

# MSR 在换热节能系统换热参数测量中的应用

## Heat Exchange Parameters Measurement in Heat Exchange Energy-saving System Based on Multiple Stepwise Regression

王瑞华 王 普

(北京工业大学电子信息与控制工程学院,北京 100124)

**摘要:** 在换热节能系统稳态机理模型的建立过程中,使用常规方法难以测量换热参数,这给系统机理模型的确定带来了一定的困难。为了满足系统建模对精度较高和计算量较小的要求,引入了多元逐步回归法对换热参数进行软测量。分别对实际现场采集的数据进行了试验研究,获得了最优回归方程。交叉检验结果表明,该方法可行的。

**关键词:** 空调节能 隔离型换热 机理模型 软测量 多元逐步回归

**中图分类号:** TP271+.3 **文献标志码:** A

**Abstract:** In establishment of the steady-state mechanism model for heat exchange energy saving system, some of the heat exchange parameters are difficult to be measured by using conventional method; this brings certain degree of difficulty for determining mechanism model of the system. Based on the requirements of high accuracy and less amount of computation in system modeling, the method of multiple stepwise regression is introduced to do the soft measurement for heat exchange parameters. The experimental research is conducted with the data collected in the field, and the optimal regression equation is obtained. The cross-validation result shows that this method is flexible.

**Keywords:** Air conditioning energy-saving Isolated heat exchange Mechanism model Soft measurement Multiple stepwise regression

### 0 引言

目前,暖通空调系统的节能降耗已日益受到社会的关注。换热节能系统作为一种绿色环保的空调节能系统,不少人已对此进行了研究<sup>[1-5]</sup>,但对其进行系统建模与优化的研究还不多见。在对系统进行机理模型的建立过程中,模型的换热参数难以确定。因此,如何采用合适的方法确定换热参数,是一个不易解决的问题。本文以北京某电信机房所安装的换热节能系统为实际工程背景,提出采用基于多元逐步回归法(multiple stepwise regression, MSR)的软测量技术来解决这一问题,并通过试验验证了该方法的可行性。

### 1 系统模型的建立

#### 1.1 系统介绍

换热节能系统由室外风道和室内风道组成。室外风道利用室外风机的驱动作用,从室外引进温度比较低的空气,经过换热器换热后再排放到室外。室内风道利用室内风机的驱动作用,从室内引进温度比较高

的空气,经过换热器后再送回到室内。室内风道与室外风道之间是隔离的,通过换热效率较高的换热器将两者连接起来,并通过换热器进行热量的交换,室内外风机均选用变频风机来改变风道内的风量。换热节能系统结构如图1所示。

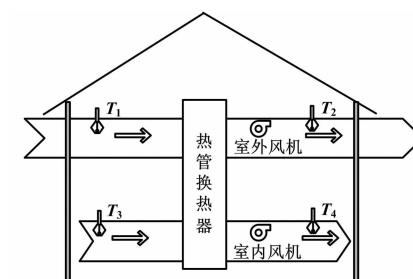


图1 换热节能系统结构图

Fig. 1 Structure of the heat exchange energy-saving system

图1中, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 分别为室外风道的进、出口温度和室内风道的进、出口温度。

#### 1.2 机理模型建立

忽略热损失等因素,根据传热过程的两个基本方程式,得到的稳态特性方程为:

$$q = G_2 C_2 (T_3 - T_4) = G_1 C_1 (T_2 - T_1) \quad (1)$$

$$q = UA_m \Delta \theta_m \quad (2)$$

式中: $q$ 为传热速率,kJ/h; $G$ 为质量流量,kg/h; $C$ 为平

国家自然科学基金资助项目(编号:60974133)。

修改稿收到日期:2012-01-07。

第一作者王瑞华(1974-),男,2003年毕业于北京工业大学控制理论与控制工程专业,获硕士学位,工程师;主要从事空调节能优化控制的研究。

均比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 本系统中冷热流体均为空气, 所以  $C_1$  和  $C_2$  都是空气的平均比热容  $C_p$ ;  $T_1$  为室外风道进风口温度,  $\text{K}$ ;  $T_2$  为室外风道出风口温度,  $\text{K}$ ;  $T_3$  为室内风道进风口温度,  $\text{K}$ ;  $T_4$  为室内风道出风口温度,  $\text{K}$ ;  $U$  为传热总系数,  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{h})$ ;  $A_m$  为平均传热面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta\theta_m$  为平均温度差,  $\text{K}$ 。  $\Delta\theta_m$  的表达式为:

$$\Delta\theta_m = \frac{[(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)]}{\ln[(T_4 - T_1)/(T_3 - T_2)]} \quad (3)$$

