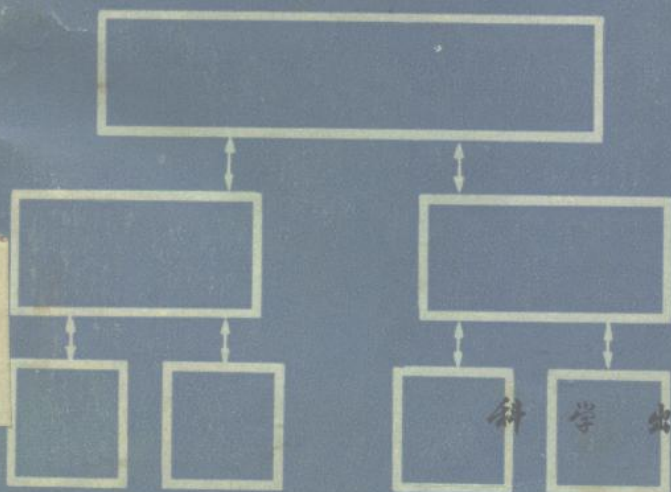
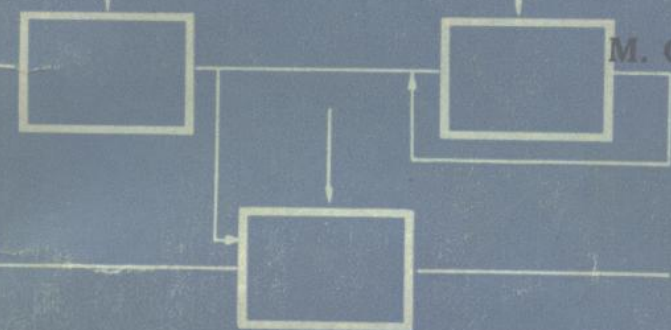


大系统的动态 递阶控制

M. G. 辛格 著



科学出版社

大系统的动态递阶控制

M. G. 辛格 著

李救安 邝硕 王翼 傅明辉 译

陈 珽 校

科 学 出 版 社

1 9 8 3

内 容 简 介

本书讨论了大规模(关联)动态系统递阶控制的基本理论和方法,介绍了利用电子数字计算机对这种系统进行数字仿真的结果,同时结合城市交通、河流污染、热轧钢等方面的实际系统说明理论和方法的应用。内容有线性和非线性系统的递阶最优化,开环递阶控制,反馈递阶控制,次最优控制,多级的状态与参数估计和多级随机控制等。

本书可供从事大系统理论及应用方面的工程技术人员、科研工作者以及大专院校教师和研究生参考。

M. G. Singh

DYNAMICAL HIERACHICAL CONTROL

North-Holland Publishing Company, 1980

大系统的动态递阶控制

M. G. 辛格 著

李教安 邝硕 王翼 傅明辉 译

陈 珽 校

责任编辑 李淑兰

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年4月第一版 开本:787×1092 1/32

1983年4月第一次印刷 印张:12 5/8

印数:0001—3,850 字数:282,000

统一书号:15031·483

本社书号:3024·15—8

定 价: 1.95 元

原 序

虽然近十多年来,大系统理论在 Mesarovic, Macko, Lasdon, Lefkowitz, Pearson, Titli, Tamura 以及其他学者的开拓性的著作中进行了积极的研究,但是他们的理论,至少是关于大规模关联动态系统的理论,用于递阶设计去解决实际问题还难于为工程师们所接受。这里有两个主要原因,首先是因为早期的著作比较抽象,其次是这些研究成果的文献相当分散。本书力图把大规模动态系统控制和最优化的递阶结构的实际可应用的综合方法收集起来。本书的读者对象较为广泛,无论是从事实际工作的工程师或是系统工程方面的毕业生都可阅读。

