

# 供热系统热负荷预测分析及应用

王少驰, 刘玉侠, 马东亮, 李爽

(北京硕人时代科技股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:**针对供热系统热负荷预测, 供热运行阶段的优化运行, 科学地调度或调控热源等问题, 从理论角度对热负荷预测模型的基本形式以及输入变量的形式做了分析, 并利用数据统计分析的方法, 研究了引入不同输入变量的情况下输入变量与换热站(环路)热负荷之间的关系。结果显示, 按稳态的热力工况考虑时, 预测模型的精度要低于按动态的热力工况考虑的预测模型, 而且按动态的热力工况的预测模型精度与引进变量的历史天数有关。在分析的基础上确立了热负荷预测模型, 并论证了一网平衡的策略按热量平衡是热负荷预测在供热运行中得以发挥作用的必要条件。对热负荷预测在实际运行中的应用效果进行了分析, 结果显示, 按动态热负荷预测模型进行热源调度(调控), 在实际运行中无论是整个集中供热系统还是单个换热站(环路)目标室温偏差都能控制在合理范围之内。同一个集中供热系统中的不同换热站(环路)的实际室温与目标室温偏差呈现出相同趋势, 且偏差在合理范围内。与之前相比, 按热负荷预测结果进行调控的节能率可达到 5.84%。

**关键词:**热负荷预测; 动态; 室温; 历史参数; 热量平衡

DOI 编码: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2023.02.019

## 1 概述

供热系统的热负荷是指在某一室外温度下, 为了达到要求的室内温度, 供暖系统在单位时间内供给建筑物的热量。热负荷是城镇集中供热系统设计和运行的重要依据。热负荷的预测就是以热负荷、气象参数的历史数据为基础, 利用科学的方法对未来的热负荷进行预测。因此将热负荷预测定义为: 在系统(建筑物)现有的热力工况下, 为保证在未来一段时间内的气象条件下, 建筑物室内温度达到目标温度的需热量(或热源所提供的供热量)。供热部门根据预测结果对热负荷进行调整, 以达到改善供热效果和节能降耗的目的。

采暖热负荷一般采用面积(体积)热指标

进行估算, 主要考虑热指标、室内温度和室外温度。除了以上因素外, 热负荷还受到其他多种因素影响, 在设计供热系统时, 这些影响因素可以以系数的形式纳入进去, 但是在实际运行时, 系统并非处于稳态过程, 为了保证供热室温的稳定(室温波动范围可控), 有些因素需要在实际中充分考虑, 不能忽略。由于供热系统设备和建筑物有很大的热惰性, 室外温度、日照、供热量等参数的变化对用户室温的影响并不是即时的, 而是会滞后一段时间, 因此, 为了保证用户室温的设计要求, 热源当天的供热量不但与当天的室外温度、供热量、日照、风速有关, 而且应该与前几天的上述参数有关<sup>[1]</sup>。

本文重点对采用动态负荷预测进行热负

荷预测的必要性进行理论分析,并通过实际历史数据,对比按稳态过程热负荷预测模型和动态热负荷预测模型的精度,从而确定最佳的预测模型。重点探讨引入参数的形式和引入室温的必要性,并进一步明确热负荷预测应用的必要条件,阐明热量平衡模式和热负荷预测是一个整体,热负荷预测是基础,热量平衡模式是使热负荷预测达到最佳效果的必要条件。

## 2 热负荷预测的理论分析

在某一供热周期内,根据能量守恒定律,在  $\Delta t$  时间段内进入建筑物的热量等于该时间段内室内热负荷和蓄热体的蓄热量之和,即:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_1+\Delta\tau} Qd\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_1+\Delta\tau} q_f F(t_n - t_{wz})d\tau + \int_{t_1}^{t_2} cMdt \quad (1)$$

式中:  $Q$ —建筑物的供热热负荷, kW;

$F$ —建筑物供热面积,  $m^2$ ;

$q_f$ —建筑物的面积供暖热指标,  $W/m^2$ ;

$c$ —蓄热体平均比热容,  $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ;

$M$ —蓄热体质量, kg;

$t_n$ —室内温度,  $^\circ C$ ;

$t_{wz}$ —考虑了风速和日照强度的室外综合温度,  $^\circ C$ ;

$\Delta\tau$ —某一供热周期的时长, s;

$\tau_1$ — $\tau_1$  时间段的初始时刻, s;

$t_1$ — $\tau_1$  时刻的蓄热体平均温度,  $^\circ C$ ;

$t_2$ — $\tau_1 + \Delta\tau$  时刻的蓄热体平均温度,  $^\circ C$ 。

在  $\Delta\tau$  时间段内,  $Q, t_n, t_{wz}$  均取时间积分平均值则有:

$$\bar{Q}\Delta\tau = q_f F(\bar{t}_n - \bar{t}_{wz})\Delta\tau + cM(t_2 - t_1) \quad (2)$$

方程两边同除以  $F\Delta\tau$  得到如下结果:

$$\bar{q} = \frac{\bar{Q}}{F\Delta\tau} = q_f(\bar{t}_n - \bar{t}_{wz}) + cm(t_2 - t_1) \quad (3)$$

式中:  $\bar{Q}$ —建筑物  $\Delta\tau$  时间段内的平均热负荷, kW;

$\bar{q}$ — $\Delta\tau$  时间段内的平均热指标,  $W/m^2$ ;

$m$ —单位面积的蓄热体质量,  $kg/m^2$ ;

$\bar{t}_n$ — $\Delta\tau$  时间段内的平均室温,  $^\circ C$ ;

$\bar{t}_{wz}$ — $\Delta\tau$  时间段内的平均综合外温,  $^\circ C$ 。

实际热负荷预测时采用平均热指标预测,主要是考虑在供暖期内,供热系统的供热面积  $F$  可能是变化的,如果将其当成定值会造成预测值出现误差。

通过以上的分析可以知道,热负荷预测的方法可以分为以下两类。

按稳态的热力工况进行热负荷预测的概算指标法,见式(4):

$$cm(t_2 - t_1) = 0$$

$$\bar{q} = \frac{\bar{Q}}{F\Delta\tau} = q_f(\bar{t}_n - \bar{t}_{wz}) \quad (4)$$

