

海底隧道渗流海水源热泵系统供冷实验研究

董文杰, 于慧俐*, 王新杰, 王禹浩, 武迪, 胡松涛

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

摘要: 针对矿山法修建的排水型海底隧道存在大量渗流海水未经利用直接排放造成能源浪费的问题, 提出将隧道渗流海水作为水源热泵系统冷热源为隧道附近建筑供热、供冷的利用方案。在青岛市建造了海底隧道渗流海水热泵系统示范工程, 通过对制冷季运行工况的监测, 分析了热泵系统在实际工程中的运行效果。实验结果表明热泵运行期间, 测试房间平均温度 $24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 室内温度可以到达设计要求。热泵系统日平均耗电量为 $1466.3\text{ kW}\cdot\text{h}$, 其中输配系统能耗占整个系统能耗的 31% , 制冷季热泵机组平均能效比(EER)为 5.3 , 系统供能效果较好。本研究为渗流海水源热泵系统的工程应用提供了数据支撑。

关键词: 冷热源形式; 隧道渗水; 海水源热泵系统; 供冷实验

中图分类号: TU831.6 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2024)06-0102-08

Experimental study of seawater source heat pump system for cooling in submarine tunnel seepage

DONG Wenjie, YU Huili*, WANG Xinjie, WANG Yuhao, WU Di, HU Songtao

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Aiming at the problem of energy waste caused by the direct discharge of a large amount of seawater seepage without being utilized in the drainage-type undersea tunnel constructed by the mining method, it is proposed that seawater seepage from the tunnel be used as the cooling and heating source of the water-source heat pump system, which can supply heat and cold to buildings near the tunnel. A demonstration project of seepage seawater heat pump system in submarine tunnel was built in Qingdao, and the operation effect of the heat pump system in the actual project was analyzed through the monitoring of the operation condition in the cooling season. The experimental results showed that during the operation of the heat pump, the average temperature of the test room was $24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the indoor temperature can reach the design requirements. The average daily power consumption of the heat pump system was $1466.3\text{ kW}\cdot\text{h}$, of which the energy consumption of the transmission and distribution system accounted for 31% of the energy consumption of the whole system, and the average energy efficiency ratio (EER) of the heat pump unit in the cooling season was 5.3 , which made the system more effective in energy supply. This study provides data support for the engineering application of seepage seawater source heat pump system.

收稿日期: 2024-05-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078257)

作者简介: 董文杰(1998—), 男, 山东枣庄人。硕士, 研究方向为海水源热泵系统。E-mail: 1376664123@qq.com。

* 通信作者: 于慧俐(1975—), 女, 山东青岛人。博士, 副教授, 主要从事海水源热泵系统方面的研究。E-mail: yuhuili@vip.sina.com。

Key words: heat and cold source forms; tunnel seepage; seawater source heat pump system; cooling experiment

在我国“双碳”目标背景下,大力发展可再生能源已成为加快构建清洁低碳、安全高效能源体系的必然选择。建筑领域是能源消费的三大领域(工业、交通、建筑)之一,2022年我国建筑领域碳排放总量为 50.8 亿 t,占全国碳排放量的 44.3%^[1],而建筑供热、供冷系统产生的碳排放量约占建筑总碳排放量的 1/3,因此,在建筑供冷(热)系统中加大可再生能源利用率是助力“双碳”目标的必由之路。

海底隧道是目前沿海城市的重要基础设施,由于深埋于水下,其承受了较大的海水压力,致使大量海水渗入到隧道内^[2]。渗流海水具有流量大而稳定的特点,以青岛地铁 1 号线海底隧道为例,结构渗水量约为 1200 m³/d^[3]。目前海底隧道渗流海水通常作为废水由水泵抽至地表排放到市政管网中,少数用于消防^[4]、冲洗用水^[5]、试验原水^[6]等。渗流海水来源于深层海水,其温度较表层海水随季节变化小,根据实测 8 月渗流海水温度变化区间为 [21.6, 22.9] °C,平均温度约为 22.4 °C;1 月渗流海水温度变化区间为 [13.6, 15.3] °C,平均温度约为 14.8 °C。同期,青岛地区 8 月表层海水温度变化区间为 [24.1, 27.2] °C,平均温度约为 25.5 °C;1 月表层海水温度变化区间为 [5.2, 8.0] °C,平均温度约为 6.5 °C。由此可见,渗流海水蓄存丰富的低品位热能。从海水水质来看,海水通过岩层和沙层以渗入方式进入隧道,泥沙等悬浮物及海藻等水生生物量较少,其水质优于直接从海洋中抽取的海水。渗流海水适合作为热泵系统的冷(热)源,但目前对于隧道渗水作为热泵系统的冷(热)源的研究鲜有报道^[7]。

