

既有建筑空调冷源蓄冷节能改造的经济优化^{*}

哈尔滨工业大学 牛福新[☆] 倪 龙 姚 杨 马最良

摘要 通过对我国既有建筑能耗现状及节能潜力的分析,提出在不改变既有建筑冷源原有冷水机组的前提下,将冷源改造成蓄冷空调系统,以缓解用电峰谷差大的问题。建立了系统改造优化设计的数学模型以寻找改造后经济最优的蓄冷率。并结合实例,应用模型找到了最佳改造方案,验证了系统改造的经济性及可行性。

关键词 既有建筑 节能改造 蓄冷 经济性分析

Economic optimization of energy efficiency reconstruction of cool storage air conditioning for existing buildings

By Niu Fuxin[★], Ni Long, Yao Yang and Ma Zuiliang

Abstract Analyses the energy consumption and energy efficiency potential of existing buildings in China. To alleviate the electricity peak-valley difference, proposes transforming the cold source into that with cool storage without changing the water chiller for the existing buildings. Establishes the optimal design mathematical model to find the most economic cool storage rate, obtains the best transformation plan for an example building with the model, and verifies its economical efficiency and feasibility.

Keywords existing building, energy efficiency reconstruction, cool storage, economic analysis

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

既有建筑的节能改造是国家“十一五”建筑节能工程实施的重点内容之一^[1],节能改造的目标是:到“十一五”末,既有建筑节能改造将完成 5.54 亿 m²,其中,住宅 4.89 亿 m²,公共建筑 0.65 亿 m²。可见我国建筑节能工作任重而道远。

空调冷源系统的节能改造是既有建筑节能改造的重要内容之一。我国很大一部分既有建筑兴建不久,空调冷源设备完好,效率尚可,没有必要、经济上也不容许大规模地更换。那么在保留原有冷源系统的同时,将既有建筑冷源改造为蓄冷空调系统,不仅能充分利用原有设备的功能、降低改造费用,而且能够通过蓄冷的移峰填谷减小电网的峰

谷差,节省运行费用。

将既有建筑的冷源改造成蓄冷空调系统,是利用原系统的冷水进行相变蓄冷,这有别于冰蓄冷系统^[2]。冰蓄冷系统中制冷设备蒸发温度较低(-15~-10℃),一般来讲,蒸发温度每下降 1℃,制冷系数下降 3%~4%,制冷量下降 5%~6%。这样,冰蓄冷系统制冷设备的性能系数和制冷量均较常规空调系统大为降低^[3]。研究表明,在相同的制冷量下,冰蓄冷空调主机比传统空调的冷

①☆ 牛福新,男,1982 年 6 月生,在读博士研究生
150090 哈尔滨市南岗区海河路 202 号哈尔滨工业大学市政
环境工程学院

(0) 13674660430

E-mail: fuxinniu@163.com

收稿日期:2008-09-17

一次修回:2008-12-16

二次修回:2010-05-04

* “十一五”国家科技支撑计划项目(编号:2006BAJ03A05)

水机组多耗电 30% 左右。而直接利用原系统的冷水进行相变蓄冷,蓄冷介质的相变温度略高于冷水的温度,可以显著提高蓄冷介质的相变温度(此时相变温度为 6~8 °C),从而提高蒸发温度,减少蓄冷空调主机的电能消耗^[4]。

本文建立了既有建筑空调系统蓄冷节能改造经济优化数学模型,并结合实例,应用经济优化设计数学模型寻找最佳改造方案,验证既有建筑蓄冷空调系统改造的经济性及可行性。

1 蓄冷节能改造经济优化数学模型

既有建筑的冷源改造成蓄冷空调系统的经济性主要取决于系统改造费用和运行费用。对于改造费用,蓄冷率对其有直接的影响,蓄冷率越大,系统的改造费用会由于蓄冷容量的增加而增加;而蓄冷空调系统的优势之一就是在电价低谷时蓄存冷量,在电价峰值时释放冷量,减少系统的运行费用。这样,初投资和运行费用之和在蓄冷率增加的过程中可能会出现一个最小值,这个最小值所对应的蓄冷率就是最佳蓄冷率。在最佳蓄冷率的情况下,蓄冷空调系统的经济性会得到最大限度的发挥。

1.1 目标函数

蓄冷系统年折算费用目标函数如下:

$$\min Z = A + \sum_{n=1}^{365} C_{op}(n) = \omega K + \sum_{n=1}^{365} C_{op}(n) \quad (1)$$

