

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.006

污水热利用的供需侧负荷动态匹配

蔡晓磊, 林真国, 于祥雷, 唐建平

(重庆大学 城市建设与环境工程学院; 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:对重庆某三级污水管网的流量动态特性、温度动态特性进行了分析,对某商场建筑的全年负荷进行了模拟。在此基础上,比较了商场建筑日峰值排热量与污水平均载热量的相对大小,找出最不利流量及其与建筑需求侧的差额。为了充分、合理的利用城市污水冷热资源,探索在污水流量不利工况下城市污水与城市建筑负荷之间的供需匹配方法,采用复合式系统弥补全年污水最不利流量时段污水平均载热量与建筑负荷的差值,并针对复合式系统提出了负荷分担原则及控制策略。

关键词:污水热利用;动态特性;欠流量;复合式系统;匹配

中图分类号:TU834.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)01-0029-06

Load dynamic matching of supply and demand side based on the utilization of urban sewage heat energy

Cai Xiaolei, Lin Zhenguo, Yu Xianglei, Tang Jianping

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering; Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Flowing dynamic characteristics and its temperature dynamic characteristics of a three-level sewage pipe network in Chongqing were analyzed. A mall's building whole year load was simulated. In the adverse condition of wastewater flow, the market construction peak discharge heat was compared with the sewage heat load, the balance between the most adverse flow and the building demand was found. Explored supply and demand matching method between urban sewage and city building load in flow adverse condition to take full advantage of the urban sewage cold and hot resources, the composite system was adopted to make up the most unfavorable flow time of sewage average heat load and the construction load difference; it also puts forward principle of load sharing and control strategy aimed at compound system.

Key words: sewage heat utilization; dynamic characteristics; sewage flow disadvantage; hybrid system; matching

城市生活污水是一种良好的低品位冷热资源。近年来,国内外对于污水冷热资源利用的研究大多围绕污水源热泵工程应用技术或设备研展开。如

污水的取水及退水方式、污水过滤器的防腐与防堵、污水换热器的污垢形成与强化传热、污水源热泵应用的可行性与节能效益评价等等^[1-7]。对于城市污

收稿日期:2014-07-09

基金项目:国家自然科学基金(51106190)

作者简介:蔡晓磊(1989-),男,主要从事污水源热泵应用研究,(E-mail)yujian000@126.com。

Received:2014-07-09

Foundation item:National Natural Science Foundation of China(No. 51106190)

Author brief:Cai Xiaolei(1989-),main research interest:application of sewage source heat pump,(E-mail)yujian000@126.com.

水冷热资源排放与建筑冷热负荷需求匹配的研究涉及较少。

城市污水中赋存的冷热量是巨大的,文献[8]从城市宏观尺度定量计算了城市污水中赋存的冷热量以及可以利用的冷热量。目前污水源热泵系统的实际工程和设计思想多是基于这种宏观的定量计算^[7, 9-10],即在污水最小流量和冬夏季计算温差下,污水可利用容量需要满足建筑最大的冷(热)负荷,忽略了具体工程应用时污水的流量、温度等特性^[11]与城市尺度下差异。在一个城市中,污水总量很大,而污水分布是不均衡的,一栋建筑可以利用的部分也是有限的。这种地域上的不均衡性和污水本身的动态特性是污水源热泵系统在推广和应用过程中需要考虑的。为充分、合理的利用城市污水冷热资源,提高污水源热泵系统的可靠性,本文基于动态的思想,探索了在污水流量不利的工况下城市污水与城市建筑负荷之间的供需匹配方法,并提出了负荷分担原则及控制策略。

1 污水的动态特性

污水中携带的冷热量主要通过流量和温度表现出来,其中流量显示出污水冷热量“量”的特点,而温度则可评判污水“质”的好坏。

1.1 污水的流量动态特性

城市生活污水量通常取决于城市生活用水量。由于城市居民生活的规律性导致用水量变化具有一定的规律性,从短期内用水量变化具有周期性,长时间看它又具有逐年增长的趋势。城市生活污水量与城市生活用水量一样逐月逐时变化,一年之内冬季和夏季不同,一日之中白天和夜晚也不一样,即使在同 1 h 内污水流量也是恒定不变的。污水管网内污水流量的变化程度与管网内流量的大小有关,污水流量越大变化幅度越小,变化系数也越小,反之则越大^[12]。不同类型的污水管网在流量变化规律上存在一定的差异。

