

基于遗传算法三级自动复叠制冷系统建模分析和优化

胡姣姣,张 华,杨易坤,柏霄翔

(上海理工大学 制冷与低温工程研究所,上海 200093)

摘 要:为了优化混合工质配比,提高系统性能,采用 Aspen Plus 来模拟自动复叠制冷系统,将遗传算法与混合工质的配比选取结合,以系统热力学完善度最高为目标函数进行优化,得出了不同蒸发器出口温度、冷凝器出口温度、压缩机压比时系统性能最优时混合工质的质量配比,为实际自动复叠制冷系统设计和制冷剂充注提供了理论数据。将一组三级自动复叠制冷系统的实验值与模拟值进行对比,发现模拟值与实验值的误差多数都在 10% 以内。

关 键 词:自动复叠系统;非共沸混合工质;遗传算法;Aspen Plus;优化

中图分类号:TB657 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2020.03.004

[引用本文格式]胡姣姣,张 华,杨易坤,等.基于遗传算法三级自动复叠制冷系统建模分析和优化[J].热能动力工程,2020,35(3):27-36. HU Jiao-jiao, ZHANG Hua, YANG Yi-kun, et al. Modeling analysis and optimization of three-level automatic cascade refrigeration system based on genetic algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 27-36.

Modeling Analysis and Optimization of Three-Level Automatic Cascade Refrigeration System based on Genetic Algorithm

HU Jiao-jiao, ZHANG Hua, YANG Yi-kun, BAI Xiao-xiang

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: In order to optimize the mixing ratio and improve the performance of the system, Aspen Plus is used to simulate the automatic cascade refrigeration system, the genetic algorithm is combined with the selection of the mixing ratio for the working medium, and the system thermodynamics is optimized with the highest objective degree. The mass ratio of mixed refrigerants with different evaporator outlet temperature, condenser outlet temperature and compressor pressure ratio is obtained, which provides theoretical data for the actual automatic cascade refrigeration system design and refrigerant charging. The comparison of the experimental values of a set of three-stage automatic cascade refrigeration system and the simulation results, shows that the error between the simulation and the experimental results is mostly within 10%.

Key words: auto cascade refrigeration, zeotropic mixtures, genetic algorithm, aspen Plus, optimization

引 言

自复叠制冷(auto-cascade refrigeration, ACR)与其他形式的制冷系统相比,具有低温端无运动部件、运行可靠、使用寿命长、循环效率高、制造成本低等优点,已经成为 $-40 \sim -160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温区的主要制冷方

式之一,应用于能源、军工、电子、空间、生命科学和生物医疗器械等领域^[1-2]。

混合工质作为自复叠制冷系统中的制冷剂,其配比决定了混合工质的热物性,不同的配比对系统性能影响很大^[3]。目前,对混合工质优化配比多是通过搭建实验台,不断调试来优化配比,但这种方法效率较低,人力和物力成本较高^[4-8]。在对自复叠

收稿日期:2018-05-16; 修订日期:2018-06-13

作者简介:胡姣姣(1995-),女,河南信阳人,上海理工大学硕士研究生,E-mail:15216716087@163.com.

通讯作者:张 华(1966-),男,河南睢县人,上海理工大学教授,E-mail:usst_wzl@163.com.

制冷系统模拟方面,前人多采用自己编程,而混合工质物性计算方法的编程较为复杂,工作量大^[9-12]。

本文采用软件 Aspen Plus 来模拟自复叠制冷系统,运用 Refprop 物性计算方法,将遗传算法与混合工质的配比选取结合,以系统热力学完善度最高为目标函数进行优化,为自复叠制冷系统设计提供理论数据。

1 三级自动复叠循环系统流程

图 1 为三级自动复叠制冷系统原理图。混合工质经压缩机压缩并排入冷凝器,在冷凝器中进行变温冷凝,其中高温工质冷凝为液体,而中、低温工质仍然保持为气态。从冷凝器出来的气液混合物进入高温级气液分离器,在重力的作用下气体与液体实现自动分离。高温工质的液体经气液分离器底部送至节流阀节流,然后在高温级蒸发冷凝器中蒸发制冷,蒸发后的气体回到压缩机吸气管路。中、低温工质气体混合物进入高温级蒸发冷凝器进行冷凝,其中中温工质冷凝为液体,而低温工质仍然保持气态。从蒸发冷凝器出来的气液混合物进入中温级气液分离器,中温工质冷凝液经节流阀节流后在中温级蒸发冷凝器中蒸发制冷,蒸发得到的气体回到压缩机吸气管路。自气液分离器流出的低温工质的气体在蒸发冷凝器中冷凝,冷凝液经低温级节流阀节流降温后进入蒸发器蒸发制冷,实现系统的制冷量。蒸发得到的气体进入吸气管路,先后与中、高温工质的气体汇合回到压缩机,完成整个循环流程。

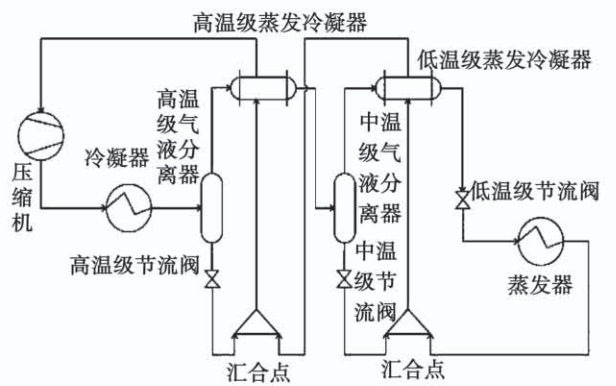


图 1 三级自动复叠制冷循环流程图

Fig. 1 Flow chart of three-stage automatic cascade refrigeration cycle

2 系统模拟优化

2.1 混合工质的选取

混合工质各组元沸点差距需在 40 ~ 80 ℃ 之间较为合适^[13],在结合本课题组以往实验研究的基础上,选择三级自动复叠制冷系统进行优化分析,选用 R134a、R23、R14 三元混合工质作为制冷工质^[14-16]。上述 3 种工质的主要热物性参数如表 1 所示。

