

工程概率设计

原理与应用

〔加拿大〕J. N. 希德尔 著

科学出版社

TB114
X 00

334420

工程概率设计

——原理与应用

〔加拿大〕J. N. 希德尔 著

陈立周 夏曼革 路 鹏 译
孙成完 李献人 叶小纲

陈立周 李献人 校

科学出版社

1989

内 容 简 介

本书是工程概率设计方面一本颇具特色的专著。作者在书中强调工程观点的概率含义,因此书中除介绍一些必备的概率论的基本概念外,主要介绍了许多在一般概率论著作中很少涉及到的问题,如概率密度函数的产生方法、概率分析方法、极值分布理论、组合失效模式和概率优化技术等。这些内容很适合于解决工程问题,书中针对这些内容列有大量的应用实例。全书共分13章和5个附录;其中附录A介绍了一个很有实用价值的概率设计软件包——PROBVAR。

本书适合于从事工程设计和研究的科技人员参考,亦可作为高等工科院校教师、研究生和高年级学生的教学用书。

J. N. Siddall

PROBABILISTIC ENGINEERING DESIGN

— *Principles and Applications*

Marcel Dekker, Inc., 1983

工 程 概 率 设 计

——原理与应用

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1989年7月第一版 开本:787×1092 1/32

1989年7月第一次印刷 印张:17 3/8

印数:0001—2,200 字数:397,000

ISBN 7-03-001011-6/TH·7

定 价: 14.40 元

译 者 的 话

在工程设计问题中,不确定性因素是在所难免的,用传统的设计方法很难正确地处理。因而,如何模拟包含不确定性因素的实际问题,以及如何正确地作出设计分析决策,就成为工程概率设计的主要研究内容,也是目前工程设计理论与方法的主要发展方向之一。

概率论和数理统计学的方法虽已为研究工程设计中的不确定性因素问题提供了必要的数学依据,然而在发展工程概率设计的理论与方法时,应该根据实际情况和现象来建立概率模型,并采用合理的处理方法。作者在本书中比较强调工程观点的概率含义,而不主张完全搬用经典概率论和统计学中的方法。基于这一思想,作者在本书中介绍了一些在一般概率论和统计学教程中很少涉及的内容,如概率密度函数的产生方法(其中尤其是效果较好的最大熵法)、概率分析方法、极值分布理论、组合失效模式、概率最优化途径等一些适合于解决工程问题的概念、理论和方法。实际上,有的内容也是作者新近研究所取得的一些成果。因此,我们觉得,本书的内容新颖,叙述深入浅出,着重于工程设计实践,是一般概率设计文献中颇具特色的一本著作。我们希望,本书的翻译出版有助于提高广大工程设计人员对概率设计的认识与兴趣。同时我们也相信,它对于推动我国工程设计理论与方法的发展将会有所裨益。

本书作者 J. N. 希德尔为加拿大麦克马斯特 (McMaster) 大学机械工程系教授,是国际知名的工程设计理论专家,他所

著的“Optimal Engineering Design: Principles and Application”和本书是近年来国际上具有较大影响的两本著作。

参加本书翻译的有：陈立周(前言、第1和13章、附录)，叶小钢(第2章)，夏曼苹(第3、4和5章)，李献人(第6章)，路鹏(第7、8和9章)，孙成宪(第10、11和12章)。全书由陈立周和李献人总校与统稿。在译校中对原书中的一些错误作了订正。限于我们的理论与知识水平，对原文有可能理解不深，译文中难免还会有不少错误和不当之处，恳请读者指正。

• H •

前 言

本书的目的是为工程设计人员在设计中应用概率概念提供一些必备的知识。当然,工程设计人员在他们的设计工作中一直在应用概率的概念。风险判断就是设计过程中的最重要的内容之一。然而,直到不久前,这还几乎是完全根据直觉来判断的,并把风险用一个简单的安全系数来刻画。在工程中的某些领域,诸如质量管理、可靠性、研究性试验的安排及其结果分析等方面,经常应用到统计学的方法。但在工程师的主要工作部门——设计领域中,概率理论的应用还非常之少。

数字计算机使在设计中应用正规的概率方法成为可能;这将提高设计人员的风险判断能力,并能以一种更有意义的方式来表示出他们所作的风险决策。通过这种表示方式,将使更广泛的设计人员分享风险决策的经验。这样,我们将来就不仅可以有各种不同装置、部件的标准概率函数手册,而且设计部门还会总结出本单位所制造零件、组件的概率函数一览表,这些都可以作为设计人员所用数据的来源。

