多阶段多属性配电网规划项目优选模型及求解

邓嘉浩，林凌雪，朱林，吴子龙
（华南理工大学 电力学院，广东 广州 510640）

摘要：目前配电网规划项目优选方法很少考虑负荷增长速度快慢对项目供电效益和项目入选年的影响，也很少同时考虑项目的紧急程度、技术效益和经济效益，为此建立以技术效益和经济效益最大为目标的中低压配电网规划项目优选模型。根据项目的紧急程度对项目技术效益进行奖优罚劣，为衡量项目供电效益的逐年变化速度，采用差异化权重法得到项目投产后5 a的供电效益综合水平。提出改进的多目标粒子群算法求解模型，得到一系列目标互有优势的项目组合方案，根据供电企业的目标偏好对项目组合方案集进行多级筛选，得到最优项目组合方案。以某地区配电网规划项目库为例，优选结果表明所提模型能更好地考虑项目的紧急程度和供电效益变化速度，并实现多区域多目标综合提升。

关键词：配电网规划；项目优选；奖优罚劣；差异化权重法；多目标粒子群算法
中图分类号：TM715 **文献标识码**：A **DOI**：10.19457/j.1001-2095.dqcd24660

Multi-stage and Multi-attribute Distribution Network Planning Project Optimal Selection Model and Its Solution

DENG Jiahao，LIN Lingxue，ZHU Lin，WU Zilong
（*College of Electric Power*，*South China University of Technology*，*Guangzhou* 510640，*Guangdong*，*China*）

Abstract：Up to now，the distribution network planning project optimization method rarely considered the impact of the speed of load growth on the power supply efficiency of the project and the year when the project is selected，and rarely considered the urgency，technical benefit and economic benefit of the project at the same time. Therefore，the optimal model for medium and low voltage distribution network planning projects was established with the goal of maximizing technical and economic benefits. According to the urgency of the project，the technical benefits of the project were rewarded and punished. In order to measure the annual change rate of the power supply benefits of the project，the differential weight method was used to obtain the five-year comprehensive level of power supply benefits after the project was put into operation. An improved multi-objective particle swarm algorithm solution model was proposed，and a series of project combination schemes with mutually advantageous objectives were obtained，and the optimal project combination scheme was obtained by multi-level screening of the project combination scheme set according to the target preference of the power supply enterprise. Taking the distribution network planning project database in a certain region as an example，it show that the proposed model can better consider the change of power supply efficiency and the urgency of the project，and achieve multi-regional and multi-objective comprehensive improvement.

Key words：distribution network planning；project selection；reward the good and punish the bad；differential weight method；multi-objective particle swarm optimization

对于中低压配电网近期规划，项目优选是供电企业实现精准投资的关键环节[1]。在有限资金下确定综合考虑规划问题、规划目标和负荷发展等维度的项目组合方案，实现配电网供电能力、供电质量和供电可靠性等属性的全面提升，是规划项目优选方法研究的主要任务[2]。

目前配电网规划项目优选方法主要分为两类：一类是基于评价指标体系排序，另一类是基于优化模型求解。评价指标体系排序的优点是分层分类的指标体系能够直观、全面地描述项目

基金项目：国家自然科学基金（51761145106）；广东省重点领域研发计划（2019B111109001）
作者简介：邓嘉浩（1998—），男，硕士，主要研究方向为配电网规划设计与精准投资，Email：1054099089@qq.com
通讯作者：林凌雪（1979—），女，博士，讲师，主要研究方向为电力系统运行与规划，Email：linlx@scut.edu.cn

效益，缺点是评价结果受到权重大小和加权方法影响很大。对此，文献[3]采用层次分析-主客观赋权法（analytic hierarchy process-criteria importance though intercrieria correlation，AHP-CRITIC）确定复合权重；文献[4]采用多准则妥协解排序法（vlseKriterijumska optimizacija i kompromisno resenje，VIKOR）作为加权方法，能够兼顾单项指标得分和综合指标得分；文献[5]基于分层序列法优选项目3次，每次的评价指标完全不同，使入选项目集包含了多层效益。以上改进使评价结果更为合理，但忽略了项目间的关联性，简单地按单个项目的投资效益进行排序。

优化模型求解的优点是能够建立规划项目间的效益与时序关系[6]，具有明确的投资方向，例如：文献[7]以投入产出效益最大为目标函数；文献[8]考虑了投资组合的条件风险价值，以技术效益最大和风险最小为双目标函数；文献[9]定义了迫切度指标衡量项目的紧急程度，并以迫切度减少量最大为目标函数。以上模型都得到了实际应用，但还存在下述问题：1）对项目的紧急程度、技术效益和经济效益缺少综合考虑，特别是在可靠性方面，只考虑经济效益，即停电损失减少量，但对经济水平不高的区域，供电可靠率等技术指标改善值更能够体现可靠性的投资效益；2）对项目供电效益的衡量不够准确，现有的研究只计算项目投产后首年的供电效益，未考虑到负荷增长速度差异使得项目间供电效益变化速率和最佳入选年份各不相同；3）求解多目标项目优选模型时，多采用前决策方法，通过加权求和把多目标模型转化为单目标模型，其结果依赖于各目标权重大小[10-11]。

