



# 控制系统的智能设计

吴 麒 高黛陵 著

4



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 控制系统的智能设计

吴 麒 高黛陵 著



机械工业出版社

“控制系统的智能设计”是本书两著者多年来的独立研究成果，是新一代的控制系统计算机辅助设计（CACSD）。它的主要特征是将高级专家设计控制系统的知识和经验集成于设计软件的知识库中，用以帮助并指导经验不足的设计人员设计出既能保证鲁棒性和动态品质，又能兼顾控制器的简单性的控制系统。设计的结果可与高级专家相媲美。该研究成果已通过国家教育部的正式鉴定。本书详细叙述了控制系统智能设计的理论、算法、软件的结构和功能，并列举了在汽轮发电机组和导弹自动驾驶仪上实际应用的结果。两著者还将所研发的智能设计软件 IntelDes 3.0 以光盘附于本书免费赠送读者使用。

本书是自动控制和自动化专业的科研和工程人员的有价值的参考书，也可供自动控制和自动化专业以及相关专业的职业院校教师和高年级本科生及研究生参考。

### 图书在版编目（CIP）数据

控制系统的智能设计/吴麒，高黛陵著. —北京：机械工业出版社，2003.2

ISBN 7-111-11323-3

I. 控... II. ①吴...②高... III. 控制系统-计算机辅助设计 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2002）第 099243 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：周 娟 版式设计：张世琴 责任校对：李秋荣

封面设计：姚 毅 责任印制：路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·8.75 印张·341 千字

0 001—3 000 册

定价：35.00 元（含 1CD）

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

# 前 言

控制科学是一门技术科学。正如钱学森所指出，控制科学的目的是要把控制论的成果“直接用在工程上设计被控制系统或被制导系统”<sup>①</sup>。

确实，设计出性能优良的控制系统，从来都是控制科学的核心内容和终极归宿，也是控制科学家和工程师们呕心沥血为之奋斗的理想。世代代的科学家和工程师们创造的博大精深的控制理论体系，最终都要落实到优良的控制系统设计方法上。事实上 100 多年来也确实产生了许多精妙的控制系统设计方法和优良的计算机辅助设计软件。但是，令中外控制科学家们困惑不安的是：工程实践中却至今仍然大量沿用着某些相当原始的设计方法，耗时费力而效果往往不尽如人意。

本书两著者认识到，造成这种理论与实践脱节的局面的重要原因是：控制理论教科书和控制系统计算机辅助设计软件中缺少高级专家的具体设计知识。

控制系统的设计人如果仅仅掌握抽象的设计方法和常规的计算机辅助设计软件，而缺乏高级专家的设计知识和经验，是没有把握设计出优良的控制系统的。没有专家知识的指导，设计方法只是“虚”的理论，常规的计算机辅助设计软件也只是“死”的计算工具。专家的设计知识和经验才是完成设计的灵魂和统帅。惟有把高级专家的设计知识和经验集成到计算机软件中作为指导，设计人对设计方法的运用才能恰当，计算才能有效，才能获得理想的结果。这就是**控制系统的智能设计**的基本思路。

控制系统的智能设计是新一代的控制系统计算机辅助设计。凭借高级专家的设计知识和经验作指导，控制系统的智能设计能保证经验不多的普通设计工程师设计出可以与高级专家相媲美的控制系统。

本书两著者多年从事控制理论和控制系统设计的教学和科学研究，于 20 世纪 80 年代末和 90 年代初，逐步形成了上述的认识和思路。1993 年，两著者率先在国内正式提出了控制系统的智能设计这一概念和它的基本理论。其后多年来，在国家自然科学基金的重点资助下，两著者与学生们系统地开展了对控制系统的智能设计的研究，并取得了一系列成果，包括初步建立起控制系统智能设计的理论基础和研制成功两种控制系统智能设计软件。这些理论和软件曾试用于具体工

---

① Tsien, H S. Engineering Cybernetics. Preface. New York: McGraw-Hill, 1954. (在科学出版社 1958 年的汉译本《工程控制论》中，“被制导系统”作“被操纵系统”。)

程对象，完成某汽轮发电机组的多变量控制系统与某导弹的自动驾驶仪的智能设计，得到了很好的结果，证明了控制系统智能设计思想的正确性和可行性。两种智能设计软件已分别通过国家教育委员会（教育部）的正式鉴定，评价为“具有创新性、示范性，处于国内领先，达到国际先进水平”。

对于我们多年前就开始酝酿的想法终于得到初步实现和证实，本书两著者感到欣慰。回忆起“文化大革命”期间，哪怕想要思考一点极小的学术问题都会遭到“批判”，两著者由衷地感到，我们的一点微薄成果，应该首先归功于十一届三中全会以来党的正确路线。