在编写工程概率设计这样的一本著作时,较为遗憾的事是我不得不采用工程观点的概率含义,尽管对于这一观点很可能会有争议。虽然许多工程理论知识取之于科学,但有时必须以与科学家不相同的方式来理解这些材料。概率概念可能是科学界与工程界之间许多不同概念中的最重要的一个。我认为,在工程设计中,必须把概率十分明确地定义为严格主观的概念,它排除置信度的概念以及甚至于贝叶斯统计学。尽管贝叶斯统计学家也是将概率定义为主观的,但即使对于他

们,也需要说明工程问题的性质和理论问题的性质是不一样的。这个问题将在第 3.2、3.6 节和附录 C 中作进一步的讨论。

但是,需要即刻强调指出的是,我并不是说在其他的领域中不能使用另一种概念的概率。Kendall 和 Stuart 说得好:“但是就我们看来,每个人都必须为他自己选择一种‘概率的定义’,而一个人的心理基础、经历和研究领域这一切决定了他所偏爱的公理系统。对于概率理论的基础作过多的争论是统计学不成熟的标志”。

据我所知,只修过经典统计学的传统课程的学生对于概率概念缺乏深入的了解,而概率概念对于在设计中的应用是非常重要的,所以对于本书的读者,如能先修一门概率论和统计学的课程对阅读本书会有所帮助。第 2 章到第 5 章介绍了足够的基础理论,目的是使读者在使用本书时可以不参考其他的基础教程,当然,阅读其他书籍总是会有帮助的。不管怎么说,读者最好是能够复习这几章的内容,以加深从工程意义方面对概率理论的理解。

在本书中编入了一些计算机程序,这为在设计中应用概率方法提供了必要的工程软件。

概率设计与设计中的优化技术是密切相关的,它们都属于设计中分析决策的内容。事实上,概率优化的专题就是两者内容的交叉,并且本书的第 10 章和与本书配套的另一本著作“Optimal Engineering Design: Principles and Applications”(工程优化设计——原理和应用)中第 3 章的内容是完全相同的。此外,第 1 章介绍了与概率设计有关的一般设计理论的内容,其中大部分亦与上述著作中的概率部分的材料是一致的。

J. N. 希德尔

目 录

译者的话

前言

第 1 章 绪言	1
1.1 设计中的分析决策	1
1.2 决策的类型	2
1.3 价值的作用	4
1.4 概率设计的实际问题	5
第 2 章 概率的概念与定理	6
2.1 概率的基本概念	6
2.2 事件和总体的概念	15
2.3 概率定理	21
2.4 概率定理的推广	27
2.5 贝叶斯定理	38
习题	41
第 3 章 概率分布	44
3.1 随机变量的概念	44
3.2 概率函数	46
3.3 理论离散分布	53
3.4 理论连续分布	61
3.5 多维随机变量及其分布	70
3.6 关于密度函数的贝叶斯定理	75
第 4 章 分布的矩	80
4.1 矩的定义	80
4.2 矩的计算	81

4.3	期望值的代数学	83
4.4	原点矩对中心矩的变换	83
第 5 章	概率密度函数的产生	85
5.1	引言	85
5.2	以数值定义的分佈	86
5.3	用参数估计拟合解析分佈	88
5.4	用秩拟合解析分佈	91
5.5	最大熵法	97
5.6	主观分佈	133
5.7	拟合良好性检验方法	139
5.8	方法的选用	141
	习题	143
第 6 章	概率分析	151
6.1	引言	151
6.2	蒙特卡洛模拟	157
6.3	变量变换法	182
6.4	矩关系	206
6.5	积分变换法	218
6.6	自变量的网格法	221
6.7	各种方法的比较	224
6.8	概率分析的不确定性	226
	习题	226
第 7 章	序列事件	240
7.1	引言	240
7.2	马尔科夫链	240
7.3	蒙特卡洛模拟	241
7.4	随机时变函数	251
	习题	257
第 8 章	顺序统计量与极值	259
8.1	引言	259

8.2	顺序统计量	259
8.3	极值分布	268
8.4	边界的选择与界外值的判断	284
8.5	超值事件的分布	289
	习题	291
第 9 章	失效模式概率的预测	296
9.1	引言	296
9.2	简单失效模式的概率	302
9.3	组合失效模式的概率	307
9.4	失效模式的串联组合	312
9.5	失效模式的并联组合	314
9.6	复杂系统	317
9.7	失效模式的确定	329
	习题	330
第 10 章	设计选择问题	339
10.1	确定型设计选择问题	339
10.2	概率型设计选择问题	343
10.3	讨论	350
	习题	352
第 11 章	可靠性理论	354
11.1	引言	354
11.2	危度函数	355
11.3	用于可靠性的概率分布	359
11.4	可靠性试验	363
11.5	可靠性纲目和数据库	365
11.6	可维护性和可用性	369
	习题	370
第 12 章	结构可靠性	372
12.1	引言	372
12.2	单构件	373
12.3	静定离散结构	375

