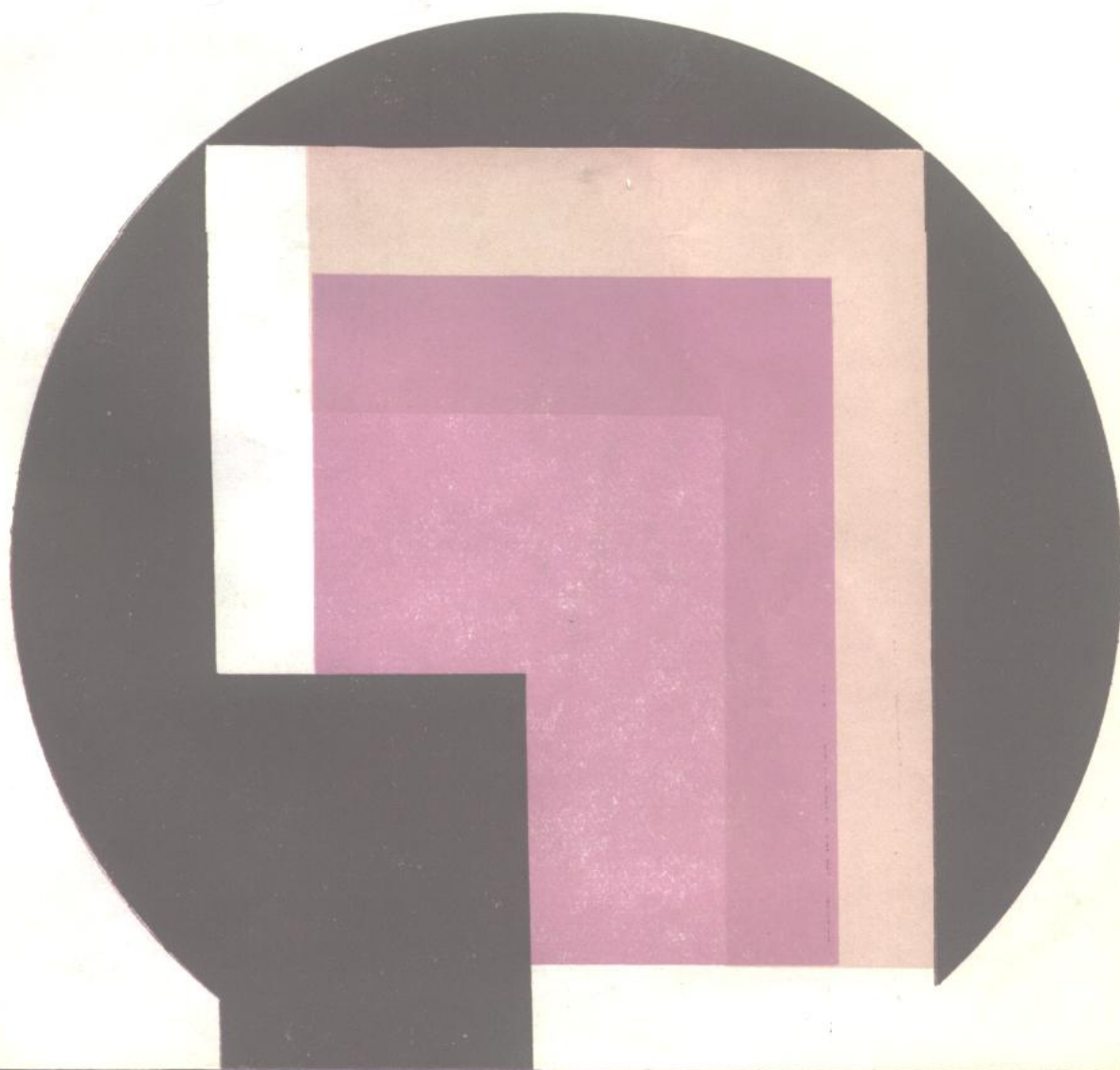


PROBABILISTIC MECHANICAL DESIGN

机械概率设计

〔美〕 E.B.豪根 ● 机械工业出版社



机 械 概 率 设 计

〔美〕 E.B. 豪 根

汪 一 麟 余 康 临

徐 祺 祥 徐 云 珠

译

汪 一 麟 校



机 械 工 业 出 版 社

本书是一部系统论述概率法设计理论和方法的专著，书中举有许多引用概率统计概念进行机械工程设计的实例。全书共十二章：绪论、基础数学、载荷随机变量、尺寸随机变量、应力随机变量、变形随机变量、几何应力集中、材料性能随机变量、设计和分析、机械零件强度、机械零件最优化、可靠度置信区间。本书可供从事机械工程设计的技术人员阅读，也可供高等工科院校机械工程专业教师、研究生和高年级学生参考。

Probabilistic Mechanical Design

Edward B. Haugen

John Wiley & Sons, 1980

* * *

机械概率设计

〔美〕 E.B. 豪根 著

汪一麟 余康临 译
徐祺祥 徐云珠

汪一麟 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $25 \frac{1}{4}$ · 字数 607 千字

1985年9月北京第一版·1985年9月北京第一次印刷

印数 0,001—9,800 · 定价 6.00 元

*

统一书号：15033·5807

译 序

将概率论和统计学应用于工程设计，不仅能解决过去用传统设计方法所不能处理的一些问题，而且能有效地提高产品质量和降低产品成本。因此，先进工业国家在工程设计中正在以概率设计方法逐步取代传统设计方法。

