

最经济控制理论 及其应用

涂序彦 刘维 马忠贵 著



*Most Economical Control Theory
and Its Applications*



国防工业出版社
National Defense Industry Press

最经济控制理论及其应用

Most Economical Control Theory and Its Applications

涂序彦 刘维 马忠贵 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

最经济控制理论及其应用/涂序彦,刘维,马忠贵著. —
北京:国防工业出版社,2016.4
ISBN 978-7-118-10751-7

I. ①最… II. ①涂… ②刘… ③马… III. ①自
动控制理论 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 055584 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 13 1/4 字数 225 千字

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—500 册 定价 60.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序 (一)

涂序彦教授是我国自动控制领域卓有成效的著名专家学者。1960年,在第一届国际自动控制联合会(IFAC)世界大会上提出了多变量协调控制理论,并获得与会专家学者的好评。

他曾经在中国科学院自动化研究所工作多年,承担过多项国家重点项目的研究任务。在“科学卫星姿态控制系统研究”项目的开发科研任务中,担任总体负责人之一。为了解决如何节约研制经费的问题,提出建议:利用被控制对象(卫星星体)自旋的耦合作用,采用二套检测装置和控制机构,实现准三轴卫星姿态控制的新方案。此建议经采用获得成功。

涂序彦教授从“最经济控制系统”领域的实际工作出发,并进一步上升为理论研究,进行了系统性的研究开发工作。

1979年,他出席全国控制理论及应用学术交流会,作学术报告:“可控性、可观性的实用价值与最经济结构综合问题”,论述了可控性、可观性的实用价值,提出了控制系统的“最经济结构综合”的新概念、新思想。

1981年,在“第一届中美控制系统学术会议”,作学术报告:The Problem on Most Economical Control,提出了控制系统“经济化”的思路,构建了最经济控制理论的基本架构。

1982年,在《自动化学报》发表了“最经济控制系统结构综合”论文,提出了最经济控制、最经济观测、分型能控性、分型能观性等新概念,给出了最经济控制系统结构综合的直接方法,以及相关的定义、定理。

1984年,在《自动化学报》发表了“线性系统最经济控制问题的一种解法”论文,提出了最经济控制系统结构综合的一种新方法。

1985年,在中国科学院研究生院讲授“最经济控制理论及应用”课程,撰写了《最经济控制理论及应用》教材。

最经济控制理论及应用的研究、开发、应用,不仅得到国内同行专家学者的关注、支持、响应,而且也受到国外同行专家学者的关注。现在,涂序彦教授总结关于最经济控制理论的多年研究、开发、应用工作,参考国内同行专家、学者的相

关论文、著作,撰写出版《最经济控制理论及应用》专著。

正如习近平主席在“2014 年国际工程科技大会”上的主旨演讲所说:“一项工程科技创新可以改变世界”!涂序彦教授等关于最经济控制理论的研究成果完全符合这一精神!

特此为序,祝贺新书面世,衷心期望此专著的出版,能够为我国经济建设实现“中国梦”,做出重要贡献。

中国自动化学会(第4~8届)副理事长、
中国人民解放军军事科学院研究员

孙柏林 少将

2014 年 7 月 12 日

序(二)

涂序彦教授所著《最经济控制理论及应用》是一本极有价值的科学著作。涂教授在本书中对控制系统方面的工作给出了三个层面上的创新。

首先,他将控制系统的应用从单变量系统推广到多变量的复杂系统,而多变量复杂系统正是我们经常要面临的实际问题,所以这个推广具有从量变到质变的飞跃特征。

其次,他将多变量系统中参量间关联耦合中的“退耦原则”转变成关联耦合中的“协调控制原则”,利用状态多变量之间的相互耦合性,进行多变量的协调控制,这实质上是在线性定常系统中利用耦合中的非线性特性来寻求用最小的经济投入,最少的控制设备来获取最大的观测效果。这是自动控制工程中相当本质的问题。涂教授在他的《最经济控制理论》中回答了这个问题,从而提供了解决多变量复杂系统的自动控制中一系列难题的途径。

再次,涂教授在构建理论框架的基础上,又提出了“分型能控性”与“分型能观性”的新观念,并运用这些新观念来对实际问题进行探讨,这些方法能很好地解决一些实际应用问题,并举实例加以讨论,达到了理论与实践的高度统一。

综上所述,本书是一部严谨的科学著作,它系统地阐述了最经济控制理论的科学基础、计算方法以及实际运用时的切入点等。另外,它又是控制系统学科中一个崭新领域的入门书,它深入浅出地将控制系统学科中最本质的图像展示在读者的面前,从而使后来者能在这块科学阵地上开出灿烂的花朵。

