公路土工结构物可靠性设计理论与应用

刘春原　母焕胜　著

人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co.,Ltd.

Gonglu Tugong Jiegouwu Kekaoxing Sheji Lilun yu Yingyong

公路土工结构物可靠性设计理论与应用

刘春原　母焕胜　著

人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co.,Ltd.

内 容 提 要

本书共7章内容，首先应用盲数测度理论对某高速公路全路段的路基力学性能指标参数进行了分析，计算出基于盲数测度理论确定的参数代表值区间；其次，针对路基沉降可靠性的特点，提出了非概率可靠性指标的计算方法；在此基础上，应用基于区间分析可靠度模型对软土路基沉降进行可靠度分析，验证了非概率可靠性模型在路基沉降可靠度分析中的可行性；最后，采用 Mohr-Coulomb 屈服准则，将可靠度理论与有限元强度折减法计算出的中值安全系数进行耦合，分析了土体强度在折减下的塑性应变与位移的变化关系，提出根据塑性应变或位移的突变（陡增）判断土质滑坡稳定性失效的方法。这些内容不仅促进地质情况复杂地区高等级公路土工结构物可靠性设计的学术理论发展，而且有利于指导工程建设实践。

本书内容丰富具体，图文并茂，概念清晰，可靠度理论分析叙述全面，可供土建、水利、交通、铁道等土木建筑工程领域，特别是从事高等级公路土工结构或同类工程设计、施工、科研、管理的工程技术人员及高等院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

公路土工结构物可靠性设计理论与应用/刘春原，母焕胜著.—北京：人民交通出版社股份有限公司，2015.3

ISBN 978-7-114-11743-5

Ⅰ.①公… Ⅱ.①刘…②母… Ⅲ.①道路工程—路基工程—可靠性设计 Ⅳ.①U416

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 224193 号

书　　名：**公路土工结构物可靠性设计理论与应用**
著 作 者：刘春原　母焕胜
责任编辑：刘永芬
出版发行：人民交通出版社股份有限公司发行部
地　　址：（100011）北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号
网　　址：http://www.ccpress.com.cn
销售电话：（010）59757973
总 经 销：人民交通出版社股份有限公司发行部
经　　销：各地新华书店
印　　刷：北京市密东印刷有限公司
开　　本：787×1092　1/16
印　　张：9
字　　数：207千
版　　次：2015年3月　第1版
印　　次：2015年3月　第1次印刷
书　　号：ISBN 978-7-114-11743-5
定　　价：35.00元

前　　言

当前，河北高速公路建设项目主战场已逐步由平原向山区和沿海地区转移，在施工过程中遇到越来越多的技术难题，如特长隧道、高墩大跨桥梁、滩涂软基处理等，如何准确深入地理解路基土工结构物失稳的成因，科学合理地进行路基土工结构物的结构设计以及准确地预估路基土工结构物变形发展趋势，是目前公路设计、施工与管理部门亟需解决的问题。鉴于人们对高速公路路基结构的高可靠性、高质量要求以及常规可靠性理论解决问题的局限性的困惑，人员开始尝试借助新的工具，建立新的可靠性理论和方法，寻求避开求(P_f)非概率可靠性的方法。因此，研究不确定性的非概率凸集模型的稳健可靠性，将非概率可靠性应用于高等级公路土工结构物的研究，对提高高速公路路基结构的可靠性，为高等级公路工程各部分施工和运营安全性管理提供一定的参考，实现安全性预警，避免和减轻灾害，促进公路的可持续发展，具有良好的应用前景和巨大的经济效益。

本书利用理论分析和数值模拟方法，以实际工程为背景，非概率可靠性理论为基础，数值分析与现场实测相结合，对公路土工结构物的软土路基沉降和路基边坡稳定性进行了系统详细的分析研究。本书结构合理清晰，内容精炼实用，包含作者一些新的思路和认识。

本书的编写人员有刘春原、母焕胜、龚攀、张军其、宋海超、李晓颖。具体编写分工如下：第1章由刘春原撰写；第2章、第3章和第4章由龚攀和刘春原撰写；第5章由李晓颖和母焕胜撰写；第6章由张军其和母焕胜撰写；第7章由刘春原和宋海超撰写。全书由刘春原统稿。

本书的研究成果得到了河北省科学技术厅、河北省交通运输厅和河北省住房与城乡建设厅科技计划项目的资助，在此表示衷心的感谢。

感谢保定市保阜高速公路筹备处、保定市张石高速公路筹建处、石家庄市京昆高速公路石太北线筹建处、唐山唐曹高速公路有限公司、河北省建筑科学研究院、河北省交通规划设计院等单位提供的许多宝贵资料。同时感谢赵献辉博士、范嘉慧对书稿进行修订、编排、整理和校阅的过程中所付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限，书中疏漏和不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