毛细管网换热器具有传热性能高、造价低的特点,常用于辐射吊顶空调中作为末端换热器。胡松涛团队^[8-13]将其埋置于海床中作为新型海水源热泵系统的前端换热器,有效地解决了海水源热泵系统腐蚀和生物附着的问题。本文以渗流海水作为热泵系统的冷(热)源,以毛细管网换热器作为热泵系统的前端换热器构建了渗流海水源热泵系统。在制冷季对该系统运行进行了实验测试,探究了系统的运行特性,并对系统制冷效果、运行能耗、系统能效等进行了分析。本研究为渗流海水源热泵系统的工程应用提供了数据支撑。

1 实验台构建

1.1 实验台简介

海底隧道渗流海水源热泵系统实验台搭建在青岛地铁 1 号线瓦屋庄停车场内。地铁海底隧道黄岛端排水点位于 1 号线凤凰岛站附近,距停车场约 200 m,有利于减少水泵的输配功耗。综合楼位于场区的西北侧,总建筑面积 31 251 m²,地上建筑面积 13 267.4 m²,地下建筑面积 17 983.6 m²。综合楼地下 2 层,地上 10 层,建筑高度 52.65 m,地下部分主要为停车库、食堂等,地上 1~5 层为综合楼办公用房,6~10 层为休息室。海底隧道渗流海水源热泵系统由放置于海水蓄水池中的毛细管网换热器、水源热泵机组、循环水泵和风机盘管末端装置构成(图 1),海水源热泵机房布置如图 2 所示。

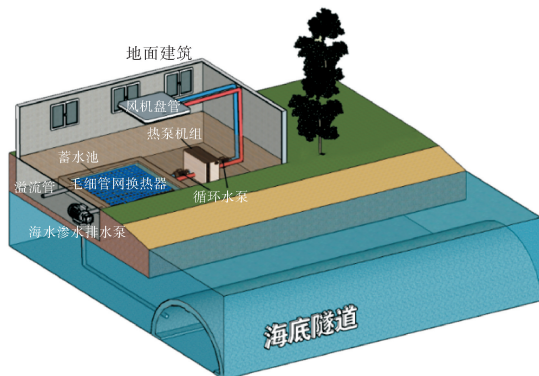


图 1 渗流海水源热泵系统示意



图 2 渗流海水源热泵机房布置

1.2 渗流海水水源取水系统

青岛地铁1号线海底隧道是采用矿山法施工的控制排水型海底隧道,全长8.1 km,其中海域段长度约3.49 km,最深处距离海平面约88 m,是目前国内最长且最深的地铁海底隧道。隧道内部设有4座废水泵房,其中在隧道最低点设置1座海底废水泵房,泵房内设有3台排水泵;在隧道1号风井(黄岛端凤凰岛站风井)、2号风井(黄岛端入海处风井)以及3号风井(青岛端团岛站风井)内分别各设置1座风井废水泵房,泵房内设有2台排水泵。海底隧道渗流海水沿线路排水沟通过隧道内设置的横截沟排到设置在隧道最低点和两端风井附近的废水泵房。废水泵房所有水泵实现自动控制,当集水池水位到达限度,排水泵就会自动启动。海底隧道过海段排水采用高水高排、双向排水、多级提升的运作方式。常用路径从海底泵房提升至2号风井再次提升至1号风井,从1号风井排放进入瓦屋庄停车场海水源蓄水池中(也可直排市政)。当此路径发生故障时,可切换至备用路径:从海底泵站排放至3号风井,再从3号风井排放至市政排水管网(图3)。水源热泵取水系统与隧道排水系统的有效结合,为水源热泵系统提供了稳定的水源,实现了能源的回收和利用,降低了系统的初投资。

