

工程结构可靠性

中国土木工程学会桥梁及结构工程学会
结构可靠度委员会

全国第三届学术交流会议论文集

1992/4/21—24

南 京

中国土木工程学会桥梁及结构工程学会
结构可靠度委员会

工程结构可靠性

中国土木工程学会桥梁及结构工程学会
结构可靠度委员会

全国第三届学术交流会议论文集

1992/4/21—24

南 京

中国土木工程学会桥梁及结构工程学会
结构可靠度委员会

中国土木工程学会桥梁及结构工程学会
结构可靠度委员会
第二届委员名单

主任委员：吴世伟

副主任委员：胡德忻、陈基发、秦 权、陈夏新

学术秘书：陈基发（兼）、马坤贞

名誉委员：李继华、姚明初

委 员：（以姓名笔划为序）

马坤贞、王春瑞、包承羽、刘汉民、刘健新
邹天一、吴世伟、何健雨、陈夏新、陈基发
林志仲、林志民、赵国藩、欧进萍、胡德忻
秦 权、浦幸修、高小旺、高大钊、郭怀志
夏正中、谢征勳、滕征本、瞿伟廉

通信委员：陈 星（香港）

目 录

结构可靠性的十年.....	1
中国土木工程学会桥梁及结构工程学会结构可靠度委员会	
(一) 一般理论	
[1] 工程结构可靠度的设计和评估.....	21
李继华 (重庆建筑工程学院)	
[2] 广义随机空间内的结构可靠度分析方法.....	26
李云贵、赵国藩、张保和 (大连理工大学)	
[3] 结构状态变化过程的随机描述.....	33
李清富、赵国藩、(大连理工大学)	
[4] 结构基本变量样本容量较小时分布参数的统计不定性.....	40
姚明初 (铁道部科学研究院)	
[5] 线性化极限状态方程及其归一型算法.....	45
郑 铎	
吴世伟 (河海大学)	
[6] Rosenblueth 法的探讨及其在工程结构可靠度分析中的应用.....	52
张广文、陈祖煜 (水利水电科学研究院)	
[7] 同时算出结构可靠指标和验算点值的快速收敛蒙特卡罗法.....	59
高尔坤、叶 军、吴世伟 (河海大学)	
[8] 结构四阶矩可靠度分析的验算点法.....	66
贡金鑫 (西安公路学院)	
[9] 结构可靠指标计算中较佳线性化点的讨论.....	72
姚明初 (铁道部科学研究院)	
[10] 结构可靠度的逼近分析方法.....	76
李云贵、赵国藩 (大连理工大学)	
张保和 (新疆工学院)	
[11] 材料性能的随机场特性参数的检定方法.....	83
郭怀志 (天津大学)	
[12] 客观构成基本变量先验分布的商讨.....	89
郭怀志 (天津大学)	
[13] 结构可靠性设计中基本变量的分布类型及其参数的推断问题.....	97
陈基发 (中国建筑科学研究院)	
[14] 正态分布函数计算的建议及其反函数的非迭代算法.....	103
郑 铎	
吴世伟 (河海大学)	

[15]	结构极限状态设计式中分项系数选定的设计验算点法初行论.....107	姚明初 (铁道部科学研究院)
[16]	工程结构设计规范可靠度校准的精确方法.....115	程学文、解伟、李铁 (华北水利水电学院)
[17]	结构设计的发展方向——以整体结构可靠度为目标的结构设计.....121	李国强 (同济大学) 李杰 (郑州工学院)
[18]	框架结构机构的自动生成及体系可靠度.....127	李宏、吴世伟、吕泰仁 (河海大学)
[19]	多层多跨框架失效机构的可靠度计算.....134	姚继涛、浦季修、陈慧仪 (西安冶金建筑学院)
[20]	结构体系可靠度的简化近似计算.....142	马永欣、浦季修 (西安冶金建筑学院)
[21]	结构系统可靠性设计.....149	曹起凤 (铁道部建设司标准科情所)
[22]	结构体系可靠度的 Ω 法.....158	汪长风 (山西省建设厅)
[23]	用于结构可靠度分析的随机有限元法.....166	杨柏华、姚耀武 (清华大学)
[24]	随机有限层法.....174	张思俊 (河海大学) 张广健 (南京航务工程专科学校)
[25]	改进的随机有限元法.....184	张新培 (成都电子科技大学)
[26]	随机块体理论及应用.....190	王保田、吴世伟 (河海大学)
[27]	钢结构构件抗火可靠度分析模型研究.....197	李国强 (同济大学)
[28]	日本钢筋混凝土耐久性研究综述.....204	卢哲安、霍凯成 (武汉工业大学)
(二) 荷载及荷载组合		
[1]	扩展RF算法及其在非线形组合中的应用.....213	王立、陈英俊 (北方交通大学)
[2]	结构作用按“JCSS”和“TR”组合规则时组合分项系数选定的分位值法.....221	姚明初 (铁道部科学研究院)
[3]	最大熵法在铁路列车荷载统计中的应用.....228	陈秀方、唐进锋 (长沙铁道学院)

