

参 见 条

J

- | | | | |
|--------|-------------|--------------|------------------------|
| 季戊四醇 | 见多元醇 | 蕉麻纤维 | 见纤维 1. 天然纤维 |
| 加氢精制 | 见石油炼制 | 搅拌 | 见混合 |
| 加氢裂化 | 见石油炼制 | 解热消炎剂 | 见镇痛、退热、消炎剂 |
| 甲胺 | 见胺 | 金刚石 | 见碳 2. 金刚石 |
| 甲胺磷 | 见杀虫剂 | 金刚烷 | 见烃 |
| 甲苯二胺 | 见苯二胺和甲苯二胺 | 金属 π 络合物 | 见有机金属化合物 |
| 甲酚 | 见烷基酚 | 金属茂 | 见有机金属化合物 |
| 甲酚胺 | 见烷基酚 | 金属切削 | 见金属加工 |
| 甲基对硫磷 | 见杀虫剂 | 金属热处理 | 见金属加工 |
| 甲基乙炔 | 见乙炔衍生物 | 金属陶瓷 | 见复合材料 2. 非纤维
增强复合材料 |
| 甲基异丁基酮 | 见酮 | 锦纶 | 见聚酰胺纤维 |
| 甲硫氨酸 | 见氨基酸 | 浸取 | 见萃取 1. 固-液萃取 |
| 甲烷 | 见烃 | 菁染料 | 见增感染料 |
| 甲酰胺 | 见脂肪族酰胺 | 腈纶 | 见丙烯腈系纤维 |
| 钾肥 | 见肥料；钾化合物 | 精馏 | 见蒸馏 |
| 减湿 | 见增湿和减湿 | 精神兴奋剂 | 见兴奋剂 |
| 碱性染料 | 见阳离子染料及碱性染料 | 精神药物 | 见精神病治疗药物 |
| 间氨基苯磺酸 | 见苯胺及其衍生物 | 精细陶瓷 | 见陶瓷 |
| 降胆固醇药物 | 见心血管疾病药物 | 酒精 | 见乙醇 |
| 降糖药 | 见糖尿病药物 | 酒石酸 | 见羟基羧酸及其衍生物 |
| 降血脂药物 | 见心血管疾病药物 | 聚苯硫醚 | 见含硫聚合物 |
| 酱油 | 见调味料 | 聚苯醚 | 见聚醚 |
| 胶带 | 见橡胶制品 | 聚苯乙烯 | 见苯乙烯系塑料 |
| 胶管 | 见橡胶制品 | 聚丙烯 | 见聚烯烃 |
| 胶合板 | 见木基层压材料 | 聚丙烯腈 | 见苯乙烯系塑料；丙烯腈系纤维 |
| 胶乳加工 | 见橡胶制品——乳胶制品 | 聚丙烯纤维 | 见聚烯烃纤维 |
| 焦枞酚 | 见烷基酚 | 聚丁二烯橡胶 | 见橡胶 2. 合成橡胶 |
| 焦炉气 | 见煤的焦化 | 聚对苯二甲酸丁二酯 | 见聚酯 |
| 焦炭 | 见煤的焦化 | 聚对苯二甲酸乙二酯 | 见聚酯 |
| | | 聚砜树脂 | 见含硫聚合物 |

目 录

主 词 条

J	
计算机控制系统	1
计算机软件	19
记忆增强剂和抗衰老药	37
技术服务	45
技术经济评价	51
技术预测	63
季铵化合物	69
寄生虫感染化疗药物	83
加氢和脱氢	111
镓和镓化合物	121
甲苯	135
甲醇	153
甲基丙烯酸及其衍生物	171
甲基丙烯酸系聚合物	191
甲基叔丁基醚	213
甲醛	223
甲酸及其衍生物	251
甲乙酮	271
甲状腺和抗甲状腺制剂	283
钾	297
钾化合物	303
建筑防水材料	327
交联剂和固化剂	353
胶	385

胶粘剂	391
胶乳	417
胶乳配合	451
胶体	483
焦油砂	495
酵母	507
结晶	531
金和金化合物	561
金属表面处理	581
金属基层压板材料	611
金属加工	623
金属涂层	647
金属纤维	679
金属阳极	695
金属有机聚合物	703
金属皂	727
肟	737
精神病治疗药物	781
精细化学品	817
胍及其衍生物	839
静电复印	861
聚氨酯	897
聚醋酸乙烯	921
聚电解质	931
聚硅氧烷	943

目 录

主 词 条

J	
计算机控制系统	1
计算机软件	19
记忆增强剂和抗衰老药	37
技术服务	45
技术经济评价	51
技术预测	63
季铵化合物	69
寄生虫感染化疗药物	83
加氢和脱氢	111
镓和镓化合物	121
甲苯	135
甲醇	153
甲基丙烯酸及其衍生物	171
甲基丙烯酸系聚合物	191
甲基叔丁基醚	213
甲醛	223
甲酸及其衍生物	251
甲乙酮	271
甲状腺和抗甲状腺制剂	283
钾	297
钾化合物	303
建筑防水材料	327
交联剂和固化剂	353
胶	385

胶粘剂	391
胶乳	417
胶乳配合	451
胶体	483
焦油砂	495
酵母	507
结晶	531
金和金化合物	561
金属表面处理	581
金属基层压板材料	611
金属加工	623
金属涂层	647
金属纤维	679
金属阳极	695
金属有机聚合物	703
金属皂	727
肟	737
精神病治疗药物	781
精细化学品	817
胍及其衍生物	839
静电复印	861
聚氨酯	897
聚醋酸乙烯	921
聚电解质	931
聚硅氧烷	943

参 见 条

J

- | | | | |
|--------|-------------|--------------|------------------------|
| 季戊四醇 | 见多元醇 | 蕉麻纤维 | 见纤维 1. 天然纤维 |
| 加氢精制 | 见石油炼制 | 搅拌 | 见混合 |
| 加氢裂化 | 见石油炼制 | 解热消炎剂 | 见镇痛、退热、消炎剂 |
| 甲胺 | 见胺 | 金刚石 | 见碳 2. 金刚石 |
| 甲胺磷 | 见杀虫剂 | 金刚烷 | 见烃 |
| 甲苯二胺 | 见苯二胺和甲苯二胺 | 金属 π 络合物 | 见有机金属化合物 |
| 甲酚 | 见烷基酚 | 金属茂 | 见有机金属化合物 |
| 甲酚胺 | 见烷基酚 | 金属切削 | 见金属加工 |
| 甲基对硫磷 | 见杀虫剂 | 金属热处理 | 见金属加工 |
| 甲基乙炔 | 见乙炔衍生物 | 金属陶瓷 | 见复合材料 2. 非纤维
增强复合材料 |
| 甲基异丁基酮 | 见酮 | 锦纶 | 见聚酰胺纤维 |
| 甲硫氨酸 | 见氨基酸 | 浸取 | 见萃取 1. 固-液萃取 |
| 甲烷 | 见烃 | 菁染料 | 见增感染料 |
| 甲酰胺 | 见脂肪族酰胺 | 腈纶 | 见丙烯腈系纤维 |
| 钾肥 | 见肥料；钾化合物 | 精馏 | 见蒸馏 |
| 减湿 | 见增湿和减湿 | 精神兴奋剂 | 见兴奋剂 |
| 碱性染料 | 见阳离子染料及碱性染料 | 精神药物 | 见精神病治疗药物 |
| | | 精细陶瓷 | 见陶瓷 |
| 间氨基苯磺酸 | 见苯胺及其衍生物 | 酒精 | 见乙醇 |
| 降胆固醇药物 | 见心血管疾病药物 | 酒石酸 | 见羟基羧酸及其衍生物 |
| 降糖药 | 见糖尿病药物 | 聚苯硫醚 | 见含硫聚合物 |
| 降血脂药物 | 见心血管疾病药物 | 聚苯醚 | 见聚醚 |
| 酱油 | 见调味料 | 聚苯乙烯 | 见苯乙烯系塑料 |
| 胶带 | 见橡胶制品 | 聚丙烯 | 见聚烯烃 |
| 胶管 | 见橡胶制品 | 聚丙烯腈 | 见苯乙烯系塑料；丙烯腈系纤维 |
| 胶合板 | 见木基层压材料 | 聚丙烯纤维 | 见聚烯烃纤维 |
| 胶乳加工 | 见橡胶制品——乳胶制品 | 聚丁二烯橡胶 | 见橡胶 2. 合成橡胶 |
| | | 聚对苯二甲酸丁二酯 | 见聚酯 |
| 焦枞酚 | 见烷基酚 | 聚对苯二甲酸乙二酯 | 见聚酯 |
| 焦炉气 | 见煤的焦化 | 聚砜树脂 | 见含硫聚合物 |
| 焦炭 | 见煤的焦化 | | |

jisuanji kongzhi xitong

计算机控制系统 Computer Control Systems

吴明光 浙江大学工业控制技术研究所
李 平 浙江大学工业控制技术研究所
王 慧 浙江大学工业控制技术研究所
于静江 浙江大学工业控制技术研究所
周春晖 浙江大学工业控制技术研究所

1. 最优控制.....	2	5.3. 随机最优控制	10
2. 状态反馈控制.....	3	6. 模糊控制	11
2.1. 反馈.....	3	6.1. 基本工作原理	11
2.2. 状态空间.....	3	6.2. 典型模糊控制器的设计	11
2.3. 状态反馈控制.....	4	6.3. 模糊控制的优缺点	12
3. 多变量系统控制.....	4	7. 控制系统仿真	12
3.1. 多变量系统的描述方法.....	5	7.1. 仿真过程	13
3.2. 多变量控制系统的分析.....	5	7.2. 控制系统仿真的基本内容	13
3.3. 多变量控制系统的综合.....	6	7.3. 控制系统辅助设计	14
4. 适应性和鲁棒控制.....	6	8. 工业控制计算机系统	14
4.1. 自适应控制.....	6	8.1. 发展概况	14
4.2. 鲁棒控制器.....	8	8.2. 系统组成	15
5. 随机控制.....	9	8.3. 系统设计与实施	16
5.1. 概述.....	9	基本参考文献	16
5.2. 卡尔曼滤波器.....	9		

计算机控制系统是强调计算机作为控制系统的重要组成部分而得名。由于计算机处理的是在时间上离散、幅值上量化的数字信号,计算机控制系统有时又称为数字控制系统。随着计算机技术的迅速发展,尤其是微型计算机技术的突飞猛进,计算机控制系统已越来越广泛地应用于石油、化工、冶金、电力等方面的工业过程自动控制系统。从发展的趋势看,计算机控制系统将取代模拟控制系统而成为自动控制系统的主要方式。

计算机控制系统是控制理论和计算机技术相结合的产物。控制理论的发展,尤其是现代控制理论的发展,已与计算机技术息息相关。利用计算机快速强大的数值计算、逻辑判断等信息加工能力,计算机控制系统可以实现常规控制以外更复杂、更全面的控制方案。计算机为

现代控制理论的应用提供了有力的工具。同时,计算机控制系统应用于工业控制实践所提出来的一系列理论与工程上的问题,又进一步促进和推动了控制理论和计算机技术的发展。

计算机控制系统所列的内容包括:最优控制、状态反馈控制、多变量系统控制、适应性和鲁棒控制、随机控制、模糊控制、控制系统仿真和工业控制计算机系统。文中对它们的概念、现状及发展趋势等做了简要的叙述。这些内容代表了现代控制理论最新发展的主要成果以及计算机控制系统的设计、仿真和应用技术。理论研究和工程实践已经表明,利用这些控制理论可以使系统的性能有重大的改善。随着现代化工业生产的发展以及对控制和管理提出的更高要求,计算机控制系统也在深度和