最后，对参阅文献的作者和相关网站，致以衷心的谢意。

2014年5月于天津

目　录

第1章 绪 论

1.1 引 言

高速公路的发展始于20世纪30年代，最早是美国和德国在其国内修建，在他们的实践上其他有经济实力的国家也开始发展高速公路，自20世纪50年代以来，各国的高速公路建设均取得了较快的发展。我国从20世纪70年代开始对高速公路进行规划，1988年10月，我国建成了第一条高速公路——沪嘉高速公路。不久之后，沈大、京津唐高速公路相继开始建设，从此，我国的高速公路建设进入了一个全新的时代。到1999年底，一大批高质量高速公路如京沈高速、沪杭高速、济青高速等相继竣工通车，在很短时间内就表现出了巨大的综合效应：在高速公路的沿途地区，一大批工业厂房、矿产企业和高新技术开发区如雨后春笋般涌现，极大地拉动了当地经济的发展。地价增值，地方税收增加，一个个原本落后的地区实现了经济的腾飞。

目前，我国的高速公路网络正在逐步建立。高速公路的铺设不可避免会遇到各种地质条件，其中，很多高速公路就必须在软土路基上修筑。软土路基大多属于湖泊相、河相和海相沉积层，这样的沉积层在地质构造上被划分为第四纪 Q_4上层，通常是由淤泥、淤泥质黏土和淤泥质亚黏土一类的正常压密的黏土构成。这类土含水率大，孔隙比大，强度低，扰动灵敏度高，渗透性差，压缩性大，承载力低，因此在这种地基上修建高速公路，地基将产生很大的沉降和差异沉降，如果不对这类地基进行处理或处理方法不当，就会导致路基沉降时间很长，从而使路基的整体沉降不均匀进而影响路面的平整度，使路面状况变差，汽车无法高速行驶。多年的实践经验告诉我们，如果不解决好软土路基设计问题，在高速公路运营期间，路面容易发生沉陷，也往往导致在桥头处发生“桥头跳车”现象，这将会影响到高速公路的正常使用，严重时还会诱发路基边坡失稳，造成道路损毁，使国家和人民的生命财产蒙受损失。因此，解决路基设计的安全性问题是高速公路建设与施工的关键问题之一。可靠性分析方法作为安全评价的一种重要手段，得到了广泛的应用并取得一定的研究成果。

1.2 不确定性的来源及分析

随着现代社会的发展，人们对产品的质量要求和安全要求越来越高，对产品的可靠度评估正逐渐引起人们的重视。工程结构作为一种特殊的产品，其可靠与否不仅关系重大的经济利益，还与工程结构使用者的生命安全息息相关，所以建立合理的可靠性评估理论对于指导现代工程设计与建设具有重大的现实意义。

人们对于可靠性理论的研究始于20世纪40年代，最早是为了解决电子设备的不确

定性问题，而20世纪60年代开始引起广泛关注的结构可靠性问题源自于对结构设计、施工和使用过程中存在的不确定性的认识，以及结构设计风险决策理论中计算结构失效概率的需要。当然，如果设计前能准确了解作用于结构的荷载大小以及结构的抗力表现，则能将结构设计得极为可靠。但是在通常情况下，事件的结果是由多因素共同作用，其中不乏一些偶发因素，而且在每一次事件中哪些因素的影响大，哪些因素的效果弱不是事先能够预测的，这也就导致了在事件出现或发生之前其结果是不可预测的，即所谓的不确定性。

不确定性是指事件出现或发生的结果是不确定的，或在事件出现或发生之前不能预测其结果，需要用不确定性理论和方法进行分析和推断。工程可靠性理论正是为了合理考虑诸多的不确定性，从而对结构的表现行为能有一个较为准确的预判而产生和发展。如果在设计前能够准确预测结构各构件的极限承载能力和作用荷载的大小，则可将结构设计为使用期内不会发生破坏，但这是不现实的。根据不确定性性质和特点的不同，不确定性有多种分类方法。赵国藩等人将结构设计中影响结构可靠性的不确定性分为随机性、模糊性和知识的不完善性。随机性反映了事件发生条件的不充分性对结构可靠性的影响，模糊性反映了结构失效准则的不分明性或中间过渡性对结构可靠性的影响，而知识的不完善性反映了未来信息的不完备对结构可靠性的影响。在这三种不确定性中，对随机性的研究比较充分，已有的概率论、数理统计和随机过程理论为结构可靠度的研究提供了坚实的基础，目前的结构可靠度理论基本是考虑随机不确定性的可靠度理论。模糊性的研究还不完善，目前仍在发展之中。知识的不完善性尚无可行的数学分析方法，工程中一般结合以往的经验进行处理。

