

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250422002

空气源热泵性能一致性指数的理论框架与运行诊断应用

杨强^{1,2,3} 李浩^{1,2} 徐昭炜^{1,2} 徐策^{1,2} 王智超^{1,2} 战斌飞^{1,2} 勾小溪^{1,2} 李敏霞³

(1 中国建筑科学研究院有限公司 建筑环境与能源研究院 北京 100013; 2 建科环能科技有限公司 北京 100013;
3 天津大学 天津 300072)

摘要 空气源热泵实际运行诊断中,针对单一制热性能系数因工况依赖性难以区分环境效应与机组性能退化的局限性,提出基于热力学第二定律的性能一致性指数的指标。该指标以铭牌标识工况热力学完善度为基准,通过归一化实际工况下的热力学完善度,构建兼具工况鲁棒性与设计对标能力的能效诊断方法。研究表明:性能一致性指数融合了热力学完善度的稳定性与可比性,有效解耦环境参数波动与机组性能退化的耦合影响,其值可独立于运行工况,精准表征机组状态。以性能一致性指数PCI=1为设计基准,量化机组实际性能与设计目标的偏差。基于对4台机组实际运行诊断的验证,性能一致性指数成功识别部分负荷能效衰减与低温性能劣化。性能一致性指数为空气源热泵长效节能监管提供了理论工具,通过设定阈值可精准定位低效机组,支撑“煤改电”设备更新的科学化决策。

关键词 空气源热泵;性能一致性指数;热力学完善度;长效节能;运行诊断

中图分类号: TB61¹;TU831.3

文献标识码: A

Theoretical Framework of Performance Consistency Index and Its Application in Operational Diagnostics for Air-Source Heat Pumps

Yang Qiang^{1,2,3} Li Hao^{1,2} Xu Zhaowei^{1,2} Xu Ce^{1,2} Wang zhichao^{1,2} Zhan Binfei^{1,2}
Gou Xiaoxi^{1,2} Li Minxia³

(1. Institute of Building Environment and Energy, China Academy of Building Research, Beijing, 100013, China; 2. Jianke EET Co. Ltd., Beijing, 100013, China; 3. Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract In the operational diagnosis of air-source heat pumps, the conventional coefficient of performance has limitations in distinguishing environmental effects from equipment performance degradation because of its dependency on the operating conditions. To address this issue, this study proposes a performance consistency index based on the second law of thermodynamics. By normalizing the thermodynamic perfectibility under actual operating conditions against its rated value under nameplate conditions, a diagnostic method is established for energy efficiency based on this index, with operational robustness and design benchmarking capabilities. The study demonstrates that the performance consistency index inherits the stability and comparability of thermodynamic perfectibility, effectively decoupling the effects of environmental parameter fluctuations and equipment performance degradation, independent of the operating conditions, and accurately characterizes the equipment status. Design benchmark based on performance consistency index PCI=1, the deviations between the actual performance and design objectives were quantified. Validation through operational diagnosis of the four units confirmed that the performance consistency index successfully identified the degradations in partial-load energy efficiency and low-temperature performance. The performance consistency index provides a theoretical tool for the long-term energy efficiency conservation of air-source heat pumps, enabling the precise identification of inefficient units through threshold settings and supporting scientific decision-making for equipment renewal in "coal-to-electricity" projects.

Keywords air-source heat pump; performance consistency index; thermodynamic perfectibility; long-term energy efficiency conservation; operational diagnosis

作为“煤改电”政策的核心技术载体,空气源热泵在我国北方地区清洁供暖工程中的规模化应用,已实现大气环境改善^[1]与碳减排^[2]的双重环境效益。随着技术迭代与政策补贴力度加大,其部署版图已

从华北平原^[3]延伸至东北^[4]、新疆^[5]、西藏^[6]等地区,形成覆盖-40~10℃宽温阈值的跨纬度应用格局。然而,极端低温、极端高湿、昼夜大温差、空气低密度等区域气候参数对空气源热泵机组能效产生显著

影响。

针对机组实际运行工况变化情况,我国产品标准采用了多点工况测试评价的方法,GB/T 19577—2024《热泵和冷水机组能效限定值及能效等级》^[7]中,全年性能系数(annual performance factor, APF)以1℃为步长划分温度发生区间,结合典型地域8 760 h气象数据建立室外温度-建筑负荷-多点工况能效的耦合映射关系,本质上是对特定气候区和运行模式下机组平均能效水平的表征。

空气源热泵供暖机组的实际运行能效受多种因素综合影响,包括运行区域的气候参数^[8]、用户设定水温^[9-10]、部分负荷下的控制策略^[11]及运行特性^[12]、末端类型^[13]、现场安装条件^[14]以及机组自身性能退化^[15]等。因此,现行机组能效评价体系并不能完全反映实际运行场景下的能效水平。在实验室基于特定稳态工况的性能测试,虽为铭牌制定及机组选型提供统一基准,却难以反映和预测在实际场景下的真实能效表现,特别是空气源热泵在实际运行中面临宽域工况波动时的表现^[16-17]。