为了向国内从事工程设计特别是机械设计的工程技术人员以及高等工科院校机械工程专业的教师、研究生和高年级学生介绍如何在设计中引用概率统计概念，我们翻译了美国亚利桑那大学航空和机械工程系副教授豪根所著的《机械概率设计》一书。亚利桑那大学是美国唯一可以授予可靠性工程硕士学位和培养主修可靠性工程的博士的大学，而作者豪根是美国第一批研究和发展概率法设计理论的学者之一。早在六十年代初期，作者就建立了“正态函数代数”，对修正和发展传统设计理论作出了贡献。我们相信，这本书的翻译出版对推动我国现代机械工程设计理论和方法的发展将有所助益。

本书的译校分工如下：汪一麟译序、第六、第十一章和附录，余康临译第一和第十章，徐祺祥译第二、第三、第四、第五和第十二章，徐云珠译第七、第八和第九章，全书译稿最后由汪一麟总校和统稿。限于我们的理论知识和业务水平，译文中定有错误和不当之处，恳请广大读者批评指正。

作者为中译本写的序

欣闻拙著《机械概率设计》已译成中文，这是我的学术著作第二次译成别国文字。拙著《概率设计方法》已于1972年译成日文。作者希望《机械概率设计》这本书不仅能对正在接受和从事高等工程教育的学生和教师起指导作用，而且能作为中美两国文化交流的许多象征之一。

概率设计现正被应用于工程的许多领域，因此工业产品的质量无疑将获得提高。作者希望中美两国的学者和工程技术人员未来在这方面进行更密切的合作。

作者特别感谢汪一麟副教授在把这本书译成中文过程中所起的作用并对所有帮助这本书出版的人士表示谢意。

E. B. 豪根
1983年4月

原 序 (摘译)

在各门科学技术的发展过程中, 初始解有时好象是一般问题的特例。进行机械设计与机械分析时, 情况确是这样。

虽然从二十世纪初期 Heisenberg 发表了不定性原理后, 人们已认识到整个科学 (包括技术在内) 在理论上归根结底是以实验概率的概念为基础的。但是直到最近, 人们还没有充分理解由于工程问题具有概率性而出现的许多现象, 而且某些必要的基础科学技术还没有发展到足以引用概率和统计概念的设计理论和方法提供基础。

从以概率为基础的设计理论着手, 消除了设计变量的各种变率后, 剩下的是一种特例, 这相当于一种以确定性假设为基础的理论。这种特例的主要特点是, 传统的确定性设计理论已发展成这种特例。在过去几个世纪内, 已根据这种假定为确定性的特例建立了庞大的方法学和基础文献。

虽然在大多数工程问题中已确定了各种变量, 并且已正确地描述了其函数关系, 但是直到最近, 人们还没有完全了解许多独立变量的特性。此外, 为了以数量表示随机变量的函数, 只是到最近才用概率数学来辅助设计的综合和分析。

本书的任务是向大学生和在职工程技术人员详细地介绍理论和方法学, 以便使他们能在设计中加以应用。书中举了许多例题说明可靠性程度, 这样可避免作出过于保守或不够安全的设计。书中引用了变率信息, 并利用有意义的信息为管理决策提供基础。读者将会发现, 概率设计能扩充和补充传统理论。

《机械概率设计》既是一本教科书, 又是一本供工程技术人员用的参考书。作为一本教科书, 可作为机械设计的第二门课程。根据作者的经验, 可向高年级大学生讲授这本教材。对于一学期的设计课程, 可选用第二、三、四、五、八、九章的内容。

虽然本书的讨论中心是机械零件、机械系统以及结构构件和结构系统的设计, 但是所讨论的概念也适用于机械工程的其它专业 (如动力装置等) 和其它的工程学科 (如核能工程、电机工程、矿业工程等)。在其它领域工作的读者, 也可依靠各自的才智应用概率方法以适应各自的需要。

本书的内容一部分取自作者在美国亚利桑那州立大学的讲课笔记, 一部分由美军战备司令部 Rodman 工程实验室提供。

E. B. 豪根

1980年8月

符 号 说 明

由于本书将概率论和统计学与机械工程结合起来,因此在书中的符号说明上提出了一个问题。本书尽可能保留各种符号的惯用意义,然而往往是一个符号在概率论和统计学中有一种意义,而在工程语言中又有另一种意义。下面想向读者提供一种易于理解的符号说明方法。

书中的 μ 和 σ 分别表示工程变量的总体均值和标准差,而用下标表示特定的随机变量,即 μ_E 和 σ_E 各为弹性模量的平均值和标准差; μ_s 和 σ_s 各为强度的平均值和标准差。而弹性模量和强度的样本均值和标准差则用 $\bar{E}$ 和 ζ_E 以及 $\bar{S}$ 和 ζ_s 表示。

按照工程习惯,大写字母 S 表示强度,下标表示具体的种类。例如, S_u 表示极限强度, S_y 表示屈服强度, S_e 表示持久强度。由于工程变量的统计量是根据样本估算的,因此极限强度用 $(\bar{S}_u, \zeta_{s_u})$ 表示,屈服强度用 $(\bar{S}_y, \zeta_{s_y})$ 表示,等等。

作用应力用小写字母 s 表示,而样本统计量用 $(\bar{s}, \zeta_s)$ 表示。样本标准差用希腊字母 ζ 表示,其下标的小写字母 s 则表示该标准差是适合于应力的。

