

文章编号: 0253-4339(2012)06-0001-06

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.06.001

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

马一太 田 华 刘春涛 袁秋霞 刘忠彦

(天津大学 中低温热能高效利用教育部重点实验室 热能研究所 天津 300072)

摘 要 为了建立评价冷水机组和水源热泵的 EER或COP等能效指标的公共平台,提出了热力学完善度的分析方法,并计算了我国的房间空调器、冷水机组和水源热泵等制冷装置的热力学完善度的数据范围。大多水冷产品的热力学完善度在0.3至0.5之间,高效产品可以达到0.6,但风冷产品热力学完善度在0.2左右,空气源热泵热水机等介于两者之间。热力学完善度可用于同类产品或相似产品在不同工况下的性能比较。分析可见热力学完善度表征着当前产品设计制造的综合水平,是制定相关产品能效标准的限定值、节能值及能效等级的依据。

关键词 热工学; 热力学完善度; EER; COP; 冷水机组; 水源热泵

中图分类号: TB61⁺2; TU831.6; TQ051.5

文献标识码: A

Analysis on Energy Efficiency of Water Chiller and Water Source Heat Pump Systems with Thermodynamic Perfectibility

Ma Yitai Tian Hua Liu Chuntao Yuan Qiuxia Liu Zhongyan

(Key Laboratory of Medium-Low Temperature Energy Efficient Utilization of Ministry of Education, Thermal Energy Research Institute, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract To set up a platform for evaluating energy efficiency of water chiller and water source heat pump systems with EER or COP, the method of the second thermodynamic perfectibility was introduced. The range of thermodynamic perfectibility of room conditioners, water chillers and water-source heat pumps were calculated. The results show that the thermodynamic perfectibility of most water chillers is in the range of 0.3 to 0.5, the efficient products can reach 0.6, but the thermodynamic perfectibility of air to air products is about 0.2, and the thermodynamic perfectibility of air source heat pump water heaters is between water chillers and air to air products. The thermodynamic perfectibility is a useful index for the performance comparison of same or similar production in difference working conditions. The thermodynamic perfectibility analysis indicated that it characterizes the design and manufacturing level of products at present, and can be important foundation for the decision of minimum allowable performance, energy conservation performance and energy efficiency grade of energy efficiency standards for related products.

Keywords Pyrology; Thermodynamic perfectibility; EER; COP; Water chiller; Water-source heat pump

随着人民生活水平的提高和经济的快速发展,用于采暖和空调系统等的能源消耗也在逐年增加,约占社会总能耗的30%左右。因此为了减少能源消耗,世界各国都将节能减排列为头等大事,许多国家都对用能产品颁布和实施了能效标准和标识制度。如美国的“能源之星”制度,日本的“领跑者”制度,鼓励行业选用节能产品;欧盟在家用电器产品施行能效标准的标识制度。

上世纪90年代以来,通过与美国、德国、日本等国家相关机构组织和专家的交流互访,了解到国外能效标准的制订与实施活动正在深入进行,取得节约能源、提高产品质量的效果,为中国能效标

准的研究提供了许多可供借鉴的经验。而且,随着国内生产企业的升级换代,中国制冷空调产品的研制、生产水平也有了很大提高,为进一步提高能源利用效率、促进节能创造了技术条件。中国能效标准的研究工作进入了一个稳步发展的阶段,能效标准涉及的产品范围已由家用电器逐步扩展到家用电器、工商用制冷、热泵设备^[1-2]。

我国于2003年首先对电冰箱实施了能效等级标准(GB12021.2—2003)^[3]。该标准不仅规定了冰箱在标准状况下耗电量限定值,并且规定了冰箱的能效等级为1~5级,其中1级是最高效的产品,约占5%;2级代表节能型产品的门槛,即节能评

基金项目:国家自然科学基金(51076111、50976057)及国家科技部支撑课题(2006BAK04A22-3)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51076111, No.50976057) and the Important National Science&Technology Specific Projects(No.2006BAK04A22-3).)