式中:  $\bar{q}$ —室内温度、室外综合温度(考虑了风速和日照强度)的函数,如果忽略风速和日照的影响,则是室内温度、室外温度的函数。这也就是传统意义上热负荷预测的概算热指标法。

按动态的热力工况进行热负荷预测的动态预测法,见式(5):

$$\bar{q} = \frac{\bar{Q}}{F\Delta\tau} = q_f(\bar{t}_n - \bar{t}_{wz}) + cm(t_2 - t_1) \quad (5)$$

从以上公式可知,如果  $cm(t_2 - t_1) \neq 0$  则  $\bar{q}$  不仅是  $\tau_1$  至  $\tau_1 + \Delta\tau$  时刻室内平均温度、室外综合平均温度的函数,同时也和  $\tau_1$  时刻的  $t_1$  和  $\tau_1 + \Delta\tau$  时刻的  $t_2$  相关。

从 0 时刻到  $\tau_1$  时刻建立热平衡方程:

$$\int_0^{\tau_1} Qd\tau = \int_0^{\tau_1} q_f F(t_n - t_{wz})d\tau + \int_{t_0}^{t_1} cMdt \quad (6)$$

从以上公式可知,  $t_1$  是 0— $\tau_1$  时刻平均热负荷、室内平均温度、室外综合平均温度和 0 时刻蓄热体平均温度的函数。同理,  $t_2$  是 0— $\tau_2$  时刻平均热负荷、室内平均温度、室外综合平均温度和 0 时刻蓄热体平均温度的函数。

由此可以得出,  $\bar{q}$  不仅是  $\tau_1$  至  $\tau_1 + \Delta\tau$  室内平均温度、室外综合温度的函数,同时也和 0 至  $\tau_1$  时刻的平均热负荷、室内平均温度、室外综合

平均温度和 0 时刻蓄热体平均温度的函数。

实际应用中,预测一天的热指标(供热负荷)的情况较多,引入的变量则包括预测当天的目标室温、气象参数(室外平均温度、预报天气情况、预报风速、历史供热热指标、历史实际室温、历史室外平均温度、历史天气情况和历史风速),采用的历史区间段可以是一天、两天或者更多天数,根据数据统计分析的结果以及要求达到的精度,最终确定采用多少天的历史数据。

### 3 热负荷预测中引入输入变量的形式及数值化

#### 3.1 室内温度

采集供热系统的室温并按照  $3\sigma$  原则筛选数据,采用有效数据的 24 h 平均室温作为历史室温。当日目标室温可根据供热需求及二次供热系统的平衡情况确定。

#### 3.2 室外温度

历史室外温度采用 24 h 平均温度,热负荷预测当天室外温度采用预报室外平均气温。

#### 3.3 日照强度

水平面太阳能日总辐射量、日照时数与天气情况存在一定关系<sup>[2]</sup>,对每种天气状况对应的水平面太阳能总辐射与平均日照时数取平均值,得到表 1。

表 1 太阳辐射及日照百分率与天气情况的关系

天气情况	总天数	水平面平均太阳总辐射/MJ · d <sup>-1</sup>	日照百分率	占供暖期比例/%
晴	78	10.79	0.86	43
晴~阴	4	10.38	0.82	2
多云~晴	5	9.81	0.65	3
多云~阴	5	9.63	0.68	3
晴~多云	9	9.62	0.62	5
多云	22	9.61	0.61	12
多云~小雪	4	8.53	0.54	2
霾~晴	5	7.43	0.52	3
霾	9	6.99	0.51	5
多云~霾	4	6.86	0.5	2
阴~雨夹雪	4	6.8	0.48	2
阴~晴	5	6.76	0.48	3
阴~小雪	7	6.66	0.45	4
雨夹雪~阴	2	6.34	0.43	1
霾~多云	4	5.49	0.26	2
小雪	2	5.45	0.19	1
霾~阴	5	4.19	0.14	3
阴	4	3.32	0.12	2
雨夹雪	2	2.28	0.09	1
阴~多云	2	1.08	0	1

实际应用中,采用不同天气情况的水平面平均太阳总辐射作为日照强度的数字化因子,这样可以将天气情况量化为一个日照强度的度量变量,作为输入变量引入热负荷预测的模型中进行统计分析。

### 3.4 风速

根据历史天气情况,将风力等级转化为风速,作为输入变量引入热负荷预测的模型中进行统计分析。对应关系见表2。

表2 风力等级与风速的关系

风力等级	风速范围/m·s <sup>-1</sup>	风速/m·s <sup>-1</sup>
0	0~0.2	0.1
1	0.3~1.5	0.9
2	1.6~3.3	2.45
3	3.4~5.4	4.4
4	5.5~7.9	6.7
5	8.0~10.7	9.35
6	10.8~13.8	12.3
7	13.9~17.1	15.5
8	17.2~20.7	18.95
9	20.8~24.4	22.6
10	20.5~28.4	24.45

## 4 引入不同输入变量预测模型的对比

本文选择预测当日平均热指标作为唯一的输出变量,当引入不同的输入变量时,则有不同的预测模型,例如,当输入变量为目标室温 $\bar{t}_n$ 、室外平均温度 $\bar{t}_w$ 、当日平均日照强度 $s$ 和当日风速 $w$ 时,基本表达式为:

$$\bar{q} = f(\bar{t}_n, \bar{t}_w, s, w) \quad (7)$$

本文选取了河北省承德市某集中供热系统的换热站2021年11月15日至2022年3月31日的历史数据作为数据样本,并利用SPSS统计分析软件对数据样本进行多元线性回归分析,根据不同的输入变量可以得到不同的多元回归预测模型。当引入输入变量为目标室温 $\bar{t}_n$ 、室外平均温度 $\bar{t}_w$ 、当日平均日照强度 $s$ 和当日风速 $w$ 时,表示为:

$$\bar{q} = A + B\bar{t}_n + C\bar{t}_w + Ds + Ew \quad (8)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ —常数项。

