

THEORY OF SOFT DESIGN IN ENGINEERING

工程软设计理论

王光远 著

科学出版社

工程软设计理论

王光远 著

国家自然科学基金委员会和
建设部联合资助项目

科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书初步地建立了工程软设计的理论框架,主要内容是工程大系统的全局优化和结构的不确定性优化设计,还介绍了结构控制的概念和方法,并提出了结构维修决策的初步研究成果。为了便于阅读,第二编和附录给出了本书所需的超出高等院校课程内容的数学知识。最后介绍了有关专家系统的建造问题。本书的特点是理论和实践并重,在深入的理论研究基础上,提出了简便实用的计算和决策方法。

虽然本书的论述主要涉及土建工程,但除三、六两编外,其余内容均可供其他工程专业应用和参考。本书的读者对象是各种工程类专业的技术人员、科研工作者、研究生以及高等院校有关专业的教师和高年级本科生。

工 程 软 设 计 理 论

王 光 远 著

责任编辑 杨家福

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100707

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

*

1992 年 11 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1992 年 11 月第一次印刷 印张:13 3/4

印数:平 1—500 插页:精 2

精 1—800 字数:350 000

ISBN 7-03-002403-6/TU·21 (平)

ISBN 7-03-002404-4/TU·22 (精)

定价: 平装压膜 15.50 元
纸面精装 17.30 元

前 言

以“决定论”为基础的科学模式认为，事物之间存在严格量化的因果关系，过程序列中每一个环节都被上一个环节的输入所单义地决定，并由此引起对下一个环节的确定性的输出。反映在力学上，一切运动都是由初始条件、边界条件、运动方程和外界干扰所决定的，答案是唯一的。此外，这种模式认为一切信息都是确定性的、绝对的。

从总的趋势来看，目前自然科学和技术科学的很多领域都正在从“决定论”向“选择论”的方向发展，使得有些“硬”科学出现“软化”的倾向。与此同时，过去无法进行运算的“软”科学逐渐向程序化发展，有“硬化”的倾向。产生这种趋势的根本原因有二，首先是某些事物之间因果关系的不确定性和某些信息的不确定性（包括随机性、模糊性和未确知性）正在得到普遍承认和逐步得到正确处理，其次是人们还认识到，在人类社会中，人对事物的发展应该更积极主动地参与，使其更符合人类的需要。人的干预是“选择论”的核心。实际上，人类的认识和实践活动所以是能动的、创造性的，其本质就在于人类具有独特的自觉的选择能力。因此，人们的经验是宝贵的，正确的决策离不开人的经验。正像钱学森同志所说：“一个系统应该有人的干预，在概念上可以把人包括在系统之内”（光明日报，1979年11月9日）。

设计领域包括人类在解决各种问题时对方案的构思和规划的一切活动。构思的目的是建立或产生解决问题的各种方案，而规划是对所有可用方案进行优选。

我们认为，当前在土木建筑工程设计领域中有几个重大问题亟待解决并可能解决。

首先是工程系统全局优化设计的概念和方法。这是一个影响

整个工程的社会、经济效益的重大战略性决策问题。它包括工程的可行性分析与论证、总体布置(工程系统的组成)和大系统优化的方法和技术。工程项目的可行性分析和总体布置具有强烈的软科学的性质,它们的研究对象不仅是自然环境和科学技术,而且包括人和社会的因素,必须从国家的经济政策、建设方针出发,结合地区的资源条件、社会需要与可能,以及有关企业配套来考虑,并且将广阔领域的知识有机地结合起来才能解决。

工程大系统优化的问题难度很大。从系统的观点看,人们都知道,各个局部单独优化而后组成的总体并不一定优化。但当前的状态是,人们还只是研究各个结构的优化,并没有考虑工程系统全局的优化问题。主要困难在于无法建立各子系统之间及结构之间的联系约束,找不到合适的协调参数。经过多年的研究,我们初步解决了这些问题。在本书第三编中我们将提出工程系统全局优化的方法和技术。这个方法不仅非常合理,而且十分简便实用,它解决了整个工程项目中总可靠度及总投资在各子系统和所有结构间的最优分配问题。

