

亚行贷款污水管理培训中心暖通空调设计

中南建筑设计院 徐 鸿[☆]

摘要 介绍了该工程的暖通空调设计,包括设计参数、冷热源、水系统、风系统与自动控制等。通过详细的方案比较确定了采用热回收型地埋管地源热泵机组作为冷热源。重点介绍了地埋管换热器的系统设计。总结了设计经验。

关键词 地埋管换热器 地源热泵系统 模拟 分析

HVAC system design for ADB-loan Waste Water Management Training Center

By Xu Hong[★]

Abstract Presents the HVAC system design, including the design parameters, water system, air system and automatic control system etc. Adopts the heat recovery-type ground-coupled heat pump units as cold and heat source based on detailed comparison among different schemes. Emphasizes the system design of ground heat exchangers. Summarizes design experiences.

Keywords ground heat exchanger, ground-source heat pump system, simulation, analysis

★ Central-south Architectural Design Institute, Wuhan, China

①

1 工程概况

亚行贷款污水管理培训中心大楼(见图 1)位于武汉市青山区武青四干道。工程总建筑面积 15 000 m²,地下 1 层,地上 15 层,建筑总高度 59.5 m。其中地下 1 层为车库、变配电房、动力中心、水泵房等;1 层为大堂、餐厅等;2~3 层为小会议室以及展厅、多功能厅等;4~9 层为培训中心客房;10~13 层为培训中心办公用房;14 层为档案室、调

度室等;15 层为职工餐厅。该工程属建筑高度超过 50 m 的一类高层公共建筑。工程所在地气候分区属夏热冬冷地区。

2 设计参数

2.1 室内主要房间设计参数(见表 1)

	温度/℃		相对湿度/%		最小新风量/ (m ³ /(人·h))
	夏季	冬季	夏季	冬季	
客房	25	22	≤60		50
餐厅	25	20	≤60		20
多功能厅	25	20	≤60		20
大堂	26	18	≤60		10
办公室	26	18	≤60		30
会议室	25	20	≤60		30
调度室	18~38		40~70		30

2.2 通风换气次数(见表 2)

3 负荷计算



图 1 亚行贷款污水管理培训中心

①☆ 徐鸿,男,1969 年 3 月生,大学,高级工程师
430071 武汉市武昌区中南二路 10 号中南建筑设计院机电二所
(027) 87336943
E-mail: hbwh-xuhong@163.com
收稿日期:2008-12-24

表 2 通风换气次数

	排风		送风	
	换气次数/h ⁻¹	方式	换气次数/h ⁻¹	方式
地下汽车库	6	机械排风	5	车道自然进风
地下变配电室	风量由热平衡计算确定	机械排风	风量由热平衡计算确定	机械送风
地下制冷机房	6	机械排风	6	机械送风
地下水泵房	6	机械排风	6	机械送风
卫生间	10~15	机械排风		自然补风

3.1 空调负荷

采用 DeST 软件进行全年动态空调负荷计算,模拟曲线见图 2,由逐时计算结果得到空调系统最大热负荷为 1 000 kW,最大冷负荷为 1 650 kW。

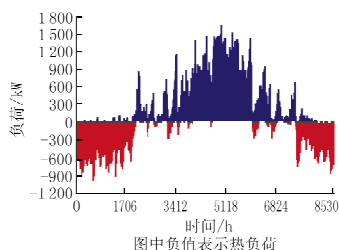


图 2 全年动态负荷计算模拟曲线

3.2 生活热水耗热量

该工程客房部分生活热水设计耗热量为 433 kW/h。

4 冷热源设计

4.1 方案比较

根据工程特点,结合相关能源供应情况,初步设计阶段提供了 3 种冷热源方案:方案 1,常规水冷螺杆冷水机组+燃气锅炉;方案 2,热回收型地埋管地源热泵机组;方案 3,污水源热泵机组。