广度上不断发展。在过程生产行业中,以分布式计算机系统(DCS)为基础的计算机集成生产系统(CIPS)将是计算机控制系统未来发展的方向。

1. 最优控制

最优控制(optimal control)理论是现代控制理论的一个重要分支。它所研究的中心问题是:如何根据受控系统的动态特性以及所要求的性能指标,寻求一个最佳控制规律,使得系统按照一定的技术要求运行,并使指定的性能指标达到极值。必须指出,最优控制是在一定意义下对某一指标而言的,一般意义下的所谓最优控制是不存在的。

从不同的角度出发,最优控制就有各种不同的分类方法。

根据系统是否考虑随机扰动,分为确定系统最优控制和随机系统最优控制,确定系统最优控制是随机系统最优控制的基础和特例。

根据讨论的系统是离散的,还是连续的,又可分为连续系统最优控制和离散系统最优控制。

根据目标函数的不同,最优控制有最少时间控制,最少燃料控制,动态误差和静态误差最小控制等。

现以登月舱的月球软着陆为例,以使读者对最优控制问题有个感性的认识,见图1.1。

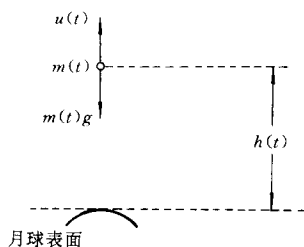


图 1.1 登月舱的月球软着陆

登月舱要在月球表面软着陆,即降落到月球表面时速度为零,以避免任何的撞击。需要确定发动机推力的变化规律,使得燃料消耗最少。

设登月舱的质量为 $m(t)$,它离月球表面的高度为 $h(t)$,垂直速度为 $V(t)$,发动机推力为 $u(t)$,月球表面的引力加速度为常数 g 。设登月舱的自身质量为 M_1 ,携带的燃料质量为 M_2 ,登月舱某时刻 $t_0=0$ 开始登月着陆,初始高度为 h_0 ,初始的垂直速度为 V_0 ,其运动方程式为

$$\dot{h}(t) = V(t) \quad (1.1)$$

$$\dot{V}(t) = u(t)/m(t) - g \quad (1.2)$$

$$\dot{m}(t) = -ku(t) \quad k \text{ 为常数} \quad (1.3)$$

初始状态为

$$m(0) = M_1 + M_2 \quad (1.4)$$

$$h(0) = h_0 \quad (1.5)$$

$$V(0) = V_0 \quad (1.6)$$

在某一时刻 t_f ,登月舱软着陆,即

$$m(t_f) \geq M_1 \quad (1.7)$$

$$h(t_f) = 0 \quad (1.8)$$

$$V(t_f) = 0 \quad (1.9)$$

约束条件是推力 $u(t)$,不能超过发动机所能提供的最大推力 u_M ,即

$$0 \leq u(t) \leq u_M \quad (1.10)$$

目标函数是燃料消耗最少,即选择最优推力 $\hat{u}(t)$,使

$$J = \max_{\hat{u}(t)} m(t_f) \quad (1.11)$$

综上所述,登月软着陆问题抽象为如下的最优控制问题。寻找满足约束条件(1.10)的最优推力规律 $\hat{u}(t)$,使登月舱从初始状态(1.4)、(1.5)、(1.6)转移到终端状态(1.7)、(1.8)、(1.9),并使目标函数(1.11)达到最大值。

由登月舱实例,最优控制问题一般由以下4个部分组成。

(1) 动态系统的状态方程,它表征动态系统所循的运动规律[参见式(1.1)、(1.2)、(1.3)]。在集中参数情况下,动态系统的数学模型写成向量微分方程的形式

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] \quad (1.12)$$

对于线性定常系统,状态方程简化为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1.13)$$

(2) 动态系统的初态与终态,即状态方程的边界条件[参见式(1.4)、(1.5)、(1.6)与(1.7)、(1.8)、(1.9)]。

(3) 性能指标[参见式(1.10)]。从初始状态 $x(t_0)$ 转移到终态 $x(t_f)$,可通过不同的控制作用来达到。为了对不同的控制方案作客观的评价,需要一个准则——性能指标。对不同的最优控制问题,有不同的性能指标,这取决于最优控制所要完成的任务。

(4) 容许控制[参见式(1.10)]。物理现实中控制 u 不能是无限大,而必然有约束,即 u 必须是个闭集,数学表达式为: $u(t) \in \Omega$,集合 Ω 是闭集。

本世纪50年代人们开始探讨时间最优控制问题。随着生产和科学技术的发展,特别是航海、航空和航天技术的发展,推动人们深入研究最优控制问题。人们发现,最优控制问题就其本质来讲是求泛函极值的变分学问题。但是古典变分理论在工程应用中具有明显的局限性,它只能解决容许控制属于开集的一类最优控制问题,相反工程上遇到的问题,其容许控制总要受到某种约束。

1956年苏联学者庞特里亚金(Л. С. Понтрягин)提出了最优控制的极大原理,1957年美国学者贝尔曼

(R. E. Bellman) 创立了“动态规划”，他们卓有成效的工作从理论上解决了诸如把空间运载体准确送入轨道和导弹飞行中燃料消耗最少等一类最优控制问题。

最优控制理论的主要数学工具是线性代数，变分法和泛函分析法。线性二次型最优控制问题是理论上研究得最充分，且在应用领域中最富成果的部分，其问题的求解比较简单，最终都可归结为黎卡提 (Riccati) 方程的求解。

古典变分法、最大值原理和动态规划三者研究的是同一类问题，因此必然存在某种内在的联系。

古典变分法难以处理控制变量受约束的最优控制问题。最大值原理是在哈密顿原理的基础上发展了古典变分法，得到一组关于状态变量 $x(t)$ 和协态变量 $\lambda(t)$ 的常微分方程，这样就归结为求解状态变量方程，协态变量以及控制方程的两点边值问题。动态规划法是在哈密顿-雅可比理论的基础上发展了古典变分法，得到一个关于最优性能指标函数的偏微分方程，这样求解最优控制问题转化为求解偏微分方程和状态方程问题。一般说来，解偏微分方程远比解常微分方程困难，但动态规划却比最大值原理应用的范围要广泛得多，并且所得结论是关于最优控制问题的充分条件。动态规划的基本思想朴素直观：任何时刻，不论现在的状态和过去的决策如何，随后阶段的决策对于现在的状态必定构成最优决策。

求解最优控制问题实际上是寻找一个控制规律，除了某些简单情况可获得解析解外，绝大多数情况下都只能获得数值解。用于数值解法的主要工具是数学规划。用数学规划求解最优控制问题有两个优点：(1) 处理等式约束和不等式约束十分有效，故对状态及控制向量的各种约束方程易解决；(2) 数学规划可以处理较多的变量，不像动态规划那样有维数问题。最优控制问题的数值解法通过数值计算求解最优控制问题，所以又称为直接法。

最优控制理论至今仍然是控制理论的热门课题，无论在深度与广度上都有长足的进展。诸如随机系统的最优控制，非线性系统的最优控制，离散事件系统的最优控制，大系统的递阶控制和分解-协调控制，多目标最优控制，最优控制与数学规划的统一数学表达形式等等。随着人们对客观世界认识的不断深化，又提出了一系列有待解决的新课题。迄今为止，非线性随机控制中，无论用反馈或闭环策略，设计所得的控制器最好也只能是次优的。问题在于，观测(滤波)所得状态不能确保蕴含着等价性。此外，最优控制对系统模型有很高的要求，而系统的不确定性实际上是不可避免的。自寻优控制理论、智能控制理论等用于不确定系统时，一般也只能做到次优控制。

2. 状态反馈控制

2.1. 反 馈

由于外部条件变化或内部参数改变，工业装置无法按照预定的进程精确运行，为此需设计控制系统予以解决。根据控制对象的输入信号是否受输出信号的影响，控制系统可分为开环控制系统 (图 2.1) 和闭环 (反馈) 控制系统 (图 2.2) 两类。

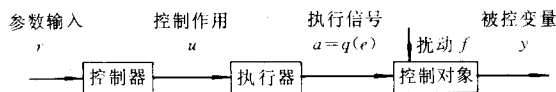


图 2.1 开环控制系统

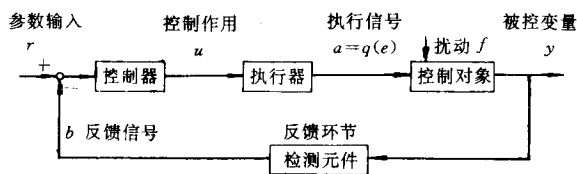


图 2.2 闭环 (反馈) 控制系统

开环系统的控制作用与系统的输出无关。只有当系统参数相当稳定，外部条件变化不大，且对控制精度要求不高的情况下，开环控制系统才可以满意地工作。

闭环系统将系统的被控变量反馈到输入端，并与参数输入相比较产生一个误差信号 e ，控制器的执行信号 a 是误差 e 的函数 $a=q(e)$ ，执行信号 a 作用于被控对象，使被控变量 y 改变，从而减小系统误差 e ，达到实现精确控制的目的。这种将控制效果的信息送回到控制器的概念称反馈。不难看出，一个反馈系统由 4 个基本环节组成：测量比较环节、控制器 (控制算法)、执行环节和被控对象。

2.2. 状态空间

过程控制理论有经典控制理论和现代控制理论两部分。本世纪 50 年代，经典控制理论已经成熟，它是以线性常系数微分方程描述系统为出发点而发展起来的，基本的数学工具是拉普拉斯变换，常用的数学模型为传递函数，主要的分析和综合方法是频率响应法和根轨迹法。随着科学技术的发展，工业装置日趋复杂，生产的规模不断扩大，对自动控制系统精度的要求日益提高。经典控制理论不论在生产实践中，还是在理论上都遇到了严重的挑战，其不足之处是经典控制理论本身所无法克服的。首先，对单输入-单输出卓有成效的经典控制理论不能有效地推广到多输入-多输出系统。其次，经典控制理论只关注输入变量与输出变量间的关系，无法揭示系统内部各物理量的运动规律与内在特性。经典控制理论从

本质上讲是一种“外部研究”法，即所谓的“黑箱子”法。

60 年代兴起的现代控制理论以线性代数为主要数学工具，采用能表征微分方程组的矩阵方程式描述系统，并用函数形式来表达控制指标，因而可通过严格的计算在时域内或频域内进行系统的分析和综合。现代控制理论的发展很大程度上得益于计算机科学的突飞猛进。计算机快速和强大的计算功能是现代控制理论得以广泛应用的主要技术手段。卡尔曼 (R. E. Kalman) 系统地把状态空间法引入到控制理论。在状态空间法的基础上，卡尔曼进一步提出了能控性和能观性这二个表征系统结构特性的重要概念。能控性和能观性使系统的分析和综合在指导原则上有了质的变化，“内部研究”法取代了传统的“外部研究”法。状态空间法既适用于单输入-单输出、线性、定常、集中参数系统，又适用于多输入-多输出、非线性、时变、分布参数系统。因此，状态空间法大大扩展了所能处理问题的领域。

状态空间法中，用以表征系统动力学特性的数学模型，是反映输入变量、状态变量和输出变量间关系的一对向量方程，称为状态方程和输出方程 (见图 2.3)。输入变量是指由系统的外界作用于系统之上，并引起系统内部状态变化的变量 $u_1, \dots, u_r$ 。