但是，对于控制系统的智能设计的研究和开发来说，本书两著者所做的这些工作还只能算是打下了初步的基础。这是一件既有理论意义，又有工程实用价值的研究事业，而需要继续做的工作比我们已经完成的多得多。两著者真心地希望，这一件由中国人首先提出并由中国人开了头的具有创新性的研究事业不要就此中断。因此两著者决心把自己已做的工作向同行和朋友们报告出来，希望有志于此的同行和朋友们接过我们手中的接力棒，继续做下去，使控制系统的智能设计的研究进一步开花结果，为社会主义中国服务，为控制科学的进步服务。这是两著者撰写本书的目的。

下面简要叙述本书各章的主要内容。

第1章详细阐明控制系统的智能设计的立论理由和历史背景，它在控制科学的发展中应该发挥的作用和应该解决的问题，以及它解决问题的基本方法。这一章还扼要叙述了迄今为止控制系统智能设计的研究工作已取得的成果和尚待完成的任务。

第2章扼要叙述多变量的频率域鲁棒控制理论的若干基本知识，包括：多变量控制系统的频率域描述和分析方法，多变量控制系统的稳定性判据与鲁棒性条件等。它们是其后各章所述的多变量鲁棒控制系统的智能设计方法和智能设计流程的理论基础。

第3章着重讨论选取控制系统设计参数的专家知识，其中主要是关于设计参数与闭环线性系统动态性能之间的关系的知识。这种知识是控制系统智能设计的关键，是智能设计区别于常规的控制系统计算机辅助设计（Computer - Aided Control System Design，简称CACSD）的主要特征，也是智能设计区别于常规的基于专家系统的控制系统设计（Expert Systems Approach to Control System Design）的主要特征。与大多数教科书不同，该章中采用单一的动态性能指标。两著者与学生们做了大量数字计算和分析归纳，又吸收了许多专家的经验，总结出独特的经验公式，并将动态性能划分等级，以适应智能设计的需要。这些专家知识都已集成在两著者与学生们开发的智能设计软件中。

第4章叙述几种适合于实行智能设计并已由两著者加以智能化的控制系统设

计方法. 包括抽取对象响应特征设计方法, 常规的逆 Nyquist 阵列 (INA) 方法, 鲁棒的逆 Nyquist 阵列 (RINA) 方法, 正规矩阵参数优化 (OPNORM) 方法等. 这些设计方法中, 除 INA 方法是英国学者发明的以外, 都是两著者与学生们研究成果. 这些方法都适合于设计单变量和多变量的鲁棒控制系统.

第 5 章用相当大的篇幅描述两著者与学生们研究开发的两种控制系统智能设计软件 IntelDes 1.0 和 IntelDes 3.0. 这一章中详细叙述这两种软件在结构和功能上的主要特点. 结构上的主要特点是采用面向对象技术, 大大增强软件的灵活性和开放性. 功能上的特点是实现了自动化设计, 分层次优化设计和保证设计人的最终决策权. 此外, 这一章中对于这两种软件的其他许多重要功能, 也作出全面的叙述.

第 6 章给出 4 个智能设计实例, 具体地演示了前面各章对控制系统的智能设计这一学术思想的阐述. 有两个设计实例是数字例题, 另两个则是实际的工程课题. 这两个工程课题中, 一个是某汽轮发电机组的多变量控制系统, 另一个是我国某型导弹的自动驾驶仪. 它们的设计都做到了兼顾系统的动态品质、鲁棒性和控制器的简单性, 并都得到了满意的效果.

第 7 章是对控制系统的智能设计的发展前景的展望, 提出了两著者对于如何进一步研究控制系统智能设计的一些不很成熟的设想.

多变量鲁棒控制系统的分析和智能设计问题比单变量系统复杂得多. 为了研究多变量鲁棒控制理论和智能设计, 需要用到一些数学工具. 其中某些数学工具可能已超出工科专业高等数学课程的常规内容. 为帮助读者顺利掌握多变量鲁棒控制理论, 两著者为本书提供了一个附录, 扼要地叙述相关的数学工具. 不熟悉这些数学工具的读者最好在阅读本书第 2 章之前先读这个附录. 对于这些数学工具已有一定了解的读者, 则只需在必要时翻阅参考这个附录.

感谢机械工业出版社的热心建议, 两著者把与学生们研制的控制系统智能设计软件 IntelDes 3.0 以光盘形式附于本书赠送读者. 我们赠送该软件的目的是帮助读者更具体地理解控制系统智能设计. 读者可以在自己的计算机上运行该软件, 以帮助理解本书中所叙述的各项内容. 读者也可以用它实际设计控制系统, 以领会智能设计的优越性. 当然, **由于两著者与出版社都不是经营软件的商业性人员和机构, 所以对于读者在使用该软件独立进行设计工作时可能遇到的问题, 两著者与出版社不能承担商业性的义务.**

两著者希望, 本书能成为控制科学家和控制工程师了解和研究控制系统智能设计的一份有用的文献. 另外, 由于本书只用到工科大学本科的数学和控制理论知识以及计算机软件初步知识, 两著者相信, 本书能成为大专院校控制专业和自动化专业乃至电类各专业本科学生和研究生的一本有益的参考书.

