

文章编号: 0253-4339(2013)01-0018-06

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2013.01.018

房间空调器的热力学完善度分析

李晓凤 马一太 闫秋辉

(天津大学机械工程学院 中低温热能高效利用教育部重点实验室 天津 300072)

摘要 通过对定速与转速可控房间空调器能效标准的分析,发现两类房间空调器的能效划分标准、划分等级以及制冷运行室外温度发生时间均有不同的规定。因此对国内市场上的定速房间空调器制冷量和制冷循环的能效比(EER)、转速可控房间空调器制冷量和制冷季节能效比(SEER)、以及定速房间空调器与转速可控房间空调器的能效等级现状等方面进行了调研统计。利用热力学完善度对两类房间空调器能效等级进行计算,发现2008版转速可控房间空气调节器的能效等级的热力学完善度偏低,根据热力学完善度相一致的原则,提出转速可控房间空调器新的能效标准等级的建议。

关键词 房间空气调节器;能效标准;热力学完善度;SEER;EER

中图分类号 TU833.1; TM925.12

文献标识码: A

Analysis on Thermodynamic Perfectibility of Room Air Conditioners

Li Xiaofeng Ma Yitai Yan Qiuhui

(Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, MOE, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract According to analysis on the energy efficiency standards of the constant speed room air conditioner and the variable speed type, differences between the two kinds of air conditioners exist in division standard, grades of energy efficiency and outdoor temperature starting refrigeration. Therefore, a survey was made about cooling capacity and EER as well as energy efficiency grades of the constant and variable speed room air conditioners. The thermodynamic perfectibility of the two types of room air conditioners was calculated for the performance evaluation. The calculation results show that energy efficiency standard of variable speed room air conditioners in 2008 is lower than that of constant room air conditioners. A new energy efficiency standard of the variable speed air conditioner is suggested in accordance with the consistent thermodynamic perfectibility.

Keywords room air conditioners; energy efficiency standard; thermodynamic perfectibility; SEER; EER

21世纪将面临人口、资源与环境三大问题。而能源成为了资源的首要问题。随着我国经济的迅猛发展和人们生活水平的提高,对建筑使用要求也越来越高,用于制冷、空调、热泵系统、家用电器及采暖的能耗在逐年增加,直接导致了建筑能耗的急剧升高。在国内大中型城市中,夏季用电的高峰时段,空调用电负荷占总负荷的比例已达40%左右,成为电力消费的重要领域^[1]。为了提高能源利用率,减少能源的消耗,许多国家都颁布并实施了用能设备的能效标准^[2-3]。我国于2003年首先对电冰箱实施了能效等级标准(GB12021.2—2003)^[4]。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。

针对房间空气调节器(下称房间空调器)等制冷空调产品,我国也制定了国家能效标准。这些标

准的制定和实施,使我国制冷空调产品的用能效率平均每5年提高20%以上,极大推动了我国制冷空调产品用能效率的提高,为我国的建筑节能与减少温室气体的排放做出了突出的贡献。

但是现在也存在一定问题,我国定速与转速可控房间空调器的能效标准并未使用同一参数作为能效划分指标,两类标准采用制冷循环的能效比(EER)与制冷季节能效比(SEER)分别作为定速与转速可控房间空气调节器的能效等级的划分指标,对两类空调性能比较造成一定的困扰,所以在此提出引入热力学完善度来进行房间空调的能效等级划分。经过对一些发达国家与国内转速可控房间空调器能效标准数值进行热力学完善度分析,得出不同额定制冷量的平均热力学完善度日本比中国高24.4%,美国高32.3%,欧盟高26.4%,韩国高

基金项目:国家自然科学基金(50976075)、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.50976075) and the Key Technologies R&D Program of China (No.2006BAK04A22-3).)

收稿日期:2011年12月31日

25.8%^[5]。针对此种情况提出新转速可控房间空调器能效标准的建议。

1 房间空调器能效标准与产品现状分析

1.1 房间空调器能效标准

我国从1989年开始先后制定了房间空调器的能效标准以及房间空调器的使用性能标准,随着产品的不断发展和技术进步,均进行过修订。近年来随着变频技术的发展,转速可控型房间空调器问世,于2008年颁布了GB21455—2008《转速可控型房间空气调节器能效限定值及能源效率等级》,该标准对转速可控房间空调器的能效进行了限定。