污水流量在一小时内可以认为是均匀的^[13]。如果将管网内污水逐时流量与该日平均污水流量的比值定义为小时流量系数,就可以通过该系数看出管网内污水流量在 1 d 内的波动程度。文献^[12]通过调研测试给出了 3 个不同规模污水管网的小时流量系数,具体见图 1。

图 1 中 1 级污水管网主要指的是城市污水主干管(比如流入污水处理厂的污水管),2 级污水管网对应于城市污水干管,3 级污水管网对应于城市污水支管(比如单个小区的污水排出管道)。图 1 可以

看出,污水管网越大,污水流量在 1 d 内逐时波动越小,污水管网越小,污水流量在 1 d 内波动越剧烈;3 种管网的波动曲线都显示晚上管网内污水流量相对较少。

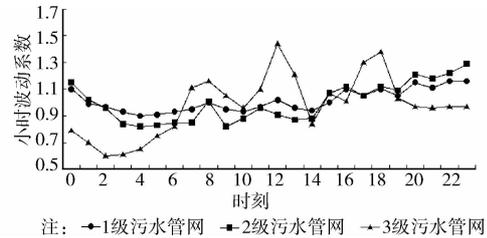


图 1 3 个不同规模污水管网的小时流量系数
Fig. 1 The hour flow coefficient of the three different scale sewage pipe

在不考虑气候突变前提下,城市生活污水流量日与日之间变化不明显,但日变化的长时间累加可能导致污水流量的明显变化。工程应用中常假定每月内日流量相同,而在月间出现差异,这与通常采用的按月统计相适应。实际上以月为周期,气候变化并不明显,污水流量基本稳定。如果将管网内污水逐月流量与 1 a 内月平均污水流量的比值定义为月流量系数,就可以通过月流量系数看出管网内污水流量在 1 a 内月与月之间的波动程度。文献^[14]通过调研测试给出了 3 个不同规模污水管网的月流量系数,具体见图 2。

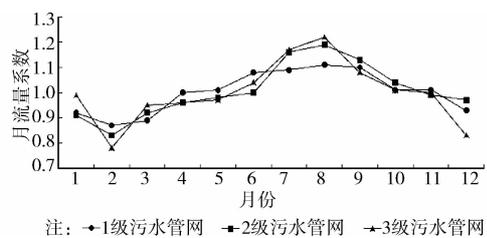


图 2 3 个不同规模污水管网的小时流量系数
Fig. 2 The hour flow coefficient of the three different scale sewage pipe

从图 2 可以看出,污水管网越大,污水流量在 1 a 内逐时波动越小,污水管网越小,污水流量在 1 a 内波动越剧烈;另外,3 种管网内污水流量都是冬季少,夏天较多。

1.2 污水的温度动态特性

温度是城市生活污水冷热资源的关键因素,是换热工况设计的重要参数,直接影响系统投资与运行能耗,关系到热泵系统使用的经济性和节能性,因此污水冷热资源建筑应用必须考察污水的温度情况。图 3 是重庆市全年污水、空气及地表江水的温

度变化情况,污水各月平均温度为 14~25℃,空气全年各月平均温度为 8~29℃,地表江水温度各月平均温度为 13~28℃。从整体上看城市生活污水全年温度均在 10~25℃左右,并且差别并不大,是理想的低温热源与热汇。

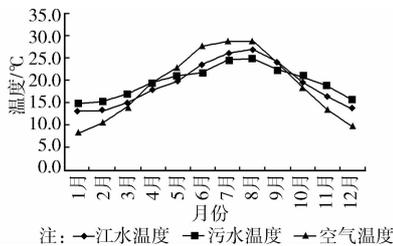


图 3 重庆市污水与环境温度全年变化曲线

Fig. 3 Annual temperature changes of sewage and outside surroundings in Chongqing

1.3 污水冷热量的动态特性

污水冷热量的波动主要受污水流量和污水被利用前后的温差影响,具体见式(1)、(2)。

$$Q_L = C \cdot m \cdot \Delta t_l \quad (1)$$

$$Q_R = C \cdot m \cdot \Delta t_r \quad (2)$$

式中: Q_L 、 Q_R 为污水冷热容量, kW; C 为污水定压比热,可近似取 4.187 kJ/kg·℃; m 为污水质量流量, kg/s; Δt_l 、 Δt_r 为制冷、制热工况下污水被利用前后的温差,℃。