工程设计理论的第二个重大问题就是不确定性信息和因素的处理方法。在结构设计中,设计方案好坏的标准、约束条件、荷载等级(如地震烈度)、场地土分类等重要因素都具有强烈的不确定性。现有的结构设计理论在信息处理上采取两种极端相反的手法。例如结构设防水平的决定是结构设计的战略性决策,但由于不确定性因素过于强烈,无法进行科学处理,只好由决策者“拍脑袋”决定,而转入结构变量设计以后就走另一极端,把一切信息和各个环节的因果关系都看作严格的确定性的事物,以致出现多种矛盾,长期无法解决。

在结构设计中考虑上述各种不确定性因素,将使设计的目标函数和约束条件软化,因而得到的不再是唯一的所谓“最优解”,而是一系列“满意解”,从而增加了可选择性,为多层次的优选创造了条件。我们称之为“结构软设计理论”。

本书第二编主要介绍了各种不确定性因素和信息的数学处理

方法。在第四、五两编中，我们将介绍我们提出的结构软设计理论，包括结构不确定性优化设计理论、结构的广义可靠性理论和实用的结构软设计方法。

工程设计理论的第三个重大问题就是，缺乏对已建成工程的科学管理(控制)和维修问题的研究。到目前为止，土木建筑界的工程理论工作者和工程师们的主要精力只是放在对结构设计方案和施工规划的研究上。工程建成后，就移交使用单位而不再过问。但对于任何工程问题，设计不是目的，使用才是目的。为了保证已建成工程经常处于良好的工作状态，它仍然离不开土建工程师的关怀和研究。这就是从土建工程和结构工程的角度与使用领域的工程师配合，使工程系统总体和各个结构能为企业或其他使用单位的最佳运转状态更好地服务。

此外，已建成工程体系和真实结构的研究成果和经验，将成为工程大系统优化、结构分析和设计理论的反馈信息，从而必将成为推动这些理论发展的有效途径。

本书第六编介绍有关结构性态(各种反应)控制的研究现状和实用方法，并给出了结构维修决策方法的初步研究成果。

工程设计理论的第四个重大问题就是如何充分利用专家知识的问题。过去决定论的科学模式长期统治人们的头脑，他们常常从贬义角度来看待人类经验的运用。当一篇论文全部是数学推导时，有些人就认为它水平很高；当一篇论文在解决某些问题中需要靠人的判断时，就被贬为经验性的东西。实际上，人类的一切成就莫不依赖于人们的经验，经验是最可宝贵的东西，而且只有充分利用有关的多领域的科学成就才能更有效地利用人的经验。过去靠拍脑袋决定的一些软问题的程序化和科学化，比解一个“硬”的力学和数学问题要困难得多。正是为了能最充分地发挥专家经验在解决各种问题时的作用，以先进的计算手段为基础，近年来才开发了各种相应的专家系统。本书第七编将介绍有关专家系统的基本概念和我们在此领域的一些研究成果。

工程设计理论的第五个重大问题是，目前的结构设计都只考

虑结构建成后使用过程中的安全问题，而较少考虑结构在施工中的受力过程。后者是十分复杂的问题。例如斜拉桥在施工过程中，结构本身就在不断变化，受力情况又很严峻，如不认真进行力学分析和设计，轻则会使结构受到损伤，重则会造成施工中的倒塌事故，这是屡见不鲜的。这个问题的逐步解决，必将形成一个崭新的工程学科分支——施工力学与设计。

