

水电站库区翻坝能源-物流耦合调度优化

贾清茹,刘皓明,普月,王健

(河海大学 电气与动力工程学院,南京 211100)

摘要:为解决水电站大坝阻断造成的翻坝运输成本高昂与碳排放严重问题,提出了一种结合电-氢-油多能互补的翻坝能源-物流耦合调度优化方法。针对翻坝货物在水路和陆路间的分流特点,分析了涵盖多类型重卡及水路转运设施的翻坝物流运行特性,建立了物流设施能耗模型;基于制充储氢一体站等设施的运行功率特征,构建了能源设施产能模型。结合能源供需耦合机理刻画,建立翻坝能源-物流耦合调度优化模型。以运行成本最低为目标,兼顾碳排放与负荷响应能力,对翻坝能源与物流进行耦合优化,得到货流分配及物流和能源设施的调度方案。以西南某6400 MW水电站库区为例,仿真结果表明,所提方法能够有效降低翻坝运行成本和碳排放。

关键词:水电站;翻坝物流;能源-物流耦合;耦合优化;节能减排

Energy-logistics coupled scheduling optimization for cross-dam in hydropower reservoir areas

JIA Qingru, LIU Haoming, PU Yue, WANG Jian

(School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To address the high transportation costs and severe carbon emissions caused by dam blockages at hydropower stations, a cross-dam energy-logistics coupled dispatching optimization method that integrates electricity-hydrogen-oil multi-energy complementarity is proposed. According to the flow diversion characteristics of cross-dam cargo between waterway and land routes, the operational characteristics of cross-dam logistics covering heterogeneous heavy-duty trucks and waterway handling facilities are analyzed, and energy consumption models for transportation equipment are established. Based on the operational power characteristics of facilities such as integrated hydrogen production-charging-storage stations, energy facility production models are constructed. Combined with the characterization of energy supply-demand coupling mechanisms, a cross-dam energy-logistics coupled dispatching optimization model is established. With the objective of minimizing operational costs while considering carbon emissions and load response capability, coupled optimization is performed on cross-dam energy and logistics systems to obtain cargo flow distribution and dispatching strategies for transportation and energy equipment. Taking a 6400 MW hydropower station in Southwest China as a case study, simulation results demonstrate that the proposed method can effectively reduce cross-dam operational costs and carbon emissions.

Key words: hydropower station; cross-dam logistics; energy-logistics coupling; coupled optimization; energy saving and emission reduction

0 引言

在全球应对气候变化与我国“双碳”目标的背景下,物流运输业的低碳化转型至关重要。大型水电站的建设在提供清洁能源的同时,其形成的大坝也阻断了原有水路运输的连续性。即货物需通过“水路-陆路-水路”完成跨坝运输。传统翻坝运输主要依赖燃油重卡(fuel truck, FT)和大坝升降船机(ship lift, SL),存在碳排放高、能源结构单一等问题。当前,电动重卡(electric truck, ET)、氢能重卡(hydrogen truck, HT)等新能源工具正逐步推广,充

电站(charging station, CS)、制充储氢一体站等设施不断完善,推动系统向多能互补转型。根据《“十四五”现代物流发展规划》,物流行业面临明确的碳排放强度约束。然而,传统降碳措施常伴随较高成本。因此,如何在满足低碳要求的同时兼顾经济性,实现降碳与成本控制的协同优化,成为翻坝物流系统亟待解决的关键问题。

针对交通物流领域绿色转型,国内外学者已开展大量研究。在能源与物流系统耦合研究方面,文献[1]针对港口能流与物流系统耦合问题,提出多源激励的能流-物流协同调度策略,构建港口能流-物流“双流”协同调度框架,实现能源与物流的统一优化。文献[2]从能源侧与交通侧分析港口能源-交通融合中的柔性资源,分别提出这些柔性资源的

建模方法,并基于综合能源系统研究提出能源-交通融合运行方法。文献[3]系统梳理了我国水路交通与能源融合发展的技术路径,从供给、质量、利用模式等角度评估了相关主体的能源需求演化趋势。

上述研究表明,能源与物流系统的深度耦合已成为物流运输领域绿色转型的重要趋势,通过多能互补与负荷响应技术能够实现系统柔性提升和综合效益优化。然而,现有研究主要集中于港口场景^[4],在内河翻坝运输的应用仍存在空白。

与港口的单一进出口作业不同,翻坝运输不仅涉及船舶与陆路运输工具之间的货流分配,还需要同时协调上下游双向物流过程,面临运力受限、作业环节复杂等多重问题。因此,有必要开展面向翻坝场景的能源-物流耦合优化研究,以实现系统的经济性与低碳化发展。

目前,水利枢纽通航系统的优化调度主要集中于货运线路选择与船舶过闸协调管理,以提升通航效率和降低运输成本为重点。文献[5]探索了船舶过闸与公路转运相结合的协调优化调度问题,并在此基础上进一步考虑了泊位分配问题的水路联合调度^[6]。文献[7]考虑梯级船闸间通航效应引发的拥堵问题,建立了双船线模型,提出了“过闸+翻坝”的双线联动机制和拥堵收费策略,通过收费管理有效降低船舶通航的社会成本并缓解拥堵问题。但目前研究考虑翻坝优化时主要考虑了船舶调度、线路选择等物流侧因素,在能源供需协同、多能源载体时空耦合方面鲜有研究。

针对上述研究空白,本文提出一种面向水电站库区翻坝场景的能源-物流耦合调度优化方法。该方法通过构建涵盖“水路-陆路”多式联运与“电-氢-油”多能互补的协同优化框架,并建立以经济性与低碳性为目标的调度模型,旨在实现翻坝物流系统总成本与碳排放的协同优化,为水电站库区的绿色、可持续发展提供决策支持。

1 水电站库区翻坝能源-物流耦合优化框架

水电站库区翻坝能源-物流耦合运行机制如图1所示。该框架旨在通过水路、陆路与能源系统的深度融合,解决大坝阻断水路连续性的问题。系统由水路运输设施、陆路运输工具、货物中转装置和能源供给设施构成。水路运输依靠船舶与SL共同完成,受SL运力限制,部分货物需经装卸船机(bulk loader, BL)转为陆路运输。陆路翻坝由FT、ET和HT共同承担,三者各具优劣,通过协同调度实现经

济与环保效益。



图1 水电站库区翻坝能源-物流耦合系统

Fig. 1 Energy-logistics coupled system for cross-dam intermodal in hydropower station reservoir area

