第49卷 第6期 2025年3月25日
DOI：10.7500/AEPS20240613008
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 49 No. 6 Mar. 25，2025

面向用电碳计量的备用碳表系统优化配置方法

郭魁星[1]，李姚旺[1,2]，何晓宜[2]，刘　恒[3]，李雪城[3]，张　宁[1,2]
（1. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京市 100084；2. 清华四川能源互联网研究院，四川省成都市 610213；
3. 国网北京市电力公司，北京市 100031）

摘要：电力碳表系统是实现实时、精准用电碳计量的重要载体。“碳达峰·碳中和”目标的深入实施，对电力碳表计量准确性和连续性的要求愈发严格，仅靠独立碳表系统难以应对越来越高的要求，亟须探索备用碳表系统的优化配置方法。文中根据电力碳计量具有“牵一发而动全身”的特性和用电碳计量与电力潮流间的强耦合关系，提出了一套备用碳表系统优化配置方法。该方法采用分步优化的方式。首先，在保证碳表系统能够完整计量电力系统全量碳信息的前提下，提出了以配置成本最低为目标的最优备用碳表装置数量确定方法。然后，以最小化备用碳表系统计量误差为目标，提出了备用碳表装置优化布点方法。最后，基于PJM 5节点系统和中国某地市实际电力系统的运行数据开展算例仿真。仿真结果表明，该方法能够在保证电力系统完整碳排放信息计量的前提下，以最小的备用碳表系统配置成本，实现不超过0.2%的碳排放计量误差。

关键词：低碳电力系统；电碳计量；电力碳表系统；碳排放

0　引言

准确、合理的用电碳计量技术是支撑电力系统低碳转型的基础性技术之一[1-2]。自2021年以来，国家相继印发了多项计量发展规划与计量标准体系实施方案，对中国用电碳排放领域的计量工作进行了全面规划[3]。

目前，中国主要采用电网平均排放因子法核算用电碳排放量。该方法原理简单、易于操作，但其计量时空间分辨率较为粗放，在高比例新能源接入趋势下，其计量误差将愈发明显[4]。已有研究提出了边际碳排放因子法[5-6]、合作博弈法[7-9]、碳排放流追踪法[10-13]等改进方法[14]。在诸多改进方法中，碳排放流追踪法的理论体系较为完整，实践经验较为丰富，受到了学术界和工业界的广泛关注。为支撑该理论的实际工程应用，碳表系统应运而生。文献[15]提出了面向实时用电碳计量的碳表系统概念，该系统主要由分散设置在全网各处的碳表、电碳平台以及通信链路组成，其借助“中心式”平台的方式实现用电碳排放监测功能。然而，该系统与传统“去中心化”的表计概念仍未完全契合，难以开展表计的校准检定工作，当考虑计量误差分析时，该方案不易开展计量误差来源溯源，也不易开展误差责任的界定。为此，文献[16-17]提出了“去中心化”的碳表装置，该碳表装置采用在智能电表中内嵌碳计量模块的方案，基于碳排放流迭代算法和表间通信方式实现碳排放因子的本地计算。基于该思路，诸多研究在碳表系统不确定度、考虑交易的碳表系统等方面进行了进一步的探索与完善[18-20]。目前，碳表系统已经在中国大连、东莞等地进行了示范应用[21-22]。

在电力系统中，电能表的计量结果与电费结算息息相关。为了保障生产生活电能计量的准确性和连续性，通常选择在关键位置安装备用电能表[23-25]。对于碳表系统而言，同样存在这方面的要求。随着碳关税等政策的落地，碳表的计量结果也将与贸易结算结果紧密关联，碳表系统未来将同样有配置备用表计的需求。目前，鲜有研究关注碳表系统的备用问题，尚无关于备用碳表系统优化配置方法的研究。

为此，本文首先提出了备用碳表系统的概念。由于碳排放流计算具有“牵一发而动全身”的特点[24]，备用碳表系统配置需要系统性地进行考虑。因此，本文进一步提出了面向备用碳表系统的分步优化方法：第1步，在保证碳表系统能够实现完整计量的前提下，提出了面向备用碳表系统的最优碳表数量确定方法；第2步，以最小化备用碳表系统计量

收稿日期：2024-06-13；修回日期：2024-11-22。
上网日期：2024-12-31。
国家电网有限公司总部科技项目（5700-202411271A-1-1-ZN）。

误差为目标，提出了碳表装置优化布点方法。基于PJM 5节点系统和中国某地市实际系统数据开展算例仿真，验证了本文所提方法的有效性。

1　备用碳表系统优化配置方法架构

1.1　碳表系统的基本工作原理

“去中心化”的碳表系统以电力系统碳排放流理论为基础，其主要由分散在全网各处的碳表以及连接各碳表的通信装置组成。通过对源侧发电直接产生碳排放量和发电量、网侧潮流和荷侧用电量等信息的计量，得到全系统各处的碳排放分布情况。“去中心化”碳表系统的工作原理如附录A图A1所示[17]。火电厂和风电场处安装的碳表为源侧碳表，变电站互联线路两端安装的碳表为网侧碳表，用户侧安装的碳表为荷侧碳表。

在源侧，碳表通过烟气监测或实时煤耗计量等方式计算发电侧产生的直接碳排放量；在网侧和荷侧，碳表装置通过在智能电表中安装碳计量芯片的方式实现。网侧碳表布置在与节点相连的所有输入输出线路的两段，其读取智能电表以计量得到有功潮流数据，并通过通信模块获得上游碳表输出的碳排放因子信息，经过本地计算得到所在节点的碳排放因子，并同步给下游碳表。荷侧碳表根据智能电表计量得到的用户负荷结果，结合上游碳表输入的碳排放因子信息，实时输出用户用电间接碳排放数据。