在下表中,随机变量用成对的样本均值和样本标准差来表示。常数则用单一符号表示。

a	实值常数	$(\bar{G}, \zeta_G)$	切变弹性模量
$(\bar{a}, \zeta_a)$	半裂纹长度	(h, ζ_h)	高度
$(\bar{a}_{cr}, \zeta_{acr})$	临界裂纹长度	$(\overline{HP}, \zeta_{HP})$	马力
$(\bar{A}, \zeta_A)$	面积	i	指数
b	实值常数	$(\bar{I}, \zeta_I)$	惯性矩
$(\bar{B}, \zeta_B)$	薄板或板的厚度	$(\overline{ID}, \zeta_{ID})$	内径
c	常数或阻尼系数	$(\bar{J}, \zeta_J)$	极惯性矩
$(\bar{c}, \zeta_c)$	离中性轴的距离	k	数值常数
$(\bar{c}_c, \zeta_{c_c})$	临界阻尼系数	$(\bar{k}, \zeta_k)$	弹簧常数
C	轴承径向载荷	$(\bar{K}, \zeta_K)$	应力强度因子
C_x 和 C_y	分别为 X 轴和 Y 轴的变差系数	$(\bar{K}_a, \zeta_{K_a})$	表面系数
C_D 和 C_L	分别为阻力系数和升力系数	$(\bar{K}_b, \zeta_{K_b})$	尺寸系数
$(\bar{d}, \zeta_d)$	直径	$(\bar{K}_c, \zeta_{K_c})$	平面应力断裂韧度
$(\bar{D}, \zeta_D)$	直径	$(\bar{K}_{Ic}, \zeta_{K_{Ic}})$	平面应变断裂韧度
$(\bar{e}, \zeta_e)$	偏心距	K_a	单侧公差系数
$(\bar{E}, \zeta_E)$	弹性模量	$(\bar{K}_f, \zeta_{K_f})$	疲劳应力集中系数
$E(x)$	$x = \nu_x$ 的期望值	(K_I, ζ_{K_I})	几何应力集中系数
$f(x)$	X 的概率密度函数	ΔK_{Ic}	界限断裂韧度
$F(x)$	累积分布函数	(l, ζ_l)	长度, $\pm \Delta l$ ——公差范围
$(\bar{F}, \zeta_F)$	力或载荷	$(\bar{L}, \zeta_L)$	载荷
g	万有引力常数	$L(t)$	随机过程

$(\bar{M}, \zeta_M)$	力矩	$(\bar{S}_e, \zeta_{S_e})$	持久极限
N	齿轮齿数	$(\bar{S}_f, \zeta_{S_f})$	疲劳极限
n	样本量或破坏循环次数	S_R	强度向径
$(\overline{OD}, \zeta_{OD})$	外径	$(\bar{S}_{se}, \zeta_{S_{se}})$	抗剪持久极限或弹性极限
p	概率或节圆直径	$(\bar{S}_{sy}, \zeta_{S_{sy}})$	抗剪屈服强度
$(\bar{P}, \zeta_P)$	载荷或压强	$(\bar{t}, \zeta_t)$	厚度或时间
P_f	破坏概率($P_f = 1 - R$)	$(\bar{T}, \zeta_T)$	扭矩
P_c	径节	$(\bar{U}, \zeta_U)$	应变能
$(\bar{P}_{cr}, \zeta_{P_{cr}})$	临界载荷	$(\bar{v}, \zeta_v)$	速度或剪力
Q	缺口敏感系数	$V(x)$	x 的方差
$(\bar{r}, \zeta_r)$	半径、范围、样本相关系数	$(\bar{w}, \zeta_w)$	宽度
$(\bar{r}_c, \zeta_{r_c})$	曲率半径	$(\bar{w}_t, \zeta_{w_t})$	齿轮所传递的载荷
$(\bar{r}_g, \zeta_{r_g})$	回转半径	X	随机变量
R	可靠度	x	X 的实值
$(\bar{R}, \zeta_{R_1})$ 和		$\bar{x}$	X 的样本均值
$(\bar{R}_2, \zeta_{R_2})$	支点反力	ΔX	X 的公差
RA	截面收缩	$(\bar{y}, \zeta_y)$	挠度或变形
$(\bar{s}, \zeta_s)$	作用应力(静态或动态)	α	裂纹形状系数或容许缺陷率
$(\bar{s}_n, \zeta_{s_n})$	正应力	$(\bar{\delta}, \zeta_{\delta})$	应变, 总伸长
$(\bar{s}_1, \zeta_{s_1})$ 和		$(\bar{e}, \zeta_e)$	单位应变或误差
$(\bar{s}_2, \zeta_{s_2})$	主应力	v	置信系数
$(\bar{s}_{eq}, \zeta_{s_{eq}})$	等效应力(静态或动态)	$(\bar{\gamma}, \zeta_{\gamma})$	剪应变
$(\bar{s}_c, \zeta_{s_c})$	表面应力或接触应力	$(\bar{\nu}, \zeta_{\nu})$	泊松比
$(\bar{s}_{cr}, \zeta_{s_{cr}})$	临界应力	μ_x	X 的平均值
s_p	应力向径	σ_x	X 的标准差
ζ_x	x 的样本标准差	$(\bar{\tau}, \zeta_{\tau})$	剪应力或扭应力
$(\bar{S}, \zeta_S)$	许用应力或许用强度	$(\bar{\omega}, \zeta_{\omega})$	频率
$(\bar{S}_u, \zeta_{S_u})$	抗拉极限强度	$(\bar{\omega}_n, \zeta_{\omega_n})$	固有频率
$(\bar{S}_y, \zeta_{S_y})$	抗拉屈服强度	ρ	相关系数或密度
$(\bar{S}_{su}, \zeta_{S_{su}})$	抗剪强度	φ	相角或起始状态

