

控制与决策

Control and Decision

基于节能瓶颈诊断的循环冷却水系统节能改造

朱笑晨, 王福利, 牛大鹏, 贾明兴

引用本文:

朱笑晨, 王福利, 牛大鹏, 等. 基于节能瓶颈诊断的循环冷却水系统节能改造[J]. *控制与决策*, 2020, 35(9): 2129–2136.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1770>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向复杂作业车间的交互式两级调度方法

Two-stage interactive scheduling method for complex job-shop

控制与决策. 2020, 35(9): 2285–2291 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0107>

不同政府目标决策下具有奖惩机制的绿色供应链模型

Green supply chain model with premium and penalty mechanism under different government goals

控制与决策. 2020, 35(2): 427–435 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0664>

考虑维修优先权的多状态温贮备系统可靠性模型

Reliability analysis for multi-state warm standby system with repair priority

控制与决策. 2018, 33(11): 2029–2036 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0718>

采暖通风与空调系统中冷却塔传热效率的回归模型

Regression model of heat exchange efficiency of cooling tower in an HVAC system

控制与决策. 2018, 33(10): 1801–1806 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0643>

分簇传感器网络中时延约束下移动sink的路径优化

Optimizing path selection for mobile sink under delay constraint in cluster sensor networks

控制与决策. 2015, 30(8): 1423–1428 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0722>

基于节能瓶颈诊断的循环冷却水系统节能改造

朱笑晨[†], 王福利, 牛大鹏, 贾明兴

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘要: 循环冷却水系统是一种常用的工业辅助系统, 具有极大的节能潜力, 目前对该系统的节能改造往往具有盲目性. 鉴于此, 基于节能瓶颈诊断对循环冷却水系统进行节能改造分析和研究, 以提高改造针对性和节能效果. 根据循环冷却水系统特点对能耗分解方法进行改进, 提出多工况能效分解法, 将该方法与正交试验分析方法相结合设计一种两维度的系统节能瓶颈诊断方法, 对系统节能状态进行分析, 确定系统各部分的改造优先级, 以改造优先级为基础, 结合相应的改造措施形成优化问题以实现改造方案的设计. 同时结合项目后评价知识, 对各最优方案进行评价, 从而为决策者提供更多决策信息. 最后通过案例应用验证所提出方法的应用效果.

关键词: 循环冷却水系统; 节能改造; 节能瓶颈诊断; 改造优先级

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.1770

引用格式: 朱笑晨, 王福利, 牛大鹏, 等. 基于节能瓶颈诊断的循环冷却水系统节能改造[J]. 控制与决策, 2020, 35(9): 2129-2136.

Energy-saving retrofit of circulating cooling water system based on energy-saving bottleneck diagnosis

ZHU Xiao-chen[†], WANG Fu-li, NIU Da-peng, JIA Ming-xing

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Circulating cooling water systems are a kind of commonly used industrial auxiliary systems with great energy saving potential, but the energy-saving retrofit of the system is often blindfold. Therefore, this paper performs an analysis and research on energy-saving retrofit of a circulating cooling water system based on energy-saving bottleneck diagnosis to improve the targeted and energy-saving effects. According to the system characteristics, the energy decomposition method is improved, and the multi-case energy efficiency decomposition method is proposed. Combining this method with the orthogonal test analysis method, this paper designs a two-dimensional energy-saving bottleneck diagnosis method. Then the system energy-saving status is analyzed, and the retrofit priority of each system part is determined. Based on the retrofit priority, combined with the corresponding retrofit measures, the optimization problem is formed to realize the design of the retrofit scheme. In addition, combined with post-project evaluation knowledge, each optimal scheme is evaluated to provide decision makers with more decision information. Finally, through a case application, the effect of this method is verified.

Keywords: circulating cooling water system; energy-saving retrofit; energy-saving bottleneck diagnosis; retrofit priority

0 引言

循环冷却水系统是一种常见的工业辅助系统, 已广泛应用于化工、石油、钢冶、能源、食品等行业. 该系统的主要任务是使用水作为介质, 吸收工业系统在运行过程中产生的废热并将其排放至大气中, 对于保证生产安全、提高设备的运行效率以及节约水资源有着重要意义. 但是, 循环冷却水系统自身也是系统

流程中的一个高耗能单元, 例如在钢铁冶炼企业中, 循环冷却水系统能耗往往能达到生产流程总能耗的 20%~30%, 在一些大型工业系统中, 这部分能耗甚至能够达到上万千瓦^[1-2]. 所以, 循环冷却水系统具备很大的节能潜力, 对其进行节能研究, 具有节约企业运行成本、实现资源和能源高效使用的重要现实意义.

收稿日期: 2018-12-25; 修回日期: 2019-07-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61533007, 61673092, 61773101); 创新研究群体科学基金项目(61621004); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(N150404017).

责任编辑: 阳春华.

[†]通讯作者. E-mail: 763104213@qq.com.