表 1 工质热物性参数表

Tab. 1 Thermal and physical parameters of working medium

工质	分子式	GWP	标准沸点/℃	凝固温度/℃	临界温度/℃
R134a	CH ₂ FCF ₃	1300	-26.07	-103.3	101.11
R23	CHF ₃	12100	-82.02	-155.13	26.14
R14	CF ₄	5700	-128.05	-153.15	-45.64

采用 Aspen Plus 软件自带的 Refprop 方法计算混合工质的物性,采用一个类 Helmholtz 能量方程的工质混合规则,如式(1),将混合物组分的亥姆霍兹能量应用到混合物中,它使用一个偏离函数来描述理想混合物的偏离。

$$\Phi_m = \sum_{j=1}^n [x_j(\Phi_j^0 + \Phi_j^r) + x_j \ln x_j] + \sum_{p=1}^{n-1} \sum_{q=p+1}^n x_p x_q F_{p,q} \Phi_{p,q}^{\text{excess}} \quad (1)$$

式中: Φ_m —混合物的自由能; Φ^0 —理想状态下混合物的自由能; Φ^r —实际状态下混合物的自由能; Φ^{excess} —实际状态与理想状态偏移的自由能; x_j —混合物中第 j 种组分的摩尔成分; $F_{p,q}$ —概括参数

$$\Phi^r = \frac{1}{RT} \int_v^\infty (p - RTp) dv \quad (2)$$

式中: p —压力, MPa; R —通用气体常数, J/(mol · K), $R = 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$; v —摩尔体积, m³/mol; T —温度, ℃

$$\Phi^0 = \frac{h_{\text{ref}}}{RT} - \frac{S_{\text{ref}}}{R} - 1 + \ln\left(\frac{T\rho}{T_{\text{ref}}\rho_{\text{ref}}}\right) +$$

$$\frac{1}{RT} \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p^0 dT - \frac{1}{R} \int_{T_{\text{ref}}}^T \frac{c_p^0}{T} dT \quad (3)$$

式中: h_{ref} —参考点的焓值, J/kg; S_{ref} —参考点熵值, J/(kg · K); ρ —密度, kg/m³。

当确定了混合工质物性方法后,混合物的热力学性质可通过偏差函数法计算:

焓的偏差:

$$(H_m - H_m^{ig}) = - \int_{\infty}^v \left(p - \frac{RT}{V} \right) dV + RT \ln \left(\frac{V}{V_{ig}} \right) + T(S_m - S_m^{ig}) + RT(Z_m - 1) \quad (4)$$

熵的偏差:

$$(S_m - S_m^{ig}) = \int_{\infty}^v \left[\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - \frac{R}{V} \right] dV + R \ln \left(\frac{V}{V_{ig}} \right) \quad (5)$$

吉布斯自由能的偏差:

$$(G_m - G_m^{ig}) = - \int_{\infty}^v \left(p - \frac{RT}{V} \right) dV + RT \ln \left(\frac{V}{V_{ig}} \right) + RT(Z_m - 1) \quad (6)$$

气相焓:

$$H_m^v = H_m^{ig} + (H_m^v - H_m^{ig}) \quad (7)$$

液相焓:

$$H_m^l = H_m^{ig} + (H_m^l - H_m^{ig}) \quad (8)$$

两相区的焓:

$$H_m = xH_m^v + (1-x)H_m^l \quad (9)$$

理想气体摩尔焓:

$$H_m^{ig} = \sum_i y_i \left[\Delta_f H_i^{ig} + \int_{T^{ref}}^T c_{p,i}^{ig}(T) dT \right] \quad (10)$$

式中: Z —工质压缩因子; H_i^{ig} —理想气体在298.15 K和101.325 kPa下的标准摩尔生成焓; T^{ref} —参考温度=298.15 K; $c_{p,i}^{ig}$ —理想气体的定压比热容; x —气液两相混合物干度; y_i 是*i*组分气相的摩尔组分。

熵和吉布斯自由能可以按同样的方法计算:

$$G_m^v = G_m^{ig} + (G_m^v - G_m^{ig}) \quad (11)$$

$$G_m^l = G_m^{ig} + (G_m^l - G_m^{ig}) \quad (12)$$

$$S_m^v = S_m^{ig} + (S_m^v - S_m^{ig}) \quad (13)$$

$$S_m^l = S_m^{ig} + (S_m^l - S_m^{ig}) \quad (14)$$

2.2 自复叠制冷系统的热力学模型

三级自复叠制冷系统假想空间压焓图如图2所示。图中左右两条曲线为气液混合物在气液相平衡时的泡点线和露点线。其循环运行流程:混合工质通过压缩机从1点压缩为过热气体(点2),经过冷凝器时,冷凝为气液两相混合物(点3),之后经过第一级气液分离器,未被冷凝的富含中低沸点工质的高压气体混合物(点5)和被冷凝的富含高沸点工质

的高压液体混合物(点4)被分离出来,其中高压气体混合物进入第一级冷凝蒸发器降温到点6,高压液体混合物经第一级节流机构节流为低压气液两相混合物(点15)。从点6蒸发冷凝器出来的混合物经第二级气液分离器分离出富含低沸点的气体混合物(点8)和富含中沸点的液体混合物(点7),其中高压气体混合物进入第二级冷凝蒸发器降温到过冷状态(点9),高压液体混合物经第二级节流机构节流为低压气液两相混合物(点12)。过冷后的液体混合物经第三级节流机构节流为低压气液两相混合物(点10),并进入蒸发器蒸发吸热升温(点11)。蒸发器出来的混合物与第二级节流后的混合物(点12)混合,并进入第二级蒸发冷凝器中对8点的混合物提供冷量降温并到达点14,之后再与第一级节流机构出口的液体混合物(点15)混合至点16,点16的混合物进入第一级蒸发冷凝器对点5的气相混合物提供冷量,而自身升温至压缩机进口(点1)。

