

# 基于全寿命周期成本方法的地表水源热泵系统分析

王 勇<sup>1</sup>, 赖道新<sup>1</sup>, 范 维<sup>2</sup>

(1. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400045)

**摘 要:**利用空调系统的全寿命周期成本(LCC)的构成以及数学计算模型对重庆某地表水源热泵工程的全寿命周期成本进行了计算。结果表明,系统设置不合理,地表水源热泵的 LCC 值并非是最底的,会高于其他空调系统;而合理的地表水源热泵方案才能够得到最低的 LCC 值。对实际测试的数据进行了分析,找到了影响地表水源热泵的 LCC 值的主要因素有负荷特征、取水能耗和取水水温等。最后指出了取得最低的 LCC 值应注意的问题。

**关键词:**地表水源热泵;全寿命周期成本;负荷特征;取水能耗;取水水温

**中图分类号:** TU831

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2011)01-0075-06

由于国家对可再生能源利用项目的扶持,至 2005 年以来,地表水源热泵系统在我国得到了迅速发展。截至到 2008 年底,在国家可再生能源建筑应用示范项目中,就有超过 80 万 m<sup>2</sup> 的项目使用地表水源热泵<sup>[1]</sup>,随着这一技术的不断发展,它的运用将会更广泛。但每一项新技术的运用,均存在适应性和合理性。影响地表水源热泵系统的因素较多,合理使用地表水源热泵系统,是该系统目前飞速发展中应重视的问题<sup>[2]</sup>。

目前工程决策的方法较多,如净年值比较法、费用现值比较法、费用年值比较法、最低价格比较法、全寿命周期成本分析法等<sup>[3-]</sup>。全寿命周期成本分析法是目前应用较多的工程评价方法。全寿命周期成本(LCC, Life Cycle total Cost)是指设备或系统从诞生到报废的整个期间需要的费用总和,它往往数倍于设备购置费用<sup>[5]</sup>。地表水源热泵系统作为一个相对复杂的系统,若合理使用,其节能和环保优势明显,但初投资是影响系统推广的主要因素之一。全寿命周期成本分析从系统在整个寿命周期内的所有成本出发,考虑成本的时间价值,从经济性角度出发去评价方案设计的合理性。将 LCC 设计思想应用于地表水源热泵系统设计中,以最经济的寿命周期成本实现系统各方面的功能,才能为地表水源热泵的合理应用提供依据<sup>[6]</sup>。

## 1 地表水源热泵系统全寿命周期成本构成及计算数学模型

### 1.1 全寿命周期成本构成

全寿命周期成本由初投资成本、运行与维护成本、废弃处理成本三方面组成<sup>[7]</sup>。

#### 1) 初投资成本

初投资成本为工程建设所进行的勘察、设计、设备采购、施工安装,直至进入系统运行之前所发生的一切成本。对于地表水源热泵系统而言,水体的勘察成本和取水部分的施工安装成本是应重点考虑的问题。

#### 2) 运行与维护成本

运行与维护成本指运行所产生的能源费用,即电费和燃料费用等,运行人员的工资,以及检查和维修保养费等。若地表水源热泵的取水温度过高,取水能耗过大,或者水处理代价过高,均严重影响地表水源热泵的运行和维护成本。

收稿日期:2010-03-26 修改稿日期:2010-12-03

基金项目:国家科技部“十一五”科技攻关资助项目(2006BAJ01A06)

作者简介:王 勇(1971-),男,重庆人,工学博士,副教授,主要从事建筑节能技术研究、新能源开发与利用。

3) 废弃处理成本

废弃处理成本具体指到空调系统寿命终止期后发生的处理成本,包括拆除处置、环保处理等产生的成本.这里的寿命终止期可以指从设备使用的角度上来分析已不具备使用条件,也可指设备的经济寿命,即从经济性的角度上,可以更新替换,来获取更经济的效果.

对于上述成本构成中,运行成本将是影响地表水源热泵系统全寿命周期成本的重要因素.

1.2 全寿命周期成本计算的数学模型

运用全寿命周期成本方法分析地表水源热泵系统首先要建立成本数学模型,主要考虑系统的建设费用和运行费用,计算其寿命周期成本,按系统初投资费用、运行成本、维护成本和残值,并考虑各经济因素的修正,建立 LCC 计算的数学模型为<sup>[8]</sup>:

$$LCC = IC + \sum_{k=1}^n OC(1+i)^{-k} + DC(1+i)^{-n}$$

(1)

式中,  $LCC$  为全寿命周期成本,万元;  $IC$  为初投资费用,万元;  $OC$  为运行成本,万元;  $DC$  为残值,万元;  $k$  为设备已使用的年数,  $a$ ;  $n$  为经济寿命期,  $a$ ;  $i$  为折现率.