本书的第 1, 2, 3, 7 各章和附录由吴麒撰写, 第 5 章由高黛陵撰写, 第 4

章和第6章均由两著者各撰写一部分。两种智能设计软件 IntelDes 1.0 和 IntelDes 3.0 均由高黛陵主持并指导博士研究生李卫东、葛军等研制。全书的主要内容均为两著者并指导学生们在清华大学自动化系进行科学研究的成果。全书所有缺点和错误均由两著者共同负责。两著者诚恳地欢迎读者提出宝贵意见和批评指正。

借本书出版的机会,两著者愿向多年来一贯热情鼓励和鼎力支持我们研究控制系统智能设计和撰写本书的杨嘉墀院士、陈翰馥院士、李衍达院士、卢强院士表示衷心的感谢,向多年来一贯热情鼓励和慷慨资助我们的研究工作的国家自然科学基金委员会表示衷心的感谢,向多年来一贯热情鼓励和多方帮助我们的研究工作的各位同行专家表示衷心的感谢。

吴 麒 高黛陵  
2002年8月于清华大学

# 目 录

## 前言

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 从常规计算机辅助设计到智能设计 .....         | 1  |
| 1.1 先进的设计理论与落后的设计实践 .....           | 1  |
| 1.2 设计控制系统的难点 .....                 | 4  |
| 1.3 问题的症结 .....                     | 7  |
| 1.4 控制系统的智能设计 .....                 | 11 |
| 1.4.1 新一代的 CACSD .....              | 11 |
| 1.4.2 不同于专家系统方法 .....               | 13 |
| 1.4.3 研究现状和前景 .....                 | 14 |
| 第 2 章 多变量鲁棒控制系统频率域理论的基本知识 .....     | 18 |
| 2.1 控制系统的系统矩阵描述 .....               | 18 |
| 2.2 控制系统的频率域描述 .....                | 24 |
| 2.3 多变量控制系统的稳定条件 .....              | 27 |
| 2.3.1 特征多项式与系统的稳定性 .....            | 28 |
| 2.3.2 系统矩阵、特征多项式与传递函数矩阵 .....       | 29 |
| 2.3.3 根据开环系统参数判断闭环系统的稳定性 .....      | 30 |
| 2.4 多变量系统的 Nyquist 稳定判据 .....       | 35 |
| 2.5 矩阵的特征函数和特征轨迹 .....              | 39 |
| 2.6 基于特征轨迹的多变量系统 Nyquist 稳定判据 ..... | 46 |
| 2.7 设计多变量控制系统的特征轨迹方法 .....          | 51 |
| 2.8 控制系统的鲁棒性与传递函数矩阵 .....           | 53 |
| 2.9 设计鲁棒控制系统的正规矩阵方法 .....           | 60 |
| 2.9.1 基于正规传递函数矩阵设计鲁棒控制系统 .....      | 60 |
| 2.9.2 正规矩阵与最优 $H_{\infty}$ 范数 ..... | 61 |
| 2.10 矩阵的正规性指标 .....                 | 64 |
| 第 3 章 控制系统的专家设计知识 .....             | 68 |
| 3.1 控制系统的设计参数 .....                 | 68 |
| 3.2 典型系统应有的基本特征 .....               | 70 |
| 3.2.1 截止角频率 .....                   | 71 |
| 3.2.2 对数幅频特性在中频段的斜率 .....           | 73 |
| 3.2.3 低频段的增益 .....                  | 74 |
| 3.2.4 中频段与低频段的衔接 .....              | 75 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 3.2.5 中频段与高频段的衔接 .....                | 77         |
| 3.2.6 典型系统基本特征小结 .....                | 79         |
| 3.3 两种适用于设计的典型系统 .....                | 79         |
| 3.3.1 典型 4 阶最小相位系统 .....              | 79         |
| 3.3.2 典型 5 阶非最小相位系统 .....             | 81         |
| 3.4 典型系统的稳定性和动态品质指标 .....             | 83         |
| 3.4.1 典型系统的稳定性 .....                  | 83         |
| 3.4.2 动态品质的误差积分指标 .....               | 84         |
| 3.4.3 误差及其各阶导数的初值 .....               | 86         |
| 3.4.4 关于误差积分指标的代数方程组 .....            | 87         |
| 3.4.5 典型 4 阶最小相位系统的误差积分指标 .....       | 91         |
| 3.4.6 典型 5 阶非最小相位系统的误差积分指标 .....      | 93         |
| 3.4.7 误差积分指标与截止角频率的关系 .....           | 95         |
| 3.5 典型系统的专家设计知识库 .....                | 97         |
| 3.5.1 品质指标类型的选取 .....                 | 98         |
| 3.5.2 品质指标中的权系数的选取 .....              | 101        |
| 3.5.3 设计参数值的选取和组合 .....               | 102        |
| 3.5.4 典型系统动态品质指标的数据库 .....            | 104        |
| 3.5.5 控制系统动态性能的等级化 .....              | 106        |
| 3.5.6 动态性能等级区域 .....                  | 110        |
| 3.6 系统的动态品质受到的约束 .....                | 113        |
| <b>第 4 章 控制系统的几种智能设计方法 .....</b>      | <b>116</b> |
| 4.1 抽取对象响应特征设计方法 .....                | 116        |
| 4.1.1 普通对象及其闭环临界角频率 .....             | 118        |
| 4.1.2 超前校正的智能设计 .....                 | 121        |
| 4.1.3 滞后校正的智能设计 .....                 | 123        |
| 4.1.4 抽取对象响应特征方法的智能设计流程 .....         | 124        |
| 4.2 鲁棒的逆 Nyquist 阵列 (RINA) 设计方法 ..... | 127        |
| 4.2.1 常规的 INA 设计方法 .....              | 128        |
| 4.2.2 对角优势矩阵的鲁棒性 .....                | 132        |
| 4.2.3 RINA 设计方法的原理 .....              | 137        |
| 4.2.4 鲁棒的逆 Nyquist 阵列方法的智能设计流程 .....  | 140        |
| 4.3 正规矩阵参数优化 (OPNORM) 设计方法 .....      | 142        |
| 4.3.1 正规矩阵参数优化设计方法的基本思路 .....         | 142        |
| 4.3.2 特征函数矩阵的参数化 .....                | 143        |
| 4.3.3 特征向量矩阵的参数化 .....                | 145        |
| 4.3.4 控制器的简化 .....                    | 147        |
| 4.3.5 正规矩阵参数优化方法的智能设计流程 .....         | 149        |

