

济南奥林匹克体育中心室外 暖通管线优化设计计算

山东同圆设计集团有限公司 叶青★ 赵文武

摘要 介绍了该工程的室外暖通管线设计,并对区域供冷系统经济运行、热力管网敷设的应力进行了详细的分析计算,进一步验证了相关文献给出的空调冷水管线的经济比摩阻。

关键词 奥体中心 区域供冷 直埋管 应力计算

Optimization and design calculation of outdoor water pipeline in Jinan Olympic Sports Center

By Ye Qing★ and Zhao Wenwu

Abstract Presents design of this project, and performs a detailed analysis and calculation for economical operation of the district cooling system and the stress of direct buried heating water pipes, verifying the economical specific frictional resistance presented by related literatures.

Keywords Olympic Center, district cooling system, direct buried pipe, stress calculation

★ Shandong Tongyuan Design Group, Jinan, China

①

0 引言

济南奥林匹克体育中心位于济南市东部燕山新区,占地约 70 hm²,总建筑面积约为 34 万 m²,包括体育场、体育馆、游泳馆、网球中心、中心商业用房及地下车库等。在功能上将满足 11 届全国运动会和世界单项比赛的要求,并在设计上充分考虑赛后营运的灵活性,使其既能够满足举办大型文艺演出、展览和商业服务功能,又能成为济南市文化活动和群众健身中心及商业、文化、体育、休闲娱乐的基地和场所。

笔者对该体育中心的室外冷水、热力管线进行优化分析和设计计算,结合现场实际情况提出管线敷设方式及经济运行方式。

1 室外暖通管线工程概况

1.1 奥体中心冷热源及场馆冷热负荷分布情况

本场区冷源由能源中心提供,采用水蓄冷方式,供回水温度为 3.5℃/12.5℃。蓄冷水量共 9 000 m³,蓄冷能力为 89.7 MWh (25 500 rth)。制冷机房设置 4 台 3 269 kW (930 rt)冷水机组,2 台冷水机组串联运行。冷水系统采用二次泵形式,

一次泵为定流量,满足冷水机组制冷及蓄冷罐蓄冷时的流量,二次泵为变流量,满足二次侧负荷的变化,通过末端换热站压差控制改变流量,以达到节能的目的。关于冷源的可行性研究,在济南奥体中心场馆工程项目分部文件《济南奥体场馆能源中心论证会会议纪要》中进行了详细论述。热源由市政热力管线供给,经场区室外热力管线输送至各场馆换热站,供回水温度为 150℃/70℃。非供暖季节的生活热水及泳池池水加热,由 4 台 0.9 MW 燃气热水锅炉提供 90℃/70℃的热水。

奥体中心各场馆冷热负荷分布如表 1 所示。

计入生活热水和泳池加热负荷后,奥体中心总冷负荷为 27.9 MW,总热负荷为 26.7 MW。对赛时和赛后运营进行分析,考虑季节和各场馆的同时使用系数,负荷配置按总负荷的 70%设计。

①★ 叶青,女,1983 年 11 月生,硕士研究生,助理工程师,注册公用设备工程师

250101 山东省济南市高新区舜华路 2000 号舜泰广场 11 号楼山东同圆设计集团有限公司

(0531) 66775735

E-mail: yeqing1983@sina.com

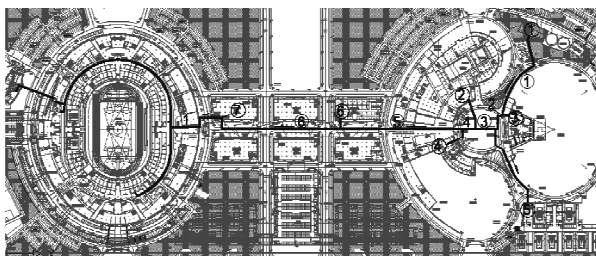
收稿日期:2008-09-03

表 1 场馆冷热负荷分布

	空调总冷负荷/kW	空调热负荷/kW
体育场	9 741	7 945
体育馆	6 812	6 007
游泳馆	4 509	3 895
网球中心	2 704	2 325
商业中心区	3 630	2 760.5
网球半决赛场	110	123
体育场训练场	440	290
合计	27 946	23 345.5

