

区域供冷系统枝状冷水输送管网的优化设计^{*}

华南理工大学 刘金平[☆] 陈志勤

摘要 在各并联管路压力损失相等的条件下建立了优化设计模型,其目标函数为系统的年度费用,由冷水泵的年运行费用、冷水泵的折旧费用、管道的折旧和维修费用及输水管道冷量损失费用组成。通过实例计算,得到以下结论:区域供冷系统冷水管路的设计不能按传统的等比摩阻或等流速设计思想进行;采用优化模型比等流速设计年度总费用约减少 17%,具有明显的经济效益;若采用等流速设计,各节点的压降偏差较大,会增加运行调节的困难,容易产生水力失稳,既不利于系统的稳定运行,又增大了运行费用。

关键词 区域供冷系统 枝状管网 优化设计 年度费用

Optimal design for tree-shaped chilled water pipe network in district cooling systems

By Liu Jinping[★] and Chen Zhiqin

Abstract Develops an optimal design model on condition that the pressure drops of each parallel connection loop are equal. The objective function of the model is the annual costs of the system, including annual operating costs and depreciation costs of chilled water pumps, depreciation and maintenance costs of pipeline, and costs of chiller power consumption rising from cold loss through chilled water pipe wall. By a case study, obtains the following results: the tree-shaped chilled water pipe network in district cooling systems should not be designed by equal specific frictional resistance or by equal velocity; the annual costs of the system obtained by the optimal model decrease by 17% than those by the equal velocity model and the economical benefit is remarkable; the differences of pressure drop of each segment pipeline are considerable by the equal velocity model, then the adjustment of the system is difficult and the pressure stabilization is destroyed easily, and the annual costs of the system increases.

Keywords district cooling system, tree-shaped pipe network, optimal design, annual cost

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

①

0 引言

区域供冷系统在日本爱知世博会^[1]和我国上海浦东国际机场^[2]的实际应用,为研究和设计人员认识其优点和避免可能的失误提供了参考实例。由于区域供冷系统的供冷量大、供冷距离长,冷水二次泵及冷水输送管线的投资和能耗费用大,对系统投资和运行费用有显著影响,目前大多数区域供

冷管网的设计仍然是根据规范选定各管段的比摩阻^[3],或选择比摩阻不超过 40 Pa/m^[4],或选择管道的经济比摩阻在 40~80 Pa/m 之间^[5],这样设

①[☆] 刘金平,男,1962年6月生,博士研究生,副教授
510640 广州华南理工大学电力学院
(020) 87112182 (0) 13501546214
E-mail: mpjpliu@scut.edu.cn

收稿日期:2004-09-23

一次修回:2005-04-06

二次修回:2006-05-19

计的结果不能保证管网的经济性最佳,因此有必要对其进行研究。文献[6]提出了针对区域供水输配系统的管径参数选择的“均匀性”设计方法,其原则是经济性与可靠性并重,从技术角度进行经济性分析,结果证实与传统的“最优比摩阻”设计相比,只要相应地调整初投资比例,就可以在保持初投资不变的情况下节省大量的运行费用。

本文以经济效益最优为目标,针对拓扑结构和冷水流量已知的枝状冷水输送管网建立了优化设计模型,通过实例计算,分析比较了优化模型与等流速设计在比摩阻、经济效益及节点的压降偏差等方面的不同,为管网的整体优化提供理论依据。

1 优化模型的建立

区域供冷系统枝状冷水输送管网一般具有拓扑结构已知,端点冷负荷已知,即冷水流量已知,但各管段的长度和流量各不相同的特点。而根据《全国民用建筑工程设计技术措施 暖通空调·动力》[7]第6.7.7条水力计算规定,空调水系统应进行水力计算,各并联管路压力损失差额不应大于15%。因此应在各并联管路压力损失相等的条件下建立区域供冷系统枝状冷水输送管网的优化设计模型。根据区域供冷系统的工作原理和热经济学原理,考虑变负荷特性,在冷水二次泵及单一冷水输送管线的优化设计模型[8]基础上,借鉴流量已分配的供水管网的优化计算方法[9]及供热管网优化计算方法[10-11],枝状冷水输送管网的优化设计以经济效益最优为判据,即以冷水系统的年度费用最小为优化目标。冷水系统的年度费用由四部分组成:冷水泵的年运行费用、冷水泵的折旧费用、管道的折旧和维修费用、输水管道冷量损失费用(水泵功耗导致水温升高而产生的费用只占总费用的2%[7],在此忽略不计)。

