区域供冷技术的经济适用性分析*

南京丰盛新能源股份有限公司　马宏权☆
南京市建筑设计研究院　贺孟春
同济大学　龙惟定

摘要　分析了区域供冷系统目前应用中的突出问题，讨论了区域供冷在国内典型建筑中的经济性和定价方式，认为区域供冷技术适用于以公建为主的区域，而不适用于单独住宅的区域。

关键词　区域供冷　经济性　适用性

Economical applicability analysis of district cooling technology

By Ma Hongquan★, He Mengchun and Long Weiding

Abstract　Analyses conspicuous problems in the application of district cooling systems. Discusses the economical applicability and the pricing method of the system for typical buildings in China. Considers that the system is suitable for areas constituted mainly by public buildings and not for where by separate residential buildings.

Keywords　district cooling, economy, applicability

★ Nan Jing Fullshare Energy Co., Ltd., Nanjing, China

0　引言

商业化运营区域供冷系统 DCS（district cooling system）的经济性是国内的一个研究热点，虽然不少研究结论是 DCS 在适宜条件下可以实现节能运行，但用户调研结果则显示 DCS 的收费往往高于常规空调系统 CCS（conventional cooling system），这在实际中导致 DCS 这种新出现的商品的服务价格成为供需双方的矛盾焦点。用户侧希望 DCS 的优势体现在可提供经济性和可靠性更好的服务上，定价过高会导致用户对区域供冷技术的抵触，接入后也会由于对用能费用的担心而抑制需求，而需求不足将进一步导致系统损耗增加和成本上升，使系统陷入使用率不断降低和成本不断上升的恶性循环中。投资侧 DCS 要真正实现可持续的商业化运行，必然需要通过商品化的收费回收前期设备、配电和土建等巨额投资，希望在定价上获得理想的回报，以尽快回收资金。因此 DCS 系统的经济性必须考虑这种大规模投资系统的特有经济特性，以及商业化模式带来的优缺点。

通过商业化运营的 DCS 有利有弊，优势是可以通过商业化促进机制化的成本控制与运营费节省，缺点是商业化可能会带来短期的资金回报要求。在 DCS 与 CCS 的对比中，用户往往只关心运行费用而不关心初投资，而建设方更关心初投资而对运行费用缺乏约束底线，如何权衡，尚没有现成和统一的方法可供使用。通常 DCS 的前期运营是亏损的，建设期的收费扣除运行成本甚至不够支付建设费用的融资利息，但随着负荷率提高，成本得到分摊而降低，现金流量逐渐会由负到正并实现积累。对投资者来说，希望投资尽快回收；对用户来说，“商品”以何种价格及方式提供给他们，能够体现公平合理的原则，同时在他们可接受的范围内，是所关心的首要问题。因此 DCS 的定价并不是单方面的事，而应该兼顾用户和能源投资方的利益，

* 国家科技部、上海市政府部市合作 2005 年世博科技专项课题《城市清洁能源高效利用系统技术研究与示范》（编号：05dz05807，2005BA908B07）

①☆ 马宏权，男，1979 年 1 月生，在读博士研究生
210012　南京市雨花区软件大道 26 号丰盛能源技术研发中心
（025）68199205
E-mail：mhqtj@163.com
收稿日期：2010-07-01
修回日期：2011-06-18

因为只有用户最终接受并愿意使用这一系统，这一系统才能正常运行并发挥更大效益。

本文希望提出一种用户方和能源投资方均可以接收的 DCS 定价方式，该方式在首先保证用户不多花费的基础上能够满足用户与能源投资方的利益平衡，同时满足能源投资方的投资回收和适当盈利要求，并每年对各影响因素进行合理的修正。DCS 的定价要能体现商业化供冷的资源配置优势，利用市场的机制来提高效率和配置能源，因此在确定价格的时候还必须确定合理的价格调整机制，在短期收益分配与长期效率激励之间作优化和平衡，由能源投资方与用户共同分享 DCS 带来的比常规系统节省的收益。在实现公平定价的基础上分析区域供冷技术的经济性和适用性，在此基础上制定双方接受的定价体系和操作方式。

1 定价研究的基准确定

本文的分析基于以下基本设定：DCS 单位冷热量价格的上限值为 CCS 的当量价格。当然由于在定价时项目的建设可能尚未开始，因此可以参考当地类似建筑功能的实际能耗情况来确定。

