

华北电力大学

专业硕士学位论文

考虑资本性成本约束的电网技改项目

投资时序优化方法

**Timing Optimization Method for Investment in Power
Grid Technical Transformation Projects Considering
Capital Cost Constraints**

尹政

2024年5月

国内图书分类号：TM73

国际图书分类号：621.3

学校代码：10079

密级：公开

专业硕士学位论文

考虑资本性成本约束的电网技改项目 投资时序优化方法

硕士研究生：尹政

导师：王志强 副教授

企业导师：耿建宇 高级工程师

申请学位：能源动力硕士

专业领域：电气工程

学习方式：全日制

所在学院：电气与电子工程学院

答辩日期：2024年5月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM73

U.D.C: 621.3

Thesis for the Professional Master's Degree

**Timing Optimization Method for Investment in Power
Grid Technical Transformation Projects Considering
Capital Cost Constraints**

Candidate:	Yin Zheng
Supervisor:	Associate Prof. Wang Zhiqiang
Enterprise mentor:	Senior Engineer Geng Jianyu
Academic Degree Applied for:	Master of Energy and Power Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
Cultivation ways:	Full-time
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	May, 2024
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

“十三五”期间，我国新型电力系统建设加快、工商业和居民用电负荷增长、能源结构加速转型，诸多因素叠加使得电网资产规模日益扩张，电网结构愈发复杂，电网公司面临早期投入设备资产成批次老化的严峻形势，电网设备技术改造的重要性日益凸显。因此，确定合理的技改投资资金规模并根据资金限制对技改项目储备库中的技改项目进行投资决策尤为关键。目前电网企业在技改项目投资决策上主要存在两种不足。一是忽视了电网运维过程中资本性成本和成本性成本之间的关联，割裂地进行两种电网运维成本分配，难以实现电网技改投资资金规模合理配置。二是在电网技改项目投资决策地过程中计划周期较短，缺乏对项目投资时序的考虑，难以定制匹配企业长远运营目标的技术改造方案。为此，本文针对电网技改项目投资决策进行了以下工作：

本文首先研究电网全寿命周期中运维阶段资本性及成本性成本优化分配。介绍了电网运维资本性及成本性成本，对电网运维资本性及成本性成本投资成效进行分析，并基于历史数据挖掘运维成本与相应收益内在关系，以投资成效最优为目标建立电网运维成本优化分配模型，求解电网技改资本性成本约束。

然后，在分析现有电网技改项目投资决策现状的基础上，针对现有决策流程的不足，提出一种技改项目时序优化方法。将电网技改资本性成本约束转化为每年技改投资的资金约束，同时考虑项目出入库特性和紧迫性，建立以安全、经济和绿色三个维度效益为目标的技改项目投资时序优化模型。另外，考虑技改项目储备库中项目滚动更新的特性，基于技改项目出入库机制，逐年进行投资决策优化。

最后，本文以某省级电网为例，对电网运维成本优化分配模型和电网技改项目时序优化模型进行仿真模拟。同时，计算并分析了电网技改项目效益指标不同权重设置对时序优化结果的影响。仿真结果表明，考虑资本性成本约束的电网技改项目投资时序优化方法能优化分配技改投资成本，合理安排技改项目投资时序以提高投资效益。

关键词：电网技改项目；时序优化；资本性成本；投资决策；

Abstract

As the national economy transitions from high-speed growth to high-quality growth, the growth rate of electricity demand from industrial, commercial, and residential users in China is slowing down. The scale of investment in grid infrastructure is gradually decreasing, and grid companies are facing the severe situation of early investment in equipment assets aging in batches. The importance of grid equipment technology transformation is increasingly prominent. Therefore, it is crucial to determine a reasonable scale of technical transformation investment funds and make investment decisions on technical transformation projects in the project reserve based on fund limitations. At present, there are mainly two shortcomings in the investment decision-making of grid enterprises in technical transformation projects. First, it neglects the relationship between capital costs and operating costs in the grid operation and maintenance process, and carries out the allocation of the two types of grid operation and maintenance costs separately, making it difficult to achieve a reasonable allocation of grid technical transformation investment scale. Second, in the process of investment decision-making for grid technical transformation projects, the planning cycle is relatively short, and there is a lack of consideration for the timing of project investment, making it difficult to tailor technical transformation plans that match the long-term operational goals of the enterprise. Therefore, this article conducts the following work on the investment decision-making of grid technical transformation projects:

Firstly, this article studies the optimization allocation of capital and operating costs in the operation and maintenance stage of the grid's entire life cycle. It analyzes the investment effectiveness of capital and operating costs in grid operation and maintenance, explores the inherent relationship between operation and maintenance costs and corresponding benefits based on historical data mining, and establishes an optimization allocation model for grid operation and maintenance costs with the goal of maximizing investment effectiveness, solving the constraint of capital costs for grid technical transformation.

Secondly, based on the analysis of the current status of investment decision-making for existing grid technical transformation projects, a method for optimizing the timing of technical transformation projects is proposed to address the shortcomings of the existing decision-making process. The capital cost constraint of grid technical transformation is transformed into a funding constraint for annual technical transformation investment, and a technical transformation project investment timing optimization model is established with the goal of "safety,

economy, and environmental friendliness" in three dimensions. In addition, considering the characteristic of rolling updates of projects in the project reserve, a rolling mechanism is added to the timing optimization model to achieve annual investment decision optimization.

Finally, taking a provincial-level grid as an example, this article simulates and verifies the feasibility of the grid operation and maintenance cost optimization allocation model and the grid technical transformation project timing optimization model. At the same time, it calculates and analyzes the impact of different weight settings of grid technical transformation project benefit indicators on the timing optimization results.

Keywords: Grid technical transformation project; Timing optimization; Capital costs; Investment decision-making.

目 录

第1章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 电网技改投资研究现状.....	2
1.2.2 时序优化研究现状.....	3
1.3 主要研究内容.....	4
第2章 电网运维资本性及成本性成本优化分配模型	6
2.1 优化分配模型研究思路.....	6
2.2 投资成效指标选取与赋权	7
2.2.1 投资成效指标选取.....	7
2.2.2 投资成效指标赋权.....	9
2.3 投入与成效关系分析及建模	10
2.3.1 投入与成效指标协同制约关系分析.....	10
2.3.2 基于历史数据的投入与成效关系建模	12
2.4 成本优化分配模型.....	14
2.4.1 目标函数.....	14
2.4.2 约束条件.....	15
2.5 模型求解.....	16
2.6 本章小结.....	17
第3章 技改项目投资时序优化模型	18
3.1 技改项目投资决策分析.....	18
3.1.1 技改项目投资决策现状.....	18
3.1.2 技改项目投资决策优化思路.....	19
3.2 技改项目投资成效建模.....	19
3.3 时序优化模型.....	22
3.3.1 决策变量和状态变量.....	22
3.3.2 目标函数.....	22
3.3.3 约束条件.....	23
3.4 模型求解.....	24
3.5 本章小结.....	27
第4章 算例分析	28
4.1 算例数据.....	28
4.2 资金优化分配结果与分析	30
4.3 技改项目时序优化结果及分析	34

4.3.1 技改项目投资时序优化结果.....	34
4.3.2 模型必要性和有效性分析.....	37
4.3.3 权重设置对优化结果影响分析.....	40
4.4 本章小结.....	42
第5章 结论与展望	43
5.1 结论.....	43
5.2 展望.....	43
参考文献.....	44

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

“十三五”期间，我国新型电力系统建设加快、工商业和居民用电负荷增长、能源结构加速转型，诸多因素叠加使得电网资产规模日益扩张，电网结构愈发复杂。面对之前大规模的电力设备投入使用，在维护工作中不可避免存在设备技术落后难以满足新的生产管理需求和设备老化磨损安全隐患增加的问题。加之电力企业效益下滑，“新冠疫情”迟滞生产要素流动，电力设备隐患治理、更新升级等“欠账”较多，近两年电力设备可能进入故障高发期。2023年8月7日，国家能源局发布《国家能源局综合司关于认真贯彻落实全国安全生产电视电话会议精神进一步加强电力安全监管工作的通知》（国能综通安全〔2023〕96号），明确要求全面落实电力安全生产责任。因此，处理设备技术落后和老化问题的主要手段电网技术改造至关重要。合理的电网技改项目投资决策能有效保障用电安全，履行电网公司社会责任，提高国民整体幸福度。

长期以来电网投资去向主要为基建成本，电网技改受到的关注较少。目前，电网技改投资资金规模拟定较为粗放，未能从全寿命周期角度考虑不同成本之间的协同优化。从全寿命周期角度来看，电网技改成本发生在电网运维阶段，电网运维成本可以分为技改成本和运检成本，二者差异在于是否产生固定资产并输配电价回收成本，前者为资本性成本后者为成本性成本^[1]。资本性投入和成本性投入在提升设备安全方面存在协同作用，同时二者在资金额度配置上相互制约、此消彼涨，当前电网公司缺乏将二者联合考虑以合理配置技改投资额度的考虑，容易引发资金错配、投资收效较低的现象。

此外，在考虑电网生产成本中资本性成本配置优化结果的基础上，也需要考虑电技改项目投资时序对投资效益产生的影响。现有电网技改项目投资流程为规划编制—项目储备—根据预算进行当年项目出库^[2]。这种技改项目投资思路极易陷入局部最优，而长期来看由于投资冗余或不足导致投资效果欠佳。因此需要从长期决策的角度科学安排技改项目的投资顺序，以满足电网在经济性、安全性等方面的需求。

综上，当前电网技改投资资金规模确定未考虑电网运维过程中资本性成本与成本性成本的协同制约关系，难以实现投资成本之间的平衡。电网技改项目投资决策中，缺乏技改项目投资时序的考虑，不能够满足技改产出效益最优的目标。因此，有必要深入研究电网设备技改成本配置优化方法，合理优化资金配置，并在技改投资规模约束下优化技改项目投资时序，提高资金利用效率，达到精准投

资的目的。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 电网技改投资研究现状

电网技改投资主要包括三个阶段，分别为规划阶段、计划阶段和后期阶段。

针对前期阶段的研究为长期研究，主要包括技改投资规模预测和针对技改项目可行性研究报告审批的准入决策研究。杨威引入资产墙原理对电网一次主设备的技改和大修投资规模进行预测，并构建了一个电网一次主设备全寿命周期成本模型和设备技改大修决策模型，作为设备技改决策依据^[3]。贺兰菲研究了输配电定价改革背景下输配电价定价成本与设备技改大修决策的关联，根据监审约束条件，构建最大化资产原值和运维费用增长空间的经济模型，基于上述模型优化电网技改投资规模，并提出一种技改检修策略以辅助设备进行技改大修决策^[4]。王凯引入生存概率模型和威布尔曲线，改进了“资产墙”技改投资规模预测方法，在中长期的技改投资规模预测中考虑电网风险，提高了预测精度^[5]。周凯兵结合设备平均使用寿命、财务折旧年限、设备设计寿命进行电网公司“资产墙”预测，以此测算电网技改投资规模，解决了传统预测手段数据来源单薄、应用效果一般的问题^[6]。童典基于 LCC 理论计算电网技改和大修的年均费用，提出了电网设备安全评价模型，以技改和大修的安全评分与年均费用的比值为标准进行技改项目的准入优选^[7]。

计划阶段的研究主要为技改投资效益评估和项目出库优选。电网技改项目的投资效益评估为电网技改投资决策的基础。杨蕴华构建了电网技改项目评价指标体系，并采用主客观相结合的方式对指标赋权，最后得出每个项目评分，以综合评分为依据进行项目优选^[8]。在这类传统技改项目投资效益评估的基础上，有学者考虑到需要从多方面综合考虑技改项目效益，避免投资行为追求单一特征的盲目性，提高电网企业投资效率与设备运营收益。章思远考虑到架空线路六防技改项目风险属性，引入线路风险值概念评价架空线六防项目，为六防项目技改效果评价提供依据^[9]。万昆提出考虑财务效益、客户绩效、内部评价、外部评价、供应链协同五方面的多属性电网技改项目评价体系，辅助电网技改项目方案比选和决策^[10]。基于技改投资效益评估的研究，许多学者构建技改项目优选模型，为项目出库安排提供参考。于天一对变电站无功技改项目展开研究，选择经济性、功能性、风险性、紧迫性、可行性和政策性六个指标作为项目优选排序依据，考虑到决策者投资风险和收益倾向，采用前景理论构建这类技改项目优选模型^[11]。宋天奇采用 DEA 模型测算复杂技改项目产出效益，并引入加权算子以解决传统 DEA 模型不考虑投资者偏好的问题，实现部分产出效益测算困难的项目优选排序^[12]。

此外也有针对单一设备的技改时间的投资决策,文献^[13]从设备历史故障信息入手,建立设备故障率与经济性关联模型,以经济效益最优为目标函数进行单一设备技改时间决策。

后期阶段的研究主要为技改项目的后评价研究。朱鑫鑫等从投入产出角度分析电网技改项目投资效益,引入全寿命周期成本理论,建立了经济效益计算模型^[16]。谭玉东等采用物元可拓模型以解决电网技改项目投资效益评价模糊的问题,明确计算项目与不同评价等级关联系数,提升了项目评价的区分度^[18]。杨卫红针对部分电网技改项目定性效益指标难以量化的问题,提出了一种模糊区间评价与层次分析相结合的后评价方法^[20]。此外,针对不同类型的技改项目,如变电站技改项目^[21]、输变电技改项目^[22],也有学者根据项目特性提出了适用指标体系进行项目后评价。

综上所述,针对电网技改项目投资预测和优化的相关研究主要是考虑现有设备资产年龄结构现状基于“资产墙”理论对后续年份技改投资规模的预测,未考虑技改投资为资本性投资产生固定资产,从后续输配电价提计收益和电网可靠性等方面进行考虑。在技改项目评价和优选方面,缺乏对投资时序的考虑,以静态的方式进行项目出库优选,忽略了已出库项目会对后续电网运行状态、累计效益产生影响,以及长期决策过程外部条件改变对技改项目决策的影响,不能契合电网技改投资决策实际情况。

1.2.2 时序优化研究现状

在电网项目的投资中,往往由于人力、资金和需求的限制不能在某一时间节点完成所有项目的投资,一般会在连续的时间序列中进行项目投资决策。因此,对电网项目进行投资决策时需要考虑在时间序列中投资能力、投资效益等决策关键因素受时间的影响。时序优化理论为此类问题提供了解决方案。时间序列是指按照时间顺序排列的一系列数据点或观测结果,这些数据点通常是在一定时间间隔内或者按照时间顺序采集得到。时序优化是指利用时间序列数据进行分析 and 建模,预测未来的趋势和规律,并采用合适优化算法来求解问题的过程^[23]。

时间序列概念最早起源于19世纪,由英国博学家 Sir Francis Galton 提出,高尔顿引入了回归分析和相关性概念,最先将时间序列预测分析应用于统计学和计量经济学领域^[25]。19世纪末至20世纪初,在工业革命以及自动控制系统的背景下,随着控制理论开始兴起,时序优化思想逐渐形成,首先出现在1912年 Harry Nyquist 和 Harold S. Black 对反馈控制系统的研究中^[28]。二战期间,运筹学在资源分配、逻辑分析和决策支持方面起到了至关重要的作用,其中的线性规划、整数规划和动态规划等技术开始应用于时序优化问题。随着计算技术的发展,尤其是上世纪

