

组合式空调机组供冷量测量的 不确定度评定

开利空调冷冻研发管理(上海)有限公司 陆宏觉[☆]

摘要 介绍了空调机组供冷量的测试方法。并在对某机组供冷量实测的基础上,详细分析了水侧及空气侧供冷量测量的不确定度及其主要来源。结果表明,供冷量测量不确定度的主要因素是进出风干、湿球温度和进出水温度及水流量。

关键词 组合式空调机组 供冷量 不确定度

Uncertainty evaluation of cooling capacity measurement of modular air handling units

By Lu Hongjue[★]

Abstract Presents the test methods of cooling capacity of the air handling units. Based on the cooling capacity measurement of an actual unit, analyses the uncertainty and main sources in detail. As a result, the uncertainty of cooling capacity measurement results mainly from the dry-bulb and wet-bulb temperature of entering and leaving air, temperature of entering and leaving water and water flow rate.

Keywords modular air handling unit, cooling capacity, uncertainty

★ Carrier Air-Conditioning & Refrigeration R&D Management (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai, China

根据 GB/T 14294—2008《组合式空调机组》,组合式空调机组供冷量的确定,可以引用空气冷却器试验得出的传热系数公式计算并在使用现场按规定方法验证,也可以在试验室测量。笔者利用所在单位 260 kW(74 rt)多功能焓差试验室,按标准要求实测了 39CBF11824 的供冷量。本文详细分析其测试不确定度。

1 测试原理与装置

组合式空调机组供冷量测试装置包括空气处理系统、水循环系统、蒸汽系统及其控制测量系统。空气处理系统包括测试环境间、空气处理机组、回风系统、送风系统。测试环境间共分为上、下两层,上层主要放置空气处理机组,下层主要供测试机组使用;水循环系统包括被测机组测量水循环系统、辅助水循环系统;控制系统采用可编程序控制器自动控制测试工况,测量值由计算机进行数据采集与处理。

测量时,控制并测量被测机组进风的干、湿球温度与风量,测量机组出风干、湿球温度,计算出被

测机组进、出风的比焓值,以空气侧焓差法来计算风侧换热量;同时控制和测量机组进出水温度,测量机组水量与输入功率,计算机组水侧换热量,两种方法计算得出的热平衡偏差不超过±5%,取二者算术平均值作为机组换热量。

$$Q = \frac{Q_s + Q_w}{2} \quad (1)$$

式中 Q 为机组供冷量, kW; Q_s 为空气侧供冷量, kW; Q_w 为水侧供冷量, kW。

2 数学模型

1) 空气侧供冷量 Q_s ^[5]

$$Q_s = \frac{L_2 \rho_2}{1 + d_2} (h_1 - h_2 - c_{pw} t_{s2} \Delta d) \quad (2)$$

[☆] 陆宏觉,女,1970年12月生,大学,学士,工程师
201206 上海市申江路 3239 号开利空调冷冻研发管理(上海)有限公司

(021) 38603308

E-mail: hongjue.lu@carrier.utc.com

收稿日期:2010-07-09

修回日期:2010-10-11

式中 L_2 为湿工况下通过喷嘴的风量, m^3/s ; ρ_2 为喷嘴处空气密度, kg/m^3 ; d_2 为喷嘴处湿空气含湿量, kg/kg ; h_1 与 h_2 分别为进、出口空气的比焓, kJ/kg ; c_{pw} 为水的比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; t_{s2} 为机组出口空气湿球温度, $^\circ\text{C}$; Δd 为机组进出口空气含湿量差, kg/kg 。

2) 水侧供冷量 Q_w [5]

$$Q_w = Wc_{pw}(t_{w2} - t_{w1}) - N \quad (3)$$

式中 W 为水的质量流量, kg/s ; t_{w1} 与 t_{w2} 分别为水的进、出口温度, $^\circ\text{C}$; N 为机组输入功率, kW 。

3 标准不确定度评定

表 1 连续 7 次测量供冷量结果、平均值及 A 类不确定度评定

测量结果/kW					平均值/kW		A 类不确定度/kW
1	2	3	4	5	6	7	
238.30	238.24	236.68	236.43	236.52	235.67	235.78	236.80 0.40