GB/T 7725—2004《房间空气调节器》给出了房间空气调节器的定义:一种向密闭空间、房间或区域直接提供经过处理的空气的设备^[6]。GB12021.3—2010《房间空气调节器能效限定值及能效等级》适用于制冷量小于14kW的定速房间空调器的能效限定及能效等级的划分^[7],而GB21455—2008《转速可控型房间空气调节器能效限定值及能源效率等级》适用于制冷量小于14kW的转速可控的房间空调器的能效限定值及能效等级的划分^[8]。

GB12021.3—2010和GB21445—2008分别对定速和转速可控的房间空调器的能效限定及能效等级的划分,见图1、图2所示。

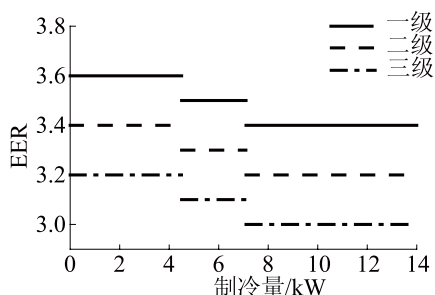


图1 定速房间空调器能效等级划分

Fig.1 Energy efficiency grades division of constant speed air conditioners

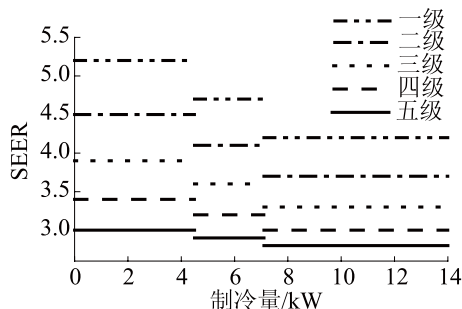


图2 转速可控房间空调器能效等级划分

Fig.2 Energy efficiency grades of variable division speed air conditioners

GB12021.3—2010和GB21445—2008还对定速和转速可控的房间空调器的制冷季节各室外温度制冷运行时间做了不同的规定,见图3。其中,标准GB12021.3—2010的制定过程参照的是GB/T7725—2004。

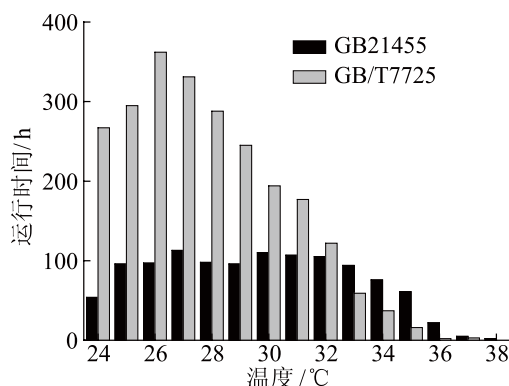


图3 制冷运行室外温度发生时间

Fig.3 Refrigeration operation time in outdoor temperature

1.2 房间空调器产品能效现状

我国的空调行业在不断地发展壮大。数据显示,2011冷冻年度家用空调行业实现终端销售规模4919万台,同比增长34.4%,是继2010冷冻年度后又一个行业增长“大年”^[9]。我国的房间空调器产品种类也越来越丰富,从原来仅有定速单冷的房间空调器发展为现有定速、转速可控的单冷或热泵等多种机型。

对国内市场上的定速制冷量和制冷循环的能效比(EER)、转速可控房间空调器制冷量和制冷季节能效比(SEER)以及定速房间空调器与转速可控房间空调器的能效等级现状等方面的调研统计发现,房间空调器无论定速还是转速可控型均是制冷量较小的能效相对较高,这与能效标准中规定的制冷量小的能效较高一致,见图4、图5。

定速房间空调器与转速可控房间空调器的各个等级在所调研产品总量中所占比例,见图6、图7。按当时的统计值,定速房间空调器大部分为2、3级产品,1级产品仅占总数的12.44%。这是由于房间空调器能效标准于2004年颁布之后,市场相当一段时间主要是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,于2010年6月1日开始实施的房间空调器的新能效等级标准,也将能效限定级提高了3个等级,并且应用能效比将能效等级分为3级,新标准的3级产品为原标准的2级产品。所以3级产品仍为大部分。而转速可控房间空调器分布较均匀,

1、2、4等级相差不大, 3级产品占的份额较大, 而5级产品仅占调研总量的1.88%。这是因为转速可控房间空调器为新型产品, 自2008年制定能效标准以来, 各级产品均衡发展, 中端产品所占份额稍大也是情理之中。

