



高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

供热系统运行调节与控制

石兆玉 杨同球◎编著



中国建筑工业出版社

高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

供热系统运行调节与控制

石兆玉 杨同球 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

供热系统运行调节与控制/石兆玉, 杨同球编著. —
北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 12
高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材
ISBN 978-7-112-22484-5

I. ①供… II. ①石… ②杨… III. ①供热系
统-高等学校-教材 IV. ①TK17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 171096 号

本书共 9 章, 内容包括: 供热工程基础、供热系统水力工况、供热系统热力
工况、供热系统节流式流量调节、分布式输配系统、能源管理与节能技术、供热
系统协调运行、供热智能控制、控制系统静态优化与设备的特性指数。

读者在使用本书过程中, 有任何意见或建议, 可发送邮件至 qiqingmei@163.com 联系。

责任编辑: 齐庆梅

责任校对: 焦 乐

高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

供热系统运行调节与控制

石兆玉 杨同球 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

大厂回族自治县正兴印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 28 $\frac{3}{4}$ 字数: 713 千字

2018 年 12 月第一版 2018 年 12 月第一次印刷

定价: 65.00 元

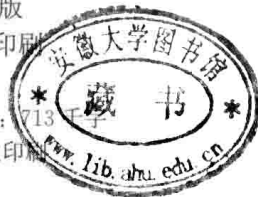
ISBN 978-7-112-22484-5

(32565)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



前 言

《供热系统运行调节与控制》(第一版)于1994年1月由清华大学出版社出版。在书中,首次提出了供热系统热力工况的概念,并就水力工况与热力工况的关系进行了探讨,指出了水力失调是热力失调的主要影响因素。还从理论上阐述了大流量小温差运行方式的利弊,为我国供热行业运行水平的提高发挥了积极作用。同时,对供热系统流量调节的机理作了较深入的分析,提出了“模拟分析”初调节法和快速简易调节法,丰富了现有的调节方法。在系统定压方面,创新性地提出了旁通变频补水定压方式,弥补了现行定压方式的不足。在供热系统运行调节方面,首次提出了最佳流量的变流量调节,使系统调节更加科学合理。该书出版以来,一直是业内技术人员的良师益友,为推动行业的技术进步起到了较好的促进作用。

该书出版20多年来,国内外供热技术有了突飞猛进的发展,我们也继续进行了新的科学研究。2015年2月《石兆玉教授论文集——供热技术研究》的出版,集中反映了这些新的研究成果。为了满足广大读者的愿望,决定再版《供热系统运行调节与控制》,主要目的是将新的研究成果补充到该书中。为此,该书将原有的6章,扩充为9章,新增加了分布式输配系统、能源管理与节能技术、供热系统调节特性与控制决策。别的章节,也都有相应的删增。在新增的章节中详细阐述了分布输配系统的设计、运行的技术细节,为供热行业这一工艺上的重大革新的推广,搭建了应用的技术平台。为促使供热计量技术推广工作的健康发展,书中首次提出了分布式户用泵的热量分摊方法,可使系统近端多余的水量、热量调剂到系统末端,同时实现系统调节、室温控制、热量分摊与计量收费四个功能。为了更有效地选择供热系统的控制决策,书中还另辟蹊径,对系统的调节特性进行了独特的分析。此外,书中还对节能技术、热泵技术以及智能供热,阐述了作者另有新意的见解。

本书再版,第1~7章、8.8节由石兆玉教授撰写,第8~9章主要由杨同球高级工程师编著。杨同球,1966年毕业于清华大学本科暖通专业,后长期在西南自动化研究所从事自动控制的研究,多有建树。

由于作者水平有限,难免有不当之处,敬请读者提出宝贵的批评、指正,不胜感谢!



目 录

第 1 章 供热工程基础	1
1.1 供热设计热负荷	1
1.2 散热设备选择计算	8
1.3 供热系统	12
1.4 水力计算	22
第 2 章 供热系统水力工况	34
2.1 水压图	34
2.2 水压图在设计、运行中的应用	38
2.3 系统水力工况计算	43
2.4 系统变动水力工况分析	50
2.5 供热系统定压	58
2.6 水击及其防治	68
第 3 章 供热系统热力工况	71
3.1 换热器的热特性	71
3.2 热力工况的分析计算	77
3.3 大流量小温差运行方式的利弊分析	83
3.4 集中运行调节	89
3.5 最佳流量调节	100
3.6 蒸汽系统的调节	107
3.7 热力工况的动态调节	114
第 4 章 供热系统节流式流量调节	118
4.1 初调节	118
4.2 决定初调节的影响因素	137
4.3 调节阀及其选择计算	147
第 5 章 分布式输配系统	162
5.1 传统循环水泵设计存在的问题	162
5.2 分布式输配系统设计的基本理念	164
5.3 分布式输配系统的设计	169
5.4 分布式输配系统的连接方式	173
5.5 全网分布式输配系统	188
5.6 变频调速是分布式输配系统的核心技术	192
第 6 章 能源管理与节能技术	221
6.1 供热的地位与目标	221