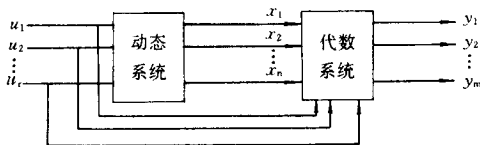


图 2.3 状态方程描述的系统原理图

状态变量是一组能完全表征系统动态特征的最小数量的变量 $x_1, \dots, x_n$ ，状态变量所张成的空间称为状态空间；如果给定初始时刻 t_0 的系统状态 x_0 ，且给定了 $t \geq t_0$ 时的输入，则系统的动态过程完全可由状态变量 $x(t)$ 表征。状态变量的取法不是唯一的，但相互间可转化，是完全等价的。输出变量是指人们从系统中能测量的量，系统的输出也就是系统内部特性的外部表现。

其一般解析式为

$$\dot{x}(t) = f(x, u, t) \quad x(t_0) = x_0 \quad (2.1)$$

$$y(t) = g(x, u, t) \quad (2.2)$$

式 (2.1) 为系统的状态方程，刻画了系统的内部动态特性，即反映了输入 u 以及状态 x 本身对系统动态过程的影响。式 (2.2) 是输出方程，输出方程是代数方程，它反映了输出变量对状态变量和输入变量的依赖关系。如系统为线性定常系统，则 (2.1)、(2.2) 式可简化为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad x(t_0) = x_0 \quad (2.3)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.4)$$

状态空间法是一种时域方法，系统分析和综合所涉及的计算主要是矩阵运算和矩阵变换。不管是系统的分

析还是综合，状态空间法已发展了一整套完整的和成熟的理论和方法。在状态空间法的基础上，先后发展起来的几何理论、代数理论和多变量频域法，一起形成了线性系统理论的四大学派。

2.3. 状态反馈控制

无论是经典控制理论还是现代控制理论，反馈都是系统补偿和设计的主要方式。由于经典控制理论采用传递函数来描述系统，因此反馈量 b (见图 2.2) 只能是输出量 y 的函数。现代控制理论采用系统内部的状态变量来描述系统 [见式 (2.1)，(2.2) 或式 (2.3)，(2.4)]，输出量 y 是状态变量 x 和输入 u 的函数，状态变量包含着与系统输出量相关的信息。因为状态变量数目一般大于输出变量的数目，用状态变量反馈较之输出反馈有更多的控制余地 (见图 2.4)。不难证明，输出反馈能达到的质量指标，用状态反馈也能得到，反之则不然。

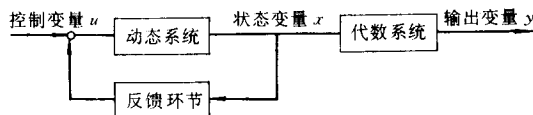


图 2.4 状态反馈结构图

通常并不是每一个状态变量都可以直接测量或能够采用经济的手段进行测量的。解决这一矛盾的途径是，利用可测输入 u 和输出 y 来构造出不能测量的状态 x ，即所谓的观测器设计问题。如果系统中存在噪声，则往往采用辨识方法来获取状态变量 x 。

如果线性定常系统 [式 (2.3)，(2.4)] 完全能控，则通过状态反馈可任意配置全部极点。如果线性定常系统部分能控，而不能控的部分是渐近稳定的，则通过状态反馈仍能使系统稳定，并称之为能镇定系统，在一定条件下借助于状态反馈，可实现解耦控制和最优控制。

3. 多变量系统控制

所谓多变量系统，是指其输入变量或输出变量的数目大于 1 的系统，记为 MIMO 系统 (multi input-multi output system)。

在很多生产过程特别是复杂生产过程中，需要加以控制的变量 (输出) 不只一个，一般要用相应多个控制手段 (输入) 对其施加影响来达到控制目的。在进行控制系统设计时，若将各个输入输出对分别加以考虑，构成多个单回路控制系统，虽然可以做到系统稳定，但由于各个单回路之间可能存在的关联耦合作用 (即各个输入输出变量之间的相互影响)，单回路的控制品质会下降。另一方面，将一个多变量系统作为多个单变量 (即单输入单输出) 系统考虑，缺乏整体性，因此无法做到

整体最优控制。但是,在60年代以前由于控制系统只能用模拟仪表来实现,用其构成多变量控制系统是一件非常复杂甚至难以实现的事。因此,当时以频率响应和根轨迹方法为代表的、主要解决单变量控制系统的分析与综合问题的经典控制理论占了主导地位。在硬件上相应的有适用于单回路控制的PID调节器得到广泛应用。在中国,直到目前为止,在许多工业部门也仍然还是单回路PID控制为主。

50年代后期随着数字计算机的发展、对控制系统性能要求的提高以及受控系统复杂性的增加,多变量系统控制的理论和设计方法应运而生并得到迅速发展。它是现代控制理论的主要研究内容之一,也是现代控制理论与经典控制理论的重要区别之一。目前较为成熟的是线性多变量系统理论,因此本节介绍仅限于线性系统。

50年代末60年代初贝尔曼等人建立的以状态空间描述为核心的线性控制系统理论,奠定了现代控制理论的基础,并为解决多变量控制系统的分析与综合问题提供了有效的时域工具。70年代初罗森布洛克(Rosenbrock)等人在经典控制理论频域描述方法基础上建立了多变量系统传递函数矩阵的矩阵分式描述以及多项式矩阵描述方法,成为线性系统理论的另一个重要组成部分——多变量频域法。因此,多变量控制系统的分析与综合有基于状态空间描述的、基于多变量传递函数矩阵描述的以及两种描述结合的方法,主要有以下内容。

3.1. 多变量系统的描述方法

(1) 多变量系统的状态空间描述 多变量系统的状态空间描述具有以下形式

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), x(0) = x_0, t \geq 0 \quad (3.1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.2)$$

其中, $x(t)$ 为 n 维状态向量, $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)]^T$;

$u(t)$ 为 m 维输入向量, $u(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_m(t)]^T$;

$y(t)$ 为 l 维输出向量, $y(t) = [y_1(t) \ y_2(t) \ \dots \ y_l(t)]^T$;

且 m 与 l 中至少有一个大于1;在不考虑系统时变情况下, A, B 和 C 均为常数矩阵。

(2) 多变量系统的传递函数矩阵 考虑多变量系统输入向量 $u(t)$ 和输出向量 $y(t)$ 的拉氏变换 $u(s)$ 和 $y(s)$, 有

$$u(s) = [u_1(s) \ u_2(s) \ \dots \ u_m(s)]$$

$$y(s) = [y_1(s) \ y_2(s) \ \dots \ y_l(s)]$$

各个输入输出变量之间的关系可用传递函数表示为

$$y_i(s) = g_{i1}(s)u_1(s) + g_{i2}(s)u_2(s) + \dots$$

$$+ g_{ij}(s)u_j(s) + \dots + g_{im}(s)u_m(s) \quad (3.3)$$

其中, $g_{ij}(s)$ 为输入变量 $u_j(s)$ 与输出变量 $y_i(s)$ 之间的传递函数, $i=1, 2, \dots, l, j=1, 2, \dots, m$ 。

输入输出之间的关系也可以用传递函数矩阵形式表示为

$$y(s) = G(s)U(s) \quad (3.4)$$

$$\text{其中, } G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & \dots & g_{1m}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & \dots & g_{2m}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{l1}(s) & g_{l2}(s) & \dots & g_{lm}(s) \end{bmatrix}$$

即为 $l \times m$ 的传递函数矩阵。

(3) 多变量系统的矩阵分式描述 给定输入 U 为 m 维、输出 Y 为 l 维的多变量系统, 具有有理分式形式的传递函数矩阵 $G(s)$, 则一定存在 $l \times m$ 和 $m \times m$ 的多项式矩阵 $N_r(s)$ 和 $D_r(s)$, 以及 $l \times l$ 和 $l \times m$ 的多项式矩阵 $D_l(s)$ 和 $N_l(s)$, 使

$$G(s) = N_r(s)D_r^{-1}(s) \quad (3.5)$$

和

$$G(s) = D_l^{-1}(s)N_l(s) \quad (3.6)$$

成立。 $N_r(s)D_r^{-1}(s)$ 和 $D_l^{-1}(s)N_l(s)$ 均为 $G(s)$ 的矩阵分式描述, 记为 MFD (matrix fraction description)。其中, $N_r(s)D_r^{-1}(s)$ 为 $G(s)$ 的右 MFD, $D_l^{-1}(s)N_l(s)$ 为 $G(s)$ 的左 MFD。

(4) 多变量系统的多项式矩阵描述 给定输入 U 为 m 维、输出 Y 为 l 维的多变量系统, 考虑描述系统内部运动的 n 维广义状态 (pseudo-state) ζ , 系统的动态过程可以如下描述为

$$\begin{cases} P(s)\zeta(s) = Q(s)U(s) \\ Y(s) = R(s)\zeta(s) + W(s)U(s) \end{cases} \quad (3.7)$$

式中, $\zeta(s)$ 、 $U(s)$ 和 $Y(s)$ 分别为广义状态向量、输入向量和输出向量, $P(s)$ 、 $Q(s)$ 、 $R(s)$ 和 $W(s)$ 分别为 $n \times n$ 、 $n \times m$ 、 $l \times n$ 、 $l \times m$ 的多项式矩阵。这种描述即称为系统的多项式矩阵描述, 记为 PMD (polynomial matrix description)。

以上(2)、(3)、(4)均属于多变量频域法描述。对同一多变量系统的上述4种描述之间可以互相转换。

3.2. 多变量控制系统的分析

多变量控制系统的分析主要有能控能观性分析和稳定性分析。

(1) 线性多变量系统的能控性和能观性在状态空间描述中有完备的分析方法, 参见有关线性系统理论的文献。由于系统的能控能观性概念是基于系统的状态空间描述而建立起来的, 因此在多变量频域描述中有关能控能观性的分析均与向量状态空间描述转换有关, 即多变量频域描述的状态空间实现的能控能观性分析。

(2) 线性多变量系统的稳定性分析主要建立在李亚普诺夫稳定性理论上, 其重要结论有:

对于无外输入的线性定常系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t), x(0) = x_0, t \geq 0 \quad (3.8)$$

① 系统是渐近稳定的充分必要条件是 A 的所有特征值均具有负实部(特征值判据)。

② 系统是渐近稳定的充分必要条件是, 对任意给定的一个正定对称矩阵 Q , 如下形式的李亚普诺夫矩阵方程

$$A^T P + PA = -Q \quad (3.9)$$

有唯一正定对称矩阵解 P (李亚普诺夫判据)。

3.3. 多变量控制系统的综合

多变量控制系统主要有以下综合方法:

(1) 状态反馈极点配置——状态空间综合法 给定线性定常系统

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.10)$$

其中, x 为 n 维状态向量, u 为 m 维控制向量。所谓状态反馈极点配置问题, 就是确定状态反馈控制 $u = -Kx + v$ (v 为参考输入), 也就是确定一个 $m \times n$ 的状态反馈矩阵 K , 使得所导出的状态反馈闭环系统

$$\dot{\hat{x}} = (A - BK)x + Bv \quad (3.11)$$

的极点为所期望的闭环系统极点 $\{\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_n^*\}$ 。

系统(式 3.10) 可以通过线性状态反馈任意配置其全部极点的充分必要条件是该系统为完全能控。确定状态反馈矩阵 K 的算法有很多, 较常用的有能控规范形法、直接法(循环矩阵法)等。