根据武汉市二郎庙污水处理厂提供的历年污水水温统计平均值(见图 3),其 1,2,3 月份的污水平均温度基本维持在 5.7,8.2,10.2 °C,2007 年冬季水温更低。由于该污水处理厂现阶段仅达到 1B 级的处理标准,其工艺流程为:污水进水→格栅→泵房提升→曝气沉淀→计量→配水→初沉(除泥)→出水,另外该地区污水收集大多采用明渠,所以水温与环境温度较接近。一般认为冬季污水温度不低于 12 °C 时比较适合采用污水源热泵,因此,方案 3 在初步设计阶段专家评审意见为不建议采用。另外,污水处理厂即将进行大规模改造,污水的利用存在不确定性。考虑到本工程为亚行贷款项目,工期非常紧迫,业主明确表示该项目必须按时正常投入使用,所以经与业主多次沟通后,最终决定不采用方案 3。以下就方案 1、方案 2 进行初投资(空调末端投资省略)及运行费用的综合比较,结果见表 3,4,5。其中方案 2 的初投资比方案 1 增加 152.1 万元,但每年可节省的运行费用为 44.6 万元,增加投资额的静态回收期约为 3.4 a。最终采用方案 2,并通过了专家组的论证。

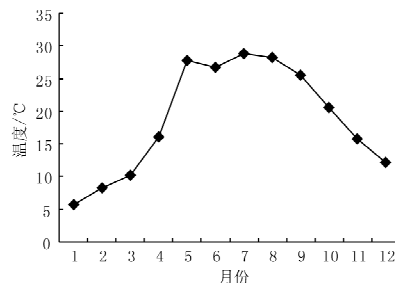


图 3 历年污水水温曲线

表 3 方案 1 设备选型及初投资费用

设备规格		数 量	单价/万元	备注
水冷螺杆冷水机组	制冷量 838 kW,功率 162 kW	2 台	45	合资
冷水泵	250 m ³ /h,28 m,37 kW	3 台	2.5	国产
冷却水泵	150 m ³ /h,28 m,22 kW	3 台	1	国产
冷却塔	250 m ³ /h,11 kW	2 台	6	合资
管道、保温及附件			50	共用
初投资小计			162.5	
天然气热水锅炉	制热量 0.7 MW,耗气量 77 m ³ /h	2 台	15	合资
供热循环水泵	90 m ³ /h,15 m,11 kW	3 台	1	国产
锅炉循环水泵	95 m ³ /h,15 m,11 kW	3 台	1	国产
烟囱及附件		1 套	6	国产
锅炉房土建造价	100 m ² ,3000 元/m ²	1	30	
天然气开户费			40	
管道、保温及附件			20	供热
初投资小计			135	
初投资合计			294.5	

表 4 方案 2 设备选型及初投资费用

设备规格		数 量	单价/万元	备 注
部分热回收型地源热泵机组	制冷量 1 270 kW, 功率 255 kW, 供回水温度为 7 °C/12 °C; 制热量 1 370 kW, 功率 308 kW, 供回水温度为 45 °C/40 °C; 部分热回收量 242 kW, 供回水温度为 45 °C/40 °C	1 台	90	进口
高温全热回收型地源热泵机组	制冷量 388 kW, 功率 75 kW; 制热量 402 kW, 功率 87 kW, 供回水温度为 45 °C/40 °C; 全热回收量 400 kW, 供回水温度为 55 °C/50 °C	1 台	30	进口
冷却塔	200 m ³ /h, 11 kW	1 台	5	国产
负荷侧循环水泵	110 m ³ /h, 30 m, 18.5 kW	3 台	1.5	国产
地埋管侧循环水泵	135 m ³ /h, 36 m, 30 kW	3 台	2	国产
冷却水泵	200 m ³ /h, 30 m, 30 kW	1 台	2.5	国产
热水循环泵	40 m ³ /h, 12.5 m, 2.2 kW	2 台	0.8	国产
板式换热器	换热量 500 kW	1 台	6	国产
钻孔	Ø150, 钻孔深度 80 m	300 个	0.53	国产
PE 管管材及施工			102	
其他管道、保温及附件			40	
初投资合计			446.6	

