

电冰箱能耗与制冷系统匹配分析*

陈爱东¹ 段焕林² 苗翠平³ 张凤林⁴ 车景顺⁵

(1、2、3 河南纺织高等专科学校 郑州 450007 4. 河南新飞电器有限公司
新乡 453000 5. 河南冰熊保鲜设备股份有限公司 民权 476800)

摘要: 冷冻室蒸发器采用多层换热片的复合立体结构, 在 S 型制冷盘管壁外侧固定套装翅片, 增加冷冻室顶部和低部两个高温区制冷量。将冷冻室按 1: 1 划分出变温室, 通过其中温度传感器控制双稳态电磁阀通断实现制冷剂回路切换, 将变温室按冷冻、软冷冻、冷藏使用, 也可关闭。通过横、竖盘管混排结构的丝管式冷凝器设计, 借助制冷系统压缩机、冷凝器、蒸发器负荷匹配及其与毛细管制冷剂流量匹配, 通过防凝露管走向及位置设计、蒸发器管道位置及走向布置和回气换热器设计, 研制的 BCD-188CH 直冷电冰箱最大负荷日耗电 0.38 度, 在变温室为节能状态时耗电在 0.35 度以下, 最低达 0.31 度。

关键词: 优化设计; 电冰箱; 匹配; 制冷系统

Search on Optimization Design of Refrigeration System for Direct Cooling Refrigerator

Chenaidong, Duanhuanlin, miaocuiping,, Zheng Fenglin and Che Jingshun

☆Henan Textile College, China

Abstract: Composite and stereoscopic structure with laminated exchanger flake was used on evaporator of freezing chamber. Wing-flakes were fixed outside the refrigeration pipe coil with a S type in order to increase the quantity of refrigeration on top and bottom of freezing chamber. Freezing chamber was divided into variable temperature areas according to 1:1 proportion. Temperature sensor controlled the connection or breaking of electro-magnetic valve with double steady state so that cut-over of refrigerant circuit was completed. Variable temperature areas might be used as freezing chamber, lower-degree freezing chamber, cold storage chamber and also could be closed. By the optimizing design of condenser structure direction and position of anti-condensation pipe and evaporator, circling-gas exchanger and By matching the load of compressor condenser and evaporator, a direct cooling refrigerator, which type is BCD-188CH, was recently manufactured. It consumes 0.38 KWh electric-energy every day under the maximum load. It consumes less than 0.35KWh even attaining 0.31 KWh every day if variable temperature chamber is operating under economy condition.

Keyword: Optimization design, refrigerator, refrigeration system

1 前言

电冰箱发展速度很快，我国电冰箱的产量由 1991 年的 470 万台增加到 2001 年的 1349 万台，平均年增长 11.1%^[1]，电冰箱的普及率也迅速增长，我国东部沿海地区为 89.6%，中部地区 80.7%，西部地区 83.9%^[1]，而电冰箱的耗电量占家用电器总耗电量的 32%^[2]，所以，电冰箱节能已成为能源工作的重要组成部分，节能降耗和环保是电冰箱研发工作的重要课题，电冰箱制冷系统优化设计是节能降耗的重要环节。而蒸发器和冷凝器的**优化设计和匹配**则是关键因素。

2 蒸发器的优化匹配

制冷循环在制冷剂 lgP-h 图中表示如图 1 示，可以看出，过低的蒸发压力（如图中虚线 a-b）会引起单位制冷量和制冷系数的减小，同时，由于传热温差加大，也会增加箱体热负荷，引起能耗增加。在保持冰箱各间室温度一定情况下，应尽可能提高蒸发压力（温度），也即降低蒸发器与箱内的温差。有文献介绍，蒸发温度的提高对提高冰箱能效至关重要，采用大内径蒸发管以减小阻力，通过增大蒸发器传热面积来保证箱内所需冷量，从而提高蒸发温度。项目研究发现，应合理调节冷藏、冷冻蒸发面积，太大或太小皆不可取，应控制在最佳点。原因有三方面，其一，蒸发面积过大时，制冷剂充注量也必须加大，否则会出现蒸发器出口温度过高，影响温度场稳定性，而制冷剂量的加大必然使耗功增加；另一方面，增大蒸发面积在提高蒸发温度的同时，压缩机排气量增加，造成在毛细管中流动阻力更大，从而又降低蒸发温度，同时，冷凝器的散热能力也限制、制约了系统的制冷能力。其二，受到安装空间及使用空间限制，蒸发面积不能太大或太小。其三，由于设计成本及销售影响制约，蒸发器面积应控制在最佳点。

