基于可靠性融合的电力变压器全寿命周期成本模型构建与应用

李智威[1]，孔 娟[2]，张赵阳[1]，武 岳[3]，王 璨[4]，张 亮[4]，王 巍[1]

（1.国网湖北省电力有限公司经济技术研究院，武汉 430077；2.国网经济技术研究院有限公司，北京 102209；
3.华中电力科技开发有限责任公司，武汉 430077；4.国网武汉供电公司，武汉 430077）

摘要：针对传统电力变压器成本评估中可靠性因素考虑不足的问题，提出融合可靠性指标的全寿命周期成本（LCC-R）模型，构建“成本-可靠性”双维度评价体系，并结合指数分布可靠性函数与动态成本测算方法，以变压器为例开展实证分析。结果表明：设备可靠性水平与初始投资成本呈正相关、与运维成本呈负相关，不同供应商设备LCC及最优经济寿命差异显著。研究结论可为电网企业设备选型、供应商评价及资产管理提供理论依据与决策参考。

关键词：电力变压器；全寿命周期成本（LCC）；成本-可靠性；设备选型；供应商评价

中图分类号：F406.3；TM41 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2026)09－0056－10

随着电网建设的快速发展，各类电力设备的运维和检修成本已成为影响电力企业经济效益的主要因素[1]，特别是作为电力系统重要枢纽设备的电力变压器，其运行稳定性和可靠性直接影响电网的安全性和供电质量[2]。因此，提升变压器全寿命周期管理水平，降低全寿命周期成本（life cycle cost，LCC）已成为行业关注的重点，这不仅涉及企业投资效益，还关乎社会资源的优化配置，对提升综合竞争优势具有重要意义[3-4]。

在电力变压器LCC的研究中，国内外学者已从成本结构、故障机理、外部环境影响及可靠性评估等多个角度展开了广泛探讨。在电力变压器LCC基础模型构建方面，现有研究已形成多维度的建模体系，学者们普遍将变压器LCC拆解为初始投资、运行维护、故障损失、退役处置等核心模块，为成本核算提供了统一框架。王涌[5]提出区间法建模思路，针对一次投资、损耗、环境、运行维护及报废成本分别建立区间模型，有效应对了成本估算中的不确定性因素。刘树森[6]则拓展了成本维度，将土地机会成本、环保成本、风险费用纳入LCC体系，完善了电网规划场景下的成本评估框架，使模型更贴合实际工程需求。这些研究共同奠定了变压器LCC从构成拆解到多场景量化的基础，为后续可靠性因素的融入提供了前提。

在成本构成与关键影响因素识别方面，钟声等[7]以220 kV变压器为例分析其成本构成，指出硅钢和铜材价格对LCC影响最为显著。Qu等[8]在LCC模型中引入通货膨胀、环境条件与预防性试验成本等因素，建立了多参数灵敏度分析框架，研究表明外部环境变量对LCC评估结果具有系统性影响。谢庆等[9]、李刚等[10]针对电网设备老化问题，提出了面向设备退役与更新的运维管理思路，开展了不同电网等级故障率演变趋势研究，结果表明设备整体正面临故障率上升和运维压力加剧的挑战。

在可靠性因素与LCC融合建模方面，李娜等[11]引入威布尔比例失效模型，通过设备失效率将LCC与可用性、可维修性指标关联，构建“成本-效能”综合评估模型，揭示了可靠性指标对成本的传导路径。赵淑媛等[12]基于变压器历史故障数据构建故障树模型，将故障划分为引线、绕组、套管等

收稿日期：2025-12-22

作者简介：李智威（1987—），男，湖北武汉人，博士，正高级工程师，研究方向为电网工程技术经济、电网实物资产管理、资产寿命评估；孔娟（1987—），女，北京人，硕士，高级工程师，研究方向为电网实物资产管理、资产寿命评估；张赵阳（1991—），男，湖北黄冈人，硕士，高级工程师，研究方向为电网资产全寿命周期、电网实物资产管理；武岳（1987—），男，湖北武汉人，硕士，高级工程师，研究方向为电网设备数字化、资产全寿命周期管理；王璨（1990—），男，湖北黄冈人，硕士，工程师，研究方向为电网资产全寿命周期、电网实物资产管理；张亮（1986—），男，湖北武汉人，硕士，高级工程师，研究方向为电网设备运维、资产全寿命周期管理；王巍（1989—），男，湖北鄂州人，硕士，高级工程师，研究方向为电网资产全寿命周期、电网实物资产管理。

7 大类,通过概率统计计算单台变压器故障率,证实故障率通过影响运维检修成本和故障成本显著作用于 LCC。陈祥[13]以 35 kV 变电站主变选型为案例,建立可用系数、失效率与 LCC 的关联关系,提出费用-效益关系式,为基于可靠性的设备选型提供了决策方法。朱丽丽[14]在变电站主设备招标评标中,将非计划停运率等可靠性指标作为核心评标依据,通过特高压1 000 kV 变压器采购案例验证,实现了安全、效能与周期成本的统筹平衡;杨娜等[15]采用"每千瓦时电能平均产值(产电比)"估算停电损失费用,将用户停电成本这一可靠性核心指标转化为经济成本,完善了可靠性成本的量化路径。赵宇琪等[2]则聚焦换流变压器这一特殊类型,从漏抗、绝缘特性、谐波等多个状态参数出发,构建了其可靠性评估体系,并指出该类设备受多重不确定性因素耦合影响,传统 LCC 模型难以直接适用。这些研究实现了可靠性从定性要求到定量融入 LCC 模型的跨越,为成本与效能的平衡提供了技术支撑。