### 4.1 引入变量分类

按不同输入变量将预测模型进行分类,共三大类,15种。

第一类输入变量为预测当日室温和气象参数,包括3种:

(1)输入变量:预测当日室外平均温度;

(2)输入变量:预测当日室温、当日室外平均温度;

(3)输入变量:预测当日室温、当日室外平均温度、当日风速、当日日照。

第二类输入变量为预测当日室温、气象参数和历史热指标,包括6种:

(4)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、日照、风速和当日前1天热指标;

(5)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、日照、风速和当日前2天每天的热指标;

(6)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、日照、风速和当日前3天每天的热指标;

(7)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、日照、风速和当日前4天每天的热指标;

(8)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、日照、风速和当日前5天每天的热指标;

(9)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、日照、风速和当日前6天每天的热指标。

第三类输入变量为当日室内温度和气象参数及历史热指标、历史室内温度和历史气象参数,包括6种:

(10)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、日照、风速和当日前1天热指标、室内平均温度、室外平均温度、日照、风速;

(11)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、风速、日照和当日前2天每天的热指标、室内平均温度、室外平均温度、日照、风速;

(12)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、日照、风速和当日前3天每天的热指标、室内平均温度、室外平均温度、日照、风速;

(13)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、日照、风速和当日前4天每天的热指标、室内平均温度、室外平均温度、日照、风速;

(14)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、日照、风速和当日前 5 天每天的热指标、室内平均温度、室外平均温度、日照、风速;

(15)输入变量:预测当日室温、室外平均温度、日照、风速和当日前 6 天每天的热指标、室内平均温度、室外平均温度、日照、风速。

4.2 不同模型对比

为了评价预测模型的预测精度,引入两个评价指标<sup>[1]</sup>,其中  $R^2$ (可决系数,是度量拟合优度的统计量)的值越接近 1,说明回归直线对观测值的拟合程度越好;反之, $R^2$  的值越小,说明回归直线对观测值的拟合程度越差。MAPE(平均绝对百分比误差)用来预测值偏离观测值的程度,MAPE 的值越接近 0,说明

模型精度越高。

4.2.1 引入输入变量为预测当日室温和气象参数模型对比

引入预测当日室温和气象参数,得到 3 种负荷预测模型以及不同模型的评价指标,随着引入参数的增加,预测模型的精度逐步提高,如图 1 所示。

4.2.2 引入输入变量为预测当日室温和气象参数及历史热指标模型对比

引入预测当日室温和气象参数及历史热指标,得到 6 种负荷预测数学模型以及不同模型的评价指标,随着引入历史热指标数量的增加,模型精度整体呈现逐步提高的趋势,引入预测当天前 4 天的热指标时精度最高,如图 2 所示。

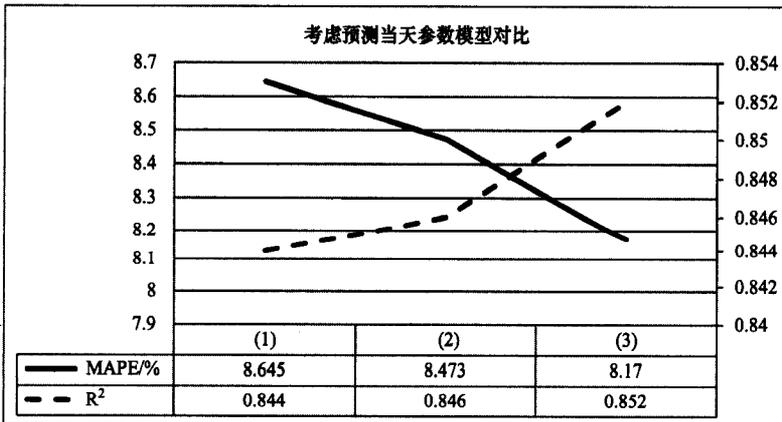


图 1 考虑预测当天室温及气象参数模型的评价指标对比

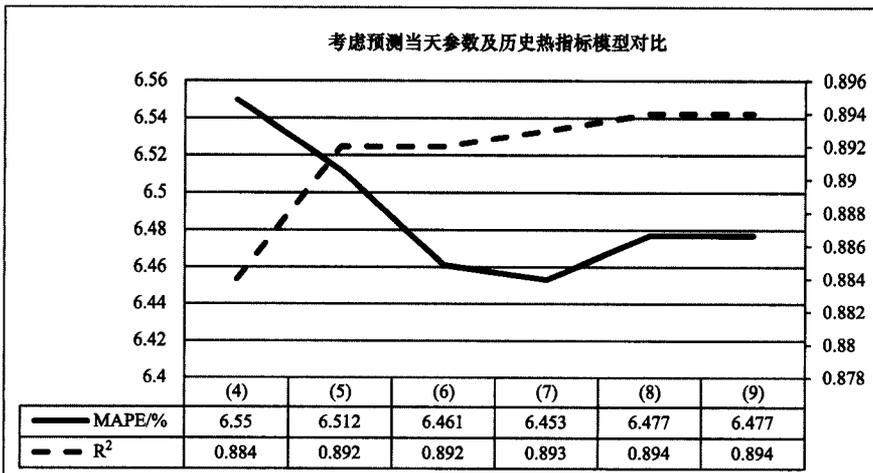


图 2 考虑预测当天室温和气象参数和历史热指标模型的评价指标对比

### 4.2.3 引入输入变量为预测当日室温和气象参数及历史热指标、室内温度和气象参数模型对比

引入预测当日室温和气象参数及历史热指标和历史室温和气象参数,得到 6 种负荷

预测模型以及不同模型的评价指标,随着引入历史气象参数、历史热指标数量的增加,模型精度整体呈现逐步提高的趋势,引入预测当天前 5 天的历史参数时精度最高,如图 3 所示。