目前,最常见的循环冷却水系统节能研究是系统的优化设计研究,即根据各项设计要求或设计目标对系统的结构、设备类型、运行状态进行设计.此类研究的研究成果较为全面, Kim等^[3-4]开创性地对循环冷却水系统进行整体分析与设计,不再将该系统视为各类设备的简单组合,并在管网建模与设计过程中考虑了系统各环节间的相互影响. Panjeshahi等^[5-6]在文献[3-4]的基础上进一步扩展了系统模型,增强系统各环节的联系,通过对多种设计方法费用模型的对比,实现了更加节能的管网设计. Gololo等^[7]对前人提出的整体设计方法进行分解,先使用超结构方法描述系统拓扑结构,再使用关键路径算法计算系统压降,实现管网系统最优设计.我国研究人员在该领域也进行了很多有价值的研究, Ma等^[8]考虑了系统结构、压降等多种因素进行了循环冷却水系统中水泵和换热器的优化设计. Sun等^[9]采用一种两步优化设计方法,将管网设计过程分为热力设计和水力设计两个部分,分步优化得到最优管网系统.此外,孙彦广等^[1]、赵斐等^[2]、王宁^[10]也在循环冷却水系统的优化设计领域进行了探索,发表了具有参考价值的成果.

虽然系统节能设计研究可以实现系统的最大节能效果,但是此类研究是对管网系统的自由设计,一般只适用于管网系统搭建前的设计过程.节能研究通常更多地应用于已经投入使用的管网系统,对这些现存系统的研究往往存在着场地、现有结构、设备基础、资金等大量限制,导致大多数优化设计方法难以获得适合的应用环境.

系统节能改造是实现现有循环冷却水系统节能的有效方法,因为节能改造可以改变系统设备类型和属性,从根源上提高系统的节能水平,从而减少能源与资源的浪费,提高企业受益.同时,节能改造可以对系统的现有资源进行最大程度的应用,减少新项目的建设,极大地减少资本投入和对环境的影响.目前,各国研究人员对循环冷却水系统和相似工业系统的节能改造进行了一些研究,部分学者提出一些分析方法进行节能改造方案的设计. Jahromi等^[11]在夹点分析的基础上提出了桥分析法,实现对换热管网系统的节能改造设计. Piacentino^[12]以案例分析作为研究切入点,并对夹点分析、烟分析、换热驱动等多种分析方法进行了综合应用,采用组合分析设计系统的最优改造方案. Sreepathi等^[13]采用数学规划方法将改造方案设计问题转化为优化问题,进行了年运行费用最小的优化设计. Brange等^[14]采用模拟仿真方法对节能改造过程中的各项改造措施进行分析,综合考虑

改造效果和实施成本提出最优改造方案. Gang等^[15]对冷却系统进行了区域化改造,采用建模分析方法与传统系统进行比较和验证.此外,还有部分学者进行了更具备实用性的研究,张承慧等^[16]对某供水系统进行研究,主要针对系统中水泵组进行建模分析与改造设计,取得了良好的节能效果. Akpomimie等^[17]和 Wang等^[18]均对系统中换热器进行了改造研究,提出了有效的改造方案.王德维^[19]将冷却塔风机作为节能改造对象,进行了水轮机替代电动机的改造研究,实现了系统节能,也分析了此种改造方案的优缺点. Marugán-Cruz等^[20]对循环冷却水系统进行改造并将其与太阳能发电系统结合,使用太阳能余量进行冷却,避免了能源的浪费. Oh等^[21]通过更换制冷剂的方式提高系统的冷却能力,从而起到节能效果.这些研究对循环冷却水系统及相似系统中不同的改造对象进行了分析,提出了一些成熟的、具有实用性的改造措施.

目前看来,部分学者在循环冷却水系统的节能改造领域进行了研究,但是仍然存在一些问题有待解决.首先,很多节能改造的指标设定不够合理,没有选择能效作为改造目标的评价标准,也就不能较为客观地描述系统的节能水平.此外,大多数研究也缺乏对改造系统多种运行工况的考虑与分析.另一方面,目前绝大多数节能改造研究都是对某一项节能改造对象进行设计或者对系统进行完整改造设计,缺少对当前系统节能瓶颈的分析,即没有对当前系统存在的节能问题进行针对性的改造.这样会导致节能改造难以获得最优的节能效果,进而影响改造资金投入的收益率,造成资源浪费.

本文针对目前循环冷却水系统节能改造研究中存在的问题,提出基于节能瓶颈诊断的循环冷却水系统节能改造方案分析方法.对能耗分解方法进行改进,根据循环冷却水系统特性改进了分解指标,并且实现多工况状态分析.同时综合正交实验分析方法,提出一种全新的两维度系统改造优先级分析方法,从运行单元和节能因素两个方向上分析系统节能状态,量化系统各部分的改造优先级.在此基础上通过优化方法设计得到高价值改造措施的最优改造方案,结合项目后评价知识对改造方案进行评价,为决策者提供参考意见与指导,提高循环冷却水系统的节能水平.

