

考虑全寿命周期低碳增量成本的建筑物 目标可靠指标研究

张振浩, 苏 越

(长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为在结构设计中兼顾全寿命周期低碳排放、经济性与安全性, 量化低碳增量成本对优化决策的影响至关重要。文章提出全寿命周期低碳增量成本概念, 即在全寿命周期内因降低碳排放而产生的额外成本, 构建融合低碳约束的结构可靠度与成本优化模型。基于该模型, 系统量化分析了荷载与抗力的变异系数及概率分布类型对优化结果的影响。结果表明: 变异系数的增大将显著提高最优安全系数, 但同时降低最优可靠指标; 而概率分布类型的影响相对微弱。以钢筋混凝土框架结构公寓楼为研究对象, 确定该类结构在多种失效后果等级(轻微、中等、严重)与安全措施成本水平(高、中、低)组合下的年度最优目标可靠指标推荐值。相较于传统规范值, 该系列推荐值相差 0.02 至 0.23, 可为推进低碳建筑在可靠度、经济性与可持续性三方面的协同优化设计提供定量决策依据。

关键词: 低碳增量成本; 成本优化; 目标可靠指标; 低碳建筑

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)07-0056-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.07.079

Research on target reliability index for buildings considering life-cycle low-carbon incremental cost

ZHANG Zhenhao, SU Yue

(Changsha University of Science and Technology, School of Civil and Environmental Engineering,
Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In order to take into account the low-carbon emission, economy and safety in the whole life cycle in structural design, it is very important to quantify the impact of low-carbon incremental cost on optimization decision-making. This paper proposes the concept of low-carbon incremental cost in the whole life cycle, that is, the additional cost caused by reducing carbon emissions in the whole life cycle, and constructs a structural reliability and cost optimization model that integrates low-carbon constraints. Based on this model, the influence of the variation coefficient and probability distribution type of load and resistance on the optimization results is quantitatively analyzed. The results show that the increase of the coefficient of variation will significantly improve the optimal safety factor, but at the same time reduce the optimal reliability index; the influence of probability distribution type is relatively weak. Taking the reinforced concrete frame structure apartment building as the research object, the recommended value of the annual optimal target reliability index of this kind of structure under the combination of various failure consequence levels (slight, medium and serious) and safety measures cost levels (high, medium and low) is determined. Compared with the traditional standard values, the recommended values of this series differ from 0.02 to 0.23, which can provide quantitative decision-making basis for promoting the collaborative optimization design of low-carbon buildings in terms of reliability, economy and sustainability.

Key words: low-carbon incremental cost; cost optimization method; target reliability index; low-carbon building

收稿日期: 2025-12-21

基金项目: 湖南省科技人才托举工程资助项目(2023TJ-Z17)

作者简介: 张振浩(1980—), 男, 教授, 从事结构动力可靠度理论及其应用研究。

建筑结构的安全性与经济性,始终是工程设计的核心问题。现行的结构设计规范通过规定“目标可靠指标”,来确保结构在预定的设计使用年限内具备足够的可靠度,以承受各种可能的荷载作用。它是规范设定的基准安全水平。随着全球双碳战略的深入推进,建筑业作为能源消耗和碳排放的重点领域,其绿色低碳转型已刻不容缓,这也对结构设计的安全性与经济性带来了新要求与挑战。

现有的研究大多将安全、经济、低碳作为分离的目标进行讨论。例如,袁阳光等^[1]采用了个体风险准则、社会风险准则、寿命质量指标和成本优化方法,确定了构件服役阶段的目标可靠指标。王燕平等^[2]采用校准法与经济优化法相结合的研究思路,对公路路堤结构设计方法的隐含可靠度进行了分析,并基于设计阶段各项费用的经济优化,提出了路堤结构目标可靠指标的推荐值。WAY 等^[3]针对南非国情,基于经济成本优化和社会风险方法,建议南非新建公路桥梁的年度目标可靠指标取值为 $\beta=4.2$ 。SU 等^[4]通过调查中国在役中小跨桥梁历史事故造成的人类致死率和死亡人数数据,并将其纳入个体风险标准、群体风险标准、成本优化以及边际生命救援成本估算中,为中小跨桥梁上部结构及其构件推荐了 3 种安全水平的目标可靠指标值。

