

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-591-08

多能互补能源站综合评价体系研究

刘启明 许抗吾 褚 赛 孙林娜 牛笑晨

(北京市勘察设计研究院有限公司 北京 100038)

【摘 要】 对于多种冷热源耦合的能源站系统,采用高效制冷机房评价标准进行系统的能效评价存在较大的局限性,一方面无法直接应用于热泵系统的能效评价,另一方面无法对市政热力/燃气锅炉的运行情况进行评估。根据多能互补能源站中冷热源的特点,提出能效、费效和节能率三大节能指标。参考高效制冷机房能效评价方法,通过不同条件下的能耗模拟,制定出不同冷热源系统与耦合能源系统的能效评价指标;对无法采用能效进行评价的常规热源耦合系统,提出费效评价指标,旨在判断冷热源系统的运行经济性;此外,提出节能率的计算方法,可反映节能算法与控制策略的节能效益。

【关键词】 多能互补能源站; 能耗模拟; 能效; 费效; 节能率; 评价体系

中图分类号 TU83 文献标志码 A

Study on the Comprehensive Evaluation System of Multi-energy Energy Stations

Liu Qiming Xu Kangwu Chu Sai Sun Linna Niu Xiaochen

(BGI Engineering Consultants Ltd, Beijing, 100038)

【Abstract】 For energy station systems with multiple cold and heat source coupling, the use of high-efficiency chiller plant evaluation standards to evaluate the energy efficiency of the system has great limitations. On the one hand, it cannot be directly applied to the energy efficiency evaluation of heat pump systems, and on the other hand, it cannot evaluate the operation of municipal heating/gas-fired boilers. According to the characteristics of cold and heat sources in multi-energy complementary energy stations, three energy-saving indicators are proposed: energy efficiency, cost-effectiveness, and energy-saving rate. With reference to the energy efficiency evaluation method of high-efficiency chiller plants, energy efficiency evaluation indicators for different cold and heat source systems and coupled energy systems are formulated through energy consumption simulation under different conditions; for conventional heat source coupling systems that cannot be evaluated by energy efficiency, the cost-effectiveness evaluation indicator is proposed to evaluate the operating economy of cold and heat source systems; in addition, a method for calculating energy-saving rate is proposed to reflect the energy-saving benefits of energy-saving algorithms and control strategies.

【Keywords】 Multiple-energy energy station; Energy simulation; Energy efficiency; Cost-effectiveness; Energy-saving rate; Evaluation system

0 引言

建筑冷热源系统的首要任务是保障安全舒适,其次是实现高效经济运行。而在“碳达峰、碳中和”^[1]的背景下,提高系统运行能效、降低碳排放显得尤为重要。

冷热源系统能效水平,需要根据相关评价标准来确定。美国采暖、制冷与空调工程师学会(ASHRAE)早在 2001 年就提出了制冷机房年平均运行效率的概念,其定义为冷水机组、冷却水泵、冷却塔风机年总耗电量之和与冷水机组年总制冷量

的比值^[2],认为年平均运行效率 $<0.7\text{kW/RT}$ ($COP>5$) 制冷机房为高效机房^[3];新加坡建设局在其推出的 Green Mark 绿色建筑评价标准中提出了制冷机房系统效率 η_c ^[4],将除了末端送风系统之外的空调耗电设备纳入到制冷机房总效率的计算中,并将能效等级分为认证级、金奖、超金奖和白金奖;我国在《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015 中引入了电制冷综合制冷系数 ($SCOP$)^[5],定义为设计工况下

电驱动的制冷系统的制冷量与制冷机、冷却水泵及冷却塔净输入能量之比;2017 年广东省发布的《集中空调制冷机房系统能效监测及评价标准》DBJ/T 15-129-2017 中提出制冷机房全年平均能效比 (EER_{ao})^[6],为制冷机房系统实际运行时全年累计总制冷量与全年累计总用电量的比值;此外,近年来相关协会、团体也编制了高效机房的能效评价标准^[7-9]。

