

水冷冷水机组测量不确定度研究

茹志鹏¹, 樊海彬², 贾磊², 钱雪峰², 刘开胜¹

(1. 重庆美的通用制冷设备有限公司 重庆 401336 ; 2. 合肥通用机械研究院 安徽 合肥 230031)

摘要 : 测量不确定度对水冷冷水机组的性能检测具有重要意义, 本文选取名义制冷量为850kW的水冷冷水机组为研究对象, 以GB/T 10870-2014规定的液体载冷剂法和机组热平衡法为主要试验和校核试验方法, 建立测量不确定度评定模型, 对实测结果的测量不确定度进行了评定, 并分析了直接测量参数对不确定度的影响趋势。结果表明: 进出口水温是影响测量不确定度评定的最主要因素, 在温度测量系统精度为0.05℃、流量测量系统精度为0.5%时, 进出口水温对合成标准不确定度的分项占比高达67.5%, 如果将测温精度分别更改为0.08℃和0.1℃, 则主侧制冷量的相对不确定度将从1.8%提升到2.7%和3.3%, 辅侧制冷量的相对不确定度将从2.2%提升到3.4%和4.2%。

关键词 : 水冷冷水机组; 测量不确定度; 精度

DOI : 10.3969/J.ISSN.2095-3429.2015.04.015

中图分类号 : TU831.4

文献标识码 B

文章编号 2095-3429(2015)04-0052-04

Measurement Uncertainty Research for Water-cooled Chillers

RU Zhi-peng¹, FAN Hai-bin², JIA Lei², QIAN Xue-feng², LIU Kai-sheng¹

(1. ChongQing Midea General Refrigeration Equipment Co., Ltd., Chongqing 401336, China; 2. Hefei General Machinery Research Institute, Hefei 230031, China)

Abstract : Measurement uncertainty is of significance in performance testing for water-cooled chillers. This article selects water cooled chillers with 850kW of nominal cooling capacity as its study objects, and adopts the liquid refrigerant method and the heat balance method as its testing and checking methods in accordance with the provisions of GB/T 10870-2014. Based on the evaluation model, the uncertainty obtained by tests is assessed, and the effect of trends of all direct measured parameters on uncertainty are also analyzed. The results show that the inlet/outlet water temperature is the most important factor affecting uncertainty measurement. When the precision of temperature and flow rate measuring is 0.05℃ and 0.5% respectively, the inlet/outlet water temperature contributes up to 67.5% to the combined standard uncertainty. If the temperature measuring precision is modified to 0.08℃ or 0.1℃, the uncertainty of evaporator cooling capacity will increase from 1.8% to 2.7% or 3.3%, and that of condenser cooling capacity will increase from 2.2% to 3.4% or 4.2%.

Key words : water-cooled chillers; measurement uncertainty; precision

0 引言

水冷冷水机组作为重要的建筑空调设备, 目前广泛应用于商场、酒店、写字楼等公共建筑, 能耗普遍偏

高^[1]。作为水冷冷水机组从设计到应用的重要一环, 性能测试是不可或缺的产品质量管控手段, 准确测量机组的制冷量、消耗功率等关键参数将对产品能效标识和工程应用起到至关重要的作用。

作者简介 : 茹志鹏(1981-), 男, 重庆人, 硕士, 工程师, 主要从事冷水机组开发及技术支持工作。

随着性能检测技术的不断成熟^[2,3],水冷冷水机组测试系统在制冷行业也开始逐步推广应用,如何完整、准确地表达检测结果已成为业界关注的重点问题。根据相关计量规程和测量规范的要求^[4],测量结果必须同时包含赋予被测量的值及与该值相关的测量不确定度,才是完整并有意义的。因此,水冷冷水机组性能检测的结果必须有测量不确定度的评定数据。根据GB/T 10870-2014的规定^[5],水冷冷水机组性能试验包括主要试验和校核试验,两者应同时进行测量;主要试验方法为液体载冷剂法,校核试验方法包括机组热平衡法、液体制冷剂流量计法和水冷冷凝器法。朱峰等人对冷水机组使用液体载冷剂法测试的不确定度进行了分析^[6],冯国强评定了冷水机组COP现场测量的不确定度^[7],但同时分析主要试验和校核试验测量不确定度的研究成果还未见报道。

