

武汉地区地源热泵夏季工况能效测评与效益分析

李玉云 马勇 胡先芳 胡贵华 赵亚洲 熊瑶
黄建光 鲁文雄 柳继超 汤森 邱爽 赵典

(中信建筑设计研究院总院有限公司 武汉 430070)

摘要:通过对武汉市地源热泵系统的短期测试与长期监测,讨论了热泵性能系数、水泵效率、水系统输送系数、热泵系统能效系数,分析了影响热泵系统实际能效的因素以及无热回收热泵系统能效高于热回收热泵系统能效的原因;得出了90%被测评项目的地源热泵系统能效高于2.4,实际投资回收期大于计算回收期的结论。

关键词:地源热泵 能效测评 经济效益

引言

地源热泵系统是一种采用岩土体或地下水、地表水为低温热源的可再生地热能的供热供冷系统,由水源热泵机组、地热能交换系统、建筑物内的空调采暖末端系统组成的供热空调系统。武汉地区地下水源、岩土蓄热体的温度一年四季相对稳定,基本保持在18~20℃,丰富的自然资源为采用地源热泵系统奠定了基础。武汉市自上世纪开始采用地源热泵技术,现在已经拥有多项地源热泵空调工程,建筑应用面积已达300多万m²,分别应用于公共建筑、住宅以及多功能建筑群。其中18项是住房和城乡建设部第一批示范项目。地源热泵技术源于欧洲,蓬勃发展起源于石油危机之后,我国起步于上世纪80年代,在21世纪进入了推广、快速发展阶段。地源热泵技术已经基本成熟,但在实际使用过程中的能效、节能效益、环境效益与经济效益如何?文章围绕武汉市可再生能源建筑应用示范项目,依据《公共建筑节能节能检验标准》^[1]与住房和城乡建设部《可再生能源建筑示范项目测评导则》^[2],通过对项目的测试与监测,分析与讨论地源热泵的能效水平与经济

效益。

1 测试内容及测试方法

1.1 项目概况及测试内容

表1为2011年夏季已测评的项目。从表中可知,地源热泵有地下水源热泵与土壤源热泵,热泵有二工况、三工况,建筑有住宅、公建以及综合建筑群。对地源热泵系统测试的主要内容:室内热环境,热泵机组及系统的冷冻水供回水温度、流量,热泵机组及系统辅助设备的功率,设备进出口压力等。根据测试数据,计算热泵机组性能系数、输配系统能效、地源热泵系统综合能效;计算系统的节能效益、经济效益与环保效益。

1.2 测试方法与测试仪器

系统按实际负荷需求运行空调系统,当系统处于稳定工况时,采用间接测量法得到热泵机组制冷性能系数、热泵系统COP,采用直接测量法得到空调区域温湿度、风速以及室外温湿度。

1.2.1 测试仪器

作者简介:李玉云 教授

收稿日期:2011年12月

表1 测评项目概况

项目	热泵形式	功能	示范面积(m ²)	用途	机组容量		台数
					制冷	制热	
A	地埋管+冰蓄冷	住宅+公建	57000	供冷供热	2251	2284	2
B	地埋管	公建	697.6	供冷供热、卫生热水	28	26	1
C	地埋管	住宅+公建	48656	供冷供热、卫生热水	2140.6	3597.4	3
D	地埋管	公建	20989	供冷供热、卫生热水	1883.8	2308.1	3
E	地埋管	住宅+公建	8500	供冷供热、卫生热水	544.1	577.5	2
F	地埋管	住宅+公建	10174.54	供冷供热、卫生热水	1882.1	1969	2
G	地下水热泵	公建	23973	供冷供热	1895.2	2110.6	2