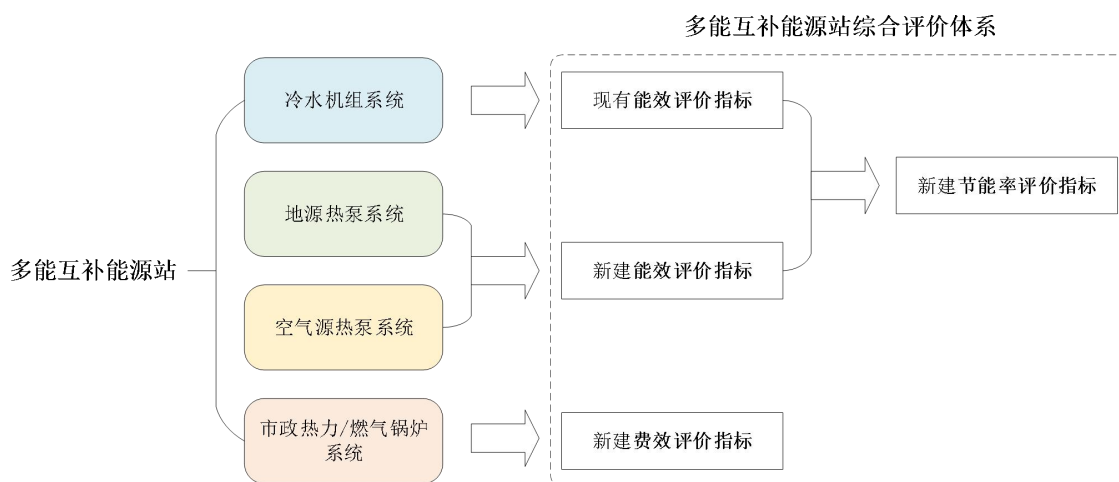


图1 多能互补能源站综合评价体系

Fig.1 The comprehensive evaluation system of multi-energy energy stations

研究主要针对由冷水机组、地源热泵、空气源热泵、市政热力/燃气锅炉等常见冷热源形式组成的多能互补能源站系统,从系统的运行能耗、运行费用与节能水平出发,建立一套涵盖能效、费效和节能率的综合评价体系。

1 能效评价指标

能效评价指标涵盖冷水机组系统、地源热泵系统、空气源热泵系统以及多能耦合冷热源系统。

1.1 综合能效计算

1.1.1 冷水机组系统

冷水机组系统的综合运行能效 EER_c 的计算沿用目前高效制冷机房的综合能效比的计算公式。

$$EER_c = \frac{Q_c}{W_{ch} + W_{chp} + W_{cp} + W_{ct}} \quad (1)$$

式中: Q_c 为冷水机组的累计制冷量, kWh; W_{ch} 为冷水机组的累计用电量, kWh; W_{chp} 为冷冻水泵的累计用电量, kWh; W_{cp} 为冷却水泵的累计用电量, kWh; W_{ct} 为冷却塔的累计用电量, kWh。

1.1.2 地源热泵系统

地源热泵系统的制冷综合运行能效 EER_g 和供热综合运行能效 COP_g 的计算参考《可再生能源建筑应用工程评价标准》GB/T 50801-2013^[10]。

$$EER_g = \frac{Q_c}{W_{ghp} + W_{lp} + W_{gp}} \quad (2)$$

式中: Q_c 为地源热泵机组的累计制冷量, kWh; W_{ghp} 为地源热泵机组制冷累计用电量, kWh; W_{lp} 为负荷侧水泵制冷累计用电量, kWh; W_{gp} 为地埋侧水泵制冷累计用电量, kWh。

$$COP_g = \frac{Q_h}{W_{ghp} + W_{lp} + W_{gp}} \quad (3)$$

式中: Q_h 为地源热泵机组的累计供热量, kWh; W_{ghp} 为地源热泵机组供热累计用电量, kWh; W_{lp} 为负荷侧水泵供热累计用电量, kWh; W_{gp} 为地埋侧水泵供热累计用电量, kWh。

1.1.3 空气源热泵系统

空气源热泵系统的制冷综合运行能效 EER_a 和供热综合运行能效 COP_a 的如式 (4)、式 (5) 所示。

$$EER_a = \frac{Q_c}{W_{ahp} + W_{lp}} \quad (4)$$

式中: Q_c 为空气源热泵机组的累计制冷量, kWh; W_{ahp} 为空气源热泵机组制冷累计用电量, kWh; W_{lp} 为负荷侧水泵制冷累计用电量, kWh。

$$COP_a = \frac{Q_h}{W_{ahp} + W_{lp}} \quad (5)$$

式中: Q_h 为空气源热泵机组的累计供热量, kWh; W_{ahp} 为空气源热泵机组供热累计用电量, kWh; W_{lp} 为负荷侧水泵供热累计用电量, kWh。

