



硕 士 学 位 论 文

MASTER'S DISSERTATION
(专业学位)

论文题目 配电网分布式光伏承载能力评估方法研究

作者姓名 张硕

学科专业 电气工程

指导教师 贾清泉 教授

2023 年 5 月

中图分类号：TM71

学校代码：10216

UDC：621.3

密级：公开

专业学位硕士学位论文

(应用研究型)

配电网分布式光伏承载能力评估方法研究

硕 士 研 究 生：张硕
导 师：贾清泉 教授
副 导 师：谢小英 高级工程师
申 请 学 位：能源动力硕士
学 科 专 业：电气工程
所 属 学 院：电气工程学院
答 辩 日 期：2023 年 5 月
授 予 学 位 单 位：燕山大学

A Dissertation in Electrical Engineering

**RESEARCH ON EVALUATION METHOD OF
DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC HOSTING
CAPACITY IN DISTRIBUTION NETWORK**

by Zhang Shuo

Supervisor: Professor Jia Qingquan
Senior Engineer Xie Xiaoying

Yanshan University

May, 2023

摘要

在“双碳”战略目标与“整县光伏”政策背景下，“十四五”时期我国分布式光伏产业发展将呈现跨越式增长态势。然而其大规模接入给配电网的规划运行带来了许多问题，主要包括节点电压越限，潮流反向倒送等，严重影响配电网的安全性。同时，传统的被动管理模式难以适应光照和负荷等不确定性因素影响下的电网运行，为了能够进一步经济合理的提升配电网承载能力，需要兼顾一定经济性并考虑主动管理措施进行综合控制。为了在保证配电网安全稳定运行的基础上，能够更高效地利用分布式光伏，本文针对配电网分布式光伏承载能力评估方法展开了研究。具体内容如下：

首先，研究了源荷时序场景的构建。在 K-means 场景聚类算法原理的基础上，针对其缺点引入了密度中心和 DBI 指数对算法流程进行了改进。应用改进后的聚类算法对光伏和负荷功率年时间序列进行场景聚类，并分析了其随机性及变化规律。依据聚类结果验证了改进 K-means 算法的实用性。将聚类后的场景及概率作为配电网承载能力研究的计算场景，能够在保证一定准确度的同时，大大降低运算的复杂度。

其次，研究了不同光伏接入状态下配电网的最大承载能力。建立了以光伏装机容量最大为目标的数学模型，考虑了多种约束条件。定义了不同光伏接入方式，构建了分布度、容量分散度、距离分散度和综合均匀度 4 种光伏分布特征指标。改进了鲸鱼优化算法，并应用该方法对不同光伏接入状态下的配电网分布式光伏承载能力进行计算。在 IEEE33 算例的基础上证明了所提方法的有效性，同时从定性和定量两个角度分析了所定义的光伏接入状态对分布式光伏规模化接入的指导意义。

最后，进一步研究了兼顾经济成本的配电网承载能力评估方法提升。依据 4 种主动管理措施的原理，建立了数学模型和约束条件。考虑了分布式光伏接入的综合经济成本，构建了承载能力多目标优化模型。采用基于 NSGA-II 的多目标优化算法求出 Pareto 最优解集，并提出了通过最优解集综合评价指标选择最优解。在改进的 IEEE33 节点系统上仿真验证了各种主动管理措施对承载能力的提升，以及兼顾综合经济成本后的承载能力变化情况，从而进一步促进分布式光伏的经济安全接入。

关键词：分布式光伏；承载能力；聚类场景；接入状态；主动管理措施；经济成本

Abstract

Under the background of the "double carbon" strategic goal and the "whole county photovoltaic" policy, the development of China's distributed photovoltaic industry will show a leap-forward growth trend during the 14th Five-Year Plan period. However, its large-scale access has brought many problems to the planning and operation of the distribution network, including node voltage violation, power flow reverse transmission, etc., which seriously affect the security of the distribution network. At the same time, the traditional passive management mode is difficult to adapt to the power grid operation under the influence of uncertain factors such as illumination and load. In order to further improve the hosting capacity of distribution network economically and reasonably, it is necessary to take into account certain economy and consider active management measures for comprehensive control. In order to make more efficient use of distributed photovoltaic on the basis of ensuring the safe and stable operation of distribution network, this paper studies the evaluation method of distributed photovoltaic hosting capacity in distribution network. The details are as follows:

Firstly, the construction of source-load temporal scene is studied. Based on the principle of K-means scene clustering algorithm, the density center and DBI index are introduced to improve the algorithm flow. The improved clustering algorithm is used to cluster the annual time series of photovoltaic and load power, and its randomness and variation law are analyzed. According to the clustering results, the practicability of the improved K-means algorithm is verified. Taking the clustered scene and probability as the calculation scene of the distribution network hosting capacity research can greatly reduce the complexity of the operation while ensuring a certain accuracy.

Secondly, the maximum hosting capacity of distribution network under different photovoltaic access conditions is studied. A mathematical model with the goal of maximizing photovoltaic installed capacity is established, and various constraints are considered. Different photovoltaic access modes are defined, and four photovoltaic distribution characteristic indexes of distribution, capacity dispersion, distance dispersion

Abstract

and comprehensive uniformity are constructed. The whale optimization algorithm is improved, and this method is applied to calculate the distributed photovoltaic hosting capacity of distribution network under different photovoltaic access states. Based on the IEEE33 example, the effectiveness of the proposed method is proved. At the same time, the guiding significance of the defined photovoltaic access state to the large-scale access of distributed photovoltaic is analyzed from both qualitative and quantitative perspectives.

Finally, the evaluation method of distribution network hosting capacity considering economic cost is further studied. According to the principle of four active management measures, the mathematical model and constraint conditions are established. Considering the comprehensive economic cost of distributed photovoltaic access, a multi-objective optimization model of hosting capacity is constructed. The Pareto optimal solution set is obtained by the multi-objective optimization algorithm based on NSGA-II, and the optimal solution is selected by the comprehensive evaluation index of the optimal solution set. The simulation on the improved IEEE33 node system verifies the improvement of the hosting capacity by various active management measures and the change of the hosting capacity after taking into account the comprehensive economic cost, so as to further promote the economic and safe access of distributed photovoltaic.

Keywords: Distributed photovoltaic; Hosting capacity; Clustering scene; Access status; Active management measures; Economic costs

目 录

第1章 绪论.....	1
1.1 课题背景及研究意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 场景分析的研究现状.....	2
1.2.2 配电网承载能力的研究现状.....	3
1.2.3 承载能力提升的研究现状.....	5
1.3 本文主要工作.....	8
第2章 源荷典型场景构建方法	9
2.1 引言	9
2.2 基于 K-means 聚类算法的典型场景生成.....	9
2.2.1 基本原理.....	9
2.2.2 算法改进思想.....	9
2.3 基于密度中心和 DBI 指数的改进算法	10
2.3.1 密度聚类中心选取.....	10
2.3.2 DBI 指数的计算过程.....	10
2.3.3 算法流程.....	12
2.4 仿真分析.....	13
2.4.1 光伏和负荷时序特性分析.....	13
2.4.2 光伏场景聚类.....	15
2.4.3 负荷场景聚类.....	16
2.5 本章小结.....	18
第3章 考虑光伏接入状态的配电网最大承载能力评估	19
3.1 引言	19
3.2 配电网承载能力优化模型	19
3.2.1 目标函数.....	20
3.2.2 约束条件.....	20
3.2.3 不等式约束的处理.....	21
3.3 光伏在配电网中的接入状态	22
3.3.1 光伏接入方式.....	22
3.3.2 光伏分布特征.....	23
3.4 基于改进鲸鱼优化算法的模型求解	24
3.4.1 鲸鱼优化算法.....	24
3.4.2 算法改进.....	25
3.4.3 承载能力优化流程.....	27

3.5 仿真分析.....	28
3.5.1 算例数据.....	28
3.5.2 所提算法的有效性证明.....	29
3.5.3 考虑机会约束的承载能力评估.....	30
3.5.4 不同接入方式下承载能力定性分析.....	32
3.5.5 基于分布特征的承载能力定量分析.....	33
3.6 本章小结.....	37
第 4 章 兼顾经济成本的配电网承载能力提升	38
4.1 引言	38
4.2 主动管理措施及其模型建立	38
4.2.1 逆变器无功调节.....	38
4.2.2 有功削减.....	39
4.2.3 变压器分接头调节	39
4.2.4 无功补偿装置调节	40
4.3 承载能力多目标优化模型	41
4.4 基于 NSGA-II 的多目标优化求解	41
4.4.1 帕累托最优解集.....	42
4.4.2 多目标求解流程.....	42
4.4.3 最优解集评价指标.....	43
4.5 仿真分析.....	44
4.5.1 算例数据	45
4.5.2 主动措施对承载能力的提升	46
4.5.3 兼顾经济成本的配电网承载能力	49
4.5.4 最优方案的确定	51
4.6 本章小结	52
结论.....	53
参考文献.....	55

第1章 绪 论

1.1 课题背景及研究意义

随着经济社会和科学技术的日益发展，人们对各类能源的需求与日俱增，然而持续无序、低效能的开采和利用化石能源不仅导致了严重的资源浪费，也给环境带来了巨大的污染^[1]。依赖化石能源的传统发展模式无法持续，能源体系的转型升级成为重中之重。因此，在当前这个“双碳”目标的大背景下，为了增加清洁能源的使用、减少环境污染的现象，具有资源节约、环境友好等特点的分布式能源得到了快速发展^[2]。

与传统的大量集中式接入相比，分布式能源发电设备的建设周期短，所需成本低廉，具有即插即用的优势。同时，由于国家环保方面相关政策的大力支持和电力技术水平的不断提高，分布式能源的装机和并网容量也逐年增长，如：太阳能、风能等，都以分布式的方式接入配电网。这其中，又以分布式光伏的发展最为迅速。截至 2022 年底，我国新增光伏并网容量 8740 万千瓦，其总容量更是达到 3.92 亿千瓦，连续 8 年稳居全球首位。“十四五”首年，光伏发电建设实现新突破，呈现新特点^[3]。

然而，随着分布式光伏在电网中的渗透率不断提升，使得配电网从简单辐射网络变成了多电源网络，给系统的稳定运行带来了一定影响。这样的发展趋势使得配电网分布式光伏的承载能力逐渐达到其所能承受的极限，因此对分布式光伏的接入及高效利用也有了更高的标准。需要进行配电网分布式光伏承载能力的相关研究。

一方面，分布式光伏虽然能够有效减少环境的污染以及化石资源的过度浪费，但是其大规模无节制的接入给配电网的运行规划过程带来了许多问题。具体来说，包括节点电压越限，潮流反向倒送，网络损耗增加，电能质量下降等，严重影响了配电网的安全性。此外，由于分布式光伏发电的多少与外界环境有着密切的联系，其功率输出具有明显的随机性和不确定性，严重威胁电力系统的稳定运行。所以，配电网对分布式光伏的承载能力有一定限度。为了保证在配网安全稳定运行的情况下，能够更高效地利用分布式光伏，需要一定的方式来评估现有网架情况下配电网对分布式光伏的承载能力，从而指导配电网分布式光伏的规划建设。

另一方面，考虑到“整县光伏”和“户用光伏”政策的施行^[4]，要求分布式光伏“宜建尽建”和“应接尽接”^[5]。导致部分地区配电网已经超出其最大承载能力，提升了产生

不稳定风险的概率。同时，传统的被动管理模式也无法很好的应对光照和负荷不确定性所带来的影响。因此，在准确评估配电网分布式光伏的最大承载能力基础上，考虑主动管理措施进一步提升配电网承载分布式光伏的能力也十分重要^[6]。这样能够对分布式光伏进行综合控制，同时提升对分布式光伏的消纳能力。另外，分布式光伏的接入不仅是为了保护环境，同时也希望维持一定经济性，而单纯依赖传统配电网很难满足电力系统的经济、高效运行，因此需要在评估和提升配电网承载能力的同时，兼顾一定的综合经济成本。

综上所述，需要研究一种配电网分布式光伏承载能力的评估方法，并在保证安全性的同时，计及一定的不确定性。此外，在前述准确评估的基础上，进一步研究主动管理措施对配电网承载能力的提升也迫在眉睫，同时为了推动分布式光伏的发展，需要考虑一定的经济性。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 场景分析的研究现状

电力系统场景分析是描述不确定性的常用方法。通常在进行配电网规划和运行方面的研究时，需要处理大规模的光伏和负荷出力场景，从而得到符合实际情况的规划方案，但这不免增加了计算量，降低了计算效率。因此，需要应用场景分析来生成小部分具有代表性的场景代替大量实际场景，从而平衡计算速度和准确度之间的关系，达到快速准确的规划分析。根据研究背景和实际情况的不同具体分为两个方面。

一方面是在没有原始数据的情况下，采用场景生成的方法获得与实际情况相符的大量场景。通常根据研究对象的概率分布函数或统计特征通过抽样的方法，从而获得具有不确定性和随机性特征的近似场景。

文献[7]通过 KL 散度量化概率函数，从而模糊处理了分布式光伏的随机性。文献[8]通过构建分布式光伏和负荷之间的相关性样本矩阵来处理出力不确定性。文献[9]建立了考虑相关性的概率潮流模型，同时采用基于电压偏差机会约束的准入容量规划方法提升光伏并网容量。文献[10]采用近似似然估计的方法来考虑光伏、风机和负荷的相关不确定性。文献[11]采用高斯混合模型表征分布式光伏发电功率的概率分布。

另一方面是在有原始数据或根据概率生成了大量场景的情况下，采用场景削减的方法，达到用少量具有代表性的场景以及相应的概率来描述原有的大量复杂场景的目的。其中又包括极具主观性的典型日法和较为客观的聚类方法。

文献[12]采用了典型日法分析了光伏和负荷的时序特性。文献[13]采用 K 均值聚类的方法处理源荷出力的不确定性。文献[14]提出基于戴森维丁堡指数的改进场景聚类法解决分布式光伏和负荷功率的不确定性。文献[15]采用同步回代消除法对一年四季的光伏和风机出力场景进行削减，从而避免了大量长周期的模拟。文献[16]为避免聚类结果陷入局部最优，采用模糊 C 均值聚类方法构建典型场景。

1.2.2 配电网承载能力的研究现状

配电网分布式光伏承载能力是指在保证配电网安全稳定运行，各运行指标约束不越限的情况下，配电网所能承载的分布式光伏容量。该指标是评估配电网分布式光伏接入规模的主要标准，目前国内外还有诸如“接纳能力”、“准入容量”、“Hosting Capacity”等类似的词语对该问题进行表述^[17]。

最近几年，在国内外机构及学者研究配电网分布式光伏承载能力的过程中，取得了一些成效。基本的承载能力评估问题主要是分布式光伏的优化配置，即分布式光伏的最佳接入位置和接入容量的确定，同时考虑到不同规划目的，还需要选择所需的目标函数、运行约束以及分析方法。目标函数是接入分布式光伏所希望达到的最终目的，而约束条件则是限制配电网分布式光伏承载能力提升的主要因素，分布式光伏的不合理并网，会导致相关约束条件达到限值，从而限制了承载能力的提升，因此为了避免上述情况，还需要考虑可行且高效的分析方法。由此可见，承载能力评估问题是一个复杂的混合整数非线性优化问题。

1. 优化配置模型研究现状

一方面是目标函数的不同。其最主要的目标通常是优化分布式光伏的接入位置或接入容量，使得配电网各节点接入总量最大，文献[18]以分布式能源准入容量最大为目标，计算其最大并网容量；由于分布式光伏接入带来的主要影响是使电压升高，因此也有些学者以电压偏差最小作为目标函数，以改善电压的分布。另外接入分布式光伏的目的往往是为了保护环境的同时获得一定收益，因此考虑综合经济效益最大化也是十分必要的，文献[19]以全寿命周期收益最大为目标函数，得到了收益最大化

的光伏接入容量。文献[20]以成本最低为目标，通过协调储能系统和无功电源，对分布式能源进行优化配置。或者是是系统网损最小化，避免不必要的经济损失，文献[21]将网损最小作为目标函数，并通过函数关系为分布式电源的接入提供指导；还有诸如系统故障率最小、平均停电持续时间指数最小等相关目标函数。

另一方面是考虑约束条件的不同。潮流方程等式约束是分布式光伏接入配电网后首要满足的约束，也是必须满足的约束；另外根据所接入配电网电压等级的不同，还需要考虑节点电压约束，文献[22]建立了以并网点电压偏差为主要约束的光伏准入容量模型，从而为光伏电站的最优并网点提供一定指导。文献[23]考虑了电压上升和电压偏差约束来确定分布式电源的最大接入极限。文献[24]在建立中压配电网优化模型的同时考虑了电压三相不平衡度约束。变压器和线路的承载能力也都有一定限度，因此考虑线路功率约束和变压器容量约束同样十分重要，文献[25]综合考虑线路输送容量约束、主变压器容量约束等多种约束计算了分布式电源最大渗透率。

还有的学者考虑了分布式光伏约束、电压质量和继电保护等其他相关约束，文献[26]采用分段解析算法求解了一个包含电压波动和继电保护等多类约束的承载力评估模型，文献[27]以电压质量为约束条件，并通过矩阵描述配网的方法计算准入容量，文献[28]从倒送功率约束的角度，考虑平日和节假日两个不同场景，给出了最大接入容量的计算方法。文献[29]基于谐波发射机理，获得了以谐波发射限值为约束的接入容量极限。文献[30]对包含电网频率稳定性约束的电网承载能力进行了评估。文献[31]考虑总线的谐波失真限制作为约束，并使用谐波功率流法来计算谐波分量。

2. 优化模型求解方法研究现状

第一类是分析法，具体又包括试探法和灵敏度分析法。试探法以固定值为初始值并设置步长逐次递增带入数值计算，直至违反相关约束限值。文献[32]分析了光伏与负荷功率同分布情况下的承载能力问题，为光伏的规划提供一定指导。灵敏度分析法主要是通过灵敏度计算确定配电网中对网络性能影响最大的节点，并将其作为分布式能源优化配置点。文献[33]将时序电压灵敏度指标最大的节点选择作为分布式光伏的接入节点。文献[34]采用灵敏度分析方法评估了承载能力结果的百分比准确性。

第二类是数值解析法，其中最基础最常用的解析算法是线性规划方法，文献[35]综合各类电能质量影响因素，提出了一种计算分布式电源准入容量的快速且实用的解析算法。当数学模型出现了非线性函数，使用普通的线性规划就无法直接求解了，

序列二次规划是一种有效的解决办法，但仅适用于中小规模的计算，文献[36]基于信赖域序列二次规划算法来求解含负荷不确定性的配电网承载能力问题。

非线性规划方法用于解决非线性问题，其下又包含多种解析算法，文献[37]基于非概率性决策理论和机会约束准确评估了分布式电源最大可新增容量。文献[38]构建了两段鲁棒优化模型，提升了“源荷”不确定性情况下分布式光伏的最大准入容量。文献[39]利用列与约束生成算法形成二阶段鲁棒优化模型求解策略。文献[40]通过基于数据驱动的分布鲁棒优化方法，确定分布式电源的最大渗透水平。文献[41]将交直流混合配网的准入容量模型松弛为可解的混合整数二阶锥规划模型并求解。文献[42]采用修改后的 C&CG/OA 方法来解决电动汽车最大承载能力双层优化问题。

第三类是智能优化算法。随着计算机等人工智能技术的发展，出现了越来越多新的配电网承载能力评估方法。但这类方法是一把双刃剑，一方面，其具有极强的全局寻优能力，并能较为灵活的处理问题中的离散变量，相应的数学模型均是根据实际生活中来源的灵感构建，更加贴合实际。另一方面，其结果具有一定程度的随机性，容易陷入局部最优，同时计算速度较慢，并且难以处理各种复杂变量。文献[43]基于随机权重粒子群算法确定分布式电源的最大并网容量配置方案。文献[44]采用了与二次插值相结合的改进粒子群算法评估了分布式电源的最优接入位置与最优容量。文献[45]采用多种群遗传算法求解包含多约束的承载能力规划模型。

还有除以上方法之外的其他求解算法：文献[46]提出了基于光伏重心理论的配电网分布式光伏最大准入容量的修正算法。文献[47]利用异构分解算法进行输配电网各自区域的交替求解计算。

1.2.3 承载能力提升的研究现状

在正确评估配电网最大承载能力的基础上，开始着眼于进一步提升配电网分布式光伏的承载能力。目前，国内外学者已研究出较多提升配电网分布式光伏承载能力的调控设备及技术，按照控制方式的不同主要分为三大类：配电网主动管理措施、储能技术和需求侧响应。配电网主动管理措施主要是通过控制电网电压维持在约束范围内来提高配电网承载能力。储能技术通过参与调节配电网的功率供需平衡，促进分布式光伏的消纳，但是成本较高，通常作为补充调节措施。需求侧响应是采用激励的手段有效整合需求侧资源，从而实现分布式光伏的高效利用。由于各项技术具有不同