1 循环冷却水系统节能改造分析

循环冷却水系统的节能改造过程首先需要明确该系统的工作原理,分析与理解系统中能量的转化、

传递过程,从而确定节能改造对象.从循环冷却水系统的运行任务来看,该系统的主要目标是对整个系统流程中存在废热的环节或设备进行冷却,具体过程可以描述如下:冷却水由水泵提供动能,从储水设备中提取,经过水泵传输至换热管道中;冷却水通过管道流入换热器,在换热器中与工艺侧热流体进行换热,吸收热流体中的热量对其进行冷却;冷却后的热流体负责对系统设备进行直接或间接冷却,换热后的冷却水通过管网流入冷却塔;在冷却塔中,冷却水与空气充分接触,并将换热得到的热量传递至大气中;最后经过水质处理后,冷却水利用重力流回储水设备,等待循环使用.

以循环冷却水系统的工作原理为基础对系统中能量的传递、消耗、转化过程进行分析,以明确系统的能源使用情况.系统的能量输入包括电能和热能,一部分电能通过水泵转化为动能提供给冷却水,另一部分电能输入冷却塔对循环水进行冷却,热能通过换热器输入系统,再通过冷却塔输出系统,传递至大气中.其中电能是循环冷却水系统主要的能源消耗,系统吸收的热量是系统的运行任务.所以,与电能、热能的传递、转化过程密切相关的水泵、换热器、冷却塔是循环冷却水系统的核心设备,也是进行节能改造研究的关键点.但是,循环冷却水系统作为工业系统设备的类型和数量都比较多,因此在对核心设备分析过程中应该划分为若干单元,以简化并使分析过程更为清晰.此类划分方法种类较多, Li等^[22]提出了一种较为实用的以变量性质为基础的划分方法.但循环冷却水系统作为工业辅助系统,其系统运行任务往往具有独立性,同时具备多工况特点.因此,本文在对系统运行设备进行节能分析的过程中,采用了一种以系统运行任务为基础的运行单元划分方式,使分析过程更适应系统特点,也更为简便清晰.

对循环冷却水系统进行节能改造,本质上是通过改进系统设备性能参数改善系统运行状态,从整体上提高系统的节能水平.设备性能参数是描述运行设备自身工作能力的参数,可以反映系统运行任务与各项设备间的匹配程度以及管网系统的设计水平.由于工业系统的复杂程度较高,系统中一般存在多个需要分析与改进的性能参数,同时同类型设备的数量也较多,会进一步提高节能改造设计的复杂程度.目前对该系统的节能改造往往是进行的整体改造设计,这种方法固然可以取得最大的节能效果,但会导致改造工程量大、工程成本过高.因为在系统中各项设备的性能参数对系统整体的节能水平的影响程度并不

相同,且各项设备自身的节能基础也有所不同,导致各项参数的改造价值是不同的.所以,在节能改造方案设计过程中应该先对当前系统的节能状态进行深入分析,进行更有针对性的改造.为了对分析结果进行量化,本文提出了改造优先级概念.在节能改造方案设计过程中先计算各项改造对象的改造优先级,选择具有较高优先级的对象设计改造方案并实施改造,可以在获得较高节能效果的同时最大程度地节约实施成本,有效提高资金利用率和企业收益.

2 基于节能瓶颈诊断的改造优先级设计

本文提出的循环冷却水系统的节能改造优先级确定方法以系统节能瓶颈诊断为基础.首先对研究系统的节能现状进行分析;然后诊断节能瓶颈,确定系统各环节的节能潜力,进而确定系统各项节能措施的改造价值;最后进行量化确定改造优先级指标.为了准确地对现有循环冷却水系统的节能瓶颈进行分析,提出一种两维度节能瓶颈诊断方法,将节能瓶颈诊断分解为瓶颈单元分析和瓶颈因素分析,从两个方向上进行分析,再综合两部分分析结果确定系统节能瓶颈.

大规模工业系统中一般存在多种类型和数量的运行设备,为了完成系统运行任务,这些设备会被划分为若干运行单元,各单元对系统节能水平的影响程度是不同的,因此需要对其节能潜力进行分析.能量密度分解方法是一种常用于节能形势分析的宏观方法^[23].蔡九菊等^[24]在该方法的基础上提出了e-p分析方法,将能耗变化分解为能量使用和产品结构的变化,实现了钢铁企业生产流程的节能分析,部分学者应用该方法进行了钢铁企业的节能瓶颈诊断^[25].但是,循环冷却水系统与大多数工业辅助系统一样,并没有直接的产品输出,无法进行产品结构分解.因此,本文对能量密度分解方法进行改进,结合循环冷却水系统特点改进评价分解指标,将单位产出能耗分解改为对有用功能效的分解,拓展其应用范围.同时,综合考虑了系统的多工况运行情况,增加了多工况单元贡献度指标,使分析更为全面、准确.最终提出了基于多工况能效密度分解方法,可以实现对循环冷却水系统及类似工业辅助系统的节能瓶颈单元分析.