6.2	能源的梯级利用	223
6.3	热泵在工业余热回收中的应用	231
6.4	供热系统设计参数的确定原则	240
6.5	建筑能耗影响因素与供热系统节能潜力	243
6.6	供热系统的节能技术	248
6.7	供热计量技术	254
第7章	供热系统协调运行	265
7.1	供热系统运行指标探讨	265
7.2	运行中的技术管理	275
7.3	多种类型热负荷的调节	279
7.4	供热系统运行中的三个平衡原则	289
7.5	供热系统故障识别	297
第8章	供热智能控制	303
8.1	供热系统的特点与供热控制的内容和目标	304
8.2	自动控制和供热智能控制概述	320
8.3	计算机及计算机控制系统基本知识	336
8.4	现有供热计算机自动监控系统及其智能化升级	347
8.5	供暖热力站的全程优化集中控制	354
8.6	供热分户计量调控与收费	363
8.7	层燃锅炉控制的作用、难点与策略	368
8.8	供热智能控制全局级功能举例——供热智能信息管理系统简介	377
第9章	控制系统静态优化与设备的特性指数	392
9.1	研究设备调节特性和静态优化的重要性	393
9.2	特性指数定义与控制系统静态优化的特性指数法	403
9.3	调速泵/风机的特性指数	413
9.4	调节阀的特性指数与优选	429
9.5	调节对象的特性指数	440
9.6	对传感器特性的特殊要求	446
	主要参考文献	451
	作者简介	452

第 1 章 供热工程基础

本章介绍供热工程最基本的内容：热负荷计算，散热器的选择计算，供热系统及其水力计算。

热负荷是供热工程设计中最基本的数据，它的数值直接影响着供热方案的选择，各种设备、仪表的确定。因此，热负荷计算是供热系统设计、运行中最基础的工作。供热系统形式的选择，是确定供热方案的重要内容，必须进行技术、经济的综合分析。散热设备的选择计算和供热系统水力计算，是供热工程设计的最基本内容，也是进行供热系统水力工况和热力工况分析的前提和依据。因此，在学习供热系统运行调节与控制时，必须对上述内容有比较深入的了解。由于篇幅所限，本章只能对这些内容进行概括地叙述，读者如有需要，可参阅有关的参考文献。

1.1 供热设计热负荷

1.1.1 室内供热系统热负荷

室内供热系统热负荷一般需进行精确计算。室内供暖热负荷通常包括三部分：

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3 \quad (1.1)$$

式中 Q ——室内供暖总热负荷，W；

Q_1 ——房间围护结构耗热量，W；

Q_2 ——房间通过门、窗缝的冷风渗透耗热量，W；

Q_3 ——外门开启冷风侵入耗热量，W。

(1) Q_1 最主要，称为基本耗热量，由下式计算：

$$Q_1 = \left(\sum_{i=1}^4 K_i F_i (t'_n - t'_w) \right) (1 + \beta_1 + \beta_2) (1 + \beta_3) \quad (1.2)$$

式中 t'_w ——设计外温，不同地区其值不同，北京地区为 -7.6°C ，哈尔滨地区为 -26°C ，各地区的 t'_w 值可由暖通设计手册查得。

t'_n ——设计室温，一般为 $+18^\circ\text{C}$ 。

i ——房间围护结构的种类数， $i=1$ ，表示外墙； $i=2$ ，表示外窗； $i=3$ ，表示外屋顶； $i=4$ ，为一层地面。 F_i 分别表示房间各围护结构的面积， m^2 。 K_i 分别表示房间各围护结构的传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，根据需求和围护结构实际情况查有关手册获得。

β_1 ——朝向附加，该附加值主要考虑太阳辐射（日照）对房间的影响，由于南向房间获取日照热量最多，所以耗热量应该扣除最多。北向房间基本上无日照影响，因此不予附加。南向附加一般为 $-15\% \sim -25\%$ ；东南向与西南向附加 $-10\% \sim -15\%$ ；东西向附加 -5% ；北、东北、西北向不附加。

β_2 ——风向附加，一般风力愈大，房间耗热量愈大；但在一般多层建筑中，不考虑风力附加，这是因为在多层建筑的高度范围风力变化不大。

β_3 ——房屋层高附加。房屋层高愈大，自然对流影响愈大，耗热量愈大。房屋层高4m以下影响小， $\beta_3 \approx 0$ ；层高大于4m，每增高1m， β_3 增加2%。

(2) Q_2 为房间门、窗缝冷风渗透耗热量，这部分耗热量是指把每小时由门、窗缝进入室内的冷空气加热到室温需要的热量。按下式计算：

$$Q_2 = 0.278 L l \rho_w c (t'_n - t'_w) \quad (1.3)$$

式中 ρ_w ——室外空气密度， kg/m^3 ；

c ——冷空气比热， $c = 1 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

L ——门、窗缝的总长度，m；

l ——门、窗缝单位长度每小时渗入的冷空气量， $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 。该值由实际测定获取，由暖通设计手册查得。

(3) Q_3 为外门冷风侵入耗热量。由于外门冷风侵入量不易确定，通常按外门的基本耗热量的百分比计算：

无门斗的双层外门 $100n\%$

有门斗的双层外门 $80n\%$

无门斗的单层外门 $65n\%$

其中 n 为楼层数。

双层外门附加值比单层外门附加值大，是因为双层外门的基本热耗小。

对于频繁开启的公共建筑外门，外门冷风侵入量取外门基本热耗量的5倍。

将 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 相加即得房间的总热耗量。高层建筑热负荷计算、辐射供暖热负荷计算、空调冷负荷计算，见有关设计规范。