本文所讨论的区域供冷系统是在中央制冷站制取冷水,冷水沿管路由泵输送到用户,然后再返回制冷系统。在设计时若选用较大的冷水流速,则可以减小输送管路的直径,减少设备的初投资;但冷水流速增大会导致流动阻力增大,水泵的功耗增大,故存在最佳的输水速度和输水管径。

1.1 目标函数[8]

1.1.1 管道的折旧和维修费用

冷水的输送管线有两种埋设方式:直埋式和管沟式。对于直埋式管道,其输送管线的投资由管

道、保温材料、保护材料和直埋土建造价四部分构成。根据实际工程的造价,拟合出单位长度管道各部分费用与管道直径的函数关系,管道的年折旧和维护费用为

$$\Delta C_p = \sum_{i \in L} \beta_p [C_p \pi \delta_i \rho (a_1 d_i + b_1) + C_{th} \pi \delta_{ti} (a_2 d_i + \delta_{ti} + b_2) + C_{pr} \pi \delta_{ti} (a_2 d_i + \delta_{ti} + b_2) + c_{\infty} \pi (d_i + 2\delta_i + 2\delta_{ti})] \frac{l_i}{10\,000} \quad (1)$$

式中 ΔC_p 为管道的年折旧和维护费用,万元/a; L 为管网中所有管段的集合; β_p 为管道的年折旧费率; C_p 为钢管价格,元/t; δ 为管壁厚度, m; ρ 为钢管密度, t/m³; a_1, b_1, a_2, b_2 均为拟合因数, $a_1 = 1.019\,9, b_1 = 0.001\,42, a_2 = 1.039\,8, b_2 = 0.002\,84$; d 为输水管内径, m; C_{th} 为保温材料价格,元/m³; δ_{ti} 为冷水管保温层的厚度, m; C_{pr} 为保护层材料价格,元/m²; c_{∞} 为土建费用拟合系数,元/(a·m²); l 为冷水输送管段长度, m。

1.1.2 冷水泵的折旧费用

冷水泵的耗电功率为

$$P_{pu} = \frac{\Delta p Q_v}{\eta} \quad (2)$$

式中 P_{pu} 为冷水泵的耗电功率, W; Δp 为冷水管线总阻力损失, Pa; Q_v 为冷水的体积流量, m³/s; η 为水泵效率, 本文取 0.65。

冷水泵的价格可简化为设计功率的线性函数,根据有关生产厂家提供的数据可拟合出下式:

$$c_{pu} = A_1 + B_1 P_{pu0} = A_1 + B_1 A_2 P_{pu} \quad (3)$$

式中 c_{pu} 为冷水泵的价格, 万元; P_{pu0} 为水泵设计功率, kW; A_1, B_1 为拟合系数; A_2 为水泵设计功率的冗余值。

水泵的年折旧费用为

$$\Delta C_{pu} = \beta_{pu} c_{pu} \quad (4)$$

式中 ΔC_{pu} 为水泵的年折旧费用, 万元/a; β_{pu} 为水泵的年折旧费率。

1.1.3 冷水泵的年运行费用

水泵的年运行费用(即年耗电费)为

$$C_{pu} = P_{pu} \tau c_e \times 10^{-7} \quad (5)$$

式中 C_{pu} 为水泵的年运行费用(年耗电费), 万元/a; τ 为水泵的年运行时间, h/a; c_e 为电价, 元/(kWh)。

1.1.4 输水管道冷量损失费用

输水管道冷量损失为

$$\Delta Q = \sum_{i \in L} \frac{2\pi\lambda_i\tau_0}{\ln \frac{d_i + 2\delta_i + 2\delta_{ii}}{d_i + 2\delta_i}} (2t_s - t_{cs} - t_{cr}) \quad (6)$$

式中 ΔQ 为输水管道冷量损失, W; λ 为保温材料的导热系数, W/(m·°C); τ_0 为供冷系统总的运行时间, h; t_s 为输水管道外土壤平均温度, °C; t_{cs} 为输水管道内冷水供水平均温度, °C; t_{cr} 为输水管道内冷水回水平均温度, °C。