(2) 状态反馈极点配置——频域综合法 状态反馈极点配置频域综合问题提法是: 给定系统传递函数矩阵 $G_0(s)$, 其矩阵分式描述为 $G_0(s) = N(s)D^{-1}(s)$, 引入状态反馈可得闭环系统的传递函数矩阵为

$$G(s, K) = N(s)D_K^{-1}(s) \quad (3.12)$$

要求确定一个适当的状态反馈矩阵 K , 使得

$$\det D_K(s) = 0 \quad (3.13)$$

的根等同于任意指定的一组期望极点值。

状态反馈极点配置的频域综合算法也很多。与状态空间法相比, 频域法的一个突出的优点是综合过程较为简单和直观。

(3) 线性二次型最优控制系统综合 线性二次型最优控制系统综合法是多变量控制系统的一种最常用的综合方法。

(4) 状态重构和状态观测器设计 由于在实际过程中许多系统的状态无法直接通过测量得到, 构造一个系统(即状态观测器)以利用原系统的输入输出变量重构其状态来实现状态反馈已成为多变量系统综合中的重要内容。状态观测器综合方法中最为常用的是渐近状态观测器(Luenberger 观测器), 分为全维状态观测器和降维

状态观测器。全维状态观测器问题提法是: 考虑 n 维线性定常系统

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu & x(0) &= x_0, t \geq 0 \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.14)$$

其中, 状态 x 不能直接加以测量, 输入 u 和输出 y 是可以利用的。所谓全维状态观测器, 就是以 y 和 u 为输入, 且其输出 $\hat{x}$ 满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{x}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) \quad (3.15)$$

全维状态观测器存在的充分必要条件是系统[式(3.14)]完全能观。

最常见的全维状态观测器结构为

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}), \hat{x}(0) = \hat{x}_0 \quad (3.16)$$

降维状态观测器与全维状态观测器的区别在于, 在系统[式(3.14)]中, 状态 x 是部分可测的。降维状态观测器的结构比全维状态观测器简单, 有利于工程应用。

(5) 多变量系统的解耦控制 解耦问题是多变量系统综合理论中一个极其重要的问题, 其本质是寻求某种适当的闭环控制规律, 使一个有相互关联(即耦合)的多变量过程转变为多个无关联的单变量过程, 从而实现系统输入输出一对一互不相干的自主控制。根据这样的解耦思想, 已经解耦的系统其传递函数矩阵应是一个非奇异的对角矩阵。有关解耦控制系统的综合问题参见过程控制系统。

4. 适应性和鲁棒控制

在许多工业过程中, 如果由于各种原因(非线性、外界扰动、设备磨损更换等)使过程动态特性变化, 原数学模型便不能准确反映对象特性, 如果这时仍采用常规反馈控制系统和原整定参数就难以保证期望的控制指标。为解决这个问题, 自适应(adaptive)控制和鲁棒(robust)控制应运而生。这两种控制中, 自适应控制是在控制系统运行中根据对象或扰动的动态性能变化而自动调整控制器的行为(通过改变控制器参数或结构)以保证控制质量; 而鲁棒控制则是在控制系统设计中就考虑对象参数的变化, 使所设计的控制器不改变自己的参数或结构就能够在对象参数在一定范围内变化时保证控制系统的控制品质。目前这两种控制都正处于蓬勃发展时期, 各种新的控制算法层出不穷, 其功能也越来越多。

4.1. 自适应控制

自适应控制的含义很广, 一般说来是指能够自动觉察环境变化, 并采用相应措施进行校正, 以达到所要求控制目标的控制系统。它通常具备以下功能:

① 在线辨识: 不断测取系统的信号和参数, 并加以处理, 以及及时地了解系统。

② 确定目标:根据系统特点或控制任务提出预定的性能指标和自适应准则。

③ 作出决策:由①、②,根据自适应控制算法进行决策。

④ 在线修改,克服偏差。将决策过程付诸实施,在线修改控制系统参数或结构,以克服不确定因素带来的偏差。

自50年代末提出自适应控制系统至今,在理论和应用上比较成熟的自适应控制系统大致可分成简单自适应,模型参考自适应和随机自适应(自校正)3类。

(1) 简单自适应控制系统 简单自适应控制系统一般都不建立被控系统数学模型,也不进行复杂的优化计算,而是采用一些简单的优化方法。它往往直接根据扰动 $f(t)$ 或偏差 $e(t)$ 辨识,通过扰动或偏差的函数进行品质分析,改变反馈控制回路的参数消除偏差,使系统的性能适应环境干扰的变化。这类系统的特点是在原有的控制系统基础上,针对扰动的不同性质,增加某些自适应环节。自适应环节的设计以解决具体问题为目标,针对性强,设计简单,但很难提出一般性的模式。最简单的例子是增益调整法,原理见图4.1。其关键是找出与过程动态特性有关的辅助变量(如偏差),建立辅助变量与调节器参数之间的关系,当辅助变量变化时,根据这个变化量调整调节器参数,使系统克服过程动态特性变化带来的影响。

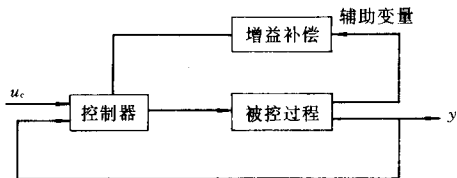


图 4.1 增益补偿系统结构框图

(2) 模型参考自适应控制系统 这类系统由参考模型、被控对象、常规反馈控制器和自适应机构组成。其突出的特点是系统总含有一个理想的参考模型,它体现了人们对被控对象的要求。自适应控制系统根据被控对象的状态(或输出)与参考模型的状态(或输出)之间的偏差,实时地进行调整,使得被控对象的动态特性与参考模型的特性在某种性能指标下尽量趋于一致。因此,系统的工作过程可以看成是参考模型与实际系统响应之间偏差的调整过程。系统的一般方块图如图4.2所示。

模型参考自适应控制系统的基本设计步骤:

a. 列写数学模型 分别列出相同形式(状态方程或传递函数)的被控系统和参考模型的数学模型。其中参考模型的参数则可根据系统设计要求选定。控制器的结构形式应满足模型完全匹配条件,这样控制器才存在一组合适的参数使可调系统和参考模型取得一致。而自

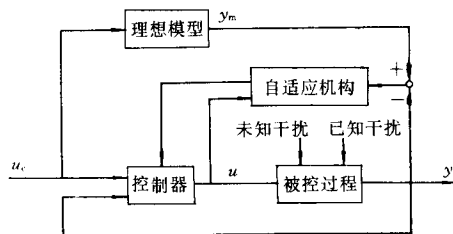


图 4.2 模型参考自适应控制系统

适应机构的任务只是在线地自动寻找出这组参数。

b. 建立等效误差系统 设被控对象和参考模型的状态方程分别为:

$$\dot{x}_p = A_p x_p + B_p u_p \quad (4.1)$$

$$y_p = C x_p \quad (4.2)$$

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m u_m \quad (4.3)$$

$$y_m = C x_m \quad (4.4)$$

记系统的广义输出误差和广义状态误差为:

$$e = y_m - y_p \quad (4.5)$$

$$e = x_m - x_p \quad (4.6)$$

则由以上各式可得广义误差运动方程:

$$\dot{e} = A_m e + (A_m - A_p) x_p + B_m u_p - B_p u_p \quad (4.7)$$

按系统的工作原理,表征可调系统和参考模型之间差异的广义误差完全代表了模型参考自适应控制系统运动状态,因而称为等效误差系统。

c. 推导自适应控制规律 自适应控制规律应使等效误差系统的解 e 越小越好,或随时间趋于零。对于不同的性能指标,可以采取不同的设计方法(常见的有参数局部优化,李亚普诺夫稳定法及波波夫超稳定性设计法),以求得相应的自适应控制规律。

(3) 随机自适应控制系统——自校正控制器 在模型参考自适应控制系统的算法中,通常不考虑干扰对系统的影响。而随机自适应控制算法将计入随机干扰的影响。这类系统通常用一个结构已知、参数未知的模型来描述系统的动态,用在线采集到的数据估计出模型的参数,并将参数的估计值作为真实参数值计算出控制作用。当控制动作完成以后,又重新进行参数的估计。可见,这类系统主要由一个参数估计器(辨识器)和一个控制器结合而成,结构框图见图4.3。

由于这类系统的主要部分是辨识器和控制器,所以不同的辨识方法和最优控制律就构成了不同的随机自适应控制系统。常见的辨识算法和估计算法有:递推最小二乘法;递推广义最小二乘法;递推极大似然算法;递推扩展并联结构模型参考算法;递推适应式状态观测器算法。常见的控制算法也有许多,如:最小方差控制算法;最小拍控制算法;极点配置控制算法;PID控制算

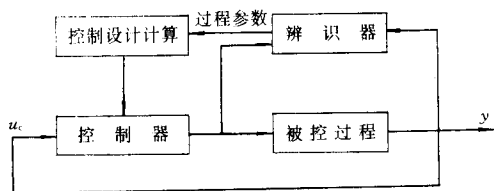


图 4.3 自校正控制系统框图

法；模型跟随控制算法等等。

4.2. 鲁棒控制器

“鲁棒”是英语形容词“robust”的译音，其含义是“稳健的”、“强健的”、“坚固的”等。自 70 年代来，这个词被广泛应用于控制界。鲁棒性往往成为衡量一个控制系统控制品质的标准之一。但严格地说，这只是一个定性的概念而没有定量的描述。

所谓鲁棒控制问题，经典的解释就是在控制对象存在着明显的不确定性的条件下设计一个确定的控制系统，使其在对象特性发生变化时也能保证有良好的控制性能。目前，控制系统的稳定性、最优性、解耦性等控制性能都存在鲁棒性的研究。

(1) 鲁棒控制器的定义 一个控制器，如果装置参数发生变化，只要闭环稳定，那么一定可以达到输出调节，则这样的调节器称为鲁棒控制器。其精确定义如下：

对于线性定常系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \quad (4.8a)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + Fw(t) \quad (4.8b)$$

$$e(t) = y(t) - y_r(t) \quad (4.8c)$$

其中 $x(t) \in R^n$ 为状态向量； $u(t) \in R^m$ 为输入向量； $y(t) \in R^p$ 为输出向量； $w(t) \in R^l$ 为扰动向量（可测或不可测的）； $y_r(t) \in R^p$ 为给定向量； $e(t) \in R^p$ 为误差向量。 $w(t)$ 满足下列扰动方程：

$$\dot{x}_w(t) = A_w x_w(t) \quad (4.9a)$$

$$w(t) = C_w x_w(t) \quad (4.9b)$$

$y_r(t)$ 满足下列给定方程

$$\dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) \quad (4.10a)$$

$$y_r(t) = C_r x_r(t) \quad (4.10b)$$

$A, B, C, D, E, F, A_w, C_w, A_r, C_r$ 均为相应维数的系数矩阵。

假定存在一个控制器，使系统式(4.8)闭环稳定，且达到输出渐近调节，即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$$

当装置参数发生变化，使系数矩阵发生变化

$$A \rightarrow A + \delta A, B \rightarrow B + \delta B, C \rightarrow C + \delta C$$

时，存在正常数 ϵ ，满足 $\epsilon > \delta > 0$ ，此时若系统闭环稳定，就

一定仍达到输出渐近调节，这样的控制器就称为鲁棒控制器。

(2) 鲁棒控制器的存在条件 对于系统式(4.8)，鲁棒控制器存在的充要条件为：

- ① (A, B) 可控；
- ② (C, A) 可观；
- ③ $m \geq p$ ；
- ④ $\text{Rank} \begin{bmatrix} A - \lambda_i I & B \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + p$ 。