- [4] 林区公路桥梁最大车辆荷载效应统计分析·····236
吴冲、陈英俊(北方交通大学)
- [5] 铁路桥梁纵向力传递系数的统计分析·····245
刘清松(铁道部第三勘测设计院)
- [6] 已建水库水位的概率特性·····251
张学易、张亦昭、梁家志(能源部、水利部北京勘测设计院)
- (三) 结构动力及疲劳可靠性
- [1] 地震动峰值统计结果在抗震结构可靠性分析中的应用·····260
李大华(国家地震局工程力学研究所)
- [2] 抗震钢筋混凝土结构的弹塑性随机动力分析与概率设计·····266
欧进萍、牛荻涛、王光远(哈尔滨建工学院)
- [3] 弹塑性结构地震作用下可靠度分析中若干问题初探·····275
徐守泽、王成博(天津大学)
- [4] “大震”作用下钢筋混凝土框架房屋变形能力的抗震可靠度分析·····283
高小旺(中国建筑科学研究院)
沈聚敏(清华大学)
- [5] 考虑结构—地基参数变异性的地震反应分析·····290
吴再光(大连理工大学)
- [6] 粘弹性地基上多层剪切框架随机地震反应分析·····296
吴再光(大连理工大学)
- [7] 工业基地地上煤气干线的抗震可靠度·····303
秦权、陈水荣(冶金部建筑研究总院)
- [8] 地下管道随机反应及动力可靠性分析·····309
周建、王前信(国家地震局工程力学研究所)
- [9] 自立式微波通讯塔在复合地震动作用下的随机反应分析·····318
李宏男(大连理工大学)
陆鸣(工程力学研究所)
- [10] 重力坝动力可靠度的随机动力有限元的分析方法·····324
陈厚群、梁爱虎(水利水电科学研究院)
- [11] 地震作用下重力坝可靠度分析·····332
张社荣、李振富、郭怀志(天津大学)
- [12] 水平地震系数的概率特性估计及应用·····340
张社荣、李振富、郭怀志(天津大学)
- [13] 在多次地震作用下结构概率累积损伤初探·····346
吴波、欧进萍(哈尔滨建工学院)
- [14] 结构风振的概率疲劳累积损伤·····354
欧进萍、叶骥(哈尔滨建工学院)

[15]	高耸结构抗风动力可靠性的统计分析·····	363
	瞿伟康 (武汉工业大学)	
[16]	结构自振频率的统计特性·····	368
	吕泰仁、何慧莉、吴世伟 (河海大学)	
[17]	铁路钢筋混凝土梁钢筋疲劳可靠度评估·····	373
	陈夏新、戴福忠 (铁道部科学研究院)	
[18]	表面裂纹扩展随机过程及疲劳可靠度计算·····	382
	刘晓光、潘际炎 (铁道部科学研究院)	
[19]	铁路混凝土桥疲劳可靠度研究·····	387
	戴公连、徐名枢 (长沙铁道学院)	
[20]	车桥振动系统的分布参数模型及数值解·····	394
	房庆海、房兴太 (黑龙江省林业设计研究院)	
[21]	桥梁结构振动参数辨识的一个工程方法·····	400
	房庆海、房兴太 (黑龙江省林业设计研究院)	
	(四) 岩土工程可靠性	
[1]	地基基础工程标准化与概率极限状态设计原则·····	406
	高大钊 (同济大学)	
[2]	对计算土性相关距离的讨论·····	415
	涂 枫 (华侨大学)	
[3]	桩基承载力参数估计的随机场模型·····	422
	高大钊、李健培 (同济大学)	
[4]	试论桩基础的可靠度·····	428
	谢征勋 (海口市建筑质量监督站)	
	何志美 (海南华阳房地产开发公司)	
[5]	岩土工程参数概率统计的几个问题·····	435
	光耀华 (广西电力工业勘测设计院)	
[6]	均匀场地上冻胀量的随机分布特征·····	442
	张 兴、冯彦辉、魏建峰 (吉林省水利科研所)	
	(五) 可靠性理论在工程结构中的应用	
[1]	钢筋混凝土单层厂房柱的可靠度·····	447
	赵传智、杨伟军 (武汉冶金建筑专科学校)	
[2]	高层钢结构框架的实用概率极限状态设计表达式·····	455
	戴国欣、李继华、夏正中 (重庆建筑工程学院)	
[3]	高层钢结构框架柱的可靠度与抗力分项系数·····	462
	戴国欣、李继华、夏正中 (重庆建筑工程学院)	
[4]	钢压杆弯曲失稳抗力不定性的蒙特卡罗法模拟及可靠度分析·····	468
	刘嘉武 (石家庄铁道学院)	

