

生命周期费用分析在空调系统中的应用

金梧凤¹, 李 惠¹, 朴完奎²

(1. 天津商业大学天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134; 2. 乐金电子(天津)有限公司, 天津 300134)

摘 要:地源热泵多联机空调系统是以地源热泵作为冷热源, 直接蒸发式多联机组作为室内末端的一种新的节能技术. 以天津市某办公楼的地源热泵多联机系统为研究对象, 通过能耗、初投资、运行费用、维护修理费用以及敏感性和 CO₂ 排放量分析, 得出在设备使用年限内, 地源热泵多联机系统较传统的风冷多联机系统, 6 年即可回收成本; 较地源热泵加风机盘管系统, 尽管首年总费用高 6.9%, 但是 LCC 费用涨幅较小, 11 年可以回收成本; 相比其他两种系统, 地源热泵多联机系统受利息率和物价上升率变化影响最小, 其利润风险最小.

关键词:地源热泵多联机系统; 能耗; 生命周期费用; 经济性

中图分类号: TU 833

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)04-0602-06

多联机系统因其传输介质、反应速度、使用控制、建筑面积和负荷特性等几个方面的优点, 自 20 世纪 90 年代引入我国, 在办公、商业等建筑中得到广泛应用. 但是, 多联机在系统设计中还存在一些问题, 如配管长度、室内外机高差的限制以及北方冬季低温的气候条件已严重影响了多联机空调系统的能效和推广^[1]. 为克服这一问题, 国内的科研院所对地源热泵多联机系统的研究随之展开. 文献^[2]介绍了常规地源热泵系统和变制冷剂流量空调系统的特点及二者相结合的技术特点, 并以北京市某别墅空调系统设计为例, 阐述了冬季实际供暖效果, 室内温度可达 20°以上, 并指出该技术在中小型间歇使用建筑中具有广泛的应用前景. 文献^[3]基于 Energy Plus 动态模拟软件, 在制冷季和供热季运行工况下, 分析了水源多联机系统在我国不同地区(以哈尔滨、北京、大连、广州、重庆、上海为代表)办公建筑的动态能耗, 并与常规空调系统的能耗进行对比, 总结了水源多联机系统在我国各主要城市的节能特性. 但是国内大部分的相关研究只是局限于该系统的节能性分析, 而对该系统的经济性分析的研究较少. 而地源热泵多联机空调作为一个产品, 有必要从方案设计、设备选型、工程实施、建成投入使用后的运行及维护等诸多方面考虑, 而解决这些难题对降低设备系统寿命周期内全部成本具有深远的意义^[4,11].

针对上述问题, 笔者进行了对地源热泵多联机系统进行了能耗模拟和全生命周期费用分析, 并与传统的风冷多联机系统、地源热泵加风机盘管系统进行比较; 对设备使用年限内的敏感度及 CO₂ 排放量进行了对比分析. 此项研究可为地源热泵多联机空调系统的进一步研究提供基础数据, 并为地源热泵多联机产品的普及及其推广提供理论基础.

1 工程概况和空调系统方案

1.1 建筑概况及气象参数

研究对象是天津市某税务局办公楼的地源热泵多联机系统, 该办公楼包括会客厅、办公室、休息室以及多功能厅等, 共 8 层, 总建筑面积 9 857 m², 空调面积 6 276 m².

该研究采用了天津市典型年室外逐时气象参数进行计算, 空调系统运行时间均为周一至周五的 8:00—18:00, 风机在空调系统运行前和关闭后运行 1 h, 周末以及假期全关. 夏季空调设计冷负荷为 550

收稿日期: 2012-12-10 修改稿日期: 2013-07-20

作者简介: 金梧凤(1964-), 男, 吉林延边人, 副教授, 主要从事地面辐射采暖系统的控制技术; 节能、环保住宅控制技术以及再生能源利用技术方面研究.

kW, 冬季供热负荷为 280 kW. 气象参数情况详见表 1。

1.2 空调系统方案

以地源热泵作为冷热源,多联机作为末端装置的地源热泵多联机空调系统,是两种技术结合而成的一种新的空调系统方案,该研究选择了两种典型且应用广泛的空调系统方案与之进行比较,具体方案详见表 2。