五十年代以后，高效的算法和模型用于处理更加复杂的时序优化问题，例如，Dijkstra 算法^[29]、Bellman-Ford 算法^[30]等在图论和网络流问题的时序优化上产生了重要影响。时至今日，时序优化在各个领域得到广泛应用，包括但不限于金融^[31]、供应链管理^[32]和生产计划^[33]等。

此外，在电力领域也有不少学者从时序优化角度出发，解决实际的投资决策、电力系统调度和控制策略等问题。Taherkhani M 构建了一个多阶段电网扩张和风电装机容量增长协同规划模型，并采用时序优化思路进行求解，发现该模型在风电高渗透率场景下，电网扩张成本与发电机组成本之和相较传统发电方式更有优势^[34]。Wang Y 以有源微电网最低运行成本为目标能源调度时序优化模型，该模型由预测阶段、日前调度阶段和实时调度阶段组成，与原始调度方案相比显著提高了经济性^[35]。束洪春基于限流混合式直流短路器提出一种开断时序优化方法以减少支路开断电流和降低电力电子开关投资成本^[36]。金智博分析了电网建设项目投资行为对电网资产规模和经济效益的变化影响，引入这些因素对后续阶段投资能力的反馈机制，以规划窗口内项目投资效益最大为目标，进行电网规划项目投资决策时序优化，得出最优出库方案^[37]。

综上所述，时序优化理念已经应用于多种学科领域，但在电网项目投资决策领域普遍还是缺乏对时间属性的考虑，难以贴合电网项目投资决策实际情况。

1.3 主要研究内容

本文研究内容为考虑资本性成本约束的电网技改项目投资时序优化方法。首先，考虑电网全寿命周期中的运维阶段成本组成，以电网运维成本投资效益最大化为目标对其资本性及成本性成本建立优化分配模型。然后，在明确资本性成本约束的情况下，考虑投资时序影响，建立技改项目投资决策时序优化模型。最后，选择了典型地区电网运维成本及成效指标和技改项目数据验证所提方法的可行性。

本文的具体研究内容如下：

(1) 电网运维资本性及成本性成本优化分配模型

分析总结了电网运维资本性和成本性成本的投资成效差异，提炼了四个投资成效指标，并分析二者与成效指标的协同制约关系，明确了数据存在宏观规律，通过神经网络模型以历史数据对成本与投资成效的内在关联进行建模。在此基础上，以电网运维成本投资成效最大为目标建立模型，以实现资本性与成本性成本的合理化配置。

(2) 电网技改项目时序优化模型

在电网资本性成本约束的基础上，研究技改项目投资时序优化方法，提高资

金利用效率。总结电网技改项目效益产出，考虑电网技改项目投资决策的时序影响，构建技改项目投资时序优化模型，实现经济、安全、绿色三类产出效益综合最优。

(3) 算例分析

在第二章和第三章的模型研究基础上，以某省地市公司的数据进行电网技改规模配置优化及电网技改项目时序优化，验证了模型的可行性与有效性，并对技改投资时序优化模型中投资成效指标权重对投资决策结果的影响做出分析。

本文技术路线如图 1-1 所示。

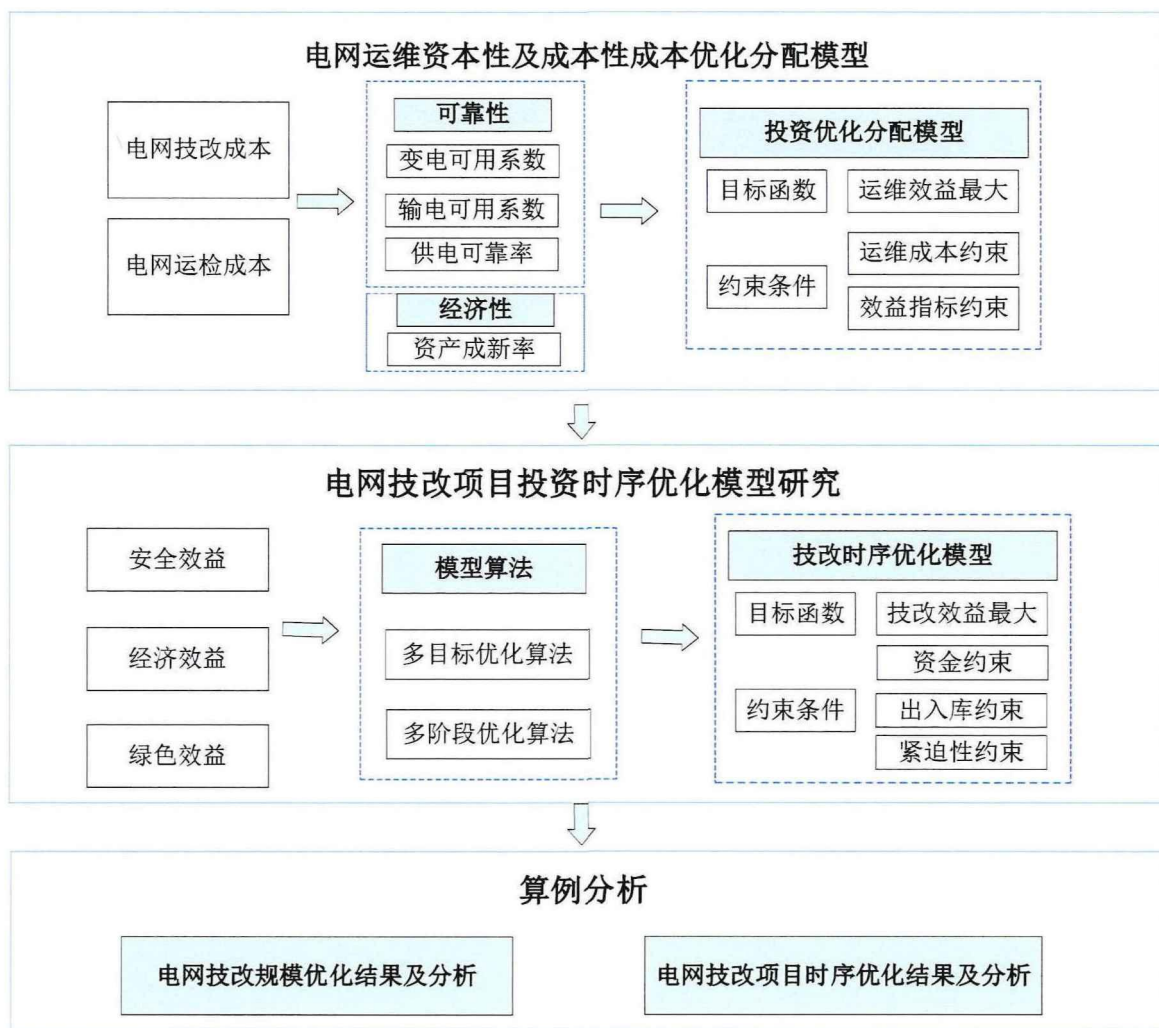


图 1-1 本文技术路线

第2章 电网运维资本性及成本性成本优化分配模型

电网全寿命周期以项目为载体考虑，参考文献[38-39]将电网全寿命周期划分为决策设计与施工建设阶段、运行维护阶段和退役报废阶段。电网运维阶段指相关项目开始运行到停止运行全过程，因此，电网运维阶段成本（也可以称为电网运维成本）与设备全寿命周期中运维阶段成本^[40]不同，其包含电网设备改造成本。电网运维成本包括电网运检成本和电网技改成本，具体组成如图 2-1 所示。

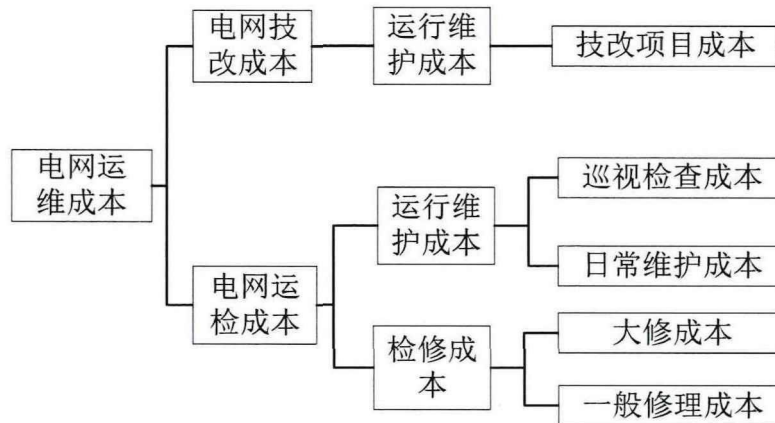


图 2-1 电网运维成本组成

资本性成本指的是在投资过程中增加设备资产原值、产生固定资产的成本，成本性成本指的是不改变设备资产原值、维持设备正常运行的成本。电网运维中资本性及成本性成本分别为电网技改成本和电网运检成本。

电网运维资本性成本转化为电网有效资产，提高电价增长空间，对电网经济效益产生影响。同时，电网运维资本性成本为电网设备技改规模，与电网安全性呈现正相关趋势。电网运维成本性成本用于电网日常维护和检修，是安全用电的重要影响因素。

在电网运维阶段，一方面，电网企业投资能力来源于其输配电价收入和最大负债下融资收入，电网运维阶段投资能力有限；另一方面，居民和工商业用户对供电安全要求不断提高电网，电网企业需要获取合理经济收益以保障自身经营。因此从效益出发，考虑电网运维资本性及成本性成本效益异同，并优化二者资金配置，提高电网运行经济性和安全性至关重要。

2.1 优化分配模型研究思路

当前电网运维资本性与成本性成本配置过程相互独立，未考虑二者联合配置。以电网运维资本性成本配置流程为例进行说明，当前电网公司技改规模确定可以

总结为：下级单位上报不良设备资产信息—上级单位预测技改需求—下辖单位上报技改预算建议—上级单位参考需求预测和预算建议下达技改总控目标。

以上流程中未考虑电网运检成本配置情况，容易导致资金错配，投资效益不佳。同时，从需求角度进行投资金额配置，难以实现需求和投资成效的平衡，不符合电网企业精准投资的理念。

因此，优化分配模型的整体思路是把握电网运维资本性及成本性投资成效，并将二者联合考虑，以投资成效为目标，分析在电网运维成本受限的情况下，二者的资金配置方式，具体研究思路如下：

首先进行电网运维资本性成本和成本性成本投资成效的定性分析，提炼并设立指标，同时设置指标权重为后续优化打下基础。其次，收集电网运维资本性及成本性成本以及投资成效数据，构建数据集合，在数据中验证电网运维成本与投资成效指标存在数学规律，基于历史数据，对电网运维成本投入与产出建模。然后，将两类成本总额作为边界条件，将两类成本作为决策变量，构建基于成效评价的投资优化分配模型。最后，研究模型求解策略，将综合效益最优的成本配置方案作为优化结果，达到电网技改规模优化的目的并作为技改项目时序优化的资本性成本约束。

2.2 投资成效指标选取与赋权

电网运维成本主要产生可靠性和经济性两方面的成效。从电网可靠性方面分析，电网运维资本性成本和成本性成本分别为技改和运检成本，与电网可靠性成正相关。从电网经济性方面分析，经济性随电网运维资本性成本增加而先增后减，具体分析如下。

电网营收模式为输配电价准许收入，计算方式为准许成本、准许收益和价内税金之和，这三者计算方式为电网设备资产净值乘以相关费率^[41]。电网运维资本性成本产生投资额度乘固定资产转化率的固定资产原值，固定资产转化率一般与资本性成本相关技改项目电压等级相关^[42]。由于电网运维资本性成本提高输配电价收入，当资本性成本不足时，输配电价收入减少的同时电网运检成本增多，当资本性成本过量时，电网设备普遍退役提前，导致设备残值增加，无法合理计提折旧。

2.2.1 投资成效指标选取

为进行投入产出关系分析及运维产出效益评价，应选取适当的产出效益指标。本文遵循系统性、典型性、可采集、可量化、关联性高等原则，筛选出资本性成本、成本性成本分别影响的产出指标，分别为变电可用系数^[43]、输电可用系数^[44]、

供电可靠率^[45]和资产成新率^[46]，具体阐述如下：

(1) 变电可用系数

变电可用系数是衡量变电设备可用性的一个指标，反映了电网变电设备的可靠性。在电网中，该系数一般指变电设备在统计时间内的平均可用小时数与统计小时数比率的百分数。变电可用系数计算方式为：

$$AF_{tf} = \sum_{i=1}^{N_{tf}} A_{tf,i} / \sum_{i=1}^{N_{tf}} T_{tf,i} \quad (2-1)$$

式中 AF_{tf} 为变电可用系数， N_{tf} 为统计的变电设备数量， $A_{tf,i}$ 为第 i 个变电设备统计可用小时数， $T_{tf,i}$ 为第 i 个变电设备总统计小时数。

(2) 输电可用系数

与变电可用系数同理，该系数是输电设备在统计时间内的可用小时数与统计时间比率的百分数。输电可用系数计算方式为：

$$AF_{ts} = \sum_{i=1}^{N_{ts}} A_{ts,i} / \sum_{i=1}^{N_{ts}} T_{ts,i} \quad (2-2)$$

式中 AF_{ts} 为输电可用系数， N_{ts} 为统计的输电设备数量， $A_{ts,i}$ 为第 i 个输电设备统计可用小时数， $T_{ts,i}$ 为第 i 个变电设备总统计小时数。

(3) 供电可靠率

供电可靠率是供电质量的重要指标，它是指供电系统在用户用电时间内供电不中断的概率。电网中，一般以用户供电平均年供电小时数与一年内全部小时数的百分比来表示。供电可靠率计算方式为：

$$AS = \sum_{i=1}^{N_u} A_i / 8760N_u \quad (2-3)$$

式中 AS 为供电可靠率， N_u 为统计的用户数量， A_i 为第 i 个用户年供电小时数。

(4) 资产成新率

资产成新率又称“资产净值率”或“有用系数”，是电网企业当期平均固定资产净值同固定资产原值的比率，反映了电网企业所拥有的电网设备资产的新旧程度。资产成新率计算方式为：

$$ANR = \frac{CV}{OV} \quad (2-4)$$

式中 ANR 为资产成新率， CV 为电网固定资产现值， OV 为电网固定资产原值。

综上所述，最终选取了以上 4 个指标进行投入产出的关系分析及运维产出成效的评价，变电可用系数、输电可用系数和供电可靠率反映的是电网输变配电的可靠性，是电网中的可靠性指标。可靠性指标受到电网运维资本性成本和成本性成本的影响，资本性成本主要用来进行设备的更新和改造，成本性成本用来确保设备的正常运行和及时维护，是确保投运设备正常运行的重要因素。资产成新率

与电网输配电价收入相挂钩，是电网重要经济性指标。由于实施技改增加电网公司固定资产，资产成新率受到资本性成本的影响。

2.2.2 投资成效指标赋权

层次分析法是一种将决策有关的元素分解成目标、准则和方案等层次，在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。层次分析法具有方法简便、系统性强等特点，是分析多目标、多因素、多准则的复杂大系统的有力工具。层次分析法具体步骤如下：

(1) 构建层次结构模型

通过分析整体对象，将各个影响因素按照不同属性及其归类分成不同层级。低层次因素影响高层次，高层次因素支配低层级。

(2) 构造判断矩阵

对于每一层中的所有元素而言，其重要性需要具体量化。通过数字 1~9 来量化两元素之间的重要程度差别，构造判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 。