根据碳排放流理论，电力系统中节点i处的碳排放流和有功潮流之间存在一定的数量关系：

$$\sum_{j\in B_1} e_i P_{ij} + e_i P_i^{\mathrm{L}} = -\left(\sum_{k\in B_2} e_k P_{ik} + e_i^{\mathrm{G}} P_i^{\mathrm{G}}\right) \tag{1}$$

式中：B_1和B_2分别为系统中流出和流入节点i的支路所对应节点编号的集合；e_i和e_i^{G}分别为节点i与所连发电机组的碳排放因子；P_{ij}、P_i^{L}和P_i^{G}分别为支路ij、节点i所连负荷和所连发电机组的实际功率。

式(1)的等号左侧表示从节点i流出的所有碳流，等号右侧表示流入节点i的所有碳流。根据式(1)可知，“去中心化”碳表装置通过通信模块获得上游输入的支路及发电机组的碳排放因子大小，同时读取所在节点计量得到的支路潮流及负荷大小，即可本地计算出该节点的碳排放因子e_i：

$$e_i = -\frac{\sum_{k\in B_2} e_k P_{ik} + e_i^{\mathrm{G}} P_i^{\mathrm{G}}}{\sum_{j\in B_1} P_{ij} + P_i^{\mathrm{L}}} \tag{2}$$

由“去中心化”碳表系统的工作原理与特点可知，碳表系统的计量工作是“牵一发而动全身”的。当某一块碳表出现故障时，其计量误差会向下游碳表传递，可能影响附近区域甚至整个系统的计量功能。若由于通信模块故障导致多块碳表同时失灵，则更会给碳表系统的计量工作带来较大的损失。因此，针对备用碳表系统的优化配置问题，必须从整个碳表系统的角度进行分析和决策。

由于网侧和荷侧碳表主要基于电力潮流进行碳排放流或间接碳排放计量，而线路两端的电力潮流仅受网损影响，两者近似相等。此外，对于同一节点所链接的各条线路，节点流出总潮流等于注入总潮流，每个节点也具有一个计量的冗余度。因此，在配置备用碳表系统时，可以通过在合理的位置减少碳计量表计的安装，来实现保障完整计量功能前提下，以一定碳计量为代价（主要来自网损）降低备用碳表系统的配置成本。实现减配碳表装置的场景示意图如附录A图A2所示。

1.2　备用碳表系统的定义

综合考虑电力系统全环节碳计量体系搭建的阶段性特征和对碳排放量、碳流分布等情况进行计量的现实需求，本节给出了备用碳表系统的一般定义：备用碳表系统能够在多块主碳表甚至全部主碳表系统突发失灵时，衔接完成电力系统的碳计量工作，保障对电力系统各环节、各主体的碳排放连续计量，且计量精度在合理范围内。

在备用碳表的应用场景方面，是否配置备用碳表系统主要与对碳计量结果的连续性要求有关。针对碳计量连续性要求较高的系统，或者当出现碳表故障会带来较大经济损失的系统，建议额外配置一套备用碳表系统。

一个完备的备用碳表系统应具有以下特征：

1）满足电力系统全环节完整碳计量的需求。碳表系统的核心功能是厘清电力系统源网荷全环节的碳排放情况，实现对电力系统各主体直接和间接碳排放的计量。因此，备用碳表系统应当具备完整的电力系统碳计量能力，保证在原始碳表系统故障失灵时，备用碳表系统也能够完整计量电力系统全环节、各主体的碳排放信息。

2）经济成本适当，计量误差可控，避免过度布点造成浪费。作为备用表计系统，通常情况下备用碳表系统的使用频率较低。因此，可以通过优化布点的方式，在合适的源、网、荷位置配置备用碳表。在保障完整计量功能、计量误差可控的前提下，可以适当减少配置数量，降低部署成本，使得备用碳表系统的技术经济性维持在合理范围。

1.3　备用碳表系统优化配置思路

根据碳表系统的工作原理与备用碳表系统的一

般定义，一个较为理想的备用碳表系统应实现布置碳表成本低、计量误差小且能保证完整计量功能。

为了实现上述目标，本文将备用碳表系统的优化配置问题转化为一个分步优化问题：首先，求解布置碳表成本最低、满足完整计量需求的备用碳表优化配置方案，当每个表的布置成本基本一致时，该问题可简化为确定最少布置碳表数量的问题；然后，考虑实际电力系统运行中存在的网损，找出计量误差最小的一个碳表装置优化布点方案。备用碳表系统优化配置思路示意图如附录A图A3所示。

2　最优备用碳表数量确定方法

本模型以备用碳表配置成本最小为优化目标：

$$\min\left(\sum_{i,j\in B}c_{ij}u_{ij}+\sum_{i\in B,g\in G}c_{ig}u_{ig}+\sum_{i\in B,d\in D}c_{id}u_{id}\right)\tag{3}$$

式中：B、G、D分别为系统节点、机组和负荷集合；u_{ij}、u_{ig}和u_{id}分别为指示网侧碳表、源侧碳表、荷侧碳表是否布置的二进制变量；c_{ij}、c_{ig}和c_{id}分别为对应网侧碳表、源侧碳表和荷侧碳表的配置成本。针对网侧碳表，$u_{ij}=0$表示支路ij上节点i侧不布置网侧备用碳表，或者并不存在连接节点i和j的支路；$u_{ij}=1$表示支路ij上节点i侧布置了网侧备用碳表；同理，$u_{ig}=u_{id}=0$表示对应机组和负荷不配置备用碳表或不在节点i，$u_{ig}=u_{id}=1$表示配置备用碳表。