在智能算法与先进技术融合应用方面,刘一博等[16]提出改进粒子群优化(particle swarm optimization,PSO)算法,通过动态惯性权重和交叉变异操作增强全局搜索能力,构建多目标优化模型,应用于 220 kV 变电站实际数据验证,实现了运行、维护、故障成本的显著降低,为 LCC 优化提供了高效求解工具。在故障监测与状态感知方面,何锐等[17]基于八叉树空间分割和非均匀有理 B 样条(nonuniform rational B-splines,NURBS)三维建模技术构建数字孪生变电站模型,结合改进麻雀搜索算法(improved sparrow search algorithm,ISSA)优化极限梯度提升(eXtreme gradient boosting,XGBoost)模型,将故障监测正确率提升至 96.45%,为变压器可靠性状态的实时感知和 LCC 动态调整提供了技术支撑;刘士李等[18]通过模糊平滑法与指数平滑理论结合,在数据量不足的情况下实现了投资成本的精准估算,为模型在数据稀缺场景的应用提供了新思路。这些技术的融合应用,推动 LCC 模型从静态核算向动态优化、从经验驱动向数据驱动转型,提升了模型的实用性与适配性。

总体而言,现有研究已在变压器 LCC 的局部建模、影响因素分析、动态特性刻画及可靠性基础理论等方面取得了较丰富的成果。然而,当前大多数成果主要侧重于理论推进与模型构建,尚未形成系统性的方法以解决复杂电力装备(如变压器)在强不确定性环境下的"成本-可靠性"集成建模问题,尤其缺乏能够同时兼容多源状态参数、时变故障机制与经济性目标的 LCC 综合分析体系,导致其在实际工程中的决策支持能力有限。

针对上述局限,提出一种融合可靠性指标 R 的 LCC-R 模型,建立"成本-可靠性"双维度评价体系,并引入动态修正机制与权重熵值优化方法,增强模型对实际变压器运行环境的适应性与解释能力,旨在为实现电力变压器精益化管理与资产全寿命效益优化提供理论依据与实用方法,并可拓展至其他关键电力设备的 LCC 分析中,推动电网资产管理向数据驱动与模型驱动相结合的新模式转型。

1 模型构建

在 LCC-R 模型构建过程中,结合成本与可靠性两个维度,采用"成本-可靠性协同"的方式开展定量分析。一方面,通过设备缺陷、隐患及故障历史等数据,计算同类型设备的可靠性水平;另一方面,结合常规运维成本以及大修、抢修等项目化成本,全面量化设备的 LCC[14-15]。在此基础上,构建融合生命周期成本与可靠性分析的 LCC-R 模型(图 1),对设备全周期的经济性与可靠性进行综合评估。

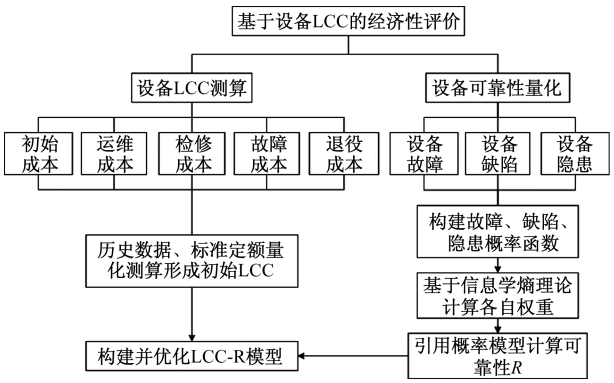


图 1 设备 LCC-R 研究路径

1.1 LCC 模型

在设备全寿命周期管理中,LCC 模型表征设备从采购、运行到退役各阶段的成本构成。在实际应用中,根据数据取值范围的差异,LCC 模型具体分为单体设备 LCC 与同类设备 LCC 两类。前者适用于新增设备的个体经济性评估,后者则适用于存量设备管理,有助于把握运行规律与成本趋势,指导选型和运维策略优化。相较于单体设备 LCC,同类设备 LCC 能够在统一维度下整合多设备数据,克服单体设备未正常退役情况下无法构成全寿命周期成本的局限,通过整合同类设备的全寿命周期数据来揭示这类设备的普遍成本规律与长期趋势,用以

比较不同型号类型、供应商或技术方案之间的经济性差异，支持基于全寿命周期成本的设备选型与策略优化，因此，重点对同类设备 LCC 的构建方法开展相关研究。基于设备类型、电压等级和专业分类等维度，测算年均资产价值、年均运维检修费用和年均总费用。

1.1.1　年均资产价值

依据设备资产的折旧年限及价值评估规律，结合设备类型、电压等级和专业类别等因素，采用直线折旧法测算同类设备的年均资产价值，其中残值取初始投资的 5%。

1.1.2　年均运维检修费用

基于历史运行数据，统计同类设备在相同投运年限下的平均运维与检修成本，计算公式为

$$C_{\text{year}} = \frac{C_{\text{total}}}{T} \tag{1}$$

式中：C_{year}为年均运维检修费用；C_{total}为运维检修总成本；T 为运营年限。

1.1.3　年均总费用

年均总费用为年均资产价值与年均运维检修费用之和，计算公式为

$$F_{\text{year}} = V_{\text{year}} + C_{\text{year}} \tag{2}$$

式中：F_{year}为年均总费用；V_{year}为年均资产价值。

基于设备年均 LCC 成本模型，可有效识别设备在不同投运年限下的年均总费用变化规律。通过计算并分析年均总费用的最小值及其对应的时间点，能够确定设备的经济寿命点，从而明确实现全寿命周期成本最优的更换或升级时机。

1.2　可靠性模型

1.2.1　可靠性计算方法选取

电力设备可靠性是指设备在规定条件和时间内无故障地完成预定功能的能力，是衡量电力系统稳定运行与供电安全的重要指标。目前常用的可靠性分析方法包括故障树分析（fault tree analysis，FTA）法、马尔科夫分析法和故障率模型[19-21]。

FTA 适用于结构清晰的系统建模[22]，马尔科夫分析法适合考虑状态转移与维修过程[23]。然而上述两种方法均对数据要求较高，需要有详细的故障细类数据，目前条件并不具备。相比之下，故障率模型是一种动态故障率预测模型，基于设备故障率历史数据，更直接反映失效趋势，以支撑可靠性决策，其适用于具备一定可靠历史数据的情形[24-25]。因此，选用故障率模型构建贴近实际的可靠性评估方法，并采用指数分布与威布尔分布两种方式进行对比分析（表 1），以测算变电主要设备在不同投运年限下的可靠性指标。