式中 Z 为蓄冷系统年折算费用,元; A 为改造费用折成的等额年金,元; $\sum_{n=1}^{365} C_{op}(n)$ 为年运行费(总成本),元; ω 为系数,当采用静态法时, $\omega = x_t$, x_t 为标准投资效果系数, $x_t = 1/m$,当按动态法计算时

$$M_{op} = \sum_{i=1}^{24} \left[J_d(i) \frac{Q_{d,i}(i)}{COP_z(i)} a_1 + J_d(i) \frac{Q_{h,i}(i)}{\beta COP_{sl}(i)} a_2 + J_d(i) \frac{Q_{sl,i}(i)}{COP_{sl}(i)} a_3 \right] \quad (5)$$

式中 M_{op} 为设计日系统运行费用,元; $J_d(i)$ 为设计日 i 时刻电价,元/(kWh); $Q_{d,i}(i)$ 为设计日 i 时刻制冷机组用于直接供冷的冷负荷,kWh; $Q_{h,i}(i)$ 为设计日 i 时刻利用蓄冷槽来供冷的冷负荷,kWh; $Q_{sl,i}(i)$ 为设计日 i 时刻制冷机组在蓄冷工况下的蓄冷量,kWh; $COP_z(i)$ 为 i 时刻制冷机组的性能系数; $COP_{sl}(i)$ 为蓄冷时制冷机组的性能系数; a_1, a_2, a_3 分别为三种供冷策略下辅助机组(水泵、风机等)电耗的附加系数。

$\omega = \theta_g, \theta_g$ 为资金回收系数, $\theta_g = \frac{i(1+i)^m}{(1+i)^m - 1}, m$ 为蓄冷空调系统寿命周期(即系统改造后的使用寿命), i 为折现率; K 为系统改造费,元。

1.2 系统改造费用

既有建筑空调冷源改造成蓄冷空调系统的改造费包括各种设备、管道、材料、空间费用等。同时还应计入相应的运输、安装、调试等费用,这部分费用一般按设备投资的百分率计算。因此系统改造费可用下式表示:

$$K = (A_x Q_x + M_b)(1 + \zeta_x) + S e \quad (2)$$

式中 A_x 为蓄冷装置单位冷量估算价格指标,元/(kWh); Q_x 为蓄冷装置蓄冷容量,kWh; M_b 为蓄冷循环泵费用,元; ζ_x 为运输、安装、调试费用占设备费用的百分比; S 为蓄冷装置占地面积, m^2 ; e 为建筑单位面积价格,元/ m^2 。

其中蓄冷装置蓄冷容量可表示成:

$$Q_x = \frac{\Phi Q_z}{\beta} \quad (3)$$

式中 Φ 为蓄冷率; Q_z 为设计日总冷负荷,kWh; β 为蓄冷槽蓄冷效率。蓄冷槽效率反映了蓄冷槽槽体冷量损失的大小,与蓄冷槽保温状况、所处环境、形状等都有密切的关系。因此式(2)可改写成:

$$K = \left(A_x \frac{\Phi Q_z}{\beta} + M_b \right) (1 + \zeta_x) + S e \quad (4)$$

1.3 系统运行费用

目前,我国已有不少省市和地区实行电力峰、谷段分时电价政策,因此在计算运行费用时,应按不同分时电价分别计算运行费用并累加得到总运行费用。

设计日系统运行费用可描述为

在实际工程中,年运行费用在没有确定设备的情况下,由数学模型求解极为复杂。本文采用估算法,即将等额年金折算到每天,用设计日的运行费用作为评价的标准。但非设计日的运行费用并不完全等同于设计日的运行费用,因此引入一个修正系数 $a^{[5]}$,其值为

$$a = \frac{\text{空调期冷负荷总和} \div \text{设计日冷负荷总和}}{\text{空调期天数}}$$

因此系统优化设计的数学模型可描述为

$$Z' = \frac{A}{ad} + \sum_{i=1}^{24} \left[J_d(i) \frac{Q_d(i)}{COP_z(i)} a_1 + J_d(i) \frac{Q_d(i)}{\beta COP_{sd}(i)} a_2 + J_d(i) \frac{Q_d(i)}{COP_{sd}(i)} a_3 \right] \quad (6)$$