项目研制过程中采取以下措施。第一，减小冷藏、冷冻两蒸发器的面积比差值，在总面积一定情况下，尽量加大冷藏室蒸发器的面积，采用大内径蒸发管、增加蒸发管长度及双管并行排列结构等，保证在低温或高温环境下有最佳的开停比，从而保证在一定环境温度下耗电最少。第二，设计高效蒸发器。冷冻室蒸发器是由从上到下依次排列多个换热层片和连接所有换热层片的连接管组成的复合立体式结构^[3]，换热层片由多个并列 S 型制冷盘管构成，且在其盘管壁外侧固定套装翅片，大大增加了制冷盘管与空气间接触面积，如图 2 示。该蒸发器在不改变电冰箱结构情况下，大幅度增加冷冻室蒸发面积，增加冷冻室顶部和低部两个高温区制冷量，使其快速达到规定要求，缩短压缩机工作时间，大幅降低能耗。冷藏室采用导热粘接胶膜将压扁铜管紧紧粘在传热铝板上，并通过高粘合双面胶粘贴在冷藏室内胆上，增强传热效果。第三，合理安排蒸发器位置和

制冷剂走向。据箱内自然对流情况，制冷剂流向采用逆流式换热，毛细管和回气管采用较长的并行锡焊或热塑工艺等，以提高换热效果。第四，通过理论计算和试验相结合方法，合理匹配蒸发器与冷凝器的传热面积，努力减小冰箱工作系数，避免过低蒸发压力和过高冷凝压力，达节能目的。

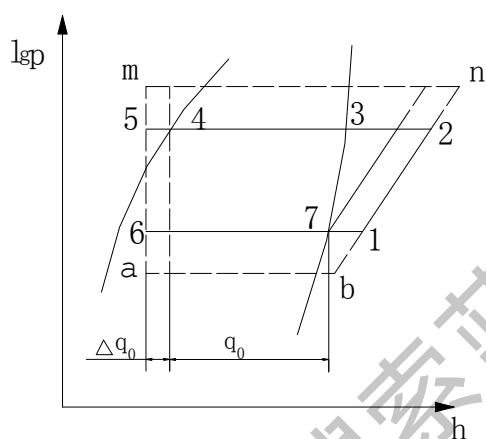


图1 回热制冷循环理论分析图

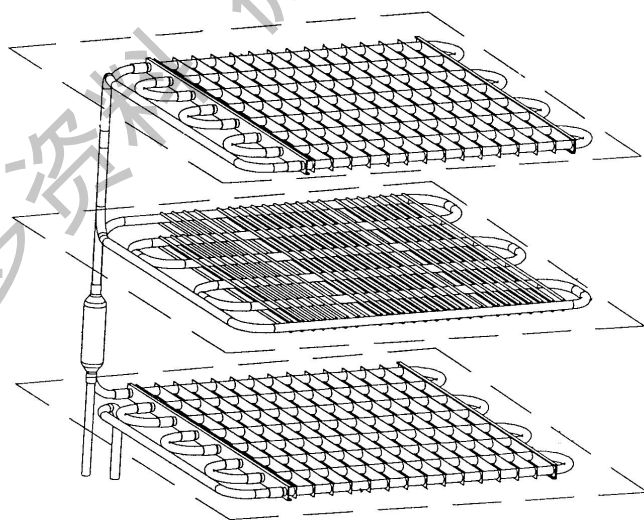


图2 冷冻室蒸发器示意图

3 冷凝器优化匹配

从图1看出，过高冷凝压力（如图中虚线m-n，考虑节流损失）同样会引起制冷量减小、耗电增加，进而引起制冷系数减小。同时，由于传热温差加大，引起箱体热负荷

增大，能耗增加。有文献介绍，在箱外环境温度一定情况下，应尽量减小冷凝压力即减小冷凝器与箱外环境的换热温差，并合理增加冷凝面积，这样，可降低排气压力，提高深冷程度，对减小系统能耗、提高制冷系数非常有利。进一步研究发现，增大冷凝器面积，会产生冷凝温度降低，压缩机排气量增加，从而制冷系统制冷能力增大。但是，如果冷凝面积增大是以冷凝器管道面积增大为代价，则要充分考虑加大制冷剂充注量问题，并且仔细测试与蒸发器的正确匹配，否则未能达到预期目的；如果仅增加散热面积而未增加内部管道面积，那么系统制冷剂量变化不大。所以，应合理匹配冷凝器与蒸发器两传热面积，以避免过低蒸发压力和过高冷凝压力，从而达到节能降耗之目的。

