

降温温度。文献 [11] 针对室外温度，提出了风速降温等效温度的计算公式，相应的计算公式如式 (2) 所示：

$$\Delta T_{wind} = 0.0246(\lg(7.23 W_{wind}))^3 - 0.4525$$

$$(\lg(7.23 W_{wind}))^2 + 3.2398 \lg(7.23 W_{wind}) \quad (2)$$

其中： W_{wind} 为外界风速值 (m/s)； ΔT_{wind} 为风速降温等效温度 (°C)。

然后，将折算后的风速降温等效温度 ΔT_{wind} 加入到实测的室外温度 T_{out} 上，就变成加入了风速影响的室外温度 $T_{out-wind}$ 。相应的 $T_{out-wind}$ 计算公式如式 (3) 所示：

$$T_{out-wind} = T_{out} - \Delta T_{wind} \quad (3)$$

同样针对该换热站，通过最小二乘法进行了一元回归方程的拟合，相应的室外温度 (加入了风速影响) 与某换热站热负荷之间的拟合效果如图 4 所示。

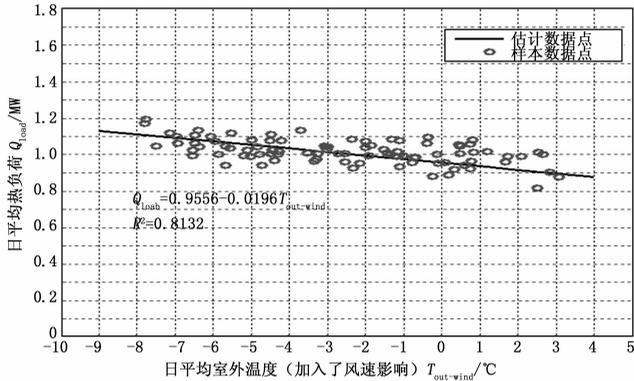


图 4 室外温度 (加入了风速影响) 与某换热站热负荷之间的关系

相应的室外温度 (加入了风速影响) 与某换热站热负荷之间的一元回归拟合方程如式 (4) 所示：

$$Q_{load} = 0.9556 - 0.01967 T_{out-wind} \quad (4)$$

其中，拟合的平方相关系数 R^2 为 0.8132。说明加入了风速影响的室外温度与该换热站热负荷也成近似的线性关系，并且其平方相关系数 R^2 比只考虑室外温度的要大，说明加入了风速影响的室外温度与该换热站热负荷的线性相关性比只考虑室外温度的要高。

2.3 日照与室外温度对热负荷的影响

由于外界日照的变化会对真实的室外温度造成影响，当日日照增加时，真实的室外温度值会比实测的室外温度值偏高。因此，在研究室外温度与集中供热系统热负荷之间的关系时，需要考虑日照对室外温度的影响。

当日日照增加时，对应于室外温度，可以折算为一个等效的升温温度。文献 [12] 针对室外温度，提出了日照升温等效温度的计算公式，相应的计算公式如式 (5) 所示：

$$\Delta T_{solar} = \frac{S_{solar}}{S_k} \quad (5)$$

其中： S_{solar} 为外界日照值 (W/m^2)； S_k 为日照折算系数 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)； ΔT_{solar} 为日照升温等效温度 (°C)。在本文中， S_k 取 $100 W/m^2 \cdot ^\circ C$ 。

然后，将折算后的日照升温等效温度 ΔT_{solar} 加入到实测的室外温度 T_{out} 上，就变成加入了日照影响的室外温度 $T_{out-solar}$ 。