本模型约束条件主要包括布置碳表位置约束、完整计量需求约束、无冗余计量约束。

布置碳表位置约束用于保障：只有机组g在节点i时，才能够在相应位置配置源侧碳表；只有支路ij间存在线路时，才能够在线路两端配置网侧备用碳表；只有负荷d在节点i时，才能够在相应位置配置荷侧碳表。该约束如式(4)所示。

$$\begin{cases}u_{ig}L_{\mathrm{ge},ig}\geqslant u_{ig}\\u_{ij}L_{\mathrm{line},ij}\geqslant u_{ij}\\u_{id}L_{\mathrm{load},id}\geqslant u_{id}\end{cases}\tag{4}$$

式中：$L_{\mathrm{ge},ig}$、$L_{\mathrm{line},ij}$和$L_{\mathrm{load},id}$分别为反映机组、支路和负荷连接关系的二进制系数。

完整计量需求约束用于保障备用碳表的布置方案能够实现不计及网损误差情况下电力系统全环节各点碳排放量信息的计量。该约束由式(5)和式(6)组成。

$$\sum_{i\in B,g\in G}u_{ig}=N_{\mathrm{G}}\tag{5}$$

$$\sum_{i,j\in B}u_{ij}+\sum_{i\in B,d\in D}u_{id}\geqslant N_{\mathrm{L}}+N_{\mathrm{D}}-N_{\mathrm{B}}\tag{6}$$

式中：N_{L}为该系统的支路数量；N_{D}为该系统的负荷数量；N_{G}为该系统的发电机组数量；N_{B}为该系统的节点数。

式(5)用于保障系统中所有源侧碳表均有备用碳表，设置该约束的原因是源侧碳表主要用于计量系统注入碳排放，其完全根据本地测量烟气或燃料耗量得到，无法根据冗余电力信息获得。式(6)用于保障系统中配置的网侧碳表和荷侧碳表能够实现全电力系统各节点间接碳排放信息的计量，其设置原理如下：

在源侧碳排放注入信息已知情况下，网侧和荷侧的间接碳排放信息可以完全根据系统潮流情况计算得到。换言之，系统备用碳表只要能够借助“线路两端潮流近似相等”和“节点功率平衡”特性，得到完整的系统潮流分布情况，就能够推导出全系统各节点的间接碳排放信息，故可以转化为求解如下线性方程组的问题：

$$\begin{cases}\sum_{j\in B_1}P_{ij}+P_i^{\mathrm{L}}=-\left(\sum_{k\in B_2}P_{ik}+P_i^{\mathrm{G}}\right)\\P_{ij}=-P_{ji}\end{cases}\tag{7}$$

求解式(7)可以得到各支路端点处的有功潮流大小及流向，即可进一步得到各节点的间接碳排放量。其中，对整个电力系统来说，式(7)展开项共计$N_{\mathrm{B}}+N_{\mathrm{L}}$个，而求解系统各支路端点处有功潮流的大小和流向时，未知量总数为支路两端的端点数即$2N_{\mathrm{L}}$个，所有负荷和发电机组的端点为$N_{\mathrm{D}}+N_{\mathrm{G}}$个。需要通过配置碳表计量，减少方程组中未知数的个数，保障线性方程组可解，才能够满足全系统各节点间接碳排放可计量的要求，故增配的网侧和荷侧碳表数量至少需要$N_{\mathrm{L}}+N_{\mathrm{D}}-N_{\mathrm{B}}$个，进而得到约束式(6)。

为了实现布置碳表数量尽可能小，需要尽量利用式(7)中的每一个方程，避免出现等式左右均为已知量的情况，故设置无冗余计量约束，该约束表达如式(8)和式(9)所示。

$$u_{ij}+u_{ji}\leqslant 1\tag{8}$$

$$\sum_{j\in B}u_{ij}+\sum_{g\in G}u_{ig}+\sum_{d\in D}u_{id}\leqslant\sum_{j\in B}L_{\mathrm{line},ij}+\sum_{g\in G}L_{\mathrm{ge},ig}+\sum_{d\in D}L_{\mathrm{load},id}-1\tag{9}$$

在最优备用碳表数量确定问题中，决定网侧碳表、源侧碳表、荷侧碳表是否布置的二进制变量u_{ij}、u_{ig}和u_{id}为决策变量。

备用碳表成本优化问题为混合整数线性优化问题，可采用目前常用的商用求解器求解。需要说明的是，当每个位置的碳表配置成本相等时，该优化问

题存在多解，每个求得的结果都是满足完整计量需求的备用碳表配置方案。因此，需要进一步探索最小误差下的碳表优化布点问题。

3　最优布点方案确定方法

3.1　备用碳表优化布点模型

电力碳排放因子是开展电力碳计量工作最重要的指标，本优化模型旨在寻找到能够最小化电力碳排放因子计量误差的布点方案。因此，本模型以典型日碳排放因子计量结果的平均绝对误差最小为优化目标，表达式为：

$$\min \frac{1}{N_{\mathrm{T}} b} \sum_{t \in T} \sum_{i \in B} \left| e_{t,i} - e'_{t,i} \right| \tag{10}$$

