

蓄能型太阳能液体除湿空调系统的优化设计

曹毅然, 张小松, 殷勇高

(东南大学动力工程系, 210096, 南京)

[摘要] 近年来蓄能型太阳能液体除湿空调系统作为一种绿色空调系统受到了国内外学者越来越多的关注, 本文对该系统循环进行了模拟优化, 一系列的优化思想, 使该循环在众多方面达到了最优化. 优化结果得出了针对设计目标的优化设计方案, 为今后的实验系统的设计和建立打下了基础, 同时, 优化结果表明, 这种新型的绿色空调系统在总体性能上比现今受到关注的太阳能空调系统更具竞争力.

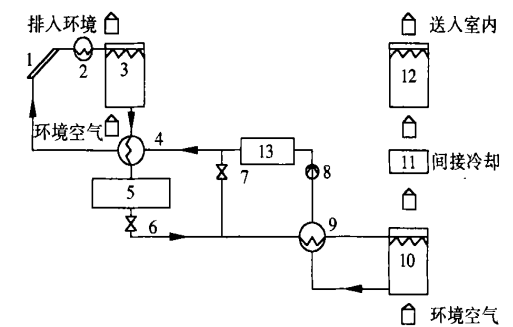
[关键词] 蓄能, 太阳能, 溶液除湿, 模拟, 优化

[中图分类号] TU834, [文献标识码] A, [文章编号] 1672- 1292- (2004) 01- 0008- 04

0 引言

除湿冷却系统(Desiccant Cooling System, DCS)基本的原理是将空气先经过干燥剂, 使空气干燥, 然后向该空气中喷水处理, 利用水蒸发时吸收汽化潜热而使空气降温, 根据需要可将该空气直接作为送风, 也可用于冷却其它空气后作为送风. 干燥剂为 LiCl 溶液, 干燥后的 LiCl 溶液可用太阳能或其它余热进行再生处理, 浓缩后反复使用. 这一循环提出后不久即受到重视, 可望发展成一种高效节能尤其是保护环境的新颖空调系统^[1]. 因为用水作为制冷剂, 对环境绝对无污染, 用 LiCl 溶液作为除湿剂, 不但不会影响环境, 而且可以用太阳能或其它余热来加热再生, 循环使用, 所以具有非常良好发展前途与实用价值, 将对大气层保护以及在空调中利用低温余热和太阳能起到重要作用.

系统流程如图 1, 运行过程如下: 溶液部分, 白天, 稀溶液经太阳能集热器加热后通过(2, 3)点间建立一测温点来判断(2)是否启动, 溶液经再生器获得再生, 流入储液槽. 当循环进行时, 阀门(6)开启, 浓溶液流入除湿器(10)对空气进行除湿, 浓溶液在流出阀门(6)时通过仪器测得此时的溶液浓度, 若过高则打开阀门(7), 调节开度大小, 使流入除湿器的溶液的浓度达到预定值. 除湿后的稀溶液由泵(8)抽回集热器. 晚间, 由于用电的峰谷差价, 可以完全通过电加热来积蓄能量, 产生系统运行所需的浓溶液. 空气部分, 除湿器端环境空气经除湿器除湿后进入间接冷却器, 然后再进入加湿器. 最



1. 太阳能集热器; 2. 电加热器; 3. 再生器; 4. 9. 热交换器
5. 13. 储液槽; 6. 7. 阀门; 8. 泵; 10. 除湿器; 11. 间接冷却器
12. 加湿器

图 1 蓄能型太阳能除湿空调系统流程图

后达到送风状态送入室内. 再生器端环境空气经再生器后直接排入环境. 图 2 为此过程在湿空气焓湿图中的热力过程.

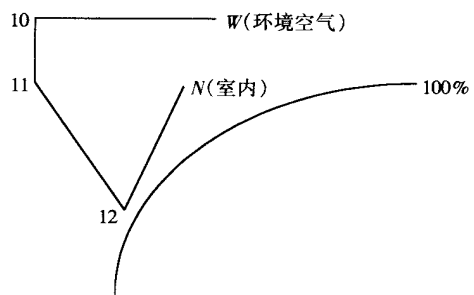


图 2 空气变化过程图

以上循环是本次优化设计的目标循环. 为了进行优化设计, 在优化运行过程中需要对一些可变的设计部分进行预测, 因此, 需要对所建立循环模型进行数据模拟. 通过模拟来研究系统运行中不同部

分对结果的影响.