然而,仅通过单元瓶颈分析不能定位系统瓶颈的准确位置,需要进一步对系统中节能水平的各项影响因素进行分析.通过分析运行单元中各因素对节能水平的影响显著程度确定其改造价值,从两个方向上对系统节能瓶颈进行准确定位.考虑到工业系统运行机理复杂,采用正交实验分析方法这种高效率、

快速、经济的多因素实验分析方法对运行单元中各节能影响因素的影响程度进行分析,确定节能改造价值。

最终,对瓶颈单元分析结果和瓶颈因素分析结果进行标准化处理,并将两部分分析结果进行整合,实现循环冷却水系统的节能瓶颈准确诊断,同时得到系统节能改造优先级。具体计算过程描述如下。

step 1: 指标设置. 进行多工况能效密度分解的基础指标是系统能效指标,该指标描述系统输出单位有用功所消耗的能量,反映系统能源使用效率,即系统节能水平。循环冷却水系统的能效指标为单位制冷量能耗,记为 e ,该指标的计算公式和分解描述为

$$e = \frac{E}{Q} = \frac{\sum E_i}{Q} = \sum \frac{Q_i}{Q} \times \frac{E_i}{Q_i} = \sum q_i \times e_i. \quad (1)$$

其中: E 为系统能耗, Q 为系统冷却量, E_i 为运行单元 i 的能耗, Q_i 为 i 的冷却量。这些指标均为可测的工程统计量,系统能耗为系统中所有运行耗能设备单位时间消耗的能源(大多数情况下为电能);系统冷却量为系统完成的冷却任务,即单位时间内所有工艺侧热流体在换热器中被吸收的热量的总和; E_i 和 Q_i 则是将上述两个统计量的统计范围精确至运行单元。

为了进行能效分解,需要对能效指标的分解项进行定义,因此定义如下3个分解项指标,同时也是各项分析指标计算的基础指标:冷却量系数

$$q_i = Q_i/Q; \quad (2)$$

能效系数

$$e_i = E_i/Q_i; \quad (3)$$

能耗权重

$$\omega_i = E_i/E. \quad (4)$$

能效密度分解是对系统不同状态下的能效变化进行分析的方法,本文在该方法中加入多工况信息,所以可以设定系统中任一工况为基准工况,系统能效为 e^0 ,工况 j 的能效为 e^j ,那么系统由工况0~工况 j 的节能水平变化可以定义为

$$V^j = e^j/e^0. \quad (5)$$

step 2: 能效分解. 根据参考文献[25-26]中的指标分解方法,通过Laspeyres因素分解方法和牛顿-莱布尼兹公式,式(5)可被分解为

$$V^j = D_c^j \times D_e^j, \quad (6)$$

$$D_c^j = \exp \left[\sum \hat{\omega}_i^j \ln (q_i^j/q_i^0) \right], \quad (7)$$

$$D_e^j = \exp \left[\sum \hat{\omega}_i^j \ln (e_i^j/e_i^0) \right]. \quad (8)$$

其中: q_i^j 为运行单元 i 在工况 j 下的冷却量系数, e_i^j 为

运行单元 i 在工况 j 下的能效系数,可由式(2)和(3)计算得到。在不同的工况下,各运行单元的能耗权重 ω_i 可能发生变化,因此需要对该指标进行修正,具体过程为

$$\bar{\omega}_i^j = \frac{\omega_i^j - \omega_i^0}{\ln \omega_i^j / \omega_i^0}, \quad (9)$$

$$\hat{\omega}_i^j = \bar{\omega}_i^j / \sum \bar{\omega}_i^j. \quad (10)$$

其中: ω_i^j 为工况 j 下运行单元 i 的能耗权重; $\hat{\omega}_i^j$ 为修正后的单元能耗权重,可由式(4)计算得到。

系统节能水平变化分解为 D_c 和 D_e 两项指标,定义 D_c 为冷却量系数变化, D_e 为能效系数变化。 D_c 反映系统生产任务设计与运行调度的水平,不应用于节能瓶颈诊断过程。 D_e 反映系统运行单元的能效系数对系统能效的影响,同时也考虑了单元能耗权重的影响,是进行节能瓶颈单元诊断的主要指标。

step 3: 单元贡献度计算. 通过对指标贡献度的计算,可以分析各指标对系统能效变化的影响。指标贡献度定义为:如果存在 $Z = A \times B$,则 A 对 Z 的贡献度 $C(A \rightarrow Z)$ 可以表示为

$$C(A \rightarrow Z) = \frac{\ln A}{\ln Z} \times 100\%. \quad (11)$$

在此基础上可以对 D_e 指标进一步分解,确定各运行单元能效系数变化对整体变化指标的影响,从而确定各单元能效系数对整体节能水平的影响。各单元指标满足

$$D_e^j = \prod D_{ei}^j, \quad (12)$$

运行系统在不同工况下,各单元的能效贡献度可能不同,需要将工况信息加入最终的贡献度计算,有

$$C_i(D_{ei} \rightarrow D_e) = \left[\sum_j K_m^j C^j(D_{ei}^j \rightarrow D_e^j) \right], \quad (13)$$

$$j = 1, 2, \dots, n-1.$$

其中: n 为工况数量; C_i 为运行单元 i 的能效系数变化在多工况条件下对系统能效变化的贡献度; K_m^j 为工况权重系数,反映工况 j 在整个运行周期中的重要程度,可以表示为

$$K_m^j = t^j/t_{\text{total}}. \quad (14)$$

t^j 为工况 j 的年运行时间, t_{total} 为系统年运行时间。

step 4: 构建正交表,进行节能瓶颈因素的分析. 首先根据系统中的各项影响因素建立正交表。正交表是一种实验设计工具,能够保证设计实验的正交性,可以表示为

$$L_n(r^m). \quad (15)$$

其中: L 为正交表代号, n 为正交表的行数(实验次数), r 为因素水平数, m 为正交表列数(因素数量)。正

交表一般形式见表1,表中数字代表各实验因素的水平, x_n 为各次实验得到的实验结果,即各单元能效.

