

基于可靠性理论的建筑工程质量设计

刘冬勤

吉安市五建建筑工程有限公司 江西 吉安 343009

摘 要：建筑结构传统定值设计方法难以适配工程中的各类不确定性参数，易造成结构设计冗余失衡、服役质量稳定性不足等问题。本文以可靠性理论为核心支撑，结合建筑结构全生命周期设计、施工与服役特征，系统梳理材料、荷载、施工及环境四类不确定性影响因素。通过构建极限状态方程、优选计算模型、校准设计参数，建立适配实际工程的结构质量可靠性设计模型。针对主体承重结构、围护结构等分项工程，提出差异化可靠性设计策略与前置质量管控方法，并开展结构设计优化与风险防控研究。研究成果可有效改善传统设计弊端，提升建筑结构整体安全储备与服役质量，具备良好的工程应用价值。

关键词：可靠性；建筑结构；工程质量设计；模型构建；实施策略

引言：现阶段建筑工程结构日趋复杂，高层、大跨度及异形结构不断增多，结构服役面临的荷载波动、环境侵蚀、施工偏差等不确定问题愈发突出。传统经验化、定值化的设计模式，无法精准量化结构失效风险，难以满足现代建筑高质量、长寿命的建设要求。为切实提升结构工程设计的科学性与精准度，本文引入结构可靠性理论，以概率统计方法量化各类不确定因素对结构质量的影响。结合建筑分项工程的受力与功能差异，开展可靠性设计模型构建、施工管控及风险优化研究，为建筑结构工程质量精细化设计提供理论与实践参考。

1 建筑结构可靠性理论与质量设计基础体系

1.1 结构可靠性核心理论

建筑结构可靠性是指结构在规定使用年限、预设工况及常规环境条件下，完成安全承载、正常使用、耐久稳定等既定功能的能力，是结构工程质量管控的核心理论支撑。该理论以概率统计为核心依据，核心评价指标包含可靠度、失效概率与可靠指标三项内容。其中，可靠度为结构完成既定功能的概率，是衡量结构质量稳定性的核心标准；失效概率与可靠度互为互补关系，直观反映结构发生破损、变形、失稳等病害的风险概率；可靠指标可量化结构安全储备，规避了单一概率数值的局限性，是工程设计中常用的量化评价参数，为结构质量精准设计提供数据支撑。

1.2 建筑结构质量设计核心内涵与标准

建筑结构质量设计区别于常规外观与施工质量管控，聚焦结构体系本身的性能设计，核心是通过科学的参数取值、结构选型与方案设计，保障建筑全生命周期的综合

性能。其设计核心内涵涵盖安全性、适用性与耐久性三大维度，三者共同构成结构工程质量的核心框架。安全性保障建筑承受荷载、环境作用时不发生坍塌、破坏；适用性保证结构正常使用无超标变形、裂缝等问题；耐久性确保结构长期服役不受环境侵蚀、材料老化影响。现阶段工程质量设计均严格依据国家现行建筑结构设计规范，形成了量化、标准化的质量评价体系^[1]。

2 建筑结构工程质量设计不确定性影响因素

建筑结构在设计、施工与服役全过程中存在大量随机不确定性参数，是导致实际结构质量与设计预期存在偏差的主要原因。结合工程实际，结构质量设计的不确定性主要分为材料、荷载、施工与环境四类。（1）材料性能不确定性。混凝土、钢材、砌体等结构主材的力学参数存在天然离散性。受原材料批次、生产工艺、养护质量、加工精度等影响，材料强度、弹性模量等指标存在波动，直接改变构件实际承载水平，对梁柱、基础等核心受力构件的设计精度产生直接影响。（2）荷载参数不确定性。建筑永久荷载、可变荷载及偶然荷载均具有随机波动特征。楼面活荷载、风荷载、雪荷载随使用场景与气候条件动态变化，地震、极端强风等偶然荷载具有突发性，无法通过固定公式精准取值，是结构设计中最主要的不确定性变量。（3）施工工艺不确定性。现场施工存在人工操作误差、设备精度偏差与工序管控差异，容易出现构件尺寸偏差、钢筋偏移、混凝土密实度不足、接缝处理不规范等问题。施工偏差会造成实际结构体系与理论模型不一致，直接降低结构整体受力稳定性与质量储备。（4）服役环境不确定性。建筑结构长期处于自然环境中，冻融循环、温湿度变化、酸碱侵蚀、