目前的结构可靠度理论主要讨论的是随机不确定性下的可靠度，所以进一步分析结构设计中的随机不确定性是非常必要的。与结构可靠度有关的随机不确定性包括以下几个方面。

（1）物理不确定性。在结构设计中，承认存在随机不确定性，就是承认与设计有关的变量存在变异性，如荷载的变异性、材料强度的变异性等。在一定的环境和条件下，这些变量的不确定性是由其内在因素和外在条件共同决定的，称为物理不确定性。在有些情况下，当与制作过程有关时，物理不确定性可通过提高技术水平或质量控制水平来降低，如混凝土的变异性可通过严格配制程序、准确控制拌和料重量、细心拌和等手段而减小，但严格控制过分，基于响应面法的混凝土重力坝可靠度分析会提高构件制作的费用，降低生产效率。所以，降低物理不确定性有时是与一定的经济条件相关的，而有些情况下物理不确定性则不能人为降低，如风荷载、雪荷载等。

（2）统计不确定性。概率论中研究的随机变量的概率分布和统计参数（如平均值、标准差、形状参数、尺度参数等）都是已知、确定的，但在实际中，随机变量的统计参数要根据收集到的样本数据，利用数理统计方法进行估计才能得到。而估计的结果与样本的容量有关，理论上只有当样本的容量为无穷时，估计的参数才是准确、确定的。一般情况下估计一个参数也是一个随机变量，样本容量大时参数估计值的变异性小，样本容量小时变异性大。例如，一般认为混凝土的抗压强度服从正态分布，当采用矩法或其他方法估计抗压强度的平均值时，即使是同一批试件，用不同组试件估计的结果也是不同的。这种由于随机变量样本量的

不足而导致统计参数估计值的不确定性称为统计不确定性。降低统计不确定性的手段是增大样本容量或采用合适的估计方法,但由于客观条件的限制,很多情况下并不能得到足够多的数据,甚至有时获得少量样本数据都是困难的。当变量的统计数据不足时,理应将统计不确定性也考虑在结构可靠度分析中,目前有一些这方面的研究,如用贝叶斯法进行分析。但由于问题的复杂性,工程中应用尚有一定困难。

(3)模型不确定性。在结构设计和可靠度分析中,常需要根据一些变量利用已有的公式或模型计算另一变量的值,如根据结构的材料特性和几何尺寸计算结构的承载力,根据结构上的荷载计算结构的反应等,使用的公式可为理论公式,也可能为半经验半理论公式,还可能是完全通过试验得到的经验公式。即使是精确推导的理论公式,计算结果也会与实际值有所差别,因为理论公式是在一定假设条件下得到的,而假设条件一般总与实际情况有差别,对于经验公式更是如此。除此之外,采用各种简化手段进行分析也会产生一定的误差,如将非线性问题简化为线性问题,将动力问题简化为静力问题等。由计算公式不准确或模型简化而产生的不确定性称为模型不确定性,在结构可靠度分析中常用一个附加的随机变量来描述。降低模型不确定性的途径是使计算假定尽量与实际情况相符采用先进的计算手段,但这些都要受到科学技术发展水平和经济条件的限制,如许多问题目前还不能建立更为准确的理论模型,有些情况下精确地分析则需要相当大的费用。

不确定性因素特征按照表现形式分为随机性、模糊性和灰色性。

①随机性事件发生的条件无法控制,因果定律不成立;事件本身的性态和类属是确定的,概念的外延明确,内涵不确定;从信息的观点看,它只涉及信息的量,如结构承受的荷载,材料强度等。

②模糊性事件本身的性态和类属上的不确定性,排中律不成立,概念的内涵确定、外延模糊,如工程结构中耐久与不耐久,结构安全,应力比较大和比较小;从信息观点看,关系到信息的意义。

③灰色性又称事件知识的不完备性,是人类认识上的局限性造成的,一般认为事件或其特性的部分信息已知,部分信息未知。这种不完备性主要包括客观信息的不完善性和人类主观知识的不完备性,客观信息不完善性是由客观条件限制而造成的统计资料信息不足,从而导致判断结论的不确定性,而人类主观知识的不完备性,则是指人类对一些问题认识不充分。

Elishakoff 将其概括为不确定三角形(图 1-1)。它的三个顶点分别为:概率论和随机过程、模糊集合、凸集理论或反优化(Anti-optimization)模型。Elishakoff 综述了与不确定三角对应的三种可能的有限元方法。从理论上讲,以此三种数学模型为基础,可以建立起相应的结构可靠性理论。吕震宙教授用带"重心"的可靠性三角形(图 1-2)形象地概括了结构可靠性理论的基本结构。其中,以概率论和随机过程为基础的结构随机可靠性理论已较为成熟。在结构工程中得到了成功的应用,并成为工程中处理不确定性事件的重要工具和应用最为普遍的方法。本书较为详细地介绍和论述了随机结构的可靠性方法及其研究情况。基于模糊理论的模糊可靠性方法也已有很多研究,并取得了长足的进展。

