

1. 概述

1.1 工程概况

城建学校新校区地埋管地源热泵空调系统，负责行政楼、图书馆、技术教育中心、大学生活动中心、食堂、学生宿舍的夏季空调供冷和冬季空调供暖的能量供应，并用作研发楼空调系统的备用冷/热源。

校区地埋管地源热泵中央空调系统，夏季供冷设计负荷 5336kw，冬季供暖设计负荷 3882kw。

地埋管地源热泵空调系统是以岩土体为低温热源，由水源热泵机组、地埋管地热能交换系统、建筑物内终端设备和监测控制系统等组成的夏季供冷/冬季供暖的空调系统。

1.2 地埋管地源热泵空调系统基本原理

地埋管地源热泵系统是以土壤岩土体作为热泵机组的低位热源，热泵机组以消耗少量的高品位能源从低位热源中吸取能量，并传递给高位能源。热泵机组输出的高位能源是从低位热源中提取的能量与机组产出的高品位能量之和。所以地源热泵系统是绿色节能装置。热泵机组冬季从岩土层中吸取热量，夏季向岩土层中排放热量(吸取岩土层中的冷量)，实现从低位热源中吸取能量满足建筑物冬季供暖和夏季供冷的需求。

1.3 地热能的资源调查

地源热泵系统方案设计前，应进行工程场地状况及岩土地质条件调查，并应对浅层地热能资源进行勘察。

地埋管换热系统勘察应包括下列内容：

- (1)岩土层结构；
- (2)岩土体热物性；
- (3)岩土体温度；
- (4)地下水静水位、水温、水质及分布；
- (5)地下水径流方向、速度；
- (6)冻土层厚度。

当地埋管地源热泵系统的应用建筑面积大于等于 5000 m²时，应进行岩土热响应试验。岩土热响应试验测试过程应符合下列要求：

- (1)岩土热响应试验应连续不断，持续时间不宜少于 48h；
- (2)试验期间，加热功率应保持恒定；
- (3)地埋管换热器的出口温度稳定后，其温度宜高于岩土初始平均温度 5℃以上且维持时间不应少于 12h；
- (4)地埋管换热器内循环水流速不应低于 0.2m/s；
- (5)试验数据读取和记录的时间间隔不应大于 10min。

1.4 城建校新校区土壤资源调查

为对新校区使用地埋管地源热泵空调系统的适宜性进行评价，在拟设地埋管换热器的场地钻了 2 个测试孔，对土壤岩土体资源状况进行了测试调查。

经过对 2 个测试孔的钻探和热响应测试，测得从自然地表下 10m~20m 至竖直地埋管换热器埋设深度范围内，岩土体的初始平均温度(岩土常年恒定的平均温度)：1#测试孔为 18.9℃，2#测试孔为 18.8℃，岩土体的初始平均温度为 18.85℃。

对项目所在场区测试孔中的地埋换热器进行一定时间的连续加热，测得循环水的温度变化数据，根据循环水流量和施加的加热功率，经计算得出岩土体的换热量、土壤导热系数等热物性参数，见下表。

岩土的热物性参数

测试孔位	夏季换热量 w/m	冬季换热量 w/m	平均导热系数 (w/m.k)
1 号测试孔	47.83	33.03	1.73
2 号测试孔	46.49	32.10	1.66

平均值	47.16	32.57	1.695
-----	-------	-------	-------

测试调查结论:

(1) 根据工程场地内试验井孔钻探所得地层柱状断面资料, 地下 85 米深度范围的地层, 岩性以黄泥、砂砾、黑砂泥层和白砂泥层为主。钻孔设备现场打孔较为顺利, 该种地质适合钻孔打井设置竖直埋管换热器;

(2) 岩土的综合导热系数(1.695 w/m.k)较高, 适合作埋管地源热泵系统的低温热源;

(3) 资源调查提供的热物性参数, 可作为竖直埋管换热器的设计依据。根据建筑物的空调负荷和热泵机组性能参数, 可设计竖直埋管换热器的孔数、孔深和间距。

2. 埋管地源热泵空调系统组成

城建学校新校区埋管地源热泵中央空调系统, 由 4 台满液式单螺杆水冷水源热泵机组(其中 1 台为全热回收机组)、4 组竖直埋管换热器及输水管网系统、负荷侧一、二次供水管网系统、1 台空气源风冷冷却塔、建筑物室内的空调终端及水管系统、全热回收生活热系统、各管路系统循环水泵、自控监测系统及辅助设施等组成。

2.1 水源热泵机组

(1) 本工程项目共配置 4 台水源热泵机组:

1) 1#全热回收机组: 麦克维尔单螺杆双机头水源热泵机组

型号 WPS325.2C-HR

制冷工况: 制冷量 1161.7kw 输入功率 166.6kw

性能系数 $COP = 6.975$

蒸发器 进水温度 12℃ 出水温度 7℃ 流量 55.6L/s

冷凝器 进水温度 25℃ 出水温度 30℃ 流量 63.5L/s

全热回收工况: 制热量 1088.3kw 输入功率 291.7kw

性能系数 $COP = 3.731$

蒸发器 进水温度 12℃ 出水温度 7℃ 流量 38.1L/s

热回收器 进水温度 50℃ 出水温度 55℃ 流量 52.1L/s

制热工况: 制热量 1108.9KW 输入功率 231.1KW

性能系数 $COP = 4.798$

蒸发器 进水温度 10℃ 出水温度 5℃ 流量 42.0L/s

冷凝器 进水温度 40℃ 出水温度 45℃ 流量 53.0L/s

2) 2#热泵机组: 麦克维尔单螺杆三机头水源热泵机组

型号 WPS510.3C

制冷工况: 制冷量 1876.3KW 输入功率 266.9KW

性能系数 $COP = 7.029$

蒸发器 进水温度 12℃ 出水温度 7℃ 流量 89.8L/s

冷凝器 进水温度 25℃ 出水温度 30℃ 流量 102.5L/s

制热工况: 制热量 1794.4KW 输入功率 371.3KW

性能系数 $COP = 4.833$

蒸发器 进水温度 10℃ 出水温度 5℃ 流量 68.1L/s

冷凝器 进水温度 40℃ 出水温度 45℃ 流量 85.8L/s

3) 3#、4#热泵机组: 麦克维尔单螺杆双机头水源热泵机组

型号 WPS325.2C

制冷工况: 制冷量 1161.7KW 输入功率 166.6KW

性能系数 $COP = 6.975$

蒸发器 进水温度 12℃ 出水温度 7℃ 流量 55.6L/s

冷凝器 进水温度 25℃ 出水温度 30℃ 流量 63.5L/s

制热工况：制热量 1108.9KW 输入功率 231.1KW

性能系数 COP =4.798

蒸发器 进水温度 10℃ 出水温度 5℃ 流量 42.0L/s

冷凝器 进水温度 40℃ 出水温度 45℃ 流量 53.0L/s

2.2 地热能交换设备系统

本工程地源热泵的地源侧，采用竖直埋地 U 型管换热器作地热能交换器。校区单体建筑物平面位置排布后，可设埋地 U 型管换热器的场地只有两处，分别是图书馆西广场(C 区地块和 D 区地块)、兰球运动场(A 区地块)及足球场(B 区地块)。根据所测岩土体的热物性参数，4 个地块 U 型管换热器的设计排布参数如下：

A 区地块 U 型管 288 根、设计孔深 100m、孔距 5000mm，

B 区地块 U 型管 288 根、设计孔深 100m、孔距 5000mm，

C 区地块 U 型管 221 根、设计孔深 100m、孔距 5000mm，

D 区地块 U 型管 221 根、设计孔深 100m、孔距 5000mm。

根据所测岩土的热物性参数，按设计 A、B、C、D 四个地块的 U 型管换热器，在冬季空调供暖期，可向岩土体提取约 3316kw/h 的低位热能；夏季空调供冷期，可向岩土体排放约 4780kw/h 的热量。

竖直埋地管换热器 U 型管采用聚乙烯管 32/PE100，公称外径 dn=32 mm、公称壁厚 3.0^{+0.5} mm、公称压力 1.6 MPa。

各分区地块设埋地管二级分/集水器，总进/出水管管径 Dn150mm、二级分/集水器出水分支管径 De75mm。

2.3 中央空调主机房负荷侧一次供水管路系统

热泵机组负荷侧一次供水管路系统，由负荷侧循环水泵、热泵蒸发器(夏季)/冷凝器(冬季)、机组出水管、夏/冬季管路切换阀门组、一次供水总管、一级分水器、一级分/集水器旁通管路阀门组、一级集水器、回水总管、负荷侧总能量表、自动反冲洗过滤器、循环水泵回水管等组成。

主机房内空调冷冻水/采暖热水一次泵循环回路，采用定流量系统。

2.4 负荷侧二次供水管路系统

机房至各用能建筑单体的冷冻水(冬季采暖热水)二次循环回路，采用变流量系统；室内采用两管制同程式管路系统。在机房一次循环管路的分水器上，设有通往各建筑单体的分支管路。通往食堂和学生宿舍共有的分支管路上，设三用一备 4 台变频循环水泵；其他分支管路设一用一备 2 台变频循环水泵。根据各用能单体的负荷变动，二次循环水泵变频变流量运行。

循环回路：一级分水器→分水器分支供水管→变频水泵组→校区分支供水总管→单体建筑进户阀门组→室内供水管→空调终端换热盘管→室内回水管→校区分支回水总管→一级集水器分支回水管→回水流量计→一级集水器。

2.5 埋地管循环水管路系统

地源侧循环水环路，采用定流量系统。由热泵机组埋地管侧循环水泵、热泵冷凝器(夏季)/蒸发器(冬季)、机组埋地侧分支管、夏/冬季管路切换阀门组、埋地管出水总管、埋地管一级分水器、A/B/C/D 地块分支输水管、埋地侧二级分水器、分支竖直 U 型管换热器组、埋地侧二级集水器、A/B/C/D 地块分支回水管路、埋地管一级集水器、一级集水器回水总管、自动反冲洗过滤器、埋地管侧能量总表、热泵机组埋地管侧回水支管等组成。

热泵地源侧供/回水主管一级分/集水器之间设动态平衡阀，调节通往埋地管换热器的循环水流量；并在地源侧总回路水管上设置能量表，监测夏/冬季在土壤层中交换能量的瞬时值和累计值。

在埋地管各分区管网上设二级分/集水器，二级分/集水器调节埋地管井间 U 型换热器的水力平衡。

2.6 管网系统的补水和稳压

负荷侧冷、热水管网系统的一次回水总管上，埋地管侧循环水管网系统的一次回水总管上，各设一台定压补水装置，进行管网补水、排气和管路系统的稳压。

补水为软化水装置向软化水箱提供的软化水。

2.7 单体建筑中央空调终端系统

水源热泵输出的冷/热能量，是以水作为冷/热媒的传输载体，将能量传输至使用终端。使用终端为带送风设备的室内空气调节盘管机组。室内空气与载有冷/热能量的循环水盘管换热器进行能量交换，使其温、湿度符合用户需求。终端设备有风机盘管、新风机组、热回收组合式空调机组、全空气组合式空调机组等。