DCS 需要回收的成本主要包括三部分：固定成本、浮动成本和利润税费。其中固定成本是指项目的初投资，在通常情况下还应包括土地使用费、机房与辅助用房建设费等在寿命周期内单位冷热量上的分摊；浮动成本即是单位冷热量分摊的水电费等日常运行费用；利润和税率是根据实际情况来计算合理利润及应交税费。

因此在确定价格计算公式的时候还要同时考虑约定的期限长短，必须在收益与分配效率之间作一个权衡，从而决定是考虑短期还是长期的合约期限。如果价格是在长期内进行控制的，那么能源投资方为了保持长期收益，将有动力去减少成本。但是在最后的一段期限内，价格将明显高于公司成本，从而导致低效与分配问题。而且如果价格控制操之过急，公司的持续发展将受到威胁。如果价格控制的时间比较短，管理者能确保价格与公司成本持平，有利于通过市场机制保证节能效益的公平分配与系统的可持续发展。总而言之，用以提高产品效率的动机将随着期限的缩短而减小。

2 定价公式导出及修正

2.1 CCS 固定成本基准的导出

固定成本是即使不使用空调也需要进行分摊的成本，包括系统的初投资、运行维护等费用。CCS 系统单位面积的年度固定费用可按下式计算：

$$C_{\mathrm{B}}=\frac{C_{\mathrm{m}}+C_{\mathrm{d}}+C_{\mathrm{add}}+P\dfrac{i(1+i)^{T}}{(1+i)^{T}-1}}{\sum A_i} \tag{1}$$

式中 C_{B} 为年固定费用，元/(m^2 · a)；C_{m} 为年维护管理费，元/a；C_{d} 为年设备折旧费，元/a；C_{add} 为其余附加收费，元/a；P 为区域系统初投资，元；i 为年利率；T 为设备使用年限，a；$\sum A_i$ 为区域建筑物总面积，m^2。

CCS 系统单位冷负荷的总固定成本 C_{BK} 计算式为

$$C_{\mathrm{BK}}=\frac{\sum A_i C_{\mathrm{B}}}{Q_{\mathrm{cap},t}} \tag{2}$$

式中 C_{BK} 为系统单位冷负荷所需要的固定成本，元/(kW · a)；$Q_{\mathrm{cap},t}$ 为系统 t 年区域供冷范围内所有用户的总装机容量，kW。

则根据前一年固定成本基准并考虑通货膨胀影响的单位冷量固定成本计算式如下：

$$C_{\mathrm{BK},t}=\left(1+\frac{I_t}{100}\right)\frac{C_{\mathrm{BK},t-1}Q_{\mathrm{cap},t}}{Q_{\mathrm{l},t}} \tag{3}$$

式中 $C_{\mathrm{BK},t}$ 为根据前一年消费价格指数修正后的第 t 年固定成本现值，元/(kW · h)；$I_{i,t}$ 为第 t 与 $t-1$ 年 1 月之间的消费价格指数的百分比增长量；$Q_{\mathrm{l},t}$ 为预计第 t 年区域供冷范围内所有用户的总用冷量，kW · h。

式(3)是将原来按照装机容量分摊的固定成本按照年度累计供能分摊到单位冷热量上去。计算公式采用消费价格指数(CPI)来更新 CCS 中的固定成本，CPI 可采用当地统计部门每个月公布的数据。

2.2 CCS 变动成本的导出

为了确定 CCS 用水、电成本，可以对 CCS 样本楼制取冷水的水电消耗进行测量并作统计平均，结合前一年测量数据与水电价格计算出当年 CCS 用水、电的成本基准，单位为元/(kW · h)，其他成本以此类推，以后每年的成本则设置消费价格指数指标进行修正。

第 t 年 CCS 冷水的电力成本为

$$C_{BE,t}=\left(1+\frac{I_{E,t}}{100}\right)C_{BE,t-1} \tag{4}$$

式中　$C_{BE,t}$和$C_{BE,t-1}$为第t年和$t-1$年CCS的用电成本,元/(kW·h);$I_{E,t}$为第t年与第$t-1$年相比电价的百分比增量。

