

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2024) 06-056-06 中图分类号: TP29

基于碳排放流与负荷识别的流程工业碳排估算

Process Industry Carbon Emission Estimation Based on Carbon Emission Flow and Load Identification

★ 周桂珍, 叶超, 王继磊, 程昊旻 (杭州电力设备制造有限公司桐庐白云源成套电气制造分公司, 浙江 杭州 311500)

摘要: 当今世界碳排放引发的环境问题日益严重, 随着双碳目标的提出, 流程工业的碳减排和碳计量变得十分重要。针对化工行业, 本文主要研究了净购入电力碳排与生产过程碳排的计算方法, 并结合碳排放流理论估算了净购入电力排放, 提出了基于负荷识别的质量平衡法估算工业生产过程排放的方法。本文最后以氯化钙生产工段为例, 通过负荷识别识别出设备类型, 并用曲线拟合的方法得到设备功率与流量的关系从而估算生产过程碳排, 再结合碳排放流理论, 估算出总碳排放量。

关键词: 负荷识别; 生产过程碳排; 碳排放流理论; 总碳排放

Abstract: With the increasingly serious environmental problems caused by carbon emissions in today's world, carbon reduction and carbon measurement in process industries have become extremely important with the proposal of the dual carbon target. For the chemical industry, this paper mainly studies the calculation methods for net purchased electricity carbon emissions and production process carbon emissions, estimates net purchased electricity emissions based on the carbon emission flow theory, and proposes a quality balance method based on load identification to estimate industrial production process emissions. Finally, taking the production section of calcium chloride as an example, equipment types are identified through load identification, and the relationship between equipment power and flow rate is estimated using curve fitting to estimate production process carbon emissions. Combined with carbon emission flow theory, the total carbon emissions are estimated.

Key words: Load recognition; Carbon emissions of production processes; Carbon emission flow theory; Total carbon emissions.

业, 这些典型的流程工业同时也是碳排放重要领域。以钢铁行业为例, 钢铁行业占国内碳排放总量的15%以上, 在工业领域中是仅次于电力行业的第二排放大户。因此流程工业的碳排放计算意义重大, 它可以帮助我们了解企业在生产过程中的碳排放情况, 从而采取有效的措施来减少碳排放, 达到环保和可持续发展的目的。以化工行业为例, 根据《中国化工生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》, 化工行业的碳排放源类别可分为燃料燃烧排放、工业生产过程排放、CO₂回收利用量、净购入电力排放、净购入热力排放和其他温室气体排放。其中, 工业生产过程排放与净购入电力排放, 在钢铁、有色、石油等流程工业的报告指南中都有提及, 因此本文主要研究这两种碳排放的计算方法, 结合碳排放流理论估算净购入电力排放, 并提出基于负荷识别的质量平衡法计算工业生产过程排放的方法。

电力系统碳排放流理论最早是由文献[1]在2011年提出, 这一理论明确了电力系统碳排放流的基本概念, 建立了以支路碳流率、节点碳势等为核心的基本度量指标, 并提出了基于潮流分析的电力系统碳排放流计算方法。但考虑到网损及无功潮流对碳排放流计算的影响, 该方法在面对实际有损网络时会产生较大计算误差, 为此文献[2]通过计算线路等效传输功率和负荷节点等效负荷需求, 把网络损耗责任分摊到负荷, 进而将有损网络转换成无损网络, 实现碳排放流理论的补充和完善, 使其能够应用于实际有损电力系统。文献[3]通过引入灵活可调的网损分配系数, 将顺流跟踪和逆流跟踪方法相结合, 建立了网损碳流的双向分摊模型。然而, 现有

当今世界碳排放引发的环境问题日益严重, 2020年9月, 我国首次提出“双碳”目标, 旨在2030年达到碳达峰, 在2060年实现碳中和。我国的流程工业主要包括钢铁、石油、化工、有色、建材等基础原材料行

的碳排放流算法运算由中心系统完成,不仅需要高额算力和存储资源支撑,而且潮流数据采集的实时性也难以保证,为此文献[4,5]提出了一种用于电力系统碳排放流计算的迭代算法和基于该算法的分布式碳表系统。

