

水冷冷水机组测试台热平衡测量误差理论分析

刘效德 朱峰 路阳 陈涛 石毅登

(英格索兰亚太工程技术中心)

摘要 根据仪器仪表的测量精度计算水冷冷水机组测试台位热平衡的理论测量误差。分析各个直接测量参数对于热平衡偏差的贡献,提出改善办法,提升台位测量的可靠性并扩充台位的测量范围。

关键词 制冷;水冷冷水机组;热平衡;测量;误差分析

Theoretical analysis on heat balance measurement error of water-cooled chiller test bench

Liu Xiaode Zhu Feng Lu Yang Chen Tao Shi Yideng

(Ingersoll Rand Engineering & Technology Center-Asia Pacific)

ABSTRACT According to the measurement accuracy of instruments, the theory error of heat balance measurement for one water-cooled chiller test bench is calculated. The contributions of direct measurement parameters on heat balance error are analyzed, and the improvement measures are put forward to enhance the reliability and expand the scope of water-cooled chiller test bench measurement.

KEY WORDS refrigeration; water-cooled chiller; heat balance; measurement; error analysis

在产品研发和商业化生产过程中,须对产品的性能进行严格的检测鉴定,测量数据的准确性和可靠性是检测鉴定质量的重要标志,因此控制测量装置的测量误差、分析误差来源就显得极为重要^[1]。GB/T 18430.1—2007《蒸气压缩循环冷水(热泵)机组 第1部分:工业或商业用及类似用途的冷水(热泵)机组》^[2]和 AHRI Standard 550-590 (I-P)-2011 *Performance Rating of Water-Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle*^[3] 严格规定了水冷冷水机组产品设计准则。根据 GB/T 10870—2014《蒸气压缩循环冷水(热泵)机组性能试验方法》^[4] 提出的蒸气压缩循环冷水(热泵)机组性能试验方法,性能测试数据的准确性以机组测量的热平衡作为综合参照标准,热平衡须满足一定的误差范围。笔者以 1 406 kW 水冷冷水机组测试装置为例,在误差理论的基础上从仪器本身的测量精度出发,计算各直接测量参数对热平衡

总误差的贡献,分析各个直接测量参数的测量误差对总误差的影响,为验证试验测试装置的可靠性和扩充试验装置测量的适用性提供理论指导。

1 误差理论

误差理论指出:间接物理量的测试是通过直接测试量的相关函数关系计算得到,测试结果的总误差取决于各分项误差。因此,应根据给定的总体测试误差进行误差分析,并确定具体的测试方案及各分项误差^[5-6]。

根据误差理论公式,若 $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 各误差因素为随机量且互不相干,则

$$\delta_y = \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2} \quad (1)$$

式中: δ_y 为最大极限误差; D_i 为函数的各部分误差,

$$D_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

式中 δ_i 为各误差因素的极限误差。

若给定测量整体的最大极限误差为 δ , 则

$$\delta_y = \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2} \leq \delta \quad (2)$$

收稿日期:2015-08-05

作者简介:刘效德,硕士,工程师,主要研究方向为测试装置改进及系统测试优化。

D_i 的各项取值具有随机性,测量结果只要整体误差满足要求即可。若按照分项误差等作用原则进行总测量误差分配,则:

$$D_1 = D_2 = \dots = D_n = \frac{\delta_y}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$\delta_i = \frac{\delta_y}{\frac{\partial f}{\partial x_i} \sqrt{n}} \quad (4)$$

但是实际测量过程中,各个测量参数对于误差的贡献不同。

2 理论计算

2.1 机组热平衡测量误差判定依据

标准 GB 10870—2014 所规定的机组性能试验要求:主要试验与校核试验允许偏差不大于式(5)的计算值:

$$\sigma = 10.5 - 0.07 \times FL + \frac{833.3}{DT_{FL} \times FL} \quad (5)$$

式中: σ 为试验结果的允许偏差(%); DT_{FL} 为机组满负荷下的换热温差($^{\circ}\text{C}$); FL 为机组运行负荷(%).