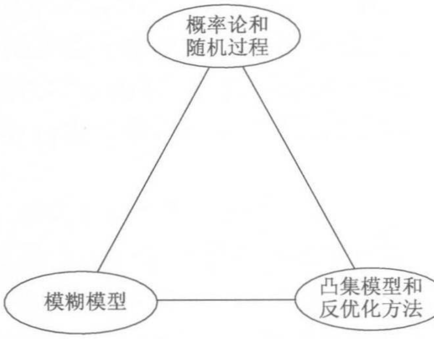

图 1-1　不确定三角形

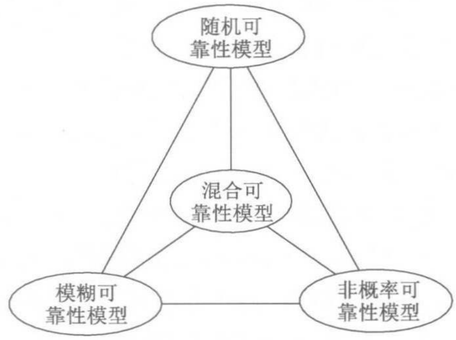

图 1-2　可靠性三角形

1.3　工程不确定性处理的一般方法

1.3.1　模糊数学方法

田艳芳和师义民等认为，在结构的可靠性分析中，数据不足和信息不完整导致构件强度和荷载分布只能根据已有试验数据和经验用模糊理论进行描述，此时的强度和荷载都被看作随机模糊变量。基于随机模糊理论，他们建立了将概率模型的分布参数作为模糊变量时的结构可靠性度量指标计算模型。该模型避开了模糊安全事件的隶属函数不易确定的难题，不但可以解决应力和强度服从任意分布的可靠度问题，而且也为计算多变量模型提供了一种计算可靠度的方法。龚文惠和王元汉等进行的基于模糊理论的膨胀土路基沉降的可靠度分析工作，运用模糊理论建立了膨胀土路基沉降模糊可靠度的数学分析模型，得出相应的计算表达式，但是该方法的缺点是就具体模糊事件而言，模糊可靠度在量值上总是低于传统可靠度。许江和李克刚将模糊理论应用到了公路边坡稳定性的分析中，通过全面考虑影响因素，建立相应的评判因素集及单因素评判矩阵，运用专家评判法和判断矩阵法确定出各因素的权重。最后通过多层次模糊评判得到该边坡的稳定性评判结果。但是在不同区域，甚至是同一区域的不同部位，其影响因素及各因素对边坡稳定性的影响程度是有差异的，该方法不能区分这些差异。

1.3.2　灰色理论方法

灰色理论主要被应用于结构的变形预测和预警机理的研究。陶干强和任凤玉等将灰色理论 Verhulst 模型应用于滑坡预测的研究。研究表明，V 氏模型的应用范围为变加速阶段，及滑坡的失稳破坏阶段，对于短期预报有很强的适应性。应用 V 氏模型进行滑坡预测产生误报的原因在于，测点变形没有充分发育。对于灰色系数的求解，通过累加生成和累减还原的方法建模必然加大模型的误差。蔡君君和王星华开展了基于灰色理论桥梁群桩基础工后沉降预测的工作。在采用灰色理论对蕴藻滨特大桥群桩基础沉降预测中，由实测沉降值按等时距 GM(1,1) 模型以及改进的新陈代谢模型拟合的结果来看，前者与实测结果初始阶段

吻合较好，但随着时间的推移发散很快，在后期预测中已经不再适用，经分析认为，这主要是因为 GM(1,1) 模型是以灰色模块为基础，其灰平面呈喇叭形展开，未来时刻越远，预测的灰区间越大。而后者预测的沉降量与实测值拟合较理想，通过不断补充新的沉降观测数据构建动态预测模型，反映了沉降的新变化，预测精度更高，更接近实际。卢丹玫进行了基于灰色理论的神经网络方法在防洪堤边坡稳定性分析中的应用研究，应用灰色系统理论的灰色关联分析，对防洪堤边坡稳定性影响因素进行灰关联分析，得出了各影响因素对防洪堤边坡稳定性影响程度的大小排序，然后应用人工神经网络改进的 BP 算法，选择灰关联分析的五个优势因子作为样本输入，采用 Matlab 中的神经网络函数库编写程序，建立了防洪堤边坡稳定性预测的神经网络模型。