NILM最早由Hart博士在上世纪80年代提出,它是一种通过处理和分析总电路信号得出其中负荷能耗情况以及负荷类型的技术。典型的NILM技术通常由数据采集、事件检测、特征提取、负荷分解四部分组成,其中特征提取和负荷识别是至关重要的部分。得益于机器学习和深度学习的迅速发展,NILM在过去的十年中得到了广泛关注,众多学者对其展开了更为全面的研究。在负荷特征提取方面,负荷特征按照采集速率及转换方式通常可以归类为稳态、瞬时及非传统特征。电压电流轨迹常被当作稳态特征用于负荷识别,文献[6]基于前人所提出的V-I轨迹提取负荷信号特征向量,利用V-I轨迹的对称性、面积及峰值等以便于挖掘更深层次的、更全面的负荷特征。当多个相似设备在相同时间开启时,稳态特征往往无法很好地检测出负荷类型,此时瞬态特征通常能够有效捕捉并区分这类情况下的负荷设备,利于算法对负荷的有效监测。常见的瞬态特征为启动瞬间所产生的电流、功率等。在负荷识别方面,文献[7]使用CNN对以较高频率采样的瞬态电信号进行多类设备识别研究,通过研究结果可知,微调的深度架构优于传统的多类分类算法。文献[8]利用深度学习网络LSTM在存储器中存储关键信息的能力,识别从KNN、集成学习和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类器获得的高维特征,有效提高了负荷识别的效率。

本文主要研究了两种碳排的计算方法,并结合碳排放流理论估算了净购入电力排放,提出了基于负荷识别的质量平衡法估算工业生产过程排放的方法。本文以氯化钙生产工段为例,通过负荷识别识别出设备类型,并用曲线拟合的方法得到设备功率与流量的关系从而估算生产过程碳排,进而验证方法的可行性。

1 电力碳排估算方法

1.1 碳排放流理论的概念

化石燃料燃烧后产生温室气体排放到大气中,形成碳排放。而碳排放流则是一种虚拟的网络流,简称虚

拟流。在电力系统中,碳排放流可以定义为依附于电力潮流存在且用于表征电力系统中维持任一支路潮流的碳排放所形成的虚拟网络流^[9]。

1.2 碳排放流理论的意义

在电力系统中,通常用排放因子法和实测法进行碳排放的计算。实测法通过安装二氧化碳监测仪器,对碳排放量进行实时监测。该方法消耗人力物力较大,成本较高,仅适用于小区域、简单生产排放链的碳排放源。因此电力系统碳排放总量计算一般采用排放因子法,根据不同燃料对应的不同碳排放系数来估算碳排放量,即功率乘以排放因子。该方法计算简单,对于大规模、复杂排放链的应用效率较高。然而排放因子法也有局限性,其存在数据更新不及时、时空分辨率体现不够、清洁电力绿色环境价值未体现和计算结果存在误差的问题。为此,我们基于排放因子法,将碳排放依附于电力潮流,提出碳排流理论,为电力系统碳排放拓展了分析方法和研究思路。

1.3 碳排放流指标

(1) 碳排放流量 F ,表示电力系统存在有功潮流时,发电机组在一段时间内于节点或支路产生的 CO_2 排放累加值,单位为 $t^{[9]}$ 。

(2) 碳排放流率 R ,电力系统支路上单位时间内的 CO_2 排放流量,单位为 tCO_2/h ,即

$$R = \frac{dF}{dt} \quad (1)$$

(3) 支路碳流密度 ρ ,系统支路上依附于单位有功功率的 CO_2 碳排放流率,单位为 $t/(MW \cdot h)$,即

$$\rho = \frac{R}{P} \quad (2)$$

(4) 节点碳势 e_n ,节点单位有功功率与发电侧碳排放流率的关系,单位为 $t/(MW \cdot h)$,即

$$e_n = \frac{\sum_{s \in N^+} r_s + \sum_{g \in \Omega^+} p_g \times e_g}{\sum_{s \in N^+} p_s + \sum_{g \in \Omega^+} p_g} \quad (3)$$