工 程 单 位

美国在机械工程方面即将用国际制(SI)单位代替过去惯用的单位。然而,对于模数、尺寸、功率等,很可能继续兼用这两种单位制。

常用的换算系数

(美国惯用单位→国际制单位)

物 理 量	换 算	系 数
平面角	度(deg)→弧度(rad)	1.745×10^{-2}
长度	英寸(in)→米(m)	2.54×10^{-2}
	英尺(ft)→米(m)	3.048×10^{-1}
	英里(mi)→米(m)	1.609×10^3
面积	英寸 ² (in ²)→米 ² (m ²)	6.452×10^{-4}
	英尺 ² (ft ²)→米 ² (m ²)	9.290×10^{-2}
体积	英尺 ³ (ft ³)→米 ³ (m ³)	2.832×10^{-2}
	英寸 ³ (in ³)→米 ³ (m ³)	1.639×10^{-5}
	升(liter)→米 ³ (m ³)	1.000×10^{-3}
速度	英尺/分(ft/min)→米/秒(m/sec)	5.08×10^{-3}
	英尺/秒(ft/sec)→米/秒(m/sec)	3.048×10^{-1}
	公里/小时(km/hr)→米/秒(m/sec)	2.778×10^{-1}
速度	英里/小时(mi/hr)→米/秒(m/sec)	4.470×10^{-1}
	英里/小时(mi/hr)→公里/小时(km/hr)	1.609
质量	盎司(英制)(oz)→千克(kg)	2.832×10^{-2}
	磅(英制)(lb)→千克(kg)	4.536×10^{-1}
	斯〔勒格〕(slug)→千克(kg)	1.459 × 10
加速度	英尺/秒 ² (ft/sec ²)→米/秒 ² (m/sec ²)	3.048×10^{-1}
	标准重力加速度→米/秒 ² (m/sec ²)	9.807
力	千克力(kgf)→牛〔顿〕(N)	9.806
	磅力(lbf)→牛〔顿〕(N)	4.448
	磅达(poundal)→牛〔顿〕(N)	1.382×10^{-1}
弯矩	千克力米(kgf·m)→牛〔顿〕米(N·m)	9.806
	磅力米(lbf·m)→牛〔顿〕米(N·m)	1.429×10^{-1}
	磅力英尺(lbf·ft)→牛〔顿〕米(N·m)	1.356
压强, 应力	千克力/米 ² (kgf/m ²)→帕〔斯卡〕(Pa)	9.806
	磅达/英尺 ² (poundal/ft ²)→帕〔斯卡〕(Pa)	1.488
	磅力/英尺 ² (lbf/ft ²)→帕〔斯卡〕(Pa)	4.788×10
	磅力/英寸 ² (lbf/in ²)→帕〔斯卡〕(Pa)	6.892×10^3
能, 功	英热量单位(Btu)→焦〔耳〕(J)	1.055×10^3
	卡〔路里〕(caloric)→焦〔耳〕(J)	4.487
	英尺磅力(ft·lbf)→焦〔耳〕(J)	1.356
功率	马力(hp)→瓦〔特〕(W)	7.457×10^2

资料来源: ASME Orientation & Guide for Use SI Units.

