

# 天然气储运无人值守场站能源管理方法分析

苗 键 (贵州页岩气勘探开发有限责任公司, 贵州 遵义 563400)

**摘要:** 天然气储运无人值守场站作为天然气供应链的关键节点, 其能源消耗涵盖压缩机组、加热设备、安防系统等多类负载, 能源管理效率直接影响场站运营成本与环保效益。本文结合无人值守场站“远程监控、少人运维”的运营特征, 分析场站能源消耗结构与管理痛点, 提出涵盖“智能监测-动态优化-能效评估”的全流程能源管理方法: 通过物联网感知技术构建能源消耗实时监测网络, 依托边缘计算实现负载动态调度, 引入能效指标体系完成管理效果量化评估。通过某LNG储运无人值守场站工程实例验证, 该方法可使场站综合能耗降低, 压缩机组能耗利用率提升, 为天然气储运无人值守场站的节能降耗与精细化管理提供技术支持。

**关键词:** 天然气储运; 无人值守场站; 能源管理; 物联网监测

**中图分类号:** TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0097-03

## Analysis of Energy Management Methods for Unmanned Natural Gas Storage and Transportation Stations

Miao Jian (Guizhou Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Zunyi Guizhou 563400, China)

**Abstract:** As a critical node in the natural gas supply chain, unattended natural gas storage and transportation stations involve energy consumption across multiple loads, including compressor units, heating equipment, and security systems. The efficiency of energy management directly impacts operational costs and environmental benefits. This paper analyzes the energy consumption structure and management challenges of unattended stations based on their operational characteristics of “remote monitoring and minimal staffing.” A comprehensive energy management method encompassing “intelligent monitoring, dynamic optimization, and energy efficiency assessment” is proposed: real-time energy consumption monitoring networks are established through IoT sensing technology, load dynamic scheduling is achieved via edge computing, and management effectiveness is quantitatively evaluated by introducing an energy efficiency indicator system. Validation through an engineering case of an LNG storage and transportation unattended station demonstrates that this method reduces overall energy consumption and improves compressor unit energy utilization efficiency, providing technical support for energy conservation, consumption reduction, and refined management of natural gas storage and transportation unattended stations.

**Keywords:** Natural gas storage and transportation; Unattended field stations; Energy management; IoT monitoring

随着天然气产业向智能化、低碳化转型, 无人值守场站凭借“减少人工成本、提升运营安全性”的优势, 逐渐成为天然气储运环节的主流建设模式。此类场站主要承担天然气增压、冷却、储存、计量等功能, 涉及压缩机组、换热器、循环水泵、安防监控系统等多类能源消耗设备。当前, 无人值守场站能源管理仍存在三方面突出问题: 一是能源监测碎片化, 多数场站仅对总能耗进行统计, 缺乏对单设备、单流程的精细化能耗监测, 难以定位高耗能环节; 二是负载调度依赖经验, 压缩机组、循环水泵等设备多采用“恒功率运行”模式, 未根据天然气流量、压力等工况动态调整, 导致能源浪费; 三是能效评估体系不完善, 传统管理仅以“能耗总量下降”为目标。

### 1 天然气储运无人值守场站能源消耗现状与管理痛点

#### 1.1 能源消耗结构分析

天然气储运无人值守场站的能源消耗以电能为主, 辅以少量热能(如伴热系统), 具体可分为生产

性能耗与辅助性能耗两类: 生产性能耗聚焦天然气处理核心环节, 包括压缩机组(用于天然气增压)、LNG低温储罐冷却系统、计量装置动力消耗, 其中压缩机组因需维持天然气输送压力(通常为4.0-6.0MPa), 采用变频电机驱动, 能耗占比最高; 辅助性能耗涵盖安防系统(红外监控、周界报警)、照明系统、通风设备、远程通信设备等, 此类设备虽单台能耗较低, 但24h连续运行, 累计能耗占比达15%-20%<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 能源管理核心痛点