空调水系统为两管制闭式机械循环系统。用能单体各分区水系统采用同程式设计。一般办公室、档案室、小型会议室、计算机教室采用风机盘管加新风机组供新风的形式；公用厅、堂(学生服务中心、外宾接待室等)采用风机盘管加全热交换式新风换气机；行政楼大会议室采用二氧化碳含量控制的全空气低速风道热回收组合式空调机组，可回收排风中的热量以节约新风负荷；单体建筑中的大空间(图书馆中各阅览室、食堂就餐厅等)采用全空气组合式空调机组，过渡季节采用 50 %~80 % 全新风节能运行。

2.8 埋管换热器与冷却塔(低位热源)的复合式系统

地源热泵的应用要遵循因地制宜的原则。对于全年冷、热负荷不均的地区，需作经济技术分析，确定是否需要增设辅助热源和冷源，并使两者合理匹配。在负荷高峰时段，可采用辅助热源或冷源与埋管换热器并用的调峰形式，保证整个系统经济合理运行。

常州地处夏热冬冷地区，夏/冬季空调的冷/热负荷差比较大。采用土壤源地源热泵系统时，夏季向土壤层排放的热量大于冬季从土壤岩土体吸收的热量，长期运行结果势必使岩土体温度越来越高，可向岩土体排放的热量会逐年减少，这将降低热泵系统的运行效率，最终导致夏季岩土体的热堆积，造成地源热泵系统不能正常运行。

由于夏季热泵机组排入地下岩土体的热量大于冬季热泵机组从岩土体中取出的热量，为使得地下岩土体的温度在一个供冷/供暖周期内(一般为 1 年)基本保持不变，本工程设计采用了“低位热源 + 冷却塔”复合式地源热泵系统。

在复合式地源热泵系统中，埋管换热器承担的交换容量由冬季供热负荷确定，夏季热泵机组超出的排热量，通过冷却塔排至大气。这样的系统配置，通过合理控制调节，可确保持土壤层在一个运行周期内的吸热量和释热量基本平衡。

本工程复合式地源热泵系统，设有额定流量 300 m³/h 低噪横流式冷却塔 1 台。夏季空调供冷期，可承担热泵冷凝器约 1750kw/h 的散热。

2.9 全热回收生活热水系统

本工程在热泵机组配置设计时，将 1#机组选型为全热回收机组。该机组在夏季供冷时，可将冷凝器需要散发的热量，作为加热生活热水的热源，所得热水供学生宿舍淋浴使用。

本项目中央空调系统夏季高峰负荷供冷量 5336kw/h，4 台热泵机组同时满负荷工作时，其冷凝器、循环水泵、能量载体输送热等向土壤岩土体最大排热量约 6280kw/h；冬季高峰负荷供热量 3882kw/h，热泵蒸发器需从土壤岩土体吸收的热量约 3184kw/h。热泵机组夏季向土壤岩土体排放的热量大于冬季从土壤岩土体吸收的热量。为使系统设计合理、运行可靠，在系统设计中除加入辅助冷源(冷却塔)外，将 1#机组选为全热回收热泵机组。高峰冷负荷运行时，冷却塔可分担排热 1750 kw/h；1#机组全热回收运行，可减少向土壤岩土体排放 1325kw/h 的排热量。这样的系统配置，通过制订优化的运行方案、合理调节运行，可维持土壤岩土体在一个运行周期内的吸热量与放热量基本平衡。

在夏季空调供冷季节，1#全热回收机组在供冷的同时可提供给生活热水的制热量 1088.3kw/h。按全天工作 8h 计，每天可提供 55℃的生活热水 180m³/d，可满足 6000 位学生淋浴使用。

全热回收系统由 1#热泵全热回收换热器、循环加热水泵、100m³ 循环加热水箱、热水输送泵、输水管网、终端储热水箱等组成。

3. 地源热泵系统的检测与评价

3.1 测试内容

- (1)室内应用效果检测；
- (2)热泵机组性能检测；
- (3)输送系统性能检测；
- (4)地源热泵系统综合能效检测；

(5)地源侧特性检测。

3.2 评价内容

- (1)室内应用效果评价； (2)热泵机组能效评价；
 (3)地源热泵系统综合能效评价； (4)系统节能性评价；
 (5)系统经济性评价； (6)系统环保性评价。

3.3 系统设备的监控内容和检测参数

系统设备的监控内容和检测参数

监控设备	监控内容、主要参数
水源热泵机组	启停控制、运行状态、待机状态、故障状态；地源侧介质流量、空调侧介质流量、地源侧进/出口介质温度、空调侧进/出口介质温度、机组输入功率、机组制冷(热)量、机组制冷(热)工况下的性能系数。
空调水一级循环泵	启停控制、运行状态、待机状态、故障状态；水泵流量、水泵扬程、输入功率、水系统输送能效比、累计运行时数。
空调水二级循环泵	启停控制、运行状态、待机状态、故障状态；水泵流量、水泵扬程、工作频率、输入功率、水系统输送能效比、累计运行时数。
地源侧循环水泵	启停控制、运行状态、待机状态、故障状态；水泵流量、水泵扬程、输入功率、水系统输送能效比 ER、累计运行时数。
空调一次水(分/集)水器	分水器供水压力、温度测量；集水器回水压力、温度测量；(分/集)水器压差值、压差平衡阀运行/故障状态、压差平衡阀开度指示值。
地源侧循环水(分/集)水器	分水器供水压力、温度测量；集水器回水压力、温度测量；(分/集)水器压差值、压差平衡阀运行/故障状态、压差平衡阀开度指示值。
1#热泵机组全热回收换热器	进/出水温度监测、进/出水压力监测、进/出水阀门开/闭状态。
热回收换热器循环加热水泵	启停控制、运行状态、待机状态、故障状态；水泵流量、水泵扬程、输入功率、水系统输送能效比、累计运行时数。
循环加热热水箱	高/低水温区温度监测、液位监测、高/低水位报警、进水电动阀开/闭状态。高/低水温区热水(55℃)加热平衡时间。
生活热水输水泵	启停控制、运行状态、待机状态、故障状态；水泵流量、水泵扬程、输入功率、水系统输送能效比、累计运行时数。
冷却塔	轴流风机启停控制、运行状态、待机状态、故障状态；电动阀开/闭状态、冷却水流量、冷却水进/出水温度、轴流风机累计运行时数。
冷却塔供水泵	启停控制、运行状态、待机状态、故障状态；水泵流量、水泵扬程、输入功率、系统水输送系数、累计运行时数。
定压补水泵	启停控制、运行状态、待机状态、故障状态、补水用时、补水量、系统水压。
软水器软水箱	软水器工作/待机状态、软水箱液位监测。
土壤层岩土特性检测	A、B、C、D 地块岩土体平面及深度多点温度监测；各地块夏/冬季换热量计量与累计。
负荷侧一次水能量表	能量总输出实时计量与累计
负荷侧二次水能量表	各用户能量消耗实时计量与累计
地源侧能量表	能量输入实时计量与累计
地源热泵系统综合能效检测	空调侧水流量、空调侧介质进/出口温度；地源侧水流量、地源侧介质进/出口温度；系统总供热(供冷)量、系统总输入功率、系统制热(冷)工况下的性能系数。