表 1 气象参数表

Tab. 1 Meteorological parameters

运行工况	计算干球温 /℃	湿球温度 /℃	相对湿度 /%	室内设计温度 /℃
夏季工况	33.9	26.9	50	26
冬季工况	—9.4		73	22

表 2 空调系统方案

Tab. 2 Air conditioning system program

	空调系统名称	冷热源	末端装置
1	地源热泵多联机系统 VRV	埋管式地源热泵机组	直接蒸发式室内末端机组
2	传统的风冷多联机系统	风冷热泵机组	直接蒸发式室内末端机组
3	地源热泵加风机盘管系统	单螺杆式冷热水热泵机组	风机盘管

2 全年运行能耗分析

对全年运行能耗的模拟研究所采用的能耗模拟软件 eQuest 是在美国能源部(U. S. Department of Energy)和电力研究院的资助下,由美国劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)和 J. J. Hirsch 及其联盟(Associates)基于 DOE2 软件共同开发的,它那能够准确便捷的分析各种设备的节能潜力和全年运行状况,以确定合适的节能策略和最佳的节能方案。

本文采用 eQuest 能耗模拟软件进行全年空调能耗分析,分析步骤如下:

采用反应系数法计算建筑围护结构的传热量。

软件根据室外气象条件、围护结构情况,采用一种正向思维计算出室内温度以及室内得热量进而计算出负荷. 对要控制室内热环境的房间,由选定的供暖空调系统根据室内负荷情况提供冷热量,以维持室温在允许的范围内波动。

此软件根据输入的建筑情况(建筑结构、围护结构材料、供暖空调方式与系统布置形式、室内人员活动规律、照明设备情况)和室内设计温度值,动态地计算出建筑的全年能耗。

该办公楼主要消耗电力,用于空调设备、照明、以及其他办公设备的正常运行. eQuest 软件可以直接便捷的得到建筑各项能耗和空调系统各项能耗,如表 3、表 4 所示。

由表 3、4 可以看出:(1)该建筑的建筑能耗由空调系统能耗和照明能耗、其它办公设备能耗组成;(2)传统的风冷多联机系统因受室外环境影响较大,所以在空调运行阶段制冷能耗和供热能耗都大大超出了其他两种系统,从而造

表 3 建筑全年能耗

Tab. 3 Annual building energy consumption

能耗类型	地源热泵 多联机系统	传统的风冷 多联机系统	地源热泵加风 机盘管系统
制冷(MWh)	65.46	168.73	75.71
供热(MWh)	47.18	138.83	65.93
风机(MWh)	29.26	27.64	29.12
水泵(MWh)	57.87	5.71	93.82
热泵补充能耗(MWh)	0	36.56	0
办公室设备(MWh)	366.87	366.87	366.87
照明(MWh)	291.1	291.1	291.1
全年总能耗(MWh)	857.74	1 035.44	922.55

表 4 空调系统全年能耗

Tab. 4 The annual energy consumption of air conditioning systems

能耗类型	地源热泵 多联机系统	传统的风冷 多联机系统	地源热泵加风 机盘管系统
制冷能耗(MWh)	65.46	168.51	75.71
供热能耗(MWh)	47.18	138.83	65.93
风机能耗(MWh)	29.26	27.64	29.12
水泵及附属设备能耗(MWh)	57.87	5.71	93.82
热泵补充能耗(MWh)	0	36.56	0
空调系统总能耗(MWh)	199.77	377.25	264.58

成整个空调系统的能耗较大;多联机机组由于制冷剂直接蒸发,相对于风机盘管系统中载冷剂间接换热,节省了设备耗功,从而节约了能耗。

由表4可以看出:地源热泵多联机系统由于可再生能源的充分利用和制冷剂直接蒸发的节能手段,故空调系统能耗最小,比其它两种系统分别低47%和30%。

3 LCC分析

生命周期费用分析^[12],即LCC分析,在暖通空调领域的应用主要面向工程,该领域生命周期费用(即LCC值)由三方面内容组成,即系统初投资费用、年均运行使用电费和维护修理费用。