[5]	悬索结构的可靠指标 β 的计算方法.....	474
	张新培 (成都电子科技大学)	
[6]	老厂房可靠性评价与控制系统及用FHW法辅助决策.....	480
	陈向红、杜增林、关胜兰 (冶金工业部安全环保研究室)	
[7]	简支铁路桥梁的系统可靠度分析.....	496
	贾士升 (石家庄铁道学院)	
[8]	桥跨结构的系统可靠度估计.....	502
	李铁夫 (铁道部第三勘测设计院)	
[9]	铁路混凝土简支梁桥斜截面抗剪强度的可靠度分析.....	510
	马忠国、张开敬 (西南交通大学)	
[10]	部分预应力混凝土铁路道碴桥面梁可靠性分析.....	517
	杨梦蛟 (铁道部科学研究院)	
[11]	现有公路桥梁钢筋混凝土简支梁可靠度评估初探.....	528
	叶锦秋、吕志农 (北京建筑工程学院)	
[12]	可靠度理论在桥涵水文设计中的应用.....	536
	潘思远、房兴太 (黑龙江省林业设计研究院)	
[13]	铁路隧道衬砌结构可靠性分析初探.....	544
	谢锦昌 (兰州铁道学院)	
[14]	随机块体理论及其在隧洞工程中的应用.....	551
	张广健 (南京航务工程专科学校)	
	张思俊 (河海大学)	
[15]	重力式码头稳定性的可靠度分析.....	561
	姚 辉 (交通部三航院)	
	王浩芬 (天津大学)	
[16]	重力式码头抗滑稳定可靠性分析.....	573
	李恒云 (青岛海洋大学)	
[17]	重力式码头地基承载力的可靠度分析.....	579
	王浩芬、刘锡岭 (天津大学)	
	姚 辉 (交通部三航院)	
[18]	随机场理论在重力式码头地基承载力计算中的应用.....	586
	包承钢、黄卫锋、张庆华 (长江科学院)	
[19]	二维裂隙块体结构边坡稳定安全度分析.....	597
	王保田、吴世伟 (河海大学)	
[20]	边坡稳定可靠度的分析.....	604
	孙万禾、黄传志 (天津港湾工程研究所)	
	陈 环 (天津大学)	
[21]	土坝稳定的可靠度分析方法初探.....	612

	郑 锋、吴世伟 (河海大学)	
[22]	土石坝可靠度分析的初步研究.....	618
	张镜剑、李志远 (华北水利水电学院)	
[23]	重力坝按失稳进程的系统可靠度分析.....	626
	郭怀志、翁 伟、范训益 (天津大学)	
[24]	三峡大坝多层大孔口溢流坝坝段风险分析.....	634
	张思俊 (河海大学)	
	张广健 (南京航务工程专科学校)	
[25]	随机边界元法计算空腹坝的可靠度.....	644
	吴媚玲、姚耀武、高长军 (清华大学)	
[26]	拱坝的失效模式与可靠度.....	652
	吴世伟 (河海大学)	
[27]	用有限元影响系数法计算拱坝可靠度.....	659
	吕泰仁、李宏、叶军、李同春、吴世伟、张思俊 (河海大学)	
[28]	弹性地基上重力坝坝踵界面裂缝断裂可靠度分析.....	666
	周鸿钧、董耀星、王 博 (郑州工学院)	
[29]	混凝土大坝裂颖扩展的可靠性分析.....	674
	符晓陵、徐道远、张林兵 (河海大学)	
[30]	混凝土重力坝概率极限状态设计分项系数研究.....	682
	黄东军 (能源部、水利部华东勘测设计院)	
[31]	水工钢筋混凝土结构设计规范分项系数确定方法的研究.....	691
	程学文、解 伟 (华北水利水电学院)	

中国土木工程学会桥梁及结构工程学会
结构可靠度委员会《工程结构可靠性》
全国第三届学术交流会议 1992南京

结构可靠性研究的十年

中国土木工程学会桥梁及结构工程学会
结构可靠度委员会

在我国将结构可靠性的概念及计算理论引入建筑结构设计规范体系，并在评价结构性能时将它作为基本指标而制定了相应的国家标准以来，在结构工程中的各个领域内，结构可靠性的研究工作在国内先后得到广泛的开展。这一方面是由于这门学科在国外近廿年来发展较快而对国内产生了影响，而更主要的是出于结构设计本身不断提出改进的要求。在结构计算力学和结构试验技术已经取得相当成就的今天，反映在结构实际性能中的不定性因素，已在结构设计方法问题中占据了主要地位，要进一步改进结构的设计方法，在结构设计中，必须对不定性因素给以妥善的处理。结构可靠性的研究主要是围绕着这个问题而进行的。

国内学者在近十年内在吸收并消化国外研究成果的基础上，为发展结构可靠性这门学科也做了大量的工作。委员会委员们共同建议，在本届全国性学术交流会议上，对国内研究的状况做一次阶段性的总结，这看来是很有意义的。为此，根据我们所了解的在国内已经开展的工作，我们分别按下述几个方面做一次简要的总结。