表 5 全年运行费用比较

	方案 2			方案 1				
	夏季	过渡季	冬季	夏季	过渡季	冬季	夏季	冬季
能源形式	电	电	电	电	燃气	电	燃气	电
单价	1.0 元/(kWh)	1.0 元/(kWh)	1.0 元/(kWh)	1.0 元/(kWh)	2.6 元/m ³	1.0 元/(kWh)	2.6 元/m ³	1.0 元/(kWh)
消耗量	271 800 kWh	180 940 kWh	226 350 kWh	334 080 kWh	138 600 m ³	22 520 kWh	97 020 m ³	15 624 kWh
能源费用/(万元/a)	27.2	18.1	22.6	33.4	36.0	2.3	25.2	1.6
机房运行费用/(万元/a)		7				10		
冷却塔运行费用/(万元/a)		2				8		
年维护保养费/(万元/a)		5				10		
全年运行费/(万元/a)		81.9				126.5		
方案 2 比方案 1 全年节省运行费/(万元/a)		44.6						

4.2 空调系统的冷热源

1) 客房、办公部分采用集中冷热源的风机盘管加新风系统,其冷热源采用混合(地埋管换热器加辅助冷却塔)地源热泵系统。

设备选型详见表 4。

4.3 生活热水热源

1) 夏季,空调系统制冷的同时,采用热回收系统为生活热水“免费”提供 55 °C/50 °C 热源。生活热水系统可根据空调负荷的变化及生活热水的用量,优化控制部分热回收型机组、全热回收型机组的运行。

2) 冬季,运行全热回收型机组,为生活热水提供 55 °C/50 °C 热水。

3) 生活热水系统同时考虑 1 h 的储热热水罐。

5 空调水系统设计

空调负荷侧水系统采用一次泵、两管制系统,分为两个环路,分别供给客房及办公用房,便于管理及计量;循环水泵共 3 台(互为备用),其总流量

与 2 台空调主机相匹配。地源侧循环水系统采用同程一次泵定流量系统,循环水泵共 3 台(互为备用),其总流量与 2 台空调主机相匹配。生活热水加热循环泵共 2 台(互为备用),其总流量与生活热水负荷相匹配。空调负荷侧水系统、地源侧水系统的定压方式均采用落地膨胀罐定压,并配套设置软水装置、软水箱。空调水系统原理图见图 4。

6 空调风系统设计

6.1 1 层大堂冬季供暖 CFD 模拟

1 层大堂为 3 层贯通的高大空间,为保证冬季空调效果,采用了低温热水地面辐射供暖系统与变风量空调器(冬季主要承担新风负荷)相结合的方式,并进行了 CFD 模拟计算。

1) 地面温度模拟:地板表面温度分布见图 5。

2) 房间温度模拟:剖图方式 1 见图 6,其温度、风速分布见图 7;剖图方式 2 见图 8,其温度、风速分布见图 9。

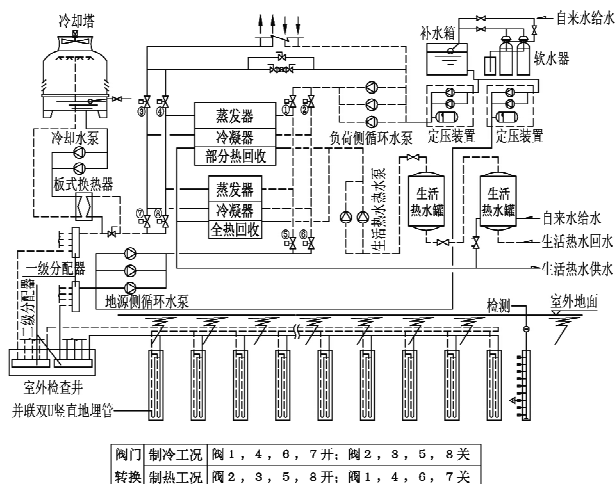


图 4 空调水系统原理图

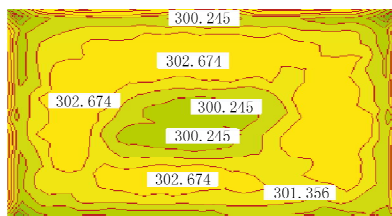


图 5 地板表面温度分布(单位:K)