1.2 系统能耗模拟

1.2.1 模拟软件

能源系统模拟采用 Trnsys 软件, 如图2所示。Trnsys 仿真模型主要用到以下几个模块: (1) Type9e: 负荷输入; (2) Type682: 理想末端; (3) Type110: 变频水泵; (4) Type225: 地源热泵机组; (5) Type666: 冷水机组; (6) Type206: 空气源热泵机组; (7) Type122: 锅炉; (8) Type557a: U型地埋管; (9) Type126: 冷却塔; (10) Type650: 换热器。

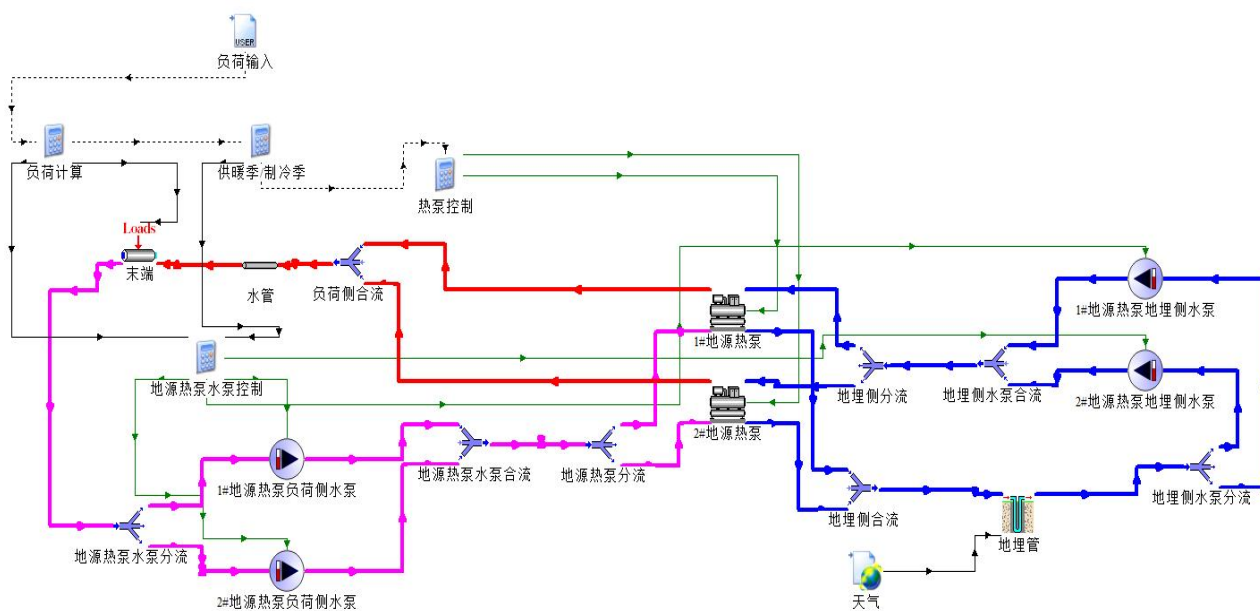


图2 Trnsys 仿真模型(地源热泵)

Fig.2 Trnsys simulation model (GSHP)

1.2.2 模拟内容

以地源热泵为主的多能互补能源站, 主要适用于寒冷地区和夏热冬冷地区, 能耗模拟分别以北京和武汉作为典型城市。考虑到不同建筑类型的负荷特点, 分别对办公、酒店、商场、医院和学校等五种常见公共建筑进行冷热源系统高效运行能耗模拟^[1]。此外, 对于冷水机组系统和地源热泵系统, 螺杆式机组和离心式机组的能效相差较大, 还需要分析单台机组容量 $<1758\text{kW}$ (500RT) 和 $\geq 1758\text{kW}$ (500RT) 的情况。

能耗模拟过程以北京某办公建筑冷热源系统为例。该建筑设计冷负荷为 2144kW , 设计热负荷为 1981kW , 建筑全年负荷分布如图3所示。系统配置2台地源热泵机组(制冷量 1118kW ,

$EER=5.76$, 制热量 1151kW , $COP=4.80$), 3 负荷侧水泵 ($Q=220\text{m}^3/\text{h}$, $H=31.5\text{m}$, $P=30\text{kW}$, 2 用 1 备) 和 3 台地埋侧水泵 ($Q=270\text{m}^3/\text{h}$, $H=24.6\text{m}$, $P=30\text{kW}$, 2 用 1 备)。