笔者计算忽略机组测试时的漏热损失,其热平衡偏差计算见式(6):

$$\delta = \frac{|Q_{con} - (Q_{evp} + P_{com})|}{Q_{evp}} \times 100\% \leq \sigma \quad (6)$$

式中: Q_{con} 为冷凝器换热量(kW); Q_{evp} 为蒸发器换热量(kW); P_{com} 为压缩机功耗(kW)。

根据误差分配原理,热平衡理论最大偏差由各个参数的最大理论允许误差合成所得,须满足下式:

$$\sqrt{\delta_{Q_{con}}^2 + \delta_{Q_{evp}}^2 + \delta_{P_{com}}^2} \leq \sigma \quad (7)$$

2.2 理论误差计算

热平衡计算的3个物理量都是间接物理量,须通过直接测量参数计算得到,直接测量参数的测试所用仪器仪表技术要求如表1所示。

表 1 直接测量参数的仪器仪表技术要求

测点名称	仪表测量范围	仪表精度
水温/ $^{\circ}\text{C}$	-15~70	$\pm 0.04^{\circ}\text{C}$
流量/ (m^3/h)	0~350	0.5%
电压/V	0~506	0.5%
电流/A	0~500	0.5%
功率因素	0~1	0.5%

2.3 计算模型

2.3.1 计算模型的基本假设

- 1) 忽略机组漏热损失,忽略水侧压差损失;

- 2) 以符合国家标准 GB 19577—2004《冷水机组能效限定值及能源效率等级》^[7]的三级能效被测机组作为计算实例,且各机组做部分负荷测试时,都能够稳定运行到额定负荷的25%及以下;

- 3) 蒸发侧、冷凝侧换热量测量采用定水流量的液体载冷剂法;

- 4) 被测机组的输入功率主要是指压缩机的耗功。

2.3.2 蒸发侧、冷凝侧换热量

对于被测机组的冷凝侧和蒸发侧的换热量测量都是采用载冷剂间接测量,即

$$Q = c_{pw} \rho_w V_w |t_{in} - t_{out}| \quad (8)$$

式中: c_{pw} 为水的比热容($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$); ρ_w 为水的密度(kg/m^3); V_w 为水流量(m^3/h)。

根据误差理论,两侧换热量测量的最大理论误差 δQ 和最大相对误差 $E(\delta Q)$ 计算如下:

$$|\delta Q| = c_{pw} \rho_w \sqrt{\delta V_w^2 (t_{out} - t_{in})^2 + V_w^2 \delta t_{out}^2 + V_w^2 \delta t_{in}^2} \quad (9)$$

$$E(\delta Q) = \frac{|\delta Q|}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\delta V_w}{V_w}\right)^2 + \frac{\delta t_{out}^2 + \delta t_{in}^2}{(t_{out} - t_{in})^2}} \quad (10)$$

2.3.3 功率

被测机组输入功率主要测量压缩机输入功率,计算公式如下:

$$P = \sqrt{3} UI \cos \phi \quad (11)$$

式中: P 为功率(kW); U 为电压(V); I 为电流(A); $\cos \phi$ 为功率因素。

根据误差理论,功率测量的最大理论误差 δP 和最大相对误差 $E(\delta P)$ 计算如下:

$$|\delta P| = \sqrt{\delta U^2 I^2 \cos^2 \phi + \delta I^2 U^2 \cos^2 \phi + \delta \cos^2 \phi I^2 U^2} \quad (12)$$

$$E(\delta P) = \frac{|\delta P|}{P} = \sqrt{\left(\frac{\delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\delta \cos \phi}{\cos \phi}\right)^2} \quad (13)$$

3 误差分析

计算分析以测试制冷量为1406 kW的台位为例,根据国家标准 GB/T 10870—2014 要求的性能试验 IPLV(100%负荷、75%负荷、50%负荷和25%负荷)为主要计算工况。被测机组的冷量从70 kW至1406 kW(如表2所示),计算热平衡量的最大理论误差。

表 2 各工况对应的名义流量

机组冷量/kW	1 406	1 055	633	422	352	281	211	141	70
蒸发侧水流量/ (m^3/h)	240	180	108	72	60	48	36	24	12
冷凝侧水流量/ (m^3/h)	300	225	135	90	75	60	45	30	15

经假设计算,从图 1 可以看出,不同制冷量的被测机组功率测量理论最大误差随被测机组的制冷量降低而增大,尤其是在被测机组制冷量低于测试台位容量的 10% (141 kW) 时,理论最大误差迅速增大;同一被测机组的测试随着负荷的降低,误差也逐渐增大。从功率计算的 3 个参数分析,功率测量误差随负荷降低而增加的原因是由于负荷的降低,机组压缩机消耗功率降低,在机组电压一定(380 V)时,所需电流逐渐降低。因此电流互感器的测量误差是小功率测量误差的主要来源。