本书是我们在工程设计理论方面研究成果的总结。这批研究工作是从1979年开始的，至今已十年有余。头二年主要研究一般性的结构优化设计方法。1981年开始探讨利用模糊数学的方法解决地震工程中的一些重大矛盾，同时开始研究结构模糊优化设计理论和结构的模糊随机可靠性理论。1983年硕士生王文泉开始协助我进行这两项研究工作，作出了贡献。王文泉工作勤奋，思维敏捷，不幸英年早逝，令人痛惜。1987年博士生谭东耀开始协助我进行结构模糊随机优化设计方法和工程大系统全局优化技术的研究。此外，博士生武爱虎在结构最优设防水平的模糊决策方面，博士生陈树勋在普遍型模糊规划方面作出了贡献。博士生欧进萍的主要工作是与我共同开发结构模糊随机振动理论，同时也参与了本书部分内容的研究和讨论。本书第七编所介绍的有关专家系统的研究成果是范乃文、高原青、刘晓燕等作出的。此外，还应该感谢我的夫人叶崇敏，她不仅在精神上给我以鼓励，在生活上给我以关怀，而且为誊抄稿件付出了大量的劳动。

本书承蒙清华大学刘西拉教授审阅，他提出了很多宝贵意见，特别是对第二十章“结构的维修策略”还提供了参考资料，作者非常感激。

在写作本书时力求使之具有科学性和实用性。尽管本书所探讨的工程大系统全局优化技术、结构软设计理论等都是难度很大的崭新的复杂课题，但我们都是在对它们进行深入研究的基础上分别提出了简单易行的实用方法。

虽然本书的研究对象以土建工程为主，但除三、六两编外，其余内容均可供其他工程类专业的科技人员应用和参考。本书各编

都具有相对的独立性,可分别阅读。为便于读者使用,本书所用超出大学课程内容的数学知识均在第二编及附录中给出。

本书的研究工作得到国家自然科学基金委员会和建设部的支持和资助,特此致谢。

还应该着重说明,所有这些研究成果都具有初创的性质,是对工程软设计理论的探索,有待进一步的完善、提高和补充。因此,作者以感激的心情,迫切地希望读者对我们的工作提出宝贵的意见,更希望能积极参加研究,使其日臻成熟。

王光远

1990年9月于哈尔滨

目 录

前言

第一编 绪 论

第一章 工程软设计的概念.....	2
§ 1.1 软科学与硬科学	2
§ 1.2 工程软科学和工程软设计	4
§ 1.3 工程优化设计的满意解	5
§ 1.4 设计方法的人工智能化	7
§ 1.5 关于工程设计理论的发展问题	8

第二编 不确定性信息的数学处理方法

第二章 事物的不确定性.....	12
§ 2.1 已存在的客观事物都是确定性的	12
§ 2.2 未来事物的随机性	13
§ 2.3 客观认识的模糊性	14
§ 2.4 主观认识的未确知性	15
§ 2.5 信息的分类和对若干观点的讨论	16
第三章 概率论基础.....	19
§ 3.1 随机事件和基本空间	19
§ 3.2 概率论的公理化结构	23
§ 3.3 随机变量及随机向量的分布律	26
§ 3.4 随机变量及随机向量的数字特征	30
§ 3.5 几种常用的分布律	35
§ 3.6 极值分布	42
第四章 模糊集合论的准备知识.....	46
§ 4.1 模糊子集的概念	46

§ 4.2	隶属函数的模糊集值统计	50
§ 4.3	隶属度的试验统计	53
§ 4.4	隶属函数具体形式的选定	54
§ 4.5	模糊子集的基本运算规则	56
§ 4.6	模糊子集的水平截集	58
§ 4.7	模糊子集的分解定理	60
§ 4.8	扩展原理	62
§ 4.9	函数的模糊条件极值	63
§ 4.10	模糊事件的概率	65
第五章	模糊综合评定及其应用	70
§ 5.1	问题的性质	70
§ 5.2	单因素评判	71
§ 5.3	多因素综合评判	74
§ 5.4	多级综合评判	77
§ 5.5	评定所得模糊向量的应用	79
§ 5.6	地震烈度的二级综合评定	81
§ 5.7	部分因素耦联情况下的模糊综合评定	89
§ 5.8	抗震结构建筑场地等级的综合评定	97
第六章	未确知信息的数学处理	103
§ 6.1	对事物认识的主客观因素	103
§ 6.2	未确知性的定义及其基本性质	104
§ 6.3	主观概率分布的设定	106
§ 6.4	主观隶属度分布的设定	107
§ 6.5	信比与信比分布	108
§ 6.6	信比分布的设定	109
§ 6.7	未确知集合和未确知数的概念和定义	111
§ 6.8	结语	112