的特点与适用场景，需要根据系统实际运行情况进行选择。随着设备参数或措施的变化，配电网分布式光伏承载能力也会发生变化，甚至一定程度上改变配电网稳定运行裕度。

1. 配电网主动管理措施

通过调整有载调压变压器的抽头位置，能够对配电网整体电压水平进行调节，进而减少分布式光伏接入导致的电压越限问题，从而提高配电网的承载能力。文献[48]提出了三种有载调压变压器的控制策略，缓解了英国低压网络中的电压升高问题，同时采用电容器组进一步提高了网络承载更大范围光伏的能力。

分布式光伏往往通过逆变器接入配电网，通过调控其功率因数在 0.95(超前)~0.95(滞后)之间改变，一方面可以在无功不足时支撑配电网电压，另一方面在电压越限时，可以通过运行逆变器吸收一定无功从而降低节点电压，能够一定程度上提升配电网对分布式光伏的承载能力。文献[49]研究了自主式逆变器控制策略，它不需要逆变器与其环境之间的任何形式的数据通信，仅通过提供无功功率就能有效提高低压电网对分布式光伏的承载能力。文献[50]通过控制光伏逆变器上的无功功率输出大大提高了馈线的整体承载能力。文献[51]通过光伏逆变器和有载调压变压器在每个阶段的联合作用，提高了不平衡场景中的光伏托管能力。文献[52]考虑了逆变器控制功能，并通过保持馈线的电压分布随时间变化来提升光伏托管容量。

无功补偿装置通常分为离散和连续调节无功补偿两种。其中，连续无功补偿装置具有响应快速、调节方便等优点，能够灵活输出无功支撑节点电压，在配电网中可通过其输出感性无功来解决因分布式光伏接入引起的电压越限问题。文献[53]提出了一种最大承载能力评估方法，考虑了有载分接开关和静态无功补偿器在一定的分布式电源功率输出和负载消耗情况下的鲁棒最优运行，从而最大化配电系统的分布式电源承载能力。

网络重构主要通过调整系统拓扑结构来改变潮流分布，在保证系统安全稳定运行的同时提升配电网分布式光伏承载能力。具体包括规划阶段的静态重构和运行阶段的动态重构两种。文献[54]提出了一种多周期最优潮流，通过应用静态重构及动态重构来提高分布式电源的接入容量。文献[55]提出了智能软开关协同配置策略来提升配电网最大承载能力。文献[56]利用智能软开关双向功率调节能力提高分布式电源准入容量。文献[57]通过开关电容器、有载调压变压器、可控分支开关和智能光伏逆变

器的协调操作，提出了一种积极的配电网络管理方法，以最大化光伏接入容量。

当以上措施无法进一步调节配电网状态时，可以考虑分布式光伏有功功率削减，即所谓的弃光。文献[58]采用柔性电量削减方法提高弃风弃光量，从而增加可再生能源装机裕度。文献[59]使用软削减将要断开的生产量降至最低，从而允许更多的风能或太阳能连接到分配网络。

2. 储能配置

储能是一种灵活性资源，能够促进系统的功率平衡。一方面能在分布式光伏出力较大负荷较小时，担当负荷来消纳一部分电能，从而减少弃风弃光量；另一方面在分布式光伏出力较小负荷较大时，能增加电源结构的灵活性。随着技术的发展，储能已经越来越多的应用在中低压配电网，其主要内容可以分为两点。

一是从规划的角度分析储能，确定储能的最优位置和容量。文献[60]建立了考虑储能和柔性多状态开关时空特性的双层规划模型，进一步提升配电网运行的灵活调节能力。

二是从调度的角度研究储能和其他能源之间的最优协同运行方式。文献[61]通过源-网-荷-储灵活性资源协同的方式，对分布式光伏与储能进行了联合优化，提升分布式光伏消纳能力的同时保证了配电网经济性；文献[62]提出了一种电池储能系统的优化集成策略，以提高公用电网的负荷和分布式发电托管能力。

3. 需求侧响应

需求侧响应是指，采用分时电价、电价激励等措施，使用户主动改变自己的用电方式和用电行为，增加分布式光伏出力高峰时段的用户负荷水平，通过负荷侧消纳分布式光伏，从而实现协调电量供需关系平衡、削峰填谷和抑制新能源波动等目的，有利于降低线路容量和节点电压越限的风险，提高配电网的分布式光伏接入容量。对额外消纳的光伏进行电价补贴，可以引导用户改变用电方式，使需求侧各类资源变相主动进行响应，进而影响配电网分布式光伏的承载能力评估结果。

文献[63]基于需求响应构建了分布式光伏集群承载能力双层评估模型，并采用灵敏度排序的方法进行评估。文献[64]采用分时电价优化策略来提升配电网光伏接纳能力。文献[65]分析了需求侧响应对于新能源消纳的促进作用。文献[66]利用二阶锥松弛技术求解，证明了需求侧管理和网络重构能有效提升配电网承载能力。

1.3 本文主要工作

针对上述问题和研究现状，本文以评估配电网分布式光伏承载能力为出发点，考虑光伏出力和负荷功率的不确定性，从不同光伏接入方式和不同光伏分布特征两方面进行承载能力定性和定量分析；并进一步研究了多种主动管理措施对配电网分布式光伏承载能力的提升程度，同时在兼顾一定经济成本的情况下，评估配电网对分布式光伏的最大承载能力。具体的章节安排如下所示：

第 1 章为绪论，介绍了课题的研究背景与意义，分析了分布式光伏的发展及国家相关政策，描述了分布式光伏的接入给配电网运行带来的影响，强调了配电网承载能力研究的必要性。总结概括了场景构建、配电网分布式光伏承载能力评估及其提升方法的国内外研究现状。

第 2 章主要研究了源荷时序场景的构建。首先概括了 K-means 场景聚类算法的基本原理和流程。然后针对 K-means 需要事先确定聚类数和随机选取初始聚类中心的缺点引进 DBI 指数和密度中心进行了改进。最后采用改进后的算法对光伏和负荷年时间序列进行场景聚类，并对 DBI 指数计算结果和聚类结果进行了分析。为第三、四章的配电网承载能力研究做数据铺垫，在保证准确性的前提下，大大降低计算量。

第 3 章主要研究了不同光伏接入状态下配电网的最大承载能力。首先建立了以光伏装机容量最大为目标的数学模型，同时考虑多种约束条件。然后定义了不同光伏接入方式，构建了分布度、容量分散度、距离分散度和综合均匀度 4 种光伏分布特征指标，并对鲸鱼优化算法进行了改进。最后在 IEEE33 算例的基础上采用改进算法对不同光伏接入状态的配电网进行承载能力计算。同时从定性和定量两个角度分析了光伏接入状态对承载能力的影响，从而为分布式光伏的规划提供一定指导。

第 4 章进一步研究了兼顾经济成本的配电网分布式光伏承载能力提升。首先基于逆变器、有载调压、无功补偿和有功削减 4 种主动管理措施的原理，建立了数学模型和约束条件。然后在考虑综合经济成本的情况下，构建了承载能力多目标优化模型。接着采用 NSGA-II 的方法求解 Pareto 最优解集，并通过所提出的最优解集综合评价指标来确定最优解。最后在改进的 IEEE33 节点系统上分析了兼顾经济成本的配电网承载能力及提升情况，从而进一步经济合理的提升承载能力。

最后对全文进行了总结，并对后续研究的开展进行了展望。

第2章 源荷典型场景构建方法

2.1 引言

由于分布式光伏和负荷功率随着外界环境因素的不同具有明显的差异，因此在进行规划时，需要构建源荷时序场景集，来体现随机性的影响。否则会使规划结果产生一定的偏差，甚至造成资源的严重浪费。如果直接构建体现随机性的数学模型，过程十分困难，结果也不易求得，并且与实际情况有一定程度的脱离。因此本文采用场景分析法来表示光伏和负荷功率在实际环境中的不确定性，即用容易求解的大量确定性场景代替随机性模型的建立，从而一定程度上降低模型构建和求解的难度^[67]。

场景分析方法也有局限性。只有当场景规模达到一定量级时，才能精确模拟不确定性。但倘若将全部原始场景带入模型求解，又将极大的增加计算时间。因此本文采用场景削减的方法，在保证一定计算精度的同时，降低计算的复杂度，提升计算效率。聚类算法在削减过程中获得了普遍应用。同时为保证分布式光伏的接入在大多数场景下不会造成配电网各类指标越限，需要构建具有代表性，能准确反应长时间光伏和负荷功率的典型场景。最优聚类数和初始聚类中心的确定是其他需要关注的问题。

2.2 基于 K-means 聚类算法的典型场景生成

2.2.1 基本原理

时间序列聚类算法分为层次聚类、划分聚类、密度聚类等，K-means 算法属于基于划分的聚类^[68]。一般使用两组数据之间的欧氏距离作为分类的依据，距离越小，证明其相似性越高，可以划分为一类。其基本流程包括：随机挑选原始数据中的 K 个场景作为初始聚类中心；判断各原始场景到 K 个中心的距离；将原始场景划分到距离最近的中心处形成簇类；用每一簇类场景的平均值当作新的聚类中心；判断更新前后聚类中心变化程度大小；大于所设阈值则继续更新，小于所设阈值则输出结果^[69]。

2.2.2 算法改进思想

K-means 聚类简单易行，效率高，并能使缩减后的场景具有代表性和多样性。但

需要人为指定聚类个数，且随机生成聚类中心，这两者均会导致聚类结果的改变。一方面是因为人为指定的聚类数不能够反映出典型、极端的光伏出力及负荷情况；另一方面是因为随机聚类中心的选取会导致从一开始就陷入局部最优。因此，为了解决上述问题，并确保生成的场景具有典型性。本文结合密度聚类方法构建初始聚类中心，同时引入 Davies-Bouldin(DBI)指数对聚类结果进行评估。

2.3 基于密度中心和 DBI 指数的改进算法

2.3.1 密度聚类中心选取

密度聚类方法是依据各个场景之间的紧密程度来分类的，据此可以将密度大小引入到初始聚类中心的选取上来。当一个场景附近所聚集的场景越多，就表明该场景的密度越大，进而能够具有代表性的体现该区域场景的特征，选择这样的场景作为聚类中心所获得的聚类结果更容易实现全局最优。密度的定量计算如下所示：

$$d(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^{24} (x_{i,k} - x_{j,k})^2 \quad (2-1)$$

$$E = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i \neq j} d(x_i, x_j) \quad (2-2)$$

$$D(x_i) = \sum_{j=1}^n u(E - d(x_i, x_j)) \quad (2-3)$$

其中，式(2-1)表示两个场景之间的距离；式(2-2)表示所有场景之间的平均距离；式(2-3)表示密度的计算方法； x_i 和 x_j 分别表示第 i 个和第 j 个场景； $x_{i,k}$ 和 $x_{j,k}$ 表示其中第 k 小时的出力数据； M 表示原始场景个数； $u(x)$ 为阶跃函数。

最后，将各场景密度由大到小排列，依次选择初始聚类中心，直至设定的聚类数。

2.3.2 DBI 指数的计算过程

DBI 指数综合考虑不同簇类的分散性和同一簇类的紧密性，主要通过簇内各元素距离和不同簇类间距离的比值来表述结果的好坏。其值越小，意味着各类相差越大，同类内部各元素越接近，最终结果越好。在最优聚类数下，聚类结果的簇间距离和内部元素距离达到平衡，即同类各元素紧密，不同簇类关系稀疏。具体包括：

1. 簇内分散度 S_i

它表示某一类内全部场景到本簇类质心的平均距离，体现了同一簇类中各时间

序列的分散程度，其值越小，分类效果越好。由于本文聚类的是光伏和负荷场景，因此 X 和 A 均是时间尺度为 1 小时时序数据，计算公式为：

$$S_i = \frac{1}{T_i} \sum_{j=1}^{T_i} \left(\sum_{k=1}^{24} |X_{ij,k} - A_{i,k}|^p \right)^{1/p} \quad (2-4)$$

式中， $X_{ij,k}$ 表示簇类 i 中第 j 个场景下第 k 小时的出力数据； $A_{i,k}$ 表示簇类 i 的聚类中心场景中第 k 小时的出力数据； T_i 表示簇类 i 中的场景个数； p 取 2，相应的距离被称为欧氏距离。

2. 簇间分离度 M_{ij}

它表示簇类 i 聚类中心到簇类 j 聚类中心的欧式距离，体现了各类之间的分离程度。其值越大，分类效果越好。

$$M_{ij} = \|A_i - A_j\|_p = \left(\sum_{k=1}^{24} |A_{i,k} - A_{j,k}|^p \right)^{1/p} \quad (2-5)$$

式中， A_i 和 A_j 分别表示簇类 i 和 j 的聚类中心场景； $A_{i,k}$ 和 $A_{j,k}$ 表示其中第 k 小时的出力数据。

3. 相似度 R_{ij}

它表示为簇内分散度和簇间分离度的比值，体现了各类之间的相似程度。其值越小，分类效果越好。

$$R_{ij} = \frac{S_i + S_j}{M_{ij}} \quad (2-6)$$

式中， S_i 和 S_j 分别表示簇类 i 和 j 的簇内分散度； M_{ij} 表示簇类 i 和 j 之间的簇间分离度。

4. DBI 指数

对簇类 i 计算其最大相似度，记为 R_i ，计算公式为：

$$R_i = \max_{j \neq i} (R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{ij}, \dots, R_{iK}) \quad (2-7)$$

即取出簇类 i 与其他类之间的最差结果，然后取均值得到 DBI 指数，表示为：

$$DBI = \bar{R} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K R_i \quad (2-8)$$

其中， K 代表分类个数。不同的分类个数会产生不同的 DBI 值，其值越小，说明类内分散程度越小，类间分散程度越大，分类效果越好。

最后设定一个范围，将同一样本进行多次 K-means 聚类，分别计算其 DBI 指标，最小值所对应的聚类数即为最优。

2.3.3 算法流程

改进后的 K-means 算法生成典型场景的流程如图 2-1 所示，具体步骤如下：

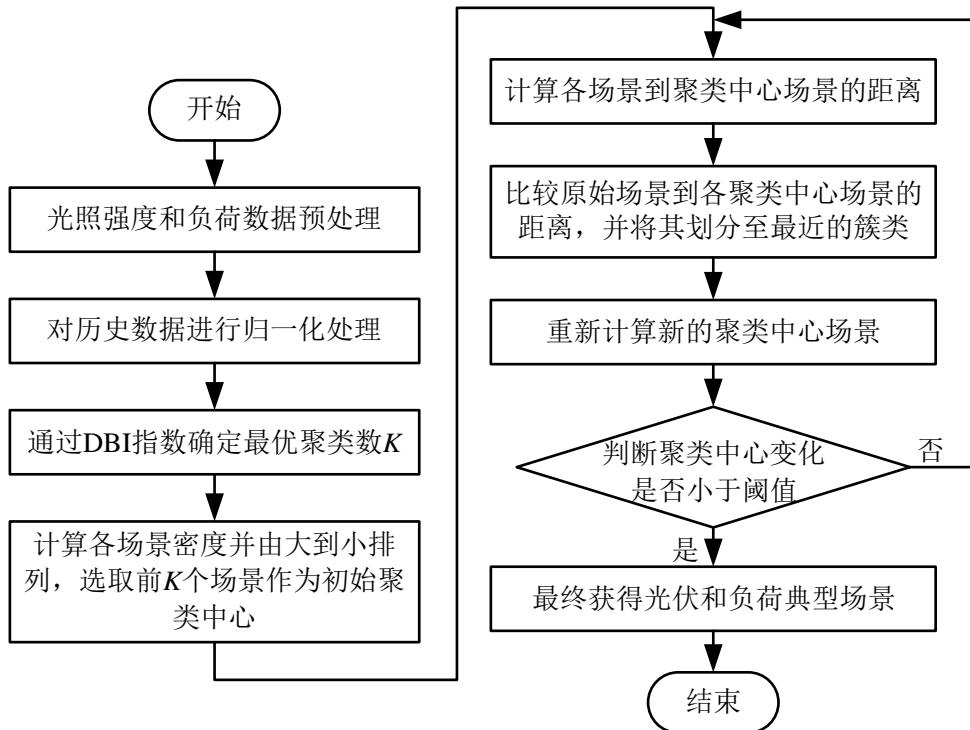


图 2-1 改进 K-means 聚类流程

步骤 1：获取光伏和负荷原始场景时序数据。

步骤 2：对原始场景数据进行归一化处理，具体表示为：

$$S_i = \frac{S_i}{\max(S_1, S_2, \dots, S_M) - \min(S_1, S_2, \dots, S_M)} \quad (2-9)$$

式中， S_i 表示第 i 个光伏或负荷的原始数据； M 表示原始场景数； $\max(S_1, S_2, \dots, S_M)$ 和 $\min(S_1, S_2, \dots, S_M)$ 分别表示场景范围内光伏或负荷原始数据中的最大值和最小值。

步骤 3：依据 2.3.2 节方法，最小 DBI 指数对应的聚类数即为最优聚类数 K 。

步骤 4：依据 2.3.1 节方法计算各个场景密度 $D(x_i)$ 并从大到小排列，选取前 K 个场景作为初始聚类中心 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_K\}$ 。

步骤 5：计算原始场景中全部场景 S 到各初始聚类中心 A 的距离。表示为：

$$O(m, q) = \sqrt{(S_{m,1} - A_{q,1})^2 + (S_{m,2} - A_{q,2})^2 + \dots + (S_{m,24} - A_{q,24})^2} \quad (2-10)$$

式中， $O(m, q)$ 表示原始场景集 S 中的第 m 个场景到第 q 个初始聚类中心的欧式距离； $S_{m,1}$ 表示第 m 个场景下第 1 个小时的出力数据， $S_{m,2}$ 、 $S_{m,24}$ 同理； $A_{q,1}$ 表示第 q

个聚类中心所对应的第1个小时的出力数据， $S_{q,2}$ 、 $S_{q,24}$ 同理。

步骤6：判断第 m 个原始场景到各聚类中心的距离，并将其划分至距离最短的簇类，形成聚类类簇 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_K\}$ ，并求出各簇类场景数，记为 T_1, T_2, \dots, T_K 。

步骤7：在每个聚类类簇中重新计算聚类中心。其中，第 r 个聚类类簇的聚类中心表示为：

$$A_r = \frac{X_r^1 + X_r^2 + \dots + X_r^{T_r}}{T_r} \quad (2-11)$$

式中， A_r 表示第 r 个新的聚类中心； X_r^1 表示第 r 个聚类类簇中第1组光伏或负荷数据； T_r 表示第 r 个聚类类簇中的场景个数。

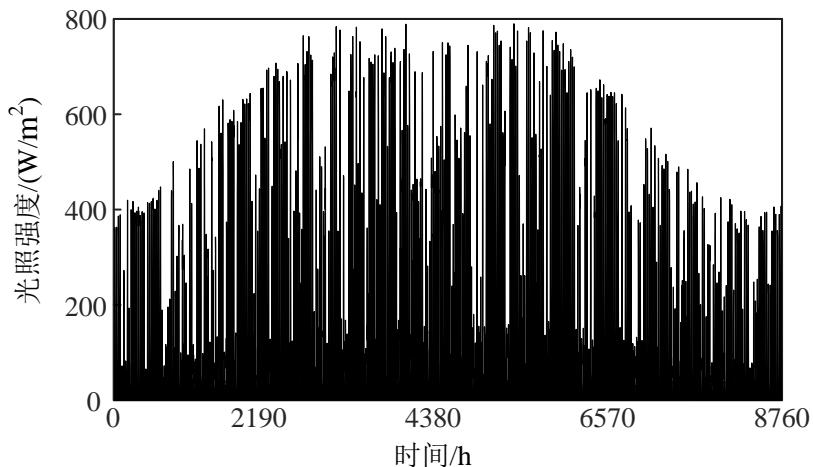
步骤8：判断更新前后的聚类中心距离是否小于阈值。如果大于所设阈值，则返回步骤5继续迭代，如果小于所设阈值，则迭代停止。最终得到描述分布式光伏或负荷典型出力场景的 K 个聚类结果。