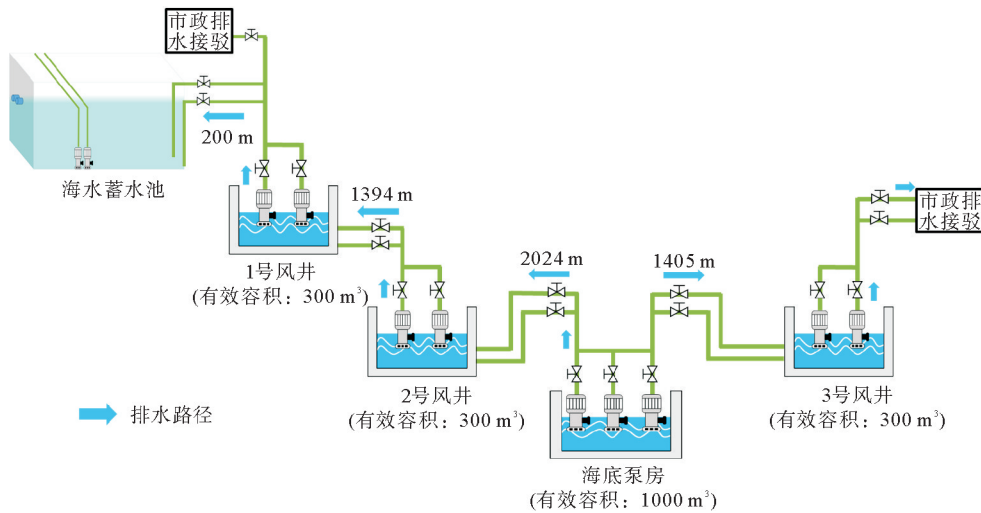


图3 海底隧道排水系统示意

1.3 海水蓄水池

海水蓄水池位于综合楼地下二层,利用建筑地下空间蓄存海水(图4)。水池长40 m,宽8.7 m,高5.5 m,溢流高度4.6 m,蓄水容积1600 m³。换热海水接自1号风井处,通过管线接至池内,海水经换热后通过溢流方式排出。溢流管距池底4.6 m,当水池内液面高度达到溢流口高度时,海水自动排出。为维持蓄水池的安全容积,避免海水外溢,出现损坏机房的情况,水池配有液位传感器,联动控制海水排出泵。海水蓄水池内设有2台排水泵,单泵启动液位4.9 m,双泵启动液位5 m,停泵液位4.8 m。

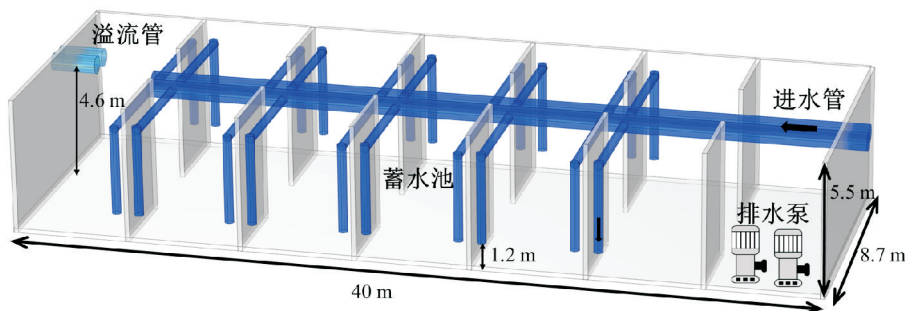


图4 海水蓄水池

1.4 毛细管网换热器

毛细管网换热器是由联集干管和毛细支管通过特定的焊接技术焊接而成,用编管塑料卡条均匀排列固定的网栅形式换热器。毛细管网换热器采用悬挂的安装方式,吊装于蓄水池顶部,毛细管网底部采用槽钢作为固定基础,通过扎带绑定牢固。为防止海水对换热器的腐蚀,选用无规共聚聚丙烯(PP-R)管作为换热器材料。同时,为了增大换热面积,毛细管网换热器的管间距设计为 20 mm,单根毛细管管长 4 m,管外径 4.3 mm,壁厚 0.85 mm。毛细管网单片尺寸(长×宽)有 4 m×1 m,4 m×0.8 m,4 m×0.5 m 3 种,总换热面积约 15 416 m²(图 5)。