上述研究都从经济角度考虑目标可靠指标的取值,而尚未考虑低碳约束对设计决策的影响。事实上,结构的可靠性水平与全生命周期低碳增量成本密切相关:更高的可靠度要求往往涉及更多的材料或更优的性能,这可能同时影响初始的低碳材料投入与长期的运维碳排放。因此,针对以上问题,本文将对全寿命周期内的低碳增量成本与结构可靠性进行一体化考量,提出一种将低碳增量成本与目标可靠指标结合的分析方法,并以钢筋混凝土框架结构公寓楼为研究对象,应用该方法重新审视和校准目标可靠指标,以期可为推动建筑结构向更加安全、更加经济、更加可持续发展的方向发展提供参考借鉴。

1 全寿命周期低碳增量成本

基于全寿命周期成本理论、全寿命周期碳排放模型^[5]与增量成本理论,提出“全寿命周期低碳增

量成本”概念,即:为实现建筑低碳目标,在建筑全寿命周期内采取相应技术或措施,相较于传统设计方案所产生的额外成本。其与全寿命周期低碳建筑成本的关系可以表示为:低碳增量成本=低碳建筑总成本-传统建筑总成本。该全寿命周期增量成本主要包括决策阶段、施工准备阶段、建设阶段、运营维护阶段以及拆除报废阶段等。

1.1 决策阶段

在决策阶段,低碳建筑因其建造模式和发展路径特殊,涉及多维成本,超越单纯的经济核算。主要包括两方面:1) 调研成本,即为确保技术可行性与经济性,需投入资源调研低碳技术性能、市场案例及政策动态;2) 咨询成本,涉及全寿命周期成本分析与碳足迹测算,常需借助专业工具或委托第三方服务。这些环节共同构成了决策阶段的增量成本,单位为元。该增量成本为

$$C_{jc} = C_{dy} + C_{zx} \quad (1)$$

式中: C_{jc} 为决策阶段产生的增量成本,元; C_{dy} 为调研产生的增量成本,元; C_{zx} 为咨询产生的增量成本,元。

1.2 施工准备阶段

该阶段的增量成本主要涵盖设计费用和模拟费用。设计费用主要是指为达到各项低碳指标标准的要求进行设计而增加的费用,这一部分费用很少,可忽略不计。模拟费用是指委托专门的咨询单位或者具有绿色低碳建筑标识的评价机构,针对建筑设计方案中影响性能的重点技术,利用计算机软件模拟分析其减少的二氧化碳排放量所产生的费用。该增量成本为

$$C_{zb} = C_{sj} + C_{mm} \quad (2)$$

式中: C_{zb} 为准备阶段产生的增量成本,元; C_{sj} 为设计产生的增量成本,元; C_{mm} 为计算机软件模拟分析产生的增量成本,元。

1.3 建设阶段

该阶段的增量成本在整个阶段所占的比重较大,是成本控制的重点环节,低碳建筑建设增量成本主要由以下几部分构成。

1.3.1 建筑材料增量成本

低碳建筑通常采用高性能的建筑材料,如保温隔热材料、低碳水泥、再生骨料混凝土,再生钢材等。这些材料的生产工艺复杂,技术要求高,

导致其价格普遍高于传统建材。该增量成本为

$$C_{\text{clsc}} = \sum_i A_i \cdot M_{1,i} \quad (3)$$

式中: C_{clsc} 为材料生产产生的增量成本, 元; A_i 为项目使用的第 i 种建筑材料的工程量, t; $M_{1,i}$ 为第 i 种建筑材料的增量成本, 元/t。

1.3.2 材料运输增量成本

低碳建筑材料的运输增量成本, 包括 3 个方面: 1) 特殊运输要求, 如预制构件需要专用设备; 2) 运输距离延长, 部分环保材料需跨区域运输; 3) 多式联运需求, 例如“公转铁”等模式。该增量成本为

$$C_{\text{clys}} = \sum_i A_i \cdot M_{2,i} \cdot D_i \quad (4)$$

式中: C_{clys} 为材料运输产生的增量成本, 元; A_i 为第 i 种建筑材料的工程量; $M_{2,i}$ 为第 i 种建材运输方式的增量成本, 元/t·km; D_i 为生产现场到施工现场的距离, km。