当不考虑能源价格变动因素时,上式简化为

$$LCC = IC + OC \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} + DC(1+i)^{-n}$$

(2)

2 地表水源热泵系统经济性分析

2.1 冷热源方案

以重庆市某地表水源热泵系统工程为例.该项目属于会所、度假类休闲产品建筑, -1F 和 -2F 为车库和库房、办公等后勤用房,1F 为会所用房,包括大堂、餐厅、淋浴房、VIP 房、会议室等,2F 为中餐餐厅.该项目空调面积为 10 000 m<sup>2</sup> 左右.夏季空调设计冷负荷 1 973 kW,冬季空调设计热负荷 1 568 kW.

现选取其他两种常见的冷热源方案与地表水源热泵系统比较,方案 1 为普通螺杆制冷机组+锅炉,方案 2 为风冷热泵系统,方案 3 为地表水源热泵系统.三种冷热源方案见表 1.

表 1 冷热源方案设备参数表  
Tab.1 Parameters of cooling and heating equipment scheme

项目	冷源形式	单台容量	主机台数	技术参数	热源形式	技术参数
普通螺杆制冷机组+锅炉	螺杆式压缩机组	$Q_L=1\ 000\ \text{kW}$	2	$P=110\ \text{kW}$ $Q_{LD}=172\ \text{m}^3/\text{h}$ $Q_{LQ}=203\ \text{m}^3/\text{h}$	燃气热水锅炉 3 台	$Q_R=698\ \text{kW}$ 燃气耗量 74 m <sup>3</sup> /h
风冷热泵	风冷热泵机组	$Q_L=683\ \text{kW}$ $Q_R=624\ \text{kW}$	3	$P_L=219\ \text{kW}$ $P_R=203\ \text{kW}$	—	—
地表水源 热泵	水-水式全热回收螺杆机组	$Q_L=1\ 160\ \text{kW}$ $Q_R=1\ 096\ \text{kW}$	2	$P_L=186\ \text{kW}$ $P_R=280\ \text{kW}$	—	—

2.2 系统初投资

由于本文主要讨论空调工程各方案在整个寿命周期内的经济性和运行性能,机房土建费用已包括在土建部分中,该部分成本不再计入各方案初投资中.而三个方案的末端设备均采用风机盘管+新风系统,末端部分造价费用相同,按照现行的报价计算为 100 万元.为了遵循经济评价可比性原则,设备价格均以厂家现行报价为准.各方案系统成本以分水器为界计入初投资成本,具体详见表 2.

表 2 各方案系统初投资 万元  
Tab.2 Initial investment of each scheme  
@ ¥ 10,000

项目	方案 1	方案 2	方案 3
冷热源	100	213	130
室内系统部分	100	100	100
冷却塔	10	—	—
水泵(不含冷冻泵)	5	—	10
锅炉	40	—	—
板式换热器	—	—	50
取水费用	—	—	43
总计/万元	255	313	333

2.3 运行能耗费用

2.3.1 各方案机组年耗电量

根据重庆的气象条件,运行时间按照夏季运行 3 个月,冬季运行 3 个月,每个月按 30d,每天运行 9h 计算. 由于集中空调系统全年大部分时间在部分负荷工况条件下运行,因此在设备全年能耗计算时,应求出设备的综合部分负荷性能系数(IPLV)<sup>[9]</sup>. 本文三个方案统一参照《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2005)关于冷水(热泵)机组在部分负荷工况条件下的综合部分负荷性能系数(IPLV)规定的最低值<sup>[10]</sup>进行计算. 水冷螺杆制冷机组和水源热泵机组分别取 4.81,风冷热泵机组取 2.8. 下面以方案 3 水源热泵机组为例,机组年耗电量计算如下:  $(1\,973\times 9\times 30\times 3 + 1\,568\times 9\times 30\times 3)/4.81 = 596\,302\text{ kWh}$ .

2.3.2 各方案中辅助设备的年耗电量

辅助设备包括冷冻水泵,冷却循环水泵,取水泵(地表水源热泵系统使用),冷却塔等,均按设计功率计算. 各方案室内末端设备均采用相同方案,故耗电量不予考虑.