谨以此序,祝贺涂序彦教授的新书出版。

北京大学 黄昀

2014年9月18日

序（三）

喜读涂序彦教授的最新著作《最经济控制理论及应用》，这部专著的出版适逢其时，它正是我国进入全面深化改革时期所迫切需要的！

党的十八届三中全会指出，全面深化改革的总目标是完善和发展中国特色社会主义制度，推进国家治理体系和治理能力现代化。从系统的观点看，国家治理体系和治理能力是社会主义建设系统工程的控制系统和控制策略（包括：社会建设、经济建设、政治建设、文化建设、生态文明建设系统工程等）。对如此复杂开放的控制系统，如何实现“最经济结构综合”是一个亟待解决的重大的理论与实践问题。

本书总结了他关于最经济控制理论多年研究、开发、应用工作，从理论上对上述问题创造性地提出了新的概念、新的思想与新的方法，这是十分值得推崇的学术贡献！

第一，控制系统的结构与功能的新问题。涂序彦教授从社会经济发展的需要，提出两个新概念。一个是最经济结构（MES），它是指为了完成给定的控制任务，如何选取最经济的控制系统的结构方案，使得在给定的控制对象下，所需采用的控制机构与观测装置最少，或者说，所需采用的控制设备最经济；另一个是最经济控制（MEC），它是指在给定的技术约束条件下，如何设计和建造控制系统，使经济目标函数极小化，实现控制系统的“经济化”。这两个新概念对于从新的视角，考虑我国治理系统的构建，提供了十分有价值的理论前提。

第二，控制系统的技术性能与经济性能的区别与联系。涂序彦教授认为：这是构建最经济控制的关键。二者的区别在于：技术性能是指稳定性、准确度、快速性；经济性能是指为构建控制系统付出的经济代价，例如，控制设备的投资、控制系统运行费用、控制人员培训的费用等。二者的联系在于：在控制系统的工程设计与技术实现中，必须把“经济性”考虑在内。特别是社会控制系统的设计更多地涉及社会经济方面，尤其需要考虑：在各种技术上可行的设计方案中，如何选择最经济的设计方案？

第三，可控性与可观性是控制理论的核心概念。涂序彦教授从协调控制原

理出发,引入可控性与可观性概念,并深刻地指出,这两个概念在控制理论中起核心作用。因为:一是,它们是设计控制系统结构方案的重要依据;二是,它们是判断控制对象中关联(耦合)是否有益的判据。

第四,提出最经济控制理论需要解决三方面的问题:

- (1) 如何评价控制系统的经济性?
- (2) 如何给出技术性能约束条件?
- (3) 如何设计最经济控制系统?

习近平总书记提出“第五个现代化”伟大的历史任务,“第五个现代化”是国家治理体系和治理能力的现代化,从系统论的观点看来,它实质上是控制系统与控制能力的现代化。

涂序彦教授的最经济控制理论创造性地提出了最经济控制系统的设计问题,进行了科学的论证,新著出版与广大读者见面,将对实现第五个现代化的进程起积极推动作用。

中国人民大学 黄顺基
2014年9月24日

前 言

1956—1962 年,我在中国科学院自动化研究所攻读研究生,师从著名自动电力拖动专家疏松桂先生,承担国家重大科研任务,研究三峡升船机多电机“同步控制”问题。

1959—1960 年,研究多变量控制理论及应用,有幸得到著名科学家、工程控制论创立者钱学森先生的亲切关怀、亲自指导,在第一届国际自动控制联合会(IFAC)世界大会,提出了多变量协调控制理论。

1977—1984 年,在中国科学院自动化研究所工作,承担国家科学卫星姿态控制系统研究开发的科研任务,担任总体负责人之一。为了解决如何节约研制经费的问题,提出建议:利用被控制对象(卫星星体)自旋的耦合作用,采用二套检测装置和控制机构,实现准三轴卫星姿态控制的新方案。

1979 年,应邀出席全国控制理论及应用学术交流会,作学术报告:“可控性、可观性的实用价值与最经济结构综合问题”,论述了“可控性、可观性的实用价值”,提出了控制系统的最经济结构综合的新概念、新思想。

1981 年,在“第一届中美控制系统学术会议”上,作学术报告:The Problem on Most Economical Control,提出了控制系统“经济化”的思路,构建了最经济控制理论的基本架构。

1982 年,在《自动化学报》,发表了“最经济控制系统结构综合”论文,提出了最经济控制、最经济观测、分型能控性、分型能观性等新概念,给出了最经济控制系统结构综合的直接方法,以及相关的定义、定理。

