

区域供冷系统二次管网的 优化设计^{*}

华南理工大学 康英姿[★] 华 贲

摘要 分析了区域供冷系统二次管网的优化设计方法,建立了管径非连续变化的区域供冷系统二次管网的优化设计模型,并提出了求解方法。在对某区域供冷系统二次管网工程实例进行优化的基础上,进一步分析了传统设计与优化设计方法下二次管网经济性的差异。结果表明,优化设计方法通过权衡二次管网的初投资与二次系的运行费用,使得二次管网在整个寿命周期内经济性较优;相对于经济流速分别取 0.8, 1.8, 2.5m/s 时假设流速法的计算结果,采用优化设计方法可分别节省寿命周期费用 14.3%, 16.2%, 39.9%。

关键词 二次管网 优化设计 初投资 运行费用

Optimal design of secondary piping network in district cooling systems

By Kang Yingzi[★] and Hua Ben

Abstract Analyses the optimal design method, develops the optimal design model of the secondary piping network, which covers the discontinuous change in pipe diameter, and presents the solving method. Based on optimization of an actual case, analyses the economic difference of conventional and optimal design method. It is concluded that the life cycle cost of secondary piping network can be reduced by optimal design via weighing the initial investment of the secondary piping network and the power consumption of secondary chilled water pumps. Comparing with the calculating results of conventional design method with economical flow velocity of 0.8, 1.8, 2.5m/s, optimal design method can save life cycle cost by 14.3%, 16.2%, 39.9% respectively.

Keywords secondary piping network, optimal design, initial investment, operating cost

[★] South China University of Technology, Guangzhou, China

①

1 概述

区域供冷系统的二次管网是区域供冷站内平衡管与区域供冷站外各冷用户之间的冷水管路,其作用为将区域供冷站生产出来的冷水输送至各用户,并将经过换热后的冷水回水由各用户输送回制冷站。

相对于常规的集中空调系统,区域供冷系统多出了从区域供冷站到各用户的冷水二次管网。冷水二次管网投资与二次泵运行能耗对整个区域供

冷系统的经济性影响很大。目前,一些建成的区域供冷项目出现了由于二次管网的投资与二次泵能耗过大,而导致区域供冷系统的供冷成本较高,用户怨声载道的现象。因此,在区域供冷系统中,二次管网的设计具有十分重要的地位。

①☆ 康英姿,女,1970年11月生,博士,讲师

510641 广东省广州市天河区五山路华南理工大学机械与汽车工程学院汽车研究所热能与动力工程教研室

(020) 87113614

E-mail: yzkang@scut.edu.cn

收稿日期:2009-03-23

修回日期:2009-08-27

^{*} “十一五”国家科技支撑计划重大项目资助(编号:2006BAJ03A06)

关于区域供冷系统的冷水输送系统,目前已经有进行了相关的研究^[1-7]。文献[8]关于区域供冷(热)系统优化设计的研究也涉及冷水输送管网的优化。对于拓扑结构一定、用户冷负荷已知的冷水二次管网,确定冷水供回水温度后,输送的冷水量将随之确定。二次管网各管段冷水量一定的情况下,各管段管径越小,管网的投资越小,但二次管网总阻力越大,二次泵能耗越高。因此,必然存在一个最优的二次管网系统,使得二次管网的初投资与二次泵运行费用综合最优。本文将对冷水二次管网的优化设计进行分析与研究。

2 区域供冷系统二次管网的优化设计

对拓扑结构一定、用户冷负荷已知、冷水供回水温度确定的区域供冷系统冷水二次管网进行设计的任务是确定各管段的管径以及二次泵的流量、扬程。区域供冷系统冷水二次管网优化设计的目标是其经济性最优。本文采用寿命周期费用作为二次管网经济性的评价指标。对于冷水二次管网在整个寿命周期内发生的费用主要考虑二次管网的投资、二次泵投资、二次泵的运行费用,其他费用在本文中暂不考虑。