|                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.6 论增益平衡技术 .....                                         | 151        |
| <b>第 5 章 控制系统的智能设计软件 IntelDes .....</b>                     | <b>153</b> |
| 5.1 IntelDes 的概貌 .....                                      | 153        |
| 5.2 IntelDes 3.0 的功能及界面简述 .....                             | 154        |
| 5.3 矩阵文件及维护功能 .....                                         | 159        |
| 5.3.1 矩阵列表 .....                                            | 159        |
| 5.3.2 矩阵的创建和编辑 .....                                        | 159        |
| 5.3.3 矩阵的删除和更名 .....                                        | 160        |
| 5.3.4 矩阵的打印和索引打印 .....                                      | 161        |
| 5.3.5 矩阵的其他维护功能 .....                                       | 161        |
| 5.4 传递函数矩阵的分析及运算功能 .....                                    | 161        |
| 5.4.1 传递函数矩阵分析 .....                                        | 161        |
| 5.4.2 传递函数矩阵的运算 .....                                       | 165        |
| 5.5 控制系统设计功能 .....                                          | 166        |
| 5.5.1 IntelDes 3.0 中的智能 INA 设计方法 .....                      | 166        |
| 5.5.2 正规矩阵参数优化 (OPNORM) 设计方法 .....                          | 173        |
| 5.5.3 其他几种设计方法 .....                                        | 177        |
| 5.6 控制系统仿真功能 .....                                          | 183        |
| 5.6.1 几种仿真算法的比较与评述 .....                                    | 183        |
| 5.6.2 IntelDes 3.0 的仿真功能 .....                              | 185        |
| 5.7 系统运行参数的设定功能 .....                                       | 194        |
| 5.7.1 数据输出格式的设定 .....                                       | 194        |
| 5.7.2 频率范围的设定 .....                                         | 194        |
| 5.7.3 要求的设计指标的设定 .....                                      | 196        |
| 5.7.4 仿真参数的设定 .....                                         | 196        |
| 5.8 工具/帮助功能的使用 .....                                        | 197        |
| 5.8.1 智能数据管理机制 .....                                        | 197        |
| 5.8.2 表达式计算平台 .....                                         | 199        |
| 5.8.3 帮助系统 .....                                            | 200        |
| <b>第 6 章 控制系统的智能设计实例 .....</b>                              | <b>202</b> |
| 6.1 抽取对象响应特征设计方法实例 .....                                    | 202        |
| 6.2 鲁棒的逆 Nyquist 阵列 (RINA) 设计方法实例 .....                     | 204        |
| 6.3 正规矩阵参数优化 (OPNORM) 设计方法实例之一: 汽轮发电机组转速和端电压<br>控制器设计 ..... | 210        |
| 6.4 正规矩阵参数优化 (OPNORM) 设计方法实例之二: 导弹自动驾驶仪设计 .....             | 217        |
| <b>第 7 章 控制系统智能设计的发展前景 .....</b>                            | <b>229</b> |
| <b>附录 关于控制系统鲁棒性的一些数学准备知识 .....</b>                          | <b>234</b> |
| A.1 酉空间 .....                                               | 234        |

