

公路桥梁结构可靠度与
概率极限状态设计

Gonglu Qiaoliang Jiegou Kekaodu
Yu Gailu Jixian Zhuangtai Sheji

李扬海 鲍卫刚 郭修武 程翔云 等编著

人民交通出版社

内 容 简 介

为了及时反映公路桥梁可靠度的研究成果,普及概率极限状态设计理论和设计方法,帮助读者理解在编公路桥梁规范采用概率极限状态设计方法以及其中许多参数、系数的取值,特编著本书,以飨读者。全书共分七章:概述;概率统计基础;公路桥梁作用;公路桥梁结构构件抗力;工程结构可靠度;公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计;公路桥梁结构材料的质量要求及质量控制。

公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计
李扬海 鲍卫刚 郭修武 程翔云 等编著
插图设计: 版式设计: 刘晓方 责任校对: 杨杰
人民交通出版社出版发行
(100013 北京和平里东街 10 号)
各地新华书店经销
北京密云云浩印刷厂印刷
开本: 850× 1168 1/32 印张: 11.5 字数: 299 千
1997 年 5 月 第 1 版
1997 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷
印数: 0001- 3000 册 定价: 15.00 元
ISBN7-114-02628-5
U · 01862

目 录

前言.....	1
第一章 概述.....	1
第一节 可靠性理论在工程设计中的应用.....	1
第二节 工程结构可靠度.....	4
第三节 概率极限状态设计基本概念.....	6
一、极限状态和极限状态方程	6
二、承载能力极限状态和正常使用极限状态	7
三、设计基准期	8
第四节 概率极限状态设计应具备的基本条件.....	9
第二章 概率统计基础	11
第一节 随机变量的概率分布及其数字特征	11
一、离散型随机变量概率模型	11
二、连续型随机变量概率模型	12
三、随机变量的数字特征	13
第二节 结构可靠度分析常用的概率分布	16
一、二项分布	17
二、几何分布	17
三、泊松分布	18
四、均匀分布	19
五、正态分布	20
六、对数正态分布	21
七、指数分布	22
八、威布尔分布	22
九、伽马分布	23
十、极大值 I 型分布	24

第三节	随机向量及其概率分布	25
一、	随机向量基本概念	25
二、	随机向量的数字特征	27
三、	随机变量的变换和组合	28
四、	χ^2 分布、t 分布、F 分布	31
五、	误差传递公式	33
六、	μ 组合和 σ 组合	35
第四节	数理统计分析方法	38
一、	数据整理	38
二、	参数估计	42
三、	分布优度拟合检验	46
四、	回归分析法	53
第五节	随机过程及其最大值分布	57
一、	随机过程及其样本函数	57
二、	几类常用的随机过程	59
三、	随机过程的平均值和协方差函数	63
四、	随机过程统计分析方法	66
第三章	公路桥梁结构上的作用	74
第一节	公路桥梁结构上的作用	74
一、	作用与作用效应	74
二、	作用的分类	75
三、	作用的代表值	76
第二节	公路桥梁恒载	78
一、	数据采集与整理	78
二、	构件自重和桥面铺装的概率分布及其统计参数	79
三、	恒载的统计参数及其概率分布	84
四、	恒载标准值	87
第三节	公路桥梁车辆荷载	88
一、	数据采集与整理	88
二、	车辆荷载概率分布类型及其分布参数	91