该组合式空调机组供冷量的基本测量参数、实际测试参数的平均值、经过标定的测量精度以及经计算得到的不确定度见表 2。其中温度的测量仪表均是 Pt100 铂电阻传感器, 压力的测量采用压力(压差)传感器, 流量测量仪表采用电磁流量计, 功率测量仪表采用 WT230 数字功率计。数据采集器采集各传感器的数据, 再传输到计算机进行处理与存档。

表 2 供冷量测试的基本测量参数

	平均值	测量精度 U	误差分布	包含因子 k	不确定度 u
回风干球温度 $t_{d1}/^\circ\text{C}$	26.89	± 0.1	均匀	$\sqrt{3}$	0.058
回风湿球温度 $t_{s1}/^\circ\text{C}$	19.57	± 0.1	均匀	$\sqrt{3}$	0.058
出风干球温度 $t_{d2}/^\circ\text{C}$	12.35	± 0.1	均匀	$\sqrt{3}$	0.058
出风湿球温度 $t_{s2}/^\circ\text{C}$	11.27	± 0.1	均匀	$\sqrt{3}$	0.058
喷嘴直径 D/mm	189	± 0.2	均匀	$\sqrt{3}$	0.115
喷嘴前后压差 $\Delta p/\text{Pa}$	673.75	± 1.6	正态	1.96	0.820
大气压 p_b/Pa	101 890	± 240	正态	1.96	122.450
机组出口静压 p_{s1}/Pa	560.15	± 4	正态	1.96	2.040
进口水温 $t_{w1}/^\circ\text{C}$	7.09	± 0.1	均匀	$\sqrt{3}$	0.058
出口水温 $t_{w2}/^\circ\text{C}$	12.08	± 0.1	均匀	$\sqrt{3}$	0.058
水量 $W/(\text{L}/\text{s})$	12.28	± 0.08	正态	1.96	0.040
输入功率 N/kW	18.95	± 0.25	正态	1.96	0.130

1) 空气侧焓差法供冷量测量 B 类不确定度及主要来源

由于空气侧供冷量不确定度计算公式比较复杂, 为表达简便, 用参数 y 来代替 ($y = h_1 - h_2 - c_{pw}t_{s2}\Delta d = h_1 - h_2 - h_c$)。故空气侧供冷量 Q_s 可表示为

$$Q_s = \frac{L_2\rho_2}{1+d_2}y \quad (5)$$

3.1 A 类评定

组合式空调机组的供冷量在工况稳定后连续测量 0.5 h, 取平均值作为最终结果。连续 7 次测量供冷量的结果见表 1。从表 1 可计算供冷量 Q 的 A 类标准不确定度, 计算公式为

$$u_A(Q) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (Q_i - Q_0)^2}{7 \times 6}} \quad (4)$$

式中 Q_i 为第 i 次测量的供冷量, kW ; Q_0 为制冷量 7 次测量结果的算术平均值, kW 。

3.2 B 类评定

① 空气侧供冷量 Q_s 的 B 类不确定度

$$u_B^2(Q_s) = c_1^2 u^2(L_2) + c_2^2 u^2(\rho_2) + c_3^2 u^2(d_2) + c_4^2 u^2(y) + 2c_1c_2r(L_2, \rho_2)u(L_2)u(\rho_2) + 2c_1c_3r(L_2, d_2)u(L_2)u(d_2) + 2c_1c_4 \cdot r(L_2, y)u(L_2)u(y) + 2c_2c_3r(\rho_2, d_2) \cdot u(\rho_2)u(d_2) + 2c_2c_4r(\rho_2, y)u(\rho_2) \cdot u(y) + 2c_3c_4r(d_2, y)u(d_2)u(y) \quad (6)$$

式中 $c_1 = \frac{\partial Q_s}{\partial L_2} = \frac{\rho_2}{1+d_2}y = \frac{Q_s}{L_2} = 28.73, c_2 = \frac{\partial Q_s}{\partial \rho_2} = \frac{L_2}{1+d_2}y = \frac{Q_s}{\rho_2} = 189.98, c_3 = \frac{\partial Q_s}{\partial d_2} = -\frac{L_2\rho_2y}{(1+d_2)^2} = -\frac{Q_s}{1+d_2} = -234.16, c_4 = \frac{\partial Q_s}{\partial y} = \frac{L_2\rho_2}{1+d_2} = 10.13。$

