

建筑能量循环模式的热力学分析^{*}

湖南大学 王 瑞[☆] 龚光彩[△] 陈飞虎
美国海军大学 Chih Wu

摘要 以某中学的供暖系统为例,借助 CyclePad 软件进行仿真建模。用热力学方程组完整地描述了该建筑的两种基本能量循环模式,计算和比较了有新风和无新风、围护结构有保温措施和无保温措施四类模型的系统一次能源利用系数和系统的相对热力学完善程度。

关键词 系统的相对热力学完善程度 建筑能量循环 一次能源利用系数 CyclePad 软件

Thermodynamics analysis about energy cycle pattern in building

By Wang Rui[★], Gong Guangcai, Chen Feihu and Chih Wu

Abstract Taking the heating system design of a high school as an example, simulates the design model with the software CyclePad. Describes the two basic energy cycle patterns with thermodynamic equations. Calculates and compares the primary energy utilizing factor and system relative thermodynamics perfect degree for the four models of those with/without fresh air supplied and envelope with/without insulation materials.

Keywords system relative thermodynamic perfect degree, energy cycle in building, primary energy efficiency ratio, software CyclePad

★ Hunan University, Changsha, China

①

0 引言

以某中学供暖系统为建模原形,此物理模型来源于根据实际工程修改的课程设计题目,其物理流程图见图 1。因为围护结构节能是建筑节能的基础,我国的建筑节能是从供暖居住建筑起步的,因此建筑节能首先应该考虑加强围护结构的保温,而温室气体向大气的排放也是造成环境问题的原因之一,所以要尽量减少向环境排放的气体^[1]。文章正是基于以上两点考虑进行仿真建模^[2],分析了在无新风的情况下,围护结构保温性能的变化对系统的影响,以及采用新风时围护结构保温性能改变对系统的影响。

主要借助 CyclePad 软件^[3]构建模型,模拟系统的流程、各个状态点的工质性质、状态参数、锅炉

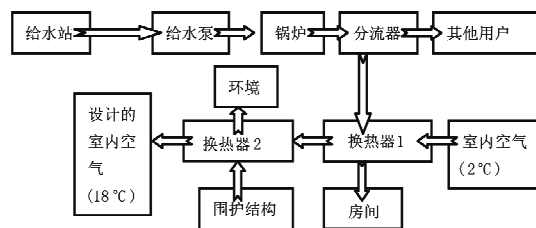


图 1 供暖系统的物理流程图

的加热量、换热器的换热量、泵的耗功等等。CyclePad 软件是一种智能辅助软件,建模时可以从设备库中选取设备,按照循环流程连接好系统

①☆ 王瑞,女,1983 年 11 月生,在读硕士研究生
△ 410012 湖南省长沙市岳麓区湖南大学土木工程学院
(0) 13170309076
E-mail:gcgong2000@yahoo.com.cn
收稿日期:2007-10-08
一次修回:2008-03-03
二次修回:2009-04-08

^{*} 国家 863 项目“复合冷凝热泵热水空调及冷热源新技术研究”(编号:2006AA05Z229)

后,便进入分析模式。在确定工作介质、工质状态参数后,软件会把设计人员输入的参数按照系统的设计流程分配和按照热力学原理转换为数据求解,在后台循环运行。当所有必须的数据输入完成后,软件会按照设计者限定的条件求解出其他的未知变量。如果设计者输入矛盾的条件,软件会自动判别并进入矛盾模式,提醒设计者修改条件,阻止设计者进一步分析和设定参数,直到矛盾消除才可进行下一步的分析。此外,该软件还有敏感性分析,任何一个输入参数的改变对整个系统的影响都可以用图表表示出来。CyclePad 软件在国外应用的例子见文献[3]。