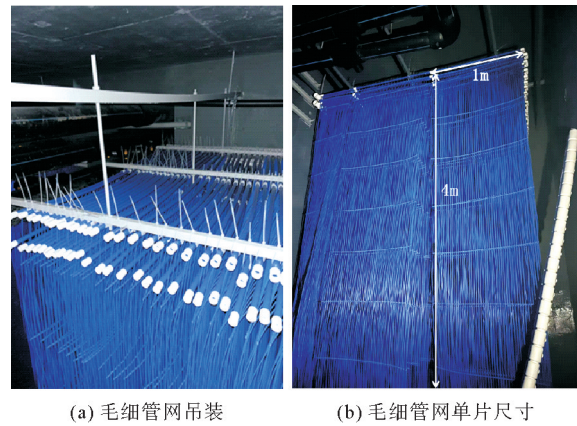


图 5 毛细管网换热器

1.5 实验设备和测试仪器

本实验选用型号为 HGRCFV-300DMH/AH 的双机头磁悬浮变频离心式水源热泵机组,额定制冷量为 879 kW,额定制冷功率为 129.2 kW,制冷剂为 R134a,由于入住率低于 50%,测试期间,双机头热泵机组仅开启 1 台压缩机运行。源侧和负荷侧各运行 1 台卧式离心泵,管内循环介质为经过软化的自来水。源侧循环水泵额定流量 110 m³/h,扬程 28 m,额定功率 15 kW。负荷侧循环泵额定流量 130 m³/h,扬程 35 m,额定功率 18.5 kW。采用卧式暗装风机盘管作为空调系统末端。机组及管路上装有温度、压力、流量等测试仪器,测试系统如图 6 所示。

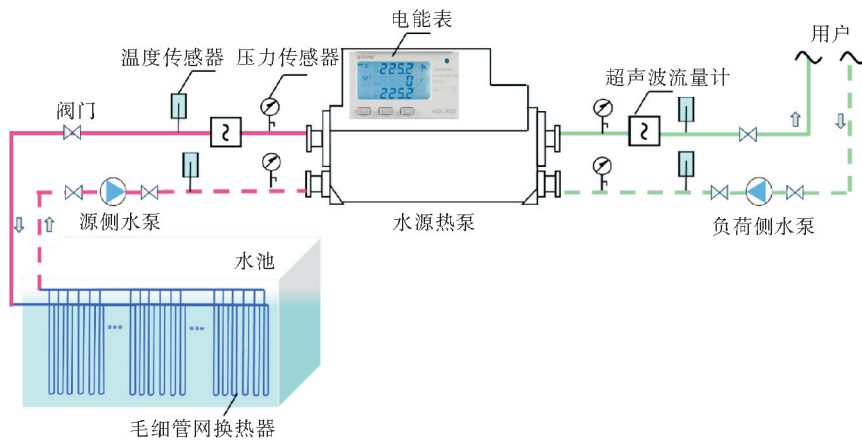


图 6 测量系统

本实验中涉及到的测量或监控数据包括:室内外空气温度、源侧进出口温度、源侧及负荷侧循环水泵流量和进出口压力、海水温度、负荷侧进出口温度、机组及循环水泵逐时功率。为获得以上测试或监控数据,采用的测试设备有:Pt100 铂电阻温度传感器、温度自记录仪、超声波流量计、压力表、电能表和安捷伦数据采集仪。各种测量仪器的量程以及精度如表 1 所示。

表 1 测量仪器参数

仪器名称	型号	量程	精度
温度自记录仪	Testo 174H	-20~70 °C	±0.5 °C
铂电阻温度传感器	Pt100	0~100 °C	±0.5 °C
超声波流量计	TUF-2000SW	0.2~32 m/s	±1%
海鸟温度自记录仪	SBE 56	-5~45 °C	±0.002 °C
电能表	ADL400	—	有功电能 0.5%
压力表	YTH-100	0~1.6 MPa	1.6%

2 实验数据处理方法

将采集到的数据代入式(1)和式(2)可以计算得到海水源侧放热量 Q 和机组制冷量 Q_c :

$$Q = \frac{\rho c V_1 (t_{1,\text{in}} - t_{1,\text{out}})}{3600} \quad (1)$$

$$Q_c = \frac{\rho c V_2 (t_{2,\text{out}} - t_{2,\text{in}})}{3600} \quad (2)$$

式中: Q 为换热器向海水释放的热量, kW; Q_c 为机组制冷量, kW; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; c 为水的定压比热容, 取 $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; V_1, V_2 分别为源侧、负荷侧循环水流量, m^3/h ; $t_{1,\text{in}}, t_{1,\text{out}}$ 分别为源侧进出口温度, $^\circ\text{C}$; $t_{2,\text{in}}, t_{2,\text{out}}$ 分别为负荷侧进出口温度, $^\circ\text{C}$ 。