另外“实验室-现场”性能差异,除现场场景区别于实验室场景外,还有机组部件性能退化的影响。以制热性能系数(coefficient of performance, COP)为代表的热力学第一定律效率虽能表征特定工况下的能量转换效率,但其数值高度依赖测试工况,无法区分环境温度波动与机组性能退化耦合的影响。例如,某机组在低温环境下COP下降可能源于性能下降(可接受工况效应),也可能由压缩机磨损或换热器结垢(不可接受性能衰减)导致,而单一COP指标对此缺乏诊断能力。Xu Zhaowei等^[16]构建了可量化计算稳态性能衰减、启动损失、待机损失和除霜损失的空气源热泵供暖系统运行能效分析模型,但该方法对于数据采样周期要求较高。随着人工智能技术的演进,数据驱动模型通过挖掘历史数据中的潜在规律建立能效分析体系^[17-18]。然而,其固有的“黑箱”特性导致物理可解释性不足,限制了模型的透明度和诊断结果的理论支撑力度。

同时,在设备报废更新决策体系中,诊断指标应具备性能退化量化的溯源性。需要通过耦合实验室基准工况性能与实测运行数据,建立机组衰减率识别模型,实现性能退化的定量表征,消除因环境工况影响导致的误判风险。

针对单一COP指标在空气源热泵实际运行诊断中的局限性,本文构建了一种工况鲁棒性强、能够解耦环境因素与机组状态的能效诊断指标——性能一致性指数(performance consistency index, PCI),通过

指标研究与运行诊断应用,阐明该指标的理论合理性及工程实用性。

1 性能一致性指数指标的理论依据

在制冷热泵机组的能效评价中,热力学定律的层级递进催生了多维度的评价指标。

1.1 热力学第一定律效率

热力学第一定律效率,如COP,从能量守恒的视角出发,定义为输出能量与输入能量的比值,见式(1),其核心关注能量转换的“数量平衡”。但该指标忽略了能量品质的差异,例如等量热量在不同温区下的可用能品位存在显著差异。此外,第一定律效率高度依赖测试工况,环境温度的变化会显著影响其数值,导致同一机组在不同工况下的效率值缺乏可比性。

$$COP = \frac{Q_H}{W_{in}} \quad (1)$$

式中:COP为制热性能系数; Q_H 为机组制热量,kW; W_{in} 为输入功率,kW。

1.2 热力学第二定律效率

热力学第二定律效率(焓效率)的提出弥补了第一定律效率对能量品位的忽视。焓效率通过计算焓输出与总焓输入的比值,见式(2)~(4),从能量“可用性”维度评估机组的能效,体现了能量转化的不可逆性及可用能的损失(焓损)。

空气源热泵的输入焓通常为电能,因为电能可完全转化为有用功,因此,输入焓为:

$$E_{input} = W_{in} \quad (2)$$

空气源热泵输出焓为热量,需根据输出热量温度与环境温度的差异计算:

$$E_{output} = Q_H \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \quad (3)$$

空气源热泵机组焓效率计算如下:

$$\eta_{exergy} = COP \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \quad (4)$$

式中: E_{input} 为输入焓,kW; E_{output} 为输出焓,kW; T_0 为环境温度,K; T_H 为进出水平均温度^[19],K; η_{exergy} 为焓效率。

该指标在机组设计阶段具有重要价值,通常是对每个部件的焓效率进行计算,例如通过分析焓损分布优化换热器设计或减少节流损失^[20]。只有对比不同循环时,才计算整机的焓效率。然而,焓损或焓效率的局限性在于其复杂的计算过程,需精确量化压缩、换热、节流等各环节的焓流与焓损^[21],这对实际运行监测的实时性与数据完备性提出较高要求。

因此,焓效率更侧重于设计优化,对运行阶段动态性能衰减的诊断能力较弱。

1.3 热力学完善度

为进一步统一不同工况下的能效评价基准,热力学完善度(thermodynamic perfectibility, TP)被引入,其定义为热力学第一定律效率与理论最大效率(逆卡诺效率)的比值,见式(5)~(6)。逆卡诺循环是理论上的能效最高热泵循环,其COP可按下式计算:

$$COP_{\text{carnot}} = \frac{T_H}{T_H - T_0} \quad (5)$$

空气源热泵机组的热力学完善度可按下式计算:

$$\eta = \frac{COP}{COP_{\text{carnot}}} \quad (6)$$

式中: COP_{carnot} 为逆卡诺循环的制热性能系数; η 为热力学完善度。在计算时,实际机组和逆卡诺循环的制热性能系数应取相同的环境温度和水温。

该指标以热力学第二定律的不可逆性为理论基础,量化实际循环与理想循环的偏离程度。热力学完善度的突破性在于其“理论极限归一化”特性:通过逆卡诺效率这一普适基准,不同环境温度下的能效值得以横向比较^[22]。该指标最大的特点是稳定性,即对于一台机组,当工况变化较小时,热力学完善度变化非常小。此外,热力学完善度也反映了机组偏离理想状态的程度,进而明晰机组性能的提高空间。然而,热力学完善度属于静态理论指标,仅反映某一时刻或特定工况下的性能,一般不涉及机组启动、停机、负荷波动等动态过程损失分析。

虽然空气源热泵机组的焓效率与热力学完善度在数值上相同,但2个指标的物理意义并不相同。焓效率用于评估能量转换过程中的能量品位的“浪费”情况,而热力学完善度用于评估实际性能距离理论