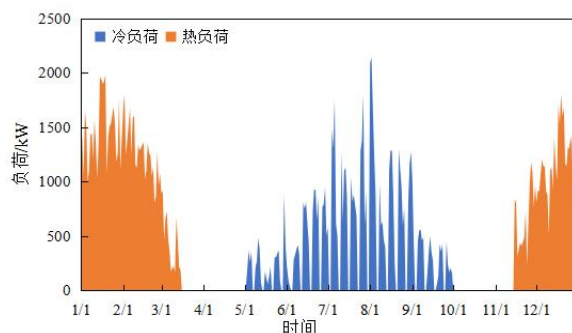


图3 建筑负荷分布图

Fig.3 Building load distribution

1.2.3 模拟结果

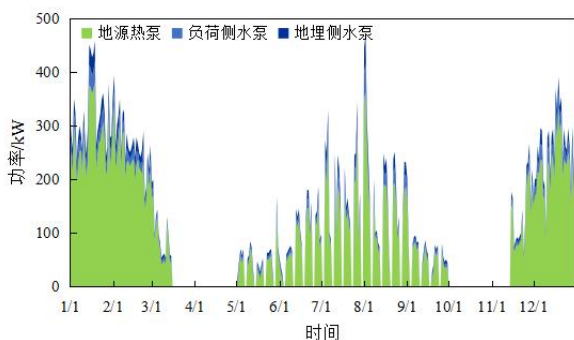


图4 地源热泵系统全年能耗

Fig.4 Annual energy consumption of the GSHP system

系统能耗模拟结果如图4所示。系统制冷季累计制冷量为490459.63kWh，累计耗电量为98049.93kWh，制冷综合EER为5.00；供暖季累计供热量为966837.12kWh，累计耗电量为217815.86kWh，供热综合COP为4.44。

寒冷地区冷水机组系统、地源热泵系统和空气源热泵系统综合能效汇总如表1所示。

夏热冬冷地区冷水机组系统、地源热泵系统和空气源热泵系统综合能效汇总如表2所示。

表1 寒冷地区不同冷热源系统综合能效

Table 1 Comprehensive energy efficiency of different cold and heat source systems in cold region

建筑类型			办公	酒店	商场	医院	学校
冷水机组系统	EER_c	$<1758kW$	5.41	4.71	5.45	4.99	5.71
		$\geq 1758kW$	5.68	4.90	5.74	5.27	6.00
地源热泵系统	EER_g	$<1758kW$	5.00	4.45	5.11	4.71	4.98
		$\geq 1758kW$	5.23	4.62	5.36	4.97	5.23
	COP_g	$<1758kW$	4.44	4.41	4.24	4.69	4.31
		$\geq 1758kW$	4.80	4.75	4.54	5.07	4.63
空气源热泵系统	EER_a		3.71	3.52	3.64	3.67	3.72
	COP_a		2.74	2.79	2.63	2.80	2.76

表2 夏热冬冷地区不同冷热源系统综合能效

Table 2 Comprehensive energy efficiency of different cold and heat source systems in hot summer and cold winter region

建筑类型			办公	酒店	商场	医院	学校
冷水机组系统	EER_c	$<1758kW$	5.27	5.00	5.37	5.23	4.94
		$\geq 1758kW$	5.57	5.28	5.67	5.49	5.18
地源热泵系统	EER_g	$<1758kW$	5.11	4.86	5.26	5.10	4.63
		$\geq 1758kW$	5.38	5.11	5.52	5.33	4.85
	COP_g	$<1758kW$	4.34	4.35	3.90	4.66	4.29
		$\geq 1758kW$	4.63	4.70	4.19	5.01	4.58
空气源热泵系统	EER_a		3.64	3.59	3.62	3.58	3.73
	COP_a		2.82	3.01	2.58	3.01	2.80

1.3 综合能效评价

为简化综合能效评价标准，将能源系统的综合

能效根据建筑类型进行加权，以近年我国典型公共建筑竣工面积的分布比例作为权重系数。

$$EER = \frac{EER_{bg} \times p_{bg} + EER_{jd} \times p_{jd} + EER_{sc} \times p_{sc} + EER_{yy} \times p_{yy} + EET_{xx} \times p_{xx}}{p_{bg} + p_{jd} + p_{sc} + p_{yy} + p_{xx}} \quad (6)$$

$$COP = \frac{COP_{bg} \times p_{bg} + COP_{jd} \times p_{jd} + COP_{sc} \times p_{sc} + COP_{yy} \times p_{yy} + COP_{xx} \times p_{xx}}{p_{bg} + p_{jd} + p_{sc} + p_{yy} + p_{xx}} \quad (7)$$