相应的 $T_{out-solar}$ 计算公式如式 (6) 所示：

$$T_{out-solar} = T_{out} + \Delta T_{solar} \quad (6)$$

同样针对该换热站，通过最小二乘法进行了一元回归方程的拟合，相应的室外温度 (加入了日照影响) 与某换热站热负荷之间的拟合效果如图 5 所示。

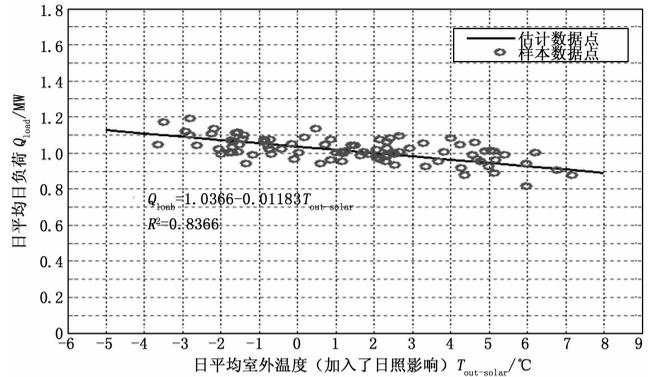


图 5 室外温度 (加入了日照影响) 与某换热站热负荷之间的关系图

相应的室外温度 (加入了日照影响) 与某换热站热负荷之间的一元回归拟合方程如式 (7) 所示：

$$Q_{load} = 1.0366 - 0.01183 T_{out-solar} \quad (7)$$

其中：拟合的平方相关系数 R^2 为 0.8366。说明加入了日照影响的室外温度与该换热站热负荷也成近似的线性关系，并且其平方相关系数 R^2 比只考虑室外温度的要大，说明加入了日照影响的室外温度与该换热站热负荷的线性相关性比只考虑室外温度的要高。

3 热负荷预测模型

3.1 样本数据的选取

根据前面分析的数据结果，可知室外温度与集中供热系统热负荷呈近似的线性关系，加入了风速或日照影响的室外温度与集中供热系统热负荷的线性关系程度更高。说明室外温度对集中供热系统热负荷有直接影响，而风速与日照对室外温度有直接影响，然后间接影响集中供热系统热负荷。

因此，本文选择室外温度、风速与日照作为影响集中供热系统热负荷的气象因素。考虑集中供热系统热负荷具有一定的热惰性，前几天的热负荷作为一个基础热负荷，会对后几天的热负荷造成一定的影响。因此，在考虑集中供热系统热负荷的影响因素分析中，需要考虑前几天热负荷对当日集中供热系统热负荷的影响^[13]。

基于此，本文选择的热负荷预测模型的输入输出变量的汇总表如表 1 所示。

表 1 集中供热系统热负荷预测模型输入输出变量

输入变量	输出变量
当日日平均室外温度 $T_{out}^d / ^\circ C$	当日日平均热负荷 Q_{load}^d / MW
当日日平均风速 $W_{wind}^d / (m/s)$	
当日日平均日照 $S_{solar}^d / (W/m^2)$	
昨日日平均热负荷 Q_{load}^{d-1} / MW	

其中, 选择当日日平均室外温度 T_{out}^d (°C)、当日日平均风速 W_{wind}^d (m/s)、当日日平均日照 S_{solar}^d (W/m^2) 与昨日日平均热负荷 Q_{load}^{d-1} (MW) 作为热负荷预测模型的 4 个输入变量, 由于本文的研究需要预测集中供热系统热负荷, 因此, 本文选择当日日平均热负荷 Q_{load}^d (MW) 作为热负荷预测模型唯一的 1 个输出变量。其中 d 均代表日期的序号。

当热负荷预测模型的输入输出变量选择好了以后, 热负荷预测模型的结构可简化用式 (8) 来表示:

$$Q_{load}^d = f(T_{out}^d, W_{wind}^d, S_{solar}^d, Q_{load}^{d-1}) \quad (8)$$

其中: $f(., ., .)$ 为该集中供热系统热负荷预测模型的函数。然后, 以本文中涉及的大连市某高校区域集中供热系统为实验背景, 选取其中的 1 个换热站与 2 个楼宇作为 3 个实验对象, 然后分别建立相应的热负荷预测模型 1、模型 2 与模型 3。

相应的样本数据分为训练样本数据与测试样本数据。针对其中本文项目中大连市某高校区域集中供热系统, 训练样本数据选取的是 2015 年 1 月份 31 天的数据, 测试样本数据选取的是 2015 年 3 月份 31 天的数据。