同理,第t年CCS冷水的用水成本为

$$C_{BW,t}=\left(1+\frac{I_{W,t}}{100}\right)C_{BW,t-1} \tag{5}$$

式中　$C_{BW,t}$和$C_{BW,t-1}$分别为第t年和$t-1$年CCS的用水成本,元/(kW·h);$I_{W,t}$为第t年与第$t-1$年相比商业楼群供水价格的百分比增量。

第t年CCS的其他成本为

$$C_{BO,t}=\left(1+\frac{I_{O,t}}{100}\right)C_{BO,t-1} \tag{6}$$

式中　$C_{BO,t}$和$C_{BO,t-1}$分别为第t年和$t-1$年CCS的其他成本,元/(kW·h);$I_{O,t}$为第t年与第$t-1$年相比除水电外其他费用的消费品价格百分比增量。

2.3　区域供冷节能效益的分享

区域供冷系统如设计合理、运营良好,则可以获得比预期更多的节能收益,其节能效益应该由用户与节能服务公司分享,但是分享的比例要合理确定。将节省成本分给DCS运营商有助于他们投入更多的资金来提高能效,但是DCS运营商也要将效率提高带来的节省效益给用户分享一部分,以确保用户对区域供冷的信心和消费量,这个平衡点需要仔细判断。

设第t年DCS分摊给用户的经济效益值为S_t,单位为元/(kW·h),则年度运营盈余时S_t为正值,年度运营亏损时S_t为零,即亏损时不分摊收益,也不由用户分摊亏损。

$$S_t=\frac{\{[C_{B,t-1}Q_{cap,t-1}+Q_{l,t-1}(C_{BE,t-1}+C_{BW,t-1}+C_{BO,t-1})]-(\sum C_{D,t-1}+\sum C_{E,t-1})-L_{t-2}\}\phi}{Q_{l,t}} \tag{7}$$

式中　$\sum C_{D,t-1}$为$t-1$年DCS总的固定运行成本,包括运营商对区域供冷投资的资金回收,元;$\sum C_{E,t-1}$为$t-1$年DCS总的可变运行成本,元;L_{t-2}为第$t-2$年DCS系统运营的亏损数额;ϕ为DCS用户与运营商之间经济效益收入的分配比率。

图1是根据效率与激励之间假设关系进行的敏感性预测,从中可见区域供冷的节省效益分配存在唯一的平衡点。这是由于给能源服务商分配的节省效益越多,其越愿意投入更多的资金去提高能效和加强运行管理以获得更多的收益,即其盈余收入与分配比例的关系基本是线性的。但是从用户角度来分析,所获得的分配比例过低或过高都不能带来盈余的增长,因为用户的最终节省效益分配是分配比例与分配总量的乘积,分配比例过低自然会降低用户享受到的节省效益,分配比例过高则会降低能源服务商对提高能效的动力,从而降低分配基数。只有在用户与能源服务商分配比例基本相当的情况下,才可以使用户的分配收益达到最大,即用户享受区域供冷服务所需要花费的成本达到最低,如图2所示。

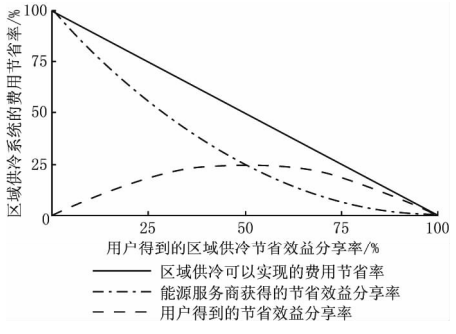

图1　节省效益分享率对区域供冷费用节省的影响

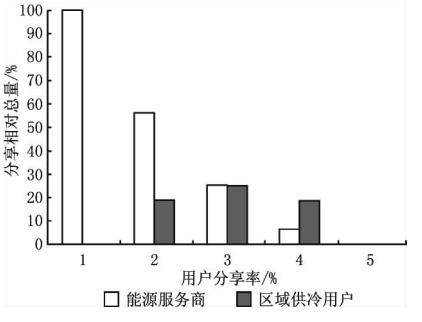

图2　节省效益分享率的情景分析

2.4　DCS定价公式的导出

根据以上的分析,则可为DCS确定最高限价,具体如下:

$$M_t=\left[\left(1+\frac{I_{i,t}}{100}\right)\frac{C_{B,t-1}Q_{cap,t-1}}{Q_{l,t}}+\left(1+\frac{I_{E,t}}{100}\right)C_{BE,t-1}+\left(1+\frac{I_{W,t}}{100}\right)C_{BW,t-1}+\left(1+\frac{C_{BO,t-1}}{100}\right)C_{BO,t-1}\right]-S_t+K_t \tag{8}$$