翻坝运输中FT虽具备运载能力强、机动性好等优势,但其碳排放问题日益凸显。因此,需要深入探究用能侧和供能侧的耦合优化机制。电解槽(electrolytic cell, EC)、氢气压缩机(hydrogen compressor, HC)与储氢罐(hydrogen storage, HS)组成的氢能供应链与HT用能精准匹配,解决氢气生产、压缩、储存与使用的全链条协调问题;ET充电系统与电网互动紧密,要求在保障运输需求的同时优化电力负荷曲线,实现用电低谷充电、高峰错峰的经济运行模式。通过建立“电网-EC-HS-HRS”与“电网-CS”两大供能链路,可在满足翻坝运输任务要求的前提下,降低系统运行成本与碳排放水平,推动翻坝运输系统向低碳化、电氢化方向转型。系统中ET通过优化充电时段调度即可实现负荷灵活响应,无需额外配置固定式储能;而氢储能HS则是HT供应链的关键环节,与系统电氢化目标契合。

为更清晰展示系统各部分的能量流动与耦合机理,图2以能流图形式描绘了电能、氢能和燃油3种能源载体的供应链路及其与物流设施的交互关系。

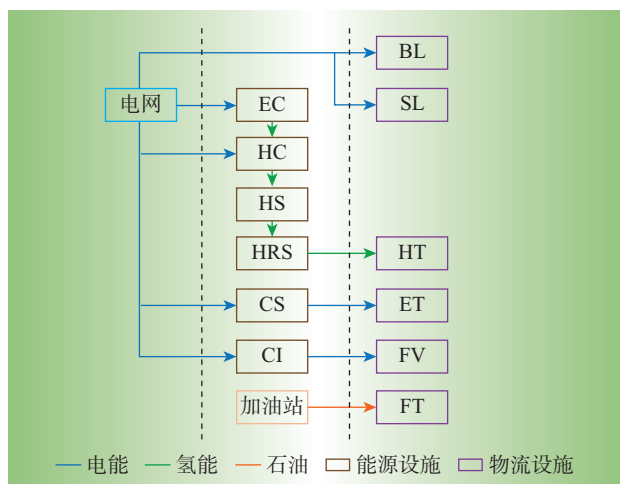


图2 水电站库区翻坝能源-物流耦合系统能流图

Fig. 2 Energy flow of energy-logistics coupled system for cross-dam intermodal in hydropower station reservoir area

2 水电站库区翻坝物流设施能耗模型

物流设施主要包括FT、ET、HT及BL等,各类型设施能耗模型具体表示如下。

2.1 装卸船机

BL为到港船舶装卸货物,是连接水路与陆路运输的关键设施,其耗电与装卸量有关,BL在完成一次装卸作业过程中,吊具需要先上升至规定高度,然后下降复位,因此实际运行距离为起升高度的2倍,可表示为

$$P_t^{\text{BL,e}} = \sum_{z=1}^Z (u_{t,z}^{\text{BL}} P_{t,z}^{\text{BL,e}}), P_{t,z}^{\text{BL,e}} = \eta_{t,z}^{\text{BL,e}} \left(\frac{2H_z^{\text{BL}} p_{t,z}^{\text{BL}}}{v_{\text{BL}}} \right) \quad (1)$$

式中: $P_t^{\text{BL,e}}$ 为 t 时刻所有BL的总电功率, kW; n_{BL} 为BL总台数, 台; $u_{t,z}^{\text{BL}}$ 为 t 时刻第 z 台BL是否工作, 若工作取1; $P_{t,z}^{\text{BL,e}}$ 为 t 时刻第 z 台BL的电功率, kW; Z 为BL总数量; $\eta_{t,z}^{\text{BL,e}}$ 为 t 时刻第 z 台BL的装卸效率; H_z^{BL} 为第 z 台BL吊具的起升高度, m; p_z^{BL} 为第 z 台BL的平均运行功率, kW; v_{BL} 为BL吊具的平均起升速度, m/s。

2.2 燃油重卡

FT作为传统的货物运输载体,在翻坝运输系统中承担了重要的运输任务,但其具有较高的排放。FT的燃油消耗与运输量直接相关,可表示为

$$\begin{cases} E_{t,k}^{\text{FT}} = u_{t,k}^{\text{FT}} \left[E_{t-1,k}^{\text{FT}} - p^{\text{FT}} d^{\text{FT}} (q_{0,k}^{\text{FT}} + q_{t,k}^{\text{FT}}) - p^{\text{FT}} d^{\text{FT}} q_{0,k}^{\text{FT}} \right] + \\ \quad (1 - u_{t,k}^{\text{FT}}) E_{\text{max}}^{\text{FT}} \\ E_t^{\text{FT}} = \sum_{k=1}^K (1 - u_{t,k}^{\text{FT}}) E_{\text{max}}^{\text{FT}} + \\ \quad \sum_{i=1}^I u_{t,i}^{\text{FT}} (E_{t-1,i}^{\text{FT}} - p^{\text{FT}} d^{\text{FT}} (q_{0,i}^{\text{FT}} + q_{t,i}^{\text{FT}}) - p^{\text{FT}} d^{\text{FT}} q_{0,i}^{\text{FT}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $E_{t,k}^{\text{FT}}$ 为 t 时刻第 k 辆FT的燃油存量, L; $q_{0,k}^{\text{FT}}$ 为FT空载返回时的等效虚拟运输量, t; $E_{\text{max}}^{\text{FT}}$ 为FT加满一次燃油的最大存量, L; d^{FT} 为FT的单次运输距离, km; $q_{t,k}^{\text{FT}}$ 为 t 时刻第 k 辆FT的运输量, t; p^{FT} 为FT的油耗, L/(t·km); $u_{t,k}^{\text{FT}}$ 为 t 时刻第 k 辆FT是否加油, 若不加油取1, 否则取0; K 为FT的总数量。

