

文章编号: 0253-4339(2012)05-0001-04

doi: 10.3969/j.issn. 0253-4339. 2012. 05. 001

以自然度和完善度为基准的制冷和热泵系统 环境性能评价探讨

马一太 刘忠彦 李敏霞 闫秋辉

(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 从可持续发展观以及制冷系统的自然属性与大自然的角度出发, 结合制冷剂的天然度和热力学完善度, 提出了一种新的制冷和热泵系统环境性能的评价方法——制冷系统自然度。并对制冷系统自然度的评价指标进行了量化计算和分析, 结果表明: 各系统的自然度有很大的提升空间, 采用制冷系统自然度的方法进行评价, 能够为系统的改进提供指导方向。

关键词 热工学; 自然度; 热力学完善度; 制冷; 热泵

中图分类号: TB61⁺2; TU831.6; TQ051.5

文献标识码: A

Environmental Performance Evaluation of Refrigeration and Heat Pump on the Basis of Nature Degree and Thermodynamic Perfectibility

Ma Yitai Liu Zhongyan Li Minxia Yan Qiuhui

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

Abstract Based on sustainable development concept, consideration of natural quality of refrigeration system, a new evaluation methodology has been proposed for the environmental performance of refrigeration and heat pump system with conjunction of the natural quality and the thermodynamic perfectibility. According to the quantitative results of refrigeration nature degree evaluation indexes, there is large room to advance the natural quality of each system. And using the natural quality methodology to evaluate the refrigeration system can show the direction for improving the system.

Keywords Pyrology; Nature degree; Thermodynamic perfectibility; Refrigeration; Heat pump

随着我国经济的迅猛发展和人民生活水平的提高, 制冷、热泵相关产品得到了广泛的应用, 其产量和社会保有量日益增加, 在工业、商业、民用等范围的应用越来越多。制冷、热泵产品的大量使用在改善生产工艺和提升人们生活水平的同时, 也带来了巨大的能源消耗。2007年, 我国的建筑运行能耗占社会总能耗的30%左右, 其中制冷、热泵及空气调节等产品所产生的能耗就占到了建筑运行能耗的30%~50%^[1]。因此, 采取有力措施提高制冷空调与热泵产品的能效水平, 降低其能耗水平将对我国的节能减排工作产生巨大的推动作用。同时, 对其环境性能的评价也尤为重要。

这里从可持续发展观来探讨制冷和热泵系统环境性能评价, 从制冷系统的自然属性与大自然关联作用的角度出发, 以自然度和热力学完善度为基准点, 提出了一种新的制冷和热泵系统环境性能评

价方法——制冷系统自然度。

1 制冷系统自然度的概念

对于自然度的概念, 科学界早有定义, 应用较为广泛的为森林自然度, 是指地段森林生长发育过程状态与森林稳定(顶级)状态的距离, 具体含义包括总蓄积量、蓄积结构(径级分布、垂直分布)、树种组成等与森林顶极状态的近似程度。是以未受人为干预的原始林或稳定的顶极森林为I级, 不同程度偏离这个原始状态依次分为II级、III级和IV级, 已经充分砍伐的森林、天然更新幼林地、皆伐迹地、火烧迹地和宜林地为V级^[2]。

这里借鉴森林自然度的概念, 提出了以制冷系统自然度来评价制冷和热泵系统环境性能。对于制冷系统自然度, 建立能够衡量比较的各种量化指标, 再将指标综合考虑转化为统一标准——自然

基金项目: 国家自然科学基金(51076111、50976057)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51076111, No.50976057).)