极限的差距,即存在的挖掘潜力,指明优化空间。

1.4 性能一致性指数

基于上述指标的局限性,本文提出性能一致性指数,其定义为机组实际运行工况下的热力学完善度与铭牌标识工况热力学完善度的比值,见式(7)。

空气源热泵性能一致性指数计算如下:

$$PCI = \frac{\eta_{\text{actual}}}{\eta_{\text{normal}}} \quad (7)$$

式中:PCI为性能一致性指数; η_{actual} 为实际运行工况下的热力学完善度; η_{normal} 为铭牌标识工况下的热力学完善度(如名义工况)。 η_{actual} 计算时,可取日平均制热性能系数、日平均供回水温度及日平均环境温度进行计算, η_{normal} 可按照机组铭牌指标进行计算。

通过引入铭牌标识工况的热力学完善度作为基准,PCI将传统热力学完善度从静态理论值拓展至动态运行场景,既保留了热力学完善度的工况鲁棒性,又建立了设计目标与实际性能的直接关联。其工程应用意义在于可以反映出动态性能与稳态性能的一致性偏差,识别实际运行过程中各项损失情况,如启停损失和结除霜损失等。例如,当环境温度变化导致COP下降时,PCI通过归一化处理可分离运行工况与机组自身性能的影响,若PCI仍接近1,则表明COP下降主要由运行工况恶化引起,而非机组性能退化。

PCI的提出,标志着热力学评价从静态分析向动态管理的跨越。相比于第一定律效率的“数量局限”、第二定律效率的“设计导向”以及热力学完善度的“理论静态”,PCI通过设计-运行联动的动态归一化,实现了多维度优势融合,既保留了热力学第二定律的能量品质视角,又克服了传统COP指标的工况依赖性,为制冷热泵系统的长效节能评价提供了兼具理论深度与实践价值的新标尺。上述4种热力学评价指标对比如表1所示。

表1 热力学评价指标对比

Tab.1 Comparison of thermodynamic evaluation indicators

评价指标	理论基础	评价维度	适用场景
制热性能系数	热力学第一定律(能量数量)	能源利用率	简单能效对比、用户侧经济性分析
焓效率	热力学第二定律(能量质量)	可用能利用率	焓损分析、机组设计优化
热力学完善度	热力学第二定律(理论极限)	接近理想循环的程度	理论性能上限评估,机组横向比较分析
性能一致性指数	热力学第二定律(铭牌性能与实际性能偏差)	设计-运行匹配度	长效节能评价、性能诊断与优化

2 性能一致性指数的特点

2.1 基准性

PCI以机组铭牌标识工况下的热力学完善度

(η_{normal})为设计目标基准(PCI=1),建立绝对参考系。通过将实际运行工况下的热力学完善度(η_{actual})与设计目标对比,直接量化机组性能相对于设计状态的偏离程度。基准性的工程价值在于锚定设计目标,

量化性能衰减,为维护更新决策提供绝对依据。

当 $PCI=1$ 时,实际效率与设计目标水平一致;当 $PCI < 1$ 时,实际效率低于设计目标水平,可能是由于设计目标水平标识高、机组老化、控制策略不佳、严重偏离设计工况的性能衰减等导致;当 $PCI > 1$ 时,实际效率优于设计目标水平,可能是由于设计目标水平标识低或采取了进一步优化措施等导致。

2.2 稳定性

热力学完善度已通过逆卡诺循环归一化处理,弱化了对绝对工况的依赖,在此基础上 PCI 进一步以设计基准为锚点,消除系统性偏差。同一机组在工况变化(如环境温度波动、部分负荷运行)时, PCI 变化幅度远小于 COP 变化幅度,即 PCI 受环境温度影响

的敏感性更低。稳定性的工程价值在于当实际运行工况偏离名义工况时, COP 难以判断机组性能是否退化,而 PCI 则可用于判定机组实际运行偏离设计状态的程度,弱化工况波动干扰,聚焦机组自身状态,降低误判风险。

以A型号名义 COP 为2.48的空气源热泵例,在实验室按照GB/T 19577—2024《热泵和冷水机组能效限定值及能效等级》^[7]测试了5个工况的性能,并计算了各工况下的制热性能系数、焓效率、热力学完善度和性能一致性指数,如表2所示。由表2可知,随着工况变化, PCI 变化幅度远小于 COP 变化幅度, PCI 的相对标准差为3.1%, COP 的相对标准差则为33.8%。

表2 A型号空气源热泵机组实验室测试结果

Tab.2 Laboratory test results of model A air-source heat pump

序号	室外干球温度/°C	室外湿球温度/°C	进水温度/°C	出水温度/°C	COP	η_{exergy}	η	PCI
1	-19.84	/	37.45	41.03	2.16	0.41	0.41	1.01
2	-12.01	-13.12	37.04	41.03	2.50	0.41	0.41	1.01
3	-6.99	-7.87	35.74	38.95	3.03	0.43	0.43	1.07
4	2.02	1.05	35.04	37.04	3.81	0.42	0.42	1.04
5	7.02	6.05	33.34	34.98	4.93	0.44	0.44	1.08