一、结构可靠性一级理论的若干问题

(1) 可靠度计算方法的改进

在一次可靠度计算方法中，由于考虑了基本变量的分布类型，为确定结构可靠度就要求从技巧上解决繁冗的积分运算问题。这首先由德国 Rackwitz 等人通过所谓当量正态分布，对各变量在分布尾部提出逼近原理，并成为国际安全度联合委员会 (JCSS) 建议的所谓 JC 方法。该方法原型在计算中要求在每次迭代过程中按验算点的分布密度和分布函数等价条件计算当量平均值和标准差，计算比较费时。

姚明初提出的分位值法^[1,2]，虽然在原理上没有改变，但将基本变量 X_i 变换为约化正态变量 $\beta_{xi} = \Phi^{-1}[F_{xi}(x_i)]$ 后，定义待求验算点 X_i^* 为变量的某个分位值，变量对 β_{xi} 的导数为分位导数，按可靠指标 β 与诸变量的约化正态变量 β_{xi} 的关系，以及诸变量分位值和分位导数与 β_{xi} 的关系，通过迭代对问题求解。与原型方法相比，减少了一些计算过程，而且约化正态变量在概念上与灵敏系数 α_i 类似，反映了可靠指标在各基本变量上的分配。赵国藩的实用分析方法^[3] 吸取了 Polohcno 和 Hannus 的加权分位值方法中

的某些概念, 在分布尾部逼近原理上采用了平均值不变的条件, 使运算得以简化, 而在精度上与JC方法相比, 当 β 不大于1时基本上一致。不过这些改进都没有避免迭代计算的麻烦。许朝劲在分析JC方法产生误差的可能原因后, 建议直接取由均值中心到极限状态平面的垂足为验算点, 从而避免了迭代计算而得出 β 的近似值, 认为与JC方法相比吻合较好, 至少可作为JC方法的迭代初始值^[4]。

尽管JC方法以其方便和实用, 已得到工程界的认可, 但在实际应用中仍存在一些为题。对具有某些特殊分布类型的变量, 例如取值范围在下尾部的对数正态分布, 甚至是截尾的各类分布, JC方法的误差较大, 尤其当变量的变异性很大时。文献^[5]还讨论过非线性功能函数线性化和基本变量尾部正态逼近造成的误差问题。在这方面, 也提出过相应的改进方法, 陈星和Lind曾提出三参数正态尾部逼近方法^[6], 对外形较陡峭的分布类型, 其计算结果有所改善。更多的是在数值积分方法上针对不同情况采用相应的简化方法^[7-9], 以达到实用的目的。

按照Hasofer-Lind定义的可靠指标, 还发展了通过优化技术求解从均值中心到极限状态曲面最短距离的计算方法^[10, 11]。此外, Monte-Carlo方法在可靠度计算中应用的研究, 在国内也有所反映^[12]。考虑基本变量间相关性的结构可靠性计算的研究, 也在国内引起一定重视^[13-16], 一般都应用矩阵理论, 将非正态相关的变量空间变换到标准化独立当量正态变量空间, 由于忽略了当量正态化中的影响, 其结果是近似的。也有学者专门从事于考虑变量四阶矩的可靠度计算方法研究^[17-19]。

对于非线性的问题, 虽然目前都通过线性化而可给出近似解, 但加强二次可靠度方法的研究, 应作为开展今后工作的目标。国外在这方面的研究还是比较活跃, 其中某些见解仍值得我们借鉴。

(2) 荷载统计及荷载效应组合

对结构可靠性影响很大而又不易控制的外部因素是作用在结构上的荷载。在各工程部门中, 对结构设计中的荷载问题一直很重视。随着测试手段的改善, 给荷载数据的采集提供了一定条件。但由于荷载类别繁多, 其中有些荷载的数据较多, 而更多的荷载由于测试困难, 难以取得有代表性的大量样本, 因此小样本的统计分析仍是一个有待解决的问题, 国内对此已着手研究^[20-22]。对小样本仅依靠经典的统计数学确还难以解决问题, 主要是因为单纯的小样本难以说明选用某种分布类型的合理性, 希望今后逐渐加强这方面的探讨。

在可靠性分析中, 经常会涉及到基准期最大荷载的问题, 在这方面, 文献^[23]结合车辆荷载效应随机过程的特点, 提供了五类随机过程及其最大值分布的解析式。此外, 结合设计规范的修订, 各工程部门相继对其各自某些类型的荷载, 在取得足够数据的基础上, 应用根率统计理论进行了合理的分析^[24-29]。

荷载效应组合的研究在国内仍是薄弱的一环, 虽然可供参考的国外文献很多, 而且JCSS还建议了它们的组合规则, 但对其合理性尚难以定论。因此在荷载组合问题上, 目前的设计实践一般仍持保守态度, 这也不难理解。