2.4 仿真分析

本文选取河北某地区2019年全年的光照强度和负荷数据，并采用2.3节所述的改进K-means聚类方法进行场景削减，以验证所提方法的有效性。

2.4.1 光伏和负荷时序特性分析

如图2-2(a)、(b)、(c)分别表示光照强度全年、一周和一天时间内的变化曲线。通过不同时间跨度的光照强度变化情况分析其时序特性。



(a) 全年光照强度曲线

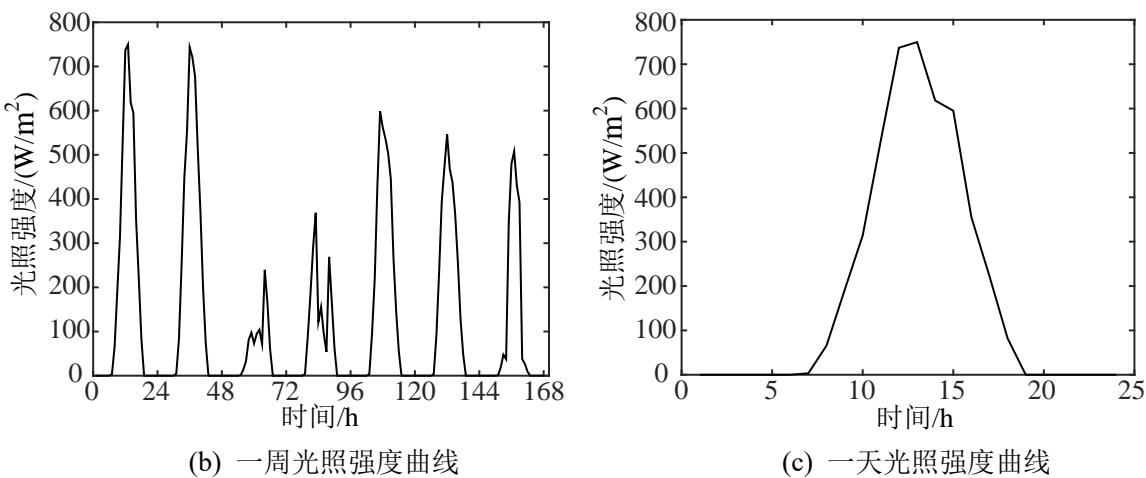
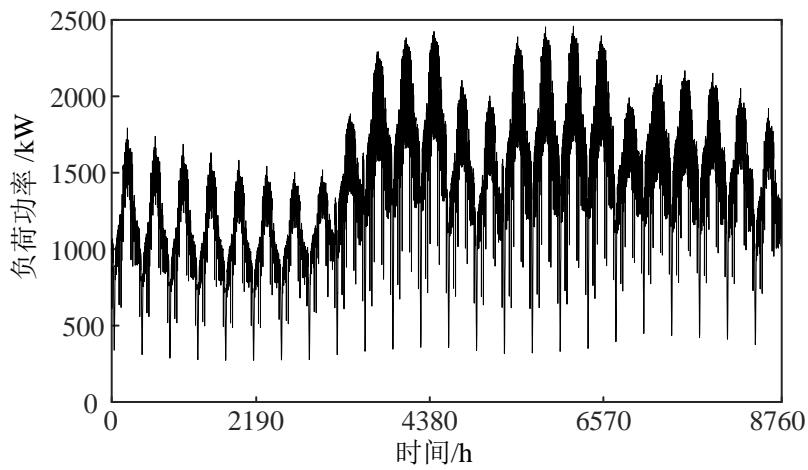


图 2-2 不同时间尺度下光照强度变化情况

从图 2-2(a)可以看出，光照强度变化具有明显的随机性，每个时刻的光照强度大小都有所不同；同时还体现了显著的季节变化特性，其中夏季和秋季太阳辐射强度最高，光伏出力较大，而冬季和春季太阳辐射强度低，光伏出力较小。从图 2-2(b)和图 2-2(c)可以看出，光照强度变化具有一定间歇性，这是因为光照中午达到顶峰，而夜晚无光照，每日往复，周而复始；同时还体现了一定波动性，这主要是因为伴随有阴雨乌云等遮挡现象导致太阳辐射减少。

如图 2-3(a)、(b)、(c)分别表示负荷功率全年、一周和一天时间内的变化曲线。通过不同时间跨度的负荷功率变化情况分析其时序特性。从图中可以明显看出，无论是全年变化曲线、周变化曲线，还是日变化曲线，负荷功率的变化规律都与光照强度明显不同，但也能够发现一些相似的变化特性，在一定程度上可以进行对比分析，总结规律。



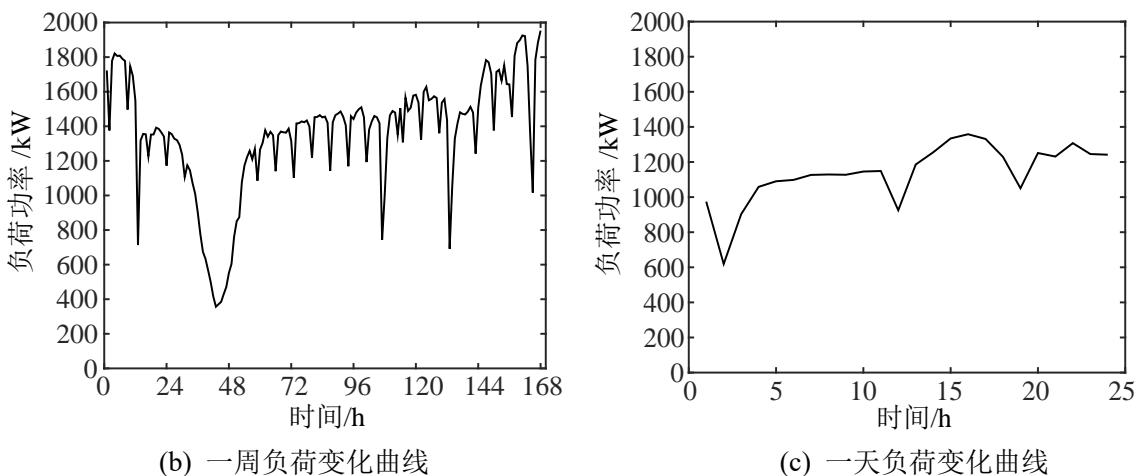


图 2-3 不同时间尺度下负荷功率变化情况

从图 2-3(a)可以看出，负荷功率和光照强度变化同样具有随机性和季节特性，不同点在于负荷功率的极大值出现在夏季、秋季和冬季，而春季相对较小，这是因为季节原因导致了空调等电力设备使用情况的改变。从图 2-3(b)和图 2-3(c)可以看出，相较于光照强度，负荷功率整体相对稳定，但同样具有一定波动性，这主要是由于设备故障、生产生活规律、节日影响等原因造成的。

2.4.2 光伏场景聚类

如图 2-4 所示, 为光伏场景 DBI 值和聚类数变化关系图。其中, 聚类数变化范围的极限值设定为 30, DBI 值的变化范围维持在 0.8-1.9 之间。曲线具有明显的极值点, 能够为光伏场景聚类数的选取提供一定指导。

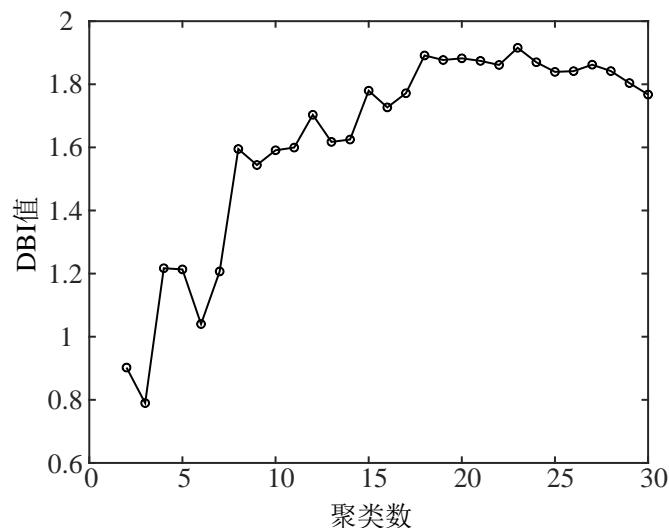


图 2-4 光伏 DBI 值与聚类数关系图

另外从图 2-4 可以明显看出，随着聚类数的增加，DBI 值逐渐升高，在 $K=23$ 处达到最大值，继续增加开始出现一定程度的回落。同时上升过程具有一定程度的波动，波动程度较小，最大值与最小值的差值不超过 1.1，具有较高的实用性。

综上，该指标适合当作光伏场景聚类的有效性指标。并且从图 2-4 中可以发现聚类数 $K=3$ 是分布式光伏 DBI 曲线的最小值点，即得出的最优聚类数为 3。具体聚类结果如图 2-5 所示：

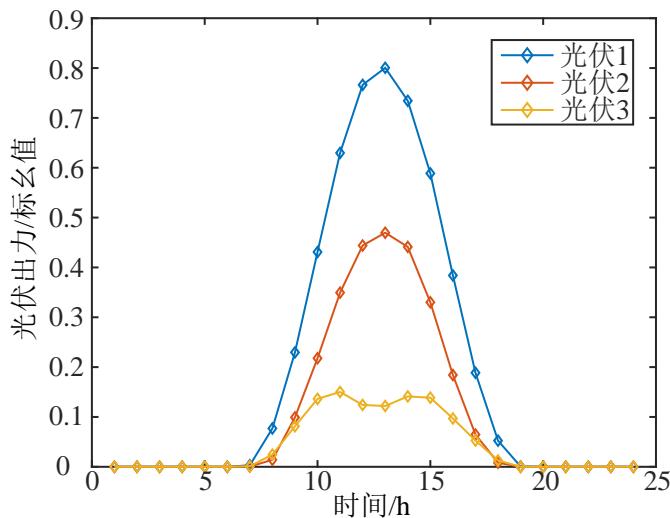


图 2-5 光伏时序特性

从图 2-5 中可以看出，经过场景聚类之后，所获得的 3 种光伏场景最大值点分别为 0.81、0.48 和 0.15 标幺值，整体差别极为明显。同时仍然具有光伏出力曲线的原有特征，相应的出力时间段为 07: 00-19: 00，并且在 12: 00-14: 00 之间出现最大值，而在夜晚时间段出力为 0。该聚类结果可以类比正常生活中的晴天、阴天和雨天，能够很好的保持原始场景的多样性，一定程度上保证了承载能力计算的准确性，同时提高了计算效率。

2.4.3 负荷场景聚类

如图 2-6 所示，为负荷场景 DBI 值和聚类数变化关系图。其中，聚类数变化范围的极限值同样设定为 30，DBI 值的变化范围维持在 0.6-1.05 之间。整体波动范围极小，同时曲线具有极为明显的极值点。并且该波动范围相比于光伏 DBI 曲线小了近 1 倍，极值点两侧的线比光伏 DBI 曲线更为陡峭，即极值点更为突出。能够为负荷场景聚类数的选取提供指导。

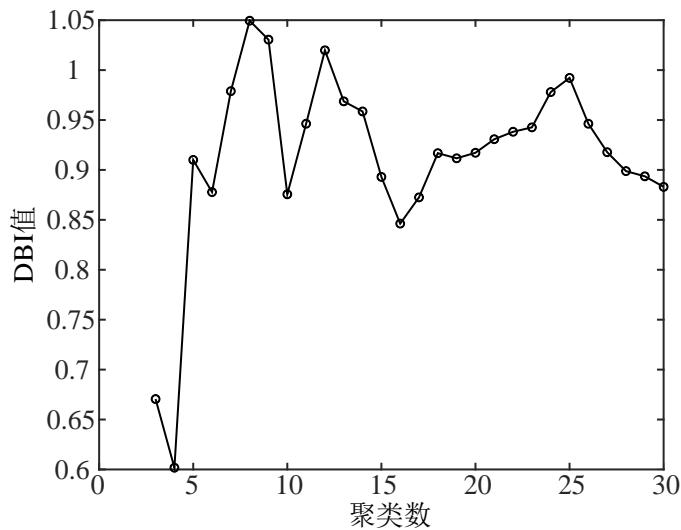


图 2-6 负荷 DBI 值与聚类数关系图

从图 2-6 可以明显看出，随着聚类数的增加，DBI 值先是逐渐升高，在 $K=8$ 处达到最大值，然后在 0.85-1.05 的范围内不断波动。整体波动程度极小，最大值与最小值的差值不超过 0.45，具有极高的实用性。并且极值点非常明显，最小值出现在 $K=4$ 时，即得出的最优聚类数为 4。

综上，该指标相较于光伏场景更为适合当作负荷场景聚类的有效性指标，具体聚类结果如图 2-7 所示：

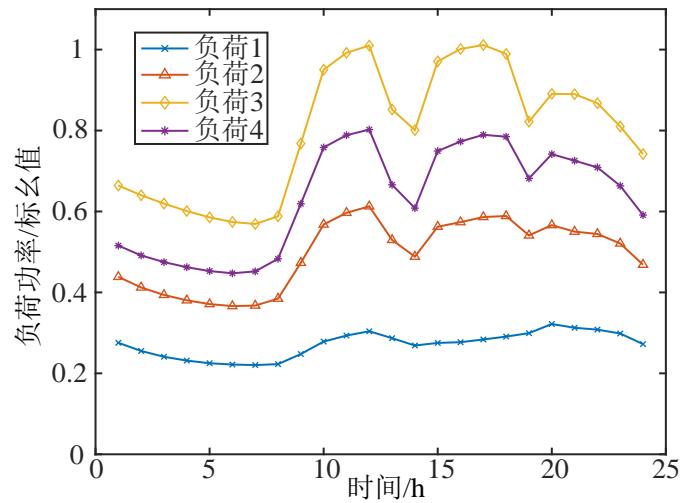


图 2-7 负荷时序特性

从图 2-7 中可以看出，经过场景聚类之后，所获得的 4 种负荷场景均值分别为 0.79、0.65、0.58 和 0.44 标幺值，整体差别很明显。同时仍然具有负荷功率曲线的原有特征，相应的出力时间段具有一定的持续性和稳定性，不存在像光伏出力场景那样

白天和夜晚两个极端出力的情况，负荷高峰集中在 10:00-20:00，其余时间段相对较小，但整体不会有太大差别。该聚类结果可以类比正常生活中的平日、周末、节假日和极端负荷日，能够极好的保持原始场景的多样性，并且一定程度上保证了第三章和第四章承载能力计算的准确性，提高了计算速度和效率。

根据上述所得光伏和负荷聚类场景及其概率，采用两两联合的方式构建联合场景，相应的联合场景概率即为对应的光伏和负荷场景概率的乘积。表 2-1 所示即为最终形成的 12 个联合场景概率值。

表 2-1 光伏-负荷联合场景概率

光伏	负荷			
	1	2	3	4
1	0.1788	0.1998	0.0488	0.0265
2	0.1096	0.1225	0.0300	0.0164
3	0.1076	0.1202	0.0236	0.0162

依据表 2-1，从光伏场景的角度看，可以发现场景 1 出现的概率最大，接近 50%，即光伏出力最大的场景出现次数最多。而场景 2 和 3 出现概率较小，并且相差不多，大致为 25%，3 种光伏场景概率较为均匀。从负荷场景的角度看，场景 1 和 2 出现的概率较多，即负荷功率超过 0.5 标幺值的场景占据了全部场景的 80%，而场景 3 和 4 出现概率小，仅为 20% 左右。最终获得的联合概率场景能够很好的体现光伏和负荷场景的实际情况。

2.5 本章小结

本章主要考虑分布式光伏出力不确定性和负荷随机出力的特点，进行了源荷时序场景的构建。一方面为简化不确定性模型、提升计算效率，采用 K-means 聚类算法对光伏出力和负荷功率时间序列进行场景缩减，在保证一定准确性的情况下，提升后续承载能力优化计算的效率。另一方面针对 K-means 聚类算法随机生成初始聚类中心和需要人为指定聚类数两个问题，引入了密度中心和 DBI 指数进行了改进，并用改进后的算法对光伏和负荷场景进行削减。最后根据聚类结果分析了光伏和负荷出力的时序特性，以及改进 K-means 聚类算法的有效性。从而为第三章和第四章配电网分布式光伏承载能力的优化计算做好数据准备工作。

第3章 考虑光伏接入状态的配电网最大承载能力评估

3.1 引言

在“双碳”战略目标与“整县光伏”政策背景下，大量分布式光伏接入配电网使得潮流分布和电能质量发生巨大变化，甚至危及到电力系统的安全稳定运行。因此，亟需确定配电网对分布式光伏的最大可承载能力^[70]。即在不违反常规约束的前提下，配电网所能承载的分布式光伏的最大容量^[71]。另外，本章在第二章场景聚类的基础上，进一步采用机会约束的方法，允许一定场景下运行指标越限，避免获得过于保守的计算结果，从而进一步提高配电网的承载能力。

同时，分布式光伏对配电网节点电压、网络潮流等方面的影响与其接入状态密切相关，若其接入位置与容量不合理，则会严重威胁系统的安全稳定运行。因此，本章在研究配电网最大承载能力时，从定性和定量两个角度分析了接入状态与承载能力的关系。在确保安全稳定运行的前提下，实现配电网承载能力最大化。

3.2 配电网承载能力优化模型

为描述不同限制因素之间的耦合关系，实现配电网分布式光伏承载能力的定量分析，文献[72]建立了描述配电网分布式光伏承载能力的基本数学模型：

$$\begin{cases} \text{目标函数: } \max_{x \in X} w^T x \\ \text{s.t. } Ax + By \leq k \end{cases} \quad (3-1)$$

式中： x 为分布式光伏接入量的决策向量， $x = [x_1, x_2 \dots x_n]^T$ ； n 为目标函数决策向量的个数； w 为权重系数向量， X 为 x 的可行解向量； y 为节点电压、线路传输功率等系统状态向量； A 、 B 分别为 x 和 y 的系数矩阵； k 为系统参数向量。

考虑到分布式光伏和负荷出力的不确定性，基于机会约束将上述模型转化为不确定评估模型：

$$\begin{cases} \text{目标函数: } \max_{x \in X} w^T x \\ \text{s.t. } P\{Ax + By \leq k\} \geq \alpha \end{cases} \quad (3-2)$$

式中， $P\{\cdot\}$ 为概率向量； α 为置信度向量，能够反映配电网各项运行指标的违犯情况，表示设定时间范围内约束条件满足的合格率要求。

3.2.1 目标函数

本章配电网最大承载能力优化配置模型是以配电网可承载分布式光伏容量最大为目标函数，具体表达式如下所示：

$$\max f = \sum_{i=1}^n P_{\text{PV},i} \quad (3-3)$$

式中， f 表示配电网可接入分布式光伏的容量； $P_{\text{PV},i}$ 表示节点 i 分布式光伏的装机容量； n 表示接入分布式光伏的节点个数。

3.2.2 约束条件

1. 系统潮流约束

配电网最大承载能力模型的等式约束为节点功率平衡方程：

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{L,i} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{G,i} - Q_{L,i} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (3-4)$$

式中， $P_{G,i}$ ， $Q_{G,i}$ 分别为第 i 个节点分布式光伏的有功功率及无功功率； $P_{L,i}$ ， $Q_{L,i}$ 分别为第 i 个节点负荷的有功功率及无功功率； U_i ， U_j 分别为节点 i 和 j 的电压； θ_{ij} 为 i 和 j 的电压相角差； G_{ij} ， B_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的电导与电纳。

2. 节点电压约束

分布式光伏的接入对各节点的电压有抬升作用，光伏接入的越多，电压提升的越高，需要设定一个电压偏差限值来保障电网的安全稳定运行。若该值设置的偏低，则会限制分布式光伏的接入；若该值设置的过高，则会威胁电力系统的安全运行。相应的节点电压约束方程为：

$$U_N(1-\varepsilon_1) \leq U_i \leq U_N(1+\varepsilon_2) \quad (3-5)$$

式中， U_i 为节点 i 的电压幅值； U_N 为系统标称电压； ε_1 和 ε_2 为国标规定的允许电压偏差率。

3. 支路功率约束

分布式光伏的并网改变了配电网潮流的原有运行状态，相应的支路功率大小也会因此改变，具体约束如下：

$$0 < S_{ij} \leq S_{\max} \quad (3-6)$$

$$S_{ij} = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \quad (3-7)$$

式中, S_{ij} 为节点 i 和 j 连接支路的传输功率幅值; S_{\max} 为线路复功率允许的极限值; P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为节点 i 和 j 连接支路的有功功率和无功功率。

4. 分布式光伏单点接入量约束

根据 2.4 节分析可知, 受外界环境、自身设备和运行条件等因素限制, 分布式光伏装机量具有一定限值。此外, 由于光伏逆变器的功率因数很高, 一般忽略光伏无功出力, 即认为其有功功率输出最大。因此, 可将分布式光伏输出容量的约束表示为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{PV},i} \leq P_{\text{PV max}} \\ Q_{G,i} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (3-8)$$

式中, $P_{\text{PV},i}$ 为节点 i 分布式光伏装机容量; $P_{\text{PV max}}$ 为分布式光伏的单点装机容量上限; $Q_{G,i}$ 为第 i 个节点分布式光伏的无功功率。