1 方法论

任何一般的优化问题可被概述为优化客观因子, 优化可变量, 优化限制条件等 3 个方向^[2]. 对于本文所提及的循环模拟, 在对这 3 个方向进行分析之后, 然后再将它们组合起来对系统进行预测.

1.1 客观因子

在对本次循环的研究当中, 系统的总投资(固定成本+ 运行费用) 被作为客观因子进行最优化的分析. 建立分析式如下:

$$T = \sum (G + Y)$$

在本次设计中, 主要部件为: 太阳能集热器, 除湿器, 再生器, 加湿器, 热交换器, 加热器, 储液槽等. 本次设计中的固定成本为加工以上部件的材料费和加工费. 运行费用为泵, 风机等消耗的电能. 泵的耗能可以通过流体流速, 液压, 和设备的运行寿命(假设可运行 15 年, 每年运行 100 天, 每天运行 8 h) 来计算得到, 风机耗能可通过风速和设备的运行寿命计算得到. 虽然本次设计中是利用太阳能来进行加热的, 但是由于天气情况的不可预测性, 所以加热器也会消耗一部分电能. 可假定其耗能为总耗能的 10%.

1.2 可变量

根据系统主要组分的结构设计得到其可变量如下:

1.2.1 除湿器

内冷型的平板降膜式结构^[3], 其变量如下:

- 平板单元格的数目
- 平板单元格的尺寸
- 空气的流量
- 溶液的流量

1.2.2 再生器

绝热型填料喷淋塔式结构^[4], 其变量如下:

- 填料的比表面积(单位体积填料层的填料的表面积)
- 填料层的尺寸
- 空气的流量
- 溶液的流量

1.3 限制条件

本系统中除湿器和再生器是影响系统运行的主要因素. 优化之后的系统能够实现设计要求的制冷量, 其中的空气流速和溶液流速有一定的限制. 因为如果气体流速太大的话, 会带走溶液. 气体流速太小的话, 会阻止溶液的流动. 同时对于设计好

的系统, 外界环境因素对它的影响很大, 太阳辐射的间断性和其受天气状况的干扰对系统的性能因素有一定的限制.

2 主要部件的模拟优化过程

影响本系统运行的最主要的部件为除湿器和再生器. 其原理相同都是根据空气中水蒸汽分压力和溶液的蒸汽压之间的压力差作为传质的驱动力. 假定空气在除湿器或再生器的入口和出口的高度分别为 O, H . 则传质方程为:

$$m_A = \alpha_D (\rho_{A,w} - \rho_{A,\infty}) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

m_A —— 组分 A 的质量通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

α_D —— 传质系数, m/s ;

$\rho_{A,w}$ —— 界面处组分 A 的质量浓度, kg/m^3 ;

$\rho_{A,\infty}$ —— 远离界面的主流中组分 A 的质量浓度, kg/m^3 .

我们可选择一个小元控制体, 此模型中的传质方程为:

$$dm_{\text{水}} = \alpha_D L (\rho_{\text{Air, Wat}}(T_{\text{Air}}, \Phi) - \rho_{\text{Sol, Wat}}(T_{\text{Sol}}, \xi)) dy$$

$m_{\text{水}}$ —— 微元段内吸收的水蒸汽流量, kg/s ;

$\rho_{\text{Air, Wat}}$ —— 空气中水蒸汽的密度, kg/m^3 ;

$\rho_{\text{Sol, Wat}}$ —— 溶液表层水蒸汽的密度, kg/m^3 .

由理想气体状态方程 $\rho = p/RT$ 可得,

$$dm_{\text{水}} = \frac{\alpha_D L}{R} \left(\frac{p_{\text{Air, Wat}}(T, \Phi)}{T_{\text{Air}}} - \frac{p_{\text{Sol, Wat}}(T, \xi)}{T_{\text{Sol}}} \right) dy \text{ kg}/\text{s}$$

R —— 水蒸汽的气体常数, $461.495 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K}$;

$p_{\text{Air, Wat}}$ —— 空气中水蒸汽分压力, pa ;

$p_{\text{Sol, Wat}}$ —— 溶液中水蒸汽分压力, pa .