收稿日期: 2011年12月4日

(2011中国制冷学会学术年会推荐论文)

价值, 节能产品认证技术需要达到的要求, 约占20%; 3、4级代表我国的平均水平; 5级产品是未来淘汰的产品。该标准于2008年进行了修订, 并且能效等级提高了2级。

目前已对电冰箱、房间空调器、单元式空气

调节机和冷水机组, 还包括多联式空调(热泵)机组以及变频空调在内的制冷空调设备设立了能效等级标准, 如表1所示。对水源热泵、制冷陈列柜和展示柜等的能效等级标准也在制定中。这些产品可按照循环方式分为四大类(见表2)。

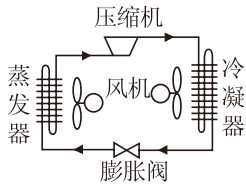
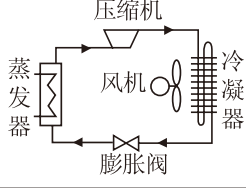
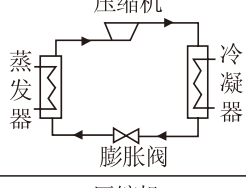
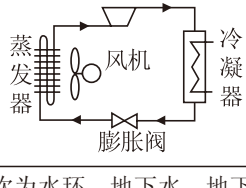
表1 我国制冷空调产品能效标准颁布实施的情况

Tab.1 The implementation of China's refrigeration and air conditioning product energy efficiency standards

标准号	标准名称	颁布日期	修改日期
GB 12021.2—2008	家用电冰箱耗电量限定值及能源效率等级	2003.9.1	2009.5.1
GB 12021.3—2010	房间空气调节器能源效率限定值及能源效率等级	2004.9.1	2010.6.1
GB19576—2004	单元式空气调节机能效限定值及能源效率等级	2005.3.1	
GB19577—2004	冷水机组能效限定值及能源效率等级	2005.3.1	
GB21454—2008	多联式空调(热泵)机组能效限定值及能源效率等级	2008.9.1	
GB21455—2008	转速可控型房间空气调节器能源效率限定值及能效等级	2008.9.1	

表2 制冷与热泵产品的四种循环方式

Tab. 2 Four cycles of refrigeration and heat pump products

类型	简图	产品名称	名义工况/℃		测试参数
			使用侧	环境侧	
空气—空气式		家用电冰箱	-18	25	日耗电
		商用陈列柜		25	日耗电
		房间空调器、单元式空调机、多联机制冷	27	35	EER, SEER
		房间空调器、单元式空调机、多联机制热	20	7	COP
水—空气式		风冷冷水机组	12/7	35	EER
		冷饮机			
		冷热水机			
水—水式		冷水机组	12/7	30/35	EER
		水源热泵制热	40/45	20/15、15/8、0/-5*	COP
		水源热泵制冷	12/7	30/35、18/29、25/30*	EER
		水冷热泵热水机	15/55	15/10	
空气—水式		水冷单元式空调机	27	30/35	EER
		冷风型水源热泵	27	30/35、18/29、25/30*	EER
		风冷热泵热水机	15/55	20	

注*: 依次为水环、地下水、地下环路式

我国能效标准的实施不但取得了可喜的成就, 其成功经验也表明有效实施能效标准能促进制冷空调相关技术的提升, 为节能、减排以及经济的可持续发展发挥了积极的作用^[6-7]。

但是原有能效标准的数据大多来自于国外的

经验和现有产品的数据分析, 还缺少理论支撑; 另外随着节能减排意识的深入, 需要制定能效标准的产品也越来越多, 虽然同为制冷空调设备, 但是由于不同产品的测试工况不同, 其评价指标也不尽相同, 这也给能效标准的制定带来困难, 各种产品和

评价指标之间是否存在某些必然的联系成为急需研究的课题。其次就是随着相关技术的不断提高,产品的能效标准也会不断提高,其用能效率也会趋于极限,那么如何判断产品的节能度并将其作为制定相关产品能效标准的限定值、节能值和能效等级的依据也是值得关注的问题。

这里提出的性能指标,即热力学完善度或完善度(Thermodynamic Perfectibility),可以将不同工况下制冷空调设备统一在一个基准上进行比较分析,而且热力学完善度反映的是设备偏离理想状态的程度,此参数可以帮助分析设备提高性能的空间和努力方向,进而提高我国制冷空调设备水平,提高我国制冷空调设备的竞争力。

1 热力学完善度的提出^[4]

