最新的工程和科研实践，结合新的工业革命，给成熟的概念、方法赋予新的应用背景，提高初学者的学习兴趣、学习自动化专业的热情，拓展学生的知识面。

2.1.5、全书共有980道不同难度、不同背景、不同工程领域的习题，包括测验题 Skills Check、练习题 Exercises、习题 Problems、难题 Advanced Problems、设计题 Design Problems、MATLAB 习题 Computer Problems，使初学者能够循序渐进地理解和建立控制系统的基本概念。

2.1.6、在设计题 Design Problems 中，每一章都有一道连续设计题 Continuous Design Problems，使学生能够一章接一章地逐步完成一个控制系统设计。

2.1.7、每过若干年推出一个新的版本，目前已经是第13版，全世界超过400所学院和大学采用本书作为教材。

2.1.8、除第一章外，每一章都有一节采用MATLAB进行控制系统计算机辅助分析、设计。

2.1.9、作者创造性地将控制系统设计过程分解为三大阶段、七个步骤。

2.1.10、控制器设计强调一对主导共轭闭环极点法。

2.2 本书第 13 版的改进

相比于以前的版本，第 13 版有如下改进：

2.2.1、新增交互式电子书教材。

2.2.2、更新了网站 www.pearsonhighered.com/dorf。

2.2.3、更新、新增了 20% 的习题。

2.2.4、更新了第 10 章超前、滞后校正网络的设计过程，更加易于理解。

2.2.5、增加了 PID 控制器、预滤波器，以及绿色工程、新能源、新能源汽车等内容。

2.3 本书的主要缺点

本书存在的主要缺点：主要内容还停留在 70 年代，随着制造业的逐渐转移，美国的工科教授、博士生确实很少有接触控制工程实践的机会；只介绍二阶系统性能，没有讲一阶系统性能；PID 参数整定方法没有介绍使用最广泛的经验法，主要讲授各种 Ziegler-Nichols 整定法，也从一个侧面反映作者缺少控制工程实践；在时域中评价闭环控制系统性能时，依然倾向于采用 4:1 衰减曲线法，习题、例题中设定的允许超调量往往过大、增益裕量和相位裕量往往过小。

我们在授课时，有些内容不讲或略讲：状态变量法；信号流图；模型降阶的频率响应近似法；灵敏度与根轨迹；Nichols 图；在 Bode 图上用解析方法设计控制系统；最小拍响应系统设计。同时增加了一些内容：一阶系统性能；PID 整定的经验法。

3 进一步改革《自动控制原理》课程的思考

大学毕业后，笔者从事自动化应用凡 35 年，应用领域包括炼油、化工（石油、煤、氯碱）、热工、动力、电力、机电、造纸、硅酸盐、伺服系统、现代农业、网络流媒体、新能源汽车、生物医学控制工程等。长期的工程和教学实践，促使我们从实际应用的角度反思《自动控制原理》的教学内容。

3.1 建模方法

建模与系统辨识理论发展到今天，建模的方法层出不穷，但在实践中真正能用的不多，有些以前常用的方法，现在也很少用了。作者对经典建模方法的应用经验如下。

频率响应法：从未用过，超低频频率特性测试仪在伟大的淘宝、京东、拼多多上都找不到，可见

产业界也都很少使用了；

机理建模法：偶尔使用，侧重于理解系统、获得建模的先验知识、确定模型结构（阶次，纯滞后）；

伪随机二位式序列 PRBS：从未用过；

阶跃响应法（飞升曲线法）：偶尔使用，特别是过程控制系统，纯滞后、惯性时间往往比较大，阶跃响应过渡过程时间太长，试验难以完成；

控制工程实践中作者主要使用的建模方法：方波响应；组合方波响应；更多的是采用运行数据，各种最小二乘法，尤其是渐消记忆递推增广最小二乘法，在实践中比较好用。

3.2 系统描述方法

系统结构、动力学特性的描述方法很多，作者的应用经验如下。

信号流图：从来没有遇到复杂到需要用信号流图的系统，方框图足矣。确实用处不大，似乎仅限于给学生考试。

根轨迹图：从未用过。特别是过程控制，当存在纯滞后时，使用很困难，几乎无法使用。

对数幅相图：从未用过。

Nyquist 图：从未测量过，从未用过。

Nichols 图：从未用过。中国也从来没有 Nichols 图的坐标纸，当然现在可以用 MatLab 绘图。

Bode 图：偶尔使用。非最小相位系统，特别是有纯滞后系统，应用困难。从应用角度出发，应该是先测量得到 Bode 图，再从中近似出传递函数，而现在往往是先得到传递函数，再画 Bode 图。如果已经得到传递函数，可用的分析、设计方法很多，往往也就不需要 Bode 图分析、设计了。