则总的传质量为:

$$M = D_P \cdot S \cdot \sum \Delta p$$

$$\sum \Delta p = \frac{1}{H} \int_0^H (p_v - p_s) dh$$

D_P 指平均传质系数, S 指气液接触面积, $(p_v - p_s)$ 指空气的蒸汽压和溶液的蒸汽压之间的压力差.

基于以上的数值模型, 可以对除湿和再生过程进行数值模拟, 具体分析参见参考文献[5], 数值模拟的程序流程图如下图 3(图中的 m_1 为由 Δc 求得的一个假想的除湿量, m_2 为由传质方程算得的除湿量).

通过数值模拟可以知道除湿量和再生量沿高度的变化, 从而为除湿器和再生器的优化设计提供了依据.

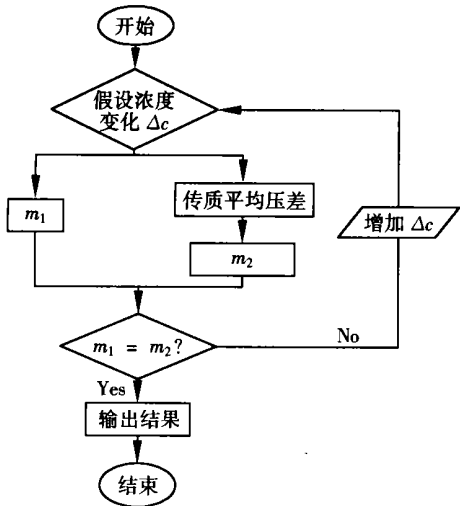


图 3 除湿和再生过程数值模拟的程序流程图

3 系统性能系数的模拟优化过程

对整个系统而言, 制冷能力和其性能系数是最为关键的. 而在本次设计中, 制冷能力被预定为 3 kW(常量), 所以优化系统的性能系数在本次优化过程中尤为关键. 在本系统中, 性能系数 COP 定义为:

$$\text{COP} = \text{收益冷量} / \text{输入热量} = Q_0 / Q_g.$$

由于本系统中所设计的除湿器是内冷型的, 所以在除湿器内的湿空气的温度变化不大, 故湿空气中除去的显热可忽略不计. 因此把 Q_0 取为湿空气中除去的潜热. 即:

$$Q_0 = \Delta m \times \lambda$$

Δm 为湿空气中除去的水分质量, λ 为水的冷凝热.

在实际的实验过程中, 由于太阳能的不稳定性, 所以通过电加热来维持一个恒定的再生温度. 这时可通过以下的方法来定义 Q_g

$$Q_g = c_{\text{sol}} \times m_{\text{sol}} \times \Delta t$$

其中 c_{sol} 为进入再生器的除湿溶液的比热容, m_{sol} 为进入再生器的除湿溶液的流量, Δt 为进入再生器的除湿溶液被加热到再生温度的温升.

而对系统 COP 有影响的因素可分为外部和内部两种. 外部为环境因素, 在限制条件中已经提及. 内部主要为除湿器和再生器各自具体的结构形式和尺寸大小及两者的具体连接方式. 一个稳定的连续运行的太阳能液体除湿空调系统, 它应该满足下面的关系式:

$$M = N$$

M 为除湿量, N 为再生量. 即再生器的再生量必须与除湿量相等. 当外部影响因素发生变化时,

系统的运行会发生波动, 但会在新的工况下去达到上式的平衡关系. 其模拟程序流程图如图 4.

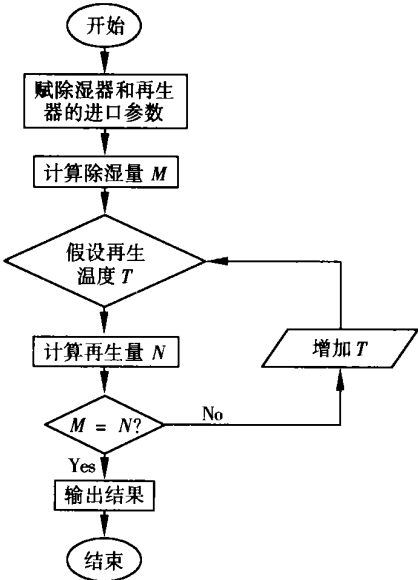


图 4 系统 COP 模拟程序流程图

通过对除湿器和再生器入口溶液流量, 入口溶液浓度, 入口溶液温度, 入口空气流量入口空气温度入口空气含湿量等参数的分析, 来对整个系统进行优化.