注:根据GB/T 25127.2—2020《低环境温度空气源热泵(冷水)机组 第2部分:户用及类似用途的热泵(冷水)机组》^[23],名义工况为环境干/湿球温度-12.00 °C/-13.50 °C,出水温度41.00 °C,进水温度可取37.00 °C。

2.3 可比性

PCI 通过归一化设计基准,使不同机组、不同运行工况下的性能评价具有横向可比性,实现跨机组、跨工况公平评价。

例如,当对两台机组的实际运行效果进行评价时,可以计算实际运行工况下机组的热力学完善度相对于设计状态(名义工况)的偏离,即实际运行的 PCI 。表3所示为B型号两个品牌铭牌性能参数表及名义工况热力学完善度,表4所示为B型号空气源热泵机组实际运行测试结果,由表4可知,B1机组实际运行 η 为0.37, PCI 为0.94,相对于设计状态均偏低,B2机组实际运行 η 为0.43, PCI 为1.02,相对于设计状态偏高,证明B2无论是绝对值的热力学完善度,还是相对值的 PCI ,实证性能均优于B1。若取 $PCI=0.95$ 为评价限值,则B1机组不满足设计要求,B2机

组达到了设计要求。

表3 两个品牌铭牌性能参数表及名义工况热力学完善度

Tab.3 Performance parameters of the nameplates and thermodynamic perfectibility of the nominal working conditions of two brands

机组	名义制热量/W	名义制热输入功率/W	名义COP	名义工况 η
B1	12.00	4.90	2.45	0.40
B2	12.00	4.62	2.60	0.42

3 运行诊断应用

3.1 实验场景

在实际极寒工况下,对4台不同品牌的空气源热泵分别进行了4个典型日的测试,实验系统如图1所

表4 B型号空气源热泵机组实际运行测试结果

Tab.4 Actual operation test results of model B air-source heat pump

机组	室外干球温度/°C	室外相对湿度/%	进水温度/°C	出水温度/°C	COP	η_{exergy}	η	PCI
B1	3.15	27.75	43.09	47.67	2.81	0.37	0.37	0.94
B2	-3.25	38.23	43.45	48.48	2.79	0.43	0.43	1.02

示。4台机组均为全新机组,不同品牌机组在超低温工况、结除霜工况和部分负荷下性能存在一定差异。测试过程中通过调节末端风机盘管转速、接入风机盘管数量、投入水箱辅助电加热的数量和调节机组设定水温,模拟机组不同运行负荷率。实验中主要仪器如表5所示。4台机组的名义工况铭牌性能参数如表6所示。

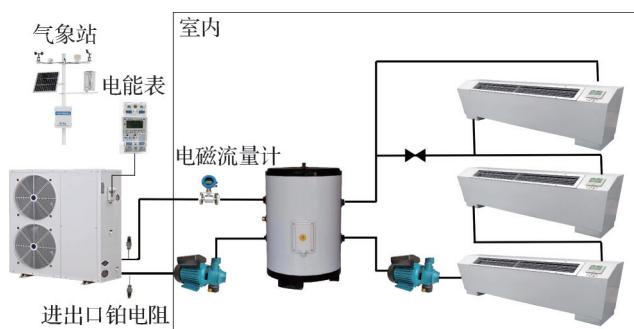


图1 实验系统

Fig.1 Experimental system

表5 实验主要仪器

Tab.5 Instruments for the experiment

项目	测量参数	最大允许误差
铂电阻	空气干球温度、进出口水温	±0.1 °C
数字功率计	电流、电压、功率	±1%
电磁流量计	水流量	±2%

表6 各品牌铭牌性能参数表及名义工况热力学完善度
Tab.6 Performance parameters of nameplates and thermodynamic perfectibility of nominal working conditions of each brand

编号	名义制热量/W	名义制热输入功率/W	名义 COP	名义工况 η
#1	12.60	4.98	2.53	0.41
#2	12.50	5.01	2.50	0.41
#3	16.1	6.3	2.56	0.41
#4	16.0	6.3	2.54	0.41

3.2 运行诊断结果

根据式(7),取日均室外干球温度、日均进水温度、日均出水温度、日运行 COP,计算实际运行的焓效率、热力学完善度和性能一致性指数,4台机组的测试日结果如表7所示。其中,负荷率为机组平均制热量与名义制热量的比值。

对于#1~#4 机组,通过 COP 分析,由于工况的不一致,很难辨识机组的性能是否有偏离或劣化,以及偏离或劣化的程度。用焓效率和热力学完善度仅可发现不同工况点的运行水平的差距,而通过引入 PCI 指标,可以更进一步分析偏离或劣化与否及程度。

对于#1 机组,4个测试日的 PCI 均在 0.9 以上,平均 PCI 为 0.99,说明机组实际运行水平接近铭牌明示水平。#1-1 的 PCI 低于其他 3 个测试日,机组负荷率

