

# 大型地表水地源热泵的多因素动态能耗分析\*

同济大学 盈丰(上海)房地产发展有限公司 邓波<sup>☆</sup>  
上海世博(集团)有限公司 陈晟  
同济大学 龙惟定  
上海世博(集团)有限公司 宁风

**摘要** 以上海某工程为例,运用多因素动态能耗分析方法,对常规水源热泵系统、水源热泵和冰蓄冷相结合系统以及水冷冷水机组系统的运行费用进行了比较。通过对不同系统制冷站合理配置和优化运行的研究,制定了运行策略,并得到了相关结论。

**关键词** 地表水地源热泵 负荷特性 多因素分析

## Multi-factor dynamic energy consumption analysis for a large scale surface water source heat pump system

By Deng Bo<sup>★</sup>, Chen Sheng, Long Weiding and Ning Feng

**Abstract** Taking a project in Shanghai for example, compares the operating costs among the conventional water source heat pump system, water source heat pump plus ice storage system and water-cooled chiller system by using the multi-factor dynamic analysis method. Studies the arrangement and optimized operating strategy for different refrigerating stations and obtains some conclusions related to the optimal operating strategy.

**Keywords** surface water source heat pump, load performance, multi-factor analysis

★ Tongji University, Shanghai, China

①

水源冷热水机组是一种利用地表面、浅层水源(如地下水、河流和湖泊)或者是人工再生水源(工业废水、地热尾水等),既可供热又可供冷的高效节能型机组。上海位于长江之畔、东海之滨,有着丰富的江河资源,完全可以使用水源冷热水机组来作为热源与冷源。本文以上海某建筑为例,运用多因素动态能耗分析方法,对分别采用常规水源热泵系统、水源热泵和冰蓄冷相结合系统以及水冷冷水机组系统进行能耗分析比较,并得出相关结论。

利用 DOE-2 建立的空调动态负荷计算模型

得到该建筑的全年最大冷负荷为 30 942 kW,该值出现在 7 月 9 日 12:00;最大热负荷为 25 672 kW,该值出现在 1 月 1 日 13:00。同时考虑江水温度、负荷和机组部分负荷性能这三大因素的计算负荷即为折算负荷。利用 TRNSYS 建立系统仿真器,得到该建筑江水源热泵逐时折算供冷量的最大值为 27 951 kW,其对应的出现时刻为 8

①<sup>☆</sup> 邓波,男,1977 年 6 月生,工学硕士,在职博士研究生,工程师  
200333 上海市普陀区富平路 737 弄 27 号 203 室  
(O) 13818082673  
E-mail: dengbob@163.com