为了评价空调系统中水系统的经济运行情况, 采用冷冻水输送系数、冷却水输送系数作为全年累计工况的评价指标。

$$W_{\text{chw}} = \frac{Q_c}{W_{\text{pl}}} \quad (3)$$

式中: W_{chw} 为冷冻水输送系数, 该指标的限值为 30; W_{pl} 为冷冻水泵功率, kW。

$$W_{\text{cw}} = \frac{Q}{W_{\text{p2}}} \quad (4)$$

式中: W_{cw} 为冷却水输送系数, 该指标的限值为 25; W_{p2} 为冷却水泵功率, kW。

制冷能效比(EER)是衡量机组效能的一个重要指标, 数值越高, 机组能效越高。此海水源热泵机组能效比 EER 可通过式(5)计算得到。

$$\text{EER} = \frac{Q_c}{W_{\text{hp}}} \quad (5)$$

式中:EER 为热泵机组制冷能效比; W_{hp} 为热泵机组输入功率, kW。

3 实验测试结果及分析

隧道渗流海水源热泵系统在 2023 年 6 月 21 日至 2023 年 9 月 24 日期间进行了制冷工况的性能测试, 热泵系统共运行 119 d。本文选取了室外温度相对较高的 31 d(7 月 10 日至 8 月 9 日)作为典型月对该系统性能进行分析, 系统运行模式为 24 h 连续。

典型月中青岛地区室外逐时温度与测试建筑室内逐时温度如图 7 所示。从图中可以看出室外空气温度变化幅度较大, 室外空气温度最大值为 $33.9 \text{ }^\circ\text{C}$, 高于青岛夏季空调计算干球温度, 属于极端炎热天气, 室外空气温度最小值为 $24.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 平均温度为 $28.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。而室内空气温度较为稳定, 室内空气温度最大值为 $25.9 \text{ }^\circ\text{C}$, 最小值为 $23.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 平均温度为 $24.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 室内空气温度能够满足设计要求, 使室内温度维持在 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。热泵系统运行良好, 制冷效果可以满足人员对室内环境的热舒适需求。

如图 8 所示, 制冷工况下, 负荷侧供水温度变化区间为 $[9.3, 12.1] \text{ }^\circ\text{C}$, 负荷侧回水温度变化区间为 $[10.6, 15.2] \text{ }^\circ\text{C}$; 源侧回水温度变化区间为 $[29.1, 33.9] \text{ }^\circ\text{C}$, 源侧供水温度变化区间为 $[30.8, 37.1] \text{ }^\circ\text{C}$ 。源侧及负荷侧供回水温差均低于设计时的 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 温差, 处于小温差循环。海水蓄水池充足的进水是整个系统的重要组成部分, 水源的水量应当满足用户制冷负荷的需要。水池进水流量间歇变化, 测试期间水池累计进水流量的变化区间为 $[1046, 1690] \text{ m}^3/\text{d}$, 日平均进水流量为 1305 m^3 。在大部分工作日机组制冷量与室外温度变化趋势基本一致, 极少部分时间里表现出相反的变化情况。这种差异主要表现在第 1 周以及其他周的周末, 主要受到室内人员变动的影 响。在系统连续运行的第 8 天至第 24 天, 源侧日平均回水温度基本持平, 水池经过换水后水温能恢复说明没有水路短路问题, 也没有热量堆积。在负荷较大以及水量较小时, 源侧回水温度会出现升高的情况, 后期需要根据负荷的变化, 对水池进水流量进行调节, 避免水池海水热堆积的情况。