图1是从实际的蒸气压缩制冷循环,到理论的蒸气压缩制冷循环再到理想的劳伦兹循环的分析图。

图中四边形a'b'c'd'(点划线)是由高低温热源的温度所确定的,例如水冷式冷水机组名义工况:冷却水温度 $T_{h,in}/T_{h,out}$ 为30/35℃,冷冻水温度 $T_{l,in}/T_{l,out}$ 为12/7℃。它形成一个变温的理想循环,可认为是劳伦兹循环^[3]。

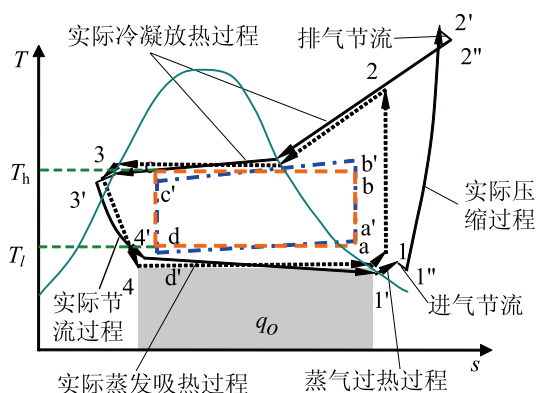


图1 蒸气压缩制冷循环分析

Fig.1 The vapor compression refrigeration cycle analysis

矩形abcd(短划线)是上述劳伦兹循环的等价逆卡诺循环,为简化计算,该等价逆卡诺循环高低温热源温度取劳伦兹循环两热源进出口温度的平均值,即 T_h 和 T_l ,其循环效率按照等价逆卡诺循环计算所得。

多边形1234(方点线)是理论的蒸气压缩循环,此时压缩机的效率为100%,节流过程按照等熵过程进行,蒸发过程和冷凝过程均在等压条件下进行。其蒸发温度和冷凝温度与冷热源的温度有关。理论循环是进行热力循环计算的依据。

多边形1'2'3'4'(实线)是实际蒸气压缩循环。此循环考虑了压缩机的实际等熵效率,蒸发过程和冷凝过程的压降损失以及膨胀阀的吸热情况,其循环效率按照实验室所规定的测试方法从实际测试中获得。

2 热力学完善度的计算方法

在热力学上所有的可逆循环都称为卡诺循环,如果它们的高低温热源温度相等,它们的循环效率也相等。虽然一开始研究是从劳伦兹循环入手,但最终都等效为卡诺循环。

2.1 逆卡诺循环高低温热源温度

逆卡诺循环高低温热源温度按照公式(1)和公式(2)计算:

$$T_l = (T_{l,in} + T_{l,out})/2 \quad (1)$$

$$T_h = (T_{h,in} + T_{h,out})/2 \quad (2)$$

2.2 制冷工况热力学完善度

逆卡诺循环制冷工况能效比 EER_c 按照公式(3)计算

$$EER_c = \frac{T_l}{T_h - T_l} \quad (3)$$

实际蒸气压缩循环制冷工况下能效比 EER_r 按照规定的测试方法实际测试所得。

制冷工况热力学完善度按照公式(4)计算

$$\eta_{re} = \frac{EER_r}{EER_c} \quad (4)$$

2.3 制热工况热力学完善度

逆卡诺循环制热工况性能系数 COP_c 按照公式(5)计算

$$COP_c = \frac{T_h}{T_h - T_l} \quad (5)$$

实际蒸气压缩循环制热工况下性能系数 COP_r 按照规定的测试方法实际测试所得。

制热工况热力学完善度按照公式(6)计算

$$\eta_{hp} = \frac{COP_r}{COP_c} \quad (6)$$

3 实际制冷热泵装置完善度分析

3.1 房间空调器热力学完善度分析

一般规定制冷量小于14000W的空气-空气式制冷与热泵循环装置为房间空调器。房间空调的能效是在恒温室或焓差室中测量的,热源可视为无限大,室内侧27℃(湿球19℃),室外侧35℃。这

样形成的循环的 $EER_c=37.5$ 。实际的房间空调 EER 为2.5~5，与这个理想数据相差甚远，原因是多方面的。空气与空调器的热交换也不是等温的，在一定流量下进出口温度不等。这样室内侧可能是27至(12~17)℃，室外侧可能是35至(43~45)℃，这样一来，理想 EER_c 的平均值为15.7。由于热力学完善度具有相对性，可以约定一个理想循环的条件，下面的分析取 $EER_c=15.7$ ，可以得出各级空调器的热力学完善度，房间空调器2004年版的标准计算的循环完善度在0.146~0.217之间。