1 建立无新风模型并进行热力学分析

1.1 使用 CyclePad 软件建立无新风系统模型

建筑物水系统:原水由给水站(SOURCE1)经过给水泵(PMP1)升压后,进入锅炉房(HTR1),从锅炉房出来的水(已经经过降压处理)一部分流入房间 R,剩余的部分流向其他用户(SINK2)。回水最后流回水站,重新由水泵送入锅炉房,系统补水忽略不计。建筑物空气系统:室内空气(SOURCE3)通过散热器与高温水进行换热后(HX1),再将一部分热量用来使围护结构升温或由门、窗、墙体等围护结构传热(HX2)至室外大气中(SINK3)。水系统和空气系统的热力循环见图 2。

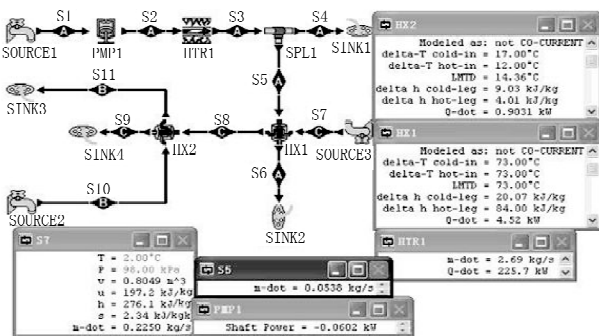


图 2 无新风有较好围护结构的热力循环(输出信息)

1.2 对模型用热力学方程组描述

先用热力学方程组描述被加热后的室内空气和围护结构换热的换热器 2(HX2)、室内空气和高温水换热的换热器 1(HX1)、分流器(SPL1)、热水锅炉(HTR1)等,则这些方程可以表达为

$$Q_{HX2} = m_{10}(h_{11} - h_{10}) = m_7(h_8 - h_9) \quad (1)$$

$$Q_{HX1} = m_5(h_5 - h_6) = m_7(h_8 - h_7) \quad (2)$$

$$m_3 h_3 = m_4 h_4 + m_5 h_5 \quad (3)$$

$$m_3 = m_4 + m_5 \quad (4)$$

$$Q_{HTR} = m_3 c_p (t_3 - t_2) = m_3 (h_3 - h_2) \quad (5)$$

式(1)~(5)中 m 为质量流量, kg/s; h 为比焓, kJ/kg; t 为温度, °C; 下标分别代表各个节点; Q_{HX1} , Q_{HX2} 分别为换热器 1, 2 的换热量, kW; Q_{HTR} 为锅炉产生的热量, kW; c_p 为水的比热容, 取 4.2 kJ/(kg · °C)。

1.3 比较不同性能围护结构的系统热力学性能

水循环:设原水的状态参数为一个工程大气压 98 kPa, 温度为 75 °C, 液态, 比焓为 314 kJ/kg (S1); 经过给水泵后, 水压变为 120 kPa^[4] (S2); 给水泵将水送入热水锅炉后, 水温升高为 95 °C, 比焓为 398 kJ/kg, 供水水压不变 (S3); 供水在分流器 (SPL1) 中分流, 分流后液体的参数与分流前保持一致, 设定房间 R 分流 2%, 剩余的 98% 供给其他房间用户, 用户端的回水温度为 75 °C, 比焓为 314 kJ/kg (S6)。

空气循环:室内空气的初始温度为 2 °C, 压力为 98 kPa, 气态, 比焓为 276.1 kJ/kg (S7), 空气的比定压热容为 1.0 kJ/(kg · °C); 室内空气与散热器中的高温水在换热器 1 (HX1) 中换热后, 温度升高为 22 °C, 比焓为 296.2 kJ/kg, 压力为 100 kPa (S8); 再向围护结构放热, 温度降低为 18 °C, 即室内设计温度, 其比焓为 292.1 kJ/kg, 压力为 98 kPa (S9); 设定室内空气的质量流量保持不变, 围护结构换热前温度为 1 °C, 压力为 98 kPa, 比焓为 275.1 kJ/kg^[5]。设定围护结构与室内空气换热时发生换热的空气的质量流量为 0.1 kg/s (S10)。