表 2-1 标度含义值

标度值 a_{ij}	1	3	5	7	9
重要程度	相同	稍微	明显	强烈	极端

2、4、6、8 表示上述相邻判断的中间值

(3) 一致性检验。

计算判断矩阵最大特征值，然后计算一致性指标 CI 。在对复杂系统中各指标进行两两比较构建判断矩阵时，由于比较的量较多评价结果难免会出现非一致性，这时候就要通过计算一致性程度来确定是否接受判断矩阵。通常利用一致性比例 (CR) 进行校验，计算方法如下：

一致性指标 CI 计算公式为：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2-5)$$

式中 λ_{\max} 表示最大特征值， n 表示矩阵的阶数。

通过计算一致性比例 CR 来检验一致性，具体计算公式为：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2-6)$$

式中 RI 为随机一致性指标，判断矩阵的阶数不同， RI 的值也不同。通过查表可得 $n=4$ 时， $RI=0.9$ 。

当 CR 小于 0.1 时，认为一致性满足要求，否则进行校正或则重构，直到满足

要求为止。

(4) 计算各层指标权重。

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj} \right), \quad i=1,2,\dots,n \quad (2-7)$$

式中权重计算即将判断矩阵中元素按列归一化后各列相加，再除以判断矩阵的列数 n 。

2.3 投入与成效关系分析及建模

2.3.1 投入与成效指标协同制约关系分析

协同制约关系具体表现为一类指标的增减对另一类指标的变化趋势与变化范围有明确的影响。分析成本投入与产出之间的协同制约关系可以使电力企业更好地把握每年总投入的分配策略，采用适当的图形分析方法对资本性成本和成本性成本协同制约关系及两者与产出效益指标之间的关联性进行可视化分析。本节以某省 18 个市级供电公司 2021 年的电网技改成本、电网运检成本、资产原值、资产现值、变电可用系数、输电可用系数和供电可靠率数据进行成本投入与成效指标协同制约关系分析。

(1) 数据预处理

数据预处理包括以下步骤：数据清洗、数据筛选、影响因素消除等。具体数据处理方式见表 2-2 以图 2-2 为例，红点为变电可用系数异常数据。

表 2-2 数据预处理方式

序号	数据处理方式
1	删除变电可用系数、输电可用系数中异常数据
2	筛选出电网技改成本、电网运检成本、资产原值、资产现值和供电可靠率数据
3	电网技改成本、电网运检成本除以资产原值消除资产规模影响
4	资产现值/资产原值，获得资产成新率

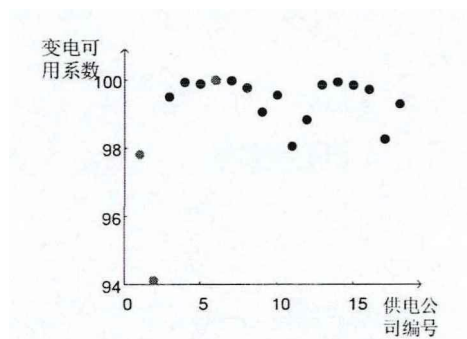


图 2-2 各市供电公司变电可用系数

(2) 各类指标协同制约关系分析

总共需要分析以下关系：资本性成本与成本性成本之间的关系、资本性成本及成本性成本与可靠性指标的关系、资本性成本及成本性成本之间与经济性指标的关系。由于变电可用性系数、输电可用性系数数据质量较差，可靠性指标选取供电可靠性与两个成本分析；经济性指标为资产成新率。

1) 资本性成本与成本性成本之间的关系分析

首先绘制市级供电公司单位资产原值资本性成本与单位资产原值成本性成本之间的散点图，如图 2-3 所示。

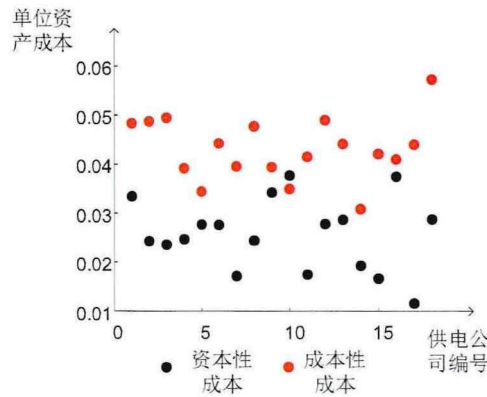


图 2-3 各市供电公司电网运维资本性与成本性成本散点图

由散点图及数据可以看出，在电网企业运维阶段的 5 类设备投资中，除了 10 号供电公司，其他的供电公司的成本性成本均大于资本性成本。虽然随着资本性成本的增加单位资产原值成本性成本不一定减少，但是成本性成本与资本性成本基本呈现相互制约的关系。

2) 资本性成本及成本性成本与可靠性指标关系分析

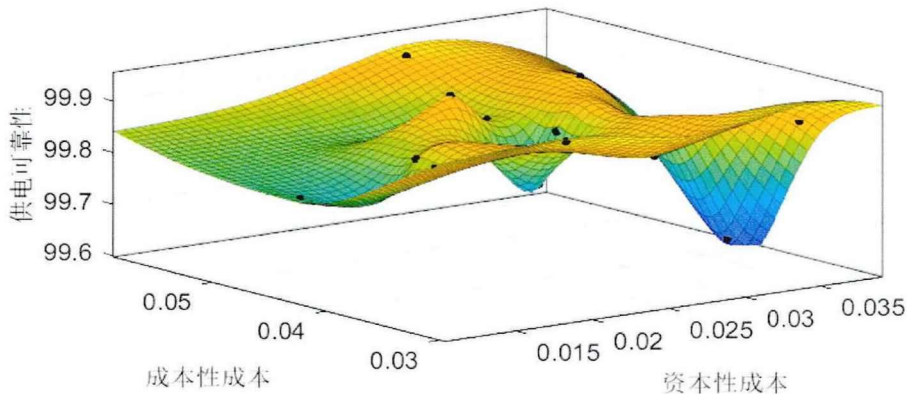


图 2-4 资本性成本、成本性成本与供电可靠性拟合曲面

进一步分析资本性成本、成本性成本与可靠性效益指标间的关系，本节采用 matlab 中曲线拟合工具，以函数图像拟合的方式绘制了各供电公司单位资产原值资本性成本、单位资产原值成本性成本与供电可靠率的拟合图像，分析资本性成

本、成本性成本与电网可靠性指标的联系。从该图中可以得出，资本性成本与成本性成本拟合的供电可靠性图像在除去中间的一个内陷点，大致可以看作一个三维凸面，可以说明在中间位置其供电可靠性较高，且越接近图像顶点增长越缓慢。可以得出结论：在某个点设为 $F(a,b)$ 取得最优的供电可靠率， a 为供电可靠率最优单位资产原值资本性成本， b 为供电可靠率最优单位资产原值成本性成本。这个结论也符合在电网运维成本额度一定的情况下，应该合理配置运维检修成本和技术改造成本才能使得供电可靠性最优的客观规律。

3) 资本性成本及成本性成本与经济性指标关系分析

定义 $k = \text{资本性成本} / \text{成本性成本}$ ，此处采用 k 与资产成新率曲线拟合的方式进行数据分析。

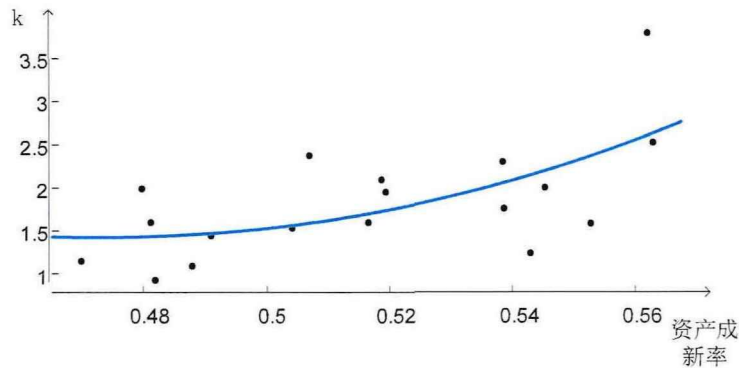


图 2-5 各市供电公司资产成新率 k 关系

k 值呈现上下波动的递增趋势，由图像可以看出成本性成本与资本性成本比例与资产成新率成正相关关系。这也符合资产成新率较高的市供电公司技改投资比例较小的大致规律。

通过实际数据验证分析，总结以上所有指标的协同制约关系分析可以得出以下结论：资本性成本和成本性成本呈现相互制约的关系，在投资分配优化过程中电网运维成本大致不变；资本性成本与成本性成本在可靠性指标上存在耦合关系，在资本性成本与成本性成本的可行区间内部取得最优解；资产成新率与成本性及资本性之间的比值成正相关关系。

2.3.2 基于历史数据的投入与成效关系建模

从多个地市区域数据进行分析，结果表明在宏观层面具有一定的规律，但投入与产出规律具有一定复杂性，难以建立精确的数学模型。神经网络算法是解决这类问题的较好方法，其优势在于不需要精确的数学模型，擅长从输入输出中学习有用知识。为此，输入大量投入与成效历史数据，通过采用神经网络算法中应用最广的 BP 神经网络算法^[47]训练的方式，建立基于历史数据的投入与成效关系模

型。

训练 BP 神经网络建立投入与成效关系模型的具体步骤如下：

(1) 数据归一化

由于指标的属性不同，其量级和含义也不同，因此需要对每个投入和产出指标进行归一化处理，以消除指标之间的量纲影响及数据指标之间的可比性。在投入产出指标中，根据各指标的性质，可以将其分为正指标和适度指标两类，并采用相应归一化方法。

1) 正指标

正指标包括技改成本、电网运检成本、变电可用率、输电可用率和供电可靠率。归一化公式如下：

$$V = \frac{v - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (2-8)$$

式中 V 为归一化之后的数据， v_{\max} 、 v_{\min} 分别是指标数据的下限和上限， v 为原始数据。

2) 适度指标

适度包括资产成新率。归一化公式如下：

$$V = \begin{cases} \frac{v_{\max} - v}{v_{\max} - \bar{v}}, & v > \bar{v} \\ \frac{v - v_{\min}}{\bar{v} - v_{\min}}, & v < \bar{v} \end{cases} \quad (2-9)$$

式中 V 为归一化之后的数据， v_{\max} 、 v_{\min} 分别是指标数据的下限和上限， v 为原始数据， \bar{v} 为数据均值。

(2) 传递函数求解

技改成本、运检成本与变电可用系数、输电可用系数、供电可靠率和资产成新率之间的关系神经网络图如图 2-6。

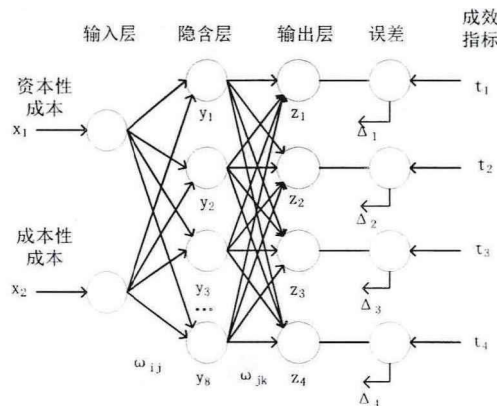


图 2-6 投入与成效神经网络关系图

输入样本数据进行神经网络误差计算和系数矩阵迭代，则得到：

$$\begin{cases} y = M_{ml}x \\ z = N_{nm}y \end{cases} \quad (m=2, l=8, n=4) \quad (2-10)$$

式中 x_1 、 x_2 为归一化的资本性与成本性成本， $z_n(n=1,2,3,4)$ 为归一化的投资成效指标。

(3) 投资成效指标计算

通过 (1) 步骤的反操作，对 z 进行还原，即得出预测的投资成效指标。则可以得出投入与成效的模型为：

$$\begin{aligned} V &= f(X) \\ f(X) &= f_1(f_2(X)) \end{aligned} \quad (2-11)$$

式中 $X=[x_1, x_2]$ ， x_1 、 x_2 分别表示表示单位资产资本性成本和单位资产成本性成本， $y=f_1(x)$ 表示效益指标由归一化值还原为原值的函数， $y=f_2(x)$ 表示训练得到投资与成效之间的数学关系， $f_2(X)$ 由 BP 神经网络中神经元的激活函数和神经网络信息传递的权重和偏置矩阵组成。

2.4 成本优化分配模型

上节中分析了电网运行成本投资成效，在本文中输入与输出属于多对多耦合关联，采用解耦合的方法分析输入输出关联较为困难。因此本节先对产出效益指标进行赋权，再采用 BP 神经网络算法得出输入输出关联，最后把电网运行成本不变作为约束条件，采用差分进化算法搜索评分最高的资本性投入配置，以实现电网运行合理配置。

2.4.1 目标函数

通过 BP 神经网络训练得到了电网运维资本性成本及车成本性成本与产出成效指标之间的内在联系，采用层次分析法进行产出成效指标赋权，明确了投入与综合产出成效之间的关联，优化两类成本的分配以提高产出效益。

电网运维资本性成本及成本性成本作为成本优化分配模型的决策变量，求取使目标函数最大化的解，得到资本性成本和成本性成本的分配关系，达到成本配置优化的目的。模型框架如图 2-7 所示。

对目标函数进行数学表示：

$$\begin{aligned} \max Z &= 100 \sum_{i=1}^4 \omega_i V_i \\ V &= f(X) \end{aligned} \quad (2-12)$$

式中 Z 表示运行成本产出综合效益， $\omega_i(i=1,2,3,4)$ 为变电可用性系数、输电可用系

数、综合供电可靠率和资产成新率权重系数， $V_i(i=1,2,3,4)$ 为这四类产出指标数据归一化结果。 $V=f(X)$ 表示投资成效与电网资本性、成本性成本的函数关系。

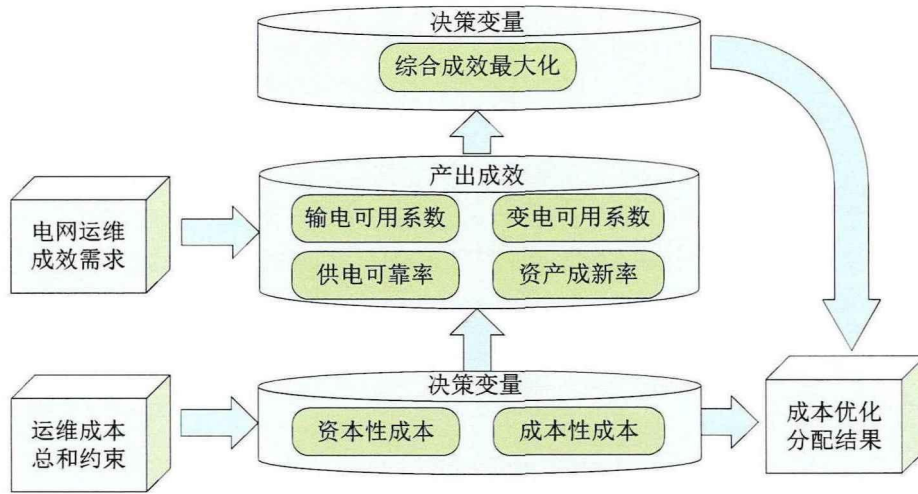


图 2-7 协调优化模型框架

2.4.2 约束条件

约束条件主要包括成本总和约束和可靠性约束和经济性约束。成本总和约束指资本性成本和成本性成本之和等于电网运维行成本。电网可靠性约束指在电网运维阶段，变电可用性系数、输电可用系数、供电可靠率应达到基本要求，以满足电网运行的安全性。电网经济性约束指在电网运维阶段，其资产成新率应该在合理范围。