3.1 各方案初投资分析

初投资由空调系统各部分投资之和,再减去地源热泵补助金得到。包括基本设备费和安装费,基本设备主要是指室外机、室内机、水泵等辅助设备;安装费主要包括室外机安装费、冷媒管安装费、自控设备安装、水电设备安装和钻井费用。

其中基本设备费用由设备厂家而定,工程安装费用采用目前阶段安装费用的市场价格,地源热泵补助金由天津市可再生能源补助政策而定,结果如图1所示。

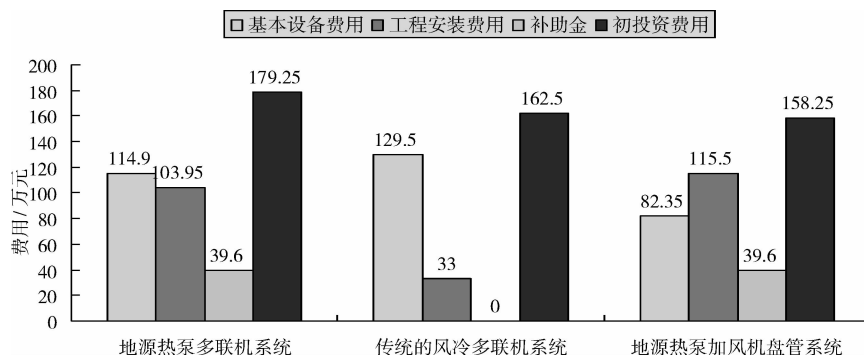


图1 空调系统初投资费用

Fig. 1 Early investment costs on Air conditioning system

图1可以看出:由于地源热泵多联机系统基本设备费用和工程按安装费用都较高,尽管有政策补贴,其初投资费用仍然最大,分别高出传统的风冷多联机系统和地源热泵风机盘管系统9.3%和11.9%。

3.2 年运行费用分析

年运行费用为空调运行使用的费用,即:年运行耗电费用=电价×电量。

空调运行消耗的电量可通过eQuest模拟出来的逐时用电量,通过在采暖期及供冷期空调用电量累加得到;电价的确定参考天津地区电网峰谷分时销售电表可得查得。空调系统年运行费用如下表5所示。

上表所得为各空调系统首年年运行费用,而众所周知,生命周期费用的分析范围不仅为首年,而是整个使用年限内,即机械设备的折旧年限,根据固定资产的折旧年限表^[5],折旧年限为15年。

而年金现价系数的计算公式为^[9]:

$$\text{年金现价系数} = \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n i} \quad (1)$$

其中: n 为期间(年), i 为贷款年利率(%).

根据年薪现价系数的定义,第 n 年运行费用为首年运行费用与第 n 年年金现价系数的乘积。

又由目前国际上通用的计算实际利率的公式^[10]:

$$i = \frac{1+r}{1+p} - 1 \quad (2)$$

表5 空调系统年运行费用表

Tab. 5 Running costs

空调系统方案	年运行费用(万元)
地源热泵多联机系统	20.76
传统的风冷多联机系统	37.40
地源热泵加风机盘管系统	27.85

其中: r 为名义利率(%); i 为实际贷款年利率(%); p 为物价水平的变动率(%),即物价上升率。
名义利率和物价上升率取近几年我国利率和物价上升率的平均值, r 取 3.86, p 取 2.99,带入上式(2),得出 i 为 0.008 4,将 $i = 0.008\ 4$ 带入上式(1),即可得出第 n 年运行费用与 n 的关系,再与首年运行费用做乘积运算,即可得到第 n 年的运行费用。