污水被利用后的温度通常要满足污水处理厂对污水温度要求,文献[14]指出只要控制污水使用后温度在 8~40℃范围内,就不会对污水处理工艺产生负面影响,因此,理论上 Δt_l 、 Δt_r 分别为 $40 - t_w$ 、 $t_w - 8$; 由于污水温度 t_w 是波动变化的,因此理论上的 Δt_l 和 Δt_r 也是波动变化的。实际工程中综合了技术及经济因素,通常取 Δt_l 和 Δt_r 为 5℃,则污水冷热量的波动只受污水流量的影响,污水温度的变化只是影响了冷热源系统中的温度参数。

2 建筑负荷的动态特性

空调的负荷特性和建筑物的类型有很大关系,每一类建筑其负荷波动性都不一样;从目前利用污水源热泵的项目可以看出,污水源热泵大都应用于办公及商业等公共类建筑^[10, 15-16]。商场作为一种典型的建筑,其空调负荷全年有明显的波动性。本文基于文献[17]对重庆地区商场建筑的调查情况,建立了一栋典型商场建筑模型。对于商场建筑,由于围护结构负荷占的比重较小,导致冬季热负荷较小甚至出现冷负荷的情况,因此本文只考虑夏季商场冷负荷特性,利用 DEST 模拟软件模拟 5~10 月空

调冷负荷;最热月典型日(8月3日)建筑负荷分布见图 4,峰值冷负荷见图 5。

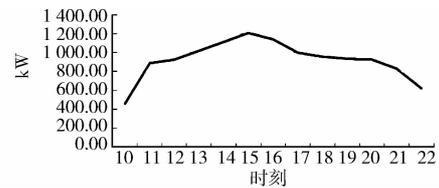


图 4 最热月典型日(8月3日)空调冷负荷分布图

Fig. 4 Distribution of cold load in typical day in hottest month

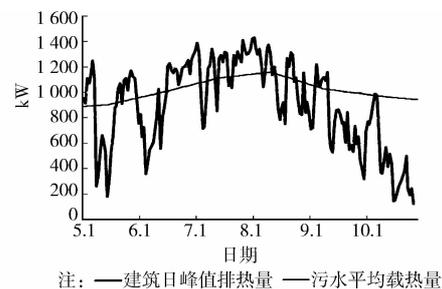


图 5 5月—10月建筑日峰值排热量与污水平均载热量分布图

Fig. 5 Distribution of peak cold load in building and the mean heat carried by sewage from May to October

从图 5 可以看出夏季峰值冷负荷波动较大,最大值仅出现在七八月的某几天,大部分时间的空调负荷都远小于最大负荷,将所有峰值负荷进行统计得出低于最大负荷的 80% 的天数高达总天数的 70%。图 4 显示最热月典型日(8月3日)空调负荷最大值出现在下午 15:00 左右,此时人员密度较大,室外温度较高导致新风负荷也较大。从负荷波动的角度可以看出,峰谷差异可以达到 3 倍;另外,当日 60% 以上的时间空调的部分负荷率都低于 80%,由此可见,空调负荷在制冷季及一天内大都处于部分负荷状态。

3 供需侧动态匹配

污水流量、温度是动态变化的,因此夏季使用空调时污水能够承载的建筑排热量也是动态变化的。重庆地区夏季污水温度为 20~25℃,污水日温度变化约为 1~2℃,污水温度在短期内基本稳定,完全满足热泵机组冷却温度要求。由式(3)计算污水动态载热量

$$Q_1 = C \times G \times \Delta T \quad (3)$$

其中: G 为夏季污水动态流量, m^3/h ; Q_1 为夏季污水动态载热量, kW; ΔT 为污水取水侧水温差(本文

取为 5°C), $^{\circ}\text{C}$ 。

由式(4)计算建筑动态排热量

$$Q_2 = Q \times (E + 1) / E \quad (4)$$

其中: Q 为建筑动态冷负荷, kW ; Q_2 为建筑动态排热量, kW ; E 为热泵机组制冷性能系数, kW/kW 。

以往的污水源热泵工程项目通常是静态分析污水最不利流量是否能满足建筑最大负荷的要求, 很多工程往往因为污水流量偏小而限制污水的热能利用。本文将 5 月—10 月建筑日最大排热量与污水的平均载热量绘制成曲线, 如图 5。