1.3.3 设备系统增量成本

为实现能源高效利用, 低碳建筑需要配置先进的设备系统, 如地源热泵、太阳能光伏系统、智能照明控制系统等, 这些系统的初期投资较大。该增量成本为

$$C_{\text{sbxt}} = \sum_i B_i \cdot M_{3,i} \quad (5)$$

式中: C_{sbxt} 为设备系统产生的增量成本, 元; B_i 为第 i 种设备的数量; $M_{3,i}$ 为第 i 种设备的增量成本, 元。

1.3.4 施工增量成本

低碳建筑的施工过程需要采用特殊的工艺和技术, 如建筑气密性处理、热桥阻断技术等。同时, 为确保施工质量, 还需要增加检测环节, 如气密性测试、热成像检测等, 这些都会增加施工成本。该增量成本为

$$C_{\text{sg}} = \sum_i M_{4,i} \quad (6)$$

式中: C_{sg} 为特殊施工工艺产生的增量成本, 元; $M_{4,i}$ 为第 i 种施工方式的增量成本, 元。

因此, 建设增量成本为

$$C_{\text{jc}} = C_{\text{clsc}} + C_{\text{clys}} + C_{\text{sbxt}} + C_{\text{sg}} \quad (7)$$

式中: C_{jc} 为建设阶段产生的增量成本, 元。

1.4 运营维护阶段

在全寿命周期低碳建筑的运营维护阶段, 增量成本主要来源于为实现低碳目标而采用的高效

技术、智能化系统和可再生能源设施的持续运维与管理。这些成本包括: 可再生能源设备(如光伏板、地源热泵)的定期检查与部件更换费用、高效空调和照明系统的专业维护费用, 以及绿色建材(如低碳混凝土、保温层)的修复费用。

1.4.1 日常维修增量成本

日常维修增量成本^[6]是建筑低碳项目在运营期内每年进行维护产生的增量成本:

$$C_{\text{wx}} = F_1 \times (F/A, r, T) = A \times [(1+r)^T - 1] \times (1+r) - T \times r^{-1} \quad (8)$$

式中: C_{wx} 为日常维修产生的增量成本, 元; F_1 为建筑低碳项目年维修成本, 元/a; r 为利率; T 为建筑全寿命周期, a; A 为项目运营阶段每年增量经济效益, 元/a。

1.4.2 设备更新增量成本

设备更新成本^[6]是指建筑低碳项目的设备更新费用。可再生能源设备使用年限约为 15 a, 高效空调、照明和供配电系统使用年限为 15~20 a。假设更换时间为 15 a, 建筑全寿命周期为 50 a, 即需要更换 3 次。假设, 复利系数为 $R_1 = (1+8\%)^{15} - 1 = 217.22\%$, 则该部分的增量成本为

$$C_{\text{sbgx}} = F_2 \times (F/A, R_1, n_1) \quad (9)$$

式中: C_{sbgx} 为设备更新产生的增量成本, 元; F_2 为建筑低碳项目的设备更换费, 元; R_1 为设备替换成本, 元; n_1 为研究周期内的设备替换次数。

1.4.3 人工增量成本

人工增量成本^[6]是建筑低碳项目在运营期内每年进行维护或更换设备和系统所额外产生的人工成本:

$$C_{\text{rg}} = F_3 \times (1+r)^{-1} \times \{F/A, [(1+s)(1+r)^{-1} - 1], t\} \quad (10)$$

式中: C_{rg} 为人工维护产生的增量成本, 元; F_3 为第 1 年时建筑低碳项目日常运行的人工成本, 元; s 为人工费增长率; t 为等比数列现金流量的时间, a。

综上, 运营维护阶段产生的增量成本:

$$C_{\text{yywh}} = C_{\text{wx}} + C_{\text{sbgx}} + C_{\text{rg}} \quad (11)$$

式中: C_{yywh} 为运营阶段产生的增量成本, 元。

1.5 拆除报废阶段

在低碳建筑的全寿命周期中, 拆除报废阶段的增量成本主要来源于环保拆除技术和废弃物分类处理产生的费用。相较于传统建筑, 低碳建筑

在拆除和回收废弃物时需遵循更高的环保标准, 以减少资源浪费和环境影响, 因此会产生额外的费用。该增量成本为

$$C_{\text{ecbf}} = \sum_i C_i \times M_{5,i} + \sum_i E_i \times M_{6,i} \quad (12)$$

式中: C_{ecbf} 为拆除报废阶段产生的增量成本, 元; C_i 为拆除报废阶段拆除第 i 种构件(设备)的面积(数量), m^2 ; $M_{5,i}$ 为拆除第 i 种构件(设备)的增量成本, 元; E_i 为拆除报废阶段处理第 i 种废弃物的工程量, t ; $M_{6,i}$ 为处理第 i 种废弃物的增量成本, 元/ t 。

2 成本优化分析

2.1 成本优化法

成本优化法是一种通过权衡经济投入与结构安全性, 来确定结构最优可靠指标的决策方法。其核心逻辑是在保证结构安全的前提下, 寻找一个平衡点(最优中心安全系数 p^*), 使得结构在全寿命周期内的总期望成本最小。