1984 年,在《自动化学报》,发表了“线性系统最经济控制问题的一种解法”论文,提出了最经济控制系统结构综合的一种新方法。

1985 年,在中国科学院研究生院讲授“最经济控制理论及应用”课程,撰写了《最经济控制理论及应用》教材。

上述科研和教学的多年工作,为建立具有中国特色的“最经济控制理论”,奠定了坚实的基础。

关于最经济控制理论及应用的研究、开发、应用,得到国内同行专家、学者的

关注、支持、响应,认为最经济控制理论适应中国国情,具有重要的学术意义和广泛的应用价值。著名学者高为炳、周春晖、蒋慰荪、孙优贤教授等,以“最经济控制”为研究生论文选题,初步统计,关于最经济控制理论及应用,已发表国内外论文数十篇,其中,IFAC 和 IEEE 国际学术论文 4 篇,《自动化学报》论文 16 篇,广泛应用于电力、造纸、冶金、石油、水泥生产过程自动化系统,开辟了控制理论及应用研究的新园地。

最经济控制理论也受到国外同行专家的关注,应著名学者 Y. C. Ho 教授、C. J. Burnes 教授、J. J. Countryman 教授、A. Lindquist 教授等邀请,我先后赴美国哈佛大学、亚利桑那州立大学、纽约州立大学、瑞典皇家理工学院,进行关于最经济控制理论的访问讲学、学术交流、合作研究。

本书总结了作者和学生们关于最经济控制理论及应用的多年研究、开发、应用工作,参考国内同行专家、学者的相关论文、著作,撰写出版本专著。

经济控制适国情,投入产出效益赢;

技术性能需满足,师生合作情谊深。

涂序彦

2014 年 6 月 24 日

目 录

第1章 绪论:控制系统最经济结构综合	1
1.1 引言	1
1.2 可控性、可观性的实用价值	1
1.3 最经济结构综合问题	4
1.4 小结	7
第2章 最经济控制的概念提出	9
2.1 引言	9
2.2 最经济控制的概念提出	9
2.3 最经济控制的理论概述	10
2.4 最经济结构综合	12
2.5 可控性、可观性分型	13
2.6 最经济结构综合的直接方法	15
第3章 最经济控制的理论方法研究	17
3.1 引言	17
3.2 最经济控制系统结构综合	17
3.3 线性最经济控制系统结构综合	18
3.4 分型可控性、分型可观性	19
3.4.1 分型可控性的定义	19
3.4.2 分型可控性的定理	20
3.5 0—型最经济结构综合	22
3.6 m —型最经济结构综合	23
3.7 最经济结构综合的直接方法	27
3.8 结论	28

第4章 线性控制系统最经济结构综合的代数方法	30
4.1 引言	30
4.2 问题的提法	30
4.3 解的存在性及其结构	31
4.4 求综合解的计算步骤	37
4.5 结论	38
第5章 分型可控的控制系统最经济结构综合方法	39
5.1 引言	39
5.2 问题的提出	39
5.3 满足分型可控条件的最小输入矢量数	40
5.4 分型可控最经济结构综合解的求法	45
5.5 计算实例	46
第6章 线性系统最经济控制问题的一种新解法	49
6.1 引言	49
6.2 最经济控制问题的新解法	49
第7章 线性系统最经济结构综合的有向图解法	55
7.1 引言	55
7.2 问题定义	55
7.3 引理和定理	56
7.4 有向图算法	56
7.5 相关证明	57
第8章 控制系统的指定最经济结构综合	60
8.1 引言	60
8.2 最经济结构综合的概念	60
8.3 简化最经济结构综合	61
8.4 指定最经济结构综合	62
8.5 最经济结构综合的应用	63

8.6 结论	66
第9章 最经济控制结构综合的分解合成方法	67
9.1 引言	67
9.2 最经济控制信息结构的分解合成综合方法	67
9.3 经济信息结构的存在条件及判定方法	69
9.4 经济信息结构的固定模综合方法	69
9.5 经济信息结构的分解合成综合方法	70
第10章 分散控制大系统的最经济结构综合及应用	76
10.1 引言	76
10.2 问题的提出	76
10.3 问题的描述	76
10.4 综合解的存在性	78
10.5 分散控制结构的最经济综合	81
10.6 工业应用实例分析——反应再生系统控制结构的最经济综合	84
第11章 参数不完全控制系统的最少信息镇定	85
11.1 引言	85
11.2 参数不完全系统的概念	85
11.3 参数不完全系统的动态模型及控制	86
11.4 最经济控制器的结构及系统极点配置	88
11.4.1 最经济控制器的结构	88
11.4.2 最经济控制系统的极点配置	89
11.5 计算示例	90
第12章 最优控制系统的最经济结构综合	92
12.1 引言	92
12.2 最经济结构综合问题的提法	92
12.3 可控性、可观性分析	93
12.4 最佳控制系统的最经济结构实现问题	95
12.5 线性空间分解的几何理论分析	96