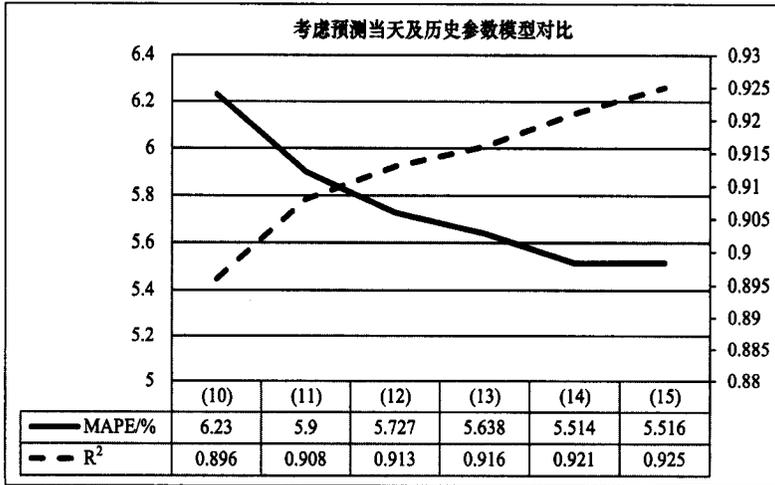


图 3 考虑预测当天室温和气象参数和历史热指标、室温、气象参数模型的评价指标对比

通过以上的统计分析结果可以看出,预测模型的精度基本上随着引入参数数量的增加而提高,但是,并非引入参数越多,精度越高。按稳态过程考虑的预测模型应该引入室内温度。引入历史参数的两类动态热负荷预测模型,当仅引入历史供热量时,预测精度要低于引入历史供热量和历史室温、历史室外温度、历史天气(日照)、历史风速的预测模型。当引入历史供热量时,引入供热量的天数以引入预测当天前 4 天的历史供热量预测模型精度最高。引入历史供热量和历史室温、历史室外温度、历史天气(日照)、历史风速时,以引入预测当天前 5 天的历史供热量、历史室温、历史室外温度、历史天气(日照)、历史风速预测模型精度最高。

## 5 热负荷预测模型的建立

### 5.1 引入室温的必要性

有些情况下,热负荷预测的引入变量不容易获取,比如室内温度没有采集则获取不到。下面简要分析引入变量缺少室内温度时,对热负荷预测结果的影响。

为了简化分析过程,本文按稳态过程考虑,忽略风力和日照的影响,通过数据分析可以得到以下两个不同的方程。

当仅引入室外温度时,得到公式(9):

$$q = A - Bt_w \quad (9)$$

当引入室内温度和室外温度时,得到公式(10):

$$q = C(t_n - t_w) \quad (10)$$

以上两式相减得到:

$$A - Bt_w = C(t_n - t_w)$$

$$t_n = \frac{A}{C} - \left(\frac{B}{C} - 1\right)t_w \quad (11)$$

当  $t_w = 0$  时,  $t_n = \frac{A}{C}$

以承德热力集团供热公司碧峰一号站的实际历史数据进行统计分析,首先通过数据分析得到如下两个方程:

$$q = 14.953 - 0.756t_w$$

$$q = 0.734(t_n - t_w)$$

两式相减得到:

$$t_n = \frac{14.953}{0.734} + \left(1 - \frac{0.756}{0.734}\right)t_w$$

以上公式中,  $\frac{A}{C} = 20.4$  为分析数据中的室温均值, 将引入室内温度和室外温度的模型和仅引入室外温度的模型相比较, 理想情况下, 数据分析得到的系数  $B$  和  $C$  相等, 之所以存在一定偏差, 是因为实际运行调节时, 不同室外温度下并未按照同样的室温标准供给热量, 当室外温度为  $0^{\circ}\text{C}$  时, 室温标准为  $20.4^{\circ}\text{C}$ , 室外温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  时, 室温标准高于  $20.4^{\circ}\text{C}$ , 室外温度高于  $0^{\circ}\text{C}$  时, 室温标准低于  $20.4^{\circ}\text{C}$ 。令  $D = \frac{B}{C} - 1$ , 可以作为评价供热调节合理性的一个指标, 理想值为 0。

实际分析中得到的  $B$  和  $C$  通常十分接近,  $\frac{A}{C} \approx \frac{A}{B}$ , 所以即便无法获得实际室温, 也可以通过  $q = A - Bt_w$  得到的系数获得一个偏差很小的平均室温  $\frac{A}{C}$  或  $\frac{A}{B}$ , 作为评价供热标准合理性的一个指标。

以上分析说明, 如果不引入室内温度, 实际得到的预测值为原有的供热调节习惯所获得的分析结果。以此作为热负荷预测的模型, 会造成不同室外温度下室温标准的不同, 因此在条件具备的情况下, 热负荷预测中应该引入室内温度。

### 5.2 热负荷模型的型式

根据以上分析, 选择当日平均热指标  $\bar{q}$  作为唯一的预测值, 选择室内平均温度  $\bar{t}_n$ 、室外平均温度  $\bar{t}_w$ 、当日平均日照强度  $s$  和当日风速  $w$  及历史实际热指标  $\bar{q}_{ls}$ 、室内平均温度  $\bar{t}_n^{ls}$ 、室外平均温度  $\bar{t}_w^{ls}$ 、历史平均日照强度  $s_{ls}$  和历史风速  $w_{ls}$  作为引入变量, 基本表达式为:

$$\bar{q} = f(t_n, t_w, s, w, \bar{q}_{ls}, \bar{t}_n^{ls}, \bar{t}_w^{ls}, s_{ls}, w_{ls}) \quad (12)$$