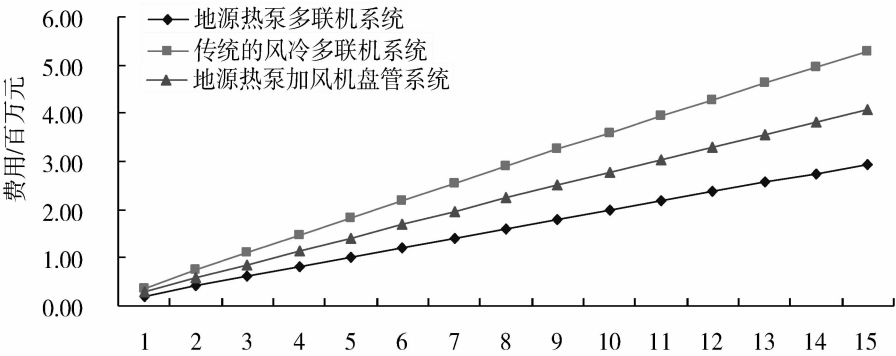


图 2 空调系统年运行费用
Fig. 2 Annual operating costs on Air conditioning system

由图 2 可以看出:(1)首年的年运行费用中,地源热泵多联机系统最小,传统的风冷多联机系统最大;(2)在整个使用年限内,地源热泵多联机系统曲线的斜率约为 19 万元/年,而传统的风冷多联机系统为 35 万元/年,地源热泵风机盘管系统为 25 万元/年,即地源热泵多联机系统不仅首年年运行费用较低,且每年的运行费用都较其它两种系统低。

表 6 维修费用所占基本费用的百分比

Tab. 6 Maintenance as cost over the basic costs

空调系统方案	维修费用占基本设备费用的百分比/%	年维修费用/万元
地源热泵多联机系统	1	1.14
传统的风冷多联机系统	0.6	0.77
地源热泵风机盘管系统	1.3	1.06

3.3 年维护修理费用分析

维修费用根据工程估算,各系统分别采用基本设备费用的百分比和年维修费用如图表 6 所示:

如表 6 所示:地源热泵多联机系统首年维护补修费用最高,分别高出传统的多联机空调系统和传统地源热泵加风机盘管空调系统 48%,7.3%。

按照上述年金现价的计算方法,同理得到第 n 年维修费用值,详见图 3。

由图 3 可以看出:(1)首年维修费中,地源热泵多联机系统最高,传统的风冷多联机系统最低;(2)在整个使用年限内,地源热泵多联机系统曲线的斜率约为 0.99 万元/年,传统的风冷多联机系统约为 0.67 万元/年,地源热泵风机盘管系统约为 0.93 万元/年,即地源热泵多联机系统不仅首年维修费用较高,且随着使用年数的增加,维修费用增长最快。