第三编 工程系统的全局性优化技术

第七章	工程项目的全局性决策问题	114
§ 7.1	引言	114
§ 7.2	工程项目的可行性论证	115

第五编 结构软设计的实用方法

第十六章	设计荷载的评估	274
§ 16.1	结构设计荷载的基本性质	274
§ 16.2	荷载的分类和组合	275
§ 16.3	抗震结构计算理论简介	277
§ 16.4	地震模糊反应谱的非模糊化	284
§ 16.5	地震危险性分析的基本概念	286
§ 16.6	地震荷载的评估	289
第十七章	工程结构设防水平的最优决策	293
§ 17.1	引言	293
§ 17.2	设防水平的等级论域	294
§ 17.3	概念结构抗灾强度的模糊综合评定	296
§ 17.4	概念结构延性的模糊综合评定	301
§ 17.5	概念结构的损伤预估	307
§ 17.6	概念结构发生各种损伤等级的概率	309
§ 17.7	灾害损失的期望值	315
§ 17.8	综合效用(目标)分析	316
§ 17.9	最优设防水平的求法	318
§ 17.10	结语	319
第十八章	具有最优荷载水平的结构软设计	320
§ 18.1	最优荷载水平下的结构优化模型	320
§ 18.2	结构的双目标多层次模糊优化	321
§ 18.3	结构的单目标模糊优化	323
§ 18.4	结构不确定优化设计的确定化	326
§ 18.5	结语	328

第六编 结构的控制与维修

第十九章	结构性态控制	330
§ 19.1	结构性态控制的概念	330
§ 19.2	结构的消极控制和积极控制	332
§ 19.3	机械减振及阻尼减振	334

§ 11.8 工程系统全局优化中的结构优化设计	180
-------------------------------	-----

第四编 结构软设计理论

第十二章 结构优化设计及其不确定性因素	183
§ 12.1 结构在设计工程中的位置	183
§ 12.2 结构优化设计的基本概念	184
§ 12.3 目标函数的模糊性和随机性	188
§ 12.4 约束条件的模糊性和随机性	189
§ 12.5 地震烈度的模糊性和随机性	192
§ 12.6 建筑场地等级的模糊性	195
第十三章 结构模糊优化设计理论	197
§ 13.1 结构不确定性优化设计的分类	197
§ 13.2 具有普通模糊约束的结构优化设计	199
§ 13.3 具有广义模糊约束的结构优化设计	214
§ 13.4 抗震结构的模糊优化设计	217
第十四章 普遍型模糊随机规划的满意解	224
§ 14.1 引言	224
§ 14.2 普遍型模糊随机规划的数学模型	225
§ 14.3 对模糊随机约束的满足度	226
§ 14.4 对模糊随机目标的满意度	228
§ 14.5 综合满意度与综合满足度	231
§ 14.6 优化模型及其解法	233
§ 14.7 结语	238
第十五章 结构的广义可靠度	239
§ 15.1 可靠度在工程设计中的重要性	239
§ 15.2 广义可靠度的概念	240
§ 15.3 构件的随机可靠度	242
§ 15.4 计算可靠指标的 JCSS 法	248
§ 15.5 结构的随机可靠度	250
§ 15.6 复杂结构可靠度的近似计算方法	253
§ 15.7 结构的模糊随机可靠度	259
§ 15.8 抗震结构的模糊随机可靠度	264

附录 III 模糊集合的模系运算	405
§ III.1 模系运算的组成	405
§ III.2 模并运算	405
§ III.3 模交运算	407
§ III.4 三种对偶的并、交运算	408
§ III.5 模糊并运算和随机并运算的对比	409
§ III.6 模糊交运算和随机交运算的对比	410
§ III.7 并、交算子的选择	411
参考文献	413