2.3 电动重卡

ET作为新兴的清洁能源运输工具,其电池能量存量变化与运输状态和任务相关,建模如下

$$\begin{cases} E_{t,i}^{\text{ET}} = u_{t,i}^{\text{ET}} \left[E_{t-1,i}^{\text{ET}} - p^{\text{ET}} d^{\text{ET}} (q_{0,i}^{\text{ET}} + q_{t,i}^{\text{ET}}) - p^{\text{ET}} d^{\text{ET}} q_{0,i}^{\text{ET}} \right] + \\ \quad (1 - u_{t,i}^{\text{ET}}) E_{\text{max}}^{\text{ET}} \\ E_t^{\text{ET}} = \sum_{i=1}^I (1 - u_{t,i}^{\text{ET}}) E_{\text{max}}^{\text{ET}} + \\ \quad \sum_{i=1}^I u_{t,i}^{\text{ET}} (E_{t-1,i}^{\text{ET}} - p^{\text{ET}} d^{\text{ET}} (q_{0,i}^{\text{ET}} + q_{t,i}^{\text{ET}}) - p^{\text{ET}} d^{\text{ET}} q_{0,i}^{\text{ET}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E_{t,i}^{\text{ET}}$ 为 t 时刻第 i 辆ET的电量存量, kWh; $q_{0,i}^{\text{ET}}$ 为第 i 辆ET空载返回时的等效虚拟运输量, t; d^{ET}

为ET的单次运输距离, km; $q_{t,i}^{\text{ET}}$ 为 t 时刻第 i 辆ET的运输量, t; p^{ET} 为ET的电耗, kWh/(t·km); $E_{\text{max}}^{\text{ET}}$ 为单台ET电池的电量最大存量, kWh; $u_{t,i}^{\text{ET}}$ 为 t 时刻第 i 辆ET是否充电, 若不充电取1, 否则取0; I 为ET的总数量。

2.4 氢能重卡

HT作为新型清洁能源运输工具,由加氢站(hydrogen refueling station, HRS)提供氢气补给,其氢存量变化与运输状态与任务相关,建模如下

$$\begin{cases} E_{t,l}^{\text{HT}} = u_{t,l}^{\text{HT}} \left[E_{t-1,l}^{\text{HT}} - p^{\text{HT}} d^{\text{HT}} (q_{0,l}^{\text{HT}} + q_{t,l}^{\text{HT}}) - p^{\text{HT}} d^{\text{HT}} q_{0,l}^{\text{HT}} \right] + \\ \quad (1 - u_{t,l}^{\text{HT}}) E_{\text{max}}^{\text{HT}} \\ E_t^{\text{HT}} = \sum_{l=1}^L (1 - u_{t,l}^{\text{HT}}) E_{\text{max}}^{\text{HT}} + \\ \quad \sum_{l=1}^L u_{t,l}^{\text{HT}} (E_{t-1,l}^{\text{HT}} - p^{\text{HT}} d^{\text{HT}} (q_{0,l}^{\text{HT}} + q_{t,l}^{\text{HT}}) - p^{\text{HT}} d^{\text{HT}} q_{0,l}^{\text{HT}}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_{t,l}^{\text{HT}}$ 为 t 时刻第 l 辆HT的氢气存量, kg; $q_{0,l}^{\text{HT}}$ 为第 l 辆HT空载返回时的等效虚拟运输量, t; $q_{t,l}^{\text{HT}}$ 为 t 时刻第 l 辆HT的运输量, t; p^{HT} 为HT的氢耗, kg/(t·km); d^{HT} 为HT的单次运输距离, km; $E_{\text{max}}^{\text{HT}}$ 为单台HT加满一次氢气的最大存量, kg; $u_{t,l}^{\text{HT}}$ 为 t 时刻第 l 辆HT是否需要充氢, 若不需要充氢取1, 否则取0; L 为HT的总数量。

2.5 岸电

岸电(cold ironing, CI)为停靠船舶提供电力供应,其供电功率由船舶用电需求决定,具体数学模型如下

$$P_t^{\text{CI,e}} = \sum_{y=1}^Y (u_{t,y}^{\text{CI}} P_{t,y}^{\text{CI,e}}) \quad (5)$$

式中: $P_t^{\text{CI,e}}$ 为 t 时刻全部CI的总电功率, kW; Y 为CI总台数, 台; $u_{t,y}^{\text{CI}}$ 为 t 时刻第 y 台CI是否工作, 若工作取1; $P_{t,y}^{\text{CI,e}}$ 为 t 时刻第 y 台CI的电功率, kW。

2.6 升降船机

SL帮助船舶跨越大坝高程差,其用电功率与船舶运输量有关,表示为

$$P_t^{\text{SL,e}} = \sum_{s=1}^S (u_{t,s}^{\text{SL}} \eta_{t,s}^{\text{SL,e}} q_{t,s}^{\text{SL}}) \quad (6)$$

式中: $P_t^{\text{SL,e}}$ 为 t 时刻所有SL的总电功率, kW; S 为SL的总数量, 台; $u_{t,s}^{\text{SL}}$ 为 t 时刻第 s 台SL是否工作, 若工作取1; $\eta_{t,s}^{\text{SL,e}}$ 为 t 时刻第 s 台SL的单位耗电系数; $q_{t,g}^{\text{FV}}$ 为第 g 辆船舶的货物运输量, t。

2.7 充电站

CS为ET提供快速、高效的充电服务。其功率与ET调度及用能紧密相关,表示为

$$P_t^{\text{CS,e}} = \sum_{j=1}^J P_{t,j}^{\text{CS,e}} = \sum_{i=1}^I (1 - u_{t,i}^{\text{ET}}) P_{t,i}^{\text{ET,e}} \quad (7)$$

式中: $P_t^{CS,e}$ 为第 t 时段 CS 的总用电功率, kW; J 为充电桩总数量, 个; $P_{t,j}^{CS,e}$ 为第 t 时段第 j 个充电桩的充电功率, kW; $P_{t,i}^{ET,e}$ 为第 t 时段第 i 辆 ET 的充电功率, kW。

2.8 加氢站

HRS 为 HT 提供快速、高效的充氢服务。其运行状态与 HT 充电速率紧密相关, 表示为

$$P_t^{HRS,h} = \sum_{n=1}^N P_{t,n}^{HRS,h} = \sum_{l=1}^L (1 - u_{t,l}^{HT}) P_{t,l}^{HT,h} \quad (8)$$

式中: $P_t^{HRS,h}$ 为第 t 时刻 HRS 的总用出氢速率, kg/h; N 为充氢桩总数量, 个; $P_{t,n}^{HRS,h}$ 为第 t 时段第 n 个充氢桩的充氢速率, kg/h; $P_{t,l}^{HT,h}$ 为第 t 时段第 l 辆 HT 的充氢速率, kg/h。