|                                |                        |     |
|--------------------------------|------------------------|-----|
| A.2                            | 酉矩阵 .....              | 237 |
| A.3                            | 正规矩阵 .....             | 238 |
| A.4                            | 奇异值分解 .....            | 242 |
| A.4.1                          | 奇异值分解的存在性 .....        | 242 |
| A.4.2                          | 奇异值分解的惟一性问题 .....      | 248 |
| A.4.3                          | 正规矩阵的奇异值 .....         | 249 |
| A.4.4                          | 奇异值分解的一些用途 .....       | 250 |
| A.5                            | 线性方程组的最小二乘解问题 .....    | 256 |
| A.5.1                          | 最小二乘解与法方程 .....        | 256 |
| A.5.2                          | 用广义逆矩阵求最小二乘解 .....     | 257 |
| A.6                            | 向量的范数 .....            | 258 |
| A.6.1                          | 定义向量范数的条件 .....        | 259 |
| A.6.2                          | 几种常用的向量范数 .....        | 259 |
| A.7                            | 矩阵的范数 .....            | 260 |
| A.7.1                          | 定义矩阵范数的条件 .....        | 261 |
| A.7.2                          | 定义矩阵范数的一种方法 .....      | 261 |
| A.7.3                          | 矩阵的谱范数 .....           | 262 |
| A.7.4                          | 矩阵的 Frobenius 范数 ..... | 262 |
| A.7.5                          | 矩阵范数的一些性质 .....        | 263 |
| A.8                            | 矩阵的和与积的特征值和奇异值 .....   | 264 |
| 参考文献 .....                     |                        | 267 |
| 附：控制系统智能设计软件 IntelDes 3.0 (光盘) |                        |     |

# 第1章 从常规计算机辅助设计到智能设计

## 1.1 先进的设计理论与落后的设计实践

从麦克斯韦尔 (Maxwell J C)、维什涅格拉茨基 (Вышнеградский И А) 和李雅普诺夫 (Ляпунов А М) 等创立经典的控制理论<sup>⊖</sup>以来, 100 多年中, 控制理论有了巨大的发展. 特别是第二次世界大战以后的半个世纪里, 发展尤为迅速. 多年来, 控制科学家们不但对于控制系统的结构性质和运动规律有了深刻的认识和作出了系统的描述, 而且还创立了许多种设计控制系统的方法. 这些设计方法所适用的控制系统从线性到非线性, 从单输入单输出到多输入多输出, 所使用的数学工具从 Laplace 变换到微分几何. 每种设计方法各有特色. 其中最优良的一些方法已经作为宝贵的知识财富积淀下来, 写进了教科书.

正是由于有了这些设计方法, 大量的工程对象才实现了高质量的控制. 一方面, 这有力地推广了控制技术的广泛应用, 推动了生产技术的巨大进步, 为社会创造了大量财富; 另一方面, 这又反过来促进了控制理论自身的进一步发展. 这一切都是有目共睹的.

确实可以说, 至少从工程的角度看, 控制理论的研究最终就是应该落实到创立设计控制系统的方法. 控制理论与控制系统的设计方法二者的关系, 是认识世界与改造世界的关系. 优良的设计方法的创立, 高性能控制系统的建成, 是控制理论的价值最终实现.

这里要说明一点. 广义地说, 控制系统的设计包括多方面的内容. 诸如选择功率部件, 配置计算机, 对电源提出要求, 乃至对造价的考虑等等, 都可算作设计的内容. 但本书所用的“控制系统设计”一词, 仅限于指控制系统的动态设计. 动态设计不研究硬件问题、能源问题和经济问题. 动态设计的任务是: 对于给定的被控制对象数学模型, 设计出控制器的数学模型, 而该控制器应能使闭环系统稳定并具有良好的动态性能. 这不但是控制理论中关于控制系统设计问题的标准提法, 事实上也是全部设计任务中最复杂最困难的部分.

---

⊖ (1) Maxwell J C. On governors. Proc. Roy. Soc., London, 1868, 16: 270 ~ 283;

(2) Wischnegradski J A. Sur la théorie générale des régulateurs. Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, Paris, 1876, 83: 318 ~ 321;

(3) Ляпунов А М. Общая задача об устойчивости движения. Харьков, 1892.