目 录

符号说明

常用的换算系数

第一章 绪论 1

1.1 设计的定义 1

1.2 机械工程设计 1

1.3 设计的开展 6

1.4 设计理论 6

1.5 经典设计法与概率设计法 9

第二章 基础数学 11

2.1 概述 11

2.2 数的性质 11

2.3 概率考虑 12

2.4 期望值 $E(x)$ 和方差 $V(x)$ 13

2.5 期望代数 15

2.5.1 和数 $X + Y$ 的平均值和方差 17

2.5.2 差数 $X - Y$ 的平均值和方差 18

2.5.3 独立随机变量 X 与 Y 之积的统计量 18

2.5.4 商数 X/Y 的平均值和方差 20

2.6 正态分布代数 24

2.6.1 概述 24

2.6.2 和数 $Z = X + Y$ 的统计量 25

2.6.3 差数 $Z = X - Y$ 的统计量 26

2.6.4 乘积 $Z = XY$ 的统计量 28

2.6.5 随机变量及其倒数之积 30

2.6.6 商数 $Z = Y/X$ 的统计量 32

2.6.7 商的分布 33

2.6.8 二次式的统计量 35

2.6.9 变差系数 35

2.6.10 组合律 35

2.6.11 特性 36

2.6.12 闭包 36

2.6.13 收敛 36

2.6.14 作为模型的正态分布 36

2.7 任意函数的统计量 37

2.7.1 平均值 38

2.7.2 随机值函数的方差 38

2.8 对数正态随机变量的特性 42

2.8.1 概述 42

2.8.2 对数正态密度函数 42

2.8.3 参数的变换 43

2.8.4 统计量的解释 43

2.8.5 集中趋势的度量 44

2.9 蒙特卡罗模拟 45

2.9.1 蒙特卡罗概念 45

2.9.2 随机数的产生 45

2.9.3 样本量和变化范围 46

补充 46

第三章 载荷随机变量 48

3.1 概述 48

3.2 实验载荷测量 50

3.2.1 数据折算 50

3.2.2 拟合优度检验 53

3.2.3 图解估计量 54

3.3 抽样要求 54

3.3.1 中心极限定理 54

3.3.2 根据范围作分散估计 56

3.4 作为随机变量的力和力矩 57

3.4.1 避免过载 60

3.5 相关的工程变量 61

3.6 相关载荷和独立载荷 62

3.7 恒幅载荷和随机幅载荷 66

3.7.1 恒幅动载荷 (平均值为零) 66

3.7.2 窄带随机载荷 (平均值为零) 67

3.7.3 静载荷和动载荷的联合作用 67

3.7.4 动载荷实例 68

3.7.5 载荷分布形式 69

3.8 载荷修正参数 70

3.8.1 概述 70

3.8.2 力幅 70

3.8.3 递增率 71

3.8.4 频率 71

3.9 载荷模型的统一	71	5.19 刘易斯动应力模型	131
3.10 载荷的全分布	72	5.19.1 弯应力	131
3.11 载荷记录总体	72	5.19.2 修正的刘易斯模型	132
3.12 随机变量和随机过程	74	5.20 表面应力	134
3.13 平稳过程和遍历性过程	75	5.20.1 直齿圆柱齿轮的应力	134
第四章 用随机变量描述零件的几何尺寸	77	5.20.2 球轴承的应力	137
4.1 概述	77	第六章 变形随机变量	139
4.2 分布特性	78	6.1 概述	139
4.3 尺寸确定	79	6.2 梁的挠度	143
4.3.1 几何公差和容许界限	80	6.3 简支梁在承受集中载荷时的挠度	145
4.3.2 金属成品的公差	82	6.4 用载荷叠加法求挠度	146
4.4 线性尺寸组合	86	6.5 不定问题	147
4.4.1 和数与差数随机值的置信界限	95	6.6 受拉和受压时的应变能	149
4.5 非线性尺寸组合	95	6.7 应变能通式	152
4.6 用计算机计算公差(蒙特卡罗模拟)	95	6.8 卡氏定理	154
4.7 几何尺寸与强度的关系	97	6.9 柱的随机特性	157
第五章 应力随机变量	100	6.10 机械振动	163
5.1 概述	100	6.10.1 振动和阻尼	165
5.2 应力分析	101	6.10.2 稳态振动	166
5.3 应力随截面方位的变化	102	6.10.3 固有频率	166
5.3.1 应力的置信界限	104	第七章 几何应力集中	172
5.4 随机正应力之和	104	7.1 概述	172
5.5 双轴静拉伸或压缩	106	7.2 应力集中和静载荷	175
5.6 复合应力之和的不变性	108	7.3 理论 K_t 值的计算	176
5.7 作为随机现象的主应力	109	7.4 概率法	177
5.8 三轴应力	110	7.4.1 通过蒙特卡罗模拟估计 K_t 的统计量	177
5.9 扭应力	110	7.5 K_t 包络线的统计量	180
5.10 弯应力	113	第八章 用随机变量描述材料的性能	181
5.11 剪应力	114	8.1 概述	181
5.12 随机变量的叠加	116	8.2 定义	182
5.13 单位应变	117	8.3 拉伸试验	183
5.14 弹性性能	118	8.4 比例极限	184
5.14.1 弹性模量	118	8.5 屈服点	184
5.14.2 泊松比	120	8.6 抗拉屈服强度 S_y	184
5.15 应力-应变关系	120	8.7 抗拉极限强度	184
5.15.1 单轴应力	120	8.8 抗剪强度	188
5.15.2 双轴静应力	121	8.9 抗扭强度	188
5.16 随机疲劳应力	121	8.10 拉伸韧性	191
5.16.1 动应力模型	123	8.11 断裂韧性	192
5.17 多轴动应力	124	8.12 回能	195
5.18 用有限元估计应力的统计量	126	8.13 硬度	196

8.13.1 概述	196	10.7.2 轴承的选择	298
8.13.2 硬度测量方法	196	10.7.3 由窄带随机载荷(平均值为零) 引起的疲劳	299
8.13.3 硬度与机械性能的关系	197	10.7.4 按窄带随机载荷(平均值为零) 进行的设计	301
8.13.4 硬度的统计特性	197	10.8 波动应力(平均值非零)	303
8.14 疲劳	199	10.8.1 恒幅动应力	303
8.14.1 持久极限和疲劳强度	200	10.8.2 随机动应力(平均值非零)	308
8.14.2 波动应力下的疲劳强度	209	10.9 按多轴动载荷进行的设计	308
8.14.3 材料在承受窄带随机载荷时的 性能(平均值为零)	215	10.10 多元系统	309
8.14.4 材料在承受窄带随机载荷时的 性能(平均值非零)	216	10.10.1 销钉联接系统	309
8.15 强度——一个随机过程	222	10.11 概率断裂力学	313
8.15.1 设计中的随机过程	224	10.11.1 单调载荷	313
第九章 设计和分析	226	10.11.2 为避免产生扩展性裂纹而进行 的设计(承受单调载荷)	314
9.1 概述	226	10.11.3 为避免断裂而进行的设计(承 受动载荷)	318
9.2 传统设计方法	226	第十一章 机械零件最优化	322
9.3 概率设计方法	228	11.1 概述	322
9.3.1 通用可靠度模型	228	11.1.1 机械零件的最优设计	324
9.3.2 正态应力和正态强度	230	11.2 最优设计: R 为规定, 应力梯度为 零	326
9.3.3 按随机轴向静载荷进行设计	234	11.3 最优设计: R 为规定, 表面应力梯 度	327
9.3.4 按随机弯曲静载荷进行设计	238	11.4 最优设计: R 为规定, 截面应力梯 度	331
9.3.5 按非正态应力进行设计	244	11.5 防止失效形式的分析	336
9.3.6 其它的应力-强度组合(分布)	249	第十二章 可靠度置信区间	340
9.3.7 对破坏循环次数的考虑	250	12.1 概述	340
9.3.8 疲劳设计	252	12.1.1 标准差为已知的正态随机变量 的置信区间	340
9.3.9 对规定 R 的要求上限	259	12.1.2 标准差为未知的正态随机变量 的置信区间	340
9.3.10 齿轮和轴承	266	12.1.3 正态分布随机变量标准差的置 信区间	341
9.3.11 可靠度保证	269	12.2 随机变量之差的置信区间	342
补充	272	12.2.1 σ_s 和 σ_s 为已知时 $\mu_s - \mu_s$ 的置 信区间	342
第十章 机械零件的强度	274	12.2.2 标准差为未知但相等的两个正 态随机变量平均值之差的置信 区间	344
10.1 概述	274	12.2.3 置信度的一般情况	345
10.2 最大正应力理论	275		
10.3 最大剪应力理论	278		
10.4 变形能理论	280		
10.5 有效应力-强度模型	284		
10.5.1 有效强度模型	284		
10.5.2 有效应力模型	285		
10.6 强度和应力修正系数	286		
10.6.1 强度修正系数	286		
10.6.2 应力修正系数	286		
10.7 为避免疲劳破坏而进行的设计	292		
10.7.1 恒幅应力(平均值为零)	293		