本书的大部分篇幅是叙述综合递阶结构的一系列设计方法,但是进行数学推导以前,在第一章中我们涉及到几个基本问题:递阶是什么?在某些系统中,递阶是怎样“自然地”发生的?能否预期地应用它们来求解大规模动态系统的控制和最优化问题?本书其他内容分为四部分,每一部分包括一章或两章。第一部分提出了应用于线性和非线性系统的开环控制递阶的最优化方法,其中的某些方法可以推广到第二部分论述的闭环控制问题。

第一部分和第二部分研究最优控制方法,第三部分研究某些次最优方法,次最优方法是利用某些系统结构上的特点使系统获得近似的最优控制。这个概念用了许多实际问题来阐明,其中包括热轧钢厂的详细研究。最后,在第四部分中,研究有随机扰动作用的实际系统。

为了强调书中提出的方法的实际应用，本书论述了把这些方法应用到实际问题的仿真研究，这些实际问题取自交通控制系统、环境保护系统直到更为传统的工程系统等各个领域。

为完整起见，在附录中简述了诸如动态规划、庞特里雅金的极大值原理以及拉格朗日对偶理论等单级标准泛函最优化方法，但本书仍假定读者相当熟悉它们。

M. G. 辛格

1976年12月于图卢兹

修 订 版 序

本专著初版以来，大规模系统递阶控制和最优化技术课题重趋活跃，又有了一些新的结果。这些新的结果主要是在两个领域里：第一个领域是非线性系统最优化技术。由于初版中作者在这个领域所总结的概念和结果实际上已经足够成熟。因此，作者在第三章主要的修改是加入了一部分内容，加入这部分内容的目的是使本部分更加连贯，从而使读者更易于阅读。收敛性的证明集中起来放到新加的附录 3,4 中。这样，主要内容的线索就更有条理。

第二个领域是递阶估计和控制。因此，第八章也稍作了修改，并且新写了第九章，其内容是多级最优滤波器、随机最优控制、估计与控制的对偶问题。这样，初版中的三分之一内容已作修改，并加入了许多内容使它成为现在这个样子。

作者感谢从前的同事和学生们对于本修订版所作的工作。特别感谢开罗大学的 M. F. Hassan 博士和法国图卢兹国家科学研究中心系统分析与自动化实验室 A. Titli 教授的富有成果的合作。

最后，作者感谢 Tougue 先生、Butterworth 先生、Waterworth 先生、Brown 女士、McLead 女士，他(她)们为修订版作了许多事务性的工作。

M. G. 辛格
曼彻斯特，1980

目 录

第一章 引言	1
1. 什么是递阶	1
2. 为什么存在递阶	5
3. 大规模动态系统递阶控制和最优化的必要性	7

第一部分 开环递阶控制

第二章 “线性二次型”问题的开环递阶控制	15
1. 引言	15
2. 问题的提出	16
2.1. 目标协调法	17
2.2. 评注	21
3. 目标协调法应用于12阶的例子	23
4. Tamura 的三级法	28
4.1. 离散动态系统的目标协调法	28
4.2. Tamura 的改进方法	30
4.3. 评注	33
5. Tamura 的时延算法	34
6. Tamura 方法在拥挤时刻交通控制中的应用	39
6.1. 一个过饱和和交通网的模型	39
6.2. 目标函数	42
6.3. 数字的实例	42
6.4. 仿真结果	46
6.5. 评注	46
7. 关联预估法	48
7.1 评注	50