为简化计算, 将式(3)的对数平均值用算术平均值表示, 可得:

$$\Delta\theta_m = [(T_4 - T_1) + (T_3 - T_2)]/2 \quad (4)$$

综合式(1)、式(2)和式(4)这三个方程式, 消去变量  $T_2$ , 可得:

$$T_4 = T_3 - (T_3 - T_1) / \left[ \frac{G_2 C_p}{U A_m} + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{G_2}{G_1} \right) \right] \quad (5)$$

式(5)即为换热节能系统的稳态模型<sup>[6-8]</sup>。其中, 两个风道内空气的质量流量  $G_1$  和  $G_2$  与两个风机运行频率  $f_1$  和  $f_2$  呈显著的线性关系。

线性函数如下:

$$G_1 = 440.76f_1 - 1860 \quad (6)$$

$$G_2 = 305.52f_2 - 1374 \quad (7)$$

这就把风量  $G_1$  和  $G_2$  转化成比较容易测量的风机频率值  $f_1$  和  $f_2$  进行处理。

### 1.3 问题描述

通过分析式(5)可以看出, 除了模型参数  $U A_m$  外, 其他变量都比较容易测量。通过分析传热过程与实际数据可知, 虽然传热面积  $A_m$  在系统运行阶段是一个固定值, 可以通过换热器的实际设计参数进行推导, 但传热总系数  $U$  的大小受两个风道内风量大小和进风口温度等变量的影响。为简化运算, 可以把传热总系数  $U$  与传热面积  $A_m$  的乘积  $U A_m$  作为待确定的模型参数。因此, 如何确定模型参数  $U A_m$  是一个急需解决的问题。

## 2 软测量技术应用

软测量技术通过建立可测变量与不可测变量的数学模型, 完成对不可测变量的估计。因此, 软测量模型是软测量技术的核心。软测量模型有机理建模、经验建模以及两者相结合<sup>[8]</sup>这三种建模方法。通过对本系统的机理研究可以发现, 流换热过程受物体物性、流动状态、温度和换热面几何特性等因素影响。机理建模法实现难度很大、精度很低<sup>[9]</sup>。因此, 本文采用经验建模的方法来完成对模型参数  $U A_m$  的软测量。由式(5)可得:

$$U A_m = G_2 C_p (T_3 - T_4) / \left[ (T_3 - T_1) - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{G_2}{G_1} \right) (T_3 - T_4) \right]$$

这样, 利用比较容易测量的  $T_1$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ , 可以求出  $U A_m$  的值。求解过程中, 以  $T_1$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $G_1$ 、 $G_2$  作为模型的输入, 以  $U A_m$  作为模型的输出。挑选合适的的数据作为软测量模型建立的样本, 采用恰当的方法, 就可以得到经验模型。

### 3 多元逐步回归法

回归分析是一种最常用的经验建模方法, 为寻找多个变量之间的函数关系或相关关系提供了有效的手段。经典的回归分析方法是小二乘法, 为了避免矩阵求逆运算, 可以采用递推小二乘法; 为了防止数据饱和, 还可采用带遗传因子的最小二乘法。在建立软测量模型时, 存在很多影响因素(辅助变量)。如果把所有考虑的因子都包括在回归方程中, 不仅会使方程复杂化, 而且会干扰回归方程的使用效果, 降低精确度和稳定性。多元逐步回归法的基本思想是将变量逐一引入回归方程, 通过自变量的筛选提高回归方程的显著性, 以找到最优回归方程。MSR 方法的操作要点如下。

① 根据专业领域的理论和经验, 提出对因变量有实际影响的自变量。

② 计算每一个自变量对因变量的相关系数, 并按从大到小的顺序对其绝对值进行排序。

③ 取相关系数绝对值最大的自变量, 建立一元线性回归模型, 并检验所得回归方程的效果。若检验表明回归效果显著, 则转到步骤④; 若检验表明回归效果不显著, 则停止建模。

④ 进行变量的追加、剔除和回归方程的更新操作。

若检验表明回归效果显著, 则按从大到小的顺序对相关系数绝对值逐一进行排序, 并将相应的自变量引入回归方程; 每引入一个新的自变量, 即对新回归方程中的每一个自变量进行显著性检验。若检验表明回归效果不显著, 则剔除对因变量影响最小的自变量, 更新回归方程; 对更新后的回归方程中的每一个自变量仍要进行检验、剔除、更新, 直到回归方程中的每一个自变量都显著为止, 再引入前面未曾引入的自变量。依次类推, 直到无法剔除已经引入的自变量、也无法引入新的自变量为止。

MSR 虽然不能保证得到真正的最优回归方程, 但它具有计算量较小、估计效果较好、应用较多等特点。此外, MSR 受检验的显著性水平  $\alpha$  影响较大,  $\alpha$  较大将会有较多的自变量引入回归方程;  $\alpha$  较小将会导致一