§ 19.4	空气动力减振	342
§ 19.5	隔振方法	346
§ 19.6	局部减振设施	349
第二十章	结构的维修策略	352
§ 20.1	问题的提出	352
§ 20.2	可靠性的几种度量	354
§ 20.3	结构动态可靠度与维修可靠度	356
§ 20.4	新建结构的可靠度	359
§ 20.5	不维修结构的动态可靠度	361
§ 20.6	结构的维修和拆除准则	362
§ 20.7	维修费与维修可靠度间的关系	364
§ 20.8	维修方案的优化	366

第七编 专家系统的建造

第二十一章	工程软设计专家系统的特点	368
§ 21.1	结构设计的专家系统	368
§ 21.2	专家系统概述	370
§ 21.3	工程软设计专家系统展望	377
第二十二章	专家系统建造工具 C-ADVISOR 及其应用 ...	379
§ 22.1	系统 C-ADVISOR 的特点	379
§ 22.2	知识获取	380
§ 22.3	问题求解	385
§ 22.4	解释系统	387
§ 22.5	抗震结构设计烈度决策的专家系统	390
附录 I	若干公式的推导	393
附录 II	简单系统可靠度的计算方法	398
§ II.1	可靠度的概念	398
§ II.2	串联系统	399
§ II.3	并联系统	400
§ II.4	复合的并串联系统	401
§ II.5	表决系统(J 中取 i)	402

附录 III 模糊集合的模系运算	405
§ III.1 模系运算的组成	405
§ III.2 模并运算	405
§ III.3 模交运算	407
§ III.4 三种对偶的并、交运算	408
§ III.5 模糊并运算和随机并运算的对比	409
§ III.6 模糊交运算和随机交运算的对比	410
§ III.7 并、交算子的选择	411
参考文献	413

CONTENTS

Preface

PART I INTRODUCTION

Chapter 1	Concept of Soft Design in Engineering	2
-----------	---	---

PART II MATHEMATICAL TREATMENTS OF UNCERTAINTY INFORMATION

Chapter 2	Uncertainty of Matters	12
Chapter 3	Basis of Theory of Probability	19
Chapter 4	Basis of Theory of Fuzzy Sets	46
Chapter 5	Methods and Applications of Fuzzy Comprehensive Evaluation	70
Chapter 6	Mathematical Treatment of Unascertained Information	103

PART III GLOBAL OPTIMIZATION OF ENGINEERING SYSTEMS

Chapter 7	Global Decisions for An Engineering Project...	114
Chapter 8	Decision for Structural Optimal Reliability...	130
Chapter 9	Relation Between Construction Cost and Reliability of Engineering System	142
Chapter 10	Reliability of Engineering System with Dependent Failures	153
Chapter 11	Global Optimization of Engineering Systems	161

PART IV THEORY OF STRUCTURAL SOFT DESIGN

Chapter 12	Structural Optimal Design and Uncertainty Factors	183
Chapter 13	Fuzzy Optimal Design of Structures	197
Chapter 14	Satisfactory Solution of General Fuzzy Random Programming	224
Chapter 15	Generalized Reliability of Structures	239

PART V PRACTICAL METHODS OF STRUCTURAL SOFT DESIGN

Chapter 16	Assessment of Design Loads for Structures ...	274
Chapter 17	Decision of the Optimal Design Load Level for Engineering Structures	293
Chapter 18	Structural Soft Design with Optimal Load Level	320

PART VI CONTROL AND MAINTENANCE OF STRUCTURES

Chapter 19	Control of the Behaviour of Structures	330
Chapter 20	Exploration of Maintenance Theory for Structures	352

PART VII BUILDING OF EXPERT SYSTEMS

Chapter 21	Character of Expert Systems for Engineering Soft Design	368
Chapter 22	Expert System's Building Tool C-ADVISOR System and Its Application	379