表1 正交表一般形式

实验号	列号				实验结果
	1	2	...	m	
1	1	1	...	1	x_1
2	1	2	...	2	x_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	r	r	...	1	x_n

step 5: 方差分析. 根据正交表设计的方案进行实验,对实验结果进行记录和分析. 方差分析利用显著性检验的原理,构建服从 F 分布的统计量并与 F 临界值进行比较判断各因素对实验结果的影响是否显著^[26],具体计算过程在文献[27-28]中有详细描述,本文不再赘述,最终计算得到各项因素的 F 统计量为

$$F_k = MS_k / MS_e. \quad (16)$$

其中: MS_k 为 k 因素的方差, MS_e 为误差方差,均由正交表中的数据进行统计计算得到. 各因素的 F 统计量可以反映该因素对研究对象的节能水平的影响程度,指标值越大,表明该因素对节能水平的影响程度越高,其节能改造价值也越高.

step 6: 改造优先级计算. 通过对瓶颈单元和瓶颈因素两部分分析结果进行整合,从两个维度上确定各改造对象的改造优先级. 整合前需要对两部分结果进行标准化,具体操作如下:

$$C_i^* = \frac{C_i}{\sum_i C_i}, \quad (17)$$

$$F_k^* = \frac{F_k}{\sum_k F_k}. \quad (18)$$

计算各节能改造对象的改造优先级

$$U_{ik} = C_i^* \times F_k^*. \quad (19)$$

3 改造方案的设计与评价

通过第2节介绍的改造优先级分析方法可以实现对循环冷却水系统各改造对象改造价值的量化,并精确至系统中具体的设备组. 在此基础上对该方法进一步拓展应用,实现系统节能改造方案的设计.

循环冷却水系统节能改造方案设计的目标是为工程决策者提供决策意见,设计能够有效提供系统整体节能水平,并且最适合当前系统的节能改造方案. 但是,节能改造是一项受到决策者多种主观因素影响的工程项目,决策者可能综合分析资金、节能收益、环保、技术基础等多种因素,同时不同的决策者对各项因素的侧重也不同,很难形成准确的数学描述,所以方案设计问题不存在理论上的最优解. 因此,改造方案的研究实际上是帮助决策者选择方案并提供

决策意见的研究. 综上所述,本文节能改造方案的研究思路可以归纳为:通过选择适当目标,对改造优先级较高的改造对象进行方案设计,并且对各个改造方案进行详细地分析与评价,尽可能多地提供有价值的决策参考信息. 决策者可根据各主观决策因素,选择一项或多项方案提出最终改造方案.

3.1 方案设计

本文的循环冷却水系统节能改造方案设计方法以改造优先级为基础,结合优化方法予以实现. 通过改造优先级选择改造对象,并将改造对象与节能改造措施相对应,结合系统的运行状态形成优化问题,通过优化计算确定各项具体的改造方案.

在实际应用中,根据不同的技术基础和工程条件,每一项设备的改造都存在多种改造措施. 本文作为理论方法研究,不具体分析每一项工程改造措施,每个改造对象只选择最为常用和易于实现的一或两项改造措施进行分析,在实际应用中可根据工程环境和企业基础进行调整和拓展. 本文改造措施如下:泵,更换高效泵或更改泵的数量与组合方式,提高运行效率;换热器,增加换热器换热面积或改变换热器的组合方式,提高传热能力;冷却塔,更换高效风机、更换填料,提高运行效率和冷却能力.

综上所述,本文将整体改造方案设计分解为多个、针对不同改造对象的设计问题,并采用优化方法给出设计方案. 下面对这些优化问题进行描述.

收益一般是工程项目中最为看重的评价指标,也最能直观体现项目价值,所以本文选择系统改造运行总收益最大作为改造方案设计优化问题的优化目标.

作为工业辅助系统,循环冷却水系统并不会直接产生运行收益,因此在计算中将改造后系统的运行成本与改造前运行成本的差值,即节约的运行成本,作为系统改造收益. 此外,节能改造是一项能够长期收益的项目,因为其节能效果会体现在循环冷却水系统的长期运行过程中,所以在优化目标计算过程中需要估算管网系统运行寿命,以计算系统的长效节能收益. 优化目标可表示为

$$\max (\sum_j (\Delta E^j \cdot t^j \cdot P \cdot Y) - \text{cost}). \quad (20)$$

其中: j 为系统工况编号, ΔE^j 为工况 j 下改造前后能耗差, P 为能源单价, t^j 为工况 j 的年运行时间, Y 为改造系统寿命, cost 为改造成本.