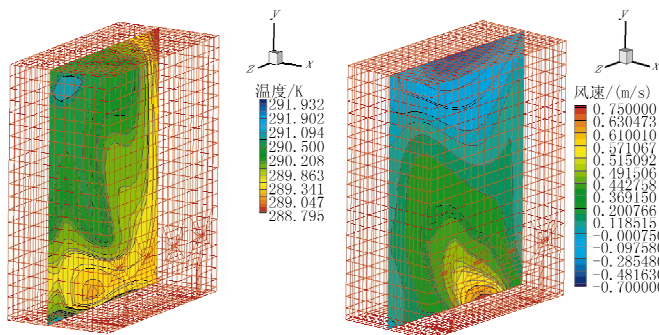
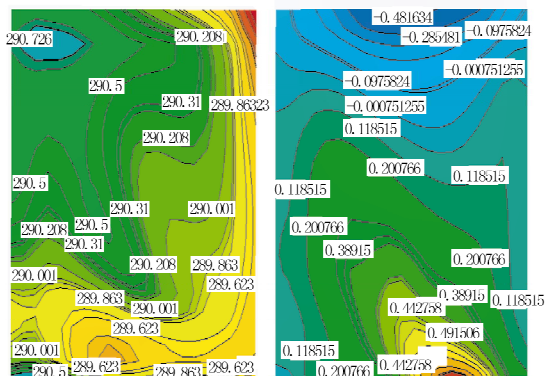


图 6 剖图方式 1 剖面示意图



a 温度分布(单位:K) b 风速分布(单位:m/s)
图 7 剖图方式 1 温度、风速分布

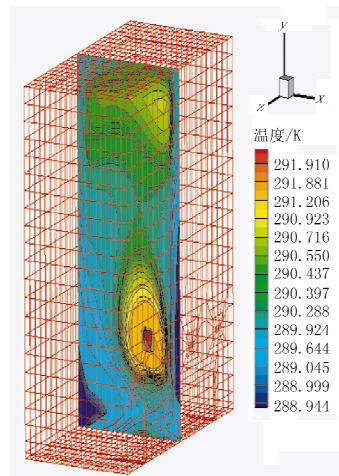
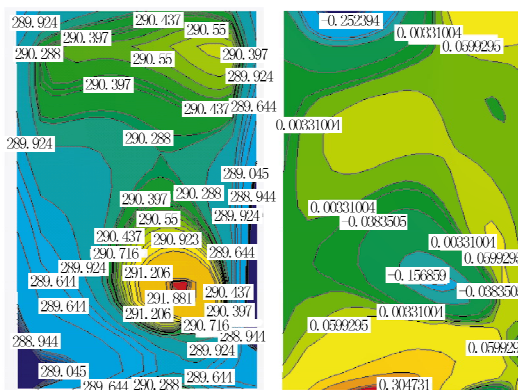


图 8 剖图方式 2 剖面示意图



a 温度分布(单位:K) b 风速分布(单位:m/s)
图 9 剖图方式 2 温度、风速分布图

3) 结果分析:冬季人员活动区室内温度保持在 16~17℃, 风速基本维持在 0.25 m/s 左右, 满足人体的热舒适性要求。

6.2 其他功能房间风系统

餐厅、职工食堂、多功能厅等均采用一次回风定风量系统。客房及办公部分采用风机盘管加新

风系统,新风机组每层配置。

7 通风系统设计

1) 地下室制冷机房、变配电室、水泵房设有机机械排风系统,其排风机兼作变配电室气体消防事后排风机。

2) 地下车库采用诱导式通风系统,由诱导器和排风机组成,利用车道自然补风。

3) 卫生间、会议室、餐厅、多功能厅、职工餐厅等均设置机械排风系统。

4) 中庭排烟系统兼作平时排风系统,排风机选用双速风机。

8 自动控制

1) 本工程空调系统采用直接数字控制系统(DDC)。

2) 地源热泵机组自带完备的控制及保护装置,实现机组空调出水温度的控制、机组空调出水温度的再设定、能量调节、机组安全保护。

3) 空气处理机组、新风空调机组、风机盘管通过调节水阀均能实现温度控制。

4) 空调负荷侧循环水泵、地源侧循环水泵采用多台并联运行,与地源热泵机组匹配。根据空调负荷的变化对水泵进行台数控制。生活热水泵两台并联运行,根据回水温度的变化,对水泵进行台数控制。