4. 地源热泵中央空调系统的监测与控制

《公共建筑节能设计标准》GB50189 规定，“集中采暖和空气调节系统应进行监测与控制，其内容可包括参数检测、参数与设备状态显示、自动调节与控制、工况自动转换、设备联锁与自动保护、能量计量以及中央监控与管理等。”

4.1 机组群控

GB50189 规定，“总装机容量较大、数量较多的大型工程冷、热源机房，宜采用机组群控方式”。机房群控是冷、热源设备节能运行的一种有效方式。对于热泵机组，在某些部分负荷范围内运行时的效率高于设计工作点的效率，简单地按容量大小来确定运行台数并不一定是最节能的方式；采用冷、热源设备大、小搭配的设计方案，合理确定运行模式，采用机组群控方式，对系统节能更为有利。

本工程水源热泵机组设计，选用了单螺杆热泵机组一大、两小、一台带全热回收装置的配置方案；

单台大机组三机头配置三台压缩机，单台小机组和全热回收机组双机头配置两台压缩机。根据运行负荷的波动区间制订合理的运行模式，选用大、小不同的机组，合理运行单机组压缩机台数，采用系统机组群控，可实现能源站的高效运行。

4.2 主机设备和负荷侧一次管路系统的监测与控制

(1)设备的联锁控制：设备的联锁启停，是保证设备安全运行的重要措施。

单台热泵机组供冷联锁启动：

1) 负荷侧水管路和地埋侧循环水管路应充满水；定压补水装置启动，管路系统维持设定压力；

2) 确认连接热泵机组的水管路阀门组各阀门的开闭状态正确。夏季供冷运行时，负荷侧管路与蒸发器连接；地埋侧管路与冷凝器连接。冬季供暖运行时，负荷侧管路与冷凝器连接，地埋侧管路与蒸发器连接；

3) 打开地埋侧管路一级分水器/集水器上与启动机组相对应的分区地块管路上的供/回水管电动阀；

4) 启动机组地埋管侧循环水泵，地埋管侧循环水流经机组冷凝器、地埋管一级分水器、校区供水管网、地埋管二级分水器、地埋U型管换热器、地埋管二级集水器、校区回水管网、一级集水器、回流机组循环水泵，进行机组冷凝器冷却水管路预排热循环；

5) 在冷凝器进水管路上的流量开关动作并运行3~5分钟后，启动机组负荷侧循环水泵，冷冻水流经机组蒸发器、负荷侧一级分水器、一级分水器与集水器之间的旁通阀、负荷侧一级集水器、回流机组冷冻水循环泵，使冷媒水在一次管路中循环；

6) 在蒸发器进水管上的流量开关动作并运行3分钟后，启动热泵主机逐步加载运行。

7) 在机组负荷侧的出水温度达到设定值后，分别启动负荷侧二级泵运行，并关闭一级分/集水器的旁通阀，投运电动压差平衡阀。

单台机组停止运行：

停程序与启动程序相反。停主机→停冷冻水泵→停冷却水泵。

(2)机组运行台数的控制调节

在冷冻水一次管路供/回水总管上设有温度变送器，回水总管上设流量变送器，DDC现场控制器根据流量和供/回水温差计算出负荷量，根据负荷量的变化，选择投运机组或增减机组的运行台数。也可由机组智能控制系统的群控功能，实现机组运行台数的自动调节。

热泵机组运行台数的控制应遵循下列原则：

1) 机组设备尽可能处于高效区运行；

2) 相同型号机组或一用一备、多用一备的设备，其累计运行时间尽量接近，以保持其同样的使用寿命；

3) 满足用户侧低负荷运行的需求。

(3)单机组负荷量变动调节——单机组压缩机运行台数的调节和小负荷量变动调节

负荷变动量在单机组可调容量的范围内时，由机组智能控制系统与压缩机增减载系统相配合，实现压缩机运行台数调节和单机负荷12.5%~100%(wps325.2c机组)与负荷8.3~100%(wps510.3c机组)调节。

(4)单机组“出水温度设定”控制

1) 正常运行时，机组蒸发器(夏季供冷设定7℃)、冷凝器(冬季供暖设定45℃)的出水温度变化率达到0.2℃(夏季温升速率/冬季温降速率)时，机组增载运行；夏季蒸发器出水温度低于设定和冬季冷凝器出水温度高于设定0.1℃时，机组减载运行。

2) 机组运行负荷低于“最小能量”(10%负荷)时，机组采用运行—停机—待机—再启动运行模式。夏季蒸发器出水温度低于5℃、冬季冷凝器出水温度高于47℃时，机组停机处于待机状态；在夏季蒸发器出水温度高于9℃、冬季冷凝器出水温度低于43℃时，机组再启动由待机进入运行状态。

