

基于可靠性理论的建筑工程结构工程质量设计

胡 崎

陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082

[摘要] 可靠性理论是使建筑工程结构的质量设计由传统的单系数法到概率极限状态设计转换的一种理论依据, 文中整理归纳了结构可靠性的基本知识及破坏标准, 研究荷载和抗力的概率分布形式以及不确定度表示方式, 叙述可靠度计算技术应用于工程结构设计领域的发展现状。构建全过程质量管理中的可靠性保证体系, 借助“潜在失效概率”的表述来阐述系统的冗余和质量管理的关系。对可靠度调整、变量取值、不确定度表征及敏感度控制等几种优化方案进行讨论, 提出一种基于风险管理的多目标优化方案。

[关键词] 可靠性理论; 建筑结构; 质量设计; 可靠度

DOI: 10.33142/ec.v9i3.19250

中图分类号: TU318

文献标识码: A

Quality Design of Building Structural Engineering Based on Reliability Theory

HU Qi

SCEGC Scientific Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710082, China

Abstract: Reliability theory is a theoretical basis for transforming the quality design of building engineering structures from traditional single coefficient method to probabilistic limit state design. This article summarizes the basic knowledge and failure standards of structural reliability, studies the probability distribution forms of loads and resistance, and uncertainty representation methods, and describes the development status of reliability calculation technology applied in the field of engineering structural design. Build a reliability assurance system in the entire process of quality management, and use the expression of "potential failure probability" to explain the relationship between system redundancy and quality management. Discuss several optimization schemes, including reliability adjustment, variable values, uncertainty characterization, and sensitivity control, and propose a multi-objective optimization scheme based on risk management.

Keywords: reliability theory; building structure; quality design; reliability

建筑物建筑工程质量设计方案的目的是在设计寿命期内用合理的设计费用保证结构的安全性、适用性及耐久性。传统的设计是运用一个安全系数的方法, 靠经验上的安全余量来抵消所有的不确定因素, 在结构越来越复杂化、新材料逐渐增多、设计使用年限也变长的情况下, 确定性的方案就显得不够准确了。而概率极限状态的设计模式则提供了一个更为可靠的方式。从 20 世纪后期国际结构安全度联合委员会 (JCSS) 提出概率极限设计的概念开始, 可靠性设计的方法也慢慢融入到了各个国家的标准里面去了。我国《工程结构通用规范》(GB 55001) 明确规定了建筑结构应该做承载能力极限状态、正常使用极限状态以及耐久性设计, 并要满足在设计使用年限内具有一定的可靠性。而《建筑结构可靠性评定标准》(T/CECS 1592—2024) 的确立完善了建筑结构可靠性评估的技术措施。

1 可靠性理论概述

1.1 可靠性的基本概念

结构可靠性的含义是在规定的时间内、在规定的作用下满足预定功能要求的可能性大小。它包括三方面: 结构的安全性、适用性、耐久性。而相应的结构可靠度就是可靠性的一种概率表达方式, 是指这个结构能够满足规

定的功能要求的概率。

设结构的荷载效应为 S , 结构抗力为 R , 则结构的功能函数可表达为:

$$Z = R - S \quad (1)$$

当大于零的时候是满足结构安全的要求; 等于零的是极限状态; 小于零表明结构已经失效了。结构失效的概率为:

$$P_f = P(Z < 0) = \int_0^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \quad (2)$$

其中, $F_R(s)$ 为抗力的累积分布函数, $f_S(s)$ 为荷载效应的概率密度函数。

与失效概率相对应, 可靠指标 β 定义为:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (3)$$

公式中是标准正态分布函数的逆函数, 可靠指标可以直接看出结构的安全余量, 在工程实践中广泛使用的可靠度表示参数之一。

1.2 可靠性理论在工程中的应用背景

可靠性理论应用于建筑工程结构经历了三个时期: 第一个时期是半经验半概率法 (20 世纪 40~70 年代), 设计是以安全系数为主导, 加入概率论的思想来对荷载以及抗力进行统计性分析; 第二个时期是近似概率设计法 (20 世纪 70~90 年代), 国际结构安全度联合会 (JCSS) 制

定的结构可靠性设计方案(JC法)为代表成果,使用一次二阶矩法近似求取可靠指标;我国颁布的建国后第一个《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68-84)首次把这种方法引入进来^[1]。第三个时期是全概率设计法(20世纪90年代以后)。伴随计算技术的进步,蒙特卡洛法、响应面法、概率密度演化法等逐步被采用,可靠的失效设计优化(RBDO)应用于复杂的结构时更具有优势了,在传统的可靠性理论里面是研究荷载和抗力间的随机变化性,在工程建设过程中存在的“粗差”很少有所涉及。历史上由于结构破坏的原因经常与粗差有关,因此可靠性理论和质量控制理论相结合的研究迫在眉睫。