3.2 预测模型的建立

当集中供热系统热负荷预测模型的输入输出变量以及基本结构确定以后, 热负荷预测模型的结构就确定下来了。本文是通过多元回归法来建立热负荷预测模型的。在本文中, 相应的热负荷预测模型的多元回归函数方程如式 (9) 所示:

$$Q_{load}^d = A + B \cdot T_{out}^d + C \cdot W_{wind}^d + D \cdot S_{solar}^d + E \cdot Q_{load}^{d-1} \quad (9)$$

其中: A, B, C, D 与 E 分别是热负荷预测模型的 5 个回归系数。

1stOpt 软件是七维高科有限公司开发的一套世界领先的曲线拟合、综合优化分析计算软件, 凭借其超强的寻优、容错能力, 在回归、曲线拟合、复杂工程模型参数估算求解等领域有着无可比拟的优势^[14]。

本文运用 1stOpt 软件, 基于其中的通用全局优化算法 (LM-UGO 算法), 利用已有的训练样本数据进行回归模型训练, 可以分别将热负荷预测模型 1、2 与 3 的 5 个回归系数辨识出来。为了检验热负荷预测模型的精度, 以及后续预测模型的准确性, 本文引入了 2 个模型的性能评价指标, 分别为平方相关系数 R^2 与平均绝对百分比误差 $MAPE$ 。相应的 2 个性能评价指标的计算公式如式 (10) 与 (11) 所示:

$$R^2 = \frac{\sum_{d=1}^{31} (Q_{load}^{d, measured} - \bar{Q}_{load}^{d, measured})(Q_{load}^{d, estimated} - \bar{Q}_{load}^{d, estimated})}{\sum_{d=1}^{31} (Q_{load}^{d, measured} - \bar{Q}_{load}^{d, measured})^2 + \sum_{d=1}^{31} (Q_{load}^{d, estimated} - \bar{Q}_{load}^{d, estimated})^2} \quad (10)$$

$$MAPE = \frac{1}{31} \sum_{d=1}^{31} \left| \frac{Q_{load}^{d, measured} - Q_{load}^{d, estimated}}{Q_{load}^{d, measured}} \right| \times 100\% \quad (11)$$

其中: 日平均热负荷的测量值是 $Q_{load}^{d, measured}$ (MW); 日平均热负荷测量值在这 31 天的平均值是 $\bar{Q}_{load}^{d, measured}$ (MW); 日平均热负荷的估计值是 $Q_{load}^{d, estimated}$ (MW); 日平均热负荷估计值在这 31 天的平均值是 $\bar{Q}_{load}^{d, estimated}$ (MW)。

其中平方相关系数 R^2 越接近 1, 证明曲线拟合得越好, 模型的准确度也越高; 而平均绝对百分比误差 $MAPE$ 越接近

0, 证明相对误差越小, 模型的精度也越高^[15]。

相应的集中供热系统热负荷预测模型 1、2 与 3 的训练结果如表 2 所示。

如表 2 所示, 3 个热负荷预测模型的 5 个回归系数都通过 1stOpt 软件给辨识出来了。通过计算分析, 3 个热负荷预测模型在训练过程中, 多元回归拟合的平方相关系数 R^2 均在 0.900 0 以上, 很接近于 1; 同时, 3 个模型训练的平均绝对百分比误差 $MAPE$ 均在 3.50% 以下。说明这 3 个热负荷预测模型的准确度比较高, 模型训练的比较合理。

4 结果与讨论

当 3 个热负荷预测模型都建立以后, 就要进行模型的实际测试与检验了。基于已经得到的 3 个热负荷预测模型的回归函数方程, 可以对已有的测试样本数据进行测试, 从而检验这 3 个模型的精度。相应的 3 个热负荷预测模型在测试过程中测量值与估计值的对比曲线如图 6、7 与 8 所示。

