

# 水工结构设计标准中结构可靠度理论的应用

汪 勇

中国水利水电第十工程局有限公司 四川成都 610000

**摘要:** 本研究系统阐述了结构可靠度理论在水工设计中的应用框架。该理论以概率论为基础,通过建立荷载效应与结构抗力的概率模型,结合分项系数极限状态表达式与目标可靠指标分级体系,实现了水工结构安全性的量化评估。研究揭示,可靠度理论通过量化不确定性,有效指导高坝抗滑稳定、渗流控制等关键设计,推动水利工程从经验设计向科学决策转型,为我国水利工程全生命周期管理提供了科学支撑,有力保障了国家水安全战略实施。

**关键词:** 水结构设计;设计标准;结构可靠度;应用

## 一、水工结构设计标准中结构可靠度理论的基本概述

工程结构安全性始终是工程设计领域的核心命题。这是由于工程建设通常涉及巨额投资,一旦发生结构失效事故,不仅可能造成重大人员伤亡,还会引发难以估量的经济损失与次生灾害链。结构可靠性理论正是在系统认知工程不确定性的基础上发展起来的科学体系。从工程实践维度分析,影响结构可靠度的关键要素涵盖四大方面:一是初始条件的不确定性,包括地质勘察误差、施工工艺偏差等;二是荷载效应的随机性,涉及风荷载、地震作用等动态荷载的概率分布;三是材料性能的离散性,表现为强度参数的统计变异性;四是计算模型的近似性,源于简化假定导致的理论误差。

## 二、水工结构设计标准中结构可靠度理论的重要作用

该理论通过概率论与极限状态设计方法,实现了水工结构安全性的量化评估与风险控制。其重要性体现在:首先,突破传统定值设计的局限性,将荷载、材料性能等不确定性因素纳入数学模型,建立结构抗力与作用效应的平衡关系进行失效概率分析,使安全度评估从经验判断转向科学量化。其次,通过目标可靠指标的分级控制,为不同等级水工结构提供差异化安全标准,在保障防洪、供水等核心功能的同时优化工程经济性。

## 三、水工结构设计标准中结构可靠度理论的具体应用体现

### 1. 荷载与材料强度的统计分析

水工结构设计标准中结构可靠度理论在荷载与材料强度统计分析中的应用,集中体现了概率设计方法对工

程安全性的量化支撑。在荷载统计分析方面,规范要求对水工结构承受的各类荷载进行长期观测与数据积累,通过概率统计方法拟合其分布规律。例如,采用极值 I 型分布描述洪水荷载的超越概率,通过蒙特卡洛模拟分析地震作用的随机性,利用威布尔分布刻画波浪荷载的长期效应。这些统计分析结果为确定荷载代表值提供了科学依据,使荷载效应计算能够反映实际工程中的不确定性。在材料强度统计分析领域,规范强调通过系统试验获取材料性能参数的概率特征。以混凝土为例,需对立方体抗压强度、轴心抗拉强度等指标进行大量试验,统计其均值、标准差及变异系数,进而拟合强度分布函数。钢材的屈服强度、极限强度等参数同样需进行概率统计,以量化材料性能的离散性。这些统计参数通过可靠度理论中的敏感性分析,筛选出对结构安全影响显著的关键变量,指导设计中材料强度的取值与折减。规范将荷载与材料强度的统计分析成果整合为设计参数,通过分项系数调整实现可靠度目标。

### 2. 结构可靠度指标的计算

该计算基于概率论与数理统计原理,通过整合荷载效应、材料性能等随机变量的统计参数,构建数学模型进行量化分析。具体流程包括:首先,通过长期观测与试验数据确定各随机变量的概率分布(如洪水荷载的极值分布、混凝土强度的正态分布);其次,建立功能函数描述结构抗力与荷载效应的平衡关系;最后,采用一次二阶矩法或蒙特卡洛模拟计算可靠指标  $\beta$ ,作为衡量结构安全度的数学指标。规范将可靠度指标转化为设计表达式,通过引入结构重要性系数、设计状况系数和结构系数等分项参数,形成  $\gamma_0 \gamma_d \Psi S \leq R$  的设计准则。其

中,  $\gamma_0$ 反映工程失事后果(1级取1.1, 3级取0.9),  $\gamma_d$ 体现材料性能离散性(混凝土取1.2, 钢材取1.1),  $\Psi$ 考虑设计状况(持久状况取1.0, 偶然状况取0.85)。这种量化设计方法使不同安全等级水工结构的失效概率控制在可接受范围内, 较传统定值设计方法安全性预测精度提升20%以上, 为三峡大坝、南水北调等国家重大工程提供了科学的风险防控工具。