本文将依据GB/T 10870-2014规定的试验方法,分别选取液体载冷剂法和机组热平衡法为主要试验和校核试验方法,在合理简化的基础上,建立测量不确定度评定模型,结合实测数据对名义制冷量为850kW的水冷冷水机组的测量不确定度进行评定,探讨影响评定结果的主要因素,为改善机组测量结果的不确定度、提高检测数据的可信程度提供建议。

1 评定模型

根据标准规定,主侧液体载冷剂法和辅侧机组热平衡法制冷量的计算式如下:

$$Q_{ne} = C_e \rho_e q_{ve} (t_1 - t_2) + Q_{ce} \quad (1)$$

$$Q_{nc} = C_c \rho_c q_{vc} (t_{w2} - t_{w1}) + Q_{1r} + Q_{11} - P - Q_{cc} \quad (2)$$

- 式中 Q_{ne} —主侧制冷量 kW;
 C_e —主侧水比热 kJ/kg·K;
 ρ_e —主侧水密度 kg/m³;
 q_{ve} —主侧水流量 m³/s;
 t —水温 °C;
 Q_{ce} —环境空气传入干式蒸发器冷水侧的修正项 kW;
 Q_{nc} —辅侧制冷量 kW;
 C_c —辅侧水比热 kJ/kg·K;
 ρ_c —辅侧水密度 kg/m³;
 q_{vc} —辅侧水流量 m³/s;
 Q_{1r} —热源侧制冷剂向环境放热的修正项 kW;
 Q_{11} —辅助设备与环境换热的修正项 kW;
 P —消耗功率 kW;
 Q_{cc} —环境向使用侧传热的修正项 kW。

考虑到实际测试情况及测量不确定度评定惯例,作出如下合理的假设:

- (1) 主侧和辅侧的水温变化约为5°C,可以认为水的比热、密度等参数为常数;
- (2) 一般来说,漏热项均会远远小于制冷量,评定测量不确定度时可忽略漏热项的影响。

因此,根据测量不确定度合成原理,主侧和辅侧制冷量、消耗功率的扩展不确定度分别表示如下:

1.1 主侧制冷量

$$U(Q_{ne}) = k \sqrt{u_1^2 + (c_2 u_2)^2 + (c_3 u_3)^2 + (c_4 u_4)^2} \quad (3)$$

式中 $U(Q_{ne})$ —主侧制冷量扩展不确定度;

k —包含因子;

u_1 —重复测量引起的A类标准不确定度分项;

u_2 —流量测试系统B类标准不确定度分项;

u_3 —主侧进水温度测试系统B类标准不确定度分项;

u_4 —主侧出水温度测试系统B类标准不确定度分项;

c_i —各项灵敏系数。

$$c_2 = \frac{\partial Q_{ne}}{\partial q_{ve}} = C_e \rho_e (t_1 - t_2)$$

$$c_3 = \frac{\partial Q_{ne}}{\partial t_1} = C_e \rho_e q_{ve}$$

$$c_4 = \frac{\partial Q_{ne}}{\partial t_2} = -C_e \rho_e q_{ve}$$

1.2 输入功率

$$U(P) = k \sqrt{u_5^2 + u_6^2} \quad (4)$$

式中 $U(P)$ —输入功率扩展不确定度;

u_5 —重复测量引起的A类标准不确定度分项;

u_6 —功率测试系统B类标准不确定度分项。

1.3 辅侧制冷量

$$U(Q_{nc}) = k \sqrt{u_7^2 + (c_8 u_8)^2 + (c_9 u_9)^2 + (c_{10} u_{10})^2 + (c_{11} u_{11})^2} \quad (5)$$