##### 1.2.1 监测精度不足, 能耗溯源困难

无人值守场站缺乏全覆盖的能源感知网络, 多数设备未安装专用能耗传感器, 仅通过场站总电表、总水表进行能耗统计, 无法区分单设备、单流程的能耗贡献。例如, 压缩机组的能耗数据需人工定期抄录, 无法实时反映不同工况下的能耗变化; 冷却系统的循环水泵能耗与冷却效果未建立联动监测, 难以判断“能耗-效果”匹配度, 导致高耗能环节定位困难。

### 1.2.2 负载调度僵化，能源利用效率低

受限于自动化水平，场站设备多采用固定运行模式：压缩机组根据预设压力阈值启停，未考虑天然气瞬时流量波动，导致“大马拉小车”现象，如当天然气流量从设计值的100%降至60%时，压缩机组仍维持80%功率运行，电能浪费率达20%；冷却系统的循环水泵采用恒转速运行，未根据储罐内LNG温度动态调整转速，在低温环境下仍保持高负荷运转，额外增加能耗<sup>[2]</sup>。

### 1.2.3 能效评估粗放，管理效果难量化

当前能效评估多以“月度/季度能耗总量”为指标，未结合场站运营负荷（如天然气处理量）、环境条件（如室外温度、湿度）进行动态修正。例如，某月场站能耗总量下降5%，但同期天然气处理量下降10%，实际单位能耗（ $\text{kWh}/10^4\text{m}^3$ ）反而上升，传统评估方法易误判管理效果；此外，缺乏对设备能效等级（如压缩机组COP值）、系统运行效率（如冷却系统换热效率）的专项评估，难以从设备与系统层面提出优化方向。

## 2 天然气储运无人值守场站能源管理创新方法

### 2.1 基于物联网的能源消耗智能监测方法

#### 2.1.1 感知网络搭建

在场站关键设备与能源节点部署多类型传感器，构建全覆盖监测网络：在压缩机组、冷却系统、循环水泵等主要耗能设备的供电回路安装智能电表（精度0.5级），实时采集电压、电流、功率、耗电量数据；在LNG储罐安装温度传感器、压力传感器，在天然气输送管道安装流量传感器，实现工况参数与能耗数据的联动监测；在辅助设备（如照明、安防系统）安装智能插座，记录设备启停时间与能耗变化。所有传感器通过LoRa/Wi-Fi协议接入边缘计算网关，数据传输频率设为1min/次，确保监测实时性<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.2 数据融合处理

边缘计算网关对采集的多源数据进行预处理：一是数据清洗，采用“ $3\sigma$  准则”剔除异常值（如传感器故障导致的瞬时高功率数据）；二是数据关联，将设备能耗数据与工况参数（如压缩机组出口压力、天然气流量）进行时间戳对齐，建立“能耗-工况”关联数据库；三是数据上传，通过4G/5G网络将处理后的数据传输至远程监控平台，平台采用分布式存储架构，支持历史数据查询（最长保留1年）与实时曲线展示，管理人员可通过电脑、手机终端随时查看场站能耗动态。

#### 2.1.3 异常预警机制

远程监控平台设置能耗异常预警阈值，包括设备单耗阈值（如压缩机组单位天然气处理能耗阈值设为

$8.0\text{kWh}/10^4\text{m}^3$ ）、能耗波动阈值（如1h内能耗突变超过20%）。当监测数据超出阈值时，平台自动触发预警，通过短信、APP推送方式通知运维人员，并生成异常分析报告，初步判断异常原因（如设备故障、工况突变），为快速处置提供依据<sup>[4]</sup>。

### 2.2 基于工况匹配的负载动态优化方法

#### 2.2.1 压缩机组能耗优化

采用“流量-压力-功率”联动控制策略，根据天然气瞬时流量动态调整压缩机组运行参数：通过管道流量传感器实时获取天然气流量数据，边缘计算网关根据流量变化计算最优输出压力（如流量从 $100\text{m}^3/\text{h}$ 降至 $60\text{m}^3/\text{h}$ 时，输出压力从5.0MPa调整为3.5MPa），并向压缩机组变频控制器发送调节指令，实现“流量匹配压力、压力匹配功率”的精准控制。同时，建立压缩机组运行状态评估模型，通过分析功率因数、振动频率等数据，判断设备是否处于最优运行区间，当发现设备效率低于85%时，自动提醒运维人员进行维护（如更换润滑油、清理滤芯），提升设备能耗利用率。