收稿日期:2008-04-07  
修回日期:2008-07-02

月 3 日 12:00; 江水源热泵逐时折算供热量的最大值为 13 095 kW, 其对应的出现时刻为 2 月 26 日 12:00。

## 1 常规水源热泵系统

### 1.1 冷热站系统的配置

#### 1.1.1 水源热泵主机配置(见表 1)

表 1 水源热泵主机配置

制冷量/kW	台数/台	功率/kW
6 089	4	1 093
4 219	1	757

单台主机供冷工况下自耗电量随负荷率变化, 根据机组的部分负荷性能曲线可计算出该机组在运行中处于部分负荷时的功耗。

#### 1.1.2 冷水泵配置

假定系统为一次泵定流量加压差旁通的形式, 故单台冷水泵耗电量恒定。冷水泵共 7 台, 分两种型号, 具体配置见表 2。

表 2 常规水源热泵系统冷水泵配置

流量/(m <sup>3</sup> /h)	扬程/m	功率/kW	备注
1 100	38	160	四用一备
820	38	132	一用一备

#### 1.1.3 冷却水泵配置

冷却水泵共 7 台, 分两种型号, 具体配置见表 3。

#### 1.1.4 运行能耗费用

主机供冷工况下, 机房运行能耗主要由主机

表 5 常规水源热泵系统峰值负荷出现日运行能耗

时间	电价/(元/kWh)	江水温度/°C	总负荷/kW	系统供冷量/kW	主机运行情况	主机能耗/kW	总能耗/kW	运行费用/元
10:00~11:00	1.044	30.9	8 596.63	8 596.63	2 台大	1 440	2 080	2 171.5
11:00~12:00	0.676	31.8	11 524.50	11 524.50	2 台大	2 070	2 710	1 832.0
12:00~13:00	0.676	32.7	27 951.00	27 951.00	4 台大 1 台小	5 129	6 673	4 511.0
13:00~14:00	0.676	32.7	14 515.40	14 515.40	3 台大	2 541	3 501	2 367.0
14:00~15:00	0.676	32.7	16 625.60	16 625.60	3 台大	2 985	3 945	2 667.0
15:00~16:00	0.676	32.7	12 158.90	12 158.90	2 台大	2 186	2 826	1 910.4
16:00~17:00	0.676	32.7	8 969.48	8 969.48	2 台大	1 566	2 206	1 491.3
17:00~18:00	0.676	32.7	22 323.70	22 323.70	4 台大	4 008	5 288	3 574.7
18:00~19:00	1.044	31.8	16 014.40	16 014.40	3 台大	2 859	3 819	3 987.0
19:00~20:00	1.044	29.9	12 626.80	12 626.80	2 台大	2 186	2 826	2 950.3
20:00~21:00	1.044	29.0	11 505.70	11 505.70	2 台大	1 930	2 570	2 683.0
21:00~22:00	0.676	29.0	8 082.74	8 082.74	2 台大	1 310	1 950	1 318.2
总计			170 894.85	170 894.85		30 210	40 394	31 463.4

## 2.1 冷热站系统的配置

冰蓄冷水源热泵系统主机共 4 台, 制冷量均为 3 516 kW(1 000 rt), 功率为 607 kW。

冷水泵配置见表 6。冷却水泵为四用一备, 单台水泵的流量为 750 m<sup>3</sup>/h, 扬程为 32 m, 功率为

表 3 常规水源热泵系统冷却水泵配置

流量/(m <sup>3</sup> /h)	扬程/m	功率/kW	备注
1 300	32	160	四用一备
984	32.7	132	一用一备

耗电量、冷水泵耗电量、冷却水泵耗电量、机房风机及水处理设备等附属设备的耗电量组成。由于制冷站通风机及其他附属设备耗电量较小且目前设计资料不全, 故在计算机房运行能耗时忽略此部分耗电量。

针对某一冷负荷率合理配置运行的设备台数, 将上述三项中的能耗折合成费用并相加, 可得到该冷负荷率下的运行能耗费用。

#### 1.2 0~100% 负荷率下制冷机房部分设备启停方案(见表 4)

表 4 常规设备启停方案

总负荷率/%	0~15	15~21	22~42	43~63	64~85	85~100
单台主机负荷率/%	1~100	70~100	50~100	66~100	75~100	85~100
启动主机情况	1 台小	1 台大	2 台大	3 台大	4 台大	4 台大 1 台小

本文中常规设备启停方案是指, 在现有的主机满载(100% 负荷下运行)且末端仍存在负荷增加的趋势时, 启动另一台主机及其相关设备。供冷、供热工况下方案相同。

#### 1.3 峰值负荷(100% 负荷率)出现日(8 月 3 日)常规水源热泵系统能耗计算结果(见表 5)

## 2 水源热泵和冰蓄冷相结合系统

90 kW。

表 6 冰蓄冷水源热泵系统冷水泵配置

	流量/(m <sup>3</sup> /h)	扬程/m	功率/kW	备注
冷水一次泵(乙二醇泵)	660	28	75	四用一备
冷水二次泵	660	28	75	四用一备

冰蓄冷水源热泵系统机房运行能耗参见常规水源热泵系统,但冷水泵包括一、二次水泵。

2.2 峰值负荷(100%负荷率)出现日(8月3日)

冰蓄冷水源热泵系统能耗计算结果(见表7)