(1) 运维成本总和约束

$$x_1 + x_2 = x_\Sigma \quad (2-13)$$

式中 x_1 、 x_2 分别表示表示单位资产资本性成本和单位资产成本性成本， x_Σ 表示单位资产电网运维成本。

(2) 电网可靠性约束

$$\begin{cases} v_1 \geq v_{1,\min} \\ v_2 \geq v_{2,\min} \\ v_3 \geq v_{3,\min} \end{cases} \quad (2-14)$$

式中 v_1 、 v_2 和 v_3 表示变电可用性系数、输电可用性系数和供电可靠率， $v_{1,\min}$ 、 $v_{2,\min}$ 和 $v_{3,\min}$ 表示这三项指标下限。

(3) 经济性约束

采用整体资产成新率代表电网公司经济性，资产成新率偏高代表整体设备更新较快，设备残值未能完全回收；资产成新率偏低代表整体设备更新较慢，输配

电价收入较低。因此考虑经济性约束，应当使得电网公司设备资产成新率维持在合理区间。

$$v_{4,\min} \leq v_4 \leq v_{4,\max} \quad (2-15)$$

式中 v_4 表示资产成新率， $v_{4,\max}$ 、 $v_{4,\min}$ 表示资产成新率上下限。

2.5 模型求解

上节所述模型资本性运行成本为连续变量，为典型的非线性优化模型，计算复杂度较大，同时需要避免求解方法陷入局部最优。差分进化算法具有较强的全局收敛能力和鲁棒性，且不需要借助问题的特征信息，适用于求解一些利用常规数学规划方法很难求解甚至无法求解的复杂优化问题。因此，本文选择差分进化算法进行模型求解。

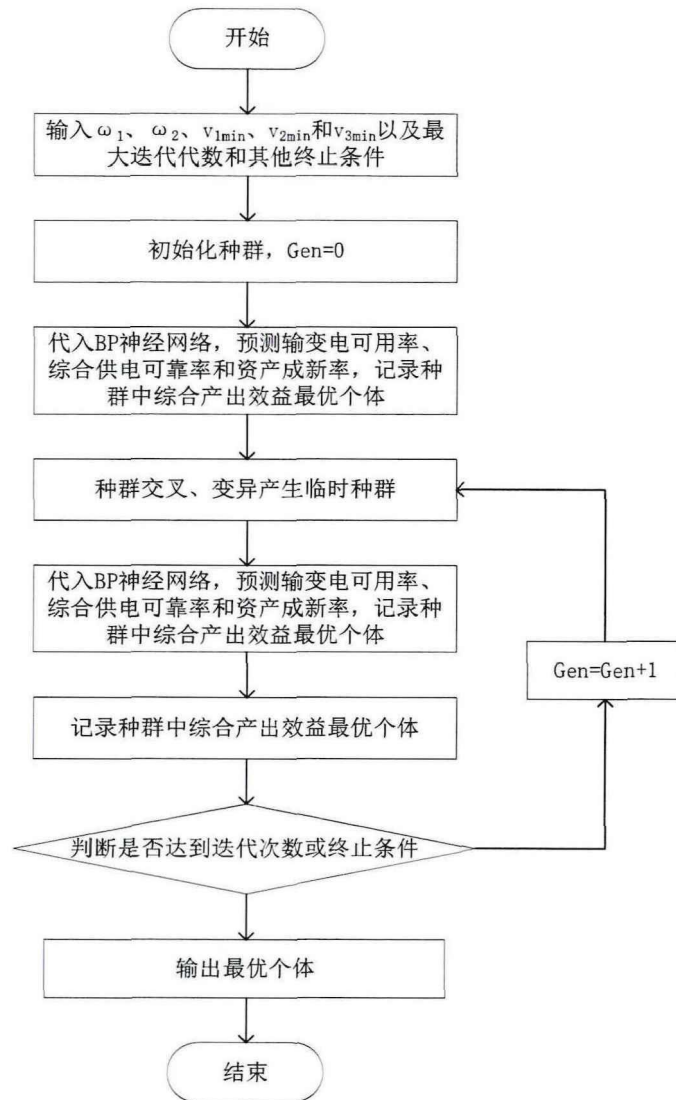


图 2-8 成本优化分配模型求解流程

差分进化算法^[48]是一种随机的启发式搜索算法，具有较强的鲁棒性和全局寻

优能力。它从数学角度看是一种随机搜索算法，从工程角度看是一种自适应的全局寻优过程。除了具有较好的收敛性外，差分进化算法非常易于理解与执行，它只包含不多的几个控制参数，并且在迭代过程中这些参数的值可以保持不变。

传统差分进化算法在面对资本性电网运行成本配置模型求解存在以下问题。首先，差分算法在变异步骤中需要设定变异算子，变异算子为 $[0,2]$ 的常实数因数，由变异算子控制偏差变量缩放。变异算子较大会导致搜索效率低下，求解的全局最优解精度偏低；变异算子较小会种群多样性降低，出现“早熟”现象。

为此，在传统差分进化算法下做出以下改进。一是采用自适应变异算子，在算法开始时变异算子值较大，保持个体多样性，避免“早熟”；随着算法迭代次数提高，变异算子逐步降低，保留优良信息，避免最优解遭到破坏，提高搜索精度^[49]。通过以上的方法能避免变异算子设置不恰当的情况，提高算法求解效率，具体步骤如图 2-8 所示。

2.6本章小结

本章先对电网运维成本投资成效进行分析，先用定性的方法分析了电网运维阶段资本性及成本性成本与安全性及经济性成效指标的关联。然后针对电网运维资本性成本与成本性成本的耦合效益，选择了四个成效指标，在分析了投入产出指标的协同制约关系后，采用 BP 神经网络的方法对投入与产出关系建模。最后，建立了以电网运维成本产出评分为目标，以电网运维成本总和为约束的成本优化分配模型。最后针对这个典型非线性模型，介绍了差分进化算法的求解策略。

第3章 技改项目投资时序优化模型

本章采用问题提出—模型建立—模型求解的思路研究电网技改项目时序优化模型。首先，通过技改项目投资决策的现状分析，提出说明模型建立的必要性并提供模型建立思路。然后，介绍了建立技改项目时序优化模型的关键点：单个技改项目投资效益模型和基于该模型的时序优化模型。最后，介绍了选择的模型求解方法以及应用流程。

3.1 技改项目投资决策分析

梳理 PMS3.0 技术改造业务逻辑，得出电网技改项目投资决策的业务流程为年度计划安排。结合电网技术改造的管理职责分工，总结得出现有电网技改投资决策存在问题，为后续电网技改投资决策优化提供支撑。

3.1.1 技改项目投资决策现状

电网技改项目是指为了提高设备性能、生产的安全性和可靠性、延长设备使用年限、增加生产能力、满足节能环保、节能降耗要求，达到提高经济和社会效益的目的，而采用国内外成熟的、适用的先进技术对现有设备和设施，以及相应配套的辅助生产、生活福利设施进行的改造项目。本章所述技改项目投资决策为考虑投资额度一定时电网技改项目的投资出库决策优化，即年度技改项目计划，具体流程如下。首先，电网公司总部设备部负责启动技改年度计划和专项计划的编制、调整工作，各级设备部根据本单位项目储备、经营管理等情况，编制本单位资产技改项目年度计划和预算投入规模总控目标建议，汇总审核后上报电网公司总部。随后，电网公司总部设备部下达项目总控目标，各级单位参照总控目标，结合预安排项目和续建项目投资规模，从储备库中优选项目，形成年度计划项目建议。最后汇总审核后上报，各级单位汇总审核后形成多级技改年度计划建议。

上述流程中，电网技改决策技改年度计划流程是根据上级单位总控目标从储备库中挑选评分较高的项目，存在计划周期较短和决策因素较多，项目难以直接比较的问题。因此，电网技改项目时序优化主要面临两个方面的问题：

一是年度计划项目确定过程中计划周期较短，需要从长期投资的角度考虑问题。由于电网技改决策是一个动态的问题，仅考虑当年进行项目出库决策容易出现投资冗余或投资不足，陷入局部最优的困境。

二是决策因素较多，项目难以直接比较。电网技改项目之间技术特性差异较大，不同类型技改项目难以建立一套评价指标体系和评价权重，项目评分缺乏明

确物理意义，难以通过比较评分进行决策，需要一种能适用于不同场景和决策意向的决策方法。

3.1.2 技改项目投资决策优化思路

针对现有电网技改项目投资决策流程中存在的两个问题，采用结合多阶段优化和多目标优化的时序优化方法进行电网技改项目的投资决策优化，具体思路：

一是采用多阶段优化算法^[50]。该方法的特点是能够进行电网技改项目投资决策的多个阶段联合考虑，充分体现了电网技改项目投资决策的后效性和外部影响。多阶段决策流程示例如图 3-1 所示。

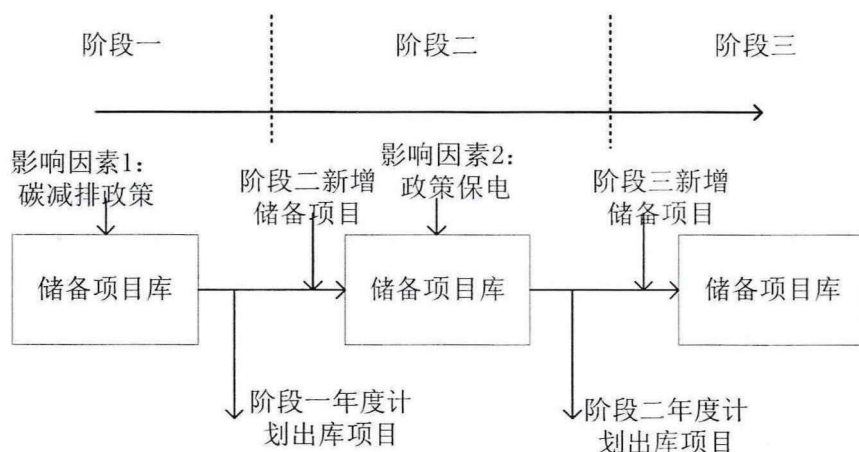


图 3-1 多阶段决策流程

从长期投资的角度进行决策能减少长期效益偏差的项目储备及出库数量。在此基础上增加滚动机制，能充分考虑外部条件变化对投资决策的影响，每年根据多阶段（多年）投资规划方案，出库第一年方案，后续年份作为预出库方案，作为后续决策的参考。

二是采用多目标优化算法^[51]。该方法的主要优点在于对多类型技改效益指标进行协调优化设计，弱化项目之间采用评分方式进行比对的主观性和片面性。多目标优化结果为 Pareto 最优解集，其中每一个解都不完全优于其它解，反映到电网技改项目投资决策中可以为多种决策场景提供决策参考。

3.2 技改项目投资成效建模

考虑到电网公司保障用电安全可靠的社会责任、投资决策的经济可行性和新型能源电力系统下绿色“双碳”的要求，本文提炼出安全、经济和绿色三方面的电网技改项目投资成效，这三个维度的年效益计算方式如下。

(1) 安全效益

对电网公司来说，提高电网安全稳定运行水平是技术改造投资的首要目标^[52]。

安全效益可以通过项目对应设备故障处理减少损失和设备负荷停电减少损失量化计算。一般而言，随着电网设备运行年限的提升，设备健康水平不断下降。提升电网运行的安全稳定性可以通过老旧设备改造，减少事故导致的缺电损失和设备故障损失，即产生安全效益。本文采用两个指标计算安全效益，包括停电缩减收益和故障降低收益。

$$E_A = E_F + E_T \quad (3-1)$$

式中 E_A 为安全效益， E_F 为故障降低效益， E_T 为停电缩减效益。

1) 故障降低效益

故障降低效益计算方式是项目相关设备减少故障频率与单次故障处理费用之积。故障降低效益 E_F 计算方式如下：

$$E_F = \sum_{e \in E} (C_e^F \cdot \Delta f_e^F) \quad (3-2)$$

式中 C_e^F 为 e 类设备平均单次故障处理成本， E 为技改项目涉及的所有设备， Δf_e^F 为技术改造前后 e 类设备降低的年度故障频率。

2) 停电缩减效益

停电缩减效益计算方式是项目相关设备减少的缺供电量与该电压等级输配电价之积。年减少停电收入 E_T 计算如下：

$$E_T = \sum_{e \in E} (\Delta T_e^F \cdot P_e \cdot Y) \quad (3-3)$$

式中 ΔT_e^F 为改造前后设备减少的年均停电时长， P_e 为设备平均负荷， Y 为设备对应电压等级输配电价。

(2) 经济效益

通常情况下，企业以一定时期内投资行为带来的利润作为该时期内企业投资产生的经济效益。新一轮电力改革明确电网公司输配电方面的投入主要以输配电价形式回收，而对于与输电量增长、负荷增加及可靠性提升不匹配的成本不纳入输配电价。在政府部门强化电网投资监管的情景下，电网投资经济效益是衡量电网投资精准度的重要标准。经济效益可以通过项目对应设备在后续资产核价过程中提升输配电价、增加供电收入量化和减少网损计算。本文采用两个指标计算经济效益，包括输配电价效益、增供电量效益和减少网损效益。

$$E_E = E_Y + E_Q + E_S \quad (3-4)$$

式中 E_E 为经济效益， E_Y 为输配电价效益， E_Q 为增供电量效益， E_S 为减少网损效益。

1) 输配电价效益

电网公司输变配电方面的投资主要由输配电价的形式进行回收，政府部门通

过周期性调整和设立平衡账户的方式确保了电网公司的准许收益包括准许成本和准许利润组成。输配电价效益 E_Y 是技改项目投资纳入有效资产后通过提高输配电价以提升电价空间增加的效益，计算方式如下：

$$E_Y = \sum_{e \in E} (\Delta A_e \times ((1 - \beta_v) / T_e + \beta_m + (1 - \beta_v) \beta_r / 2)) \quad (3-5)$$

式中 ΔA_e 为设备 e 通过技术改造固定资产增加值，通过技改项目量化到设备的投资额度与固定资产转化率相乘计算，其中固定资产转化率一般与设备电压等级相关。 β_v 、 β_m 和 β_r 分别为残值率、运行维护费率和准许收益率， T_e 为设备 e 折旧年限。

2) 增供电量效益

电网发展过程中存在供电能力不足导致难以满足用户用电需求的现象，一般而言，随着用户用电水平提升，这部分需求缺口将逐渐增大。增供电量收入指的是通过输配电设备增容改造增加的输送电量给电网公司带来的收入。增供电量收入 E_Q 计算方式如下：

$$E_Q = \sum_{e \in E} (\Delta P'_e \cdot Y \cdot t_e^{oper}) \quad (3-6)$$

式中 $\Delta P'_e$ 为技术改造前后设备 e 增加的传输功率， t_e^{oper} 为设备 e 年运行时间。

3) 减少网损效益

减少网损效益指通过高损耗设备的技术更新，设备电能损耗降低带来的收益。减少网损效益计算方式为技改项目降低的年电量损耗乘当地上网电价。减少网损效益 E_S 计算公式如下：

$$E_S = \sum_{e \in E} (\Delta P'_e \cdot Y_G \cdot t_e^{oper}) \quad (3-7)$$

式中 $\Delta P'_e$ 为技术改造前后设备 e 降低损耗功率， Y_G 为当地上网电价。

(3) 绿色效益

在能源日益紧张和倡导碳减排的当下，电能生产输送中的环境影响备受社会关注^[53]。电网公司作为电能输送调配的主体，技改投资产出的环境效益成为了决策的重要参考。电网技改过程中，通过改善技术路径能有效降低能量损耗和二氧化碳排放。技改项目的绿色效益可以通过减少碳排量所对应的交易价格来测算。

$$E_L = \sum_{e \in E} (\Delta Q_e^{CO_2} \cdot Y_C) \quad (3-8)$$

式中 E_L 为绿色效益， $\Delta Q_e^{CO_2}$ 为设备 e 碳减排量， Y_C 为碳交易价格。

3.3 时序优化模型

考虑计划期内每年计划储备项目出库安排，以每年出库方案在计划期效益最大化为目标函数，以资本性投入和成本性投入协调优化后的资本性投入、项目特性、外部约束等为约束条件，构建电网技改项目时序优化模型。该模型目标函数为每一次滚动计划周期产出效益，包含安全效益、经济效益和绿色效益，采用多目标优化的求解思路求解，并逐年滚动。模型约束条件包含各年资金投入、项目出入库特性、外部紧迫性约束。