式中: EER 、 COP 为制冷(热泵)系统的综合制冷(供热)能效比; EER_{bg} 、 COP_{bg} 为办公建筑制冷(热泵)系统的综合制冷(供热)能效比; p_{bg} 为办公建筑面积占比; EER_{jd} 、 COP_{jd} 为酒店建筑制冷(热泵)系统的综合制冷(供热)能效比; p_{jd} 为酒店建筑面积占比; EER_{sc} 、 COP_{sc} 为商场建筑制冷(热泵)系统的综合制冷(供热)能效比; p_{sc} 为商场建筑面积占比; EER_{yy} 、 COP_{yy} 为医院建筑制冷(热泵)系统的综合制冷(供热)能效比; p_{yy} 为医院建筑面积占比; EER_{xx} 、 COP_{xx} 为学校建筑制冷(热泵)系统的综合制冷(供热)能效比; p_{xx} 为学校建筑面积占比。

根据相关统计数据, 2021 年公共建筑竣工面积中, 商场占比 29%, 办公建筑占比 21%, 学校占比 20%, 医院和酒店分别占 7% 和 3%^[12]。以此为权重依据, 计算得到的能源系统综合能效如表 3 所示。

表 3 不同冷热源系统的综合能效

Table 3 Comprehensive energy efficiency of different cold and hot source systems

能源系统形式			寒冷地区	夏热冬冷地区
冷水机组系统	EER_c	$<1758\text{kW}$	5.44	5.21
		$\geq 1758\text{kW}$	5.72	5.49
地源热泵系统	EER_g	$<1758\text{kW}$	4.99	5.03
		$\geq 1758\text{kW}$	5.23	5.28
	COP_g	$<1758\text{kW}$	4.36	4.20
		$\geq 1758\text{kW}$	4.69	4.49
空气源热泵系统	EER_a		3.68	3.65
	COP_a		2.71	2.75

不同标准、规范中对于高效制冷机房的能效等级的规定各不相同, 且没有给出能效等级划分的依据。黄冬娜等^[13]基于建筑热工分区区划指标和室外湿球温度分布情况, 选用供冷季室外平均湿球温度作为制冷机房系统能效比评价分区的区划指标, 采用 4 个能效比分级冷源系统, 构建了多个制冷机房系统能效比计算模型, 得到了高效制冷机房系统能效比分级评价标准。

考虑到能效分级评价的科学性、合理性与普适性, 结合以上综合能效模拟结果, 冷水机组系统能效等级沿用上述文献中给出的寒冷地区与夏热冬

冷地区高效制冷机房系统能效比等级, 如表 4 所示。

表 4 冷水机组系统能效等级

Table 4 Energy efficiency classification of chiller systems

气候分区		3 级	2 级	1 级	领跑级
寒冷地区	$<1758\text{kW}$	4.0	4.4	4.7	5
	$\geq 1758\text{kW}$	4.4	4.8	5.1	5.4
夏热冬冷地区	$<1758\text{kW}$	3.9	4.3	4.5	4.8
	$\geq 1758\text{kW}$	4.3	4.7	5	5.3

通过类比冷水机组系统的能效模拟结果与上表中冷水机组系统的能效等级, 计算得到地源热泵系统和空气源热泵系统的能效等级, 汇总如表 5、表 6 所示。

表 5 地源热泵系统能效等级

Table 5 Energy efficiency classification of GSHP systems

气候分区		3 级	2 级	1 级	领跑级
寒冷	制冷	$<1758\text{kW}$	3.7	4.1	4.4
		$\geq 1758\text{kW}$	4.1	4.4	4.7
	供热	$<1758\text{kW}$	3.3	3.6	3.8
		$\geq 1758\text{kW}$	3.7	4.0	4.2
夏热	制冷	$<1758\text{kW}$	3.8	4.2	4.4
		$\geq 1758\text{kW}$	4.2	4.6	4.9
冬冷	供热	$<1758\text{kW}$	3.2	3.5	3.7
		$\geq 1758\text{kW}$	3.6	3.9	4.1
		$\geq 1758\text{kW}$	3.6	3.9	4.1

表 6 空气源热泵系统能效等级

Table 6 Energy efficiency classification of ASHP systems

气候分区		3 级	2 级	1 级	领跑级
寒冷	制冷	2.8	3.0	3.2	3.4
	供热	2.1	2.3	2.5	2.6
夏热冬冷	制冷	2.8	3.1	3.2	3.4
	供热	2.2	2.4	2.6	2.7