表 1　可靠性计算模型对比分析

比较项	指数分布	威布尔分布
故障率特性	恒定故障率 λ（λ 为常数）	可变故障率（由形状参数 β、尺度参数 η 决定）
可靠性函数	$R(t)=e^{-\lambda t}$	$R(t)=e^{-(\frac{t}{\eta})^{\beta}}$
数据需求	仅需基本的故障数据	需要大量不同投运年限可靠性指标数据
适应性	适用于设备生命周期中的稳定运行阶段	能够全面覆盖设备的整个生命周期
应用场景	简单、故障率相对稳定的设备或对设备周期变化不敏感	灵活性和适应性，能够描述不同阶段的故障行为

注：$R(t)$为设备在时间 t 内未发生故障的概率。

研究构建的 LCC-R 模型主要面向供应商评价、经济寿命测算及设备比选等应用场景，重点进行不同供应商及设备方案的经济性对比。目前设备的故障、缺陷及隐患等可靠性指标的长期跟踪数据（如投运 30 年以上的全周期状态数据）尚不完整，难以支撑完整的全寿命周期可靠性分析。为此，在可靠性计算方面采用参数需求较少的指数分布进行建模分析，以实现在现有数据条件下建立有效的评估基准。表 1 显示，威布尔分布虽能覆盖设备全生命周期的故障行为，但其形状参数 β 的估算需要大量不同投运年限的可靠性指标数据，当前数据条件难以满足；而指数分布仅需基本的故障数据即可测算恒定故障率 λ，无须细分失效模式，更贴合当前数据可得性条件。同时，构建模型主要应用在供应商评价、经济寿命测算、设备比选等场景，对设备投运周期内可靠性变化并不敏感。指数分布能够通过信息熵权法融合故障、缺陷、隐患等多源指标，有效量化设备的综合可靠性水平，为“成本-可靠性”协同分析提供稳定的基础输入，确保了在数据有限条件下的评估有效性。因此，在可靠性计算方面采用参数需求较少的指数分布进行建模分析，以实现在现有数据条件下建立有效的评估基准。

1.2.2　可靠性系数测算

可靠性函数描述的是设备在时间 t 之前仍然正常工作的概率。

设 $R(t)$表示设备在时间 t 内未发生故障的概率。假设在短时间 Δt 内，设备失效的概率可以近似为 $\lambda\Delta t$，那么设备在 t 到 $t+\Delta t$ 之间仍正常工作的概率为

$$R(t+\Delta t) = R(t)(1-\lambda\Delta t) \tag{3}$$

通过将 Δt 取极限(趋近于零),可以得到以下微分方程的解:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{4}$$

该函数描述了设备在时间 t 内保持正常运行的概率。可以看出,随着时间 t 的增加,设备保持正常的概率会呈指数式衰减。在电力设备可靠性指标进行分析时,影响可靠性的因素多种多样,对设备直接产生影响的是设备故障、缺陷、隐患数据,其中最主要的故障率直接与可靠性挂钩,缺陷、隐患对故障会产生间接影响。

在电网设备可靠性评估中,故障、缺陷、隐患等属于不同量纲的指标,若不进行归一化处理,会导致数值规模较大的指标主导评估结果,掩盖其他指标的实际影响,因此需通过归一化消除量纲干扰。结合上述分析,首先运用信息熵理论求取故障、缺陷、隐患各自的权重占比,对故障、缺陷和隐患指标历史数据采用 min-max 标准化方法进行归一化处理,形成评估序列[26]。计算步骤如下。

(1)归一化处理。

正向指标:

$$x_{ij}^{*} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \tag{5}$$

负向指标:

$$x_{ij}^{*} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \tag{6}$$

式中:i 为各观测样本;j 为各影响指标;x_{ij} 为原始值;x_{ij}^{*} 为处理后的值;$\max x_j$、$\min x_j$ 为指标 j 的最大值和最小值。

(2)计算各指标的相对比例 p_{ij}。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}^{*}}{\sum_{n=1}^{n} x_{ij}^{*}} \tag{7}$$

式中:n 为观测值数量。

(3)计算各指标的熵值 e_j。

$$e_j = k\sum_{n=1}^{n} p_{ij}\ln p_{ij} \tag{8}$$

式中:$k = \frac{1}{\ln n}$

(4)计算各指标的信息熵冗余度 d_j。

$$d_j = 1 - e_j \tag{9}$$

(5)计算各指标的权重系数 w_j。

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{m} d_j} \tag{10}$$

式中:m 为指标数量。

(6)通过指数函数计算公式(4)得到各自可靠性系数 $R_1(t)$、$R_2(t)$、$R_3(t)$。在此基础上通过线性加权的方式计算设备的综合可靠性,计算公式为

$$R_{\text{Composite}}(t) = R_1(t)w_1 + R_2(t)w_2 + R_3(t)w_3 \tag{11}$$

式中:$R_{\text{Composite}}(t)$为设备的综合可靠性系数;w_1、w_2、w_3 分别为设备的故障、缺陷、隐患权重系数。

1.3 LCC-R 模型

传统的 LCC 模型,通过测算同类设备的年均资产价值、年均运维检修费用及年均总费用,已能系统量化设备从采购到退役的全寿命周期成本,明确设备经济寿命以指导成本优化决策。但该模型仅聚焦成本维度的经济性评估,未将设备可靠性纳入分析框架,无法量化不同可靠性水平对应的最优经济寿命,不利于考虑经济、质量、效率等多因素的供应商评价及设备选型,易导致选择初始成本低但可靠性差的设备,后续因故障频发产生高额运维与抢修成本,反而推高全周期总费用,形成“低价高用”的决策偏差。

为弥补传统 LCC 模型的局限,需在其成本测算框架基础上融合可靠性指标,构建全寿命周期成本与可靠性协同分析的 LCC-R 模型,实现“成本-可靠性”双维度综合评估。构建全寿命周期成本与可靠性的关联模型的具体思路为:①寻找确定可靠性与全寿命周期成本之间的关联;②通过相关文献寻找两者之间函数关系;③结合电力设备的特性,完成模型与实际应用的适配性,即优化 LCC-R 基础模型;④结合各变电设备历史数据情况确定系数以及验证模型可行性。一般来说,设备的初始投资成本支出随着可靠性的提高而增加,使用与保障费用随着可靠性的提高而降低,如图 2 所示。