当围护结构保温措施不同时, 与空气换热后的温度也不同, 从室内带走的热量也不同。

1.3.1 围护结构的保温性能较好(定义为无新风 A 状态)

围护结构与空气换热后温度上升为 10 °C, 压力为 98 kPa, 比焓为 284.1 kJ/kg (S11)。

CyclePad 计算结果如下: $m_7 = 0.2250$ kg/s, $m_5 = 0.0538$ kg/s; 水泵的轴功率 $P_1 = 0.0602$ kJ/s (软件中, 输入功对系统来说是负值, 输出功是正值, 计算中取绝对值); $m_3 = 2.69$ kg/s, $Q_{HTR} = 225.7$ kW; $Q_{HX1} = 4.52$ kW; $Q_{HX2} = 0.9031$ kW。

1) 系统的相对热力学完善程度

系统的相对热力学完善程度 (SRTPD) 是用于

评价系统对能量的利用程度,以及系统热量和环境之间的关系。热力学完善程度定义在 0~1 之间,为 0 时说明系统没有回收余热的措施并且将系统的废热都排放到周围环境中;为 1 时说明余热都被

回收系统中,没有多余的热量释放到环境中。

$S RTPD = \text{利用的能量} / \text{可以利用的能量} = \text{室内空气接受的能量} (\text{室温从 } 2^\circ\text{C} \text{ 上升到 } 18^\circ\text{C}) / (\text{室内空气接受的能量} + \text{围护结构消耗的能量}) =$

$$\frac{0.2250 \text{ kg/s} \times (292.1 \text{ kJ/kg} - 276.1 \text{ kJ/kg})}{0.2250 \text{ kg/s} \times (292.1 \text{ kJ/kg} - 276.1 \text{ kJ/kg}) + 0.1 \text{ kg/s} \times (284.1 \text{ kJ/kg} - 275.1 \text{ kJ/kg})} = 0.8.$$

2) 系统的一次能源利用系数

设定热水锅炉燃煤效率为 80%^[6], 发电的效率为 60%^[7], 换热器的效率为 98% 保持不变。

一次能源利用系数 ($PEER$) = 有用的能量 (热负荷) / 系统所有用能的一次能耗^[8] = $[(Q_{HX1} - Q_{HX2}) \times 98\% \div 2\%] \div (P_1 \div 60\% + Q_{HTR} \div 80\%) = 62.8\%$ 。

1.3.2 围护结构的保温性能降低 (定义为无新风 B 状态)

围护结构与室内空气换热后温度升高为 15°C , 压力为 98 kPa, 比焓为 289.1 kJ/kg (S11)。围护结构与空气换热的质量流量仍设为 0.1 kg/s, 室内空气的质量流量仍为 0.2250 kg/s。

将 CyclePad 计算结果代入计算公式, 则系统的相对热力学完善程度和一次能源利用系数分别为 0.72 和 56.56%。

1.4 敏感性分析

进行敏感性分析是为了找到输入参数的改变对整个系统性能的影响。在本文中, S11 处的温度是自变量, 系统的净热量和系统净功都是因变量^[9], 当 S11 处的温度在 $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 之间变化时, 系统净热量和净功的变化分别见图 3, 图 4, $S RTPD$ 以及 $PEER$ 的敏感性分析见图 5。可以看出, 围护结构的保温性能越好, 对环境释放的余热越少, 系统的相对热力学完善程度和一次能源利用系数越高。