1.1.2 集中供热系统热负荷

对于区域集中供热系统，由于常常缺少单体建筑的有关资料，难以用上述方法详细计算各建筑物热负荷。在这种情况下，一般采用概算方法进行计算。

1. 供暖建筑面积概算热指标

供暖热负荷是随室外温度变化而变化的季节性热负荷，概算热指标按下式计算：

$$Q_n = q_n A \quad (1.4)$$

式中 Q_n ——供暖设计总热负荷，W；

A ——供暖建筑物的建筑面积， m^2 ；

q_n ——建筑面积概算热指标， W/m^2 ；指每 1m^2 供暖建筑面积的热负荷。

上式与房间基本耗热量的计算公式

$$Q_n = KF(t'_n - t'_w) \quad (1.5)$$

相比较，可有下列关系：

$$q_n = \frac{KF(t'_n - t'_w)}{A} \quad (1.6)$$

式中 K 、 F ——房屋围护结构传热系数和传热面积。

式(1.6)表明：(1) 室内设计室温 t'_n 要求愈高，概算热指标 q_n 愈大；(2) 建筑物围护结构愈好，外墙愈厚，门窗比例愈小，传热系数 K 值愈小， q_n 值愈小；反之， q_n 愈

大；(3) 平房、层高愈高的建筑，单位建筑面积中的围护结构面积 F/A 愈大， q_n 愈大；(4) 地区愈冷，设计外温 t'_w 愈低， q_n 愈大。但应指出：往往地区愈冷，外墙愈厚，传热系数反而减少， q_n 是增大还是减小，要具体分析。对于同厚外墙， t'_w 愈低， q_n 愈大。当地区差别比较大时，因设计外温 t'_w 是主要影响因素，而外墙薄厚的传热系数影响相对减小（24 砖墙， $K_{24} = 2.08\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，37 砖墙， $K_{37} = 1.56\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，49 砖墙， $K_{49} = 1.27\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ）。北京地区与齐齐哈尔比较，北京 37 墙，后者外墙 49 墙， $t'_w = -25^\circ\text{C}$ ；即齐齐哈尔室内外温差比北京增加 1.59 倍，而传热系数只减少了 1.23 倍。综合考虑齐齐哈尔的 q_n 值比北京地区要大，增加约 36% 左右。沈阳与北京地区相比，同为 37 墙，但沈阳设计外温 $t'_w = -19^\circ\text{C}$ ，则沈阳的 q_n 应比北京的大 37%，按理齐齐哈尔比沈阳冷，但因齐齐哈尔建筑物墙厚，所以两地区 q_n 增加比例差不多。按上述比例，若北京地区 $q_n = 52.3\text{W}/\text{m}^2$ ($45\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)，沈阳 $q_n = 71.7\text{W}/\text{m}^2$ ($61.7\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)，齐齐哈尔 $q_n = 71.2\text{W}/\text{m}^2$ ($61.2\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)。以上讨论的，多以既有建筑而言。分步实施节能建筑以来，建筑的围护结构保温性能有了明显改善，外墙的传热系数大幅减小，但影响概算热指标 q_n 的影响因素仍然是一样的。

我国现行的《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ 26—2010、《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736—2012（以下简称《暖通规范》）分别给出了我国各地区在四步建筑节能标准下的建筑围护结构热工设计标准。现将有关漠河、哈尔滨、北京地区的外墙传热系数、建筑物耗热量指标列于表 1.1 中，并换算出了相应的建筑面积概算热指标，以供参考。

民用住宅供暖面积概算热指标

表 1.1

名称	北京	哈尔滨	漠河
地区分类	寒冷 II (B)	严寒 I (B)	严寒 I (A)
室内设计温度 t'_n ($^\circ\text{C}$)	18	18	18
室外设计温度 t'_w ($^\circ\text{C}$)	-7.6	-24.2	-37.5
供暖天数 (d)	123	176	224
外墙传热系数 K ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$)	0.45~0.7	0.25~0.3	0.25~0.5
耗热量指标 q_h ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)	12.1~16.9	16.1~22.9	20.6~25.2
供暖概算热指标 q_n (W/m^2)	16.8~22.8	24.8~35.2	33.6~41.0

2. 供暖体积概算热指标

供暖热负荷也可按建筑体积大小进行概算。计算公式如下：

$$Q_n = q_v V_w (t'_n - t'_w) \quad (1.7)$$

式中 Q_n ——建筑物设计供暖热负荷，W；

V_w ——建筑物的外围体积， m^3 ；

q_v ——建筑物供暖体积概算热指标， $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ；它表示各类建筑物，在室内外温差 1°C 时，每 1m^3 建筑物外围体积的供暖热负荷。为比较 q_v 的影响因素，可根据下式进行

$$q_v = \frac{KF}{V_w} \quad (1.8)$$

在式(1.8)中, K 、 F 意义同前, 表示围护结构的传热系数和传热面积。根据公式: (1) 围护结构愈好, 门窗比例愈小, 墙愈厚, K 值愈小, q_v 愈小; (2) 和建筑物外形有关, 由几何学知, 同面积同体积中, 正方形和正方体的周长和外表面积最小的原理, 建筑物平面为正方形、立面为正方体时其 F/V_w 最小, 即单位体积中的围护结构面积最小, 此时 q_v 最小; (3) 因 q_v 表示室内外单位温差的热负荷, 理论上讲 q_v 与地区冷热无关。但寒冷地区, 一般墙厚, 当给出 q_v 值的上下限时, 应取偏小值。