尽管控制科学家和工程师们多年来创立了许多设计控制系统的方法，人们还是注意到一种奇怪的现象：控制系统的许多新颖优良的设计方法在工程实践中很少得到实际应用。在工程项目中，甚至在某些技术要求很高的很重要的项目中，至今仍然沿用着一些比较陈旧的设计方法。这些方法往往在很大程度上依赖于对多个参数值的大量试凑和反复仿真检验，才能从中选出一个比较满意的方案。这种试凑式设计不但耗费大量人力和计算机资源，而且设计效果通常也不如某些先进的设计方法，但它们却年复一年地在使用着。这种情形，不但在中国，就是在国外也是很常见的。

人们很自然地感到奇怪：一方面，控制理论愈来愈先进，控制系统的设计方法愈来愈精良；另一方面，大量的工程实践中却仍然沿用着某些相当原始的效果不理想的设计方法。先进的设计方法在工程实践中得以施展身手并经受考验的机会很少很少。这种理论与实践脱节的局面，既妨碍控制工程质量的提高，也不利于控制理论的进一步发展，很自然地引起许多有见识的控制科学家的不安。许多科学家开始研究并试图改变这种局面。

人们最初以为，造成这种局面的主要原因是：先进的控制系统设计方法总是包含庞大而复杂的数学计算，普通的设计工程师很难完成，因而妨碍了这些设计方法的推广。于是，随着计算机的普及，控制系统的计算机辅助设计（Computer-Aided Control System Design，简称 CACSD）这一学科便在 20 世纪 60 年代末和 70 年代初应运而生。

早期的 CACSD，只不过是把设计控制系统时用到的各种数字计算的算法一一编为互相分立的计算程序，供设计人选用，如计算和绘制系统的频率特性的程序，求矩阵特征值的程序等等。设计人根据设计的需要，逐一调用各个程序分别完成各项计算，一步一步地实现设计过程。其后，当这样的程序逐渐积累到相当数量时，就出现了按照设计方法的需要将许多程序组织起来，并集成在一起的程序包（package）。应用这样的程序包设计控制系统，可以免除设计人大量的键盘操作和数据转抄，是很大的进步。一段时间内，各种 CACSD 程序包在世界各地雨后春笋般地涌现出来，形成了百花竞开的局面。这一时期的软件包可以统称为常规的 CACSD 软件包。

值得指出的是，由于“文化大革命”的破坏和耽误，中国科学家到 20 世纪 80 年代初期才开始研究 CACSD。在 1988 年和 1991 年，在中国十几所高等学校和科研院所众多科学家的通力合作下，先后开发了两个大型的 CACSD 软件包。它们也属于常规的 CACSD 软件包。它们质量很好，功能很强。从此，中国得以在这一学科跻身于世界同行之列。

然而奇怪的是：到 20 世纪 80 年代中期，尽管世界上已经有了许多高质量的 CACSD 软件包，但上文所说的那种先进的设计理论与落后的设计实践相脱节的

局面却并没有发生多大的变化。这种情况是从事 CACSD 研究的科学家们始料所不及的。人们不得不进一步探究其中的原因。

很快,人们进而认识到:常规的 CACSD 软件包,严格说来,其本身并没有“设计”的功能。它们本身并不会“设计”,它们只是在设计人设计控制系统的过程中承担数字计算这一项任务而已。也就是说,CACSD 软件包扮演的角色是计算员,而不是设计师或助理设计师。计算当然重要,但计算毕竟不是设计工作的最核心的部分。最核心的工作是:理清某一设计方法所包含的各个步骤,以及这些步骤之间的关系,并在每个步骤上正确地作出决策和选取设计参数。但这些工作是常规的 CACSD 软件包做不到,也不打算做的。要使先进的设计理论在实践中得到广泛应用,CACSD 软件包必须在完成计算以外,还能指导设计人遵循复杂设计流程中各步骤的关系去循序渐进地完成设计。

在这样的认识下,20 世纪 80 年代中期开始出现基于专家系统的控制系统计算机辅助设计 (Expert Systems Approach to CACSD)。这是科学家们为克服先进的设计理论与落后的设计实践之间的脱节而作的又一巨大努力。

在这方面首先应当提到的是美国的 Taylor J H, 他于 1984 年利用英国剑桥大学的软件包 CLADP 建立了第一个基于专家系统的 CACSD 软件包<sup>[64]</sup>。在此之后的一段时间里,国外科学家们纷纷开发了许多各具特色的基于专家系统的 CACSD 软件包,并发表了许多有关的著作<sup>[65~73]</sup>。中国的同行们也做出了不少贡献<sup>[42,43,40,10~12,38]</sup>。此外,近年来,通用的计算机辅助设计工具和环境也发展得很快。MatLab, Mathematica, Matrix-x, Ctrl-C 等软件得到广泛的应用。许多新开发的 CACSD 软件包从数据结构到用户界面都利用这些工具或受到它们的影响:或是把专家系统模块加于其上作为其“前端”(front-end),或是直接在解释运行机制的数学平台中实现<sup>[70,72,42,43]</sup>。所有这些,很快形成了 CACSD 学科的新局面。