风化老化等因素会持续造成材料性能衰减。环境作用具备长期性与随机性,无法在初始设计中完全量化,对结构长期服役质量与耐久可靠性造成显著影响^[2]。

3 基于可靠性理论的结构质量设计模型构建

3.1 结构极限状态方程建立

极限状态方程是可靠性设计模型的核心基础,用于界定结构安全与失效的临界状态,贴合实际结构受力与变形特性建立方程体系。(1)依据建筑结构设计规范,区分承载能力极限状态与正常使用极限状态两类核心工况,以结构抗力与荷载效应为核心变量,构建基础极限状态函数。(2)结合前文梳理的材料、荷载、施工等不确定因素,将变量的离散性、随机性纳入方程,摒弃传统固定参数取值模式。(3)针对梁柱、楼板、基础等不同结构构件的受力特征,微调方程参数维度,保证方程适配各类结构分项的质量设计要求,贴合工程实际受力状态。

3.2 结构可靠度计算模型选取

结合建筑工程的实用性与计算精准度,选用适配的可靠度计算模型,兼顾计算效率与工程精度。(1)针对常规建筑结构,采用一次二阶矩法作为核心计算模型,该模型计算流程简洁、稳定性强,适配大部分民用建筑的可靠性计算。(2)针对复杂高层、大跨度建筑结构,引入蒙特卡洛模拟法,解决多变量、非线性结构的可靠度计算难题,适配复杂结构质量设计需求。(3)根据结构体系差异,区分构件可靠度与整体体系可靠度计算模式,规避单一构件计算无法反映整体结构质量性能的问题。

3.3 质量设计参数概率校准

参数校准是保障设计模型贴合实际工程的关键步骤,主要对结构设计核心参数的概率特征进行修正优化。(1)统计区域同类建筑建材强度、弹性模量等核心参数的实测数据,明确参数均值、方差、分布类型,替换规范通用经验数值。(2)结合建筑服役场地的荷载实测数据,校准恒荷载、活荷载、风荷载的概率取值,贴合项目实际工况。(3)结合常规施工偏差范围,修正结构几何尺寸、构件定位等参数的浮动区间,实现设计参数与现场施工实际的精准匹配。

3.4 模型求解与精度验证

完成模型搭建与参数校准后,开展模型求解与精度核验,保障模型可直接用于工程质量设计。(1)依托结构设计计算软件,代入校准后的概率参数求解模型,计算结构可靠指标与失效概率,明确结构质量安全储

备。(2)对比规范规定的可靠度标准值,校验模型计算结果的合规性,对不满足规范要求的参数进行二次优化。(3)通过多组工程实测数据迭代验算,修正模型计算误差,保障模型稳定性、精准性,使其适用于各类建筑结构质量设计工作^[3]。

4 建筑结构分项工程可靠性质量设计实施策略

4.1 主体承重结构可靠性设计

主体承重结构是建筑荷载传递的核心体系,包含梁、板、柱、剪力墙、基础等关键构件,其可靠度直接决定建筑整体结构安全,设计过程需以承载能力极限状态为核心,量化控制结构失效概率。(1)明确差异化可靠指标取值。根据构件受力重要程度划分安全等级,框架柱、剪力墙、基础等核心承重构件选取规范上限可靠指标,严格控制受压、受剪、失稳失效概率;楼板、次梁等次要受力构件适度优化冗余参数,在满足安全标准的前提下控制工程成本,避免设计冗余过剩。(2)优化荷载组合设计方式。摒弃传统固定荷载组合系数的定值设计模式,结合荷载概率分布特征,对恒荷载、活荷载、风荷载、地震荷载进行随机组合验算,覆盖结构最不利受力工况,解决特殊工况下结构承载力不足的问题。(3)把控构件细部受力可靠性。针对梁柱节点、构件支座、基础衔接等应力集中区域,单独开展可靠性验算,重点防控局部开裂、变形、剪切破坏等常见质量缺陷,保障承重结构体系受力均衡、性能稳定。

4.2 围护结构可靠性优化设计

围护结构包含外墙、屋面、门窗、幕墙等构件,不承担主要承重任务,核心设计重点为适用性、密封性、抗变形性能及耐久可靠性,需结合环境工况开展针对性优化设计。(1)控制结构变形可靠性。围护结构自身刚度较小,易受温度应力、风荷载、主体结构沉降影响产生变形开裂。设计阶段需限定围护构件极限变形值,通过概率验算明确不同环境工况下的变形允许范围,规避墙体开裂、幕墙变形、屋面渗漏等质量问题。(2)强化环境适配可靠性。结合项目所在地温湿度变化、风雨侵蚀、紫外线老化等环境特征,优化围护结构材料选型与构造做法,通过参数概率校准确定保温、防水、抗腐蚀构造厚度,保障围护结构长期服役稳定性。(3)优化连接节点可靠性。围护结构失效多源于节点连接松动、错位、脱落,设计中需对预埋件、连接件、拼接节点进行可靠性验算,统一节点施工精度标准,降低节点失效概率,提升围护结构整体稳定性^[4]。