12.4	静不定离散结构	379
习题		379
第 13 章	概率最优化	383
13.1	引言	383
13.2	实施方法	385
13.3	可靠度最优分配	387
13.4	公差最优分配	388
习题		394
附录 A	PROBVAR——概率设计软件包	397
A.1	软件的分类和说明	397
A.2	引言	399
A.3	解析密度函数	400
A.4	密度函数的产生	403
A.5	其他函数	439
A.6	其他子程序	439
A.7	矩的计算	443
A.8	顺序统计量和极值分布	449
A.9	绘制密度函数曲线和直方图	452
A.10	概率分析	465
A.11	概率函数的运算	500
A.12	概率定律	508
A.13	样本分析	512
A.14	按程序名字母顺序的索引	512
A.15	与机器有关的绘图子程序	514
附录 B	组合理论	519
附录 C	置信度	521
附录 D	最大熵分布定义域的变换	528
附录 E	最大熵解是全域最优解的证明	530
汉英名词对照		533
参考文献		539

第1章 绪 言

- 概率设计是属于一般设计理论的内容,它是分析决策的一个方面。

1.1 设计中的分析决策

我们先介绍与工程设计新理论研究有关内容的概貌。任何这样的一种理论都必须说明它在设计实践中的某种意义,或者为一种改进的设计方法提出它的设想。

与设计实践有关的任何理论,都应该包括下列几部分内容:

1. 分类学: 比如对像齿轮、轴承和泵这类标准零部件的划分,和对设备、系统的分类。
2. 设计过程学: 对整个设计过程的步骤或环节的划分。
3. 创造性: 对总体结构设计的说明。
4. 决策学: 对最佳总体结构和适合的技术要求的选择或决策的过程。

本书论述第4部分内容,即决策学。但是,我们不介绍决策学中优化技术的大部分内容,因为这部分内容在与本书配套的另一著作《工程优化设计——原理与应用》中已作了讨论。在这里,重要的是要对工程设计理论和工程建模理论加以区别,后者通常是指对零件、设备和系统性能的预测,并且要利用多门工程学科的知识,如力学、热力学和电学等。

在过去,为了得到最佳设计,几乎都是借用直觉的方法来

作出设计决策的。当然,使多数的这种决策条理化,并使它建立在定量的价值系统和分析技术的基础上,应该说是有可能的。

在讨论设计中的决策过程之前,考虑一下如图 1.1 所示的设计变量的层次结构是会有所帮助的。最低层的是独立设计变量,即是设计人员在最低层次的决策中所直接处理的那些参量,如轴的直径多大? 钢材的屈服强度限多少? 润滑油的粘度多大? 轴承表面光洁度多高? 通过作出这些决策,设计师希望能够获得一定值的设计特性,如轴的抗扭能力,发动机的功率或飞机的重量等。在第 1.3 节中我们将会看到,根据这些特性值又可以得到一些价值,而且其关系通常可以用曲线定量地表示出来。再把这些价值加起来可得一个组合指标,这就为整个设计提供了一个决策准则或目标函数。这种准则可以用于各种不同类型的决策,这一点我们在后面还将看到。

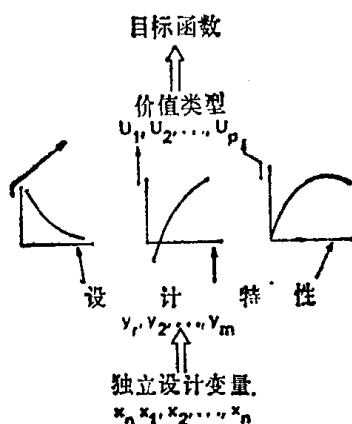


图 1.1 变量的层次结构

1.2 决策的类型

利用决策来挑选最佳设计有许多种方法。对这些方法进行

行分类是很重要的。

1. 设计选择问题：通过对两个或两个以上“冻结”的设计的比较来选取最佳者。当全部独立设计变量的数值都已经确定时，决策问题就在于确定每个设计的总价值并选取其中的价值最大者。在决策时考虑概率性质会使对问题的处理变得更为复杂些。
2. 设计最优化问题：设计师已经完成了总体结构的创造性设计，但尚未确定它的各独立设计变量的数值，为了得到最佳的具体结构，需要将问题按一般方法作出如下的表述，即通过独立变量来建立总价值并定义出一个最优化准则或目标函数

$$U(x_1, x_2, \dots, x_n) = \text{最大值} \quad (1.2.1)$$

同时，由全部可能的失效模式来定义可行性，从而可导出等式和不等式约束

$$\phi_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad i = 1, m \quad (1.2.2)$$

$$\phi_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \quad j = 1, p \quad (1.2.3)$$