式中 M_t 为 DCS 第 t 年单位冷量的最高定价，元/(kW·h)；K_t 为第 t 年运营收费不足或超出预期收入的修正值，元/(kW·h)。

按照 CCS 计算其费用来给区域供冷系统定价的方式理论上可以做到每年度的运行费用相同，但所计算的定价在实际收费过程中可能因为各种原因出现偏差，如果在实际操作过程中费用收取不完全，则会造成当年收入少于预期，在商业化过程中，少收费用应当作为亏空记入下一年的成本增加，以保证能源服务企业的正常运营；同理如果总收费高于预期，多收费用应当记入盈余在下一年度返还给消费者，以平衡合理的市场价格并恢复消费者对区域供冷的信心。

在一些政府主导或推动建设的区域供冷系统中，如果政府希望在区域供冷过程中充当积极角色，可以通过调整贷款利率或水电价格扶持区域供冷系统。当修正值为正时，即去年亏空时，政府可以通过下调给区域供冷系统的贷款利率给予扶持；当修正值为负时，则保持正常的当年期银行贷款利率。

3 居住建筑的算例分析

以下按照 1 000 户居民的 10 万 m^2 居住建筑分别采用分体空调、VRF 和区域供冷技术作为实例验证以上公式，一些常用参数的设定值为：$Q_{cap,t}=5\ 400$ kW，$Q_{l,t}=4\ 500\ 000$ kW·h，$CPI=8\%$。表 1 为居住建筑空调系统案例计算结果。

表 1 居住建筑空调系统案例计算结果

	分体空调	VRF	区域供冷
系统季节平均能效	2.8	3.0	3.2
初投资/万元	1 600	2 800	3 600
设备平均使用年限/a	8	12	16
年度维修管理费用/万元	30	40	80
固定成本/(元/(kW·a))	425.9	506.2	564.8
单位冷量固定成本/(元/(kW·h))	0.511	0.607	0.678
单位冷量变动成本/(元/(kW·h))	0.235	0.220	0.206
单位冷量成本/(元/(kW·h))	0.746	0.827	0.884

注：1) 电价按照 0.6 元/(kW·h)计；
2) 区域供冷系统管网损失按 5%计算。

从表 1 以及图 3 和图 4 可以看出，居住建筑空调系统单位冷量的固定成本和单位冷量的成本均较高，且三种形式分布明显，区域供冷高于 VRF 高于分体空调。从图中可以看出，三种供冷形式居住建筑的单位冷量固定成本差别巨大，从 0.511 元/(kW·h)到 2.2 元/(kW·h)，变化范围较大。这是由于居住建筑的单位装机容量年度累计负荷

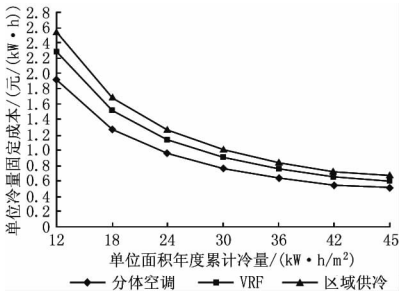

图 3 居住建筑单位冷量固定成本变化

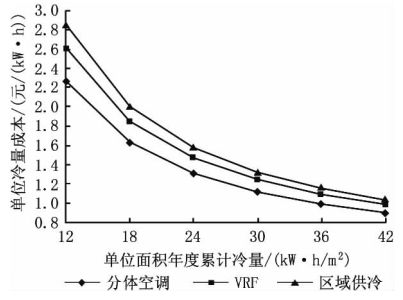

图 4 居住建筑单位冷量成本变化

较少造成的，也就是说装机容量的年度平均利用时间较少，造成的固定成本分摊过高，使得居住建筑中的固定成本占总成本主要部分，区域供冷增加的投资难以体现出较好的经济价值，这也是许多住宅区域供冷系统的运行难以为继的原因所在。另外由于住宅区域供冷系统的部分负荷时段较多，输配管网上损耗较多，虽然区域供冷高能效主机占有优势，但其系统季节能效难以提高，也造成了区域供冷系统的单位冷量成本最高，而分体空调最便宜，这也说明了在以使用率低、分散度高为特点的居住建筑负荷特性和使用条件下，单独居住建筑空调系统更适宜采用分体空调，而不适宜采用高度集中的区域供冷。