式中：N_{T}为典型日的时段数量；b为系统节点总数；T为典型日内所有时刻的集合；$e_{t,i}$和$e'_{t,i}$分别为t时刻节点i处碳排放因子的计量值和理论值，$e'_{t,i}$根据潮流数据的理论值结合碳排放流理论求解得到。

本模型约束条件主要包括最小布置碳表数量约束和碳排放因子计算约束。

最小布置碳表数量约束为：在本优化布点问题中，总网侧碳表和荷侧碳表的布置数量等于最少备用碳表数量优化结果。该约束表达式如式(11)所示。

$$\sum_{i,j \in B} u_{ij} + \sum_{i \in B, d \in D} u_{id} = n_{\mathrm{op}} \tag{11}$$

式中：n_{op}为最少备用碳表成本确定方法输出的能够实现碳计量功能的网侧及荷侧最少布置数量。

碳排放因子计算约束包括两个步骤。步骤1为根据碳表布置结果和式(7)，计算得到当前碳表布点方案下各个线路的潮流信息，以及当前计量结果下的线路潮流分布矩阵$\boldsymbol{P}_{\mathrm{B},t}$。该矩阵用$\boldsymbol{P}_{\mathrm{B},t}=(P_{\mathrm{B},ij,t})$表示，若节点$i$与节点$j$间有支路相连，且$t$时刻经此支路流入节点$j$的正向有功潮流为$p$，即$t$时刻支路$ij$的潮流$P_{\mathrm{B},ij,t}=p$，则$P_{\mathrm{B},ji,t}=0$；若流经该支路的有功潮流$p$为反向潮流，则$P_{\mathrm{B},ij,t}=0$，$P_{\mathrm{B},ji,t}=p$；其他情况下，$P_{\mathrm{B},ij,t}=P_{\mathrm{B},ji,t}=0$。该矩阵的计算过程需要借助迭代求解，迭代过程示意图如图1所示。

首先，当前碳表布置情况初始化，得到潮流分布矩阵$\boldsymbol{P}_{\mathrm{B},t_0}$，其中，$t_0$为初始时刻。然后，结合“节点功率平衡”特征，根据式(7)，以节点为单位，对各个节点进行查询和计算，更新系统潮流信息情况，并计算其中仍有待计算的元素数N_1，结合“节点功率平衡”和“线路两端潮流近似相等”特征，分别以节点、线路为单位，对各个节点的流入和流出潮流信息、各个线路两端潮流信息进行计算和补齐，并更新系统潮流分布矩阵。不断重复该过程，直至$\boldsymbol{P}_{\mathrm{B},t}$对应的所有信息全部补齐。上述计算过程得到的潮流计算结果也能够量化出部分线路的网损信息。例如，根据“节点功率平衡”特征计算得到的线路两端潮流，就能够量化得到该线路的网损。因此，本优化模型的主要思路是找到能够尽量多地量化出对碳排放因子计量结果影响较大的网损信息的碳表布点方案。

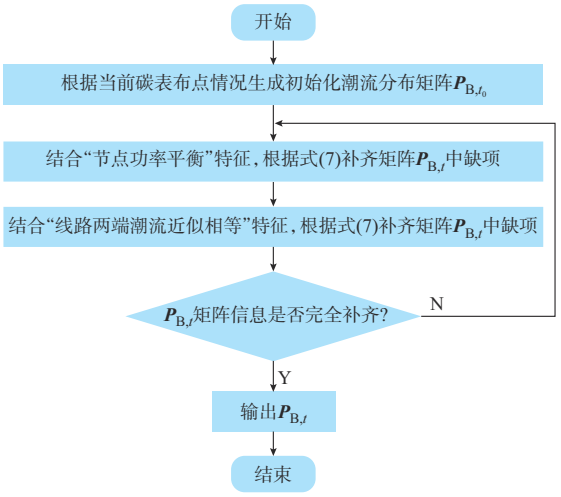

图1　潮流分布求解计算流程图

Fig. 1　Flow chart of power flow distribution solving

步骤2为根据步骤1计算得到全系统各时段的电力碳排放因子，计算表达如下：

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{B},t} = \left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{N},t} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{B},t}^{\mathrm{T}} \right)^{-1} \boldsymbol{C}_{\mathrm{G},t} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{E}_{\mathrm{B},t}$为$t$时刻的节点碳排放因子矩阵，其元素即为该时刻系统各节点碳排放因子的计量结果$e_{i,t}$；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{N},t}$为$t$时刻的节点有功通量矩阵，该矩阵为对角矩阵，表征在潮流方向下，流入各节点有功潮流的绝对值；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{G},t}$为$t$时刻的发电机组碳排放量矩阵，该矩阵中的元素由源侧碳表计量结果确定。

在最优布点方案确定问题中，决定网侧碳表、源侧碳表、荷侧碳表是否布置的二进制变量u_{ij}、u_{ig}和u_{id}为决策变量。

3.2　基于离散粒子群算法的模型求解方法

在备用碳表系统最优布点问题中，碳排放因子计算约束包含线性方程组的迭代求解过程，以及碳排放流计算的矩阵求逆过程，属于非线性约束。因此，备用碳表系统优化布点模型属于混合整数非线性优化问题，本文采用离散粒子群算法进行求解。

在求解过程中，碳排放因子计算约束主要用于建立碳表配置方案与各节点碳排放因子的关系，其采用内嵌迭代求解函数的方式实现，最小布置碳表数量约束采用罚函数的方式处理。针对不满足该约束的方案，将在目标函数中增加罚函数。