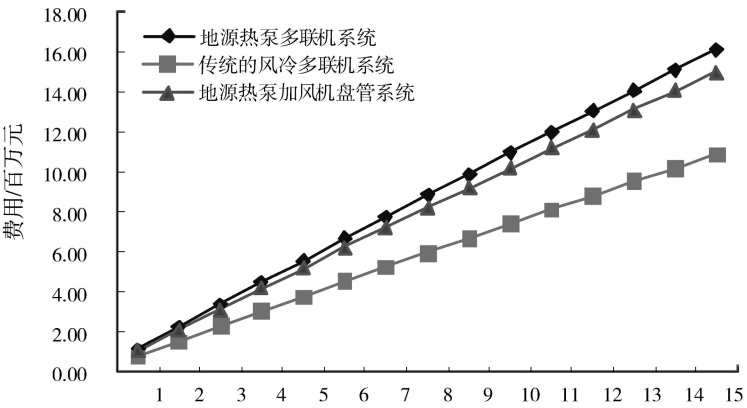


图 3 空调系统年维修费用

Fig. 2 Annual maintenance costs of Air-conditioning system

3.4 生命周期费用分析

由以上结果可以得出,三种空调系统方案在使用年限内的初投资费用、年运行费用和年维修费,故 LCC 分析结果可由三项费用累加得到,详见图 4。

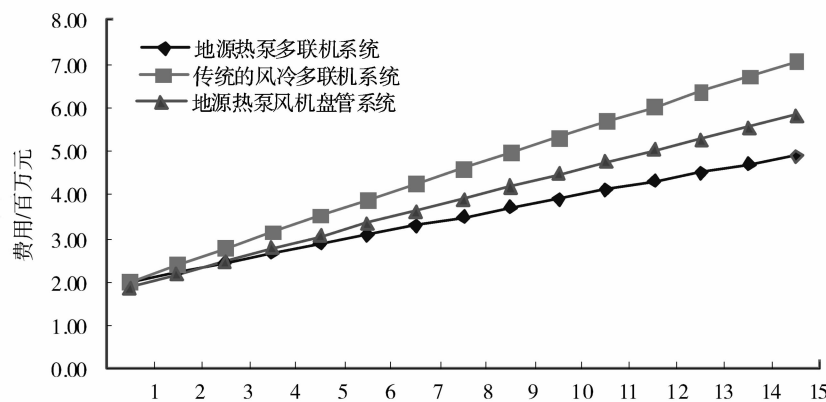


图4 空调系统 LCC 值

Fig. 4 The LCC value of air-conditioning system

由图4可以看出:(1)首年地源热泵多联机系统 LCC 值为 202.10 万元,传统的风冷多联机系统为 202.94 万元,地源热泵风机盘管系统为 188.07 万元;(2)在整个使用年限内,地源热泵多联机系统 LCC 值曲线的斜率约为 20.04 万元/年,传统的风冷多联机系统约为 35.46 万元/年,地源热泵风机盘管系统约为 26.14 万元/年;从第3年开始,地源热泵多联机系统的 LCC 值开始最小,又因为其 LCC 值曲线斜率最小,故从第3年开始,地源热泵多联机系统 LCC 值较其它系统最小;(3)较传统的风冷多联机系统,首年总费用相差不大,但随着使用年数的增加,其涨幅最小,大概6年即可回收成本;较地源热泵加风机盘管系统,尽管首年总费用高6.9%,大概11年可以回收成本。

3.5 敏感性分析

进行利润敏感性分析的主要目的是计算有关因素的利润灵敏度指标,揭示利润与有关因素之间的相对关系,并利用灵敏度指标进行利润预测^[6]。

本文通过在两个利润的敏感性因素(即利息率和物价上升率)的变化下的总费用值来分析利润的敏感性。

物价上升率不变,利息率上调50%时;物价上升率上调50%,利息率不变时,系统敏感度分析如图5所示。

由图可得:各空调系统在利息率和物价上升率的影响下,曲线的斜率变化图下表7所示:

由上图5及表7得出:(1)地源热泵多联机系统利息率上调后与 LCC 原值曲线之间的变化最小;即地源热泵多联机系统受利息率变化影响最小;(2)物价上升率上调后曲线与 LCC 原值曲线之间的变化最小;即地源热泵多联机系统受物价上升率变化影响最小;

综上所述:地源热泵多联机系统受利润的敏感因素变化较小,即在设备使用年限内,地源热泵多联机系统的利润风险最小。

4 CO₂ 分析

城市住区内,住宅建筑在建造和使用过程中因消耗化石能源排放 CO₂,绿地植被因光合作用吸收 CO₂,净排放量即为两者之差^[7]。从而,城市住区 CO₂ 净排放量 PN 为:

$$PN = P - S \quad (3)$$

其中:P、S 分别为住宅建筑排放量和绿地吸收量。

本文采用的是工程中常用的估算方法,将所有形式的能耗转化成电能消耗,而中国又主要以燃烧煤为主,据统计,消耗1度电=排放0.997千克“二氧化碳”,所以可根据实际消耗电量推算出 CO₂ 排放量。^[8]