由式(1.4)、式(1.7)计算的热负荷, 再乘以外网热损失, 即得锅炉房的总设计热负荷。

3. 供暖季总供暖耗热量概算——度日法

以上介绍的是设计供暖热负荷, 亦即每小时在供暖期间的最大热负荷。为了进行能效分析, 常常还需要知道整个供暖期的总热耗量。由于在供暖期间, 随着室外气温的不同, 严格说, 每小时的实际供暖热负荷都是不同的, 因此, 可以想象, 总供暖热耗量的计算工作量是相当复杂的。

南京大学大气科学系为此提出了度日法, 以此进行供暖季总热耗量的概算就变得十分方便。

这种方法的基本思路是把整个供暖季计算热耗量的室内外温差总数统计出来, 然后乘以室内外单位温差热负荷。计算公式为:

$$q_{h(\text{GJ})} = \frac{3.6 \times 24 \times q_n D_{18}}{t'_n - t'_w} \times 10^{-6} \quad (1.9)$$

式中 $q_{h(\text{GJ})}$ ——供暖季每 1m^2 供暖建筑面积总热耗量, $\text{GJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;

D_{18} ——各地区室内温度以 18°C 为基准的供暖期度日数 $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ (全年供暖度日数为 HDD18); 度日的定义是每日的室外平均温度与规定的室内基准温度 (如 18°C) 每日相差 1°C 的数值。可按下式计算

$$D_{18} = Z(t'_n - t'_{wp}) \quad (^\circ\text{C} \cdot \text{d}) \quad (1.10)$$

式中 t'_{wp} ——供暖季室外平均温度, $^\circ\text{C}$;

Z ——供暖季供暖天数, d ;

对于北京地区, $t'_{wp} = -0.7^\circ\text{C}$, $Z = 123$ 天 (d), 按照公式(1.10)计算出 $D_{18} = 2300.1^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。

在式(1.9)中, q_n 为建筑面积供暖概算热指标, $q_n/(t'_n - t'_w)$ 表示室内外单位温差的设计热负荷。因度日数以日作为计量单位, 而 $q_n/(t'_n - t'_w)$ 是以小时为计量单位, 因此该公式需乘以 24 小时。对于北京地区, 按式(1.9)计算出的每 1m^2 建筑供暖面积的供暖季总热耗量为 $0.12 \sim 0.16 \text{GJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (根据表 1.1 数据)。

4. 通风设计热负荷

为了保证室内空气满足一定清洁度及湿度等要求, 就要对生产厂房、公用建筑及居住房间进行通风或空调, 在供暖季节中, 加热从室外进入的新鲜空气所耗的热量, 称为通风热负荷。通风热负荷也是季节性热负荷, 但由于通风系统的使用情况和工作班次不同, 一般公用建筑和工业厂房的通风热负荷, 在一昼夜间波动也较大。

根据建筑物的性质和外围体积, 通风设计热负荷的概算多采用体积热指标法, 可按下式计算

$$Q_T = q_T V_w (t'_n - t'_w) \quad (1.11)$$

式中 Q_T ——建筑物的通风设计热负荷, W;

q_T ——建筑物的通风热指标, $W/(m^3 \cdot ^\circ C)$, 它是指各类建筑物, 在室内外温差 $1^\circ C$ 时, 每 $1m^3$ 建筑物外围体积的通风热负荷;

V_w ——建筑物的外围体积, m^3 ;

t'_n ——供暖室内计算温度, $^\circ C$;

t'_w ——通风室外计算温度, $^\circ C$ 。

工业厂房的供暖体积热指标 q_v 和通风体积热指标 q_T 值, 可参考有关设计手册选用。对于一般民用建筑、室外空气无组织地从门窗等缝隙进入, 预热这些空气到达室温所需的通风耗热量, 已在供暖热负荷中计入, 不再另行计算。

5. 生活用热的设计热负荷

(1) 热水供应用热。热水供应热负荷为日常生活中用于洗脸、洗澡、洗衣服以及洗刷器皿等的用热。无论是居住建筑、服务性行业或工厂企业, 热水供应热负荷的大小都和人们生活水平、生活习惯及生产发展情况(设备情况)有关。

热水供应系统的工作特点是用水量具有昼夜的周期性。因此, 通常首先根据使用热水的人数(或设备数目等指标)和相应的热水用水量标准, 确定全天的热水用量; 然后根据用户在昼夜中小时用水量的变化规律。利用所谓小时变化系数 K_r 值的概念, 确定热水设计用水量(L/h)。其计算公式如下:

$$q_d = m q_r \quad (1.12)$$

$$q_h = K_r \frac{m q_r}{24} \quad (1.13)$$

式中 m ——使用热水的人数;

q_r ——热水供应的用水量标准, $L/(\text{天} \cdot \text{人})$, 可查有关资料;

q_d ——全天热水用水量, $L/\text{天}$;

q_h ——热水供应设计用水量, L/h 。

K_r ——小时变化系数。

小时变化系数表示最大小时用水量与平均小时用水量之比值。对全日使用热水的用户, 如住宅、医院、旅馆等, K_r 值可按有关资料选用。如用户设置足够大的储水箱时, K_r 值可等于 1, 亦即可按平均小时用水量作为设计小时用水量。对短时间使用热水的用户, 如工业企业、体育馆和学校的淋浴设备等, K_r 值取大些可按 $K_r = 5 \sim 12$ 计算。