输水管道冷量损失折算为耗电量损失费用为

$$C_{\Delta Q} = \frac{c_e \Delta Q}{10^7 \times COP_s} \quad (7)$$

式中 $C_{\Delta Q}$ 为输水管道冷量损失费用, 万元/a; COP_s 为系统的 COP 值。

1.1.5 优化模型的目标函数

目标函数为冷水系统的年度费用, 即

$$C_t = C_{pu} + \Delta C_{pu} + \Delta C_p + C_{\Delta Q} \quad (8)$$

式中 C_t 为冷水系统的年度费用, 万元/a。

1.2 约束条件

根据基尔霍夫第二定律, 对任何一个节点, 从该节点至末端节点即最终用户间, 沿不同管线计算的压降损失应相等, 即

$$\sum_{m \in M_3} \Delta p_m = \sum_{n \in M_4} \Delta p_n \quad (9)$$

式中 M_3, M_4 分别为任一节点至末端节点管段左侧支路管段和右侧支路管段的集合。

1.3 优化模型的求解

本文所建立的模型中的优化变量为各管段冷水流速 u_i 和保温层厚度 δ_{ii} 。该模型的求解为有约束的多变量线性优化问题, 利用 Microsoft Excel 的“规划求解”宏程序, 即可进行本问题的优化计算, 得出相应的计算结果。

2 实例计算

以广州地区某区域供冷系统为例, 进行计算分析, 其拓扑结构见图 1, 主要参数: 供回水温度为 3

°C/13 °C, 冷水总流量为 4 210 m³/h。优化模型中的系数及相应经济性参数见表 1, 末端节点的流量见表 2。各管段的流量及不同电价时各管段的沿程阻力损失比摩阻计算结果见表 3, 不同电价时等流速设计与本文模型的优化设计结果效益比较见表 4。按等流速设计在不同流速时计算得出的各节点的压降偏差, 即由末端至同一节点由不同路径计算得出的压降差值, 见表 5。

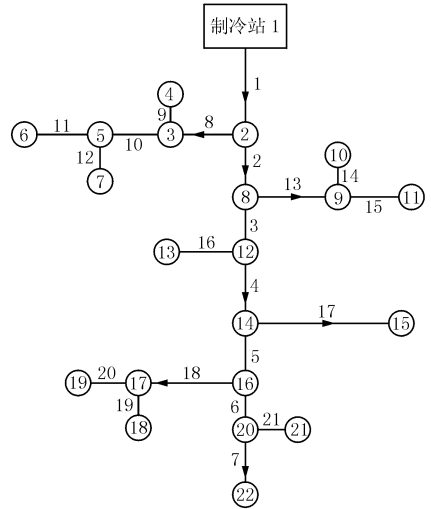


图 1 某区域供冷系统冷水管网的拓扑结构

表 1 优化模型中的系数及相应经济性参数

名称	数值	名称	数值
ρ /(kg/m ³)	1 000	t_{cs} /°C	3
C_p /(元/t)	6 500	t_{cr} /°C	13
C_{th} /(元/m ³)	680	t_s /°C	25
C_{pr} /(元/m ²)	25	COP_s	4.2
c_{es} /(元/(a·m ²))	96.4	η	0.65
A_1	12.54	β_p	0.15
B_1	0.395	β_{pu}	0.1
A_2	1.38	τ /h	2 000

表 2 各端部节点的流量

端部节点	4	6	7	10	11	13	15	18	19	21	22
流量/(m ³ /h)	150	260	420	450	580	350	400	470	520	260	350

表 3 不同电价时各管段的沿程阻力损失比摩阻计算结果

管段编号	长度/m	流量/(m ³ /h)	电价 0.6 元/(kWh)			电价 0.8 元/(kWh)			电价 1.0 元/(kWh)		
			管内径/m	流速/(m/s)	比摩阻/(Pa/m)	管内径/m	流速/(m/s)	比摩阻/(Pa/m)	管内径/m	流速/(m/s)	比摩阻/(Pa/m)
1	221	4 210	0.821	2.21	43.6	0.845	2.09	37.5	0.865	1.99	33.2
2	83	3 380	0.757	2.09	43.2	0.778	1.97	37.2	0.797	1.88	32.9
3	170	2 350	0.670	1.85	39.5	0.689	1.75	34.0	0.706	1.67	30.1
4	150	2 000	0.639	1.73	36.7	0.657	1.64	31.7	0.673	1.56	28.0
5	75	1 600	0.574	1.72	41.4	0.590	1.63	35.7	0.604	1.55	31.6
6	70	610	0.339	1.87	94.7	0.349	1.77	81.5	0.357	1.69	72.4
7	67	350	0.217	2.63	324.6	0.223	2.49	281.4	0.228	2.38	249.9