3 水电站库区翻坝能源设施产能模型

3.1 电解槽

EC 消耗电力将水电解, 生成低压氢气^[8], 具体数学模型如下

$$P_t^{EC,h} = \eta_h^{EC} P_t^{EC,e} \quad (9)$$

式中: $P_t^{EC,h}$ 为第 t 时刻 EC 产生氢气的流量, kg/h; η_h^{EC} 为 EC 的产氢效率; $P_t^{EC,e}$ 为第 t 时刻 EC 的耗电功率, kW。

3.2 氢压缩机

HC 消耗电力, 将 EC 产生的低压氢气压缩至高压, 以便储存和后续利用^[9], 具体数学模型如下

$$P_t^{HC,h} = (1 - \eta_0^{HC,h}) P_t^{EC,h}, P_t^{HC,e} = \eta^{HC,e} P_t^{HC,h} \quad (10)$$

式中: $P_t^{HC,h}$ 为第 t 时刻 HC 产氢速率, kg/h; $\eta_0^{HC,h}$ 为 HC 压缩氢气过程中的氢气损耗率; $P_t^{HC,e}$ 为第 t 时刻 HC 耗电功率, kW; $\eta^{HC,e}$ 为 HC 的用电效率。

3.3 储氢罐

HS 的氢气存量变化与用氢过程相关^[10], 具体数学模型如下

$$E_{t+1}^{HS} = (1 - \eta_0^{HS,h}) E_t^{HS} + \left(P_{t,ch}^{HS,h} \eta_{ch}^{HS,h} - \frac{P_{t,dis}^{HS,h}}{\eta_{dis}^{HS,h}} \right) \Delta t \quad (11)$$

式中: E_t^{HS} 为第 t 时刻 HS 的氢气存量, kg; $\eta_0^{HS,h}$ 为 HS 的自损率; $\eta_{ch}^{HS,h}$ 为 HS 的充氢效率; $\eta_{dis}^{HS,h}$ 为 HS 的放氢效率; $P_{t,ch}^{HS,h}$ 和 $P_{t,dis}^{HS,h}$ 分别为 HS 的充氢速率和放氢速率; $E_{t,ch}^{HS,h}$ 和 $E_{t,dis}^{HS,h}$ 分别为第 t 时刻 HS 的充氢量和放氢量, kg。

4 水电站库区翻坝能源-物流耦合优化模型

4.1 目标函数

水电站库区翻坝能源-物流耦合优化目标为翻坝总运行成本最低, 包含系统购电成本、系统购油

成本、系统运输成本、碳排放成本、设备运行维护成本以及 CI 服务费, 如下

$$C^{\min} = C^{\text{grid}} + C^f + C^{\text{tra}} + C^c + C^{\text{om}} - C^{\text{CI}} \quad (12)$$

式中: C^{grid} 为能源与物流耦合系统购电成本; C^f 为物流系统购油成本; C^{tra} 为物流系统运输成本; C^c 为物流二氧化碳的排放成本; C^{om} 为设施运行维护成本; C^{CI} 为 CI 服务费。各项如下

$$C^{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T P_t^{\text{grid},e} c_t^e \Delta t \quad (13)$$

$$C^f = \sum_{t=1}^T c^f p^{\text{FT}} q_t^{\text{FT}} d^{\text{FT}} \quad (14)$$

$$C^{\text{tra}} = \sum_{t=1}^T (q_t^{\text{ET}} d^{\text{ET}} c^{\text{ET}} + q_t^{\text{FT}} d^{\text{FT}} c^{\text{FT}} + q_t^{\text{HT}} d^{\text{HT}} c^{\text{HT}}) \quad (15)$$

$$C^c = \sum_{t=1}^T (q_t^{\text{FT}} d^{\text{FT}} p^{\text{FT}} \lambda^f + P_t^{\text{grid},e} \lambda^e) c^c \Delta t \quad (16)$$

$$C^{\text{om}} = \sum_{t=1}^T c^{\text{om,HS}} (P_{t,ch}^{\text{HS,h}} + P_{t,dis}^{\text{HS,h}}) \Delta t + \sum_{t=1}^T (c^{\text{om,EC}} P_t^{\text{EC,h}} + c^{\text{om,HC}} P_t^{\text{HC,h}}) \Delta t \quad (17)$$

$$C^{\text{CI}} = \sum_{t=1}^T P_t^{\text{CI},e} c^{\text{CI},e} \Delta t \quad (18)$$

式中: $P_t^{\text{grid},e}$ 为第 t 时刻电网购电功率, kW; c_t^e 为第 t 时刻的电价, 元/kWh; c^f 为燃油单价, 元/L; q_t^{ET} 、 q_t^{FT} 、 q_t^{HT} 和 q_t^{FV} 分别为 4 种运输工具的 t 时刻的总运输量, t; Δt 为调度时间步长; c^{ET} 、 c^{FT} 和 c^{HT} 分别为 3 种运输工具的单位运输成本, 元/(t·km); λ^e 为电网排放因子; λ^f 为燃油的二氧化碳单位排放因子; 碳排放成本由 FT 燃油消耗的直接排放和电网购电的间接排放组成, c^c 为单位二氧化碳排放的经济成本, 元/kg; $c^{\text{om,HS}}$ 、 $c^{\text{om,EC}}$ 和 $c^{\text{om,HC}}$ 分别为 HS、EC、HC 的设施运行维护单价, 元/kWh; $c^{\text{CI},e}$ 表示 CI 的售电电价, 元/kWh。

4.2 约束条件

翻坝运行约束包括能量平衡、设施运行以及运输分配 3 个维度, 具体如下。

4.2.1 能量平衡约束

(1) 电功率平衡约束

电功率平衡约束确保系统总用电需求得到满足, CS、CI、EC、HC、SL 和 BL 等用电设施的电力需求均由电网购电提供, 如下

$$P_t^{CS,e} + P_t^{CI,e} + P_t^{EC,e} + P_t^{HC,e} + P_t^{BL,e} + P_t^{SL,e} = P_t^{\text{grid},e} \quad (19)$$

(2) 氢能平衡约束

氢能平衡约束确保系统氢气供需平衡, HT 的氢气需求由 EC 制氢、HS 储存和释放共同满足, 如下

$$P_t^{HRS,h} + P_{t,dis}^{HS,h} = P_t^{HC,h} + P_{t,ch}^{HS,h}, P_t^{HT,h} = P_t^{HRS,h} \quad (20)$$