5. 倒送功率约束

分布式光伏的接入不仅会改变支路功率的大小, 甚至会改变支路功率的方向。当光伏出力大于负荷功率的消耗时, 便会有倒送功率的出现。为了限制一定的倒送功率, 设定相关约束如下^[73]:

$$P_{I,s} \geq P_{O,s} \quad (3-9)$$

式中, $P_{I,s}$ 为场景 s 下主网向配网传输的总有功功率; $P_{O,s}$ 为场景 s 下配网倒送回主网的总有功功率。

6. 机会约束

将节点电压约束和支路传输功率约束转换成机会约束得:

$$\begin{cases} \Pr\{U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}\} \geq a \\ \Pr\{S_{ij} \leq S_{\max}\} \geq b \end{cases} \quad (3-10)$$

式中, $\Pr\{\cdot\}$ 表示概率; a 和 b 分别为电压约束和支路功率约束的置信水平。

3.2.3 不等式约束的处理

本文采用罚函数的方法, 将上述不等式约束(3-5)、(3-8)和(3-9)与目标函数(3-3)整合到一起, 最终可得新目标函数为:

$$\max F = \sum_{i=1}^n P_{G,i} - \mu \cdot \max^2 \left\{ 0, (U_i - U_N(1+\varepsilon_2)), (S_{ij} - S_{\max}), (P_{O,s} - P_{I,s}) \right\} \quad (3-11)$$

式中, μ 为罚因子。

3.3 光伏在配电网中的接入状态

3.3.1 光伏接入方式

以 IEEE33 标准系统为例，图 3-1 所示为没有接入光伏情况下，配电网各节点电压分布趋势图。从图中可以明显看出节点 2、19 为电压极大值点，节点 18、33 为电压极小值点，并且节点 18 和 19 为明显的转折点。根据图 3-1 所示电压分布情况，本文将 IEEE33 节点配电网系统划分为 6 段，首先根据转折点 18 将其分为线路 I 段 2-18 和线路 II 段 19-33，再根据电压大小的不同分为线路 I 始段 2-6 和线路 II 始段 19-25、线路 I 中段 6-10 和线路 II 中段 25-28、线路 I 末段 10-18 和线路 II 末段 28-33，并根据 6 段位置的不同依据接入原则定义光伏的接入方式。

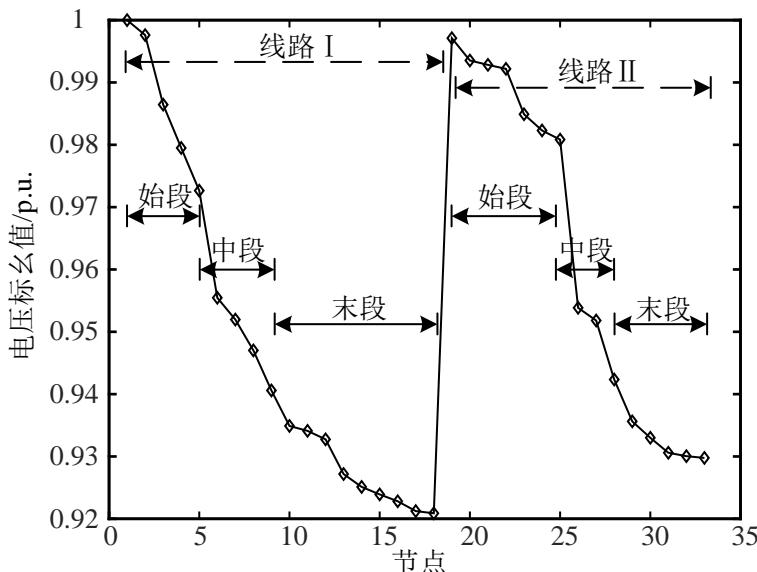


图 3-1 IEEE33 电压分布图

接入原则中，集中式接入表示接入点全部位于同一段，比如全部接入线路 I 始段或全部接入线路 II 末段。分布式接入表示接入点分别处于不同段，其中分布式集中接入要求所有光伏接入不同线路段的相同段，比如一半接入线路 I 始段，另一半线路 II 始段；而分布式均匀接入要求所有光伏不能接入相同段，比如同时接入线路 I 始段、线路 I 中段、线路 II 中段和线路 II 末段。

最终依据上述原则，形成了集中式接入线路始段、集中式接入线路中段、集中式接入线路末段、分布式集中接入线路始段、分布式集中接入线路中段、分布式集中接入线路末段、分布式均匀接入 7 中主要的接入方式。

3.3.2 光伏分布特征

本文定义分布度、容量分散度、距离分散度和综合均匀度4个不同的分布特征指标，同时从光伏接入节点数量，接入容量和接入位置等多个方面来描述光伏在配电网中的分布情况，进而通过不同分布特征下承载能力优化结果指导分布式光伏的接入。

1. 分布度

分布度表示光伏接入的节点数多少，能够衡量光伏在配电网中的分布广泛程度，其值越大，光伏接入节点越多，分布越广泛。用式(3-12)表示：

$$Z_B = \frac{n}{n'} \quad (3-12)$$

式中， n 表示光伏接入节点数； n' 表示所有分布式光伏可接入节点总数。

2. 容量分散度

容量分散度表示接入的分布式光伏彼此之间容量分配的均匀程度，其值越大，表明各节点光伏容量与平均容量相差越大，容量越分散。用式(3-13)表示：

$$Z_S = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{PV_i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{PV_i})^2}{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{PV_i})^2} \quad (3-13)$$

式中， S_{PV_i} 表示节点 i 接入的光伏容量。

3. 距离分散度

距离分散度表示接入的分布式光伏距离配电网首节点电气距离的分散程度，其值越大，表明各节点分布式光伏地理位置上相距越远，彼此接入的节点初始电压相差越大，距离越分散。用式表示：

$$Z_D = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_{PV_i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{PV_i})^2}{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{PV_i})^2} \quad (3-14)$$

式中， Z_{PV_i} 表示节点 i 距离配电网首节点的电气距离。

4. 综合均匀度

分布度指标仅考虑了分布式光伏的接入数量，倘若某一节点接入了极少量的光伏，则会对计算结果产生较大影响。容量分散度指标仅考虑了分布式光伏的接入容量，倘若分布式光伏的接入位置发生改变，但容量分配相同，会导致产生相同的计算

结果。距离分散度指标仅考虑了分布式光伏的接入位置，倘若某些节点接入的光伏容量较小，则会导致承载能力计算结果不可靠。

综上所述，本文构建综合均匀度指标，从接入容量和接入位置两个角度综合考虑光伏的接入状态，并采用电气距离标准差和渗透率的表达方式来描述。该指标改进了上述指标的不足，并进行了一定调整，其与承载能力的大小变化有更为明显的关系。具体用式表示为：

$$Z_j = \frac{\bar{D} \times \sum_{i=1}^n (Z_{PV,i} \times P_i)}{P} \quad (3-15)$$

式中， $Z_{PV,i}$ 为节点 i 距离配电网首节点的电气距离； \bar{D} 为各个光伏接入点的电气距离标准差； P 为配电网光伏渗透率； P_i 为节点 i 的单节点光伏渗透率，用式表示为：

$$P_i = \frac{P_{PV,i}}{P_{L,i}} \quad (3-16)$$

式中， $P_{PV,i}$ 为节点 i 所接光伏装机容量； $P_{L,i}$ 为节点 i 所接负荷功率。

3.4 基于改进鲸鱼优化算法的模型求解

3.4.1 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法是根据自然界中鲸鱼捕食过程形成的新型智能优化算法。鲸鱼的捕食过程是沿着螺线形路径，通过发出气泡围捕完成的，其捕食行为主要分为三种：

1. 收缩包围

鲸鱼通过回声定位来判断目标猎物的位置并包围它们，种群中的其他鲸鱼会把离猎物最近的鲸鱼当作目标猎物，不断更新自己的位置并逼近猎物。数学模型如下：

$$D = |C \cdot X^*(t) - X(t)| \quad (3-17)$$

$$X(t+1) = X^*(t) - A \cdot D \quad (3-18)$$

式中， D 是鲸鱼与目标猎物的距离； t 是迭代次数； $X^*(t)$ 是全局最优鲸鱼位置； $X(t)$ 和 $X(t+1)$ 分别表示鲸鱼更新前后的位置向量； A 和 C 为表示系数。

2. 螺旋更新

鲸鱼个体计算与猎物的距离，然后以螺旋方式围绕猎物移动。数学模型如下：

$$D_p = |X^*(t) - X(t)| \quad (3-19)$$

$$X(t+1) = X^*(t) + D_p e^{bl} \cos(2\pi l) \quad (3-20)$$

式中， b 是描述螺线形状的一个常数； l 是 $[-1, 1]$ 之间的随机数。

3. 随机搜索

除了上述的两种行为，鲸鱼也会随机搜索目标，并朝随机选取的目标游动，这一过程能够避免陷入局部最优，实现全局搜索。相应的数学模型如下：

$$D = |C \cdot X_{\text{rand}} - X(t)| \quad (3-21)$$

$$X(t+1) = X_{\text{rand}} - A \cdot D \quad (3-22)$$

式中， X_{rand} 是随机选择的鲸鱼位置向量。

3.4.2 算法改进

鲸鱼优化算法相较于其他优化算法而言，具有操作简单、调节参数少的优势，只包含两个主要调整参数。但由于表示因数 A 的搜索完全依赖随机性，导致算法收敛精度低，收敛速度慢；其次采用蒙特卡洛的方法，给目标猎物增加了急躁系数，从而增强其寻优能力；同时，借鉴了粒子群算法自适应权重的思想，来兼顾算法的全局搜索和局部寻优能力。综上，本文提出了三点改进措施，具体方法表述如下：

1. 非线性变化收敛因子

前述位置更新方式的选择是根据 A 的取值实现的，当 $|A| \geq 1$ 时，采用随机搜索的方式更新位置，使个体偏离目标，扩大种群的搜索范围，增强算法的全局搜索能力；当 $|A| < 1$ 时，采用收缩包围或螺旋更新的方式，使个体朝着目标方向移动，增强算法的局部寻优能力。

由式(3-23)可知，收敛因子 a 与系数向量 A 密切相关，两者共同协调算法全局探索与局部寻优能力。但在传统鲸鱼优化算法中，如式(3-24)所示，参数 a 是线性减小的，即算法全局探索能力线性减小。但在解决高维大范围的优化问题时，为避免过早陷入局部最优，提高收敛能力，需要改变收敛因子的变化方式。本文应用余弦曲线对其进行改进，具体如式(3-25)所示。

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (3-23)$$

$$a = 2 - \frac{2t}{T_{\max}} \quad (3-24)$$

$$a = 2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t}{T_{\max}}\right) \quad (3-25)$$

式中， r_1 是 $[0,1]$ 之间的随机数； T_{\max} 为最大迭代次数。

在迭代次数较少时， a 值较大能够有效提升全局探索能力；在迭代次数接近最大

值时， a 值减小能够增强局部寻优能力。

2. 猎物急躁系数

目标猎物觉察到危险之后，会搜寻周围的逃窜点，并选择自身行动范围之内的最优点作为躲避点。位置更新程序的实现则是采用蒙特卡洛的方法，在目标猎物周围模拟 1000 个逃窜点，并选择最优的点进行位置更新。

同时根据鲸鱼与猎物之间的距离大小，设置了不同的猎物逃窜范围，即猎物急躁系数。当鲸鱼与猎物距离较远的时候，该系数越小，猎物能够移动的范围也越小，这样能够增加鲸鱼全局搜索的能力；当鲸鱼逐渐接近猎物时，猎物的移动范围则会增加，从而增强局部寻优的能力和收敛速度。具体计算公式如下所示：

$$dis = pdist(best, x) \quad (3-26)$$

$$z = \exp\left(-\frac{dis_{\min}}{Mc}\right) \quad (3-27)$$

式中， dis 表示目标猎物的位置和当前全局最优值之间的距离； Mc 为猎物可以逃窜的范围； z 即为所定义的猎物急躁系数。

在高维数大区间的寻优问题上，结果很容易趋于局部最优。因此增加此步骤，以降低出现局部最优的概率。

3. 自适应权重调整系数

粒子群算法中有一个自动调节的惯性权重参数，其值较大时，能够扩大粒子的搜索面积，提升全局搜索能力；其值较小时，能够减小搜索范围，提高收敛速度和精度，提升局部寻优能力。本文受其启发，采取自适应权重调整方式来改善鲸鱼优化算法性能，相应表达式如下：

$$\omega = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \frac{T_{\max} - t}{T_{\max}} \quad (3-28)$$

式中， ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为权重系数上、下限。

并且，前述收缩包围和螺旋更新行为是同时存在的，鲸鱼个体随机选择其中一种来逼近猎物。这种同时行为通过概率 P 来表示，即有 P 的概率选择收缩包围和 $1-P$ 的概率选择螺旋更新。同时考虑上述权重系数的改变，将(3-18)和(3-20)的数学模型调整如下：

$$X(t+1) = \omega \cdot X^*(t) - A \cdot D, p < P \quad (3-29)$$

$$X(t+1) = \omega \cdot X^*(t) + D_p \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l), p \geq P \quad (3-30)$$

3.4.3 承载能力优化流程

如图 3-2 所示为改进后的鲸鱼优化算法流程图，本文依据其对不同光伏接入状态下的配电网最大承载能力进行计算，具体步骤如下：

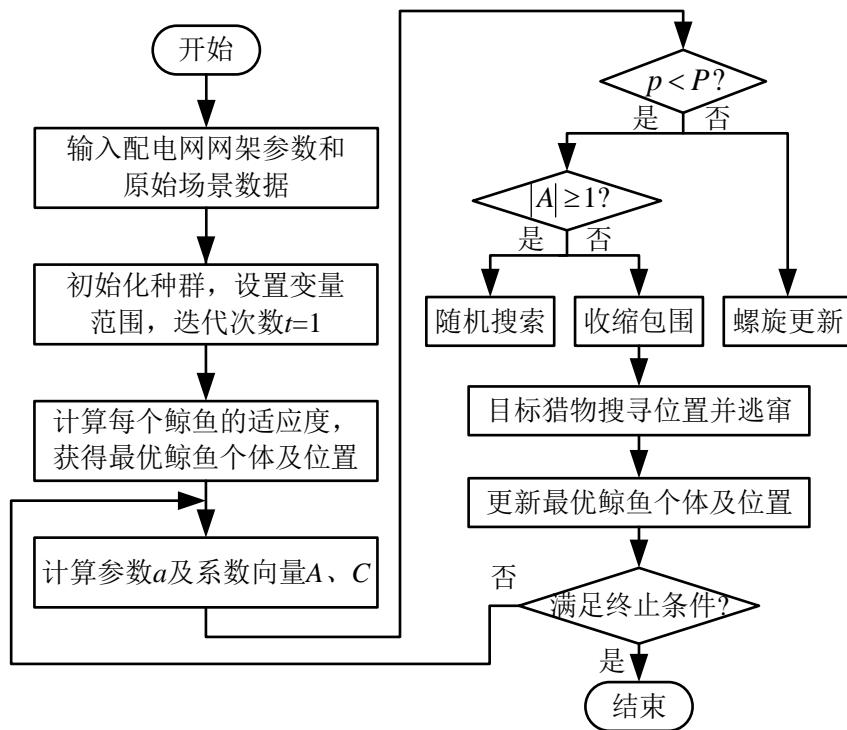


图 3-2 改进鲸鱼优化算法流程图

步骤 1：输入配电网网架参数和原始光伏出力和负荷功率场景数据。

步骤 2：设置光伏接入容量范围，进行种群初始化，包括种群大小 num 和最大迭代次数 T_{max} 。

步骤 3：计算每个鲸鱼的适应度，挑选出最优鲸鱼的位置并保留作为初始目标猎物，即 $X^*(t)$ 。

步骤 4：采用式(3-25)计算非线性收敛因子 a 和系数向量 $A、C$ 。

步骤 5：判断随机概率 p 是否小于 P ，是则直接转入步骤 6，否则根据增加自适应权重后的式(3-30)进行螺旋位置更新。

步骤 6：判断系数向量 A 的绝对值是否大于等于 1，是则采取随机搜索机制，根据式(3-22)进行位置更新；不是则采取收缩包围机制，根据增加自适应权重后的式(3-29)进行位置更新。

步骤 7：在当前目标猎物附近 Mc 范围内蒙特卡洛 1000 个逃窜点，并选择其中的最优解进行位置更新。

步骤 8：再次计算适应度，并与初始目标 $X^*(t)$ 进行比较，选择其中更优的解。

步骤 9：判断是否满足算法的终止条件，若不满足，则返回步骤 4 继续计算，否则进入步骤 10；

步骤 10：输出最优值以及最优个体位置。

3.5 仿真分析

本节对所提出的考虑不同光伏接入状态的配电网分布式光伏最大承载能力评估方法进行了进一步的研究。首先，通过与其他优化方法的比较，证明了所提出的改进鲸鱼优化算法的有效性。然后，通过配电网节点电压和支路功率等潮流数据分析机会约束对承载能力的提升。其次，从定性的角度评估了不同光伏接入方式下配电网络的承载能力，并分析了规律。最后，通过所定义的分布特征指标，进一步从定量的角度分析了其与配电网的承载能力之间的关系。本文方法及模型基于 Matlab2021a 软件进行仿真实验。

3.5.1 算例数据

本章基于图 3-3 所示 IEEE33 节点配电网系统，对不同光伏接入状态下配电网最大承载能力进行研究，同时验证本文算法的有效性。其拓扑结构如下所示，其中，包含了共 33 个节点，平衡节点为 1 节点，有 32 条支路，基准视在功率和电压分别为 10MVA 和 12.66kV；总有功负荷和无功负荷分别为 3.715MW 和 2.300Mvar。

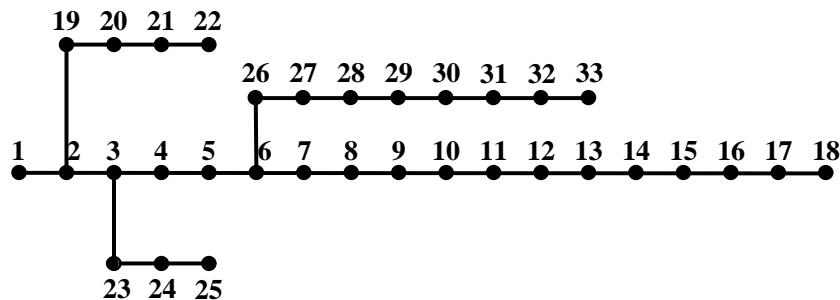


图 3-3 IEEE33 节点配电网系统

根据 10kV 低压配电网的要求，将电压约束上下限值取为 1.07 和 0.93 倍标幺值，设定线路最大传输功率为 6MW。同时将分布式光伏接入点作为 PQ 节点处理，其功

率因数设定为1，光伏及负荷的功率因数均当作恒定值，具体出力场景数据及概率详见2.4节，均以标幺值曲线的形式表述其出力，并以表格的形式呈现各个时序场景的概率。改进鲸鱼优化算法的种群数量设置为200，最大迭代次数设定为100，螺旋路径常数 b 设定为1，概率 P 设定为0.5，惯性权重上下限分别取为0.9和0.2。

3.5.2 所提算法的有效性证明

为了验证改进鲸鱼优化算法的优化效果，利用本文算法与传统鲸鱼优化算法和粒子群算法在同样的环境下进行对比分析。均设定光伏接入点为2、7、13、33，同时迭代次数和种群数量均设定为相同值。具体光伏接入容量和迭代次数的关系曲线如图3-4所示：

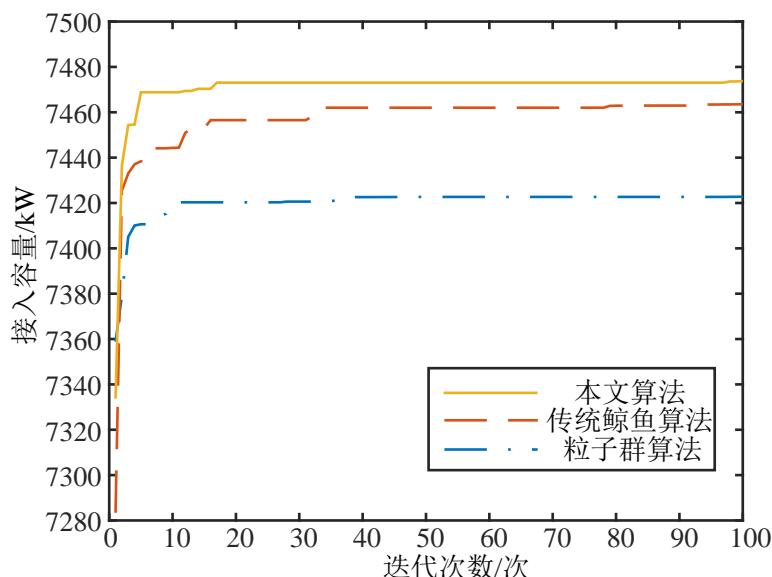


图3-4 迭代收敛曲线

由图3-4可以看出，3种算法在寻优精度方面有一定的差距。总体来说，本文所用算法结果相较其他两种算法更好，在7472kW处收敛，而其他两种算法分别在7463kW和7422kW处收敛。这是因为本文采用了非线性变化收敛因子和自适应权重调整系数同时兼顾了全局搜索和局部寻优的结果。并且本文算法收敛速度也更快，仅用15代左右就已经收敛，而其他两种方法分别为35和40代，计算速度相对较差。这是由于本文算法采用了蒙特卡洛的方法模拟猎物逃窜位置以及猎物急躁系数，大大提升了收敛的速度，提高了算法效率。