下面设定优化问题的决策变量为系统节能改造过程中改变的系统设备的相关变量,包括水泵型号、换热器板片数量、冷却塔风机型号等. 这些变量可以将设计的改造措施与设备性能参数相对应,并且根据

优化问题选择的不同改造措施,决策变量会进行相应调整.方案设计问题的约束条件包括各运行设备的机理模型、能量守恒方程、质量守恒方程、压降平衡方程等,这些条件描述了循环冷却水系统完整的运行机理,对系统运行状态进行数学描述.此部分模型前期研究已有详述,本文不再赘述^[29].

通过对上述优化问题的求解,可以得到各项改造措施的最优改造方案,但为了提供更多的决策信息,还需要对各项改造方案进行评价.

3.2 方案评价

得到各项改造措施的改造方案后需要进一步分析各方案的预期节能效果和投资效益,将方案评价与方案设计相结合,向决策者提供更多有价值的决策信息.这便要求方案评价中的各项指标具有一定的权威性并且可以有效反映方案的相关信息.本文采用项目后评价领域中节能项目常用并且被广泛认可的一些评价指标作为方案评价依据,对各方案预期效果进行分析和比较.主要指标^[30-31]如下.

资金投入为

$$K = K_1 + K_2 + K_3. \quad (21)$$

其中: K 为改造方案投资总额, K_1 为改造材料、设备的基础投资, K_2 为改造过程中人工费用等杂项投资, K_3 为改造造成的设备报废和停产损失.

节能率,反映改造项目的节能效果,是改造节能量与改造前能耗的比值,有

$$S = \sum_j \frac{E_0^j - E^j}{E_0^j} / J. \quad (22)$$

其中: S 为改造方案节能率, J 为系统运行工况数, E_0^j 为系统改造前工况 j 总能耗, E^j 为系统改造后工况 j 总能耗.

年盈利额,在节能改造研究中,其盈利额与运行成本的节约量是一致的,有

$$Z = \sum_j \Delta E^j \cdot t_j \cdot P \cdot Y. \quad (23)$$

投资回收期,反映投资项目的回收速度,投资回收期越长,投资者对未来把握的信息越小,项目风险越大,投资回收期短意味着投资者可把资金尽快的回收再利用,有

$$t_r = K/Z. \quad (24)$$

综合上述改造方案设计优化方法和评价指标,能够较为准确地针对循环冷却水系统中具有较高节能改造价值的对象设计改造方案,同时为决策者提供更多有价值的决策信息,帮助实现系统节能改造,提高系统节能水平.

4 节能改造仿真实验

为了验证研究的使用效果,根据实际循环冷却水系统进行仿真实验.将提出的节能改造设计方法应用于该系统,进行改造方案设计与决策信息分析.

管网系统结构如图1所示.该系统主要为工业运行流程中的3项工艺环节提供冷却,通过7个换热器实现冷却任务,水泵 P_3 、 P_5 、 P_7 为备用水泵.系统存在3个运行工况,各运行工况的主要运行参数见表2.

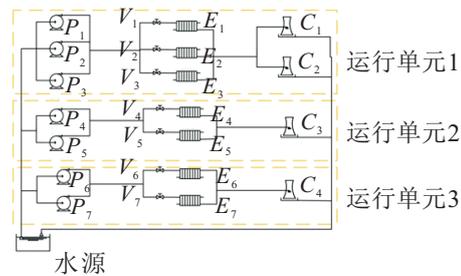


图1 管网结构

表2 管网主要运行参数

运行工况	能效	总能耗	总冷却量
1	6.93	328	4.73×10^7
2	6.22	198	3.18×10^7
3	6.00	266	4.42×10^7

根据前文基于瓶颈诊断的改造优先级分析方法,对该管网系统进行节能瓶颈分析,计算系统中各节能改造对象的改造优先级.改造优先级见表3.

表3 系统改造优先级

优先级排序	改造设备编号	优先级数值
1	水泵 P_1 、 P_2	0.30
2	水泵 P_4	0.17
3	冷却塔 C_1 、 C_2	0.17
4	冷却塔 C_3	0.10
5	水泵 P_5	0.09
6	换热器 E_1 、 E_2 、 E_3	0.06
7	冷却塔 C_4	0.05
8	换热器 E_4 、 E_5	0.04
9	换热器 E_6 、 E_7	0.02

通过对系统改造优先级的分析和比较可以发现,其中水泵 P_1 、 P_2 、 P_4 ,冷却塔 C_1 、 C_2 的改造优先级较高,明显高于其他改造对象,表明其改造价值较大,即在当前管网系统中,对这些设备进行改造,可以取得更好的节能效果.

根据上节提出的节能改造方案优化设计方法对改造优先级的排序较高的改造对象进行改造方案设计与分析,选择优先级最高的3项措施进行设计.方案与分析结果如下所示.