多台压缩机运行时，滞后机减载至“最小能量”、优先机减载至70%负荷时，滞后机停机。

累计单台压缩机的运行时间，实现压缩机均衡运行，延长整机使用寿命。

(5)参数检测与设备状态显示内容

机组冷媒水进/出水温度、分水器/集水器供/回水温度、回水总管冷/热媒水循环流量、一次管路

供回水压力、机组水泵运行/停止/故障状态显示，分/集水器压差旁通阀状态及开度位置显示，设备运行时间累计。

(6)冷媒水一次管路压力调节

当机组运行台数变动时，一次管路水流量发生较大波动，分/集水器间的电动旁通阀应及时动作(关小或开大)，维持一次管路水压力稳定

(7)能量产出计量

按供/回水温度差和供水流量，计算机组和能源站的产能量。

(8)一次冷媒水的温差控制

按公共建筑节能设计标准的要求，冷水机组的冷水供、回水设计温差不应小于 5℃。在运行中应通过机组管路阀门开度调节，控制流经蒸发器的冷冻水流量，使蒸发器进、出水温差运行在 4.6℃~5.0℃合理范围，以达节能目的。

4.3 负荷侧二次管路系统的监测与控制

(1)按预定时间表启停各分区系统的二次循环水泵

行政楼、科研楼、技术教育中心……………8: 00`~`17: 00

图书馆……………8: 00`~`21: 00

食堂……………午餐 11: 00~13: 00

晚餐 17: 30~19: 30

大学生活动中心、实训工厂……………按活动时间表确定

(2)分支管路负荷调节

二次管路采用变频水泵供水，按分区系统供水总管上的压力波动值与设定值的差值作为主控信号，分区能量计的变动值作为修正信号，调节二次循环水泵的供电频率，实现分区水系统的变流量调节

(3)负荷切换

1)在午餐时间给食堂供应空调冷热负荷时，停止技术教育中心空调负荷的供应。即每天中午 11: 00~13: 00 停技术教育中心二级循环泵，启动食堂二级循环泵运行。

2)每晚 21: 00 至次日凌晨 7: 00 停教学区空调，供学生宿舍空调。开闭供食堂和学生宿舍空调的二次水总管上的电动阀，进行食堂和宿舍的负荷切换。

3) 二次冷冻水循环泵按累计运行时间进行运行和待机备用切换，使主、备泵的运行时间基本均衡，以提高设备的使用寿命。

(4)各分区系统参数检测与运行状态显示

供/回水温度、循环水流量、供/回水管压力、二次循环泵的供电频率；二次泵运行/待机/故障状态显示、二次泵累计运行时间。

(5)输送能量和能耗计量

由现场 DDC 控制器根据供水流量和供/回水温差进行各分区系统的输送能量计量，根据二次泵电表计量能耗并记录、累计、上传。

4.4 地源侧循环水管路与地埋管换热器的监测与控制

(1)地源侧循环水大负荷量变动调节

夏季：热泵机组供冷启动时，与之匹配的地源侧循环冷却水泵和相对应的地埋管分区系统先于机组启动。

当四台机组全部供冷运行、地埋管换热器全部工作时，地埋管一级集水器的回水温度达到 26℃时，地埋管系统报警警示。当回水温度超过 26℃时，首先将 1#号机组热回收换热器投入运行，打开热回收换热器进出水管路阀门，启动全热回收循环水泵，当加热循环水管上的流量开关动作或运行 3 分钟后，停 1#号机组冷凝器冷却水泵，使 1#号机组冷凝器的热负荷转变为制备生活热水的热源。当容量 100 m³ 循环加热水箱的水温经循环加热达到 55℃时，1#号机组再转入地埋管冷却运行。这时空调负荷仍处于高位时，可将 4#机组冷凝器转入冷却塔冷却运行。

冬季：热泵机组供热启动前，应先切换工作模式。将流经冷凝器的循环水送入使用侧一次管路作

热媒水(出水 45℃)供空调采暖;流经蒸发器的低温水(出水 5℃)送入地埋管换热器,吸取大地热能升温(回水 10℃)后,进入机组蒸发器继续循环运行。

机组启动前,与机组匹配的低温水泵(夏季的冷媒水泵)和地埋管分区系统先于机组启动,当三台机组同时供热,一级集水器的回水温度低于 10℃时,与备用机组对应的地埋管分区系统投入运行。

(2)地埋管侧小负荷量变动调节

地埋管系统在四个分区地块设有 4 组 U 型管换热器,便于负荷变动调节及地埋管换热器地块的岩土体轮换休眠、平衡储能。

夏季:每个分区地埋管系统回水总管的温度高于 25℃时,加大回水管电动调节阀的开度;分区回水总管的温度低于 20℃时,调小电动调节阀的开度。当分区回水总管电动阀的开度调至最大,分区回水总管的温度仍然高于 25℃时,启用一个备用机组的地埋管系统投入运行。

冬季:分区地埋管回水总管温度低于 10℃时,加大电动调节阀的开度;当电动调节阀开至最大,回水温度仍低于 10℃时,启用一个备用的地埋管系统加入运行。

(3)系统参数检测与运行状态显示

地埋管换热系统一级分/集水器的供/回水压力、供/回水温度、循环水流量,分支回水管压力、温度、管路电动调节阀开/闭状态与开度值显示。

(4)地埋管换热器岩土体热物性参数检测

对分区地块不同地点、不同地层深度的岩土层进行温度探测、记录、存储并上传。

4.5 全热回收系统的检测与控制

全热回收系统宜在冷负荷高峰时段使用,用以回收 1#机组冷凝器侧的热量并平衡地埋管系统冷却能量的不足。1#全热回收机组在结构上设置了一套与冷凝器并列的热回收换热器,机组制冷工况时既可通过地埋管冷却运行,又可切换成全热回收运行。