5) 在空调负荷侧供回水总管上设有压力传感器及电动调节阀,DDC 数字控制器根据其压差大小对电动调节阀进行调节,以稳定系统压力。

6) 由设在地下车库的 CO₂ 浓度传感器对排风机进行变频调速控制。

9 防排烟设计

根据《高层民用建筑设计防火规范》(GB 50045—95)(2005 年版)的要求,对防烟楼梯间及其合用前室分别设置了机械加压送风系统,对不具备自然排烟条件的内走道、裙房中庭设置了机械排烟系统。

10 地埋管换热器系统设计

10.1 地埋管换热器设计

1) 根据全年动态负荷计算的结果,取热总量为 918 800 kWh,散热总量为 2 193 700 kWh。可见全年散热总量大于取热总量。为保持垂直 U 形地埋管换热器全年散热、取热总量平衡,应以取热总量为依据,扣除夏季热回收系统提供的生活热水

取热量,则地埋管换热器全年取热、散热总量的平衡计算值约为 837 080 kWh。

2) 本工程在拟埋管区域进行了地埋管换热测试实验。在测试区域选取两点进行钻孔埋管测试,孔间距 4 m,孔径 150 mm,打井深度 80 m,并联 U 形管,埋管深度 75 m。回填材料:泥岩部分采用膨润土混合水泥砂浆结合钻孔原浆,回填比例 1:6;黏土部分则采用膨润土混合黄砂结合钻孔原浆,回填比例 1:7,其中补浆部分采用钻孔原浆。同时在地另一侧单独钻取一口地质勘测井,目的是为了检查场地两侧的地质结构的具体情况是否存在较大偏差,从而确定施工钻孔技术。测试实验采用计算机采集数据,每隔 30 s 采集一次数据,每隔 6 h 自动存储一次数据。散热实验模拟夏天的空调工况,地埋管水温实测值见图 10;取热实验模拟冬季的热泵供热工况,地埋管水温实测值见图 11。岩土层结构及岩土体热物性见表 6。土壤和回填材料特性见表 7。

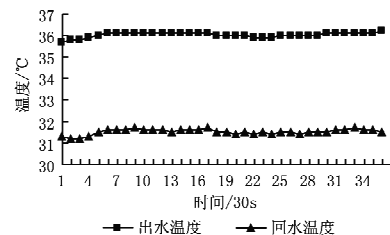


图 10 夏季工况水温变化曲线

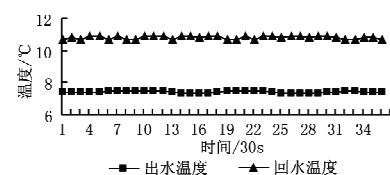


图 11 冬季工况水温变化曲线

表 6 地质情况

深度/m	岩土层结构	岩土体热物性		
		密度/ (kg/m ³)	导热系数/ (W/(m·K))	热扩散率/ (10 ⁻⁶ m ² /s)
0~3	杂填土	910	1.0	0.38
3~12	粉质黏土	1 285	1.2	0.54
12~44.5	砂石	1 925	2.0	0.81
44.5~65.5	含卵石砾岩	2 680	2.8	1.23
65.5~80	粉砾岩	2 600	2.8	1.01

3) 由于本项目的埋管区域较为紧张,地埋管换热器以满足冬季供热为设计依据,夏季不足部分采用冷却塔辅助散热。根据测试报告的结果,为增加

表 7 土壤和回填材料特性

	导热系数/ (W/(m·K))	热扩散率/ (10 ⁻⁶ m ² /s)	比热容/(kJ/ (kg·°C))
土壤			
轻质黏土	0.86	0.65	1.05
岩石	2.20	0.95	1.75
回填材料			
膨润土混合黄砂	2.40		
膨润土混合水泥砂浆	2.91		