$u(X_i)$ (如 $u(Q_s), u(L_2)$ 等) 为参数 X_i 的不确定度; $r(Y_i, Z_i)$ 为参数 Y_i 与 Z_i 的相关系数。

空气流量 L_2 , 出口空气密度 ρ_2 , 出口空气含湿量 d_2 以及 y 之间的相关系数见表 3。

② d_2 的 B 类不确定度

$$u^2(d_2) = c_1'^2 u^2(d_{sw}) + c_2'^2 u^2(t_d) + c_3'^2 u^2(t_s) + 2c_1'c_2'r(d_{sw}, t_d)u(d_{sw})u(t_d) + 2c_1'c_3' \cdot r(d_{sw}, t_s)u(d_{sw})u(t_s) + 2c_2'c_3'r(t_d, t_s)u(t_d)u(t_s) \quad (7)$$

式中 d_{sw} 为机组出口饱和空气含湿量, g/kg ; t_d 为机组出风干球温度, $^\circ\text{C}$; t_s 为机组送风湿球温度, $^\circ\text{C}$;

$$c_1' = \frac{\partial d_2}{\partial d_{sw}} = \frac{1}{1000} \times \frac{2500 - 2.347t_s}{2500 + 1.84t_d - 4.187t_s}; c_2' =$$

$$\frac{\partial d_2}{\partial t_d} = -\frac{1}{1000} \times \frac{(4600 - 4.318t_s)d_{sw} - 2370.47t_s + 2525000}{(1.84t_d + 2500 - 4.187t_s)^2}; \quad c'_3 = \frac{\partial d_2}{\partial t_s} = \frac{1}{1000} \times$$

$$\frac{4600d_{sw} - 2370t_d - 4.318t_d d_{sw} + 2525000}{(1.84t_d + 2500 - 4.187t_s)^2}; u^2(d_{sw}) = \left[\frac{622p_b}{(p_b - p_s)^2} \right]^2 u^2(p_s) + \left[-\frac{622p_s}{(p_b - p_s)^2} \right]^2 u^2(p_b),$$

其中, p_b 为大气压力, Pa; p_s 为机组出口水蒸气饱和压力, Pa。

表3 L_2, ρ_2, d_2 及 y 的相关系数

序号	输入量			
	$L_2/(m^3/s)$	$\rho_2/(kg/m^3)$	$d_2/(kg/kg)$	$y/(kJ/kg)$
1	8.206	1.243	0.00789	21.96
2	8.222	1.243	0.00788	21.94
3	8.218	1.242	0.00791	21.86
4	8.215	1.242	0.00793	21.83
5	8.225	1.242	0.00792	21.80
6	8.211	1.242	0.00793	21.77
7	8.215	1.242	0.00793	21.76
平均值	8.216	1.242	0.00791	21.84
相关系数	$r(L_2, \rho_2)=0.040$		$r(\rho_2, d_2)=-0.991$	
	$r(L_2, d_2)=0.013$		$r(\rho_2, y)=0.949$	
	$r(L_2, y)=-0.113$		$r(d_2, y)=-0.940$	

$u(p_{s2})$ 的计算公式见文献[3], d_{sw}, t_{d2} 以及 t_{s2} 的相关系数见表4。

表4 d_{sw}, t_d 以及 t_s 的相关系数

序号	输入量		
	$d_{sw}/(g/kg)$	$t_{d2}/^\circ C$	$t_{s2}/^\circ C$
1	8.34	12.32	11.23
2	8.33	12.29	11.21
3	8.36	12.34	11.27
4	8.37	12.37	11.30
5	8.37	12.38	11.30
6	8.37	12.38	11.30
7	8.37	12.38	11.30
平均值	8.36	12.35	11.27
相关系数	$r(d_{sw}, t_{d2})=0.99$		
	$r(d_{sw}, t_{s2})=1.00$		
	$r(t_{d2}, t_{s2})=0.99$		

经计算, 可得: $u(d_2) = 3.45 \times 10^{-5}$ 。

③ y 的 B 类不确定度

$$u^2(h) = (1.005 + 1.846d_2)^2 u^2(t_d) + (2500 + 1.846t_d)^2 u^2(d_2) \quad (8)$$

