

HYY 地能热泵系统在国家大剧院景观水池的应用

徐生恒、凌人滨、贺永平、卢殿通

恒有源科技发展有限公司

北京市海淀区杏石口路 102 号，邮编：100093

关键词：景观水池、浅层地能、单井抽灌技术、HYY 地能热泵系统

摘要：国家大剧院位于北京天安门广场、人民大会堂西侧，室外设置露天景观水池，面积 35000 m²。恒有源公司利用原始创新的 HYY 地能热泵系统，采集浅层地能，冬季为景观水池供热、调节池水温度，使池水在冬季不结冰。

一、概况

国家大剧院位于北京天安门广场人民大会堂西侧，总建筑面积 22 万 m²。室外设置露天景观水池，水池内周长 615 米，外周长 930 米，水池面积 35000 m²，储水量 18000 m³，平均水深 514mm。为防止冬季池水冻结，需要对池水冬季加热。池水加热的热源采用中央液态冷热源环境系统，冷热源机房与池水水处理站相衔接，末端设备利用池水水处理循环水系统。池水循环及处理共设四个机房；东北、西北机房，循环水量各为 775 m³/h；东南、西南机房，循环水量各为 332.5 m³/h，循环水总量 2215 m³/h。池水循环周期为 $(18000 \text{ m}^3 \div 2215 \text{ m}^3) = 8.1$ 小时。

去年冬季运行结果，2008 年 1 月，池水平均温度 4.41℃，池水最低温度在 1.5℃ 以上。除去少数几天北京最冷的日子（1 月 24 日前后），水面出现局部结冰外，景观水池，基本上实现了在寒冷的冬天不结冰。

二、池水加热负荷计算

原始条件：

1、北京市冬季大气压 1020.4mbar，夏季大气压 998.6mbar；

冬季水暖供热，室外设计温度-9℃，空调供热室外设计温度-12℃，室外最低日平均-15.9℃；

夏季空调，室外设计温度 33.2℃，室外空调日平均 28.6℃；

最冷月平均室外计算相对湿度 45%；

冬季平均室外风速 2.8m/s；

冬季日照率 67%;

极端气温最低为-27.4℃, 最高为 40.6℃;

极端最低平均温度为-17.1℃, 最高极端平均温度 37.1℃; 以上数据统计年份 1951 年—1980 年, 参见《采暖通风与空气调节设计规范》(GBJ19-87)。

由于水池水的蓄热能力, 热损失转化为热负荷过程中, 存在着延迟现象, 热负荷的峰值不但低于热损失的峰值, 而且在时间上有所滞后, 因此本设计方案室外计算温度采用:

冬季采暖温度-9℃, 室外风速 2.8m/s。

2、水池面积 35000 平方米。

3、池水深平均 0.514 米。

4、水池储水量 18000 立方米。

要求: 冬季最冷季池水不冻温度 $t_s=1.5^\circ\text{C}$;

散热损失分析:

- a、水面蒸发损失热量 Q_z
- b、水面传导损失热量 Q_{ch}
- c、池底和池壁传导损失热量 Q_{db}
- d、管道和设备散热损失 Q_{sh}
- e、补充水加热所需热量 Q

1. 水面蒸发损失的热量计算:

$$Q_{z1} = 1.163r(0.0174V_f + 0.0229)(P_b - P_q) \times F \times 760/B \quad (1)$$

式中: r — 水的蒸发汽化的潜热 596.51Kcal/Kg

V_f — 池水面上的风速 $V_f = 2.8 \text{ m/s}$

B — $1020.4 \times 750.1 \times 10^{-3} = 765.4 \text{ mmHg}$

P_b — 与池水温度相等时饱和空气水蒸汽的分压力

$P_b = 6.80 \times 0.7501 = 5.10 \text{ mmHg}$

P_q — 空气的水蒸汽的分压力

$P_q = P_{qb} \times 45\% = 2.83 \times 0.7501 \times 0.45 = 0.96 \text{ mmHg}$

1) 水面蒸发损失的热量

$$Q_{z1} = 1.163r(0.0174V_f + 0.0229)(P_b - P_q) \times F_1 \times 760/B \quad (2)$$

式中：F₁— 水池面积 35000 平方米

$$Q_{z1} = 1.163 \times 596.51 \times (0.0174 \times 2.8 + 0.0229) \times (5.10 - 0.96) \times 35000 \times 760 / 765.4$$
$$= 7148.67 \text{ kW} \quad (3)$$