2.1 二次管网优化设计的数学模型

2.1.1 目标函数^[9]

对区域供冷系统冷水二次管网进行设计优化的目标是使其寿命周期费用最小

$$\min LCC_{\text{pipe}} = C_{\text{inv, pipe}} + C_{\text{inv, pu}} + C_{\text{op, pu}}\beta \quad (1)$$

式中 LCC_{pipe} 为二次管网的寿命周期费用,元; $C_{\text{inv, pipe}}$ 为二次管网的投资,元; $C_{\text{inv, pu}}$ 为二次泵的投资,元; $C_{\text{op, pu}}$ 为二次泵的年运行电费,元/a; β 为等额多次分付现值系数。

2.1.1.1 二次管网的投资

二次管网的投资主要考虑由区域供冷站内冷水系统的平衡管至各用户建筑入口之间的冷水供、回水管道的投资。

区域供冷系统二次管网的供、回水管道可采用直埋和管沟敷设两种方式。直埋敷设占地少,投资低,且随着直埋管道以及管件制造和施工技术的提高,管网发生故障的概率很小,因此,国内外正在运行的区域供冷系统的冷水输配管网大多采用直埋敷设方式。本文按直埋敷设方式对二次管网的投资进行分析。

直埋式冷水二次管网的投资主要由两部分组成:直埋管的价格;直埋管的施工费用。

1) 直埋管的价格

单位长度直埋管的价格通常可以表示为其工作钢管内径 d 的函数。一般可以依据厂家的价格拟合成为如下公式

$$C_{\text{pipe}} = a_0 + a_1 d + a_2 d^2 \quad (2)$$

式中 C_{pipe} 为单位长度内径为 d 的直埋管的价格,元/m; $a_0 \sim a_2$ 为系数,可依据厂家的价格拟合得到。

2) 直埋管的施工费用

直埋管施工费用的主要影响因素为直埋管的管径,通常也可以表示为直埋管内径 d 的函数。可依据实际工程中直埋管的施工造价,拟合出单位长度的直埋管的施工费用

$$C_{\text{ps}} = b_0 + b_1 d + b_2 d^2 \quad (3)$$

式中 C_{ps} 为单位长度内径为 d 的直埋管的施工费用,元/m; $b_0 \sim b_2$ 为拟合系数。

3) 冷水二次管网的投资

冷水二次管网的投资为所有不同规格(共 p 种不同的管径)的供、回水干管的价格与施工费用之和,即

$$C_{\text{inv, pipe}} = \sum_{j=1}^p [(C_{\text{pipe}, j} + C_{\text{ps}, j})l_j] \quad (4)$$

式中 $C_{\text{pipe}, j}$, $C_{\text{ps}, j}$ 分别为单位长度内径为 d_j 的直埋管的价格及施工费用,元/m; l_j 为内径为 d_j 的直埋管总长度, m。

2.1.1.2 冷水二次泵的投资

冷水二次泵的设计流量与扬程分别等于设计工况下二次管网的总流量与总阻力。根据设计流量与扬程,结合厂家的性能曲线,对冷水二次泵进行选型,并进一步依据此选型结果选定与二次泵对应的变频调速装置。

冷水二次泵的投资包括水泵与变频调速装置两部分的费用,其计算公式如下

$$C_{\text{inv, pu}} = \mu_{\text{pu}} \sum_{i \in PUSE} [C_{\text{pu}}(i) + C_{\text{VFD}}(i)] \quad (5)$$