1.2 室外暖通管线的布置

济南奥体中心室外暖通管线分 3 类: 冷水管线、热力管线、生活热水管线, 冷热水管线采用四管制, 生活热水管线采用两管制敷设。冷水管线从能源中心分配至各场馆的换热站, 枝状布置(见图 1)。能源中心至中心商业的西区部分末端管线采用直埋敷设, 管线在建筑内上翻(自点⑦起), 体育场管线在中心区环形道顶部架空敷设。直埋冷水管线总长约 2 150 m, 最大管径 DN600。



① 能源中心制冷站 ② 游泳馆换热站 ③ 体育馆换热站
④ 网球中心换热站 ⑤ 网球半决赛中心换热站 ⑥ 中心区换热站

图 1 室外空调冷水管线走向图

室外热力管线的走向见图 2。从市政热力 DN800 管道(图示⑧)上东、西向各引入 DN300, DN200 的热力管线, 东、西区各引入口设热力计量等装置。热力管线引至各场馆的换热站, 枝状布置。东区热力管线采用直埋敷设, 西区管线直埋敷设, 在建筑内(自点⑦起)上翻, 体育场管线在环形道顶部架空敷设, 直至检录处。热力管线与冷水管

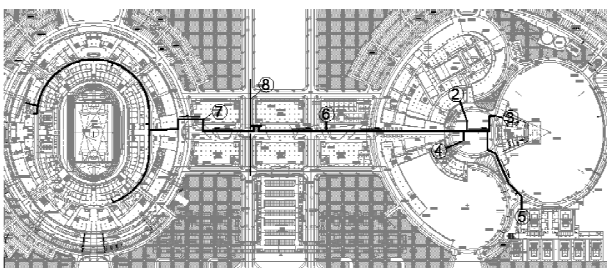


图 2 室外热力管线走向图

线平行敷设。直埋热力管线供回水温度为 150 ℃/70 ℃, 管线总长约 2 000 m, 最大管径 DN300。

生活热水管线为部分场馆提供夏季用热水, 从能源中心分配至各场馆的换热站, 直埋敷设至游泳馆、体育馆, 枝状布置。直埋生活热水供回水温度为 90 ℃/70 ℃。管线总长约 640 m, 最大管径 DN300。此段管线温度不高、距离短, 本文不作进一步介绍。

2 奥体中心区域供冷系统

2.1 区域供冷系统

区域供冷系统在日本爱知世博会^[1](制冷能力 40.27 MW (11 450 rt))和我国上海浦东国际机场^[2]、北京中关村(制冷能力一期 28.14 MW (8 000 rt), 二期 158.27 MW (45 000 rt))、广州大学城(制冷能力 372.8 MW (106 000 rt))^[3]、深圳大学城(制冷能力 28.14 MW (8 000 rt))等大型工程中的实际应用, 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。

2.2 奥体中心室外空调冷水管网

如图 1 所示, 室外空调冷水管网为双管异程, 呈枝状分布。通过各节点分支用户入口处压差控制装置和能源中心自控监测执行装置, 实现系统变流量调节。采用大温差(供回水温度 3.5 ℃/12.5 ℃)输送, 减小输送管线管径, 降低水泵功率, 从而减少了管网和水泵的初投资和运行成本。采用合理的保温措施, 管网设计温升考虑为 0.5 ℃。

2.3 冷水管线直埋的可行性分析

室外保温管道敷设可采用架空敷设、地沟敷设、直埋敷设。架空敷设势必影响场区的美观, 而体育中心东区大部分区域为岩石地段, 采用地沟敷设会大大增加施工成本和维护管理难度, 因此本工程中采用了工艺简单且工艺成熟的聚氨酯直埋管道。