对于与结构安全直接相关的极限状态, 这种成本优化^[7]可以表示为

$$p^* = \operatorname{argmin}_p Z(p) = C(p) + A(p) + D(p) + U(p) + M(p) + I(p) \quad (13)$$

$$C(p) = C_0 + C_1 \times p \quad (14)$$

$$A(p) = C(p) \times \omega/\gamma \quad (15)$$

$$D(p) = (C(p) + H) \cdot P_f(p)/\gamma \quad (16)$$

式中: p 为中心安全系数, 定义为平均结构抗力 R 与平均结构荷载效应 S 之比; p^* 为最优中心安全系数; $Z(p)$ 为总成本, 元; $C(p)$ 为设计建造费用, 元; $A(p)$ 为结构陈旧成本, 元; $D(p)$ 为结构失效成本(不计入报废), 元; $U(p)$ 为可用性极限状态成本, 元; $M(p)$ 为腐蚀、疲劳等劣化所隐含的成本, 元; $I(p)$ 为与检查相关的成本, 元; C_0 为固定建设成本, 元; C_1 为与中心安全系数 p 变化相关的边际成本, 元; ω 为淘汰率; γ 为折现率; H 为除重建成本外因故障造成的成本(如拆除成本和运营成本), 元; 而 $P_f(p)$ 为结构失效的年概率。在 FISCHER 等^[8]的研究中, 与可用性极限状态 $U(p)$ 、退化 $M(p)$ 和检查 $I(p)$ 相关的成本通常被忽略。公式(13)不是直接求解可靠指标 β 的、而是用中心安全系数 p 表示。考虑简单的性能函数 $g = R - S$, 可靠指标可以根据结构抗力和荷载效应的变异系数确定如下:

$$\beta^* = \frac{\ln p^* \times \sqrt{\frac{1 + V_R^2}{1 + V_S^2}}}{\sqrt{\ln[(1 + V_R^2) \times (1 + V_S^2)]}} \quad (17)$$

式中: β^* 为最优可靠指标; V_R 和 V_S 分别为抗力和荷载效应的变异系数。其中, 抗力和荷载效应均服从对数正态分布。正态分布、对数正态分布和 Gumbel 分布被广泛用于模拟静载和活载。

2.2 成本方案分析模型

低碳技术引入了更高的初始成本和材料不确定性, 为了实现全寿命周期内的经济与环境效益最大化, 避免失效带来的巨大浪费, 低碳建筑实际上需要略微更高的结构可靠度水平, 本文旨在通过构建成本方案的分析模型, 在安全性、经济性与低碳性三者之间确定新的最优目标可靠指标。

将全寿命周期各阶段的低碳增量成本与 C_0 和 H 相结合可以得到的计算公式:

$$C_c = C_0 + C_{\text{je}} + C_{\text{zb}} + C_{\text{js}} \quad (18)$$

式中: C_c 为低碳建筑的固定建设成本, 元。

$$H_c = H + C_{\text{yywh}} + C_{\text{ecbf}} \quad (19)$$

式中: H_c 为低碳建筑除重建成本外因故障造成的成本(如拆除成本和运营成本), 元。

公式(1)~(12)计算出的全寿命周期低碳增量成本, 直接构成了公式(13)中总成本的一部分。具体而言, 低碳增量成本改变了公式(14)中的固定建设成本(C_0)及公式(16)中的除重建成本外因故障造成的成本(H)得到了公式(18)和(19)。结合上述计算公式, 构建低碳增量成本与成本优化法的综合成本分析模型。该模型通过将特定的低碳技术或方案所带来的增量成本, 作为一项重要的成本项纳入总成本函数中, 得到的分析模型:

$$p_c^* = \operatorname{argmin}_{p_c} Z(p_c) = \left[1 + \frac{C_1}{C_c}(p_c) + \left[1 + \frac{C_1}{C_c}(p_c) \right] \times \omega/\gamma + \left[1 + \frac{C_1}{C_c}(p_c) + \frac{H_c}{C_c} \right] \times P_f(p_c)/\gamma \right] C_c \quad (20)$$

式中: p_c 为低碳建筑的中心安全系数, p_c^* 为低碳建筑的最优中心安全系数。

最优可靠指标计算公式:

$$\beta_c = \frac{\ln p_c^* \times \sqrt{\frac{1 + V_R^2}{1 + V_S^2}}}{\sqrt{\ln[(1 + V_R^2) \times (1 + V_S^2)]}} \quad (21)$$