三、车辆荷载效应概率分布类型及其统计参数	96
四、车辆荷载效应代表值	100
第四节 公路桥梁人群荷载.....	103
一、数据采集与整理	103
二、统计分析	104
三、人群荷载代表值	108
第五节 公路桥梁车辆冲击力.....	108
一、定义及其研究方法	108
二、随机样本的采集与整理	110
三、统计分析	110
四、公路桥梁车辆冲击系数谱	114
第六节 公路桥梁车辆制动力.....	118
一、概述	118
二、样本采集及数据处理	119
三、统计分析与结果	119
四、制动力标准值	120
第七节 公路桥梁风荷载.....	120
一、原始风速资料的收集与处理	120
二、年最大风速和风压的概率分布	122
三、公路桥梁风荷载	129
第八节 公路桥梁温度作用.....	130
一、资料收集	130
二、统计分析	131
三、气温标准值	137
第四章 公路桥梁结构构件抗力.....	138
第一节 基本概念.....	138
一、钢筋混凝土结构构件抗力统计分析的特点	138
二、结构构件抗力统计的间接方法	138
三、结构构件抗力的概率分布类型	139
第二节 结构构件抗力不定性因素的分析.....	140

一、构件材料性能的不定性	140
二、构件几何参数的不定性	142
三、构件计算模式的不定性	144
第三节 构件抗力统计参数及公式	148
一、各种构件抗力统计参数汇总	148
二、构件抗力统计参数公式	149
三、各类构件抗力统计参数分析表举例	166
四、抗力统计参数的对比分析	170
第五章 工程结构可靠度	173
第一节 工程结构可靠度的若干基本概念	173
一、可靠度与失效概率	173
二、可靠度与可靠指标	178
三、可靠指标与安全系数	182
四、可靠指标与分项系数	183
第二节 结构可靠度计算方法	187
一、一次二阶矩方法(中心点法)	187
二、改进一次二阶矩方法(验算点法)	196
三、结构可靠指标计算的一种新方法	218
第六章 公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计	224
第一节 公路桥梁结构概率极限状态设计表达式	224
一、设计状况	225
二、作用设计值和分项系数	225
三、概率极限状态设计表达式	228
第二节 结构承载能力极限状态下可靠指标的分析	230
一、结构可靠指标的计算	230
二、结构构件可靠指标的分析	241
三、结构目标可靠指标的确定	243
第三节 结构正常使用极限状态下可靠指标的分析	245
一、裂缝宽度和挠度的概率分布	245
二、正常使用极限状态可靠度分析	253

第四节	结构设计分项系数.....	259
一、	设计分项系数表达式.....	259
二、	结构设计分项系数的确定原则.....	261
三、	恒载与活载效应同号时结构的设计分项系数.....	261
四、	恒载与活载效应异号时结构的设计分项系数.....	278
第五节	公路桥梁结构重要性系数.....	279
第六节	公路桥梁作用效应组合.....	280
一、	作用效应组合规则.....	280
二、	恒载、车辆荷载和人群荷载的效应组合.....	286
三、	恒载、车辆荷载、人群荷载与其他作用的效应组合.....	296
第七节	公路桥梁结构概率极限状态设计.....	301
一、	直接按目标可靠指标进行设计.....	301
二、	按极限状态设计表达式进行设计.....	307
第七章	公路桥梁结构材料的质量要求及质量控制.....	308
第一节	公路桥梁结构(构件)材料质量方程.....	308
第二节	材料性能的设计质量要求.....	313
第三节	材料和制品的质理控制.....	317
结束语	319
参考文献	321
附录	323
附表 A	标准正态分布表.....	323
附表 B	标准正态分布的密度函数表.....	329
附表 C	正态分布的双侧分位数(μ)表.....	332
附表 D	卡爱方(χ^2)分布表.....	333
附表 E	学生氏(t)分布表.....	336
附表 F	t 分布的双侧分位数(t)表.....	340
附表 G	K- S 检验法临界值.....	342
附表 H	F 检验的临界值(F 表).....	344

前 言

本世纪 70 年代以来,在工程结构设计方面,各先进国家普遍推广以可靠性理论为基础的以分项系数形式表达的概率极限状态设计方法,许多国家和国际组织正在编制相应的工程结构设计标准规范,从而使工程结构的设计理论和设计方法进入了一个新的阶段,这也从另一角度表明该设计理论和设计方法的成熟和实用。