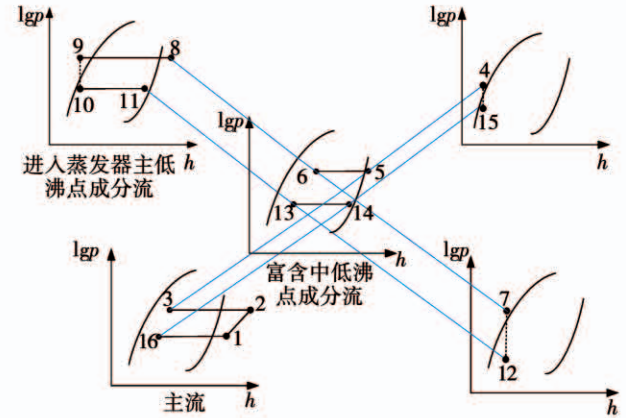


图2 三级自复叠制冷系统假想空间压焓图

Fig.2 Imaginary space pressure enthalpy diagram of three-stage auto-cascade refrigeration system

2.3 基于 Aspen Plus 软件的系统建模^[17-20]

在进行建模前,需要对自动复叠制冷系统进行一定的假设,假设如下:(1)系统的各连接管路没有压力损失;(2)系统的运行浓度等于充注浓度,且在管路中不存在液相沉积;(3)混合工质不存在气-液-液三相的情况;(4)节流过程为等焓过程;(5)气相工质在冷凝蒸发器中存在冷凝。

压缩机模型选用 Pressure Changer 中的 Compr 模块,采用 Mollier 方法的等熵模型,等熵效率为0.8,机械效率为0.9;冷凝器和蒸发器模型选用

Heater 模型,输入规定选择操作温度和压降,蒸发器规定值等于蒸发器出口温度值,冷凝器规定值为冷凝器出口温度值,压降各规定为 5 kPa;冷凝蒸发器模型采用 MHeatX 模型,第一级规定热流体出口温度气相分数的值,取值范围为 0~1,第二级规定热流体出口过冷度;节流装置模型选用 Pressure Changer 中的 Valve 模块,并规定其出口压力;气液分离器选用 Flash2 模型,规定 Flash2 的热负荷为零,相当于按照严格气液相平衡进行气液两项的分离;两股物流的混合选用 Mixer 模型,混合器中的相态为气液两相,不规定混合器压降,混合器出口压力

等于进口物流中最小的压力。

系统的模拟计算采用默认的序贯模块法。为了防止流程中因回路过多而出现循环一直迭代而不收敛的问题,计算效率降低,对流程中的物流进行撕裂。如图 3 所示,对连接冷凝器和气液分离器的流道进行撕裂操作,将其分成流道 3 和 M3,M3 作为流程计算的起点,3 作为流程计算的终点,选择该处打断是由于在各个设备分布中,冷凝器出口的温度变化相对较小;如图 4 所示,由于冷凝换热器中进口物流 C 的参数会受进口物流 A 的影响,将冷凝换热器中的物流 B 或者 C 进行撕裂。

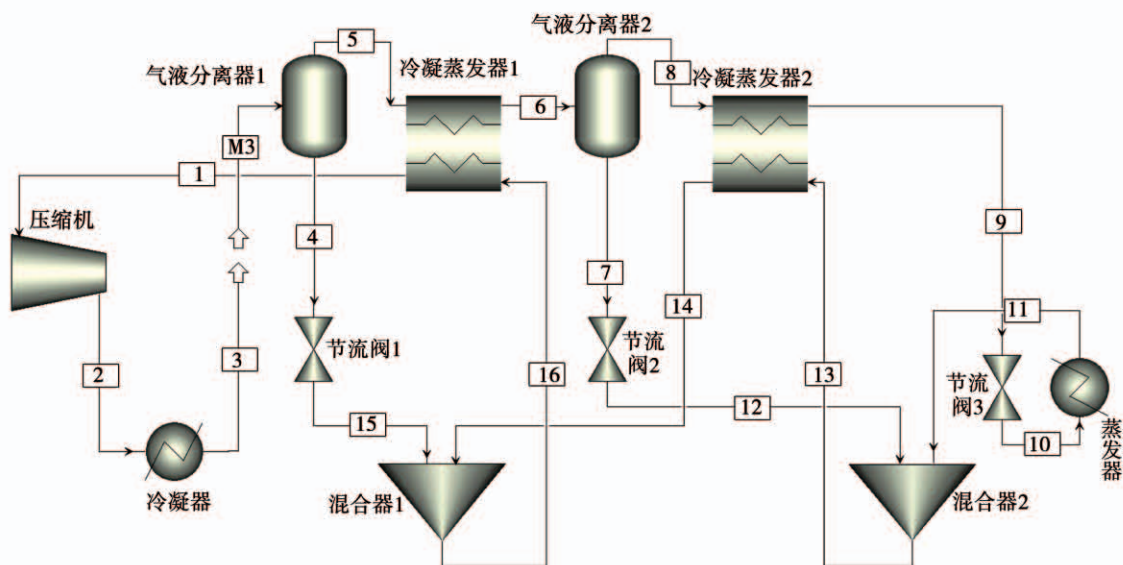


图 3 Aspen Plus 软件搭建的三级自动复叠制冷系统流程图

Fig. 3 Flow chart of the three-stage automatic cascade refrigeration system built in Aspen Plus software

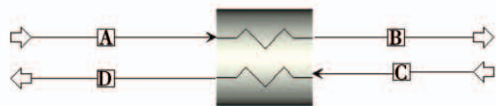


图 4 Aspen Plus 中换热器物流连接

Fig. 4 Heat exchanger logistics connection in Aspen Plus

2.4 基于遗传算法的系统优化方法

2.4.1 变量和目标

自动复叠制冷系统的优化是复杂系统,工质的不同配比对循环中换热器换热、压缩机压缩、节流装置节流都会产生影响,而这些因素反过来也会影响优化结果。这是一个多目标优化问题,需转换为在一定约束条件下单目标优化问题,可以将系统的热力学完善度 η 作为衡量系统性能优劣的指标^[21]。

热力学完善度是相同工作温度下实际制冷循环的制冷系数与逆卡诺循环的制冷系数 ε 的比值,热力学完善度越大,说明越接近理想状况,循环的性能越好。

$$\max \eta = \eta(\bar{x}) = \frac{\text{COP}}{\varepsilon} = \frac{\frac{Q}{W}}{\left(\frac{t_{\text{evp}}}{t_{\text{con}} - t_{\text{evp}}} \right)} \quad (15)$$