式中: $P_t^{HT,h}$ 为第 t 时刻 HT 的充氢速率, kg/h; $P_t^{HC,h}$ 为第 t 时刻 HC 产生的氢气速率, kg/h; $P_{t,ch}^{HS,h}$ 和 $P_{t,dis}^{HS,h}$ 分别为

t 时刻HS充氢量和放氢速率,kg/h。

4.2.2 能源设施运行约束

为保障氢能供应链各环节,包括电解槽、氢气压缩机与储氢罐,在调度过程中的安全稳定运行,需构建涵盖设备运行功率边界、能量存量安全范围及充放能速率限制的约束体系,其具体数学模型详见附录A。

4.2.3 物流设施运行约束

为保障翻坝运输作业的可行性及各关键设施,包括装卸船机、升降船机、各类重卡、充电站与加氢站的安全与高效运行,需构建设备功率范围、运输工具能量状态管理及强制补能规则的运行约束,具体内容详见附录B。

4.2.4 运输分配约束

(1) 运输工具载重约束

确保每种运输工具的实际运输量不超过其最大载重能力,保障运输作业的安全性和可行性,即

$$\begin{aligned} 0 \leq q_{t,i}^{\text{ET}} \leq q_{\max}^{\text{ET}} \quad 0 \leq q_{t,k}^{\text{FT}} \leq q_{\max}^{\text{FT}} \\ 0 \leq q_{t,l}^{\text{HT}} \leq q_{\max}^{\text{HT}} \quad 0 \leq q_{t,g}^{\text{FV}} \leq q_{\max}^{\text{FV}} \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $q_{t,g}^{\text{FV}}$ 为 t 时刻第 g 艘船舶的运输量, t ; $q_{\max}^{\text{ET}}$ 、 $q_{\max}^{\text{FT}}$ 和 $q_{\max}^{\text{FV}}$ 分别为4种运输工具单辆/艘的最大运载力, t 。

$$q_t^{\text{ET}} = \sum_{i=1}^I q_{t,i}^{\text{ET}}, q_t^{\text{FT}} = \sum_{k=1}^K q_{t,k}^{\text{FT}}, q_t^{\text{HT}} = \sum_{l=1}^L q_{t,l}^{\text{HT}}, q_t^{\text{FV}} = \sum_{g=1}^G q_{t,g}^{\text{FV}} \quad (22)$$

式中: G 为船舶的总数量,艘。

(2) 运输需求约束

确保所有运输工具的运输量总和不少于系统总运输需求,保障所有货物都能被及时运输,如下

$$Q \geq \sum_{t=1}^T (q_t^{\text{ET}} + q_t^{\text{FT}} + q_t^{\text{HT}} + q_t^{\text{FV}}) \quad (23)$$

式中: Q 为总运输需求, t 。

(3) 充能与运输互斥约束

保障车辆在充能过程中没有运输任务,如下

$$q_{t,i}^{\text{ET}} \leq q_{\max}^{\text{ET}} u_{t,i}^{\text{ET}}, q_{t,k}^{\text{FT}} \leq q_{\max}^{\text{FT}} u_{t,k}^{\text{FT}}, q_{t,l}^{\text{HT}} \leq q_{\max}^{\text{HT}} u_{t,l}^{\text{HT}} \quad (24)$$

(4) SL优先分配约束

优先分配货物由船舶运输,有助于在SL运力范围内减少对重卡的依赖,优化资源配置,降低系统运行总成本。

$$\sum_{t=1}^T q_t^{\text{FV}} = \begin{cases} q_{\max}^{\text{FV}} & Q > Q_{\max}^{\text{FV}} \\ Q & Q \leq Q_{\max}^{\text{FV}} \end{cases}, Q_{\max}^{\text{FV}} = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^G q_{t,g}^{\text{FV}} \quad (25)$$

$$\sum_{t=1}^T q_t^{\text{ET}} + \sum_{t=1}^T q_t^{\text{FT}} + \sum_{t=1}^T q_t^{\text{HT}} \geq \begin{cases} Q - q_{\max}^{\text{FV}} & Q > Q_{\max}^{\text{FV}} \\ 0 & Q \leq Q_{\max}^{\text{FV}} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $Q_{\max}^{\text{FV}}$ 为调度周期内全部船舶通过升降船机的总运输能力上限, t 。

本文所建立的翻坝能源-物流耦合调度优化模

型包含0-1变量与连续变量乘积项,属于混合整数非线性规划问题,为便于求解,采用大M法将所有0-1变量与连续变量乘积项线性化处理。经线性化处理后,模型转化为混合整数线性规划问题,采用CPLEX求解器在MATLAB平台上求解。

5 算例分析

5.1 参数设置

以西南某6400 MW水电站库区为例,开展仿真分析,调度周期为24 h,每个时段为30 min。系统主要参数见附录C。

仿真场景设置为一天内每2 h需运输800 t货物,一天内需完成共计9600 t货物的翻坝运输任务,货物以煤炭等干散货为主。

由于目前翻坝运输正处于从传统化石能源向清洁能源转型的关键阶段,既存在完全依赖FT的传统运输模式,也在逐步推广ET、HT等新能源运输工具,形成多元化重卡联合运输模式,对此设置了两种类型的运输工具配置方案:传统单一FT配置和多元化重卡配置。对于这两种类型,为验证能源-物流耦合优化方法的有效性,分别设置考虑耦合优化和不考虑耦合优化两种调度策略,共设置4个场景如下。

情景1:陆路运输由15辆FT完成,调度过程中不考虑能源-物流耦合。

情景2:陆路运输由15辆FT完成,调度过程中考虑能源-物流耦合。

情景3:陆路运输由5辆ET,5辆HT和5辆FT共同完成,调度过程中不考虑能源-物流耦合。

情景4:陆路运输由5辆ET,5辆HT和5辆FT共同完成,调度过程中考虑能源-物流耦合。

5.2 优化结果对比

5.2.1 总成本与碳排放

表1 各情景总成本与碳排放

Table 1 Total cost and carbon emissions across cases

参数	情景1	情景2	情景3	情景4
总成本/元	186 950	107 570	94 305	54 324
碳排放/kg	32 023	32 023	12 836	14 724

在仅使用FT的情景下,耦合优化(情景2)比非耦合优化(情景1)总成本降低79380元,降幅42.5%。这主要源于物流-能源协同调度利用分时电价,在谷时段增加作业、峰时段集中运输,将运输成本从100170元降至20790元。由于所用车辆相同,两情景碳排放基本持平,表明在传统FT系统中,耦合优化的价值主要体现在经济性上。