其中 $\lambda_i (i=1, \dots, q)$ 为扰动多项式的零点。

(3) 鲁棒控制器的结构 鲁棒控制器的一般结构形式为

$$u(t) = K_0 \eta(t) + K_1 \zeta(t) \quad (4.11)$$

它由伺服补偿器和镇定补偿器两部分组成，如图 4.4 所示。式(4.11)中 $\eta(t)$ 为镇定补偿器的输出， $\zeta(t)$ 为伺服补偿器的输出， K_0 和 K_1 为增益矩阵。

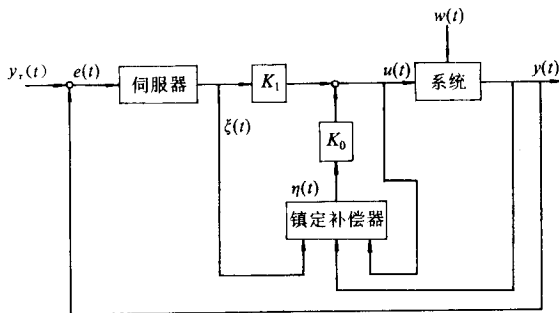


图 4.4 鲁棒控制器的一般结构

伺服补偿器的作用是保证系统具有鲁棒性，达到输出渐近调节。它由扰动模型式(4.9)和给定模型式(4.10)决定。具有如下的一般形式：

$$\dot{\zeta}(t) = \alpha^* \zeta(t) + \beta^* e(t) \quad (4.12)$$

其中， α^* 和 β^* 均为对角块矩阵，由外界扰动和给定扰动的特征多项式的最小公倍式决定，也就是说伺服补偿器中包含了外界扰动和给定扰动的不稳定信号模型。利用在增广系统内部复制一个这样的不稳定模型来进行控制器的设计，以达到完全的渐近跟踪和抑制扰动的原理，称之为“内模原理”。

镇定补偿器和增益矩阵 K_0 、 K_1 的作用是使由原来系统和伺服补偿器构成的增广系统

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\zeta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & \alpha^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \zeta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \beta^* \end{bmatrix} e(t) + \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} w(t)$$

$$\begin{bmatrix} y(t) \\ \zeta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \zeta(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix} w(t)$$

闭环稳定,并具有满意的动态特性。关于 K_0 、 K_1 的设计可采用极点配置或线性二次型最优控制等方法进行。镇定补偿器可采用状态观测器实现,即以状态观测器的输出作为镇定补偿器的输出 $\eta(t)$ 。如果原来系统的所有状态变量 $x(t)$ 都是可以直接测量的,则可直接用 $x(t)$ 进行反馈,镇定补偿器退化为零阶,此时鲁棒控制器有更简单的结构:

$$u(t) = K_0 x(t) + K_1 \zeta(t) \quad (4.13)$$

对于计算机控制系统,采用离散化的鲁棒控制器将很容易实现。

5. 随机控制

5.1. 概述

随机变量指的是某些数值大小带有随机性质的变量。对随机变量尽管不能给出它的确切数值,但从统计意义上来描述随机变量的特性。如果随机变量的取值与时间有关,则它们的集合称为随机过程。

如果一个系统具有随机输入、随机干扰或(和)随机特性(参数),该系统就是一个随机系统。对随机系统的控制称为随机控制(control of stochastic system)。随机控制与概率论和随机过程的知识密切相关,在此不再赘述有关的理论。

在系统综合和控制问题中,状态反馈非常重要。可是对于一个实际的系统,其状态并不一定能完全直接得到或测量到,所能获得的往往只是与状态有关的一些观测数据,并且对随机系统来说这些数据已经受到随机因素的干扰,或者说这些数据受到了“污染”。如何从“污染”了的观测数据获取真实信号和有用的数据是随机系统中的状态估计问题。由于直接作用于系统的过程噪声和量测噪声都是随机过程,人们只能给出它们的某些统计特性,因此在随机系统中的状态估计问题只能要求状态估计值在某种统计意义上尽量“接近于”真实值,而不可能获得系统的真实值。由此可见,随机系统的状态估计实际上是一个概率统计意义上的状态观测问题。相应于确定性系统中常用伦伯格(Luenberger)状态观测器进行状态估计,随机系统中最常用的状态估计方法是适于实时控制的卡尔曼(Kalman)滤波器。将状态估计与最优控制相结合就形成了随机最优控制。

设一个随机过程如图 5.1 所示。图中 $w(t)$ 是过程噪声, $v(t)$ 是作用于量测系统的噪声, $z(t)$ 是观测值。如果将利用直至 t 时刻的观测值对 t_1 时刻的状态 $x(t_1)$ 所作的估计值记作为 $\hat{x}(t_1/t)$, 则按 t 与 t_1 的不同关系,估计问题可分为 3 类:

① $t_1 > t$, 即利用直至当前的观测数据 z_t 来估计未来

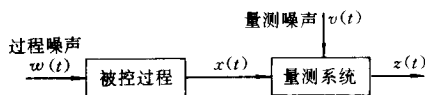


图 5.1 随机系统示意图

的状态 $x(t_1)$, 称之为预估问题;

② $t_1 = t$, 即利用直至当前的观测数据 z_t 来估计当前的状态 $x(t_1)$, 称之为滤波问题;

③ $t_1 < t$, 即利用直至当前的观测数据 z_t 来估计过去的状态 $x(t_1)$, 称之为平滑问题;

预估、滤波和平滑都各有自己相应的算法。

5.2. 卡尔曼滤波器

卡尔曼滤波器有离散的,也有连续的,但以计算机实现的离散型卡尔曼滤波器更为多见。

卡尔曼滤波器实际上是 50 年代末 60 年代初由卡尔曼提出的一种最优线性递推滤波算法,它具有线性、无偏、递推的特点。也即:滤波器的输出(所估计的状态)是观测值的线性函数;估计值与真实状态具有相等的均值;任一次估计值都可利用新的观测值修正前次估计值来获得,而递推性质对在线实时运行中十分重要。

考虑如下离散系统

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma w(k) \quad (5.1)$$

$$z(k) = Hx(k) + v(k) \quad (5.2)$$

式中 x 和 z 分别是状态向量和观测向量, $w(k)$ 是系统的过程噪声, $v(k)$ 是观测噪声。这里不失一般性地假定噪声的均值为 0, 协方差分别为 $E\{w(k)w^T(j)\} = Q(k \neq j)$ 和 $E\{v(k)v^T(j)\} = R(k \neq j)$, 也即 $w(k)$ 、 $v(k)$ 都是白噪声,并且 $w(k)$ 和 $v(k)$ 是互不相关的平稳序列。因为如果噪声不是零均值的,则它必可以看成是一个确定均值和一个零均值白噪声之和,如果噪声是有色的,则它可以看成是一个成形滤波器在白噪声激励下的产物,将成形滤波器并入原系统,增广系统的输入就转化为白噪声。

假设已进行了 k 次观测,得到一组观测值: $z(1)$, $z(2)$, $\dots$, $z(k)$, $x(k)$ 基于这些观测值的最小方差估计值称为 $x(k)$ 的滤波值,记为 $\hat{x}(k/k)$ 。 $x(k+1)$ 基于这些观测值的线性最小方差估计值称为 $x(k+1)$ 的一步预估值,记为 $\hat{x}(k+1/k)$ 。

滤波值与真实状态值的偏差 $\tilde{x}(k/k) = x(k) - \hat{x}(k/k)$ 称为滤波误差,一步预估值与真实状态的偏差 $\tilde{x}(k+1/k) = x(k+1) - \hat{x}(k+1/k)$ 称为一步预估误差。

滤波误差协方差阵 $P(k/k) = E\{\tilde{x}(k/k)\tilde{x}^T(k/k)\}$ 和一步预估误差协方差阵 $P(k+1/k) = E\{\tilde{x}(k+1/k)\tilde{x}^T(k+1/k)\}$ 是滤波器性能的衡量。

假设已得到了当前时刻状态的滤波值 $\hat{x}(k/k)$, 则根据正交投影定理和系统的状态方程,可得到 $\hat{x}(k+1)$ 的

声和观测噪声的存在对它均无影响。

③ 由于随机干扰的存在，整个系统的目标函数要比确定性系统高一些。

采用分离原理需要满足一定条件，LQG 问题是满足的。但因为 LQG 问题具有很多优点和实用价值，所以很多随机控制问题往往通过各种途径转化为近似的 LQG 问题，或者强行将控制问题和估计问题分离以解决工程上的实际问题。图 5.3 是状态不全知时的采用分离原理设计随机最优控制系统的结构示意图。

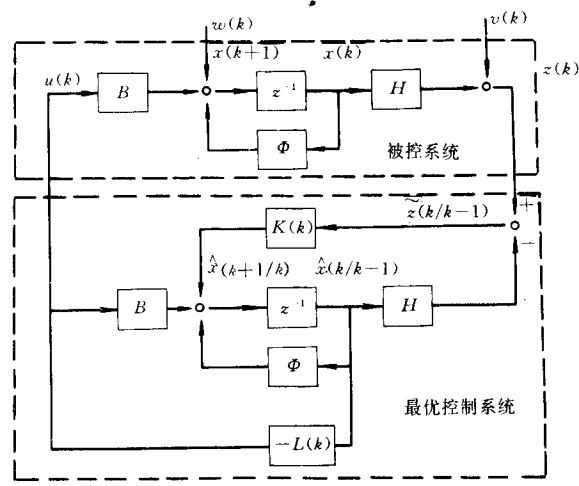


图 5.3 随机最优控制系统的结构示意图

6. 模糊控制

6.1. 基本工作原理

模糊控制（fuzzy control）的基础是 1965 年美国的 Zadeh 教授提出的模糊集理论，1974 年开始应用于过程控制。现已被认为是智能控制的 3 种主要方法之一（神经网络、专家系统和模糊控制）而得到广泛应用，国内外都有定型的模糊控制器，许多家用电器也采用了模糊控制技术。

模糊控制受到欢迎的原因主要是现实中存在着许多难以建立确切数学模型的过程，在用已有的控制方法进行自动控制时遇到麻烦。但这些过程又往往存在大量不很精确的、以定性形式表达的先验知识，操作工正是利用这些知识对过程采取适当的控制对策。由于最初的模糊控制是模仿操作人员的工作，所以可从一个操作人员对过程的控制来看典型模糊控制器的基本工作原理。

首先，操作者凭借眼睛、耳朵、手等传感器官，得到一些有关输出量和输出量变化率的模糊信息。当然这些信息客观上并非是模糊量，而是一个精确量，但这些量反映到人的大脑已经不是精确量，而是一个模糊量了。如温度高、温度偏低、压力较大及压力的变化率很大等。

从客观存在的精确量，通过传感器官而到达人的大脑，这一过程实际上是一个精确量模糊化的过程。

其次，操作者根据获得的信息，对照自己已有的经验进行分析判断，从而得出应该采取什么控制措施，即判定应该对输入量进行何种调整。人们事先可以将操作者的经验总结成若干条规则，经过一定的数学处理，存放在计算机中，这些规则即成为模糊控制规则。仿照人脑的推理过程，确定出模糊推理法则。这样计算机就可根据输入的模糊信息，依据控制规则和推理法则，作出模糊控制决策。