式中 $U(Q_{nc})$ —辅侧制冷量扩展不确定度;

u_7 —重复测量引起的A类标准不确定度分项;

u_8 —流量测试系统B类标准不确定度分项;

u_9 —辅侧进水温度测试系统B类标准不确定度分项;

u_{10} —辅侧出水温度测试系统B类标准不确定度分项;

u_{11} —输入功率标准不确定度。

$$c_8 = \frac{\partial Q_{nc}}{\partial q_{vc}} = C_c \rho_c (t_{w2} - t_{w1})$$

$$c_9 = \frac{\partial Q_{nc}}{\partial t_{w1}} = -C_c \rho_c q_{vc}$$

$$c_{10} = \frac{\partial Q_{nc}}{\partial t_{w2}} = C_c \rho_c q_{vc}$$

$$c_{11} = \frac{\partial Q_{nc}}{\partial P} = -1$$

2 评定结果

2.1 标准不确定度分量的A类评定

对待检测的水冷冷水机组进行7次独立的重复测量,测量数据见表1。

表1 测量数据

序号	Q_{ne} kW	P kW	Q_{nc} kW
1	853.085	184.004	850.603
2	851.687	183.957	848.110
3	851.598	183.826	847.677
4	850.221	183.693	847.292
5	849.360	183.632	846.305
6	850.261	183.753	845.284
7	850.424	183.852	845.195
平均值	850.948	183.817	847.209
标准不确定度	$u_1=0.471$ kW	$u_5=0.051$ kW	$u_7=0.709$ kW

A类方法评定的不确定度分量计算公式为:

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2} \quad (6)$$

式中 $u(x_i)$ 代表主侧制冷量、辅侧制冷量和消耗功率的A类标准不确定度分量;

x_{ik} 代表主侧制冷量、辅侧制冷量和消耗功率的第*k*次独立测量值;

\bar{x}_i 代表主侧制冷量、辅侧制冷量和消耗功率的*k*次独立测量的平均值;

$n=7$ 。

2.2 标准不确定度分量的B类评定

式(3)~(5)中涉及的测量参数取检测报告中多次测量的平均值,计算出各项灵敏系数,从而得到各个测量不确定度分量。

(1) 主侧流量测量引入的不确定度分量

灵敏系数 c_2 为20228kJ/m³ 根据检定/校准证书给出的不确定度为测量值的0.5%($k=2$), 得到标准不确定度 $u_2=1.03 \times 10^{-4}$ m³/s, 则 $c_2 u_2=2.079$ kW。

(2) 主侧进水温度测量引入的不确定度分量

灵敏系数 c_3 为172.4kW/K 根据检定/校准证书给出的标准不确定度 $u_3=0.03$ K, 则 $c_3 u_3=4.977$ kW。

(3) 主侧出水温度测量引入的不确定度分量

灵敏系数 c_4 为-172.4kW/K, 根据检定/校准证书给出的标准不确定度 $u_4=0.03$ K, 则 $c_4 u_4=-4.977$ kW。

(4) 输入功率的B类标准不确定度

功率计的最大允许误差为 $\pm 0.5\%$, 按照包含因子为2来考虑, 输入功率的B类标准不确定度为:

$$u_6 = \frac{183.317 \times 0.5\%}{2} = 0.460 \text{ kW}$$

(5) 辅侧流量测量引入的不确定度分量

灵敏系数 c_8 为20522kJ/m³ 根据检定/校准证书给出的不确定度为测量值的0.5%($k=2$), 得到标准不确定度 $u_8=1.29 \times 10^{-4}$ m³/s, 则 $c_8 u_8=2.637$ kW。

(6) 辅侧进水温度测量引入的不确定度分量

灵敏系数 c_9 为-213.7kW/K, 根据检定/校准证书给出的标准不确定度 $u_9=0.03$ K, 则 $c_9 u_9=-6.170$ kW。

(7) 辅侧出水温度测量引入的不确定度分量

灵敏系数 c_{10} 为213.7kW/K, 根据检定/校准证书给出的标准不确定度 $u_{10}=0.03$ K, 则 $c_{10} u_{10}=6.170$ kW。

