

# 小型制冷设备非共沸制冷剂充注量估算优化

陆宏杰<sup>1</sup>, 张忠斌<sup>1</sup>, 胡昕昊<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>江苏省能源系统过程转化与减排技术工程实验室, 能源与机械工程学院, 南京师范大学, 南京 210042)

(Tel:13515112510; Email:zhangzhongbin@njnu.edu.cn)

**摘要:** 风冷压缩冷凝机组与冷风机是应用十分广泛的制冷系统, 而非共沸制冷剂 R404A、R407A 和 R407F 在小型制冷系统中具有前景, 其充注量对制冷设备性能存在影响。在实际的工程应用中, 由于制冷剂和机组的匹配多样, 厂家难以标定准确的制冷剂充注量, 使制冷设备维护工作十分不便。本文提出了一种优化的内容积估算法对非共沸制冷剂充注量进行估算, 并对一台 5-HP 中温型风冷压缩冷凝机组进行试验测量, 结果表明该计算方法具有较高的准确性, 且结果符合欠量要求, 对非共沸制冷剂充注有一定的借鉴意义。

**关键词:** 制冷剂充注 内容积估算 R404A R407A R407F 制冷设备

## OPTIMIZED METHOD FOR ESTIMATING THE REFRIGERANT CHARGE AMOUNT OF SMALL REFRIGERATION EQUIPMENT

Lu Hongjie<sup>1</sup>, Zhang Zhongbin<sup>1</sup>, Hu Xinhao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Engineering Laboratory of Energy System Conversion and Emission Reduction of Jiangsu Province, School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, Jiangsu, China)

**Abstract** Refrigeration systems consisted by air cooled compressor and air coolers are widely used. Non-azeotropic refrigerants, like R404A, R407A and R407F, are promising in small refrigeration system of which the refrigerant charge amount has an effect on the performance of small refrigeration system. In practices, because of the various combinations of refrigerant and equipment, it is difficult for the manufacturers to calibrate the accurate refrigerant charge amount. It is very inconvenient to maintain the refrigeration system. This paper proposes an optimized inside capacity estimation algorithm for estimating the refrigerant charge amount of non-azeotropic refrigerants. Experiments on a 5-HP medium-temperature air cooled equipment are conveyed. It proves that the method shows good accuracy and the results are meet the charge rules. The optimized method has positive reference value for the refrigerant charge of non-azeotropic refrigerants.

**Keywords** refrigerant charge inside capacity estimation R404A R407A R407F refrigeration equipment

## 0 前言

目前制冷剂充注量的研究主要在于对充注量的标定[1-2]和对机组性能的分析上[3]。而制冷剂充注量对制冷设备的性能存在影响[4-5], 工程上确定最佳充注量时通常只是依靠多次试验的经验估计值来进行决定, 这种方式不仅效率低, 也导致了成本的增加。现有的估算制冷剂充注量的方法主要有空泡系数法和内容积估算法[6], 工程上多采用第二种方法[7]。已有研究大多是对单元制冷剂的估算[8], 对于非共沸制冷剂等多元制冷剂, 传统的内容积估算法无法准确估算制冷剂质量并满足欠量充注的要求。空泡系数法计算较为精确但模型十分复杂[9], 对于冷冻冷藏设备, 非共沸混合制冷剂替代是未来的发展方向[10], 如 R404A[11]、R407A 和 R407F[12], 他们均存在温度滑移的问题[13], 且 R455A 更为显著[14], 更需要注意欠量充注要求[15]。

因此, 为了准确估算风冷压缩冷凝机组中非共沸制冷剂充注量, 本文提出了一种优化的内容积估算法, 通过确定各部件内不同制冷剂状态下的比容计算制冷剂的质量并进一步求和得到总的制冷剂充注量估算值。对从高温到低温变环境温度工况下 R404A、R407A 和 R407F 三种制冷剂在一台 5-HP 中温型风冷压缩冷凝制冷设备中的充注试验进行制冷剂充注量估算, 理论计算结果和试验结果展现出较好的吻合度, 且符合欠量充注的要求。