在上述背景下，文章首先建立多属性多阶段配电网规划项目优选模型，以供电裕度效益、设备利用率效益、可靠性技术效益和可靠性经济效益最大为目标，以电压偏差、供电安全性、政策导向、资金和项目间时序关系为约束条件。在构建模型过程中，采用差异化权重法加权求和得到项目投产后5 a的供电效益综合水平，定义必选项目集和可靠性迫切度算子表征项目的紧急程度，通过场景枚举法描述项目间可靠性效益的耦合关系。然后，采用改进的多目标粒子算法求解模型，对解集多级筛选得到最优项目组合方案。最后，以某地区配电网规划项目库为例，验证所提模型的有效性。

1　多阶段多属性配电网规划项目优选模型

1.1　目标函数

项目优选模型采用供电裕度效益F_1和设备利用率效益F_2、可靠性技术效益F_3和可靠性经济效益F_4分别衡量项目组合在供电能力、供电可靠性的投资效益，各目标的公式为

$$\begin{cases} F_1 = \max \sum_{j=1}^{M}\sum_{t=1}^{5} y_j \cdot h_{j,t} \\ F_2 = \max \sum_{j=1}^{M}\sum_{t=1}^{5} z_j \cdot h_{j,t} \\ F_3 = \max \sum_{t=1}^{5}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k\in T_j} \beta_k \cdot \Delta SAIDI_k \cdot h_{j,t} \\ F_4 = \max \sum_{t=1}^{5}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k\in T_j} \Delta B_k \cdot h_{j,t} \end{cases} \tag{1}$$

式中：t为年的数目，取值范围为[1，5]；y_j，z_j分别为项目j的供电裕度效益和设备利用率效益；M为项目总数；$h_{j,t}$为项目j第t年的状态，若被选中取值为1，否则取值为0；T_j为项目j投产后可靠性发生改变的中压线路集合；$\Delta SAIDI_k$，ΔB_k分别为线路k的系统平均停电持续时间减少量（system average interruption duration index，SAIDI）和停电损失减少量，由区域分块法计算得到[12]；β_k为迫切度算子，表示线路k供电可靠性问题的严重程度，该算子具有奖优惩劣效果，当线路现状值劣于规划目标值时，β_k大于1，否则β_k小于1。

y_j，z_j，$\Delta SAIDI_k$，β_k和ΔB_k的计算公式为

$$\begin{cases} y_j = \sum_{i\in U_j} (c_{1,i}^{(1)} - c_{1,i}^{(0)}) \\ z_j = \sum_{i\in U_j} (c_{2,i}^{(1)} - c_{2,i}^{(0)}) \\ c_{1,i} = \sum_{t=x_j}^{x_j+4} \omega_t \cdot f_1(0.8I_{\lim,i} - I_{\max,i}^t) \\ c_{2,i} = \sum_{t=x_j}^{x_j+4} \alpha_t \cdot f_2\left(\dfrac{I_{\text{ave},i}^t - 0.2I_{\lim,i}}{I_{\lim,i}}\right) \\ \Delta SAIDI_k = SAIDI_k^{(0)} - SAIDI_k^{(1)} \\ \beta_k = 1 + (SAIDI_k^{(0)} - SAIDI_k^{(2)})/SAIDI_k^{(2)} \\ \Delta B_k = (\mu_k + \eta_k)(ENS_k^{(0)} - ENS_k^{(1)})/(1+\gamma)^{x_j + D_j - 1} \end{cases} \tag{2}$$

式中：U_j为j投产后供电能力发生改变的配电设备集合；$c_{1,i}$，$c_{2,i}$分别为U_j中配电设备i的供电裕度和设备利用率；ω_t，α_t分别为第t年的供电裕度权重和设备利用率权重；x_j为项目j的入选年；$I_{\lim,i}$，

$I^t_{\max,i}$，$I^t_{\text{ave},i}$分别为配电设备i的最大允许载流量、第t年的最大电流和平均电流；上标(0)和(1)分别表示项目投资前、后两种情况；上标(2)表示线路k所属供电分区的可靠性规划目标；γ，μ_k，η_k分别为利率、线路k所属区(县)的产电比和电价；ENS_k为线路k的年缺供电量(energy not supplied，ENS)；D_j为项目j的建设工期。

其中，函数f_1和f_2的表达式为

$$f_1(0.8I_{\text{lim},i}-I^t_{\max,i})=\begin{cases}1 & I^t_{\max,i}<0.8I_{\text{lim},i}\\ -1 & I^t_{\max,i}\geqslant 0.8I_{\text{lim},i}\end{cases} \tag{3}$$

$$f_2\left(\frac{I^t_{\text{ave},i}-0.2I_{\text{lim},i}}{I_{\text{lim},i}}\right)=\begin{cases}1 & I^t_{\text{ave},i}\geqslant I_{\text{cr},i}\\ \dfrac{I^t_{\text{ave},i}-0.2I_{\text{lim},i}}{I_{\text{cr},i}-0.2I_{\text{lim},i}} & 0.2I_{\text{lim},i}<I^t_{\text{ave},i}<I_{\text{cr},i}\\ -1 & I^t_{\text{ave},i}\leqslant 0.2I_{\text{lim},i}\end{cases} \tag{4}$$

