

溴化锂吸收式制冷机优化设计

李维仲, 权生林*, 陈贵军, 任健

(大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为优化设计溴化锂吸收式制冷机, 提出了一个多变量多约束的单优化目标函数的优化设计数学模型. 采用复合形法求解蒸汽型溴化锂吸收式制冷机的优化设计数学模型, 并应用 Visual C++ 语言开发了优化设计软件. 利用优化设计软件对一个实际工程算例进行了优化设计, 结果表明: 通过优化设计, 相同制冷量的溴化锂吸收式制冷机在保证较高性能系数的前提下, 换热器总的换热面积大大减小, 制冷机的综合性能提高, 同时提高了机组设计效率, 缩短了产品开发周期.

关键词: 溴化锂吸收式制冷机; 优化设计; 数学模型; 复合形法

中图分类号: TK5 **文献标志码:** A

0 引言

优化设计(optimal design)是近年来发展起来的一门新的学科. 从 20 世纪 60 年代初期开始, 优化设计和计算技术在设计领域中就开始受到重视. 优化设计为工程设计提供了一种重要的科学设计方法, 使得在解决复杂设计问题时, 能从众多的设计方案中找到尽可能完善的或最适宜的设计方案, 因而采用这种设计方法能大大提高设计效率和设计质量^[1].

在溴化锂吸收式制冷机设计中, 传统的计算方法采用大量的查表、作图、经验公式和试算法, 设计计算繁琐, 工作量大. 并且设计过程涉及若干温差、放气范围等参数的选取, 每一项参数的选取受设计者和客观条件的限制, 每变动一项参数都要重复这些复杂的设计计算, 给设计者带来极大的不便. 而机组的性能好坏还直接取决于各参数之间是否匹配合理, 因此溴化锂吸收式制冷机系统分析和设计方法研究受到广泛关注^[2~5].

传统的设计计算方法繁琐, 且误差较大, 无法实现对机组设计的整体优化. 因此本文将优化设计思想引入溴化锂吸收式制冷机的设计, 在保证制冷量的前提下, 通过对溴化锂吸收式制冷机的主要运行经济参数和制造成本参数进行分析, 以相关

运行参数合理为约束条件, 提出机组设计优化数学模型, 并采用合理的数学方法进行求解, 以期改善溴化锂吸收式制冷机的综合性能, 并借助计算机强大的数据处理能力提高设计质量和设计效率.

1 溴化锂吸收式制冷机的优化设计数学模型

在溴化锂吸收式制冷机设计过程中, 常常需要根据产品设计的要求, 合理确定各种参数, 以期达到最佳的设计目标. 这就是说, 一项工程设计总是要求在一定的技术和物质条件下, 取得一个技术经济指标为最佳的设计方案.

优化设计的数学模型一般由设计变量、目标函数和约束条件组成. 本文提出一个多元设计变量多约束的单目标函数的溴化锂吸收式制冷机优化设计数学模型, 该模型综合考虑了技术性能指标和经济性能指标对溴化锂吸收式制冷机的影响.

1.1 目标函数

设定 ζ 为溴化锂吸收式制冷机的优化设计目标函数, 其定义式如下:

$$\zeta = \sum F / COP \quad (1)$$

式中: $\sum F$ 为各换热设备传热面积和(制冷机组的经济性指标), m^2 ; COP 为性能系数(制冷机组

的技术性指标), $COP = Q_0/Q_g$, Q_0 为机组制冷量, kW, Q_g 为发生器热负荷, kW.

$\sum F$ 越小, 意味着在制冷量不变的情况下, 机组消耗的材料越少, 机组的成本越低, 经济性能越好. 而 COP 越大, 意味着在相同的制冷量下, 机组消耗的能量越少, 机组的技术性能也就越好. 这样建立目标函数的原因是单纯追求小的传热面积会使性能系数降低, 而单纯追求大的性能系数又会使传热面积增大, 因此需综合考虑两因素, 求 ζ 的最小值, 即为性能系数较大、传热面积和较小情况下的最优值.

1.2 约束条件

溴化锂吸收式制冷机设计中的约束条件包括以下 6 项^[6,7]:

$$\begin{aligned} 7 \leq \Delta t_w \leq 9; 3 \leq \Delta t_k \leq 5; 2 \leq \Delta t_0 \leq 4; \\ 3 \leq \Delta t_2 \leq 5; 10 \leq f_a \leq 20; 10 \leq f_0 \leq 20 \quad (2) \end{aligned}$$

式中: Δt_w 为冷却水的总温升, Δt_k 为冷凝器热端温差, Δt_0 为蒸发器冷端温差, Δt_2 为出口稀溶液与进口冷却水的温差, f_a 为吸收器的再循环倍数, f_0 为蒸发器的再循环倍数.