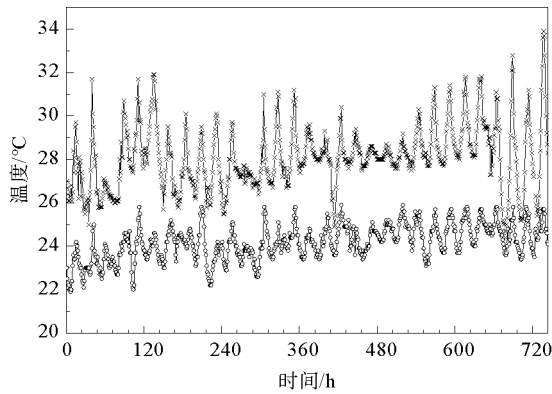


图 7 典型月室内外空气温度逐时变化
—x—室外温度; —o—室内温度

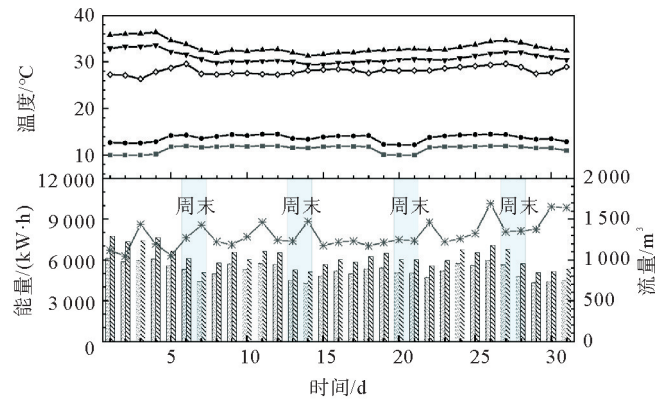


图 8 系统运行参数及气象参数

—o—室外空气温度; —▲—源侧供水温度; —▽—源侧回水温度;
—■—负荷侧供水温度; —◆—负荷侧回水温度;
▨ 机组制冷量; ▩ 源侧放热量; * 水池进水流量

如图 9 所示,热泵系统日累计耗电量的变化区间为[1188.1,1876.5] kW·h,系统日平均耗电量 1466.3 kW·h。其中,变频热泵机组可以根据实际需要动态调整运行频率和功率,以匹配实际的制冷需求,机组日耗电量变化区间为[736.4,1427.2] kW·h,机组平均日耗电量为 1011.5 kW·h。由于源侧及负荷侧水泵采用定频运行,水泵功率基本不变,分别为 9.1、9.9 kW。输配系统日耗电量 454.8 kW·h,占整个热泵系统能耗 31%,其中,源侧水泵日耗电量为 216.5 kW·h,负荷侧水泵日耗电量为 238.3 kW·h。由式(3)得冷冻水输送系数数值变化区间为[18.2,26.1],平均值为 22.3,数值略低于指标数值,用户侧循环水“大流量、小温差”现象是导致其指标低的主要原因;由式(4)得冷却水输送系数数值变化区间为[23.7,36.3],平均值为 29.2,数值高于指标值,较为正常。后期循环水泵应考虑变频运行,在部分负荷时自动调节水流量,降低水泵运行能耗的同时,系统性能又能得到提高。

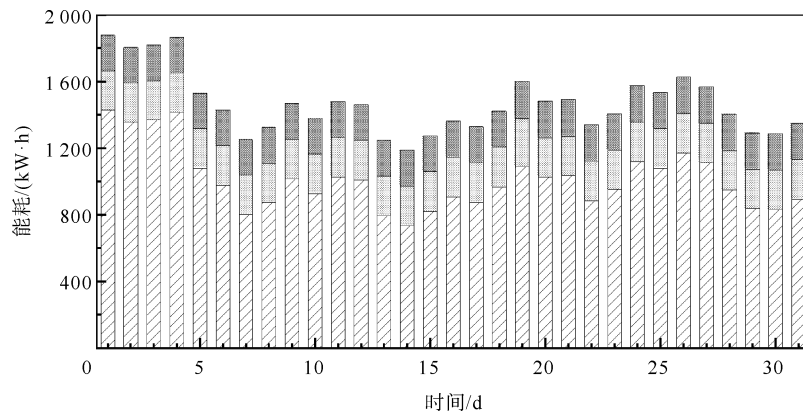


图 9 系统耗电量

▨ 机组; ■ 源侧水泵; ▩ 负荷侧水泵

将实验数据代入式(5)中,计算得到制冷工况下海水源热泵机组能效比,如图 10 所示,海水源热泵机组 EER 在 4.3~5.9 波动,EER 平均值为 5.3。理想工况下 $EER = T_c / (T_c - T_e)$,其中 T_c 为机组蒸发温度, T_e 为机组冷凝温度。在实际运行过程中,提高机组性能的外因主要从降低冷凝温度或提高蒸发温度两方面入手。对于冷凝侧,通过优化前端换热器换热性能、降低冷源温度等手段,降低换热器出水温度,进而降低冷凝温度。对于蒸发侧,通过合理匹配末端供冷需求,避免冷水供水温度过低,进而提高蒸发温度。相同负荷率下,冷凝温度与蒸发温度差值越小,机组性能越高;反之,冷凝温度与蒸发温度差值越大,机组性能越低^[14]。EER 最大值为 5.9,出现在第 15 天(7 月 24 日),主要原因是较低的换热器出水温度以及较高的负荷侧供水温度使得机组高效运行,源侧回水温度为 29.5℃,负荷侧供水温度 10℃,两者差值