计算得: $u(h_1) = 0.15; u(h_2) = 0.10; u(h_c) = 0.0062$ 。

由此可知, $u(h_c) < \frac{1}{10}u(h_2) < \frac{1}{10}u(h_1)$ 。根据

微小不确定度标准, $u(y)$ 计算时可以略去 $u(h_c)$, 故 $u(y)$ 可以简化为下式:

$$u(y) = \sqrt{u^2(h_1) + u^2(h_2) - 2r(h_1, h_2)u(h_1)u(h_2)} \quad (9)$$

h_1 与 h_2 的相关系数见表5。

表5 h_1 与 h_2 的相关系数

序号	输入量	
	$h_1/(kJ/kg)$	$h_2/(kJ/kg)$
1	55.85	32.28
2	55.79	32.23
3	55.84	32.36
4	55.89	32.43
5	55.86	32.43
6	55.83	32.44
7	55.82	32.44
平均值	55.84	32.37
相关系数	$r(h_1, h_2)=0.44$	

计算得 $u(y) = 0.14$ 。

④ ρ_2 的 B 类不确定度

$$u^2(\rho_2) = \left(\frac{\rho_2}{p_b + p_{s12}} \right)^2 [u^2(p_b) + u^2(p_{s12})] + \left(\frac{\rho_2}{T_{d2}} \right)^2 u^2(T_{d2}) + \left(\frac{\rho_2}{1 + d_2} \right)^2 u^2(d_2) + \left(\frac{\rho_2}{0.622 + d_2} \right)^2 u^2(d_2) \quad (10)$$

计算得 $u(\rho_2) = 0.0015$ 。

⑤ L_2 的 B 类不确定度

$$u^2(L_2) = \frac{C_i^2 A_i^2}{2\rho_2} \left[\frac{u^2 \Delta p}{\Delta p} + \frac{\Delta p}{\rho_2^2} u^2(\rho_2) \right] + \frac{2C_i^2 \Delta p}{\rho_2} u^2(A_i) \quad (11)$$

式中 C_i 为喷嘴流量系数; A_i 为喷嘴面积, m^2 ; Δp 为喷嘴前后压差, Pa。

计算得 $u(L_2) = 0.122$ 。

⑥ 空气侧供冷量测量的 B 类不确定度主要计算结果

将上述 L_2, ρ_2, d_2 以及 y 之间的相关系数与 $u(L_2), u(\rho_2), u(d_2), u(y)$ 的计算结果代入式(6), 便得到组合式空调机组空气侧焓差法供冷量测量的不确定度 $u_B(Q_s)$, 结果见表6。

由此可见, 空气侧供冷量测试不确定度的主要来源是 y , 即进出风比焓差的测量不确定度。比焓是由空气干、湿球温度决定的。故影响空气侧供冷量测试不确定度的主要因素是空气进出风干、湿球温度的测量。

表 6 空气侧焓差法供冷量测量不确定度及来源

$c_1 u(L_2)$	$c_2 u(\rho_2)$	$c_3 u(d_2)$	$c_4 u(y)$	$2c_1 c_2 r(L_2, \rho_2) u(L_2) u(\rho_2)$	$2c_1 c_3 r(L_2, d_2) u(L_2) u(d_2)$	kW
0.352	0.287	-0.008	1.432	0.008	0.000	
$2c_1 c_4 r(L_2, y) u(L_2) u(y)$	$2c_2 c_3 r(\rho_2, d_2) u(\rho_2) u(d_2)$	$2c_2 c_4 r(\rho_2, y) u(\rho_2) u(y)$	$2c_3 c_4 r(d_2, y) u(d_2) u(y)$	$u_B(Q_s)$		
-0.114	0.005	0.781	0.022	1.720		

2) 水侧供冷量测量不确定度及来源

由于进出水温铂电阻传感器是用同一标准温度计检定的,这两个测量参数相关,其他测量参数间均不相关。

$$u_B^2(Q_w) = c_1''^2 u^2(W) + c_2''^2 u^2(t_{w2}) + c_3''^2 u^2(t_{w1}) + c_4''^2 u^2(N) + 2c_2'' c_3'' r(t_{w1}, t_{w2}) u(t_{w1}) u(t_{w2}) \quad (12)$$

式中 $c_1'' = \frac{\partial Q_w}{\partial W} = c_{pw}(t_{w2} - t_{w1}) = 20.81; c_2'' =$