式中：$I_{\text{cr},i}$为配电设备i得到充分利用的临界值。根据文献[13]，为保证配电设备的经济运行，负载率应不小于0.4，因此$I_{\text{cr},i}$取$0.4I_{\text{lim},i}$。

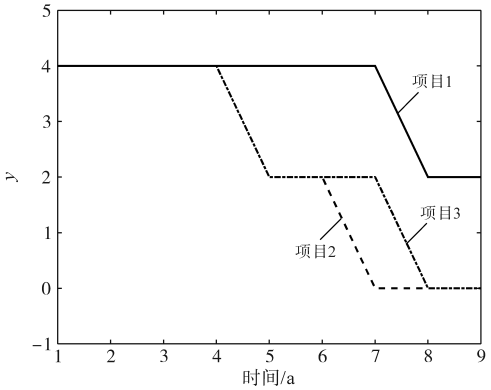
函数f_1的物理意义是如果配电设备第t年不存在重过载问题(即$I^t_{\max,i}<0.8I_{\text{lim},i}$)，函数值取1，该年供电裕度为正，否则取−1。函数f_2的物理意义是如果配电设备第t年存在轻载问题(即$I^t_{\text{ave},i}\leqslant 0.2I_{\text{lim},i}$)，函数值取−1；如果设备利用率超过临界值(即$I^t_{\text{ave},i}\geqslant I_{\text{cr},i}$)，函数值取1，表示设备得到充分利用；如果介于轻载与临界值之间(即$0<I^t_{\text{ave},i}<I_{\text{cr},i}$)，函数值区间为(0，1)，表示设备得到充分利用的隶属度。

对式(2)中的ω_t和α_t(t=1，…，5)，文章采用差异化权重法分配权重，这种方法利用不同年的指标差异性反映各年的重要程度，某一年的指标与其他年的指标差异越大，表明该年有更多项目的供电效益发生变化，因此该年更能够表征负荷增长速度差异对项目供电效益变化的影响，其权重也越大[14]。与层次分析法相比，差异化权重法基于样本效益逐年变化赋权，可避免主观赋权带来的偏差，更适合作为确定项目供电效益各年权重的方法。以ω_t为例，x_j取1，ω_t的计算公式为

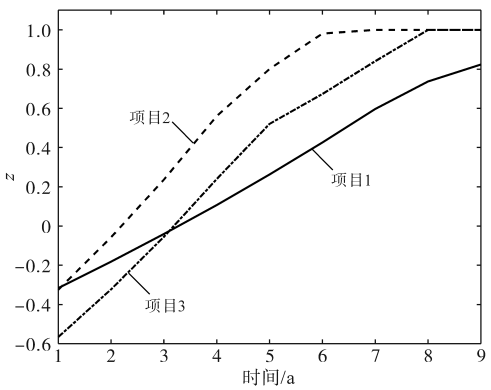
$$\begin{cases}\omega_t=d_{\text{ave},t_1}/\sum\limits_{t=1}^{5}d_{\text{ave},t}\\ d_{\text{ave},t_1}=\sum\limits_{t_2=1}^{5}\dfrac{d_{t_1,t_2}}{5}\\ d_{t_1,t_2}=\sum\limits_{j=1}^{M}[(y_{j,t_1}-y_{j,t_2})^2/M]\\ y_{j,t}=\sum\limits_{i\in U_j}f_1(0.8I_{\text{lim},i}-I^t_{\max,i})\end{cases} \tag{5}$$

式中：$y_{j,t}$为项目j第t年的供电裕度；$d_{t1,t2}$为第t_1年和第t_2年指标间的差异性；$d_{\text{ave},t1}$为第t_1年指标的平均差异性。

为更好地说明采用差异化权重法加权求和得到项目投产后5 a的供电效益综合水平能表征负荷增长速度差异对项目供电效益的影响，以图1为例，假设受资金限额每年只能投资图1中3个项目中任意一个，如果根据投产后首年的投资效益确定项目入选年，由于3个项目前3 a的供电裕度效益都相等，此时根据设备利用率效益差异得到项目先后排序为项目2、项目1、项目3；而采用差异化权重法时，项目先后排序为项目2、项目3、项目1，该排序计及项目间供电效益变化速度的差异，将供电裕度效益下降更快的项目3排在项目1之前，因此更为合理。



(a)供电裕度效益函数y逐年变化曲线



(b)设备利用率效益函数z逐年变化曲线

图1　项目供电效益函数值逐年变化示例

Fig.1　Example of annual change of project power supply benefit function value

对存在效益耦合关系的项目组合，以图2为例，同一条线路的安全隐患整改工程、分支线改造工程和配电自动化改造工程的可靠性技术效益受到入选年更早的其它项目影响，原因是其它项目改变了可靠性计算的输入参数(如元件故障率和元件连接关系等)，使得可靠性指标随着项