式中: η —自动复叠制冷系统的热力学完善度; t_{evp} —蒸发器出口温度,℃; t_{con} —冷凝器出口温度,℃; Q —系统制冷量,W; W —压缩机耗功,W;为设计自变量,其中 f_i 分别表示为 R134a、R23、R14 这 3 种工质的质量流量比, $\bar{x} = (f_1, f_2, f_3, \text{HX}_1, \text{HX}_2)^T$, HX_1 为第一级蒸发冷凝器热物流出口气相分率, HX_2 为第

二级蒸发冷凝器热物流出口过冷度。

2.4.2 约束条件

$$\begin{cases} t_s - t_{dew} \geq 3 \\ 110 - t_d \geq 0 \\ t_{pch} - 3 \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: t_s —压缩机吸气温度,℃, t_d —压缩机排气温度,℃, t_{dew} —压缩机吸气口混合工质的露点温度,℃; t_{pch} —换热器最小换热温差,℃。

根据以上 3 个约束,对目标函数采用指数函数形式的罚函数法,得适应度函数:

$$\begin{aligned} \max F(x) &= \eta(x) \cdot e^{(\min(0, t_s - t_{dew}) + \\ &\min(0, 110 - t_d) + \min(0, t_{pch} - 3))} \end{aligned} \quad (17)$$

2.4.3 改进的遗传算法

遗传算法遵循“适者生存、优胜劣汰”的原则,是一种启发式随机化搜索算法^[22-23]。基于该优化模型,通过 ActiveX 技术将 VBA 与 Aspen Plus 进行互联,采用 VBA 编写了自适应遗传算法^[24],使得交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 可随着适应度不断变化,提高了计算效率,同时引入个体间的加权海明距离,增大低相似度个体间的交叉率,减小高相似度个体间的交叉率,进而提高种群的多样性,有效防止寻优达到局部收敛^[25-30]。改进的遗传算法流程如图 5 所示。

3 三级自动复叠制冷系统优化结果与分析

3.1 优化收敛性分析

为研究自动复叠制冷系统遗传算法收敛情况,以 -60 ℃ 蒸发温度下的寻优收敛曲线为例,分别作适应度函数最大值和平均值随进化代数变化图,如图 6 所示。由图 6 可见,种群在运行到第 40 代时,无论适应度平均值还是最大值都基本不变,进化已经达到最优状态。不同的运行工况,循环性能最佳时所需的混合工质的循环配比不同。以下研究了不同工况(蒸发温度、冷凝温度、压缩机压比)下三级自动复叠制冷系统所需的最佳混合工质循环配比。

3.2 不同蒸发温度下最优配比

对于采用三元混合工质 R134a、R23、R14 的三级自动复叠制冷系统,经试算发现当吸气压力为 1 500 kPa 时,排气压力 2 000 kPa、冷凝器出口温度 30 ℃ 时,系统在蒸发温度为 -120 ℃ 时已经不能运行。为此选择蒸发温度范围 -90 ~ -115 ℃,每

5 ℃ 为一个分隔,得到的 6 组数据,每组数据包含在该蒸发温度下的自动复叠制冷系统在最优配比下的适应度函数值、热力学完善度和 COP 值。

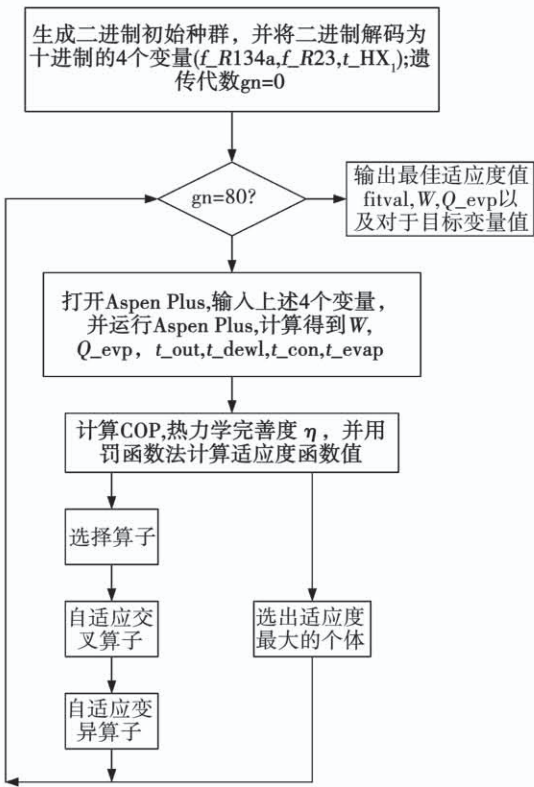


图 5 改进的遗传算法流程图
Fig.5 Improved genetic algorithm

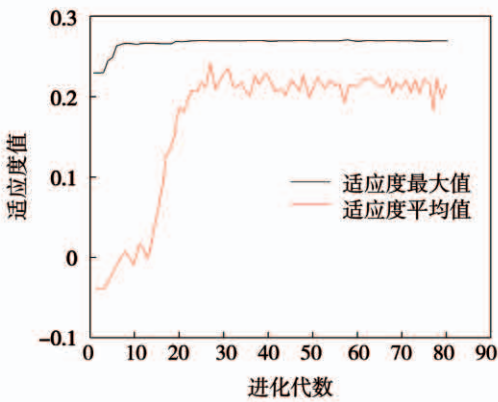


图 6 -60 ℃ 时寻优收敛曲线
Fig.6 Optimization convergence curves for -60 ℃

图 7 和图 8 分别为以冷凝器出口温度 30 ℃, 吸、排气压力 150 kPa、2 000 kPa, 第二级蒸发冷凝器高压侧混合工质出口过冷度 10 ℃ 工况下, 热力学完善度最大时混合工质配比、耗功、制冷量、循环 COP 和热力学完善度随蒸发器出口温度变化。

由图可见,当蒸发器出口温度从 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $-115\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,3种工质中高沸点工质 R134a 质量分数基本不变,维持在 0.55 左右;中沸点工质 R23 质量分数从 0.166 减小至 0.074,为了提供系统低温所需冷量,低沸点工质 R14 质量分数从 0.287 6 增加至 0.369 4。随着蒸发器出口温度下降,系统耗功在 355 ~ 372 W 之间波动,制冷量从 100.2 W 不断下降至 86.1 W,系统 COP 呈下降趋势,由 0.322 7 下降至 0.199 4,热力学完善度也呈下降趋势,从 0.211 6 下降至 0.183 1。

