

本刊
特稿

基于供热数据挖掘和负荷预测的 适量供热技术^{*}

哈尔滨工业大学 王素玉[☆] 姜永成 方修睦 刘立涛 郑瑞芸

摘要 针对供暖用户和建筑热力系统的热工特性,从计算机存储的海量历史数据中进行数据挖掘,得到对应于室外当量温度的供热负荷预测区间。通过工程实例介绍了数据挖掘过程和与热网最佳运行调节策略相结合的运行参数预测,最终实现适量供热调节。

关键词 数据挖掘 参数预测 运行调节 适量供热

Appropriate heating technology based on heating data mining and load prediction

By Wang Suyu[★], Jiang Yongcheng, Fang Xiumu, Liu Litao and Zheng Ruiyun

Abstract Based on the thermal characteristics of heating user and building thermodynamic system, performs the data mining from the abundant historical operating data stored by computer and obtains the heating load predicting scope related to outdoor equivalent temperature. With a practical project, presents the process of data mining and the operating parameter prediction integrated with optimum operating regulation strategy of heating network and realizes appropriate heating regulation.

Keywords data mining, parameter prediction, operating regulation, appropriate heating

[★] Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

近年来,城市集中供热事业飞速发展,热用户的数量成倍增加,这对供热系统的运行管理提出了更高的要求。提高我国集中供热系统的自动化水平,实现适量供热不仅是提高供热企业竞争力的要求,更是实现建筑节能减排的重要环节。

供热负荷预测是实现适量供热控制的关键环节,各热力公司在运行过程中储存了大量的历史数据,但是由于缺少合适的数据挖掘方法,这些数据没有在供热运行调节中得到充分利用。目前对供热和制冷负荷的短期和长期预测已有相关的研究,其中采用的研究方法包括指数平滑法^[1]、多元回归法^[2]、卡尔曼滤波法^[3]和状态估计法^[4-5]。近期的研究方法又包括了神经网络法^[6]和时间序列法。这些方法在负荷预测时都可以达到预期的精度,但是由于机理较复杂,对一般的技术人员来说门槛较高,并且在组态软件中编程较复杂,因此在热网自

动控制系统中的应用并不普遍。

笔者将数据挖掘方法引入到负荷预测中,通过分析以往的历史数据,挖掘出供热负荷预测的数学模型。数据挖掘的机理较前面提到的方法简单,适合工程应用。利用数据挖掘结果在线修改热网运行调节参数,得出更切合热网实际工况的运行调节公式,计算出运行参数。最后通过工程实例说明该数据挖掘方法的应用。

1 历史运行数据挖掘

在忽略太阳辐射、风速变化等因素对建筑物围护结构耗热量影响的情况下,建筑物稳态热负荷用下式计算^[7]:

$$Q = KF(t_n - t_w) \quad (1)$$

式中 Q 为建筑物的热负荷, W; K 为建筑物的传

①[☆] 王素玉,女,1986年10月生,在读硕士研究生
150090 黑龙江省哈尔滨市南岗区海河路202号哈尔滨工业大学二校区市政学院3207
(0451) 86283342
E-mail: wangsuyul1986@yahoo.com.cn
收稿日期:2011-03-08
修回日期:2011-04-21

热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; F 为建筑物的传热面积, m^2 ; t_n, t_w 分别为室内、外空气温度, $^\circ C$ 。

由式(1)可以看出,如果室内空气温度保持不变,忽略建筑物的热惰性,对于同一栋建筑物来说,建筑热负荷 Q 和室外空气温度 t_w 之间呈线性关系。

但在实际情况下,建筑物通过围护结构与外界发生非稳态传热。为了说明围护结构非稳态导热的机理,引入第三类边界条件下无限大平壁冷却时平壁内的温度分布函数^[8]:

$$\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} = A \cos(Bx) \exp(-C\tau) \quad (2)$$

式中 $\theta(x, \tau)$ 为平壁在 τ 时刻 x 位置的温度, $^\circ C$; θ_0 为平壁的初始温度, $^\circ C$; A, B, C 为与物性和形状有关的常数。

由式(2)可以看出,温度波随时间的变化存在一定的延迟和衰减,因此当前时刻对后续时刻负荷

$$t_{w,i,e} = \alpha_i t_{w,i} + \alpha_{i-1} t_{w,i-1} + \dots + \alpha_{i-n} t_{w,i-n} = \sum_{k=0}^n \alpha_{i-k} t_{w,i-k} \quad (4)$$