在基于专家系统的 CACSD 软件包中,专家系统的知识库内储存着控制系统的一种或多种设计方法的设计流程。专家系统的推理机则根据设计的进程引导设计人一步一步地循序完成设计,必要时提示设计人判断当时所处的环境和条件,据以选择下一设计步骤。

基于专家系统的 CACSD 软件确实比常规的 CACSD 软件功能强大。它的出现,标志着人工智能被引入 CACSD,使 CACSD 发展成为将控制理论、计算机科学与人工智能三者融合于一体的交叉学科。这确实是一种实质性的进步,它曾有力地推动了 CACSD 前进的步伐。有一段时间,人们普遍以为,这样的软件包真正名副其实地实现了“计算机辅助设计”。

但是,自从基于专家系统的 CACSD 出现至今,又过去近 20 年了。令人不安的事实是:上文所说的那种先进的设计理论与落后的设计实践相脱节的局面迄今仍然未见明显改善,更不用说根本改善了。众多新颖高级的控制系统设计方法,

以及实现这些设计方法的精致的 CACSD 软件, 仍然只能在很小的圈子里获得少数高级专家的欣赏: 或是给博士研究生讲授, 或是在高级学术会议上研讨, 却始终难以与广泛的工程设计项目直接结合, 始终难以被第一线上的广大设计工程师掌握并为他们服务. 因而这些软件的生命周期一般都不长. 控制理论愈来愈高深, 离工程实际却愈来愈远, 愈来愈像是象牙塔里的珍宝, 而不大像是人们改造世界的锐利武器了.

当然, 不论是常规的 CACSD 还是基于专家系统的 CACSD, 都是控制科学的重要成就. 过去和未来, 它们都发挥过并且还将继续发挥重要的作用. 这里不过是说: 30 年来人们原来对它们所寄予的厚望, 即依靠它们来缩小乃至克服先进的设计理论与落后的设计实践二者之间的脱节, 这个众所期待的战略目标, 始终未能满意地实现. 这个战略目标尽管具有重大的现实意义, 但今天看来, 离开其彻底实现似乎依然相当遥远.

这种情况, 在中国如此, 在国外也相同.

面对这样的现状, 控制科学家与控制工程师都不能不感到困惑.

困惑发人深思. 人们不安地问: 症结究竟在哪里?

## 1.2 设计控制系统的难点

如前所述, 先进的控制系统设计理论与落后的设计实践之间形成引人注目的严重脱节, 而常规的 CACSD 和基于专家系统的 CACSD 又都未能根本克服这种脱节, 这使人们普遍感到困惑.

为了初步探究造成这种脱节的原因, 现在我们从数学上具体看一下设计一个控制系统的难点.

上文中曾说, 控制系统的动态设计是全部设计任务中最复杂最困难的部分, 这是确实的. 从数学上看, 为给定的被控制对象设计控制器, 比分析一个给定的控制系统的运动确实要困难得多. 因为, 分析一个给定的控制系统的运动, 在数学上无非就是求解一组给定的微分方程或差分方程. 这固然已经比许多其他工程领域的设计问题困难, 但毕竟还不是非常困难. 至少我们可以借助于计算机求出数值解. 但若要设计一个控制系统, 则问题的提法与此大不相同. 它意味着要寻找一组未知的微分方程 (即控制器的数学模型), 使其在与另一组给定的微分方程 (即被控制对象的数学模型) 联立后, 其解具有给定的动态性质. 这个任务显然要比求解一组给定的微分方程困难得多. 不仅如此, 这个任务的解决还受到额外的约束: 所求的控制器必须满足一系列附加条件才能在工程上实现. 这些条件往往使问题更难解决. 看下面的简单例子.

图 1-1 中,  $G(s)$  和  $K(s)$  分别是给定的单输入单输出线性被控制对象和待设计的控制器的传递函数,  $Q(s) = G(s)K(s)$  是开环系统的传递函数. 设给定

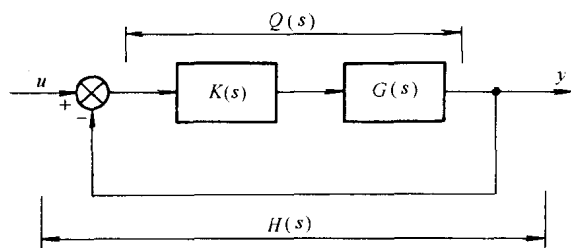


图 1-1 单输入单输出控制系统

$$G(s) = \frac{5s + 1}{s(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)}$$