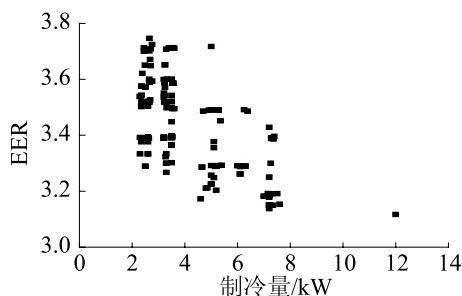


图4 定速空调器的统计值

Fig.4 Statistic of constant speed air conditioners

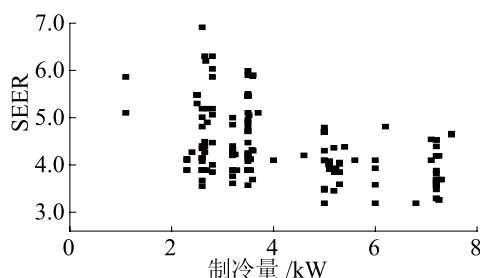


图5 转速可控空调器的统计值

Fig.5 Statistic of variable speed room air conditioners

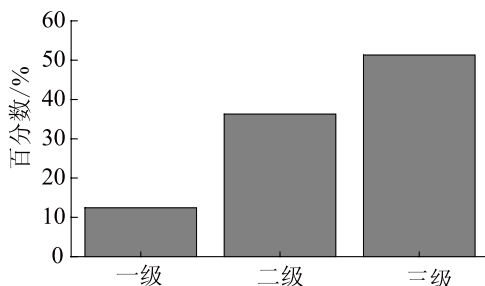


图6 定速空调器的等级分布

Fig.6 Grade distribution of constant speed air conditioner

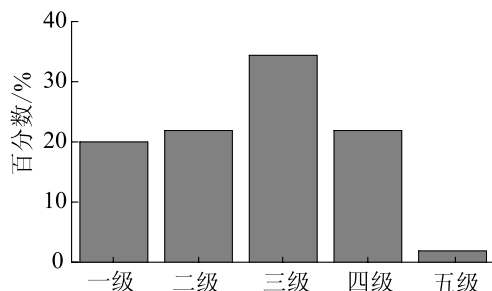


图7 转速可控空调器的等级分布

Fig.7 Grade distribution of variable speed air conditioner

由上述可知, 虽然同为房间空调器, 但定速、转速可控两类房间空调器的能效限定指标、能效等级分类以及制冷运行时间均不同, GB12021.3

—2010中对定速房间空调器的能效限定及能效等级的划分标准为EER(制冷循环的能效比), GB21455—2008对转速可控房间空调器的能效限定及能效等级的划分标准为SEER(制冷季节能效比); 定速房间空调器的能效划分为3个等级, 而转速可控房间空调器为5个等级; 定速房间空调器的制冷季节总小时数为2399h, 而转速可控型房间空调器的制冷季节总小时数为1136h。

此种状况下, 很难对同属房间空调的两类空调之间的能效性能进行对比评价。因此, 统一两种房间空调器的能效指标参数将具有非常重要的意义。

2 热力学完善度及其在房间空调器中的应用

2.1 热力学完善度原理及计算

在制冷循环中, 逆卡诺循环的效率最高。热力学完善度是热力学第二定律效率, 它反映的是设备偏离理想状态——逆卡诺循环的程度, 所以只有逆卡诺循环的热力学完善度等于1, 其他均小于1, 而且对于实际制冷设备, 由于存在由传热温差、节流损失、压缩过程及通过管道时的摩擦和外界的换热等引起的不可逆损失, 使得其热力学完善度更小。热力学完善度可以将不同制冷空调设备、不同的高低温热源等都统一在一个基准上进行分析。

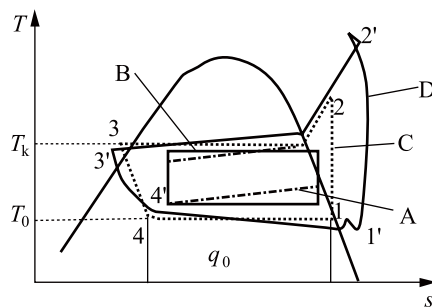


图8 蒸气压缩制冷循环温熵图

Fig.8 The T - s diagram of vapor compression refrigeration cycle

图8给出了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: 循环A是用高低温热源的溫度所确定, 它形成一个变溫的理想循环, 即认为是劳伦兹循环。循环B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溫度取劳伦兹循环两热源进出口溫度的平均值, 即 T_h 和 T_l , 其循环效率按照等价逆卡诺循环计算所得。