目组合的变化而变化，如式(2)中$SAIDI_k^{(0)}$和$SAIDI_k^{(1)}$的取值。文章采用场景枚举法得到同一线路的所有项目组合情况和对应的可靠性技术效益，图2中项目T_1的可靠性技术效益为$\Delta SAIDI_{T_1}=$

$$\begin{cases}0 & x_{T_1}=0\\ s_0-s_1 & x_{T_1}+r_1<x_{T_2}+r_2 \quad x_{T_1}+r_1<x_{T_3}+r_3 \quad x_{T_1}\neq 0\\ s_2-s_3 & x_{T_2}+r_2<x_{T_1}+r_1<x_{T_3}+r_3 \quad x_{T_1}\neq 0\\ s_3-s_5 & x_{T_3}+r_3<x_{T_1}+r_1<x_{T_2}+r_2 \quad x_{T_1}\neq 0\\ s_4-s_6 & x_{T_1}+r_1>x_{T_2}+r_2 \quad x_{T_1}+r_1>x_{T_3}+r_3 \quad x_{T_1}\neq 0\end{cases} \tag{6}$$

其中，r_1，r_2和r_3为[0，1]范围内的随机数，作用是使入选年相同的项目满足式(6)中的不等式条件。

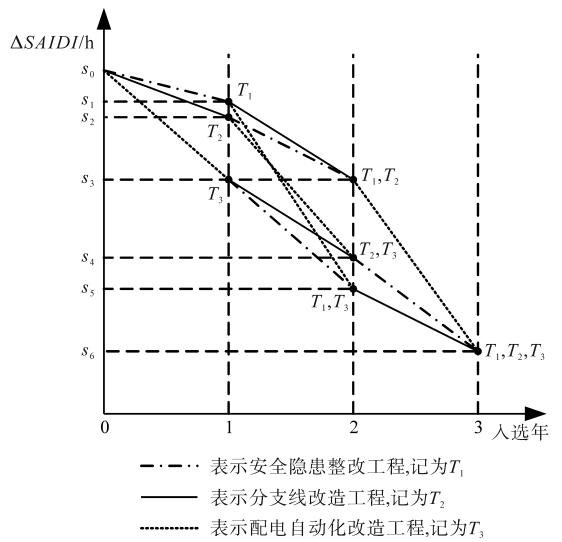


图2　配电网规划项目效益耦合特性

Fig.2　Benefit coupling characteristics of distribution network planning projects

1.2　约束条件

项目优选模型建立如下约束条件：

1)电压偏差约束。参照供电企业对配电设备缺陷的分批消缺工作[15]，采用低电压问题累计解决数量不小于目标值来表征配电网电压偏差问题的整体改善情况，公式为

$$\sum_{t=1}^{t_0}\sum_{j=1}^{M}Y_j\cdot h_{j,t}\geqslant\frac{t_0}{5}\sum_{j=1}^{M}Y_j \tag{7}$$

式中：Y_j为项目j投产后配电设备低电压问题得到解决的数量；t_0为累计年。

2)供电安全性约束。解决严重安全隐患问题的项目属于必建项目，必建项目还包括解决过载问题、无电区域供电问题、10 kV线路严重低电压问题(9.3 kV以下)和台区严重低电压问题(180 V以下)。必建项目的公式为

$$x_j=t \quad j\in Q_t \tag{8}$$

式中：Q_t为第t年的必建项目集。

3)政策导向约束。政策导向是指供电企业响应国家政策投资如光伏扶贫、异地扶贫搬迁、贫困村通动力电等带有社会责任的项目，其中分布式电源接入系统配套建设项目和电动汽车充换电设施配套网架完善项目是配电公司投资的重要方向。供电企业对分布式电源和电动汽车充换电设施装接容量的规划目标可表示为

$$\begin{cases}\sum_{t=1}^{5}\sum_{j=1}^{M}G_j\cdot h_{j,t}\geqslant G_0\\ \sum_{t=1}^{5}\sum_{j=1}^{M}S_j\cdot h_{j,t}\geqslant S_0\end{cases} \tag{9}$$

式中：G_j，S_j，G_0，S_0分别为项目j的分布式电源容量和充换电设施容量、分布式电源目标并网容量和充换电设施目标装接容量。

4)投资总额约束。项目组合的总投资成本不超过当年投资限额，公式为

$$\sum_{j=1}^{M}E_j\cdot h_{j,t}\leqslant E_t \tag{10}$$

式中：E_j为项目j的投资成本；E_t为第t年的投资限额。

5)项目时序关系约束。对建设上存在先后时序关系的项目组合，例如新出线路的联络工程必须在新建线路建设完成后进行，可表示为

$$x_{j_1}-x_{j_2}\geqslant 0 \tag{11}$$

式(11)表示只有项目j_1被选中后，项目j_2才可能被选中。

2　模型求解

2.1　IMOPSO算法

文章所建立的优选模型属于多目标、静态、约束离散优化问题，对此采用改进的多目标粒子群算法(improved multi-objective particle swarm optimization，IMOPSO)求解模型，相较于前决策方法，IMOPSO算法不用给定目标权重，避免了权重大小引起的误差，文献[16]结果表明：IMOPSO算法的复杂度低于基于非占优排序的遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm，NSGA-Ⅱ)，且寻优能力上强于NSGA-Ⅱ。