最后，当操作者根据已决定的模糊控制决策去执行具体的动作时，执行的结果则又是一个精确量。譬如，阀门开大一些，这是一个模糊的概念，但实际开过阀门后，阀门的旋转角度又是客观存在的精确量。因此这一过程是一个模糊量转化为精确量的过程。显然，人们在对工业过程进行控制时，无论是将精确量转化为模糊量，抑或是将模糊量转化为精确量，都是凭着自己的本能不知不觉地完成的。因此，如果用控制器来代替人进行控制时，这种模糊量与精确量的转化过程也是必不可少的。

6.2. 典型模糊控制器的设计

设计模糊控制器（fuzzy controller，简称 FC）的特殊之处在于它不按系统的数学分析来进行，而主要根据经验来确定控制规则及其参数，然后在实用中调整。典型 FC 的设计方法经不断补充完善，已基本形成一套固定的步骤。

(1) 确定 FC 的结构 即确定其输入变量和输出变量。一般选取被控变量的偏差及偏差的变化作为输入变量，控制量的变化作为输出变量。有时，FC 也可取更复杂的结构，如输出变量按两种方式给出。这样结构的算法比较复杂，但往往可取得较好的上升特性。

(2) 定义模糊子集，建立模糊规则 FC 的设计是在已知的以语言形式表示的控制规则基础上进行的，这些规则根据操作人员的经验总结而成，一般具有如下形式：

如果（被控变量的实测值与给定值）偏差较大，而且偏差变化率中等，则控制作用要大。

用符号记为

If $e = A_i$ and $ec = B_j$ then $u = C_l$ (6.1)
 $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; C_l \in \{C_1, \dots, C_l\}$

这里的 A_i , B_j 和 C_l 是分别定义在偏差 e 、偏差变化率 ec 和控制作用 u 的变化范围（即论域） E 、 EC 、 U 上的模糊子集，分别表示语言控制中的模糊概念“较大”、“大”、“中等”等， n, m, l 分别为定义在论域 E 、 EC 、 U 上的模糊子集个数。论域中的每个元素都以隶属度 $\mu_{A_i}(e)$ 或 $\mu_{B_j}(ec)$ 或 $\mu_{C_l}(u)$ 与模糊子集发生联系。实际上，模糊子集就是通过隶属函数来定义的。

(3) 由基本论域转变为模糊集论域（量化） 为便

于实施,一般FC设计中考虑的都为有限论域,即论域中的元素个数有限,也就是要将实际上连续的无限论域量化为离散的有限论域。

设偏差 e 的基本论域

$$E = [e_{\min}, e_{\max}] \quad (6.2)$$

量化后转化成模糊集论域 X

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (6.3)$$

且 $x_1 < x_2 < \dots < x_N$ 。

常见的量化方法有以下两种。

a. 线性量化 取定常数 k_i (称为量化因子),则有下列三种情况:

(a) 有 i 满足 $1 \leq i < N$,使得 $x_i \leq k_i e < x_{i+1}$;

(b) $k_i e < x_i$;

(c) $k_i e \geq x_N$ 。

对情况B和C,就分别把 e 量化为 x_i 和 x_N 。

对情况A,令 $d = x_{i+1} - x_i$,则有两种可能:

$$x_i \leq k_i e < x_i + d/2$$

或 $x_i + d/2 \leq k_i e < x_{i+1}$

此时,分别把 e 量化为 x_i 和 x_{i+1} 。

b. 非线性量化 由于偏差在高分辨的模糊集上变化比较剧烈,而在低分辨的模糊集上变化比较平缓,所以对小偏差可采用高分辨率(即比较小的间隔)量化,对大偏差则采用低分辨率的量化。也即在不同的论域采用不同的量化公式。

对 EC 、 U 分别作量化,转换为模糊集论域 Y 和 Z 。

(4) 确定关系矩阵 R 控制规则式(6.1)中每一条规则确定了一个模糊关系 R_{ij} : $A_i \times B_j \rightarrow C_{ij}$ 。根据这些规则,可通过模糊关系运算得到关系矩阵

$$R = \bigcup_{i,j} R_{ij} = \bigcup_{i,j}^{n,m} (A_i \times B_j \times C_{ij}) \quad (6.4)$$

即对于 $x \in X, y \in Y, z \in Z$

$$\mu_R(x, y, z) = \bigvee_{i,j} [\mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_j}(y) \wedge \mu_{C_{ij}}(z)] \quad (6.5)$$

设论域 Y, Z 中的元素个数分别为 M 和 L ,则关系矩阵 R 为 $N \times M \times L$ 维。可逐个元素地取出其隶属度。

(5) 由模糊推理合成规则求控制输出模糊子集

设实测 $x = A_k, k \in \{1, \dots, n\}, y = B_h, h \in \{1, \dots, m\}$,由模糊推量合成规则有

$$C = (A_k \times B_h) \cdot R$$

即对于 $x \in X, y \in Y$

$$\mu_C(z) = \bigvee [\mu_R(x, y, z) \wedge \mu_{A_k}(x) \wedge \mu_{B_h}(y)] \quad (6.6)$$

(6) 进行模糊判决,由模糊子集 C 确定控制输出确切值 u 模糊判决实际上包含两个步骤,先由模糊子集 C 判决量化元素 z ,再由 z 变为确切输出 u 。由 C 到 z 的判决有多种方法,一般多采用最大隶属度法。即取 z^* ,使

得

$$\mu_{C_{ij}}(z^*) \geq \mu_{C_{ij}}(z)$$

若有相邻多点同时取最大值,则 z^* 取这些点的平均值。

综合以上所述,(4)~(6)各步都可离线计算,所得结果可归结为一张控制查询表(look-up table)。实际控制时只需将查询表送入计算机,由实际测量的输入 e, ec ,量化后查表得控制输出值的量化值 z ,再乘上适当系数即可得实际控制输出值 u 。

6.3. 模糊控制的优缺点

模糊集理论为人们用精确的数学语言来描述人脑中模糊的概念开辟了道路,并为研究人类用语言和思维表达的模糊逻辑提供了有效的工具。FC与以往的控制器的相比,具有下面的优点。