采用概率极限状态设计方法的显著优点是可以定量且统一地衡量各类工程结构的可靠程度。由于运用了概率统计理论对影响结构可靠度的各基本变量(包括各类作用和材料性能等)以及作用组合等方面进行全面的统计分析,克服了以往主要凭工程经验取值的缺点,改进了作用组合的原则和方法,使所确定的各有关设计用参数、系数更具科学性和合理性,也可使各类工程结构的设计、试验、施工和验收等标准规范在可靠性理论的共同基础上协调统一起来,克服长期以来各规范间不协调所造成的有关问题,使所设计的工程结构更符合实际情况,具有更高的经济效益和社会效益。

为了编制国家标准《公路工程结构可靠度设计统一标准》并进而编制、修订现行的公路工程结构设计规范,交通部下达了“公路桥梁(上部结构,包括荷载)可靠度研究”、“公路桩基(主要为钻孔桩)可靠度研究”、“公路沥青路面可靠度研究”、“公路水泥混凝土路面可靠度研究”和“公路路基可靠度研究”等重大科研项目。经过几年的工作,基本上均已完成相应的研究内容。在公路桥梁方面,开展了公路桥梁恒载、车辆荷载、人群荷载、车辆冲击力与制动力、温度、风、作用组合系数与分项系数、可靠指标、桥梁结构构件抗力以及混凝土质量控制等方面的可靠度研究,获得了大量宝贵的实

测资料或试验资料,经过严格的统计分析和校准比较研究等,得到了许许多多十分珍贵的科研成果,为国家标准《公路工程结构可靠度设计统一标准》和新一代公路桥涵设计规范、施工规范和验收规范的编制和修订提供了可靠的依据,为提高新一代标准规范的统一性、科学性和先进性奠定了基础。

为了适应客观形势,及时反映公路桥梁可靠度研究的成果,普及概率极限状态设计理论和设计方法,“公路桥梁可靠度研究”课题的主要参加人员以“公路桥梁可靠度研究”课题成果为主要素材,编著成此书。如果本书能对读者了解可靠性理论和概率极限状态设计方法,理解在编的《公路桥涵荷载规范》和正在按此理论和方法修订的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》有所帮助的话,将是本书编著者的最大期望和心愿。

本书编写时,力求符合由浅入深、循序渐进的原则,尽可能全面地反映公路桥梁可靠度研究的成果,以便使读者全面理解规范采用的概率极限状态设计思想和设计方法以及其中许多参数、系数的取值原因。文字上尽可能做到通俗易懂,并根据具体内容附有实际算例。

本书的前言、第一章、第三章中第一节、第七节、第八节和结束语由交通部公路规划设计院李扬海、鲍卫刚撰写,第二章中第一节至第三节由重庆交通学院李红镝和交通部公路规划设计院鲍卫刚撰写,第二章中第四节和第五节由福建师范大学林忠民撰写,第三章中第二节、第五章、第六章中第一节和第二节以及第四节、第五节和第七节由西安公路交通大学郭修武撰写,第六章第六节由西安公路交通大学徐光辉撰写,第三章中第三节由交通部公路规划设计院李扬海、郑绍珪、逯一新、鲍卫刚撰写,第三章中第四节由重庆交通学院李红镝撰写,第三章中第五节和第六节由吉林省交通科学研究所李玉良撰写,第四章由湖南大学程翔云撰写,第六章中第三节由同济大学张士铎撰写,第七章由湖南大学黄征宇撰写。全书由交通部公路规划设计院李扬海、鲍卫刚汇总、定稿。

“公路桥梁可靠度研究”课题研究工作的完成、成果的取得,在

于参加课题研究工作的全体研究人员有严谨的科学态度和方法,有吃苦耐劳、无私奉献的精神和精益求精的工作作风。同时,也与各级领导的关心重视和兄弟单位及有关专家的通力协作、支持是分不开的,在此一并表示深深的谢意。本书的编著还得到本课题研究的主要技术负责人、交通部公路规划设计院郑绍珪高级工程师的关心和支持,特表感谢。