测试仪器见表2。表中仪器经过湖北省计量测试技术研究院标校,且在检定有效时期内。

表2 测试仪器参数一览表

序号	名称及型号	范围	准确度
1	超声波流量计	DN50 ~ DN700	±1.0%
2	超声波流量计	DN12 ~ DN6000	±1.0%
3	温湿度记录仪	-20 ~ 60℃ 0 ~ 95%RH	±0.5℃ ±5%RH
4	铂电阻温度测量系统	0 ~ 100℃	±0.2℃
5	功率表	0 ~ 600V 0 ~ 1000A	±0.2%
6	电力谐波分析仪	0 ~ 5000A	±0.2%

1.2.2 室内外温湿度测试

在单体建筑的顶层、标准层、一层分别布置测点;选择建筑群最不利环路的单体建筑布置测点。未正式投入运行或者入住率低的建筑群,人为调节末端负荷以尽可能满足测试条件。并抽样调查其他空调区域的舒适度。室外温湿度测点布置在庇荫处。空调区域测试数据处理方法是首先取单间室内平均值,然后取测试区域平均值。

1.2.3 机组性能系数测试

冷冻水进、出口温度测点靠近机组布置,流量计布置在冷冻水母管。功率测试仪表(三相)布置在供应机组电源的空气开关出线。

1.2.4 冷源系统能效比测试

冷冻水进、出口温度以及流量计布置在冷冻水母管。功率测试仪表(三相)布置在供应设备电源的空气开关出线。

1.3 测试结果与分析

1.3.1 室内外热湿环境

表3为室内外热湿环境的测试结果。比照《公共建筑节能节能检验标准》4.0.3,室内平均温度允许偏差小于±2℃,室内平均相对湿度允许偏差小于±15%时,室内环境测试合格。

1.3.2 循环泵水泵效率

表4是循环泵的能效。限值来源于《清水离心泵能效限定值及节能评价》GB19762-2005[3],实际效率计算式为^[4]。式中,是循环泵流量,是水泵扬程,是流体密度,是水泵功率。从表中可知,实际运行的平均效率为41.6%,比照《清水离心泵能效限定值及节能评价》GB19762-2005,水泵实际能效远低于能效限定值。

表3 室内外热湿环境

项目	A		B		C		D		E		F		G	
测试时间	8/9	8/10	7/26	7/27	8/14	7/29	8/1	8/4	8/20	7/21	7/22			
室内温度/℃	25.5	24.9	30.3	28.8	23.1	24.1	24.2	24.8	26.2	27.4	27.4			
室内湿度/%	74.9	76.7	56.1	64.0	77.3	75.1	73.6	63.6	77.2	64.4	61.9			
室外温度/℃	31.8	31.6	31.8	32.8	34.2	38.3	36.6	29.1	33.3	34.2	35.1			
室外湿度/%	70.4	72.8	57.7	82.3	64.9	51.6	57.9	65.3	65.0	59.8	59.8			

表4 循环泵能效

工况	A ※		B	C		D		E		F		G ※
	二工况	三工况		1#	1#	2#	小泵	大泵	小泵	大泵		
实际	45.60	36.0	29.7	52.2	45.6	44.7	35.4	/	/	69.4	36.8	
限值	72.2	72.2	36.5	77.6	77.2	77.2	62.5	62.7	69.5	76.9	70.9	

※变频控制

1.3.3 冷冻水系统输送能效系数

水系统输送能效系数计算式为制冷量/水系统泵功率,表5是项目使用侧平均输送系数。从表中可知,设计工况下的输送系统能效系数在8.4~25.61范围内,平均值为15.32。实际运行的输送系统能效系数在3~17

范围内,平均值为9.02。实际运行能效系数是额定能效系数的58.9%。空调循环泵采用变频控制的设计输送系数为19.23,实际输送系数为12.91;空调循环泵采用工频控制的设计输送系数为12.29,实际输送系数为7.35。采用变频控制的循环泵输送系数高于工频控制。