2) 瀑布水面蒸发损失的热量

$$Q_{z2} = 1.163V(0.0174V_f + 0.0229)(P_b - P_q) \times F_2 \times 760 / B \quad (4)$$

式中：F₂— 瀑布水面积 1076.3=(615×1.75)平方米，计算面积按 2 倍考虑

$$Q_{z2} = 1.163 \times 596.51 (0.0174 \times 2.8 + 0.0229) (5.10 - 0.96) \times$$
$$1076.3 \times 2 \times 760 / 765.4$$
$$= 439.66 \text{ kW} \quad (5)$$

3) 水面蒸发总损失的热量

$$Q_z = Q_{z1} + Q_{z2}$$
$$= 7148.67 + 439.66$$
$$= 7588.33 \text{ kW} \quad (6)$$

2. 水面传导损失的热量计算

1) 水面传导损失的热量

$$Q_{ch1} = 1.163 \alpha F(t_s - t_q) \text{ kW} \quad (7)$$

式中：α— 水面传热系数，近似采用 8Kcal/m²·h·°C

t_s— 池水温度，采用 1.5°C

t_q— 空气温度，采用 -9°C

F— 水池面积，35000 平方米

$$Q_{ch1} = 1.163 \times 8 \times 35000 (1.5 + 9)$$
$$= 3419.22 \text{ kW} \quad (8)$$

2) 瀑布水面传导损失的热量

$$Q_{ch2} = 1.163 \alpha F(t_s - t_q) \text{ kW} \quad (9)$$

式中：α— 水面传热系数，近似采用 8Kcal/m²·h·°C

t_s— 池水温度，采用 1.5°C

t_q— 空气温度，采用 -9°C

F— 瀑布水面积，1076.3 平方米，计算面积按 2 倍考虑

$$Q_{ch2} = 1.163 \times 8 \times 1076.3 \times 2 \times (1.5 + 9)$$

$$= 210.29 \text{ kW} \quad (10)$$

3) 水面传导总损失的热量

$$\begin{aligned} Q_{ch} &= Q_{ch1} + Q_{ch2} \\ &= 3419.22 + 210.19 \\ &= 3629.41 \text{ kW} \end{aligned} \quad (11)$$

3. 池壁、池底传热量

1) 池壁传热量

$$Q_b = 1.163KF(t_s - t_q) \text{ kW} \quad (12)$$

式中：K— 池壁传热系数，近似采用 $3.5 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

t_s — 池水温度，采用 1.5°C

t_q — 空气温度，采用 -9°C

F— 池壁面积， $957 (930 \times 0.5 + 615 \times 0.8)$ 平方米

$$\begin{aligned} Q_b &= 1.163 \times 3.5 \times 957 \times (1.5 + 9) \\ &= 40.90 \text{ kW} \end{aligned} \quad (13)$$

2) 池底传热量

$$Q_d = 1.163 \alpha F(t_s - t_t) \text{ kW} \quad (14)$$

式中：K— 土壤传热系数，近似采用 $1 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

t_s — 池水温度，采用 1.5°C

t_t — 土壤温度，采用 -5°C

F— 与土壤接触的池底面积， $19295 = (35000 - 15705)$ 平方米

$$\begin{aligned} Q_d &= 1.163 \times 1 \times 19295 \times (1.5 + 5) \\ &= 145.86 \text{ kW} \end{aligned} \quad (15)$$

3) 池壁、池底总损失热量

$$\begin{aligned} Q_{db} &= Q_d + Q_b \\ &= 40.90 + 145.86 \\ &= 186.76 \text{ kW} \end{aligned} \quad (16)$$

4. 其它热损失

管道和设备散热损失较小，忽略不计。

5. 水池座于车库等建筑上方的得热量

水池座于车库上方的得热量

$$Q_k = 1.163 \alpha F (t_t - t_s) \text{ kW} \quad (17)$$

式中：K— 车库传热系数，近似采用 $1\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

t_s — 池水温度，采用 1.5°C

t_t — 车库温度，采用 5°C

F — 与车库接触的池底面积， $15705 (210 \times 60 + 135 \times 23)$ 平方米

$$\begin{aligned} Q_k &= 1.163 \times 1 \times 15705 \times (5 - 1.5) \text{ kW} \\ &= 63.93 \text{ kW} \end{aligned} \quad (18)$$