① 因为FC是在人工操作经验的基础上归纳而成,所以用FC对一些难于建模的复杂过程进行自动控制成为可能,只要它们在人工操作下能正常运行。

② FC的性能对被控对象的参数变化不敏感,体现了人的思维过程的适应。

③ 由离线计算得到FC的控制查询表,在控制中不需要再花 ([1]) ([2]) ([3]) ([4]) ([5]) ([6]) ([7]) ([8]) ([9]) ([10]) ([11]) ([12]) ([13]) ([14]) ([15]) ([16]) ([17]) ([18]) ([19]) ([20]) ([21]) ([22]) ([23]) ([24]) ([25]) ([26]) ([27]) ([28]) ([29]) ([30]) ([31]) ([32]) ([33]) ([34]) ([35]) ([36]) ([37]) ([38]) ([39]) ([40]) ([41]) ([42]) ([43]) ([44]) ([45]) ([46]) ([47]) ([48]) ([49]) ([50]) ([51]) ([52]) ([53]) ([54]) ([55]) ([56]) ([57]) ([58]) ([59]) ([60]) ([61]) ([62]) ([63]) ([64]) ([65]) ([66]) ([67]) ([68]) ([69]) ([70]) ([71]) ([72]) ([73]) ([74]) ([75]) ([76]) ([77]) ([78]) ([79]) ([80]) ([81]) ([82]) ([83]) ([84]) ([85]) ([86]) ([87]) ([88]) ([89]) ([90]) ([91]) ([92]) ([93]) ([94]) ([95]) ([96]) ([97]) ([98]) ([99]) ([100]) ([101]) ([102]) ([103]) ([104]) ([105]) ([106]) ([107]) ([108]) ([109]) ([110]) ([111]) ([112]) ([113]) ([114]) ([115]) ([116]) ([117]) ([118]) ([119]) ([120]) ([121]) ([122]) ([123]) ([124]) ([125]) ([126]) ([127]) ([128]) ([129]) ([130]) ([131]) ([132]) ([133]) ([134]) ([135]) ([136]) ([137]) ([138]) ([139]) ([140]) ([141]) ([142]) ([143]) ([144]) ([145]) ([146]) ([147]) ([148]) ([149]) ([150]) ([151]) ([152]) ([153]) ([154]) ([155]) ([156]) ([157]) ([158]) ([159]) ([160]) ([161]) ([162]) ([163]) ([164]) ([165]) ([166]) ([167]) ([168]) ([169]) ([170]) ([171]) ([172]) ([173]) ([174]) ([175]) ([176]) ([177]) ([178]) ([179]) ([180]) ([181]) ([182]) ([183]) ([184]) ([185]) ([186]) ([187]) ([188]) ([189]) ([190]) ([191]) ([192]) ([193]) ([194]) ([195]) ([196]) ([197]) ([198]) ([199]) ([200]) ([201]) ([202]) ([203]) ([204]) ([205]) ([206]) ([207]) ([208]) ([209]) ([210]) ([211]) ([212]) ([213]) ([214]) ([215]) ([216]) ([217]) ([218]) ([219]) ([220]) ([221]) ([222]) ([223]) ([224]) ([225]) ([226]) ([227]) ([228]) ([229]) ([230]) ([231]) ([232]) ([233]) ([234]) ([235]) ([236]) ([237]) ([238]) ([239]) ([240]) ([241]) ([242]) ([243]) ([244]) ([245]) ([246]) ([247]) ([248]) ([249]) ([250]) ([251]) ([252]) ([253]) ([254]) ([255]) ([256]) ([257]) ([258]) ([259]) ([260]) ([261]) ([262]) ([263]) ([264]) ([265]) ([266]) ([267]) ([268]) ([269]) ([270]) ([271]) ([272]) ([273]) ([274]) ([275]) ([276]) ([277]) ([278]) ([279]) ([280]) ([281]) ([282]) ([283]) ([284]) ([285]) ([286]) ([287]) ([288]) ([289]) ([290]) ([291]) ([292]) ([293]) ([294]) ([295]) ([296]) ([297]) ([298]) ([299]) ([300]) ([301]) ([302]) ([303]) ([304]) ([305]) ([306]) ([307]) ([308]) ([309]) ([310]) ([311]) ([312]) ([313]) ([314]) ([315]) ([316]) ([317]) ([318]) ([319]) ([320]) ([321]) ([322]) ([323]) ([324]) ([325]) ([326]) ([327]) ([328]) ([329]) ([330]) ([331]) ([332]) ([333]) ([334]) ([335]) ([336]) ([337]) ([338]) ([339]) ([340]) ([341]) ([342]) ([343]) ([344]) ([345]) ([346]) ([347]) ([348]) ([349]) ([350]) ([351]) ([352]) ([353]) ([354]) ([355]) ([356]) ([357]) ([358]) ([359]) ([360]) ([361]) ([362]) ([363]) ([364]) ([365]) ([366]) ([367]) ([368]) ([369]) ([370]) ([371]) ([372]) ([373]) ([374]) ([375]) ([376]) ([377]) ([378]) ([379]) ([380]) ([381]) ([382]) ([383]) ([384]) ([385]) ([386]) ([387]) ([388]) ([389]) ([390]) ([391]) ([392]) ([393]) ([394]) ([395]) ([396]) ([397]) ([398]) ([399]) ([400]) ([401]) ([402]) ([403]) ([404]) ([405]) ([406]) ([407]) ([408]) ([409]) ([410]) ([411]) ([412]) ([413]) ([414]) ([415]) ([416]) ([417]) ([418]) ([419]) ([420]) ([421]) ([422]) ([423]) ([424]) ([425]) ([426]) ([427]) ([428]) ([429]) ([430]) ([431]) ([432]) ([433]) ([434]) ([435]) ([436]) ([437]) ([438]) ([439]) ([440]) ([441]) ([442]) ([443]) ([444]) ([445]) ([446]) ([447]) ([448]) ([449]) ([450]) ([451]) ([452]) ([453]) ([454]) ([455]) ([456]) ([457]) ([458]) ([459]) ([460]) ([461]) ([462]) ([463]) ([464]) ([465]) ([466]) ([467]) ([468]) ([469]) ([470]) ([471]) ([472]) ([473]) ([474]) ([475]) ([476]) ([477]) ([478]) ([479]) ([480]) ([481]) ([482]) ([483]) ([484]) ([485]) ([486]) ([487]) ([488]) ([489]) ([490]) ([491]) ([492]) ([493]) ([494]) ([495]) ([496]) ([497]) ([498]) ([499]) ([500]) ([501]) ([502]) ([503]) ([504]) ([505]) ([506]) ([507]) ([508]) ([509]) ([510]) ([511]) ([512]) ([513]) ([514]) ([515]) ([516]) ([517]) ([518]) ([519]) ([520]) ([521]) ([522]) ([523]) ([524]) ([525]) ([526]) ([527]) ([528]) ([529]) ([530]) ([531]) ([532]) ([533]) ([534]) ([535]) ([536]) ([537]) ([538]) ([539]) ([540]) ([541]) ([542]) ([543]) ([544]) ([545]) ([546]) ([547]) ([548]) ([549]) ([550]) ([551]) ([552]) ([553]) ([554]) ([555]) ([556]) ([557]) ([558]) ([559]) ([560]) ([561]) ([562]) ([563]) ([564]) ([565]) ([566]) ([567]) ([568]) ([569]) ([570]) ([571]) ([572]) ([573]) ([574]) ([575]) ([576]) ([577]) ([578]) ([579]) ([580]) ([581]) ([582]) ([583]) ([584]) ([585]) ([586]) ([587]) ([588]) ([589]) ([590]) ([591]) ([592]) ([593]) ([594]) ([595]) ([596]) ([597]) ([598]) ([599]) ([600]) ([601]) ([602]) ([603]) ([604]) ([605]) ([606]) ([607]) ([608]) ([609]) ([610]) ([611]) ([612]) ([613]) ([614]) ([615]) ([616]) ([617]) ([618]) ([619]) ([620]) ([621]) ([622]) ([623]) ([624]) ([625]) ([626]) ([627]) ([628]) ([629]) ([630]) ([631]) ([632]) ([633]) ([634]) ([635]) ([636]) ([637]) ([638]) ([639]) ([640]) ([641]) ([642]) ([643]) ([644]) ([645]) ([646]) ([647]) ([648]) ([649]) ([650]) ([651]) ([652]) ([653]) ([654]) ([655]) ([656]) ([657]) ([658]) ([659]) ([660]) ([661]) ([662]) ([663]) ([664]) ([665]) ([666]) ([667]) ([668]) ([669]) ([670]) ([671]) ([672]) ([673]) ([674]) ([675]) ([676]) ([677]) ([678]) ([679]) ([680]) ([681]) ([682]) ([683]) ([684]) ([685]) ([686]) ([687]) ([688]) ([689]) ([690]) ([691]) ([692]) ([693]) ([694]) ([695]) ([696]) ([697]) ([698]) ([699]) ([700]) ([701]) ([702]) ([703]) ([704]) ([705]) ([706]) ([707]) ([708]) ([709]) ([710]) ([711]) ([712]) ([713]) ([714]) ([715]) ([716]) ([717]) ([718]) ([719]) ([720]) ([721]) ([722]) ([723]) ([724]) ([725]) ([726]) ([727]) ([728]) ([729]) ([730]) ([731]) ([732]) ([733]) ([734]) ([735]) ([736]) ([737]) ([738]) ([739]) ([740]) ([741]) ([742]) ([743]) ([744]) ([745]) ([746]) ([747]) ([748]) ([749]) ([750]) ([751]) ([752]) ([753]) ([754]) ([755]) ([756]) ([757]) ([758]) ([759]) ([760]) ([761]) ([762]) ([763]) ([764]) ([765]) ([766]) ([767]) ([768]) ([769]) ([770]) ([771]) ([772]) ([773]) ([774]) ([775]) ([776]) ([777]) ([778]) ([779]) ([780]) ([781]) ([782]) ([783]) ([784]) ([785]) ([786]) ([787]) ([788]) ([789]) ([790]) ([791]) ([792]) ([793]) ([794]) ([795]) ([796]) ([797]) ([798]) ([799]) ([800]) ([801]) ([802]) ([803]) ([804]) ([805]) ([806]) ([807]) ([808]) ([809]) ([810]) ([811]) ([812]) ([813]) ([814]) ([815]) ([816]) ([817]) ([818]) ([819]) ([820]) ([821]) ([822]) ([823]) ([824]) ([825]) ([826]) ([827]) ([828]) ([829]) ([830]) ([831]) ([832]) ([833]) ([834]) ([835]) ([836]) ([837]) ([838]) ([839]) ([840]) ([841]) ([842]) ([843]) ([844]) ([845]) ([846]) ([847]) ([848]) ([849]) ([850]) ([851]) ([852]) ([853]) ([854]) ([855]) ([856]) ([857]) ([858]) ([859]) ([860]) ([861]) ([862]) ([863]) ([864]) ([865]) ([866]) ([867]) ([868]) ([869]) ([870]) ([871]) ([872]) ([873]) ([874]) ([875]) ([876]) ([877]) ([878]) ([879]) ([880]) ([881]) ([882]) ([883]) ([884]) ([885]) ([886]) ([887]) ([888]) ([889]) ([890]) ([891]) ([892]) ([893]) ([894]) ([895]) ([896]) ([897]) ([898]) ([899]) ([900]) ([901]) ([902]) ([903]) ([904]) ([905]) ([906]) ([907]) ([908]) ([909]) ([910]) ([911]) ([912]) ([913]) ([914]) ([915]) ([916]) ([917]) ([918]) ([919]) ([920]) ([921]) ([922]) ([923]) ([924]) ([925]) ([926]) ([927]) ([928]) ([929]) ([930]) ([931]) ([932]) ([933]) ([934]) ([935]) ([936]) ([937]) ([938]) ([939]) ([940]) ([941]) ([942]) ([943]) ([944]) ([945]) ([946]) ([947]) ([948]) ([949]) ([950]) ([951]) ([952]) ([953]) ([954]) ([955]) ([956]) ([957]) ([958]) ([959]) ([960]) ([961]) ([962]) ([963]) ([964]) ([965]) ([966]) ([967]) ([968]) ([969]) ([970]) ([971]) ([972]) ([973]) ([974]) ([975]) ([976]) ([977]) ([978]) ([979]) ([980]) ([981]) ([982]) ([983]) ([984]) ([985]) ([986]) ([987]) ([988]) ([989]) ([990]) ([991]) ([992]) ([993]) ([994]) ([995]) ([996]) ([997]) ([998]) ([999]) ([1000]) ([1001]) ([1002]) ([1003]) ([1004]) ([1005]) ([1006]) ([1007]) ([1008]) ([1009]) ([1010]) ([1011]) ([1012]) ([1013]) ([1014]) ([1015]) ([1016]) ([1017]) ([1018]) ([1019]) ([1020]) ([1021]) ([1022]) ([1023]) ([1024]) ([1025]) ([1026]) ([1027]) ([1028]) ([1029]) ([1030]) ([1031]) ([1032]) ([1033]) ([1034]) ([1035]) ([1036]) ([1037]) ([1038]) ([1039]) ([1040]) ([1041]) ([1042]) ([1043]) ([1044]) ([1045]) ([1046]) ([1047]) ([1048]) ([1049]) ([1050]) ([1051]) ([1052]) ([1053]) ([1054]) ([1055]) ([1056]) ([1057]) ([1058]) ([1059]) ([1060]) ([1061]) ([1062]) ([1063]) ([1064]) ([1065]) ([1066]) ([1067]) ([1068]) ([1069]) ([1070]) ([1071]) ([1072]) ([1073]) ([1074]) ([1075]) ([1076]) ([1077]) ([1078]) ([1079]) ([1080]) ([1081]) ([1082]) ([1083]) ([1084]) ([1085]) ([1086]) ([1087]) ([1088]) ([1089]) ([1090]) ([1091]) ([1092]) ([1093]) ([1094]) ([1095]) ([1096]) ([1097]) ([1098]) ([1099]) ([1100]) ([1101]) ([1102]) ([1103]) ([1104]) ([1105]) ([1106]) ([1107]) ([1108]) ([1109]) ([1110]) ([1111]) ([1112]) ([1113]) ([1114]) ([1115]) ([1116]) ([1117]) ([1118]) ([1119]) ([1120]) ([1121]) ([1122]) ([1123]) ([1124]) ([1125]) ([1126]) ([1127]) ([1128]) ([1129]) ([1130]) ([1131]) ([1132]) ([1133]) ([1134]) ([1135]) ([1136]) ([1137]) ([1138]) ([1139]) ([1140]) ([1141]) ([1142]) ([1143]) ([1144]) ([1145]) ([1146]) ([1147]) ([1148]) ([1149]) ([1150]) ([1151]) ([1152]) ([1153]) ([1154]) ([1155]) ([1156]) ([1157]) ([1158]) ([1159]) ([1160]) ([1161]) ([1162]) ([1163]) ([1164]) ([1165]) ([1166]) ([1167]) ([1168]) ([1169]) ([1170]) ([1171]) ([1172]) ([1173]) ([1174]) ([1175]) ([1176]) ([1177]) ([1178]) ([1179]) ([1180]) ([1181]) ([1182]) ([1183]) ([1184]) ([1185]) ([1186]) ([1187]) ([1188]) ([1189]) ([1190]) ([1191]) ([1192]) ([1193]) ([1194]) ([1195]) ([1196]) ([1197]) ([1198]) ([1199]) ([1200]) ([1201]) ([1202]) ([1203]) ([1204]) ([1205]) ([1206]) ([1207]) ([1208]) ([1209]) ([1210]) ([1211]) ([1212]) ([1213]) ([1214]) ([1215]) ([1216]) ([1217]) ([1218]) ([1219]) ([1220]) ([1221]) ([1222]) ([1223]) ([1224]) ([1225]) ([1226]) ([1227]) ([1228]) ([1229]) ([1230]) ([1231]) ([1232]) ([1233]) ([1234]) ([1235]) ([1236]) ([1237]) ([1238]) ([1239]) ([1240]) ([1241]) ([1242]) ([1243]) ([1244]) ([1245]) ([1246]) ([1247]) ([1248]) ([1249]) ([1250]) ([1251]) ([1252]) ([1253]) ([1254]) ([1255]) ([1256]) ([1257]) ([1258]) ([1259]) ([1260]) ([1261]) ([1262]) ([1263]) ([1264]) ([1265]) ([1266]) ([1267]) ([1268]) ([1269]) ([1270]) ([1271]) ([1272]) ([1273]) ([1274]) ([1275]) ([1276]) ([1277]) ([1278]) ([1279]) ([1280]) ([1281]) ([1282]) ([1283]) ([1284]) ([1285]) ([1286]) ([1287]) ([1288]) ([1289]) ([1290]) ([1291]) ([1292]) ([1293]) ([1294]) ([1295]) ([1296]) ([1297]) ([1298]) ([1299]) ([1300]) ([1301]) ([1302]) ([1303]) ([1304]) ([1305]) ([1306]) ([1307]) ([1308]) ([1309]) ([1310]) ([1311]) ([1312]) ([1313]) ([1314]) ([1315]) ([1316]) ([1317]) ([1318]) ([1319]) ([1320]) ([1321]) ([1322]) ([1323]) ([1324]) ([1325]) ([1326]) ([1327]) ([1328]) ([1329]) ([1330]) ([1331]) ([1332]) ([1333]) ([1334]) ([1335]) ([1336]) ([1337]) ([1338]) ([1339]) ([1340]) ([1341]) ([1342]) ([1343]) ([1344]) ([1345]) ([1346]) ([1347]) ([1348]) ([1349]) ([1350]) ([1351]) ([1352]) ([1353]) ([1354]) ([1355]) ([1356]) ([1357]) ([1358]) ([1359]) ([1360]) ([1361]) ([1362]) ([1363]) ([1364]) ([1365]) ([1366]) ([1367]) ([1368]) ([1369]) ([1370]) ([1371]) ([1372]) ([1373]) ([1374]) ([1375]) ([1376]) ([1377]) ([1378]) ([1379]) ([1380]) ([1381]) ([1382]) ([1383]) ([1384]) ([1385]) ([1386]) ([1387]) ([1388]) ([1389]) ([1390]) ([1391]) ([1392]) ([1393]) ([1394]) ([1395]) ([1396]) ([1397]) ([1398]) ([1399]) ([1400]) ([1401]) ([1402]) ([1403]) ([1404]) ([1405]) ([1406]) ([1407]) ([1408]) ([1409]) ([1410]) ([1411]) ([1412]) ([1413]) ([1414]) ([1415]) ([1416]) ([1417]) ([1418]) ([1419]) ([1420]) ([1421]) ([1422]) ([1423]) ([1424]) ([1425]) ([1426]) ([1427]) ([1428]) ([1429]) ([1430]) ([1431]) ([1432]) ([1433]) ([1434]) ([1435]) ([1436]) ([1437]) ([1438]) ([1439]) ([1440]) ([1441]) ([1442]) ([1443]) ([1444]) ([1445]) ([1446]) ([1447]) ([1448]) ([1449]) ([1450]) ([1451]) ([1452]) ([1453]) ([1454]) ([1455]) ([1456]) ([1457]) ([1458]) ([1459]) ([1460]) ([1461]) ([1462]) ([1463]) ([1464]) ([1465]) ([1466]) ([1467]) ([1468]) ([1469]) ([1470]) ([1471]) ([1472]) ([1473]) ([1474]) ([1475]) ([1476]) ([1477]) ([1478]) ([1479]) ([1480]) ([1481]) ([1482]) ([1483]) ([1484]) ([1485]) ([1486]) ([1487]) ([1488]) ([1489]) ([1490]) ([1491]) ([1492]) ([1493]) ([1494]) ([1495]) ([1496]) ([1497]) ([1498]) ([1499]) ([1500]) ([1501]) ([1502]) ([1503]) ([1504]) ([1505]) ([1506]) ([1507]) ([1508]) ([1509]) ([1510]) ([1511]) ([1512]) ([1513]) ([1514]) ([1515]) ([1516]) ([1517]) ([1518]) ([1519]) ([1520]) ([1521]) ([1522]) ([1523]) ([1524]) ([1525]) ([1526]) ([1527]) ([1528]) ([1529]) ([1530]) ([1531]) ([1532]) ([1533]) ([1534]) ([1535]) ([1536]) ([1537]) ([1538]) ([1539]) ([1540]) ([1541]) ([1542]) ([1543]) ([1544]) ([1545]) ([1546]) ([1547]) ([1548]) ([1549]) ([1550]) ([1551]) ([1552]) ([1553]) ([1554]) ([1555]) ([1556]) ([1557]) ([1558]) ([1559]) ([1560]) ([1561]) ([1562]) ([1563]) ([1564]) ([1565]) ([1566]) ([1567]) ([1568]) ([1569]) ([1570]) ([1571]) ([1572]) ([1573]) ([1574]) ([1575]) ([1576]) ([1577]) ([1578]) ([1579]) ([1580]) ([1581]) ([1582]) ([1583]) ([1584]) ([1585]) ([1586]) ([1587]) ([1588]) ([1589]) ([1590]) ([1591]) ([1592]) ([1593]) ([1594]) ([1595]) ([1596]) ([1597]) ([1598]) ([1599]) ([1600]) ([1601]) ([1602]) ([1603]) ([1604]) ([1605]) ([1606]) ([1607]) ([1608]) ([1609]) ([1610]) ([1611]) ([1612]) ([1613]) ([1614]) ([1615]) ([1616]) ([1617]) ([1618]) ([1619]) ([1620]) ([1621]) ([1622]) ([1623]) ([1624]) ([1625]) ([1626]) ([1627]) ([1628]) ([1629]) ([1630]) ([1631]) ([1632]) ([1633]) ([1634]) ([1635]) ([1636]) ([1637]) ([1638]) ([1639]) ([1640]) ([1641]) ([1642]) ([1643]) ([1644]) ([1645]) ([1646]) ([1647]) ([1648]) ([1649]) ([1650]) ([1651]) ([1652]) ([1653]) ([1654]) ([1655]) ([1656]) ([1657]) ([1658]) ([1659]) ([1660]) ([1661]) ([1662]) ([1663]) ([1664]) ([1665]) ([1666]) ([1667]) ([1668]) ([1669]) ([1670]) ([1671]) ([1672]) ([1673]) ([1674]) ([1675]) ([1676]) ([1677]) ([1678]) ([1679]) ([1680]) ([1681]) ([1682]) ([1683]) ([1684]) ([1685]) ([1686]) ([1687]) ([1688]) ([1689]) ([1690]) ([1691]) ([1692]) ([1693]) ([1694]) ([1695]) ([1696]) ([1697]) ([1698]) ([1699]) ([1700]) ([1701]) ([1702]) ([1703]) ([1704]) ([1705]) ([1706]) ([1707]) ([1708]) ([1709]) ([1710]) ([1711]) ([1712]) ([1713]) ([1714]) ([1715]) ([1716]) ([1717]) ([1718]) ([1719]) ([1720]) ([1721]) ([1722]) ([1723]) ([1724]) ([1725]) ([1726]) ([1727]) ([1728]) ([1729]) ([1730]) ([1731]) ([1732]) ([1733]) ([1734]) ([1735]) ([1736]) ([1737]) ([1738]) ([1739]) ([1740]) ([1741]) ([1742]) ([1743]) ([1744]) ([1745]) ([1746]) ([1747]) ([1748]) ([1749]) ([1750]) ([1751]) ([1752]) ([1753]) ([1754]) ([1755]) ([1756]) ([1757]) ([1758]) ([1759]) ([1760]) ([1761]) ([1762]) ([1763]) ([1764]) ([1765]) ([1766]) ([1767]) ([1768]) ([1769]) ([1770]) ([1771]) ([1772]) ([1773]) ([1774]) ([1775]) ([1776]) ([1777]) ([1778]) ([1779]) ([1780]) ([1781]) ([1782]) ([1783]) ([1784]) ([1785]) ([1786]) ([1787]) ([1788]) ([1789]) ([1790]) ([1791]) ([1792]) ([1793]) ([1794]) ([1795]) ([1796]) ([1797]) ([1798]) ([