8. 目标协调法和关联预估法的比较	50
8.1. 计算的负荷	50
8.2. 计算时间	51
8.3. 收敛性特征	52
9. 河流污染控制	53
9.1. 模型	54
9.2. 稳定状态研究	56
9.3. 多处污染物输入	57
9.4. 应用预估法得到的递阶解	59
9.5. 仿真结果	61
9.6. 评注	61
10. 目标协调法的改进	62
10.1. 改变分解方式以避免奇异性问题	63
10.2. 评注	65
10.3. 数字的例子	65
11. 讨论	67
第三章 非线性动态系统的递阶最优化	69
1. 非线性系统的目标协调法	70
1.1. 讨论	72
2. 例 1: 滑动质量系统	74
2.1. Bauman 的修正方法	75
2.2. Titli 等人的修正方法	77
2.3. 评注	78
3. 例 2: 两个互相耦合的同步电机的控制	78
3.1. 评注	80
4. 非线性系统的 Takahara 算法的推广	80
4.1. 问题的提出	81
4.2. 讨论	85
4.3. 本算法与拟线性化法按存储容量观点的比较	86
4.4. 例(同步电机的调节)	87
4.5. 结论	93

5. 用二级共态预估法的非线性系统最优化	94
5.1. 问题的提出	94
5.2. 应用	97
5.3. 例 1	98
5.4. 例 2	100
5.5. 例 3	105
6. 应用三级算法的非线性系统最优化	106
6.1. 问题的提出	106
6.2. 应用	108
6.3. 按存储容量的观点对各种方法的比较	109
6.4. 结论	110
7. 递阶模型跟踪控制器	111
8. 递阶模型跟踪器在同步电机激磁控制上的应用	114
8.1. 系统模型	114
8.2. 线性模型	115
8.3. 在本问题中的应用	115
9. 对偶协调法的推广	122
9.1. Javdan 法	122
9.2. Simmons 法	124
10. 评注	125

第二部分 递阶反馈控制

第四章 线性二次型问题的递阶反馈控制	128
1. 引言	128
2. 分散控制的关联预估法	129
2.1. 用修正法得到部分反馈控制	132
2.2. 评注	133
3. 闭环控制器	134
3.1. 调节器的解	135
3.2. 评注	137
3.3. 例	137

4. 推广到伺服机构的情况	139
5. 例: 河流污染控制	140
5.1. 河流污染控制模型	140
5.2. 最优化问题	142
5.3. 两个区段的河流系统的反馈控制	142
5.4. 使用分布时延模型时三区段系统的控制	152
6. 用对偶性和分解求取开环递阶最优化	155
6.1. 列出问题的方程	155
6.2. 开环递阶最优化结构	156
6.3. 算法	158
6.4. 评注	159
7. 无限多步调节器的多级解	160
7.1. 推广到伺服机构的情况	161
8. 仿真的例子	162
8.1. 仿真结果	163
9. 评注	164
第五章 非线性动态系统的递阶反馈控制	167
1. 引言	167
2. 整体控制问题与开环递阶控制结构	168
2.1. 最优控制问题	168
2.2. 开环递阶控制结构	168
2.3. 讨论	170
3. 子系统的闭环控制器	171
3.1. 在第一级求解两点边界值问题的拟线性化步骤	172
3.2. 有闭环控制时第一级中拟线性化步骤的改进	174
4. 例 1: 滑动质量系统的闭环控制	176
4.1. 仿真结果	178
4.2. 两台耦合的同步电机的反馈控制	181
5. 使用修正的预估原则的反馈控制	184
5.1. 反馈控制	187
6. 相对于初始条件的灵敏度	188

7. 反馈控制的改进	191
7.1. Calvet 的可行方法	191
7.2. 应用于滑动质量系统	193
8. 评论	195

第三部分 大系统的次最优控制

第六章 控制串联型和其他型大系统的启发式方法	197
1. 引言	197
2. 串联动态系统	198
2.1. 目标函数	199
3. 次最优控制策略的基础	199
4. 策略的实施	204
5. 次最优控制器的计算要求	205
6. 数字举例	206
6.1. 子系统间无时延的串联系统	206
6.2. 应用本策略于两区段河流系统	212
6.3. 子系统间有时延的串联系统	214
7. 次最优性的边界	216
7.1. 下界的计算	218
7.2. 数字例子	220
8. 讨论	220
9. 线性二次型系统的串联控制方案的改善	221
10. 更一般的结构	226
10.1. 集结	227
11. 用摄动法求解黎卡提方程	229
12. 强耦合系统	230
12.1. 评论	232
13. Wang 提出的分散次最优控制器	233
14. 讨论	236
第七章 热轧钢	237