表7 冰蓄冷水源热泵系统峰值负荷出现日运行能耗表

时间	电价/(元/kWh)	江水温 度/°C	总负荷/ kW	系统供冷量/kW		蓄冰量/ kW	主机运行 台数/台	主机能 耗/kW	总能耗/ kW	运行费 用/元
				主机供冷	融冰供冷					
00:00~01:00	0.232	27.1	0	0	0	10 197.6	4	2 428	3 088	716.4
01:00~02:00	0.232	29.0	0	0	0	9 833.4	4	2 428	3 088	716.4
02:00~03:00	0.232	29.0	0	0	0	9 833.4	4	2 428	3 088	716.4
03:00~04:00	0.232	28.1	0	0	0	9 979	4	2 428	3 088	716.4
04:00~05:00	0.232	28.1	0	0	0	9 979	4	2 428	3 088	716.4
05:00~06:00	0.232	29.9	0	0	0	9 728.2	4	2 428	3 088	716.4
06:00~07:00	0.676	29.9	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00~08:00	0.676	29.9	0	0	0	0	0	0	0	0
08:00~09:00	1.044	29.9	0	0	0	0	0	0	0	0
09:00~10:00	1.044	29.9	0	0	0	0	0	0	0	0
10:00~11:00	1.044	30.9	8 596.63	0	8 596.63	0	0	0	450	469.8
11:00~12:00	0.676	31.8	11 524.5	11 524.5	0	0	4	1940	2 900	1 960.4
12:00~13:00	0.676	32.7	27 951	13 972	13 979	0	4	2468	3 428	2 317.3
13:00~14:00	0.676	32.7	14 515.4	13 972	543.4	0	4	2468	3 428	2 317.3
14:00~15:00	0.676	32.7	16 625.6	13 972	2 653.6	0	4	2468	3 428	2 317.3
15:00~16:00	0.676	32.7	12 158.9	12 158.9	0	0	4	2 092	3 052	2 063.2
16:00~17:00	0.676	32.7	8 969.48	8 969.48	0	0	3	1 542	2 262	1 529.1
17:00~18:00	0.676	32.7	22 323.7	13 972	8351.7	0	4	2468	3 428	2 317.3
18:00~19:00	1.044	31.8	16 014.4	0	16 014.4	0	0	0	600	626.4
19:00~20:00	1.044	29.9	12 626.8	0	12 626.8	0	0	0	600	626.4
20:00~21:00	1.044	29.0	11 505.7	0	11 505.7	0	0	0	600	626.4
21:00~22:00	0.676	29.0	8 082.74	8 082.74	0	0	3	1 257	1 977	1 336.5
22:00~23:00	0.232	28.1	0	0	0	9 979	4	2 428	3 088	716.4
23:00~00:00	0.232	27.1	0	0	0	10 197.6	4	2 428	3 088	716.4
总计			170 894.85	96 623.62	74 271.23	79 727.2		33 659	50 857	24 238.6

对于供冷工况而言,在“江水温度-负荷-机组部分负荷性能”多影响因素下进行的江水源热泵选型与常规选型方法相比,可减少总的主机装机容量。图1为水冷冷水机组不同工况时的制冷量曲线图(蓄冰工况),图2给出了江水源热泵逐时折算供冷量的仿真结果。江水源热泵逐时折算供冷量的最大值为27 951 kW,出现在8月3日12:00;而从逐时计算负荷来看,最大冷负荷为30 942 kW(该值也是常规机组选型的依据),出现在7月9日

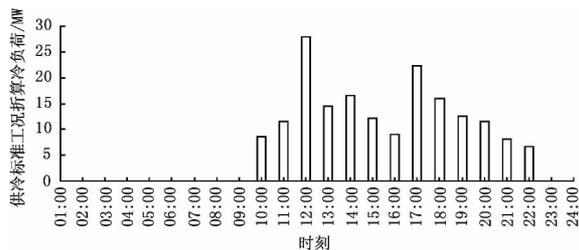


图2 峰值负荷出现日逐时折算冷负荷

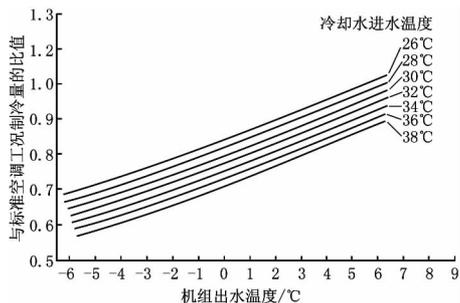


图1 水冷冷水机组不同工况制冷量曲线图(蓄冰工况)

12:00。

### 3 水冷冷水机组系统

#### 3.1 冷热站系统的配置

水冷冷水机组系统主机共6台,单台制冷量为5 598 kW(1 500 rt),功率为1 015 kW。

冷水泵为六用一备,单台流量为984 m<sup>3</sup>/h,扬程为32.7 m,功率为132 kW。冷却水泵为六用一备,单台流量为1 150 m<sup>3</sup>/h,扬程为28 m,功率为132 kW。冷却塔为六用一备,单台流量为1 200 m<sup>3</sup>/h,功率为33 kW。

水冷冷水机组系统机房运行能耗参见常规水源热泵系统,不同的是增加了冷却塔的耗电量。

3.2 8月3日水冷冷水机组系统能耗计算结果(见表8)