建筑日峰值排热量与污水平均载热量的相对大小取决于污水汇流量的多少和建筑的规模; 但从图 5 中可以看出建筑日峰值排热量波动性较大, 波峰和波谷相差达 7 倍, 而污水平均载热量波动性较小, 波峰和波谷相差仅 1.3 倍; 6 月末 7 月初日污水平均流量相对于建筑峰值负荷最小, 可以认为全年污水最不利流量出现在该时段。从 6 月末到 7 月初这几天中选取能代表这几天建筑负荷变化规律的某天作为污水最不利日, 将该典型日污水动态载热量 B 与建筑动态排热量 A 绘制成曲线, 如图 6

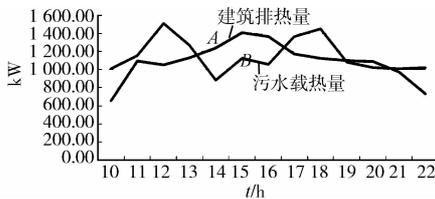


图 6 7 月 1 日建筑排热量与污水载热量分布图
Fig. 6 Distribution of building cold load and heat carried by sewage in July 1

图 6 中污水最不利流量不满足建筑负荷要求, 但全天污水量累加可以满足全天建筑负荷要求, 此时可增设污水蓄水池或采用蓄能技术进行移峰填谷, 以解决污水不能满足建筑负荷要求这一问题。但采用蓄水池缓解供需冷量差异时, 首先要解决蓄水量的问题, 蓄水池通常占据较大的用地, 在实际工程应用中较难实现^[18]。因此, 大多数工程往往结合常规的能源方式, 构建污水源热泵与常规空调的复合式系统, 以解决污水可利用冷热能和建筑冷热负荷需求在时间和数量上不匹配的矛盾, 提高能源综合利用效率。

污水源热泵复合式系统的形式根据不同的分类方法, 可以分成多种类别。若以辅助系统的复合形式来分, 包括并联和串联两种类型, 而并联与串联的位置可以在冷热源侧, 也可以在负荷侧; 若按照辅助系统冷热源的形式, 则包括传统的冷却塔, 以及其他

可再生能源^[19-20]。本文采用的复合式系统形式见图 7。

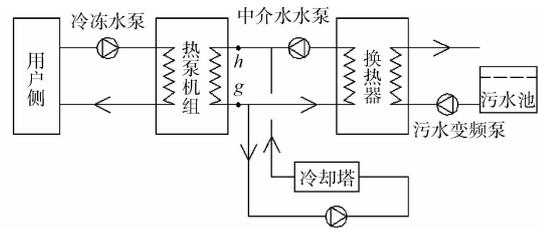


图 7 污水源热泵复合式系统原理图
Fig. 7 Schematic diagram of sewage source heat pump hybrid system

图 7 中污水泵抽水流量不能大于流入污水池内的流量, 除非污水池的容积较大或者提前蓄水, 否则污水池很容易被抽空。本文采用液位控制变频技术实现污水池内液位保持在一定高度, 污水变频泵的最大流量由污水源热泵系统容量大小确定, 当流入污水池的流量高于变频泵最大流量时开启污水池上方的溢流口, 实现污水变频泵的流量变化规律和管网实际产生的污水流量变化规律一致, 这样可以提高污水取水侧的可靠性。

污水源热泵复合式系统应用的关键是确定负荷分担系数, 即对既有的建筑物, 为了使系统更加高效的运行, 在设计阶段确定污水源热泵承担多少负荷, 常规系统承担多少负荷。冷却塔系统作为辅助系统, 其主要作用有两方面, 一是调峰作用; 二是代替污水源热泵系统为末端供冷; 因为污水取水侧污水流量的变化规律和污水干渠内污水流量变化是一致的, 当建筑负荷很小而此时污水干渠内污水流量很大时, 会导致取水侧污水浪费、取水能耗增高, 此时只开启冷却塔系统(建筑负荷低在一定程度上能说明室外温度也较低, 冷却塔换热更有优势)。

负荷分担原则: 1) 污水源热泵系统和常规系统的最大载热量之和必须大于或等于建筑最大排热量: $Q_L + Q_w \geq \max(A)$; 2) 冷却塔系统要满足调峰的作用, 其最大载热量必须大于或者等于污水载热量相对于建筑排热量的最大差值: $Q_L \geq \max(A - B)$; 3) 冷却塔代替污水源热泵系统为末端供冷; 根据文献对夏热冬冷地区 IPLV 系数的统计, 25% 满负荷工况的时间达到 18%, 此时建筑负荷较小, 但是存在时间又不是很短, 单独开启冷却塔具有一定的节能优势。根据上述原则可以综合确定 75% 负荷由污水水源热泵提供, 在冷却塔容量能够满足使用要求低的前提下其余 25% 负荷由冷却塔散热系统提供。