2.3 合成标准不确定度的评定

根据评定模型计算的标准不确定度分项见表2。

$$u_c(Q_{ne}) = \sqrt{u_1^2 + (c_2 u_2)^2 + (c_3 u_3)^2 + (c_4 u_4)^2} = 7.367 \text{ kW};$$

$$u_c(P) = \sqrt{u_5^2 + u_6^2} = 0.462 \text{ kW};$$

$$u_c(Q_{nc}) = \sqrt{u_7^2 + (c_8 u_8)^2 + (c_9 u_9)^2 + (c_{10} u_{10})^2 + u_{11}^2} = 9.136 \text{ kW};$$

其中 $u_{11}=u_c P$

2.4 扩展不确定度的评定

取置信概率 $p=95\%$, 包含因子 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U(Q_{ne}) = 14.736 \text{ kW} \text{ 相对值为} 1.8\%;$$

表2 标准不确定度分项汇总

输入量	灵敏系数 c_i	标准不确定度 u_i	$ c_i u_i $	输入量	灵敏系数 c_i	标准不确定度 u_i	$ c_i u_i $
u_1	1	0.471 kW	0.471 kW	u_6	1	0.460 kW	0.460 kW
q_{ve}	20228 kJ/m ³	1.03×10^{-4} m ³ /s	0.626 kW	u_7	1	0.709 kW	0.709 kW
t_1	172.4 kW/K	0.03 K	4.977 kW	q_{vc}	20522 kJ/m ³	1.29×10^{-4} m ³ /s	2.637 kW
t_2	-172.4 kW/K	0.03 K	4.977 kW	t_{w1}	-213.7 kW/K	0.03 K	6.169 kW
u_5	1	0.051 kW	0.051 kW	t_{w2}	213.7 kW/K	0.03 K	6.169 kW

$U(P)=0.924\text{kW}$ 相对值为0.5% ;
 $U(Q_{nc})=18.272\text{kW}$ 相对值为2.2%。

3 测量参数对不确定度评定的影响

由上述分析可以看出,本次试验的A类测量不确定度远远(0.471kW)小于B类测量不确定度,因此,B类测量不确定度对最终的合成不确定度起到了决定性的作用。

将各分项标准不确定度与对应灵敏系数乘积的绝对值与合成标准不确定度的比值定义为分项占比,则可以得出:

主侧试验中,A类测量不确定度占比为6.4%,流量分项占比为28.2%,进出水温度分项的占比均为67.5%,按照对合成标准不确定度的影响,各测量分量从大到小进行排序为进出水温度、流量和A类分量。

功率试验中,A类测量不确定度占比为11.0%,B类测量不确定度占比为99.4%;按照对合成标准不确定度的影响,各测量分量从大到小进行排序为B类分量(其中主要是功率计的精度)、A类分量。

辅侧试验中,A类测量不确定度占比为7.8%,流量分项占比为28.9%,进出水温度分项的占比均为67.5%,功率分项占比为5.1%,按照对合成标准不确定度的影响,各测量分量从大到小进行排序为进出水温度、流量、A类分量和功率。

需要说明的是,由于分项不确定度与合成不确定度并非代数和关系,因此,上述各分项占比之和并不等于1。

可以看出,影响制冷量测量不确定度的最重要因

素是进出水温度。一般来说,测试系统的进出水温度采用的是同样的原理和精度,在上述分析过程中,进出水温度测量系统的校准后的精度为0.05℃(按照均匀分布对应的不确定度为0.03K),如果采用较低精度的温度测量系统,分析结果将随之发生变化。

在保持其他测量参数精度不变的情况下,分别选取精度为0.05℃、0.08℃和0.1℃的温度测量系统对制冷量和功率的测量不确定度按照全文所述的流程进行评定,各分项占比的对比情况如图1所示。