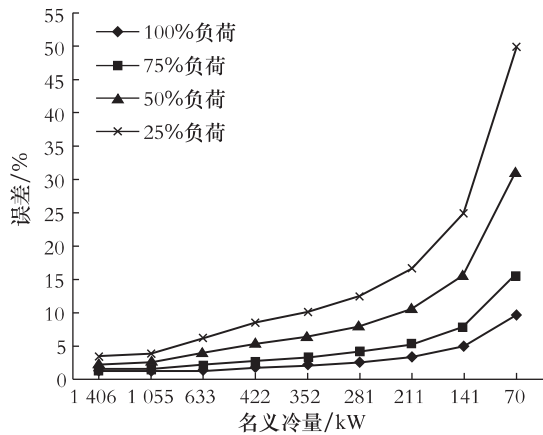


图 1 功率测量相对误差

从图 2 和图 3 可以看出,冷凝侧和蒸发侧的换热量测量的理论最大误差随着被测机组的制冷量降低而增大,尤其是在被测机组制冷量低于测试台位容量的 10% (141 kW) 时,理论最大误差迅速增加。同一机组的不同负荷测试下,25% 负荷测量误差要高于负荷在 100%、75% 和 50% 的测量;不同被测机组对比时,被测机组的制冷量越小,25% 的负荷测量误差与负荷在 100%、75% 和 50% 下的误差差值越来越小,以计算的 70 kW 为例,各个部分负荷下的理论测量误差几乎一样。从换热量计算的参数分析,温差和流量的测量共同影响换热量的测量误差,低额定制冷量的被测机组,流量测量误差为主要误差来源,同一被测机组低负荷时,换热温差降低,温度测量误差为主要误差来源。因此,在额定制冷量约为 352~1 406 kW 的被测机组的换热量测量时,误差主要是由温度测量决定的,而对于额定制冷量低于 352 kW 的被测机组其测量误差主要是由流量测量决定的。

由图 1~图 3 综合分析得:影响热平衡误差的主要直接测量参数为温度、电流和流量。在小额

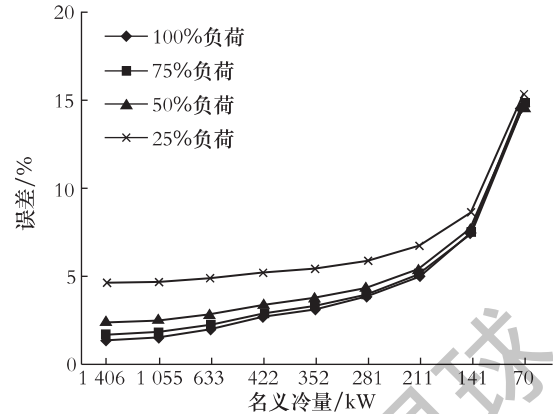


图 2 蒸发器换热量测量相对误差

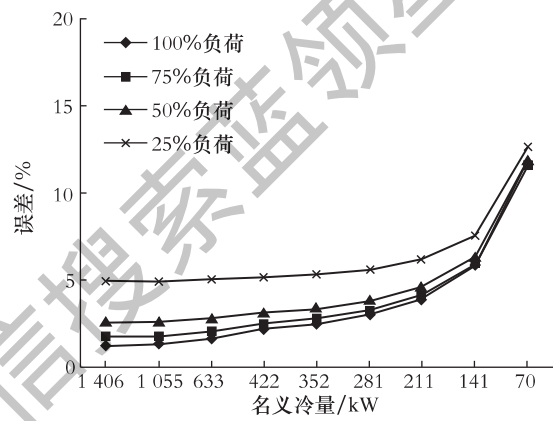


图 3 冷凝器换热量测量相对误差

定制冷量的被测机组测试时,各个参数对热平衡综合误差的贡献度为:电流测量>流量测量>温度测量。

从图 4 可以看出,对于机组的 100%、75%、50% 和 25% 负荷的性能测试,被测机组的制冷量(100% 负荷)须 ≥ 352 kW 才能符合 GB/T 10870—2014 的热平衡偏差要求(偏差在虚线以下)。因此,为扩大现有试验台位的测量范围,须依次从功率测量、流量测量和温度测量进行改善,降低测量的理论最大误差。