其他总得热量不计

$$\begin{aligned} Q_d &= Q_k \\ &= 63.93 \text{ kW} \end{aligned} \quad (19)$$

5. 总热损失：

$$\begin{aligned} Q &= Q_z + Q_{ch} + Q_{db} - Q_d \\ &= 7588.33 + 3629.41 + 186.76 - 63.93 \\ &= 11340.57 \text{ kW} \end{aligned} \quad (20)$$

三、HYY 设计和计算

I) 换热方案及能量采集装置设计

根据国家大剧院水池的要求，初步确定水池冬季池水温度 $t_s = 1.5^\circ\text{C}$ 。地下水温度为 $t_x = 12^\circ\text{C}$ ，地下水回灌温度 $t_g = 7^\circ\text{C}$ ，流量为 $100\text{m}^3/\text{h}$ 。相比之下，地下水为高温热源。将地下水为 12°C 的水抽取上来通过水-水换热方式将地下水的热量传给池水，池水温度升高。单个采集装置的能力：

$$\begin{aligned} Q_s &= 1.163 \times G \times \Delta t \times C + (8 \times 148 \times 10^3 \div 18) \\ &= 1.163 \times 100 \times 10^3 \times 5 + 65777.8 \\ &= 647.3 \text{ kW} \end{aligned} \quad (21)$$

室外计算采用 -9°C 时，采集装置数量：

$$\begin{aligned} N &= Q / Q_s \\ &= 11340.57 / 647.3 \\ &= 17.52 (\text{个}) \end{aligned} \quad (22)$$

由于水池水循环系统已确定为四个循环水处理站，且每个站的循环流量均已确定，

冷热源系统的加热冷却的热量与冷量只能通过站房的各自的循环流量带入池内，故冷热源得采集装置的数量应与各站的循环流量相对应。结合已确定四个站房的循环流量配设冷热源采集装置，通过对四个站流量的分析及工程的可靠性，确定冷热源采集装置数量为 18 个。

II) 设备的选择计算及冷热源井布置

设备选择原则如下：

- a. 设备及系统配置应符合北京市能源与环保政策的要求；
- b. 设备应具有显著的节能环保特点与效果；
- c. 设备性能先进，有较好的性能价格比；
- d. 设备运行安全可靠，便于调节，运行费用经济；

1、冷热源主机选择

采用“单井抽灌”技术，采集地源热量与池水进行热交换补充池水的散热损失。采集装置设置情况及提升器型号如下：

东北站：选取 HT760，3 台；

西北站：选取 HT760，3 台；

东南站：选取 HT760，1 台；

西南站：选取 HT760，1 台；

根据国家大剧院总体规划，原没有考虑冷热源机房位置，现可在水池底部建冷热源机房，冷热源机房设在水处理站旁，各冷热源机房配合水处理站使用，东北、西北机房各设 3 台冷热源主机，东南、西南机房各设 1 台冷热源主机，东北、西北冷热源机房各设 9 台板式换热器，东南、西南冷热源机房各设 4 台板式换热器，机房详见附图。大剧院室外没有可以打井的空地，现可在冷热源机房旁打井，井间距 10 米，东北、西北各打 6 口井，东南、西南各打 3 口井，井口标高为-11 至-12 米，冷热源井和水池底板之间空间建房子，冷热源井下安装低位能量采集装置。

2、潜水泵的选择

流量:100m³/h，扬程：54 m，电机功率 25kW。

水泵数量：18 台

3、换热器的选择计算

a) 冷热源井水与池水换热器的选择计算

已知:

1. 采集装置流量 100t/h, 进出换热器井水温度 12/7℃。
2. 池水总循环流量 2215t/h, 进单台换热器的流量 123. 1t/h。
3. 池水最低温度 $t_1=1.5^\circ\text{C}$ 。

板式换热器出口温度的计算:

$$Q=C \times \Delta t \times G, \quad \Delta t=t_2-t_1 \quad (23)$$

t_1 — 换热器池水侧进水温度

t_2 — 换热器池水侧出水温度

$$G_1/G_2=\Delta t_2/\Delta t_1, \quad \Delta t_2=G_1 \times \Delta t_1/G_2$$

$$t_2=t_1+G_1 \times \Delta t_1/G_2=1.5+100 \times 5/123.1=5.56^\circ\text{C} \quad (24)$$

池水混合绝热温度:

$$\begin{aligned} t_2 &= (15785 \times 1.5+2215 \times 5.56)/18000 \\ &= 2.00^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (25)$$