1.3 基本假设

在溴化锂吸收式制冷机组的设计计算中, 引入以下假设:

- (1) 在每一个部件(发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器、溶液热交换器)中, 都满足热力平衡条件;
- (2) 冷凝压力与发生器压力相同;
- (3) 冷凝器出口的制冷剂水处于饱和状态;
- (4) 蒸发器出口的制冷剂蒸汽处于饱和状态;
- (5) 忽略系统中的热损失和循环泵的功耗.

1.4 设计变量

以串联流程单效蒸汽型溴化锂吸收式制冷机为例, 首先根据用户要求给定以下必要的设计参数.

- (1) 制冷量 Q_0 ;
- (2) 冷媒水进口温度 t_{c1} ;
- (3) 冷媒水出口温度 t_{c2} ;
- (4) 冷却水进口温度 t_w ;
- (5) 加热蒸汽进口饱和温度 t_h ;
- (6) 传热管的管长 l ;
- (7) 传热管的内径 d_i ;
- (8) 传热管的外径 d_o ;
- (9) 管程数;
- (10) 蒸汽的流速;
- (11) 管内外的污垢热阻;
- (12) 管壁材料的导热系数.

与此同时, 为了提高模型的运行效率, 给定了一些次要的、不方便变化的参数, 只对一些重要的参数进行调整、优选, 这些调整、优选的参数即为设计变量.

给定的参数值:

- (1) 蒸发压力与吸收压力的差值 Δp ;
- (2) 单效机组吸收器与冷凝器热负荷之比 b ;
- (3) 出口浓溶液与加热蒸汽的温差 Δt_4 ;
- (4) 溶液热交换器出口浓溶液与吸收器出口稀溶液的温差 Δt_8 ;
- (5) 管中心距与管外径之比.

设计变量:

- (1) 冷却水的总温升 Δt_w ;
 - (2) 冷凝器热端温差 Δt_k ;
 - (3) 蒸发器冷端温差 Δt_0 ;
 - (4) 出口稀溶液与进口冷却水的温差 Δt_2 ;
 - (5) 蒸发器的再循环倍数 f_0 ;
 - (6) 吸收器的再循环倍数 f_a .
- 可见本数学模型(1)是一个六维空间.

1.5 程序组成

程序流程图如图 1 所示.

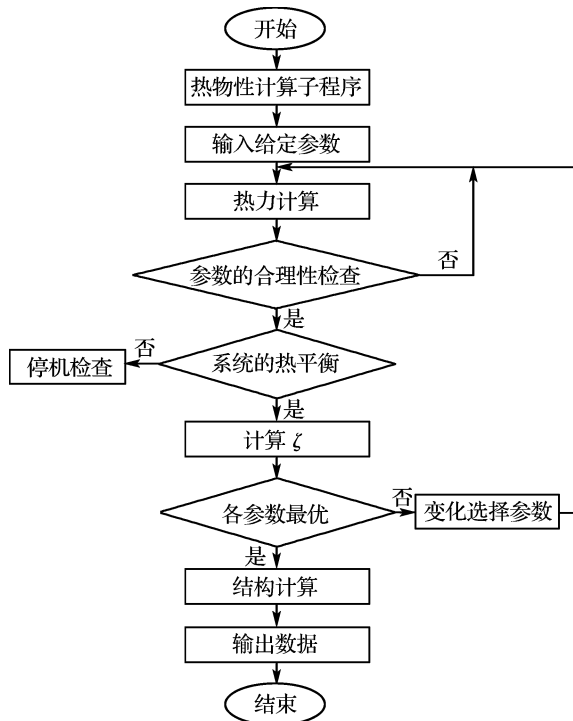


图 1 程序流程图

Fig. 1 The flow chart of the procedure

计算程序基本分 3 部分:(1)溴化锂溶液、水、水蒸气物性计算子程序;(2)热力和传热计算;(3)优化程序.

整个计算过程中进行 3 次检查:(1)放气范围检查, $0.04 \leq \Delta \xi \leq 0.06$;(2)系统热平衡检查, $[(Q_k + Q_a) - (Q_g + Q_0)] / (Q_k + Q_a) \leq 0.01$;(3)冷却水流量检查, $-0.05 \leq \Delta q_{vw} \leq 0.05$.