将  $\bar{q}$  折算为供暖室外设计温度下的热指标  $\bar{q}^{\rightarrow}$ , 作为当日的供热综合热指标, 并将其表达为综合热指标:

$$\bar{q}^{\rightarrow} = q_{jc} - \Delta q_s - \Delta q_w - \Delta q_{ls} - \Delta q_d \quad (13)$$

式中:  $\bar{q}^{\rightarrow}$ —综合热指标, 折算到设计工况下的供热热指标,  $\text{W/m}^2$ ;

$q_{jc}$ —考虑室内外温差的基础热指标, 对应于引入变量中的当日目标平均室温和当日平均外温,  $\text{W/m}^2$ ;

$\Delta q_s$ —考虑平均日照强度的热指标修正值, 对应于当日预报天气情况,  $\text{W/m}^2$ ;

$\Delta q_w$ —考虑风速的热指标修正值, 对应于当日预报风力等级,  $\text{W/m}^2$ ;

$\Delta q_{ls}$ —考虑历史供热情况的修正值, 将其定义为历史完成率修正值, 对应于历史实际供热量和计划供热量,  $\text{W/m}^2$ ;

$\Delta q_d$ —考虑供热中建筑物内部得热量的修正值,  $\text{W/m}^3$ , 由于内部的热量是一个常数, 在折算为设计工况时会随着当日室外温度的不同而变化。

## 6 热负荷预测的应用范围及条件

热负荷预测主要应用于供热系统运行阶段, 通过预测热负荷的预测, 从而调整热源的供热量和换热站(环路)的分配热量, 实现供热系统的供需平衡。

热负荷预测一般是指对未来一天的供热负荷预测, 其目的是通过预测未来一天的热负荷, 及时调整热源, 使系统在达到目标室温的情况下, 运行得更加高效节能。主要包括集中供热系统热源的热负荷预测和换热站(环路)的热负荷预测。

6.1 对热源进行热负荷预测并加以调度或调控  
 热源的热负荷预测可以将包括多个换热站的集中供热系统按一个整体进行预测, 也可以按换热站分别预测加和并考虑管网热损失后计算得出。

对于热源无法自主调控的集中供热系统(电厂集中供热), 可在热负荷预测的基础上对热源进行调度, 对于热源可自主调控的集中供热系统(区域锅炉房集中供热)则可根据热负荷预测值对热源进行调控。

6.2 对换热站进行热负荷预测和调控  
 在热负荷预测的基础上, 热源的供热量

正常地输送到供热系统末端的前提是,供热系统的末端需热量与供热量相匹配,也可以理解为“网随源动”。换热站的调控方式则需要根据供热量来调整。

显然,传统意义上的气候补偿和固定供温、供回水平均温度调节的模式很难和供热量做到精准匹配。采用电动阀固定阀位也可以达到目的,但是对于大中型的集中供热系统而言,固定阀位很难做到水力平衡,即便达到比较理想的水力平衡状态,对于热源一次网质调节的供热系统也会由于热源供水温度的变化造成热力失调,所以固定阀位的平衡方式只适用于小型供热系统。对于大中型供热系统,一网质量调节或者分阶段改变流量质调节可减少流量、提高供温,但由于管网输送的滞后性,在变流量初始阶段,换热站的水温并没有变化,热网的供热能力实际是降低的,造成的后果是前端换热站会出现抢水的情况,使得末端供热量严重不足,一网失调明显加剧。此时,一网的平衡需要以当前流量下的热网供热能力为基础进行调节控制。所以热负荷预测若要得到良好的应用效果,需要以一次网热量平衡的方式进行调控。因此,本文提出对供热系统以供热进度一致的原则进行热量平衡调控。通过推导,供热进度和室温存在如下关系:

$$\frac{\bar{t}_n^s - \bar{t}_w}{t_n^m - \bar{t}_w} = \frac{Q_s}{Q_j} = \frac{xQ_j}{Q_j} = x$$

$$\bar{t}_n^s = xt_n^m - x\bar{t}_w + \bar{t}_w \quad (14)$$

式中: $\bar{t}_n^s$ —实际室内平均温度,℃;

$\bar{t}_w$ —实际室外平均温度,℃;

$t_n^m$ —目标室内平均温度,℃;

$x$ —当前供热进度,%;

$Q_s$ —前实际供热量,GJ;

$Q_j$ —前计划供热量,GJ;

通过式(14)可以看出,当室外温度和目标温度相同时,只要供热进度相同,其实际室温则相同。这说明按供热进度一致的原则进行换热站供热量调控,理论上可以实现室温平衡。热量平衡适用于变流量系统,不再依赖于水温调节曲线指导运行。

### 7 热负荷预测在供热运行中的应用效果分析

供热运行中的热负荷预测是热负荷预测的核心内容,是保证供热质量同时实现节能高效运行的基础。热负荷预测在供热运行中的运用及效果主要体现在以下3个环节。

#### 7.1 热负荷预测及日计划的创建、提交、审核、核定、批准及执行

系统根据预测当日室温和气象参数及历史热指标、室内温度和气象参数预测每个换热站(环路)的次日理论供热量,并根据管网热损失计算出此次热源的理论供热量,系统平台操作人员据此创建次日供热计划,并通过提交、审核、核定、批准等环节最终得以执行。公司日计划如图4所示,换热站(环路)如图5所示。