式中: N^+ 为与节点 n 相连的支路中有潮流流入节点 n 的所有支路的集合; r 为支路碳流率; s 为支路号; Ω^+ 为与节点 n 相连的发电机组的集合; e 为发电机组碳势强度; g 为支路号。

1.4 碳排放流计算

定义节点有功通量矩阵 P_n ,其对角元素用有功潮流流入该节点 n 的支路组功率与接入该节点 n 的发电机组功率之和表示,非对角元素都为0,即

$$P(n, n) = \sum_{s \in N^+} P_s + \sum_{g \in \Omega^+} P_g \quad (4)$$

式中: N^+ 为流入节点n的有功潮流集合; s 为支路号; Ω^+ 为与节点n相连的发电机组的集合; g 为支路号。

考虑到支路的碳流密度与支路起始节点碳势相等^[10], 通过将式(3)变形可得节点碳势矩阵为

$$E_N = (P_N - P_B^T)^{-1} P_G^T E_G \quad (5)$$

式中: P_N 为节点有功通量矩阵; P_B 为支路潮流矩阵, 表示节点与节点之间功率的传输; P_G 为机组注入功率分布矩阵, 表示发电机组对节点功率的注入; E_G 为发电机组碳排放强度矩阵。

支路潮流单位时间碳排放量矩阵 R_B 为

$$R_B = P_B E_N \quad (6)$$

通过负载的功率矩阵与负载对应节点的碳势相乘, 可得到

$$R_L = P_L E_N \quad (7)$$

式中: R_L 为负载碳排放量矩阵; P_L 为负载功率矩阵, 表示节点对负载功率的传输。

1.5 净购入电力碳排放估算

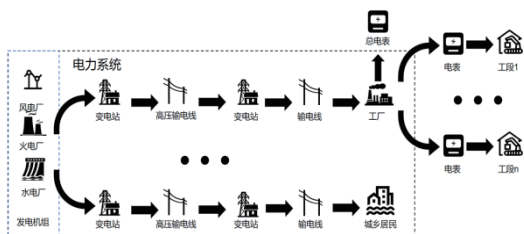


图1 电力系统图

如图1所示, 图中发电机组不同的发电方式对应不同的碳排放强度, 即式(5)中的发电机组碳排放强度矩阵 E_G 。同理机组注入功率分布矩阵 P_G 为发电机组到各个节点注入的功率。变电站、配电站和电网中的连接点作为节点, 输电线作为支路。当获得支路潮流矩阵和节点有功矩阵, 通过式(5)便可以算出节点碳势矩阵。但考虑到数据的难获得性, 因此通过电表接收来自电力系统控制平台下发的节点碳势来进行净购入电力碳排放的估算。工厂作为整个电力系统中的一个负载, 根据式(7), 通过总电表测得工厂总功率, 并接收电力系统控制中心下发的对应节点的节点碳势, 再将两者相乘完成净购入电力碳排放的估算。同样, 对每个工段车间进行功率的采集, 并乘以该节点碳势就可以得到工段车间所产生的电力碳排放估算值。

2 基于负荷识别的生产过程碳排放估算

2.1 质量平衡法

以化工行业为例, 根据《中国化工生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》, 原材料消耗产生的 CO_2 排放可以通过原材料输入的碳量以及产品输出的碳量按碳质量平衡法计算:

$$E_{CO_2_过程排放} = \left[\sum_r (AD_r \times CC_r) - \left[\sum_p (AD_p \times CC_p) + \sum_w (AD_w \times CC_w) \right] \right] \times \frac{44}{12} \quad (8)$$

式中: $E_{CO_2_过程排放}$ 为化石燃料和其它碳氢化合物用作原材料产生的 CO_2 排放, 单位为t; r 为进入企业边界的原材料种类, 如具体品种的化石燃料、具体名称的碳氢化合物、碳电极以及 CO_2 原料; AD_r 为原材料 r 的投入量, 对固体或液体原料以t为单位, 对气体原料以万 Nm^3 为单位; CC_r 为原材料 r 的含碳量, 对固体或液体原料以t碳/t原料为单位, 对气体原料以t碳/万 Nm^3 为单位; p 为流出企业边界的含碳产品种类, 包括各种具体名称的主产品、联产产品、副产品等; w 为流出企业边界且没有计入产品范畴的其它含碳输出物种类, 如炉渣、粉尘、污泥等含碳的废物。