确定热水供应设计用水量后, 可按下式确定热水供应的设计热负荷

$$Q_r = c q_h (t_r - t_l) \rho \times 10^{-3} \quad (1.14)$$

式中 Q_r ——热水供应系统的设计热负荷, kJ/h ;

c ——水的质量比热, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;

q_h ——热水供应设计用水量, L/h ;

t_r 、 t_l ——热水和冷水温度, $^\circ C$;

ρ ——水的密度, kg/m^3 。

(2) 其他生活用热。在工厂、医院、学校中, 除热水供应以外尚有开水供应、蒸饭等

项用热。这些用热负荷的概算,可参照式(1.13)计算。例如计算开水供应用热时, t_r 可取 105°C , q_r 可取 $2\sim 3\text{L}/(\text{天}\cdot\text{人})$;蒸饭锅的蒸汽消耗量,当蒸量为 100kg 时,约需耗汽 $100\sim 250\text{kg}$ 蒸汽(蒸汽量越大,单位耗气量越小)。一般开水和蒸锅要求的加热蒸汽压力为 $1.5\times 10^5\sim 2.5\times 10^5\text{Pa}$ 。

6. 生产工艺热负荷

生产工艺热负荷是为了满足生产过程中用于加热、烘干、蒸煮、清洗、熔化等项的用热,或作为动力用于拖动机械设备(汽锤、汽泵等)。

生产工艺热负荷和生活用热热负荷一样,属于全年性热负荷。生产工艺设计热负荷的大小以及需要的热媒种类和参数,主要取决于生产工艺过程的性质、用热设备的形式以及企业生产的工作制度,由于用热设备多种多样、工艺过程对热媒要求的参数不一致、工作制度各有不同,因而生产工艺热负荷很难用固定的公式表述,一般只能根据用热设备制造厂提供的说明、已有的运行经验数据,通过调查试验,或由生产工艺方面提供。

生产工艺热负荷的用热参数,按照工艺要求热媒温度的不同,大致可分为三种:供热温度在 $130\sim 150^{\circ}\text{C}$ 以下称为低温供热,一般靠供给 $4\times 10^5\sim 6\times 10^5\text{Pa}$ (绝对压力)蒸汽供热;供热温度在 $130\sim 150^{\circ}\text{C}$ 以上到 250°C 以下时称为中温供热,这种供热的热源往往是中小型锅炉或热电厂热化汽轮机 $8\times 10^5\sim 13\times 10^5\text{Pa}$ (绝对压力)级的抽汽供热;当供热温度高于 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ 时,称为高温供热。这种供热的热源通常直接从大型锅炉房或热电厂取用新汽经过减压减温后供热。

在有较多生产工艺用热设备或热用户的场合下,它们的最大负荷往往不会同时出现。在考虑集中供热系统生产工艺总的设计热负荷或管线承担的热负荷时,应考虑各设备或各用户的同时使用系数。同时使用系数是用热设备运行的实际最大热负荷与全部用热设备的最大热负荷之和的比值。利用同时使用系数使总热负荷适当降低,有利于供热的经济效果。

对于热电厂供热系统,还应对生产工艺热负荷在全年中的变化情况有更多的调查统计数据。如除最大热负荷外,还有最小热负荷,冬、夏平均负荷,用汽参数,典型的周期蒸汽热负荷曲线和年延续曲线等资料。这些数据对选择供热汽轮机组形式,分析热电厂的经济性和运行管理都是很必要的。

7. 热负荷延续图

进行城市集中供热规划,特别是对热电厂供热方案进行技术经济分析时,往往需要绘制热负荷延续图。在供暖热负荷延续图中(如图1.1所示),能表示出各个不同大小的供暖热负荷与其延续时间的乘积,能够很清楚地显示出不同大小的供暖热负荷在整个采暖季中的累计耗热量,以及它在整个采暖季总耗热量中所占的比重。

图1.1中横坐标的左方 t'_w 、 $t_{w,1}$ 、 $t_{w,2}\dots$ 表示温度等差为 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$ 的一系列室外温度。横坐标的右方 Z_0 、 Z_1 、 $Z_2\dots$ 表示各室外温度间隔的小时数(根据当地多年气象资料平均得出)。如 Z_0 表示采暖季中室外温度 $t_w\leq t'_w$ (供暖室外计算温度)的总小时数(或天数), Z_1 表示当 $t'_w < t_w\leq t_{w,1}$ 时的总小时数等等。纵坐标表示供暖热负荷(GJ/h或GW)。图左方直线 Q'_N-Q_k 表示供暖热负荷随室外温度变化曲线。 Q'_N 为供暖设计热负荷, Q_k 为室外温度 $+5^{\circ}\text{C}$ 开始采暖的热负荷。

热负荷延续图的绘制方法如下:从横坐标右方 b_0 点(b_0 点的横坐标值为 Z_0)引垂直

线与纵坐标 Q'_N 引的水平线相交于 a_0 点；又从横坐标右方 b_1 点处 (b_1 点的横坐标值为 $Z_0 + Z_1$ ，它表示室外气温 $t_w \leq t_{w,1}$ 的延续小时数)，引垂直线与纵坐标 Q_1 (相应 $t_{w,1}$ 时的供暖热负荷) 引水平线相交于 a_1 点。依此类推，连接 Q'_N 、 a_0 、 a_1 、 $a_2 \dots$ 等点形成的曲线，得出热负荷延续图。显而易见，曲线 $Q'_N a_1 a_2 \dots a_k$ 与坐标轴所包围的面积就是采暖季中的总耗热量，而曲线 $a_0 a_1 b_1 b_0$ 所包围的面积就是在 $t'_w < t_w \leq t_{w,1}$ 范围内的累计耗热量。