利用运筹学中的数值计算方法来调整独立设计变量使这些表达式得到满足。在与本书配套的《工程优化设计——原理和应用》一书中，主要介绍与这个问题有关的内容，而在本书的第13章中将讨论概率方面的最优化问题。

3. 技术要求问题：在前面所提到的约束函数中，许多是根据技术要求建立的。设计都是针对子系统进行的，所设计的装置只是系统中的一个部分，而技术要求又可以将其与系统中的其他部分联系起来。技术要求的改变会使系统中相邻两个部分的最优点发生变化，因而应该选择对整个系统来讲都是最好的技术要求。
4. 制造工艺性问题：许多决策，特别是在具体设计阶段，必须从

制造工艺的角度来选取最佳的结构，这就需要具备丰富的材料科学和加工过程方面的知识，而且主要是根据成本准则来作出决策。

5. 风险水平问题：选择设备正常运转的风险水平是一种设计决策。这种决策是主观的。风险水平决策的问题是本书所讨论的主题。

1.3 价值的作用

当我们谈到最优设计或从可能方案中产生最佳设计的时候，实际上都是认为在作出最佳选择时存在着某种价值准则。人们最常用的准则是设计特性，即图 1.1 的层次结构中的第 2 层。因此，我们总是力图选择一种设计以使其成本最低、或性能最好、或重量最轻、或误差最小等等。根据这些准则进行优化设计是有实际意义的。然而，这些准则有两个严重的缺陷。其一是不允许采用多项准则，例如设计师就不可能希望成本最低的同时又使其性能最好和重量最轻。这是由于这些特性的量纲不同而不能把它们直接综合在一个准则的表达式中。第二是当将设计特性作为准则时，设计师所考虑的准则并不是用户所希望实现的实际的和基本的准则。人们的价值观是多方面的，也很不相同。正是这些众多的价值观，使得人们作出各种决策。设计师如果没有系统地考虑到这些现有的价值理论，就有可能在错误准则的基础上作决策。利用价值作为决策准则，还可以自动地解决前面所提到的多准则问题。

一种完整而合理的概率决策方法是不可能不包括价值理论的。在与本书配套的《工程优化设计》一书中亦包括了这样的理论。

1.4 概率设计的实际问题

本书所要讨论的是概率设计的实际应用，因此我们主要的不是介绍有关的数学内容，而是着重于这些数学知识的应用。本书不要求读者具备很高的概率论水平。概率论和统计学的初级教程已提供了足够的基础知识。第2至第5章的内容提供了阅读本书所必备基础知识的复习材料。深入与清晰地理解事件、总体、样本、主观概率、随机变量、概率密度函数和累积分布函数等这些基本概念是很重要的。但要掌握这些概念亦不都是很容易的。

最后，还必须着重指出，对于概率设计的实际应用，计算机的使用是绝对必不可少的。附录中的计算机程序的特点是使用方法简单，只要根据说明，用简短的主程序即可调用，对用户 FORTRAN 语言的知识已降到了最低要求。当然，在使用中会遇到一些困难，这是很正常的，因而要是用户对编程越熟悉和越有经验，那他或她对于处理这些困难就愈为容易。

第2章 概率的概念与定理

- 对概率性质的直观理解及其在工程中的作用。
- 概率论的某些基本内容,包括概率定律、独立性条件和贝叶斯定理。
- 用基本事件的概念对概率定律的推广。

2.1 概率的基本概念

工程设计人员一定会碰到不确定性问题。这是工程实际问题的主要特点,而且是一个普遍的问题。工程问题的不确定性有三种基本型式。

当我们测量某物或者根据所测的值来预测因变量的值时,都存在不确定性。由于工程设计人员一般都认为这种类型的不确定性全然不存在,所以总是试图将这类问题按确定型处理,并按保守的设计来补偿不确定因素的影响。必须注意到,这种处理不确定性问题的方法是相当不完善的,因此我们必须学会应用概率论的概念,以便当我们评定对问题的影响时用一种更科学的合理的方法。让我们来考察一个片管式热传导的例子。片和管子材料的热传导系数通常可以从文献中查得,而且一般没有指明是不确定的,即使我们自己去测量,也不见得会认为存在不确定性,因而一般很自然会认为,多次测量的结果是非常吻合的。对于工程测量来讲,这是很有代表性的。因为仪器刻度的分辨率是和它内在的变化相对应的,所以我们会得到一种印象,就是我们所作的测量是精确

• 6 •