根据公式(8)可知, 影响工业生产工程碳排放的因素为原料的投入量、含碳产品或含碳输出物的产出量以及这三种的含碳量。其中含碳量一般不会发生改变, 因此对投入和产出的量计算变得至关重要。

2.2 负荷识别

负荷识别是指通过分析和处理电力系统中的电流、电压和频率等信息, 来判断电力系统中各个负荷的工作状态和负荷特征。对于原材料投入量、含碳产品产量以及其他含碳输出量, 一般通过统计报表获取对应的活动水平数据, 该方法获取数据简单, 计算方便, 但它不能反映实时的投入量与产出量, 同时也不能精准地得出反应的效率。而使用流量计进行流量检测, 可以获取数据, 但是多个设备就需要多个传感器。因此通过负荷识别的方式, 可以大大减少所需的传感器, 可以识别出工业生产过程中负责原料和产品运输的装置, 并通过分析装置的运行状态和功耗判断运输的活动水平数据。同样通过负荷识别的方式, 可以识别出工业生产过程中负责促进反应的传动装置, 监测判断其反应效率和产品质量。因此结合负荷识别方法, 便可以获得一段时间内反应的效率和活动水平数据。

2.3 负荷识别计算

(1) 采集相关负荷的电信号数据, 并通过负荷事件检测提取出带有启停事件的电信号数据。

(2) 数据预处理, 得益于电流数据良好的叠加性及电压数据的稳定性, 以电压曲线为标准, 获取启停瞬间前后 n 个周期长度的电流、电压序列, 并将居于中间周期启停前后的电流数据作差, 消除正在运行设备的电流对当前设备启停电流变化的影响, 即

$$\begin{cases} I_k = I_k^l \left(j + \left\lfloor \frac{nL}{2} \right\rfloor \right) - I_k^f \left(j + \left\lfloor \frac{nL}{2} \right\rfloor \right) \\ V_k = V_k^l \left(j + \left\lfloor \frac{nL}{2} \right\rfloor \right) \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, L \quad (9)$$

式中: $I_k^l(i)$, $V_k^l(i)$ 为启停后的电流、电压序列; $I_k^f(i)$, $V_k^f(i)$ 为启停前的电流、电压序列; L 表示单周期长度。

(3) 针对原有递归图, 通过去除Heaviside函数实现无阈值递归图, 并利用电压和电流相关性^[12]实现幕次型缩放, 得到自适应压缩递归图, 实现不同负荷特性下RP特征的自适应提取, 即

$$\lambda_k = e^{-|cor(I_k, V_k)|}$$

$$ASRP_{i,j,k}(I_k, V_k) = \|I_k(i) - I_k(j)\| \lambda_k, i, j=1, 2, \dots, L \quad (10)$$

式中: k 为设备的类型; L 为序列长度。

(4) 通过随机森林算法搭建负荷识别框架, 不仅可以有效处理大规模数据集, 还能抵抗过拟合, 从而提高负荷识别的计算效率和准确率。

2.4 基于负荷识别的质量平衡法

基于负荷识别的质量平衡法, 首先分别采集多组在同一工段下的不同设备启停的电信号数据, 通过处理和转换用以训练识别模型, 生成负荷数据库, 然后通过电表获取系统电力入口处的电信号数据, 并对其进行事件检测、预处理、特征提取及分析, 最终识别出内部运行装置的用电情况, 获得其活动水平数据。识别系统框架如图2所示。