12.3 可靠度的置信区间	347	附录 4 应力换算表	354
12.3.1 ξ_s 和 σ_s 为已知时可靠度的置 信区间	347	附录 5 截面元素的统计量	355
12.3.2 $\sigma_s = \sigma_s$ 但为未知时可靠度的置 信区间	348	附录 6 正态曲线下从 K_a 到 ∞ 的面积	358
12.3.3 一般情况下可靠度的置信区间	348	附录 7 t 分布的百分位点	359
附录 1 标准累积正态分布表	350	附录 8 累积 χ^2 分布	360
附录 2 正态分布的容差系数	351	附录 9 求理论应力集中系数用的关系式	361
附录 3 正态分布的单侧容许界限系数 k	353	附录 10 A 材料的静强度	370
		附录 10 B 材料的动强度	375
		参考文献	385

第一章 绪 论

1.1 设计的定义

“设计就是为了满足人类的某种需要而制定的一项计划”^[1]。Krick^[2]认为，设计是一个“作出决策的过程”。一开始，设计的要求可能是很明确的，但问题往往是多少有点含糊不清。目前，在进行机械设计时，有两种基本原理可供选择：（1）根据概率论进行设计，（2）根据确定性假设进行设计。

与分析问题相比较，设计问题很少有唯一的解。因此，为了达到主要的目的，要设法求得最优的设计解。然而，由于新知识的获得、理论的发展和主次次序的变化等原因，目前令人满意的解，也许以后就不能令人满意了。

在工程中，设计问题有一真正的目的，也就是说，采取一定的行动或产生一个具有真实性和实用性的事物以获得最终结果。不管用什么词来描述设计的作用，对于工程师来说，设计仍然是一个需要用工程方法的过程。