与文献[1]采用的鲁棒优化方法作对比，均设定光伏接入点为6、11、16、22、25、

28、31，电压上下限设置为 0.97 和 1.07p.u.。同时针对第二章采用确定性场景代替随机性模型降低求解难度的问题，利用本章模型分别在全场景和聚类后场景情况下进行承载能力计算。优化结果对比如表 3-1 所示：

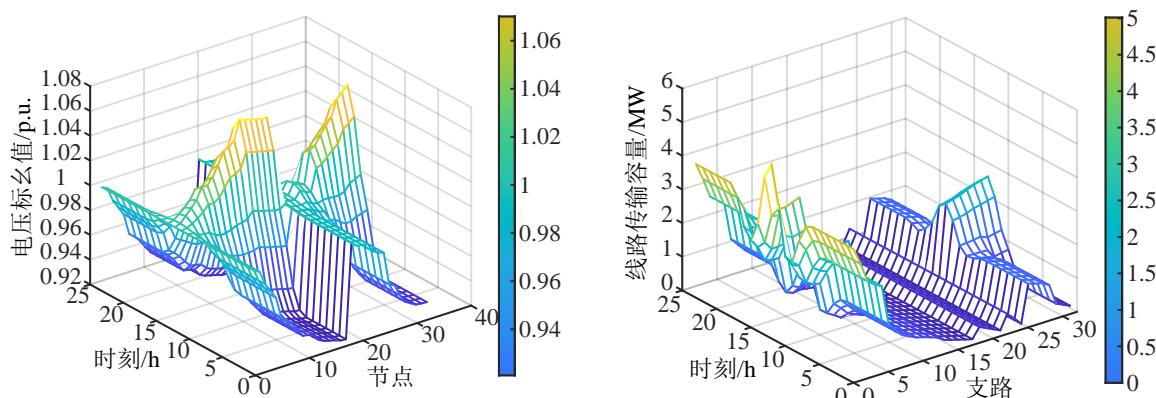
表 3-1 不同方法和场景下的优化结果

情况	各节点分布式光伏接入容量							总和
	6	11	16	22	25	28	31	
对比文献	0.1900	0.2110	0.2410	2.5460	2.6920	0.4160	0.3350	6.6310
本文方法全场景	0.4934	0.9367	0.8603	0.8265	0.9152	1.2677	1.5282	6.8280
本文方法聚类场景	0.7534	0.4475	1.3204	1.9235	0.0911	0.7588	2.1240	7.4187

从表 3-1 可以看出，在同样的配置场景下，本文方法的优化结果与参考文献对比提升了 2.97%，同时各节点光伏接入容量较为均匀，这也从侧面印证了本文优化方法的良好性能。对比不同场景下的承载能力结果，可以发现本文简化后的计算结果偏差仅有 8.65%，但极大的降低了计算量，因此在求解问题中的准确度能够保证。

3.5.3 考虑机会约束的承载能力评估

如图 3-5、3-6 和 3-7 所示为不同光伏出力场景和不同机会约束置信度情况下的各节点电压大小和各支路传输功率大小分布图。其中极端光伏出力场景指的是光伏出力最大同时负荷功率最小的情况，正常光伏出力场景则是指出现概率较高的场景。

图 3-5 极端光伏出力，置信度 $a=b=1$

从图 3-5 中可以看出，在夜晚没有光伏出力的情况下，节点电压没有越限，支路功率也没有超出线路承受能力。而中午 10:00-15:00 时，随着光伏出力的增大，各节点电压也逐渐升高，节点 14-18 和节点 31-33 增加最为明显，已经处于电压约束边界

附近。各支路传输功率也出现了不同幅度的增长，支路 1-2 增加最为明显，已经达到线路传输功率极限，而支路 26-32 传输功率也出现了小幅度的增长，倘若再继续接入，同样也会导致越限。

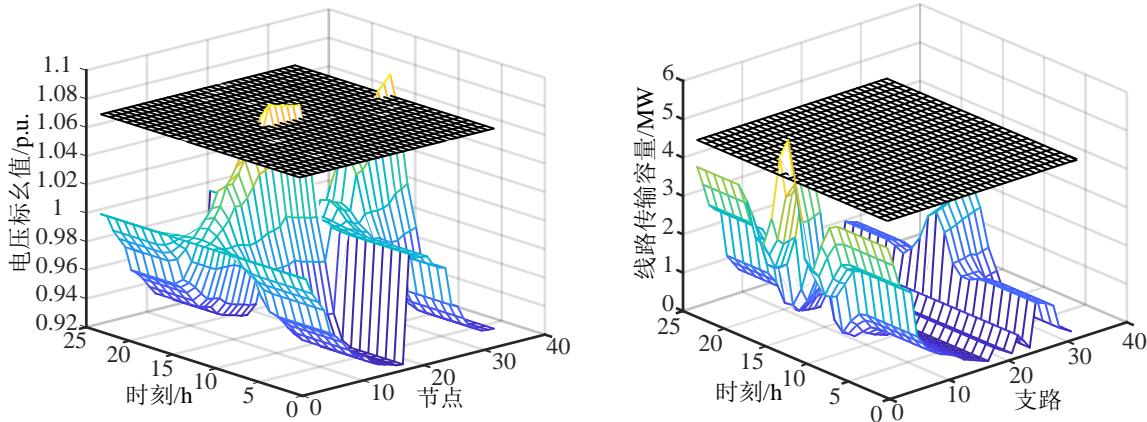


图 3-6 极端光伏出力, 置信度 $a=b=0.95$

对比图 3-5 和图 3-6 可以发现，同样是极端光伏出力情况下，当机会约束置信度从 1 降到 0.95 时，配电网各节点电压和支路传输功率增加的更为明显，甚至在中午 11:00-13:00 时，节点 14-18，节点 31-33 以及支路 1-2 均出现了不同程度的越限。但短时间低幅值的越限不会给配电网的安全稳定运行带来大的危害，因此考虑机会约束能够一定程度上改善以往承载能力评估过于保守的问题。

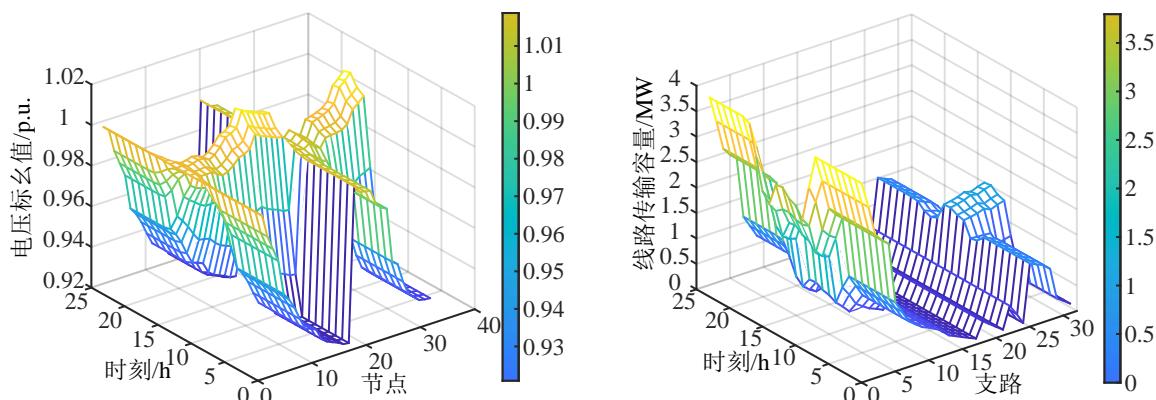


图 3-7 正常光伏出力, 置信度 $a=b=1$

对比图 3-5 和图 3-7 可以发现，在同样置信度情况下，当极端光伏出力场景变为正常光伏出力场景，配电网各节点电压和传输功率也均有一定幅度增加，但已经完全不足以威胁配电网的安全稳定运行。

上述承载能力优化结果如表 3-2 所示：

表 3-2 不同置信度下的优化结果

情况	置信度	各节点分布式光伏接入容量				总和
		2	7	13	33	
1	$a=b=1$	2.0265	0.4082	2.3899	2.6507	7.4742
2	$a=b=0.95$	1.8104	0.0090	2.7109	2.9994	7.5207

结合表 3-2 和图 3-6 可以明显看出, 当置信度降低时, 一定程度上提高了配电网的可承载分布式光伏的能力, 但也产生了一定的节点电压和支路功率越限。不过承载能力提升程度并不高, 越限场景也十分有限。因此并不会对配电网的安全稳定运行造成过大的危害, 可以采取适当降低置信度的方式来提升配电网的承载能力。

3.5.4 不同接入方式下承载能力定性分析

按照 3.3.1 节所述不同接入方式, 形成了 12 种接入方案。计算承载能力和潮流指标大小, 并定性分析承载能力的差异和影响承载能力的因素。结果如表 3-3 所示:

表 3-3 光伏接入方案

接入方案	接入节点	接入原则	限制承载能力因素
方案 1	2、3	集中式接入线路 I 始段	支路 2 功率越限
方案 2	9、10	集中式接入线路 I 中段	节点 9 电压越限
方案 3	17、18	集中式接入线路 I 末段	节点 17 电压越限
方案 4	19、20	集中式接入线路 II 始段	支路 19 功率越限
方案 5	26、27	集中式接入线路 II 中段	支路 5 功率和节点 27 电压越限
方案 6	32、33	集中式接入线路 II 末段	节点 33 电压越限
方案 7	2、4、19、23	分布式集中接入始段	支路 2 功率越限
方案 8	7、9、25、27	分布式集中接入中段	支路 2 功率和节点 9 电压越限
方案 9	15、18、30、33	分布式集中接入末段	节点 15、30 电压越限
方案 10	2、7、12、17	分布式均匀接入	支路 6 功率和节点 12 电压越限
方案 11	19、23、27、31	分布式均匀接入	支路 2 功率越限
方案 12	2、5、27、33	分布式均匀接入	支路 26 功率和节点 33 电压越限

从表 3-3 可以看出, 接入线路始段情况下, 通常限制承载能力提升的因素为支路传输功率达到限值, 比如方案 1、4、7。接入线路末段情况下, 限制承载能力提升最主要的因素则是节点电压达到限值, 比如方案 3、6、9。而接入线路中段和分散式均匀接入情况下, 节点电压约束和支路传输功率约束通常会共同起到限制作用, 比如方案 5、8、10、12。图 3-8 所示为不同接入方式下的配电网承载能力:

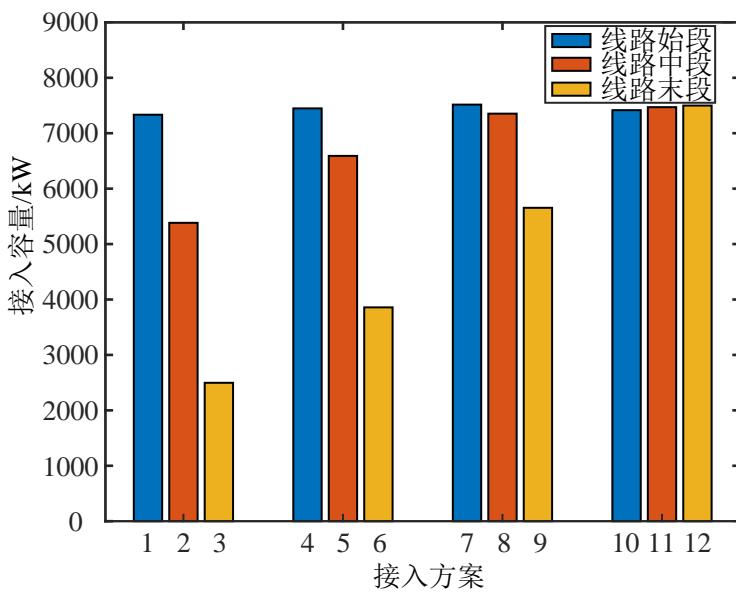


图 3-8 不同接入方式下的配电网承载能力

从图 3-8 中可以得出许多明显规律：1) 针对同一线路段，可以直观的看出光伏接入线路始段比接入线路中段和末段对配电网承载能力的提升更大。无论是集中式接入还是分布式接入都有同样的规律，但集中式接入方式下这种差距更为明显。因为光伏接入线路末段比接入线路始段对电压的提升作用更大；2) 针对集中式接入，接入线路I段与接入线路II段相比，接入线路II段情况下配电网承载能力更大。并且，越靠近线路末端，这种提升越明显；3) 对比分布式集中接入和分布式均匀接入，分布式集中接入具有和集中式接入相类似的始段承载能力大于末段的规律，而分布式均匀接入之间承载能力差距不大，并且和分布式集中接入线路首段相同。整体来说，均匀接入更有利于提升配电网的承载能力；4) 对比集中式接入和分布式接入，无论集中接入线路的哪一段，分布式接入都更能够提升配电网的承载能力。

3.5.5 基于分布特征的承载能力定量分析

根据 3.3.2 节所定义的 4 种光伏分布特征，分别计算其承载能力，得出各种分布特征与承载能力的关系，从而为大量分布式光伏合理接入配电网提供指导。

1. 分布度与承载能力的关系

针对不同分布度下的承载能力，本文采用改进鲸鱼优化算法对接入 2 至 32 个点的情况分别进行最大承载能力计算。采用固定分布度的方式随机生成接入点进行计算，选择其中最大的数值作为该分布度下的最大承载能力，最终结果如图 3-9 所示：

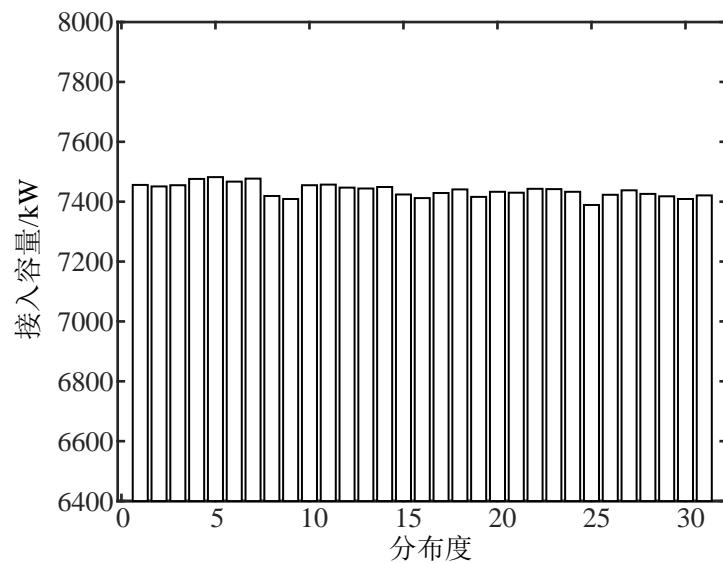


图 3-9 不同分布度下承载能力的变化

从图 3-9 可以直观的看出，当分布度从 $2/32$ 变化到 1 时，承载能力有一定程度的波动，但整体来说，仍然维持在 7400kW 左右，没有过于明显的变化。因此，可以得出结论，分布度的改变几乎与最大承载能力的大小没有关系，即在分布式接入情况下，光伏接入 5 个点所能达到的最大容量和接入 20 个点近似相同，没有显著差异。

2. 容量分散度与承载能力的关系

针对不同容量分散度下的承载能力，本文依次设定分布度为 $4/32$ 、 $7/32$ 和 $10/32$ 并进行试验。然后随机选取 4、7 和 10 个接入点，计算承载能力及容量分散度大小，并重复 300 次。最后根据容量分散度大小排序，得到图 3-10 所示曲线：

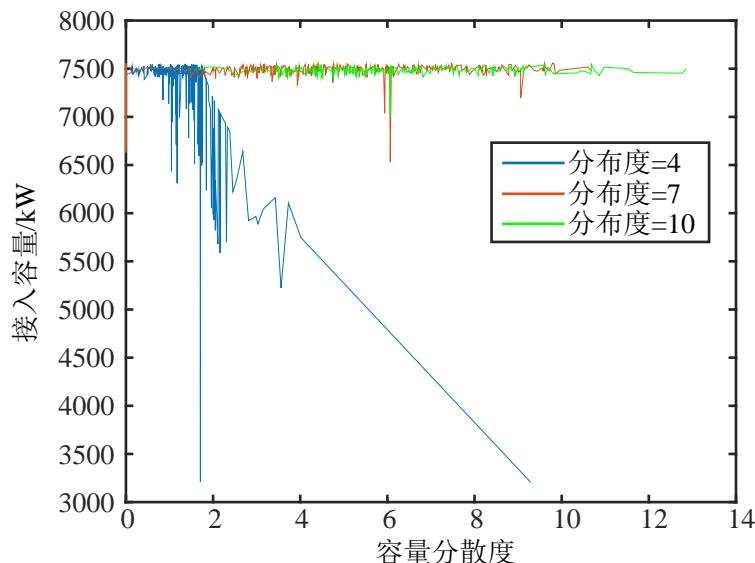


图 3-10 不同容量分散度下承载能力的变化

图3-10为不同容量分散度下，配电网承载能力的变化情况。整体来看，从分布度变化的角度可以发现，当分布度增大时，承载能力通常较大，这是因为随着接入点的增多，集中接入某一线路段的概率减少。当分布度为 $4/32$ 时，存在大量集中接入线路末段的可能，导致承载能力降低。但随着分布度升高到 $7/32$ ，集中接入末段的情况变得更少，承载能力提升十分明显。当分布度达到10，就几乎没有集中接入的情况，因为整个线路末段也仅有16个节点。

从容量分散度的角度来看，配电网承载能力较小时通常容量分散度大于6，而当容量分散度小于2时，承载能力通常处于最大值。所以可以得出结论，当容量分散度处于较小的某一区段时，即各节点光伏容量较均匀时，有利于承载能力的提升。但随着分布度的增大，在较大容量分散度情况下也可以产生较高的承载能力。图中曲线有较大振动是因为光伏的集中接入，导致承载能力有一定缩减，应在实际规划中避开这种状况。同时也说明了容量分散度指标具有一定指导意义，但仍有很多不足。

3.容量分散度与承载能力的关系

针对不同距离分散度下的承载能力，本文同样在 $4/32$ 、 $7/32$ 和 $10/32$ 这3种分布度下进行试验，并计算承载能力及距离分散度大小，最后根据距离分散度大小排序，得到图3-11所示曲线：

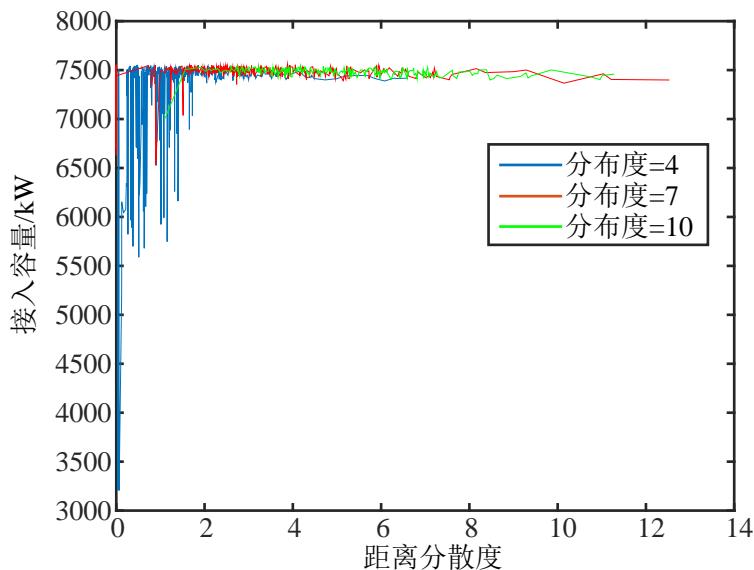


图3-11 不同距离分散度下承载能力的变化

图3-11为不同距离分散度下，配电网承载能力的变化情况。整体来看，从距离分散度的角度可以发现，其值越小，承载能力低的概率越大。而随着距离分散度的提

高，承载能力也越高，当距离分散度大于 2 时，承载能力逐渐趋于稳定，仅在峰值附近小幅度振动。从分布度的角度来看，当分布度越大时，承载能力就越早趋于稳定，而分布度越小，承载能力曲线振动的幅度和频率也越大，不利于承载能力的提升。

整体的规律性十分明显，但仍会有细微的波动。一方面是因为优化算法本身精度不够高，导致陷入局部最优。另一方面是因为没有考虑接入容量，导致有些节点仅有极少量光伏，然而在距离分散度的计算中仍然将其考虑在内，导致结果略有瑕疵。但距离分散度指标与容量分散度指标相比已经能够较好的指导分布式光伏的接入。