在使用多元化重卡(ET、FT、HT)的情景下,耦合优化(情景4)同样将总成本降低了39 981元,降幅42.4%,运输成本从72 009元降至17 628元。该系统通过多能协同,在谷时段优先充电/制氢、峰时段优先使用清洁能源,验证了方法的有效性。但为追求经济最优,情景4增加了低成本FT的使用比例,导致其碳排放比情景3高出1 888 kg。结果表明,耦合优化方法在多元化重卡趋势下同样适用,但需在经济与环境效益间进行权衡。

5.2.2 用能情况

(1) 仅使用燃油重卡

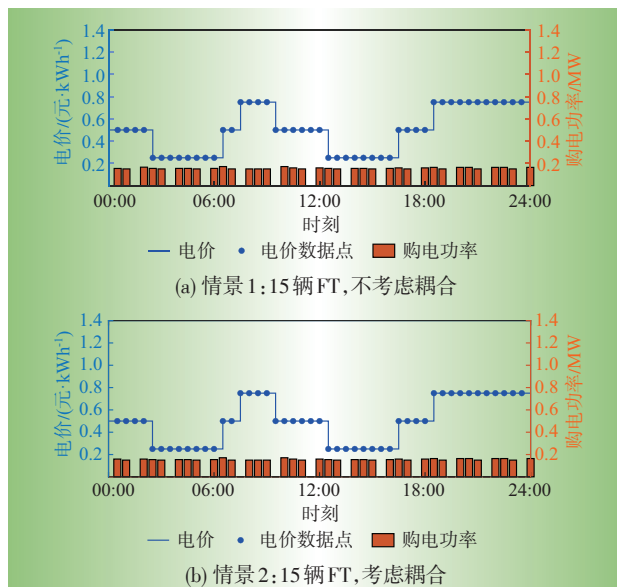


图3 不同情景下各时段购电功率

Fig. 3 Power purchase at each stage in different scenarios

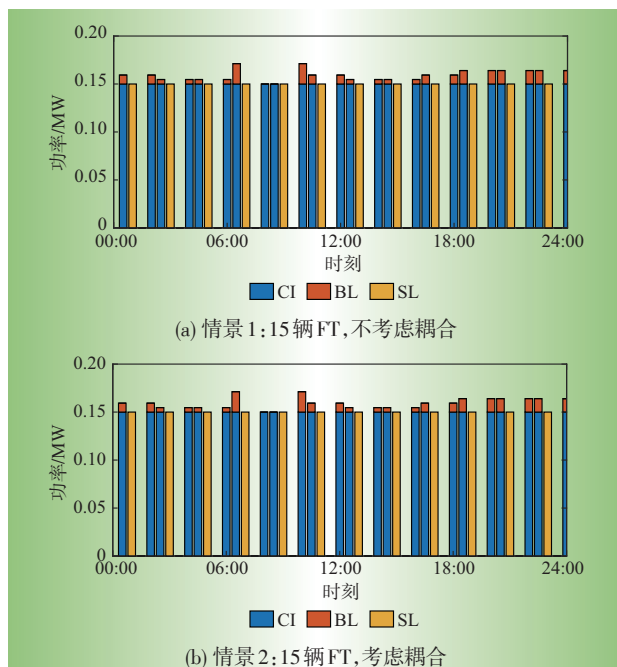


图4 不同情景下各时段电能分配

Fig. 4 Power consumption at each stage in different scenarios

从图3可见,在相同峰谷电价下,仅使用FT的情景1与情景2在购电功率时序分布上存在差异。情景2的购电曲线更为平滑,高电价时段峰值降低,低电价时段负荷分配更均衡。图4显示两种情景整体用电结构相似,但时段分配略有不同。这源于二者决策机制差异:情景1中物流与能源调度独立进行,用电安排难以充分响应电价变化;而情景2通过耦合优化实现协同决策,在保障运输效率的前提下,将部分可调负荷从高电价时段转移至低电价时段,从而形成“削峰填谷”的负荷响应效果。耦合优化通过对辅助设施运行时序的微调及运输任务与用电作业的协调,最终实现了系统成本优化。

(2) 使用多元化重卡

从图5可以看出,使用多元化重卡的两种情景(情景3和情景4)在用电设施构成和时序分布上存在显著差异。情景3的电能分配相对集中,设施运行时序固定,负荷主要集中在特定时段,整体负荷曲线波动较大。情景4的电能分配更加均衡分散,负荷分布平缓,电价低谷时段出现明显的负荷集中。

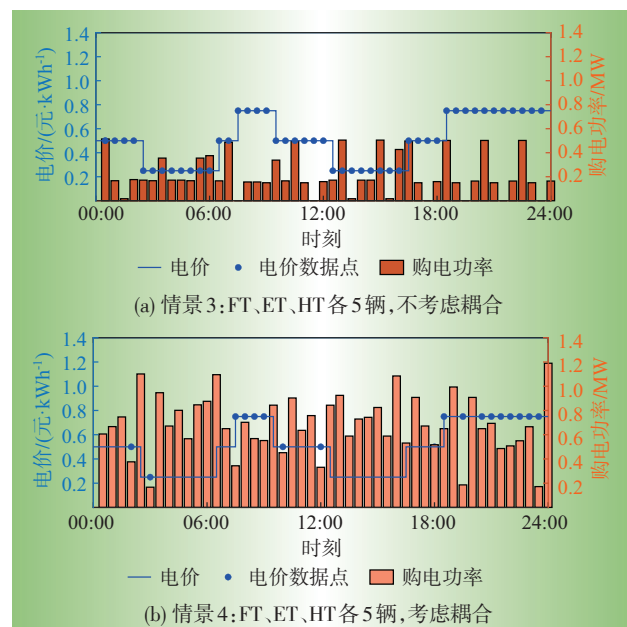
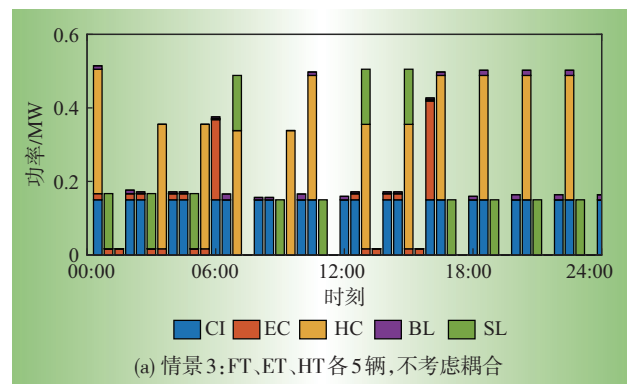