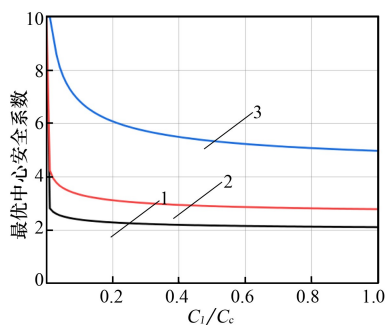
式中: β_c 为低碳建筑的最优可靠指标。

最优可靠指标是基于成本优化法计算得出的数值。它是指在满足结构功能要求的前提下,使结构的总成本达到最小值时所对应的可靠指标。旨在为规范制定目标可靠指标提供理论依据和校准参考。

2.3 参数分析

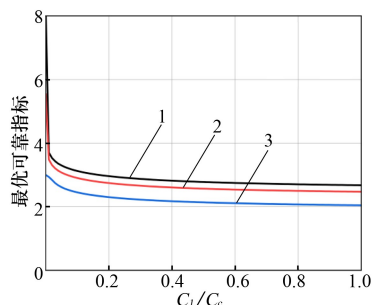
在结构可靠度分析中,随机变量的统计特征(即变异系数 V_R 、 V_S 和分布类型)是影响失效概率 P_f 和可靠指标 β 最敏感、最直接的物理参数。其他参数(如折现率 γ 、淘汰率 ω)虽然影响成本计算的数值,但属于经济参数,通常根据宏观经济环境取定值,其波动对可靠指标变化趋势的影响相对平缓且具有确定性。

因此为了探究预设参数的不确定性,本研究重点分析了两个关键因素:结构荷载效应的变异系数与分布模型,结果如图 1、2 所示,其余参数取值为 $\gamma = 3\%$ 、 $\omega = 2\%$ 。分析表明,随着变异系数的增大,最优安全系数显著升高,最优可靠指标降低。这一变化主要源于荷载效应变异性的提高增大了结构失效概率,从而削弱了选择较高安全系数所带来的边际效益。



变异系数: 1—0.2; 2—0.3; 3—0.6。

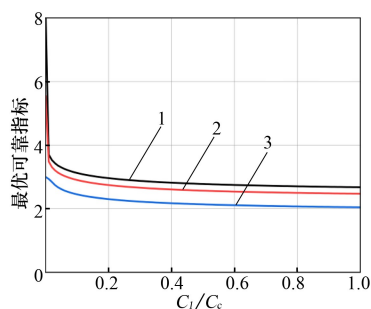
图 1 不同变异系数的最优中心安全系数



变异系数: 1—0.2; 2—0.3; 3—0.6。

图 2 不同变异系数的最优可靠指标

在概率分布模型方面,虽然已知结构抗力通常服从变异系数较低的对数正态分布,但荷载效应可能遵循不同的分布类型。为此,本研究对比了 3 种常用概率模型——正态分布、对数正态分布和 Gumbel 分布,采用 $V_R = V_S = 0.3$ 、 $\gamma = 3\%$ 、 $\omega = 2\%$ 的参数值,结果如图 3 所示。分析表明,采用不同的分布模型,最优可靠指标仍保持相对稳定。这说明在统计性质一致的条件下,分布模型的选择对基于成本优化所获得的最优可靠指标影响有限,可以忽略。



1—标准正态分布; 2—对数正态分布; 3—Gumbel 分布。

图 3 不同分布类型的最优可靠指标

3 基于成本优化法确定低碳建筑最优目标可靠指标

3.1 工程概况

以公寓楼为研究对象,该类公寓主体为钢筋混凝土框架结构,共 5 层,层高为 3.6 m, Autodesk Revit 建筑模型如图 4 所示。

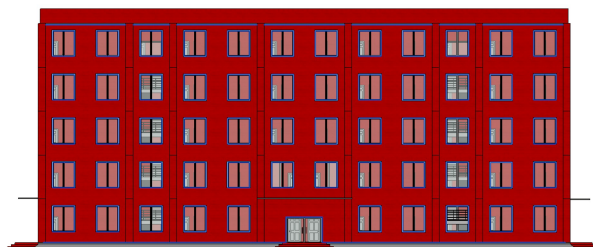


图 4 公寓楼 BIM 模型

3.2 参数取值

FISCHER 等^[8]在研究中建议,钢结构的屈服应力变异系数 $V_R \approx 0.07$,混凝土的抗压强度变异系数 $V_R \approx 0.15$,结构木材的抗弯强度变异系数 $V_R \approx 0.25$ 。SYKORA 等^[9]在报告中指出混凝土挠曲阻力的变异系数为 0.1,剪切阻力的变异系数为 0.2 ~ 0.25。HOLICKY^[10]建议抗力的变异系数值在 0.1 和