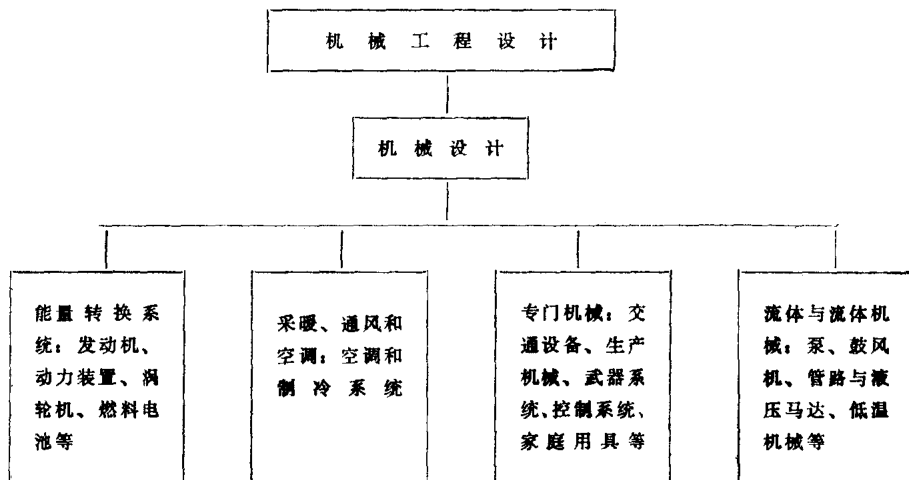


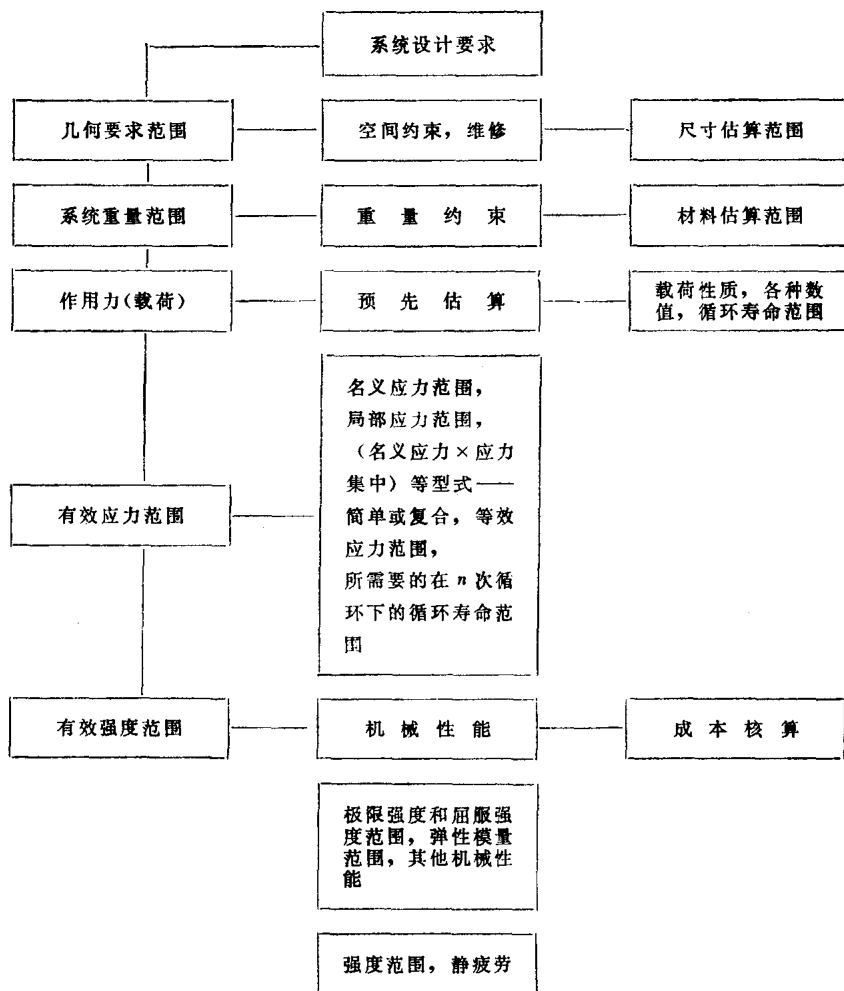
图1.1 机械设计^[1]

1.2 机械工程设计

机械工程设计涉及的范围很广，包括采暖和通风、流体机械、动力装置、武器系统、涡轮机、生产机械、内燃机和外燃机以及家庭用具。其领域是如此广泛，以致一个人很少参与其中一个以上部门的工作。

图 1.1 表示一种分类法。因为大多数机械工程师的工作多少涉及到设计，所以图中将机械设计置于中心。设计过程可能需要精确地确定材料的性能、制造方法、几何尺寸等等，或需要将一组零件装配成一个装置或系统，如图 1.2 所示。

设计中要用到数学、物理、语文、材料力学、动力学、制图学、制造工艺、流体力学、

图1.2 设计工作框图^[3]

传热学、概率论和统计学等知识。工程师要将几门学科的基本原理结合起来。他如果不懂得破坏理论、应力分析或材料的动态特性,就估计不出工作性能能满足要求的概率。

在现代社会中,人们越来越依赖于许多日益复杂的新型机械装置和系统所起的适当作用。然而在许多方面,工程方法学直到最近还进展缓慢,不能适应新的要求。所以,能满足以往(较简单)要求的工程理论和方法学,难以解决某些现代问题。

最近对所设计的机械产品提出了可靠性问题,因此要重新评价基本的设计原则。为此,工程师们在最近几十年来认真地开展了一系列研究活动,从而导致了:

1. 有限元分析法的建立(确定应力)
2. 疲劳研究(材料性能和破坏机理)
3. 断裂力学的建立(裂纹扩展和破坏)
4. 概率设计法的建立(使机械零件的预测工作性能与实际工作性能更加符合)
5. 最优化(提高效率和经济性)

重新评价设计过程就是详细研究各种基本的设计变量,例如载荷、材料性能和几何形状。

表 1.1~1.3 和图 1.3~1.8 表示常见的设计变量特性。

表 1.1 和图 1.3 举例说明典型的试件截面几何尺寸变化（由机械加工引起的），从而提供了一组试件的惯性矩在统计学上的变化。表 1.2 和图 1.4、1.5 举例说明一组 SAE（美国汽车工程师学会）4340 钢试件典型的洛氏硬度变化，也就是典型的抗拉强度和持久强度变化。表 1.3 和图 1.6 举例说明钛合金的机械性能变化。图 1.7 和 1.8 举例说明飞机和汽车设计中的加速度范围。

表 1.1 带槽弯曲试件上测试截面的直径

直径(in)	直径(in)	直径(in)	直径(in)
0.1799	0.1803	0.1805	0.1805
0.1808	0.1807	0.1816	0.1802
0.1804	0.1804	0.1808	0.1795
0.1803	0.1805	0.1800	0.1810
0.1805	0.1796	0.1808	0.1801
0.1807	0.1805	0.1806	0.1804
0.1805	0.1801	0.1802	0.1804
0.1804	0.1802	0.1805	0.1805
0.1806	0.1804		