方案1 对运行单元1的水泵组进行节能改造,根据生产厂家的各型号设备数据建立设备型号数

数据库,对水泵组 P_1 和 P_2 的型号和数量进行优化设计.通过计算得到的优化问题最优解即为该方案的改造措施,最终方案为将水泵 P_1 、 P_2 更换为两台某厂家A型号水泵.

方案2 对运行单元2的水泵组进行节能改造,方案为将水泵 P_4 更换为两台某厂家B型号水泵.

方案3 对运行单元1的冷却塔 C_1 、 C_2 进行节能改造,方案为更换 C_1 、 C_2 冷却塔填料,同时将两塔的风机更换为某厂家A型号风机.各方案分析结果见表4,假设系统运行寿命为10年进行总收益指标计算.

表4 管网主要运行参数

方案编号	方案1	方案2	方案3
改造对象	水泵 P_1 、 P_2	水泵 P_4	冷却塔 C_1 、 C_2
资金投入/万元	13	5	3.6
节能率/%	7.1	2.8	2.3
年盈利额/万元	4.1	1.6	1.3
投资回收期/年	3.2	3.3	2.7
总收益/万元	28	11	9.4

通过对各项改造方案的分析与评价可以明确各改造方案的预期实施效果,掌握各方案的优势与劣势,为决策者提供更多有价值的决策信息.方案1的节能率最高,年盈利额也最大,这与改造优先级分析结果是一致的,表明该方案的改造对象具备最大的节能潜力与改造价值,但是该方案的资金投入也是最大的,进而影响其投资回收期,所以该方案不能够100%适用于所有的节能改造工程;方案2的改造措施与方案1相似,但由于改造对象自身的节能潜力不同,节能效果低于方案1;方案3的节能率和年盈利额都是最低的,相对的是该方案的资金投入也是最低的,所以在某些情况下该方案也具备一定优势.

上述节能改造方案针对当前循环冷却水管网系统分析并设计,是具有最高节能改造价值的方案.在实际应用过程中也可以根据决策者的意见和客观条件调整改造优先级选取条件,选择更多的改造对象进行方案设计.此外,该改造方案能够为决策者提供大量决策信息,决策者可以结合工程项目情况、企业技术基础等信息提出最终的节能改造计划.

5 结论

通过对循环冷却水系统运行机理和相关节能研究的深入分析,本文提出了一种基于节能瓶颈诊断的节能改造方案设计方法.将系统节能瓶颈分解为瓶颈单元和瓶颈因素两个部分,分别采用改进的多工况能效密度分解方法和正交实验方法进行分析与诊断.确定系统节能瓶颈,分析系统各部分的节能改造

价值,最终从两个维度上确定系统各改造对象的改造优先级.在此基础上,选择系统中具有较高改造价值的部分环节,采用优化方法进行以预期运行寿命内节能收益最大为目标的改造方案优化设计.同时,结合项目后评价知识设计指标,进行方案评价,可以为决策者提供更多有价值的决策信息.通过案例仿真对所提出方法进行验证,结果表明,所提出方法可以准确分析循环冷却水系统各部分的改造价值,有效地对系统进行改造方案的优化设计,同时为决策者提供了大量相关信息,有助于指导工程项目技术改造,改进系统节能水平.

参考文献(References)

- [1] 孙彦广,梁青艳,李文兵,等.基于能量流网络仿真的钢铁工业多能源介质优化调配[J].自动化学报,2017,43(6):1065-1079.
(Sun Y G, Liang Q Y, Li W B, et al. Steel industry multi-type energy optimized scheduling with energy flow network simulation[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(6): 1065-1079.)
- [2] 赵斐,祝军,乔非,等.钢铁企业工序能耗模型及其到混杂Petri网的转换[J].系统工程,2010,28(6):70-75.
(Zhao F, Zhu J, Qiao F, et al. Modeling for work process energy consumption of steel industry and research on its transformation to hybrid Petri network model[J]. Systems Engineering, 2010, 28(6): 70-75.)
- [3] Kim J, Smith R. Cooling water system design[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(12): 3641-3658.
- [4] Kim J, Savulescu L, Smith R. Design of cooling systems for effluent temperature reduction[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(5): 1811-1830.
- [5] Panjeshahi M H, Ataei A. Application of an environmentally optimum cooling water system design to water and energy conservation[J]. International Journal of Environmentalence & Technology, 2008, 5(2): 251-262.
- [6] Panjeshahi M H, Ataei A, Gharaie M, et al. Optimum design of cooling water systems for energy and water conservation[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2009, 87(2): 200-209.
- [7] Gololo K V, Majazi T. Complex cooling water systems optimization with pressure drop consideration[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 52(22): 7056-7065.
- [8] Ma J, Wang Y, Feng X. Simultaneous optimization of pump and cooler networks in a cooling water system[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125(1): 377-385.
- [9] Sun J, Feng X, Wang Y. Cooling-water system optimisation with a novel two-step sequential method[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89(1): 1006-1013.
- [10] 王宁.循环冷却水系统的优化设计[D].青岛:青岛科技大学化工学院,2013.
(Wang N. Optimization design of circulating cooling