3.3.1 决策变量和状态变量

本文采用市级电网技改项目信息作为输入，根据单位的计划周期 T ，把每年作为一个计划阶段，以不同阶段的计划目标需求以及单位技改项目年度预算作为约束条件，计划不同阶段的项目出库情况。

以第 k 年的项目出库情况为决策变量，记为 $U_k=[u_{k,1},u_{k,2},\dots, u_{k,n}]^T$ ， $u_{k,i}$ 为布尔变量，其值为 1 表示在第 k 年项目 i 出库，为 0 表示第 k 年项目 i 不出库或已出库。

以第 k 年的项目完成情况为状态变量，记为 $D_k=[d_{k,1},d_{k,2},\dots, d_{k,n}]^T$ ， $d_{k,i}$ 为布尔变量，其值为 1 表示在第 k 年项目 i 完成，为 0 表示第 k 年项目 i 未完成。其中决策变量与状态变量之间推导关系如下：

$$d_{k+1,i} = d_{k,i} + u_{k-\lambda_i+2,i} \quad (3-9)$$

式中 λ_i 为 i 项目工期（单位：年），一般技改项目工期为一年以内，当 $\lambda_i=1$ 时， $d_{k+1,i} = d_{k,i} + u_{k+1,i}$ 。

3.3.2 目标函数

本文以计划周期为窗口进行滚动优化。在一个滚动优化窗口内，所有出库项目都应该结项，将其效益值纳入目标函数计算，因此 $T \geq \max \lambda_i$ ，即窗口长度最小为储备项目库中最长项目工期。多目标函数定义为：

$$\max \begin{cases} E_k^A = \sum_{j=k}^{k+T-1} (E_{A,j} / (1+\rho)^{j-1}) \\ E_k^E = \sum_{j=k}^{k+T-1} (E_{E,j} / (1+\rho)^{j-1}) \\ E_k^L = \sum_{j=k}^{k+T-1} (E_{L,j} / (1+\rho)^{j-1}) \end{cases} \quad (3-10)$$

式中 E_k^A 、 E_k^E 和 E_k^L 为从 k 年到 $k+T-1$ 年的累计电网技改项目安全效益、经济效益和绿色效益， $E_{A,j}$ 、 $E_{E,j}$ 和 $E_{L,j}$ 分别代表第 j 年安全、经济和绿色三个维度的效益，

ρ 为折现率。

其中 $E_{A,j}$ 、 $E_{E,j}$ 和 $E_{L,j}$ 的计算以 $E_{A,j}$ 为例：

$$E_{A,j} = \sum_{i=1}^n E_{j,i} \cdot d_{j,i} \quad (3-11)$$

式中 $E_{j,i}$ 表示第 i 个项目第 j 年产出的安全效益， $d_{j,i}$ 为布尔变量表示在第 j 年项目 i 是否完成。

3.3.3 约束条件

(1) 基于技改投资规模优化结果的资金约束

最大投资额约束，第 k 年的技改投资不应超过该年的技改投资规模优化结果。

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=k-\lambda_i+1}^k C_{k,i} \cdot u_{j,i} \leq C_k \quad (3-12)$$

式中 $C_{k,i}$ 为第 k 年项目 i 的投资费用，其值根据项目的建设周期与资金投入进度确定， C_k 为第 k 年资本性成本优化结果对应投资额度。

(2) 出入库约束

对于从 k 年往后进行 T 年的滚动优化来说，此时并不知道后续入库情况，因此不考虑入库约束。同时，一个项目进行出库决策，只能出库一次。

$$\sum_{j=k}^{k+T-1} u_{j,i} \leq 1 \quad (3-13)$$

$u_{j,i}$ 表示第 j 年， i 项目的出库决策，其值为 1 表示在第 j 年项目 i 出库，为 0 表示第 j 年项目 i 不出库或已出库。

(3) 项目紧迫性约束

基于电网企业的服务属性，对于保障民生、履行社会责任的项目，需要确保能在设备到达预计寿命前完成技改。电网技改项目在优先级上分为四个等级：第一个等级为优先安排项目，包括应急类项目和专项安排项目，这一类项目具有突发性，一般不在年度计划表内，不占用其他项目的审批通道和资金额度，如台风故障抢修和杭州亚运会保电项目；第二个等级为需要尽快实施的项目，这一类项目需要在项目入库当年安排项目出库，如保障电网、设备和人身安全、保证电力供应等项目；第三个等级为按照计划或规划稳妥推进的项目，这一类项目有规划最晚期限，一般在三年以内，如超高压断路器改造；第四个等级为按照专业管理要求逐步实施的项目，这类项目一般不对项目做出库时限约束。总结以上四个优先等级，其中第一类不在年度项目计划中安排出库，第四类项目不考虑出库时限，因此仅对第二和第三个优先级项目有以下约束：

$$\sum_{d=k}^{k+T} u_{d,i} = 1 \tag{3-14}$$

式中 k 为项目入库时间, T_i 为项目出库时限要求, 第二优先级项目 $T_i=0$, 第三优先级项目一般情况下 $0 < T_i \leq 2$ 。

3.4 模型求解

本模型求解即求得在现有技改项目储备情况下的最优时序安排, 同时为契合工程实际中的项目实时入库特点, 逐年安排技改项目入库, 采用滚动的方式实现以年为单位的技改项目时序优化。

模型求解首先是以滚动优化为大框架, 每年得到以当年为起始年份的 T 年项目出库时序安排, 并完成当年项目出库。每年把之前年份项目优化结果作为已有约束, 进行滚动推进, 其计划周期 T 为滚动优化的窗口。在一个窗口内进行多时段优化求解, 考虑到多目标优化需求, 需要采用多目标优化求解算法, 具体过程如图 3-2 所示。

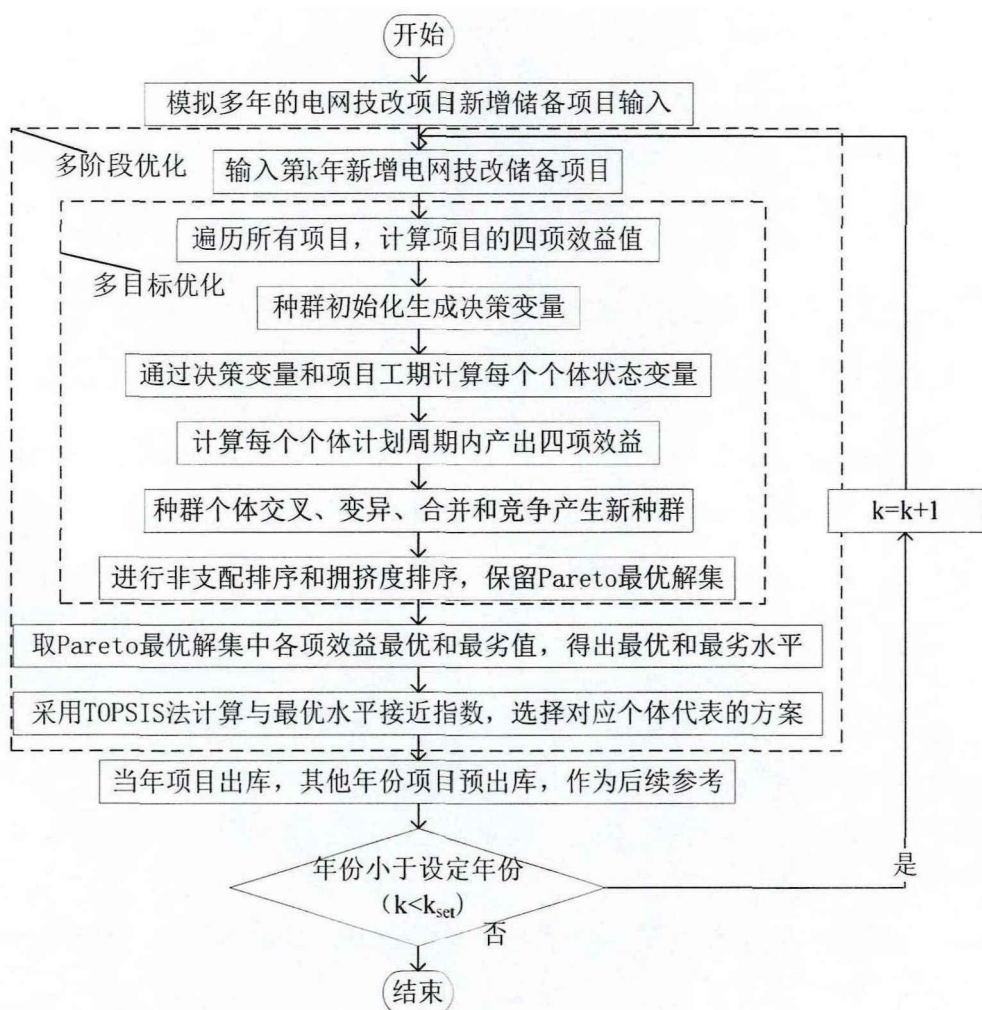


图 3-2 时序优化模型求解流程

以下先后介绍滚动机制、多阶段优化和多目标优化的求解思路。

(1) 滚动求解策略

与传统的全局优化不同，滚动优化在每一时刻的优化性能指标只涉及从该时刻起到未来有限的时间内，而到下一时刻，这一优化时间同时向前推移，不断地进行在线优化。此处对每一个阶段出现的新出入库项目进行考虑，以一个阶段为单位不断向前优化。滚动优化示意图如图 3-3 所示，箭头范围内即 T 年为一个优化窗口，一个窗口优化结果包含以当年为起始年份五年的项目出库结果，并且每年滚动推进。

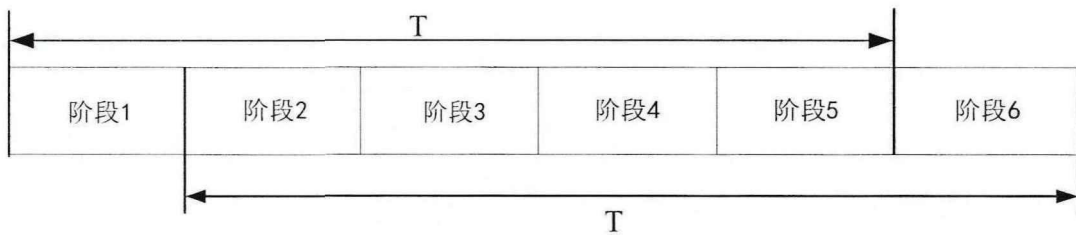


图 3-3 滚动优化示意图

滚动流程如下，在当前计划期内，输入第 k 年前项目出入库信息，从第 k 年的出库项目开始优化，滚动窗口每次向后移动 1 个阶段。每次滚动生成新的储备项目库项目列表，重新计算各个效益，设定出库方案的筛选条件，随后进行 T 年为窗口的项目出库时序优化。每次滚动优化结束后，滚动窗口下第 k 年决策变量值为 1 的项目完成出库，而其他阶段决策变量值为 1 的项目则进入“预出库”状态，“预出库”项目并不实际出库，而只作为后续计划、评估工作的参考，其物理意义为：在当前掌握的全部信息条件下，预期可实现最大投资收益的方案。“预出库”项目根据后续的决策结果，可能会如期出库、延期出库或者不出库。

在滚动的过程中，根据电网设备自身状态和外部技改需求倾向性改变的不断变化，各项目在不同计划阶段的效益与成本也会发生变化，各项目的效益与成本可根据项目内部因素和外部影响因素的变化趋势不断修正。

(2) 多阶段优化求解

对于优化窗口 T 内的优化问题是一种典型的 0-1 非线性规划问题。对于此类问题求解一般通过传统运筹学的分支定界、割平面等方法求解，还可以借助计算机利用成熟的商用求解器求解。但传统求解方法更适用于单个目标求解，由于需要同时考虑多个目标优化需求，本文采用遗传算法求解。

经过遗传算法求解后，每年都能得出关于项目出库方案的 Pareto 前沿，即非支配出库方案解集，记录该解集中所有解的效益值，获得效益指标矩阵 $S = (s_{ab})_{t \times 4} (a = 1, \dots, t; b = 1, 2, 3, 4)$ ， a 代表解集中解的序号， t 为解集中解的个数， b

为效益类型序号。然后采用 TOPSIS 法选择离最优水平最接近的方案，其具体步骤如下：

1) 标准化处理效益指标矩阵：

$$s_{ab}^* = \frac{S_{ab}}{S_{\max}} \quad (3-15)$$

2) 对效益指标矩阵元素赋权，获得赋权矩阵：

$$k_{ab} = \omega_b \cdot s_{ab}^* \quad (3-16)$$

3) 将赋权矩阵中每列最大元素作为最优解 Y^+ ，将赋权矩阵中最小元素作为最劣解 Y^- ：

$$\begin{aligned} Y^- &= \{\min_a(k_{ab})\}, b=1,2,3,4 \\ Y^+ &= \{\max_a(k_{ab})\}, b=1,2,3,4 \end{aligned} \quad (3-17)$$

4) 计算赋权矩阵中各元素 k_{ab} 与 Y^+ 、 Y^- 的距离 Z_a^+ 与 Z_a^- ：

$$\begin{aligned} Z_a^+ &= \sqrt{\sum_{b=1}^4 (k_{ab} - Y_b^+)^2} \\ Z_a^- &= \sqrt{\sum_{b=1}^4 (k_{ab} - Y_b^-)^2} \end{aligned} \quad (3-18)$$

5) 计算 Pareto 前沿中的第 a 个解与最优水平的接近指数 R_a ：

$$R_a = 1 - \frac{Z_a^+}{Z_a^+ + Z_a^-} \quad (3-19)$$

6) 选择 R_a 最大的解作为当年的项目出库方案。

(3) 多目标优化求解

通过遗传算法随机生成出库方案解集作为遗传算法初始种群，计算每个个体 U_i 对应出库方案的多目标产出效益 $\{f_1(U_i), f_2(U_i), f_3(U_i)\}$ ，进行所有个体之间的支配关系比较，得出所有 Pareto 最优解集合。

Pareto 最优解集是指多目标优化问题中一组 Pareto 最优解的集合分布情况，其构成完全依赖于解之间存在的 Pareto 支配关系。针对电网技改项目的时序优化，如果存在满足约束条件的两个出库方案 U_i 和 U_j 满足以下关系：

$$\begin{cases} \forall a \in \{1, 2, \dots, n\}, f_a(U_i) \geq f_a(U_j) \\ \text{and} \\ \exists b \in \{1, 2, \dots, n\}, f_b(U_i) > f_b(U_j) \end{cases} \quad (3-20)$$