对数温差: $\Delta t=(\Delta t_d-\Delta t_x)/(\ln \Delta t_d/\Delta t_x)$

$$=(6.44-5.5)/\ln 6.44/5.5)$$

$$=5.96^\circ\text{C} \quad (26)$$

根据板式换热器传热特性曲线 (介质水-水), 传热系数确定为 $K=2000\text{W}/\text{m}^2\text{C}$

换热面积计算:

$$\begin{aligned} H &= 1.163 \times 5 \times 100 \times 1000/2000 \times 5.96 \times 0.7 \\ &= 69.70\text{m}^2 \end{aligned} \quad (27)$$

选用板式换热器 BR65-80, 单台换热面积 80m^2 , 数量 18 台。

b) 能量提升器与池水换热器的选择计算

已知:

1. 能量提升器流量 100t/h, 进出换热器井水温度 25/20℃。
2. 池水总循环流量 2215t/h, 进单台换热器的流量 123. 1t/h。
3. 池水最低温度 1.5°C 。

板式换热器出口温度的计算:

$$Q=C \times \Delta t \times G \quad (28)$$

t_1 — 换热器池水侧出水温度

t_2 —换热器池水侧进水温度

$$G_1/G_2 = \Delta t_2 / \Delta t_1, \quad \Delta t_2 = G_1 \times \Delta t_1 / G_2$$

$$t_1 = t_2 + G_1 \times \Delta t_1 / G_2 = 1.5 + 100 \times 5 / 123.1 = 5.56^\circ\text{C} \quad (29)$$

$$\text{对数温差: } \Delta t = (\Delta t_d - \Delta t_x) / (\ln \Delta t_d / \Delta t_x)$$

$$= (19.44 - 18.5) / \ln 19.44 / 18.5$$

$$= 18.97^\circ\text{C} \quad (30)$$

根据板式换热器传热特性曲线（介质水-水），传热系数确定为 $K=1800\text{W/m}^2\text{C}$

换热面积计算：

$$H = 1.163 \times 5 \times 100 \times 1000 / 1800 \times 18.97 \times 0.7$$

$$= 24.33\text{m}^2 \quad (31)$$

选用板式换热器 BR65-40, 单台换热面积 40m^2 , 数量 8 台。

四、冬季运行费用分析

I) 冬季运行费用分析

1. 采集装置的电能消耗：

每个采集装置小时消耗的电量 $q_n = 25\text{kW}$

通过对 1982-2002 年 20 年北京市观象台气象资料研究分析, 1984-1985 年冬季最寒冷,

冬季日平均气温低于 1.5°C 共 96 天。

$$\text{热负荷平均系数, } \varphi = \frac{t_n - t_p}{t_n - t_w} = \frac{1.5 + 3.72}{1.5 + 9} = 0.497 \quad (32)$$

t_n 室内设计温度: $t_n = 1.5^\circ\text{C}$

t_p 室外低于 5°C 所有天数的平均温度, $t_p = -3.727^\circ\text{C}$

t_w 室外供热设计温度: $t_w = -9^\circ\text{C}$ 。

采集装置年消耗的电量, 运行时间按每年 96 天计算, 日平均温度平均值为 -3.72°C

$$N_1 = n \times q_n \times 24 \times 96 \times \varphi$$

$$= 18 \times 25 \times 24 \times 96 \times 0.497$$

$$= 51.53 \times 10^4 \text{KW} \cdot \text{h} \quad (33)$$

2. 通过对 1982-2002 年 20 年北京市观象台气象资料研究分析, 1984-1985 年冬季最寒冷, 冬季日平均气温低于 -7°C 共 12 天。

能量提升器消耗的电量，运行时间按 12 天计算，日平均温度平均值为 -7.65°C

$$\begin{aligned} N_2 &= n \times q_n \times 24 \times 12 \times (1.5 + 7.65) / (1.5 + 9) \\ &= 8 \times 148 \times 24 \times 12 \times 0.871 \\ &= 29.70 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h} \end{aligned} \quad (34)$$

3. 冬季加热总电能消耗

$$\begin{aligned} N &= N_1 + N_2 \\ &= (51.53 + 29.70) \times 10^4 \\ &= 81.23 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h} \end{aligned} \quad (35)$$