(3) 模糊可靠度

自美国Zadeh创立模糊集合论以来,用数学语言描述事件的模糊性就有了可能。人们对客观事物认识的不确定性,除了由于无法控制的因果关系形成的随机性外,确实还存在着很多模棱两可的模糊因素,在处理结构可靠性问题时随时可遇,以往将这类不定性归为主观不定性,对这类不定性习惯上也武断地按随机性对待。引入由隶属函数刻划的模糊性后,以根率度量的结构可靠性将改为由模糊概率来度量。国内在处理结构安全等级、地震震害等级以及结构正常使用界限等问题上,以不同深度探讨了应用模糊概率的可能性^[30-36]。

除了模糊概率外,描述各种不定性的度量方法还有很多,文献^[37]在讨论现有结构可靠性评定专家系统时,共罗列了五种数学方法,都值得今后研究发展的。文献^[38]在讨论结构体系可靠性时,指出应用概率或模糊概率来度量体系可靠性的缺陷。作者建议通过物理的和专家经验方法,以某一种模糊测度来评估其可靠性。总之,关于在结构可靠性评估问题上,仍存在着广阔的、有待人们去开垦的研究领域。

二、结构体系可靠性问题

当前在结构可靠性研究中的大部分是在于解决一个功能函数的问题,也即是在结构中仅用一个极限状态方程表示的可靠性问题,例如构件的一个截面或结构中某点处发生失效的可靠度计算。现在设计规范中规定的结构目标指标,实际上也是指这类失效问题而言。对由诸元件组成的结构体系,其可靠度应由诸元件以及体系的各种失效模式所确定的极限状态方程得出。体系的失效与元件内在联系的形式(串、并联或其混合联系)有关^[39]。

从几何上,结构体系可分为一维杆系、二维板系和三维大体积体系。在一维体系中,较多的是涉及单向应力状态的问题,因此很容易按第一强度理论建立极限状态方程;板的问题则较多地涉及二向应力,大体积结构则涉及三向应力,这类问题的破坏机理要复杂得多,其极限状态方程要求建立在复杂应力状态的强度理论上,例如,对混凝土大坝的破坏准则,一般可采用四参数准则,对岩体则采用Mohr-Culomb和Drucker-Prager准则^[40]。

对体系可靠度问题,从一维杆系结构开始,比较集中在研究可能失效模式的问题上。Ma和Ang于1981年提出用非线性优化技术,寻找主要失效模式的方法,并通过计算机程序直接确定结构体系的失效模式^[41]。但由于计算机时量很大,只能用于较简单的结构体系。经以后很多学者的探讨,提出各种方法,这里就其中有代表性的方法作简单的介绍:

Murotsu的NTM法是基于结构弹性分析,按结点(刚架的截面或桁架的杆件)的失效次序,寻找可能的失效模式^[42,43];在分析过程中,按序移去失效结点,将其抗力改为荷载作用,在新的结构体系上继续计算,直到获得出现变形或内力无限大的破坏机构为止。本方法的问题在于:(1)仅适用于理想弹塑性材料的结构;(2)对计算中不漏掉主要失效机构的要求,没有给出必要的证明;(3)没有考虑荷载逐渐增长过程的影响。

Moses等人提出的增量荷载法ILM^[44,45],是将结构在荷载增量的作用下进行弹性

分析，当最不利结点失效后，对新的体系再增加荷载，继续计算，最后得到失效模式。由于计算变量均以均值为分析基础，因此所得失效模式不能反映荷载和抗力的随机性。

Mabners 等人提出的截尾算法TEM是前两种方法通过截尾计算结构中部分失效模式而得到体系可靠度的一般性方法^[46]，它不受理想弹塑性材料的限制，可以考虑材料的剩余强度，但该方法由于条件过宽而变得非常复杂，不便于实用。

线弹性、逐段线弹—塑性法PWLEP是Ranganathan在总结前三种方法的基础上提出的更精辟、更实用的方法^[47]。方法由结构刚度矩阵、线弹—塑性破坏模型、一次二阶矩可靠度计算和系统失效概率计算方法四部分组成。对于理想弹塑性材料组成的一维杆系结构，与前述的方法相比，本方法更为实用，但使用该方法是否肯定找到所有控制机构，作者也未能给出证明。

在国内，随着结构可靠度理论在建筑、铁路、公路、港工和水利水电五大工程部门中的应用日益广泛和逐步深入，人们深知一个结构体系的可靠度不能仅由其局部元件对某种失效形态的可靠度加以度量。在五个部门共同制定的《工程结构可靠度设计统一标准》（报批稿）中明确提出“当有条件时，工程结构宜按结构体系进行可靠度分析”。在《铁路工程结构可靠度设计统一标准》（送审稿）中提到“需要对整个结构进行结构体系可靠度分析，并当具备条件时，可在结构单元可靠性分析基础上，根据结构系统各失效模式之间的相关性进行分析计算”。为了不断提高设计规范的质量水平，全国工程结构基础标准技术委员会1986年第二次全体委员会制定的科研项目中，对体系可靠度的研究十分重视，将连续梁、简单刚架、高桩码头、重力坝等结构体系的可靠度分析列为研究课题，这种形势在客观上促进了结构体系可靠度理论的发展。