(1)1#号机组制冷工况下热回收系统投入运行的联锁控制

全热回收系统投入使用前先检查被加热水箱的水位,并先将输送管网中的冷水放回至加热水箱的低温区,再补水至设计水位处;然后打开 1#号机组全热回收加热器进/出水管路上的阀门,启动加热水箱的热回收循环水泵,当热回收加热器进水管路上的流量开关动作后或循环加温 3 分钟后,停止 1#号机组冷凝器侧冷却水泵运行。

(2)1#号机组制冷工况下全热回收系统割离的联锁控制

当被加热水箱的高/低温区平均水温达到设定温度(55℃)时,启动 1#号机组冷凝器侧冷却水泵和对应的地埋管换热器投入运行,在 1#号机组冷凝器进水管上的流量开关动作并运行 3~5 分钟后,热回收循环水泵停止运行,关闭全热回收加热器进/出水管路上的阀门。

(3)过渡季节或冬季 1#号机组作热泵热水机加热生活热水时设备的联锁控制

1#号机组作热泵热水机投入使用前,先检查加热水箱的水位应在设计液位处。将 1#号机组蒸发器侧循环水泵切换至地埋管侧管路系统运行,然后打开 1#号机组热回收加热器进/出水管路上的阀门,启动加热水箱的循环水泵,对 100m³热水箱进行循环加热。

(4)参数检测和运行状态显示

热水箱初始温度/加热后的输出温度、热水箱输水次数、每次输水量计量、热水输送泵和热水加热循环泵运行/故障状态显示。水泵运行时间累计、热水箱液位显示、水箱自动补水阀开/闭状态。

(5)根据日冷负荷曲线和地埋管换热器轮换休眠、储能平衡计划表,合理安排热回收的工作时段。

(6)循环加热水箱的液位控制

循环加热水箱是生活用水循环加热升温 and 贮热水箱。箱体分隔成高温区和低温区两段,低温区的水送入机组全热回收加热器加热后送入箱体高温区,当水箱高低温区的平均水温达到 55℃时,可启动热水输水泵轮流向学生宿舍的贮热水箱供水。当 100m³热水箱的液位降至低水位时,停热水输水泵,停止向学生宿舍热水箱供水,并联动打开自来水管上的电动给水阀补水,当水位升至设计水位时,联动关闭电动给水阀。箱体上设最低和最高报警水位信号。

学生宿舍贮热水箱输送热水程序,需与宿舍区热泵热水机管理商协调。

4.6 地埋管换热器与冷却塔复合式系统的运行控制与监测

(1)工况转换：在地埋管换热器所在地块轮休蓄能期间或夏季地埋管一级集水器回水总管温度超过26℃时，4#热泵机组冷凝器的冷却切换成冷却塔喷淋冷却运行。

(2)联锁控制：冷却塔喷淋冷却投运时，打开4#机组冷凝器进/出水循环管路连接冷却塔的电动阀，关闭冷凝器连接地埋管的电动阀，启动冷凝器冷却水泵，开启轴流风机冷却运行。

(3)冷却塔冷却水系统的割离：当地埋管一级集水器回水总管的温度低于23℃时，将地埋管换热器投入运行，停止冷却塔运行。以提高热泵的制冷能效比。

(4)冷却塔系统的运行控制与调节：

冷却塔轴流风机的运行台数根据冷却塔的出水温度进行控制与调节：当冷却塔出水温度 $<23^{\circ}\text{C}$ 时，两台轴流风机都不运行，靠自然通风淋水冷却；当冷却塔出水温度 $26\sim 32^{\circ}\text{C}$ 时，一台轴流风机运行；冷却塔出水温度 $\geq 32^{\circ}\text{C}$ 时，两台轴流风机运行。

(5)参数检测与运行状态显示：检测冷却塔进/出水温度和压力，冷却塔轴流风机运行/待机/故障状态显示，冷却水泵运行/待机/故障状态显示，管路电动阀启闭状态 and 开度显示，冷却塔集水盘液位显示。

(6)冷却塔投运有四种控制策略供选用：

- 1) 设定冷却塔的运行时间，并在规定的时间域内启动运行。
- 2) 设定负荷率，当负荷率超过设定值时，启动运行冷却塔。
- 3) 设定地埋管换热器流体的平均温度，当温度超过设定值时，启动运行冷却塔。
- 4) 设定土壤层的平均温度，当温度超过设定值时，启动运行冷却塔。

地埋管换热器与冷却塔复合式系统运行策略，宜控制岩土体在一个运行周期内的温度基本保持不变。

4.7 定压补水装置的监测与状态显示

(1)负荷侧循环水管路和地源侧水管路定压值的设定

负荷侧冷冻水管路的定压值，按行政楼的建筑高度、行政楼室内水管路系统阻力、行政楼校区外管水阻力三者之和进行设定。管路系统的水流阻力值在系统管路调试时测定。

地埋管冷却水循环管路的设定压力，按最远点地埋管换热器的系统阻力(在管路系统调试时测定)+5m水柱高度设定。

管路系统的压力设定后，由定压补水装置自动控制。

(2)软水储水箱参数监测：液位显示，高、低水位报警；

(3)冷冻水和冷却水管路系统定压补水装置参数检测：补水泵运行/待机/故障状态显示，压力检测、系统高低压报警，补水量计量。

(4)软水水质监测：按产品说明书的要求执行。

4.8 空调室外管网工况切换

(1)按预定时间表启动分区系统二次循环水泵；

(2)研发楼、大学生活动中心、实训工厂按需求开启二级循环水泵或室外管网上的两通电动阀；

4.9 地埋管换热器地层蓄能的平衡切换

地源热泵系统在设计和使用中，应将低位热源的岩土层作为季节性的蓄能体。四个地块U型管换热器所在岩土层，冬季采集的热量和夏季采集的冷量应基本均衡；四个地块单季节采集的能量也应基本均衡；四个地块岩土体季节性温度也应相差无几；这样才能使得低温热源的能量源源不断。因此，在运行中应做好四个U型管换热器的运行切换，以保持地块间储能平衡。