在优化冷凝器设计中除合理增大冷凝面积外，项目研制过程中充分考虑以下几点：

3.1 设计横、竖盘管混排结构冷凝器：由传热学理论分析，在冷凝器内为制冷剂气液两相状态，分析冷凝器中制冷剂流态变化和内、外部换热条件，横排管冷凝器的换热系数比竖排管冷凝器增加 3 倍以上，为加强流体扰动，破坏流动边界层，采用横、竖盘管相结合走向的冷凝器将会提高冷凝器换热效果，同时也可降低制冷剂流动噪声。

3.2 丝管式冷凝器代替百叶窗式冷凝器：在其它条件不变情况下，丝管式冷凝器传热性能好，对应的制冷循环效率提高，能耗减小。

3.3 改内藏式冷凝器为外挂式：外挂式冷凝器散热条件比内藏式冷凝器好得多，对降低冷凝温度和过冷温度十分有利，可有效节能降耗。

3.4 防凝露管节能设计：从压缩机排气管至干燥过滤器出口整个高压区域皆为冷凝器负荷对应区域，包括制冷剂蒸汽的冷却、冷凝及再冷（过冷）三个过程，如图 1 中 2-3、3-4 及 4-5 三个过程，对应设备包括付冷凝器、主冷凝器及门边防露管。不同厂家对这三部分的设计思路及管路布置走向各不相同，这对系统能耗有直接影响。由于排气温度的不同，采用不同制冷剂时管路布置也不相同。项目研制中采用制冷剂 R600a，由于采用 R600a 使压缩机排气温度降低，约 55℃左右，故将压缩机排出的高压气体先进门边防露管，再进主、副冷凝器，这样即使条件变化，门边防露管末端对应温度也高于最高环境温度，既可保证加热门框、提高防露效果，同时，在管路布置时尽量使防露管远离箱体腔，又可减小热量向箱内传递，实现节能之目的，系统图如图 3 示。