本工程中的湖水经过板式换热器后,不是直接排入湖体中,而是根据业主景观需求,回水用于制造人工溪流流入湖内. 回水经过与周围环境充分的换热,使得流入湖体时的水温更接近湖水温度. 因此,在计算地表水源热泵系统全年运行费用的时候,把取水泵的能耗按两种情况分别分析,一是算为整个空调系统能耗的一部分(方案 3),二是不算为系统能耗(方案 4).

按照重庆市目前的能源价格,商业电价为 0.828 元/kWh,商业天然气价格为 2.05 元/m<sup>3</sup>,水价为 2.5 元/m<sup>3</sup>. 可计算 4 种方案的全年能耗费用如表 3.

表 3 各方案能耗费用  
Tab. 3 Costs of energy consumption for each scheme

项目	年耗电量/kWh	年耗气量/m <sup>3</sup>	年耗水量/m <sup>3</sup>	年能耗费用/万元
方案 1	502 352	179 820	5 224	79.76
方案 2	1 089 161	—	—	90.18
方案 3	952 701	—	—	78.88
方案 4	790 701	—	—	65.47

2.4 维护成本

①人工费用:鉴于各方案的工作量不一样,该项目方案 1、方案 3 和方案 4 需要管理人员 3 人,方案 2 需要管理人员 2 人即可完成日常的维护工作,每人每月工资按 1 800 元计算,每年人工费用如表 4.

②维修费用:设备维修费用按照折旧费用的 10%计算,设备折旧年限为 20a,残值率按 4%计<sup>[11]</sup>,得到各方案的维护成本如表 4.

表 4 各方案年维护成本  
Tab. 4 Maintenance cost of each scheme per year

万元  
@ ¥ 10,000

项目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
人工费	6.48	4.32	6.48	6.48
折旧费	11.62	15.46	16.27	16.27
维修费	1.16	1.55	1.63	1.63
全年维护成本	7.64	5.87	8.11	8.11

2.5 全寿命周期成本计算

各方案的设备使用寿命按设备已使用状况调查<sup>[9]</sup>,取值为螺杆式冷水机组 20 a,水源热泵机组 20 a,风冷热泵机组 15 a,锅炉 15 a,冷却塔 15 a. 当各方案的使用寿命不同时,可以采取的方法有多种,本文以各方案中使用寿命周期最短者计算,本文按 15 计算<sup>[12]</sup>. 根据当前的贷款利率,折现率取 7%<sup>[11]</sup>,根据式(2),以方案 3 为例,计算设计负荷下的全寿命周期成本如下,得到 4 个方案全寿命周期成本如表 5 所示.

$$LCC_3 = 333 + 86.99 \frac{(1 + 0.07)^{20} - 1}{0.07 \times 1.07^{20}} + \frac{13.56}{(1 + 0.07)^{20}} = 1\,130.2 \text{ 万元}$$

(3)

表 5 方案全寿命周期成本  
Tab. 5 Life cycle total cost of each scheme

项目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
设计负荷	1 054.6	1 192.5	1 130.2	1 008.1
部分负荷	775.3	887.7	808.2	747.1

从表 5 可以看出,方案 2 的 LCC 值最高,而方案 3 的 LCC 值高于方案 1. 这表明并非所有利用可再生能源的空调系统都是节能的. 分析其原因就是方案 3 的取水能耗过高,而方案 4 的 LCC 值最低,和方案 3 的差异主要来自取水水泵的能耗. 因此,只有采用合理的地表水源热泵系统经济性才能得到最佳.

3 实测数据对 LCC 值的影响分析

3.1 实测数据计算

课题组对该工程进行了整个夏季工况的测试,测试时机组处于试运行阶段,建筑冷负荷为部分负荷,最高值为设计负荷的 50%左右,一台机组运行. 根据《公共建筑节能设计标准》(GB 50189-2005)中对 IPLV 值的计算公式<sup>[9]</sup>,即

$$IPLV=0.023\times A+0.415\times B+0.461\times C+0.101\times D$$
 (4)

式中:A,B,C,D 分别为机组在 100%,75%,50%,25%负荷运行时的 COP 值. 由实测数据计算得到的水源热泵机组 COP 值随负荷率变化的曲线如图 1 所示,水源热泵机组 COP 值随取水温度变化的曲线如图 2 所示.