其中: Q_L 为冷却塔最大载热量; Q_W 为污水源热泵系统最大载热量; A 为建筑动态排热量; B 为污水动态载热量。

复合式系统的控制策略: 液位控制变频调节实现污水取水流量和污水实际流量一致, 一般水源热泵机组可利用水源温差为 $4\sim 5\text{ }^\circ\text{C}$, 当中介水供回水温差 $\Delta T_{g,h}$ 超过 $5\text{ }^\circ\text{C}$, 说明污水载热能力不足, 同时开启冷却塔; 当中介水温差 $\Delta T_{g,h}$ 低于某一温度 T_{\min} , 说明建筑负荷低, 而污水流量大, 污水取水浪费; 如果冷却塔的换热量能满足在此温差下污水的最大载热量, 此时关闭污水取水系统, 只开启辅助冷却塔系统; 经统计夏季污水流量并结合污水源热泵和冷却塔的容量最终确定 T_{\min} 为 $1.67\text{ }^\circ\text{C}$; 当中介水供回水温差介于 $1.67\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 则只开启污水源热泵系统。本文考虑了常态下污水流量不足时城市污水与城市建筑负荷之间的供需匹配。对于城市污水有可能出现的断流等应急情况, 需要另行确定冷却塔容量。

4 结论

1) 为了最大程度地利用城市污水的低位热能, 应该基于动态思想分析污水载热量与建筑排热量之间的关系。本文以某商场为例, 将模拟得到的建筑负荷转换成建筑侧的排热量, 并与某三级污水管网中的污水载热量进行对比分析, 找出了最不利流量及其与建筑需求侧的差额。

2) 构建了污水源热泵复合式系统, 提出了复合式分担系统的原则及控制策略, 综合确定了污水源热泵系统的容量和辅助冷却塔系统的容量, 并通过合理控制常规系统的启停提高能源综合利用效率, 使污水源热泵系统同时满足节能、可靠的双重要求。

参考文献:

- [1] 黄翔, 刘月琴. 间接式污水源热泵系统换热器的设计[J]. 暖通空调, 2011, 41(12): 111-113.
Huang X, Liu Y Q. Design of heat exchanger for indirect sewage-source heat pump systems [J]. HV&AC, 2011, 41(12): 111-113.
- [2] 李成龙, 王成端, 蔡世涛. 塑料换热器的污垢生长特性研究[J]. 制冷与空调, 2010, 24(4): 27-30.
Li C L, Wang C D, Cai S T. Study on the growth characteristics of fouling in the plastic heat exchanger [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2010, 24(4): 27-30. (in Chinese)
- [3] 肖红侠, 孙德兴, 赵明明. 非清洁水源热泵系统换热器除污方法研究[J]. 节能技术, 2007, 25(6): 525-528.
- Xiao H X, Sun D X, Zhao M M. The research on removing fouling methods of the heat exchanger of sewage heat pump system [J]. Energy Conservation Technology, 2007, 25(6): 525-528. (in Chinese)
- [4] 庄兆意, 商贤波, 张承虎, 等. 以污水厂出水为热源的直接式热泵系统技术经济分析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(2): 24-29.
Zhuang Z Y, Shang X B, Zhang C H, et al. Technical and economic analysis of direct sewage heat pump system using effluent from stp as heat source [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(2): 24-29. (in Chinese)
- [5] Torio H, Schmidt. Development of system concepts for improving the performance of a waste heat district heating network with exergy analysis [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(10): 1601-1609.
- [6] 赵晓文. 基于干渠直接取水的污水源热泵系统及首端过滤装置的应用实例[J]. 暖通空调, 2013, 43(7): 52-55.
Zhao X W. Application case of sewage source heat pump system based on direct water intake from trunk sewer and the head end filtration unit [J]. HV & AC, 2013, 43(7): 52-55. (in Chinese)
- [7] 齐杰, 钱剑峰, 姚伟君. 原生污水源热泵在商业建筑中的设计研究[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2011, 27(2): 241-243.
Qi J, Qian J F, Yao W J. Design of sewage water heat pump system in commercial buildings [J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition, 2011, 27(2): 241-243. (in Chinese)
- [8] 尹军, 韦新东. 我国主要城市污水中可利用热能状况初探[J]. 中国给水排水, 2001, 17(4): 27-30.
Yin J, Wei X D. Exploring of heat utilization in swage in main cities of China [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(4): 27-30. (in Chinese)
- [9] 杨灵艳, 朱清宇, 路宾, 等. 污水源热泵中心能源站设计研究[J]. 暖通空调, 2012, 42(4): 31-34.
Yang L Y, Zhu Q Y, Lu B, et al. Design of central energy station with sewage source heat pump [J]. HV & AC, 2012, 42(4): 31-34. (in Chinese)
- [10] 林真国, 王长青, 张素云, 等. 某水疗会所利用污水热泵供冷供热的可行性分析[J]. 中国给水排水, 2010, 26(1): 101-104.
Lin Z G, Wang C Q, Zhang S Y, et al. Feasibility analysis of sewage-source heat pump system for cooling and heating in a club SPA [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(1): 101-104. (in Chinese)
- [11] Cipolla S S, Maglionico M. Heat recovery from urban wastewater: Analysis of the variability of flow rate and temperature [J]. Energy and Buildings, 2014, 69(0):