(1)绘制夏季日冷负荷逐时需求曲线和热泵机组系统地埋管侧逐时最大释热量曲线；

(2)根据夏季的两条负荷曲线，预设热泵机组和地埋管换热器的运行模式。如，在高峰冷负荷日可预设：

8:00~10:00

运行2#、3#、4#号机组供冷；用冷却塔+A、C地块地埋管换热器作散热源；

10:00~17:00

运行1#、2#、3#、4#号机组供冷；1#号机组全热回收器加热生活热水、A、B、C、D地块的地理

管换热器并列运行作冷却源；

17:00~21:00

运行 1#、2#、4#号机组供冷；冷却塔+A、C 地理管换热器运行；

21:00~次日 1:00

1#、2#、3#号机组供冷运行；冷却塔+A、C 地理管换热器运行；

次日 1:00~7:00

1#、2#、4#号机组供冷运行；冷却塔+B、D 地理管换热器运行。

(3)绘制冬季供暖负荷曲线和热泵机组蒸发器吸热负荷曲线；

(4)预定冬季供暖运行模式(略)。

4.10 地理管换热器岩土层能量释放与储能恢复的监测

(1)夏季地层吸热和岩层温升变化监测；

(2)冬季地层放热和岩层温降变化的监测；

(3)过渡季节地能恢复的监测；

(4)夏冬两季岩土层吸热和放热的能量累计与平衡。

(5)测点设置：平面 A、B、C、D 地块各 2~3 个测点；

监测井纵深 20m、40m、60m、80m 各一点。

4.11 中央监控与管理平台

本工程项目在技术教育中心设有 BAS 中央监控与管理平台，设两层网络结构。

底层(现场设备层)网络由通信总线和控制器组成，主要完成应用系统的监测与控制、所有数字量/模拟量的采样及相应的处理与运算、输出控制功能，直接控制设备的运行和调节。底层网络由现场通信总线连接微控制器(DDC)、分布式智能输入/输出模块、传感器、变送器、执行器、电动风阀/水阀、变频器等现场仪器、仪表和终端系统组成。微控制器(DDC)具有逻辑控制功能，提供模拟 P、PI、PID 控制特性，对末端设备进行控制操作和运行调节。

管理网络层应用 IEEE802.3 以太网，采用 TCP/IP 通讯协议，提供数据访问服务器。对现场智能仪表采集过程数据和存贮历史数据，提供服务器配置数据，存储用户定义数据的应用信息结构，生成报警和事件记录、趋势图、报表，提供系统状态信息。管理网络层具有与互联网通信能力，提供互联网用户通信接口技术，用户可通过 Web 查看各种数据或进行远程操作。

中央监控与管理平台将机房系统中各自独立的单元，如热泵主机、水泵、末端设备等组成完整的运行体系进行综合管理，实现主机群控、系统设备联动控制、各单元的开关启停控制及运行调节，将机、电两个系统进行整合并构成完整的控制平台。设定和自动调节系统的运行状态，调节控制设备最佳的运行配置，实现地源热泵中央空调系统真正意义上的智能化运行。

5. 地源热泵系统能源管理

(1)单台机组产能、能源效率

地源热泵机组的性能系数(COP)是指热泵机组制冷量/制热量与输入功率的比值。每台机组在出厂时都标有在名义工况下的性能参数。实际运行中受环境因素的影响，机组的运行参数与名义工况下的标定参数存在一定的差异。因此，要对热泵机组在不同环境条件下实际运行的性能进行测试、记录并累计存储，掌握和积累各种环境条件下的能效水平，便于制订节能运行策略。

(2)地源热泵系统综合能效评价与效率分析

地源热泵系统综合能效，指整个能源系统输出能量与输入能量(电功率)的比值，它反映了整个系统中包括所有设备的综合性能。综合性能不仅仅受系统中每台设备性能的影响，还受各台设备之间的匹配、系统的运行模式、控制方式等的影响。综合能效评价与效率分析是全面考察地源热泵系统在实际运行条件下能效水平的重要指标。

(3)用户能耗计量与能量的传输效率

空气调节冷热水系统的输送能效比(ER)，是指输送单位能量所需要的功耗。是反映地源热泵输送系统性能的主要参数。能量输送系统主要包括地源侧的循环水输送和负荷侧的一级、二级循环水输送

及生活热水循环加热与热水供应系统的输送。

(4)地源侧低位热源特性的检测分析

地源热泵技术是指以地源能夏季制冷作冷却源，冬季采暖作低温热源，实现制冷、供暖的热泵技术。地源热泵技术的应用，应考察从地源侧获取与释放热量的实际效用，土壤的热物性、土壤温度随深度和季节的变化情况。应定时、定期检测土壤源的水温、土壤层温度、热源侧换热量等参数，衡量、检查低位热源的稳定性及可持续能力。

(5)系统节能性评价

对于同时承担冬季热负荷和夏季冷负荷的地源热泵空调系统，根据冷/热负荷估算结果、实测结果和运行管理累积的相关资料，对地源热泵空调系统冬季采暖和夏季供冷的能耗进行核算，采用同样方法对运用常规热泵空调系统所需能耗进行测算，将两者消耗的能量折算成一次能源进行比较。