式中 μ_{pu} 为冷水二次泵的投资系数,指运输安装费用; $PUSE$ 为冷水二次泵的集合; $C_{\text{pu}}(i)$ 为第 i 台冷水二次泵的价格,按式(6)计算,元; $C_{\text{VFD}}(i)$ 为第 i 台冷水二次泵对应的变频调速装置的价格,按式(7)计算,元。

$$C_{pu}(i) = c_0 W_{pu0}(i) + c_1 \quad (6)$$

式中 c_0, c_1 为系数, 可依据水泵生产厂家的价格拟合得到; $W_{pu0}(i)$ 为第 i 台水泵的额定功率, kW。

$$C_{VFD}(i) = e_0 W_{pu0}(i) + e_1 \quad (7)$$

式中 e_0, e_1 为系数, 可依据变频调速装置的价格拟合得到。

2.1.1.3 冷水二次泵的運行電費

冷水二次泵在不同的供冷负荷下, 其实际运行功率是变化的。本文二次泵变流量采用定末端压差控制方式。定末端压差控制方式下, 某一时刻二次泵的实际流量可通过该时刻的冷负荷、冷水供回水温差计算出来; 二次泵的实际扬程与运行功率可

$$p_{total,k} = (S_{B1} + S_{A1'})L_k^2 + (S_{12} + S_{1'2'})(L_k - L_{1,k})^2 + (S_{23} + S_{2'3'})(L_k - L_{1,k} - L_{2,k})^2 + \dots + (S_{(n-1)C} + S_{(n-1)'D})L_{n,k}^2 + \Delta H_D \quad (8)$$

式中 $p_{total,k}$ 为 k 时刻二次管网的总阻力, Pa; $S_{B1}, \dots, S_{(n-1)'D}$ 为供回水干管上对应管段的阻抗, kg/m^7 ; $L_{1,k}, L_{2,k}, \dots, L_{n,k}$ 为 k 时刻各用户的流量, m^3/s ; L_k 为 k 时刻二次管网的总流量, m^3/s ; ΔH_D 为最不利用户支路的阻力损失, 即控制压差, Pa。

各管段的局部阻力按其摩擦阻力的 20% 考虑, 则冷水二次管网供回水干管上各管段的阻抗 S_j 可按式(9)计算:

$$S_j = 1.2 \times \frac{8\rho\lambda_j l_j}{\pi^2 d_j^5} = 1.056 \times \frac{\rho J^{0.25} l_j}{\pi^2 d_j^{5.25}} \quad (9)$$

式中 ρ 为冷水密度, kg/m^3 ; λ_j 为内径为 d_j 的直埋管的摩擦阻力系数; J 为管道的绝对粗糙度, m。

定末端压差控制方式下, 二次泵的实际运行功率的计算公式如下

$$W_{pu,k} = \frac{L_k p_{total,k}}{\eta_k} \quad (10)$$

式中 η_k 为 k 时刻二次泵的效率。

冷水二次泵在第 d 天 k 时刻总电功率为

$$W_{pu}(d,k) = \sum_{i \in \text{PUSE}} z_{pu}(d,k,i) W_{pu}(d,k,i) \quad (11)$$

式中 $W_{pu}(d,k)$ 为冷水二次泵在第 d 天 k 时刻的总运行电耗, kW; $z_{pu}(d,k,i)$ 为第 i 台冷水二次泵在第 d 天 k 时刻的启停状态, 开启时其值为 1, 停机时其值为 0; $W_{pu}(d,k,i)$ 为第 i 台冷水一次泵在第 d 天 k 时刻的运行功率, kW。

整个供冷季节, 冷水二次泵的运行电费为

$$C_{op,pu} = \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^{24} W_{pu}(d,k) c_e \quad (12)$$