图5 不同情景下各时段购电功率

Fig. 5 Power purchase at each stage in different scenarios



(a) 情景3: FT、ET、HT各5辆,不考虑耦合

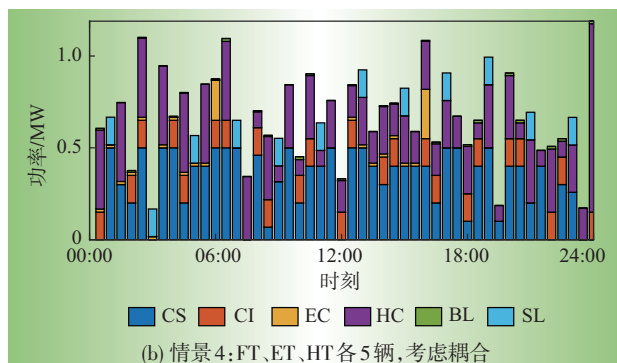


图6 不同情景下各时段电能分配

Fig. 6 Power consumption at each stage in different scenarios

从图6来看,情景3的购电曲线峰谷差异较大,而情景4的购电功率分布更加平滑,体现出明显的“削峰填谷”特征。这些差异源于情景3采用分离优化策略,各设施模块独立决策,而情景4通过深度耦合优化,实现物流调度与多能源系统协同决策,将大功率负荷安排在电价谷时段,运输任务集中在电价峰时段,大幅降低用电成本。HS的缓冲作用使制氢与用氢在时间上解耦,增强了系统调度灵活性。耦合优化实现了电-氢-油3种能源的协调利用,根据实时电价和运输需求动态选择经济高效的能源供应方案。

6 结束语

本文针对水电站库区翻坝运输系统能源优化问题,提出了能源-物流耦合优化框架,构建了基于多能互补的水电站库区翻坝能源-物流耦合调度模型。经仿真结果表明,在仅使用FT及使用ET、FT、HT的情况下物流系统与能源系统协同优化均能比单独优化有效降低系统运行成本并显著减少碳排放量。D

附录见本刊网络版(<http://dsm.ijournals.cn>)。

参考文献:

- [1] 普月,刘皓明,王健,等.考虑多源激励的港口能流-物流全过程协同调度优化[J].中国电机工程学报,2023,43(20):7 912-7 929.
PU Yue, LIU Haoming, WANG Jian, et al. Whole-process collaborative scheduling optimization for port energy flows and logistics flows considering multi-source incentives[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 7 912-7 928.
- [2] 方斯顿,赵常宏,丁肇豪,等.面向碳中和的港口综合能源系统(二):能源-交通融合中的柔性资源与关键技术[J].中国电机工程学报,2023,43(3):950-969.
FANG Sidun, ZHAO Changhong, DING Zhaohao, et al. Port integrated energy systems toward carbon neutrality (II): flexible resources and key technologies in energy-transportation integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3):950-968.
- [3] 袁裕鹏,袁成清,徐洪磊,等.我国水路交通与能源融合发展路径探析[J].中国工程科学,2022,24(3):184-194.
YUAN Yupeng, YUAN Chengqing, XU Honglei, et al. Pathway for integrated development of waterway transportation and energy in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3):184-194.
- [4] YIGIT K, ACARKAN B. A new electrical energy management approach for ships using mixed energy sources to ensure sustainable port cities[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 40:126-135.
- [5] JI B, SUN H, YUAN X, et al. Coordinated optimized scheduling of locks and transshipment in inland waterway transportation using binary NSGA-II[J]. International Transactions in Operational Research, 2020, 27(3):1 501-1 525.
- [6] JI B, YUAN X, YUAN Y. A binary borg-based heuristic method for solving a multi-objective lock and transshipment co-scheduling problem[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(3):947-958.
- [7] 高攀,许泽傲,张雪莹,等.面向梯级船闸通航拥堵的船舶过坝协同策略研究[J/OL].中国管理科学,1-14[2025-06-05].
GAO Pan, XU Zeao, Zhang Xueying, et al. Research on cooperative strategy of ship crossing dam for traffic congestion of cascade lock[J/OL]. Chinese Journal of Management, 1-14[2025-06-05].
- [8] 谢文强,史明明,刘瑞煌,等.多时间尺度下考虑船舶需求响应的海港综合能源系统优化调度方法[J].浙江电力,2025,44(3):42-52.
XIE Wenqiang, SHI Mingming, LIU Ruihuang, et al. An optimal scheduling method for port integrated energy system considering ship demand response at multiple time scales[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(3):42-52.
- [9] 徐慧慧,赵宇洋,田云飞,等.考虑供应侧灵活响应与需求响应不确定性的综合能源系统优化调度[J].浙江电力,2025,44(3):53-61.
XU Huihui, ZHAO Yuyang, TIAN Yunfei, et al. Optimal scheduling of integrated energy system considering supply-side flexible response and demand response uncertainty[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(3):53-61.
- [10] 张海伟,刘会家,洪家恩,等.考虑需求响应不确定性的电-热-氢综合能源系统优化调度策略[J].浙江电力,2025,44(4):39-49.
ZHANG Haiwei, LIU Huijia, HONG Jiaen, et al. An optimal scheduling strategy for integrated electric-thermo-hydrogen energy system considering demand response uncertainty[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(4):39-49.

作者简介:

贾清茹(2002),女,北京人,硕士研究生,研究方向为综合能源系统;

刘皓明(1977),通信作者,男,江苏盐城人,教授,研究方向为配电系统运行与控制、智能用电与能效、新能源发电。

(责任编辑 安然)

附录 A

(1) HS 约束

HS 的氢气存量须在安全范围内,且充放氢功率不能超过设施额定值,如下

$$0 \leq P_{t, \text{ch}}^{\text{HS}, \text{h}} \leq P_{\text{ch}, \text{max}}^{\text{HS}, \text{h}}, 0 \leq P_{t, \text{dis}}^{\text{HS}, \text{h}} \leq P_{\text{dis}, \text{max}}^{\text{HS}, \text{h}}, E_{\text{min}}^{\text{HS}, \text{h}} \leq E_t^{\text{HS}, \text{h}} \leq E_{\text{max}}^{\text{HS}, \text{h}} \quad (\text{A-1})$$

式中: $E_{\text{min}}^{\text{HS}, \text{h}}$ 和 $E_{\text{max}}^{\text{HS}, \text{h}}$ 分别为 HS 的最小和最大容量, kg。