续表

管段编号	长度/m	流量/ (m ³ /h)	电价 0.6 元/(kWh)			电价 0.8 元/(kWh)			电价 1.0 元/(kWh)		
			管内径/m	流速/ (m/s)	比摩阻/ (Pa/m)	管内径/m	流速/ (m/s)	比摩阻/ (Pa/m)	管内径/m	流速/ (m/s)	比摩阻/ (Pa/m)
8	100	830	0.388	1.95	86.7	0.399	1.84	74.7	0.409	1.76	66.2
9	296	150	0.189	1.49	123.8	0.194	1.41	107.1	0.199	1.34	95.0
10	284	680	0.353	1.93	95.7	0.363	1.83	82.8	0.371	1.75	73.4
11	135	260	0.260	1.36	70.1	0.267	1.29	60.5	0.273	1.23	53.8
12	30	420	0.234	2.71	315.4	0.241	2.56	272.1	0.246	2.45	242.0
13	104	1 030	0.401	2.27	112.8	0.412	2.14	97.2	0.422	2.05	86.1
14	200	450	0.277	2.08	150.8	0.284	1.97	130.4	0.291	1.88	115.8
15	236	580	0.314	2.08	127.8	0.323	1.96	110.5	0.331	1.88	98.1
16	80	350	0.205	2.96	443.2	0.210	2.80	383.1	0.215	2.67	340.1
17	689	400	0.335	1.26	43.8	0.344	1.20	37.9	0.352	1.14	33.6
18	392	990	0.489	1.46	36.6	0.503	1.38	31.6	0.515	1.32	28.1
19	380	470	0.374	1.19	33.8	0.384	1.13	29.3	0.393	1.08	26.1
20	200	520	0.344	1.56	64.3	0.353	1.47	55.7	0.361	1.41	49.5
21	300	260	0.260	1.36	69.5	0.267	1.29	60.2	0.273	1.23	53.5

表 4 不同电价时等流速设计与优化设计经济效益比较

	电价 0.6 元/(kWh)		电价 0.8 元/(kWh)		电价 1.0 元/(kWh)	
	优化设计	等流速设计	优化设计	等流速设计	优化设计	等流速设计
平均流速/(m/s)		1.90		1.78		1.70
总阻力损失/Pa	65 469.2	133 835.7	56 518.2	112 770.7	50 100.8	99 947.6
水泵的设计扬程/m	8.02	16.39	6.92	13.81	6.13	12.24
冷水泵的总功耗/kW	117.8	240.8	101.7	202.9	90.1	179.8
冷水泵的年耗电量/(MWh)	236	482	203	406	180	360
冷水泵的耗电费用/(万元/a)	14.1	28.9	16.3	32.5	18.0	36.0
冷水泵的投资费用/万元	68.4	126.7	60.7	108.7	55.3	97.8
冷水泵的折旧费/(万元/a)	6.8	12.7	6.1	10.9	5.5	9.8
输水管道冷量损失费用/(万元/a)	10.3	9.5	12.5	13.0	14.5	16.6
总的冷水管路的投资费用/万元	412.3	390.1	439.7	409.9	463.6	424.7
冷水管路的折旧费用/(万元/a)	61.8	58.5	65.9	61.5	69.5	63.7
总的年度费用/(万元/a)	93.1	109.6	100.8	117.8	107.6	126.0
等流速设计比优化设计的总年度费用增加百分数/%		17.72		16.87		17.10

表 5 等流速设计计算得到的各节点的压降偏差(水力平衡比较) Pa

节点编号	流速 1.90 m/s	流速 1.78 m/s	流速 1.70 m/s
5	22 637.7	19 074.6	16 905.6
3	25 436.9	21 433.3	18 996.1
20	-49 053.4	-41 332.7	-36 632.7
17	-26 656.0	-22 460.5	-19 906.5
16	18 340.1	15 453.5	13 696.3
14	-14 019.4	-11 812.8	-10 469.6
12	-100 741.0	-84 884.9	-75 232.6
9	197.3	166.3	147.4
8	85 174.6	71 768.6	63 607.8
2	-32 535.8	-27 414.8	-24 297.5

3 计算结果分析

3.1 从表 3 可知,在各并联管路压力损失相等时,以冷水系统的年度费用最小为优化目标进行设计,

由于各管段的流量和长度各不相同,各管段的比摩阻各不相同且相差很大,在 25~450 Pa/m 范围内变化,比《全国民用建筑工程设计技术措施 暖通空调·动力》规定的“冷水管路比摩阻宜控制在 100~300 Pa/m”的变化范围更大,且流速也不相等,即区域供冷系统冷水管路的优化设计不宜按传统的等比摩阻或等流速设计思想进行。优化的比摩阻随电价的升高而减小。