## 1 样机及其测试装置

试验样机为一台 5-HP 冷风机、风冷压缩冷凝制冷设备。冷风机型号为 LFF35/9.0M, 额定风量 6800m<sup>3</sup>/h; 风冷压缩冷凝机组制冷剂为 R404A, 制冷量为 10320W (蒸发温度为-5℃)、8670W (蒸发温度为-10℃)、7070W (蒸发温度为-15℃), 压缩机为丹佛斯漩涡式压缩机, 型号为 MLZ038。

图 1 为试验样机, 主要包括室内机和室外机两部分。制冷系统相应的温度和压力测点分别布置在压缩

基金项目: 江苏省教育厅高校自然科学基金(15KJD470001)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX18\_0370)

作者简介: 陆宏杰 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 数据中心热环境性能分析及制冷空调节能优化

通讯作者: 张忠斌 (1980-), 男, 副教授, 主要研究方向: 数据中心热环境性能分析、制冷空调设备性能优化和试验新方法研究 (E-mail:zhangzhongbin@njnu.edu.cn)

机、冷凝器、热力膨胀阀和蒸发器的进出口。由于 R404A 与 R407A、R407F 热力性质不一样，故将 R404A 专用热力膨胀阀和 R407 系列专用热力膨胀阀并联使用，在充注不同制冷剂时通过球阀控制两膨胀阀的通断。



图 1 试验样机

低温低压的过热蒸汽在蒸发器中吸热汽化后经压缩机压缩成为高温蒸汽，进入冷凝器中，被冷凝机组侧的室外空气冷却为过冷高温高压的液态制冷剂，然后进入高压储液器，经干燥器、视液镜后进入膨胀阀，节流减压后回到蒸发器，最后进入压缩机进行如此循环。

## 2 制冷剂充注量估算

参考国家标准 GB/T 21363-2008[16]、GB/T 25129-2010[17]、欧盟能源标准[18]以及夏热冬冷地区的环境温度，选取 4 种工况如表 1 所示。

表 1 试验工况

| 环境温度 (°C) | 蒸发温度 (°C)* | 吸气温度 (°C) |
|-----------|------------|-----------|
| 32        |            |           |
| 25        |            |           |
| 15        | -7         | /         |
| 5         |            |           |

\* 通过控制室内侧环境温度来实现蒸发温度

传统的内容积估算法采用制冷剂质量占系统内各个设备及部件的内容积百分比来估算系统整体的制冷剂充注量[19-20]，占比数值通常是经验数值。不同种类的制冷剂物理性质有所差异，经验数值往往无法对每一种制冷剂有很好的适应性，尤其是非共沸混合制冷剂，其独特的物理性质使其在两相区的物质分布与单元制冷剂有显著的差距[21]。因此，在估算非共沸混合制冷剂充注量时，采用传统的内容积估算法估算的制冷剂充注量往往不具有较好的准确性。

本文采用优化的内容积估算法进行制冷剂充注量估算，按系统各部分制冷剂状态的不同分段计算各部件的内容积。因试验样机系统中干燥器与视液镜的内部不易测量，故将实验样机系统中干燥器及视液镜两者截面尺寸视为与之连接的管道尺寸一致，压缩机容积也考虑在内，求得制冷系统内容积总和。

制冷剂的质量按公式(1)计算。制冷剂的比容可通过给定工况对应的状态点查询，系统各部件及管道尺寸可由游标卡尺等直接测得。

单相区制冷剂充注量可通过下式 (1) 求得，根据各设备和部件测量的压力值与制冷剂平均温度查的制冷剂在该工况的比容，按不同分段的内容积求得该部分的制冷剂质量。

$$m = \frac{V}{v(p_v, T_v)} \quad (1)$$

式中  $m$  为制冷剂质量, kg ;  $v$  为制冷剂对应比容,  $m^3/kg$ ;  $V$  为制冷系统部件内容积  $m^3$ ,  $p_v$  为压力, Pa ;  $T_v$  为制冷剂平均温度, K。

两相区制冷剂充注量估算方式如式 (2) :

$$m_t = m_g + m_l = A \int_0^{l_s} \left[ \frac{\alpha}{v_g} + \frac{1-\alpha}{v_l} \right] dl \quad (2)$$

式中  $m_t$  为制冷剂总质量, kg ;  $m_g$  为气态制冷剂质量, kg ;  $m_l$  为液态制冷剂质量, kg ;  $A$  为管路截面积;  $l_s$  为两相区长度, m;  $\alpha$  为空泡系数。