#### 2.2.2 冷却系统能耗优化

针对LNG储罐冷却系统，采用“温度-转速”自适应控制：根据储罐内LNG温度传感器数据，结合室外环境温度，通过PID算法计算循环水泵最优转速。例如，当储罐内温度维持在 $-162^\circ\text{C}$ （LNG饱和温度）且室外温度低于 $10^\circ\text{C}$ 时，将水泵转速从额定转速的100%降至60%，减少电能消耗；当室外温度高于 $25^\circ\text{C}$ 或储罐内温度升至 $-160^\circ\text{C}$ 时，自动提高水泵转速至80%-100%，确保冷却效果。此外，优化冷却系统启停时间，利用电网谷段电价（如23:00-7:00）进行储罐预冷，在峰段电价时段适当降低冷却负荷，实现“错峰用能”，降低用电成本<sup>[5]</sup>。

#### 2.2.3 辅助设备能耗优化

对安防、照明等辅助设备采用“按需启停”控制：安防系统的红外监控设备根据周界入侵风险等级调整运行模式（如白天人流密集时段采用高清录像模式，夜间无人时段切换为移动侦测模式，仅在检测到异常时启动录像）；照明系统采用光感+人体感应双重控制，当室外光照强度高于500lux或场站无人员作业时，自动关闭照明灯具；远程通信设备采用休眠机制，在数据传输间隙进入低功耗模式，降低待机能耗。通过上述措施，辅助设备能耗可降低15%-20%。

### 2.3 基于多维度指标的能效评估方法

#### 2.3.1 构建能效评估指标体系

从设备、系统、场站三个维度设置评估指标：设备维度包括压缩机组能效比（COP，即制冷量/耗电量，目标值 $\geq 3.5$ ）、循环水泵运行效率（目标

值  $\geq 75\%$ )；系统维度包括冷却系统换热效率(目标值  $\geq 85\%$ )、压缩系统单位处理能耗(目标值  $\leq 8.0\text{kWh}/10^4\text{m}^3$ )；场站维度包括综合能耗指标(目标值  $\leq 8.5\text{kgce}/10^4\text{m}^3$ )、能源利用率(目标值  $\geq 80\%$ )。各指标根据场站实际运营情况设置权重(如压缩机组能效比权重 0.3, 综合能耗指标权重 0.2)，采用层次分析法计算综合能效得分(满分 100 分)，得分  $\geq 85$  分为优秀, 70-84 分为良好,  $<70$  分为待改进。

### 2.3.2 动态修正评估标准

考虑到场站运营负荷与环境条件的变化, 对能效指标进行动态修正: 例如, 当天然气处理量低于设计值的 70% 时, 将压缩系统单位处理能耗阈值从  $8.0\text{kWh}/10^4\text{m}^3$  放宽至  $9.0\text{kWh}/10^4\text{m}^3$ ; 当室外温度高于  $30^\circ\text{C}$  时, 将冷却系统换热效率阈值从 85% 下调至 80%。修正公式基于历史数据回归分析得出, 确保评估标准的科学性与合理性, 避免因客观条件变化导致评估结果失真。

### 2.3.3 生成优化建议报告

远程监控平台每月自动生成能效评估报告, 内容包括各指标实际值与目标值对比、能耗变化趋势分析、高耗能环节识别, 并结合设备运行数据提出针对性优化建议。例如, 若压缩机组 COP 值低于目标值, 报告建议检查制冷剂泄漏情况; 若冷却系统换热效率下降, 建议清理换热器结垢。运维人员根据报告制定整改计划, 形成“评估-优化-再评估”的闭环管理。