由表8可得,地源热泵多联机系统最减排,环保性能优势性明显。

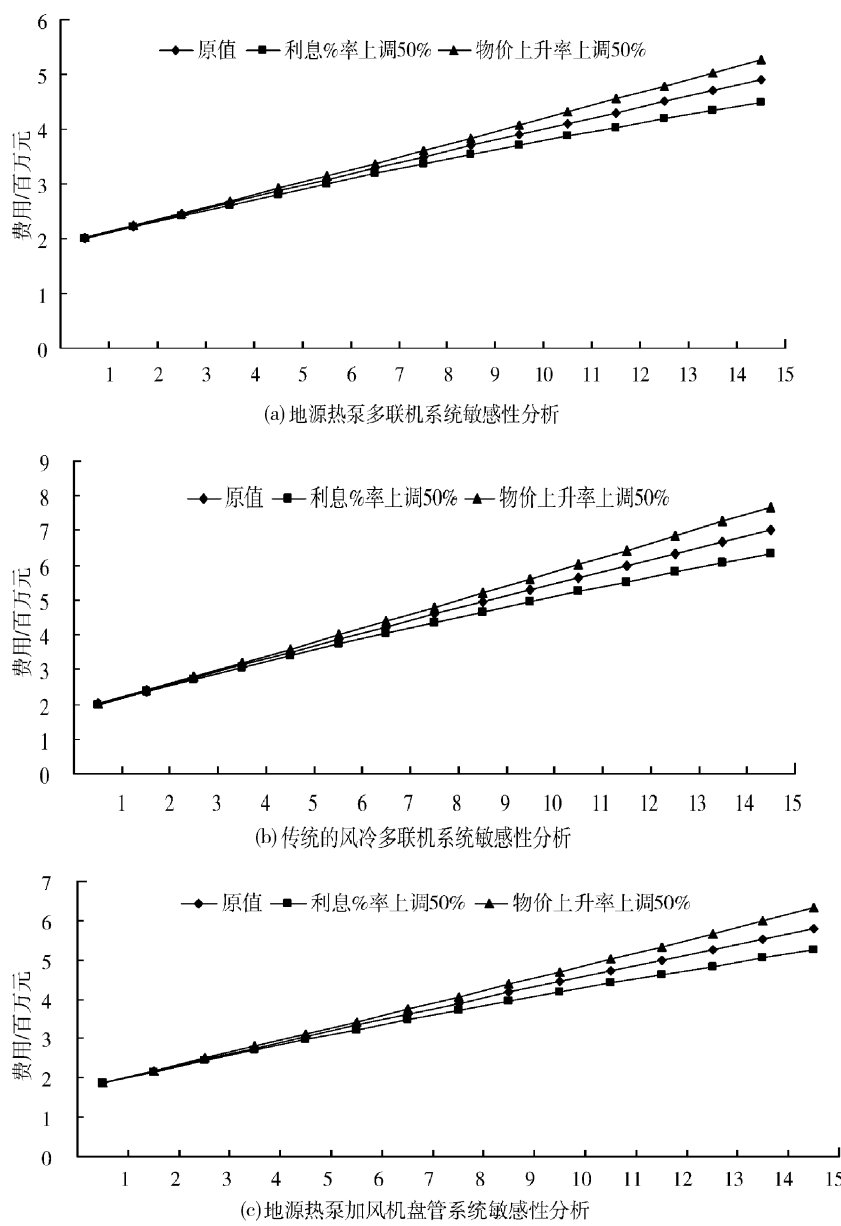


图 5 系统敏感性分析图

Fig. 5 System sensitivity analysis

表 7 各系统敏感性分析数据

Tab. 7 Sensitivity analysis of the system data

空调系统形式	原值曲线斜率 (万元/年)	利息上调后 曲线斜率 (万元/年)	物价上调后 曲线斜率 (万元/年)
地源热泵多联机系统	20.04	17.22	22.64
传统的风冷多联机系统	35.46	30.48	40.06
地源热泵风机盘管系统	26.14	22.47	29.54

表 8 CO₂排放量

Tab. 8 The emissions of carbon dioxide

系统类型	CO ₂ 排放量 (10 ⁵ kg)
地埋管式多联机系统	2.0
传统的风冷多联机空调系统	3.8
传统地源热泵加风机盘管空调系统	2.6

5 结 论

(1)地源热泵多联机系统由于初投资和首年维修费用较高,故较其它两种空调系统首年总费用高.但随着使用年数的增加,其 LCC 值变化最小,较传统的风冷多联机系统大约 6 年即可以回收成本;且较其它两种系统,受利息率和物价上升率的影响最小.(2)地源热泵多联机系统 CO₂排放量最低,与地源热