2 建筑结构可靠性设计原理

2.1 结构可靠度与失效准则

结构可靠度设计的关键是如何制定正确的失效准则。承载力极限状态就是结构承载量达到最大的时候出现破坏,破坏后果比较严重,所要求的目标可靠度数值较大。而正常使用极限状态就是指结构出现过大的变形或者开裂的情况,它的目标可靠度相对较低一些。模糊结构可靠性计算方法存在的不可避免的模糊现象要被注意到。结构破坏是一个逐步演变的过程,用明确的标准来判断会造成可靠性估算误差。在模糊数学中引入了结构的可靠度概念并提出了模糊可靠指标的概念,在失效容差范围内进行分析与预测,从而得到可靠度,通过实例验证,得到模糊可靠度更加合理。

2.2 荷载与抗力的概率模型

荷载概率模型:恒载一般用正态函数来表示;活载、风载等变载荷随时间而变化,一般选取极值 I 或极值 II 函数,地震作用是一种随机的、非平稳过程,基于物理原理的随机地震模拟可以更好地考虑不确定性。

抗力概率模型:结构抗力与材料性能、几何尺寸以及计算模式的不确定性有关。材料强度(例如混凝土的抗压强度)、钢筋混凝土结构抗力变异系数一般是0.10~0.20。质量控制可以很好的减少材料性能的差异性,以贝叶斯更新进行的计算表明系统质量管理可以使得材料强度变异系数下降20%~30%。

荷载及结构效应组合:一般采用Turkstra准则和JCSS组合方案,主要荷载选择设计基准期内的最大值;附加荷载取瞬时值。

2.3 可靠度计算方法

近似解析法:一次二阶矩法(FORM)及二次二阶矩法(SORM)应用最多的是工程当中,用于解决显示的功能函数以及较低的非线性问题。

数值仿真法:蒙特卡洛模拟法(MCS)是结构可靠性计算的基础方法,在此基础上发展起来的重要性抽样及子集模拟法可用于有效解决小概率失效事件的效率问题;在屈曲约束支撑框架的可靠性最优化设计过程中,利用自

适应容许限法可以将工作量减少到原来的万分之1.52。

数值积分法:概率密度演化方法(PDEM)利用物理模型以及概率守恒准则联合来解决随机振动系统的可靠性分析中得到的概率密度函数,可以较好地解决非平稳及非高斯随机激励下系统的动力可靠度计算难题。

3 可靠性理论在工程质量设计中的应用

3.1 基于可靠度的设计标准与规范

我国建筑结构设计规范已经广泛采用以概率为基础的设计法,目前的《工程结构通用规范》(GB 55001)规定了建筑结构的安全等级分类及目标可靠指标(表1)。住宅建筑设计的安全等级不应低于二类,其中的目标可靠指标是以破坏模式划分而言的,即:延性破坏目标可靠指标为3.2;脆性破坏目标可靠指标为3.7。

表1 建筑结构安全等级与目标可靠指标

安全等级	破坏后果	结构类型示例	目标可靠指标 β (延性破坏)	目标可靠指标 β (脆性破坏)
一级	很严重	重要建筑、120m以上超高层	3.7	4.2
二级	严重	普通住宅、办公楼	3.2	3.7
三级	不严重	临时性建筑	2.7	3.2

在规范执行中,设计师不对可靠度指标直接求取,以分项系数表达式来进行设计:

$$\gamma_g S_{Gk} + \gamma_q S_{Qk} \leq R_k / \gamma_R \quad (4)$$

式中 γ_g 、 γ_q 、 γ_R 分别为永久荷载分项系数、可变荷载分项系数和抗力分项系数。这些分项系数是由可靠度修正得到的,在给定的目标可靠度水平上求得各类结构构件的最佳分项系数取值。

新发布的《建筑结构可靠性评定标准》(T/CECS 1592—2024)完善了既有结构的可靠性评定,包括混凝土结构、砌体结构、钢结构、钢-混凝土组合结构等结构类型。由中国建筑科学研究院有限公司主编,是我国不断的研究积累。