4. 综合均匀度与承载能力的关系

针对不同综合均匀度下的承载能力，仍然在前述 3 种分布度下进行试验。计算承载能力及综合均匀度大小，并依据综合均匀度大小排序，得到图 3-12 所示曲线：

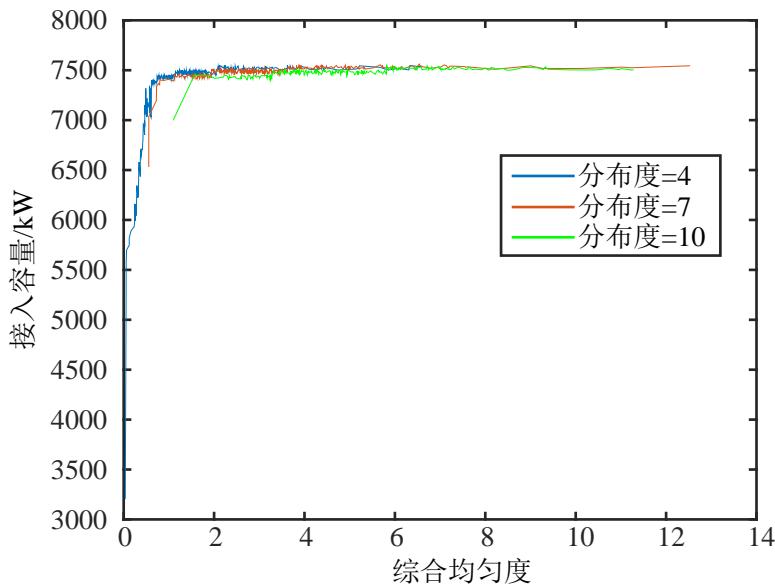


图 3-12 不同综合均匀度下承载能力的变化

图 3-12 为不同综合均匀度下，配电网承载能力的变化情况。整体来看，与容量分散度和距离分散度相比，已经十分具有规律性。在均匀度较低时，承载能力通常较低，并且分布度越小，这种情况越明显。随着综合均匀度的提升，在各个分布度情况下，承载能力也逐渐提高，且具有明显的拐点。当综合均匀度达到极限时，不同分布度下的承载能力也趋于相同，这与图 3-9 所描述的规律相吻合。这些足以证明本文所提出的综合均匀度能够很好的指导分布式光伏的接入，但由于优化算法仍有一定不足，导致曲线仍出现了一些细微的波动。

综上所述，本文对不同接入状态下承载能力最大化的规律进行总结。依照分布度

来分析，对于同一配电网网架结构，在保证分布式接入的情况下，接入节点的数量并不会影响承载能力的大小。依照容量分散度来分析，当光伏容量在各个节点分配越均匀时，承载能力相对越大。依照距离分散度来分析，当光伏接入位置距离首节点越分散时，承载能力相对越大。依照综合均匀度来分析，当该指标越大，承载能力逐渐提升。因此，按照上述指标的变化规律接入光伏能使承载能力达到最大。

3.6 本章小结

为了促进双碳目标下分布式光伏高质量发展，指导分布式光伏更多的接入，本章提出了一种考虑光伏接入状态的配电网最大承载能力评估方法。首先基于2.4节所生成的光伏和负荷出力典型场景，考虑机会约束处理不确定性；然后构建包含多种约束的配电网承载能力评估模型；并依据本文所定义的不同接入方式和不同分布特征，计算配电网最大承载能力；最后利用IEEE33节点配电网标准算例，验证所提出的配电网承载能力评估方法的有效性，同时从定性和定量两个角度分析了光伏接入方式和分布特征与承载能力之间的关系，为我国实现分布式光伏规模化接入提供理论指导。

第4章 兼顾经济成本的配电网承载能力提升

4.1 引言

通过3.5节的结果分析发现，节点电压和支路功率越限是限制配电网承载能力的主要因素。通过主动管理措施能够使越限情况恢复到约束范围内，从而提升配电网分布式光伏承载能力。对于本文研究的10kV低压配电网而言，有载调压、无功补偿、逆变器无功调节和有功削减更为常见^[74]，因此对这4种控制方式进行了建模分析，为配电网承载能力的提升提供基础模型。

同时，在分布式光伏应接尽接和配电网安全稳定的基础上，考虑一定的综合经济成本，能够进一步经济、合理的提升配电网承载能力。只有分布式光伏的接入能够兼顾一定的经济成本，才能扩大用户自发自用光伏的使用范围。因此，兼顾经济成本的配电网承载能力研究必不可少。另外通过上述主动管理措施的协调优化，来应对配电网的各种变化，不仅能够提升承载能力，还能保证配电网高效、经济的运行质量^[75]。

4.2 主动管理措施及其模型建立

在式(3-1)的基础上，考虑有载调压、无功补偿、逆变器功率因数控制等配电网承载能力提升技术的改进模型。表达如下：

$$\begin{cases} \text{目标函数: } \max_{z \in Z} \max_{x \in X} a^T x \\ \text{s.t. } Ax + By + Cz \leq k \end{cases} \quad (4-1)$$

式中， $a = [a_1, a_2 \dots a_n]^T$ 为 x 的系数向量； z 为有载调压变压器变比、无功补偿量、逆变器功率因数等提升技术对应的状态向量； Z 为 z 的可行解向量； C 为 z 的系数矩阵。

4.2.1 逆变器无功调节

分布式光伏通过逆变器接入配电网，调节其功率因数，能够调整光伏有功无功功率，进而改变电压大小，避免越限情况的发生，提升配电网承载能力。调节控制时，光伏有功、无功功率和逆变器容量之间满足下述关系：

$$P_{G,i} \leq P_{PV,i} \quad (4-2)$$

$$\sqrt{(P_{G,i})^2 + (Q_{G,i})^2} \leq S_N \quad (4-3)$$

式中, S_N 是逆变器的视在功率, 通常是装机容量的 1.0~1.1 倍。同时, 考虑到逆变器功率因数的调节和控制, 光伏有功和无功功率之间还有如下关系:

$$P_{G,i} \cdot \frac{\sqrt{1-(\cos \phi_{\min})^2}}{\cos \phi_{\min}} \leq Q_{G,i} \leq P_{G,i} \cdot \frac{\sqrt{1-(\cos \phi_{\max})^2}}{\cos \phi_{\max}} \quad (4-4)$$

式中, $\cos \phi$ 是功率因数; ϕ_{\max} 和 ϕ_{\min} 分别表示功率因数角的上下限。

如图 4-1 所示为逆变器功率因数控制范围图, 表示出了有功功率、无功功率、容量和功率因数之间的关系。阴影部分代表逆变器的可调范围, 红实线代表调节方式。

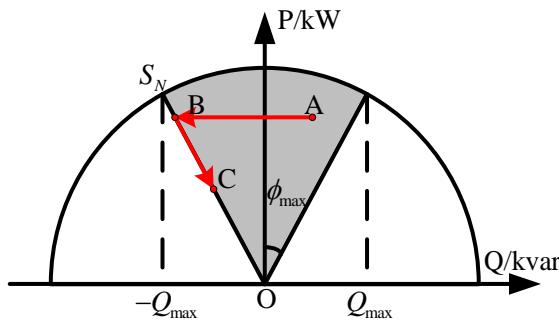


图 4-1 逆变器功率因数控制范围

由红实线 AB 可以看出, 节点电压越限时, 逆变器可以通过减少无功功率输出, 甚至吸收无功功率的方式, 降低节点电压, 维持配电网安全稳定运行, 提升承载能力。

4.2.2 有功削减

通过削减分布式光伏出力, 也可以起到控制电压, 改善潮流分布, 提升配电网承载能力的作用。如图 4-1 红实线 BC 所示, 进行无功调节后, 若节点电压仍然越限, 则可通过有功削减来进一步调节, 即通常所说的“弃光”。由于本文研究的是 10kV 低压配电网, 线路电阻一般大于电抗, 其有功减少使电压降低的数值要远大于无功使电压增加的数值。因此, 总的来说仍然会使节点电压降低。相应的数学模型如下所示:

$$P_{G,i} = (1-\xi) \cdot \tau \cdot S_{PV} \quad (4-5)$$

$$0 \leq \xi \leq \xi_{\max} \quad (4-6)$$

式中, τ 为光伏出力标么值; ξ 和 ξ_{\max} 分别为光伏有功削减率和最大允许削减率。

4.2.3 变压器分接头调节

有载调压变压器通常接在上级电网与配电网首节点之间。针对负荷增大引起的

线路电压过低，或光伏接入引起的电压越限。通过调节有载调压变压器的可变抽头，能够改变配电网整体的电压水平，提升配电网承载能力。调节模型如图 4-2 所示。

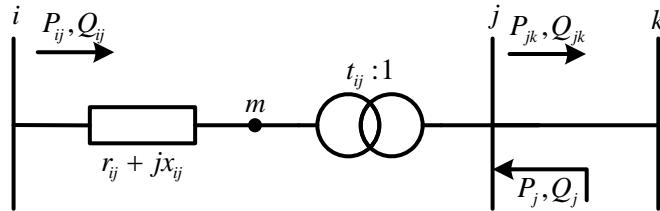


图 4-2 有载调压变压器模型

其中， m 为虚拟节点，相当于支路 mj 接了一个理想变压器。其数学模型如下所示：

$$U_j^t = U_m^t(1 + 0.025k^t) \quad (4-7)$$

$$k_{\min} \leq k^t \leq k_{\max} \quad k^t \in \mathbb{Z} \quad (4-8)$$

式中， U_j^t 是变压器出口侧 j 点电压； U_m^t 是虚拟节点 m 电压；整数 k^t 是 t 时刻变压器分接头的位置； k_{\min} 和 k_{\max} 分别表示有载调压变压器分接头上下限。同时，分接头调节不能过于频繁，否则会降低变压器使用寿命。因此，需要考虑调节次数约束：

$$\sum_{t=1}^{24} |k^t - k^{t-1}| \leq \text{time} \quad (4-9)$$

式中， time 表示有载调压变压器分接头一天内的调节次数限制值。

4.2.4 无功补偿装置调节

利用无功补偿装置来吸收或者放出无功，能够起到改善系统潮流分布和电压水平的目的，同时还具有平抑电压波动的能力。具体分为离散型和连续型，其中离散无功补偿装置的代表是电容器组，通过分组投切电容器组构建数学模型：

$$Q_i^{\text{CB}} = N_i^{\text{CB}} q_i^{\text{CB}} \quad (4-10)$$

$$0 \leq N_i^{\text{CB}} \leq N_{\max}^{\text{CB}}, \quad N_i^{\text{CB}} \in \mathbb{Z} \quad (4-11)$$

式中， Q_i^{CB} 为节点 i 上投切整组电容器发出的无功功率； q_i^{CB} 为投切单个电容器补偿的无功功率；整数 N_i^{CB} 为电容器组中的电容器个数； N_{\max}^{CB} 为可投切电容器个数上限。

对于连续无功补偿装置，其在一定范围内能够连续调节，从而满足负荷的需求。通过静态无功补偿装置(SVC)构建相应数学模型：

$$Q_{\min}^{\text{SVC}} \leq Q_i^{\text{SVC}} \leq Q_{\max}^{\text{SVC}} \quad (4-12)$$

式中， Q_i^{SVC} 是 i 节点 SVC 的补偿功率； Q_{\min}^{SVC} 和 Q_{\max}^{SVC} 分别为 SVC 补偿功率的上下限。

4.3 承载能力多目标优化模型

本章承载能力多目标优化配置模型是以配电网可承载分布式光伏容量最大和年综合经济成本最低为目标函数，表达式如下所示：

$$\max f_1 = \sum_{i=1}^n P_{\text{PV},i} \quad (4-13)$$

$$\min f_2 = C_G + C_N - B_N \quad (4-14)$$

式中， C_G 为分布式光伏一年的安装成本和运行维护成本； C_N 为配电网一年的主动管理及损耗成本； B_N 为光伏年综合运行收益。各项具体的表达式如下：

$$C_G = C_1 + C_2 = \frac{d \cdot (1+d)^y}{(1+d)^y - 1} \cdot c_1 \cdot \sum_{i=1}^n P_{\text{PV},i} + c_2 \sum_{s=1}^N \cdot 365 \cdot p_s \sum_{k=1}^{24} \sum_{i=1}^n P_{G,i,k}^s \quad (4-15)$$

式中， C_1 为光伏的安装成本等值转化到每一年的等效成本； C_2 为光伏的年运行维护成本； d 为贴现率； y 为光伏的经济使用年限； c_1 为其单位容量安装成本； c_2 为其单位容量运行维护成本； N 为原始数据削减后的场景数； p_s 为每个场景对应的概率； $P_{G,i,k}^s$ 为场景 s 下节点 i 的分布式光伏在 k 时段的实际出力。

$$C_N = C_3 + C_4 = c_3 \sum_{s=1}^N \cdot 365 \cdot p_s \sum_{k=1}^{24} P_{\text{loss},k}^s + c_4 \sum_{s=1}^N \cdot 365 \cdot p_s \sum_{k=1}^{24} \sum_{i=1}^n P_{G,i,k}^s \quad (4-16)$$

式中， C_3 为配电网年损耗成本； C_4 为年主动管理成本； c_3 为损耗单位电量的成本； c_4 为等效到光伏单位出力的主动管理成本； $P_{\text{loss},k}^s$ 为场景 s 下时段 k 内的网络损耗。

$$B_N = B_1 + B_2 = b_1 \sum_{s=1}^N \cdot 365 \cdot p_s \sum_{k=1}^{24} P_{O,k}^s + b_2 \sum_{s=1}^N \cdot 365 \cdot p_s \sum_{k=1}^{24} \sum_{i=1}^n P_{G,i,k}^s \quad (4-17)$$

式中， B_1 为分布式光伏年余电上网收益； b_1 为单位电量售电收益； $P_{O,k}^s$ 为场景 s 下时段 k 内返送大电网的电量。 B_2 为分布式光伏发电使用户节省的年购电费用，或者称作发电收益； b_2 为单位电量发电收益。

基本约束条件同 3.2 节，同时补充考虑 4.2 节相关约束。

4.4 基于 NSGA-II 的多目标优化求解

基于 4.3 节多目标优化模型的建立，可以将这一类问题概括表示为：

$$\begin{cases} \min f_i(x) & i=1,2,\dots,m \\ s.t. \begin{cases} h_j(\mathbf{x})=0, & j=1,2,\dots,p \\ g_k(\mathbf{x}) \leq 0, & k=1,2,\dots,q \end{cases} \end{cases} \quad (4-18)$$

式中， $f_i(x)$ 为第 i 个目标函数； m 为目标函数的个数； $h_j(\mathbf{x})$ 和 $g_k(\mathbf{x})$ 分别为等式约

束条件和不等式约束条件; p 和 q 分别为等式和不等式约束的个数。

4.4.1 帕累托最优解集

不同于 3.2 节所述单目标优化模型, 通常仅有一个最优方案, 多目标优化的各个目标函数之间往往是互相矛盾的。当一个目标函数趋向最优时, 其他目标函数就会变得不可接受。因此, 使所有目标全部最优是不可能的, 一般需要在各个目标之间相互协调和折衷。所以多目标的最终优化结果产生的是满足约束的一组解, 这组解通常被称作帕累托(Pareto)最优解, 需要满足以下两个条件:

$$\begin{cases} f_i(x_1) \leq f_i(x_2), \forall i \in \{1, 2, \dots, m\} \\ f_i(x_1) < f_i(x_2), \exists i \in \{1, 2, \dots, m\} \end{cases} \quad (4-19)$$

其中, x_1 和 x_2 分别为两组满足约束条件的目标解。上述两个条件通俗的讲, 就是只有 x_1 这组解在所有目标函数下的结果都不比 x_2 所对应的目标函数的结果差, 且至少有一个目标函数下的结果 x_1 是优于 x_2 的, 这时 x_1 才是比 x_2 更优的解, 或者称作 x_1 支配 x_2 。所有处于支配状态的解的集合就是最终的求解结果, 并且各个解之间不能互相支配。

4.4.2 多目标求解流程

NSGA-II 算法是一种带精英策略的多目标优化算法, 本章采用该算法对 4.3 节所述的承载能力多目标优化模型进行求解, 获得相应的 Pareto 最优解集。该算法采用快速非支配排序机制, 计算原理较简便, 同时为了使获得的解集更加均匀, 通过拥挤度来保证种群的多样性。由于变量中同时包含有实数连续变量和整数离散变量, 因此需要在优化的过程进行取整操作, 即同时在实数范围内优化上述两种变量, 然后在更新位置时, 对整数变量进行取整操作, 从而得到符合实际的优化结果。

基于 NSGA-II 的承载能力多目标优化模型求解流程如图 4-3 所示, 步骤如下:

步骤 1: 系统初始化。输入配电网相关参数、算法相关参数、综合经济成本相关参数和主动管理措施相关参数。

步骤 2: 种群初始化。随机产生初始种群 G_h , 同时设迭代次数 $t=0$ 。

步骤 3: 进行潮流计算, 得出每个个体的目标函数值 f_1 和 f_2 。

步骤 4: 对种群 G_h 进行快速非支配排序和拥挤度计算。

步骤 5: 利用拥挤度算子筛选出前 $Y/2$ 个作为遗传变异的个体。

- 步骤6：通过选择、交叉、变异过程生成子代种群 H_h 。
- 步骤7：父代、子代种群合并获得 $U_h = G_h \cup H_h$ ，并进行快速非支配排序和拥挤度计算。
- 步骤8：采用保留精英策略，选择前 Y 个个体作为新的父代种群。
- 步骤9：判断是否达到最大迭代次数，是则输出Pareto解集，否则返回步骤5。

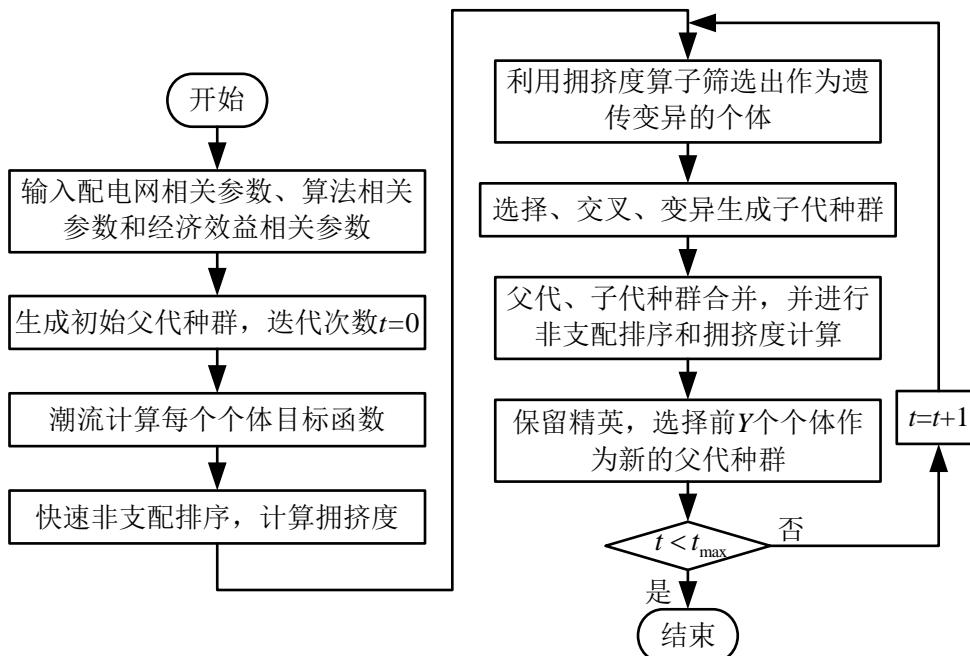


图 4-3 承载能力多目标优化模型求解流程

4.4.3 最优解集评价指标

通常在 Pareto 最优解集一定范围内，所获得结果的两个目标函数均是满足预期要求的最优解，单纯依靠目标函数的大小确定最优解已不再足够。同时，配电网承载能力的提升除了意味着尽可能多的接入分布式光伏，还需要保证接入光伏后配电网的各项性能指标处于最优的运行状态。因此，本文定义了其他配电网性能指标，并采用构建综合指标的方法确定 Pareto 解集中各个方案的最优解。

1. 电压偏差度

该指标反映了分布式光伏并网对整个配电网电压水平的影响，表示为：

$$R_l = 365 \cdot \sum_{s=1}^N \sum_{k=1}^{24} \sum_{i=1}^n \frac{U_{i,k}^s - U_N}{n \cdot U_N} \cdot p_s \quad (4-20)$$