根据文献^[1]管采用高密度聚乙烯外护管聚氨酯泡沫塑料预制直埋保温管, 可输送连续工作温度不高于 120 ℃, 偶然峰值温度不高于 140 ℃, 工作压力不大于 2.5 MPa 的介质。直埋式预制保温管是由憎水不燃型聚氨酯硬质泡沫保温层和高密度聚乙烯外护管紧密结合的预制管, 保温层采用发泡工艺使其和外套管紧密结合在一起。因管道直埋, 保温管道直接承受土壤及地面活荷载和地下潮气及地下水侵蚀, 因此保温直埋管在防水、防腐及机械强度等方面性能都要求较高。但因其工程综合

造价较低,施工简便,和地沟敷设相比,节约土石方工程量、砖砌混凝土工程量,施工工期缩短一半以上。实际直埋保温管道不仅保温效果好,综合造价低,而且在严格要求施工的情况下,保温管经 6 a 实物解剖分析和人工老化试验证实使用寿命在 15 a 以上,而地沟敷设保温管易潮,保温材料岩棉或离心棉一般 3~5 a 需更换一次。由此可看出,聚氨酯直埋保温管道在保温性能、初投资、施工条件、维护工作量及日常运行费上均有较大优势。

2.4 枝状冷水输送管网的优化设计

冷水输送系统采用变频调速泵进行调节,在末端冷负荷变化时,通过调节冷水泵的流量,保证供水温度和回水温度不变。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,降低设备的初投资;但冷水流速增大会导致流动阻力增大即水泵的能耗增大,故存在最佳的输配速度和输配管径。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。

本文在文献[2]建立的冷水流量已知的枝状冷水输送管网优化数据模型基础上,以济南奥体中心室外冷水管线为计算实例,分析比较了优化模型与等温降设计在比摩阻、经济效益及节点的压降偏差等方面的不同,为该管网的整体优化提供理论依据。

2.4.1 目标函数及约束条件

优化模型的目标函数为系统的年度费用,由水泵的年耗电费用、输送管线的投资、水泵的投资、输水管道冷量损失费用、水泵功耗导致的冷水温升的费用五部分组成^[2]。

约束条件为系统的总冷负荷,即

$$Q_0 = \frac{1}{4} \pi d^2 \rho v_0 c_p \frac{\theta_{\text{chr}} - \theta_{\text{chs}}}{\zeta} \quad (1)$$

式中 d 为管段内径, m; ρ 为冷水密度, kg/m^3 ; U_0 为管中冷水流速, m/s ; c_p 为冷水比热容, $\text{kJ}/$

$(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; θ_{chr} 为设计工况冷水回水温度, $^\circ\text{C}$; θ_{chs} 为设计工况冷水供水温度, $^\circ\text{C}$; ζ 为冷水温度备用系数。

考虑到长距离冷量输送调节的滞后性,输送的冷水温度有较大的备用,即在用户侧负荷增加时可通过调节二次泵的流量满足用户侧负荷增加的要求,取 $\zeta = 1.2$,系统中的优化变量为冷水流速 v_0 。

2.4.2 优化模型的求解

本文所建立模型中的优化变量为各管段冷水流速 v_0 。该模型的求解为有约束的多变量线性优化问题,结合优化模型中的系数及相应的经济性参数^[2],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。优化模型中的系数及相应的经济性参数见表 2,各端部节点的流量见表 3。

表 2 优化模型中的系数及相应经济性参数^[5]

名称	数值	名称	数值	名称	数值	名称	数值
γ	7 800	c_{con}	96.4	θ_s	25	θ_{chs}	3.5
c	4.18	t_{cs}	3	λ	0.06	θ_{chr}	12.5
c_p	7 500	t_{cr}	13	A_1	12.54	β_p	0.15
c_{th}	680	t_s	25	B_1	0.395	β_{pu}	0.1
c_{pr}	25	COP_s	4.2	A_2	1.38	η	0.65