4. 运行电费

当中央液态冷热源系统利用峰谷电价，其峰谷加权平均每度电价为

$$S_p = \frac{0.44 \times 16 + 0.2 \times 8}{24} = 0.36 \text{ 元/kWh} \quad (36)$$

年电费： $S = N \times 0.36 = 81.23 \times 10^4 \times 0.36 = 29.24$ 万元

折合每平方米池面的运行费用：

$$S = 29.24 \times 10^4 / 35000 = 8.35 \text{ 元/ m}^2 \cdot \text{季} \quad (37)$$

II) 安全运行计划

- 1、晚 7 时至 11 时为国家大剧院演出高峰用电时间，当室外温度高于 -5°C 时，冷热源系统能量提升器停止运行，只运行潜水泵，晚 7 时前全负荷运行，水池蓄能，晚 11 时后全负荷运行，补充水池散失热量。
- 2、瀑布水面散热损失比较大，瀑布水面飞溅水易冻结，晚 12 时至早 6 时无景观要求，可以停止瀑布水面，水池采用内循环。
- 3、本方案计算采用冬季采暖温度，如遇灾害性天气，假定水池水面结一层薄冰，水池不会全部冻结。
- 4、本方案考虑太阳辐射得热为计算富裕量。
- 5、如遇特大灾害性天气，水池完全泄水，以保证水池不完全冻结，影响建筑结构安全。

五、去年冬季实际运行结果

北京地区去年冬天，夜间最低气温低于 -6°C 、白天平均气温低于 -2°C 共有 27 天，2008 年 1 月 24 日最冷：夜间最低气温 -10°C 、白天平均气温 -6°C 。1 月、2 月份共有 18 天（1 月 24 日前后），室外平均温度在 -5°C 以下，有 3-4 级以上大风，水面出现局部结冰。2008