控制系统,实施各种高级控制算法已成为可能。但这些算法往往比较复杂,一方面难以用物理模型进行仿真,另一方面为了研究这种复杂系统而设计制造一个物理模型常需要花费巨大的代价,所以用计算机对实际系统进行仿真研究就日益为人们所采纳。这种仿真的特点是,将实际系统的运动规律用数学形式表达出来,它们通常是一组微分方程或差分方程,然后用计算机来求解这些方程,所以又叫计算机仿真。这样做的好处是只用一套仿真设备就可以对物理性质截然不同的许多控制系统进行仿真研究。

7.1. 仿真过程

控制系统的仿真过程简述如图 7.1。

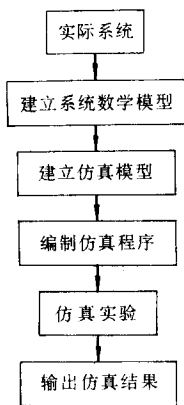


图 7.1 控制系统仿真过程示意图

图 7.1 中,数学模型包括对象、控制器以及构成系统的各个部分,可以采用机理建模、系统辨识建模,或两种方法结合起来建模。由于数学模型代表着实际的控制系统,它是仿真的依据。建立控制系统的数学模型以后,必须通过一定的算法对原系统数学模型进行处理,使之适合于系统仿真。就连续系统而言,就是要进行离散化处理,建立相应的差分方程。编制仿真程序,可用一般的高级语言或仿真语言,但对于快速的实时仿真,往往需要用汇编语言。最后在进行仿真实验时,要对仿真系统模型及程序进行校验和修改,并按系统仿真的要求输出仿真结果。这里涉及到 3 个具体的部分:实际系统,数学模型,仿真模型。还涉及到二次模型化过程:第一次模型化是将实际系统变成数学模型,通常称此为系统建模或系统辨识;第二次是将数学模型变成仿真模型,它与仿真编程、运行、修改等一起称为系统仿真技术。需要说明的是,随着计算机技术和控制理论的迅速发展,目前已有许多具有良好人机界面并且直观方便的商品化控制系统仿真软件供人们选用,大大减轻了仿真人员的程序工作量。

7.2. 控制系统仿真的基本内容

(1) 面向传递函数和结构图的连续系统的仿真

a. 面向传递函数的连续系统的仿真 虽然一个连续系统可以用不同的数学模型来描述,如:微分方程,传递函数,状态方程等。但由于这些形式可以互相转换,所以问题的实质便是要用计算机求解 n 个带初值的一阶微分方程

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(t, x(t)), \quad a \leq t \leq b$$

$$x(a) = x_0$$

的数字解,也即要逐个求出区间 $[a, b]$ 内若干个离散点 $a \leq t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_n$ 处的近似值 $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n)$ 。常用的数字解法有欧拉法、梯形法、预估-校正法和龙格-库塔法。

b. 面向结构图的连续系统的仿真 面向传递函数的仿真针对整个系统的,如要改变某一环节的参数或系统中存在小闭环或非线性环节,这种方法就不大方便。因此将系统看成是由许多典型环节组成,数字仿真时将各环节的参数以及各环节的连接方式输给计算机,让程序来求闭环系统的微分方程组,然后再用数值积分法求解,这就是面向结构图的仿真。典型环节一般有:

积分环节 $\frac{K}{s}$

比例积分环节 $K_1 + \frac{K_2}{s} = \frac{K_1 s + K_2}{s}$

惯性环节 $\frac{K}{Ts + 1}$

一阶超前(或滞后)环节 $K \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}$

二阶振荡环节 $\frac{K}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1}$

等等。

常见的非线性环节有:饱和非线性,分段线性非线性,失灵区非线性,间隙非线性,继电非线性,具有死区的继电非线性,具有滞环的继电非线性,具有死区和滞环的继电非线性等。

(2) 连续系统按环节离散化的数字仿真 不同于上述按系统离散化进行数值仿真,按环节离散化是按环节建立离散模型(差分方程),它用的是控制理论中的采样和信号重构技术。为减少仿真系统的环节数,除了上述的典型环节,一般还引入二阶和三阶环节。差分方程的建立常用 z 变换法和状态转移法,建立的离散模型实际上是一个采样系统,完全可以按采样理论对其进行分析。

按环节离散化,就是将系统分成若干环节,在每个环节入口处加一个虚拟的采样开关,并立即跟一个信号重构过程,以便使信号恢复为连续形式。当采样周期足够小时,该采样系统近似于原连续系统。信号重构装置