3.2 从表 4 可知,采用本文的优化模型所得结果比等流速设计总的年度费用约减少 17%,具有明显的经济效益。

3.3 从表 5 可知,若采用等流速设计,各节点的压降偏差较大,而压降偏差过大,会增加运行调节的困难,增大阀门的节流损失,容易产生水力失稳,既不利于系统的稳定运行,又增大了运行费用。

3.4 由于实际可选用的管径是非连续变化的,还需将所得到的优化管径圆整到实际可选用的管径,这样会使实际设计与计算结果产生些许误差。

4 结语

区域供冷系统冷水管网的设计不宜按传统的等比摩阻或等流速设计思想进行,应根据当时当地的经济数据进行优化设计,以体现区域供冷技术的先进性,促进其健康发展。

参考文献

- [1] 范存养,许雷,李小平. 日本爱知世博会的空调供能和环境技术[J]. 暖通空调, 2006,36(1):91-100
- [2] 刘传聚,陆琼文,李伟业,等. 区域供冷系统经济运行研究及实践——浦东国际机场区域供冷系统经济运行研究总结[J]. 能源技术, 2005, 26(2): 81-83
- [3] 韩晓红,邹平华,陈光明. 多热源环状热网的水力计算与事故工况分析[J]. 煤气与热力, 2004, 24(6): 307-311
- [4] 王魁吉,孙玉庆. 多热源环网供热技术[J]. 暖通空

调, 2002,32(6):83-86

- [5] 高明亮,宋玲. 青源热力站及供热管网改造设计[J]. 暖通空调, 2004,34(1):36-38
- [6] 龚明启,冀兆良,苏宇贵. 区域供水输配系统的“均匀性”设计与评价[J]. 中国给水排水, 2005, 21(7): 57-60
- [7] 建设部工程质量安全监督与行业发展司,中国建筑标准设计研究所. 全国民用建筑工程设计技术措施 暖通空调·动力[M]. 北京:中国计划出版社, 2003
- [8] 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, 2004, 32(10):28-31
- [9] 赵洪宾. 给水管网系统理论与分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003:219-225
- [10] 王志国,马一太,卢苇,等. 供热系统优化规划方法研究[J]. 暖通空调, 2003, 33(1):2-4
- [11] 李祥立,王晓霞,周志刚,等. 枝状供热管网水力工况模拟分析[J]. 煤气与热力, 2004, 24(10):554-557

· 封面广告说明 ·

美意 (上海) 空调设备有限公司

美国美意(Mammoth Inc.)创立于 1935 年,总部位于美国明尼苏达州,隶属于年销售额 200 亿人民币的 Nortek 集团公司。

集团拥有十大空调品牌系列(集团新近收购两家专业制造洁净设备厂家),以领先科技及专业品质,根据全球用户在不同应用领域的需求提供量身定制的各类空调产品,并以这一创新模式始终雄居这一领域的领导者地位。

美意中央空调产品涉及专业领域及通用领域,包括:水源/水环/地源热泵、商用空调、AHU、VAV、恒温恒湿机、洁净设备、冷水机组等。至今,美国本土和海外已拥有 18 家工厂,并在世界各地设有分公司或代理机构,全球拥有员工逾万名。

10 大系列品牌,分别在美国、英国、加拿大、中国设有研发和生产基地。集团采用目前最为先进的 DFT 生产管理系,将市场预测、客户个性化需求、产品研发、采购、制造、测试、物流、服务等纳入整套系统管理。凭籍雄厚的研发及制造实力,为全球用户提供最贴切需求的空调产品。

如今,美意(Mammoth)以独资身份投资千万美金,以美意(中国)有限公司为载体,精选集团优势产品,整合于 Mammoth 品牌旗下,全面进军中国中央空调市场,并在上海和浙江设立生产基地,专为中国用户量身定制各类先进节能中央空调产品。

美意(Mammoth)不仅将代表行业领导地位的美意水源/水环/地源热泵空调形式及专业空气处理机引入中国,并首次在中国中央空调市场推行其全球一贯的“专业空调、量身定制”的产品及营销概念。

中国区总公司:美意(上海)空调设备有限公司

地址:上海市延安西路 777 号裕丰国际大厦 8 楼

网站:www.mammothchina.com

电话:86-21-51097778

传真:86-21-62253611

电邮:mammoth@mammothchina.com