表7 4台机组测试日结果

Tab.7 Results of four units on test date

编号	室外干球温度/°C	室外相对湿度/%	进水温度/°C	出水温度/°C	制热量/kW	输入功率/kW	COP	η_{energy}	η	PCI
#1-1	-16.0	64.5	42.6	44.8	7.03	3.40	2.06	0.39	0.39	0.95
#1-2	-25.9	64.6	41.2	44.2	9.58	5.05	1.90	0.41	0.41	1.00
#1-3	-15.8	58.0	35.5	38.9	10.06	4.22	2.38	0.41	0.41	1.00
#1-4	-22.9	53.6	32.9	36.3	10.32	4.65	2.22	0.42	0.42	1.02
#2-1	-20.1	59.3	29.1	32.8	10.21	4.01	2.55	0.43	0.43	1.05
#2-2	-17.1	57.0	39.7	43.7	11.19	4.85	2.31	0.43	0.43	1.05
#2-3	-19.1	55.8	32.6	35.6	7.66	3.84	1.99	0.34	0.34	0.83
#2-4	-17.2	57.9	31.2	34.0	7.12	3.41	2.09	0.34	0.34	0.83
#3-1	-26.3	65.6	39.1	41.9	8.31	5.79	1.44	0.31	0.31	0.76
#3-2	-26.5	65.1	31.4	34.0	7.56	5.01	1.51	0.29	0.29	0.71
#3-3	-14.5	47.8	33.3	36.8	10.10	4.33	2.33	0.37	0.37	0.90
#3-4	-15.6	50.7	38.7	42.3	9.80	4.72	2.08	0.37	0.37	0.90
#4-1	-28.7	67.9	31.4	32.9	3.75	4.81	0.78	0.16	0.16	0.39
#4-2	-27.5	68.5	32.7	34.1	3.65	4.85	0.75	0.15	0.15	0.37
#4-3	-19.9	58.0	34.0	37.0	7.39	5.32	1.39	0.25	0.25	0.61
#4-4	-17.3	55.1	35.6	39.1	8.35	5.80	1.44	0.25	0.25	0.61

最低,相对于名义工况,机组负荷率仅为56%。图2所示为#1机组在典型日实际运行曲线,由图2可知,相比于#1-3,机组出现频繁启停运行,且在待机过程中制热量为零而仍有功率消耗,存在待机损失,这些是导致明显的能效损失的主要因素^[24]。

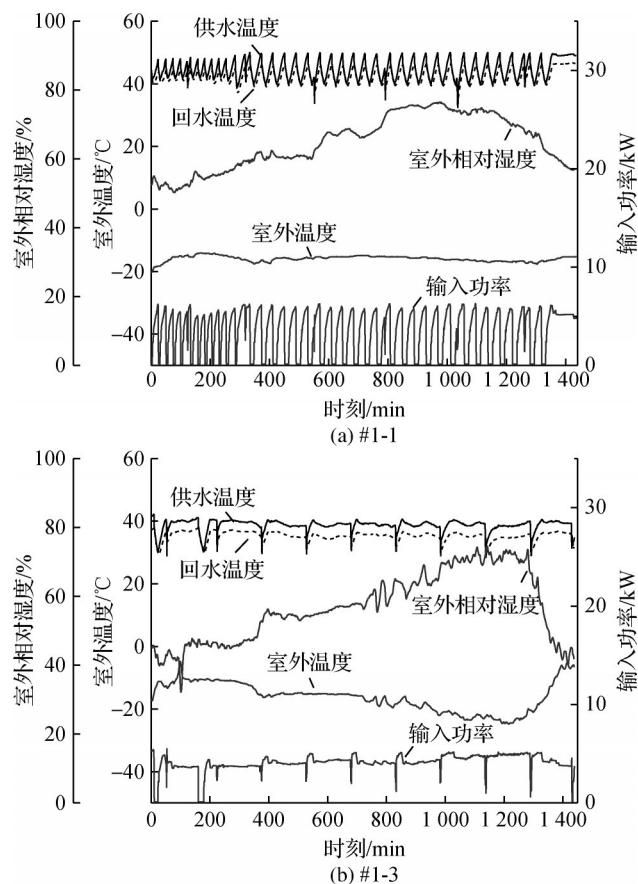


图2 #1机组典型日实际运行曲线图

Fig.2 The actual operation curve of #1 on a typical day

对于#2机组,前2个测试日PCI大于1,说明该机组实际运行水平优于铭牌明示水平,可能原因是机组铭牌明示的名义工况性能数据比较保守,或实际低温性能要优于机组明示的名义工况的性能数据。而#2-3、#2-4的PCI出现明显降低,对比#2-2和#2-4的实际运行曲线(图3)可知,在#2-4出现低温运行,运行水温显著下降,制热量呈现显著衰减,导致能效衰减,表明该机组的低温性能仍需要提升。

#3机组低温下PCI进一步下降。由图4(a)可知,当室外干球温度低于-25℃后,供水温度持续下降,机组制热量衰减明显,在湿度较高时,机组结除霜较少,可能存在有霜不除现象;而#3-3和#3-4的PCI并不高,其主要原因是机组出现较为频繁的结除霜运行,如图4(b)所示。