4 公共建筑的算例分析

以 50 栋 1 万 m^2 办公建筑组成的 50 万 m^2 项目为例，分别采用 VRF、集中供冷和区域供冷技术作为实例验证以上公式。一些常用参数的设定值为：$Q_{cap,t}=55\ 000$ kW，$Q_{l,t}=40\ 000$ MW·h，$CPI=8\%$。表 2 为公共建筑空调系统案例计算结果。

对比表 1、图 3、图 4 以及表 2、图 5、图 6 可以看出，总体而言，办公建筑的冷量成本低于居住建筑，这主要是由于单位冷量固定成本更低和系统运行更稳定、效率更高两方面原因造成的。从表 2 可

表 2　公共建筑空调系统案例计算结果

	VRF	集中供冷	区域供冷
系统季节平均能效	3.0	4.0	3.5
初投资/万元	14 000	11 500	16 000
设备平均使用年限/a	12	15	18
年度维修管理费用/万元	100	600	180
固定成本/(元/(kW·a))	230.3	248.5	178.2
单位冷量固定成本/(元/(kW·h))	0.317	0.340	0.245
单位冷量变动成本/(元/(kW·h))	0.300	0.225	0.270
单位冷量成本/(元/(kW·h))	0.617	0.565	0.541

注:1) 根据大型 DCS 建设的实际情况,DCS 的初投资中考虑了单独的室外输配管网以及机房的土建和变配电费用,而 VRF 与集中供冷系统中无此费用,其余设定同上。
2) 电价按 0.9 元/(kW·h)计。
3) 区域供冷系统的管网损失按 5%计算。

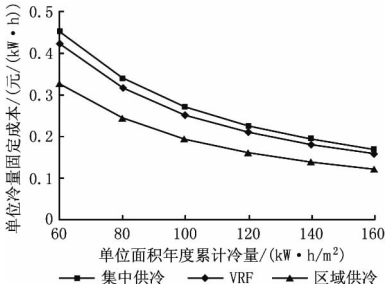

图 5　公共建筑单位冷量固定成本变化

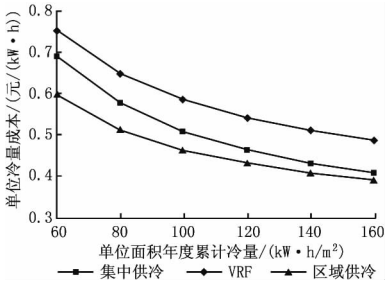

图 6　公共建筑单位冷量成本变化

以看出,公共建筑由于本身的负荷较住宅要大许多,其分摊到装机容量上的固定成本要低于住宅。公共建筑三种供冷形式的单位冷量固定成本随累计负荷的变化趋势是明显的,集中供冷>VRF>区域供冷。这是由于区域供冷需要建设独立的机房土建并进行供配电,因此初投资最高,但是区域供冷建成后每年的运行管理和维护费用相对集中供冷得到了极大的节省,因而其固定成本分摊后在三种供冷形式中是最低的。而 VRF 虽然初投资较低且维护费用也不高,但是系统寿命较短造成单位冷量的固定成本分摊最高。

在三种供冷形式中,虽然区域供冷系统的设备效率最高,但是由于受到输配管网的影响,尤其是在部分负荷时输配损耗较高,区域供冷系统的季节平均能效在三种供冷形式中也是居中的,这就最终导致了区域供冷系统的单位冷量成本随累计负荷变化在三种供冷形式中居中间位置。而集中供冷系统虽然初投资最少,但是由于分散的机房数量众多,每年所需要的维护管理花费巨大,造成其单位冷量的固定成本反而是三种供冷形式中最高的,虽然其运行的效率也最高,但是最终的单位冷量成本在大多数情况下还是较高的,只有在年度累计负荷超过 120 kW·h 时,固定成本在总成本中的比例下降明显,变动成本成为总成本的主导因素,集中供冷系统效率更高的优势明显显现,使得集中供冷系统的运行费用在三种系统中最低。而 VRF 系统作为分散程度最高的供冷系统,没有集中的输配水系统,虽然机组能效最低,但是在中小规模的办公建筑中因为无需值班人员,运行管理费用低,在累计负荷小于 120 kW·h 的情况下单位冷量成本最低,这也是最近几年 VRF 系统在中小规模的办公建筑中应用较多的原因之一。