4 软冷冻及变温技术设计

从热力学角度考虑，过高的环境温度或过低的箱内温度对电冰箱的能耗均有直接影

响。环境温度过高，冷凝器散热受到影响，而冰箱内温度过低，一方面增加传热温差，

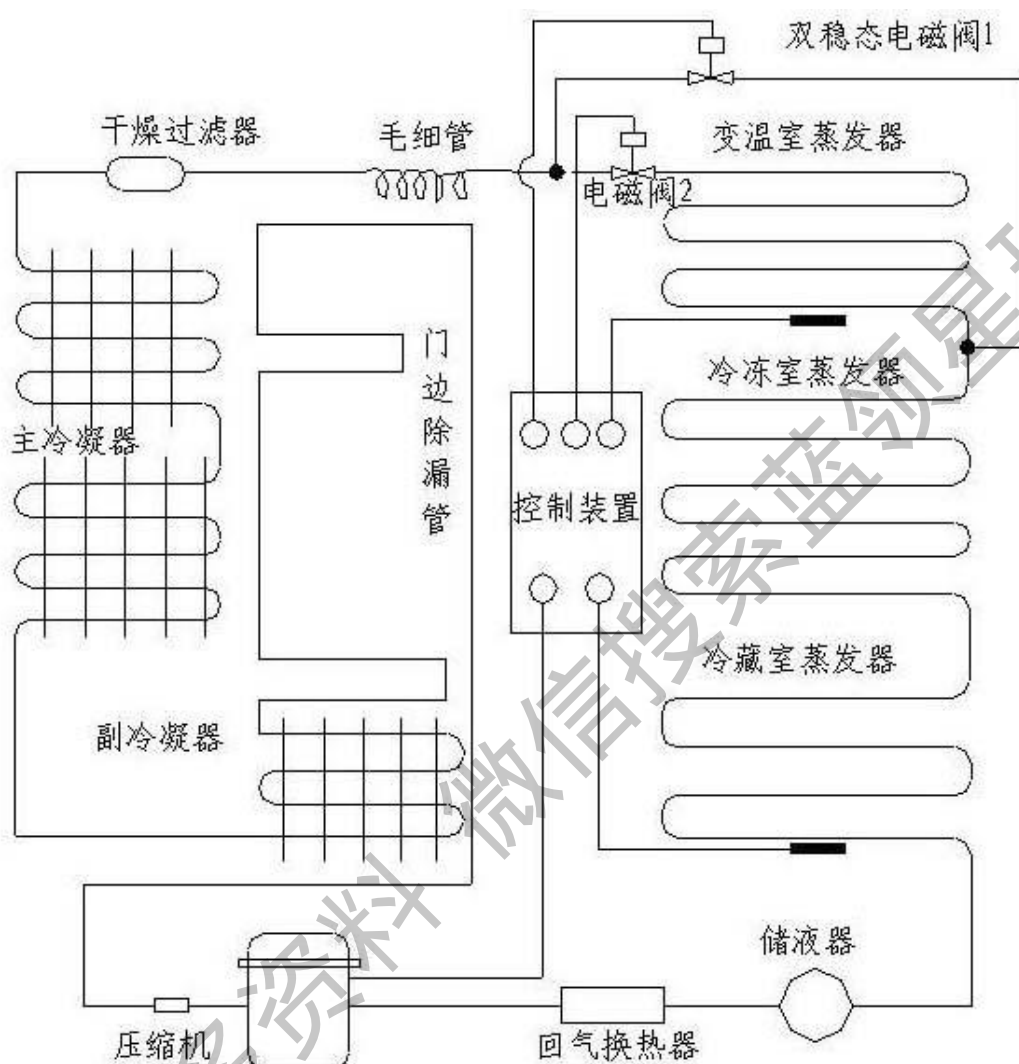


图3 软冷冻及变温技术设计制冷系统示意图

另一方面需较低的蒸发温度从而降低制冷系统循环效率，甚至延长压缩机开机时间，造成能耗上升。所以，过低的、不必要的冷冻室温度设计会加剧冰箱能耗上升。为满足消费者需要，又使冰箱降耗节能，软冷冻及变温设计就显得十分重要。

目前，传统冰箱的两个温区，R室 5°C ，F室为 -18°C ，而且F室相对较大。项目尝试将F室划分两区域，其一温度仍保持 -18°C ，其二温度为 -10°C 。F室内冻结物很难在短时间内用刀进行切削处理，在食用前必须解冻，此举一耗费时间，二造成营养成分流失。将F室分离出一个 -10°C 温区，既可使鱼、肉等食品在 $-7^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ 低温下冻结，又

能达到短时间内用刀进行切削处理的目的，同时，据使用冰箱需要，也可将此温区温度设定为 R 室温度 5℃或 F 室温度-18℃，甚至关闭。此即所谓软冷冻及变温技术。

如图 3 示为软冷冻及变温技术设计制冷系统示意图^[4]。从图中可以看出制冷剂经压缩机压缩，在冷凝器中冷凝后流经干燥过滤器和毛细管，系统分为两个支路。支路一：制冷剂经变温室蒸发器、冷冻室蒸发器、冷藏室蒸发器、贮液器和回气换热器后回到压缩机形成循环回路。支路二：制冷剂经双稳态电磁阀 1、冷冻室蒸发器、冷藏室蒸发器、贮液器和回气换热器后回到压缩机形成循环回路。

在结构设计中，电冰箱由上而下分为冷冻室、变温室和冷藏室（变温室由冷冻室按 1:1 分割形成），各间室都有相对独立的蒸发器。变温室蒸发器设计时较大，满足变温室作为三星冷冻室的匹配。而该间室作为其他功能间室（如冷藏、软冷冻等）使用时，可以通过设在变温室的温度传感器将温度信号送至电冰箱的控制装置中，控制装置据温度设定值对双稳态电磁阀的通路进行切换实现。当电冰箱启动运行时，电磁阀 1、2 处于通电状态，系统按照支路二形成的循环回路运行，同时变温室的温度传感器检测变温室的温度。变温室温度若在变温室的设定温度范围内，系统按照支路二形成的循环回路继续运行。若检测到温度高于变温室设定值上限，电冰箱的控制装置使双稳态电磁阀 1 处于断电状态，而双稳态电磁阀 2 仍通电，系统按照支路一形成的循环回路运行，直到温度传感器感应到温度低于变温室的温度设定值下限时，双稳态电磁阀 1 执行通电操作，而双稳态电磁阀 2 断电，系统又按支路二循环回路运行。此时冷冻室和冷藏室温度继续下降，直到冷藏室温度达到标准后，压缩机停机，系统如此往复循环。这种设计，控制压缩机启停的是冷藏室温度，而变温室温度的设定及变化仅控制双稳态电磁阀的通断，以切换制冷剂流向，并不直接控制压缩机的运行，故可较好解决双路循环系统存在的频繁开、停机现象，既使压缩机及其附件寿命延长，又减少启动功率，耗电量也随之降低。