1.3.3 概率可靠度分析理论

1.3.3.1 一次二阶矩法

王永刚和任伟中等将一次二阶矩法应用到了边坡可靠性分析中，以极限平衡理论和传统的安全系数方法为基础，运用二阶矩法建立边坡可靠性分析的极限状态功能函数，对边坡的稳定性进行了可靠性分析，探讨了随机土性变量黏聚力，内摩擦角和重度的均值及其变异系数对其可靠指标的影响。结果表明，内摩擦角的变异性对可靠指标的影响大于黏聚力变异性的影响，可靠指标对内摩擦角的变化更为敏感，变量之间的相关性对可靠指标的影响很小。然而该方法的不足之处在于，岩土体主要结构面的主要力学参数的取值方法对试验条件的依赖较大，计算可靠度指标所依据的功能函数也不固定。陈凯和温淑莲等对计算边坡稳定可靠指标的一次二阶矩法进行了改进，通过将线性展开点选在极限状态面上（即与边坡最大还能破坏概率对应点上），杜绝了原一次二阶矩法的近似极限状态面同真正的极限状态面相距较远的现象，同时克服了原方法将展开点选在空间中基本变量的均值所对应的点上，使得随线性化点 X_0 到极限状态面距离增加，可靠指标的误差也增大的缺点，从而保证边坡的稳定。

1.3.3.2 Monte Carlo（蒙特卡洛）法

赵德文和王春雷等针对工程实际中遇到的岩体边坡稳定问题，运用 Monte Carlo 法岩体结构面网络模拟技术对现场岩体结构面进行模拟分析和计算，比较清晰和逼真地再现了现场结构面的节理分布、岩体连同性等几何特征。周泉宇和杨仕教等将蒙特卡洛法应用到了公路边坡稳定性可靠度的分析之中，研究表明，采用蒙特卡洛法计算公路边坡工程可靠度问题时，当模拟次数达到 3000 ~5000 次时，一般能满足工程设计的精度要求。采用垂直条分法进行圆弧滑动公路边坡稳定性分析时，土条数目划分为 8 ~10 条较为合理，一般能满足工程设计的精度要求。张明星和李延新等基于蒙特卡洛法，对某高速公路软土路段工后沉降进行可靠性分析，并推导出了软土路基工后沉降极限状态方程，编写了计算程序。研究表明，当工后沉降容许值较大时，基于定值方法得出的估算路基工后沉降的规律与基于可靠度方法得出的规律是一致的；而当工后沉降容许值较小时，可靠度方法能够更好地考虑参数变化影响，优于定值方法。

1.3.3.3 响应面法

黄靓和易伟建等开展了针对岩土工程可靠度分析的改进响应面法研究，为了提高响应

面法的计算效率和精度,对现有的全局响应面法进行了改进。采用径向基函数(RBF)神经网络,代替目前常用的BP网络,迭代过程中在超锥体的范围内构造响应面,逼近隐式的非线性功能函数。与通常的相应面法相比,改进全局响应面法的迭代次数和有限元分析次数均大幅减少,节省机时,有利于提高计算精度。以浅基础和挡土墙为工程背景进行可靠度分析,表明该方法能以较快的收敛速度和较少的有限元分析次数,获得较高精度的可靠度指标,应用岩土工程的可靠度分析。苏永华和赵明华等将响应面法应用到边坡稳定可靠度分析中,借用响应面思想,利用试验结果拟合近似安全系数计算方程从而替代隐式方程,并建立近似极限状态方程,利用其计算可靠度指标和验算点,然后将安全系数计算近似方程、隐函数计算方程和验算点结合起来,确定新的展开点和抽样点,并进行近似方程再拟合、可靠度指标的循环计算直到收敛。

以上几种方法是目前工程领域处理不确定性事件比较成熟的方法,总体而言,这几种方法对工程信息量的需求都比较大,但是在很多实际工程中往往不能得到足够的数据信息去保证分析的精确可靠,所以这些方法在实际应用上都有一定的难度。因此,研究不同的可靠性分析方法,不但可使可靠性理论进一步完善,使不确定性的模拟更为合理,而且也是非常必要的。

1.4 非概率可靠度研究现状

20世纪90年代,以色列学者Yakov. Ben-Haim提出了基于凸集合模型的非概率可靠性分析方法,该方法能够在统计信息少的情况下,对结构进行较为准确的可靠性分析,能够克服传统可靠性分析模型在实际应用时遇到的困难。在实际工程中一般都能容易地给出各参数的变化区间,而不是概率分布,所以非概率可靠性分析方法具有较好的工程实用性。按照概率可靠性的观点,如果系统不可接受行为的概率(或失效概率)小到可以接受,则认为系统是可靠的。而非概率可靠性思想,即如果系统性能的变异或波动范围与系统的失效区域不交,则系统是可靠的。或者说,如果系统性能的变异或波动不超出确定的任务范围,或性能波动的范围小到可以接受,则系统是可靠的。正如Ben-Haim所指出的,概率可靠性强调可接受行为的概率,而非概率可靠性强调的是可接受行为的范围。从设计上讲,基于概率可靠性的系统设计要求将不期望行为出现的概率减小到可接受的最低水平,而基于非概率可靠性的系统设计则要求保证系统性能的变异保持在可接受的范围内。