#4机组在4台机组中PCI最低。图5所示为#4机组在典型日实际运行曲线,由图5可知,测试过程

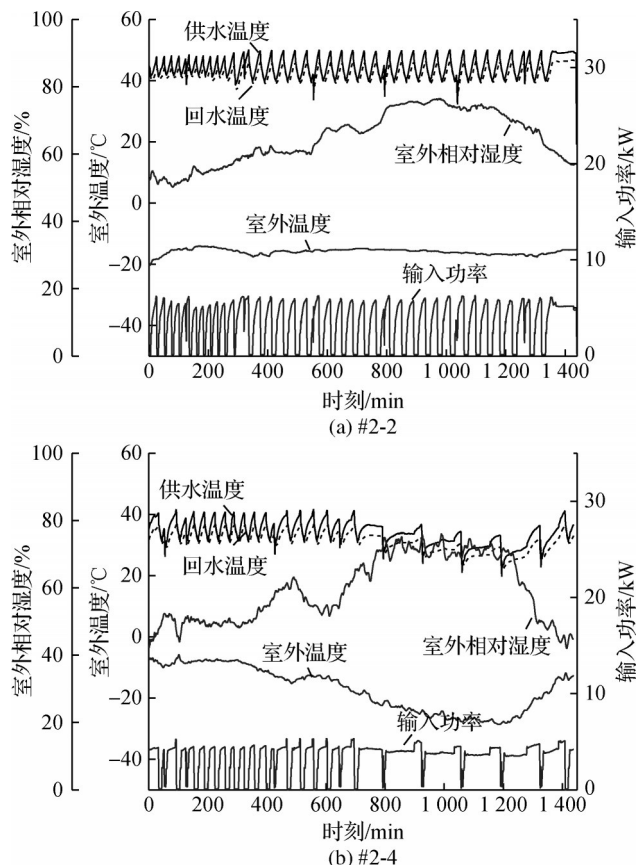


图3 #2机组典型日实际运行曲线图

Fig.3 The actual operation curve of #2 on a typical day

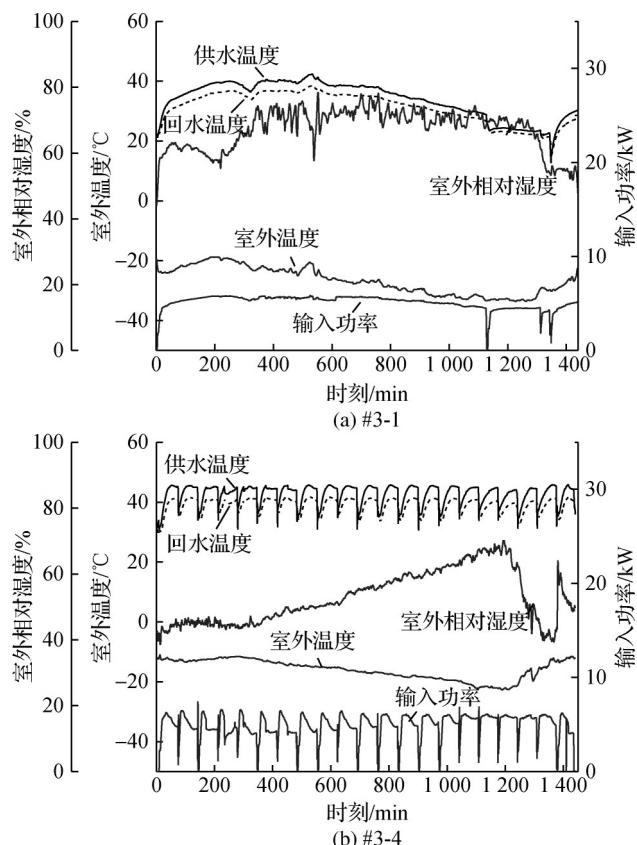


图4 #3机组典型日实际运行曲线图

Fig.4 The actual operation curve of #3 on a typical day

中均出现了结除霜运行。通过对比#3-4和#4-4,在接近的环境工况下,#4-4的PCI更低,说明该机组性能偏离铭牌性能较多;此外,对比#4-1和#4-4,其低温性能的衰减也是导致#4-1的PCI进一步下降的原因。

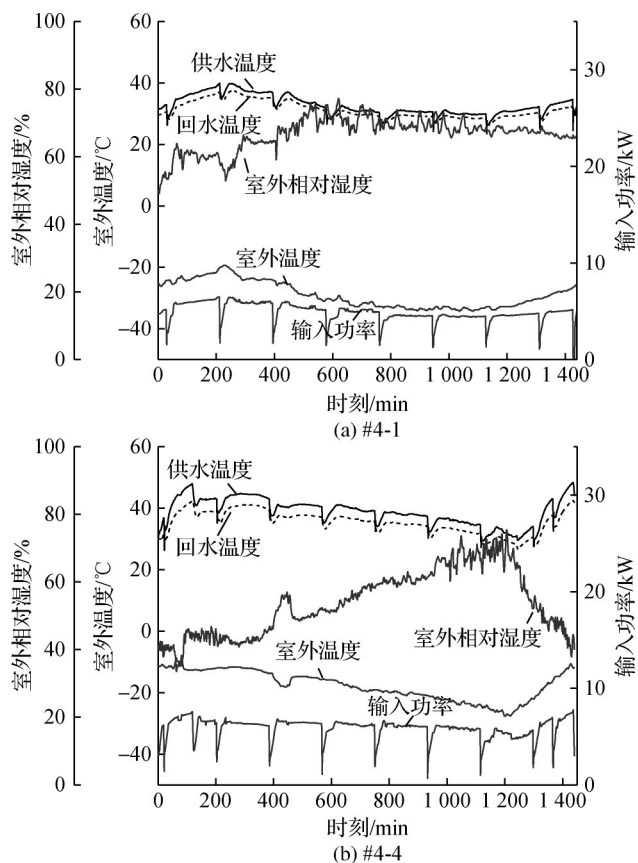


图5 #4机组典型日实际运行曲线图

Fig.5 The actual operation curve of #4 on a typical day

综上所述,可以根据PCI值判断机组实际运行性能。相比于COP指标,PCI受运行工况的影响较小,可以独立表征机组实际运行状态;相比于焓效率 η_{energy} 和热力学完善度 η ,PCI则具备相对于1的基准性,其值越小于1,表明机组实际运行状况相对于机组铭牌明示的名义工况性能偏离更大。

