

电力拖动系统中的能量簿记与碳足迹最小化算法

何晶丽 420921198310104426

摘要

电力拖动系统是工业生产领域的主要电能消耗终端，其碳排放占工业总碳排放量的比例超过 40%，对其开展精准的能量核算与低碳运行优化是工业领域实现双碳目标的核心路径之一。本文引入能量簿记框架，对电力拖动系统全运行周期的能量流、碳排放流进行精细化计量，构建以碳足迹最小化为目标的运行优化模型，提出基于动态规划的启发式优化算法，实现拖动系统运行参数的实时调整。实验结果表明，该算法能够在保障生产任务完成的前提下，降低拖动系统碳足迹约 8.7%，为工业拖动系统的低碳运行提供可落地的技术方案。

关键词

电力拖动系统；能量簿记；碳足迹；最小化算法

一、引言

在我国双碳战略推进过程中，工业领域的节能降碳是核心攻坚方向，而电力拖动系统作为各类风机、泵类、传送带等工业设备的动力核心，消耗了全社会约 60% 的发电总量，其运行碳排放是工业碳排放的主要来源之一。长期以来，电力拖动系统的运行优化多以电能消耗最小化为目标，忽略了电力碳排放的边际差异——不同时段电网电力的碳排放因子存在显著差异，在碳排放因子较低的时段完成高能耗作业，能够在总电能消耗不变的前提下降低整体碳足迹。因此，构建适配电力拖动系统的能量计量框架，开发碳足迹最小化的运行优化算法，对推动工业领域节能降碳具有重要的现实意义。

能量簿记是近年来兴起的精细化能量计量方法，其核心是对系统各个环节的能量输入、输出、损耗进行逐环节记账式计量，能够清晰呈现能量流动路径与损耗分布，为后续优化提供精准的数据基础。将能量簿记引入电力拖动系统，能够解决传统能耗计量仅统计总输入电能、无法区分各运行环节碳排放差异的问题，实现碳足迹的精准溯源。在此基础上，通过优化算法调整拖动系统的运行时序与参数，能够实现碳足迹的最小化，兼顾生产效率与低碳目标。

二、电力拖动系统的能量簿记框架构建

电力拖动系统的能量流动从电网电能输入开始，经过变频器、电动机、传动机构、负载终端四个核心环节，每个环节都会产生一定的能量损耗，最终只有部分能量转化为负载的机械输出能量。能量簿记框架需要对每个环节的输入能量、输出能量、损耗能量分别进行计量，同时对应每个环节的能量消耗核算对应的碳排放量。

首先，确定能量簿记的边界与计量单元。本文将能量簿记的系统边界设定为从电网接入点到负载输出端的全环节，以 15 分钟为一个计量时间单元，匹配电网碳排放因子的更新频率。

其次，建立碳足迹的簿记转换规则。碳足迹的核心来源是电网电能的生产碳排放，因此每个时间单元的碳足迹 $CF(t)=E_{grid}(t) \times f_{grid}(t)$ ，其中 $f_{grid}(t)$ 为 t 时段电网的平均碳排放因子，由区域电网当日的电源结构决定，火电占比越高则碳排放因子越大，新能源占比越高则碳排放因子越小。对于拖动系统自身的设备隐含碳排放，由于本文聚焦运行阶段的碳足迹优化，因此将其纳入固定碳排放，不计入优化目标。

最后，构建能量簿记的更新机制。通过在拖动系统各环节部署电量传感器、转速传感器、转矩传感器，实时采集各环节的运行数据，每一个计量单元结束后自动更新簿记数据，形成动态更新的能量与碳排放台账，为后续优化算法提供实时数据支撑。

三、碳足迹最小化优化模型与算法设计

电力拖动系统的碳足迹最小化问题，本质是在满足生产任务约束、设备运行约束的前提下，调整不同时间段的运行功率与作业时序，使得总碳足迹最小。首先构建优化模型的目标函数：优化目标为调度周期 T 内总碳足迹最小，即 $\min CF_{total} = \sum_{t=1 \rightarrow T} CF(t) = \sum_{t=1 \rightarrow T} E_{grid}(t) \times f_{grid}(t)$ 。

其次确定约束条件，第一是生产任务约束，整个调度周期内负载需要完成的总输出机械能固定，即 $\sum_{t=1 \rightarrow T} E_{load}(t) = W_{total}$ ，其中 W_{total} 为生产任务要求的总机械功。第二是设备运行约束，包括电动机的额定功率约束 $0 \leq P_{grid}(t) \leq P_{rated}$ ，转速约束 $n_{min} \leq n(t) \leq n_{max}$ ，以及变频器的频率约束等，保障设备运行在安全范围内。第三是能量转换约束，各个环节的损耗与运行功率满足拟合关系，通过实验数据拟合得到损耗系数，保障能量平衡关系成立。

针对该优化模型，本文提出基于动态规划的启发式最小化算法。算法的核心思路是将调度周期划分为若干个阶段，每个阶段对应一个计量时间单元，以当前

已完成的总机械功为状态变量，逆向推导每个阶段的最优运行功率。具体步骤如下：第一，初始化阶段，获取调度周期内各个时段的电网碳排放因子 $f_{grid}(t)$ ，确定生产任务总功 W_{total} 与设备约束参数；第二，状态转移，从最后一个时段开始逆向计算，对于每个时段 t 的每个可能状态 w （已完成总功），计算该状态下的最小碳足迹，存储最优决策变量即运行功率；第三，正向回溯，从第一个时段初始状态出发，回溯得到每个时段的最优运行功率，形成最终的优化运行方案；第四，动态更新，每个计量单元结束后，根据实际运行数据更新能量簿记，在下一个调度周期重新优化，适应电网碳排放因子的动态变化。

四、实验验证与结果分析

为验证本文提出算法的有效性，选取某钢铁企业的高炉鼓风机电力拖动系统作为实验对象，该拖动系统额定功率为 2500kW，调度周期为 1 天（24 小时，共 96 个计量单元）。分别对比传统以电能消耗最小化为目标的优化方案，以及本文提出的碳足迹最小化方案，实验结果如下：传统方案的总电能消耗为 36240kWh，总碳足迹为 21028kgCO₂；本文方案的总电能消耗为 36480kWh，总电能消耗仅增加 0.66%，但总碳足迹降低为 19201kgCO₂，碳足迹降低幅度达到 8.7%。

分析结果可以发现，由于本文算法将高能耗作业调整到电网碳排放因子较低的午间与夜间（该区域午间新能源发电占比高，夜间火电出力低，碳排放因子均较低），虽然总电能消耗略有上升，但整体碳足迹实现了显著下降，验证了碳足迹最小化优化的价值，说明仅以电能消耗最小为目标无法实现低碳运行，需要结合电网碳排放因子的动态差异进行优化。

五、结论

本文将能量簿记框架引入电力拖动系统的能耗与碳排放计量，构建了碳足迹最小化的运行优化模型，提出了基于动态规划的优化算法。实验结果表明，该方法能够在几乎不增加总电能消耗的前提下，显著降低电力拖动系统的运行碳足迹，为工业拖动系统的低碳运行提供了新的思路。未来研究可以进一步考虑设备维护成本与碳足迹的多目标优化，拓展算法的适用范围。

参考文献

[1] 顾建军, 李庚银. 工业电力拖动系统节能技术现状与发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3801-3814.

[2] 江亿, 谢可慧. 工业系统能量簿记方法与应用案例[J]. 中国工程科学,

2022, 24(3): 123-131.

[3] 张智刚, 康重庆. 双碳目标下电力系统碳排放流的计算方法与应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 1-10.