房间空调器能效标准于2004年颁布之后，相当一段时间市场上销售的主要是4级和5级能效的产品。2009年国家推出节能产品惠民工程，对生产1级和2级产品给予补贴，推动了空调产品的升级，产品迅速向高效转化。因此，2010年6月1日开始实施的新房间空调器能效等级标准，也将能效限定级提高了3个等级，并且用3级能效等级代替了原来

的5级，见表3^[5]。新版的房间空调器的热力学完善度范围从0.185到0.229，平均水平提高了20%以上。

表3 新版房间空调器能效等级 EER /热力学完善度
(GB12021.3—2010)

Tab.3 The room air conditioner energy rating EER / thermodynamic perfectibility η (GB12021.3—2010)

类型	额定制冷量 CC/kW	能效等级 (EER)		
		1	2	3
整体式		3.30/0.210	3.10/0.197	2.90/0.185
	$CC \leq 4.5$	3.60/0.229	3.40/0.217	3.20/0.204
分体式	$4.5 < CC \leq 7.1$	3.50/0.223	3.30/0.210	3.10/0.197
	$7.1 < CC \leq 14$	3.40/0.217	3.20/0.204	3.00/0.191

注：计算热力学完善度 η 的理想循环效率 $EER_c=15.7$

3.2 冷水机组的热力学完善度

如果不考虑冷却塔和室内系统，按冷水机组的外部热源条件，即冷冻水和冷却水的进出口温度进行测量制冷系数。2004年我国相关部门制定了冷

表4 冷水机组能源效率等级/循环完善度 η 等级 (GB19577—2004)

Tab.4 Water chiller energy rating EER / thermodynamic perfectibility η (GB19577—2004)

	额定制冷量 CC/kW	能效等级 $EER/(W/W)$				
		1	2	3	4	5
水冷式	≤ 528	5.00/0.407	4.70/0.382	4.40/0.358	4.10/0.334	3.80/0.309
	528~1163	5.50/0.448	5.10/0.415	4.70/0.382	4.30/0.35	4.00/0.326
	> 1163	6.10/0.5	5.60/0.456	5.10/0.415	4.60/0.375	4.20/0.342

注：水冷式 $EER_c=12.28$

水机组的能效标准^[6]，根据不同的容量段和5级能效的划分，标准中给出了一个表格。根据这两侧的温度，可以用上述原则计算理想卡诺循环的制冷系数 $EER_c=12.28$ 。这样在这个表格中还可按文中给出相应的热力学完善度，见表4。

注意在水冷式的冷水机组中，标准中规定的制冷系数折算的热力学完善度为0.309~0.5，这反映了我国当前冷水机组的技术水平。可以理解为实际循环的用能效率相当于理想循环的1/3到1/2。

3.3 水源热泵机组的热力学完善度

对于水源热泵，尽管和冷水机组的测试工况有所不同，但由于它们在设备结构、机组容量上基本相同，所以二者应该具有相近的技术水平。水源热泵的产品标准见文献[6]。

对目前我国部分水源热泵生产厂家的产品进行了统计，图2为产品样本的热力学完善度的分布范围，从图中可以看出，水源热泵的热力学完善度也主要集中在0.3~0.5之间，有部分高端产品的热

力学完善度可以达到0.6。这与冷水机组的热力学完善度分布情况一样。

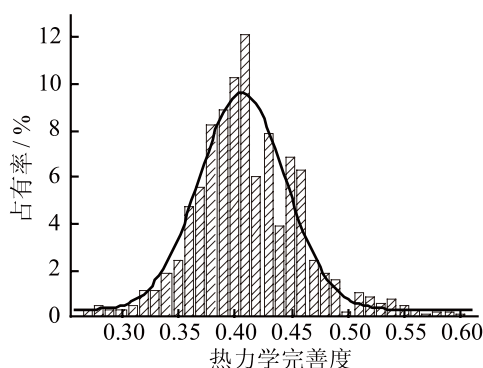


图2 水源热泵产品热力学完善度分布范围

Fig.2 Water source heat pump products distribution

若考虑水源热泵与冷水机组具有相同的热力学完善度，则可得到水源热泵的能效等级，见表5。

3.4 空气源热泵热水机的热力学完善度

图3 是统计的空气源热泵热水机产品的性能系

表5 与冷水机组相同热力学完善度下的水源热泵能效等级

Tab.5 Water source heat pump energy efficiency rating with the same thermodynamic perfectibility of water chiller