12.6 典型关联方式的简便综合方法	97
第 13 章 线性控制系统最经济结构综合解的适定性	99
13.1 适定性问题的提出	99
13.2 可控性余度的估计方法	100
13.3 可控性程度变动量特征值估计法	101
13.4 可控性程度变动量行列式值估计法	109
第 14 章 最经济控制结构综合解的可控适定性	111
14.1 引言	111
14.2 问题描述	111
14.3 相关的引理	112
14.4 分型可控性的适定性分析	115
14.5 完全可控适定性分析	118
14.6 例题	120
14.7 结论	122
第 15 章 广义系统的最经济控制结构综合	123
15.1 引言	123
15.2 广义系统的最经济控制结构综合问题	123
15.3 最经济控制矩阵 B_* 的存在性	123
15.4 最经济控制矩阵 B_1^* 的结构与性质	124
15.5 最经济控制阵 B_2^* 的结构与性质	126
15.6 最经济控制阵 B_* 的结构和性质	127
15.7 举例	128
第 16 章 广义系统可控性与最经济结构综合方法	131
16.1 引言	131
16.2 广义系统可控性的类型	131
16.3 广义系统可控性的判据	131
16.4 广义系统最经济结构综合	132
16.5 可控性程度判断方法	133

16.6	工程设计的计算实例	133
第 17 章	分散控制大系统的最经济结构综合	136
17.1	引言	136
17.2	问题的提出	136
17.3	问题的解法	139
17.4	问题的实例	143
17.5	结论	144
第 18 章	大系统的信息结构能通性分析方法	145
18.1	大系统的信息结构模型与能通阵计算	145
18.2	大系统信息结构的分型能通性与能通性指标	148
18.3	系统信息结构分型能通性与分型可控可观性的关系	149
第 19 章	线性系统的结构经济控制	150
19.1	引言	150
19.2	线性系统结构经济控制的定义	150
19.3	列最少结构经济控制阵的求法	153
19.4	一般结构经济控制阵的求法	158
19.5	利用结构经济控制阵求 $\bar{A} \in R^{n \times n}$ 的最经济控制阵 $\bar{B}$	159
第 20 章	最经济控制理论研究的拓展	160
20.1	引言	160
20.2	最经济控制的定义拓展	160
20.2.1	最经济控制的原型定义	160
20.2.2	最经济控制的定义拓展	161
20.3	最经济控制的对象及模型拓展	162
20.3.1	最经济控制对象的 WSR 模型	162
20.3.2	最经济控制对象的 BDA 模型	163
20.3.3	以可靠性为对象的最经济控制模型	164
20.4	最经济控制问题的求解思路与方法拓展	165
20.5	小结	167

第21章 最经济智能控制的概念提出	168
21.1 引言	168
21.2 最经济控制问题的提出	168
21.3 最经济结构综合	169
21.3.1 最经济结构综合的概念	169
21.3.2 最经济结构综合的方法	170
21.3.3 最经济结构综合解的适定性	170
21.4 结构经济控制	171
21.5 分散控制系统的最经济控制	172
21.6 闭环控制系统的最经济控制	172
21.6.1 状态反馈和输出反馈的最经济结构综合	172
21.6.2 镇定系统的经济信息结构综合	173
21.7 应用研究	174
21.7.1 不需要改进生产设备的综合	174
21.7.2 部分改进生产设备的综合	174
21.8 小结	174
第22章 最经济智能控制系统的研究与开发	177
22.1 引言	177
22.2 最经济智能控制系统的结构方案	178
22.3 最经济智能控制系统的目标函数	179
22.3.1 控制系统寿命周期成本	179
22.3.2 控制系统经济收益	179
22.4 最经济智能控制系统的结构优化设计	180
22.4.1 信息通道结构模型建立	180
22.4.2 信息通道结构能通性判断	181
22.4.3 信息通道结构可靠性与经济性分析	181
22.4.4 信息通道结构的优化方法	182
22.5 最经济智能控制系统的参数设计	183
22.5.1 控制参数取值范围的选择	183
22.5.2 适应度函数的选择	184

22.5.3 遗传算法参数的选择	184
22.6 最经济智能控制系统的系统仿真	184
22.7 小结	185
第 23 章 最经济控制系统理论的应用	186
23.1 引言	186
23.2 最经济控制系统理论在造纸生产过程的应用	186
23.3 最经济控制系统理论在电力系统运行过程的应用	187
23.4 最经济智能控制系统在混凝土生产过程的应用	188
23.5 小结	189
第 24 章 结论与展望	190
参考文献	191