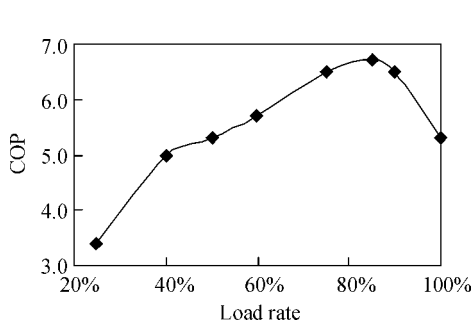


图 1 机组 COP 值随负荷率的变化  
Fig. 1 Change of COP of chiller with load rate

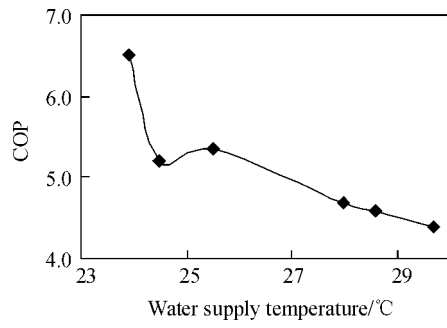


图 2 机组 COP 值随取水温度的变化  
Fig. 2 Change of COP of chiller with water supply temperature

根据式(4)计算得到实际 IPLV 值为 5.6. 按上述方法分别计算方案 3,4 的全寿命周期成本,具体详见表 6.

表 6 按实测值计算的方案 3、4 的 LCC  
Tab. 6 LCC of scheme 3 and 4 calculated according to actual test data

项目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
实测计算 LCC	—	—	756.8	696.9

3.2 影响因素分析

1) 负荷特征对全寿命周期成本的影响. 对表 5 和表 6 满负荷与部分负荷下 4 种方案的

全寿命周期成本比较发现,随着负荷增加,方案 1 和方案 2 的全寿命周期成本增加的程度比方案 3 和方案 4 大,表明在设计工况下,高负荷使用工况比低负荷使用工况时更适宜于地表水源热泵系统. 由图 1 也可以看出,随着负荷率增大,水源热泵机组 COP 值增大(这里指的是变化趋势,但并非所有工况下,满负荷状况下的机组 COP 值最高),相应的单位能耗降低,与其他方案比较,地表水源热泵系统的全寿命周期成本降低. 在相同条件下,不同类型的建筑采用地表水源热泵方案比较时,使用负荷总量大的

建筑具备更高的节能量,才有可能得到最低的全寿命周期成本。

2) 取水能耗与取水水温对全寿命周期成本的影响。图2是水源热泵机组COP值随一次侧湖水取水温度变化的曲线,可以看出,随着取水温度的升高,机组COP值降低,由(4)式可得机组的综合部分负荷性能系数(IPLV值)减小,机组能耗增加,全寿命周期成本增加。从表5和表6中看出, $LCC_4 < LCC_3$ ,决定该值的主要影响因素是取水的能耗。说明取水水泵能耗也是影响地表水源热泵系统全寿命周期成本的重要因素。控制取水能耗,是地表水源热泵系统合理设计的关键措施,也能降低其全寿命周期成本。

## 4 结 论

1) 系统的全寿命周期成本由其初投资和运行费用共同决定,由于运行费用往往是初投资的数倍,要控制空调系统的全寿命周期成本,关键是降低后期的运行费用。

2) 影响地表水源热泵系统全寿命周期成本的因素很多,有建筑负荷,取水能耗,取水温度,以及机组部分负荷运行下的综合部分负荷性能系数。因此对建筑负荷特征的分析预测,采取合理的取水方式避免过大的取水能耗以及选取性能好的机组都是控制地表水源热泵系统全寿命周期成本的主要手段。