5　结论与建议

5.1　区域供冷系统的经济性研究必须基于寿命周期成本的分析,按照固定成本和变动成本分别计算汇总,才能客观公正地与常规系统进行比较。在这种分析中,系统的初投资、运行费用与管理维护三个主要影响因素对寿命周期成本影响较大,而单纯地对比 DCS 与 CCS 的初投资、运行费用或管理维护费用是不合适和没有意义的。

5.2　本文提出了一种 DCS 的动态定价方法,按照常规系统的收费调研数据确定 DCS 的收费高限,可以在首先保证用户不比 CCS 增加花费的基础上对 DCS 系统进行定价,以平衡用户与能源投资方的利益,同时满足用户节省能源费用支出和能源投资方的合理盈利要求。

5.3　本文对区域能源系统产生的节能效益在能源服务商与用户之间的最佳分配进行了探讨,研究显示,只有在用户与能源服务商分配比例基本相当的情况下,方可使用户分配的收益达到最大,对 DCS 的持续运行最为有利。

5.4　研究表明,居住建筑空调系统单位装机容量的年度累计负荷小于办公建筑,因而采用分体空

调、VRF 或区域供冷时，其单位冷量的固定成本与分摊到单位冷量的总成本变化规律相同，且均高于办公建筑。

居住建筑采用 DCS 的综合成本高于采用 VRF 和分体空调的综合成本，主要原因是由于居住建筑制冷设备的年度平均利用时间较少，造成的单位冷量固定成本分摊过高，以及住宅区域供冷系统的部分负荷时段较多，输配管网损耗较多。因此在居住建筑负荷特性和使用条件下，单独居住建筑空调系统更适宜采用分体空调，而不适宜采用高度集中的区域供冷。

5.5 研究发现，公共建筑中 DCS 初投资高，但运行维护费用低，固定成本分摊到单位冷量后在三种供冷形式中是最低的。而集中供冷的初投资虽然最低，但是由于维护成本较高而导致其单位冷量的固定成本反而最高，这说明区域供冷系统在公共建筑中存在应用的可能性。VRF 的单位冷量固定成本稍低于集中供冷，但计量收费方便，同时运行管理简便，维护量少，这也是近年来部分出租型办公楼的建设方偏爱 VRF 系统的缘由。

在高密度的公共建筑中，供冷总成本与其单位面积的年度累计负荷有较大关系，随着系统服务建筑中单位面积的年度能耗增加，三种系统形式的单位冷量成本均下降，但是采用 VRF 系统的经济性最差，集中供冷系统的经济性适中，采用区域能源系统的经济性最好。随着年度累计负荷增加，集中供冷与区域供冷经济性的差异在减小，只有当年度累计负荷超过 120 kW·h 时，固定成本在总成本中的比例下降明显，变动成本成为总成本的主导因素，集中供冷系统效率更高的优势明显显现，使其运行费用在三种系统中最低。这进一步说明了高集中度供冷方式节省的是管理维护费用和系统能效提高节省的运行费用两方面，增加的是输配损耗，可以根据这三个方面的对比来分析具体项目中哪个方案更为适宜。

5.6 DCS 项目的实施必须考虑负荷密度，并进行可靠的经济性分析，DCS 的经济性必须按照寿命周期的方法进行计算并科学合理地与 CCS 系统进行对比，DCS 的定价必须要根据市场化规律，保证用户和能源服务商双方利益。

5.7 人力资源是社会体系中最宝贵的资源，无论何种空调系统，节约人力都是最大的节约。节约的人力成本可以转换为能耗和碳排放，同时节约人力还间接实现了节能。这一趋势虽然在目前形势下并未得到充分体现，但是从人类社会长期的发展趋势来看，会间接和缓慢地影响空调系统集中度的选择。

参考文献：

[1] 马宏权，龙惟定. 区域供冷系统的能源效率分析[J]. 暖通空调，2008，38(11)：53-58

[2] 马宏权，龙惟定. 区域供冷系统的应用现状与展望[J]. 暖通空调，2009，39(2)：23-29

[3] 马宏权，贺孟春，龙惟定. 区域供冷系统的两类能源效率研究[J]. 暖通空调，2011，41(4)：24-28