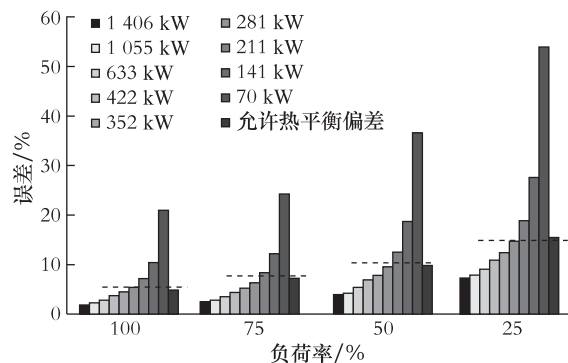


图 4 热平衡测量误差

4 改善措施

从仪器仪表本身测量精度上改善理论最大误差的措施有以下 2 种：一是提高仪器仪表测量精度，二是选择合适量程的仪器仪表。笔者在现有的基础上根据不同测量范围选择同精度适合量程的仪器仪表的方法进行测量改善。

从已有的计算分析可知，3 个主要的测量参数对于误差的贡献程度是不一样的，当被测机组额定制冷量低于 352 kW 时，首先改进电流测量装置，采用量程为 0~150 A，精度为 0.5% 的电流互感器进行测量；其次改进流量测量装置，采用量程为 0~100 m³/h，精度为 0.5% 的流量测量装置进行测量。

从图 5 可看出，改善电流测量后，功率理论测量误差大大减小，其中 70 kW 的 25% 负荷的功率测量的理论最大误差减少了 35%。

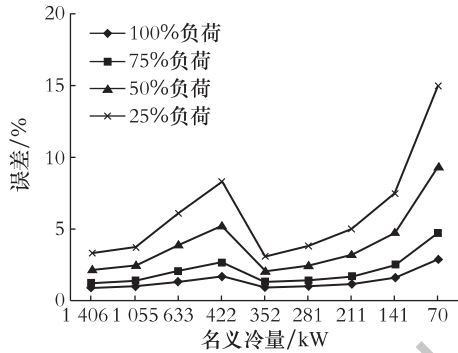


图 5 改进后功率测量相对误差

从图 6 和图 7 可看出，改善流量测量装置也可以大大减小换热量的测量误差，几乎所有的理论误差都在 5% 以下。

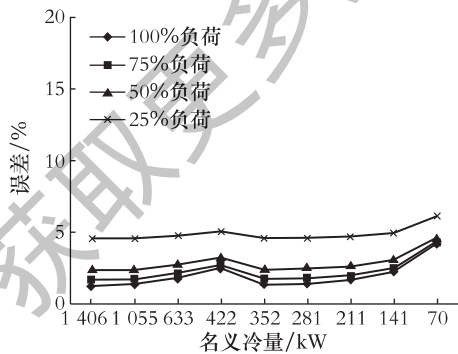


图 6 改进后蒸发器换热量测量相对误差

从图 8 可看出，经过 2 个方面改善后，热平衡测量的最大理论误差在 141~1406 kW 的范围，能够满足国家标准所规定的热平衡偏差要求（偏差在虚线以下），扩大了试验测试台位的测试范围。

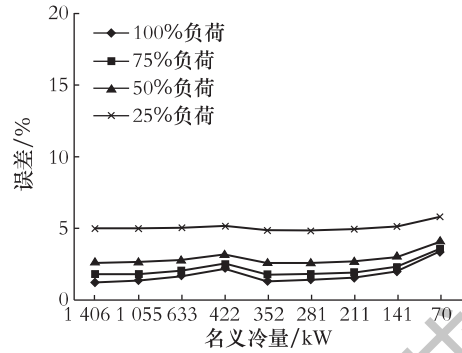


图 7 改进后冷凝器换热量测量相对误差

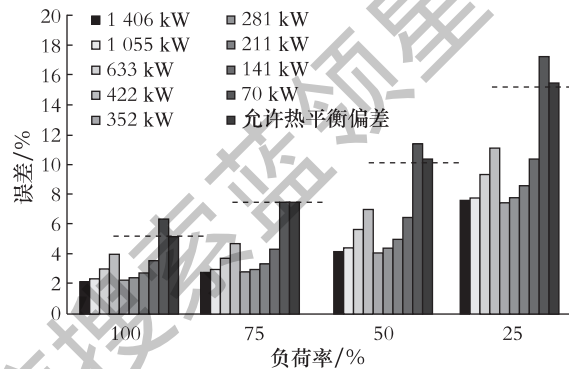


图 8 改进后热平衡测量误差

5 结论

笔者忽略测试过程中的人为、外部环境等因素，主要从仪器仪表的测量精度计算了试验台位测量的理论最大误差。分析换热量、功率及总的热平衡理论偏差，得出电流、流量和温度三大主要直接测量参数对热平衡偏差的贡献程度。提出在被测机组 100% 负荷低于 352 kW 时，增加改进的电流互感器和流量计的量程范围进行测量可以大大降低理论测量误差，使热平衡测量的最大理论误差在 141~1406 kW 范围内满足国家标准所规定的热平衡偏差要求，增加了测试台位的适应性，也为大范围测量的测试台位的设计和改善方案提供了一定的理论参考。