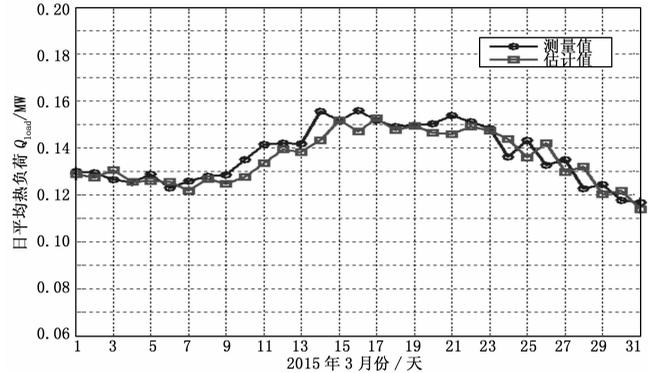


图 6 模型 1 在测试过程中热负荷测量值与估计值的对比曲线

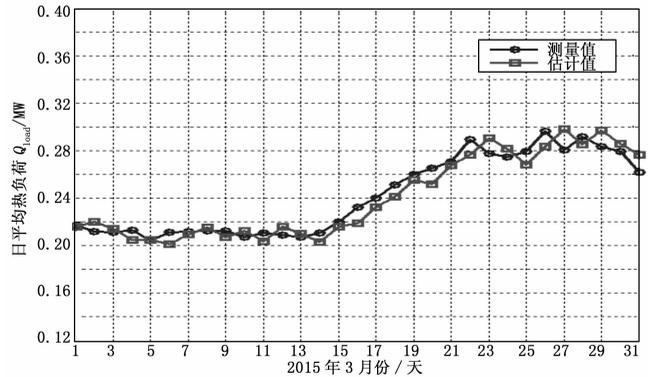


图 7 模型 2 在测试过程中热负荷测量值与估计值的对比曲线

如图 6~8 所示, 这 3 个热负荷预测模型在测试过程中, 日平均热负荷的估计值与测试值比较接近, 预测曲线对实际曲线的拟合效果是不错的。从直观上来看, 这 3 个热负荷预测模型的测试效果比较理想。为了更好地研究这 3 个模型的预测效果, 则需要对模型的预测误差进行量化计算。

相应的集中供热系统热负荷预测模型 1、2 与 3 的测试结果如表 3 所示。

表 2 集中供热系统热负荷预测模型 1,2 与 3 的训练结果

$$Q_{load}^d = A + B \cdot T_{out}^d + C \cdot W_{wind}^d + D \cdot S_{solar}^d + E \cdot Q_{load}^{d-1}$$

模型编号	回归系数					误差	
	A	B	C	D	E	R ²	MAPE
模型 1	0.006 8	3.1248e-5	0.001 4	-3.1434e-5	0.956 0	0.953 9	2.89%
模型 2	-0.002 0	-6.7021e-5	-0.003 6	7.7381e-5	0.984 1	0.962 3	3.21%
模型 3	0.040 3	-0.000 8	0.005 4	-5.9781e-5	0.845 3	0.958 9	2.64%

表 3 集中供热系统热负荷预测模型 1,2 与 3 的测试结果

模型编号	回归函数方程	误差	
		R ²	MAPE
模型 1	$Q_{load}^d = 0.0068 + 3.1248e-5 T_{out}^d + 0.0014 W_{wind}^d - 3.1434e-5 S_{solar}^d + 0.9560 Q_{load}^{d-1}$	0.907 2	3.09%
模型 2	$Q_{load}^d = -0.0020 - 6.7021e-5 T_{out}^d - 0.0036 W_{wind}^d + 7.7381e-5 S_{solar}^d + 0.9841 Q_{load}^{d-1}$	0.964 9	3.16%
模型 3	$Q_{load}^d = 0.0403 - 0.0008 T_{out}^d + 0.0054 W_{wind}^d - 5.9781e-5 S_{solar}^d + 0.8453 Q_{load}^{d-1}$	0.948 3	3.76%