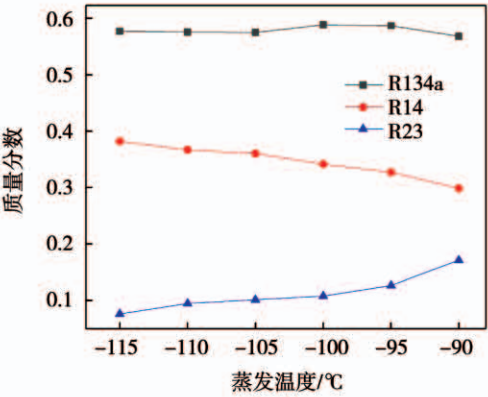


图 7 循环最优时质量分数随蒸发温度变化
Fig. 7 Variation of mass fraction with evaporation temperature at optimal cycle time

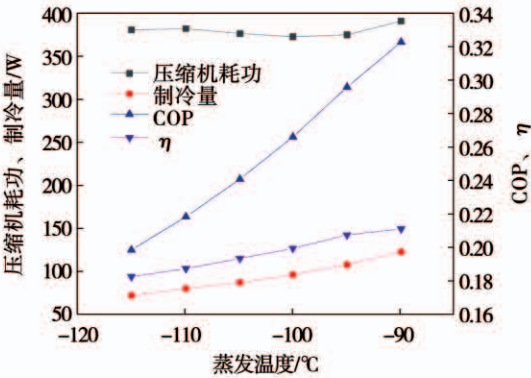


图 8 循环最优时压缩机耗功、制冷量、COP 和 η 随蒸发温度变化
Fig. 8 Variation of compressor power consumption, cooling capacity, COP and η with evaporation temperature at optimal cycle time

3.3 不同冷凝温度下最优配比

图 9 是循环最优时质量分数随冷凝温度变化图。图 9 可见,当循环吸气压力、排气压力和蒸发器

出口温度一定时,循环热力学完善度最大时,随着冷凝器出口温度从 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升至 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,高沸点工质 R134a 的比例从 0.425 6 不断增加至 0.593 8,低沸点工质 R14 比例从 0.435 1 不断减小至 0.304 4,中沸点工质 R23 比例在 0.1 上下小范围内波动。

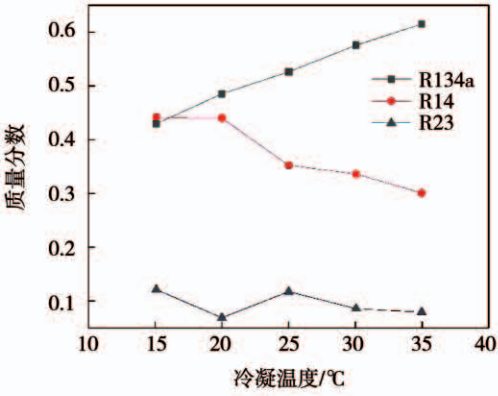


图 9 循环最优时质量分数随冷凝温度变化
Fig. 9 Variation of mass fraction with condensation temperature at optimal cycle time

图 10 是循环最优时压缩机耗功、制冷量、COP 和 η 随冷凝温度变化图。

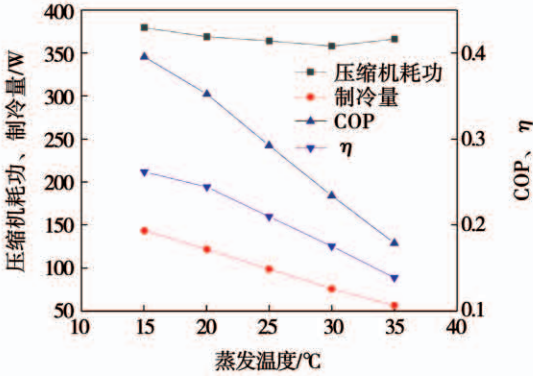


图 10 循环最优时压缩机耗功、制冷量、COP 和 η 随冷凝温度变化
Fig. 10 Variation of t compressor power consumption, cooling capacity, COP and η with condensing temperature at optimal cycle time

图 10 可见,当循环吸气压力、排气压力和冷凝器出口温度一定时,循环热力学完善度最大时,随着冷凝器出口温度上升,系统耗功缓慢减小,制冷量亦减小,随着冷凝器出口温度上升,最优状况下系统 COP 不断从 0.395 8 下降至 0.180 4,热力学完善度从 0.263 1 下降至 0.140 8。

由于模拟不考虑系统与环境之间的漏热,所以在一定范围内,冷凝器出口温度降低,系统热力学完善度增大。但如考虑系统与环境之间的漏热,则冷凝温度过低,制冷工质与环境之间的传热温差越大,导致不可逆损失越大。因此,针对不同的环境温度,应对实际系统综合分析后选取合适的冷凝温度。

3.4 不同压缩机压比下最优配比

压缩机压比是影响压缩机容积效率、排气温度的重要因素,压比对系统热力学完善度以及工质配比的影响很大。研究压比与配比关系时规定以下条件:规定排气压力最大为 2 200 kPa,这是由于制冷系统中的常规部件设计承压一般为 2 200 kPa,压力过高会对设备承压造成压力,且会增加泄漏的可能性。规定最小吸气压力为一个大气压 100 kPa,这是由于为防止制冷剂在低温级泄漏,需要保持系统内最小压力大于环境压力。在压缩机压比 6 ~ 13,每隔 1 选取一个压比进行模拟优化。

从图 11 可以看出,在压比 7 之后吸气压力随着压比增加不断减小,排气压力随着压比增加基本维持在 2100 ~ 2 200 kPa 之间。随着压比升高到一定程度,最优时排气压力基本接近压力上限 2 200 kPa。可见压比上升到一定程度后排气压力的影响比吸气压力对寻优的影响更大。