0.18 之间。据 JCSS (Joint Committee on Structural Safety) 统计分析,材料抗力更符合对数正态分布。考虑到相关低碳材料抗力的变异系数偏大,本研究取变异系数 $V_R = 0.17$ 。

FISCHER 等^[11]发现,当 $V_S < 0.3$ 时,永久荷载(正态分布)和可变荷载(极值分布)的联合荷载效应服从对数正态分布。因此,本文组合荷载效应采用对数正态分布。HOLICKY^[10]建议永久荷载的变异系数 V_S 值在 0.03 和 0.1 之间。考虑到风荷载、地震作用和其他可变荷载的影响,取 $V_S = 0.15$ 。

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068)^[12]明确规定,淘汰率 $\omega = 2\%$ 适用于公寓楼,在设计寿命结束时,折现率是发达国家和发展中国家之间最显著的差异之一。前者通常在 0 ~ 3% 的范围内^[7],后者通常在 8% ~ 15% 的范围内^[13]。而中国的折现率处于发展中国家范围内取 $\gamma = 8\%$ 。各参数如表 1 所示。

表 1 建筑参数

参数	数值
γ	0.08
ω	0.02
V_R	0.17
V_S	0.15
C_1/C_e	0 ~ 1
H_e/C_e	0 ~ 10

3.3 成本方案分析

JCSS 中没有以定量的方式定义成本类别划分。其成本是基于安全措施的成本相对(边际)值 C_1/C_e 进行定义的。通过改变 C_1/C_e 和 H_e/C_e 的值进行成本方案分析,得出成本类别。根据表 1 参数,通过公式(20)和公式(21)计算得出公寓楼的最优中心安全系数和最优可靠指标,结果如图 5、6 所示。

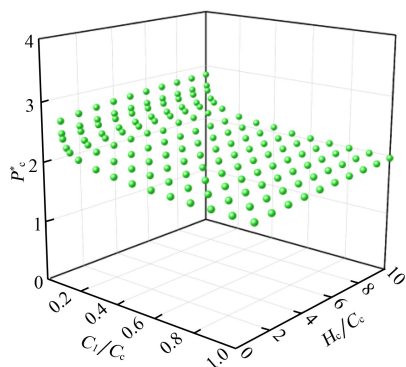


图 5 各成本方案的最优中心安全系数

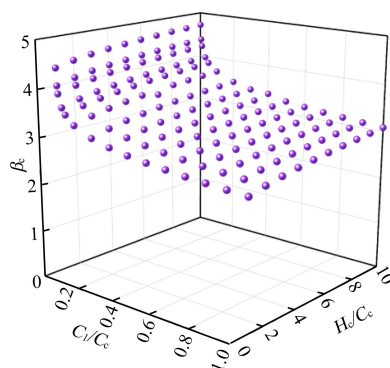


图 6 各成本方案的最优可靠指标

进一步拟合得到各方案最优可靠指标如图 7 所示。

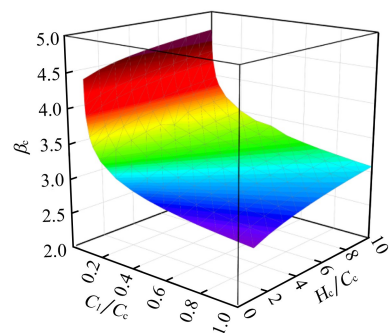


图 7 最优可靠指标

通过成本优化得到的目标可靠度指标已在各种类型结构的 JCSS 和 ISO 2394: 2015^[14] 规范中有明文规定,基于除重建成本外因故障造成的成本(如拆除成本和运营成本)与建造成本之间的比率,将失效后果分为 3 类,如表 2 所示。

本文案例同样基于除重建成本外因故障造成的成本(如拆除成本和运营成本)与建造成本之间的比率,将低碳公寓楼失效的后果划分为轻微,中等,严重 3 个安全等级,建立失效后果与安全措施相对成本之间的量化关系,基于一年的参考期确定了低碳公寓楼对应于不同成本方案范围内的 9 个最优目标可靠指标推荐值,如表 3 所示。

对比表 2、3 可知,考虑了低碳技术的建筑目标可靠指标略高于 ISO 2394: 2015 规范的推荐值,相差范围在 0.02 ~ 0.23。与通用优化分析相比,其中使用了更高的 V_R 和 V_S 值,以考虑更大范围的抗力和荷载效应,这些抗力和荷载效应的变异系数可根据不同情况改变。变异系数的提高会使目标可靠指标降低。由于中国使用的折现率更高,会使可