从图中可以看出,随着温度测量系统的降低,各分项的影响排名不变,温度测量分项的占比仍然是最大的,约为65-70%,而A类测量不确定度和流量分项的占比不断下降,这是由于总体合成不确定度不断增大造成的。在温度测量系统精度为0.08℃时,主侧和辅侧制冷量的相对不确定度分别达到了2.7%和3.4%,结果偏高;在温度测量系统精度为0.1℃时,主侧和辅侧制冷量的相对不确定度分别达到了3.3%和4.2%,已经超出了合理的范围。功率测量由于不受温度测量的影响,所以功率分项的占比不变。

4 结语

(1) 在稳定测试的前提下,A类测量不确定度一般是远小于B类测量不确定度,因此,在分析水冷冷水机组的测量不确定度时需重点关注B类测量不确定度,其中最主要的是仪器仪表的精度。

(2) 蒸发器和冷凝器进出口水温和流量是影响测量不确定度评定结果的主要因素,在温度测量系统精度为0.05℃、流量测量系统精度为0.5%时,进出口水温和流量对合成标准不确定度的分项占比分别为67.5%、67.5%和28.2%。

(3) 在其他参数及其精度保持不变的情况下,将对测量不确定度影响最大的温度测量系统的精度从0.05℃分别变为0.08℃和0.1℃时,主侧制冷量的相对不确定度分别达到了2.7%和3.3%,辅侧制冷量的相对不确定度分别达到了3.4%和4.2%,数值偏大,超出了合理的范围。因此,在实际的水冷冷水机组测试系统中,需采用高精度温度测量系统并定期校准,确保检测结果的准确性和可信程度。

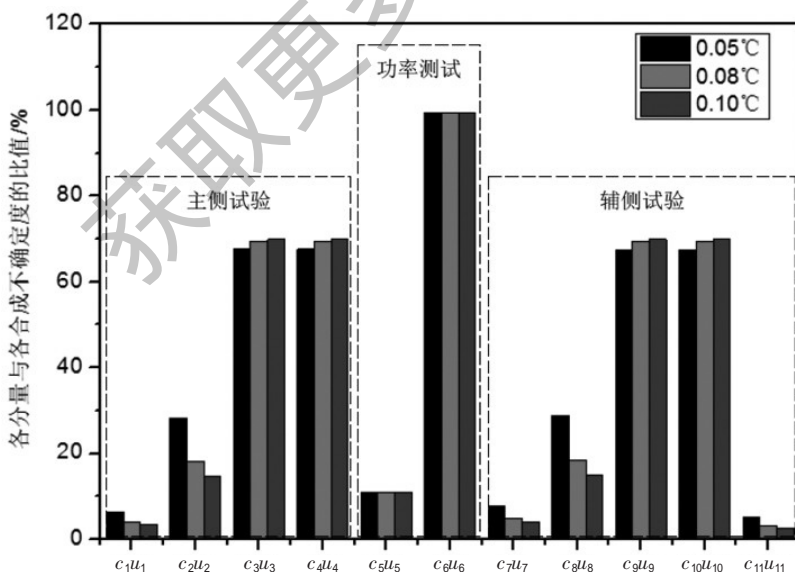


图1 不同精度的温度测量系统对分项占比的影响

(下转第79页)