制冷量/kW	能效等级 (COP/热力学完善度)				
	1	2	3	4	5
≤528	4.07/0.407	3.82/0.382	3.58/0.358	3.34/0.334	3.10/0.309
528~1163	4.49/0.448	4.16/0.415	3.82/0.382	3.50/0.350	3.27/0.326
>1163	5.01/0.500	4.57/0.456	4.16/0.415	3.76/0.375	3.42/0.342

注：以地下水式水源热泵机组为例，其标准工况为冷冻水进出口水温15/7℃，冷却水进出口水温40/45℃^[10]，逆卡诺循环效率为10.02。

表6 某公司水源热泵(最高出水温度60℃)变工况分析COP_e/COP_r/η_{re}

Tab.6 A water source heat pump (maximum water temperature is 60℃) variable condition analysis

热水进/出 温度/℃	热源水进/出温度/℃				
	10/5	13/5	15/7	17/9	19/11
40/45	9.01/4.08/0.45	9.42/4.08/0.43	10.02/4.24/0.42	10.69/4.38/0.41	11.47/4.52/0.40
45/50	8.01/3.70/0.46	8.32/3.70/0.44	8.78/3.84/0.44	9.29/3.98/0.43	9.86/4.11/0.42
50/55	7.23/3.34/0.46	7.48/3.35/0.45	7.84/3.48/0.44	8.24/3.61/0.44	8.68/3.73/0.43
55/60	6.61/3.02/0.46	6.81/3.02/0.44	7.11/3.15/0.44	7.43/3.26/0.44	7.78/3.38/0.43

数。根据上述公式及热泵热水机的名义工况条件，计算得出空气源普通型热泵热水机的COP_e(W/W)为14.51。其中考虑了空气源热泵热水机的蒸发器风扇和循环式水泵的功耗的影响。

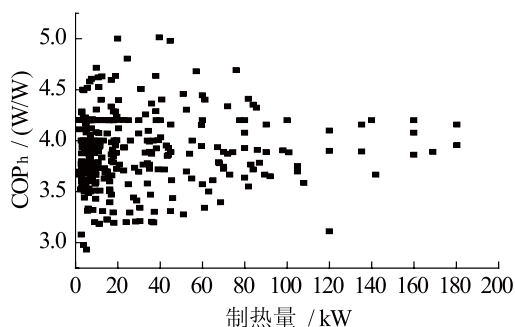


图3 空气源热泵热水机COP_h与制热量关系

Fig.3 The relation of COP_h and heat production about air source heat pump water heater

用热力学完善度分析方法，考虑我国目前技术条件，可得出空气源热泵热水机的合理的热力学完善度为0.25~0.33，COP为3.6~4.8之间。

4 热力学完善度的特性和意义

4.1 可大大减少能效标准制定的工作量

热力学第二定律水平的高低，反映出当前制冷或热泵设备总体设计制造的综合能力，特别是原理相似、容量相近的制冷热泵产品，例如属于表2中的四类之一的，应该具有相近的热力学完善度。例如房间空调器与单元式空调机之间、冷水机组与水源热泵之间、变频式空调器与多联机之间的完善

度应该相近或持平。目前水源热泵有三种热源，依次为水环、地下水、地下环路式，每种都有不同的工作温度。如果考虑机组的容量，这样会有一大批数据和表格，给制定标准和推行标准带来不便。在制定很多种制冷热泵产品能效标准时，先制定第二定律的标准，可减少很多重复的工作量。

4.2 可以发现当前技术的薄弱环节

用完善度的比较可发现，比如统计发现，大中型水源热泵供热的完善度一般比制冷的完善度高，两者的比值约为1.4。这是由于螺杆压缩机也好，离心压缩机也好，都是定压缩比设计的。水源热泵的供热工况压缩比大，必须满足；而制冷工况的压缩比小，如果采用变压比设计，目前技术尚不成熟或成本过高，只能采用在小压比时用过压缩的方式，肯定会牺牲用能效率。但是技术是会不断进步的，通过螺杆机变内容积比、离心机变频调速等技术，可以解决“双高效”的难题，这就为今后技术改进找出了方向。