由于作者学识和经验均有限,书中难免有错误和欠妥之处,恳请读者批评指正。

编著者

一九九七年元月

第一章 概 述

第一节 可靠性理论在工程设计中的应用

随着科学研究和实践认识的不断深入及计算技术的不断发展,工程结构的设计理论和方法不断演变和更新。19世纪末,随着材料试验科学和弹性理论的发展出现了容许应力设计法,该法是通过材料强度的折减来保证结构的使用可靠性。此折减系数即为安全系数。此法将影响结构可靠性的各种不同性质的随机因素(如荷载、材料强度和结构构件的几何参数等)全部集中在降低材料的工作应力来处理,不可能真实地反映结构的可靠程度。20世纪40年代后开始出现了破损阶段设计法。该法是克服了容许应力设计方法的某些缺点后形成的一种方法,它考虑了材料的非线性因素,使材料的强度得以较充分的利用。破损阶段设计法通过对荷载乘以荷载系数来保证结构的可靠度。该法也存在着与容许应力设计方法性质相似的缺点,即将影响结构可靠性的各种不同随机因素的影响全部集中于乘以荷载系数来处理,同样不可能真实地反映结构的可靠程度。上述方法均称为定值设计法。50年代,前苏联首先采用极限状态设计法(即所谓三系数法),当初的极限状态设计法并没有与结构可靠性理论相结合,故亦称半概率极限状态设计法(定值极限状态设计法)。与此同时,前苏联和美国学者开始运用概率论和数理统计理论研究结构的可靠度,但进展缓慢,主要在结构可靠度的定义和分析方面,无论在理论上还是在实际应用上均未取得实质性的解决办法。

1969年,美国的康乃尔(C. A. Cornell)提出了结构可靠指标

的概念,从而使结构可靠性理论进入实用阶段,并为这一科学理论得以引进工程结构设计创造了条件。工程结构设计方法在半概率极限状态设计方法的基础上,进一步考虑基本变量的概率分布类型,并给出统一的、数量化的结构可靠度定义,以替代传统的安全系数,从而形成了向以可靠性理论为基础的概率极限状态设计方法(简称概率极限状态设计法)过渡的发展趋势。概率极限状态设计法继承了定值设计和半概率极限状态设计的许多基本概念、内容和方法,把结构设计基本变量的研究和应用,从定值变量、基本统计参数推进到概率分布的水平,从而形成了区别于传统设计理论和方法的一整套基本概念、内容和方法。

为了在设计原则和方法上进行协调统一,1971年,欧洲混凝土委员会(CEB)、国际预应力混凝土协会(FIP)、欧洲钢结构协会(CECM)、国际建筑研究与文献委员会(CIB)、国际桥梁与结构工程协会(IABSE)、国际壳体与特种结构协会(IASS)和国际材料与结构试验研究所联合会(RILFM)等国际组织联合成立了“结构安全度联合委员会”(JCSS),专门研究结构安全度和设计方法的改进,编制的《结构统一标准规范的国际体系》已陆续出版。国际标准化协会“建筑结构设计依据”委员会(ISO/TC98)于1973年提出了《检验结构安全度总则》(ISO2394),该文件业经多次修改,并改名为《结构可靠性总原则》。上述两个国际性文件都介绍了概率极限状态设计方法的典型模式和确定各分项系数的原则和方法,对于各国开展以可靠性理论为基础的工程结构设计规范的技术变革提供了一整套的原则和模式,起到了很好的协调和促进作用。1975年,加拿大首先制定了以可靠性理论为基础的极限状态设计统一标准,并相继编制了有关的专业规范,《安大略省公路桥梁设计规范》和加拿大国家标准《公路桥梁设计》在概率极限状态设计方法的基础上已经多次修改。1977年,原联邦德国编制了《确定建筑物安全度的基础》作为编制其它规范的基本依据;1978年,北欧五国的建筑委员会(NKB)提出了《结构荷载与安全度设计规程》;1980年,美国国家标准局提出了《基于概率的荷载准则》(ANSI A-