5 结论

面对现有热力学指标对空气源热泵机组实际运行状态评价的局限性,本文提出性能一致性指数指标,通过引入铭牌明示工况的热力学完善度作为基准,对实际运行工况下机组热力学完善度的归一化处理,实现不同机组、不同工况下的横向可比性,即在理论层面保留了热力学第二定律的能量品质视角,又克服了热力学第一定律效率在实际运行中的工况依赖性,完善了对空气源热泵机组实际运行与

设计偏差的量化评价体系,为机组的长效节能优化提供依据。通过案例研究,得到如下结论:

1) PCI指标继承了热力学完善度的稳定性和可比性特点,实现对运行工况影响的解耦,其值受运行工况影响较小,可以独立表征机组实际运行状态。

2) 相比于热力学完善度,PCI又具备相对于1的基准性,其值越小于1,表明机组运行性能更为劣化,实现机组“设计-运行”状态的量化对标,具备对实际能效的诊断能力。

3) 通过对4台不同品牌的空气源热泵实际运行状态的诊断,表明PCI指标可以识别出机组由于部分负荷下启停运行和结除霜导致的能效衰减和低温运行导致的性能劣化,证明了该指标对于空气源热泵机组实际运行诊断的可用性。

PCI指标为空气源热泵长效节能监管提供技术抓手,通过建立PCI阈值,可精准识别低效机组,为能效提升的实施提供精确的判定指标。

本文受西藏自治区科技计划项目(No. XZ202301ZY0017G)资助。(The project was supported by the Xizang Autonomous Region Science and Technology Program (No. XZ202301ZY0017G))

参考文献

- [1] XU Zhaowei, LIU Fang, XU Wei, et al. Atmospheric air quality in Beijing improved by application of air source heat pump (ASHP) systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120582.
- [2] 郭扬, 刘骏亚, 包继虎, 等. 地域与建筑类型对低环温空气源热泵减碳量定量评估的影响分析[J]. *流体机械*, 2024, 52(2): 67-74. (GUO Yang, LIU Junya, BAO Jihu, et al. Analysis of the influence of region and building type on the quantitative evaluation of carbon reduction of low ambient temperature air source heat pump [J]. *Fluid Machinery*, 2024, 52(2): 67-74.)
- [3] 李建凯, 庄绪成, 王海英, 等. 寒冷地区空气源热泵地板供暖系统运行及分析[J]. *建筑科学*, 2023, 39(10): 105-112. (LI Jiankai, ZHUANG Xucheng, WANG Haiying, et al. Operation and performance analysis of floor heating system of air-source heat pump in cold regions [J]. *Building Science*, 2023, 39(10): 105-112.)
- [4] 刘馨, 耿秀, 冯国会, 等. 严寒地区空气源热泵供热系统改造优化研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(11): 124-130. (LIU Xin, GENG Xiu, FENG Guohui, et al. Research on reconstruction and optimization of air source heat pump heating system in severe cold region [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2024, 45(11): 124-130.)