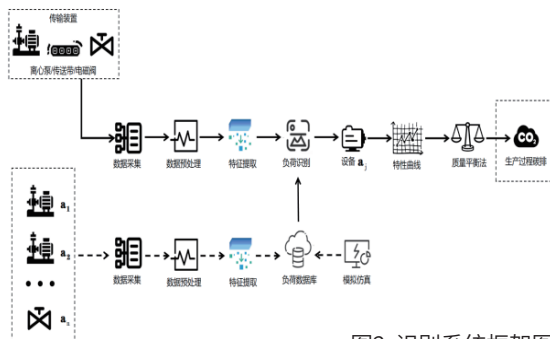


图2 识别系统框架图

通过负荷识别, 我们可以获得设备的运行功率, 再通过设备功率与流量的特性曲线关系计算流量, 那么活动水平数据即可表示为

$$AD_i = \int_0^t \phi^i(P^i(\tau)) d\tau \quad (11)$$

式中: i 为设备类型, 可以分为原材料投入运输设备、含碳产品产出运输设备和非产品范畴的含碳产物运输设备, 即 i 取 r 、 p 和 w ; AD_i 为 i 设备的活动水平数据; $\phi^i(P^i(\tau))$ 为 i 设备功率与流量的特性曲线关系式。

3 以氯化钙生产工段为例进行分析

该工段为碳酸钙浆液与盐酸反应的工段, 其中反应器为反应釜, 用电设备有电磁阀、泵和电机。泵负责传输碳酸钙浆液, 电磁阀用于传输盐酸。我们现已采集了电磁阀和泵的多组电信号数据, 并仿真了电机的电信号数据, 同时仿真了三个设备不同时段分别启动的电信号。

3.1 负荷数据库

首先对采集和仿真的多组电磁阀、泵和电机启停电信号数据进行数据预处理工作, 然后对其进行特征提取, 提取结果如图3所示。最后将提取的特征用于决策森林模型进行训练, 生成负荷数据库。

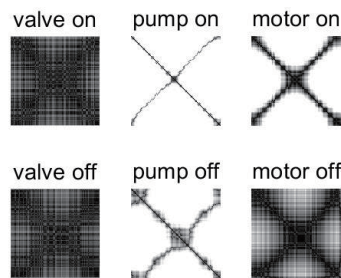


图3 阀门、泵、电机ASRP特征图

3.2 负荷识别

通过仿真得出多设备不同时段启动的电信号数据, 如图4所示。

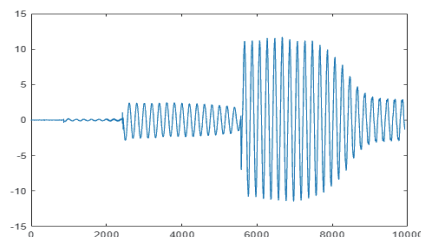


图4 多设备启动电信号数据图

将该电信号数据，通过事件检测检测出三个启动事件，并对这三个事件进行数据预处理和特征提取后，送入已训练好的决策森林模型进行分类，并得出最终的结果，结果如图5所示。

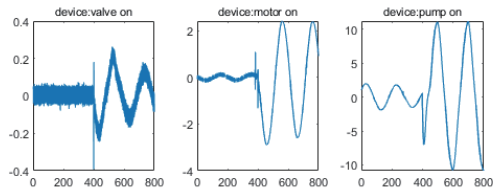


图5 负荷识别图

同理，设备的停止识别同启动识别步骤一样。当识别出设备启动时，开始记录设备的启动时间，同理，记录设备的停止时间，并根据启停时间获得设备启动到停止这段时间内的功率情况。

3.3 特性曲线

假定已通过负荷识别识别出了设备泵并得到了泵的功率。由于泵内流体的复杂性，使得泵的扬程以及各部分效率都难以从理论上准确计算，因此本文主要利用最小二乘法拟合离心泵功率与流量之间的特性曲线。通过实验测定水泵的工作点为 $(P_i, Q_i)(i = 0, 1, \dots, n)$ ，设所求的离心泵特性曲线 $Q-P$ 的拟合函数 $\varphi(P) \in M = \text{Span}\{1, P, P^2, \dots, P^m\}$ ，则有

$$\varphi(P) = \sum_{k=0}^m a_k P^k, a_k \in R \tag{12}$$

式中： $\varphi(P)$ 为多项式函数； a_k 为拟合方程的待定系数。

为确定系数 $a_0, a_1, \dots, a_m$ ，可以设 Q 与 $\varphi(P)$ 在工作点处差的平方加权和函数为

$$S(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{k=0}^n w_k (Q_k - \sum_{i=0}^m a_i (P_k)^i)^2 \tag{13}$$