(2) EC 约束

EC 的运行功率须在其额定功率范围内,如下

$$P_{\text{min}}^{\text{EC}, \text{e}} \leq P_t^{\text{EC}, \text{e}} \leq P_{\text{max}}^{\text{EC}, \text{e}} \quad (\text{A-2})$$

式中: $P_{\text{min}}^{\text{EC}, \text{e}}$ 和 $P_{\text{max}}^{\text{EC}, \text{e}}$ 分别为 EC 的耗电功率的最小值和最大值, kW。

(3) HC 约束

HC 的运行功率须在其额定功率范围内,如下

$$0 \leq P_t^{\text{HC}, \text{e}} \leq P_{\text{max}}^{\text{HC}, \text{e}} \quad (\text{A-3})$$

式中: $P_{\text{max}}^{\text{HC}, \text{e}}$ 为 HC 的耗电功率的最大值, kW。

附录 B

(1) BL 约束

BL 的运行功率须在其额定功率范围内,如下

$$P_{\text{min}}^{\text{BL}, \text{e}} \leq P_t^{\text{BL}, \text{e}} \leq P_{\text{max}}^{\text{BL}, \text{e}} \quad (\text{B-1})$$

式中: $P_{\text{min}}^{\text{BL}, \text{e}}$ 和 $P_{\text{max}}^{\text{BL}, \text{e}}$ 分别为 BL 的耗电功率的最小值和最大值, kW。

(2) SL 约束

SL 的运行功率须在其额定功率范围内,如下

$$P_{t, \text{min}}^{\text{SL}, \text{e}} \leq P_t^{\text{SL}, \text{e}} \leq P_{t, \text{max}}^{\text{SL}, \text{e}} \quad (\text{B-2})$$

式中: $P_{t, \text{min}}^{\text{SL}, \text{e}}$ 和 $P_{t, \text{max}}^{\text{SL}, \text{e}}$ 分别为 SL 耗电功率的最小值和最大值, kW。

(3) 多元化重卡

重卡能量约束确保 3 种运输重卡在运行过程中的补能合理性。首先是安全补能约束,规定重卡补能过程中的能源存量必须保持在设施安全运行范围内,防止过度充能或补能不足,见式(B-3);其次是强制补能约束,当重卡能源存量低于安全阈值时,必须进行补能操作,避免在运输过程中因能源耗尽导致运输中断或安全事故,以确保系统运行的可靠性和安全性,见式(B-4)。

$$\begin{cases} E_{\text{min}}^{\text{FT}} \leq E_{t, k}^{\text{FT}} \leq E_{\text{max}}^{\text{FT}} \\ E_{\text{min}}^{\text{HT}} \leq E_{t, l}^{\text{HT}} \leq E_{\text{max}}^{\text{HT}} \\ E_{\text{min}}^{\text{ET}} \leq E_{t, i}^{\text{ET}} \leq E_{\text{max}}^{\text{ET}} \end{cases} \quad (\text{B-3})$$

$$\begin{cases} u_{t, k}^{\text{FT}} E_{t, k}^{\text{FT}} \geq u_{t, k}^{\text{FT}} (p^{\text{FT}} d^{\text{FT}} q_{t+1, k}^{\text{FT}} + E_{\text{min}}^{\text{FT}}) \\ u_{t, l}^{\text{HT}} E_{t, l}^{\text{HT}} \geq u_{t, l}^{\text{HT}} (p^{\text{HT}} d^{\text{HT}} q_{t+1, l}^{\text{HT}} + E_{\text{min}}^{\text{HT}}) \\ u_{t, i}^{\text{ET}} E_{t, i}^{\text{ET}} \geq u_{t, i}^{\text{ET}} (p^{\text{ET}} d^{\text{ET}} q_{t+1, i}^{\text{ET}} + E_{\text{min}}^{\text{ET}}) \end{cases} \quad (\text{B-4})$$

式中: $E_{\text{min}}^{\text{HT}}$ 为 HT 的最小安全氢气存量, kg; $E_{\text{min}}^{\text{ET}}$ 为 ET 电池的最小安全电量存量; $E_{\text{min}}^{\text{FT}}$ 为 FT 的最小安全燃油存量, L。

(4) CS 约束

CS 内第 j 个充电桩用电功率约束见式(B-5), 同时充电 ET 数量约束见式(B-6)。

$$0 \leq P_{t, j}^{\text{CS}, \text{e}} \leq P_{\text{max}}^{\text{CS}, \text{e}} \quad (\text{B-5})$$

$$\sum_{j=1}^J u_{t, j}^{\text{CS}, \text{e}} \leq J \quad (\text{B-6})$$

式中: $P_{\text{max}}^{\text{CS}, \text{e}}$ 为充电桩的最大用电功率, kW。

(5) HRS 约束

HRS 内第 n 个充电桩用电功率约束见式(B-7), 同时充氢 HT 数量约束见式(B-8)。

$$0 \leq P_{t, n}^{\text{HRS}, \text{h}} \leq P_{\text{max}}^{\text{HRS}, \text{h}} \quad (\text{B-7})$$

$$\sum_{l=1}^L u_{t, l}^{\text{HT}} \leq L \quad (\text{B-8})$$

式中: $P_{\text{max}}^{\text{HRS}, \text{h}}$ 为充氢桩的最大充氢速率, kg/h。

附录 C

表 C-1 重卡参数

Table C-1 Heavy-duty truck parameters

设施	最大载重/ (t/车)	储能容量	单位能耗	单位运输 成本/ (元/(t·km))
FT	35	400 L	0.06 L/(t·km)	0.55
ET	30	300 kWh	0.12 kWh/(t·km)	0.45
HT	35	15 kg	0.1 kg/(t·km)	0.40

表 C-2 能源设施参数

Table C-2 Energy facilities parameters

参数	取值	参数	取值
$P_t^{\text{EC}, \text{e}} / \text{kW}$	500	$c^{\text{om}, \text{HC}} / (\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.03
$\eta_{\text{h}}^{\text{EC}}$	0.025	$c^{\text{om}, \text{HS}} / (\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.04
$c^{\text{om}, \text{EC}} / (\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.05	$\eta_{\text{h}}^{\text{HC}, \text{h}}$	0.02
$P_t^{\text{HC}, \text{e}} / \text{kW}$	400	$P^{\text{CS}, \text{e}} / \text{kW}$	150