国外对于可靠度的研究已经历了很长的过程。基于凸集模型的结构优化设计是Elishakoff教授等在20世纪90年代中期首次提出的。将不确定性参量看作是有界的,将其包含在某个凸集合中,在其中求反优化思想用于结构优化设计,在上一级优化设计变量,获取最优设计;在低一级通过反优化不确定性,找出已知设计的最不利响应,并成功地将此思想用于桁架结构的优化设计。1995年,Elishakoff在针对此概念的讨论中,基于区间方法提出了一种可能的度量。认为非概率可靠性与不定参量一样,属于某一区间,提出的可靠性指标是一区间而非一具体量值。区间的边界是根据传统的安全因子法进行区间运算而求得。之后,Ben-Haim在研究了凸集合运算性质的基础上,提出以系统能容许的不确定性的最大程度度量可靠性。所定义的可靠性本质上是系统对不确定性的稳健性的度量,并进一步较

为系统地研究了非概率的稳健可靠性方法。Lombardi等提出两级两步解法，对Elishakoff的方法进行改进，可在一定程度上降低计算工作量，并用于复合材料结构的优化设计。Ganzerli等提出了椭圆凸集模型的建模方法，利用叠加方法直接获得结构响应的极值，可避开反优化计算，并用于不确定性桁架结构和多跨梁的优化设计。总之，不确定性的凸集模型方法用于结构设计已经显示出良好的应用前景。凸集模型描述已成为可靠性分析和结构优化设计中很有前途的发展方向。

国内关于非概率可靠性方面的研究刚刚起步。比较有代表性的研究有吕震宙教授以"非概率可靠性模型及其应用研究"为题申请了国家自然科学基金，提出了基于区间分析的结构非概率可靠性模型，给出了结构体系的非概率可靠性分析方法，进而又对区间模型进行改进，以此思想方法研究了简单桁架结构非概率可靠性以及结构可靠性优化等问题。邱志平等在这方面也作了卓有成效的工作，将非概率凸集合理论模型和有限元摄动理论相结合，提出了求解有界不确定参数结构的静力位移所在集合上下界的摄动数值方法，拓宽了凸集理论的应用范围，他们的工作获得了国家杰出青年基金的资助。赵明华和曹文贵等人将给予区间分析的非概率可靠性模型应用到了岩土工程领域，开展了基于区间理论的挡土墙稳定性非概率可靠性分析方法和基于区间组合法的边坡稳定非概率模糊可靠性分析方法的研究。

就目前这些研究来看，基于凸集模型的稳健可靠性理论雏形已经建立，并在应用力学方面得到一定的应用，但稳健可靠性理论还不成熟，以Ben-Haim定义的稳健可靠性指标具有量纲，给设计及分析带来很大不便，其度量指标有待完善；描述各种不确定性的模型还有待完善，模型求解方法还需进一步研究；虽已初步将非概率可靠性模型引入到一些简单的并有解析解的情况，但稳健可靠性定量方面的研究和应用有待深入，所以稳健可靠性应用的领域和范围还比较窄，应该进一步拓展应用范围。

1.5 本书主要内容

1. 介绍盲数测度理论的相关知识，提出基于盲数测度理论的岩土工程参数的区间分析方法，为岩土工程设计参数的选取提供依据。应用基于盲数测度理论的岩土工程参数的区间分析方法对唐曹高速公路的路基设计参数进行研究。

2. 介绍非概率可靠度的发展及概念，并总结不同情况下计算非概率可靠指标的方法。利用ABAQUS有限元分析软件，分别建立经不同地基处理的软土路基模型，计算并分析软土路基沉降。应用非概率可靠性研究方法对软土路基沉降可靠度进行分析，计算沉降的可靠度指标。对各种处理方式下的软土路基沉降可靠度参数敏感性进行分析，从而为软土路基沉降提供一种有效的分析方法。

3. 在工程滑坡实例的基础上，通过ABAQUS有限元软件，应用强度折减法，计算出安全系数，并对不同折减系数下的塑性应变、位移场、应力场进行分析，将稳定系数的计算结果与用同济曙光边坡稳定性分析软件计算出的瑞典法、毕肖普法计算结果进行比较，通过工程实例说明，有限元强度折减土坡稳定分析的三种判据都能够合理、有效地判断多层均质土坡的安全系数。

4. 总结判断滑坡发生滑动的方法,提出通过位移或塑性应变突变来确定边坡滑动面的方法,并通过本工程实例说明此方法的可行性。对土体参数的不确定性(随机性、模糊性、灰色性、未确知性)主要应用在对土性参数均值、变异系数(或标准差)的估计上。介绍岩土工程中可靠度的分析方法。总结最优化方法在确定边坡最小安全系数、可靠性指标方面的应用,并通过工程滑坡实例。说明土的变异性对安全系数的影响很大。