对于以上三种能源结合的复合能源系统, 其系统能效等级应根据不同能源系统的供能量变化动态调整, 计算公式如式(8)和式(9)所示。

$$EER_{s,n} = \frac{EER_{c,n}Q_c + EER_{g,n}Q_g + EER_{a,n}Q_a}{Q_c + Q_g + Q_a} \quad (8)$$

式中: $EER_{s,n}$ 为复合能源系统的第 n 级制冷能效限值; $EER_{c,n}$ 为冷水机组系统的第 n 级制冷能效限值; Q_c 为冷水机组系统累计制冷量, kWh; $EER_{g,n}$ 为地源热泵系统的第 n 级制冷能效限值; Q_g 为地源热泵系统累计制冷量, kWh; $EER_{a,n}$ 为空气源热

泵系统的第 n 级制冷能效限值; Q_a 为空气源热泵系统累计制冷量, kWh。

$$COP_{s,n} = \frac{COP_{g,n}Q_g + COP_{a,n}Q_a}{Q_g + Q_a} \tag{9}$$

式中: $COP_{s,n}$ 为复合能源系统的第 n 级供热能效限值; $COP_{g,n}$ 为地源热泵系统的第 n 级供热能效限值; Q_g 为地源热泵系统累计供热量, kWh; $COP_{a,n}$ 为空气源热泵系统的第 n 级供热能效限值; Q_a 为空气源热泵系统累计供热量, kWh。

2 费效评价指标

2.1 综合费效计算

对于市政热力/燃气锅炉系统, 由于无法和制冷(热泵)系统一样采用能效指标进行评价, 能源站冬季供暖运行工况业内尚无统一评判标准作为理论支撑, 因此提出综合费效 CER (Cost Effectiveness Ratio) 的评价指标, 其定义为:

$$CER = \frac{C}{Q} = \frac{C_e + C_h + C_g}{Q} \tag{10}$$

式中: CER 为能源系统的综合费效, 元/kWh; C 为能源系统的供能费用, 元; Q 为能源系统的供能量, kWh; C_e 为能源系统运行电费, 元; C_h 为能源系统运行热费(市政热力系统), 元; C_g 为能源系统运行气费(燃气锅炉系统), 元。

2.2 运行费用模拟

基于能源系统综合能耗模拟计算结果, 进一步对不同能源系统的综合运行费效进行计算, 并且增加市政热力与燃气锅炉系统的费效计算。

仍以 1.2.2 节中北京某办公建筑为例, 分析地源热泵系统的运行费效, 计算采用的电价如表 7 所示。系统的全年运行费用如图 5 所示, 其中制冷总运行费用为 101389.09 元, 制冷综合费效为 0.21 元

/kWh, 供热总运行费用为 210871.27 元, 供热综合费效为 0.22 元/kWh。

表 7 分时电价表

Table 7 Time-of-use electricity prices

时段	电价 (元/kWh)	时段	电价 (元/kWh)
00:00-01:00	0.590894	12:00-13:00	1.220046
01:00-02:00	0.590894	13:00-14:00	1.149313
02:00-03:00	0.590894	14:00-15:00	1.149313
03:00-04:00	0.590894	15:00-16:00	0.855626
04:00-05:00	0.590894	16:00-17:00	1.220046
05:00-06:00	0.590894	17:00-18:00	0.855626
06:00-07:00	0.590894	18:00-19:00	1.149313
07:00-08:00	0.855626	19:00-20:00	1.149313
08:00-09:00	0.855626	20:00-21:00	1.149313
09:00-10:00	0.855626	21:00-22:00	0.855626
10:00-11:00	1.149313	22:00-23:00	0.855626
11:00-12:00	1.220046	23:00-24:00	0.590894