- water system[D]. Qingdao: School of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, 2013.)
- [11] Jahromi F S, Beheshti M. An extended energy saving method for modification of MTP process heat exchanger network[J]. *Energy*, 2017, 140(1): 1059-1073.
- [12] Piacentino A. Thermal analysis and new insights to support decision making in retrofit and relaxation of heat exchanger networks[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(16): 3479-3499.
- [13] Sreepathi B K, Rangaiah G P. Improved heat exchanger network retrofitting using exchanger reassignment strategies and multi-objective optimization[J]. *Energy*, 2014, 67(4): 584-594.
- [14] Brange L, Lauenburg P, Sernhed K, et al. Bottlenecks in district heating networks and how to eliminate them — A simulation and cost study[J]. *Energy*, 2017, 137(1): 607-616.
- [15] Gang W, Wang S, Gao D, et al. Performance assessment of district cooling systems for a new development district at planning stage[J]. *Applied Energy*, 2015, 140(1): 33-43.
- [16] 张承慧, 夏东伟, 李洪斌, 等. 城市水工业系统泵站优化调度问题建模方法研究[J]. *控制与决策*, 2004, 19(5): 582-585.
(Zhang C H, Xia D W, Li H B, et al. On optimal scheduling modeling of urban water industry system[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 582-585.)
- [17] Akpomiemie M O, Smith R. Cost-effective strategy for heat exchanger network retrofit[J]. *Energy*, 2018, 146(1): 82-97.
- [18] Wang Y, Smith R, Kim J K. Heat exchanger network retrofit optimization involving heat transfer enhancement[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 43: 7-13.
- [19] 王德维. 化工循环冷却水装置风机节能改造及水质控制研究[D]. 上海: 华东理工大学化工学院, 2015.
(Wang D W. Research on energy saving reconstruction of the circulating water fan and microbial control[D]. Shanghai: School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, 2015.)
- [20] Marugán-Cruz C, Sánchez-Delgado S, Rodríguez-Sánchez M R, et al. District cooling using central tower power plant[J]. *Energy Procedia*, 2014, 49(10): 1800-1809.
- [21] Oh J S, Binns M, Park S, et al. Improving the energy efficiency of industrial refrigeration systems[J]. *Energy*, 2016, 112(1): 826-835.
- [22] Li W, Zhao C, Gao F. Linearity evaluation and variable subset partition based hierarchical process modeling and monitoring[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(3): 2683-2692.
- [23] Hasanbeigi A, Hasanabadi A, Abdorrazaghi M. Comparison analysis of energy intensity for five major sub-sectors of the textile industry in Iran[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 23(1): 186-194.
- [24] 蔡九菊, 陆钟武. 钢铁企业能源模型及微机应用软件[J]. *控制与决策*, 1989, 4(1): 6-12.
(Cai J J, Lu Z W. Energy models for iron-steel enterprise and the related software of microcomputers[J]. *Control and Decision*, 1989, 4(1): 6-12.)
- [25] 王刚, 白皓, 苍大强, 等. 钢铁企业能耗瓶颈诊断数学模型及应用[J]. *工程科学学报*, 2009, 31(9): 1195-1199.
(Wang G, Bai H, Cang D Q, et al. Mathematical model for diagnosis of energy consumption bottlenecks in steel plants and its application[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(9): 1195-1199.)
- [26] Liu R, Zhang X, Yan C, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. *Experimental Technology and Management*, 2010, 27(9): 52-55.
- [27] Yuan H, Mei N, Hu S, et al. Experimental investigation on an ammonia-water based ocean thermal energy conversion system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 61(2): 327-333.
- [28] Chen Y, Yang H, Luo Y. Parameter sensitivity analysis and configuration optimization of indirect evaporative cooler (IEC) considering condensation[J]. *Applied Energy*, 2017, 194(1): 440-453.
- [29] Zhu Xiao-chen, Niu Da-peng, Wang Fu-li, et al. Operation optimization research of circulating cooling water system based on superstructure and domain knowledge[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, 142(1): 285-297.
- [30] 唐冰. 火电厂节能改造项目投资效益后评价及案例研究[D]. 北京: 华北电力大学经济与管理学院, 2008.
(Tang B. Post-evaluation and case study of investment efficiency of thermal power plant energy-saving renovation project[D]. Beijing: School of Economics and Management, North China Electric Power University, 2008.)
- [31] 陈文晖. 工程项目后评价[M]. 北京: 中国经济出版社, 2009: 15-65.
(Chen W H. Post-project evaluation[M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2009: 15-65.)

作者简介

朱笑晨(1990—), 男, 博士生, 从事复杂工业过程建模、控制与优化的研究, E-mail: 763104213@qq.com;

王福利(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业过程建模、控制与优化、过程检测与故障诊断等研究, E-mail: flwang@mail.neu.edu.cn;

牛大鹏(1980—), 男, 副教授, 博士, 从事复杂工业过程建模、控制与优化等研究, E-mail: niudapeng@ise.neu.edu.cn;

贾明兴(1972—), 男, 教授, 博士, 从事故障诊断、控制优化等研究, E-mail: jiamingxing@ise.neu.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)