5. 通过 ABAQUS 软件分别讨论不同的屈服准则、弹性模量、泊松比、剪胀角、以及网格的疏密程度对安全系数的影响。提出对传统的二元指标体系进行改良的方法,即采用 ABAQUS 软件,应用强度折减法计算出最大可能安全系数(中值安全系数)F_0,并采用强度折减法计算出失效概率。通过工程实例说明有限元与可靠度理论相耦合的实用性。

第2章　盲数测度理论与可信度分析理论

2.1　盲数理论概述

在当今时代,信息处理在生产科研领域的作用越来越重要。随着人们认识的逐步深入,人们对于信息范畴的认识早已不再是单一的随机信息,而将信息的范畴扩展到了模糊信息、灰信息等方面。现在用来处理信息的工具,如概率统计、未确知数学、模糊数学和灰数学等虽然都能用来处理信息,但是他们都只能用来表达和处理只具有一种不确定性的信息。但是,实际生产中所面临的信息往往同时具有多种不确定性。如果我们将只具有一种不确定性的信息称为单式信息,则这种具有多不确定性的信息就可以称为信息混沌。如果定义最多同时具有随机不确定性、模糊不确定性、未确知不确定性和灰不确定性这四种不确定性的较为复杂的信息为“盲信息”,那么表达和处理这种“盲信息”的数学工具就是“盲数”。下面主要介绍一下盲数理论的相关知识。

2.1.1　盲数的定义

设 $g(I)$ 为一区间型灰数集合,α_i 为一系列的灰区间,设 $\alpha_i \in g(I)$,若 $\alpha_i \in [0,1]$,$i=1,2,\cdots,n$,$f(x)$ 为定义在 $g(I)$ 上的灰函数,且

$$A = f(x) = \begin{cases} \alpha_i, x = x_i (i = 1,2,\cdots,n) \\ 0, \text{其他} \end{cases} \tag{2-1}$$

当 $i \neq j$ 时,$x_i \neq x_j$,且 $\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = \alpha \leqslant 1$,则称函数 $f(x)$ 为盲数,称 α_i 为 $f(x)$ 的 x_i 值的可信度,称 $\alpha = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i$ 为 $f(x)$ 的总可信度,称 n 为 $f(x)$ 的阶数。

当 x_i 为实数时,函数 $f(x)$ 称为未确知有理数,并可用 $\{[x_1,x_n],f(x)\}$ 表示。称 $[x_1,x_n]$ 为未确知有理数的取值区间,x_1 为取值下限,x_n 为取值上限。未确知有理数是盲数的一个特例。

2.1.2　盲数的运算

设 * 表示 $g(I)$ 中的一种运算,该运算可以是加、减、乘、除中的一种,设 A 与 B 为盲数

$$A = f(x) = \begin{cases} \alpha_i, x = x_i (i = 1,2,\cdots,m) \\ 0, \text{其他} \end{cases} \tag{2-2}$$

$$B = g(y) = \begin{cases} \beta_i, y = y_i (i = 1,2,\cdots,n) \\ 0, \text{其他} \end{cases} \tag{2-3}$$

表 2-1 称为 A 关于 B 的可能值带边矩阵,$x_1,x_2,\cdots,x_m$ 和 $y_1,y_2,\cdots,y_n$ 分别称为 A 与 B 的可能值序列。互相垂直的两条直线叫纵轴和横轴。第一象限元素构成 $m \times n$ 阶矩阵叫做 A

关于 B 在 $*$ 运算下的可能值 $*$ 矩阵。

A 关于 B 在 $*$ 运算下的可能值 $*$ 矩阵 表 2-1

x_1	x_1+y_1	x_1+y_2	$\cdots$	x_1+y_j	$\cdots$	x_1+y_n
x_2	x_2+y_1	x_2+y_2	$\cdots$	x_2+y_j	$\cdots$	x_2+y_n
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
x_i	x_i+y_1	x_i+y_2	$\cdots$	x_i+y_j	$\cdots$	x_i+y_n
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
x_m	x_m+y_1	x_m+y_2	$\cdots$	x_m+y_j	$\cdots$	x_m+y_n
$*$	y_1	y_2	$\cdots$	y_j	$\cdots$	y_n

表 2-2 称为 A 关于 B 的可信度带边积矩阵，$f(x_1),f(x_2),\cdots,f(x_m)$ 与 $g(y_1),g(y_2),\cdots,g(y_n)$ 分别是 A 和 B 的可信度序列。互相垂直的两条直线叫纵轴和横轴。第一象限元素所构成的 $m\times n$ 阶矩阵叫做 A 关于 B 的可信度积矩阵。