最小,机组日平均负荷率为 57.5%,机组性能较高。机组 EER 最小值为 4.3,出现在第 4 天(7 月 13 日),源侧回水温度达到最大值 33.6 °C,负荷侧供水温度 10.2 °C,两者差值最大,机组日平均负荷率为 45.5%,机组性能相对较低。当负荷差别不大的情况下,EER 对水温的变化更敏感。因此,降低源侧回水温度以及提高负荷侧供水温度,从而减小冷凝温度与蒸发温度差值,有利于机组性能的提升。通过参考海水源热泵运行工况的外部条件,在室外温度及机组出水温度相同情况下,对比空气源热泵运行时机组的性能。空气源热泵不同运行工况性能参数由机组厂家提供^[15]。空气源热泵 EER 的变化范围为 3.7~3.9,机组平均 EER 为 3.8,低于海水源热泵机组能效。同一工况下,机组能效最高可相差 55%,以上数据表明海底隧道渗流海水源热泵系统在满足室内温度设计要求的同时仍然具有较大的节能优势。

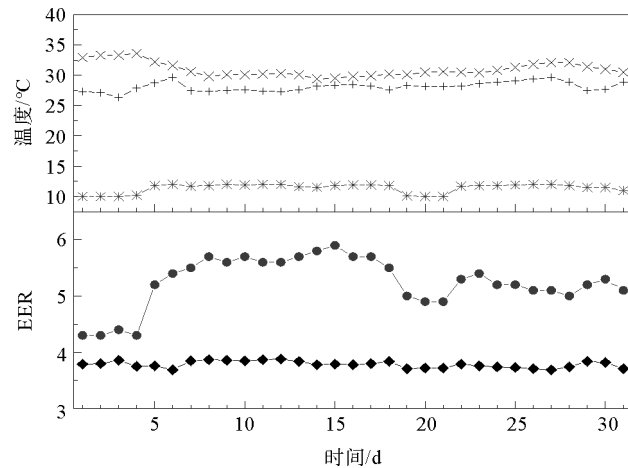


图 10 日平均 EER、机组供回水温度及室外温度
 -x- 源侧回水温度; + 室外温度; * 负荷侧供水温度
 ● 海水源热泵; ◆ 空气源热泵

4 结论

海底隧道渗流海水源热泵系统在建筑中应用,具有显著的节能效益,在理论上是可行的,在技术上是可靠的。该系统从 2023 年 6 月开始投入使用,未出现海水腐蚀和管路堵塞的问题,热泵系统一直处于稳定运行状态。本文通过现场测试,对海底隧道渗流海水源热泵系统制冷季的运行特性进行了分析,在室内实测温度 23.1~25.9 °C,源侧回水温度为 29.1~33.9 °C,负荷侧供水温度 9.3~12.1 °C 的条件下,得出以下结论:

1) 热泵运行期间,测试房间平均温度 24.5 °C,室内温度可以到达设计要求,系统运行良好,制冷效果可以满足人员对室内环境的热舒适需求。

2) 热泵系统日平均耗电量为 1466.3 kW·h,其中输配系统能耗占整个热泵系统能耗的 31%,后期可以通过搭配合理的控制策略,使水泵变频运行。

3) 测试期间水源热泵机组 EER 最小值为 4.3,最大值为 5.9,当负荷差别不大的情况下,EER 对水温的变化更敏感。后期应根据室外温度的变化,设定合适的冷冻水出水温度,从而提高机组的运行能效。海水源热泵机组 EER 平均值为 5.3,高于空气源热泵机组的能效,表明海底隧道渗流海水源热泵系统具有较大的节能优势。

参考文献(References):