4.3 可在偏离工况时估算装置的能效等级

对于一台具体的产品，当工况变化不大时，例如热源水的温度变化小于10℃，热力学完善度变化非常小，具有稳定性。分析某公司产品的变工况运行表，热泵机组两器的进出口温度在一定范围内变化，热源水从10℃到19℃，可提供热水从45℃到60℃，COP变化范围从3.02到4.52为1.5倍，但循环完善度变化较小，基本在0.4~0.46之间，仅变化

1.15倍,见表3。这是热力学完善度的差别,而其它的不可逆因素变化不大。

在变工况测量或实际应用中,冷水机组可能不按名义工况运行,例如某1000 kW的冷水机组,蒸发器侧用较大温差送冷,冷冻水进出口温度为14/6℃;冷凝器侧进出口温度为33/29℃,实测的 EER_r 为5.60,如果对这台冷水机组的能效水平进行分析,只要用热源温度计算 $EER_c=13.38$,用公式(4)可算出其热力学完善度为0.419,从表1可得出这台冷水机组相当于2级能效水平。

4.4 可发现类似产品在不同标准中的不一致

通过数据比较可发现同容量定频的房间空调器的效率较高,转速可控型房间空气调节器的效率偏低,这就为今后修改标准提供了依据。

4.5 可以比较不同制冷热泵设备的能效等级

例如冷水机组和水源热泵之间可以建立能效等级的比较。甚至在定频空调和变频空调之间、房间空调器和热泵热水机之间建立比较关系。也可在 EER 与 $SEER$ 之间、 EER 与 $IPLV$ 之间建立比较关系,相关研究正在进行之中。

5 结论

我国制冷空调产品能效标准的制定和实施对促进制冷空调相关技术的提升,节能和减排以及经济的可持续发展发挥了积极和重要的作用。但仅用 EER 或 COP 值评价产品能效水平时缺乏公共平台,因此这里介绍了热力学完善度的建立方法,并分析了我国的冷水机组、水源热泵、房间空调器、热泵热水机等制冷热泵装置的热力学完善度的数据范围。大多水冷产品的热力学完善度在0.3至0.5之间,高效产品可以达到0.6,风冷产品在0.2左右,空气源热泵热水机在两者之间,为0.25~0.33。可见热力学完善度表征着当前产品设计制造的综合水平,是评价产品能效水平的“公平秤”,是制定相关产品能效标准的限定值、节能值及能效等级的依据。

参考文献

- [1] 梁秀英,赵跃进,李爱仙,等.我国主要工业设备能效标准的节能潜力分析[J].中国标准化,2003(8):8-9.(Liang Xiuying, Zhao Yuejin, Li Aixian, et al. The potential analysis of main industrial device energy efficiency standards in China[J]. China Standardization, 2003(8): 8-9.)
- [2] 李爱仙,成建宏.国内外能效标准的发展及我国能效标准新模式探讨[J].中国标准化,2002(7):11-13.(Li Aixian, Cheng Jianhong. The development of energy efficiency standards at home and abroad and the research of new energy efficiency standards mode in China[J]. China Standardization, 2002(7): 11-13.)
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB12021.2—2008,家用电冰箱耗电量限定值及能源效率等级[S].北京:中国标准出版社,2004.
- [4] Tian Hua, Ma Yitai, Li Minxia, et al. The status and development trend of the water chiller energy efficiency standard in China[J]. Energy Policy, 2010, 38(11): 7497-7503.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB12021.3—2009,房间空气调节器能源效率限定值及能效等级[S].北京:中国标准出版社,2004.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB19577—2004,冷水机组能效限定值及能源效率等级[S].北京:中国标准出版社,2004.

作者简介

马一太,男(1945—),教授,热能研究所所长,天津大学机械工程学院,(022)87401539, E-mail: ytma@tju.edu.cn。研究方向: CO_2 跨临界循环的机理和实验研究,主要用能产品能效标准的研究,混合工质及自然工质,能源、环境及可持续发展。

About the author

Ma Yitai (1945—), male, Professor, head of Thermal Energy Research Institute, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, (022) 87401539, E-mail: ytma@tju.edu.cn. Research fields: mechanism and experimental research for CO_2 transcritical cycle, research for energy efficiency standard of main energy use productions.