(6)能源管理系统

建筑能源管理系统是指用于建筑能源管理的管理策略和软件系统。城建校能源管理系统采用江苏河海新能源公司的“能效管理分析(EMA)系统”，能够实现对 BA 各系统、各主要设备(热泵机组、循环水泵、单元系统等)进行全方位的能源管理，实现运行数据采集、能耗计量统计、能效分析、控制策略优选等全面的管理功能，并实现能耗数据的记录、综合查询和图表统计，以及设备能效值的在线计算。

EMA 系统能充分应用大量的历史数据，实现多种分析角度、多种图形方式的能耗和能效对比分析，并能够自动判断曲线中的最高点和最低点，显示极点产生时刻的设备详细控制参数和运行数据。

EMA 系统还能实现能耗、能效数据与每日气象条件等物理因素的关联，自动筛选、匹配出指定范围内的最佳能效记录和当日控制策略，可作为实用、先进的管理和辅助决策工具，为管理者提供更为科学、有效的节能运行策略，提高管理的精确度和科学性。

(7)能效计算公式

1)地源热泵机组 $EER(COP)$ 计算

$$EER(COP) = Q/P$$

式中 EER —热泵机组制热工况能效比；

COP —热泵机组制冷工况能效比；

Q —实测制热量或制冷量 kw；

P —机组实际输入功率 kw。

2)输送能效比

水系统输送系数

$$WTF = Q_t / N_t$$

式中 WTF —水输送系数；

Q_t —水系统输送的冷量或热量 kw；

N_t —水系统消耗的功率 kw。

水系统输送能效比

$$ER = 1 / WTF$$

式中 ER —水系统输送能效比。

3)冷热水系统设计输送能效比

$$ER = 0.002342H / (\Delta T \cdot \eta)$$

式中 ER —水系统输送能效比

H —水泵设计扬程 m；

ΔT —供回水温差 $^{\circ}C$ ；

η ---水泵在设计工作点的效率%。

6. 参考表式

参考表 1 地源热泵主机房能源管理系统运行班参数汇总

单	项目	单位	①号机组	②号机组	③号机组	④号机组
---	----	----	------	------	------	------

台机组产能耗能与一次电功率	综合输出能量	kw/b				
	综合输入功率	kw/b				
	平均性能系数	cop/b				
	负荷侧一次循环泵用电量	kw/b				
	负荷侧冷/热媒水一次循环泵输送能效比(1/WTF)	ER/b				
	热泵机组蒸发器循环水进/出水温差	Δt °C				
	地源侧循环水泵用电量	kw/b				
	地源侧循环水输送能量	kw/b				
	地源侧循环水泵输送能效比(1/WTF)	ER/b				
	1#号机组热回收热量	kw/b				
	加热水箱初始温度	t1 °C				
	加热水箱最终温度	t2 °C				
	热水输送量	m3/b				
	热回收加热循环泵、热水输送泵用电量	kw/b		—	—	—
	热回收工况机组综合性能系数	cop/b		—	—	—
	冷却塔系统轴流风机用电量	kw/b				
	冷却塔进水温度	t01 °C				
	冷却塔出水温度	t02 °C				
	冷却塔循环水流量	m3/b				
	冷却塔散热量	kw/b				
冷却塔冷却工况机组综合性能系数	cop/b					

参考表 2 运行班用户耗能与输能效率统计

序号	项目	行政楼	图书馆	食堂	技术教育中心	学生活动中心	①号学生宿舍	②号学生宿舍	③号学生宿舍	④号学生宿舍
1	冷/热能用量 (kw/b)									
2	空调水输送泵用电量 (kw/b)									
3	冷/热媒水进/出口温差 (Δt °C)									
4	冷/热媒水循环流量 (m3/h)									
5	二次循环水泵输送能效比 (ER/b)									
6	生活热水加热前温度 (°C)									
7	生活热水供水温度 (°C)									
8	生活热水供水量 (m3/b)									
9	供热水泵用电量 (kw/b)									
10	生活热水输送能效比 (ER/b)									
11	热回收机组总供能量 (kw/b)									

参考表 3 热泵机房综合能效与能耗统计

序号	项目内容	统计值	备注
----	------	-----	----

1	能源站总产能	kw/b		
2	能源站总电耗	kw/b		
3	能源站综合效率	kw/kw		
4	负荷侧一次循环泵用电量	kw/b		
5	负荷侧一次泵综合输送能效比	ER1		
6	地源侧冷却水循环泵用电量	kw/b		
7	地源侧冷却泵综合输送能效比	ER2		
8	负荷侧二次泵用电量	kw/b		
9	负荷侧二次泵综合输送能效比	ER3		
10	冷却塔轴流风机用电量	kw/b		
11	负荷侧管网系统补水量	m3/b		
12	负荷侧管网系统稳压与补水用电量	kw/b		
13	地源侧管网系统补水量	m3/b		
14	地源侧管网系统稳压与补水用电量	kw/b		
15	机房监测与控制中央管理系统用电	kw/b		
16	机房照明用电	kw/b		
17	机房照明功率密度	W/m2		
18	负荷侧管路系统机械刷式过滤器用电	kw/b		
19	负荷侧管路系统电子水处理器用电	kw/b		
20	地源侧管路系统机械刷式过滤器用电	kw/b		
21	地源侧管路系统电子水处理器用电	kw/b		
22	1#热泵机组全热回收工况能效比	EER/b		
23	1#热泵机组地埋管冷制冷能效比	COP/b		
24	1#热泵机组制热工况能效比	EER/b		
25	2#热泵机组地埋管冷制冷能效比	COP/b		
26	2#热泵机组制热工况能效比	EER/b		
27	3#热泵机组地埋管冷制冷能效比	COP/b		
28	3#热泵机组制热工况能效比	EER/b		
29	4#热泵机组地埋管冷制冷能效比	COP/b		
30	4#热泵机组冷却塔冷制冷能效比	COP/b		
31	4#热泵机组制热工况能效比	EER/b		