式中， $U_{i,k}^s$ 为场景 s 下节点 i 在第 k 个小时的电压。

2. 节点脆弱度

该指标反映了配电网中各节点分布式光伏对其他部分的影响程度，表示为：

$$R_2 = \sum_{i=1}^n P_{\text{PV},i} \cdot T_i \cdot \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{1}{d_{ij}} \quad (4-21)$$

式中， T_i 为节点 i 关联节点数； d_{ij} 为节点 i 和 j 之间的电气耦合距离。

3. 光伏利用率

该指标反映了分布式光伏实际发电量与额定发电量的比值，表示为：

$$R_3 = \frac{365 \cdot \sum_{s=1}^N \sum_{k=1}^{24} \sum_{i=1}^n P_{\text{G},i}^s \cdot p_s}{\sum_{i=1}^n P_{\text{PV},i}} \times 100\% \quad (4-22)$$

4. 就地消纳率

该指标反映了本级电网消纳分布式光伏发电量的比值，表示为：

$$R_4 = \frac{\sum_{s=1}^N \left(\sum_{i=1}^n P_{\text{G},i}^s - P_{\text{O}}^s \right) \cdot p_s}{\sum_{s=1}^N \sum_{i=1}^n P_{\text{G},i}^s \cdot p_s} \times 100\% \quad (4-23)$$

5. 线路负载率

该指标反映了配电网线路的运行情况，表示为：

$$R_5 = \frac{365 \cdot \sum_{s=1}^N \sum_{k=1}^{24} \sum_{l=1}^L S_{l,k}^s \cdot p_s}{L \cdot S_N} \times 100\% \quad (4-24)$$

式中， L 表示线路总数； $S_{l,k}^s$ 表示场景 s 下第 k 小时线路 l 的实际传输功率。

对上述接入分布式光伏的配电网性能指标分别进行归一化处理，然后采用文献 [76] 所述状态空间评价方法构建综合指标，进而通过综合指标优选最优解。

4.5 仿真分析

本节对所提出的兼顾经济成本的配电网分布式光伏承载能力多目标优化模型进行了进一步的研究。首先，在不考虑经济性的情况下，对不同主动管理措施下的配电网承载能力进行了计算，对比分析了其提升能力。然后，采用 NSGA-II 算法求解兼顾经济成本的承载能力多目标优化模型，并得出 Pareto 最优解集。最后，基于所定义的配电网性能综合指标，对 Pareto 解集的结果进行进一步优选。

4.5.1 算例数据

本章采用改造后的 IEEE33 节点配电网系统进行仿真测试，对采用主动管理措施的配电网最大承载能力进行研究，分析其对承载能力的提升作用。如图 4-4 所示，在 IEEE33 节点标准测试系统的基础上，增加了 4 台光伏分布于系统的 7、13、19 和 32 节点；1 台有载调压变压器位于大电网根节点 0 和配电网馈线首节点 1 之间；2 台连续无功补偿装置，分别接于系统 18 和 33 节点；同时保持原有线路参数不变。

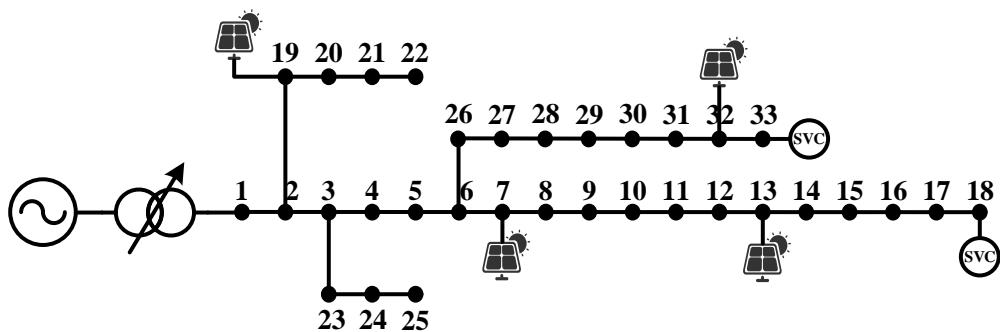


图 4-4 改进的 IEEE33 节点配电网系统

其中，4 个分布式光伏通过逆变器与配电网相连，均具备无功调节能力，其无功出力容量依据式(4-3)计算得到，逆变器视在功率为 1.1 倍的有功功率；有载调压变压器的调压范围为 0.95~1.05 标幺值，上下档位数为 9，步进量为 1.25%，日最大调节次数设置为 6 次；光伏出力和负荷功率典型场景及其概率均采用第 2 章所述的场景生成及削减方法得到；2 台 SVC 无功补偿容量均取为-600~600kvar。各节点电压取值范围为 0.93~1.07 标幺值；系统三相功率的基准值 SB=10MVA，线电压的基准值 UB=12.66kV。如表 4-1 所示为承载能力多目标优化模型中综合经济成本参数和 NSGA-II 算法的相关参数设置情况。

表 4-1 综合经济成本和多目标算法相关参数

相关参数	数值	相关参数	数值
贴现率	0.08	分布式光伏使用年限/(年)	20
单位容量投资费用/(元/kW)	10000	单位电价/(元/kW·h)	0.50
单位电量运行维护成本/(元/kW·h)	0.25	单位电量的主动管理成本/(元/kW·h)	0.15
购电电价/(元/kW·h)	0.45	上网电价/(元/kW·h)	0.80
种群规模	500	迭代次数	300
交叉率	0.9	变异率	0.1

4.5.2 主动措施对承载能力的提升

为研究主动管理措施对配电网分布式光伏承载能力的影响，本章在仅考虑最大承载能力单目标的情况下，设置以下方案进行对比分析。表 4-2 所示为各方案的分布式光伏规划结果及配电网最大承载能力对比。其中方案 1 为不考虑任何主动措施的配电网分布式光伏承载能力评估；方案 2、3、4、5 分别为仅考虑逆变器功率因数调节、变压器分接头调节、无功补偿、有功削减的配电网分布式光伏承载能力评估；方案 6 为考虑所有主动调控措施的配电网分布式光伏承载能力评估。

表 4-2 不同主动管理措施下配电网的最大承载能力

方案	功率 因数	有载 调压	无功 补偿	有功 削减	待选节点分布式光伏接入容量/MW				总和
					7	13	19	32	
1	×	×	×	×	2.7930	1.7310	0.8053	2.1498	7.4791
2	√	×	×	×	2.9989	1.2230	2.6119	1.5956	8.4294
3	×	√	×	×	1.6609	3.0000	0	3.0000	7.6609
4	×	×	√	×	2.9317	1.0101	2.3212	1.5908	7.8538
5	×	×	×	√	0.1481	2.5465	2.1847	3.0000	7.8794
6	√	√	√	√	2.9822	1.5398	2.0916	2.2443	8.8579

通过表 4-2 可以看出，采用各种主动管理措施均可以提升配电网分布式光伏的承载能力：1)利用逆变器进行功率因数调节是最为有效的措施，这主要是因为接入的分布式光伏总量达到了 8.4MW，功率因数限值设定为 0.95，所能输出的无功功率达到了 2.7MW，能够很好的支撑配电网，避免了大量无功功率由上级电网输送。2)有载调压变压器对于配电网承载能力的提升最小，因为变压器不能够输出无功，仅仅只是对配电网整体电压水平的调节。3)无功补偿 1.2MW 和弃光率为 5%情况下对于承载能力的提升相差不多，但是原理并不相同。无功补偿类似于逆变器输出的无功，一方面可以主动支撑配电网电压，另一方面可以减少电压越限。而有功削减是直接舍弃有功输出，从而减小电压的上升程度，避免电压越限。4)当全部控制措施综合使用时，逆变器无功调节和无功补偿输出的无功超过配电网无功需求，因此会互相协调输出一部分感性无功，从而进一步降低电压，提升配电网承载能力，有载调压是在无功充足且电压越限的情况下才会参与调节，有功削减是在其他三个措施都不能够提升光伏接入量的时候才会介入的措施。

如图4-5(a)(b)(c)所示分别为不同方案下，配电网各节点电压，各支路功率和各时段网损变化图。

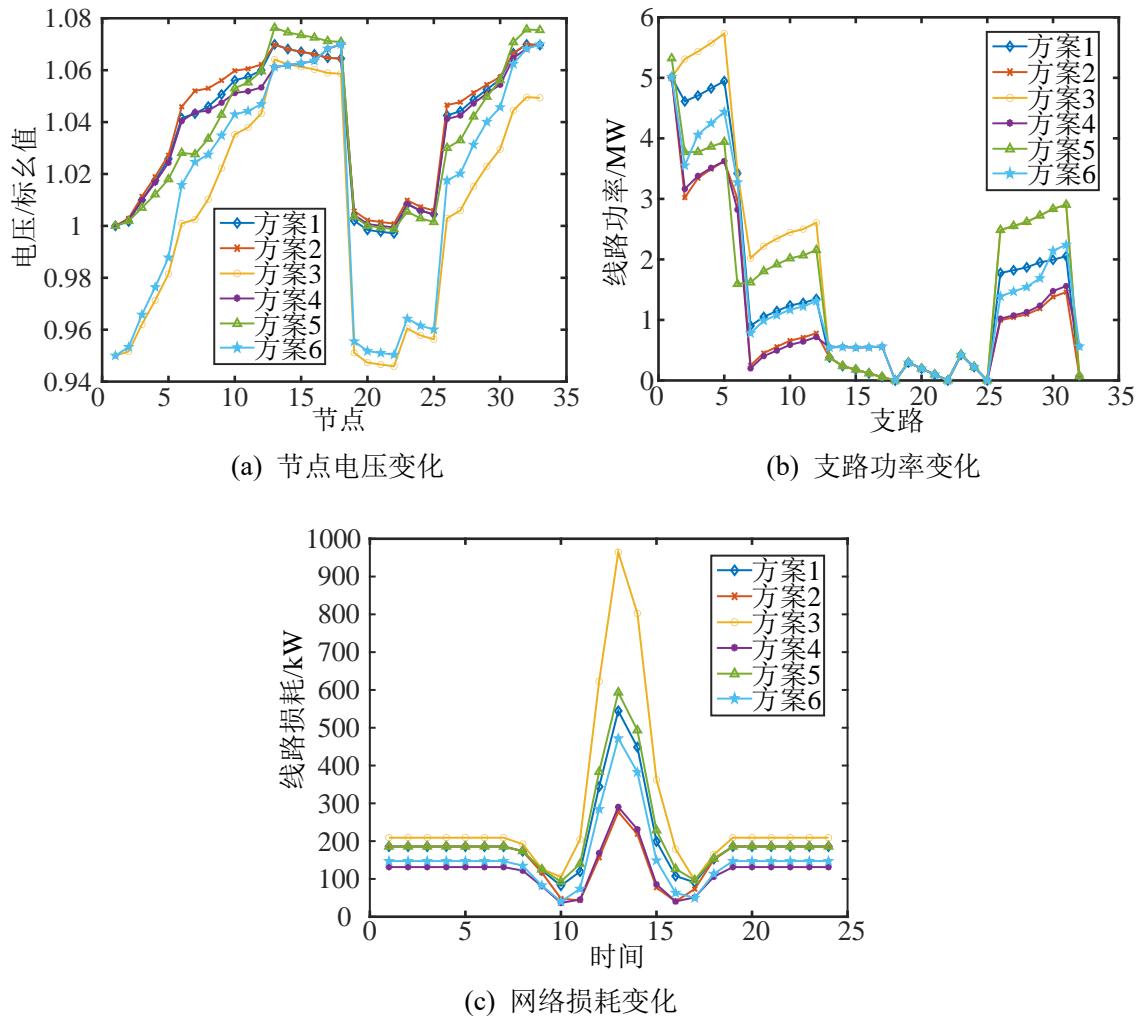


图4-5 配电网参数变化

综合6种方案下的配电网数据可以看出，采用了有载调压的方案3和6，配电网节点电压偏差较大，各个节点电压均处于0.95-1.07标么值，覆盖范围广泛。采用了无功补偿的方案4和6，由于减少了上级电网的无功传输，线路传输功率远小于其他方案，同时进一步降低了网损。采用有功削减的方案5和6，虽然原理上与无功补偿不同，但是各配电网参数的结果相近。采用逆变器调压的方案2和无任何调整措施的方案1电压变化趋势相类似，但接入了更多分布式光伏；与仅使用无功补偿的方案4在传输功率及线路损耗上有大致相同的规律，也说明了两者对于承载能力的提升原理类似。综上可以得出结论，提升配电网承载能力的代价是十分巨大的。

图 4-6 所示为逆变器功率因数与承载能力变化关系图。

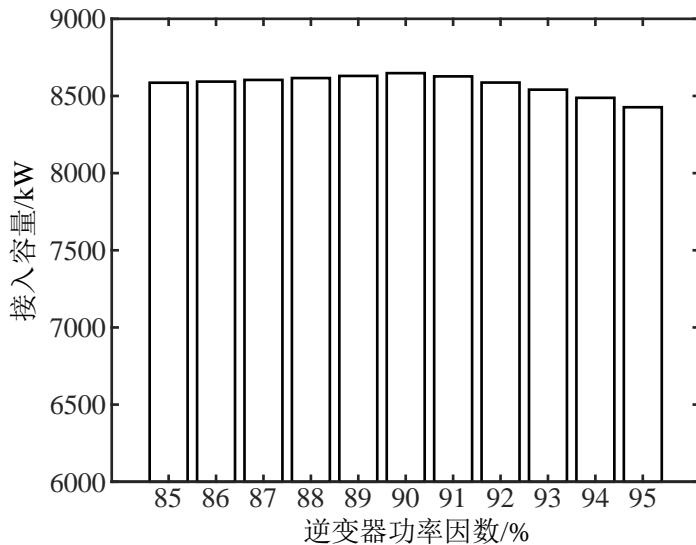


图 4-6 逆变器功率因数和承载能力的关系

从图 4-6 可以看出，随着逆变器功率因数从 95%下降到 90%，配电网承载能力逐渐提升，提升程度逐渐减小。这是因为逆变器输出的无功补偿了负荷所消耗的无功功率，减少了线路上无功功率的传送，降低了整体的电压水平，从而能够接入更多光伏。而随着逆变器功率因数从 90%下降到 85%，配电网承载能力略微减小，但整体变化不大，说明此时输出的无功已经满足了负荷所需的水平，再增加无功的输出，只会浪费光伏的有功出力，同时一定程度上增加线路传输无功带来的损耗。

图 4-7 所示为无功补偿量与承载能力变化关系图。

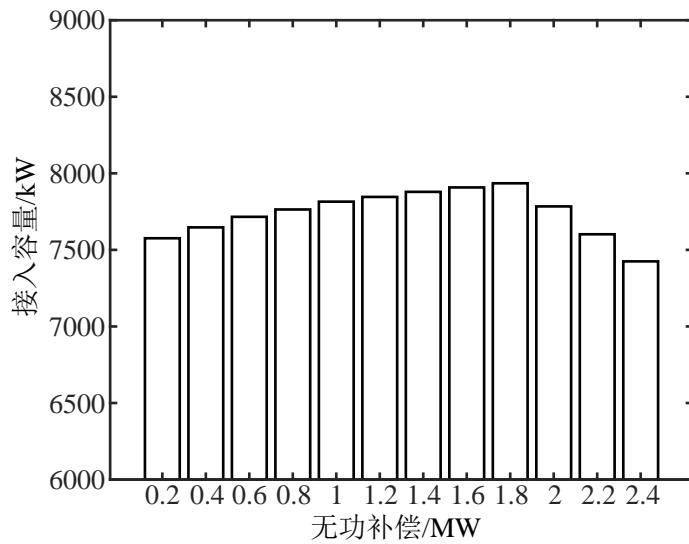


图 4-7 无功补偿量和承载能力的关系

对比图4-6和图4-7可以发现，无功补偿同逆变器功率因数调节所带来的承载能力变化结果相了类似。其原理均是通过无功补偿来调节电压，进而增大配电网的承载能力。两者的不同点在于单位无功补偿量对承载能力的影响程度要略大于单位逆变器功率因数的改变对承载能力的影响程度。随着无功补偿量的增加，承载能力呈现先增后减的趋势，在无功补偿为1800kW时出现转折，主要是因为光伏输出的无功逐渐抵消了负荷使用的无功，降低了上级电网无功的传输。然而当输出超过了负荷的需求，会徒增线路的损耗，抬升电压水平。

当逆变器功率因数调节、有载调压变压器和无功补偿都不能够提升配电网承载能力的时候，考虑弃光的方式来进一步提升承载能力。根据国家能源局综合司2016年发布的文件，要求全国各地弃光率不超过5%。因此，如图4-8所示，本文将5%弃光率作为基准，分析弃光率与配电网承载能力变化关系。

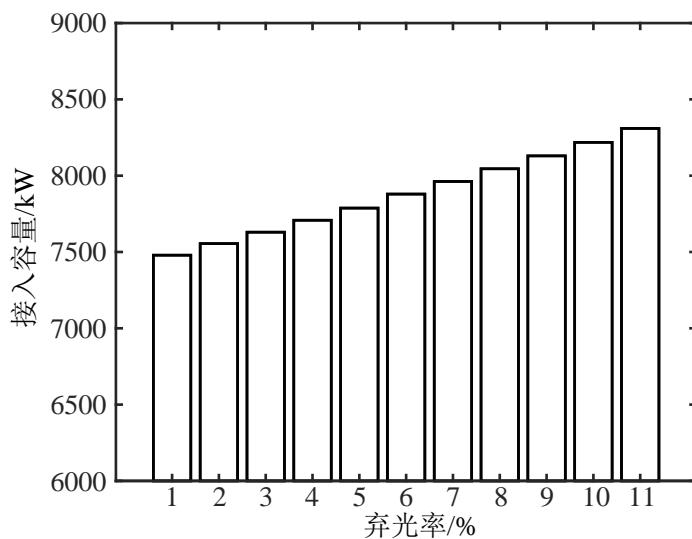


图4-8 弃光率和承载能力的关系

从图4-8中可以看出，随着弃光率的增加，承载能力的变化大致呈线性上升。这说明了弃光行为对承载能力的提升是单向的，不存在阈值限制。但随着弃光量率的增加，一方面会导致分布式光伏输出的功率白白浪费，另一方面还会徒增分布式光伏运行的经济成本。因此，在实际使用中，要综合各方面来考虑设置弃光限值。

4.5.3 兼顾经济成本的配电网承载能力

如图4-9所示为采用NSGA-II方法求解本文兼顾经济成本的承载能力多目标优化模型所得出的Pareto最优解集。

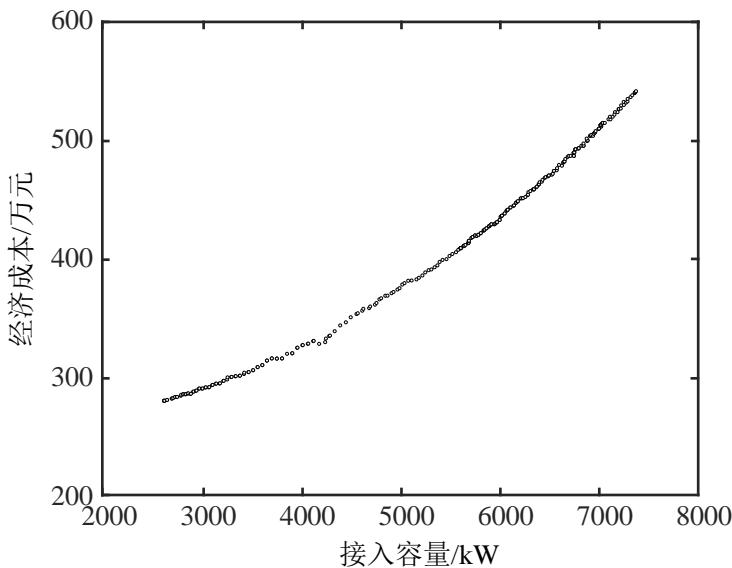


图 4-9 Pareto 最优解集分布

从上图可以明显看出，所获得的 Pareto 解集分布较为均匀，分布范围广，且比较稳定。一定程度上说明了 NSGA-II 算法对本文模型求解的有效性，同时该解集分布图也为后续选择具体规划方案提供了极为丰富的信息。随着接入容量的增大，经济成本大致呈线性上升，这是因为本文各项经济成本大多是按照单位发电量来计算的，但由于光伏和负荷出力场景的随机性和不确定性，导致结果仍存在一定的非线性。

表 4-3 Pareto 最优解集中的特殊解

优化目标	接入容量/kW	经济成本/万元
接入容量最大化	7488.6	542.4
经济成本最小化	2539.3	275.2

从表 4-3 可以看出，若仍像第 3 章一样仅以分布式光伏接入容量最大为目标，则会大大增加配电网的经济成本；但若倾向于以经济成本最小为目标，则会不利于分布式光伏的接入。因此需要权衡各方面因素，最大化利用 Pareto 解集信息，做出选择。按照接入容量依次为 4000、5000、6000kW 的情况下选取 3 组解进一步分析说明，如表 4-4 所示。