表5 使用侧平均输送系数

工况	A ※		B	C		D		E	F	G ※		
	二工况	三工况		1#	1#	1#	2#			1#、2#	单台	两台
	机组	机组		1#	3#					运行	运行	
设计	10.5	21.6	15.14	14.5	12.1	8.4	8.41	14.06	13.4	14.5	25.61	25.61
实际	16.5	8.95	14.55	4.26	3.2	6.7	6.64	8.07	8.05	7.16	12.66	11.46

1.3.4 机组性能系数以及热泵系统能效系数

机组性能系数等于制冷量/机组功率,热泵系统能效系数等于制冷量/(热泵机组功率+冷冻泵功率+冷却泵功率)。额定设计工况与实际工况的机组性能系数、热泵系统能效系数见表6、表7。从表6可知,无热回收地源热泵机组实际运行性能系数是额定值的-16%~23%,无热回收地源热泵系统实际能效系数是系统额定能效系数的86.9%~143.7%。表7为热回收地源热泵系统的能效系数。从表中可知:热回收地源热泵系统实际的制冷能效系数是系统额定的制冷能效系数的40.9%~75.0%,系统实际综合能效系数是系统额定综

合能效系数的32.8%~69.3%。对比表6与表7可得到以下几点:

(1)A项目能效系数高于系统额定能效系数,C项目能效系数低于2.0。A项目系统能效高的原因:一是主机性能系数高,二是系统变频控制,三是机组超负荷运行。C项目能效低的原因:一是负荷率低,二是工频控制,三是全热回收机组与部分热回收机组并联运行,由于白天热水需求量很少,机组基本处于待运行状态,蒸发器进出口水温度与空调冷冻水回水温度相同,系统冷冻水供水温度高于部分热回收机组的冷冻水出口温度,即导致供回水温差减小。

表6 无热回收地源热泵系统能效系数

建筑	运行工况	机组性能系数		冷源系统 COP		负荷率/%	冷源空调系统能效比限值
		机组额定	实际	额定	实际		
A	三工况	5.41	6.17	3.73	3.64	54(单台)	2.99
	二工况	5.26	6.46	3.50	5.03	105(单台)	2.79
	平均值	5.33	6.28	3.62	4.19	73	
G	1台	5.54	6.14	4.25	4.13	84	2.79
	2台	5.54	5.10	3.99	3.53	60	2.79
B	1台	4.32	3.63	3.36	2.92	93	2.47
E	1台	4.70	4.58	3.35	2.92	44	2.66

表7 热回收地源热泵系统能效系数

建筑	运行工况	机组性能系数				冷源系统 COP				系统负荷率/%	冷源空调系统能效比限值 ^[1]
		机组额定		实际		额定		实际			
		制冷	综合	制冷	综合	制冷	综合	制冷	综合		
C	部分热回收	5.24	6.20	3.02	3.47	3.84	5.02	1.68	1.93	30.39	2.79
	部分+全热回收	5.11	10.33							31.50	2.66/2.79
F	部分热回收	5.03	5.98	4.58	5.13	3.72	4.43	2.79	3.07	40.80	2.79
D	1台部分热回收			3.76	5.79	3.88	4.10	2.34	2.58	82.05	2.79
	2台部分热回收	5.35	5.79	3.74	/					58.08	

(2) 热回收地源热泵系统能效系数低于无热回收地源热泵系统能效系数,原因之一是夏天的热水用量少,热水供回水温差仅 0.5-0.7,热回收优势未得到发挥。

(3) 供回水温差小。冷冻水温差 1.4 ~ 5.6℃,地源侧温差 1.9 ~ 6.2℃(6.2℃ 是水源热泵),冷却水供、回水平均温度 24.7 ~ 29.1℃;

(4) 表 8 是热回收系统与无热回收系统能效比较。从表中可知,无热回收机组实际运行平均性能系数高于平均额定设计工况值,热回收机组实际运行性能系数、综合能效比低于额定设计工况值;无热回收热泵系统实际能效高于额定设计工况值,热回收冷源系统实际运行系数低于额定设计工况值,也低于常规冷源系统能效系数 2.4 的限值。