4　算例分析

本文首先通过PJM 5节点系统在典型时刻的系统运行情况下对备用碳表系统优化配置方法进行验证。然后，基于中国某地市电力系统典型日的实际运行数据，进一步测试了本文方法在面向实际系统环境时的计算效果。

4.1　PJM 5节点系统算例

4.1.1　备用碳表系统最少布置数量的确定

PJM 5节点系统拓扑如附录A图A4所示。该系统中共存在4个机组、3个负荷，在某一典型时刻，系统稳定运行，仅有节点1处机组的输出功率达到了额定最大功率，实测各支路进线和出线处有功功率、机组有功出力、负荷及碳排放因子等数据，如附录A表A1和表A2所示。

假设网侧和荷侧单个碳表的配置成本相等，在该系统中，根据机组运行和典型机组的数据，节点1、4处为燃煤机组，碳排放因子分别取0.75 $kgCO_2/(kW•h)$和1.00 $kgCO_2/(kW•h)$，节点3、5处为新能源发电机组，碳排放因子分别取0和0.30 $kgCO_2/(kW•h)$。

结合碳流理论和碳表系统布置的现实条件，该系统中安装碳表系统共需要布置碳表19块，其中，源侧布置碳表4块、网侧与负荷侧布置碳表15块。若要建立一套可以实现基本计量功能、成本较低的备用碳表系统，首先应保证源侧碳表的布置，以获得电力系统间接碳排放最上游的碳流数据，并对其余碳表的布点数量、位置进行优化求解，找到最少的布置数量。

本文选择CPLEX求解器对备用碳表系统最少布置数量问题进行求解。在满足布置碳表位置约束、完整计量需求约束、无冗余计量约束的条件下，考虑到该系统各处配置碳表的成本基本一致，可以得到实现该系统所有节点碳势计量的最少布置碳表数量为8块，即源侧布置碳表4块、网侧及负荷侧布置碳表4块。CPLEX求解器优先输出的布置碳表方案如附录A图A5所示。

根据电力系统的特性和碳表系统的工作原理，在确定备用碳表系统最少布置数量的同时，其对应的布点方案并不是唯一的。根据建模分析中给出的约束条件，以该PJM 5节点系统为例，可能的布点方案有1 365种。其中，一部分方案可能由于布置碳表冗余等问题无法满足系统的碳计量需求，但仍应存在大量可行的方案。在实际工程应用中，随着系统节点数的增多和复杂程度的增大，对备用碳表系统可能的布点方案进行穷举显然是难以实现的。部分PJM 5节点系统的备用碳表系统布点方案如附录A图A6所示，这些方案均能够较好满足系统碳计量需求。

4.1.2　考虑网损误差影响的备用碳表优化布点方案

在4.1.1节计算结果的基础上，本文选择使用离散粒子群算法对备用碳表系统的最优布点方案问题进一步求解，希望在满足计量需求、布置碳表成本最低的条件下，得到计量误差最小的备用碳表优化布点方案。本文使用离散粒子群的求解计算过程在软件MATLAB上完成，进行算例测试的电脑配置主频为2.1 GHz，型号为Intel i7-1260P的12核处理器，以及容量为16 GB的内存。

针对该系统，设置离散粒子群算法的种群规模为20个粒子，迭代200次，输出得到的历史最优值及其对应的备用碳表布点方案。经过100次运行后，该算法输出的最优结果有两个（平均绝对误差结果基本一致），如附录A图A7所示。虽然碳表位置在图中标注处存在细微差异，但是两个布点方案对该PJM 5节点系统典型时刻各节点的碳计量误差基本一致，如表1所示，计量得到的平均绝对百分比误差小于0.02%。

表1　备用碳表系统对PJM 5节点系统的计量结果
Table 1　Measurement results of backup carbon meter system for PJM 5-bus system

节点	系统实测值/[$kgCO_2/(kW•h)$]	备用碳表系统计量值/[$kgCO_2/(kW•h)$]
1	0.516 6	0.516 6
2	0.432 7	0.432 7
3	0.032 7	0.032 7
4	0.401 9	0.402 2
5	0.300 0	0.300 0

部分可行的备用碳表布点方案及其误差率比较如附录A图A7所示。其中，方案(a)即为离散粒子群算法求解得到的最优布点方案，平均绝对百分比误差显著小于其他可行的布点方案，验证了本文提出的求解方法的可行性。同时，结合发电机组碳排因子、系统线路网损等数据可以发现，在满足布置碳表位置和计量需求约束的前提下，布置在碳排放因子较大、网损较大的位置附近更可能获得较小的计量误差。

4.2　中国某地市电力系统算例

4.2.1　中国某地市电力系统基本情况

基于中国某地市电力系统的实际运行情况开展仿真分析[17]，系统拓扑如附录A图A8所示。图中：

节点7为换流站，其余节点为变电站；节点1为外省输入节点；节点2、3、9、10、11、12为本省其他地市节点；G1为装机容量为1 000 MW的燃煤机组，碳排放因子为0.80 $kgCO_2/(kW•h)$；G2为水电机组，碳排放因子为0；S1为抽水蓄能电站，电站运行的效率为75%。此外，设外省节点输入电量的碳排放因子为0.78 $kgCO_2/(kW•h)$，本省节点输入电量的碳排放因子为0.69 $kgCO_2/(kW•h)$。

选取某一典型日该系统24 h的实测有功潮流和碳流数据对本文提出的备用碳表系统优化配置方法进行验证，各支路进线和出线处有功功率、机组有功出力、负荷等数据详见文献[25]。