年 1 月份池水底部平均温度 4.42℃，其它日子景观水池最低温度在 1.5℃以上，实现了在寒冷的冬天不结冰。以下是景观水池最冷的北面的两个机房的监测数据。

1、国家大剧院景观水池东北区 2008 年 1 月份的日平均温度变化

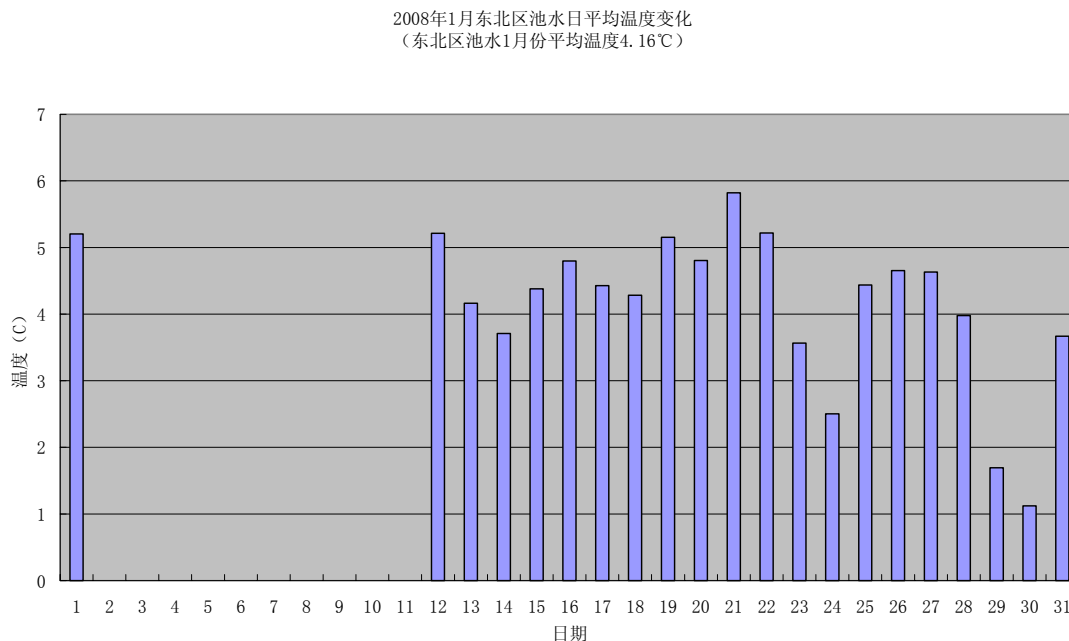


图 1：国家大剧院景观水池东北区 2008 年 1 月份的池水温度变化，月平均温度为 4.16℃，30 日温度最低为 1.2℃。

2、国家大剧院景观水池东北区 2008 年 1 月 23 日池水温度变化

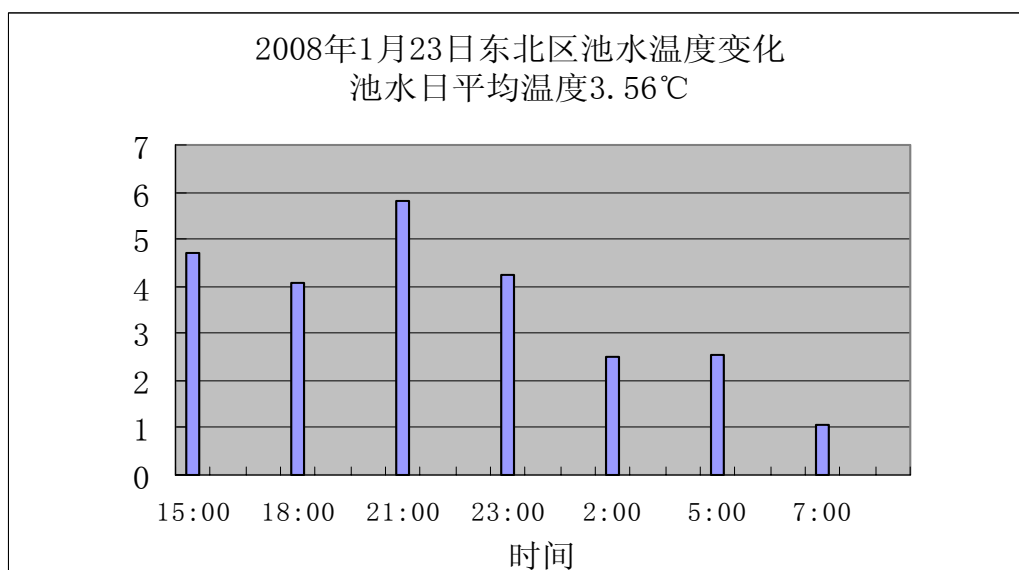


图 2、2008 年 1 月 23 日东北区池水温度的变化，日平均温度 3.56℃，早上 7 点温度最低：1.02℃。

3、西北区 1 月 24 日池水温度变化（整个冬天最冷的一天）

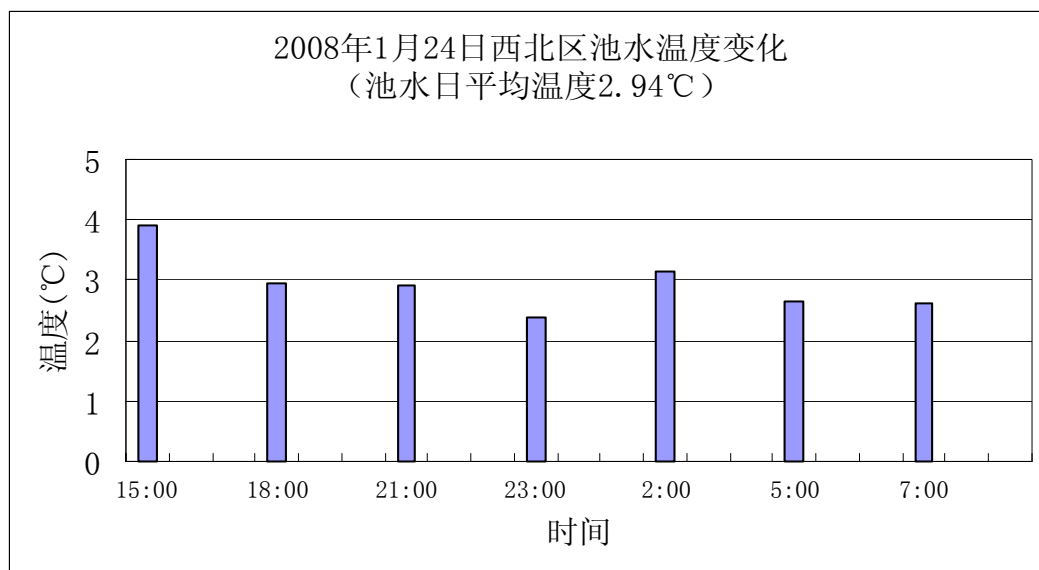


图 3、2008 年 1 月 24 日（冬季最冷的一天）西北区池水温度变化，池水日平均温度为 2.94℃，夜间（23 点）最低温度 2.38℃，有局部结冰现象。

4、西北区 1 月份池水温度变化

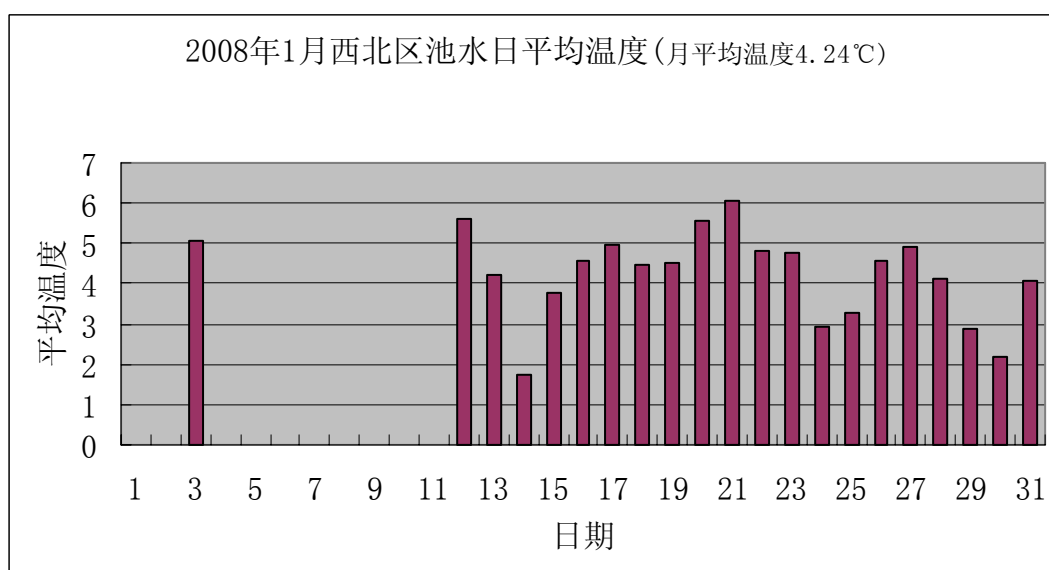


图 4、2008 年 1 月份景观水池西北区池水温度变化，月平均温度 4.24℃，14 日最低位 1.76℃。

大剧院景观水池为了美观，水池温度测量探头安装在水池底部，上述温度都是指水池底部的温度，和表面水的温度有差别。所以，尽管水池底部温度整个冬季控制在 1.5℃以上，但冬季最严寒的日子，水池表面仍然有局部结冰现象。

5、冬季运行实际耗电

2007 年冬季国家大剧院景观水池用电统计

国家大剧院 景观水池区域	冬季用电度数 (kWh)	电价 (0.5 元/kWh)	单位
西北	275400	137700	元
东北	446700	223350	元