4.3 结构安全、适用、耐久协同设计

建筑结构质量设计并非单一的安全设计,需基于可靠性理论,统筹安全性、适用性、耐久性三大核心指标,实现多性能维度的协同匹配,规避单一性能达标、整体性能失衡的设计问题。(1)安全性为核心底线。以结构可靠指标为控制依据,所有分项结构设计均需满足承载能力极限状态要求,杜绝坍塌、断裂、失稳等重大结构风险,构建结构质量安全基础。(2)适用性为控制标准。在安全达标前提下,验算结构正常使用极限状态,严格控制构件挠度、裂缝宽度、结构振动等参数,保障建筑使用功能满足设计与规范要求,避免影响日常使用体验。(3)耐久性为长期保障。结合建筑设计使用年限,考虑材料老化、环境侵蚀、荷载疲劳等不确定因素,对结构长期性能衰减规律进行概率预判,通过优化材料参数、增设防护构造,保障结构全生命周期质量稳定,实现三大性能的协同统一。

4.4 基于可靠性的前置质量管控方法

传统质量管控多集中于施工完成后的验收阶段,属于事后整改模式,管控效率低、整改成本高。基于可靠性理论的前置管控,将质量控制前移至设计、施工筹备阶段,从源头规避结构质量隐患。(1)设计阶段参数前置管控。梳理所有结构设计参数的概率波动范围,明确材料性能、构件尺寸、荷载取值的允许偏差区间,在设计文件中明确可靠性控制指标,为施工管控提供精准依据。(2)施工偏差前置预判。结合可靠性模型,预判施工过程中材料离散、工艺偏差、设备误差可能引发的结构性能波动,提前制定施工管控标准,对钢筋布置、混凝土浇筑、构件安装等关键工序设定精度控制阈值。(3)建立动态校核机制。在施工全过程中,阶段性开展结构可靠度复核验算,根据现场实测参数修正设计模型,及时调整施工方案,确保施工完成后的结构实际可靠度与设计标准一致,实现结构质量的全过程可控^[5]。

5 基于可靠性的结构质量设计优化与风险防控

建筑结构质量设计需兼顾性能标准与工程效益,同时规避全周期服役风险。传统设计模式存在冗余分配不均、风险识别滞后等问题,依托可靠性理论开展设计优化与风险防控,可实现结构质量、安全与经济指标的平

衡,提升结构整体服役稳定性。(1)质量与经济性协同优化设计。以结构可靠指标为控制基准,摒弃一刀切的保守设计方式,根据构件重要等级差异化分配安全冗余。核心承重构件保留充足可靠度储备,次要构件在满足规范可靠度要求的前提下优化截面尺寸、材料用量,减少资源浪费,实现结构质量达标与工程造价可控的双向平衡。(2)结构薄弱环节可靠性补强。通过可靠度计算模型筛查梁柱节点、长短跨交接处、地基过渡段等薄弱部位,精准定位可靠度偏低区域。针对结构局部应力集中、变形超限等问题,采用优化配筋、调整结构布局、增设构造措施等方式补强,消除局部质量隐患,均衡整体结构可靠度水平。(3)全生命周期质量风险防控。结合结构服役过程中的材料衰减、环境侵蚀、荷载波动等不确定因素,建立动态风险防控机制。依据可靠性变化规律,划分施工、使用、老化各阶段风险等级,制定对应的管控、检测与维护标准,提前预判结构性能退化风险,保障长期结构质量稳定。

结束语: 本文基于可靠性理论完成建筑结构质量设计体系的系统性研究,明确了各类不确定性因素对结构质量的影响机制,搭建了可适配工程实际的可靠性设计计算模型。通过区分主体结构与围护结构的性能差异,形成了针对性的分项设计策略,建立了前置式质量管控与全周期风险防控体系。研究证实,可靠性设计可有效弥补传统定值设计的缺陷,均衡结构安全冗余,兼顾工程质量与经济效益。

参考文献

- [1] 江琳娜. 基于可靠性理论的建筑结构工程质量设计[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(19): 10-12.
- [2] 胡崎. 基于可靠性理论的建筑结构工程质量设计[J]. 工程建设(维泽科技), 2026, 9(3): 42-45.
- [3] 官子建. 建筑结构设计施工衔接对工程质量的重要性分析[J]. 产品可靠性报告, 2025(7): 249-250.
- [4] 陈宁. 建筑工程深基坑支护结构设计优化与实施方案[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2026(3): 107-110.
- [5] 刘扁. 基于结构抗震性能视域的复杂高层建筑工程设计探索[J]. 中国科技期刊数据库工业B, 2026(1): 009-012.