单孔换热量,地埋管换热器采用双 U 形管。DN25 并联双 U 形管的单位井深散热能力为 72.5 W/m, 取热能力为 41.7 W/m。因此,本工程采用竖直钻孔埋管方式,钻孔直径为 150 mm,间距不小于 4 m,共需钻井 300 孔,孔深 80 m,管井内采用高密度聚乙烯 PE 管(DN25/PE100 双 U 形管),有效埋管深度 75 m,总有效埋管长度 90 000 m。

4) 地埋管系统一级分配器共划分为 4 个回路,每个回路对应 1 组二级分配器,每个二级集分水器划分为 4 个回路,各回路上均设平衡阀,同程布置。

5) 地埋管系统室外水平干管(集合管)采用直埋敷设,其埋深为室外地面 2.0 m 以下,避开其他管线,干管坡度不小于 0.003。室外地埋管平面布置见图 12。

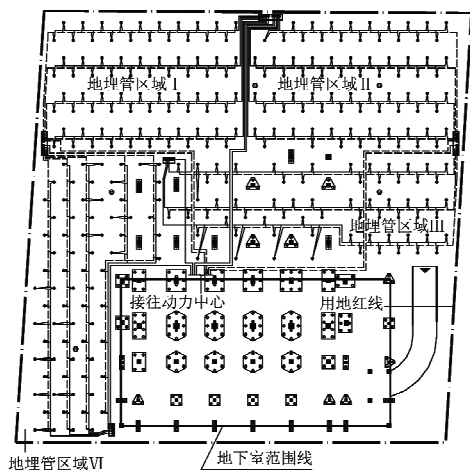


图 12 室外地埋管平面图

10.2 数据采集及监测

为保证室外地埋管区域土壤全年温度稳定,使地源热泵机组正常运行,本工程在室外地埋管区域设置 6 个土壤温度采集点,每个采集点竖直方向敷设 9 个土壤温度传感器,共 54 个。

10.3 土壤热平衡措施及空调系统运行模式控制

1) 本工程在地源侧循环水系统供、回水总管上设置温度传感器、流量传感器,DDC 控制器根据其信号由能量计量装置对竖直 U 形地埋管换热器的散热总量及取热总量进行能量计量。

2) 在室外地埋管区域设置土壤温度数据采集系统,动态监测土壤温度的变化。

3) 优化控制和调节冷却塔的夏季运行时段和时间,在保证机组高效率运行的同时,使竖直 U 形地埋管换热器冬季取热总量和夏季散热总量相当,保持室外地埋管区域土壤经过一个冬夏季运行后的温度与土壤原始温度不变。

11 设计总结

1) 结合本项目的规模、负荷特点,本着优先利用可再生能源的原则,采用热回收型地源热泵系统提供空调用冷、热水及生活热水。

2) 由于该项目是亚行贷款项目,各项预算审计工作非常严格。空调系统总投资为 756 万元,指标为 504 元/m² (建筑面积),其中,地埋管部分投资近 260 万,占总投资的 35.7%。虽然政府有一定的节能政策补贴,但总体来说地埋管系统目前一次性初投资仍然较高。因此,笔者认为采用地埋管地源热泵系统必须进行方案比较,并应和甲方充分沟通。应避免工程不分大小和性质而盲目采用地源热泵系统。

3) 根据图 3 提供的污水温度分布值可以看出,其 6,7,8 月份的污水完全可以作为冷却水使用,但由于存在污水供应的不确定性和工期等问题而最终采用冷却塔作为辅助冷却系统。

4) 地埋管换热器的设计选型应综合考虑埋管区域、地质情况、土壤热物性等的的影响,合理确定井深、井间距。并应考虑完善的控制措施,保持地埋管换热器全年总释热量与吸热量相平衡。

5) 通过对 CFD 模拟计算结果的分析,采用低温热水地面辐射供暖能有效解决高大空间冬季因热气上浮问题而引起的下冷上热问题。

参考文献:

- [1] 中国有色工程设计研究总院. GB 50019—2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2004
- [2] 中国建筑科学研究院. GB 50366—2005 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005