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告: 2022 公共建筑专题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
Building Energy Efficiency Research Center of Tsinghua University. China building energy efficiency annual development research report: 2022 public buildings topic[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [2] 周金忠, 唐健, 贺维国, 等. 矿山法海底隧道废水排水系统设计实践[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(10): 1698-1705.
ZHOU Jinzhong, TANG Jian, HE Weiguo, et al. Design and application of wastewater drainage system in subsea tunnel constructed by mining method[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(10): 1698-1705.
- [3] 戴新, 贺维国, 吕青松. 矿山法水下隧道控制排水量标准及排水设计思路探讨[J]. 隧道与轨道交通, 2021(S2): 10-13.
DAI Xin, HE Weiguo, LV Qingsong. Discussion on the standard of controlled drainage and drainage design ideas of mine method underwater tunnels[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S2): 10-13.
- [4] 张红旗. 贵州省公路隧道消防水源选择与收集建议[J]. 交通科技, 2014(5): 97-99.
ZHANG Hongqi. Selection and collection of water sources for fire fighting in road tunnels in Guizhou Province recommendations[J]. Transportation Science & Technology, 2014(5): 97-99.

- [5] 赵延丰,王斌,邢睿磊,等. 高速公路水资源综合利用研究[J]. 市政技术,2020,38(1):171-174.
ZHAO Yanfeng,WANG Bin,XING Ruilei,et al. On comprehensive utilization of freeway water resources[J]. Municipal Engineering Technology,2020,38(1):171-174.
- [6] 邱冠华,汪程鹏,王生辉,等. 海底隧道渗水海水淡化中试试验研究[J]. 盐科学与化工,2022,51(4):16-18.
QIU Guanhua,WANG Chengpeng,WANG Shenghui,et al. Pilot-scale test research on submarine tunnel seepage seawater desalination[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry,2022,51(4):16-18.
- [7] 金吉钊,张琳杰,李俊达. 海底隧道渗水余热利用[J]. 节能与环保,2023(12):80-85.
JIN Jizhao,ZHANG Linjie,LI Junda. Utilization of residual heat from seepage water in submarine tunnels[J]. Energy Conservation & Environmental Protection,2023(12):80-85.
- [8] 李振. 近海岸浅滩毛细管热泵系统运行特性研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2017.
LI Zhen. Research on operation characteristic of the heat pump system with capillary heat exchanger in the shallows near the coast[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology,2017.
- [9] 姜坤. 海水源热泵运行特性实验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2018.
JIANG Kun. Experimental study on operation characteristics of seawater source heat pump[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology,2018.
- [10] 王敬博,于慧俐,刘明辉,等. 基于 TRNSYS 的土壤-海水双源热泵系统运行特性分析[J]. 可再生能源,2021,39(12):1610-1616.
WANG Jingbo,YU Huili,LIU Minghui,et al. Operation characteristics analysis of seawater-soil dual source heat pump system based on TRNSYS[J]. Renewable Energy Resources,2021,39(12):1610-1616.
- [11] 刘明辉,于慧俐,徐光瑞,等. 海水-土壤双源热泵系统的气候适用性研究[J]. 青岛理工大学学报,2023,44(3):50-56.
LIU Minghui,YU Huili,XU Guangrui,et al. Study on climate applicability of seawater-soil dual source heat pump system[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2023,44(3):50-56.
- [12] YU H L,WANG J B,LIU J,et al. Performance of capillary box heat exchangers buried in seabed for seawater-source heat pumps[J]. Applied Thermal Engineering,2022,213:118688.
- [13] YU H L,TIAN Y,ZHAO X,et al. Numerical investigation on operational performance of seawater-source heat pump system coupled with capillary-box heat exchangers[J]. Case Studies in Thermal Engineering,2023,52:103724.
- [14] 邓杰文,钱漾漾,魏庆芑,等. 磁悬浮变频冷水机组运行特性分析及控制策略研究[J]. 暖通空调,2020,50(3):57-62.
DENG Jiwen,QIAN Yangyang,WEI Qingpeng,et al. Operation characteristics and control strategy of magnetic bearing variable frequency chillers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2020,50(3):57-62.
- [15] 江森自控. 约克空调产品之空气源热泵机组[EB/OL]. (2016-02-24) [2024-04-12]. <https://max.book118.com/html/2016/0222/35536084.shtm>.
Johnson Controls. York air conditioning products of the air source heat pump unit[EB/OL]. (2016-02-24) [2024-04-12]. <https://max.book118.com/html/2016/0222/35536084.shtm>.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)