## 3 工程实例验证

以某省天然气公司下属的 LNG 储运无人值守场站为研究对象, 该场站设计天然气处理能力  $50 \times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ , 采用“远程监控+定期巡检”运营模式, 2024 年 1-3 月采用传统能源管理方法, 4-6 月应用本文提出的创新管理方法, 对比分析管理效果。

### 3.1 监测精度提升效果

应用创新方法后, 场站实现了从“总能耗监测”到“单设备精细化监测”的转变: 压缩机组能耗数据采集频率从人工每周 1 次提升至实时 1min/次, 数据误差率从  $\pm 5\%$  降至  $\pm 0.5\%$ ; 成功识别出 2 台循环水泵存在“空转耗能”问题(日均空转时长 2.5h, 浪费电能约  $80\text{kWh}$ ), 通过优化启停控制消除空转现象。

### 3.2 能耗优化效果

#### 3.2.1 压缩机组

通过“流量-压力-功率”联动控制, 单位天然气处理能耗从  $8.6\text{kWh}/10^4\text{m}^3$  降至  $7.8\text{kWh}/10^4\text{m}^3$ , 降幅 9.3%, 日均节约约  $420\text{kWh}$ 。

#### 3.2.2 冷却系统

采用“温度-转速”自适应控制, 循环水泵日均

耗电从  $1800\text{kWh}$  降至  $1450\text{kWh}$ , 降幅 19.4%, 且 LNG 储罐温度稳定维持在  $-162^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

#### 3.2.3 辅助设备

通过“按需启停”控制, 日均耗电从  $1500\text{kWh}$  降至  $1230\text{kWh}$ , 降幅 18%。

#### 3.2.4 场站综合能耗

4-6 月日均耗电量降至  $7200\text{kWh}$ , 较 1-3 月 ( $8500\text{kWh}$ ) 下降 15.3%, 综合能耗指标从  $9.2\text{kgce}/10^4\text{m}^3$  降至  $7.8\text{kgce}/10^4\text{m}^3$ , 满足 GB 50494-2019 标准要求。

### 3.3 能效评估效果

4-6 月场站综合能效得分从传统管理时期的 68 分(待改进)提升至 87 分(优秀), 其中压缩机组 COP 值从 3.2 提升至 3.6, 冷却系统换热效率从 82% 提升至 86%, 各项指标均达到目标值。根据评估报告建议, 运维人员对 1 台老化的换热器进行清洗, 进一步提升了冷却系统效率, 验证了能效评估体系的指导价值。

## 4 结论

基于物联网的智能监测方法, 通过全覆盖感知网络与数据融合处理, 实现能耗数据实时化、精细化采集, 数据误差率降至  $\pm 0.5\%$ , 可快速识别能耗异常; 基于工况匹配的负载动态优化方法, 对压缩机组、冷却系统、辅助设备分别采用针对性控制策略, 使压缩机组单位处理能耗降幅 9.3%、冷却系统能耗降幅 19.4%、场站综合能耗下降 15.3%, 节能效果显著; 基于多维度指标的能效评估方法, 通过动态修正标准与生成优化建议, 形成管理闭环, 推动场站综合能效得分从 68 分提升至 87 分。未来可融合 AI 算法优化控制策略、探索新能源协同运行、构建区域管理平台, 为行业低碳发展提供更全面支持。

### 参考文献:

- [1] 延旭博. 面向无人值守的长输天然气作业区一体化管控平台设计 [J]. 科技与创新, 2023(23):93-95,98.
- [2] 雷升涛. 液化天然气储运安全技术研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025,45(10):161-163.
- [3] 张鑫. 天然气储运设施现状及发展趋势 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023,43(10):86-88.
- [4] 刘浩. 液化天然气储运及技术研究 [J]. 化工管理, 2021(25):69-70.
- [5] 石佩玉, 谭子茗, 薛佳. 液化天然气储运安全技术和措施分析 [J]. 石化技术, 2025,32(10):398-400,375.

### 作者简介:

苗键 (1989-), 男, 汉族, 山东曹县人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 液化天然气场站生产运行管理。