式中： w_k 为权重系数，默认为1； Q_k 为测定的泵流量； P_k 为测定的泵功率。

由极值必要条件有

$$\frac{\partial S}{\partial a_j} = 2 \sum_{k=0}^n w_k (Q_k - \sum_{i=0}^m a_i (P_k)^i) P_k^j = 0, (j = 0, 1, \dots, m) \tag{14}$$

将 w_k 代入式（12），化简得到关于系数 $a_0, a_1, \dots, a_m$ 的线性方程组

$$\sum_{k=0}^n (\sum_{i=0}^m a_i (P_k)^i) P_k^j = \sum_{k=0}^n Q_k P_k^j, (j = 0, 1, \dots, m) \tag{15}$$

由于 $n > m$ ，且拟合函数簇线性无关，系数矩阵列满秩非奇异，于是线性方程组式（15）有唯一解，设 $a_0^*, a_1^*, \dots, a_m^*$ 为其解，同样也是 $S(a_0, a_1, \dots, a_m)$ 的最小值点，从而函数

$$\varphi^*(P) = \sum_{k=0}^m a_k^* P^k \tag{16}$$

就是所要的曲线拟合函数。

参考文献[13]，水泵的工作点如表1所示。

表1 离心泵功率与流量参数

序号	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	功率 N/kW
1	0.616	8.250
2	1.483	10.056
3	2.551	11.650
4	3.241	12.350
5	4.069	13.050
6	5.523	13.980
7	6.320	14.160
8	7.345	14.450

由于求解线性方程组计算过程较复杂，故采用Matlab进行编程计算，二阶线性和四阶线性最小二乘拟合曲线函数式分别为：

$$Q_2 = 0.174530N^2 - 2.976752N + 13.450463 \tag{17}$$

$$Q_4 = 0.0188N^4 - 0.8147N^3 + 13.2130N^2 - 94.1125N + 248.2647 \tag{18}$$

式（17）、（18）的函数曲线见图6。由图6可直观看出，实测数据点大部分落在四阶线性最小二乘拟合曲线上，但易出现过拟合现象。

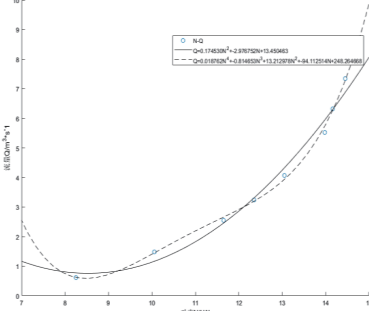


图6 拟合曲线

通过求出的拟合函数在所给拟合点与被拟合函数误差加权平方和来表示曲线拟合的误差，称为平方误差，即

$$S(a_0^*, a_1^*, \dots, a_m^*) = \sum_{i=0}^n w_i (Q_i - \varphi^*(P))^2 \tag{19}$$

表2 拟合误差表

二阶线性拟合误差	四阶线性拟合误差
0.6011	0.0874

本例选取四阶线性拟合曲线作为离心泵功率与流量之间的特性曲线，当通过负荷识别获得的功率 $P(t)$ ，便有与之相对应的一段时间流量 Q_1 （即 $\int_{t_0}^{t_1} \varphi^*(P(\tau)) d\tau$ ）。

3.4 碳排估算

假定本例氯化钙生产工段通过负荷识别得出碳酸

钙流量远小于盐酸流量，反应充分，工段没有含碳产品和含碳废物的生成，则生产过程碳排放可简化表示为

$$E_{CO_2_过程排放} = \sum_r (AD_r \times CC_r) \times \frac{44}{12} \quad (20)$$

根据《中国化工生产企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）》，得到碳酸钙的 CO_2 排放因子缺省值为0.4379tCO₂/t，则本例中的生产过程碳排放为

$$E_{CO_2_过程排放} = Q_1 \cdot \eta_{CaCO_3} \cdot \rho_{CaCO_3} \cdot EF_{CaCO_3} \quad (21)$$