1. 引言	237
1.1. Spencer 钢厂的粗轧过程	238
2. 粗轧过程厚度降低模式的离线计算	239
2.1. 目标函数	240
2.2. 模型	242
2.3. 离线最优化	244
2.4. 离线最优化结果	244
3. 粗轧过程温度控制的在线递阶策略	248
3.1. 递阶控制策略的说明	248
3.2. 粗轧过程的子系统	249
3.3. 递阶控制结构	251
4. 在粗轧过程仿真上实现递阶控制策略	254
4.1. 观察	254
4.2. 过程参数更新	255
4.3. 控制	255
4.4. 应用在线控制的仿真结果	256
4.5. 讨论	261

第四部分 随机研究

第八章 多级的状态和参数估计	264
1. 引言	264
2. 单级 Kalman 滤波器与多级 Pearson 滤波器	265
2.1. Kalman 滤波器	265
2.2. 最优 Pearson 多级滤波器	266
3. Arafteh 和 Sage 的极大后验法	271
3.1. 次最优协调	275
4. S. P. A. 滤波器	276
4.1. S. P. A. 滤波器的次最优性	279
4.2. η_1^* 和 η_2^* 的“白色性”	281
4.3. 计算上的要求	285

4.4. 仿真研究	486
4.5. 讨论	489
5. 时延系统的分散滤波器	289
5.1. 评注	293
6. 串联系统的前馈滤波器	293
7. 应用于河流系统	295
7.1. 讨论	307
8. 结论	308
第九章 应用多级技术的最优随机控制	310
1. 引言	310
2. 多级 Kalman 滤波器	310
2.1. 新滤波器的代数结构	313
2.2. 计算上的要求	315
3. 由 11 部耦合同步电机构成的系统状态估计	316
3.1. 仿真结果	317
3.2. 评注	319
4. 最优随机控制	320
5. 辨识与最优化的联合问题	327
5.1. 联合问题的提出	328
5.2. 参数解法	329
5.3. 评注	330
5.4. 递阶控制法	330
6. 四级算法	333
6.1. 评注	335
7. 收敛性分析	336
7.1. 引理 1	336
7.2. 引理 2	338
7.3. 定理	339
8. 例	339
8.1. 评注	341

9. 结论	342
附录 1 标准泛函最优化方法	344
1. 最优化问题	344
2. 标准泛函最优化方法	345
2.1. 变分法与极大值原理	345
2.2 边界条件	350
2.3. 两点边界值问题	350
2.4. 拟线性化方法	351
3. 应用于线性二次型问题	356
4. 动态规划	358
4.1. 附注	360
附录 2 拉格朗日对偶性	361
附录 3 第三章第 4 节算法的收敛性研究	367
附录 4 第三章第 6 节基于共态向量预估算法的收敛性 研究	375
参考文献	381

第一章 引 言

在本专著中，我们叙述大规模关联动态系统递阶控制中的现代成就。讨论递阶结构的综合步骤形成本书的大部分内容，为了建立讨论这一问题的基础，在本章中我们考查下列基本问题：什么是递阶结构？为什么它们如此普遍地存在？究竟有什么理由使它们比其他结构更有发展前途？在解决大规模系统最优化及控制问题时这样的结构能否人为地得到？这样做是否有好处？尽管本章中的讨论多少是启发式的，但是在以后的章节中已经默认了递阶结构确实是综合系统的有用结构。而且，本书对运输系统、环境保护系统以及更为传统的工程系统中的实际问题，给出了具体综合步骤。