其中空泡系数  $\alpha$  计算方法见式 (3) :

$$\alpha = \frac{k_H}{1 + \left(\frac{1}{x} - 1\right) \frac{v_l}{v_g}} = k_H \beta \quad (3)$$

式中  $x$  为干度,  $\beta$ 、 $k_H$  为系数, 其中系数  $k_H$  为与系数  $Z$  相关的函数, 系数  $Z$  的计算方法见式 (4), 对应关系见表 2。

$$Z = \left[ \frac{D_i G}{\mu_1 + \alpha(\mu_g - \mu_1)} \right]^{\frac{1}{6}} \left\{ \frac{1}{g D_i} \left[ \frac{G_x v_g}{\beta(1-\beta)} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{8}} \quad (4)$$

其中:  $G$  为质量流速,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\mu$  为粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $D_i$  为管内径,  $\text{m}$ 。

表 2  $k_H$  与  $Z$  的对应关系表

|       |       |       |       |      |       |       |      |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| Z     | 1.3   | 1.5   | 2.0   | 3.0  | 4.0   | 5.0   | 6.0  |
| $k_H$ | 0.185 | 0.225 | 0.325 | 0.49 | 0.605 | 0.675 | 0.72 |
| Z     | 8.0   | 10.0  | 15    | 20   | 40    | 70    | 130  |
| $k_H$ | 0.767 | 0.78  | 0.808 | 0.83 | 0.88  | 0.93  | 0.98 |

试验样机中制冷剂流经的部件主要有压缩机、冷凝器、储液器、干燥器、视液镜、膨胀阀、蒸发器以及各连接管道。测量系统各部件的尺寸及内容积计算结果见表 3。

表 3 制冷剂流经的各部件尺寸

|          | 长度 L(m) | 直径 D(m) | 体积 V(m <sup>3</sup> ) |
|----------|---------|---------|-----------------------|
| 压缩机进口    | 1.4     | 0.02    | 0.0004396             |
| 压缩机出口    | 1.75    | 0.013   | 0.0002322             |
| 冷凝器进口    | 0.9     | 0.019   | 0.0002550             |
| 冷凝器出口    | 0.85    | 0.019   | 0.0002409             |
| 高压储液器    | 1       | 0.1     | 0.0078500             |
| 高压储液器进口  | 0.81    | 0.012   | 0.0000916             |
| 高压储液器出口  | 1.65    | 0.012   | 0.0001865             |
| 内外机连接管气侧 | 1.2     | 0.017   | 0.0002722             |
| 内外机连接管液侧 | 1.2     | 0.012   | 0.0001356             |
| 蒸发器      | 90      | 0.009   | 0.0019080             |
| 冷凝器      | 70      | 0.009   | 0.0014750             |
| 压缩机      |         |         | 0.0001140             |

以环境温度  $32^\circ\text{C}$  为例, 该工况下的 R404A、R407A、R407F 三种制冷剂的理论充注量计算结果见表 2, 最终从估算结果可以看出, 三种制冷剂的充注量差异较小, 分别为 4.567kg、4.627kg、4.535kg。