式中 $f_a(X_i)$ 表示出库方案 X_i 的第 a 个目标函数值，则称 X_i 支配 X_j ，对 X_i 方案，若不存在方案 $X_j \in \{X-X_i\}$ 使 X_j 支配 X_i ，则称 X_i 为一个非支配解或 Pareto 最优解，所有 Pareto 最优解构成 Pareto 前沿或 Pareto 最优解集合。

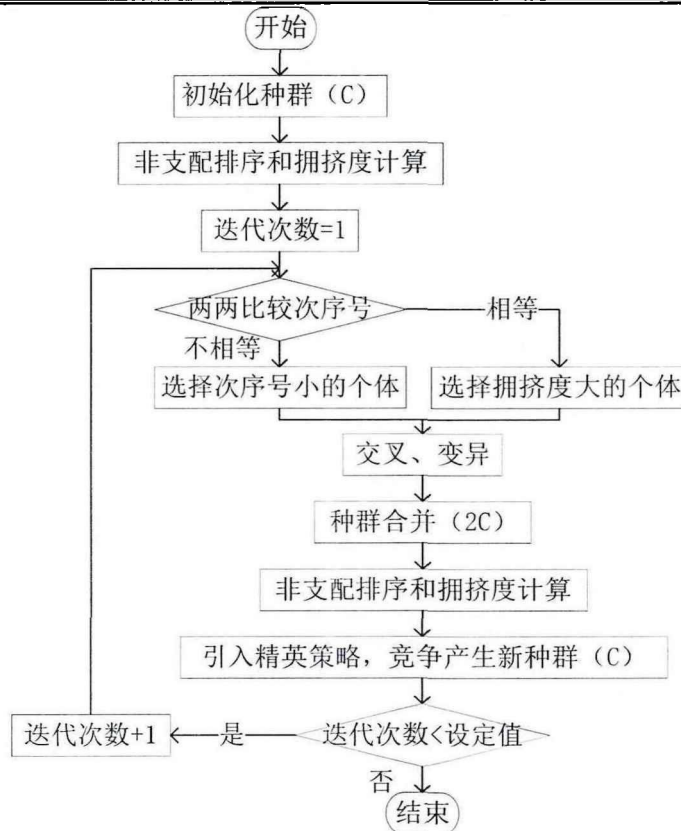


图 3-4 多目标优化求解流程

通过交叉、变异使得种群中个体数量增多，保留 Pareto 最优解集合，计算最优解集合中个体的拥挤度，以拥挤度从大到小排序，其中拥挤度较大的个体表示与其它个体差异性较大。进行多次迭代，达到迭代要求后结束算法。根据生产技改管理需求和投资者的投资倾向，选取最终技改投资方案，具体流程如图 3-4 所示。

3.5 本章小结

本章考虑实际项目技改出库决策过程中项目投资时序对总体效益的影响，开展电网技改项目投资时序优化研究。首先分析了电网技改项目投资决策的现状，提出了电网技改项目投资决策的优化思路；其次提炼电网技改项目评价指标体系，以资本性成本优化分配额度为约束条件，以多阶段产出效益最大为优化目标，构建电网技改项目时序优化模型；最后，对电网技改时序优化问题建立模型的求解策略进行研究。

第4章 算例分析

4.1 算例数据

本文分别采用某省 18 个地市供电公司的历史电网运维成本及成效数据和其中一个地市公司技改项目库数据进行资金优化分配和技改项目时序优化。

(1) 历史电网运维成本及成效数据

调研了某省 18 个地市 2019-2021 年的电网运行成本及其产出数据，其中电网运行成本包含输变配电运检、通信设备运检和运检综合管理和技改项目投资成本，产出数据包含资产成新率、输变电可用系数和供电可靠性数据。通过 2019-2021 年三年数据进行神经网络训练，建立成本投入与成效模型。

部分数据 2021 年某省 18 个地市的供电公司资本性成本、成本性成本、变电可用系数、输电可用系数、供电可靠率、资产成新率数据如表 4-1 所示。

表 4-1 投入及成效指标数据

公司 序号	资本性成本 (万元)	成本性成本 (万元)	变电可用系 数 (%)	输电可用系 数 (%)	供电可靠率 (%)	资产成新率 (%)
1	26336	38053.72	97.819	99.625	99.905	49.09
2	36039	72215.04	94.118	95.597	99.840	54.53
3	51372	107701.52	99.511	99.943	99.823	51.86
4	39819	63166.31	99.937	99.997	99.855	55.28
5	40415	50159.89	99.885	99.998	99.854	54.29
6	34219	54779.89	100.000	98.980	99.744	51.65
7	21042	48450.90	99.985	99.967	99.847	53.84
8	35875	70043.38	99.772	99.808	99.911	51.93
9	66619	76675.30	99.063	99.842	99.846	47.00
10	13148	12185.70	99.561	99.758	99.875	48.19
11	11220	26666.69	98.057	95.552	99.853	50.69
12	27911	49131.28	98.833	99.549	99.841	53.86
13	30482	46845.91	99.863	99.825	99.842	50.41

表 4-1 (续表)

公司 序号	资本性成本 (万元)	成本性成本 (万元)	变电可用系 数 (%)	输电可用系 数 (%)	供电可靠率 (%)	资产成新率 (%)
14	72892	116639.76	99.941	99.968	99.939	48.12
15	25359	64033.04	99.854	99.969	99.796	56.29
16	18521	20246.51	99.726	99.449	99.614	48.79
17	17433	66115.04	98.265	99.444	99.788	56.21
18	31517	62772.40	99.303	99.979	99.915	47.98

然后在其中选择一个市供电公司进行投资优化分配，先以效益指标偏离平均水平的程度作为依据，排除数据异常可能性较大的市供电公司 1、2、6、11，再在剩下的数据中选择各项成效值偏差的 12 号供电公司，进行资金优化分配。

(2) 技改项目投资时序优化数据

在优化电网技改规模配置的情况下，可以对其 2019-2021 年的技改项目储备库中项目进行出库时序优化。考虑实际情况该市 2021 年出库电网技改项目 146 项，技改项目投资总额为 27911 万，计算过程和结果较为复杂。为了简洁清晰展示算例优化结果，先对电网技改项目根据投资额度进行排序，采用分层抽样的方式以 13% 的 2021 年出库技改项目总数，抽取 19 个项目进行技改项目出库时序优化。根据 PMS3.0 系统中项目可行性报告及其他评估信息，得到各项目投资额度和投资成效如表 4-2 所示。

表 4-2 抽样项目信息

项目编号	入库年份	技改时限 (年)	项目初始投 资 (万元)	安全效益 (万元)	经济效益 (万元)	绿色效益 (万元)
1	1	无	89	11.84	10.31	0.00
2	1	0	195	6.15	44.32	0.00
3	1	无	130	0.00	15.74	1.06
4	1	无	174	0.27	23.38	0.00
5	1	无	190	12.27	39.30	6.63
6	1	无	269	5.60	28.41	0.48
7	1	无	387	0.00	44.15	2.40

表 4-2 (续表)

项目编号	入库年份	技改时限 (年)	项目初始投 资 (万元)	安全效益 (万元)	经济效益 (万元)	绿色效益 (万元)
8	2	1	178	24.83	17.52	3.00
9	2	无	34	2.11	4.15	0.10
10	2	无	47	0.51	7.34	0.00
11	3	无	143	35.18	18.67	3.09
12	3	2	198	0.00	23.98	9.05
13	3	无	128	0.00	14.60	9.67
14	4	无	197	7.08	16.71	7.94
15	4	无	93	0.00	19.37	0.00
16	4	2	342	1.56	47.29	0.00
17	5	无	169	4.19	27.28	0.00
18	5	无	64	0.00	7.77	0.00
19	5	无	122	0.02	13.97	0.09

4.2 资金优化分配结果与分析

为了证明模型的有效性,采用该市供电公司 2021 年的电网运维成本数据进行优化分配,即电网技改规模与电网运检规模之和保持为 7.7 亿元不变,对资本性成本和成本性成本进行重新配置,并进行对比分析。按照“成效指标权重确定—目标函数参数代入—BP 神经网络训练—资金优化分配”的过程求解优化结果并分析。

(1) 成效指标权重确定

对电网运维成本投资成效变电可用系数、输电可用系数、供电可靠性和资产成新率构造层次分析法判断矩阵如表 4-3。判断矩阵最大特征值为 4.0104,求得一致性比率值 $CR=0.03<0.1$,满足检验要求。将判断矩阵代入得出变电可用系数、输电可用系数、供电可靠性和资产成新率权重分别为 0.227、0.227、0.432 和 0.123。

以 2021 年该市供电公司电网运维成效评价为例,其四个指标归一化后的值为 0.487、0.596、0.072、0.428,将指标归一化数值和权重指标代入式 (2-12) 求得评分为 33.00。

表 4-3 电网运维成本投资成效判断矩阵

指标	变电可用系数	输电可用系数	供电可靠性	资产成新率
变电可用系数	1	1	1/2	2
输电可用系数	1	1	1/2	2
供电可靠性	2	2	1	3
资产成新率	1/2	1/2	1/3	1

(2) 目标函数参数代入

将权重代入式 (2-12) 得：为使得电网运维阶段产出成效最大化，模型数学表示为：

$$\begin{aligned} \max Z &= 100 \times (0.227V_1 + 0.227V_2 + 0.432V_3 + 0.123V_4) \\ V &= f(X) \end{aligned} \tag{4-1}$$

式中 $V=f(X)$ 表示运维成本投入与产出成效指标的关系，通过 BP 神经网络训练得到。 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 分别为变电可用系数、输电可用系数、供电可靠性和资产成新率归一化后的值，其中 V_1 、 V_2 、 V_3 为正指标， V_4 为适度指标。

模型约束条件的详细参数来源如下所述。该市 2021 年电网运维成本为 7.7 亿，资产原值总和为 100.2 亿，单位资产原值运维成本为 0.0768。变电可用率、输电可用最小值约束均取自 2021 年全国电力可靠性报告中 13 类输变电设备中可用系数最小值为 99.466%，供电可靠率最小值取 2021 年农村地区平均供电可靠率为 99.840%。考虑到资本性约束，电网资产成新率不宜过大或过小，其范围取该省 2019-2021 年 18 个地市公司 54 组数据中的最大值与最小值之间，取值范围为 [0.444,0.562]。将约束条件代回式(2-13)、式(2-14)、式(2-15)可得，约束条件为：

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = 0.0768 \\ v_1 \geq 99.466 \\ v_2 \geq 99.466 \\ v_3 \geq 99.840 \\ 44.4 \leq v_4 \leq 56.2 \end{cases} \tag{4-2}$$

式中 x_1 、 x_2 表示单位资产资本性成本和成本性成本， v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 分别为变电可用系数、输电可用系数、供电可靠性和资产成新率。

(3) BP 神经网络训练

模型训练数据来源于该省 18 个地市供电公司 2019-2021 年的 54 组数据，经过数据分析剔除其中 6 组异常数据。设定为三层神经网络，隐藏层神经元个数为 8，最大迭代次数为 2000，误差阈值为 10^{-3} 。经过验证，当迭代到 70 次时，满足精

度要求，均方根误差（MSE）为 0.00096。训练网络精度可视化曲线和训练网络有效性验证分别如图 4-1、图 4-2 所示。

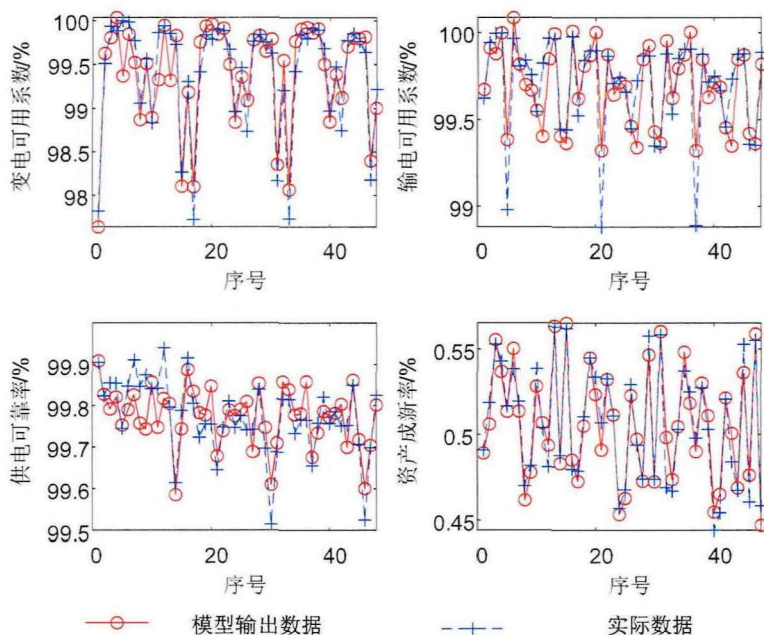


图 4-1 训练网络精度可视化曲线

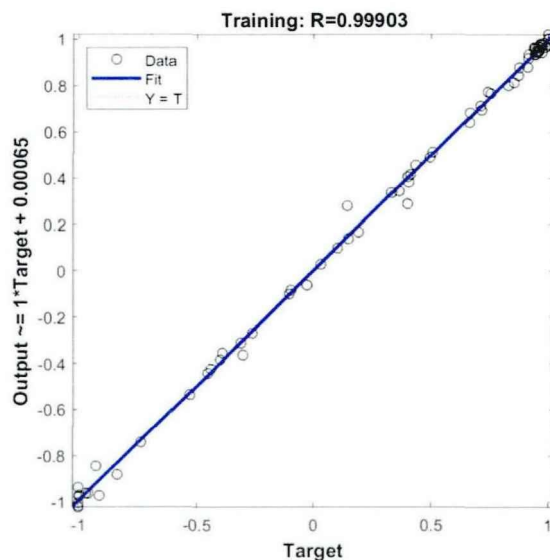


图 4-2 训练网络有效性验证

数据样本的模型输出值和真实值的相关系数为 0.9993，说明投入与成效关系模型能较好地挖掘电网运维成本与产出成效指标数据的关联，具有有效性和准确性。在仿真的过程中，经过数据清洗，去除异常点后多次改变训练样本数据量，模型输出值与真实值相关系数基本不变，说明神经网络训练数据量充足且训练效

果良好。

(4) 资金优化分配

在上述投入与产出关联模型中，可以输入资本性及成本性成本得出成效指标结果，本节求解电网运维成本投资成效最大的资金分配结果作为资金优化的分配结果。以上模型在 MATLAB-2021a 平台采用差分进化算法进行求解，在优化过程中发现，当最大迭代次数设置大于等于 200 时，最优综合效益均稳定在 73.41 不再增加，因此，为避免迭代次数过多带来不必要的计算量，本文选取最大迭代次数为 200，迭代 66 即可收敛，得到收敛曲线如图 4-3 所示，电网运维成本优化分配结果如表 4-4 所示。

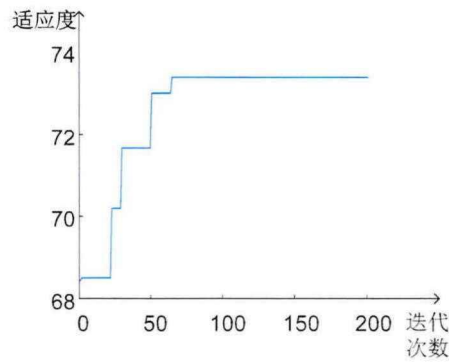


图 4-3 差分进化算法适应度收敛曲线

表 4-4 电网运维成本规模优化配置结果

方案类型	优化运维成本配置方案	未优化运维成本配置方案
电网运维成效评分	73.41	33.00
资本性成本（万元）	20968.32	27911.00
成本性成本（万元）	56073.96	49131.28
变电可用系数（%）	99.564	98.833
输电可用系数（%）	99.786	99.549
供电可靠率（%）	99.891	99.841
资产成新率（%）	53.23	53.86