3.3 稳定性分析、设计

闭环稳定性判断非常重要，作者的经验如下。

Routh-Hurwitz 稳定性判据：从未用过。

根轨迹法：从未用过。当存在纯滞后时，使用很困难，几乎无法使用。

Nyquist 稳定性判据：从未用过。

Bode 图法：偶尔使用。

实践中主要使用：根据实际系统的时域响应判断稳定性；如果已经获得传递函数，可以采用以 MatLab 为代表的时域计算机仿真技术；还可以使用硬件在环、半实物仿真、台架试验研究稳定性。

3.4 控制器设计

状态空间法，以及基于状态空间法的各种控制器：除了卡尔曼滤波，其他很少成功应用过；除了

能控性、能观性，似乎也没有对系统本质的洞察。

超前校正网络、滞后校正网络、超前滞后校正网络：从未用过；接触到有研究者应用的，都是把很多年以前老一辈工程师调试好的模拟控制器数字化，大都是各种转台、稳定平台。

实践中都是各种 PID 控制器（且主要是 PI 控制器），再加上逻辑控制，少部分预测控制、自校正控制（自校正 PID 控制）、专家控制。

4 对古典控制三种方法的思考

分析、设计控制系统时，古典控制有三种方法，时域法，频域法，复频域法（根轨迹法）。在古典控制时代，数据采集、存储、显示、计算、逻辑判断都很困难，于是建立了控制系统建模、分析、设计、测量的频域法、复频域法，但实际应用中还是时域法主导。在计算机控制时代，数据采集、存储、显示、计算、逻辑判断都很方便，控制系统建模、分析、设计、测量都在时域中进行，可以方便地使用 MatLab、硬件在环、半实物仿真、台架试验、实际系统试验。

4.1 频域法

在关键频率段上需要逐点建模，仪器设备也比较少，不适用于大纯滞后、大惯性系统；难以处理纯滞后系统；稳态性能很直观，有解析公式；动态性能不直观，很少有解析公式，有很多经验公式，但不同的研究者常常提出不同的经验公式，且适用范围有限；非最小相位系统要同时兼顾两张图。

4.2 复频域法

无法处理纯滞后系统；动态性能很直观，有解析公式；稳态性能不直观，没有解析公式，不关心稳态性能，稳态性能需要反复试凑。

4.3 时域法

在时域中建模、分析、稳定性分析、设计、测量已经有丰富经验，但缺乏系统性总结。

4.4 授课体系

对这三套方法，《自动控制原理》在授课时有四种处理办法：

三套方法都讲；

两套为主（频域法，复频域法），时域法为辅，中国科学技术大学自动化系多年来采用这种办法；

一套为主（频域法），时域法为辅，复频域法不讲，除了航空航天类大学，大多数大学的自动化专业可以采用这种办法；

一套为主（时域法），频域法、复频域法为辅，这是今后《自动控制原理》教学改革的方向。

更进一步的设想，应当整合自动控制原理、计算机控制、工程建模与系统辨识，形成适用于计算机控制时代的新自动控制原理，归根结底，系统、控制系统运行于时域。

5 结论

教学改革必须从客观实践出发，从实践中来、到实践中去，始于市场、终于市场。我们过去很熟悉的技术，有些已经不用了，有些从来就没有广泛应用过，有些已经被淘汰了。《自动控制原理》应当大胆摒弃已经没有或者很少应用或者从来没有广泛应用的授课内容，增加新的内容。

参考文献

- [1] B.B.索洛多夫尼柯夫主编，自动调整原理，王众译，电力工业出版社，1958 年
- [2] 尾形克彦著，现代控制工程，卢伯英译，科学出版社，1976 年
- [3] 庞国仲编，自动控制原理，中国科学技术大学出版社，1993 年
- [4] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, Modern Control Systems, 电子工业出版社，2009 年