依据文献[10]的方法确定, 只是在区域供冷二次管网中用户不是建筑物内的某一空调末端而是整个用冷建筑物。

对于图 1 所示的冷水二次管网, 实际运行工况

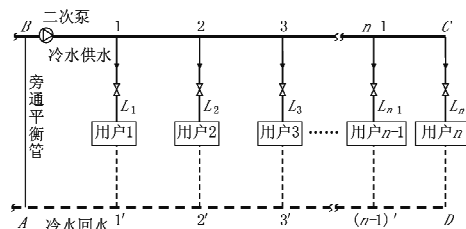


图 1 冷水二次管网布置图

下, 最不利环路的总阻力可按下式计算

式中 D 为整个供冷季节的供冷时间, d; c_e 为电价, 元/(kWh)。

2.1.2 约束条件

1) 各管道的内径应符合钢管标准管径系列的内径值, 即

$$d_j \in M \quad (13)$$

式中 M 为钢管的标准管径系列对应的内径的集合。

2) 各管段的设计流速 $\leq 3.5 \text{ m/s}$ (当冷水的流速超过 3 m/s 时, 将对管道和阀件内部产生严重的冲刷腐蚀^[11]。考虑到二次管网大部分时间运行在部分负荷下, 其内部各管道的实际流速在绝大部分运行时间低于设计流速。因此将各管段的最大设计流速提高到 3.5 m/s), 即

$$\frac{4L_{p0,j}}{\pi d_j^2} \leq 3.5 \quad (14)$$

式中 $L_{p0,j}$ 为各管段的设计流量, m^3/s 。

2.2 求解方法

区域供冷系统二次管网的优化设计模型为带约束的非连续、多变量非线性优化问题。本文采用“穷举法”对该优化模型进行求解, 求解框图如图 2 所示。笔者在 MATLAB 软件环境中编制了区域供冷二次管网的优化设计程序。

3 实例

3.1 项目概况

广州某区域供冷系统的二次管网, 其拓扑结构如图 3 所示, 各管段的长度列于表 1 中, 二次管网冷水的供回水温度为 $5^\circ\text{C}/15^\circ\text{C}$ 。区域供冷系统的供冷时间为 3—11 月, 共 9 个月 (275 d)。电价

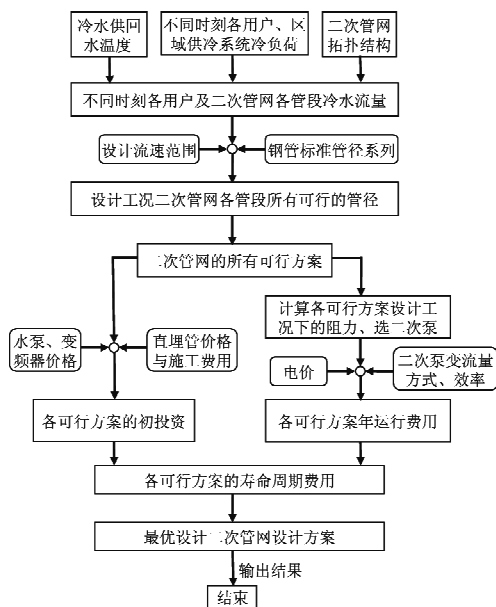


图2 求解框图

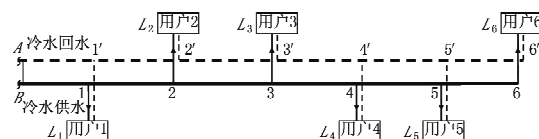


图3 某区域供冷系统的二次管网的拓扑结构

表1 二次管网各管段长度

干管管段	长度/m	支管管段	长度/m
A1' (或 B1)	240	11'	40
1'2' (或 12)	255	22'	50
2'3' (或 23)	322	33'	46
3'4' (或 34)	305	44'	52
4'5' (或 45)	285	55'	38
5'6' (或 56)	215	66'	30

按 0.93 元/(kWh) 计算。区域供冷系统设计日最大小时冷负荷及该时刻各用户的冷负荷详见表 2。为了减少计算的工作量,将整个供冷季节区域供冷系统以及各用户的冷负荷的变化规律简化为两个典型日:夏季平均日(5—10 月,共 184 d)与过渡季平均日(3,4,11 月,共 91 d)。从 DeST 能耗分析软件计算出的各用户的全年动态冷负荷数据中统计出各用户以及区域供冷系统在夏季以及过渡季平均日逐时冷负荷结果,详见图 4,5。