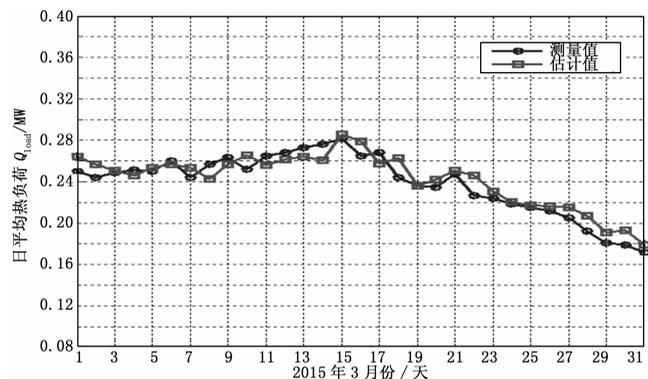


图 8 模型 3 在测试过程中热负荷测量值与估计值的对比曲线

如表 3 所示, 基于已经得到的 3 个热负荷预测模型的回归函数方程, 对已有的测试样本数据进行测试, 通过计算分析, 3 个热负荷预测模型在测试过程中, 多元回归拟合的平方相关系数 R² 也均在 0.900 0 以上, 很接近于 1; 同时, 3 个模型测试的平均绝对百分比误差 MAPE 均在 4.00% 以下。说明这 3 个热负荷预测模型的精度比较高。

同时, 需要指出的是, 在热负荷预测模型训练与测试的整个过程中, 所有相对误差绝对值的最大值不超过 8.00%, 说明这 3 个热负荷预测模型的训练与测试都比较合理。这种多元回归计算分析法比较适合应用于热负荷预测领域。

5 结论

本文针对大连市某高校的区域集中供热系统, 介绍了该集中供热系统的工艺流程与供热管网分布。本文着重研究了气象因素对集中供热系统热负荷的影响, 结果表明室外温度对热负荷有直接影响, 风速或日照对室外温度有直接影响, 然后间接影响热负荷。然后, 基于多元回归分析法, 利用 1stOpt 软件建立了集中供热系统热负荷预测模型。实验结果显示, 在热负荷预测模型的训练与测试过程中, 多元回归拟合的平方相关系数均在 0.900 0 以上, 模型训练、测试的平均绝对百分比误差均在 4.00% 以下, 并且所有相对误差绝对值的最大值均小于 8.00%, 说明热负荷预测模型的训练与测试均比较合理。这种多元回归法适用于在热负荷预测领域推广与使用。

参考文献:

- [1] 马喜成, 范梅梅, 杨巨生. 集中供热管网热瞬态预测 [J]. 暖通空调, 2011, 41 (5): 85-88.
- [2] 介鹏飞, 付林. 基于实际参数的集中供热系统二次网运行调节 [J]. 暖通空调, 2014, 44 (12): 107-111.
- [3] 袁闪闪, 田喆, 朱能, 等. 利用气象参数进行热网动态调节研究方法综述 [J]. 煤气与热力, 2010, 30 (7): 8-11.
- [4] Werner S. The heat load in district heating systems [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 1984.
- [5] Fernando S W, Roberto L. The use of simplified weather data to estimate thermal loads of non-residential buildings [J]. Energy & Buildings, 2004, 36: 847-854.
- [6] Henrik A N, Henrik M. Modelling the heat consumption in district heating systems using a grey-box approach [J]. Energy & Buildings, 2006, 38: 63-71.
- [7] Krzysztof W. An influence of weather conditions on heat demand in district heating systems [J]. Energy & Buildings, 2008, 40: 2009-2014.
- [8] Omer Y, Tolga Y. Climatic parameters and evaluation of energy consumption of the Afyon geothermal district heating system, Afyon, Turkey [J]. Renewable Energy, 2009, 34: 706-710.
- [9] 魏延宝, 林红权, 马增良, 等. 基于 ARMAX 模型的集中供热系统负荷预测研究 [J]. 自动化与仪表, 2014, 7: 1-4.
- [10] 李琦, 韩颖. 基于天气预报的集中供热系统短期热负荷预测 [J]. 自动化与仪表, 2015, 5: 5-8.
- [11] 徐大海, 朱蓉. 人对温度、湿度、风速的感觉与衣着指数的分析研究 [J]. 应用气象学报, 2000, 11 (4): 430-439.
- [12] 石兆玉. 供热系统运行调节与控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [13] 秦冰, 江亿, 付林, 等. 集中供热系统热动态特性的测试研究 [J]. 煤气与热力, 2005, 25 (11): 20-23.
- [14] Cheng X Y, Chai F X, Gao J, et al. 1stOpt and global optimization platform-comparison and case study [A]. Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology [C]. Chengdu, 2011: 328-332.
- [15] 季永明, 端木琳, 王宏彬, 等. 大连地区新建居住建筑气密性实测 [J]. 暖通空调, 2015, 45 (1): 13-18.