注：名义半径 $r = 0.25\text{in}$ ；名义直径 $d = 0.180\text{in}$ ；试件数：34。

$$\bar{\mu}_x = 0.18042$$

$$\text{注：}\mu_x = \bar{x}$$

$$\hat{\sigma}_x = 0.00038043$$

$$\hat{\sigma}_x = \sigma_x$$

（这些试件用在计算应力水平为 60300psi 时进行的疲劳试验）^{〔4〕}

表 1.2 41 个 R. R. Moore 型试验机试件的洛氏硬度 HRC 值

对同一试件测得的洛氏 硬度 (HRC)	试件的平均洛氏硬度 (HRC)	对同一试件测得的洛氏 硬度(HRC)	试件的平均洛氏硬度 (HRC)
22, 22, 21, 22, 22	21.8	22, 22, 20, 22, 20	21.2
22, 22, 22, 22, 21	21.8	22, 22, 18, 22, 18	20.4
21, 22, 21, 21, 20	21.0	22, 21, 21, 22, 21	21.4
21, 22, 22, 21, 22	21.6	20, 20, 19, 20, 18	19.4
22, 21, 21, 20, 20	20.8	24, 22, 20, 21, 21	21.6
22, 22, 22, 21, 22	21.8	21, 20, 20, 20, 21	20.4
22, 22, 22, 22, 21	21.8	20, 19, 20, 20, 21	20.0
21, 22, 22, 20, 21	21.2	21, 19, 19, 21, 20	20.0
20, 22, 22, 22, 22	21.6	20, 21, 22, 20, 20	20.6
21, 18, 18, 21, 17	19.0	21, 20, 19, 23, 21	20.8
21, 21, 19, 21, 21	20.6	21, 21, 22, 22, 21	21.4
22, 21, 21, 22, 21	21.4	21, 22, 19, 20, 22	20.8
20, 19, 22, 21, 18	20.0	21, 21, 20, 20, 21	20.6
22, 22, 22, 22, 23	22.2	21, 21, 20, 21, 21	20.8
22, 21, 21, 20, 21	21.0	21, 20, 21, 19, 21	20.4
21, 19, 22, 22, 20	20.8	21, 20, 18, 22, 22	20.6
22, 21, 21, 20, 22	21.2	21, 21, 19, 20, 21	20.4
21, 21, 20, 22, 22	21.2	20, 21, 18, 20, 20	19.8
21, 20, 22, 21, 21	21.0	20, 20, 20, 21, 22	20.6
22, 20, 22, 22, 21	21.4	20, 20, 20, 20, 20	20.0
21, 21, 21, 21, 20	20.8		

表1.3 用Riehle型试验机测得的SAE4340冷拉与退火40钢丝试件的抗拉极限强度值⁽⁴⁾

抗拉极限强度 (psi)		抗拉极限强度 (psi)	
103779	102325	102325	100145
102906	105377	104651	103799
104796	104796	105087	103488
103197	106831	106395	102906
100872	105087	100872	101017
97383	103633	104360	104651
101162	107848	101453	103197
98110	99563	103779	105337
104651	105813	101162	101744
102906	108430	102470	106104
103633	106540	105232	100726
102616	101744	103924	101598
106831	103799		

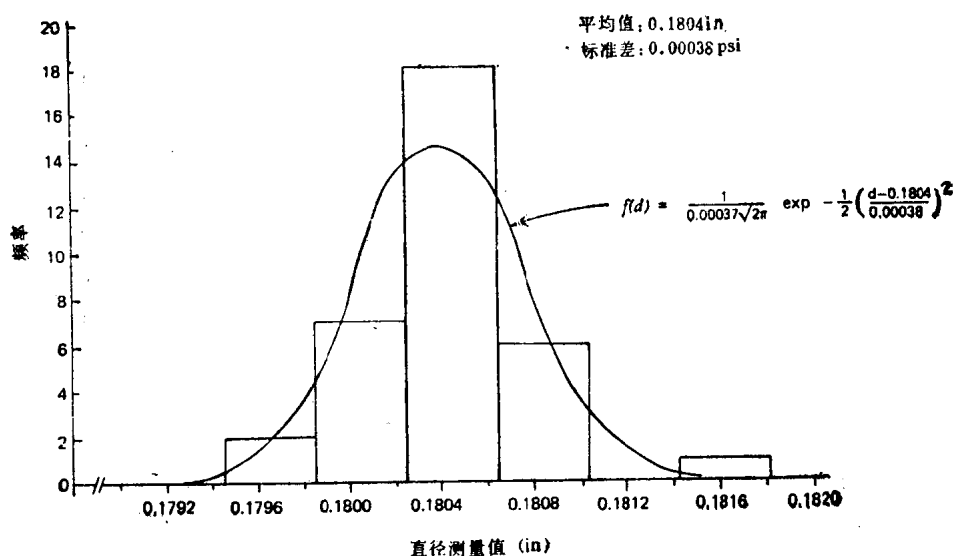
注：名义钢丝直径为 0.0937 ± 0.0005 in

图1.3 缩减直径测量值

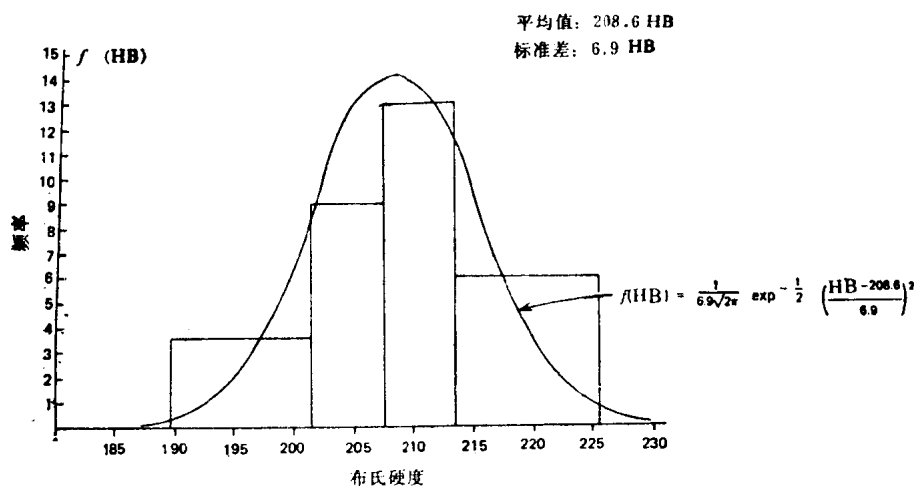


图1.4 布氏硬度的分布