表2 区域供冷系统设计日最大冷负荷及同一时刻各用户的冷负荷

用户名	冷负荷/kW	用户名	冷负荷/kW
区域供冷系统	40 913	用户 4	8 756
用户 1	5 064	用户 5	5 526
用户 2	7 697	用户 6	7 333
用户 3	6 536		

注:最大冷负荷出现时刻为 17:00。

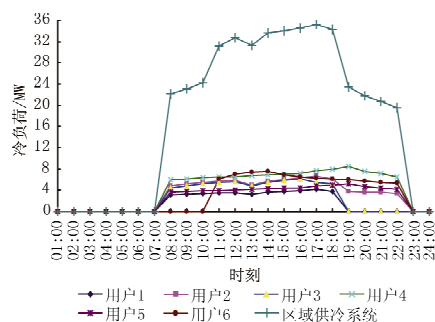


图4 用户及区域供冷系统夏季平均日逐时冷负荷

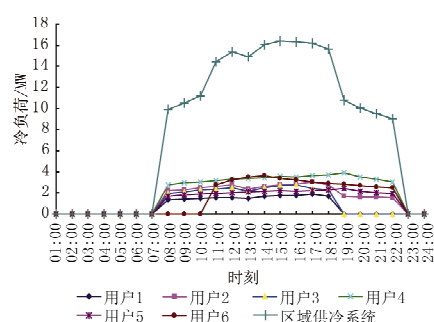


图5 用户及区域供冷系统过渡季平均日逐时冷负荷

3.2 二次管网系统相关参数的选定

1) 二次泵的台数与变流量控制方式

拟选 1 台大泵,1 台小泵,在[50%,100%]设计流量范围内仅大泵运行,在[25%,50%)设计流量范围内仅小泵运行。二次泵变流量采用定末端压差控制方式,2 台泵运行时的效率均取 0.7。为了减少二次泵的运行费用,在不同的季节,末端压差 ΔH 取值不同:夏季, $\Delta H=78.4$ kPa;过渡季, $\Delta H=58.8$ kPa。

2) 其他参数

① 基准折现率取 10%,寿命周期为 20 a,则等额多次分付现值系数 $\beta=8.5136$;

② 标准管径系列如表 3 所示,所有规格管道的绝对粗糙度均取 $J=0.0002$ m。

表3 钢管标准管径系列 mm

内径	对应外径	内径	对应外径	内径	对应外径
1 196	1 220	515	529	207	219
1 000	1 020	464	478	150	159
900	920	412	426	131	140
800	820	363	377	106	114
704	720	311	325	80.5	88.5
614	630	261	273	68	75.5

③ 冷水二次泵的投资系数 $\mu_{pu}=1.1$,水泵价格、变频调速装置价格、直埋管价格以及直埋管的

施工费用依据当前各厂家的销售价格及工程造价进行计算,拟合后的计算公式如下:

水泵价格 $C_{pu} = 1700.8 W_{pu0} + 19861$,变频调速装置价格 $C_{VFD} = 492.97 W_{pu0} + 1157.4$,单位长度直埋管价格 $C_{pipe} = 10.863 + 1917.3d + 1339.2d^2$,单位长度直埋管施工费用 $C_{ps} = 11.459 + 208.89d + 717.12d^2$ 。

3.3 区域供冷系统二次管网优化设计结果与分析

3.3.1 优化设计结果

利用 MATLAB 编制的区域供冷优化设计程序对该二次管网进行优化设计,结果如下。

1) 管道部分

各管段的管径如表 4 所示。

表 4 二次管网各管段管径优化结果

干管管段	内径/mm	支管管段	内径/mm
A1' (或 B1)	800	11'	261
1'2' (或 12)	704	22'	261
2'3' (或 23)	704	33'	261
3'4' (或 34)	614	44'	311
4'5' (或 45)	515	55'	261
5'6' (或 56)	464	66'	464