注: γ 为钢管密度, kg/m^3 ; c_{con} 为管道土建费用拟合系数, $\text{元}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; θ_s 为输水管道外土壤的平均温度, $^\circ\text{C}$; θ_{chs} 为设计工况冷水供水温度, $^\circ\text{C}$; c 为水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; t_{cs} 为冷水供水始端温度(考虑 0.5°C 温升), $^\circ\text{C}$; λ 为保温材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; θ_{chr} 为设计工况冷水回水温度, $^\circ\text{C}$; c_p 为钢管价格, $\text{元}/\text{t}$; t_{cr} 为冷水回水末端温度(考虑 0.5°C), $^\circ\text{C}$; β_p 为管道的年折旧费率; c_{th} 为保温材料的价格, $\text{元}/\text{m}^3$; A_1 , B_1 为水泵投资的拟合系数; β_{pu} 为水泵的年折旧费率; c_{pr} 为保护层材料的价格, $\text{元}/\text{m}^2$; COP_s 为系统的 COP 值; A_2 为水泵设计功率的冗余值; η 为水泵效率,为简化计算在本文中取 $\eta = 0.65$ 。

表 3 各端部节点的流量

节点编号	2	3	4	5	6	7
流量/ (m^3/h)	430.86	650.92	258.382	10.51	346.867	972.851

根据济南市 2008 年 6 月 10 日最新峰谷平段电价政策,在系统运行时间内的平均电价为 $0.906 \text{ 元}/(\text{kWh})$ 。计算得出在表 4 管径流速下,冷水系统的运行年度费用值最小。

表 4 分时各电价下各管段管径、流速及比摩阻

管段编号	长度/m	流量/ (m^3/h)	电价 0.679 元/(kWh)			电价 0.906 元/(kWh)			电价 1.154 3 元/(kWh)		
			管径/ m	流速/ (m/s)	比摩阻/ (Pa/m)	管径/ m	流速/ (m/s)	比摩阻/ (Pa/m)	管径/ m	流速/ (m/s)	比摩阻/ (Pa/m)
1	190	1 869.276 9	0.635 7	1.636 8	38.819 5	0.662 6	1.506 7	31.231 5	0.686 0	1.405 5	26.023 3
2	45	1 413.629 8	0.612 1	1.335 1	27.074 7	0.637 6	1.230 4	21.853 1	0.659 4	1.150 3	18.313 7
3	45	1 406.272 0	0.612 1	1.328 1	26.793 6	0.636 7	1.227 6	21.791 4	0.658 5	1.147 7	18.262 1
4	7	1 104.670 0	0.572 0	1.194 9	23.609 2	0.595 4	1.102 8	19.125 9	0.615 7	1.031 0	16.027 1
5	20	923.802 4	0.544 2	1.103 8	21.438 6	0.566 5	1.018 7	17.366 4	0.585 9	0.952 3	14.551 5
6	275	680.995 8	0.499 9	0.964 3	18.191 9	0.520 4	0.889 8	14.734 3	0.538 2	0.831 8	12.344 5

由以上计算结果可以看出,在电价升高时,设计工况的最优水流速度降低,最优管径增大。考虑到管线初投资,本设计中采用的各管段管径如表 5 所示。在此管径下的相关参数如表 6 所示。

由以上优化设计计算结果可以看出,系统比摩阻在 45~70 Pa/m 之间,远远小于文献[3]中第 6.7.7.1 条推荐的 100~300 Pa/m 的比摩阻控制

表 5 各管段管径取值

管段 编号	长度/ m	流量/ (m ³ /h)	管内径/ m	公称直径/ mm	流速/ (m/s)	比摩阻/ (Pa/m)
1	190	1 869.276 9	0.616	600	1.754 546	46.582 65
2	45	1 413.629 8	0.515	500	1.886 032	67.057 03
3	45	1 406.272 0	0.515	500	1.876 215	66.360 80
4	7	1 104.670 0	0.515	500	1.473 825	40.948 50
5	20	923.802 4	0.515	500	1.232 516	28.637 24
6	275	680.995 8	0.412	400	1.419 639	50.215 68

表 6 系统年度各项运行、折旧费用

平均流速/ (m/s)	管路沿程 阻力/Pa	水泵设计 扬程/m	冷水泵总 功耗/kW	冷水泵年耗电量/ (kWh)	冷水泵折旧费用/ (万元/a)	冷水管路折旧费用/ (万元/a)	输水管道冷量损失 费用/(万元/a)	总年度运行、折旧 费用/(万元/a)
1.6	59 046	26	109.19	22.37	17.09	13.24	0.338	53.038