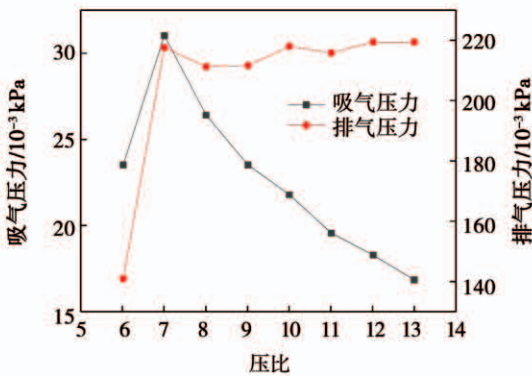


图 11 循环最优时的吸、排气压力随压比变化
Fig. 11 Variation of suction and exhaust pressure with pressure ratio in the optimal cycle

图 12、图 13 为蒸发器出口温度 - 100 ℃,冷凝器出口温度 30 ℃ 工况下,热力学完善度最大时,混合工质配比和压缩机耗功、制冷量和循环 COP 随不同压比变化的值。

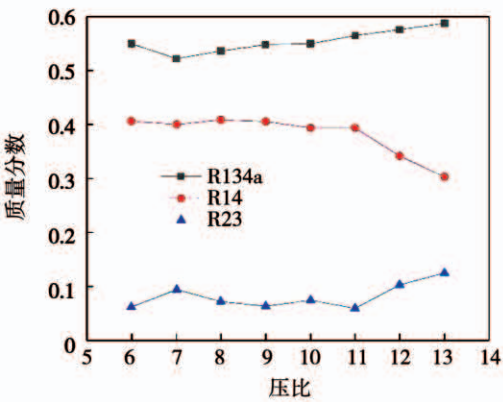


图 12 循环最优时质量分数随压比变化
Fig. 12 Variation of mass fraction with pressure ratio at optimal cycle time

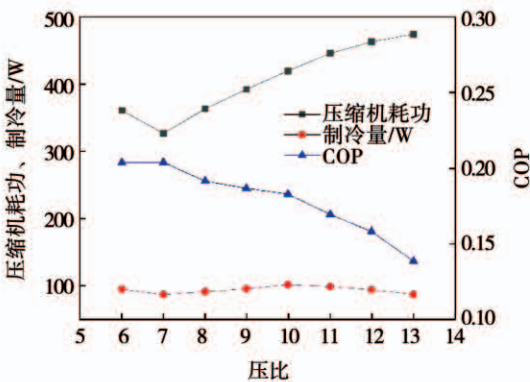


图 13 循环最优时压缩机耗功、制冷量和 COP 随压比变化
Fig. 13 Variation of compressor power consumption, refrigerating capacity and COP with pressure ratio at optimal cycle time

从图 12 中可以看出,当循环冷凝器出口温度和蒸发器出口温度一定时,循环热力学完善度最大时,随着压缩机压比从 6 上升至 13,高沸点工质 R134a 的比例从 0.508 2 先减小到 0.486 3,再不断增加至 0.541 6,低沸点工质 R14 比例从 0.388 8 不断减小至 0.303 3,中沸点工质 R23 比例在 0.11 上下小范围内波动,在压比大于 10 之后上升至 0.155 1。

从图 13 中可以看出,当循环冷凝器出口温度和蒸发器出口温度一定时,循环热力学完善度最大时,随着压缩机压比上升,最优时循环制冷量在 90 ~ 100 W 范围内上下波动,压缩机耗功从 361.6 W 先减小再不断增加至 475.2 W,循环 COP 从 0.270 6 先增加再不断减小至 0.185 3,压比为 7 时最优时的

COP 最大,为 0.271 4。

3.5 模拟值与实验值对比分析

为了验证系统模拟结果的准确性,在文献[31]对三级自复叠制冷系统的实验基础上,使用该模型对系统性能进行分析。该实验系统选用 R134a/R23/R14 作为制冷剂,质量比为 65/20/15,系统稳定运行时高压 2 300 kPa,低压 220 kPa,将部分实验数据作为模拟部件的输入参数进行模拟,得到各测点的模拟数据,与实验时各测点温度对比如表 2 所示。

由表 2 可见,模拟值与实验值的误差多数都在 10% 以内,而压缩机排气温度模拟值和实验值相差较大,这是由于压缩机吸气温度为 -28.3 ℃ (与实验值 -26 ℃ 较为接近),而此时温度已经低于露点温度,所以压缩机压缩已经带液,造成模拟产生错误,因此排气温度值不准确。为了防止压缩带液,应在实际充注制冷剂时增加低沸点工质的含量,以降低露点温度,在该工况下模拟所得的最佳配比为 R134a/R23/R14 = 0.51/0.10/0.39,显然与趋势相符。

表 2 各测点模拟数据与实验温度

Tab.2 Simulated data and experimental temperature at each measurement point

测点	t/℃	实验温 度/℃	p/ 10 ⁻³ kPa	R134a/R23/R14%	干度
1	-28.3	-26.0	2.2	65/20/15	0.6488
2	-15.6	125.1	23	65/20/15	1
3	22.0	20.2	22.95	65/20/15	0.3283
4	22.0	22.0	22.95	79.36/16.45/0.04	0
5	22.0	22.8	22.95	32.74/27.97/39.29	1
6	-30.1	-32.2	22.9	32.74/27.97/39.29	0.3680
7	-30.1	-30.1	22.9	48/33.52/17.48	1
8	-30.1	-29.8	22.9	0.04/18.24/77.54	0
9	-68.3	-68.3	22.85	0.04/18.24/77.54	0
10	-110.9	-114.2	2.35	0.04/18.24/77.54	0.3612
11	-100.3	-100.3	2.3	0.04/18.24/77.54	0.8172
12	-63.6	-74.2	2.3	48/33.52/17.48	0.3314
13	-76.2	-80.2	2.3	32.74/27.97/39.29	0.5241
14	-59.1	-50.6	2.25	32.74/27.97/39.29	0.6847
15	-35.3	-34.5	2.25	79.36/16.45/0.04	0.3786
16	-35.6	-39.1	2.25	65/20/15	0.4866

4 结 论

采用改进的遗传算法开展自动复叠制冷系统优化研究,通过 VBA 控制 Aspen Plus 软件进行优化运算,得出了不同蒸发器出口温度、冷凝器出口温度、压缩机压比时系统性能最优时混合工质的质量配比,为实际自动复叠制冷系统设计和制冷剂充注提供了理论数据。

优化得到不同蒸发器出口温度、冷凝器出口温度、压缩机压比对系统性能最优时混合工质的质量配比的影响。与文献[29]三级自动复叠制冷系统的实验值进行对比,发现模拟值与实验值的误差多数都在 10% 以内,只有压缩机排气温度模拟值和实验值相差较大,原因是由于实验中压缩机吸气带液,模拟在吸气带液时会出现错误。

参考文献:

[1] 杜 垲,廖开蒙. 自然复叠制冷系统初探[J]. 低温工程 2002 (3):29-33.
DU Kai, LIAO Kai-meng. Primary exploration of auto refrigerating cascade(ARC) system [J]. Cryogenic engineering, 2002 (3) : 29-33.