西南	165840	82920	元
东南	195090	97545	元
水池合计	1083030	541515	元
35000m ² 平均	30.94 Kwh/m ²	15.47	元/m ²

去年冬季国家大剧院景观水池机房总耗电量为 1083030 度，每度 0.5 元，电费为 541515 元；平均每平米耗电 30.94 度，每平米电费 15.47 元。

六、结论

采用 HYY 地源热泵系统采集地源热量来加热水池的中央液态冷热源环境系统，去年冬季为国家大剧院景观水池供热，池水温度始终保持在 1.5℃ 以上，除去少数几天在水池表面出现局部地区有结冰现象以外，基本上实现了冬季池水不结冰，保证了国家大剧院的建筑物安全。此外单井抽灌系统具有不移沙、不破坏地下水平衡、不污染地下水、对空气无任何污染等优点。随着运行经验的增加，今后更多的利用便宜的峰谷电，合理科学的提前为水池蓄能，还可以降低运行费用。

参考文献：

- [1] Xu Shengheng and Ladislaus Rybach, Utilization of Shallow Resources Performance of Direct Use Systems in Beijing, GRC 2003 Annual Meeting, Mexico, p115-118.
- [2] Shengheng Xu, Haitao Ma and Diantong Lu, Single Well System Technology Used in Mongolia, GRC 2006 Annual Meeting, U.S.A p110-113.
- [3] Shengheng Xu, Renbin Ling and Diantong Lu, Single Well System for Supply and Return Water Used in BHDG Office Building, GRC 2006 Annual Meeting, U.S.A p113-117.