需要指出，变温室蒸发器按三星级冷冻室要求（-18℃）与冷冻、冷藏室蒸发器匹配，制冷剂充注量也按变温室为冷冻室制冷能力充注，这样一来，通过温度设定控制双稳态电磁阀以切换制冷剂流向，可将变温室按冷冻室或软冷冻（-7~-10℃）或冷藏室使用，也可关闭，与同样大小固定冷冻室容积的电冰箱相比，此变温技术既满足消费者对冰箱温区的多方需求，又节能降耗。表 1 为能耗实测数据，可以看出，单独调高变温

室温度（将变温室作为软冷冻室或冷藏室）可以节能，单独关闭变温室更加节能。

表 1 BCD-188CH 电冰箱能耗实测数据（环境温度 25℃）

冰箱状态	耗电量 (kWh/24h)	冷藏室温 度 (°C)	变温室温 度 (°C)	冷冻室温 度 (°C)	开停机率 (%)	能耗对比 (%)
国家标准测试	0.38	+5.0	-18	-18	30.2	100
改变变温室温度	0.35	+5.0	-10	-18	21.8	89.7
改变变温室温度	0.33	+5.0	+5	-18	17.3	84.6
关闭变温室	0.31	+5.0	+4(室内无 负荷)	-18	14.1	79.4

5 系统优化匹配及管路走向节能设计

5.1 系统优化匹配

项目综合考虑箱体热负荷、系统制冷量、压缩机效率、电冰箱工作周期等相关参数，使之达最佳匹配状态。

5.1.1 设计中的气候类型应与使用地区的气候匹配，否则耗电增加，甚至出现不停机现象，同时，根据产品的气候类型(项目研制中设计为亚热带型)确定冷冻室、冷藏室的热负荷匹配关系。在产品设计和样机试验中，反复调节系统回路各有关参数，使冷冻、冷藏室之间以及蒸发器与冷凝器之间，压缩机排气量与蒸发器蒸发能力之间以及毛细管节流与蒸发温度之间达到最佳的节能匹配关系。表 2 是调整过程必须控制的系统关键状态点和相应的调整措施^[5]。

表 2 制冷系统匹配关键状态点及调整措施

关键点	控制要素	设计与调整措施
蒸发器	蒸发压力、出口过热度	调整流量及蒸发器尺寸
冷凝器	冷凝压力、出口过冷度	调整流量及冷凝器尺寸
毛细管	入口制冷剂状态	调整流量（如毛细管尺寸及充注量）
吸回管	制冷剂温度	调整回气换热器（换热长度及方式）

5.1.2 在设计冰箱系统时，工作时间系数的选配非常重要。压缩机工作时间太短，启动频繁，则因启动功率大，会带来能耗的升高；如果工作时间太长，压缩机总是工作在较低蒸发温度状态，则压缩机工作效率太低，能耗也将上升。在选配压缩机时，应满足冰箱最大热负荷要求，在满足负荷要求下尽可能选用较小型号的压缩机。项目研制中选用高效压缩机，功率 90W，经测定，冰箱工作时间系数适当，能耗较少，见表 1。

5.1.3 系统的优化匹配也包括制冷系统中制冷剂量的匹配，制冷剂偏多或偏少都会

影响制冷系统制冷效果，造成耗电增加。因此，系统的性能在其结构决定后，还必须对它的制冷剂量进行匹配试验。项目研制中采取与普通电冰箱不同的充注量试验，同时使用高精度充注系统确保最佳充注量，使系统在高效下进行工作，达到节能降耗目的。

5.1.4 改进节流系统，正确选择毛细管长度和管径以确定最佳毛细管流量是重要问题，与蒸发器的优化匹配、与冷凝器的优化匹配是紧密相关的。若毛细管长度较长或管径较小，节流时产生较大的压差，制冷剂流量小，蒸发温度低，压缩机排气量小，使制冷系统制冷能力减小。在设计中最初的理论计算往往只具指导意义，必须经多次试验调试才能确定。项目在调试过程中，将制冷系统各主要部件的主要状态参数点处分布感温电偶，在压缩机高、低压端安装压力表，通过各种工况的试验曲线及试验数据，借助压焓图，寻找优化制冷循环工况，确定最佳的流量和充注量。