式中 $t_{w,i,e}$ 为第 i 时刻的当量室外空气温度, $^\circ C$; α_i 为第 i 时刻的室外空气温度在当量室外空气温度中所占的权重, $\sum_{k=0}^n \alpha_{i-k} = 1$ 。

$$\alpha_i = \frac{m_0}{m_0 + m_1 + m_2}, \alpha_{i-1} = \frac{m_1}{m_0 + m_1 + m_2}, \alpha_{i-2} = \frac{m_2}{m_0 + m_1 + m_2} \quad (5)$$

式(5)中的 m_0, m_1, m_2 依次取 $1 \sim 10$ 之间的 10 个整数,这样就可以给每一时刻的室外空气温度赋予不同的权重,并且满足 $\sum_{k=0}^n \alpha_{i-k} = 1$ 。各权重的最终取值取决于它们满足下文所述的评价指标的情况。

根据前面的讨论,当量室外空气温度与供热负荷的关系应为线性关系,即:

$$Q_i = at_{w,i,e} + b \quad (6)$$

式中 a, b 为待挖掘的系数。

式(6)将通过历史数据进行一次曲线最小二乘拟合得到。

挖掘出的函数关系是否合理应该有一些评价指标,该指标应保证使用式(6)进行负荷预测时具有一定的准确性,量化指标为预测值与实际值的均方误差(MSE)最小。

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{p(i)} - y_{o(i)})^2}{N-1}} \quad (7)$$

的影响也应存在衰减的效应。当前时刻的热状态不仅与当前时刻的温度有关,还与历史时刻的温度有关,即与建筑物的热惰性有关。

统计计算结果表明,建筑物当前的热负荷与前 4~5 d 的室外气象状态有关^[9]。因此,在室内空气温度一定的情况下,建筑物热负荷和室外空气温度的关系可以用下式表示:

$$Q_i = f(t_{w,i}, t_{w,i-1}, \dots, t_{w,i-n}) \quad (3)$$

式中 Q_i 为第 i 时刻的负荷, W ; $t_{w,i}, t_{w,i-1}, t_{w,i-n}$ 分别为第 $i, i-1, i-n$ 时刻的室外空气平均温度, $^\circ C$ 。

综合以上讨论,建筑热负荷与室外空气温度的关系为线性关系,且不仅与当前时刻的室外空气温度有关,而且与前几天的室外空气温度有关。这里引入一个当量室外空气温度来表示对当前热负荷产生影响的室外空气温度的综合值:

在确定各时刻室外空气温度在当量室外空气温度中的权重时采用“试探”的方法。如令式(4)中的 $n=2$,则分别设:

式中 $y_{p(i)}, y_{o(i)}$ 分别为第 i 时刻的预测值和实际值; N 为数据点的个数。

需要指出的是,对于一定范围内、以不同的时间间隔储存的历史运行数据,上述方法都适用,但是时间间隔不宜过短,也不宜过长。时间间隔过短会导致计算次数增加,挖掘速度缓慢,挖掘出来的当量室外空气温度公式烦琐,且无必要;时间间隔过长会淹没建筑物的动态过程,使数据挖掘变得没有意义。因此这里推荐的数据点时间间隔应在 4 h~1 d 之间。

假设已经掌握了某锅炉房或热电厂一年的运行数据,包括室外空气温度 and 对应时刻的供热量,将这些数据分为两部分,其中一部分作为已知量进行数据挖掘,剩余部分作为检验数据。通过上述方法进行数据挖掘的流程见图 1。