注:以上运行、折旧费用仅包括室外区域供冷管网系统和冷水泵,不包括其他动力设备。

范围。参考目前投入使用的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^[4],或选择比摩阻不超过 40 Pa/m^[5],或选择管道的经济比摩阻在 40~80 Pa/m 之间^[6]。由此可见,在区域供冷系统中不宜一味按照传统的等比摩阻等流速的计算方法确定管径,应针对具体工程,在可行的情况下进行模型优化设计分析,以实现系统运行折旧费用的最小化。

3 室外热力管网系统

3.1 室外热力管线敷设方式

如图 2 所示,室外热力管网从市政管线接出 DN350 管段,分为 DN200 和 DN300 两路接往奥体中心西区、东区各场馆换热站,两侧各设热计量阀门井,管线为双管异程,呈枝状分布。市政热力管线供回水温度为 150℃/70℃,设计压力为 1.6 MPa,采用钢套钢预制直埋管道输送,保温材料为耐高温超细离心玻璃棉,工作管道采用无缝钢管。

参考已投入使用的大型热力项目的管道敷设方式,基于目前日趋成熟的多种室外热力管线施工形式,为合理降低施工难度和施工造价,采用室外热力管线直埋敷设。目前,国内直埋热水管道采用的安装方式包括明沟分段预热方式、一次性补偿器覆土预热方式、固定墩和直埋补偿器结合方式、无补偿冷安装方式等^[7]。无补偿直埋是充分利用钢材强度性能缩短施工周期、节省施工造价的一种直埋方式,对介质温度要求≤150℃,轴向引力大,管壁局部屈曲危险性大,易出现轴向失稳,且对管线的覆土深度有一定的要求。考虑到管道输送的介质温度≥120℃,此时钢材的塑性难以使管道形成自身的平衡状态,若无法对管道进行预热,且不能满足无补偿冷安装的覆土深度要求时,宜采用有补

偿直埋方式^[8],管线上需要设补偿器和固定支墩。管道在高点设放气井,低点设泄水井。

3.2 室外热力管线的设计计算

3.2.1 管道受力分析

在本工程设计中,充分利用土壤的自然补偿,并选取合理的管件加固、管网固定补偿方案避免管线受到破坏。在转角大于 60°处尽量利用弯头作自然补偿,在管线直管段上平均每隔一段距离设置一座固定支墩,每两座固定支墩之间设置一台埋地式波纹管补偿器。干管引出分支管时,在分支管上设置固定支墩。对于三通、弯头等应力比较集中的部位,优先采取加固的方式处理,例如采用大弯曲半径或壁厚增加的弯头,用大弯曲半径的曲管或多个应力集中程度小的小折角代替一个大折角,用 U 形弯管代替 15°~70°的折角或弯头,用多个逐级变化的大小头代替一个管径变化较大的大小头,使用强度特性好的钢制焊接阀门等^[9]。

3.2.2 管道应力及变形补偿计算

本工程中供热介质的供回水温度为 150℃/70℃,工作压力 $p_d=1.6$ MPa,管道工作循环最高、最低温度取 $t_1=150$ ℃, $t_2=10$ ℃,计算安装温度取 $t_0=-5$ ℃。

以东段 DN300 热力管线为例, $D_i=309$ mm,管顶覆土 1.2 m,参考文献[8],计算求得管道的理论计算壁厚 $\delta_i=3.07$ mm,选取常用壁厚 $\delta=8$ mm 满足要求, $D_0=325$ mm。计算求得管道屈服温差 $\Delta t_y=91.57$ ℃,工作温度超过屈服温差,管道进入塑性状态,需要对管道进行热补偿。 $\mu_{\max}=0.4$,最大单位长度摩擦力 $F_{\max}=9 479$ N/m,直管段最小过渡长度 $L_{\min}=133$ m; $\mu_{\min}=0.2$,最小单位长度摩擦力 $F_{\min}=4 739$ N/m,直管段最大过渡长度