收稿日期: 2011年12月4日

度。自然度为1，对自然环境没有产生任何影响；自然度为0，认为在其寿命周期内对自然环境造成无法去除的影响；在其寿命周期内对自然环境造成的影响在一定时间内能够被消除，则其自然度在0与1之间。

评价指标包括：制冷剂、系统效率、系统材料的回收性、对地质影响等。对于系统的效率，用循环的热力学完善度进行评价；对于制冷剂，用制冷剂自然度进行评价；对于系统报废后材料的回收性，用材料回收率进行评价；对于地质影响，用回灌率进行评价。上述指标都用小于或等于1的基数来表示偏离自然的程度。

制冷系统自然度具体的计算公式如下：

$$\kappa = \eta \varepsilon \alpha \beta \quad (1)$$

式中： η —系统的热力学完善度； ε —制冷剂的自然度； α —材料的回收率； β —地下水的回灌率。

2 制冷系统自然度的量化

根据上述计算公式，对制冷系统自然度的各指标进行量化计算。

2.1 制冷剂自然度

由于制冷剂的自然度与制冷系统的自然度相类似，这里选择制冷剂的安全性（即毒性、可燃性），以及环保性（即ODP、GWP）为制冷剂自然度的评价指标，应用层次分析法计算各指标的权重系数，对制冷剂自然度进行定性与定量的评价。具体计算公式如下：

$$RN = \sum_{j=1}^n \lambda_j B_j \quad (2)$$

式中： RN —制冷剂自然度； λ_j —各指标的权重； B_j —各指标自然度评价价值。

对于各指标的权重，应用层次分析法。该方法具有定性和定量相结合地处理各种决策因素的特点，以及系统、灵活、简洁的优点，在社会经济多个领域内得到了广泛的重视和应用。从本质上讲，它是一种主观赋权，但它将人的主观判断用数量方式进行表达和处理，使得对指标之间重要程度的分析根据逻辑性、有效性和可靠性。计算过程为：第一步：构造指标判断矩阵，将各指标两两进行比较；第二步：计算特征根（AHP计算方法）；第三步：各指标权重检验。经过计算，所得到的各指标权重为： $\lambda_{\text{毒}}=0.11$ ， $\lambda_{\text{燃}}=0.11$ ， $\lambda_{\text{ODP}}=0.30$ ， $\lambda_{\text{GWP}}=0.48$ 。

根据相关标准及法规政策，对制冷剂自然度的各指标进行标准化处理，将其转化为[0,1]之间。

对于毒性、可燃性，认为其对人身安全的影响越小，其自然度评价价值越高，再根据制冷剂安全分类标准，进行赋值；对于GWP、ODP，其值越小，对自然环境的影响越小，那么其自然度评价价值越高，再结合相关政策和议定书，进行赋值。

对于毒性，采用标准GB7778—2008^[3]。若为A类制冷剂，认为其毒性自然度为0.9；B类制冷剂，认为其毒性自然度为0.6；C类制冷，认为其毒性自然度为0.3。

对于可燃性，采用标准ISO/CD 817:2007^[4]。若制冷剂为第1组，即不可燃，认为其可燃性自然度为1；为第2L组，即微燃，认为其可燃性自然度为0.7；为第2组，即低可燃，认为其可燃性自然度为0.4；若为第3组，认为其可燃性自然度为0.1。

对于ODP，根据《蒙特利尔议定书》以及相关法规政策，具有臭氧层破坏势的制冷剂现已在淘汰行列，且ODP值不为零的制冷剂对环境有很大的影响及破坏作用。因此，若制冷剂的ODP为0，认为其ODP自然度为1；若制冷剂的ODP不为0，认为其ODP自然度为0。

对于GWP，根据国家标准GB7778—2008的附件C，采取寿命周期直接全球变暖潜值指数LCGWI_d作为制冷剂GWP自然度评价指标，LCGWI_d的计算公式见GB7778—2008。从替代角度来看，R22是当前急需替代且备受关注的制冷剂，计算得到的R22的LCGWI_d值为137.3。因此这里选取R22的LCGWI_d值为分界线，具体指标赋值如下：若LCGWI_d为0，认为其GWP自然度为1；大于137.3，认为其LCGWI_d为0；对介于[0,137.3]的制冷剂，取值相对于R22产生的温室效应严重程度。计算公式为：

$$B_{\text{GWP}} = \frac{\text{LCGWI}_{\text{dR22}} - \text{LCGWI}_{\text{dR}}}{\text{LCGWI}_{\text{dR22}}} \quad (3)$$