模型求解流程如图3所示。具体求解过程为：

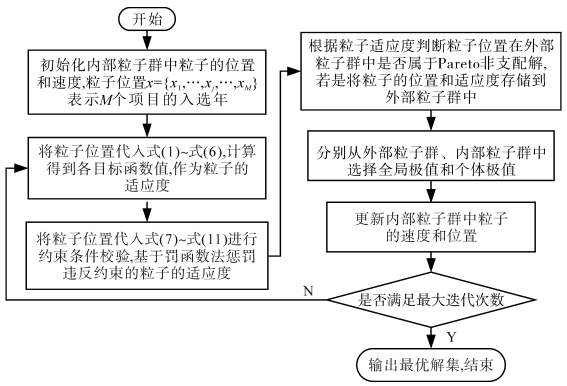


图3　模型求解流程

Fig.3　The process of solving the model

步骤1：初始化内部粒子群，包括种群规模、每个粒子的位置和速度，其中位置表示优选模型的解，每个解是由M个项目入选年组成的项目组合方案，公式为

$$\begin{cases} x_n=\{x_{n1},\cdots,x_{nj},\cdots,x_{nM}\} & n=1,\cdots,N \\ v_n=\{v_{n1},\cdots,v_{nj},\cdots,v_{nM}\} & n=1,\cdots,N \end{cases} \tag{12}$$

式中：x_n，v_n分别为粒子n的位置和速度；x_{nj}为解x_n中项目j入选年，取值范围为{0，1，⋯，5}；N为种群规模。

步骤2：将解x_n代入式(1)~式(6)，计算得到各目标函数值$F_e(x_n)$ (e=1，⋯，4)，作为粒子n的适应度。

步骤3：将解x_n代入式(7)~式(11)，当解x_n违反约束条件时，基于罚函数法惩罚粒子n的适应度[17]，公式为

$$F_e(x_n)=F_e(x_n)-\sigma L \quad e=1,\cdots,4 \tag{13}$$

$$L=\begin{cases} 0 & x_n\text{满足约束条件} \\ \Gamma & x_n\text{违反约束条件} \end{cases} \tag{14}$$

式中：σ为惩罚因子；L为惩罚项；Γ为一较大整数。

步骤4：判断解x_n在外部粒子群中是否属于Pareto非支配解，若是，将解x_n加入外部粒子群中；否则判断下一个解x_{n+1}，直到x_N。

步骤5：分别从内部、外部粒子群中选择个体极值p_n、全局极值g_{best}，其中g_{best}选择策略为：将外部粒子群的适应度空间等分成若干个网格，使用轮盘赌方法选择网格，再从被选中的网格中随机选择一个解作为g_{best}，网格被选择的概率公式为

$$\begin{cases} P_a=\dfrac{1}{q_a^2}\Big/\sum\limits_{a=1}^{A}\dfrac{1}{q_a^2} \\ q_a=\sum\limits_{\text{distance}(a,b)\leqslant 6}\dfrac{\rho_a}{[\text{distance}(a,b)+1]^2} \\ \text{distance}(a,b)=\sqrt{\sum\limits_{e=1}^{4}\{\text{pos}[a,F_e]-\text{pos}[b,F_e]\}^2} \end{cases} \tag{15}$$

式中：P_a，ρ_a和q_a分别为网格a被选择的概率、密度和考虑相邻网格密度的综合密度；ρ_a等于网格a包含的非支配解数量；A为综合密度大于零的网格总数；distance(a，b)为网格a，b间的欧氏距离；pos[a，F_e]为网格a在F_e方向的序号坐标值。

步骤6：更新内部粒子群所有粒子的位置和速度，公式为

$$\begin{cases} v_{nj}=v_{nj}w+c_1r_1(p_{nj}-x_{nj})+c_2r_2(g_j-x_{nj}) \\ x_{nj}=x_{nj}+v_{nj} \end{cases} \tag{16}$$

式中：w为惯性权重；c_1，c_2为学习因子；r_1，r_2为[0，1]范围内的随机数；p_{nj}，g_j分别为个体极值p_n和全局极值g_{best}中项目j的入选年。

步骤7：判断是否达到最大迭代次数，若是，输出最优解集，结束运行，否则返回步骤2。

2.2　筛选项目组合方案

IMOPSO算法求解结果是Pareto最优解集R_0，即一系列目标各有优势的项目组合方案。为筛选出最优的项目组合方案，文章定义协调性指标F_5衡量配电公司每年对各个供电分区的规划投资的均衡程度，指标值越小，表示该项目组合方案下各地区的规划投资越均衡，公式为

$$F_5=\sum_{t=1}^{5}\text{var}\left[\frac{m_{l,t}}{M_l}\right] \quad l=\text{A+,A,B,C,D,E} \tag{17}$$