3) 全寿命周期成本分析法涉及的参数、指标较多,为了更好的利用LCC方法,合理评价方案的经济性时,费用估算应尽可能采用类似工程准确的统计数据。

## 参考文献 References

- [1] 徐 伟. 中国地源热泵发展研究报告(2008)[M]. 北京:中国建筑业出版社,2008: 2-5.  
XU Wei. Report on China ground-source heat pump(2008)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 2-5.
- [2] 王 勇,肖益民,陈金华,等. 开式地表水源热泵取排水方式研究[J]. 暖通空调,2008,38(10):124-127.  
WANG Yong, XIAO Yi-min, CHEN Jin-hua, et al. Research on water intake and drain methods of open-loop surface water source heat pump systems[J]. Heating ventilation & Air conditioning, 2008, 38(10): 124-127.
- [3] KABBAN I A. Decision support life cycle analysis system in building design [D]. Boulder ;University of Colorado at Boulder, 1993.
- [4] 王建设,韩小龙,张立功,等. 某大型综合性项目经济分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2001,33(2): 165-168.  
WANG Jian-she, HAN Xiao-long, ZHANG Li-gong, et al. Economic analysis to one large comprehensive item[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2001, 33(2): 165-168.
- [5] VIRAL P S, DAVID C D. Life cycle assessment of residential heating and cooling systems in four regions in the United States [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(4): 503-513.
- [6] SHONDER J A. Comparative analysis of life-cycle costs of geothermal heat pumps and three conventional HVAC systems [J]. United States ASHRAE Transactions, 2000(106): 551-560.
- [7] 龙惟定. 物业设施管理与暖通空调[J]. 暖通空调, 1998, 28(4): 25-29.  
LONG Wei-ding. Facility management and HVAC[J]. Heating ventilation & Air conditioning, 1998, 28(4): 25-29.
- [8] 房华荣. 基于寿命周期成本(LCC)的暖通空调方案选择的应用研究[D]. 西安:长安大学, 2008.  
FANG Hua-rong. Decision-making Analyses of Heat Ventilation and Air-Conditioning Construction Based on Life Cycle Costs[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [9] 周一芳,周邦宁. 空调冷(热)源的寿命周期价值分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(10): 89-92.  
ZHOU Yi-fang, ZHOU Bang-ning. Analysis on life cycle value for air conditioning cooling and heating source schemes [J]. Heating ventilation & Air conditioning, 2007, 37(10): 89-92.
- [10] GB 50189-2005, 公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑业出版社, 2005.  
GB 50189-2005, Design standard for energy efficiency of public buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [11] 虞和锡. 工程经济学[M]. 北京:中国计划出版社, 2002: 5-9.  
YU He-xi. Engineering Economics [M]. Beijing: China Planning Press, 2002: 5-9.
- [12] 冯为民,付晓灵. 工程经济学[M]. 北京:北京大学出版社, 2006: 59-60.

FENG Wei-min, FU Xiao-ling. Engineering Economics[M]. Beijing: Peking University Press, 2006: 59-60.

## System analysis of surface water heat pump based on life cycle total cost method

WANG Yong<sup>1</sup>, LAI Dao-xin<sup>1</sup>, FAN Wei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Eco Environment of Three Gorges Region of Ministry of Education,  
Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Material Science & Engineering,  
Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Based on the structure and mathematical model of life cycle total cost in air-conditioning system, the life cycle total cost of a surface water heat pump system in Chongqing is calculated. The results show that the system settings are not reasonable; the LCC is not always the lowest, and sometimes it may be higher than other air-conditioning systems. Only the reasonable scheme can get the lowest LCC. Through analyzing the actual test data, the load characteristic, water supply energy consumption, water supply temperature and other main factors are found that can influence LCC of surface water heat pump. Finally, matters which require attention in obtaining the lowest LCC are pointed out.

**Key words:** *surface water heat pump; life cycle total cost; load characteristic; water supply energy consumption; water supply temperature*

**Biography:** WANG Yong, Ph. D., Associate Professor, Chongqing 400045, P. R. China, 0086-23-65120753, E-mail: wyfree@263.net

(上接第 035 页)

## Aseismic mechanism of steel frame with reinforced beam-column connection

WANG Yu-tian<sup>1,2</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, JIANG Fu-xiang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xian 710055, China;  
2. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

**Abstract:** Under intense seismic loading, brittle failure usually occurs in steel moment-resisting frames with traditional bolt-welded connections or full-welded connections. Then people are forced to be aware of the seismic performance of steel structures. And new forms of rigid beam-column connections with good seismic behavior have to be explored. In this paper, several kinds of beam-column connections with local reinforcement are employed to improve the bearing capacity of nodes and transfer the location of plastic hinges, which have been verified through low-cyclic reversed loading test. It is shown that although the increase of the bearing capacity of the reinforced beam-column connection is not obvious under seismic loading, it is sure that the plastic hinge can be effectively relocated and the ductility of the node can be greatly enhanced. Therefore, energy dissipation capability of the node can be improved, and brittle failure can be avoided in the node. Based on test results, further theoretical analysis of internal forces transmission, deformation development and the process of outward relocation of plastic hinge of the reinforced beam-column connections under seismic loading are carried out and the aseismic mechanism of reinforced beam-column connections is revealed.

**Key words:** *seismic mechanism; steel moment-resisting frame; reinforced beam-column connection; low-cyclic reversed loading test; plastic hinge outward relocation*

**Biography:** WANG Yu-tian, Candidate for Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13376489980, E-mail: wyt-wkl@163.com