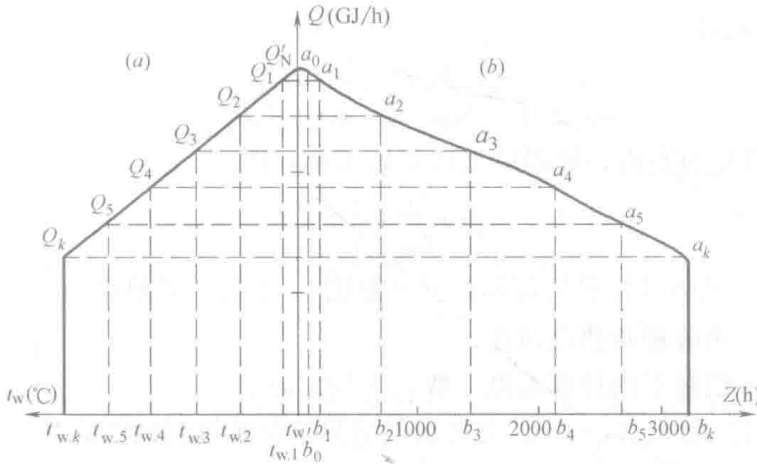


图 1.1 供暖热负荷延续图的绘制方法

(a) 供暖热负荷随室外温度的变化曲线；(b) 供暖热负荷延续图

供热系统的总供热负荷应为供暖、通风、空调、生活热水供应及生产工艺负荷之和 (考虑同时使用系数之后) 再乘以 1.1 的热网损失系数。

8. 利用无因次综合公式法绘制供暖热负荷延续时间曲线

当某地区气象数据不全时，可利用无因次综合公式法绘制供暖热负荷延续时间曲线，进行计算总供暖热负荷。该方法是根据历年室外日平均气温资料，通过数学分析和回归计算，利用无因次形式的数学模型，来表达供暖期内的气温分布规律。设 R_t 、 R_n 两个无因次变量，分别表示无因次室外气温和无因次延续天数或小时数，则：

$$R_t = \frac{t_w - t'_w}{5 - t'_w} \quad (1.15)$$

$$R_n = \frac{N - 5}{N_{zh} - 5} = \frac{n - 120}{n_{zh} - 120} \quad (1.16)$$

式中 t_w ——某一室外温度， $^{\circ}\text{C}$ ；
 t'_w 、5——供暖室外计算温度；供暖起始、终止时的室外日平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；
 N_{zh} 、 n_{zh} 、5、120——供暖期总天数或总小时数；不保证天数 (5 天) 或不保证小时数 (120h)；

N 、 n ——延续天数或延续小时数，即供暖期内室外日平均温度等于或低于某 t_w 的历年平均天数或小时数；

则 R_t 、 R_n 可整理成如下关系式：

$$R_t = \begin{cases} 0 & N \leq 5 \\ R_n^b & 5 < N \leq N_{zh} \end{cases} \quad (1.17)$$

或用下式表示：

$$t_w = \begin{cases} t_w' & N \leq 5 \\ t_w' + (5 - t_{pj})R_n^b & 5 < N < N_{zh} \end{cases} \quad (1.18)$$

式中 t_{pj} ——供暖期室外日平均温度, $^{\circ}\text{C}$;

b —— R_n 的指数值;

$$b = \frac{5 - \mu t_{pj}}{\mu t_{pj} - t_w} \quad (1.19)$$

式中 μ ——修正系数

$$\mu = \frac{N_{zh}}{N_{zh} - 5} = \frac{n_{zh}}{n_{zh} - 120} \quad (1.20)$$

根据供暖热负荷与室内、外温度差成正比关系, 即

$$\bar{Q} = \frac{Q_n}{Q_n'} = \frac{t_n - t_w'}{t_n - t_w} \quad (1.21)$$

式中 Q_n' 、 Q_n ——供暖设计热负荷和在室外温度 t_w 下的供暖热负荷;

\bar{Q} ——供暖相对热负荷比;

t_n ——供暖室内计算温度, 取 $t_n = 18^{\circ}\text{C}$ 。

综合式 (1.17) 和式 (1.18), 可得出供暖热负荷延续时间图的数学表达式:

$$\bar{Q} = \begin{cases} 1 & N \leq 5 \\ 1 - \beta_0 R_n^b & 5 < N \leq N_{zh} \end{cases} \quad (1.22)$$

或

$$Q_n = \begin{cases} Q_n' & N \leq 5 \\ (1 - \beta_0 R_n^b) Q_n' & 5 < N \leq N_{zh} \end{cases} \quad (1.23)$$

式中

$$\beta_0 = (5 - t_w') / (t_n - t_w') \quad (1.24)$$

利用无因次综合公式法绘制供暖热负荷延续时间图的最大优点是: 当缺乏一个城市详细的室外气温分布统计资料情况下, 只要从暖通相关规范中查出该城市的三个规定数据——即供暖室外计算温度 t_w' 、供暖期天数 N_{zh} 和供暖期室外日平均温度 $t_{p,j}$, 就可以利用式 (1.23) 绘制出供暖热负荷延续时间图。由《供热工程》附录 6-6 给出了我国北方二十个城市的无因次综合公式中的 β_0 和 b 值, 通过二十个城市的验证, 按无因次综合公式绘制的供暖热负荷延续时间曲线, 某一室外温度 t_w 下的热负荷偏差率 (与某一室外温度 t_w 下的理想公式 (1.21) 与式 (1.22) 确定的热负荷的差异), 一般不超过 $\pm 5\%$; 整个供暖期供热总耗热量的相对误差很小, 其值只在 $1.74\% \sim 2.85\%$ 以内, 因而所具有的精度, 可适用于工程计算上。