冷水二次管网的投资 $C_{inv,pipe} = 746.06$ 万元。

2) 二次泵部分

大泵:设计流量 $0.9772 \text{ m}^3/\text{s}$,扬程 21 m ,额定功率 292.91 kW 。

小泵:设计流量 $0.4886 \text{ m}^3/\text{s}$,扬程 9 m ,额定功率 63.98 kW 。

二次泵投资(包括泵及对应的变频调速装置) $C_{inv,pu} = 90.75$ 万元。

二次泵的年运行费用 $C_{op,pu} = 42.80$ 万元。

寿命周期内二次泵总运行费用现值: $C_{op,pu} \cdot \beta = 364.41$ 万元。

3) 寿命周期总费用

冷水二次管网的寿命周期总费用 $LCC_{pipe} = 1201.20$ 万元。

3.3.2 优化设计结果分析

依据前面的优化结果,可计算出二次管网的各部分费用在寿命周期总费用中所占的比例,结果如下。

冷水二次管网的投资是二次管网系统寿命周期内最主要的费用,高达 62.11% ;其次是二次泵的总运行费用,占 30.34% ;而二次泵投资所占的比例最小,仅为 7.55% 。因此,区域供冷系统中

二次管网优化设计的主要任务是通过权衡管网的投资与系统阻力,来确定系统内各管段的最佳管径,使得二次管网的运行费用维持在合理的水平,以达到二次管网的寿命周期费用最小的目的。

3.4 区域供冷系统二次管网优化设计结果与传统设计方法的对比

冷水系统在已知拓扑结构和各管段流量时,传统的设计方法为假设流速法。假设流速法是依据工程经验选取一个经济流速,然后按此经济流速计算最不利环路上各管段的管径,并依据标准管径系列的管径间隔,初步确定各管段的管径;最后对整个冷水系统进行水力计算,对部分管段的管径进行调整,最终确定各管道的管径;同时确定水泵的扬程、流量。图 6,7 为经济流速分别取 $0.8, 1.8, 2.5 \text{ m/s}$ 时,采用假设流速法对实例中的二次管网进行设计的结果与优化设计结果的对比。

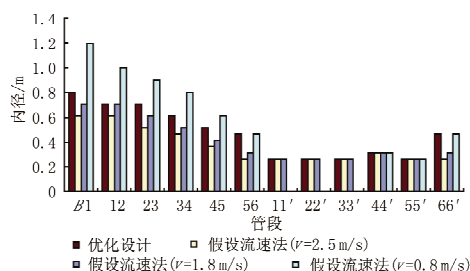


图 6 两种设计方法中各管段的管径

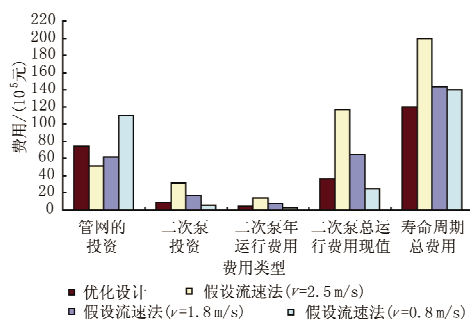


图 7 两种设计方法中各种费用的对比

从图 6 与图 7 可知,采用假设流速法设计二次管网时,经济流速取较大值(如 2.5 m/s)时,二次管网的供、回水干管的管径较小,故管网投资较小,但是二次泵的总运行费用很高;相对于优化设计,经济流速较大时,管网部分因管径减小而节省的投资小于因流速较大导致的二次泵总

运行费用的增加,因此,经济流速为 2.5m/s 时假设流速法设计的二次管网的寿命周期费用大于优化设计的二次管网的寿命周期费用。而当假设流速法取较小的经济流速(如 0.8m/s)时,虽然可以降低二次泵的扬程,减少二次泵的总运行费用,但二次管网的供、回水干管的管径增大,管网投资增加;相对于优化设计,二次泵总运行费用的节省小于管网部分增加的投资,所以,经济流速为 0.8m/s 时假设流速法设计的二次管网的寿命周期费用仍然大于优化设计的二次管网的寿命周期费用。