循环C是理论的蒸气压缩循环。循环D是实际蒸气压缩循环。

在热力学中所有的可逆循环都可等效为卡诺循环, 虽然从劳伦兹循环入手, 但如果其高低温热源的热力学平均温度相等, 它们的循环效率也相等, 而且变温劳伦兹循环热源的热力学平均温度可用进出口温度的算术平均温度来计算。

所以逆卡诺循环高低温热源温度按照公式(1)和公式(2)计算:

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

$$T_{hm} = (T_{h-in} + T_{h-out})/2 \quad (2)$$

逆卡诺循环制冷工况能效比 EER_c 按照公式(3)计算

$$EER_c = \frac{T_{lm}}{T_{hm} - T_{lm}} \quad (3)$$

热力学完善度则可以表示为:

$$\eta_1 = \frac{EER_r}{EER_c} \quad (4)$$

式中: EER_r 为实际制冷循环的能效比(测试所得); EER_c 为等效逆卡诺循环能效比。

2.2 SEER的热力学完善度

由于GB21455—2008中对于转速可控房间空调

器的能效限定值及能效等级的划分是依据制冷季节能效比SEER进行划分的, 对于转速可控的房间空调器的SEER的定义如下^[8]:

$$SEER = \frac{\sum_{j=1}^n q(t_j)}{\sum_{j=1}^n E(t_j)} \quad (5)$$

式中: $q(t_j)$ 为室外温度为 t_j 时总的制冷量; $E(t_j)$ 为室外温度为 t_j 时总的耗功量。

所以对于转速可控房间空调器的热力学完善度(也为SEER对应的热力学完善度)表示如下:

$$\eta_2 = \frac{EER_r}{EER_c} \quad (6)$$

式中: $SEER_r$ 为实际制冷季节能效比; $SEER_c$ 为等效逆卡诺制冷季节能效比。

转速可控房间空调器的理想 $SEER_c$ 由制冷季节需要制冷的各室外环境温度下理想循环EER的加权平均确定^[5], 见式(7)

$$SEER_c = \sum_j^{15} BH(j) EER_{c_j} \quad (7)$$

式中: $BH(j)$ 为各制冷温度下时间比例, 共15个温度段(见表1); EER_{c_j} 为各制冷温度下的等效逆卡诺循环能效比。

表1 制冷季节需要制冷运行时室外环境各温度发生时间

Tab. 1 The operation time of different outdoor temperatures in the cooling period

温度/℃	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	合计
时间/h	54	96	97	113	98	96	110	107	105	94	76	61	22	5	2	1136
BH(j)/%	4.8	8.5	8.5	9.9	8.6	8.5	9.7	9.4	9.2	8.3	6.7	5.4	1.9	0.4	0.2	1

η_1 与 η_2 均以逆卡诺循环为依据, 都表示实际制冷设备偏离逆卡诺循环的程度。在计算理论能效比和制冷季节能效比时, 如果我们采用统一的参数标准, 便可将定速和转速可控房间空调器的能源效率进行统一, 这样对两类房间空调器能效等级的比较提供了一定的依据。

2.3 热力完善度应用于定速房间空调器

房间空调器的能效是在恒温室或焓差室中测量的, 热源如果视为无限大, 室内侧27℃(湿球温度19℃), 室外侧35℃。这样形成的循环 $EER_c=37.5$ 。实际的房间空调器EER为2.9~3.6, 与这个理想数据相差甚远, 原因是多方面的, 将室外和室内视为无限大热源并不合理。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。其室内侧空气进口温度为27℃, 室外侧空气进口温度为35℃。一般空气冷却器进出口温差为8~10℃, 取出口温度为44℃, 高温侧平均温度39.5℃, 室内侧空气进口温度27℃, 送风温差一般为10~15℃, 取低温侧平均值20.75℃。这样即构造出空调系统的理想劳伦兹循环, 低温热源出口温度14.5℃, 高温热源出口温度44℃。由公式(3)计算得 EER_c 为15.7。即可得出各房间空调器的热力学完善度。

基于热力学完善度, 对GB12021.3—2004标准中列出定速房间空调器能效等级进行对应核算, 结果见表2, 其对应的热力学完善度在0.146~0.217之间。

表2 GB12021.3—2004定速房间空调器EER/ η_1
Tab. 2 EER/ η_1 of room air conditioners in GB12021.3—2004