2 工程实例

2.1 供热运行数据挖掘

根据大庆市某热力公司一个供暖季的运行参数,包括每天的室外空气平均温度、供水温度、回水

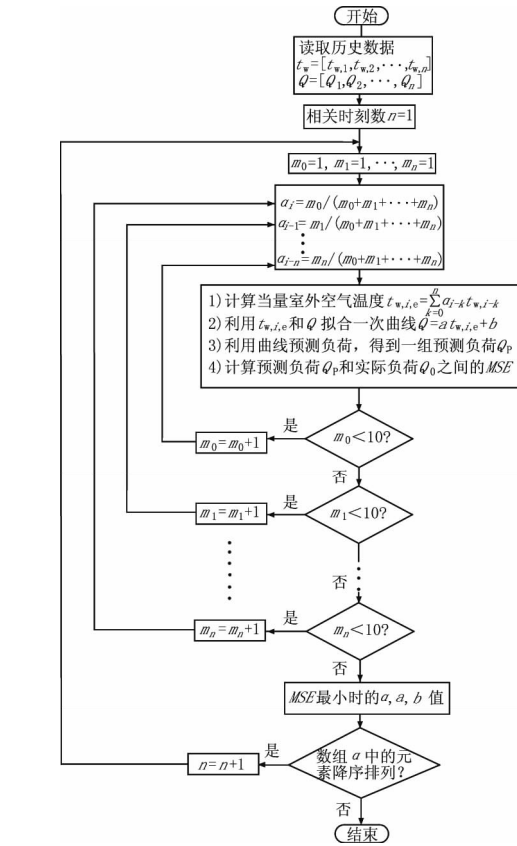


图1 数据挖掘方法的流程

温度、流量,进行数据挖掘。由于该热力公司原始数据的时间间隔为1 d,受实际条件所限,只能采用1 d时间间隔的数据进行挖掘。对于原始数据时间间隔较密的,可以采用较小时间间隔的数据进行挖掘。

根据第1章提到的数据挖掘方法,对这些运行数据采用不同的相关时间进行挖掘,结果见表1。

从表1的结果来看,均方误差随着相关时间的增加而减小,即预测越来越准确。由传热学规律可知,距离当前时刻时间越长,对当前负荷的影响越小。但是相关时间为4 d($n=3$)和5 d($n=4$)时,表示以前时刻参数对当前负荷影响程度的权重系数不再呈递减的趋势,这是违背式(2)所示的传热规律的。因此可以确定这两次数据挖掘的结果失真,采用相关时间为3 d($n=2$)的结果进行预测。

$$t_{w,i,e} = 0.642 \ 9 t_{w,i} + 0.214 \ 3 t_{w,i-1} + 0.142 \ 9 t_{w,i-2} \tag{8}$$

$$Q_i = -11.192 \ 9 t_{w,i,e} + 201.998 \ 1 \tag{9}$$

供热负荷预测值和实际值的比较见图2。

表1 数据挖掘结果

当量室外空气温度相关时间 n	挖掘得到的方程	MSE
0	$t_{w,i,e} = t_{w,i}$ $Q_i = -10.887 \ 9 t_{w,i,e} + 204.335$	55.82
1	$t_{w,i,e} = 0.631 \ 6 t_{w,i} + 0.368 \ 4 t_{w,i-1}$ $Q_i = -11.080 \ 3 t_{w,i,e} + 202.977 \ 2$	54.56
2	$t_{w,i,e} = 0.642 \ 9 t_{w,i} + 0.214 \ 3 t_{w,i-1} + 0.142 \ 9 t_{w,i-2}$ $Q_i = -11.192 \ 9 t_{w,i,e} + 201.998 \ 1$	54.36
3	$t_{w,i,e} = 0.625 t_{w,i} + 0.125 t_{w,i-1} + 0.062 \ 5 t_{w,i-2} + 0.187 \ 5 t_{w,i-3}$ $Q_i = -11.380 \ 7 t_{w,i,e} + 200.595 \ 8$	53.83
4	$t_{w,i,e} = 0.556 t_{w,i} + 0.111 t_{w,i-1} + 0.056 t_{w,i-2} + 0.056 t_{w,i-3} + 0.222 t_{w,i-4}$ $Q_i = -11.577 \ 2 t_{w,i,e} + 199.477 \ 6$	52.61

从图2的负荷预测结果来看,预测负荷和实际负荷的总体趋势是一致的,供暖中期的预测误差较大,相对误差较小;而供暖初期和末期的预测误差较小,相对误差较大。这是由于供暖初期和末期的供暖热负荷较小,而供暖中期所需的热负荷较大。

该供热系统不是分户热计量系统,用户末端没有安装温控阀,不具备自调节能力。供热公司是根据用户的投诉电话进行调节的,而当供热过量导致室温过高时则很少有用户投诉,只能通过用户的开窗情况来判断。因此历史运行数据中包含大量不合理因素,而且这种热网运行方式目前国内很典型。