表 4-4 兼顾经济成本的承载能力优化方案

优化参数	接入容量=4000kW	接入容量=5000kW	接入容量=6000kW
安装成本/万元	407.40	509.26	611.11
运维成本/万元	134.26	161.78	207.33
网损成本/万元	73.49	87.62	111.25
主动管理成本/万元	75.43	98.57	126.69

表 4-4(续表)

优化参数	接入容量=4000kW	接入容量=5000kW	接入容量=6000kW
余电上网收益/万元	145.45	252.35	349.14
售电收益/万元	219.38	234.64	260.73
综合经济成本/万元	325.75	370.24	446.51

从经济角度来看，随着分布式光伏接入量的增大，分布式光伏的安装成本是逐渐增加的。运维成本和网损成本也是逐渐增加的，但是相较于安装成本，增长幅度较小，主要是因为这两项是按照单位发电量来计算的，而安装成本是按照光伏装机容量确定的。网损成本随着接入量逐渐增加是因为向上级电网倒送的功率增多，导致线路损耗增大。余电上网收益和售电收益都与电网实际运行状况相关，当接入容量增加时，发电量随之增加，相应的电量收益也逐渐增长。但由于本文未考虑政府补贴和环境补贴，因此此种情况下光伏的接入所带来的成本要大于收益。

4.5.4 最优方案的确定

多目标优化的结果是一组最优解集，通常无法使得每一个目标都达到最优，但进行规划方案的确定时往往只需要一个或几个解，因此从最优解集中根据实际需求选择最优解也十分重要。按照 4.4.3 节所定义的评价指标及文献[76]综合指标求取方法，对 4.5.3 节所获得的 Pareto 最优解集分别计算综合指标，其结果如图 4-10 所示。由于所用综合指标求取方法采用非加权的形式，所以导致出现部分超出 1 的评价结果。

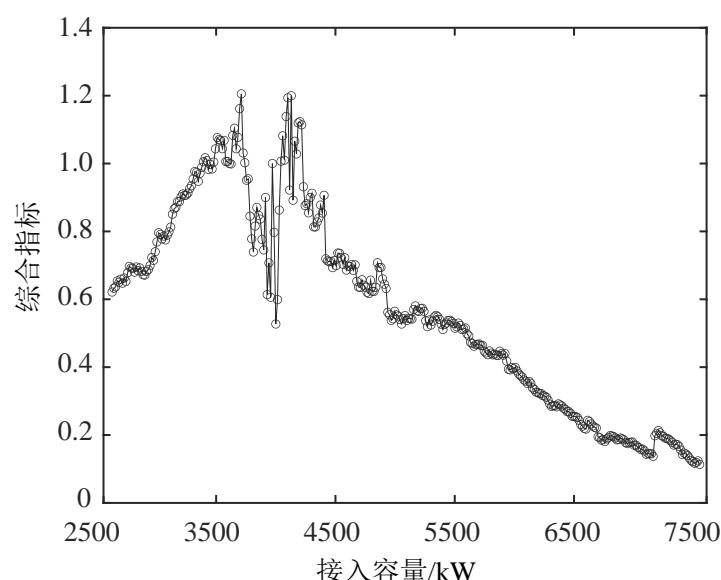


图 4-10 Pareto 最优解集的综合指标

从图 4-10 可以看出，随着接入容量的增长，综合指标大致是呈现先增后降的变化趋势。在接入量达到 3500-4500kW 之间时出现了转折。同时，在 4000kW 附近出现了极小值，而在 3700kW 和 4100kW 附近达到极大值，也就是通过本文最优解集评价指标所确定的最优解。当接入容量大于 4200kW 时，曲线出现了明显的下降，说明再接入分布式光伏已经完全不利于配电网整体性能的提升。

对于最优解的确定，文献[77]采用模糊隶属度函数来处理，但最终结果仅通过两个目标函数的之间的加权获得折衷解，不具有选择最优解的普遍意义。而根据本文最优解集评价指标确定的最优解更能保持配电网的综合性能，同时为了保证一定的经济性，需要人为设定经济成本目标的最大可接受范围，本文定为 300-500 万元之间。最终相应的对比结果如表 4-5 所示：

表 4-5 最优解的确定

优化目标	综合指标	接入容量/kW	经济成本/万元
折衷解	0.42	5887.4	423.7
本文方法最优解	1.21	3709.3	337.2

根据模糊隶属度函数方法所求出的折衷解是根据对两个目标函数的满意度来确定的，具有强烈的主观性。表 4-5 中的折衷解是按照两个目标具有相同的满意度求取的，处于两种极端之间，对照图 4-10 其配电网性能已经低于 0.5，不是最理想的解。而按照本文最优解集评价指标获得的最优解相对来说具有更符合实际情况的分布式光伏接入量，更好的综合性能和更低的经济成本，是真正意义上的最优解。

4.6 本章小结

为了进一步提升配电网的承载能力，同时兼顾一定经济性，本章提出了一种兼顾经济成本的配电网承载能力评估方法。首先基于 2.4 节所生成的光伏和负荷出力典型场景处理不确定性；然后确定了各种主动管理措施的基本模型，构建了兼顾经济成本的承载能力多目标优化模型；接着采用 NSGA-II 多目标优化方法求解，并提出了通过最优解集评价指标来选择最优解的方法；最后依据改进的 IEEE33 节点配电网标准算例，验证所提出的兼顾经济成本的配电网承载能力评估方法和最优解确定方法的有效性。从而为进一步经济、合理的提升配电网承载能力提供理论指导。

结 论

本文的研究是在在“双碳”战略目标与“整县光伏”政策的大背景下，分布式光伏大规模接入，超出了配电网实际承载能力，造成了安全稳定运行方面的问题，需要研究一种方法来评估配电网承载能力极限。另一方面，为了进一步经济合理的提高配电网承载能力，考虑一些主动管理措施的同时兼顾一定经济成本是十分必要的。本文从以上两个方面展开了深入研究，主要研究成果和结论如下：

- (1) 提出了一种基于 DBI 指数和密度中心的改进 K-means 聚类场景生成方法。一方面能够简化不确定性模型、提升承载能力计算效率；另一方面，采用密度中心和 DBI 指数两个改进措施，能够避免聚类结果陷入局部最优。仿真结果表明，采用所提方法能够对光伏和负荷出力场景进行有效聚类，并且聚类后的场景具有显著代表性，能够为配电网分布式光伏承载能力的优化计算做好数据准备工作。
- (2) 给出了一种考虑光伏接入状态的配电网最大承载能力评估方法。定义了光伏接入方式和表征分布特征的指标；构建了考虑机会约束的配电网承载能力评估模型；针对光伏不同接入状态，采用改进鲸鱼优化算法分别计算了配电网最大承载能力。仿真结果表明，所定义的不同光伏接入状态能够同时从定性和定量两个角度分析了光伏接入方式和分布特征与承载能力之间的关系，为我国实现分布式光伏规模化接入提供理论指导。
- (3) 构建了一种兼顾经济成本的配电网承载能力评估模型。该模型同时以配电网承载能力最大和综合经济成本最低为目标函数；同时考虑了有载调压，无功补偿，逆变器无功调节和有功消减等主动管理措施提升承载能力；在采用 NSGA-II 方法对多目标优化模型进行了求解的同时，进一步提出了通过最优解集评价指标来选择最优解。仿真结果表明，从承载能力提升角度看，逆变器无功调节是最为有效的措施，对配电网承载能力的提升能够达到 15%；有载调压变压器对配电网承载能力的提升最小，仅为 2%。另一方面，从经济角度来看，配电网分布式光伏的接入会导致综合经济成本的提高，但提升程度整体变化不大；从 Pareto 解集中根据配点网性能综合指标选择最优解是更符合实际情况的最优选择，能够进一步经济、合理的提升配电网承载能力。

本文研究了配电网分布式光伏承载能力评估方法，对配电网分布式光伏的规模化接入具有一定指导意义，但仍有大量问题有待进一步深入研究：

(1) 本文同时从定性和定量的角度分析了不同分布式光伏接入方式下的配电网承载能力变化，但对定量方面的研究仍有一定欠缺，所定义的分布特征指标不能很好的体现分布式光伏的接入状态，同时采用的优化算法还有一定的改进空间，应在日后的研究之中给予更多的关注。

(2) 本文考虑的主动管理措施还可以更加全面，目前最受认同的引入储能没有采用。同时没有很好的将兼顾经济成本的承载能力多目标优化模型和主动管理措施紧密结合在一起，没有分别对 4 种主动管理措施进行经济性分析，下一步需要针对上述问题进行细致研究，未来配电网的分布式光伏承载能力研究会是热点之一。

参考文献

- [1] 甘雯, 徐晴, 沈诚亮, 等. 基于鲁棒优化的配电网中分布式光伏准入容量研究[J]. 应用科技, 2019, 46(06): 53-62.
- [2] 李宏仲, 汪瑶, 胡哲晟, 等. 双碳背景下配电网对多元接入体的承载能力评估[J]. 电网技术, 2022, 46(09): 3595-3604.
- [3] 国家能源局. 2022 年光伏发电建设运行情况[R/OL]. [2023-02-17]. http://www.nea.gov.cn/2023-02/17/c_1310698128.htm.
- [4] 姚宏民, 秦文萍, 景祥, 等. 基于可能性理论的低压配电网分布式光伏承载能力评估方法[J/OL]. 高电压技术: 1-11[2023-03-18].
- [5] 王婷, 陈晨, 谢海鹏. 配电网对分布式电源和电动汽车的承载力评估及提升方法综述[J]. 电力建设, 2022, 43(09): 12-24.
- [6] 戴松灵, 王晞, 刘方, 等. 考虑综合承载力的主动配电网优化调度与运行[J]. 电力建设, 2020, 41(02): 67-75.
- [7] 于腾凯, 董靓媛, 杜晓东, 等. 考虑机会约束的配电网光伏并网容量分布鲁棒优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 43-50.
- [8] 周良学, 张迪, 黎灿兵, 等. 考虑分布式光伏电源与负荷相关性的接入容量分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(04): 56-61.
- [9] 孙玲玲, 赵美超, 王宁, 等. 基于电压偏差机会约束的分布式光伏发电准入容量研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(07): 1560-1569.
- [10] Al S H, Zivanovic R, Al S F. Probabilistic Hosting Capacity for Active Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2519-2532.
- [11] 丁琦欣, 覃洪培, 万灿, 等. 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载能力评估[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(06): 28-38.
- [12] 栾伟杰, 蒋献伟, 张节潭, 等. 考虑主动管理的分布式光伏发电消纳能力研究[J]. 电力建设, 2016, 37(01): 137-143.
- [13] 彭春华, 于蓉, 孙惠娟. 基于 K-均值聚类多场景时序特性分析的分布式电源多目标规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 58-65.

- [14] 孙建梅, 胡嘉栋, 蔚芳. 基于改进场景聚类法的主动配电网中分布式电源准入容量规划[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(01): 194-200.
- [15] 徐雨田, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 主动管理模式下基于多场景分析的分布式电源规划[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(02): 38-46.
- [16] 王丹阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑数据中心用能时空可调的电-气互联综合能源系统分布式光伏最大准入容量计算[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-11[2023-03-19].
- [17] 梁志峰, 夏俊荣, 孙檬檬, 等. 数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估技术研究[J]. 电网技术, 2020, 44(07): 2430-2439.
- [18] 苏小玲, 韩民晓, 赵正奎, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 87-92.
- [19] 李振坤, 管琰玲, 张代红, 等. 基于年时序曲线的配电网节点光伏接纳能力评估及最佳容量研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(04): 200-208.
- [20] Santos S F, Fitiwi D Z, Shafie K M, et al. New Multistage and Stochastic Mathematical Model for Maximizing RES Hosting Capacity-Part I: Problem Formulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 304-319.
- [21] 文升, 顾洁, 程浩忠, 等. 分布式电源的准入容量与优化布置的实用方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 109-114.
- [22] 王璟, 蒋小亮, 杨卓, 等. 光伏集中并网电压约束下的准入容量与电压波动的评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(09): 2450-2457.
- [23] Abad M, Ma J, Zhang D, et al. Probabilistic Assessment of Hosting Capacity in Radial Distribution Systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1935-1947.
- [24] 赵冬梅, 任耀宇, 程雪婷. 低压配电网分布式光伏接纳能力分析[J]. 现代电力, 2021, 38(04): 392-403.
- [25] 刘志文, 董旭柱, 黄豫, 等. 考虑多种约束的分布式电源最大渗透率计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(06): 85-92.
- [26] 谭笑, 王主丁, 李强, 等. 计及多约束的多分布式电源接入配电网最大承载力分段算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(04): 72-80.
- [27] 商立群, 郭伟. 一种矩阵化描述的分布式光伏准入容量计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 25-30.

参考文献

- [28] 曾强, 谢善益, 周刚, 等. 倒送功率约束下的分布式电源最大接入容量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 16-22.
- [29] 钟清, 高新华, 余南华, 等. 谐波约束下的主动配电网分布式电源准入容量与接入方式[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 108-113.
- [30] Alshahrani A, Omer S, Su Y H. An Investigation into the Potential of Hosting Capacity and the Frequency Stability of a Regional Grid with Increasing Penetration Level of Large-Scale PV Systems[J]. Electronics, 2021, 10(11): 1-25.
- [31] Sakar S, Balci M E, Aleem S, et al. Increasing PV hosting capacity in distorted distribution systems using passive harmonic filtering[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 148: 74-86.
- [32] 刘健, 黄炜. 分布式光伏电源与负荷分布接近条件下的可接入容量分析[J]. 电网技术, 2015, 39(02): 299-306.
- [33] 王小仲, 唐明, 林承钱, 等. 基于时序电压灵敏度的 ADN 分布式光伏选址及定容评估[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(06): 57-62.
- [34] Dubey A, Santoso S. On Estimation and Sensitivity Analysis of Distribution Circuit's Photovoltaic Hosting Capacity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2779-2789.
- [35] 陈永忠, 王盈祥, 苏宇, 等. 配电网典型接线模式下分布式电源的准入容量计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(07): 117-126.
- [36] 刘科研, 刘永梅, 盛万兴, 等. 考虑电压约束的分布式电源接入配电网最大准入容量计算方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(06): 81-87.
- [37] 李文升, 王春义, 穆陆杰, 等. 基于 IGDT-机会约束的配电网最大 DG 可开放容量评估[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-9[2023-03-19].
- [38] 蔡秀雯, 陈茂新, 陈钢, 等. 考虑主动管理与需求侧管理的主动配电网分布式光伏最大准入容量计算方法[J]. 电力建设, 2021, 42(05): 38-47.
- [39] 方一晨, 张沈习, 程浩忠, 等. 含智能软开关的主动配电网分布式光伏准入容量鲁棒优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(07): 8-17.
- [40] Chen X, Wu W, Zhang B, et al. Data-Driven DG Capacity Assessment Method for Active Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3946-3957.
- [41] 黄河, 高松, 韩俊, 等. 交直流混合配电网分布式电源最大准入容量[J]. 电力建设, 2019, 40(10): 75-83.

- [42] Zhao J, Wang J, Xu Z, et al. Distribution Network Electric Vehicle Hosting Capacity Maximization: A Chargeable Region Optimization Model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4119-4130.
- [43] 阎鼎, 包海龙, 程浩忠, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(10): 16-20.
- [44] 胡美玉, 胡志坚, 史梦梦. 基于改进粒子群优化算法的 DG 准入容量与优化布置[J]. 电力建设, 2014, 35(12): 111-115.
- [45] 刘科研, 盛万兴, 马晓晨, 等. 基于多种群遗传算法的分布式光伏接入配电网规划研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(06): 146-155.
- [46] 魏欣荣, 吴俊勇, 丁然, 等. 基于光伏重心理论的配电网分布式光伏最大准入容量计算 [J/OL]. 电网技术: 1-14[2023-03-18].
- [47] 吴鸣, 徐斌, 季宇, 等. 输配协同分布式电源最大接入容量计算方法[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3883-3890.
- [48] Long C, Ochoa L F. Voltage Control of PV-Rich LV Networks: OLTC-Fitted Transformer and Capacitor Banks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 4016-4025.
- [49] Stetz T, Marten F, Braun M. Improved Low Voltage Grid-Integration of Photovoltaic Systems in Germany[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 534-542.
- [50] Seuss J, Reno M J, Broderick R J, et al. Improving distribution network PV hosting capacity via smart inverter reactive power support[J]. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, 1-5.
- [51] Hu J J, Marinelli M, Coppo M, et al. Coordinated voltage control of a decoupled three-phase on-load tap changer transformer and photovoltaic inverters for managing unbalanced networks[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 131: 264-274.
- [52] Zhu D, Jain A K, Broadwater R, et al. Feeder Voltage Profile Design for Energy Conservation and PV Hosting Capacity Enhancement[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 164: 263-271.
- [53] Wang S, Chen S, Ge L, et al. Distributed Generation Hosting Capacity Evaluation for Distribution Systems Considering the Robust Optimal Operation of OLTC and SVC[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1111-1123.
- [54] Capitanescu F, Ochoa L F, Margossian H, et al. Assessing the Potential of Network Reconfiguration

参考文献

- to Improve Distributed Generation Hosting Capacity in Active Distribution Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 346-356.
- [55] 姚天宇, 李勇, 乔学博, 等. 计及安全边界和智能软开关协同配置的配电网分布式光伏准入容量优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(04): 63-70.
- [56] 梁海深, 李盛伟, 白临泉, 等. 基于 SNOP 的柔性配电网中分布式电源最大准入容量计算[J]. 电力建设, 2018, 39(08): 69-76.
- [57] Ding F, Mather B. On Distributed PV Hosting Capacity Estimation, Sensitivity Study, and Improvement[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1010-1020.
- [58] 钱振宇, 王泉, 魏建民, 等. 考虑削减方法和最大化接纳能力的新能源准入容量柔性优化模型[J]. 智慧电力, 2020, 48(06): 35-39+60.
- [59] Etherden N, Bonen M. Overload and overvoltage in low-voltage and medium-voltage networks due to renewable energy-some illustrative case studies[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 114: 39-48.
- [60] 黄志强, 陈业伟, 毛志鹏, 等. 柔性多状态开关与分布式储能系统联合接入规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 29-37.
- [61] 李勇, 姚天宇, 乔学博, 等. 基于联合时序场景和源网荷协同的分布式光伏与储能优化配置[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3289-3303.
- [62] Jayasekara N, Masoum M, Wolfs P J. Optimal Operation of Distributed Energy Storage Systems to Improve Distribution Network Load and Generation Hosting Capability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 250-261.
- [63] 于昊正, 赵寒杰, 李科, 等. 计及需求响应的分布式光伏集群承载能力评估[J]. 电力建设, 2023, 44(02): 122-131.
- [64] 王守相, 王瀚樟, 赵倩宇, 等. 面向配电网光伏接纳能力提升的分时电价优化方法[J/OL]. 电力系统自动化: 1-11[2023-03-19].
- [65] 杨鹏, 郁丹, 郭雨涵, 等. 考虑需求侧响应的新能源消纳优化模型研究[J]. 供用电, 2022, 39(11): 79-86.
- [66] 刘国伟, 马楠, 邓浩, 等. 考虑需求侧管理和网络重构的配电网新能源承载能力评估[J/OL]. 中国电力: 1-8[2023-03-19].
- [67] 艾欣, 周树鹏, 赵阅群. 基于场景分析的含可中断负荷的优化调度模型研究[J]. 中国电机工

- 程学报, 2014, 34(S1): 25-31.
- [68] 张斌, 庄池杰, 胡军, 等. 结合降维技术的电力负荷曲线集成聚类算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3741-3749.
- [69] 赵莉, 候兴哲, 胡君, 等. 基于改进 k-means 算法的海量智能用电数据分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2715-2720.
- [70] 张嘉澍, 吕泉, 郭雪丽, 等. 考虑合理弃光的配电网光伏最大接入容量研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(02): 418-426.
- [71] 邹宏亮, 韩翔宇, 廖清芬, 等. 考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(08): 2273-2280.
- [72] 董逸超, 王守相, 闫秉科. 配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J]. 电网技术, 2019, 43(07): 2258-2266.
- [73] 贾清泉, 赵美超, 孙玲玲, 等. 主动配电网中计及及时序性与相关性的分布式光伏并网规划[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(06): 1719-1728+1908.
- [74] Chen X, Wu W, Zhang B. Robust Capacity Assessment of Distributed Generation in Unbalanced Distribution Networks Incorporating ANM Techniques[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 651-663.
- [75] Torquato R, Salles D, Oriente P C, et al. A Comprehensive Assessment of PV Hosting Capacity on Low-Voltage Distribution Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 1002-1012.
- [76] 金强, 张红斌, 宋子洋, 等. 微电网规划方案的评价指标计算和空间距离评价方法[J]. 燕山大学学报, 2021, 45(03): 246-253+261.
- [77] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(05): 1079-1088.