目前,国内外针对 LCC 与可靠性关系已提出大量工程化模型,主要有两种方法:①将因可靠性问题产生的费用量化并纳入 LCC;②通过参数化方

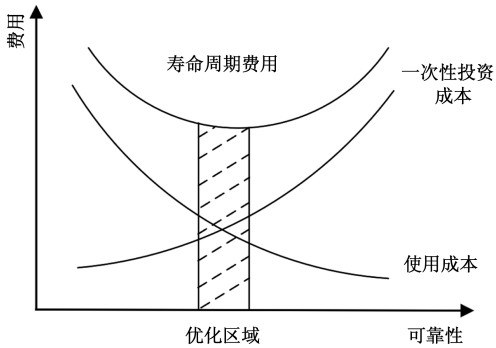


图 2 可靠性与全寿命周期成本的关联

法，分析可靠性指标变化对成本的影响，其中常用做法是构建基于特征参数的费用估算模型，将可靠性作为自变量，定量评估其对 LCC 的影响。Juran[27]的质量成本模型同样也适用于电力设备 LCC研究，是因为该模型将“质量”广义理解为“满足要求的能力”，而设备可靠性正是电力设备质量的核心体现。其模型通过系统分类并量化预防、鉴定与故障损失等成本，能够将可靠性投入（如更高标准的设备采购、预防性维护）与可靠性收益（如故障减少、寿命延长）统一纳入货币化框架，从而为“成本-可靠性”统筹优化提供了经过实践验证的、结构化的定量分析基础。按照 Juran 在其《质量管理手册》中提出的质量成本模型质量总成本的计算公式为

$$C_{\mathrm{Q}}=\sum_{k}^{n}C_{\mathrm{b}}(k)\left(\omega_1\left\{\tan\left[\frac{\pi}{2}R(k)\right]\right\}^{K_1}+\omega_2\left\{\cot\left[\frac{\pi}{2}R(k)\right]\right\}^{K_2}\right) \tag{12}$$

式中：C_{Q} 为质量总成本；$C_{\mathrm{b}}(k)$为第 k 个子系统的费用基本值；$R(k)$为第 k 个子系统的可靠度；K_i 为成本增长指数；n 为相互区别独立的子系统的数量；ω_1 与 ω_2 为成本模型中的常数。

该模型满足寿命周期费用与可靠性关系模型所应具备的基本条件，但是根据客观条件的限制，设备可靠性存在上限 $R_{\mathrm{L}}=0.99$（假设设备可靠性为 1，根据该模型可得日常运维检修费用为 0，显然不符合实际）。同时，原模型中费用计算来源于不同子系统的累加，这与电力设备成本测算不符。为了使模型更具有一般性，取系统的可靠度为参数[20]，将抽象的“可靠性”概念转化为一个可量化的连续变量，并以此为基础动态驱动 LCC 的测算。根据上述情况将模型进行修正，修正的核心在于引入以可靠度 R 为自变量的函数项，以刻画成本随可靠性变化的非线性特征，并消除原模型中“$R=1$ 时费用为零”的不合理假设。计算公式为

$$\mathrm{LCC}=C(K_1)\left[\tan\left(\frac{\pi}{2}\frac{R}{R_{\mathrm{L}}}\right)\right]^{K_1}+C(K_2)\left[\cot\left(\frac{\pi}{2}\frac{R}{R_{\mathrm{L}}}\right)\right]^{K_2} \tag{13}$$

式中：LCC 为系统的寿命周期费用；$C(K_i)$为基本费用值；R 为系统可靠度；K_1 为初始投资成本增长指数；K_2 为运维检修成本增长指数。等式右边第 1 项为初始投资成本、退役及报废处置成本，第 2 项为使用与保障费用。

2 模型应用

构建的 LCC-R 模型可用于电网设备供应商评价、经济寿命测算及设备比选等场景，重点介绍供应商评价中 LCC-R 模型的计算与应用步骤。

供应商评价的核心在于通过科学系统的方法，全面衡量各供应商设备在全寿命周期内的经济性与可靠性，助力企业精细化管理与资源优化。在电网设备规模扩大、运维压力上升的背景下，单纯依据初始采购成本选型已难以满足长期运行需求。构建 LCC-R 模型，结合成本与可靠性数据，可客观反映设备全周期表现，避免“低价高用”问题，实现以全寿命周期最优为导向的供应商管理，有效提升设备可靠性，降低运维成本，增强企业竞争力。

2.1 供应商原始 LCC 计算

（1）统计未经可靠性匹配的供应商设备初始成本 LCC，通过设备编码，将在运设备成本与缺陷、故障等值关联至供应商，从而实现不同供应商在各投运年限下的成本与可靠性数据匹配关联。具体计算公式如下：

$$\forall e_i\in E, e_i\xrightarrow{\mathrm{code}(e_i)}s_j \tag{14}$$

$$E=\{e_1,e_2,\cdots,e_n\} \tag{15}$$

$$S=\{s_1,s_2,\cdots,s_m\} \tag{16}$$

式中：E 为设备 e_i 成本、缺陷、故障等值集合；S 为供应商集合；$\mathrm{code}(e_i)$为设备 e_i 的唯一编码，通过该字段将设备 e_i 匹配至对应供应商 s_j。

（2）选取某类设备，计算各供应商该类设备全寿命周期成本，其中初始投资成本为供应商该类型设备初始投资成本的平均值，运维检修阶段成本为供应商该类型设备相同投运年限运维成本的平均值。运用平均成本法计算同类型设备不同投运年限的运维检修成本。

供应商初始投资成本 $C_{\mathrm{inv}}(s_j)$为

$$C_{\mathrm{inv}}(s_j)=\frac{1}{N_i}\sum_{i=1}^{N_j}C_{\mathrm{inv}}(e_i), e_i\in s_j \tag{17}$$

设备运维检修成本 $C_{\mathrm{om}}(s_j,t)$为

$$C_{\mathrm{om}}(s_j,t)=\frac{1}{N_{j,t}}\sum_{t}C_{\mathrm{om}}(e_i,t) \tag{18}$$