2 复合形法简介

复合形是指在 n 维设计空间的可行域内, 由

$K(n+1 \leq K \leq 2n)$ 个顶点所构成的多面体. 复合形法的基本思路来源于无约束优化算法中的单纯形法, 它实质上是单纯形法的修正. 其迭代过程是: 在设计变量的可行域内选取 K 个顶点作为初始复合形的顶点, 比较这些顶点所对应的目标函数值, 去掉其中目标函数值最大所对应的最坏点, 而代之以最坏点的反射点(以复合形中最坏点之外各点的中心为映射中心所得到的映射点)构成新的复合形. 不断重复以上过程, 使复合形的位置越来越靠近最优值, 迭代达到收敛精度时, 则取最后一个复合形中目标函数值最小的点作为近似最优值^[8].

复合形法在迭代过程中既不要求目标函数的一阶和二阶导数, 也不用进行一维搜索求步长, 对目标函数和约束条件的性态无特殊要求, 运用范围较广, 程序编制也比较简单, 容易掌握. 因此, 它是求解工程设计中约束优化问题较为有效的常用方法之一. 只是随着设计变量维数和约束条件个数的增加, 收敛速度显著变慢而已.

3 实例计算及优化分析

利用优化设计软件, 对某公司制冷量分别为 166、320、500、820 和 1 100 kW 的溴化锂制冷机组进行优化设计. 设计条件: 冷媒水进口温度为

12 °C; 冷媒水出口温度为 7 °C; 冷却水进口温度为 32 °C; 加热蒸汽进口温度为 120 °C; 蒸发压力与吸收压力的差值为 72 Pa; 单效机组吸收器与冷凝器热负荷之比为 1.3 : 1; 出口浓溶液与加热蒸汽的温差为 19 °C; 溶液热交换器出口浓溶液与吸收器出口稀溶液的温差为 19 °C; 管中心距与管外径之比为 1.35 : 1; 发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器传热管的管长为 6 m; 溶液热交换器传热管长为 5 m; 传热管的内径为 20 mm; 传热管外径为 25 mm; 管程数为 2; 蒸汽的流速为 35 m/s; 管内外的污垢热阻分别为 0.000 043 m² · °C/W(发生器)、0.000 17 m² · °C/W(冷凝器、蒸发器、吸收器)和 0.000 086 m² · °C/W(溶液热交换器); 不锈钢管壁材料的导热系数为 16 W/(m · °C); 紫铜管壁材料的导热系数为 383.8 W/(m · °C); 吸收器中溶液的喷淋密度为 250 kg/m; 溶液热交换器管内稀溶液的流速为 0.8 m/s; 溶液热交换器管外浓溶液的流速为 0.5 m/s.

3.1 优化结果

将不同制冷量的机组设计的各部件传热面积、总面积、性能系数、优化目标函数计算结果与原设计进行了比较, 分别绘制了随制冷量的变化各参数优化前后的曲线, 如图 2 所示.

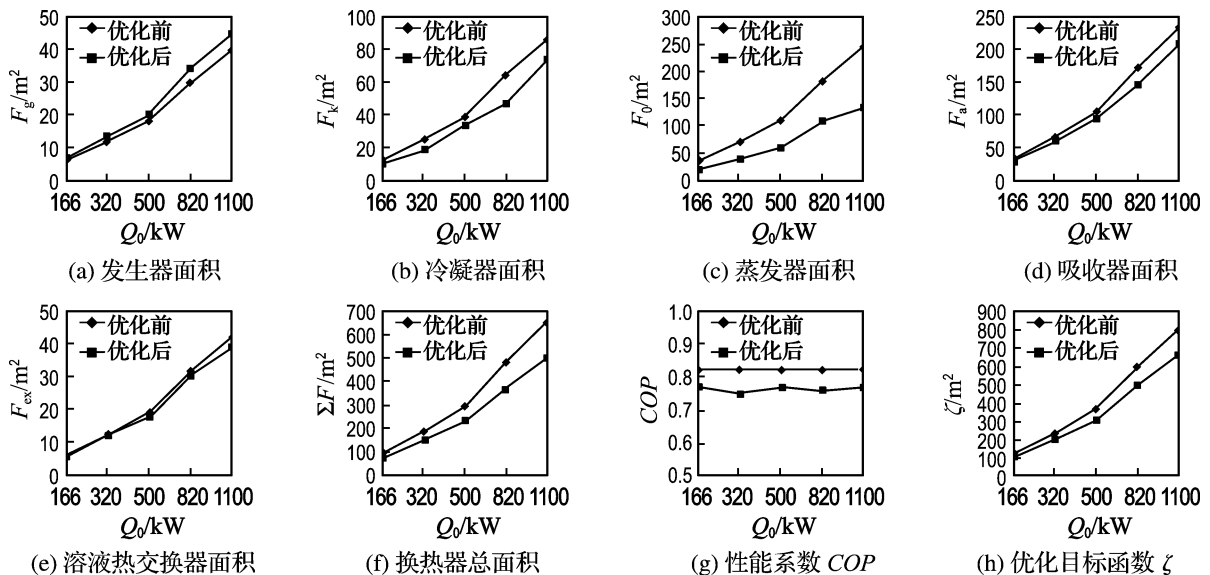


图 2 各参数优化与非优化比较

Fig. 2 Comparisons of every parameter between optimization and non-optimization

从图 2 可以看出:

(1) 发生器面积优化前后变化不大, 优化后面积略有增加, 随着制冷量的增加, 差值增加.