1.2 散热设备选择计算

1.2.1 散热设备分类

散热器按其制造材质分为铸铁、钢制散热器。按其结构形状分为柱形、翼形、平板形和管形等。按其传热方式分为辐射型 (辐射换热占 60% 以上), 对流型 (对流换热占 60% 以上)。辐射供暖散热设备主要有辐射供暖地面和毛细管网辐射板。

1. 铸铁散热器

(1) 圆翼形散热器, 是一根管子外面带有许多圆形肋片的铸件。它的规格用内径 D

表示,有 D50 (内径 50mm,肋片 27 片)和 D75 (内径 75mm,肋片 47 片)两种。每根管长 1m,两端法兰连接成组。

(2) 长翼形散热器,外表面具有许多竖向肋片,外壳内部为一扁盒状空间,每个散热器所带肋片的数目分别为 10 片和 14 片两种。此种散热器高度为 60cm,故肋片为 14 片的称为大 60。肋片为 10 片的称小 60。可单独悬挂或搭配组装。

(3) 四柱散热器,外表光滑,无肋片,每片有 4 个中空立柱互相连通。高 813mm,规格为四柱 813 型。有带脚不带脚两种片型,用于落地或悬挂安装。

(4) 二柱散热器,每片两侧各有一个中空立柱互相连通,中间有波浪形纵向肋片与两个立柱连通。片宽 132mm,又称为 M-132 型散热器,一般组对成组悬挂安装。

铸铁散热器具有结构比较简单、防腐性能好、使用寿命长以及热稳定性好等优点。缺点是金属耗量大,制造安装和运输劳动繁重和承压能力较低 ($4.0 \times 10^5 \text{ Pa}$) 等。与钢制散热器比较,虽有不尽人意之处,但防腐性能好,因而长期广泛应用于多层建筑中。稀土合金铸铁散热器可用于高层建筑 (可承压 $6.0 \times 10^5 \sim 8.0 \times 10^5 \text{ Pa}$)。

2. 钢制散热器

(1) 钢串片对流散热器,该散热器是在钢管外侧串以用 0.5mm 的薄钢片制成的串片而成。可组合成组。一般外面加罩,侧面形成上下两个有栅格的进出风口,多以对流方式换热。

(2) 板式散热器,主要由面板、背板、对流片和进出口接头等组成。面板、背板材料由 1.2mm 厚的冷轧钢板冲压成型。主要水道呈圆弧形或梯形,直接压制在面板上,水平联箱压制在背板上。在背板后面电焊对流片,对流片由 0.5mm 厚的冷轧钢板冲压成型。

板式散热器高度有 480、600mm 等几种规格,长度由 400mm 开始,每 200mm 进位至 1800mm,共八种规格。

(3) 扁管式散热器,它是采用 $52 \times 11 \times 1.5$ (宽 \times 高 \times 厚, mm) 的水通路扁管作为散热器的基本模数单元,然后将数根扁管叠加焊接在一起,在两端加上断面 $35 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的联箱而成。

扁管散热器外形尺寸是以 52mm 为基数,根据需要可叠加成 416mm (8 根管)、520mm (10 根管)和 624mm (12 根管)三种高度。长度起点为 600mm,以 200mm 进位至 2000mm,共八种不同长度。

(4) 钢制柱式散热器,结构、外形与铸铁柱式散热器相似,也有几个中空立柱。高度为 640mm。

这种散热器采用 1.5~2.0mm 厚普通冷轧钢板经过冲压延伸形成片状半柱型,将两片片状半柱型经压力滚焊复合成单片,单片之间经气体弧焊连接成散热器段。

与铸铁散热器相比,钢制散热器的优点是金属耗量少;耐压强度高 ($(5 \sim 12) \times 10^5 \text{ Pa}$)。主要缺点是容易腐蚀,特别是氧腐蚀 (即点腐蚀),使用寿命短,板式、扁管式和柱式尤为突出。该类型散热器水容量小,热稳定性较差。此外,由于我国工艺水平不高,焊接质量差,板式、扁管式散热器常常漏水,达不到应有承压能力。根据上述分析,目前我国已较少采用板式、扁管式和柱式钢制散热器。在高层建筑中,宜采用钢串片式散热器。

3. 辐射供暖地面

适用于地板辐射供暖系统的散热设备一般做成辐射供暖地面。主要由加热管、绝热层和地面层等组成。地面层有水泥、地砖、石材和木地板等。绝热层有塑料绝热层、发泡水泥绝

热层。加热管有塑料管 (PB管、PB-R管、PE-X管、PE-RTII型、PE-RTI型和PP-R管), 公称外径 16、20、25mm, 工作压力 0.4MPa、0.6MPa、0.8MPa 和 1.0MPa; 铝塑复合管, 公称外径 16、20、25mm, 工作压力 1.0~2.0MPa; 无缝铜管, 公称外径 15、18、22、28mm, 工作压力 3.3~10.0MPa。所有加热管, 工作温度为 60~80℃。其具体结构见《辐射供暖供冷技术规程》JGJ 142—2012 附录 A。辐射供暖地面厚度为 120mm。