首先，使用CPLEX求解器求解该系统备用碳表优化配置的最少布置数量。可以得到，想要实现对该系统碳流信息的全面计量，需要配置源侧碳表6块，分别布置在节点1、2、3处上游潮流流入端，发电机组G1、G2的流入端和抽水蓄能电站S1的流入端。同时，还需要在各节点间支路的两端和与节点相连的负荷侧布置碳表9块，实现对系统所有节点、支路碳流信息的计量，合计须布置碳表15块。

4.2.2　备用碳表系统最优布点方案

使用离散粒子群算法对该电力系统中符合CPLEX求解结果的备用碳表布置方案进行运算求解，试图找到在所选取的典型日24 h累计计量误差最小的碳表布置方案。由于模型中存在非线性的约束条件，且采取了惩罚函数法，离散粒子群算法并不能保证每次求解都可以找到全局最优解。设置种群规模为2 000个粒子，迭代20 000次的情况下，累计运行算法30次，共有23次输出结果符合系统约束条件且表计数量为备用碳表系统最少布置数量，结果比较有参考价值。其中，误差最小的方案如图2所示。

在该情况下，典型日每时刻各节点的碳排放因子计量误差如表2所示。由表2可知，离散粒子群算法求解得到的备用碳表最优方案在典型日内的每个时刻，对该地市电力系统内各节点碳排放因子的计量平均绝对百分比误差均不超过0.2%。上述结果说明该系统可以较好地适应典型日内随着系统有功潮流变化而带来的碳流变化对碳排放因子计量的影响，可以实现在备用碳表使用数量尽可能少、计量误差尽可能小的情况下，依然较为精准地实现对全系统碳排放因子的计量。由此可见，该方法求解得到的备用碳表优化布点方案是行之有效的，可以实现系统的计量需求，具备实际应用的价值。

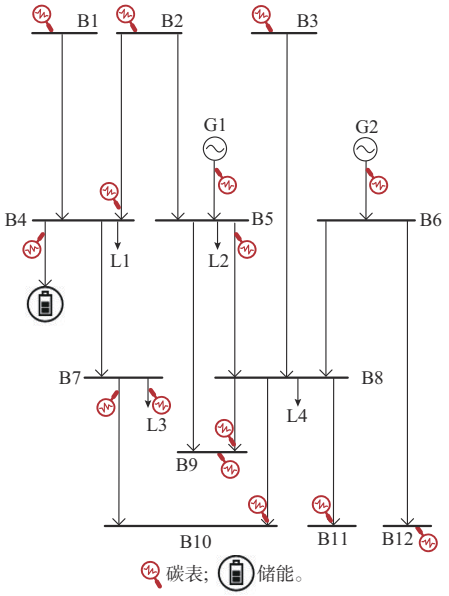

图2　平均绝对误差最小的备用碳表布点方案
Fig. 2　Layout scheme of backup carbon meter with least mean absolute error

表2　典型日的碳排放因子误差
Table 2　Errors of carbon emission factors on typical day

时刻	各节点碳排放因子平均绝对误差/[$kgCO_2/(kW•h)$]	平均绝对百分比误差/%
01:00	0.001 08	0.10
02:00	0.001 96	0.18
03:00	0.001 62	0.15
04:00	0.002 10	0.20
05:00	0.001 62	0.16
06:00	0.002 06	0.20
07:00	0.001 42	0.14
08:00	0.001 48	0.14
09:00	0.001 22	0.11
10:00	0.000 74	0.06
11:00	0.000 94	0.07
12:00	0.000 98	0.09
13:00	0.001 02	0.09
14:00	0.001 18	0.09
15:00	0.001 60	0.12
16:00	0.000 96	0.07
17:00	0.001 42	0.11
18:00	0.001 16	0.09
19:00	0.001 22	0.11
20:00	0.001 36	0.12
21:00	0.001 00	0.08
22:00	0.001 06	0.08
23:00	0.000 98	0.08
24:00	0.000 86	0.08

与此同时，23个使用离散粒子群算法求解得到有参考价值的方案，每种方案得到的典型日累计误差情况如附录A图A9所示。可以看出，虽然本文提出的优化方法中需要求解一个离散非线性的优化问题，但使用离散粒子群算法进行求解在多数情况下都可以得到一个较为理想的解决方案。在23个备用碳表布点方案中，最优方案典型日内碳排放因子计量的平均绝对百分比误差为0.12%，得到的大部分方案平均绝对误差小于0.01 $kgCO_2/(kW•h)$，且有12个方案小于0.005 $kgCO_2/(kW•h)$。

在此基础上，进一步探索了网损校正方案对备用碳表计量精度的影响。考虑网损校正的备用碳表系统计量方式为：首先，根据线路历史数据，对线路网损率进估算；其次，结合估算得到的网损率进行线路潮流校正；最后，根据碳表系统基于碳流理论得到碳排放因子数值。

基于本文所选用的地市电力系统典型日运行情况，采用计算得到的系统平均线路网损率数值(1.20%)开展网损校正，探索网损校正对备用碳表系统计量误差的影响。校正前后系统计量结果的平均绝对百分比误差如图3所示。

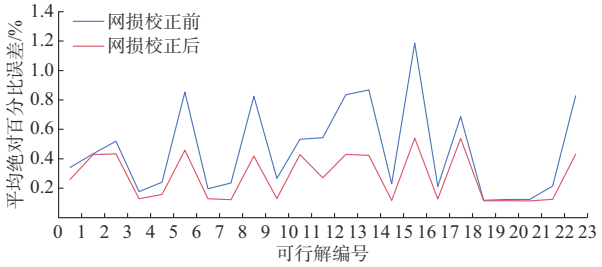

图3　校正前后系统计量结果的平均绝对百分比误差
Fig. 3　Average absolute percentage errors of systematic measurement results before and after calibration