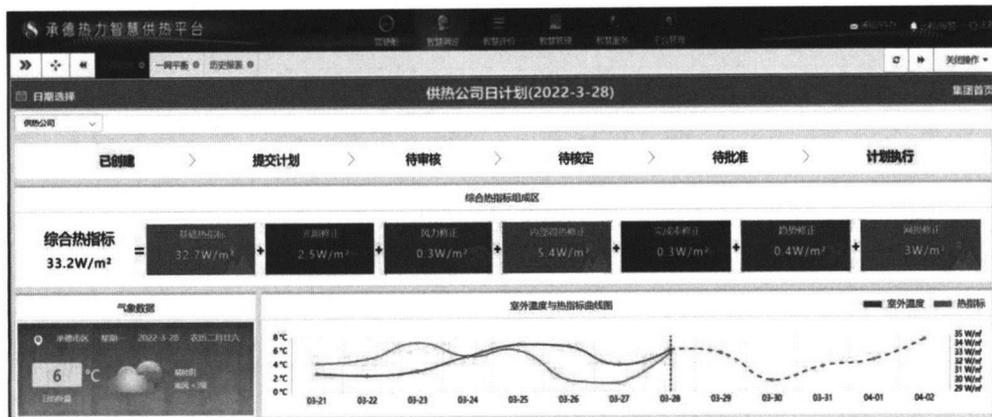


图4 公司日计划

供热公司日计划(2022-3-28)												集团首页															
热网合计												33.2	775.63	18615.12	7951.40	42.7%											
管网热损失												3.0	63.17	1516.08	1219.9	15.3%											
热力站合计												15384344	15655731	19.9	20.1	33.1	32.7	2.5	0.3	-5.4	-0.3	0.4	30.2	712.46	17099.04	6731.50	39.4%
序号	换热站	环路	供热面积 (m²)	运行面积 (m²)	投运率 (%)	昨日室温 (°C)	目标室温 (°C)	建议基础指标 (W/m²)	基础站指标 (W/m²)	光照修正 (W/m²)	风力修正 (W/m²)	内部得热修正 (W/m²)	完成率修正 (W/m²)	趋势修正 (W/m²)	综合站指标 (W/m²)	计划热量 (GJ/h)	日计划热量 (GJ)	日实际热量 (GJ)	完成率 (%)								
1	碧峰1号站	高环	68493.95	68493.9	20.6	20.8	24.9	24.9	1.8	0.2	-4.9	-0.7	0.3	21.6	2.35	56.4	23.51	41.7									
2	碧峰2号站	高环	83900.39	82988.3	20.8	20.8	24.8	24.8	1.8	0.2	-4.9	-0.5	0.1	21.5	2.79	66.96	27.52	41.1									
3	碧峰2号站	低环	43449.66	44191.9	19.6	19.6	27.4	27.4	2.2	0.3	-5.7	-0.4	0	23.8	1.51	36.24	14.68	40.5									
4	康乐站	高环	53387.08	53387.9	19.9	20.6	38.8	38.8	2.9	0.4	-5	-0.3	1.6	36.4	3.17	76.08	30.67	40.3									
5	康乐站	高环	73977.19	73933.6	20.7	21.6	35.3	35.3	2.5	0.3	-4.5	-0.2	0.9	34.3	4.19	100.56	40.9	40.7									

图5 换热站(环路)日计划

7.2 计划值赋值给全网平衡模块,换热站(环路)并按热量进度一致原则进行一网平衡调控

负荷预测模块的计划值包括热源计划值和换热站(环路的)计划值,其中热源计划值

用于热源调度,换热站(环路)计划值作为一网平衡热量平衡调控的基础数据,参与供热系统一网热量平衡调控的计算。供热系统热网平衡调控情况如图6所示,换热站(环路)供热进度如图7所示。