4 模拟结果及讨论

根据以上优化讨论, 得出制冷量为 3 kW 的蓄能型太阳能液体除湿空调系统的设计方案如下:

除湿器

平板单元格的数目: 54

平板单元格的尺寸: 长 0.6 m, 宽 1 m,

单元格内部间距: 5.5 mm

空气流量: 0.6667 kg/s

溶液流量: 0.0987 kg/s

再生器

填料的比表面积: $190 \text{ m}^2/\text{m}^3$

填料层的尺寸: 高 1.5 m, 直径 0.6 m

空气流量: 0.187 kg/s

运行条件

室内空气状态为: $t_N = 28^\circ\text{C}$; 相对湿度 $\phi_N = 65\%$; 大气压为: 101 325 pa. $i_N = 68 \text{ kJ/kg}$, $d_N = 15.5 \text{ g/kg}$ 干空气.

室外参数 $t_w = 35^\circ\text{C}$; $\phi_w = 70\%$; $i_w = 99.5 \text{ kJ/kg}$; $d_w = 25 \text{ g/kg}$ 干空气.

送风温差取 4°C , 热湿比为 10 000.

通过运算可得系统运行 COP 大于 1, 具体运算步骤参见参考文献[1]. 优化之后的系统在于其所

有部件之间的匹配与耦合, 使得系统的性能系数最佳和总体投资最少. 优化系统的热源温度为 80°C , 此热源温度的溴化锂吸收式制冷系统的热力系数一般只能在 0.7 左右. 如果能得以充分利用太阳能的话, 在运行费用方面, 本系统每产生 1 kW 制冷量, 使房间维持在室内设计工况点时的运行费用为泵与风机的能耗为 0.1 kW , 而传统的气体压缩式制冷循环系统能耗一般为 $0.3 \sim 0.4\text{ kW/kW}$ 制冷量.

5 结论

本优化设计是对蓄能型太阳能液体除湿空调系统进行针对性设计的. 通过优化结果得出了针对设计目标的优化设计方案, 只有系统的各部件能够比较匹配的运行才不至于出现系统的瓶颈, 使得系统的热力性能达到最佳, 本文旨在提出一种优化思想和系统运行模拟方法, 在优化的过程中做了一定

的简化, 有待在实验中加以验证和模型的修正. 另外, 如果在能得以充分的利用太阳能的前提下, 可以综合分析出优化后的系统在投资费用上相当可取, 其整体性能大大优于传统的太阳能集热器加热水型溴化锂吸收式制冷的系统, 因此可望有较好的发展潜力与应用前景.

[参考文献]

- [1] 张小松, 费秀峰. 具有蓄能功能的除湿蒸发冷却系统的初步研究[J]. 流体机械, 2000, 28(11): 50~ 52.
- [2] Dhar P L. Optimization in refrigeration systems Ph[M]. D thesis, Mechanical Engineering Dept Delhi, India 1974.
- [3] Kessling W, Leavemann E, Kapfhammer C. Energy storage for desiccant cooling systems Component development[J]. Solar Energy, 1998, 64(4): 209~ 221.
- [4] Ertas A, Gandhidasan P, Kiris I, *et al.* Experimental study on the performance of a regeneration tower for various climatic conditions[J]. Solar Energy, 1994, 53(1): 125~ 130.

Optimization Design of Liquid Desiccant Air Conditioning Using Solar Energy with Energy Storage

Cao Yiran, Zhang Xiaosong, Yin Yonggao

(Power Engineering Dept of Southeast University, Nanjing 210096, PRC)

Abstract: Recently as an air conditioning without contaminating the environment, the liquid desiccant cooling air conditioning system using solar energy with energy storage has attracted more and more international scholars' attention. This paper discusses the process for simulating and optimizing the system to achieve optimization of system design by adopting a series of optimization idea, which will lay the foundation for system design and establishment. Moreover, the optimization results indicate that the performance of the system gains the advantage over the solar air conditioning system being cared about at present.

Key words: energy storage, solar energy, liquid desiccant, simulate, optimize

[责任编辑: 刘健]