全寿命周期成本（LCC）为

$$\mathrm{LCC}_0(s_j)=C_{\mathrm{inv}}(s_j)+\sum_{t=1}^{T}C_{\mathrm{om}}(s_j,t) \tag{19}$$

式中：$C_{\mathrm{inv}}(s_j)$为供应商 s_j 设备的平均初始投资成本；$C_{\mathrm{om}}(s_j,t)$为设备投运第 t 年的平均运维检修成本；$\mathrm{LCC}_0(s_j)$为设备运行寿命为 T 年下，供应商 s_j 的基础 LCC；N_j 为供应商 s_j 下属设备数量台数；

$N_{j,t}$为供应商 s_j 投运年限为 t 年的设备数量。

2.2 基于可靠性的 LCC 计算

设 D_f 为故障数据集合,D_d 为缺陷数据集合,D_h 隐患数据集合,w_f、w_d、w_h 分别为对应指标权重,且满足 $\omega_f+\omega_d+\omega_h=1$。基于指数分布假设,失效率 λ_x 与可靠性的关系计算公式为

$$R_x(t)=\mathrm{e}^{-\lambda_x t},\ x\in\{f,d,h\} \tag{20}$$

$$R_{\mathrm{zh}}(t)=w_f R_f(t)+w_d R_d(t)+w_h R_h(t) \tag{21}$$

式中:λ_x 由历史数据统计估算;$R_x(t)$为第 t 年事件类型 x 的可靠性函数;$R_{\mathrm{zh}}(t)$为第 t 年整体综合可靠性系数。

依据设备 LCC-R 模型,结合各供应商平均初始投资成本、平均运维检修成本以及整体可靠性系数,分析可靠性与投资成本、运维检修成本之间的关系。利用 Stata 软件求出增长指数系数,从而求出各供应商考虑了设备可靠性之后的经济寿命和全寿命周期成本。考虑可靠性因素后,调整的运维检修成本 $C_{\mathrm{om}}(s_j,t)$的计算公式为

$$C'_{\mathrm{om}}(s_j,t)=C_{\mathrm{om}}(s_j,t)\mathrm{e}^{k[t-R_{\mathrm{zh}}(t)]} \tag{22}$$

在 LCC-R 模型下,综合计算供应商 s_j 设备的全寿命周期成本和经济寿命计算公式如下:

$$\mathrm{LCC}_R(s_j)=C_{\mathrm{inv}}(s_j)+\sum_{t=1}^{T_{\mathrm{e}}(s_j)}C'_{\mathrm{om}}(s_j,t) \tag{23}$$

$$T_e(s_j)=\mathrm{argmin}\left[\frac{C_{\mathrm{inv}}(s_j)+\sum_{t=1}^{n}C'_{\mathrm{om}}(s_j,t)}{n}\right] \tag{24}$$

式中:k 通过 Stata 软件基于历史数据回归拟合;$C'_{\mathrm{om}}(s_j,t)$为考虑可靠性的第 t 年运维检修成本;$\mathrm{LCC}_R(s_j)$为供应商 s_j 考虑可靠性的全寿命周期成本;$T_{\mathrm{e}}(s_j)$为经济寿命,单位年均成本最小对应的最优使用年限。

2.3 供应商综合评价

不同供应商之间的比较基于总体 LCC 成本、经济寿命点等评价维度进行综合分析。结合项目对设备的具体要求,基于上述维度完成各供应商的综合评价,综合评价函数 $P(s_j)$的计算公式为

$$P(s_j)=\alpha\frac{\mathrm{LCC}_{\min}}{\mathrm{LCC}_R(s_j)}+\beta\frac{T_{\mathrm{e}}(s_j)}{T_{\mathrm{e,max}}} \tag{25}$$

式中:$P(s_j)$为供应商 s_j 的综合评分;$\mathrm{LCC}_{\min}$为所有供应商中最小 $\mathrm{LCC}_R(s_j)$;$T_{\mathrm{e,max}}$为所有供应商中最大经济寿命;α、β为权重参数,满足 $\alpha+\beta=1$。

3 算例分析

以某省级电网公司近 8 年在运的主变压器为样本,收集设备编码、成本、故障、缺陷和隐患等数据,并关联至对应供应商,对主变压器供应商评价以及主变压器设备选型开展案例分析。

样本数据包含1 694台变压器的台账、检修记录及成本明细。故障/缺陷界定参考《输变电设备状态检修试验规程》(DL/T 393—2021)及国家电网公司输变电设备状态检修试验规程》(Q/GDW 1168—2013),其中"故障"定义为导致设备停运大于 24 h 的事件,"缺陷"定义为不影响运行但需修复的异常。数据处理过程中,采用线性插值法补全缺失值,并对原始数据进行标准化。通过熵权法确定故障类指标权重,结合指数分布模型计算各设备的可靠性系数,进而与成本数据构建 LCC-R 模型,实现对不同类型设备全寿命周期经济性与可靠性的综合评估。

3.1 主变压器供应商评价

依据供应商在运设备存量规模情况,确定不同变电设备的供应商分布,如图 3 所示。从供应商设

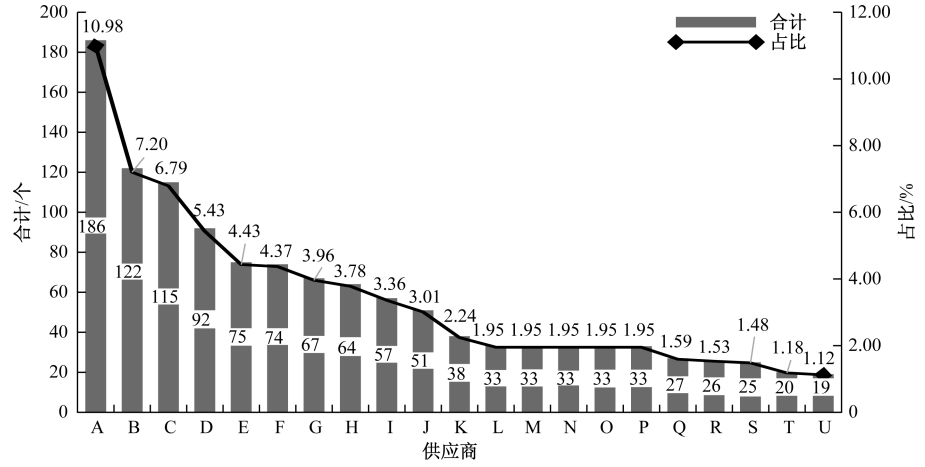


图 3 主变压器主要供应商设备规模

备存量规模占比来看，主变压器供应商集中度较高，前 10 家供应商占总成本达 53.31%，其中 A 公司(10.98%)、B 公司(7.20%)和 C 公司(6.79%)市场份额前 3，选定设备规模前 10 的供应商开展基于可靠性的 LCC 的深入分析。