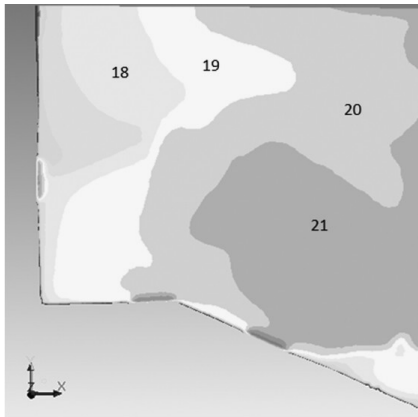


图17 工况三 27层人员区温度分布图

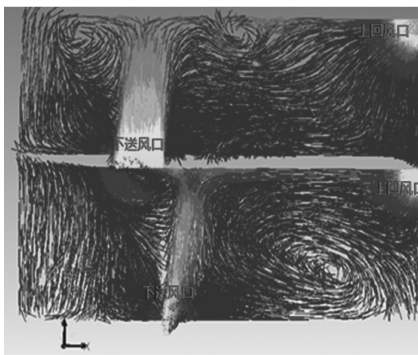


图18 工况三 26/27层人员区气流矢量图

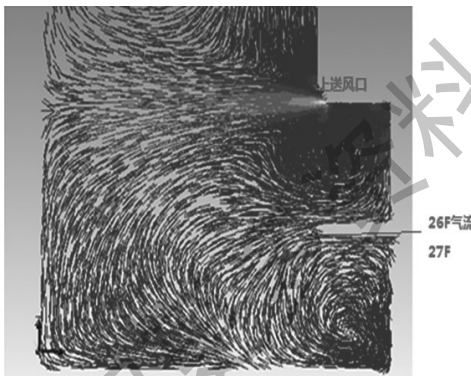


图19 工况三 中庭人员区气流矢量图

6 结语

中庭的热环境系统设计可采用能耗模拟软件和CFD模拟软件进行联合模拟分析,根据具体项目情况提供研究分析作为设计的参考。

(1) 中庭得热分析不能仅采用常规的负荷计算软件进行稳态的计算,一定要基于当地实际的气象参数,包括太阳辐射照度及太阳高度角等参数进行模拟分析;

(2) 当中庭上方未开启排风装置时,地板送风方式逸入中庭部分的热气流量较少,但差别并不显著;

(3) 地板送风与上送风方式比较,人员区域最终平均温度高一摄氏度左右;

(4) 冬季送风可通过提高送风温度来提高人员区温度分布。

参考文献:

- [1] 理查·萨克森. 中庭建筑开发与设计 [M]. 戴复东、吴庐生译. 1版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [2] 卫丹. 温室型中庭建筑室内热环境研究与能耗分析[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [3] 赵荣义, 范存养, 薛殿华, 等. 空气调节[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [4] 金星, 等. 不同朝向玻璃窗太阳辐射得热系数模拟与实验研究[J]. 太阳能学报, 2009 (12): 1666~1671.
- [5] 陆耀庆, 等. 实用供热空调设计手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [6] Mulvany, Nicholas J., et al. Steady-State Evaluation of Two-Equation RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) Turbulence Models for High-Reynolds Number Hydrodynamic Flow Simulations. No. DSTO-TR-1564. DEFENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION VICTORIA (AUSTRALIA) PLATFORM SCIENCES LAB, 2004.

收稿日期 2015-06-18

修回日期 2015-07-29

(上接第 55 页)

参考文献:

- [1] 中国标准化研究院, 等. 中国用能产品能效状况白皮书(2013)[M]. 北京: 中国质检出版社, 2013: 148~149.
- [2] 樊海彬, 宋有强, 钱雪峰, 等. 大型冷(热)水机组性能试验方法的研究[J]. 制冷与空调(四川), 2010, 24(6): 52~57.
- [3] 蒋德伦, 钱雪峰, 郝庆伟, 等. 冷水机组试验台功能扩展的优化设计[J]. 制冷技术, 2011, 31(3): 6~11.
- [4] JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S].

- [5] GB/T 10870-2014 蒸气压缩循环冷水(热泵)机组性能试验方法[S].
- [6] 朱峰, 路阳, 张维加, 等. 液体载剂法不确定度的理论与试验分析[J]. 制冷与空调, 2014, 14(8): 75~77.
- [7] 冯国强. 冷水机组COP现场测量的不确定度评定与分析[J]. 广东建材, 2012 (8): 28~30.

收稿日期 2015-08-09

修回日期 2015-08-19