式中 d 为空调期运行时间, d ; Z' 为日折算费用, 元。

1.4 约束条件

1) 制冷机组直接供冷与蓄冷槽供冷满足冷负荷需求

$$Q_d(i) + Q_{fl}(i) = Q(i) \quad (7)$$

式中 $Q(i)$ 为设计日 i 时刻冷负荷, kWh。

2) 蓄冷槽逐时供冷量总和应为冷负荷转移量

$$\sum_{i=1}^{24} Q_{fl}(i) = \Phi Q_z \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{24} Q(i) = Q_z \quad (9)$$

3) 制冷机组逐时直接供冷量总和应为设计日总冷负荷减去蓄冷槽蓄冷量

$$\sum_{i=1}^{24} Q_d(i) = (1 - \Phi) Q_z \quad (10)$$

2 系统改造经济性主要影响因素

依据改造费用和运行费用公式分析, 影响蓄冷空调经济性的因素主要有: 不同地区的电价政策、蓄冷率、空调系统的送风温度等^[6]。

2.1 不同地区的电价政策

1) 电力增容费。电力增容费等将直接影响蓄冷空调系统的初投资。电力增容费越高, 系统的初投资就降低越多, 甚至可以因此使系统的初投资低于常规方案, 此时, 即便其他的电价政策不变, 蓄冷方案也已明显优于常规方案。

2) 峰、谷电价结构将直接影响蓄冷空调系统的运行费用, 峰、谷电价差值越大, 系统的运行费用节省就越多, 投资回收期将大大缩短。

3) 各地区还有一些其他的调荷电价政策, 如对非工业性空调用电, 在空调季节按装机功率每月每 kW 收取一定的费用, 给予奖励性补贴、免息贷款等。总之, 不同地区的电价政策对蓄冷空调系统的经济性起着决定性的作用, 电价政策越是倾向于削峰填谷, 蓄冷空调的用户得益越快、越多, 越能有力地推动蓄冷技术的应用和发展。

2.2 蓄冷率

蓄冷率是影响蓄冷空调系统经济性的一个重要因素。它与系统初投资密切相关, 决定着系统初投资的规模。峰谷电价比对总运行电费的影响

响, 随不同的蓄冷率出现不同的变化趋势, 蓄冷的优势要在蓄冷率达到一定值后才能体现。从总运行电费来说, 蓄冷率越大, 峰谷电价比越大, 则其总运行电费越小。空调冷负荷的分布特征对系统经济性也有较大的影响, 当空调冷负荷在用电高峰期呈现高而窄的分布时, 采用蓄冷系统最为经济。它可以减少高峰电力需求, 很好地实现移峰填谷作用。

因此, 对于既定地区的既有建筑空调冷源改造或蓄冷空调时, 需要对改造系统的运行策略及蓄冷率进行优化设计, 以实现最大的经济效益。

3 既有建筑空调冷源蓄冷节能改造经济性分析实例

我国地域广阔, 各地气候条件差别非常大。这对既有建筑空调冷源蓄冷节能改造的节能效果有很大的影响, 因此, 本文以某办公建筑为例, 对原空调冷源蓄冷改造进行优化分析, 分别计算此办公建筑在不同建筑气候分区典型城市内的节能改造效果。

该办公建筑面积为 5 620 m², 空调面积为 4 760 m², 供冷时间为 07:00—21:00, 共 14 h。其他计算参数见表 1。

表 1 计算参数

	西安 (寒冷地区)	银川 (严寒地区)	武汉 (夏热冬冷地区)	广州 (夏热冬暖地区)	昆明 (温和地区)
峰电价/(元/(kWh))	0.713	1.10	1.222	0.945	0.75
峰谷电价比	2.67:1	2.25:1	3.31:1	2.25:1	2.10:1
设计日空调总冷负荷/kW	8 548	7 324	11 014	10 855	6 459
全年供冷时间/d	132	90	195	200	50

原系统制冷主机采用的是螺杆式制冷机组, 满负荷运行时 COP 为 4.6。对不同的气候分区选取代表性城市, 计算得到的既有建筑空调冷源蓄冷节能改造的改造费用随蓄冷率变化规律如图 1 所示。从图 1 可以分析得出, 夏热冬冷地区与夏热冬暖地区系统改造费用随蓄冷率的变化率基本相同, 蓄冷率每变化 0.1, 改造费用变化 19.5 万元。温和地区系统改造费用受蓄冷率变化的影响相对较小, 蓄冷率每变化 0.1, 改造费用变化 11.5 万元。