5.2 制冷系统管路走向节能设计

此问题关系到电冰箱结构是否合理、制冷能力是否增强，而且对电冰箱能耗影响很大。包括以下三部分。

5.2.1 防凝露管节能设计，是影响冰箱能耗的重要方面，文中 3.4 已介绍。

5.2.2 回气换热器节能设计。采用环保型制冷剂如 R600a、R134a 等与 R12 一样，在系统中设置回气换热器，采用回热循环是提高制冷系数和单位容积制冷量的有效措施。理论分析如图 1 示：采用回热循环时产生过冷过程 4-5，制冷量 $q_0' = h_7 - h_6$

没有回热循环 制冷量 $q_0 = h_7 - h_4$

显然 $q_0' > q_0$ ， $\Delta q_0 = q_0' - q_0 = h_4 - h_6$

压缩机耗功 $w = h_2 - h_1$ 不变

制冷系数 $\varepsilon = q_0' / w$ 增大

项目研制中主要从以下三个方面对换热效率进行了强化：（1）毛细管与回气管中的制冷剂采用逆流换热；（2）毛细管和回气管采用并行锡焊（或热塑工艺）的方式；（3）尽可能增加毛细管与回气管的锡焊长度使之最终换热效率达到 98%，这样可明显提高系统制冷量。

5.2.3 两大换热设备（蒸发器和冷凝器）中制冷剂管道的合理布置。两大换热设备换热能力的提高对提高系统制冷量，降低能耗十分重要，而换热能力的提高与其中制冷剂管道的合理布置紧密相关。项目研制中，冷藏室蒸发器双排并行盘管紧贴于内胆之上，冷冻室蒸发器采用分层立体结构。冷凝器设计为横、竖盘管混排结构，并采用外挂式。通过这些措施，大大增强了蒸发器与冷凝器的换热能力，经实测，电冰箱最大负荷时日耗电仅 0.38 度，而在节能状态下耗电在 0.35 度以下。

5.2.4 在制冷系统管路走向节能设计中注意降低冰箱噪声，保证冰箱在节能的同时将噪声控制在合理范围内。

6 结语

通过改进换热器结构，采用多层排列的复合立体式蒸发器设计，改单一的竖排管排列为横、竖混合排列的丝管式外挂冷凝器，借助于电冰箱压缩机、冷凝器、蒸发器及毛细管的优化匹配，并且借助于制冷剂管路走向节能设计等措施，通过变温控制技术的优化设计，研制的BCD-188CH直冷电冰箱最大负荷时日耗电0.38度，而在节能状态下耗电在0.35度以下，最低达0.31度。与同样大小固定冷冻室容积的直冷电冰箱相比，项目研制的电冰箱，既满足消费者对温区的多方需求，又显著节能降耗。

参考文献：

* 河南省科技攻关项目：电冰箱节能技术研究（编号0324220006）。基金：2万元，配套经费6万元。

由河南纺织高等专科学校、河南新飞电器有限公司及河南冰熊保鲜设备股份有限公司等单位共同完成。

经河南省科技厅组织专家鉴定，该项目整体水平居国际先进水平。

1 方言. 电冰箱市场需求的大趋势. 家用电器科技, 2002, (7): 34~35

2 www.clasponline.org/download/General/2001/211/The-SL-Guidebook.pdf

3. 张凤林. 电冰箱的蒸发器. 中国, 实用新型, 200420010921.8. 2004年5月31日

4 李刚, 张凤林. 一种带软冷冻室的节能直冷电冰箱. 中国, 实用新型, 200420011137.9. 2004年6月25日

5 赵先美. 节能BCD-248/H、BCD-218/H电冰箱的研究开发. 制冷学报, 2002, (1): 61~65

作者简介及联系方式：

陈爱东，女，1965年出生，汉族，本科，讲师；主要从事空调、制冷及热工领域教学和研究。主要业绩：主持、参与河南省科技攻关项目《文物柜恒温恒湿研究》、《电冰箱节能技术研究》、《电子冷冻加工用热电制冷器》及《户式中央空调节能、舒适性研究》等科研项目4项。在《制冷学报》、《节能技术》《轻工机械》及《河南纺织高等专科学校学报》等杂志发表《R600a节能压缩机探析》、《高效节能压缩机研究》《冷藏陈列柜用高效模块式蒸发器性能的实验研究》《文物柜去湿机设计》等论文多篇。参与编写了《制冷技术及应用》。

地址：郑州市桐柏路62号院 河南纺织高等专科学校机电系空调教研室126# 陈爱东

邮编：450007 电话：13613805213

电子信箱：chenaidong19651031@yahoo.com.cn