对于同一个区域供冷系统的二次管网,采用优化设计方法要比传统的假设流速设计方法节省寿命周期费用,经济上具有优势。相对于经济流速分别取 $0.8, 1.8, 2.5\text{m/s}$ 时的假设流速法,采用优化设计方法可分别节省寿命周期费用 14.3% , 16.2% , 39.9% ,通过优化设计,二次管网的经济性得到很大的提高。

4 二次管网的优化设计对区域供冷系统综合效率与经济性的影响

区域供冷系统的综合效率是其供冷量与总能耗之比。区域供冷系统的总能耗包括制冷机组、冷却塔、冷却水泵、冷水一次泵、二次管网的冷水二次泵的能耗。其中二次泵的能耗对区域供冷系统的综合效率有较大影响,也是区域供冷系统是否节能的关键。

二次管网的投资对整个区域供冷系统的投资影响较大,尤其在二次管网设计不当时,将会成为导致区域供冷系统初投资过大的主要因素。

因此,二次管网的优化设计不仅能避免二次泵能耗过大或因二次管网设计的先天不足而导致的初投资过大等问题,使区域供冷系统的综合效率维持在一个合理的水平,并能通过初投资的综合权衡,实现其经济性最优,保证区域供冷系统经济、节能、环保优势的充分发挥。

5 结论

5.1 优化设计方法比传统的假设流速设计方法具有经济优势。在本文实例中,相对于经济流速分别取 $0.8, 1.8, 2.5\text{m/s}$ 时的假设流速法,采用优化设计方法可分别节省寿命周期费用 14.3% , 16.2% , 39.9% ,二次管网的经济性得到很大的提高。

5.2 对于区域供冷系统的二次管网,由于其复杂性与输送距离较远,应采用优化设计方法进行设计,不能采取常规的设计方法。

二次管网的优化设计能使区域供冷系统的综合效率维持在一个合理的水平,最终实现经济最优。本文提出的区域供冷系统中冷水二次管网优化设计方法、编制的优化设计程序,是整个区域供冷系统优化设计中一个重要的组成部分,本文的研究为区域供冷系统优势的充分发挥、规模的扩大提供了技术手段。

参考文献:

- [1] 刘金平,陈志勤. 区域供冷系统枝状冷水输送管网的优化设计[J]. 暖通空调, 2006, 36(7): 18-22
- [2] 刘金平,杜艳国,陈志勤. 区域供冷系统中冷冻水输送管线的优化设计[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2004, 32(10): 28-31
- [3] Porter R W. Economic distribution distance for cogenerated district heating and cooling [J]. Energy, 1985, 10(7): 851-859
- [4] 冯小平,邓波,龙惟定. 基于单亲遗传算法的区域供冷系统管网的布置优化[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2008, 40(1): 142-147
- [5] Chan A L S, Hanby Vic I, Chow T T. Optimization of distribution piping network in district cooling system using genetic algorithm with local search [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(10): 2622-2629
- [6] 龚明启,冀兆良. 区域供冷(热)水管网系统的经济性分析与评价[J]. 广州大学学报:自然科学版, 2005, 4(5): 470-474
- [7] Soderman J. Optimisation of structure and operation of district cooling networks in urban regions [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(16): 2665-2676
- [8] 蔡龙俊,胡立蛟. 区域供冷/热系统的优化设计[J]. 暖通空调, 2008, 38(1): 93-95
- [9] 康英姿. 区域供冷系统集成建模与优化设计[D]. 广州:华南理工大学, 2008
- [10] 王寒栋. 中央空调冷冻水泵变频调速运行特性研究(2):模拟与分析[J]. 制冷, 2003, 22(3): 4-10
- [11] 潘云钢. 高层民用建筑空调设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1999