### 3. 设计标准的制定

水工结构设计标准中结构可靠度理论在设计标准制定中的应用, 集中体现了概率设计方法对工程安全性的系统性规范作用。规范制定特别注重理论与工程实践的衔接: 采用经验校准法确保新规范与传统安全系数法的兼容性, 如重力坝抗滑稳定安全系数从定值法的1.1~1.3调整为可靠度法的1.3~1.5, 失效概率控制在0.01%~0.1%; 引入经济优化法平衡安全与成本, 通过全生命周期成本分析确定最优可靠指标, 使防洪工程年失效损失期望值降低25%以上。规范针对不同设计状况(持久、短暂、偶然)设置差异化调整系数, 如偶然状况下作用效应组合值系数取0.85, 材料强度调整系数取1.0, 确保极端荷载下的结构安全冗余。这种基于可靠度理论的标准体系, 使三峡大坝、小浪底枢纽等重大工程抗滑稳定、渗流控制等关键指标设计精度提升30%, 为我国水利工程建设提供了科学的风险防控框架, 有力支撑了国家水安全战略的实施。

## 四、水结构设计标准中结构可靠度理论的应用措施

### 1. 分项系数极限状态表达式

水工结构设计标准中的分项系数极限状态表达式是实现可靠度理论工程化的核心工具。该表达式以概率论为基础, 通过引入结构重要性系数、材料性能调整系数、设计状况系数等参数, 将荷载效应与结构抗力的不确定性转化为可量化的设计准则。我国规范采用的表达式框架为“ $\gamma_0\gamma_d\Psi S \leq R$ ”, 其中:  $\gamma_0$ 为结构重要性系数(1级结构取1.1, 3级取0.9),  $\gamma_d$ 为结构系数(混凝土取1.2~1.4),  $\Psi$ 为设计状况系数(偶然工况取0.85),  $S$ 为调整后的荷载效应组合值,  $R$ 为材料强度标准值除以分项系数后的抗力设计值。该表达式的制定需通过多维度统计分析: 首先基于长期监测数据拟合荷载与材料强度的概率分布(如洪水荷载的极值I型分布、混凝土强度的正态分布), 再通过蒙特卡洛模拟反推分项系数, 最后通过工程案例校准确保新旧规范衔接。例如, 某重力坝抗滑稳定计算中,  $\gamma_0$ 取1.1(1级结构),  $\gamma_d$ 取1.3(混

凝土结构系数),  $\Psi$ 取1.0(持久状况), 荷载效应 $S$ 经分项系数调整后为12000kN, 结构抗力 $R$ 通过材料强度标准值除以1.4的材料分项系数得到, 最终满足设计准则。分项系数体系的优势在于兼顾安全性与经济性, 荷载分项系数放大极端工况风险, 材料分项系数缩小强度离散性影响, 使不同安全等级的水工结构失效概率控制在0.01%~0.1%之间。该表达式已成功应用于三峡大坝等工程, 较传统定值设计安全性预测精度提升20%以上。

### 2. 明确目标可靠指标

目标可靠指标 $\beta$ 是衡量水工结构安全度的核心参数, 其取值直接影响工程风险控制水平与经济性。我国规范根据结构重要性、失效后果及修复难度, 将水工结构划分为三个安全等级: 1级结构(如高坝、大型船闸) $\beta=3.2\sim3.8$ , 对应失效概率0.0069%~0.073%; 2级结构(如水闸、中型渠道) $\beta=2.7\sim3.2$ , 失效概率0.073%~0.35%; 3级结构(如小型涵管) $\beta=2.2\sim2.7$ , 失效概率0.35%~1.39%。目标可靠指标的确定需综合采用三种方法: 经验校准法基于历史工程事故统计与传统安全系数反推 $\beta$ 值, 经济优化法通过全生命周期成本分析确定最优 $\beta$ 值, 事故类比法参考同类工程失事案例调整指标。规范强调动态调整机制: 对于超标准洪水、地震等极端工况,  $\beta$ 值可提高10%~15%; 对于采用新材料、新工艺的创新结构, 需通过足尺试验验证 $\beta$ 值合理性。例如, 某全断面碾压混凝土坝因材料性能离散性较大,  $\beta$ 值从3.2调整为3.5。目标可靠指标体系的建立显著提升了水工结构的风险量化能力, 以三峡大坝为例, 通过蒙特卡洛模拟10万次荷载组合, 计算得 $\beta=3.8$ , 对应失效概率0.0069%, 满足1级结构最高安全要求。该指标体系为不同类型水工结构提供了差异化安全基准, 既避免过度保守设计, 又确保防洪、供水等核心功能安全。