A 关于 B 的可信度积矩阵 表 2-2

$f(x_1)$	$f(x_1)g(y_1)$	$f(x_1)g(y_2)$	$\cdots$	$f(x_1)g(y_j)$	$\cdots$	$f(x_1)g(y_n)$
$f(x_2)$	$f(x_2)g(y_1)$	$f(x_2)g(y_2)$	$\cdots$	$f(x_2)g(y_j)$	$\cdots$	$f(x_2)g(y_n)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$f(x_i)$	$f(x_i)g(y_1)$	$f(x_i)g(y_2)$	$\cdots$	$f(x_i)g(y_j)$	$\cdots$	$f(x_i)g(y_n)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$f(x_m)$	$f(x_m)g(y_1)$	$f(x_m)g(y_2)$	$\cdots$	$f(x_m)g(y_j)$	$\cdots$	$f(x_m)g(y_n)$
$*$	$g(y_1)$	$g(y_2)$	$\cdots$	$g(y_j)$	$\cdots$	$g(y_n)$

将 A 关于 B 的可能值 $*$ 矩阵中的元素，相同的合并为一个，排成一列 $\bar{x}_1,\bar{x}_2,\cdots,\bar{x}_k$，如果 $\bar{x}_i$ 在 A 关于 B 的可能值 $*$ 矩阵中有 S_i 个不同位置，将可信度积矩阵中相对应的 S_i 个位置上的元素之和记为 $\bar{r}_i$，则可以得到序列 $\bar{r}_1,\bar{r}_2,\cdots,\bar{r}_k$，令

$$\varphi(x)=\begin{cases}\bar{r}_i, x=\bar{x}_i(i=1,2,\cdots,k)\\0,\ 其他\end{cases} \tag{2-4}$$

称 $\varphi(x)$ 为盲数 A 与 B 之 $*$，记作

$$A*B=f(x)*g(y_i)=\begin{cases}\bar{r}_i, x=\bar{x}_i(i=1,2,\cdots,k)\\0,\ 其他\end{cases} \tag{2-5}$$

当 $*$ 分别代表"+""−""×""÷"时，则分别得到 $A+B$、$A-B$、$A\times B$、$A\div B$。对"÷"要求 y_i 的区间不包含实数零。

2.1.3 盲数的均值

设 a、b 是实数，并且有 $a\leqslant b$。称 $\frac{1}{2}(a+b)$ 为有理灰数 $[a,b]$ 的心，记为

$$e[a+b]=\frac{1}{2}(a+b) \tag{2-6}$$

设盲数

$$f(x)=\begin{cases}\alpha_i, x=x_i(i=1,2,\cdots,m)\\0, \text{其他}\end{cases} \tag{2-7}$$

其中,$x_i\in g(I)$,$0<\alpha_i\leqslant 1(i=1,2,\cdots,m)$,$\sum\limits_{i=1}^{m}\alpha_i=\alpha\leqslant 1$,称一阶未确知有理数

$$Ef(x)=\begin{cases}\alpha, x=\frac{1}{a}(e\sum\limits_{i=1}^{m}\alpha_i x_i)\\0, \text{其他}\end{cases} \tag{2-8}$$

为盲数$f(x)$的均值。它体现了盲数$f(x)$的平均取值。

易知,当$x_i\in R(i=1,2,\cdots,m,R$为实数集)时,盲数$f(x)$退化为确知有理数。此时,$Ef(x)$为未确知有理数$\{[x_1,x_m],f(x)\}$的未确知期望。

当$m=1$,$x_1=[a,b]$,并且$\alpha_1=1$时,$f(x)$表示一个有理灰数,$Ef(x)$为$[a,b]$的心。

由此可知,盲数均值是未确知期望与有理灰数心的概念的推广。

2.1.4　盲数的性质

性质 1:盲数$A*B$与可能值$*$矩阵中元素的排列顺序无关。

性质 2:设A、B、C是盲数,则由盲数$*$的运算定义可知,下列运算定律成立

$A+B=B+A$

$A\times B=B\times A$

$(A+B)+C=A+(B+C)$

$(A\times B)\times C=A\times(B\times C)$

性质 3:设盲数

$$f(x)=\begin{cases}\alpha_i, x=x_i(i=1,2,\cdots,m)\\0, \text{其他}\end{cases}$$

$$g(y)=\begin{cases}\beta_i, y=y_i(i=1,2,\cdots,n)\\0, \text{其他}\end{cases}$$

则盲数均值具有以下性质

$E[f(x)+g(y)]=Ef(x)+Eg(y)$

$E[f(x)-g(y)]=Ef(x)-Eg(y)$

$E[f(x)\cdot g(y)]=Ef(x)\cdot Eg(y)$

2.2　可信度分析

由于可信度分析方法和取值区间的确定方法不易进行抽象的描述,故这里给出几个小的实际案例以直观地说明问题。

[**案例 1**]　砌体结构构件承载力设计值的确定