58)。日本也成立了四个专门委员会来研究结构安全度的理论、荷载、材料和设计规范等问题。

在我国，原国家计委标准定额局（现建设部标准定额司）自1976年以来，先后下达了《工程结构可靠度设计统一标准》和《建筑设计统一标准》、《铁路工程结构可靠度设计统一标准》、《公路工程结构可靠度设计统一标准》、《港口工程结构可靠度设计统一标准》及《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》的编制任务。

为编制《公路工程结构可靠度设计统一标准》，在公路工程方面，先后开展了“公路桥梁（上部结构，包括荷载）可靠度研究”、“公路桩基（主要为钻孔桩）可靠度研究”、“公路沥青路面可靠度研究”、“公路水泥混凝土路面可靠度研究”和“公路路基可靠度研究”。

《公路工程结构可靠度设计统一标准》(简称《统一标准》)采用了以可靠性理论为基础的以分项系数形式表达的概率极限状态设计方法，统一了公路工程结构设计的基本原则，规定了适用于各种材料结构的可靠度分析和设计表达式，并对材料和构件的质量控制与验收提出了相应的要求。这本标准是制定公路工程结构荷载规范、混凝土桥涵设计规范、钢结构、木结构、公路桥涵地基与基础、水泥混凝土路面设计和柔性路面设计规范以及公路工程结构抗震设计规范等设计规范应共同遵守的准则，亦可供编制其它工程结构设计规范参考。

《统一标准》的编制，标志着我国在公路工程结构可靠度研究和实际应用方面提高到一个新的水平，将会对我国公路工程结构设计规范体系和设计思想、施工管理、科研方法等方面产生一系列的影响。

图 1-1 简明交待了“公路桥梁可靠度研究”的基本内容和工作流程，图中虚线框部分表示该荷载尚未做荷载组合及有关的计算分析。

图 1-1 “公路桥梁可靠度研究”框图

第二节 工程结构可靠度

工程结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的概率称为结构的可靠度。这里所说的“规定时间”是指作结构可靠度分析时结合结构使用期考虑各种基本变量与时间的关系所

取用的基准时间；“规定的条件”是指结构在正常设计、正常施工和正常使用的条件下，即不考虑人为过失的影响；“预定功能”是指结构的安全性、适用性和耐久性，亦即工程结构应具备所期望的功能，为：

1. 在正常施工和使用时，能承受可能出现的各种作用，并能在规定设计的偶然事件发生时和发生后，保持必需的整体稳定性；
2. 在正常使用时，具有良好的工作性能；
3. 在正常维护下，具有足够的耐久性能。

完成预定功能的标志可用“极限状态”来衡量。一般情况下，结构的极限状态又可分为“承载能力极限状态”和“正常使用极限状态”。

安全性、适用性和耐久性总称为结构的可靠性。由此可见，结构可靠度是结构可完成“预定功能”的概率度量。它是建立在统计数学的基础上经计算分析确定的，可给结构的可靠性以一个定量的描述。

目前，结构可靠度设计一般将赋予概率意义的极限状态方程转化为极限状态设计表达式进行，此类设计均可称为概率极限状态设计。

工程结构设计应用概率意义上的可靠度，或可靠概率或可靠指标来衡量结构的安全程度，是工程结构设计思想和设计方法的一大进步。实际上，结构的设计不可能是绝对可靠的，至多是说它的不可靠概率，或失效概率相当小。我们以往采用的容许应力和定值极限状态等传统设计方法实际上也是具有一定的设计风险的，只是其失效概率未被人们象现在这样能够明确地揭示出来，关键是结构设计的失效概率小到何种程度人们才能比较放心地接受。