式中： Q_1 为流量； η_{CaCO_3} 为碳酸钙浆液中碳酸钙的占比； ρ_{CaCO_3} 为碳酸钙密度， $2.93 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

结合电力系统碳排放流理论，通过电表实时接收上个节点的碳势强度 $E(t)$ ，并实时采集总功率 $P(t)$ ，那么同一段时间内的净购入电力碳排放为

$$E_{CO_2_净购入电} = \int_0^t P(\alpha) \times E(\alpha) d\alpha \quad (22)$$

假定该工厂在这一段时间内，只有该工段在工作，那么这一段时间内工厂的总碳排放为净购入电力碳排放与生产过程碳排放之和，即

$$E_{CO_2_总} = E_{CO_2_净购入电} + E_{CO_2_过程排放} \quad (23)$$

4 结语

本文主要对流程工业中的净购入电力碳排与生产过程碳排的计算方法进行了研究，并结合碳排放流理论进行了净购入电力碳排的计算，提出了通过负荷识别计

算生产过程碳排的方法。该方法通过曲线拟合的方式获得传输装置功率与流量之间的关系，并结合负荷识别获取的功率计算得出相应的流量，从而计算得出生产过程碳排。本文还以氯化钙生产工段为例，验证了该方法的可行性。**AP**

★基金项目：浙江大有集团有限公司科技项目(DY2022-11)。

作者简介：

周桂珍（1979-），女，浙江桐庐人，经济师，学士，现就职于杭州电力设备制造有限公司桐庐白云源成套电气制造分公司，研究方向为电气工程、自动化、科研项目管理等。

叶超（1987-），男，浙江建德人，高级工程师，学士，现就职于杭州电力设备制造有限公司桐庐白云源成套电气制造分公司，研究方向为电力设备、电气工程、自动化。

王继磊（1982-），男，安徽宿州人，经济师，现就职于杭州电力设备制造有限公司桐庐白云源成套电气制造分公司，研究方向为电力设备、电气工程、自动化。

程昊旻（1995-），男，浙江杭州人，助理工程师，学士，现就职于杭州电力设备制造有限公司桐庐白云源成套电气制造分公司，研究方向为电气试验、电气工程。

参考文献：

- [1] 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 + 85.
- [2] 冯欣, 杨军. 考虑网络损耗的碳排放流理论改进与完善[J]. 电力自动化设备, 2016, 36 (5): 81 - 86.
- [3] 汪超群, 陈懿, 文福拴, 等. 电力系统碳排放流理论改进与完善[J]. 电网技术, 2022, 46 (5): 1683 - 1693.
- [4] 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.
- [5] 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 - 2695.
- [6] Jia D, Li Y, Du Z, et al. Non-Intrusive Load Identification Using Reconstructed Voltage-Current Images[J]. IEEE Access, 2021, 9: 77349 - 77358.
- [7] Guo Y, Xiong X, Fu Q, et al. Research on Non-Intrusive Load Disaggregation Method based on Multi-Model Combination[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 200: 107472.
- [8] Li Y, Yang Y, Sima K, et al. Non-Intrusive Load Monitoring based on Harmonic Characteristics[J]. Procedia Computer Science, 2021, 183: 776 - 782.
- [9] 陈家兴, 王春玲, 刘春明. 基于改进碳排放流理论的电力系统动态低碳调度方法[J]. 中国电力, 2023, 56 (3): 162 - 172.
- [10] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (11): 44 - 49.
- [11] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (15): 39 - 44.
- [12] Bouhouras A S, Gkaidatzis P A, Panagiotou E, et al. A NILM Algorithm with Enhanced Disaggregation Scheme Under Harmonic Current Vectors[J]. Energy and Buildings, 2019, 183: 392 - 407.
- [13] 张戎, 余淑荣, 吴明亮. 基于MATLAB的离心泵特性曲线拟合[J]. 机械制造, 2015, 53 (8): 18 - 20.