$-c_3'' = \frac{\partial Q_w}{\partial t_{w2}} = -\frac{\partial Q_w}{\partial t_{w1}} = W c_{pw} = 51.42; c_4'' = -1.$

t_{w1} 与 t_{w2} 之间的相关系数见表 7。

表 7 t_{w1} 与 t_{w2} 之间的相关系数

序号	输入量	
	$t_{w1}/^\circ\text{C}$	$t_{w2}/^\circ\text{C}$
1	7.01	12.04
2	7.01	12.03
3	7.10	12.08
4	7.13	12.11
5	7.11	12.10
6	7.14	12.10
7	7.13	12.10
平均值	7.09	12.08
相关系数	$r(t_{w1}, t_{w2}) = 0.98$	

水侧供冷量不确定度计算结果见表 8。

表 8 水侧供冷量不确定度

$c_1''^2 u^2(W)$	$c_2''^2 u^2(t_{w2})$	$c_3''^2 u^2(t_{w1})$	$c_4''^2 u^2(N)$	$2c_2'' c_3'' r(t_{w2}, t_{w1}) \cdot u(t_{w2}) u(t_{w1})$	$u_B(Q_w)$	kW
0.727	8.883	8.883	0.016	-17.411	1.047	

由计算结果可知,由于进出水温度相关,故水温差与水流量的测量对水侧供冷量测量不确定度影响相当,影响水侧供冷量测量不确定度的主要因素是水流量以及进出水温度的测量。

3) 供冷量测量 B 类标准不确定度

$$u_B^2 = \frac{1}{4} u_B^2(Q_s) + \frac{1}{4} u_B^2(Q_w) \quad (13)$$

经计算, $u_B = 1.05 \text{ kW}$ 。

3.3 合成标准不确定度

$$u^2(Q) = u_A^2 + u_B^2 \quad (14)$$

经计算, $u(Q) = 1.08 \text{ kW}$ 。

3.4 扩展不确定度

供冷量测试的可能值分布接近正态分布,取包含因子 $k = 2$,则制冷量测试结果的扩展不确定度计算如下

$$u(Q) = ku(Q) \quad (15)$$

组合式空调机组 39CBF11824 的供冷量测量值的最终结果为:

$$Q = 236.80 \text{ kW}; u(Q) = 2.16 \text{ kW}; k = 2.$$

4 结语

影响组合式空调机组供冷量不确定度评定的主要因素是机组进出风干、湿球温度和进出水温度以及水流量。本实验室温度与压力计量均采用现场计量,温度不确定度包含了铂电阻温度传感器、传输电缆、数据采集器的总体不确定度,有效地控制了组合式空调机组供冷量测试的不确定度。

参考文献:

- [1] 中国计量科学研究院. JJF 1059—1999 温度不确定度评定与表示[S]. 北京:中国计量出版社,1999
- [2] 刘智敏. 不确定度及其实践[M]. 北京:中国标准出版社,2000
- [3] 徐卫荣,杜垲. 喷嘴式空气流量测量不确定度分析与评定[J]. 制冷与空调,2009,9(5):13—16
- [4] 贾磊,钱雪峰,王溢芳,等. 空气焓值法测量空调制冷量的不确定度评定[J]. 制冷与空调,2007,7(6):80—82
- [5] 中国建筑科学研究院. GB/T 14294—2008 组合式空调机组[S]. 北京:中国标准出版社,2008
- [6] 中国合格评定国家认可委员会. CNAS-GL05 测量不确定度要求的实施指南[M]. 北京:中国计量出版社,2006

· 简讯 ·

《2010 年度中央空调行业发展分析报告》

由暖通空调传媒机构旗下媒体——《暖通空调资讯》制作的《2010 年度中央空调行业发展分析报告》已于年初正式发布,在原有的数据调研及整理分析的基础之上,《暖通空调资讯》编辑部对 2010 年度行业报告进行内容的精细化创新处理,使《2010 年度中央空调行业发展分析报告》独树一帜地从销售及数字以外的、更为全面的角度来探析中国中央空调行业发展轨迹。

《2010 年度中央空调行业发展分析报告》沿袭了以往的段落成文方式,从宏观、微观、产品、区域四个方面来解读行业的发展。其中,报告独家推出了中央空调产业研究(AIR)指数的概念,从企业动作的生产、销售、研发、财务、人力资源等等多个因素,运用经济模型来计算行业发展的景气指数。

(本刊)