

平衡环境型房间量热计优化设计

柳胜耀, 李瑛, 赵四海, 黄彩凤
(上海理工大学 制冷及低温研究所, 上海 200093)

摘要:按照 GB/T7725—2004 中平衡环境型房间量热计法测量中小冷量空调器制冷量时,会造成较大测试偏差。为符合实际实验工况并提高测试精度,对实验室测量方法进行优化:以3台高精度电子秤代替传统平衡环境型房间量热计中1台或2台电子秤,在测试过程中采用称重法分别同时测量平衡环境型房间量热计内、外室加湿水量及被测机的凝结水。利用基于称重法设计的量热计实验室测得3台被测机的2组数据并进行分析。结果表明,优化后量热计可以有效减小中小冷量空调器测量偏差,提高测试精度;制冷量为1.8 kW 空调器内、外室测量偏差提高达32.1%。试验证明,此优化方法为提高量热计精度提供了有效的依据。

关键词:房间型量热计;称重法;凝结水测量;实验验证

中图分类号: TB 663 **文献标志码:** **文章编号:** 1006-7167(2014)07-0079-04

An Optimization Design of Balanced Ambient Room-type Calorimeter

LIU Sheng-yao, LI Ying, ZHAO Si-hai, HUANG Cai-feng

(Refrigeration and Cryogenic Research Institute, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In the cooling capacity measurement of small or medium size air conditioner, the test error was caused by room-type calorimeter which was mentioned in the standard GB/T7725—2004. In order to comply with the actual experimental conditions and improve test accuracy, laboratory measurements were optimized: 1 or 2 units of electronic scales which were used in traditional room-type calorimeter were replaced by three high-precision electronic scales; the mass weighing method was proposed to measure the humidification water of inner and outer chambers of the calorimeter, as well as the condensate water of air conditioner under test respectively. By analyzing the two sets of test results of three test units which were tested by means of room-type calorimeter based on the mass weighing method: It turns out that, optimized calorimeter can effectively reduce the measurement error and improve test accuracy of small or medium size air conditioners; the error of conditioner with 1.8 kW cooling capacity can be improved upto 32.1%. Tests show that this optimized method is an effective basis of improving the precision of room-type calorimeter.

Key words: room-type calorimeter; weighing method; condensate measurement; validation

0 引言

目前,国内空调器的性能测试主要采用空气焓值法试验室(简称焓差试验室),该方法试验速度快,精

度稍差,主要用于空调器生产厂家的产品开发和出厂检测;房间型量热计法检测家用空调器性能较空气焓差法精度高,适用于生产厂家产品开发的最终检测和质量监督检测部门的抽查认证,以及压缩机与换热器的性能匹配测定,性能测试系统自动控制技术的研究等,是不可或缺的性能检测设备^[1-4]。

由于变频空调器的能源利用率高和舒适性好的优点,其市场占有率在逐年增加。因其在高频和低频运行段性能有较大差别,故季节能效比是更符合评价变频空调性能的测试方法^[5-6]。在 GB/T 7725 的报批

收稿日期:2013-09-02

作者简介:柳胜耀(1989-),男,江苏徐州人,硕士生,主要研究方向:制冷系统控制与检测。

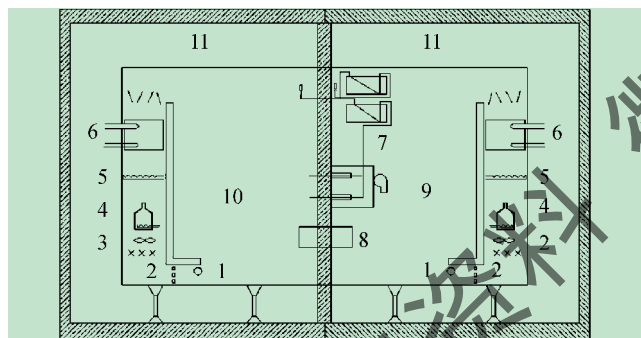
Tel.: 18817582285; E-mail: syliu@126.com

通信作者:李瑛(1963-),男,上海人,高级工程师,研究方向:制冷系统控制与检测。Tel.: 021-55271599; E-mail: shouches@live.cn

稿中增加了对变频空调器的最小冷量、中间额定制冷能力及 25% 额定制冷能力的测量,在这些工况测试中,平衡环境型房间量热计凝结水量测量的精度是影响被测空调器性能的一个重要因素。目前量热计研制设计多侧重平衡环境型房间量热计的功能及自动程度^[7-43]。如马最良等^[10]研制的可对 9 种制冷设备进行性能测试的房间热平衡法多功能试验台;李垒^[11]研制的一套高标准的平衡环境型房间量热计等。Nestor Fonseca Diaz^[12]通过分析凝结水量的不确定度,强调在除湿量大的工况下被测机凝结水量占总制冷量的不确定度较大比例;而 Park 等^[13]则分析了显热制冷量占总制冷量的比例。为准确测试家用空调器的中小制冷量,需对传统量热计实验室进行优化。本文考虑到标准^[1]中量热计法室内侧制冷量计算公式未计入空气处理柜除湿量,为提高测试精度,提出采用称重法分别对被测空调器及空气处理柜测量热湿水量。