表 2 与极限状态相关的年度目标可靠指标

安全措施 相对成本	失效后果		
	较小($P < 2$)	中等($2 \leq P < 5$)	严重($5 \leq P < 10$)
高	$3.1 (P_f \approx 10^{-3})$	$3.3 (P_f \approx 5 \times 10^{-4})$	$3.7 (P_f \approx 10^{-4})$
中等	$3.7 (P_f \approx 10^{-4})$	$4.2 (P_f \approx 10^{-5})$	$4.4 (P_f \approx 5 \times 10^{-5})$
小	$4.2 (P_f \approx 10^{-5})$	$4.4 (P_f \approx 5 \times 10^{-6})$	$4.7 (P_f \approx 10^{-6})$

表 3 低碳公寓楼建筑的年度最优目标可靠指标推荐值

安全措施相对成本		失效后果		
		轻微($H_e/C_e \leq 1$)	中等($1 \leq H_e/C_e \leq 5$)	严重($5 \leq H_e/C_e \leq 10$)
高	$(10^{-2} \leq \frac{C_1}{C_e} \leq 10^{-1})$	3.24	3.53	3.38
中等	$(10^{-3} \leq \frac{C_1}{C_e} \leq 10^{-2})$	3.83	4.09	4.23
小	$(10^{-4} \leq \frac{C_1}{C_e} \leq 10^{-3})$	4.36	4.60	4.72

靠指标减小,二者略微抵消,使整体差距变小。

4 结 论

本文基于全寿命周期成本理论、全寿命周期碳排放模型与增量成本理论,提出了“全寿命周期低碳增量成本”概念。在此基础上,结合成本优化法,构建了考虑低碳技术影响的可靠度分析模型。对不同方案下的成本进行分析,并与规范相对比,给出了具有类似荷载与抗力统计特征的钢筋混凝土框架类低碳公寓楼建筑在不同方案下的最优目标可靠指标建议值。通过研究,得到结论如下。

(1) 变异系数分析结果表明,随着荷载效应和抗力的变异系数增大,最优中心安全系数显著升高,最优可靠指标降低。这一变化主要源于荷载效应变异性的提高增大了结构失效概率,从而削弱了选择较高安全系数所带来的边际效益。

(2) 分布类型分析结果表明,在考虑相同的荷载统计参数时,采用正态分布荷载下的最优可靠度指标最高,采用对数正态分布和 Gumbel 分布荷载下的最优可靠指标与正态分布基本吻合。即便采用不同的分布模型,最优可靠指标仍保持相对稳定。这说明在统计性质一致的条件下,分布模型的选择对基于成本优化所获得的最优可靠指标影响有限。

(3) 通过统计不同参数,结合成本优化法确定了具有类似荷载与抗力统计特征的钢筋混凝土框架类低碳公寓楼建筑的最优目标可靠指标。成

本优化法考虑了提高安全性的成本和失效的后果,最后根据失效后果划分为轻微,中等,严重 3 个安全等级,基于一年的参考期,确定了对应于不同成本方案范围内的最优目标可靠指标推荐值,轻微等级为 3.24、3.83、4.36,中等等级为 3.53、4.09、4.60,严重等级为 3.68、4.23、4.72。

参考文献:

- [1] 袁阳光,韩万水,李光玲,等.考虑非平稳因素的混凝土桥梁概率极限状态评估[J].工程力学,2020,37(8):167-178.
- [2] 王燕平,王选仓,王秉纲.公路路堤结构目标可靠度研究[J].西安公路交通大学学报,1997(2):16-21.
- [3] WAY A C,DE KOKER N,VILJOEN C. Target reliability for new road bridges in South Africa[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2022, 64(3):10-19.
- [4] SU J X,ZHANG J P,CAPRANI C C, et al. A practical framework for determining target reliability indices for the assessment of existing structures based on risk-informed decision-making [J]. Structural Safety, 2025, 114: 102583.
- [5] 建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [6] 朱昭,李艳蓉,陈辰.绿色建筑全生命周期节能增量成本与增量效益分析评价[J].建筑经济,2018,39(4):113-116.