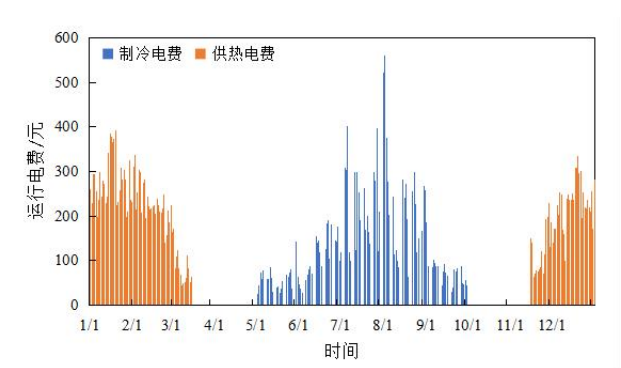


图 5 地源热泵系统全年运行费用

Fig.5 Annual operating costs of the GSHP system

寒冷地区冷水机组系统、地源热泵系统、空气源热泵系统、市政热力/燃气锅炉系统的综合费效汇总如表 8 所示。

表 8 寒冷地区不同冷热源系统综合费效

Table 8 Cost effectiveness ratio of different cold and heat source systems in cold region

建筑类型			办公	酒店	商场	医院	学校
冷水机组系统	CER_c	<1758kW	0.19	0.21	0.19	0.20	0.18
		≥1758kW	0.18	0.20	0.18	0.18	0.17
地源热泵系统	$CER_{g,c}$	<1758kW	0.21	0.23	0.21	0.20	0.20
		≥1758kW	0.20	0.22	0.20	0.20	0.19
	$CER_{g,h}$	<1758kW	0.22	0.21	0.23	0.17	0.22
		≥1758kW	0.20	0.19	0.22	0.17	0.21

续表 8 寒冷地区不同冷热源系统综合费效

Table 8 Cost effectiveness ratio of different cold and heat source systems in cold region

建筑类型		办公	酒店	商场	医院	学校
空气源热泵系统	$CER_{a,c}$	0.28	0.29	0.29	0.27	0.27
	$CER_{a,h}$	0.35	0.33	0.37	0.31	0.35
市政热力/燃气锅炉系统	CER_h	0.37	0.37	0.38	0.37	0.38
	CER_b	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33

夏热冬冷地区冷水机组系统、地源热泵系统、综合费效汇总如表 9 所示。
空气源热泵系统、市政热力系统和燃气锅炉系统的

表 9 夏热冬冷地区不同冷热源系统综合费效

Table 9 Cost effectiveness ratio of different cold and heat source systems in hot summer and cold winter region

建筑类型		办公	酒店	商场	医院	学校
冷水机组系统	CER_c	<1758kW	0.17	0.17	0.17	0.17
		≥1758kW	0.16	0.17	0.17	0.17
地源热泵系统	$CER_{g,c}$	<1758kW	0.17	0.17	0.17	0.18
		≥1758kW	0.17	0.17	0.17	0.17
	$CER_{g,h}$	<1758kW	0.19	0.18	0.22	0.17
		≥1758kW	0.18	0.18	0.20	0.16
空气源热泵系统	$CER_{a,c}$	0.24	0.24	0.25	0.25	0.24
	$CER_{a,h}$	0.29	0.27	0.33	0.29	0.29
市政热力/燃气锅炉系统	CER_h	0.42	0.42	0.43	0.42	0.42
	CER_b	0.43	0.43	0.45	0.43	0.43

能源系统的费效受具体项目的电价、热价或气价的影响较大,难以通过制定统一的费效分级标准来衡量能源系统的运行经济性。本节所研究内容,一方面提出费效的计算方法,以确定能源系统的运行耗费水平;另一方面,在多能耦合的能源系统中,可以通过比较不同能源系统的费效,制定一种以降低系统整体运行费用为目标的控制策略,以上对不同能源系统费效的模拟与计算结果,可以作为具体项目的参考。

3 节能率评价指标

节能率通常用于评价改造系统的节能效果,其定义式为:

$$\eta_e = \frac{E_b - E_a}{E_b} \times 100\% \quad (11)$$

式中: η_e 为节能率; E_b 为系统改造前的电耗, kWh; E_a 为系统改造后的电耗, kWh。

节能率评价指标的提出,旨在评价与常规能源站系统相比,采用节能算法的能源站系统的节能性。然而,未采用节能算法的常规能源站的运行能

耗难以通过模拟计算确定。一方面,能耗模拟是在一定假设和简化的前提条件下进行的,其计算结果不能直接作为节能率计算的基准值;另一方面,即使是系统形式与设备选型相同的常规能源站系统,仍然存在项目要求不同导致运行策略的差异。

谭海阳等^[14]在高效机房系统能效分级评价标准中阐述了能效等级的划分原则,其中三级能效即各主要用能设备满足现行节能标准的基本规定,合理选用变频水泵、冷却塔,采用高效制冷机房的控制逻辑,并加入理论模型中未考虑的能效偏差修正,在此条件下,实际可达到的全年运行能效比,视为高效制冷机房的入门等级。节能率用于评价多能耦合能源站系统采用高效节能算法与优化控制策略的节能效果,对于未采用节能算法与控制策略的常规能源站,可按高效机房系统三级能效对应的设计条件与运行状况考虑,即在进行节能率计算时,选择能源系统三级能效限定值作为基准值。