在水利工程中，整个结构往往难以分解为各个元件，而其破坏模式又十分复杂。因此，对水工结构历来重视其整体作用。河海大学从1962年开始，就在重力坝可靠度研究中，考虑了多种极限状态的结构可靠性问题^[48]。在文献^[48]中系统地介绍了体系失效概率计算的各种方法，并讨论了这些方法在一些结构，例如连续梁、简单平面刚架、升船机塔柱、重力坝等结构中的应用。

1987年在北京召开的第一届《工程结构可靠性》学术讨论会上，将结构体系可靠度的问题作为会议的主要议题。在特邀报告^[50]中指出，系统可靠度分析的关键在于寻找可能的失效模式，并介绍了寻找的各种方法，还指出，对弹性阶段工作的结构，可应用内力或应力系数法建立各种功能函数^[51]，对一些简单的一维杆系，可按产生塑性铰的可能位置寻找失效机构^[52-54]，认为线弹性、逐段线弹—塑性理论是寻找复杂体系失效模式最有希望的方法。在这次会议上，还提出很多论文^[55-58]，其中，有的以杆件生成塑性铰的截面为单元，借鉴极限分析的经验选取或寻找可能失效模式，有的则仿照极限分析方法探讨自动生成破坏机构的途径，有的通过框架破坏试验的结果，验证体系可靠度理论所得失效模式的正确性。这些成果正如各文献所述，一般只适用于简单的结构体系。

在第二届学术交流会议上，对一维杆系可靠度分析的方法，又提出一些论文，文献^[59]采用杆件（塑性铰截面）为分析单元寻找控制截面，建立功能函数，并求出体系可靠度，方法是按机动法，在常用荷载比值范围内，寻找主要失效机构，并引入条件概率来考虑

体系单元间的相关性。文献^[60]以机构组合法为基础,对某些规则框架,从荷载的实际情况出发,用分块组合法寻找框架体系的主要失效机构。文献^[61]在探讨结构体系可靠度近似计算方法方面做了许多研究工作。文献^[62]采用模糊测度理论和专家系统的方法,探讨结构体系可靠性问题。文献^[63]通过总结以及一些算例,归纳出结构系统可靠性与单元可靠性的关系。文献^[63]在PWLEP方法的基础上,对多跨高层框架结构进行了研究,并编制了体系可靠度分析程序,可以考虑有任意分布的变量和变量间的相关性,也考虑了失效模式间的相关性。

二、三维结构体系可靠度问题要比一维杆系结构复杂得多,水利工程结构中的不少问题都属于这类问题。河海大学从1985年就开始该课题的研究。在学习掌握基于矩阵理论的一维杆系结构可靠度计算方法^[64]基础上,导出适用于二维结构的随机有限元方法,完成了考虑变量随机和考虑单元划分随机的重力坝可靠度分析并取得初步成果^[65,66]。文献^[67,68]首次尝试基于随机有限元的PWLEP法分析一个典型的重力坝,探讨了在坝与地基不同弹模比值下的可能开裂深度与可靠度的关系、可能失效模式和体系可靠度。方法的贡献在于提出二维结构体系可靠度的分析途径、导出每一失效途径中开裂深度与可靠度的关系,通过条件概率反映单元功能函数间的相关性。在二维随机有限元的基础上,又推广到三维结构体系^[69],与二维相比,三维结构更为复杂,方法中作了一定的简化,河海大学在这方面做了很多工作,并为三峡多层大孔口重力坝、二滩拱坝完成了可靠性分析的任务^[70-72]。将变量的随机性与有限元方法相结合,使工程结构设计的效果更符合实际,并使今后有可能用计算机计算来代替大型的结构破坏试验。

尽管在结构体系可靠性研究上取得很大的进展,但要使计算方法完全进入实用阶段,还需要对以下问题进行深入的研究:

(1) 破坏准则。结构的失效模式是建立在结构的破坏机理上,只有搞清楚破坏机理并提出正确的破坏准则,才能建立符合实际的失效模式。目前在一维杆系结构中,方法只限于理想弹塑性材料的结构,还应根据不同结构的破坏特点,在可靠度计算中引入更为正确的破坏准则,例如,在杆件截面上具有复杂内力时,考虑塑性铰形成过程的影响。在二维和三维结构体系中,还要不断改进并完善相应的强度理论,以建立比较成熟的结构破坏准则。

(2) 寻找主要(控制)失效模式的方法。尽管目前的方法已经取得可以实用的效果,但如何保证不会漏掉主要失效模式,还没有从理论上加以论证。因此,随着研究的深入,力争有一个令人信服の説明。

(3) 相关性问题。对一维杆件结构,单元间和失效模式间的相关性问题已经得到较好的解决方法,但二维、三维结构中的相关问题,一般不好处理,尤其对失效模式间的相关性问题,还需进一步探讨。