由上表可知，在总成本不变的情况下，对比该市 2021 年电网运行成本配置，资本性成本配置减少 6942.68 万元，此时产出效益中三项可靠性指标提升，变电可用系数提升最大，增幅为 0.731%，其次，输电可用系数增幅达 0.237%，供电可靠率小幅度提升，资产成新率下降 0.63%。以上结果说明电网运维资本性及成本性成本分配优化模型能有效提高资金利用率，合理配置电网技改和运检资金规模，提

高投资效率。

4.3 技改项目时序优化结果及分析

算例中每年的技改项目投资总额取该市 2021 年资本性电网运行成本优化配置结果的 2% 为 419 万元, 因此 4.1 节中抽取表 4-2 的 19 个项目可在 9 年内完成出库。为了贴合技改项目投资决策实际情况, 模拟了技改项目出入库特性, 对项目入库年份进行合理假设, 具体见表 4-2。

设定技改项目滚动优化的优化窗口为五年, 第一年获得当年出库项目及后续四年(第二至第五年)预出库项目, 滚动至第二年考虑到新入库项目并不按照第一年预出库结果出库而是再次优化得出第二年出库项目和后续四年(第三至第六年)预出库项目, 滚动至第五年, 所有项目完成出库安排, 总共得到一至五年的四年的实际出库项目方案和六至九年的预出库项目方案。

4.3.1 技改项目投资时序优化结果

设定多目标遗传算法交叉概率为 0.8, 遗传概率为 0.05, 种群数量为 200, 迭代次数为 500, TOPSIS 算法中三类效益权重均为 1/3。按照本文提出的电网技改项目投资时序优化模型, 不断更新项目库信息对项目库的待出库项目进行滚动时序优化, 得到优化后的项目出库方案。

在决策周期第一年, 电网技改项目储备库中包含 1-7 号电网技改项目, 优化结果为第一年到第五年的电网技改项目时序。首先通过多目标优化得出 Pareto 最优解集中结果共 7 个, 将 Pareto 最优出库方案集五年内安全、经济和绿色效益绘制三维散点图, 如图 4-4 所示。

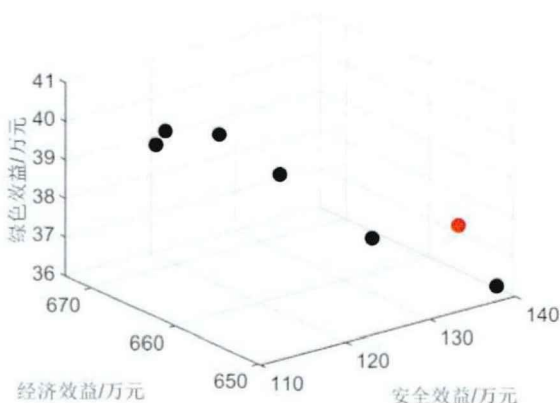


图 4-4 第一年多目标优化结果

随后采用 TOPSIS 算法决策得到 Pareto 最优解集中与最优水平最接近的解, 最优水平指的是不同解中取得的最优单项效益组合, 接近指数 R 为 0.7266, R 的计

算见式(3-19)，该解对应的 Pareto 最优解集的解为上图中标注的红点。

通过 TOPSIS 算法得出项目出库优化结果及投资成本见表 4-5，其中第一年出库结果为当年实际出库结果，后续四年为预出库结果，在后续滚动优化中由于技改项目出入库特性得到更新优化。

表 4-5 第一年项目出库决策优化结果

实际出库结果					
年份 序号	出库项目	技改成本 (万元)	安全效益 (万元)	经济效益 (万元)	绿色效益 (万元)
1	2、5	385	18.41	83.62	6.63
预出库结果					
年份 序号	出库项目	技改成本 (万元)	安全效益 (万元)	经济效益 (万元)	绿色效益 (万元)
2	1、6	358	33.19	113.28	6.59
3	7	387	30.74	142.74	8.16
4	3、4	304	28.67	163.22	8.40
5	—	—	26.55	151.13	7.78

滚动至决策周期第二年，项目 2、5 已完成出库，电网技改储备库增加项目 8、9、10，优化窗口滚动至第二年到第六年，但需要保留第一年的出库结果，再进行第二年到第六年的技改项目时序优化。第二年出库项目由第一年优化结果中的预出库项目 1、6 改为 1、3、8。依次滚动至第五年，后续年份项目库无新增技改项目，在第六至九年的预出库即可完成项目库中所有项目出库。第二到五年的多目标优化 Pareto 最优解集散点图如图 4-5、图 4-6、图 4-7、图 4-8 所示。通过 TOPSIS 算法得出经过五年滚动后果及投资成本见表 4-6，其中前五年出库结果为当年实际出库结果，后续四年为预出库结果。对每一年优化结果中实际出库和预出库的顺序进行分析，项目出库优先顺序与项目投产比关联度较高，例如第一年的实际出库项目比后续预出库项目更高；同时优化结果也受投资额度的影响，投资额度较高但投入产出比中等的项目容易推迟出库，例如 4 号项目。对多年优化结果进行分析，每年的实际出库方案与前一年优化得出的预出库方案存在差异，主要原因是后续年份新入库项目与前一年项目库中的项目对比，存在一些项目投入产出比更高，例如对比第二年的实际出库项目与第一年优化得到的第二年预出库项目存在差异，原因在于 3、8 号项目相较于 6 号项目，投资性价比更高。

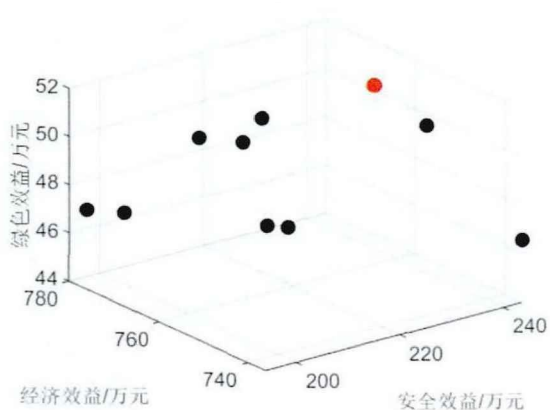


图 4-5 第二年多目标优化结果

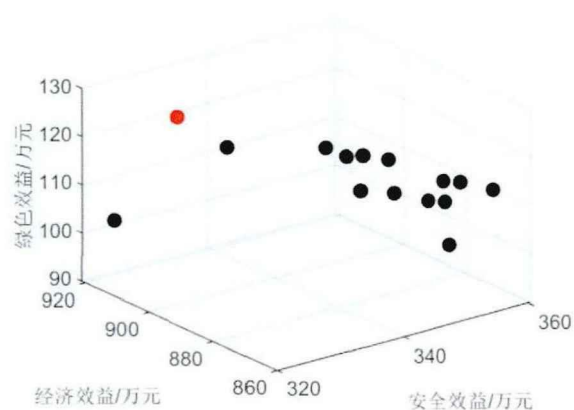


图 4-6 第三年多目标优化结果

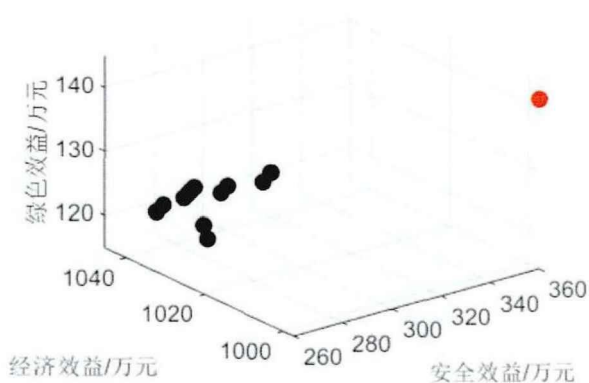


图 4-7 第四年多目标优化结果

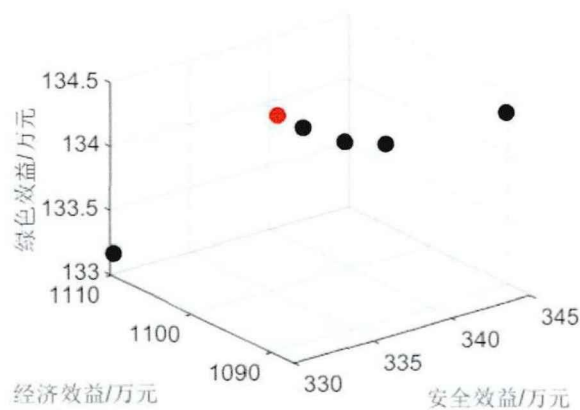


图 4-8 第五年多目标优化结果

表 4-6 第一至五年项目出库决策优化结果

实际出库结果					
年份序号	出库项目	技改成本 (万元)	安全效益 (万元)	经济效益 (万元)	绿色效益 (万元)
1	2、5	385	18.41	83.62	6.63
2	1、3、8	397	51.00	117.77	9.90
3	9、10、12、13	407	49.47	151.98	25.29
4	11、14	340	79.36	168.81	32.17
5	16、18	406	74.63	196.78	29.79

表 4-6 (续表)

预出库结果					
年份序 号	出库项目	技改成本 (万元)	安全效益 (万元)	经济效益 (万元)	绿色效益 (万元)
6	6、15	362	72.91	214.73	27.91
7	7	387	67.51	226.64	27.35
8	4、17	343	65.11	239.41	25.33
9	19	122	60.29	229.23	23.50

在有效出库决策(即 1-5 年)中,累计产出安全效益 272.89 万元、经济效益 718.96 万元和绿色收益 103.78 万元,总计 1095.61 万元,总投资 1935 万元。

4.3.2 模型必要性和有效性分析

为了对技改项目时序优化模型的必要性和有效性进行分析说明,本节进行时序优化必要性分析、滚动机制必要性分析,对模型采用的多目标优化和多阶段优化进行有效性分析。

(1) 时序优化必要性分析

对第一年入库的 1-7 号项目时序优化出的结果(表 4-5)中不同年份的出库项目进行交换以验证时序对整个计划周期技改项目产出效益的影响,分析时序优化的必要性。由于 2 号项目受出库时间限制必须当年完成出库,所以对设计三种对比方案分别为:方案一为第二年和第三年出库项目交换、方案二为第二年和第四年出库项目交换、方案三为第三年和第四年出库项目交换。算例方案为表 4-5 所示的技改项目出库时序,计算计划周期内的各项效益指标,对比结果如表 4-7 所示。

表 4-7 不同技改项目时序产出效益

方案	安全效益(万元)	经济效益(万元)	绿色效益(万元)	总效益(万元)
算例方案	137.56	653.99	37.56	829.11
方案一	121.42	659.02	39.33	819.77
方案二	106.96	654.72	38.60	800.28
方案三	137.80	649.69	36.40	823.89

从表中可以看出,技改项目出库时序不同会导致在技改计划周期内效益改变。以算例方案和方案一对比为例,其安全效益减少明显,原因在于产出安全效益的 1

号和 6 号项目从第二年推迟到第三年出库，导致计划周期内产出安全效益减少。对比技改项目出库时序改变方案，算例方案总产出效益更高，优化结果与最优水平接近指数 R 更高。同样的出库项目在不同年份出库产出效益即不同，为此有必要对电网技改项目投资时序进行优化。

(2) 滚动机制必要性分析

通过滚动优化后的项目出库方案（表 4-6）与不加入滚动机制的项目出库方案进行对比分析（表 4-5），通过一至五年累计产出各项效益对滚动机制必要性进行说明。对比结果如表 4-8 所示，表中数据单位为万元。

表 4-8 有无滚动机制技改项目时序优化产出效益

年份	有滚动机制出库方案				无滚动机制出库方案			
	累计安全效益	累计经济效益	累计绿色效益	累计总效益	累计安全效益	累计经济效益	累计绿色效益	累计总效益
1	18.41	83.62	6.63	108.66	18.41	83.62	6.63	108.66
2	69.41	201.39	16.53	287.33	51.60	196.9	13.22	261.72
3	118.88	353.37	41.82	514.07	82.34	339.64	21.38	443.36
4	198.24	522.18	73.99	794.41	111.01	502.86	29.78	643.65
5	272.87	718.96	103.78	1095.61	137.56	653.99	37.56	829.11

通过对比可以发现添加了滚动机制的技改项目时序优化方案各种累计产出效益更高，原因在于选择出库了技改项目储备库中更新的效益更高的技改项目而非继续根据预出库方案进行技改项目出库。

(3) 多阶段优化有效性分析

为了证明多阶段优化模型的有效性，此处计算了单阶段优化模型的优化结果，单阶段优化指的是每一年仅考虑当前阶段进行多目标优化求解，以所求解与最优水平接近指数最大为目标。考虑到不同项目出库决策出库项目不同，在项目出入库滚动机制下，下一个决策周期待决策项目存在差异，难以进行直接比较技改项目投资倾向。为了消除上述影响，选取第一个滚动优化窗口进行对比分析，以第一年入库项目的当年实际出库结果和后续年份项目预出库结果进行对比。优化结果如表 4-9，单阶段优化与多阶段优化的对比如表 4-10。

将单阶段优化结果与多阶段优化结果对比可知，产生差异的主要原因是单阶段优化结果未考虑全周期内优化结果与最优水平的接近度 R 值最大化，从当前 R 值最大角度出发，选择了提高经济效益的项目进行出库。这种优化方式容易陷入短期最优，在技改项目投资决策中不适用于长期的技改投资决策。

表 4-9 单阶段优化结果

年份 序号	出库项目	技改成本 (万元)	安全效益 (万元)	经济效益 (万元)	绿色效益 (万元)
1	2、5	385	18.41	83.62	6.63
2	1、3、4	393	28.26	123.20	7.13
3	6	269	30.97	138.43	7.01
4	7	387	28.67	163.22	8.40
5	—	—	26.55	151.13	7.78

表 4-10 单阶段优化与多阶段优化对比

方案类型	单阶段优化	多阶段优化
安全效益	132.87	137.56
经济效益	659.61	653.99
绿色效益	36.95	37.56
总效益	829.42	829.11
最优水平接近指数 R	0.6334	0.7266

将单阶段优化结果与多阶段优化结果对比可知，产生差异的主要原因是单阶段优化结果未考虑全周期内优化结果与最优水平的接近度 R 值最大化，从当前 R 值最大角度出发，选择了提高经济效益的项目进行出库。这种优化方式容易陷入短期最优，在技改项目投资决策中不适用于长期的技改投资决策。

(4) 多目标优化有效性分析

为了证明多目标电网技改项目时序优化模型的有效性，同样计算了单目标时序优化模型的优化结果，单目标时序优化指的是以三种效益直接相加最大为目标函数。同样以第一年入库项目的当年项目出库和后续年份项目预出库方案进行对比。优化结果如表 4-11，单阶段优化与多阶段优化的对比如表 4-12。

可以得出结论，在长期的项目出库优化过程中，多目标时序优化和单目标时序优化产出安全效益和汇总效益相差不大，而多目标时序优模型在项目出库选择中优先选择产出绿色效益的项目，单目标时序优化模型在项目出库中优先选择产出经济效益的项目。二者总体效益相差不大的原因在于多目标时序优化方案总是在 pareto 最优解集中选择相对均衡的出库方案，pareto 最优解集中都是相互不支配