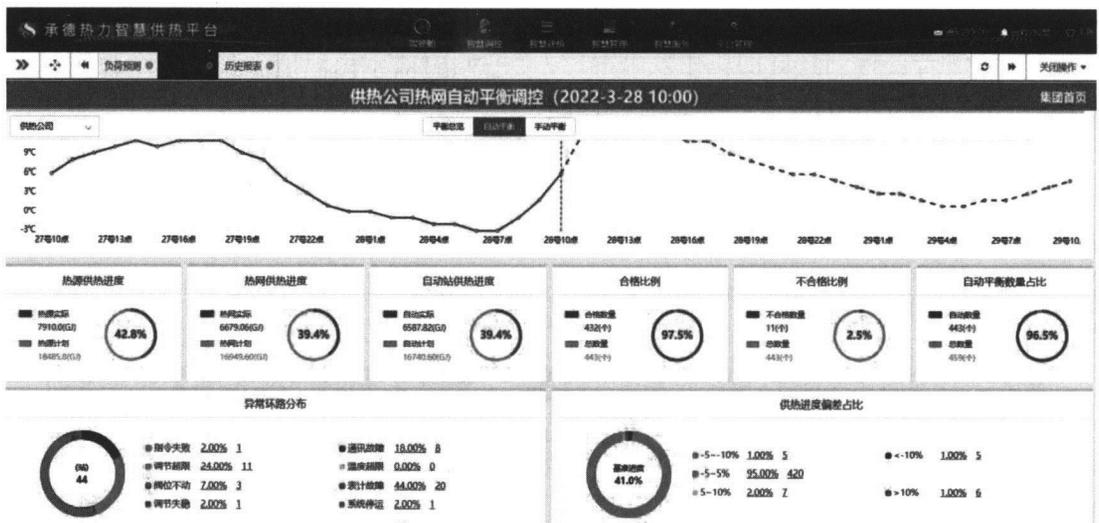


图6 供热系统热网平衡调控情况

7.3 计划执行后运行效果

7.3.1 整个集中供热系统运行效果

对承德热力集团供热公司供热系统(供热面积 1 530.75 m<sup>2</sup>)的实际运行数据做统计分析,供热系统整体运行效果如图8、图9

所示。

由图8可知,计划完成率每天控制在95%~103%之间,热源供热量控制在允许误差±5%范围内。整体计划完成率99.92%,热量调控误差仅为0.08%。



图7 换热站(环路)供热进度

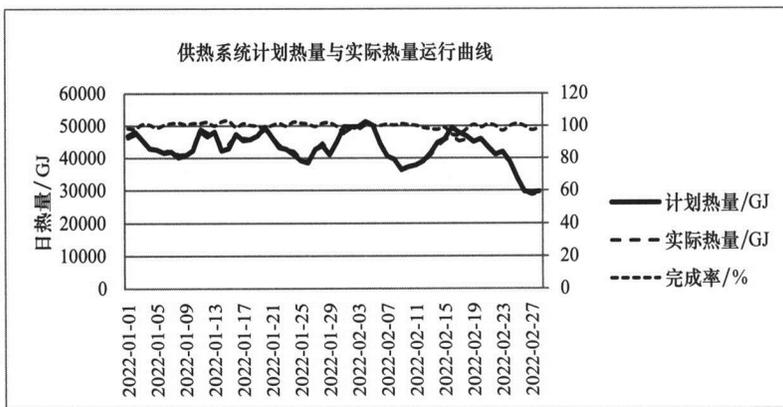


图8 供热系统计划热量与实际热量运行曲线(2022年1月1日—2月28日)

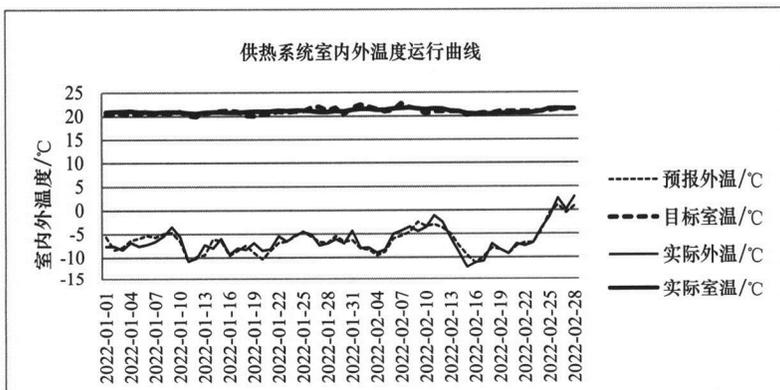


图9 供热系统室内外温度运行曲线(2022年1月1日—2月28日)

由图9可知,计划完成率在95%~103%之间,日室温偏差最大值1℃,实际室温平均值21.05℃,目标室温平均值20.95℃,偏差0.1℃。

### 7.3.2 换热站(环路)运行效果

对承德热力集团供热公司供热系统碧峰一号换热站历史数据进行统计,换热站运行效果如图10、图11所示。

由图 10 可知,日计划完成率每天控制在 90%~113%之间,供热量控制在允许误差±10%范围内。整体时间段内计划完成率 99.3%,热量调控误差为 0.7%。

由图 11 可知,日计划完成率在 90%~113%之间,日室温偏差最大值 1.1℃,实际室温平均值 20.756℃和目标室温平均值 20.758℃偏差为 0.002℃。这说明时间段拉长后实际

室温和目标室温基本无偏差,整体上的室温控制达到了目标要求。

(3)换热站(环路)间对比(平衡情况)

如图 12 所示,选取 2022 年 1 月 1 日供热公司集中供热系统中面积最大的 19 个换热站室温进行横向对比,其中两个自管站没有室温数据。换热站(环路)实际室温与目标室温最大偏差在中兴路站,为 1.4℃。各站平均

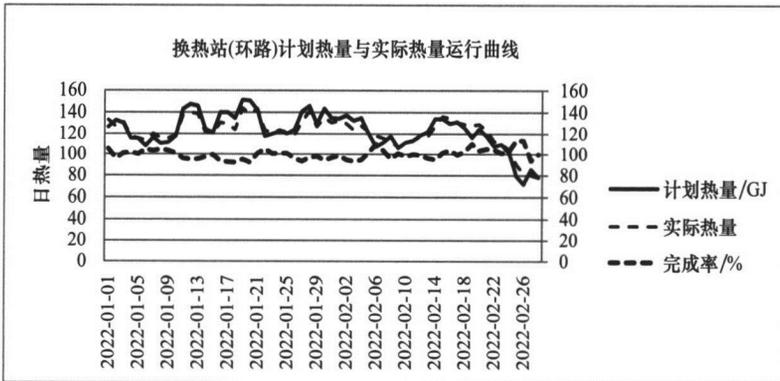


图 10 换热站(环路)计划热量与实际热量运行曲线(2022 年 1 月 1 日—2 月 28 日)

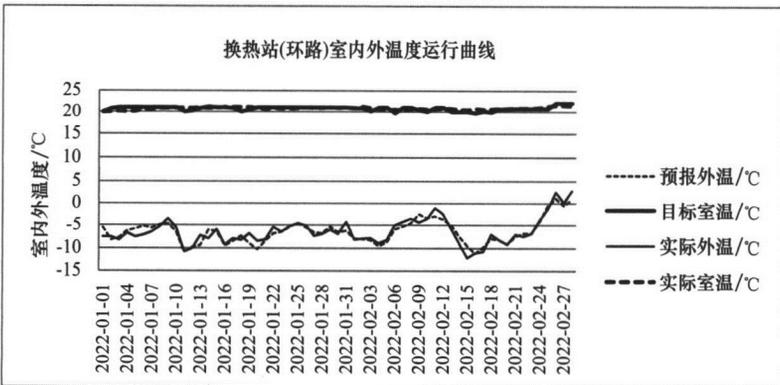


图 11 换热站(环路)室内外温度运行曲线(2022 年 1 月 1 日—2 月 28 日)