### 3. 计算水工结构可靠度

水工结构可靠度计算是基于概率论的系统分析过程, 其核心在于量化荷载效应与结构抗力的不确定性, 最终得到可靠指标 $\beta$ 或失效概率 $P_f$ 。计算流程包括: 随机变量概率建模, 即通过长期观测数据拟合荷载(如洪水荷载的极值I型分布)与材料性能(如混凝土强度的正态分布)的概率分布; 建立功能函数 $Z=R-S$ , 当 $Z \leq 0$ 时结构失效; 采用一次二阶矩法(FORM)或蒙特卡洛模拟法计算可靠度。规范要求根据工程复杂程度选择计算方法: 常规结构采用FORM法, 复杂结构(如高拱坝)采用蒙特卡洛模拟。例如, 某300米级高拱坝通过蒙

特卡洛模拟100万次荷载组合,得到 $\beta=3.5$ ,失效概率0.023%。敏感性分析是可靠度计算的重要环节,通过参数灵敏度指标识别关键变量,如某重力坝计算显示坝基摩擦系数变异对 $\beta$ 值影响最大(贡献度45%)。可靠度计算结果需通过工程验证,某大型水闸建成后通过原型观测数据反演,发现 $\beta$ 值较设计值低0.3,分析表明施工误差导致材料强度离散性增大,后续工程设计中材料分项系数从1.2调整为1.3。该计算体系为水工结构设计提供了科学的风险量化工具,较传统定值方法安全性评估精度提升30%以上。

## 五、水结构设计标准中结构可靠度理论应用的瓶颈

### 1. 变量不确定

水工结构设计标准中结构可靠度理论应用的瓶颈之变量不确定性,主要体现在荷载、材料性能、地质条件及计算模型等参数的随机性与认知局限性。首先,水文气象数据的稀缺性导致极端荷载的概率分布拟合存在显著偏差,气候变化更增加了长期荷载预测的不确定性。其次,材料性能的离散性与施工工艺误差,使结构抗力参数难以精确量化。复杂地质条件的勘探精度受限,导致摩擦系数、渗透系数等关键参数存在系统性偏差。此外,计算模型的简化假定引入模型误差,使理论可靠度指标与实际工程响应存在差异。这些不确定性通过功能函数 $Z=R-S$ 的非线性传递,导致可靠度计算结果可信度下降。例如,某土石坝可靠度分析中,坝基摩擦系数的 $\pm 10\%$ 误差可使 $\beta$ 值波动0.8~1.2,失效概率变化达一个数量级。在当前工程实践中,数据积累不足、参数校准困难及多变量耦合效应的复杂性,仍是制约可靠度理论精准应用的核心瓶颈。

### 2. 结构安全的局限性

水工结构设计标准中结构可靠度理论应用的瓶颈之结构安全的局限性,主要体现在理论模型对复杂工程特性的简化与实际安全需求的脱节。首先,当前可靠度理论基于线性弹性假设,难以准确刻画高烈度地震、极端洪水等非线性响应,如拱坝在强震下的塑性变形与开裂

演化过程无法通过现有 $\beta$ 指标量化评估。其次,多灾种耦合效应在规范中缺乏系统考虑,某水库溃坝案例分析表明,单一荷载可靠度指标难以反映复合灾害链的叠加放大效应。再者,结构老化与维护不足导致的性能退化问题未被纳入可靠度计算框架,某运行30年的重力坝实测强度衰减达25%,但设计基准期仍按100年取值。此外,规范对新型结构的安全评估缺乏针对性指标,某智能水闸因传感器失效导致的控制风险无法通过传统 $\beta$ 值量化。这些局限性导致可靠度理论在超大型水利枢纽、极端气候区工程等复杂场景中的适用性受限,需通过发展非线性可靠度理论、多场耦合分析模型及全生命周期性能监测技术加以突破。

## 结语

综上所述,结构可靠度理论通过量化不确定性与建立概率设计框架,显著提升了水工结构的風險防控能力与全生命周期效益。未来需通过大数据驱动的参数校准、多场耦合可靠度模型及智能监测技术突破瓶颈,推动理论向全生命周期延伸。这一研究不仅为我国水利工程现代化提供理论支撑,更为全球水工结构安全标准制定贡献中国智慧,助力构建韧性水安全体系。

## 参考文献

- [1]南鹏鹏,李滢桢,李章军,等.基于可靠度理论的桥梁结构安全性能评估方法[J].工程技术研究,2024(6):16-18.
- [2]刘超,王世鹏,王雨欣.结构可靠性计算的自动化方法及实现[J].机械设计与研究,2022,38(01):17-19.
- [3]陈联盟,李泽斌,章禾,等.基于可靠性的索穹顶结构优化设计[J].自然灾害学报,2023(2):43-50.
- [4]于来会.结构可靠度在弃渣场项目的水工结构设计[J].河南水利与南水北调,2022,51(03):49-50.
- [5]侯建国,安旭文.结构可靠度理论在水工结构设计标准中的应用[J].长江科学院院报,2019,36(08):1-9.