类型	额定制冷量 CC/W	EER/ η				
		5	4	3	2	1
整体式		2.30 /0.146	2.50 /0.159	2.70 /0.172	2.90 /0.185	3.10 /0.197
	CC≤4500	2.60 /0.166	2.80 /0.178	3.00 /0.191	3.20 /0.204	3.40 /0.217
分体式	4500<CC	2.50 /0.159	2.70 /0.172	2.90 /0.185	3.10 /0.197	3.30 /0.210
	≤7100	2.50 /0.159	2.70 /0.172	2.90 /0.185	3.10 /0.197	3.30 /0.210
	7100<CC	2.40 /0.153	2.60 /0.166	2.80 /0.178	3.00 /0.191	3.20 /0.204
	≤14000	2.40 /0.153	2.60 /0.166	2.80 /0.178	3.00 /0.191	3.20 /0.204

注：计算热力学完善度 η_1 的理想循环效率EER_c=15.7

已颁布实施的2010年6月1日开始实施的《房间空气调节器能效限定值及能效等级》标准，将能效等级改为3级，并提高了各级的能源效率，表3给出了新能效标准中房间空调器的EER及其对应的热力学完善度。GB12021.3—2010中所列房间空调器能效等级对应的热力学完善度范围在0.185~0.229之间，能效限定值比GB12021.3—2004中所列的能效标准提高了20%左右。

表3 GB12021.3—2010定速房间空调器EER/ η_1
Tab. 3 EER and η_1 of room air conditioners in GB12021.3—2010

类型	额定制冷量 CC/W	EER/ η		
		1	2	3
整体式		3.30/0.210	3.10/0.197	2.90/0.185
	CC≤4500	3.60/0.229	3.40/0.217	3.20/0.204
分体式	4500<CC	3.50/0.223	3.30/0.210	3.10/0.197
	≤7100	3.50/0.223	3.30/0.210	3.10/0.197
	7100<CC	3.40/0.217	3.20/0.204	3.00/0.191
	≤14000	3.40/0.217	3.20/0.204	3.00/0.191

注：计算热力学完善度 η_1 的理想循环效率EER_c=15.7

在GB/T 7725—2004《房间空气调节器》中仅规定额定制热量不能低于其额定制冷量，对于额定制冷量不大于7.1kW的分体式热泵空调器，其热泵额定制热量应不低于其额定制冷量的1.1倍，至于制热性能系数并没有具体的规定。由于这些标准的缺失，暂不对房间空调器的热泵工况热力学完善度进行分析。下面同样对于转速可控的房间空调器也不做热泵工况下的分析。

2.4 热力学完善度应用于转速可控房间空调器

为了便于与定速房间空调器的能效等级进行比较，计算转速可控房间空调器的SEER_c时室内温度与定速房间空调器相一致，取27℃，室外温度取

GB21455—2008中给出的各温度，室内外换热器的进出口温差均与定速房间空调器一致。计算各温度下的等效逆卡诺循环能效比EER_c，并与该温度下运行时间进行加权平均得出理论SEER_c为23.44，便可计算出各级转速可控房间空调器的热力学完善度。GB21455—2008中所列转速可控房间空调器能效等级对应的热力学完善度在0.119~0.222之间，见表4。

由表3、表4可知，转速可控房间空调器的热力学完善度小于定速房间空调器，能效限定值低了35%以上。具体原因可能有多方面，两个标准的起点不同是主要的，可以确定的是，转速可控房间空调器在能效方面还有较大的提升空间。

表4 转速可控房间空调器的SEER/循环热力学完善度 η_2
Tab. 4 Energy efficiency grades SEER and η_2 of variable speed air conditioner

类型	额定制冷量 CC/W	SEER/ η				
		5	4	3	2	1
分体式	CC≤4500	3.00 /0.128	3.40 /0.145	3.90 /0.166	4.50 /0.192	5.20 /0.222
	4500<CC	2.90	3.20	3.60	4.10	4.70
	≤7100	2.90 /0.124	3.20 /0.137	3.60 /0.154	4.10 /0.175	4.70 /0.201
	7100<CC	2.80	3.00	3.30	3.70	4.20
	≤14000	2.80 /0.119	3.00 /0.128	3.30 /0.141	3.70 /0.158	4.20 /0.179