又设，当输入信号  $u(t)$  为单位阶跃函数时，设计人希望闭环系统的输出信号  $y(t)$  为如下的函数：

$$y(t) = 1 - 1.155e^{-t} \sin(1.732t + 60^\circ) \quad (1-1)$$

从表面上看，这个函数很简单，而且其图像如图 1-2 的曲线  $y_1$  所示，动态品质令人满意。

但是计算的结果却出人意料。运用 Laplace 变换处理式 (1-1)，以  $\bar{y}(s)$  表示  $y(t)$  的 Laplace 变换像函数，得到

$$\bar{y}(s) = \frac{1}{s(0.25s^2 + 0.5s + 1)}$$

因  $u(t)$  是单位阶跃函数，即  $\bar{u}(s) = 1/s$ ，故所要求的闭环系统传递函数应为

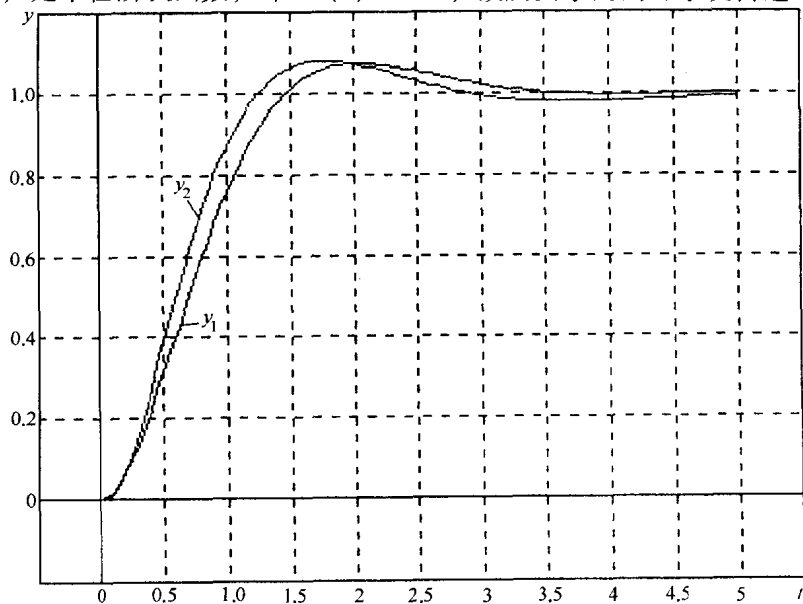


图 1-2 单输入单输出系统的阶跃响应

$$H(s) = \frac{\bar{y}(s)}{u(s)} = \frac{1}{0.25s^2 + 0.5s + 1}$$

根据开环系统与闭环系统传递函数的关系，容易求得开环系统的传递函数应为

$$Q(s) = \frac{H(s)}{1 - H(s)} = \frac{1}{0.25s^2 + 0.5s}$$

因此控制器的传递函数应为

$$K(s) = \frac{Q(s)}{G(s)} = \frac{2(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)}{(5s + 1)(0.5s + 1)} \quad (1-2)$$

但是式 (1-2) 的分子的次数高于分母的次数，即它不是真 (proper) 有理函数，因而这样的控制器在工程上不可能实现。设计失败。

上面的例子中，阶跃响应函数 (式 (1-1)) 是设计人自由选取的，可以把它称作自由参数，或设计参数。它是这个设计过程的出发点。正是由于设计人把这个设计参数选成了式 (1-1)，致使最终算得的控制器 (式 (1-2)) 在工程上不可能实现。应当承认，设计人把设计参数选取为式 (1-1) 是不适当的，是设计失败的原因。

可见，设计人所选取的设计参数不但应当保证系统稳定并且动态品质满意，还必须使最终所得的控制器在工程上能够实现。具体说，控制器的传递函数必须是有理函数。不仅如此，控制器的传递函数还必须在复数平面的右半面没有极点 (即控制器本身须是稳定的)。此外，控制器还应尽量简单。在许多情况下，特别是对于多输入多输出的对象，通常还要求系统的鲁棒性好。

设计人在选取设计参数时竟须顾及这样多的要求，可见其困难。而在上面的例子中，由于在选取函数  $y(t)$  时没有考虑到这许多，也就是有一定的盲目性，尽管全部计算完全正确，设计还是失败了。

反过来看，如果我们采用如下的控制器：

$$K(s) = \frac{2(5s + 1)(0.5s + 1)}{(0.1s + 1)^2} \quad (1-3)$$

则有

$$Q(s) = \frac{2(5s + 1)^2(0.5s + 1)}{s(10s + 1)(2s + 1)(s + 1)(0.1s + 1)^2}$$

可以算得，此系统的输出量的 Laplace 变换像函数成为

$$\bar{y}(s) = \frac{12.5s^3 + 30s^2 + 10.5s + 1}{s(0.1s^6 + 2.16s^5 + 13.265s^4 + 29.805s^3 + 36.6s^2 + 11s + 1)}$$

与此相应的输出量函数是