三、结构动力可靠性问题

结构动力可靠度的计算在于确定结构在预定的期限内当涉及动态作用时仍不发生破

坏或失效的概率。在工程结构的设计中,要考慮的动态作用主要有地震、强风、波浪力等,这些作用不仅在事件发生的时间和空间上是随机的,而且每次事件作用的强度随时间的变化规律也是随机的。

由于结构的抗震设计在我国近年来受到极大的重视,与抗震有关的结构动力可靠性研究,同样也得到相应的注意而得到开展。结构动力可靠性涉及的有四个方面的问题,即(1)结构的失效或破坏机理与机制;(2)荷载的统计特性;(3)结构反应的概率分析;(4)结构抗力的概率统计分析。

在结构设计中,围绕着需要考虑的不同极限状态,而建立的不同失效机制,在很多论文中都有反映。在地震作用下,结构的破坏机理,在经过大量的动力试验和震害调查的基础上,已逐步地得到改进,我国学者多数采用变形和滞回耗能的双参数破坏模型^[73-76],也有采用低周疲劳模型的,他们都结合结构的不同特点而进行了讨论。关于在反复荷载作用下结构疲劳破坏机制将在第四部分中专门讨论。

关于风荷载作用下的结构失效机理,以往主要考虑结构在最大平均风压下的破坏,这属于结构静力可靠性范围。由于高层建筑的大量使用,在风的脉动作用下,结构顶层的水平振动造成人体不舒适感的后果,有时比较严重。要确定设计中的控制标准,就离不开相应极限状态的可靠性分析,国内已开始从可靠性的角度来研究这个问题^[77,78]。

在动态荷载的统计方面,在国外已有成果的基础上,对地震动的随机过程模型及参数的确定,国内也做了一些工作^[79-81],并根据大量地震记录资料,取得反映强地震最大峰值加速度、峰值速度、峰值位移、有效峰值加速度或持续时间等地面运动参数的统计规律^[82]。至于对我国各地震的危险性分析,在修订我国建筑抗震规范阶段,做了一些分析工作^[83-85],为适应“小震不坏,大震不倒”的抗震设计原则,用概率方法对多遇地震烈度和罕遇地震烈度给出相应的定义和定量方法,藉以满足三个烈度水准的设防要求^[86,87]。

关于风在结构上的动力影响,通常是通过脉动风速的随机特征来反映。目前在结构设计中还是普遍采用Davenport的风速功率谱,作为结构动力响应的计算依据。在国内对强风的实测工作虽然不能与国外相比,但也做了一定数量的实测和分析工作^[88-94]。其结果表明,Davenport谱总是偏于保守,而且也没有考虑其沿高度的变化规律。

近年来,国内外对在某一强度的地震作用下结构的弹性和弹塑性反应和结构抗力(构件的承载能力及结构层间的极限位移)的概率统计特性,包括概率分布类型和统计参数进行了大量的研究工作,并取得了一些令人瞩目的进展。

结构在地震作用下的随机反应分析,对于输入为白噪声或过滤白噪声的线性体系,其稳态反应和瞬态反应,以及输入为非平稳的随机反应都进行了系列的研究,当前可以说,对于线性系统,在随机激励下的反应分析方法还是相当成熟和完善的。由于在工程抗震设计中,习惯采用地面峰值加速度的反应谱,因而以地震反应的平均反应谱为输入的线性随机振动的分析方法得到了发展^[95,96]。同时对地震反应谱与功率谱之间的关系也进行了研究^[97],使平均反应谱方法的运用更加广泛。

在强震作用下,结构一般已进入弹塑性状态,对非线性系统的随机振动的分析方法

也进行了有成效的研究。Caughey首先提出在白噪声激励下，对弱非线性系统解Fokker-Planck方程的方法和统计等效线性化方法^[98,99]。但是，对具有滞回特性的强非线性系统，由于只能有条件地采用Markov过程的假定，而且高斯过程的性质又不能传递，这给随机反应的分析带来了很大困难，但经十几年来的努力，对具有滞回特性的非线性结构的随机地震反应的分析也已提出了一些近似方法，如峰值系数法、等效线性化法、摄动法等，其中尤以Y.K.Wen和小堀等人的研究，使这个问题得到较大的进展^[100-104]，他们从不同的角度处理结构弹塑性滞回特性这个问题，有的通过状态向量，并将弹塑性恢复力用非线性且非滞回的函数来描述，并通过富利哀变换最终可表示为一阶偏导可微的单值连续函数，从而对这类结构系统建立Fokker-Planck方程。还有的通过Bouc提出的函数^[100]并用等效线性化方法加以分析。我国不少学者也对等效线性化方法和其它近似方法进行了研究^[105-109]。

结构抗震可靠性的研究在我国日益受到重视，抗震可靠度的分析方法一般采用首次超越和低周疲劳破坏的分析方法^[110]，其中首次超越的界限，在弹性分析中一般沿用了结构构件承载能力的允许值，在弹塑性分析中采用了延性系数的允许值。这些界限值假定具有某种概率分布，近来也有学者提出应考虑界限模糊性的观点^[111,112]。