由图3可知，经过网损校正后，备用碳表系统的计量误差均有减小，其中，针对计量误差较明显的场景，该校正方法的精度提升效果较为明显；但对计量误差已经较小的场景，该方法的改进效果相对并不显著。因此，对于网损所带来的计量误差本身就较小的场景，可能需要探索更加精准的网损估计方法来应对。

5　结语

本文结合当前电力碳计量表计的设计体系，考虑碳表系统在故障失灵情况下的冗余备用需求，提出了一套备用碳表系统优化配置方法。该方法采用分步优化的方式，在满足电力系统完整碳计量需求的情况下，确定经济性最优的碳表数量配置方案。在此基础上，以备用碳表系统的计量误差最优为目标，确定碳表装置的优化布点方案。分别通过PJM 5节点系统和中国某地市电力系统的实际数据对本文方法的有效性和效果进行了验证。

由于备用碳表系统的优化问题为混合整数非线性优化问题，本文采用启发式算法进行求解，在面向节点数量较大、考虑的典型日场景较多的情况下，计算效率较低。未来，将进一步研究和探索相关问题的线性近似和加速求解方法，以进一步支撑工程化应用。同时，未来还将探索基于网损误差校正的改进备用碳表优化配置方法。

本文在撰写过程中得到香港大学电机电子工程系李业辉博士和清华大学低碳能源实验室杜尔顺老师的帮助，特此感谢！

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)，扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

[1] 康重庆，杜尔顺，李姚旺，等. 新型电力系统的“碳视角”：科学问题与研究框架[J]. 电网技术，2022，46(3)：821-833.
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833.

[2] 章政文，顾津锦，赵俊华，等. 基于碳卫星与电力排放数据的碳计量[J]. 电力系统自动化，2024，48(1)：2-9.
ZHANG Zhengwen, GU Jinjin, ZHAO Junhua, et al. Carbon measurement based on carbon satellite and electricity emission data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 2-9.

[3] 宋金伟，杨维，周春雷，等. 跨电网的区域电力碳排放因子分布式计算方法[J/OL]. 电力系统自动化[2024-06-13]. http://doi.org/10.7500/AEPS20240319001.
SONG Jinwei, YANG Wei, ZHOU Chunlei, et al. Distributed calculation method for regional power carbon emission factors across power grids [J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2024-06-13]. http://doi. org/10.7500/AEPS20240319001.

[4] 李姚旺，张宁，杜尔顺，等. 基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2830-2842.
LI Yaowang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2830-2842.

[5] 马铭辰，李姚旺，杜尔顺，等. 多时段边际碳排放因子及其不确定性分析[J/OL]. 电力系统自动化[2024-06-13]. http://doi.org/10.7500/AEPS20230905003.
MA Mingchen, LI Yaowang, DU Ershun, et al. Analysis for the

marginal carbon intensity and its uncertainty[J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2024-06-13]. http://doi. org/10.7500/AEPS20230905003.

[6] HUBER J, LOHMANN K, SCHMIDT M, et al. Carbon efficient smart charging using forecasts of marginal emission factors[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284: 124766.

[7] 周全，冯冬涵，徐长宝，等.负荷侧碳排放责任直接分摊方法的比较研究[J].电力系统自动化，2015，39(17)：153-159.
ZHOU Quan, FENG Donghan, XU Changbao, et al. Methods for allocating carbon obligation in demand side: a comparative study [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39 (17): 153-159.

[8] FUDENBERG D, TIROLE J. Game theory[M]. Cambridge, USA: MIT Press, 1991.

[9] 高效，彭建春，罗安.考虑输电阻塞的电网固定成本分摊核仁法[J].电网技术，2007，31(22)：49-53.
GAO Xiao, PENG Jianchun, LUO An. Nucleolus method to allocate fixed cost for interconnected multi-area power network with transmission congestion considered [J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 49-53.

[10] Carbon flows: the emissions omitted: the usual figures ignore the role of trade in the world's carbon economy [EB/OL]. [2024-06-13]. http://www.economist.com/node/18618451.

[11] Carbon footprints: following the footprints[EB/OL]. [2024-06-13]. http://www.economist.com/node/18750670.

[12] 陈晓科，周天睿，李欣，等.电力系统的碳排放结构分解与低碳目标贡献分析[J].电力系统自动化，2012，36(2)：18-25.
CHEN Xiaoke, ZHOU Tianrui, LI Xin, et al. Structure identification of CO_2 emission for power system and analysis of its low-carbon contribution [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 18-25.

[13] 周天睿，康重庆，徐乾耀，等.电力系统碳排放流分析理论初探[J].电力系统自动化，2012，36(7)：38-43.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianyao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43.

[14] 刘昱良，李姚旺，周春雷，等.电力系统碳排放计量与分析方法综述[J].中国电机工程学报，2024，44(6)：2220-2236.
LIU Yuliang, LI Yaowang, ZHOU Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2220-2236.

[15] 张宁，李姚旺，黄俊辉，等.电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J].电力系统自动化，2023，47(9)：2-12.
ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 2-12.