表 3 制冷剂理论充注量计算结果

|            | 体积 V(m <sup>3</sup> ) | 比容 v (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) |         |         | 质量 M(kg) |         |         |
|------------|-----------------------|---|---------|---------|----------|---------|---------|
|            |                       | R404A                                   | R407A   | R407F   | R404A    | R407A   | R407F   |
| 压缩机进口管道    | 0.0004396             | 0.0463                                  | 0.0516  | 0.054   | 0.0095   | 0.00852 | 0.00814 |
| 压缩机出口管道    | 0.0002322             | 0.011                                   | 0.0127  | 0.0136  | 0.02111  | 0.01828 | 0.01707 |
| 冷凝器进口管道    | 0.000255              | 0.011                                   | 0.0127  | 0.0136  | 0.02319  | 0.02008 | 0.01875 |
| 冷凝器出口管道    | 0.0002409             | 0.00103                                 | 0.00093 | 0.00096 | 0.2335   | 0.2586  | 0.2523  |
| 高压储液器      | 0.00785               | 0.00837                                 | 0.00975 | 0.0117  | 0.9377   | 0.8049  | 0.6709  |
| 高压储液器进口管道  | 0.0000916             | 0.00103                                 | 0.00093 | 0.00096 | 0.08874  | 0.09832 | 0.09591 |
| 高压储液器出口管道  | 0.0001865             | 0.00103                                 | 0.00093 | 0.00096 | 0.1808   | 0.2003  | 0.1954  |
| 内外机连接气侧管道  | 0.0002722             | 0.0404                                  | 0.0456  | 0.0477  | 0.00674  | 0.00597 | 0.00571 |
| 内外机连接液侧管道  | 0.0001356             | 0.00103                                 | 0.00093 | 0.00096 | 0.1315   | 0.1457  | 0.1421  |
| 蒸发器 (液态部分) | 0.001272              | 0.00085                                 | 0.00078 | 0.0008  | 1.496    | 1.621   | 1.582   |
| 蒸发器 (气态部分) | 0.004451              | 0.0404                                  | 0.0456  | 0.0477  | 0.1102   | 0.09761 | 0.09331 |
| 冷凝器 (液态部分) | 0.001844              | 0.00837                                 | 0.00975 | 0.0102  | 0.2203   | 0.1891  | 0.1808  |
| 冷凝器 (气态部分) | 0.0003688             | 0.00107                                 | 0.00096 | 0.00098 | 0.3443   | 0.3845  | 0.3752  |
| 压缩机        | 0.000114              | 0.0463                                  | 0.0516  | 0.0008  | 0.00246  | 0.00221 | 0.1418  |
| 总质量        | /                     | /                                       | /       | /       | 3.806    | 3.855   | 3.779   |
| 修正总质量      | /                     | /                                       | /       | /       | 4.567    | 4.626   | 4.535   |

应用同样的估算方式对该机组在  $25^\circ\text{C}$ 、 $15^\circ\text{C}$  和  $5^\circ\text{C}$  等三个工况下进行制冷剂充注量估算, R404A, R407A 和 R407F 三种非共沸制冷剂的充注量估算值如表 4。

表 4 R404A, R407A 和 R407F 在四种工况下的制冷剂充注量估算值

| 环境温度 ( $^\circ\text{C}$ ) | R404A 充注量估算值(kg) | R407A 充注量估算值(kg) | R407F 充注量估算值(kg) |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 32                        | 4.567            | 4.626            | 4.535            |
| 25                        | 4.311            | 4.307            | 4.311            |

|    |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|
| 15 | 4.140 | 4.184 | 4.183 |
| 5  | 4.000 | 4.097 | 4.093 |

通过试验测试能效比、制冷量等性能参数,并根据过冷度、过热度、排气温度等性能参数得出的 R404A, R407A 和 R407F 制冷剂在不同环境温度下的推荐充注量情况见表 5。由试验得到的推荐制冷剂充注量范围最具代表性,但耗时长、成本高且分析过程复杂,在此作为参照值评估本种优化的内容积估算法的准确性与适应性。

表 5 R404A, R407A 和 R407F 试验推荐充注量

| 环境温度(°C) | 推荐充注量(kg) |           |           | 全年推荐充注量(kg) |           |           |
|----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
|          | R404A     | R407A     | R407F     | R404A       | R407A     | R407F     |
| 32       | 5.00~5.35 | 5.00~5.25 | 4.70~4.95 |             |           |           |
| 25       | 5.17~5.52 | 5.16~5.42 | 4.85~5.11 |             |           |           |
| 15       | 5.30~5.67 | 5.38~5.65 | 5.07~5.33 | 5.00~5.71   | 5.00~5.89 | 4.70~5.56 |
| 5        | 5.34~5.71 | 5.61~5.89 | 5.28~5.56 |             |           |           |

将 R404A, R407A 和 R407F 三种非共沸混合制冷剂在四种工况下的制冷剂充注量估算值与试验得出的推荐范围对比,结果表明采用该种优化的内容积估算法求得的制冷剂充注量估算值与试验得出充注范围误差在 0.2~1.8kg,对于多种非共沸混合制冷剂及多个工况都能够很好地满足欠量充注要求,对工程实践有参考意义。此外,随着环境温度递减,估算值递减,而试验推荐值递增,这种现象的原因可能是:循环流量的降低导致多处压力降低,比容增加,故在计算时使估算值降低。