表8 热回收系统与无热回收系统能效比较

平均制冷量	制冷量	机组平均 COP				冷源系统平均 COP			
		额定		实际运行		额定		实际运行	
		制冷	综合	制冷	综合	制冷	综合	制冷	综合
热回收	880.7	5.19	7.15	3.66	4.05	3.82	4.76	2.1	2.34
无热回收	746.4	5.16	/	5.48	/	3.69	/	3.77	/

1.3.5 冷热负荷

表 9 是测评项目的全年累计负荷。其中,实测值是长期监测所获得的数据,计算值:全年累计冷负荷采用温频法,全年累计热负荷采用度日法^[5]。从表中可知,实际冷热负荷均小于计算冷热负荷的 1/3 ~ 2/3; D 的全年累计热负荷(采暖+卫生热水)大于冷负荷, G 的热负荷占冷负荷的 46.4%。这说明为

了地源侧的冷热平衡,辅助冷却系统的设计,不仅要正确选择模拟参数进行全年空调采暖负荷模拟,还必须正确计算全年累计热水负荷。还须值得注意的是:无论是温频法还是度日法,均与建筑物总设计冷负荷(或热负荷)成正比,如果设计负荷偏离实际工况甚远,则实际累计负荷也偏离计算累计负荷甚远。

表9 空调冷热累计负荷/kWh/a

		A	B	C	D	E	F	G
计算值	热负荷 1	1744365	14470	3750448	528139	601860	1167003	779047
	热负荷 2	1744365	19673	4378067	603487	846043	1557713	779047
	冷负荷	1781961	14289	1809589	959413	399122	926533	969620
实测值	热负荷 1	/	/	/	341600	/	/	285197
	热负荷 2	/	/	/	417000	/	/	285197
	冷负荷	/	/	/	357900	/	/	614457

备注:热负荷 1 为采暖累计热负荷,热负荷 2 为采暖累计热负荷+全年生活热水负荷

由于实际累计负荷仅是计算累计负荷的 1/3 ~ 2/3,则项目实际投资回收期大于项目申报投资回收期,见表 10。

1.3.6 经济效益

表 10 增量成本与回收期

工况		A	B	C	D	E	F	G
增量成本/万元/a		343.60	32.90	549.80	289.00	75.00	212.00	67.48
回收期/a	申报	5.40	/	3.50	7.0	5.0	8.0	2.3
	测 计算	5.5	19.2	3.7	10.2	2.2	3.1	1.4
	评 实测	/	/	/	11.0	5.3	/	3.4

2 结论与分析

(1)实际运行的热回收机组制冷性能系数、综合能效系数均低于无热回收机组的性能系数;

(2)实际运行工况下,热回收地源热泵系统能效系数低于无热回收地源热泵系统能效系数。通过现场测试表明:附件质量、系统串水、运行操作是导致全热回收系统能效低的主要原因;

(3)系统大流量、小温差运行;水泵实际运行的平均效率为 41.6%,水泵实际能效远低于能效限定值;系统实际输送系数是额定能效系数的 58.9%,变流量系统的设计、实际系统输送系数均大于定流量系统的设

计、实际系统输送系数;

(4)实际累计负荷是计算累计负荷的 1/3 ~ 2/3,项目实际投资回收期大于项目申报投资回收期。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T177-2009,公共建筑节能节能检验标准 [S]
- [2] 中国建筑科学研究院. 可再生能源建筑应用示范项目测评导则 [S]
- [3] 付祥钊. 流体输配管网[M]. 12. 北京:中国建筑工业出版社, 2008:156-161
- [4] 中国标准化研究院. GB19762-2005,清水离心泵能效限定值及节能评价值 [S]
- [5] 钱以明. 高层建筑空调与节能 [M]. 上海:同济大学出版社, 1990:432-437