1. 什么是递阶

由于在我们的日常生活中，遇到等级递阶事例是如此之多，因此我们是非常熟悉等级递阶或递阶的。但是，它们有何特性？一个最简单的递阶有两级，如图 1.1 所示。例如，在下述情况下就会发生一个两级递阶：在一个公司里，第一级是由完成他们各自工作的职员组成，管理人(或协调人)确保每一个职员的工作负担合适，也确保公司的全部经营目标能按照一个合适的进度表去完成。这个进度表本身是通过反复交换信息去确定的，在这一过程中，协调人在考虑到每个职员与其他职员间的工作联系后确定每个职员的任务，而每个职员应使协调人知道他能否完成此任务。假如不能，协调人就要

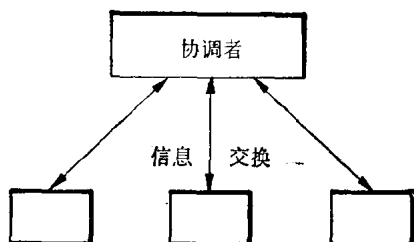


图 1.1 一个典型的二级递阶

在考虑其他人员的任务后,对这个职员的任务进行修改,这一过程一直进行到每个职员都得到合适的任务同时公司的任务也能够完成为止。还应注意下列事实:下级往往注意公司的日常工作,而上级则更关心公司的较长时期的目标。

我们已经以很原始的形式描述了一个特别简单的递阶,现在再来看看这一递阶所包含的,当然也是其他递阶所具有的基本性质。这些性质是:

(1) 递阶由安排在一个“锥形”结构里的所有决策单元组成,在锥形结构的每一级,都有一定数量的决策单元平行地运转。图 1.2 表示了这一锥形结构。

(2) 递阶结构存在于有整体目标的系统中,构成这个递阶结构的全体决策者的目标是彼此协调的。

(3) 递阶结构中不同级上的决策单元之间有往返的信息交换,但向下的信息有优先权,较低级对这一信息应作为命令对待,只要可能作到,他们就应服从这一命令。

(4) 递阶结构中,决策者所处的级别越高,越关心较长时期的目标。

让我们回到原来的公司型递阶的例子,显然上面所列举的性质对它来说是基本的性质:它有一个锥形结构(图 1.1);有一个整体的目标(或许是工作效率);有往返的信息交

换(在职员与管理人之间); 另外更高级的职员关心更长期的目标。

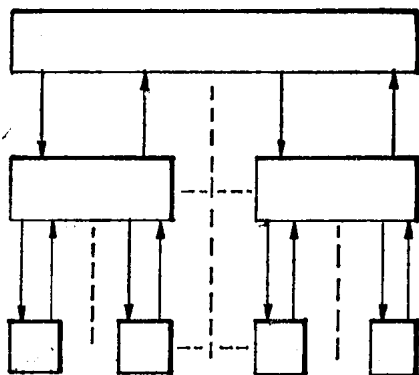


图 1.2 一个“锥形”结构

在熟悉这些性质以后, 让我们从简单的两级递阶转到更复杂的递阶: 一般的生产过程如图 1.3 所示, 设想一个公司生产一种工业产品, 这个生产系统的任务可能是获取最大利润, 或是生产高质量的产品, 或是保障工人的最大福利, 或是保障管理人员的最大福利, 或是这些因素的一种综合。让我们从生产递阶的顶端开始, 这一级(总管理处)根据市场情况的预测去确定公司的总方针并且决定一个合适的生产清单以满足预测的市场需要。

顶端这一级的生产清单是一个十分粗糙的清单, 因为它仅仅注意产量这一目标。下一步是按照顶端总管理处分配的物资判断这些目标能否达到。这显然是一个反复的过程, 实际制造产品的各个工厂的管理人(第二级)获得有关他的工厂的输入信息, 然后把他们能否完成清单中他们自己的任务的估计送回总管理处。这种信息交换是反复进行的, 因为各个工厂的管理人仅仅关心他们自己的工厂, 而各家工厂之间的