式中：var[·]为方差计算；l为供电分区类型；M_l，$m_{l,t}$分别为l供电分区的项目数和第t年的入选项目数。

根据供电企业对各个目标的偏好，文章对最优解集进行多级筛选：首先计算R_0中每个解的协调性指标F_5，从R_0中选择F_5前50%的解构成子集R_1，然后从R_1中选择可靠性经济效益F_4前10%的解构成子集R_2，再从R_2中选择供电裕度效益F_1前5%的解构成子集R_3，从R_3中选择可靠性技术效益F_3前1%的解构成子集R_4，最后选择设备利用率效益最大的解作为最优项目组合方案。

3　算例验证

为验证文章所建立项目优选模型的有效性，以某地区的项目库作为算例，项目库共有145个项目，总投资成本为18 396.552 5万元，涵盖各个供电分区的规划问题，A，B，C和D类供电分区的项目数量分别为10，21，32和82。按项目目的划分，有57个供电能力项目、20个供电质量项目、45个供电可靠性项目、21个供电安全性项目和2个政策导向项目。按项目是否必选划分，有41个

必选项目和104个非必选项目。

设该地区投资限额为4 000万元/a，规划周期为5 a，货币贬值率为6.83%。各个供电分区的供电可靠性目标$SAIDI^{(2)}$、产电比μ和电价η如表1所示。根据差异化权重法，供电裕度权重ω_t和设备利用率权重α_t如表2所示。

表1 不同供电分区的产电比等数据

Tab.1 Data such as the production ratio of each power

供电分区	$SAIDI^{(2)}$/(h·户$^{-1}$)	μ/[元·(kW·h)$^{-1}$]	η/[元·(kW·h)$^{-1}$]
A	0.87	54.902 4	0.423 6
B	3	45.337 8	0.423 6
C	12	33.114 5	0.423 6
D	24	17.414 6	0.423 6

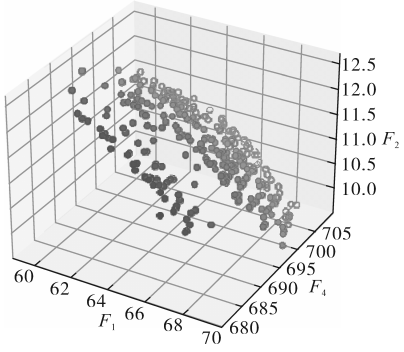
表2 供电效益权重计算结果

Tab.2 Calculation result of power supply benefit weight

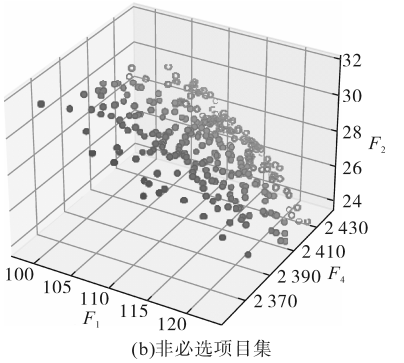
t/a	ω_t	α_t
1	0.220 8	0.343 7
2	0.162 5	0.152 2
3	0.149 1	0.113 7
4	0.172 7	0.154 6
5	0.295 0	0.235 8

按照以下3种情形对上述项目库进行优选：

Case$_1$：基于文章所建立的优选模型及其求解算法，IMOPSO算法得到的最优解集如图4所示，优选结果如表3所示。



(a)必选项目集



(b)非必选项目集

图4 项目库的最优解集

Fig.4 The optimal solution set of the project library

表3 Case$_1$部分项目的优选排序结果

Tab.3 Optimal sorting results of some projects in Case$_1$

项目编号	入选年	项目编号	入选年	项目编号	入选年	项目编号	入选年
1	5	11	2	21	3	31	5
2	2	12	2	22	5	32	1
3	1	13	1	23	1	33	4
4	1	14	1	24	1	34	2
5	3	15	2	25	2	35	2
6	3	16	5	26	1	36	5
7	5	17	3	27	2	37	2
8	3	18	4	28	5	38	4
9	2	19	3	29	5	39	5
10	2	20	3	30	4	40	5

Case$_2$：不考虑负荷增长速度快慢对项目供电效益的影响和项目的紧急程度，优选结果如表4所示。

表4 Case$_2$部分项目的优选排序结果

Tab.4 Optimal sorting results of some projects in Case$_2$

项目编号	入选年	项目编号	入选年	项目编号	入选年	项目编号	入选年
1	5	11	1	21	2	31	4
2	2	12	2	22	4	32	2
3	1	13	1	23	1	33	3
4	1	14	1	24	1	34	4
5	3	15	1	25	2	35	3
6	5	16	4	26	1	36	4
7	3	17	4	27	1	37	5
8	5	18	3	28	4	38	3
9	2	19	3	29	4	39	5
10	2	20	3	30	3	40	3