- 122-130.
- [12] 林真国. 城市生活污水冷热资源建筑应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [13] 刘兴昌. 市政工程规划[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [14] 周志仁,谭洪卫,王恩丞. 酒店热水用水规律与热泵热回收系统设计[J]. 建筑节能,2009,37(1):27-30.
Zhou Z R, Tan H W, Wang E C. Study on the use law of domestic hot water in hotel and design of heat pump heat recovery system [J]. Heating Ventilation & Equipment, 2009, 37(1): 27-30. (in Chinese)
- [15] Zhao X L, Fu L, Zhang S G, et al. Study of the performance of an urban original source heat pump system [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(4): 765-770.
- [16] Tian L, Chen X D, Yang Q P, et al. Effect of silica dioxide particles on the evolution of biofouling by *Bacillus subtilis* in plate heat exchangers relevant to a heat pump system used with treated sewage [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 188(0): 47-56.
- [17] 王树健. 重庆市大型商场建筑能耗调研与能耗模拟[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [18] 黄磊. 污水厂二级出水用于污水源热泵系统几个问题的探讨[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [19] 白雪莲. 水源热泵复合式系统的应用[J]. 制冷与空调, 2011, 25(6): 553-557.
Bai X L. Application of hybrid water source heat pump system [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 25(6): 553-557.
- [20] 刘义成. 水源热泵复合式系统的优化匹配和运行调控[D]. 重庆:重庆大学,2011.

(编辑 胡 玲)

(上接第 28 页)

- [9] 杨洪兴,吕琳,娄承芝,等. 典型气象年和典型代表年的选择及其对建筑能耗的影响[J]. 暖通空调, 2005, 35(1): 130-133.
Yang H X, Lyu L, Lou C Z, et al. Selections of typical meteorological year and example weather year and their effects on building energy consumption [J]. HV & AC, 2005, 35(1): 130-133. (in Chinese)
- [10] 刘加平. 建筑物理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [11] 刘大龙. 区域气候预测与建筑能耗演化规律研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.
- [12] 刘大龙,刘加平,杨柳,等. 气候变化下建筑能耗模拟气象数据研究[J]. 土木与环境工程, 2012, 34(2): 110-114.
Liu D L, Liu J P, Yang L, et al. Analysis on Simulation meteorological data under climate change [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(2): 110-114. (in Chinese)
- [13] 杨柳,李昌华,刘加平. 典型气象年生成方法及原始气象数据质量分析[J]. 气象科技, 2006. 34(5): 596-599.
Yang L, Li C H, Liu J P. Generating method of typical meteorological years and quality analysis of raw meteorological data [J]. Meteorological Science and Technology, 2006, 34(5): 596-599. (in Chinese)
- [14] 刘大龙,刘加平,杨柳. 建筑能耗计算方法综述[J]. 暖通空调, 2013, 43(1): 95-99.
Liu D L, Liu J P, Yang L. Review of building energy consumption calculation [J]. HV & AC, 2013, 43(1): 95-99. (in Chinese)
- [15] GB 50189—2005. 公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [16] Energy Plus, United States Department of Energy. Energy Plus Energy Simulation Software [EB/OL]. <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>.

(编辑 胡 玲)