$L_{\max}=266\text{ m}$ 。

为避免管线出现锚固段产生轴向压缩应力造成纵向失衡,根据场馆热力管线实际布置情况,选取固定支墩间距 $L=60\text{ m}$ 。则管线热伸缩量 $\Delta L=104.16\text{ mm}$,选用直埋型不锈钢波纹补偿器 2.5ZMWY300×8,工作压力 2.5 MPa,轴向额定补偿量 $\Delta L'=123\text{ mm}$,轴向刚度 $K=1\,111\text{ N/mm}$,有效面积 $A=1\,399\text{ cm}^2$ 。

热力管线采用有补偿直埋敷设,平均埋深 1.5 m,共设置 10 套直埋外压式波纹管补偿器、28 座直埋固定支墩。选取系统中某部分热力主管线如图 3 所示,计算固定支墩轴向力。管道对固定支架的推力包括

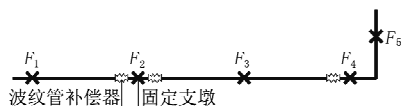


图 3 某段室外热力主管线

三个部分,管道和土壤的摩擦力 F_m 、内压产生的不平衡力 F_A 和补偿器的弹性力 F_f 。固定支架两侧管道作用力合成时,考虑两侧管道随温度循环次数的增加使摩擦力下降而造成轴向力变化的差异,选择不利情况进行作用力合成。考虑两侧管段摩擦力与补偿器弹性力抵消时,载荷较小一侧作用力乘以小于 1 的抵消系数。本工程选用抵消系数 0.7。

固定支墩 F_2 的轴向力计算: $F_2=(F_f+F_A)\times 0.3$

固定支墩 F_3 的轴向力计算: $F_3=(F_m+F_f+F_A)\times 0.3$

固定支墩 F_4 的轴向力计算: $F_4=F_f+F_A-0.7F_x$

其中 $F_A=p_dA$, $F_f=K\Delta L$, $F_m=FL$, 自然补偿段在 x 方向的弹性力 $F_x=\frac{9.8K_xCI}{L^2}$ (其中 K_x 为管形系数, $\frac{L}{H}=3$ 时, $K_x=22.3$; C 为温度综合系数, 150℃时为 0.37; I 为管道截面二次矩, 为 $10\,014\text{ cm}^4$)。

求得场区室外管网初始运行时各固定支墩的轴向推力如下:

$F_2=35.388\text{ kN}$ (即 3.611 t), $F_3=234.45\text{ kN}$ (即 23.92 t), $F_4=85.571\text{ kN}$ (即 8.73 t)。

根据各点推力计算设计混凝土固定支墩,采用现场灌注方法并在管道安装前施工。

4 结语

目前济南奥体中心室外暖通管线工程已进行调试和测试运行,在现有的设计施工调试基础上,总结如下经验,希望有助于指导类似工程的施工。

1) 室外冷水系统通过优化模型计算后,比摩阻在 45~70 Pa/m 之间,远小于文献[4]中第 6.7.7.1 条推荐的 100~300 Pa/m 的比摩阻控制范围。优化管径选取宜根据具体工程的管网分配形式具体分析计算。

2) 室外冷水系统中保温层厚度、导热系数的优化,作为系统运行成本的重要指标,有待进一步分析计算。

3) 室外高温热水系统的设计需基于安全可靠、经济合理的原则,选取有补偿直埋的敷设方式,减小工作量、缩短工期,不拘泥于埋深大小,可适用于地下管线偏多的区域。

4) 采用有补偿直埋敷设时,可利用土壤的约束作用调整过渡段长度,合理布置固定支墩,以减少补偿器数量。在两个补偿器之间的平直管段的零受力驻点,为安全起见,设小推力固定支墩。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. CJ/T 114—2002 高密度聚乙烯外护管聚氨酯泡沫塑料预制直埋保温管[S]. 北京:中国标准出版社,2003
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 唐山市热力总公司. CJJ/T 81—98 城镇直埋供热管道工程技术规程[S]. 北京:中国标准出版社,1998
- [8] 动力管道设计手册编写组. 动力管道设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2006
- [9] 王钢,贺平,吴星. 直埋敷设热力管道强度设计理论及方法[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2001,34(4): 83-86
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 邱东. 广州大学城区供冷系统[J]. 制冷空调与电力机械,2007(28): 76-79