(下转第 71 页)

- 的动员机制研究[J]. 吉林大学社会科学学报, 2024, 64 (4): 219 - 234; 240.
- [9] BARNEY J. Firm resources and sustained competitive advantage [J]. *Journal of Management*, 1991, 17 (1): 99 - 120.
- [10] 张春巍, 鲍德仁, 孙丽. 智能建造技术的研究与应用展望[J]. 沈阳工业大学学报, 2024, 46 (5): 722 - 734.
- [11] 王旺军. 从财务角度看大型建筑施工企业高质量发展[J]. 财会月刊, 2022, (增刊 1): 89 - 92.
- [12] 朱菲菲, 严小丽, 李桃. 基于演化博弈的建筑智能机器人激励政策研究[J]. 数学的实践与认识, 2023, 53 (4): 24 - 34.
- [13] 王波, 陈家任, 廖方伟, 等. 智能建造背景下建筑业绿色低碳转型的路径与政策[J]. 科技导报, 2023, 41 (5): 60 - 68.
- [14] 朱菲菲, 严小丽. 基于 ISM - AHP 的建筑企业数字化转型影响因素研究[J]. 建筑经济, 2022, 43 (10): 66 - 73.
- [15] 尤志嘉, 郑莲琼, 冯凌俊. 智能建造系统基础理论与体系结构[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38 (2): 105 - 111.
- [16] BIAN Y J, XIE L, LI J Q. Researchon influencing factors of artificial intelligence multi-cloud scheduling applied talent training based on DEMATEL-TAISM [J]. *Journal of Cloud Computing*, 2022, 11 (1): 35.
- [17] 尤志嘉, 刘紫薇. 工业 4.0 驱动下建筑业智能化转型升级战略研究[J]. 建筑经济, 2022, 43 (3): 21 - 27.
- [18] 刘亮, 谢根. 大数据智能制造在建造业应用及发展对策研究[J]. 科技管理研究, 2019, 39 (8): 103 - 109.
- [19] ZHANG L P, ZHANG X Y. Impact of digital government construction on the intelligent transformation of enterprises: Evidence from China [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2025, 210: 123787.
- [20] 钮新强, 谢明霞, 徐利福. 水利工程智能建造的理论思考和发展展望[J/OL]. 中国工程科学, 1 - 18 [2026 - 04 - 27]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4421.G3.20250928.1332.002>
- [21] 黄海滨, 刘锋, 王石留, 等. 智能建造在工程高质量发展实践中的探索与应用[J]. 建筑结构, 2024, 54 (24): 83 - 86.
- [22] 孙喜亮, 孙志勇, 薛小龙, 等. 智能建造技术协同创新主体互动关系研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55 (11): 108 - 117.
- [23] 许龙, 周嘉怡, 刘兵. 企业数字化转型影响因素与实施路径[J]. 财会月刊, 2023, 44 (10): 146 - 152.
- [24] 住房和城乡建设部. “十四五”建筑业发展规划 [EB/OL]. (2022 - 01 - 25) [2024 - 03 - 15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/27/content_5670687.htm.
- [25] 张烨, 邓小鹏. 基于 DEMATEL-ISM 的国际工程供应链韧性影响因素研究[J]. 工程管理学报, 2024, 38 (3): 47 - 52.
- [26] 张贵华, 岳庆慧. 基于 DEMATEL-ISM-MICMAC 的装配式建筑成本影响因素研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2025, 41 (2): 242 - 248.
- [27] WANG Y H, ZHAO X F, YU X Y, et al. Analysis of development trends and associations in intelligent construction of chinese corporations[J]. *Buildings*, 2025, 15 (5): 716.

(上接第 62 页)

- [7] RACKWITZ R. Optimization: The basis of code-making and reliability verification [J]. *Structural Safety*, 2000, 22 (1): 27 - 60.
- [8] FISCHER K, VIRGUEZ E, SÁNCHEZ - SILVA M, et al. On the assessment of marginal life saving costs for risk acceptance criteria[J]. *Structural Safety*, 2013, 44: 37 - 46.
- [9] SYKORA M, HOLICKY M, PRIETO M, et al. Uncertainties in resistance models for sound and corrosion-damaged RC structures according to EN 1992 - 1 - 1 [J]. *Materials and Structures*, 2015, 48 (10): 3415 - 3430.
- [10] HOLICKY M. Reliability analysis for structural design [M]. SUN MeDIA Stellenbosch, 2009.
- [11] FISCHER K, VILJOEN C, KÖHLER J, et al. Optimal and acceptable reliabilities for structural design [J]. *Structural Safety*, 2019, 76: 149 - 161.
- [12] 建筑结构可靠度设计统一标准: GB 50068—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [13] Economists C. A manual for cost-benefit analysis in South Africa with specific reference to water resource development[J]. WRC Report TT, 2014, 598: 14.
- [14] General principles on reliability for structures: ISO 2394: 2015 [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2015.