Case$_3$：在文章所建立的优选模型基础上进一步考虑弹性预算影响，设该地区年投资限额允许偏差为10%，5 a预算总额固定，优选结果如表5所示。

表5 Case$_3$部分项目的优选排序结果

Tab.5 Optimal sorting results of some projects in Case$_3$

项目编号	入选年	项目编号	入选年	项目编号	入选年	项目编号	入选年
1	3	11	2	21	2	31	5
2	2	12	2	22	4	32	1
3	1	13	1	23	1	33	3
4	1	14	1	24	1	34	2
5	2	15	2	25	2	35	3
6	5	16	5	26	1	36	4
7	3	17	3	27	2	37	3
8	3	18	3	28	4	38	3
9	1	19	4	29	4	39	5
10	2	20	4	30	4	40	3

$Case_1$，$Case_2$和$Case_3$的每年投资额和各目标效益如表6和表7所示。

表6　$Case_1$，$Case_2$和$Case_3$的每年投资额

Tab.6　The annual investment in $case_1$, $case_2$ and $case_3$

万元

情形	第1年	第2年	第3年	第4年	第5年
$Case_1$	3 947.14	3 873.14	3 978.70	3 388.95	3 208.62
$Case_2$	3 994.83	3 964.05	3 975.02	3 948.86	2 513.79
$Case_3$	4 288.34	4 137.34	3 431.54	2 819.02	3 596.62

表7　$Case_1$，$Case_2$和$Case_3$的投资效益

Tab.7　Investment benefits of $case_1$, $case_2$ and $case_3$

情形	F_1	F_2	F_3/(h·户$^{-1}$)	F_4/万元	F_5
$Case_1$	173.097 8	39.609 4	375.773 3	3 111.139 4	0.268 5
$Case_2$	132.275 3	29.678 9	359.436 6	3 143.250 8	0.344 7
$Case_3$	176.373 8	38.065 9	375.773 3	3 137.573 7	0.286 6

对比表3和表4可知，由于$Case_1$考虑了负荷增长速度快慢对项目供电效益的影响，对供电裕度效益F_1随入选年增大下降较快的项目，优选模型能够将其入选年排序靠前，例如项目6，8和17；$Case_1$对可靠性技术效益进行奖优罚劣，使得可靠性指标低于规划目标的项目能够排序靠前，例如项目35和37。$Case_2$对供电效益随入选年变化速度不敏感，更倾向于把可靠性经济效益F_4更高的项目排序靠前，如项目7，30，38和40。由表7可知，$Case_1$优选结果的供电裕度效益和设备利用率效益都显著优于$Case_2$。

对比表3和表5可知，由于$Case_3$考虑了弹性预算影响，对效益和成本双高的项目，优选模型能够将其入选年排序更早，例如项目1，5，7，9和18，使得表6中$Case_3$前两年的投资额增加。由表7可知，$Case_3$相较于$Case_1$能够获得更高的供电裕度效益F_1和供电可靠性经济效益F_4，设备利用率效益F_2和协调性指标F_5有小幅度下降，原因是弹性的预算能够使投资效益（主要是F_1和F_4）下降较快的项目尽早完成，避免了刚性约束。因此，在资金总额一定的情况下考虑弹性预算，能够更合理地分配资金，产生更高的投资效益。

4　结论

文章提出了一种多属性多阶段配电网规划项目优选模型，得到未来5 a的项目组合方案。以某地区项目库为例验证所提模型和求解方法的有效性，算例结果表明：

1）基于差异化权重法加权求和得到项目投产后5 a的供电效益综合值，定量表征了负荷增长速度对项目供电效益的影响，与以往的模型相比，所提优选模型对供电效益变化更加敏感，能够在供电能力上对项目进行更为合理的排序。

2）采用IMOPSO算法求解模型，避免了目标权重大小对优选结果的影响，分布均匀的Pareto最优解集验证了该算法的有效性。

3）所提模型综合考虑了项目的紧急程度、技术效益和经济效益，得到的项目组合方案兼顾项目的紧急程度和多区域多目标提升，更加贴近供电企业的投资期望。

4）在所提模型的基础上进一步考虑弹性预算，能够更合理地分配资金，使投资效益下降较快的项目尽快完成，从而获得更高的投资效益。

参考文献

[1] 伍也凡，刘浩田，肖振锋，等. 考虑源-网-荷不确定性的增量配电网规划研究综述[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(8)：177-187.
WU Yefan，LIU Haotian，XIAO Zhenfeng，et al. Review of incremental distribution network planning considering the uncertainty of source-network-load[J]. Power System Protection and Control，2021，49(8)：177-187.

[2] 张永斌，张漫，王主丁，等. 高中压配电网网架结构协调规划方案[J]. 电力系统自动化，2021，45(9)：63-70.
ZHANG Yongbin，ZHANG Man，WANG Zhuding，et al. Coordinated planning scheme for grid structure of high and medium voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(9)：63-70.