3.1.1　总体 LCC-R 分析

图 4 为设备规模前 10 供应商基于可靠性的 LCC 曲线。在考虑可靠性的前提下，从各供应商 LCC 来看，可分为优质供应商、一般供应商及较差供应商。D、G、I 公司为优质供应商，其设备 LCC 最低，具备较高的设备可靠性和经济性。其中 D 公司初始投入成本相对较高，后期呈现平稳增长趋势，虽然设备可靠性提升致使初始投资增加，但其设备 LCC 最低，长期经济性佳，G、I 公司设备初始投入成本较低，后续运维阶段成本稳步增长。E、C 和 F 公司为一般供应商，其中 E、C 公司的设备 LCC 水平在中游偏下，初始成本较低，但后期维护成本逐步增加的特点，适用于前期投资预算紧张的场景。M、B 公司为较差供应商，其中 M 公司的 LCC 最高，30 年 LCC 高达1 721万元，且增长速度最快，反映出其设备可靠性低、维护需求大的特点。B 公司设备的初期成本偏高，LCC 逐年增长较快，需改善设备初始设计及提高可靠性。

3.1.2　经济寿命与年均成本分析

从经济寿命曲线可知，不同供应商主变压器经济寿命存在较大差异，从 10 年到 30 年不等，最低年平均成本为 20 万～40 万元/年。从长期投运效益来看，首选供应商 D 公司，其经济寿命最长；从中长期投运效益来看，I 供应商是优选公司，该供应商的经济寿命为 15～20 年，LCC 费用增长较慢，且年均总费用低于平均值，表明其设备具备良好的可靠性和经济性。次选供应商为 G 公司，该供应商的经济寿命适中，经济寿命曲线变化稳定，适用于平衡成本与寿命的场景。相对而言，M、B 公司呈现出经济寿命点较小，年平均成本较高的特点，长期成本控制能力较差。具体如图 5 所示。

3.1.3　综合评价结果分析

对 10 家供应商进行综合评价，采用专家调查法确定权重($\alpha=0.7$，$\beta=0.3$)，最终供应商综合评分如图 6 所示。I 公司综合评分最高，其次为 D 公司、G 公司，M 公司综合评分最低。综合评价表明，D、G、I 3 家公司的设备表现最优，可作为中长期投运设备的优先选择，而 M 公司因初始投资、运维检修成本等均过高，未达到基准要求，不推荐采用。

3.2　主变压器设备选型

根据设备台账情况并结合设备的不同结构特性，筛选出设备选择的关键要素，如使用环境、冷却方式、调压方式、绝缘介质、结构类型等。根据这些要素将设备划分为不同的组合类型，并选择设备存量较高的要素组合类型作为候选方案。最终选取了

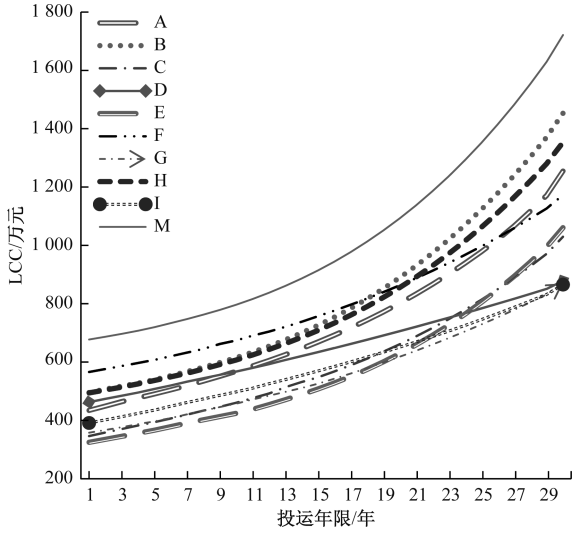


图 4　主变压器主要供应商总体 LCC

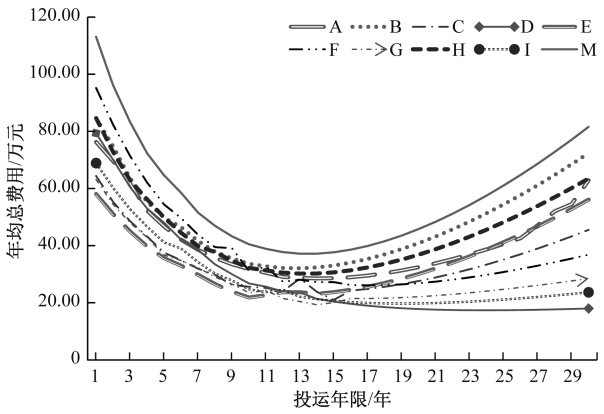


图 5　主变压器主要供应商年均总费用

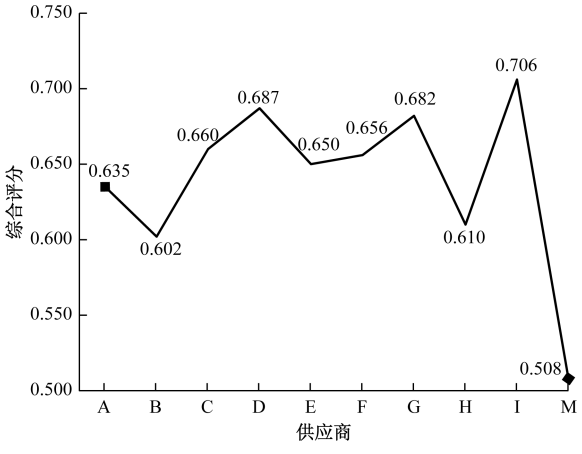


图 6　供应商综合评分

相数为三相、相别为ABC类、绝缘介质为油浸、结构型式为芯式、使用环境为户外、调压方式为有载调压的主变压器作为研究对象。在此基础上,结合不同的绕组形式和冷却方式,选取三绕组－自然冷却/油浸自冷、双绕组－自然冷却/油浸自冷、三绕组－自然油循环风冷、双绕组－自然油循环风冷4种典型方案开展设备比选。表2显示,所有方案均控制设备容量为50 MVA、年平均负载率60%,差异仅在于绕组型式和冷却方式。