[2] ISSIMER Dale J. Refrigeration conversion of auto refrigerating cascade(ARC) system [J]. International Journal of Refrigeration, 1997,20(3) :201-207.

[3] 芮胜军,张 华,张书春. 自复叠制冷系统混合工质配比研究 [J]. 低温与超导,2012,40(3) :64-68.
RUI Sheng-jun, ZHANG Hua, ZHANG Shu-chun. Study on the mixture ratio of auto refrigerating cascade(ARC) system[J]. Low temperature and superconductivity, 2012,40(3) :64-68.

[4] 徐士鸣,张 丽,高红岩. R290/R744 新型低温混合工质物性分析[J]. 大连理工大学学报,2013,53(5) :642-646.
XU Shi-ming, ZHANG Li, GAO Hong-yan. Analysis of R290/R744 new low temperature mixed working properties [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013,53(5) :642-646.

[5] GONG Mao-qiong, WU, et al. Development of a -186 ℃ cryogenic preservation chamber based on a dual mixed-gases Joule-Thomson refrigeration cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2012,36 (1) :188-192.

[6] 许雄文,刘金平,曹 乐,等. 非共沸混合工质在制冷循环中浓度偏移分析[J]. 化工学报,2011,62(11) :3066-3072.
XU Xiong-wen, LIU Jin-ping, CAO Le, et al. Concentration migration analysis of non-azeotropic mixed working medium in refrigeration cycle[J]. Journal of Chemical Engineering, 2011,62(11) :

3066-3072.

- [7] KIM S G, KIM M S. Experiment and simulation on the performance of an auto-cascade refrigeration system using carbon dioxide as a refrigerant[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(8):1093-1101.
- [8] 朱军韬,张 华. 单级自动复叠混合工质制冷循环的实验研究[J]. 低温与超导, 2012, 40(1):53-56, 61.
- ZHU Jun-tao, ZHANG Hua. Experimental study on the refrigeration cycle of single-stage auto-cascade hybrid working medium[J]. Low temperature and superconductivity, 2012, 40(1):53-56, 61.
- [9] 钱文波,晏 刚,冯永斌,等. 应用不同混合工质的自复叠制冷机组性能的理论分析[J]. 低温与超导, 2008(10):14-18, 38.
- QIAN Wen-bo, YAN Gang, FENG Yong-bin, et al. Theoretical analysis of the performance of auto-cascade refrigeration units with different mixed working qualities[J]. Low temperature and superconductivity, 2008(10):14-18, 38.
- [10] 罗二仓,公茂琼,周 远. 30 K~60 K 温区混合工质内复叠节流制冷循环及其实验验证[J]. 工程热物理学报, 2000(2):142-146.
- LUO Er-cang, GONG Mao-qiong, ZHOU Yuan. Refrigeration cycle of auto-cascade throttling in mixed working medium in temperature zone 30 K~60 K and experimental verification[J]. Journal of engineering thermo physics, 2000(2):142-146.
- [11] 杜 垲,徐卫荣. R134a/R123 自然复叠式热泵系统浓度配比分析[J]. 制冷学报, 2009, 30(2):33-38.
- DU Kai, XU Wei-rong. Analysis of R134a/R123 auto-cascade heat pump system concentration ratio[J]. Journal of refrigeration, 2009, 30(2):33-38.
- [12] 龙建佑,朱冬生,陈 礼. 采用自然复叠制冷-40℃低温冷柜的仿真设计[J]. 流体机械, 2007(5):83-86.
- LONG Jian-you, ZHU Dong-sheng, CHEN Li. The auto-cascade refrigeration - 40℃ low temperature freezer simulation[J]. Journal of Fluid Machinery, 2007(5):83-86.
- [13] 芮胜军,张 华,贺 滔,等. 自动复叠制冷系统非共沸混合工质组分变化特性[J]. 制冷学报, 2016, 37(4):39-45.
- RUI Sheng-jun, ZHANG Hua, HE Tao, et al. Variation characteristics of non-azeotropic mixed working material components in auto refrigerating Cascade (ARC) system[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(4):39-45.
- [14] 张 华,刘占杰,荆 磊,等. 一种三级自动复叠制冷系统的试验研究[J]. 低温与超导, 2005(4):24-26, 32.
- ZHANG Hua, LIU Zhan-jie, JING Lei, et al. Experimental study of a three-stage auto refrigerating cascade (ARC) system[J]. Low Temperature and Superconductivity, 2005(4):24-26, 32.
- [15] 李娟娟,张 华,芮胜军. 带旁通的三级自动复叠制冷系统性能研究[J]. 低温与超导, 2014, 42(1):78-81.
- LI Juan-juan, ZHANG Hua, RUI Sheng-jun. Study on the performance of three-stage auto refrigerating cascade (ARC) system with bypass[J]. Low Temperature and Superconductivity, 2014, 42(1):78-81.
- [16] 肖丽媛,张 华,张庆庆. 三级自动复叠制冷系统混合工质运行过程分析[J]. 制冷技术, 2017, 37(1):38-43, 72.
- XIAO Li-yuan, ZHANG Hua, ZHANG Qing-qing. Analysis of mixed operation process of tertiary auto refrigerating cascade (ARC) system[J]. Refrigeration Technology, 2017, 37(1):38-43, 72.
- [17] 徐言生,余华明. 基于 Aspen Plus 的自然复叠制冷系统过程模拟分析[J]. 顺德职业技术学院学报, 2009, 7(4):29-31.
- XU Yan-sheng, YU Hua-ming. Simulation analysis of auto refrigerating cascade (ARC) system based on Aspen Plus[J]. Journal of Shunde Vocational and Technical College, 2009, 7(4):29-31.
- [18] 王云龙,高 龙,邱实诚. 基于 Aspen Plus 的 NH₃/CO₂ 复叠式制冷系统仿真研究[J]. 中国化工贸易, 2015, 7(24):192-193.
- WANG Yun-long, GAO Long, QIU Shi-cheng. Simulation study of NH₃/CO₂ cascade refrigeration system based on Aspen Plus[J]. China Chemical Trade, 2015, 7(24):192-193.
- [19] WANG Q, LI D H, WANG J P, et al. Numerical investigations on the performance of a single-stage auto-cascade refrigerator operating with two vapor-liquid separators and environmentally benign binary refrigerants[J]. Applied Energy, 2013, 112(16):949-955.
- [20] 王宏进. 基于粒子群算法和 Aspen Plus 的有机朗肯循环系统性能优化研究[D]. 北京:北京工业大学, 2016.
- WANG Hong-jin. Performance optimization of organic rankine cycle system based on particle swarm algorithm and Aspen Plus [D]. Beijing:Beijing University of Technology, 2016.
- [21] 王 勤. 混合工质节流制冷机的理论与实验研究[D]. 浙江:浙江大学, 2002.
- WANG Qin. Theoretical and experimental study of a hybrid working mass throttling refrigerator [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2002.
- [22] 周 明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.
- ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Principle and application of genetic algorithm[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
- [23] 王 丰,吉庆丰,王东海,等. 基于遗传算法的冷却塔管式配水系统优化设计计算研究[J]. 热能动力工程, 2015, 30(6):921-925, 975-976.
- WANG Feng, JI Qing-feng, WANG Dong-hai, et al. Study on optimal design and calculation of cooling tower tubular water distribu-