近年来，以概率为基础的承载能力极限状态的研究和应用逐步深入和扩大，通过系统的研究^[113,114]，我国的《建筑结构抗震设计规范》也采用了基于概率的抗震承载力设计表达式。

尽管国内在结构动力可靠性分析方面还是做了不少工作，但由于问题的复杂性，无论在分析方面，还是有效资料的采集方面，仍有很多难题，作为长期的任务，等待人们去探索并期望逐步得到解决。

四、结构疲劳可靠性问题

近年来随着铁路和公路桥梁、吊车梁、铁路混凝土轨枕、海洋建筑物等承受疲劳荷载的结构物的发展以及结构可靠性理论在土木工程中的广泛应用，结构疲劳可靠性问题日益受到重视。早在60年代开始，在铁道部门就已经开展了以可靠性理论为基础的轨枕疲劳设计方法的研究工作^[116,117]，在70年代又开始考虑不稳定重复荷载下的混凝土受弯构件的疲劳可靠性设计问题^[118,119]，同时在原国家建委支持下，中国建筑科学研究院、太原工学院、冶金部建筑研究总院等单位进行了大量的混凝土受弯构件正截面和斜截面在等幅荷载下的试验研究工作^[120,121]，为进一步开展疲劳可靠性的研究积累了可供利用的资料。

在80年代，结构疲劳可靠性研究主要是为了完成铁道部下达的《铁道建筑安全度(可靠性)及设计原理》科研项目^[122,123]，后来又结合由国家计委下达的《铁路工程结构设计统一标准》编制任务面进行，该标准业已完成，正在报批阶段。相应提出的部分科研成果也已通过验收^[124-127]。从1987年开始，全国各有关科研和高校单位接受全国钢筋混凝土结构标准技术委员会的委托，对《混凝土结构设计规范》第四批科研课题中，有关

受弯构件疲劳验算方法作进一步的研究。通过各单位的通力合作,已提出18个研究报告,并在此基础上,提出一个综合研究报告^[128]。

归纳近十年来的结构疲劳可靠性的研究工作,其主要成果可列出如下:

- (1) 对混凝土材料,以极限变形为判据,提出等幅重复应力下疲劳强度设计参数,并对变幅重复应力情况,提出转换为等幅重复应力的等效方法^[129-131];
- (2) 对钢筋、钢丝、钢绞线,以应力变程为指标,提出等幅重复应力下疲劳强度设计参数,并对变幅情况提出等效方法^[132];
- (3) 对钢结构及各种构造细节,提出在等幅重复应力下的疲劳强度设计参数,并对变幅情况提出等效方法^[133];
- (4) 在对铁路列车运营情况调查的基础上,制定了不同线路运量等级的标准荷载效应比频谱,为铁路桥梁疲劳荷载效应谱的制定创造了条件^[134];
- (5) 对工程结构疲劳承载能力极限状态可靠性验算,分别提出三种方法:等效重复应力系数法、等效重复应力可靠指标法和极限损伤度法^[126,135];
- (6) 继续对混凝土受弯构件正截面和斜截面进行了大量试验研究,为结构承载能力极限状态可靠性研究积累了原始资料^[136-139];
- (7) 对铁路混凝土和钢桥梁的荷载效应谱进行大量的实测工作,为铁路桥梁效应谱的制定提供了重要资料^[140,141];

对结构疲劳问题,在国内尽管已做了不少工作,但由于任务繁重而财力有限,工作很不平衡。在重复荷载效应的统计方面,仅着力于铁路桥梁,而对公路桥梁和吊车梁结构,还需要在这方面多做工作;对结构的疲劳性能,偏重于混凝土受弯构件的正截面,面对斜截面的资料较少;此外,对结构在重复荷载下的变形和裂缝问题还缺乏系统的研究;在钢结构方面还应加强构造细节疲劳性能的研究。

五、岩土工程的可靠性问题

国内在岩土工程中应用概率统计方法的问题,是在八十年代初期开始得到重视。中国力学学会岩土力学专业委员会于1983年,在上海召开了《概率论与统计学在岩土工程中的应用》专题学术座谈会;1986年在长春举行了《岩土力学参数的分析与解释》讨论会;1989年又在上海举行了《岩土力学新分析方法》讨论会。1991年在山东举行的中国力学学会第9届岩土力学专业委员会会议。在这些会议上发表了一系列的有关论文,包括在各种杂志上发表的有关论文,推动了学术研究的进展。

各工程部门由于要求编制各自的工程结构可靠度设计统一标准,从而在这方面的研究队伍又迅速扩大;以纳入设计规范为目标的研究专题在各部门也相继开展工作。在取得进展的同时,也提出许多有待探讨的问题。不少高等学校研究生的学位论文选题,也开始转向这个领域,进行了有益的探讨。综观了十年来的发展现状,研究内容大致可分为三个方面:

- (1) 在概念方面的探讨^[142-149],这部分虽然数量不多,但内容却十分重要。要将概