图7为不同要素组合方案下设备基于可靠性的LCC曲线。从图中可以看出,在统计设备运行年限内,主变压器不同要素组合的总体LCC的范围在600万～1 100万元。所有因素组合的总体LCC都随时间增加,但增加的速度和幅度存在差异。具体而言,投运年限1～15年时,所有方案的LCC曲线斜率差异较小,投运年限15年后,方案A和方案C的LCC曲线斜率增加,成本增速加快,方案B和方案D的LCC曲线趋势相对较缓。比较不同组合在同一时间点的LCC总体曲线可知,在投运年限达到15年及以上时,相同投运年限内不同方案的LCC差异值最大可达40%及以上。方案A和方案B总体LCC较高,方案C总体LCC最低。值得注意的是,在投运年限达到15年以上时,方案A和方案C(三绕组主变压器)成本增速加快,在此阶段应加强设备的防护,避免设备故障。对比方案A和方案C、方案B和方案D可知,绕组型式相同条件下,冷却方式为自然油循环风冷的主变压器LCC更低,且差异较大。对比方案A和方案B、方案C和方案D可知,冷却方式相同条件下,绕组型式为双绕组的主变压器LCC更低,但差异较小。

由图8可知,在统计设备运行年限内,4种方案的变电主变压器年均成本呈现先递减后上升趋势,不同要素组合的年均总费用范围为16万元～82万元。

从年均总费用曲线变动趋势来看,所有要素组合在运行10～20年时,曲线变化趋势减缓,年平均使用成本处于相对较低且平稳的运行年限范围;在投运年限20～30年时,斜率增大,成本增速加快。对比方案A和方案C、方案B和方案D可知,绕组型式相同条件下,冷却方式为自然油循环风冷的主变压器年均总费用更低。对比方案A和方案B、方案C和方案D可知,冷却方式相同条件下,绕组型式为双绕组的主变压器年均总费用更低。从设备经济寿命点来看,方案C(三绕组-自然油循环风冷)经济寿命最低,为15年;方案D(双绕组-自然油循环风冷)经济寿命最高,为19年,其运行至11年后设备年均总费用最低,且状态稳定。综上所述,双绕组-自然油循环风冷主变在年均成本与经济寿命方面表现最优,可作为较优的设备选择方案。

表2　主变压器不同要素组合方案

方案	相数	相别	绝缘介质	结构	使用环境	绕组	冷却方式	调压方式
A	三相	ABC	油浸	芯式	户外	三绕组	自然冷却/油浸自冷	有载调压
B	三相	ABC	油浸	芯式	户外	双绕组	自然冷却/油浸自冷	有载调压
C	三相	ABC	油浸	芯式	户外	三绕组	自然油循环风冷	有载调压
D	三相	ABC	油浸	芯式	户外	双绕组	自然油循环风冷	有载调压

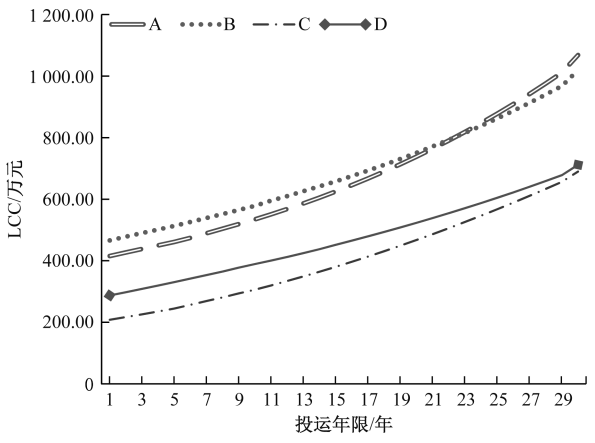


图7　主变压器不同要素组合类型总体LCC

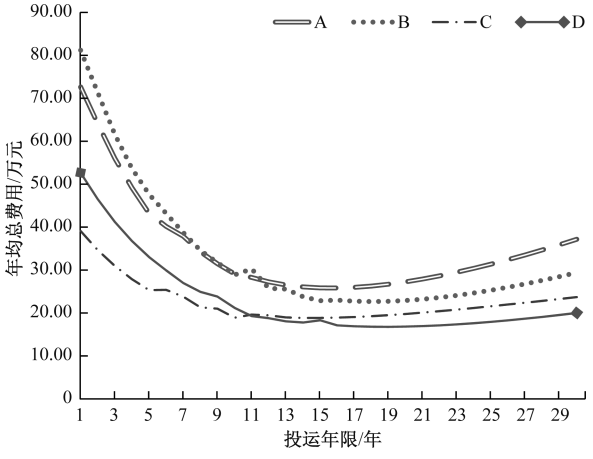


图8　主变压器不同要素组合类型年均总费用

4 结论

基于融合可靠性指标的LCC-R模型为解决电力变压器全寿命周期成本评估中可靠性量化不足的问题提供了可量化的分析方法，通过建立“成本-可靠性”双维度评价体系，将指数分布可靠性函数与动态成本测算相结合，实现了设备经济性与可靠性的协同优化，为电网设备精细化管理提供了系统化的分析工具。变压器案例分析验证了模型的实际应用价值。设备可靠性提升虽增加初始投资，但可降低运维成本；不同供应商全周期成本差异显著，优质供应商可节约40%以上成本；双绕组自然油循环风冷变压器相比三绕组方案具有更优经济性。案例数据表明，模型能有效识别供应商分级差异，支持技术选型决策。

研究成果为电网企业设备管理提供了重要决策依据。所确定的最优经济寿命区间，可指导设备更新策略制定；所建立的供应商评价方法，有助于规避“低价高用”风险；所提出的技术选型方案，能实现全周期成本节约。这不仅为电网企业降低运营成本、提升供电可靠性提供了切实可行的实践路径，更推动了电网资产管理模式从传统经验驱动向数据驱动、精准化管控转型，为电力系统高质量发展、资产精益化运营注入持续动力。

参考文献

[1] 卞建鹏，杨苏，高世闯，等. 基于全寿命周期成本的电力变压器检修决策[J]. 电力系统及其自动化学报，2019，31(5)：77-83.