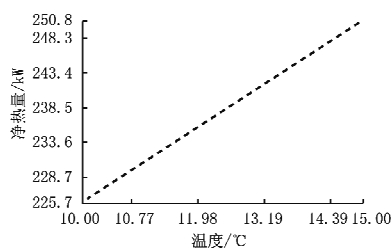


图3 系统净热量的敏感性分析

2 建立有新风的建筑模型并进行热力学分析

2.1 构建模型

建筑物水系统与无新风时的水系统流程相同。建筑物空气系统: 室内空气 (SOURCE2) 通

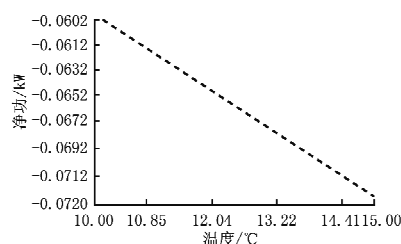


图4 系统净功的敏感性分析

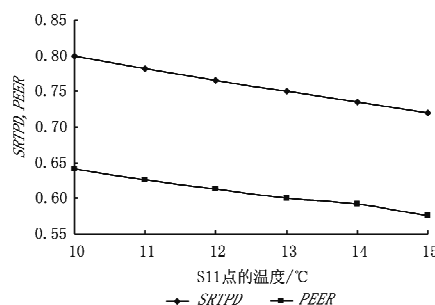


图5 S11点的温度与 $S RTPD$ 和 $PEER$ 的敏感性分析 (无新风)

过散热器与高温水换热 (HX1) 后, 再与围护结构换热 (HX2), 换热后的室内空气与为满足人体健康的室外空气混合, 一部分混合气体作为回风排至室外。水系统和空气系统的热力循环见图 6。

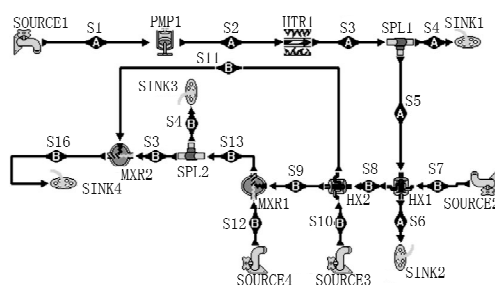


图6 有新风时的热力循环

2.2 对模型进行热力学方程组描述

室外新风和室内空气的混合 (MXR1)

$$m_{12}h_{12} + m_9h_9 = m_{13}h_{13} \quad (6)$$

$$m_{12} + m_9 = m_{13} \quad (7)$$

2.3 比较不同性能围护结构系统热力学模型

为了便于比较, 假定有新风时和无新风时的水循环是相同的。空气循环中, 室内空气先与散热器

中的水换热(HX1),再与围护结构换热(HX2),温度变为 22 °C(S9),室外新风温度为-9 °C(S12),与室内 22 °C 的空气混合后温度为 18 °C(S14),一部分混合气体排出室外(S16),围护结构换热前温度为 1 °C(S10),其他条件不变。

$$SRTPD = \frac{0.2250 \text{ kg/s} \times (292.1 - 276.1) \text{ kJ/kg}}{0.2250 \text{ kg/s} \times (292.1 - 276.1) \text{ kJ/kg} + 0.1 \text{ kg/s} \times (284.1 - 275.1) \text{ kJ/kg} + 0.0333 \text{ kg/s} \times (292.1 - 265.1) \text{ kJ/kg}} = 0.6668$$

$$PEER = \frac{[(5.42 \text{ kW} - 0.9031 \text{ kW}) \times 98\% - 0.0333 \text{ kg/s} \times (292.1 \text{ kJ/kg} - 265.1 \text{ kJ/kg})] \div 2\%}{0.0723 \text{ kW} \div 60\% + 270.8 \text{ kW} \div 80\%} = 52.09\%$$

2.3.2 当围护结构的保温性能降低的时候(假定为有新风 B 状态),围护结构与室内空气换热后温度升高为 15 °C,比焓为 289.1 kJ/kg(S11)。围护结构与空气换热的质量流量仍设为 0.1 kg/s。室内空气的质量流量仍为 0.225 kg/s。则系统的相对热力学完善程度和一次能源利用系数分别为 0.6103 和 47.71%。