表8 水冷冷水机组系统峰值负荷出现日运行能耗

时间	电价/(元/(kWh))	湿球温度/℃	总负荷/kW	系统供冷量/kW	主机运行台数/台	主机能耗/kW	总能耗/kW	运行费用/元
10:00~11:00	1.044	27.3	9 873.479	9 873.479	2	1 622	2 216	2 313.5
11:00~12:00	0.676	27.3	12 905.290	12 905.290	3	2 102	2 993	2 023.3
12:00~13:00	0.676	28.2	30 252.170	30 252.170	6	5 059	6 841	4 624.5
13:00~14:00	0.676	27.2	15 710.450	15 710.450	3	2 668	3 559	2 405.4
14:00~15:00	0.676	27.2	17 994.410	17 994.410	4	2 931	4 119	2 784.3
15:00~16:00	0.676	27.2	13 159.930	13 159.930	3	2 144	3 035	2 051.2
16:00~17:00	0.676	26.1	9 707.933	9 707.933	2	1 541	2 135	1 443.2
17:00~18:00	0.676	26.1	24 161.630	24 161.630	5	3 836	5 321	3 596.4
18:00~19:00	1.044	27.3	17 933.210	17 933.210	4	2 922	4 110	4 291.0
19:00~20:00	1.044	25.5	14 741.820	14 741.820	3	2 352	3 243	3 384.8
20:00~21:00	1.044	24.7	13 617.990	13 617.990	3	2 146	3 037	3 170.4
21:00~22:00	0.676	24.7	9 566.628	9 566.628	2	1 515	2 109	1 425.6
总计			189 624.900	189 624.900		30 838	42 718	33 513.6

#### 4 三种系统的对比

4.1 从主机能耗情况分析可知,部分冰蓄冷加水源热泵系统和常规水源热泵系统差别并不大,两者仅差 11.4%。这是由于蓄冰工况虽然蒸发温度降低,但夜间冷却水温度较低,致使主机 COP 值下降并不明显。

4.2 8月3日常规水源热泵系统主机能耗比水冷冷水机组系统主机能耗约小 2%。虽然水冷冷水机组冷却水系统阻力小于常规水源热泵系统,但由于水冷冷水机组系统装机容量大且冷却塔存在 3~5℃的冷却幅高(冷却幅高=冷却塔出水温度-湿球温度)并增加冷却塔能耗,致使水冷冷水机组系统冷却塔出水温度未必比江水温度低,所以和常规水源热泵系统相比水冷冷水机组系统主机 COP 值不升反降,主机耗能略微上升。

4.3 8月3日为水源热泵系统的峰值负荷日(100%负荷率),而水冷冷水机组系统的峰值负荷日为 7月9日。如果将 8月3日水源热泵系统的耗能情况和 7月9日水冷冷水机组系统的耗能情况相比较,水源热泵系统的节能优越性将得到进一步的体现。

4.4 从系统总能耗情况分析可知,部分冰蓄冷水源热泵系统和常规水源热泵系统差别较大,两者差 25.9%。这是由于蓄冰工况采用二次泵系统,且增加的蓄冰装置和换热器造成了一次乙二醇泵的功率有较大幅度增加。

4.5 8月3日常规水源热泵系统总能耗比水冷冷水机组系统总能耗约小 5.44%。这不仅是由于水

冷冷水机组系统主机能耗增加,而且其增加了冷却塔耗能和整个系统装机容量(包括冷却水泵和冷水泵)大。

4.6 从系统运行费用情况分析可知,部分冰蓄冷水源热泵系统和常规水源热泵系统差别很大,两者差 29.8%。这是由于蓄冰工况可以充分利用峰谷电价差,降低了运行费用。制定优化的蓄冰工况运行策略是降低系统运行费用的一个重要因素,应尽量在电价高峰时段采用融冰工况运行。

4.7 从系统运行费用情况分析可知,常规水源热泵系统比水冷冷水机组系统约少 6.52%。

4.8 从对电网的削峰填谷作用分析可知,部分冰蓄冷加水源热泵系统比常规水源热泵系统装机容量小近 50%,部分冰蓄冷水源热泵系统装机容量为 3 388 kW,常规水源热泵系统装机容量为 6 673 kW。这对降低电网装机容量、节省投资、缓解当前电力紧张局面具有举足轻重的作用。而且由于冰蓄冷系统机组单台容量较小,更易于对系统进行调节。

4.9 上述计算过程假定三者均为定流量系统,无论采用何种系统,由于装机容量大,采用变流量系统意义重大,能大幅降低运行费用。常规水源热泵系统水泵的配电装机容量达到制冷站总装机容量的 23%,部分冰蓄冷水源热泵系统水泵的配电装机容量更达到制冷站总装机容量的 28.3%。

4.10 对冰蓄冷江水源热泵系统应该进行“江水温度-负荷-电价-机组部分负荷性能”4个影响因