泵加风机盘管空调系统相比减排 24.5%, 与传统的风冷多联机空调系统相比减排 47%。综合考虑, 地源热泵多联机空调系统虽然初投资较其它系统大, 但是它的能耗和全生命周期费用是最小的, 再由其减排的优势, 故地源热泵多联机系统是非常好的选择。

参考文献 References

- [1] 杨筱静, 由世俊. 埋管式多联机热泵系统的应用研究[C]//全国暖通空调制冷 2008 年学术年会论文集, 2008.
YANG Xiao-jing, YOU Shi-jun. The applied research of multi-line pipe heat pump system[C]. National HVAC&R 2008 Conference Proceedings, 2008.
- [2] 袁东立, 张 钦. 地源热泵与 VRV 技术的结合与运用实例[J]. 建筑节能, 2007, 7(35): 4-7.
YUAN Dong-li, ZHANG Qin. Ground source heat technology combined with VRV and application examples[J]. Building energy, 2007, 7(35): 4-7.
- [3] 张志强. 水源 VRF 变频空调系统能耗分析及其在我国应用的评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
ZHANG Zhi-qiang. Water Inverter VRF air conditioning energy consumption analysis and evaluation of application in China[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [4] 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. Based on life cycle cost (LCC) of the selected HVAC Applications[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [5] 耿秀珍. 企业选用固定资产折旧方法的技巧[J]. 会计之友, 2007(6): 56.
GENG Xiu-zhen. Companies use the techniques of fixed assets depreciation method[J]. Friends of Accounting, 2007 (6): 56.
- [6] 于树彬. 管理会计[M]. 大连: 东北财经大学出版社, 2010: 155-213.
YU Shu-bin. Management Accounting[M]. Dalian: Dongbei University Press, 2010: 155-213.
- [7] 刘念雄, 汪 静, 李 嵘. 中国城市住区 CO₂ 排放量计算方法[J]. 清华大学学报, 2009, 49(9): 1433-1436.
LIU Nian-xiong, WANG Jing, LI Rong. Chinese urban settlements CO₂ emissions calculation methods[J]. Journal of Tsinghua University, 2009, 49(9): 1433-1436.
- [8] 现代生态[N]. 中国环境报, 2009-12-08(8).
Modern ecology[N]. China Environment News, 2009-12-08(8).
- [9] 胡 廉. 机械系统设计经济性评比[J]. 机械工程, 1985(4): 25-26.
HU Qian. Mechanical system design economic appraisal[J]. Mechanical engineering, 1985(4): 25-26.
- [10] 袁晋华. 如何计算实际利率[J]. 金融与经济, 2000(11): 60.
YUANG Jin-hua. How to calculate the effective interest rate[J]. Finance and Economy, 2000(11): 60.
- [11] Fulinwang 2003. Economic Prediction of HVAC Systems at Different Design Stages. ASHRAE
- [12] Breidenbach D P. Life cycle cost analysis[J]. Aerospace and Electronics Conference, 1989, 4(3): 1216-1220.

Application of life-cycle cost analysis on HVAC system

JIN Wu-feng¹, LI Hui¹, PIAO Wan-kui²

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China;

2. LG Electronics Company in Tianjin, Tianjin 300134, China)

Abstract: Variable Refrigerant Volume Ground Source Heat Pump (VRV-GSHP hereinafter) is a new energy-saving technology, using ground source heat pump as a heat source, and direct evaporative multi-line units as indoor terminal devices. An office building of Tianjin is selected as representative building, and VRV-GSHP system is compared by with two other traditional air conditioning systems. According to the comparison between VRV-GSHP system and other systems in energy consumption, initial costs, operation costs and maintenance and repair costs, the economy of the VRV-GSHP system is elicited.

Key words: VRV Ground-source Heat Pump System; energy consumption; life-cycle cost analysis; economy