2.4 敏感性分析

S11 处的温度变化与净热量和净功的敏感性分析分别见图 7 和图 8。图 9 是 S11 处温度变化与 SRTPD 和 PEER 的敏感性分析图。如果模型中 S11 处的温度是 10 °C,说明这个模型在本文的模型里算是围护结构的保温性能比较好的。当室外温度发生改变的时候,SRTPD 和 PEER 的变化见图 10。

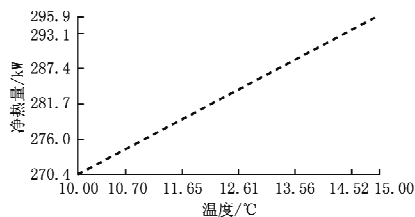


图 7 系统净热量的敏感性分析(有新风)

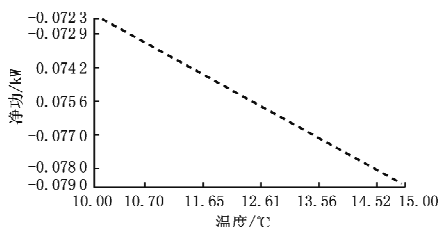


图 8 系统净功的敏感性分析(有新风)

从图 10 中显然可见,室外温度越高,SRTPD 和 PEER 越大,即达到同样的室内设计参数系统所需要的能量越少。

2.3.1 当围护结构的保温措施较好的时候(假定为有新风 A 状态),与空气换热后温度升高为 10 °C(S11)。

由 CyclePad 的计算结果可以算出系统的相对热力学完善程度和一次能源利用系数。

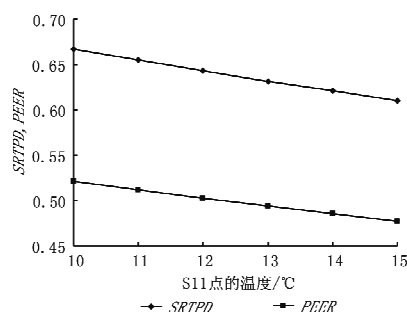


图 9 S11 点的温度与 SRTPD 和 PEER 的敏感性分析(有新风)

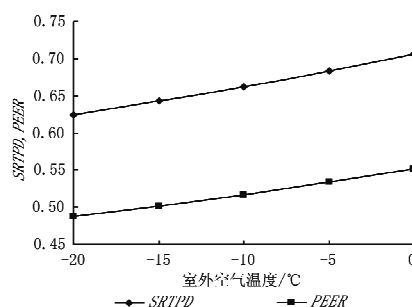


图 10 S12 点的温度与 SRTPD 和 PEER 的敏感性分析(有新风)

3 讨论

本文以 CyclePad 软件为平台建模,对供暖模型中比较基本的几种情况进行对比分析,从一个新的角度估算了系统的相对热力学完善程度指标。CyclePad 软件极大地减轻了设计人员的工作量,在分析的时候,只要按照实际的设计在 CyclePad 软件中建模,输入必要的设计参数,该软件就能生成设备所耗热量等参数,而这个参数和用热力学方程组计算出的结果是一样的。再结合热力学完善程度指标的定义公式便可以快速计算出系统的相对热力学完善程度,并判断其节能潜力。而在以往的研究中,如 Asfaw 等人只是统计了多种热力学过程来概括热力学完善程度,并没有作具体指标方面的计算^[10],本文正是完善了这一指标的计算。

分析了系统对能量的利用程度,利用程度越大说明对环境释放的热量就越少;利用程度越小说明系统回收余热的空间就越大。系统的相对热力学完善程度越高说明系统越优化、越节能,对环境的污染就越小;反之则说明系统向环境释放的热量较多,不太符合节能和环保的要求,但与此同时,说明系统的节能潜力就越大,应当对系统进行改进,使之成为更节能环保的系统。比如在围护结构保温性较差时,通过围护结构向环境释放的热量就越多,这样的系统就应该进行优化改进。