结构的可靠度与时间关系密切。一般而言，结构或结构构件的材料强度和几何因素等会随着时间的增长而有所变异，但这种变异在大多数情况下均较小，在工程结构的设计和可靠度分析中可以忽略不计，即结构或构件的抗力可用与时间因素无关的随机变量概率模型描述，而非随机过程概率模型。但对于作用或作用效

应, 一般而言, 时间因素的影响不容忽视, 应以随机过程概率模型描述。如此, 作用(作用效应)与抗力的组合为一半随机过程概率模型, 分析比较繁烦, 一般在一定假定条件下, 可将它转化为随机变量来处理。

第三节 概率极限状态设计基本概念

一、极限状态和极限状态方程

公路工程结构的可靠度通常受各种作用效应、材料性能、结构几何参数、计算模式准确程度等诸多因素的影响。在进行结构可靠度分析和设计时, 应针对所要求的结构各种功能, 把这些有关因素作为“基本变量” X_1, X_2, \dots, X_n 来考虑。由这些设计基本变量组成的描述结构功能的函数 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 称为结构功能函数。我们也可将若干基本变量组合成综合变量, 例如将作用方面的基本变量组合成综合作用效应 S , 抗力方面的基本变量组合成综合抗力 R 。从而, 结构的功能函数为 $Z = R - S$ 。

如果对功能函数 $Z = R - S$ 作一次观测, 其可能出现如下三种情况之一:

$Z = R - S > 0$, 表明结构处于可靠状态;

$Z = R - S < 0$, 表明结构已失效或破坏;

$Z = R - S = 0$, 表明结构处于极限状态。

因此, 我们定义: 若整个结构或结构的一个部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求, 则此特定状态即为相应于该功能的极限状态。极限状态实质上即是结构可靠(有效)或不可靠(失效)的界限。对于结构的各种极限状态, 均应该规定明确的标志及限值。

欧洲混凝土委员会、国际预应力混凝土协会、国际标准化组织等国际组织, 一般将极限状态分为两类: 承载能力极限状态和正常使用极限状态。加拿大曾提出三种极限状态, 即破坏极限状态、损

伤极限状态和使用极限状态。其中损伤极限状态系指由混凝土的裂缝或碎裂而引起的损坏,因其对人身安全危险性较小,可允许比破坏极限状态具有较大一些的概率。我国的《工程结构可靠度设计统一标准》将极限状态划分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。同时提出考虑随着技术进步和科学发展,在工程结构上还应考虑“连续倒塌极限状态”,即万一一个别构件局部破坏,整个结构仍能在一定时间内保持必需的整体稳定性,防止发生连续倒塌。广义地说,这是为了避免出现与破坏原因不相称的结构破坏。这种状态主要是针对偶然事件而言的,如撞击、爆炸等。《公路工程结构可靠度设计统一标准》暂未考虑连续倒塌极限状态。

结构的极限状态可以相应功能函数取值为零表达,即由极限状态方程 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$ 描述。显然,不同的设计问题,功能函数及相应的极限状态方程的形式和内容均不相同。只要对作用效应 S 和结构抗力 R 赋予不同的意义,各类极限状态方程仍可用通式 $Z = R - S = 0$ 表示。

二、承载能力极限状态和正常使用极限状态

(一) 承载能力极限状态

承载能力极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形,承载能力极限状态直接关系到结构的安全与否,任何公路工程结构均需做承载能力极限状态的设计,且要求其出现的失效概率相当低。

当结构或结构构件出现下列状态之一时,应认为超过了承载能力极限状态:

1. 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡(如倾覆、滑移等);
2. 结构构件或连接部因材料强度不够而破坏(包括疲劳破坏),或因过度变形而不适于继续承载;
3. 结构转变为机动体系;
4. 结构或结构构件丧失稳定(如压屈等)。