[16] 李业辉，李姚旺，刘昱良，等.基于碳排放流迭代算法的分布式碳表系统(一)：理论方法与分析[J].电网技术，2023，47(6)：2165-2174.
LI Yehui, LI Yaowang, LIU Yuliang, et al. Distributed carbon meter system based on iterative calculation of carbon emission flow (Ⅰ): theoretical method and analysis[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2165-2174.

[17] 李业辉，包维瀚，周特，等.基于碳排放流迭代算法的分布式碳表系统(二)：系统设计与验证[J].电网技术，2023，47(7)：2682-2690.
LI Yehui, BAO Weihan, ZHOU Te, et al. Distributed carbon meter system based on iterative calculation of carbon emission flow (Ⅱ): system design and validation[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2682-2690.

[18] 王春妍，卢达，李贺龙，等.电力碳排放计量网络溯源方法及计量分析[J].电网技术，2024，48(8)：3373-3381.
WANG Chunyan, LU Da, LI Helong, et al. An electric carbon measurement network traceability method and measurement analysis[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3373-3381.

[19] 李姚旺，刘昱良，杨晓斌，等.计及电量交易信息的用电碳计量方法[J].中国电机工程学报，2024，44(2)：439-450.
LI Yaowang, LIU Yuliang, YANG Xiaobin, et al. Electricity carbon metering method considering electricity transaction information [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44 (2): 439-450.

[20] 王春妍，卢达，李贺龙，等.考虑电力市场化交易的电碳表计量及实现方法研究[J].电网技术，2024，48(6)：2297-2306.
WANG Chunyan, LU Da, LI Helong, et al. Measurement and implementation methods of electricity carbon meter considering electricity market-oriented trading [J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2297-2306.

[21] 首款“电碳表”广东挂网试运行[EB/OL].[2024-06-13]. https://wap.peopleapp.com/article/7312922/7150116.
The first “carbon meter” was put into trial operation in Guangdong [EB/OL]. [2024-06-13]. https://wap.peopleapp.com/article/7312922/7150116.

[22] 清华大学与国网江苏省电力有限公司联合发布全国首个电力系统全景碳排放流分析平台与“eCarbon+”智慧碳服务品牌[EB/OL].[2024-06-13]. https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/5085.htm.
Tsinghua University and State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. jointly released the country's first power system panoramic carbon emission flow analysis platform and “eCarbon+” smart carbon service brand [EB/OL]. [2024-06-13]. https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/5085.htm.

[23] 顾哲伟，董勤飞，洪宇峰，等.一种住宅小区居民用电备用电表智能切换装置与方法：CN114221323A[P].2022-03-22.
GU Zhewei, DONG Qinfei, HONG Yufeng, et al. A kind of intelligent switching device and method of standby meter for residential electricity in a residential district: CN114221323A [P]. 2022-03-22.

[24] 康重庆，程耀华，孙彦龙，等.电力系统碳排放流的递推算法[J].电力系统自动化，2017，41(18)：10-16.
KANG Chongqing, CHENG Yaohua, SUN Yanlong, et al. Recursive calculation method of carbon emission flow in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (18): 10-16.

[25] 某地市电力系统典型日实际运行数据[EB/OL].[2024-06-13].https://pan.baidu.com/s/1dLNG-MRSDBZZNi9IhAbthg.
The system data in typical day of a a city power system[EB/OL]. [2024-06-13]. https://figshare. com/articles/dataset/

___/28193666.

郭魁星(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:低碳电力系统、电碳耦合技术。E-mail:gkx22@mails.tsinghua.edu.cn

李姚旺(1993—),男,通信作者,博士,助理研究员,主要研究方向:低碳电力技术、云储能技术、压缩空气储能。E-mail:yaowang_li@126.com

何晓宜(1975—),女,博士,高级工程师,主要研究方向:双碳政策研究、多能源系统、低碳电力技术。E-mail:hexiaoyi@tsinghua.org.cn

(编辑　杨松迎)

Optimal Configuration Method for Backup Carbon Meter System for Carbon Measurement of Electricity Consumption

GUO Kuixing[1], *LI Yaowang*[1,2], *HE Xiaoyi*[2], *LIU Heng*[3], *LI Xuecheng*[3], *ZHANG Ning*[1,2]

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China;
3. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: The electric carbon meter system is an important carrier for realizing real-time and accurate electric carbon measurement. With the deeply implement of the goal of carbon emission peak and carbon neutrality, the requirements for the accuracy and continuity of measurement by electric carbon meter become increasingly stringent. It will be difficult to cope with the increasing requirements only by relying on an independent carbon meter system, and it is urgent to explore the optimal configuration method for the backup carbon meter system. Considering the characteristics of "one hair affecting the whole body" of the electric carbon measurement and the strong coupling relationship between the electric carbon measurement and the power flow, this paper proposes an optimal configuration method of the backup carbon meter system. The method is conducted in a stepwise optimization manner. First, to ensure that the carbon meter system can measure the complete carbon information of the power system, this paper proposes an optimal method to determine the number of backup carbon meter devices with the minimum configuration cost. Then, with the aim of minimizing the measurement error of the backup carbon meter system, this paper proposes a method of optimizing the distribution of backup carbon meter devices. Finally, the simulation test is carried out based on the PJM 5-bus system and the actual power system data of one city in China. The simulation results show that the proposed method can achieve a carbon emission measurement error of less than 0.2% with the minimum configuration cost of the backup carbon meter system, on the premise of ensuring the complete carbon emission information measurement of the power system.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5700-202411271A-1-1-ZN).

Key words: low-carbon power system; electric carbon measurement; electric carbon meter system; carbon emission