的解，总效益相差不大。而单目标时序优化模型选择经济效益更优的方案原因在于各项目总体经济效益要优于绿色效益，单目标优化更容易受到优势指标的影响，难以克服优势指标补偿劣势指标的弊端。

表 4-11 单目标时序优化结果

年份 序号	出库项目	技改成本 (万元)	安全效益 (万元)	经济效益 (万元)	绿色效益 (万元)
1	2、5	385	18.41	83.62	6.63
2	1、3、4	393	28.26	123.20	7.13
3	7	387	26.17	151.92	8.66
4	6	269	28.67	163.22	8.40
5	—	—	26.55	151.13	7.78

表 4-12 单目标优化与多目标优化对比

方案类型	单目标优化	多目标优化
安全效益 (万元)	128.03	137.56
经济效益 (万元)	673.09	653.99
绿色效益 (万元)	38.60	37.56
总效益 (万元)	839.75	829.11
最优水平接近指数 R	0.6287	0.7266

4.3.3 权重设置对优化结果影响分析

本文另外设计六种场景差异性场景，分别为重视安全效益、重视经济效益、重视绿色效益、忽视安全效益、忽视经济效益和忽视绿色效益场景。考虑到不同项目出库决策出库项目不同，在项目出入库滚动机制下，下一个决策周期待决策项目存在差异，难以进行直接比较优化结果差异。为了避免上述影响，以第一个滚动窗口为例进行比较分析。重视安全效益场景安全效益权重设置为 $2/3$ ，经济效益和绿色效益权重为 $1/6$ ，重视经济效益场景和重视绿色效益场景权重设置同理；忽视安全效益场景安全效益权重设置为 0 ，经济和绿色效益权重为 $1/2$ ，忽视经济效益场景和忽视绿色效益场景权重设置同理。则六种场景在第一个滚动窗口内的效益值如表 4-13 所示。以上每一种场景代表不同的决策者投资倾向，通过多目标优化得出 Pareto 最优解集如图 4-4 所示，在这七个解中可以根据投资倾向选取不同

的技改项目投资时序方案。

表 4-13 六种场景下优化结果技改效益

场景类型	安全效益 (万元)	经济效益 (万元)	绿色效益 (万元)
场景 1	137.57	653.99	37.55
场景 2	128.07	673.09	38.60
场景 3	116.85	668.20	39.83
场景 4	112.27	663.68	40.24
场景 5	137.57	653.99	37.55
场景 6	112.27	663.68	40.24

因此，以安全效益为例，得出四种不同权重情况下的优化结果，分别为 0、1/3、2/3 和 1，其中权重为 1/3 的情况为算例中多目标优化结果，权重为 1 的情况为 pareto 解集中安全效益最大的解。绘制出安全、经济和绿色效益设置不同权重时的效益图如下。

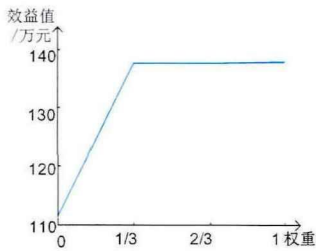


图 4-9 权重对安全效益影响

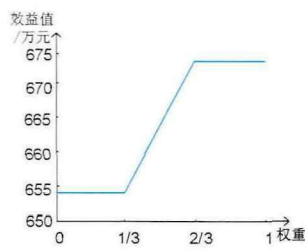


图 4-10 权重对经济效益影响

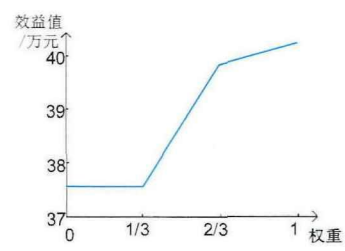


图 4-11 权重对绿色效益影响

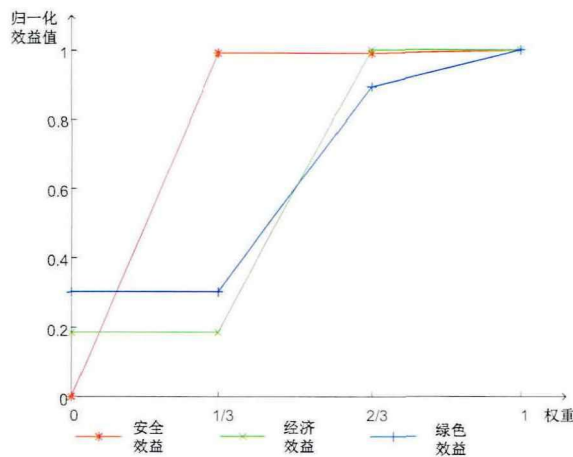


图 4-12 不同权重下时序优化结果效益归一化对比

将以上图进行归一化处理可以得出不同权重下，多目标优化结果的效益值对比如图 4-12 所示。

从图中可以看出，效益权重可以划分为三个区间，安全效益和绿色效益在其中的两个区间归一化效益值发生改变，经济效益仅在一个区间归一化效益值发生

变化，相对来说安全效益和绿色效益对权重变化较为敏感。造成上述现象的主要原因是所有技改项目都能从输配电价中提取经济效益，由于经济效益权重改变而导致不同的项目出库选择对经济效益影响不大，同时不是所有技改项目都能提取安全效益和绿色效益，所以安全效益和绿色效益受到权重改变影响更大。

4.4本章小结

本章对某省级电网技改投资决策进行算例分析。选择运维表现一般的某市供电公司进行分析，以该市 2021 年的电网运维成本数据和技改项目数据，进行电网运维资本性成本重新配置和电网技改项目投资时序优化，验证了本文提出技改项目时序优化方法的有效性。

第5章 结论与展望

5.1 结论

本文研究了电网技改项目的投资决策优化，包括电网运维阶段资本性成本与成本性成本的优化分配和基于资本性成本约束的电网技改时序优化。做出了以下工作：

首先，本文从电网全寿命周期出发引出了电网运维阶段成本，介绍了电网运维资本性成本和成本性成本。从投资成效角度分析并建立电网运维成本投资成效指标体系，通过历史数据方式对电网运维成本和投资成效建模。基于投资成效评价建立了电网运维成本优化分配模型，以求解电网技改投资的资本性约束。

然后，以资本性成本为技改决策的资金约束，建立了电网技改项目时序优化模型。针对电网技改项目投资成效指标之间存在较大差异性，采用了先求取 Pareto 最优解集后折衷求取最优解的方法。模型考虑电网技改的时序影响，以多阶段技改项目投资效益为目标函数，优化得出包含当年和后续四年技改项目出库结果的优化方案。考虑到技改项目储备库的年度滚动更新机制的影响，技改项目时序优化模型添加了滚动机制，即保留当年项目出库投资决策结果，并实施项目出库，后续四年的投资决策结果并不实际出库，逐年滚动推进。

最后，本文以某省级电网为例对电网技改项目时序优化模型进行仿真模拟，验证了模型的可行性并计算分析了电网技改项目效益指标不同权重设置对时序优化结果的影响。本文研究方法可为电网技改项目投资决策提供参考，提高电网技改投资收益。

5.2 展望

由于研究水平和论文工作时间有限，审视本文还存在一些疏漏，还可以在以下内容继续下一步工作：

(1) 本文分析了电网运维阶段投资成效指标，这些指标均来自于电网公司现有统计指标，应用到不同使用场景还需要斟酌分析，从更全面的角度进行成效挖掘和建模。

(2) 电网技改项目投资时序优化中，由于不涉及电网网架，采用静态的方法计算技改效益，与实际电网中动态效益计算存在差异。

参考文献

- [1]董晋喜,谭忠富,王佳伟等. 电力体制改革背景下输配电价关键问题综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(03):113-122.
- [2]杨柳,刘俊廷,杨玉瑞,等. 浅谈电网技术改造项目库管理[J]. 华北电力技术,2011,(11): 48-51.
- [3]杨威. 电网一次主设备技改修理投资优化模型研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.
- [4]贺兰菲,韩文长,张雪霏,等. 一种基于输配电定价成本监审建模的电网设备技改大修策略[J]. 华中师范大学学报(自然科学版):1-9.
- [5]王凯,文江海,杨放南等. 基于“资产墙”的电网设备技改规模预测研究[J]. 青海电力,2023,42(03):38-43.
- [6]童典. 基于 LCC 理论的电网设备技改项目准入优选方法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
- [7]周凯兵,夏骏,蒋明姣等. 统筹设备使用寿命、设计寿命、资产折旧年限多因素的电网资产技改资金规模预测方法研究[J]. 现代工业经济和信息化,2023,13(05):222-224+230.
- [8]杨蕴华,项维,游春,冯婷婷,袁亚. 电网生产技改项目投资优选方法研究[J]. 中国电力企业管理, 2023, (15): 62-63.
- [9]章思远. 架空线路六防技改项目效果评价与投资预测研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
- [10]万昆. 电网企业技术改造与技术创新项目功效系统评价研究[D]. 武汉:武汉大学,2013.
- [11]于天一. 基于前景理论的变电站无功技改工程项目优选研究[D]. 保定:华北电力大学, 2022.
- [12]宋天奇,叶祚鸿,姚自林. 基于加权 DEA 模型的电网企业技术改造投资优选策略[J]. 微型电脑应用, 2021, 37 (02): 161-162+172.
- [13]郝洵. 基于全寿命周期成本的变压器技改经济评估[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- [14]马晓晴,刘文霞,陈璐,等. 考虑系统效能和风险的电网设备检修/退役策略协同优化方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版): 1-12.
- [15]ALDHUBAIB H, SALAMA M. A novel approach to investigate the effect of maintenance on the replacement time for transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014,29(4): p1603-1612.
- [16]朱鑫鑫,朱金龙. 电网技术改造项目经济效益后评价研究[J]. 电力学报, 2017,

32(2): 159-167.

- [17] Liu Y, Zhang H, Li T, Wang M. Economic Benefit Post-evaluation for Technical Revamping of Power Grid Projects[C]//ITNEC 2023 - IEEE 6th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference,2023: IEEE: 1253-1257.
- [18] 谭玉东, 文明, 李湘华, 等. 基于改进物元可拓模型的输电项目投资效益评价[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 113-119.
- [19] Wu X, Zhang Q, Chen X, Wang D. 2021. Research on Post Evaluation of Power Grid's Technological Transformation Project Based on Combined Weighting and Matter-Element Extension Method[C]//Proceedings - 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference: Energy Transition for Carbon Neutrality, SPEC 2021: IEEE: 1772-1777.
- [20] 杨卫红, 何永秀, 李德智, 等. 模糊区间评价与层次分析相结合的电网改造项目综合后评估方法[J]. 电网技术, 2009, 33(05): 33-37.
- [21] 张华. 廊坊大尚屯 110kV 变电站电网技改项目后评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [22] 王玲, 李效臻. 输变电技改项目后评价指标与方法[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(7): 25-28.
- [23] Blazquez-Garcia A, Conde A, Mori U, Lozano J A. A Review on Outlier/Anomaly Detection in Time Series Data[J]. ACM Computing Surveys, 2022, 54(3). 21-33.
- [24] Langkvist M, Karlsson L, Loutfi A. A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling[J]. Pattern Recognition Letters, 2014, 42: 11-24.
- [25] Xu J, Yin H, Zhang L, Li S, Zhou G. Review Rating with Joint Classification and Regression Model[C]. 6th CCF International Conference on Natural Language Processing and Chinese Computing (NLPCC): 2018: 10619, 529-540.
- [26] Engstrom E, Runeson P, Skoglund M. A systematic review on regression test selection techniques[J]. Information and Software Technology, 2010, 52(1): 14-30.
- [27] Pallavi, Joshi S, Singh D, Kaur M, Lee H. Comprehensive Review of Orthogonal Regression and Its Applications in Different Domains[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29(6): 4027-4047.
- [28] Sigrist R, Rauter G, Riener R, Wolf P. Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review[J]. Psychonomic Bulletin & Review, 2013, 20(1): 21-53.
- [29] Deng Y, Chen Y, Zhang Y, et al. Fuzzy Dijkstra algorithm for shortest path problem under uncertain environment[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(3): 1231-1237.
- [30] Parimala M, Broumi S, Prakash K, et al. Bellman-Ford algorithm for solving shortest path problem of a network under picture fuzzy environment[J]. Complex &

Intelligent Systems, 2021, 7: 2373-2381.

- [31] Yan B, Aasma M. A novel deep learning framework: Prediction and analysis of financial time series using CEEMD and LSTM[J]. Expert systems with applications, 2020, 159: 113609.
- [32] Namir K, Labriji H. Decision support tool for dynamic inventory management using machine learning, time series and combinatorial optimization[J]. Procedia Computer Science, 2022, 198: 423-428.
- [33] Georgiadis G P, Elekidis A P, Georgiadis M C. Optimal production planning and scheduling in breweries[J]. Food and Bioproducts Processing, 2021, 125: 204-221.
- [34] Taherkhani M, Hosseini S H, Javadi M S, et al. Scenario-based probabilistic multi-stage optimization for transmission expansion planning incorporating wind generation integration[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: 106601.
- [35] Wang Y, Dong W, Yang Q. Multi-stage optimal energy management of multi-energy microgrid in deregulated electricity markets[J]. Applied Energy, 2022, 310: 118528.
- [36] 束洪春, 邵宗学, 旷宇. 基于改进型限流混合式直流断路器的开断时序优化研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6176-6187.
- [37] 金智博, 李华强, 李山山, 等. 考虑投资能力反馈的电网规划项目投资时序优化方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 168-174.
- [38] 张昕雅. 基于全寿命周期理论的光伏发电经济与环境效益研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2023.
- [39] 苏海锋. 配电系统规划全寿命周期管理理论和方法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012.
- [40] 王希. 电网企业设备运维阶段成本管控模型研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
- [41] 程曦, 吴霜, 王静怡, 等. 输配电价改革背景下电网项目多阶段投资优化决策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 116-123.
- [42] 杨婷. 输配电价改革下电网企业投资组合优化模型研究[D]. 北京:华北电力大学, 2020.
- [43] 李雪, 李佳奇, 张儒峰, 等. 计及风电出力相关性和条件价值风险的电力系统概率可用输电能力评估[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4162-4177.
- [44] 刘文霞, 夏宝亮, 王志强, 等. 输电网输电能力评价方法的解析与改进[J]. 现代电力, 2017, 34(04): 27-32.
- [45] 郭浩明. 考虑 LCC 的配电网多阶段设备资产联合优化配置方法[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
- [46] 罗春梅. 专用生产设备成新率算法的改进及应用[D]. 重庆:重庆理工大学, 2020.
- [47] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. Nature, 1986, 323: 533-536.

-
- [48] 丁青锋, 尹晓宇. 差分进化算法综述[J]. 智能系统学报,2017,12(04):431-442.
- [49] Tasoulis D K, Pavlidis N G, Plagianakos V P. Parallel Differential Evolution[J]. Evolutionary Computation,2004(2):2023-2029.
- [50] 董福贵, 郗来昊, 孟子航. 考虑碳交易的电力现货市场出清多阶段优化模型研究[J]. 电网技术,2024,48(01):79-96.
- [51] 易建波, 胡猛, 王泽宇, 等. 提升光储充电站运行效率的多目标优化配置策略[J]. 2023:电力系统自动化,1-14.
- [52] 韩俊, 韩文花, 陈曦, 等. 基于熵权 - 灰色关联分析的降低区域停电损失举措研究[J]. 中国电力,2020,53(05):10-17.
- [53] 穆永铮, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于多算子层次分析模糊评价的电网安全与效益综合评价指标体系[J]. 电网技术,2015,39(01):23-28.