### 3 结论

本文采用一种优化的内容积估算法对 R404A、R407A 和 R407F 三种非共沸制冷剂的充注量进行估算,优化的内容积估算法对单相区和两相区制冷剂质量的估算都比传统方法更为准确,得到以下结论:

(1) 用优化的内容积估算法可以得到制冷剂充注量的估算值,具有一定的工程参考价值。

(2) 由于非共沸制冷剂存在温度滑移的问题,估算值是欠量的,三种制冷剂的欠量估算结果相近,符合欠量要求。

(3) 本文研究的 R404A、R407A 和 R407F 制冷剂均为非共沸制冷剂,滑移温度较小。对于未来具有大滑移温度的非共沸替代工质 R455A 的充注需要做进一步的研究。

### 参考文献

- [1] Ghoubali R, Byrne P, Bazantay F. Refrigerant charge optimisation for propane heat pump water heaters[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 76:230-244.
- [2] Pang W, Liu J, Xu X. A strategy to optimize the charge amount of the mixed refrigerant for the Joule - Thomson cooler[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 69:466-479.
- [3] Zhang Z, Du K, Huang H, et al. Experimental study on impact of refrigerant charge on performance of room air conditioner with micro-channel evaporator[J]. Dongnan Daxue Xuebao, 2014, 44(3):567-572.
- [4] Cheng X, Zhai X, Wang R. Thermal performance analysis of a packed bed cold storage unit using composite PCM capsules for high temperature solar cooling application[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100:247-255.
- [5] Vaitkus, L, and V Dagilis. Refrigerant charge reduction in low-temperature transport refrigerator with the eutectic plate evaporator[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 47:46-57.
- [6] 王玉贵, 夏曦. 中小型空调器制冷剂最佳充注量的确定[J]. 暖通空调, 1999, 29(1):41-43.
- [7] 徐德胜. 制冷空调原理与设备[M]. 上海交通大学出版社. 1996. 230
- [8] 王文斌, 李廷永, 余晓明等. 小型风冷热泵制冷剂最佳充注量实验研究[J]. 制冷与空调, 2005, 5(6): 77-79.
- [9] 李会芳, 胡张保, 吕彦力, 等. 空泡系数模型在空调器制冷剂充注量计算中的应用[J]. 低温与超导, 2014(9):74-77.
- [10] 李大伟, 晏刚, 宋新洲, 等. 非共沸碳氢混合物作为冷柜替代制冷剂的理论研究[C]// 2011 中国制冷学会学术年会. 2011.
- [11] Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrí J, Ángel Barragón, et al. Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 44(16):81-90.
- [12] Bortolini M, Gamberi M, Gamberini R, et al. Retrofitting of R404a commercial refrigeration systems using R410a and R407f refrigerants[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 55:142-152.
- [13] 成宏岗. 混合工质 R407C 温度滑移的验证[J]. 制冷, 2001(1):62-64.
- [14] Makhnatch P, Mota-Babiloni A, Khodabandeh R, et al. Characteristics of R454C and R455A as R404A alternatives in commercial refrigeration[C]// Iir Conference on Sustainability and the Cold Chain. 2018.
- [15] Mota-Babiloni A, Makhnatch P, Khodabandeh R. Recent investigations in HFCs substitution with lower GWP synthetic alternatives: focus on energetic performance and environmental impact[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 82:288-301.
- [16] GB/T 21363-2008 容积式制冷压缩冷凝机组[S]. 中国标准出版社. 2008.
- [17] GB/T 25129-2010 制冷用空气冷却器[S]. 中国标准出版社. 2010.
- [18] Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing regulation (EC) no 842/2006. Off. J. Eur. Union, 2014.
- [19] 王栋, 李蒙, 武卫东, 等. 小型 CO<sub>2</sub> 制冷系统最佳充注量的计算及实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(3):80-84.
- [20] 肖学林, 顾小刚, 刘国胜. 空调机制冷剂充注量的计算[C]// 江苏省制冷学会学术年会. 2004.
- [21] 何红萍, 马虎根, 齐鲁山. 非共沸混合制冷剂微尺度管内流动沸腾特性研究[J]. 中国工程热物理学会论文, 2011.