参考文献

- [1] 何曙,陈巍,陈荣,等.焓差法空调制冷量测量不确定度分析[J].低温与超导,2010,38(8):52-55.
- [2] 蒸气压循环冷水(热泵)机组 第 1 部分:工业或商业用及类似用途的冷水(热泵)机组:GB/T 18430.1—2007[S].
- [3] Performance Rating of Water-Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle: AHRI Standard 550-590 (I-P)-2011[S].

(下转第 52 页)

0.37%，带油分系统的 OCR 为 0.22%，这 2 个系统都满足标准的要求 (<1.5%)。因此，在进行压缩机性能测试时需要注意测试系统是否包含油分离器，特别是进行比对试验时尤为重要。即使比对试验的系统都包含油分离器，测试结果也可能有较大的偏差，这是因为回油管的管径和长度可能不一样，回油的处理方式也会不一样，有些测试系统在油分量器和回油管路上捆绑电加热器，以减少从油分离器中旁通的制冷剂，这些因素都会影响最终测试的结果。

表 3 不同测试系统制冷量测试结果

项目	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
不带油分系统/W	15 910	10 942	7 826	5 261
带油分系统/W	15 485	10 705	7 494	4 988
偏差/%	2.7	2.2	4.4	5.5

对于带油分离器的测试系统,GB/T 5773—2004^[6]中提到了一种处理方法,测试主回路和油回路中油和制冷剂混合物的质量流量,同时测试两回路的 OCR 进行修正处理。主回路的质量流量大并且稳定,因此主回路用 OCR 修正没有问题,但是油回路的质量流量较小,并且由于油中包含了制冷剂,在油管路中不断挥发,质量流量计测试时要求被测物是纯液体或纯气体,这就会导致质量流量计测试的结果波动很大,测试结果并不准确。测量两回路的质量流量和 OCR 进行修正理论是可行的,但是实际处理起来比较困难,因此一般测试时不会按照此方法进行修正。

4 结论

笔者主要从传感器和测试系统角度对压缩机

性能测试的准确性进行了研究。从分析结果可以看出,压缩机吸气压力和量热器电加热功率测试传感器的影响最大,对不确定度的贡献百分比分别为 57.16%和 38.57%,其余传感器的影响都很小,可以忽略不计,目前实验室常用传感器对制冷量带来的不确定度为 0.16%。除传感器外测试系统本身对压缩机性能测试结果也会带来一定的影响,如测试系统是否带油分离器对测量结果的最大影响可达 5.5%,因此在进行压缩机性能测试时关注传感器的同时需要关注测试系统本身。

参考文献

[1] 单元式空气调节机:GB/T 17758—2010[S].
 [2] 王枫,米小珍,慕光宇,等.润滑油循环率对活塞式制冷压缩机性能影响的实验研究[J].制冷学报,2014,35(3):33-37.
 [3] 陶宏,杨军,刘春慧,等.吸气过热度对滚动转子压缩机性能影响的试验研究[J].制冷学报,2011,32(6):25-29.
 [4] 陈向东,喻志强.压缩机性能数据的相对标准不确定度分析[J].制冷与空调,2013,13(11):62-65.
 [5] 沈希,黄跃进,鲍雨梅,等.R600a 压缩机制冷量测量的误差分析[J].压缩机技术,2004(6):6-8.
 [6] 容积式制冷剂压缩机性能试验方法:GB/T 5773—2004[S].
 [7] 电器领域不确定度的评估指南:CNAS-GL08[S].
 [8] Standard methods for volatile-refrigerant mass flow measurements using calorimeters; ANSI/ASHRAE Standard 41.9-2011[S].



(上接第 48 页)

[4] 蒸气压缩循环冷水(热泵)机组性能试验方法:GB/T 10870—2014[S].
 [5] 徐大中,糜振琥.热工测量与试验数据整理[M].上海:上海交通大学出版社,1991:15-30.

[6] 丁振良.误差理论与数据处理[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015:10-15.
 [7] 冷水机组能效限定值及能源效率等级:GB 19577—2004[S].