从图3中的数据可以看到,实际供热负荷分布较分散,在同一个当量室外空气温度下对应的供热

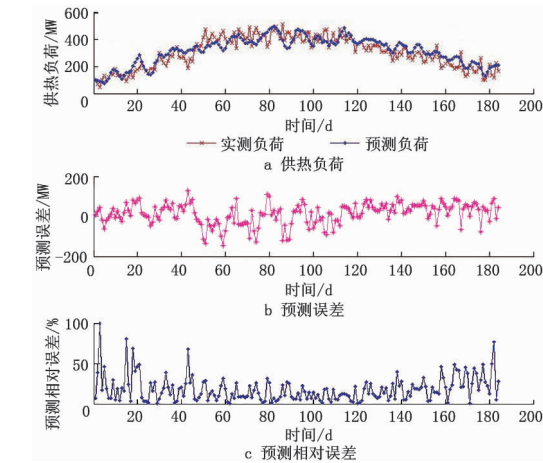


图2 供热负荷预测结果和误差

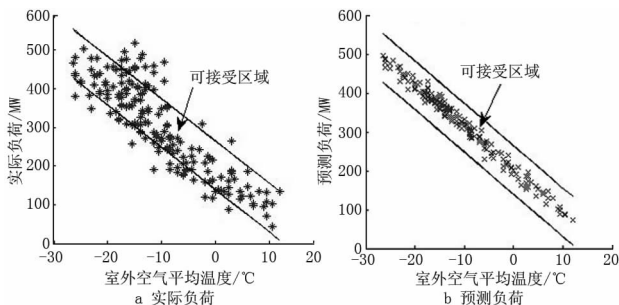


图3 负荷与室外空气平均温度的关系

负荷值波动范围大,这说明原始供热数据存在不合理因素。由于该供热系统具有热容量较大、滞后时间较长、用户无自调节能力等特点,预测结果的评估标准应为一个模糊的区间而不应是一条精确的供热负荷曲线。

如图3所示,在原始供热数据与室外空气平均温度的关系图上画出一个负荷预测的可接受区域,该区域包含了该热网大多数的实际工作点,而预测负荷的数据点则全部落在该区域内,说明预测结果是可接受的。此外,预测负荷分布的密集程度较高,比原始运行数据更合理。

2.2 调节方式的选择

热网的调节方式很多,包括质调节、分阶段改

$$\bar{Q} = \left(\frac{t_g - t_h}{t_g' - t_h'} \right)^{1+b} \frac{[\ln(t_g' - t_n) - \ln(t_h' - t_n)]^{1+b}}{[\ln(t_g - t_n) - \ln(t_h - t_n)]^{1+b}} = \bar{G} \frac{t_g - t_h}{t_g' - t_h'} \quad (11)$$

式中 t_g, t_h 分别为实际供、回水温度, $^{\circ}\text{C}$; b 为与散热器形式相关的系数,一般取 0.3; $\bar{G}$ 为相对流量。

根据式(11)结合质量综合调节策略得到的热网调节曲线见图4。

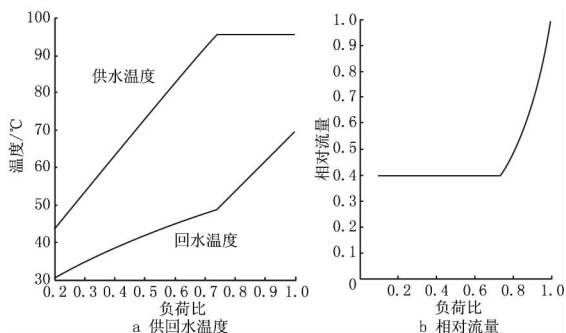


图4 质量综合调节的调节曲线

计算出负荷比之后,通过图4所示的调节曲线就可以对第2天的供热参数即供水温度、回水温度和流量进行预测。

变流量的质调节、等温差调节和量调节等。文献[10]通过分析量调节的特点,提出了修正的量调节方式,即在供暖中期负荷较大时采用量调节,在供暖初期和末期负荷较小时采用质调节,称为质量综合调节。该调节方式不仅可以最大程度地减少水泵的输送能耗,还能保证系统水力工况和热力工况的稳定。因此采用该方式作为供热系统的运行调节方式[10]。

由该地区的供暖室外计算温度,根据式(8), (9)可以得到热网在当地室外计算温度下的负荷 Q' ,如果已知热网的设计供、回水温度 t_g' 和 t_h' ,则可以计算出热网的设计流量 G' 。

如果要预测第2天的热负荷,就需要用到第2天的室外空气预测温度和前两天的实际室外空气平均温度,通过式(8)求出第2天的当量室外空气温度;再通过式(9)求出第2天的预测负荷 Q_p 。预测负荷 Q_p 与热网在当地室外计算温度下的负荷 Q' 之比即为负荷比 $\bar{Q}$:

$$\bar{Q} = \frac{Q_p}{Q'} \quad (10)$$

根据文献[9]可得出集中供热系统各参数满足的等式关系:

2.3 热源自动控制系统

热源的自动控制系统采用文献[11]提供的控制策略,热源的控制器根据预测得出的循环流量和供回水温度进行调节,图5给出了自动控制系统的方框图。

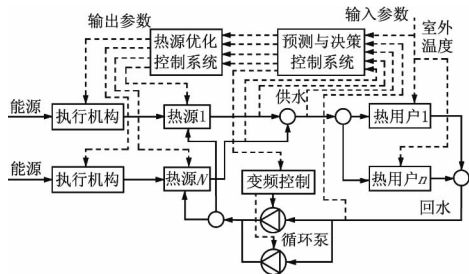


图5 热源循环水泵变速的自动控制系统方框图[11]

3 结论

本文在分析建筑热工过程特点的基础上采用了供热运行数据挖掘方法,该方法考虑到建筑物的热惰性,引入了当量室外空气温度的概念,找出当前供热负荷与之前几天的室外空气温度的

关系。将挖掘得到的关系式与热网调节公式结合,可以预测运行参数。结合某热力公司的运行数据,给出了该数据挖掘方法的应用过程。该方法与其他预测方法相比机理简单,更适合在实际工程中应用。

参考文献:

[1] Christiaanse W R. Short-term load forecasting using general exponential smoothing[J]. Power Apparatus and Systems, 1971, 90(2):900-911

[2] Thompson R P. Weather sensitive electric demand and energy analysis on a large geographically diverse power system: Application to short-term hourly electric demand forecasting [J]. Power Apparatus and Systems, 1976, 95(1):385-393

[3] Irissari G D, Widergren S E, Yehsakul P D. On-line load forecasting for energy control center application[J]. Power Apparatus and Systems, 1982, 101(1):71-78

[4] Toyoda J, Chen M S, Inoue P D. An application of state estimation to short-term load forecasting, Parts I: Forecasting modelling[J]. Power Apparatus and Systems, 1970, 89(7):1678-1682

[5] Toyoda J, Chen M S, Inoue P D. An application of state estimation to short-term load forecasting, Parts II: Implementation [J]. Power Apparatus and Systems, 1970, 89(7):1683-1688

[6] Kawashima M, Dorgan C E, Mitchell J W. Optimizing system control with load prediction by neural networks for an ice-storage system [G] // ASHRAE Trans, 1996,102(1):1169-1178

[7] 贺平,孙刚. 供热工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996

[8] 章熙民,任泽霈,梅飞鸣. 传热学[M]. 4 版. 北京:中国建筑工业出版社, 2001

[9] 刘靖. 供热系统的动态调节[J]. 建筑热能通风空调, 2000,19(3):47-63

[10] Jiang Yongcheng, Zheng Ruiyun. An appropriate heating control technology in variable flow rate central heating systems [C]//The 6th International Conference on Cold Climate. Greenland,2009

[11] 郑瑞芸,姜永成,王昭俊,等. 集中供热系统适量供热调节技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(12): 69-72

（上接第 21 页）

部分受访者感觉室内温度略低,说明地板送风的出风口距离人员较近,温度即使略有降低,也会造成人员的不适感。冬季室温比设计值偏高,受访者的主观感受好于夏季,说明人员对较高的送风温度不敏感。考虑到阅览室的人员基本处于静坐状态,在设计中略微提高设计温度,将会带来较为舒适的体感。

6.3 模拟数据显示风速随高度增加而递减,实测受周围家具、人员的影响,且测点并非位于末端装置正上方,风速大小与高度并无太大的联系。主观评价中,大多数受访者也无明显的吹风感。说明地台送风末端装置只要设计及布置合理,室内风速完全能满足阅览室的使用要求。

6.4 从客观测试和主观调研结果看,地板送风在提高室内空气品质方面效果较好。主要是因为地板送风直接把经过处理的空气送入人员活动区的缘故。在实测中,夏季室内含尘量高于冬季,分析原因,可能由于经过一个供暖季,空调箱过滤器存在破损,物业未及时更换,导致室内含尘量上升较

多。

6.5 通过合理布置机房及管道,做好消声措施,选用噪声低的地台送风末端装置,室内噪声值完全能达到室内使用者的要求,不会产生噪声污染。

6.6 受测试时间、测试环境等条件制约,测点的布置还不充分,没有测试 1.2 m 高度以上区域的参数,给这次测试留下遗憾。今后还希望能弥补这一遗憾,并增加过渡季全新风运行时的客观测试和主观调查。

参考文献:

[1] 中国建筑西北设计研究院. JGJ 38—99 图书馆建筑设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1999

[2] 万嘉凤,左涛,吴国华,等. 一大型图书馆工程暖通空调设计[J]. 暖通空调,2008,38(6):26-30

[3] 连之伟,马仁民. 下送风空调原理与设计[M]. 上海:上海交通大学出版社,2006

[4] 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所. GB/T 18883—2002 室内空气质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2003