- [5] 孙志利, 任彤, 刘起友, 等. 和田地区空气源热泵地暖辐射采暖系统实验[J]. 制冷学报, 2023, 44(3): 67-73. (SUN Zhili, REN Tong, LIU Qiyu, et al. Experiment on radiant floor heating system of air-source heat pump in Hotan area [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(3): 67-73.)
- [6] 赵娟, 周波涛, 白艺飞, 等. 高原寒冷地区既有建筑节能改造适宜性及经济性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(5): 774-782. (ZHAO Juan, ZHOU Botao, BAI Yifei, et al. Suitability and economic analysis of existing building energy saving reconstruction in cold plateau region [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2023, 55(5): 774-782.)
- [7] 王志坤, 张子祺, 亓新, 等. GB 19577-2024《热泵和冷水机组能效限定值及能效等级》解析[J]. 中国标准化, 2024, 23: 165-169. (WANG Zhikun, ZHANG Ziqi, QI Xin, et al. Analysis of GB 19577-2024, Minimum allowable values of the energy efficiency and energy efficiency grades for heat pumps and water chillers [J]. China Standardization, 2024, 23: 165-169.)
- [8] WU Chunling, LIU Fang, LI Xiaofeng, et al. Low-temperature air source heat pump system for heating in severely cold area: Long-term applicability evaluation [J]. Building and Environment, 2022, 208: 108594.
- [9] 李露露, 尹应德, 刘世杰, 等. 供暖水温对低温空气源热泵制热性能影响的实验研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 377-383. (LI Lulu, YIN Yingde, LIU Shijie, et al. Experimental study on effect of heating water temperature on heating performance of low-temperature air source heat pump [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(4): 377-383.)
- [10] 武尚将, 孙育英, 王伟, 等. 空气源热泵-风机盘管供暖系统变水温自适应控制方法及应用研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(6): 169-177. (WU Shangjiang, SUN Yuying, WANG Wei, et al. Study on adaptive control method of variable water temperature in air-source heat pump and fan coiled unit heating system [J]. Building Science, 2022, 38(6): 169-177.)
- [11] XU Zhaowei, ZHAO Wenyuan, SHAO Shuangquan, et al. Analysis on key influence factors of air source heat pumps with field monitored data in Beijing [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 48: 101642.
- [12] 李子坤, 孙育英, 王伟, 等. 实际空气源热泵供暖系统容量超配问题测试与分析[J]. 建筑科学, 2023, 39(12): 114-119. (LI Zikun, SUN Yuying, WANG Wei, et al. Test and analysis of capacity overallocation of field air source heat pump heating system [J]. Building Science, 2023, 39(12): 114-119.)
- [13] 牛建会, 王海超, 吕天舒, 等. 空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统实验研究[J]. 制冷学报, 2025, 46(1): 46-52. (NIU Jianhui, WANG Haichao, LYU Tianshu, et al. Experimental study on capillary floor radiation heating system with air-source heat pump [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(1): 46-52.)
- [14] 谭庆澎, 刘金平, 陈建勋, 等. 阵列低环温空气源热泵外流场模拟研究[J]. 制冷学报, 2024, 45(2): 81-93. (TAN Qingpeng, LIU Jinping, CHEN Jianxun, et al. External flow field simulation of low ambient temperature air-source heat pump array [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(2): 81-93.)
- [15] 石含, 郑文科, 姜益强, 等. 制冷剂充注量对补气增焓热泵系统的影响[J]. 制冷学报, 2022, 43(6): 114-120. (SHI Han, ZHENG Wenke, JIANG Yiqiang, et al. Effect of refrigerant charge on air-source heat pump system with vapor injection [J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(6): 114-120.)
- [16] XU Zhaowei, LI Hao, SHAO Shuangquan, et al. A semi-theoretical model for energy efficiency assessment of air source heat pump systems [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 228: 113667.
- [17] ZHANG Wenqi, YU Yong, YUAN Zhongyuan, et al. Data-driven pre-training framework for reinforcement learning of air-source heat pump (ASHP) systems based on historical data in office buildings: Field validation [J]. Energy and Buildings, 2025, 332: 115436.
- [18] HU Lulu, MIAO Yike, FANG Ming, et al. Study on process monitoring optimization of air-source heat pump IoT platform based on multivariate time series causal analysis [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 261: 125188.
- [19] 水-水热泵机组热力学完善度的计算方法: GB/T 29033—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. (Calculation method of water-water heat pump units on the basis of thermodynamic perfectibility: GB/T 29033—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.)
- [20] 李光斌, 王传华, 廖永章, 等. 基于减小中间换热器(火用)损的自复叠热泵系统最佳工质循环配比分析及实验研究 [J]. 暖通空调, 2025, 55(2): 94-101. (LI Guangbin, WANG Chuanhua, LIAO Yongzhang, et al. Analysis and experimental study on optimal working fluid mixture ratio of auto-cascade heat pump systems based on reducing intermediate heat exchanger exergy loss [J]. Journal of HV&AC, 2025, 55(2): 94-101.)
- [21] 祖丰. 低温空气源热泵系统中间压力及(火用)分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012. (ZU Feng. Intermediate pressure and exergy analysis of low temperature air source heat pump system [D]. Dalian: Dalian University of

Technology, 2012.)

- [22] 马一太, 田华, 刘春涛, 等. 制冷与热泵产品的能效标准研究和循环热力学完善度的分析[J]. 制冷学报, 2012, 33(6): 1-6. (MA Yitai, TIAN Hua, LIU Chuntao, et al. Analysis on energy efficiency of water chiller and water source heat pump systems with thermodynamic perfectibility[J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(6): 1-6.)
- [23] 包继虎, 杨弋, 马金平, 等. 低环境温度空气源热泵(冷水)机组性能测试方法解析[J]. 流体机械, 2022, 50(5): 85-90. (BAO Jihu, YANG Yi, MA Jinping, et al. Analysis on performance test methods of the low ambient temperature air source heat pump(water chilling) packages [J]. Fluid Machinery, 2022, 50(5): 85-90.)
- [24] XU Zhaowei, LI Hao, XU Wei, et al. Investigation on the efficiency degradation characterization of low ambient

temperature air source heat pump under partial load operation [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 133: 99-110.

通信作者简介

徐昭炜,男,博士,正高级工程师,中国建筑科学研究院有限公司建筑环境与能源研究院,010-64517193-803, E-mail: xuzw@emcso.com。研究方向:建筑节能、可再生能源利用、暖通空调设备性能评价技术研究。

About the corresponding author

Xu Zhaowei, male, Ph. D., professorate senior engineer, Institute of Building Environment and Energy, China Academy of Building Research Co., LTD., 010-64517193-803, E-mail: xuzw@emcso.com. Research fields: Building Energy Conservation, Renewable Energy Utilization, and Performance Evaluation Technology of HVAC Equipment.