3.2 设计参数的不确定性处理

建设工程质量设计方案需要解决两类不确定性:随机性和非随机性。随机性是由结构所受荷载与材料强度自身的随机性质引起的;非随机性是由施工质量的变化以及检验误差、建模简化等因素造成的,质量控制是减少这种非随机性的主要方式,然而传统的工程设计对于质量控制的效果缺乏量化的考量因素^[2]。最新研究表明贝叶斯更新方法可以将符合性评价建模为一个概率过滤器,在接收到新的测量信息之后,重新估计其对应参数的概率分布状态,通过减小变异系数间接地达到减少分项系数的目的。

以砌体结构为例进行分析,对于砖强度、砂浆强度以及工程质量和管理的三方面因素的不确定性情况进行研究,其中对于主要影响因素即砖强度及工程质量采取强化质量管理措施后综合分项系数由1.50降低到1.38,相应的可节省材料费用大约8%,而对于次要影响因素即砂浆强

度采取强化质量管理措施后效果不明显为合理分配质量管理资源提供参考。

3.3 可靠度与工程经济性的平衡

结构的设计要在可靠性和经济性上进行权衡。增加可靠性一般会增大材料用量、施工费用等，但却减少了后期的事故损失以及维修费用。可靠性的设计最优化(RBDO)则可以提供出具体的数值化的选择依据^[3]。

基底隔震钢筋混凝土框架优化结果表明在随机地震作用下，使用 RBDO 方法进行优化设计所得到的隔震结构与传统的弹性抗震结构相比，安全系数增加，而造价减少；对 10 层钢筋混凝土框架而言，经过优化的隔震结构比基础固定的框架节省造价大约 15%~20% 左右，而且满足目标可靠度要求。

屈曲约束支撑框架可靠度最优化的研究表明，用自动容许界限的方法来改变确定性的约束的容许界限从而在不影响概率约束的情况下使其得到隐式满足，能节省大量的计算耗时达到 99.85%；这为复杂结构工程提供了切实可行的方法。

3.4 全过程质量控制中的可靠性保障

工程质量设计要覆盖从材料的生产到工程的建设再到运行的过程，关键是找到影响工程质量的关键环节，构建以预防为主保障机制。

雄安新区雄忻高铁项目实施中发现，隧道衬砌混凝土抗渗等级达到 P12 级别后，预埋注浆盒偏位问题成为质量问题的瓶颈。采取“全焊+钢卡固定”的做法，精确定位率达到百分之百，实现了 623 板衬砌和接近 5000 个注浆盒“零返工”，防水效果验收合格率 100%。用可靠性理论来分析，质量管理和冗余设计有着互补作用，在出现施工粗差等“冲击”时能提供一定的安全保障。但冗余的效果好坏与检测次数以及质量管理有关，最好的冗余量是在满足系统可靠度的前提下，对构件数量、截面尺寸以及检测手段进行联合优化的结果。

4 可靠性设计的优化策略

4.1 可靠度校准与设计参数优化

可靠度校正为计算出分项系数以及可靠性指标的基本步骤，传统可靠度校正是基于“平均”的意义之上的结构构件，无法体现不同种类结构的特点区别。精确化的可靠度校正应该注意到如下几点：①结构的重要性：重要的建筑物比如 120m 以上的超高层建筑等，其目标可靠指标可以适当提升，《住宅项目规范》GB55038—2025 规定可在满足设计工作年限大于 50 年或者业主方有更高要求的情况下安全等级取一级。②破坏形态：脆性破坏比延性破坏更危险，对可能发生脆性破坏的部分，即节点区、受剪部位要给予更高的可靠度标准。③失效后果：失效后果严重的结构例如大跨度公共建筑、人员密集场所应当拟定较高的目标可靠指标。

4.2 不确定性量化与敏感性控制

不确定性的量化是找出影响结构可靠度最大的几个重要因素，有针对性地进行质量管理，敏感度分析能定性的评价每个随机变量对失效概率的影响程度，根据对模糊随机可靠度的研究结果发现，结构抗力变异系数的影响最大。因此对于预应力空心板而言，在 0.10~0.20 之间变化的时候，可靠度就降低了大约百分之三十左右，这就需要我们着重注意的是材料强度的稳定情况。基于 FORM 的敏感性分析可以得到各随机变量的重要程度顺序，进而作为工程设计和施工过程中的质量管理的重点。