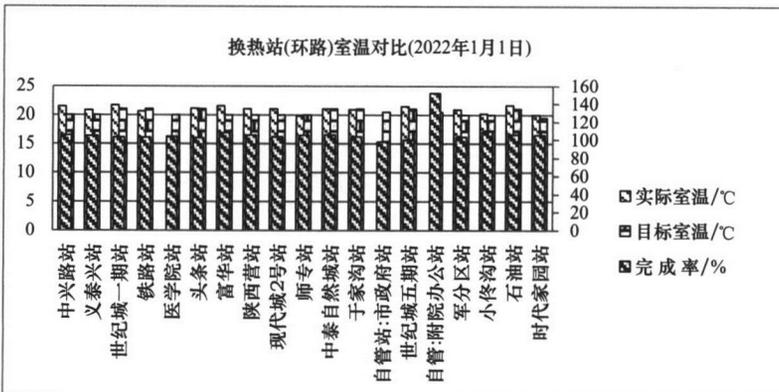


图 12 换热站(环路)室温对比

实际室温 20.9℃, 平均目标室温 20.4℃, 平均偏差 0.5℃, 整体上达到了控温效果。

#### (4) 热负荷预测使用前后能耗对比

对承德热力集团供热公司供热系统的实际运行数据进行统计, 负荷预测应用前后的能耗数据对比见表 3 和图 13。

表 3 历史平米单耗统计

年度	供热面积 / 万平方米	室外平均温度 /℃	平米单耗 / $\text{GJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	实际节能率 /%	折算平米单耗 / $\text{GJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	折算节能率 /%
2018—2019	1 441.71	-3.99	0.303	0.000	0.303	0
2019—2020	1 504.55	-2.6	0.267	11.88	0.285	5.94
2020—2021	1 476.68	-2.89	0.272	10.23	0.286	5.50
2021—2022	1 530.75	-2.63	0.267	11.88	0.285	6.07

备注: 供热量为折算到北京标准采暖天数 121 天的完成数, 折算单耗为折算到 2018—2019 同一室外温度的平米单耗。

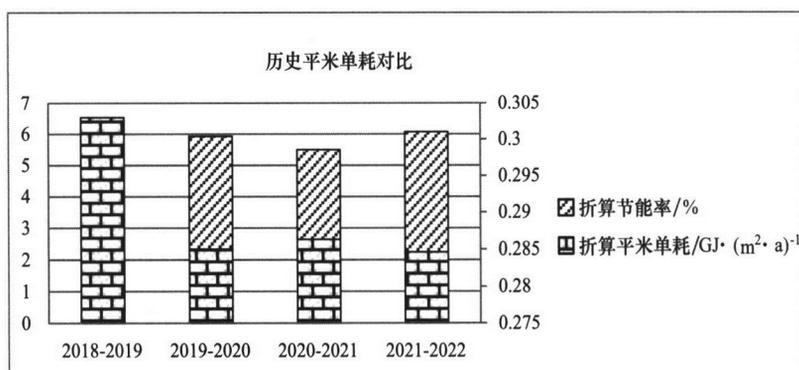


图 13 负荷预测应用前后能耗对比

由图 13 可知, 2018—2019 采暖季为传统运行调控模式, 其后 3 个年度采用了热负荷预测及全网热量平衡模式, 较 2018—2019 采暖季的节能率分别为 5.94%、5.50% 和 6.07%, 平均为 5.84%。

## 8 结论

(1) 供热系统的热负荷预测应采用动态热负荷预测, 按稳态过程考虑的热负荷预测精度比动态热负荷预测低。

(2) 具备引入室内温度的条件时, 热负荷预测模型中应引入室内温度, 不引入室内温度的热负荷预测模型会比引入室内温度的预测模型精度低。

(3) 引入历史参数时不仅要引入历史供热量, 还要引入历史室温、历史天气(历史气温、历史日照强度、历史风速)。

(4) 总体上, 引入历史参数天数多的精度高于天数少的情况。但是并非引入天数越多越好, 数据统计分析的结果显示, 引入预测当

日前 5 天的供热量、历史室温、历史天气(日照强度)、风速得到的预测模型精度最高, 此结论与文献[1]第 3.7 节热力工况的动态调节的结论是一致的。

(5) 为使热负荷预测在实际供热运行中发挥最佳效果, 供热系统的一网平衡(换热站的控制)应按热量平衡的方式进行调控(热量进度一致的原则)。大型热网由于热源的供热量无法做到实时调节, 输送也具有滞后性, 换热站的控制亦即一网平衡需要根据供热系统的供热能力进行操作, 传统的控制二网供水温度和供回水平均温度的方式是根据需热量确定水温, 需要供热系统的供热能力适应末端需求的变化, 对于大型热网难于实现。同时, 由于热量平衡适用于变流量系统, 不再依赖水温调节曲线指导运行, 规避了水温调节曲线的局限性, 适应性更强。

(下转第 148 页)

提升管网输配能力,应用新技术新科技实现智慧供热,对供热企业今后的发展至关重要。

### 参考文献

[1] 石兆玉.供热系统多热源联网运行的再认识[J].

中国住宅设施,2016(Z3):43-49.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城镇供热管网设计规范:CJJ 34-2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

(上接第 139 页)

(6)在实际工程中,动态热负荷预测基础上的热源调度(控制)和一网智能热量平衡(热量进度一致的原则),无论是采用热量控制还是室温控制都能达到比较理想的效果,实际运行数据显示,采用热负荷预测及全网热量平衡模式可比传统的运行方式节能 5.84%。

### 参考文献

[1] 石兆玉,杨同球.供热系统运行调节与控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[2] 赵红霞,孙春华,耿欣欣,等.太阳辐射对供热负荷的影响分析[C]//中国市政工程华北设计研究

总院有限公司,《煤气与热力》杂志社有限公司.2016 供热工程建设与高效运行研讨会会议论文专题报告,2016:84-89.

[3] 王文标,蔡麒,汪思源.基于气象因素的集中供热系统热负荷预测研究[J].计算机测量与控制,2016,24(2):22-26.

[4] 石兆玉.供热系统热负荷的动态预测[M]//石兆玉.石兆玉教授论文集——供热技术研究.北京:中国建筑工业出版社,2015:49-54.

[5] 贺平,孙刚,王飞,等.供热工程:第 4 版[M]北京:中国建筑工业出版社,2009.