[2] 赵宇琪，杜茗茗，王谦，等. 基于灰狼算法优化支持向量回归的110 kV电力变压器全寿命周期成本预测模型[J]. 重庆电力高等专科学校学报，2023，28(1)：24-29.

[3] GHAZALI Y Z. Managing on-load tap changer lifecycle in tenaga nasional berhad (TNB) distribution power transformers[C]// Proceedings of the 24th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2017). Glasgow：IET，2017：303-307.

[4] JEROMIN I，BALZER G，BACKES J，et al. Lifecycle cost analysis of transmission and distribution systems [C]//2009 IEEE Bucharest PowerTech. Bucharest：IEEE，2009：1-6.

[5] 王涌. 电力变压器全寿命周期成本模型分析[J]. 电气技术与经济，2023(1)：104-106.

[6] 刘树森. 资产全寿命周期管理在电网规划中的应用[J]. 科技和产业，2013，13(3)：36-38，116.

[7] 钟声，余晓峰，吴海泉，等. 220 kV变压器成本敏感度及成本估算模型[J]. 广东电力，2015，28(6)：87-92.

[8] QU G H，ZHENG R，LEI S，et al. A new lifecycle cost model of power transformer and its comprehensive sensitivity analysis [C]//Proceedings of 2014 International Conference on Power System Technology. Piscataway：IEEE，2014：1342-1348.

[9] 谢庆，杨天驰，裴少通，等. 基于多尺度协作模型的电气设备红外图像超分辨率故障辨识方法[J]. 电工技术学报，2021，36(21)：4608-4616.

[10] 李刚，李银强，王洪涛，等. 电力设备健康管理知识图谱：基本概念、关键技术及研究进展[J]. 电力系统自动化，2022，46(3)：1-13.

[11] 李娜，李程启，徐冉，等. 变电设备全寿命周期成本-效能综合评估方法[J]. 山东电力技术，2023，50(5)：48-54.

[12] 赵淑媛，陈衡，张伊玺，等. 考虑故障率的变压器全寿命周期成本评估[J]. 内蒙古电力技术，2025，43(6)：66-74.

[13] 陈祥. 基于全寿命周期成本的变电站主设备选型分析[J]. 电工技术，2022(4)：161-163.

[14] 朱丽丽. 变电站主设备LCC招标评标动态模型及应用[J]. 科技和产业，2016，16(8)：70-73，110.

[15] 杨娜，葛斐，叶斌，等. 基于资产全寿命周期的500千伏电网规划方案评估[J]. 科技和产业，2013，13(12)：153-156.

[16] 刘一博，王硕，刘素伟. 变电设备全寿命周期成本智能优化模型构建[J]. 粘接，2025，52(11)：212-215.

[17] 何锐，梁智，戈一航，等. 基于ISSA-XGBoost的数字孪生变电站故障监测[J]. 科技和产业，2025，25(17)：100-107.

[18] 刘士李，朱晓虎，刘丽，等. 基于模糊平滑的安徽地区110 kVGIS变电站LCC模糊估算模型[J]. 广西师范大学学报(自然科学版)，2020，38(5)：24-33.

[19] 丁思畅，严俊. 基于故障树和蒙特卡罗方法的地铁车门可靠性分析[J]. 城市轨道交通研究，2024，27(10)：188-192，198.

[20] 兑红炎，郑小倩，陈立伟，等. 基于半马尔科夫过程的逻辑门可靠性分析[J]. 运筹与管理，2021，30(5)：66-72.

[21] 马林海，贾旭杰，姜珊，等. 考虑动态故障率的多态级联失效电网系统可靠性分析[J]. 运筹与管理，2024，33(11)：118-123.

[22] 朱益辰，魏志明，刘豪，等. 基于故障树分析法的某控制系统故障与可靠性研究[J]. 现代电子技术，2024，47(22)：1-6.

[23] 刘海潮，沈丁建，唐雄辉，等. 基于用户模型的驱动电机系统可靠性试验循环研究[J]. 控制与信息技术，2023(4)：96-104.

[24] 张文韬，张友鹏，苏宏升，等. 基于动态故障树的CTCS-3级ATP系统可靠性分析[J]. 工程设计学报，2014，21(1)：18-26.

[25] 叶远波，刘宏君，黄太贵，等. 变电站继电保护设备状态检修可靠性分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(10)：170-177.

[26] 陈衍泰,陈国宏,李美娟. 综合评价方法分类及研究进展[J]. 管理科学学报,2004(2):69-79.

[27] JURAN J M. Quality handbook[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

Construction and Application of Life Cycle Cost Model for Power Transformers Based on Reliability Fusion

LI Zhiwei[1], KONG Juan[2], ZHANG Zhaoyang[1], WU Yue[3], WANG Can[4], ZHANG Liang[4], WANG Wei[1]

(1. State Grid Hubei Economic and Technological Research Institute, Wuhan 430077, China; 2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 3. Huazhong Electric Power Technology Development Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 4. State Grid Wuhan Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: To address the insufficient consideration of reliability factors in traditional power transformer cost assessments, a life cycle cost model incorporating reliability metrics (LCC-R) model was proposed. A dual-dimensional evaluation framework integrating cost and reliability was established, employing exponential distribution reliability functions and dynamic cost estimation methods for empirical analysis on transformers. It is found that equipment reliability levels correlate positively with initial investment costs and negatively with operational and maintenance expenses. Significant variations exist in LCC and optimal economic lifespans across equipment from different suppliers. The theoretical foundations and decision-making references are provided for power grid enterprises in equipment selection, supplier evaluation, and asset management.

Keywords: power transformer; life cycle cost(LCC); cost-reliability; equipment selection; supplier evaluation