(2) 冷凝器、吸收器、溶液热交换器面积在优化前后变化不大, 优化后面积略有减小, 随着制冷量的增加, 差值增加.

(3)蒸发器面积在优化后显著减小,优化后相当于优化前的 54%~60%,即优化后能节省 40%~46%的面积。

(4)各部件的总传热面积优化后相当于优化前的 75%~78%,即优化后能节省 22%~25%的面积。

(5)性能系数优化后减小,但减小幅度不大。

(6)优化目标函数优化后相当于优化前的 82%~85%,即优化后能节省 15%~18%的面积。

从优化结果可以看出,以 ξ 作为优化目标,并不是单方面追求性能系数 COP 的提高或各部件总传热面积 $\sum F$ 的减小,而是综合考虑二者的协调,既要减小传热面积,降低成本,又要使制冷机组性能系数尽可能大,使 ξ 越小越好,即取最优值。虽然优化后性能系数减小了,但减小幅度很小,发生器的传热面积增加了,但增加幅度也很小,与此同时,总的传热面积却大大减小,提高了制冷机组的综合性能,而且制冷机组的制冷量越大,优化的效果越明显。

3.2 优化分析

从优化结果可看出,优化前的性能系数虽然高,但总传热面积也大,增加了生产成本。优化后性能系数虽然比优化前降低了 6%~9%,但总传热面积降低了 22%~25%,大大降低了一次投入生产成本,提高了溴化锂制冷机的综合性能,达到了优化的目的,证明了此优化软件的可行性和有效性。

4 结 论

在溴化锂吸收式制冷机中采用优化设计方法,结果表明该优化设计方法能够在保证较高的性能系数情况下,得到最优的传热面积,提高了制冷机组的综合性能,尤其对制冷量较大的机组效果更明显。同时软件的使用可以大大减少设计人员的工作量,提高设计精确度,降低产品开发周期。

参考文献:

- [1] 方世杰,綦耀光. 机械优化设计[M]. 1 版. 北京:机械工业出版社, 2003
- [2] 汤国水,穆 丹. CHNN 型神经网络在双效溴化锂吸收式制冷机的参数优化设计中的应用[J]. 制冷与空调(四川), 2007, 21(2):35-37
- [3] TALBI M M, AGNEW B. Energy analysis:an absorption refrigerator using lithium bromide and water as the working fluids [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2000, 20(7):619-630
- [4] 岳永亮,董素霞,张红岩,等. 溴化锂吸收式制冷机设计应注意的问题探讨[J]. 制冷与空调, 2007, 7(1):50-52
- [5] 高田秋一. 吸收式制冷机[M]. 耿惠彬,戴永庆,郑玉清,译. 北京:机械工业出版社, 1987
- [6] 吴业正. 制冷与低温技术原理[M]. 1 版. 北京:高等教育出版社, 2004
- [7] 戴永庆,陆 震,胡仰耆,等. 溴化锂吸收式制冷空调技术实用手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1999
- [8] 王国彪. 机械优化设计方法微机程序与应用[M]. 1 版. 北京:机械工业出版社, 1994

Optimization design of lithium-bromide absorption refrigerator

LI Wei-zhong, QUAN Sheng-lin*, CHEN Gui-jun, REN Jian

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A mathematical model,including multi-variables, multi-constraints and single-objective function, is proposed for optimization design of the lithium-bromide absorption refrigerator. The problem of optimization design mathematical model for a steam-heat-lithium-bromide absorption refrigerator was solved by using the complex method, and the corresponding software was developed by using Visual C++. The optimization design for a actual engineering case was carried using the optimization design software. The optimization design result reveals that the comprehensive performance of the lithium-bromide absorption refrigerator can be improved because of greatly reducing total heat exchanger area, while the COP of the refrigerator does not fall. In addition, the design efficiency of the refrigerator is increased and the design period of a product is shortened.

Key words: lithium-bromide absorption refrigerator; optimization design; mathematical model; complex method