注：计算热力学完善度 η_2 的理想循环效率SEER_c=23.44

3 新能效标准建议

定速与转速可控房间空调器能效标准均适用于采用空气冷凝器、全封闭转速可控电动压缩机并且制冷量在14kW及以下的房间空气调节器^[7-8]，但是两个标准的能效等级划分指标以及等级划分不同。为便于比较两类房间空调器，对定速与转速可控房间空调器进行热力学完善度的计算，便可将定速房间空调器与转速可控房间空调器统一在同一个基准下。

因此，建议转速可控房间空调器的新能效标准中能效等级划分参照GB12021.3—2010进行制定，新标准中能效等级也划分为3级，并且与定速房间空调器能效标准中对应等级的热力学完善度相等，见表5。新能效标准中能效比比GB21455—2008中能效比有了较大地提高，并且制冷量越大，能效提升比率越大。

热力学完善度在房间空调器新能效标准的应用，将进一步加剧设备的更新换代，从而提高我国制冷空调设备技术水平，以及我国制冷空调产品的竞争力。

表5 新转速可控房间空调器建议SEER/热力学完善度 η
Tab. 5 Proposal in new energy efficiency grades SEER and η of variable speed air conditioner

类型	额定制冷量 CC/W	SEER/ η		
		1	2	3
分体式	CC≤4500	5.40/0.229	5.10/0.217	4.80/0.204
	4500<CC ≤7100	5.20/0.223	4.90/0.210	4.60/0.197
	7100<CC ≤14000	5.10/0.217	4.80/0.204	4.50/0.191

注：表5数据仅为理论推荐值，实际应用尚需考虑变频器的损失等方面因素，其能效提高的比率可能要低于理论计算值。

4 结论

目前，定速与转速可控两类房间空调器产品均有现行的能效标准，但两类产品之间的能效优劣却很难比较，究其原因两类产品在能效等级划分时参考指标不同，因而引入热力学完善度概念用于评价两类产品的能效。通过对定速与转速可控两类房间空调器的能效标准进行热力学完善度计算，GB12021.3—2010中定速房间空调器热力学完善度，不同容量、不同能效等级分体机分布在0.191~0.229之间；而GB21455—2008中转速可控房间空调器的热力学完善度在0.119~0.222，可见定速房间空调器的热力学完善度均高于转速房间空调器。

同时，依据热力学完善度概念以及计算值，提出转速可控房间空调器的新能效标准的修改方法建议，即参照定速房间空调器能效标准GB12021.3—2010，将转速可控房间空调器的新能效标准中能效等级也划分为3级，且对应容量、能效等级的热力学完善度相同。不仅便于对两类房间空调器进行比较，从促进提高产品制造水平来说也是合理的。当然有关的研究仅是理论上的建议，具体的标准数据，还需要参考大量的统计数据。

参考文献

[1] 张朝晖.推进产业升级,实现作大作强(专题报告)[EB/

OL]. (2009-12-19). <http://www.cnfrp.net/news/echo.php?id=37798>.

- [2] Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute. AHRI Standard 210/240. Performance Rating of Unitary Air-Conditioning & Air-Source Heat Pump Equipment [S]. USA. 2008.
- [3] ECCJ (Energy Conservation Center of Japan). Developing the World's Best Energy-Efficient Appliances[S]. Japan, 2005.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会. 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.
- [5] 马一太,田华,刘春涛,等.制冷与热泵产品能效标准的研究和循环热力学完善度的分析[M]. 科学出版社, 2012.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会. GB/T 7725—2004房间空气调节器[S].北京:中国标准出版社, 2005.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会. GB12021.3—2010房间空气调节器能效限定值及能效等级[S].北京:中国标准出版社, 2010.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会. GB21455—2008转速可控型房间空气调节器能效限定值及能源效率等级[S].北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] 2011年度中国家用空调市场发展报告[EB/OL]. (2011-08-04). <http://tech.163.com/digi/11/0804/18/7AKOG2KF0016656K.html>.

作者简介

李晓凤, 女(1981—), 博士研究生, 天津大学中低温热能高效利用教育部重点实验室, 13502128624, E-mail: lixiaofeng404@126.com。研究方向: 制冷热泵技术的研究。现研究课题: 国家自然科学基金(50976075)。

About the author

Li Xiaofeng (1981—), female, Doctoral student, Key Laboratory of Medium-Low Temperature Energy Efficient Utilization of Ministry of Education, Tianjin University, 13502128624, E-mail: lixiaofeng404@126.com. Research fields: Research on the technology of refrigeration and heat pump. The author takes on project supported by the Natural Science Foundation of China (No.50976075).