4.3 全过程可靠度协同管理

全过程可靠性协同管理的基本思想是：结构系统的最终可靠度是由其设计、施工、使用三个阶段可靠度相乘的结果。任何一个阶段出现问题都会影响整个系统的可靠度。设计阶段：应基于预定设计使用寿命年限内的可靠度来选择结构以及截面尺寸，确定出重要的质量控制要点与技术指标，在一些重要构件如转换梁、大跨度梁等处可以超出现行规范中的最小限值要求；施工阶段：应设立好原材料进场检查、施工过程管控、隐蔽工程验收的质量保障机制；在一些重点环节比如混凝土浇筑、钢筋绑扎、预应力张拉等地方需要采用现场监督的方式并保存记录影像证据。运营时期：要设立建筑结构安全监控体系，针对重点区域做好定期检查、维修工作，在遇到设计使用年限延长、使用功能变更或者发生事故性损伤之后应做可靠性评估。

表 2 不同质量控制水平对结构可靠度的影响(基于砌体墙算例)

质量控制方案	关键参数变异系数	综合分项系数	材料用量相对值	可靠指标 β
基准方案(无额外质控)	砖强度 $\delta = 0.20$, 施工 $\delta = 0.25$	1.50	1.00	3.2
仅控制砖强度	砖强度 $\delta = 0.12$, 施工 $\delta = 0.25$	1.46	0.97	3.3
仅控制施工质量	砖强度 $\delta = 0.20$, 施工 $\delta = 0.15$	1.42	0.95	3.4
综合控制	砖强度 $\delta = 0.12$, 施工 $\delta = 0.15$	1.38	0.92	3.5

4.4 基于风险的多目标决策优化

可靠度设计就是一种在可靠性和经济性之间寻找最佳折衷的方法。从风险的角度来看采用多目标决策方法把失效的概率和失效的影响因素相融合并且以整个生命周期的期望费用最小为目标函数进行最优解的设计：

$$C_{total} = C_{initial} + C_{inspection} + \sum P_f^{(t)} \cdot C_{failure}^{(t)} \quad (5)$$

式中表示的是起始建造费用，是检测保养费用，表示的是在第 n 年出现故障的概率，在第 n 年发生的损失，包含人员伤亡、财产损失、社会影响等。

针对有外力影响下的结构体系，例如施工粗差的影响下的结构体系，优化过程较为困难，在此情况下，系统冗

余度及质量控制之间存在着最佳搭配^[4]。在检测频次较高的情况下,能够尽早地发现问题并且进行相应的修补工作,在这种情况下不需要很高的冗余度就可以达到足够的可靠度,在检测频次较低的情况下就需要通过对冗余度的增大从而保证一定的安全度。这一结论对编制检测规范以及优化结构方案具有一定的参考意义。

5 结束语

可靠性理论给建筑工程质设提供了从定性到概率的方法转换。文章对可靠性基本理念、结构可靠度的设计原则、不确定因素的处理方式以及优化方案进行了详实介绍。主要观点有:一、结构可靠度设计由过去的经验概率法逐渐转变为现在的全面概率法,但是实际工程项目还是以经验系数的形式存在的。把质量控制的质量指标转化为对分项系数的调整幅度,这是联系可靠性理论与质量控制的一种方式。系统化质量控制可以使材料强度的分项系数降低到大约1.38,达到将近8%的节约量;二、质量控制与结构冗余之间具有一定的协作作用。对于有施工粗糙错误等外在因素的影响下,最佳结构方案应考虑部件的数量及截面积、观测次数之间的关系。全生命周期的质量管理在于发现重要变量,把质量管理投入在敏感性强的指标上。第三,通过可靠性的优化设计(RBDO)可以很好的处理安全可靠性和经济性之

间的矛盾,利用自适应容许限等一系列高效的算法可以使计算效率提升99%,为复杂结构工程的应用提供条件。

今后的研究工作是:加强对认知不确定性数量化的定量表示方式,丰富现有多种结构可靠评价方法,构建人工智能的可靠度代理模型,推广可靠度理论应用于全过程工程咨询领域。随着我国建筑业工业化、信息化及智能化程度提高,以可靠度为基础的质量设计方法将在“好房子”建造过程中起到更加重要的作用。

[参考文献]

- [1]吴洪亮.AI大模型驱动下企业数字化转型路径探索[J].智能城市,2026,12(1):114-118.
- [2]白利明.BIM技术在绿色建筑结构智能化设计中的应用[J].中国建筑金属结构,2026,25(1):43-45.
- [3]李仲元,张翔.高层建筑加层后结构抗震分析及加固设计研究[J].江西建材,2025(11):305-307.
- [4]刘伟.基于人工智能算法的高层建筑结构设计优化[J].产业创新研究,2025(18):117-119.

作者简介:胡崎(1993.12—),男,毕业院校:西安建筑科技大学,学历:硕士研究生,所学专业:结构工程,当前工作单位:陕西省建筑科学研究院有限公司,职称级别:中级。