COP 和焓分析都是研究能量利用程度的方法,但是对于一个有大量余热回收的系统,本文的方法能够更简单直观地评价这个系统的节能潜力。因为 COP 一般都是大于 1 的,没有一个固定的上限,而热力学完善程度的值被定义在 0~1 之间,因此它能更好地判断系统有多大的节能潜力。这样通过对系统进行最优化的改革,可以使系统尽可能多地回收余热,对环境的影响达到最小。最后通过比较本文中建立的 4 个模型,得出 4 个模型的系统的相对热力学完善程度和一次能源利用系数的比较图,见图 11。

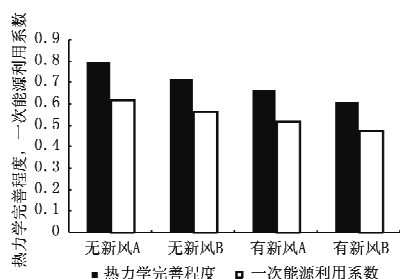


图 11 系统的相对热力学完善程度和一次能源利用系数比较

4 结论

4.1 用热力学方程组计算出来的数据结论和用 CyclePad 软件计算出来的数据结论一致,该软件也可以对实际管网进行模拟。

4.2 围护结构的保温性能越好,向环境释放的能

量就越少,对环境的影响越小,系统的相对热力学完善程度和一次能源利用系数都较高。

4.3 当系统中有新风的时候,由于新风和室内空气混合后会带走室内的热量,所以系统的相对热力学完善程度和一次能源利用系数都会降低。

4.4 利用 SRTPD 和 PEER 两个指标对系统进行综合评价,增加了对系统进行评价的指标。

4.5 本文只是在不考虑能量品质的情况下进行建模,分析不同工况并进行运算,如果要考虑能量级别,则需选定参考能量基准,这些工作将在以后进行讨论。

参考文献:

- [1] 周航兵,李华玉.不同模式下供热采暖的能耗对比分析[J].中国科技信息,2005(13)
- [2] 袁锋,胡益雄.供暖房间热力学模型的建立与计算机仿真[J].制冷空调与电力机械,2003,24(1)
- [3] Chih Wu. Intelligent computer based engineering thermodynamics and cycle analysis [M]. Nova Science Publishers, Inc, 2002
- [4] 魏力军.实现燃煤工业锅炉节能降耗的措施和途径[J].电器工业,2006(9)
- [5] 中国建筑科学研究院. JG9 26—95 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)[S].北京:中国建筑工业出版社,1996
- [6] 卜银坤,王绍华,汪景武.水煤浆及其在工业锅炉中的应用[J].工业锅炉,2005(2)
- [7] 张安华.中国电力工业节能降耗影响因素分析[J].电力需求侧管理,2006(6)
- [8] 王长庆,龙惟定,丁文婷.各种冷源的一次能耗及对环境影响的比较[J].节能技术,2000,18(4)
- [9] Chih Wu. Intelligent computer aided sensitivity analysis of a multistage Brayton / Rankin combined cycle[J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40(2): 215-232
- [10] Asfaw Beyene, Annika Moman. Process oriented industrial classification based on energy intensity[J]. Applied Thermal Engineering, 2006,26(17/18)

• 简讯 •

两项工程建设标准修订后获批准发布

日前,工程建设国家标准《锅炉安装工程施工及验收规范》(GB 50273—2009)和行业标准《城镇燃气室内工程施工与质量验收规范》(CJJ 94—2009)经修订后,获住房和城乡建设部批准发布。原《工业锅炉

安装工程施工及验收规范》(GB 50273—98)和原《城镇燃气室内施工及验收规范》(CJJ 94—2003)同时废止。

(本刊特约通讯员 高鹏)