根据上述方法，计算结果如表1。表1给出了一些常用制冷剂的ODP、GWP、安全分类及自然度值。

表1 一些常用制冷剂的ODP、GWP、安全分类及自然度值
Tab.1 Natural degree, safety classification, ODP and GWP of regular refrigerants

制冷剂	ODP	GWP	安全分类	自然度
R718	0	0	A1	1
R744	0	1	A1	0.99
R717	0	3	B2	0.92
R290	0	3	A3	0.90
R600a	0	3	A3	0.90
R152a	0	140	A2	0.88

表1(续)

制冷剂	ODP	GWP	安全分类	自然度
R32	0	650	A2	0.85
R123	0.022	470	B1	0.84
R134a	0	1300	A1	0.81
R407c	0	1520	A1	0.78
R410a	0	1720	A1	0.75
R22	0.055	1500	A1	0.62
R411a	0.045	1200	A1	0.61
R507a	0	3300	A1	0.52
R12	1	3800	A1	0.22
R11	1	8100	A1	0.19

注：表中制冷剂的ODP/GWP以及安全分类的数据来源于标准BS EN378—1:2008

2.2 系统效率

制冷、空调和热泵系统一般消耗电能或其它高质能，可以认为系统的效率越高，其自然度也就越高。系统的用能效率用“热力学完善度”来表示。“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的程度，是指设备在某工况下运行的系统效率(COP或EER)与此工况下的逆卡诺循环效率的比值。卡诺循环的热力学完善度为1，经过对大量的冷水机组、水源热泵等样本统计分析，得到房间空调器的热力学完善度为0.2~0.3，单元式空调机的热力学完善度为0.15~0.23，冷水机组和水源热泵机组的热力学完善度为0.2~0.6^[5]，可见实际循环的热力学完善度在0.2~0.6之间。

热力学完善度值在[0,1]之间，不再进行量化，直接带入上述制冷系统自然度计算公式进行计算。

2.3 系统对环境的影响

系统对环境的影响，主要考虑系统所采用的材料。系统若采用了不易回收或不利降解的材料，且这些材料在系统报废后不能很好的回收，遗弃在环境中，会对环境造成很大的影响，从而自然度会下降。而且不同材料的自然度是不同的，例如铜管铝翅片换热器的自然度低于全铜或全铝换热器，铝塑管的自然度低于全塑管。

因此，制冷系统所应用的材料要进行回收。对于制冷系统对环境的自然度，采用材料的可回收率进行计算，其值在[0,1]之间。

2.4 对地质的影响

地源热泵包括地下水热泵、地表水(江、河、湖、海)热泵、土壤源热泵。对于使用地下水和土

壤源的水源热泵，如使用不当，都会对地质以及环境造成不利的影响。如土壤源，冬天提取和夏天排入的热量失衡，对地质性能可能会产生副作用，对于土壤源的热泵若以热量失衡来进行量化，较为困难，在此暂且不考虑土壤源热泵对地质的影响，但计算结果不会影响系统的自然度排序。因此这里主要从地下水回灌的角度来讨论对地质以及环境的影响。

地下水是水资源的重要组成部分，对经济的可持续发展具有不可替代的作用，同时，地下水还是生态环境的重要组成部分。大部分地下水都是在地质变化中形成的“封存水”，并没有自然补充能力。地下的热能是可再生的，但地下水是不可再生的，用一点就少一点。近年来，地下水位持续下降、水质污染和生态退化问题时有显现。这些问题如果得不到及时解决，势必危及到人类社会的生存安全，对未来经济和社会可持续发展构成威胁^[6]。

近年来，水源制冷热泵机组得到了大量的应用，这同时也带来了地下水大量的无序开发，没有得到很好的回灌，超采越来越严重，形成了地下水降落漏斗，造成泉水断流，部分水源地枯竭，也会造成地面沉降。过量开采地下水还会带来水质污染、土壤盐渍化的危害。因此在开采的同时进行好的回灌尤为重要，若地下水无序开发利用至枯竭，会对环境造成不可挽回的损失。