- tion system based on genetic algorithm[J]. Thermal Power Engineering, 2015, 30(6): 921–925, 975–976.
- [24] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 2002, 24(4): 656–667.
- [25] 徐承爱, 林伟, 肖红. 一种基于加权海明距离的自适应遗传算法[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2015, 47(6): 121–127.
- XU Cheng-ai, LIN Wei, XIAO Hong. An adaptive genetic algorithm based on weighted hamming distance[J]. Journal of south China normal university (natural science edition), 2015, 47(6): 121–127.
- [26] 谢 谢, 刘吉臻, 曾德良, 等. 基于自适应遗传算法的协调控制系统优化[J]. 热能动力工程, 2011, 26(4): 432–435, 494.
- XIE Xie, LIU Ji-zhen, ZENG De-liang, et al. Optimization of coordinated control system based on adaptive genetic algorithm[J]. Thermal Energy and Power Engineering, 2011, 26(4): 432–435, 494.
- [27] 蔡振兴. Aspen Plus 与 VisualC++ 混合编程在化工模拟中的应用[J]. 上海化工, 2014, 39(2): 23–25.
- CAI Zhen-xing. Application of mixture programming of Aspen Plus and VisualC++ in chemical engineering simulation[J]. Shanghai Chemical Engineering, 2014, 39(2): 23–25.
- [28] 王小平, 曹立明. 遗传算法 – 理论、应用及软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic algorithms - theory, application and software implementation[M]. Xi'an: Xi'an jiaotong university press, 2002.
- [29] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. Matlab 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社 2005.
- LEI Ying-jie, ZHANG Shan-wen, LI Xu-wu, et al. Matlab genetic algorithm toolbox and application[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2005.
- [30] 公茂琼, 吴剑峰, 罗二仓. 深冷混合工质节流制冷原理及应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2014.
- GONG Mao-qiong, WU Jian-feng, LUO Er-cang. Principle and application of cryogenic mixed working material throttling refrigeration[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2014.
- [31] 陆向阳. 三级自动复叠制冷循环的实验研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2004.
- LU Xiang-yang. Experimental study of three-stage automatic cascade refrigeration cycle[D]. Shanghai: Shanghai University of Technology, 2004.

(姜雪梅 编辑)

(上接第 18 页)

- [10] 李娟娟. 带旁通的三级自复叠制冷系统实验研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2014.
- LI Juan-juan. Experimental research on three-stage automatic capitation refrigeration system with bypass[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2014.
- [11] 芮胜军. 带两路旁通的三级自复叠制冷系统实验研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2014.
- RUI Sheng-jun. Experimental research on three-stage automatic capitation refrigeration system with two-passage bypass[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2014.
- [12] 张行周, 钟晓晖, 吴玉庭, 等. 单兵空调系统研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(6): 749–752.
- ZHANG Xing-zhou, ZHONG Xiao-hui, WU Yu-ting, et al. Study of soldier's air-conditioning systems[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(6): 749–752.
- [13] 袁卫星, 杨宇飞, 廖翼兵, 等. 基于微型蒸汽压缩制冷循环的个体冷却系统研制[C]//2011 中国制冷学会学术年会. 2011.
- YUAN Wei-xing, YANG Yu-fei, LIAO Yi-bing, et al. Development of individual cooling system based on miniature steam compression refrigeration cycle[C]//2011 Annual Meeting of China Refrigeration Society, 2011.
- [14] 杨宇飞, 袁卫星, 杨波, 等. 基于蒸汽压缩制冷循环的便携式微环境冷却系统研究[J]. 航空学报, 2013, 34(11): 2500–2509.
- YANG Yu-fei, YUAN Wei-xing, YANG Bo, et al. Study of a portable microclimate cooling system based on vapor compression refrigeration cycle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(11): 2500–2509.
- [15] 桑 岱, 孙淑凤, 胡 洋, 等. 微型蒸汽压缩制冷系统实验研究[J]. 低温与超导, 2013, 41(1): 27–32.
- SANG Dai, SUN Shu-feng, HU Yang, et al. Experimental investigation of a miniature vapor compression refrigeration system[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2013, 41(1): 27–32.

(单楚舒 编辑)