些重要的自变量被剔除<sup>[10]</sup>。

#### 4 试验研究

本着多样性和均匀性的原则,从系统运行现场获得了 73 组有效数据用于建立回归方程,运用逐步回归方法对这 73 组数据进行回归分析,取显著性水平为 0.05,获得的最优回归方程为:

$$UA_m = 161.869 9T_1 - 203.315 7T_3 + 35.902 2f_1 + 130.581 5f_2 + 3 574.5 \quad (8)$$

可以看出,在给定的显著性水平 0.05 下,所有的自变量都显著。

为了检验模型的泛化能力,从历史数据中随机抽取 100 组有效数据对回归方程进行交叉检验。以样本序列为横坐标,以系统传热总系数  $U$  与传热面积  $A_m$  的乘积  $UA_m$  作为纵坐标,使用各样本点相对误差的均值  $MER$  衡量模型的拟合精度和泛化能力,求得交叉检验样本的  $MER$  为 0.095,获得的最优回归方程模型输出与实际输出曲线如图 2 所示。

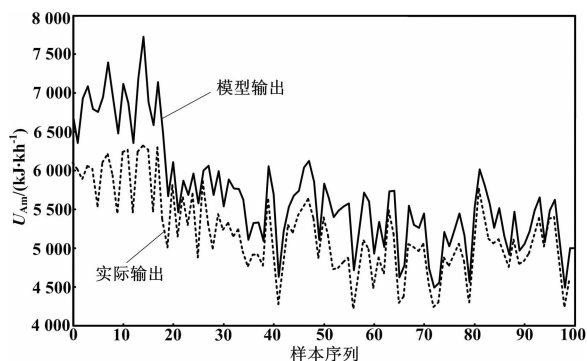


图 2 逐步回归法模型输出与实际输出图

Fig. 2 Output of multiple stepwise regression model and actual output

从图 2 可以看出,根据现场实际数据结合机理模型计算得到的  $UA_m$  值与通过最优回归方程模型得出的值相差不大,所得到的模型可以用于实际应用。

#### 5 结束语

多元逐步回归(MSR)作为回归分析的一种,具有计算量小、容易编程实现的优点,对实际工程而言,方法的简单、实用与否是其是否被采用的一个重要因素。本文从工程实际应用出发,利用基于 MSR 的软测量技术解决了系统模型中的关键参数难以测量的问题。本文的研究为进一步对节能系统进行在线优化打下了基础。

#### 参考文献

- [1] 李长云. 利用自然冷源进行隔绝换热的节能措施[J]. 电信技术, 2008(8): 52-53.
- [2] 金鑫, 瞿晓华, 祁照岗, 等. 分离式热管型机房空调性能实验研究[J]. 暖通空调, 2011, 41(9): 133-136.
- [3] 刘岩. 自然冷资源辅助空调系统研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007.
- [4] 许磊, 陈超, 管勇, 等. 自然冷却换热技术在电信行业通信机房空调系统中的应用研究[J]. 制冷与空调, 2010, 10(5): 85-89.
- [5] 鲍玲玲. 通信基站用空气换热器的研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2008.
- [6] 俞金寿, 蒋慰孙. 过程控制工程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 195-198.
- [7] 孙优贤, 邵惠鹤. 工业过程控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 15-16.
- [8] 俞金寿, 刘爱伦, 张克进. 软测量技术及其在石油化工中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 1-2.
- [9] 邓元望, 袁茂强, 刘长青. 传热学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 183-184.
- [10] 包研科, 李娜. 数理统计与数据处理[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2008: 209-213.

行业信息

### INFICON 为中国汽车行业提供专业检漏方案

2012年10月26日,专业气体测量、分析及控制仪器解决方案供应商英福康(INFICON)成功参展2012中国国际汽车零部件博览会,全面展示了其先进的检漏技术,以帮助中国汽车制造企业更好地迎合检漏标准日益提高的全球化发展趋势。

展会现场,英福康的专业人员不仅展示了针对传统汽车工业的专业检漏方案,而且也对其检漏技术在新能源汽车行业的运用作了详细介绍。英福康专利“智能科技”传感器就采用了先进的陶瓷薄膜渗透原理,在保证高检测质量的同时,大大降低了整个系统的集成费用。“新比亚迪轿车的燃料电池使用的就是英福康的检漏设备。”英福康中国销售总监赵凡非先生对英福康在新能源汽车行业的应用前景充满了信心。

英福康(INFICON)是检漏仪器仪表的开发商、制造商与供应商。英福康的主要客户有制冷和空调设备的制造商与服务商、汽车制造商和汽车零部件供应商、半导体行业以及检漏系统集成商。全球大多数重要的汽车制造商及零部件供应商都是英福康的客户。