不同建筑气候分区的最佳蓄冷率及年运行费

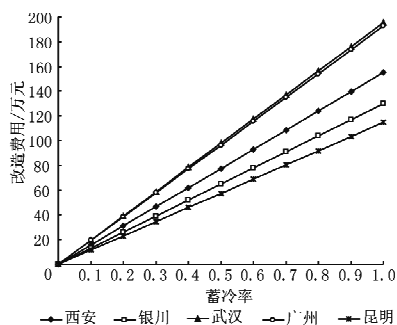


图1 不同建筑气候分区系统改造费用随蓄冷率的变化

用节省率情况如图2所示,从图2可以看出,在我国5个建筑气候分区里,夏热冬冷地区既有建筑空调冷源蓄冷节能改造年运行费用节省率最高,达到了40%;夏热冬暖地区次之,达到31%;再次为寒冷地区、严寒地区,分别为25%,16.5%;而温和地区则不适合既有建筑空调冷源蓄冷节能改造,其节省率为0。因此,夏热冬冷地区最具既有建筑空调冷源蓄冷节能改造的潜力。从最佳蓄冷率上看,夏热冬冷地区最佳蓄冷率最高,为0.59,夏热冬暖地区次之,为0.53,再次为寒冷地区、严寒地区,分别为0.423,0.23,由于温和地区不适合既有建筑空调冷源蓄冷节能改造,因此最佳蓄冷率为0。

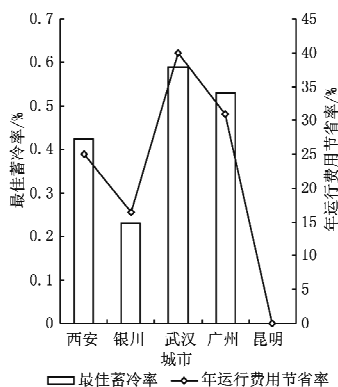


图2 不同建筑气候分区的最佳蓄冷率及年运行费用节省率

不同建筑气候分区采用最佳蓄冷率进行节能改造后,寿命周期内总费用节省率如图3所示。在我国5个建筑气候分区里,夏热冬冷地区建筑蓄冷空调总费用节省率最高,达到了25.5%,总节省费用200.05万元;夏热冬暖地区次之,达到11.6%;再次为寒冷地区、严寒地区,分别为6.4%,5.3%;而温和地区总费用节省率为0。

综上,夏热冬冷地区最具节能改造的潜力,

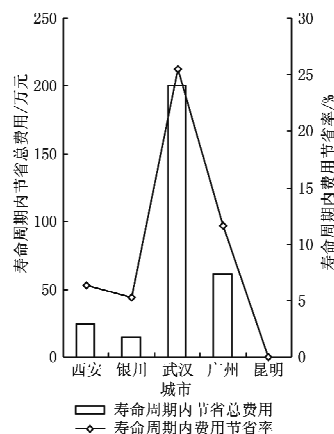


图3 不同建筑气候分区蓄冷空调寿命期内的费用节省率

夏热冬暖地区次之,再次为寒冷地区、严寒地区,温和地区不适合既有建筑空调冷源蓄冷节能改造。

4 结论

4.1 夏热冬冷地区与夏热冬暖地区进行既有建筑空调冷源蓄冷节能改造时,改造费用受蓄冷率影响最大,温和地区受蓄冷率影响最小。

4.2 夏热冬冷地区最具节能改造的潜力,其节能潜力几乎为寒冷地区、严寒地区的两倍。夏热冬暖地区节能效果也很显著,而温和地区则不宜将既有建筑空调冷源进行蓄冷改造。

4.3 夏热冬冷地区最佳蓄冷率最高,夏热冬暖地区次之,寒冷地区、严寒地区再次之。

参考文献:

- [1] 江亿,杨秀.我国建筑能耗状况与建筑节能工作中的问题[J].中华建设,2006(2):12-18
- [2] Michael A L. A heat pump system with a latent heat storage utilizing sea water installed in an aquarium [J]. Energy and Buildings, 2006,38 (2):121-128
- [3] Michael A L. Design of solar powered adsorption heat pump with ice storage [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(7):1612-1628
- [4] 李晓燕,周维,周辉.适用于蓄冷空调的二元相变蓄冷材料的测试与研究[J].哈尔滨商业大学学报,2001, 17(4):108-110
- [5] 吴逸飞.冰蓄冷空调系统的优化设计与经济性分析 [D].南昌:南昌大学,2006
- [6] 方贵银.蓄冷空调工程使用新技术[M].北京:人民邮电出版社,2005