4. 毛细管网辐射板

采用细小管道, 加工成网状, 敷设于地面、顶棚或墙面, 以热水为热媒的一种辐射供暖方式。其毛细管直径为 3.5~4.3mm, 管间距为 0.8~10mm。每 1m² 辐射板的容量只有 0.32~0.49kg, 比辐射供暖地板的 1kg 少很多。毛细管网辐射板的厚度为 45mm, 也比普通辐射供暖地板厚许多。由于结构特点, 其蓄热层厚, 温差和热惰性小, 温度均匀, 是一种较好的供暖形式。

1.2.2 散热设备选择

1. 散热器选择

散热器计算主要是确定供暖房间所需散热器的散热面积和片数。它是在供暖热负荷、系统形式及散热器选型确定之后进行的。

散热器散热面积 $F(\text{m}^2)$ 由下式计算

$$F = \frac{Q}{K(t'_p - t'_n)} \beta_1 \beta_2 \beta_3 \quad (1.25)$$

式中 Q ——散热器散热量即供暖房间热负荷, W;

K ——散热器的传热系数, W/(m²·℃);

t'_p ——散热器内热水平均温度, ℃;

t'_n ——室内设计温度, ℃;

β_1 ——散热器的片数修正系数;

6片以下 $\beta_1 = 0.95$;

6~10片 $\beta_1 = 1.00$;

11~20片 $\beta_1 = 1.05$;

20~25片 $\beta_1 = 1.0$

β_2 ——管道热水冷却修正系数, 当室内管道明装时 $\beta_2 = 1.0$; 暗装时 $\beta_2 > 1.0$, 详见暖通设计手册;

β_3 ——散热器装置方式修正系数, 当无外罩时 $\beta_3 = 1.0$; 有外罩时 $\beta_3 \geq 1.0$, 详见暖通设计手册。

散热器散热量 Q 由上节介绍方法计算。传热系数 K 可查阅有关散热器的技术经济指标。散热器平均温度 t'_p 采用散热器的供、回水温度的算术平均值, 即 $t'_p = (t'_g + t'_h)/2$ 。设计室温一般取 18℃。

在计算传热面积 F 时, 散热器片数尚未求出, β_1 难以确定。通常做法是先取 $\beta_1 = 1.0$, 计算出 F 值 (按式 (1.25)), 然后按下式计算散热器片数 n

$$n = F/f \quad (1.26)$$

式中 f ——每片或每米长散热器的散热面积 (可由产品说明书查得)。

然后根据每组散热器片数 n 确定 β_1 值, 再校核计算散热器的散热面积 F 和散热器片数 n 。

在散热器片数（或长度） n 的计算中，只能取整数。如果 n 不为整数，应根据下述原则进行取舍：

对柱形、长翼形、板式、扁管式等散热器，散热面积的减少不宜超过 0.1m^2 ；对于串片式、圆翼形散热器，散热面积的减少不宜超过计算面积的10%。

在通常情况下，也可用粗估方法大体了解散热器的选取片数。对于铸铁四柱813型，每 1m^2 供暖面积所需散热器片数为0.5片。

散热器一般布置在供暖房间外窗台下。房间进深较小时，也可布置在内墙一侧，但当房间进深超过4m时，最好布置在外窗台下，否则冷空气流经人们的工作区，影响舒适感。

楼梯间的散热器应尽量布置在底层，当建筑物为五层时，可将50%的散热器布置在一层，30%的散热器布置在二层，20%的散热器布置在三层，四、五层楼梯不放散热器。楼梯上层由空气自然对流来补偿热损失。为防止冻裂，双层外门的外室以及门斗内不宜布置散热器。

2. 辐射板选择

辐射面传热量应满足房间所需供热量或供冷量的需求。辐射面传热量应按下列公式计算：

$$q = q_f + q_d \quad (1.27)$$

$$q_f = 5 \times 10^{-8} [t_{pj} + 273]^4 - (t_{fj} + 273)^4 \quad (1.28)$$

全部顶棚供暖时：

$$q_d = 0.134(t_{pj} - t_n)^{1.25} \quad (1.29)$$

地面供暖、顶棚供冷时：

$$q_d = 2.13 |t_{pj} - t_n|^{0.31} (t_{pj} - t_n) \quad (1.30)$$

墙面供暖或供冷时：

$$q_d = 1.78 |t_{pj} - t_n|^{0.32} (t_{pj} - t_n) \quad (1.31)$$

地面供冷时：

$$q_d = 0.87(t_{pj} - t_n)^{1.25} \quad (1.32)$$

式中 q ——辐射面单位面积传热量， W/m^2 ；

q_f ——辐射面单位面积辐射传热量， W/m^2 ；

q_d ——辐射面单位面积对流传热量， W/m^2 ；

t_{pj} ——辐射面表面平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_{fj} ——室内非加热表面的面积加权平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_n ——室内空气温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

辐射板面积的选择，首先要确定供暖房间所需单位地面面积向上供热量：

$$q_1 = \beta \frac{Q_1}{F_r} \quad (1.33)$$

$$Q_1 = Q - Q_2 \quad (1.34)$$

式中 q_1 ——房间所需单位地面面积向上供热量或供冷量， W/m^2 ；

Q_1 ——房间所需地面向上的供热量或供冷量， W ；

F_r ——房间内敷设供热供冷部件的地面面积， m^2 ；

β ——考虑家具等遮挡的安全系数；