因此对于多能耦合能源系统,其节能率计算可按式(12)(13)计算:

$$\eta_{e,c} = \frac{EER_s - EER_{s,3}}{EER_s} \times 100\% \quad (12)$$

式中： $\eta_{e,c}$ 为制冷工况节能率； EER_s 为系统的制冷实际能效； $EER_{s,3}$ 为系统的制冷三级能效限定值。

$$\eta_{e,h} = \frac{COP_s - COP_{s,3}}{COP_s} \times 100\% \quad (13)$$

式中： $\eta_{e,h}$ 为供热工况节能率； COP_s 为系统的供热实际能效； $COP_{s,3}$ 为系统的供热三级能效限定值。

上述节能率计算方法，首先能够避免复杂的能耗模拟过程，消除计算结果不确定性的影响；其次，采取平均、统一的基准值，计算简便的同时相对科学合理；最后，该计算方法可以较为准确地反映节能算法与控制策略在能源站系统应用中的节能效果。

4 结论

参考高效制冷机房的能效评价方法，研究制定出一套适用于由冷水机组、地源热泵、空气源热泵、市政热力/燃气锅炉等常见冷热源形式组成的多能互补能源站综合能效评价体系，涵盖能效、费效和节能率三大指标。本文主要结论为：

(1) 能源站综合能效为累计供冷（热）量与累计用电量的比值；针对冷水机组、地源热泵和空气源热泵系统，考虑两种气候分区、两种装机容量和五种建筑类型，分别进行系统的高效运行能耗模拟，根据能耗结果与相关文献中的能效分级标准，确定单一能源系统的能效分级；对于耦合能源系统，其能效评价分级标准根据不同能源形式的供能占比进行加权平均计算确定；

(2) 由于市政热力/燃气锅炉系统无法和制冷（热泵）系统一样采用能效指标进行评价，提出综合费效评价指标，定义为累计运行费用与累计供冷（热）量的比值。考虑到能源价格存在波动，无法制定统一的费效分级标准，费效指标的引入一方面能够体现系统的运行耗费水平，另一方面在多能耦合系统中可以作为相关控制策略的目标参数；

(3) 基于能效评价指标中三级能效的准入条件分析，在节能率的计算中采用三级能效限定值作为常规能源站系统运行能效。该节能率计算方法避免了模拟计算带来的误差，可以较为准确地反映节能算法与控制策略的节能效益。

参考文献：

- [1] 江亿,胡珊.中国建筑部门实现碳中和的路径[J].暖通空调,2021,51(5):1-13.
- [2] Hartman T. Variable speed chiller plants-The author respond[J]. Ashrae Journal, 2001,(9):43-51.
- [3] 张昆,宋业辉,钱程.高效制冷机房性能化设计方法研究[J].暖通空调,2021,51(S1):296-301.
- [4] 新加坡建设局.新加坡建设局 Green Mark-即有非住宅建筑(版本 3.0)[S].BCA,2015.
- [5] GB 50189-2015,公共建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [6] DBJ/T 15-129-2017,集中空调制冷机房系统能效监测及评价标准[S].北京:中国城市出版社,2018.
- [7] T/DZJN 78-2022,集中空调制冷机房系统能效等级及限定值第 1 部分:采用电驱动水冷式冷水机组的机房系统[S].北京:中国质检出版社,2022.
- [8] T/CECS 1012-2022,高效制冷机房技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [9] T/CECS 1100-2022,高效空调制冷机房评价标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [10] GB/T 50801-2013,可再生能源建筑应用工程评价标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [11] 刘启明,高朋,魏俊辉,等.典型气候区典型建筑负荷特性研究[J].建筑节能,2019,47(4):47-50,55.
- [12] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告[M].北京:中国建筑工业出版社,2023.
- [13] 黄冬娜,屈国伦,谭海阳,等.基于建筑热工分区的高效制冷机房系统能效比评价分区研究[J].暖通空调,2022,52(12):1-7.
- [14] 谭海阳,屈国伦,何恒钊,等.基于高效制冷机房系统能效分级评价的冷源系统模型构建[J].暖通空调,2021,51(11):33-38.