对于水源制冷热泵机组自然度，应对地下环境进行评估。地下水是水源制冷热泵机组对环境影响的一个直接体现，因此采用地下水回灌率进行计算，其值在[0,1]之间。

3 制冷系统自然度计算与分析

按照上述方法，对冷水机组、水源热泵、以及热泵热水机进行了自然度的计算。具体结果见表2。

表2 不同制冷和热泵系统自然度计算结果
Tab.2 Calculation results of natural degree about different refrigeration and heat pump

机组	热力学完善度 η	工质及其自然度 ε	材料可回收率 $\alpha/\%$	地下水回灌率 $\beta/\%$	系统自然度 κ
冷水机组	0.4	R22 0.62	100	100	0.248
		R407c 0.78	100	100	0.312
水源热泵	0.45	R22 0.62	100	80	0.279
		R134a 0.81	100	80	0.365
热泵热水机	0.33	R744 0.99	100	100	0.327

由于现在还没有确切的数据表明制冷、空调和热泵系统材料可回收多少,也没有相关的法规政策规定,对于表中所取的材料回收率都按可100%回收计算,在有确切数值时可进行替代计算,但不影响各制冷系统自然度的排序。

从表2中可以看出,所计算的制冷系统的自然度最高为0.365,如果考虑到热力学完善度,合理的最高值是0.65,自然工质的自然度接近为1,对地下水资源没有影响并可100%回收再利用率的系统自然度为0.65,两者之间还有很大的差距,说明系统的自然度还有很大提升空间。从评价指标来看,要提高系统的能效水平,进而提高系统的热力学完善度;采用环境性能好的工质,即自然度高的工质;在系统报废以后,要尽可能的对系统材料进行回收,并进行再利用;对于采用地下水作为热源的系统,在有序的开采下,要保证有很好的回灌率。可见用制冷系统的自然度来评价对环境的影响,能够指导系统改进的方向。

4 结论

在此提出了制冷系统自然度的概念,结合系统的热力学完善度,来评价制冷与热泵系统的环境性能。选取了系统的能效水平、制冷剂自然度、系统报废后材料回收率以及地下水回灌率作为指标进行评价,并对不同制冷系统进行了自然度的计算,结果表明:各系统的自然度还有很大的提升空间,从各评价指标出发,为系统提高自然度给出了改进的方向;不同的系统自然度值不同,冷水机组和水源热泵的自然度值较高,房间空调器、单元式空调机以及电冰箱的自然度值较低。

参考文献

- [1] 翁丽芬, 张楠, 陈俊萍. 我国建筑能耗现状下的建筑节能标准解析及节能潜力[J]. 制冷与空调, 2011, 25(1): 10-14. (Weng Lifeng, Zhang Nan, Chen Junping. Thinking of Energy Efficiency Design Standards under Current Building Energy Consumption in China[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 25(1): 10-14.)
- [2] 赵中华. 基于林分状态特征的森林自然度评价研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [3] 特灵空调系统(中国)有限公司, 合肥能用机械研究院. GB7778—2008制冷剂编号方法和安全性分类[S]. 北京: 国家质检总局(CN-GB), 2008.
- [4] BS EN378-1:2008 Refrigerating systems and Heat pumps—Safety and environmental requirements[S].
- [5] Tian Hua, Ma Yitai, Li Minxia, et al. The status and future of energy efficiency standard of water chillers in China[J]. Energy Police, 2010, 38(11): 7497-7503.
- [6] 张群力, 王晋. 地源和地下水热泵的研发现状及应用过程中的问题分析[J]. 流体机械, 2003, 31(5): 50-54. (Zhang Qunli, Wang Jin. Research and Development and Practical Problem Analysis of Ground Source Heat Pump and Groundwater Source Heat Pump[J]. FLUID MACHINERY, 2003, 31(5): 50-54.)

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: CO₂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 CO₂, trans-critical cycle, research for energy efficiency standard of main energy use productions.