[3] 罗宁，贺墨琳，高华，等. 基于改进的AHP-CRITIC组合赋权与可拓评估模型的配电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(16)：86-96.
LUO Ning，HE Molin，GAO Hua，et al. Comprehensive evaluation method for a distribution network based on improved AHP-CRITIC commbination weighting and an extension evaluation model[J]. Power System Protection and Control，2021，49(16)：86-96.

[4] 张华一，文福拴，张璨，等. 基于前景理论的电网建设项目组合多属性决策方法[J]. 电力系统自动化，2016，40(14)：8-14.
ZHANG Huayi，WEN Fushuan，ZHANG Can，et al. Prospect theory based multiple-attribute decision-making method for determining portfolio of construction projects in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(14)：8-14.

[5] 陆野，何永秀，吕媛，等. 基于分层序列法的配电网项目优选研究[J]. 山东电力技术，2021，48(11)：1-6.
LU Ye，HE Yongxiu，LÜ Yuan，et al. Research on distribution network project optimazation based on stratified sequencing method[J]. Shandong Electric Power，2021，48(11)：1-6.

[6] 沈美燕，胡哲晟，刘曌煜，等. 考虑效益耦合和时序关联特性的配电网规划项目多阶段双Q优选[J]. 电力自动化设备，

2020，40(6)：22-28.
SHEN Meiyan，HU Zhesheng，LIU Zhaoyu. Optimal multi-stage dual-Q selection for distribution network planning projects considering benefit coupling and timing correlation characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40(6)：22-28.

[7] HEIDARI S，FOTUHI M. Integrated planning for distribution automation and network capacity expansion[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2019，10(4)：4279-4288.

[8] 王泽祺，刘友波，沈晓东，等. 考虑风险测度的配电网精准投资项目优选模型[J]. 电网技术，2021，45(1)：216-226.
WANG Zeqi，LIU Youbo，SHEN Xiaodong，et al. Risk constrained investment portfolio model for distribution network projects with efficiency optimization[J]. Power System Technology，2021，45(1)：216-226.

[9] 荆朝霞，曾丽. 基于改进层次分析法的配电网中压改造项目迫切度分析[J]. 电力系统自动化，2011，35(4)：92-95.
JING Zhaoxia，ZENG Li. Analysis on urgency degrees of distribution network reconstruction scheme based on advanced AHP [J]. Automation of Electric Power Systems，2011，35(4)：92-95.

[10] 钱科军，谢鹰，张新松，等. 考虑充电负荷随机特性的电动汽车充电网络模糊多目标规划[J]. 电网技术，2020，44(11)：4404-4414.
QIAN Kejun，XIE Ying，ZHANG Xinsong，et al. Fuzzy multi-objective optimization of electric vehicle charging network with stochastic characters of charging load[J]. Power System Technology，2020，44(11)：4404-4414.

[11] 陈诗杰，向月，刘俊勇，等. 考虑负荷不确定性与差异化需求的配电网网架结构混合多属性评价优选模型[J]. 电力自动化设备，2020，40(11)：24-36.
CHEN Shijie，XIANG Yue，LIU Junyong. Mixed multi-attribute evaluation and optimization model for distribution network configuration considering and uncertainty and different demands [J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40(11)：24-36.

[12] 李闫远，刘会家，肖隆恩，等. 基于自动区域故障模式与后果分析法的配电网可靠性评估[J]. 三峡大学学报(自然科学版)，2015，37(2)：55-58.
LI Yanyuan，LIU Huijia，XIAO Longen，et al. Reliability evaluation of distribution system based on automatic area failure mode and effects analysis method[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)，2015，37(2)：55-58.

[13] 尹卿宇，徐启峰，周洁. 配电网设备利用率的组合智能评价方法[J]. 智慧电力，2020，48(11)：55-61.
YIN Qingyu，XU Qifeng，ZHOU Jie. Combined intelligent evaluation method of equipment utilization rate in distribution network[J]. Smart Power，2020，48(11)：55-61.

[14] 喻小宝，谭忠富. 改进霍尔三维视角下智能电网差异化评价研究[J]. 现代电力，2015，32(4)：42-48.
YU Xiaobao，TAN Zhongfu. Differentiated evaluation of smart grid in the improved hall three-dimensional perspective[J]. Modern Electric Power，2015，32(4)：42-48.

[15] 王玉贵. 配电线路运检[M]. 北京：中国电力出版社，2015.
WANG Yugui. Distribution line operation inspection[M]. Beijing：China Electric Power Press，2015.

[16] 齐燕. 带约束多目标粒子群算法的研究和应用[D]. 成都：电子科技大学，2022.
QI Yan. Research and application of constrained multi-objective particle swarm optimization[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology，2022.

[17] 马文彪，程亮，陈红坤. 考虑电动汽车有序充电的主动配电网网架规划[J]. 电力科学与技术学报，2020，35(3)：83-91.
MA Wenbiao，CHEN Liang，CHEN Hongkun. Framework planning considering coordinated charging of electric vehicles in active distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2020，35(3)：83-91.

收稿日期：2022-10-08
修改稿日期：2022-11-01