1 量热计法测试原理及设计参数

将平衡环境型房间量热计搭建于上海市质量技术监督局,最大测试制冷能力达到 5HP,设计原理图如图 1 所示。



1 - 空气取样管 2 - 混合器 3 - 风机 4 - 加湿器 5 - 加热器 6 - 冷却盘管 7 - 压力平衡装置 8 - 被测机 9 - 室外侧测试室 10 - 室内侧测试室 11 - 温度可控的套间

图 1 环境型房间量热计原理图

1.1 测试原理

平衡环境型房间量热计是根据稳态下能量平衡的原理来测量空调的制冷量、制热量及除湿量,分为室内侧和室外侧两个测试室,而且在室内侧和室外侧测试室的外面分别设温度可控的套间,一个完整的平衡环境型房间量热计包括制冷系统、空气循环系统和数据采集系统。

制冷系统主要包括冷却系统、压缩循环系统、载冷系统;空气循环采用微孔上送下回的送风方式,调节稳压层的高度可将动压转化为静压以减小送风速度,保证测试室温度梯度。数据采集主要包括测试室温湿度、加湿水流量及温度和电器设备输入功率。采用两组干湿球温度计代替一组干湿球温度计测试,将参与

控制同时也参与数据计算的参数分离,提高控制计算精度。

1.2 设计参数

此实验台可以测试中小冷量家用空调器性能,特别是对于变频家用空调器,在其 25% 额定制冷量时也能够进行测试。具体参数如下:被测机制冷量范围 0~5HP,测试方法:量热计热平衡法,室内侧有焓差测量风筒(可独立进行焓差、风量测试)。测试参数检测项目以规定工况下的制冷量制热量、最小制冷制热量,其他还包括最大运行制冷(制热)、制冷(制热)消耗功、季节能效比(SEER、HSPF)等。测试精度与样机比对 $\leq \pm 2.5\%$ (目标值 $\pm 1\%$),重复性 $\leq \pm 1\%$ 。

2 中小制冷量测量原理

室内、室外侧被测空调器总制冷量公式如下^[1]:

$$\phi = \sum P + (h_{w1} - h_{w2})W_r + \phi_{1p} + \phi_{1r} \quad (1)$$

$$\phi' = \phi_e - \sum P_e - P_i + (h_{w3} - h_{w2})W_{r1} + \phi'_{1p} + \phi_{10} \quad (2)$$

式中: ϕ 为室内侧测定的空调总制冷量, W ; P_i 为被测机输入功率, W ; $\sum P$ 为室内侧测试室的总输入功率, W ; h_{w3} 为室外侧测试室再处理机组排出的凝结水的焓值, kJ/kg ; h_{w1} 为加湿所用水或水蒸气焓值, kJ/kg ; W_{r1} 为室外侧测试室凝结水量, g/s ; h_{w2} 为室内侧测试室凝结水焓值, kJ/kg ; ϕ_e 为室外侧测试室空气处理柜冷器带走的热量, W ; W_r 为被测机凝结水量, g/s ; ϕ'_{1p} 为室内侧测试室通过中间隔墙向室外侧测试室的漏热量, W ; ϕ_{1p} 为室外侧测试室通过中间隔墙向室内侧测试室的漏热量, W ; ϕ_{10} 为室外侧向外的漏热量, W ; ϕ_{1r} 为除中间隔墙外的漏热, W ; h_{w4} 为室内侧表冷器凝结水在离开量热计隔室的温度下的焓值, kJ/kg ; ϕ' 为量热计室外侧测试室测定的空调总制冷量, W ; W_{r2} 为室内侧空气处理柜排出的凝结水流量, g/s ; $\sum P_e$ 为室外侧测试室的总输入功率, W 。

由式(1)、(2)知,当被测空调器制冷量较小时,其除湿量也相应减小。若测试室输入功率大于被测空调器制冷量,此时式(1)修正成为下式:

$$\phi = \sum P + (h_{w1} - h_{w2})W_r + \phi_{1p} + \phi_{1r} - (h_{w1} - h_{w4})W_{r2} \quad (3)$$

即测试室需要开启空气处理柜进行制冷,且会有凝结水产生。

结合以上 3 式,考虑到被测空调器最大制冷量为 5HP,且在除湿工况下运行,空调器的最大除湿量约为 5.4 kg/h。当被测空调制冷量较小的工况时,被测空调器及空气处理柜产生的凝结水量使用常规流量计将很难测量或带来的误差非常大。由于没有动力提供给

凝结水,若使用超声波或节流管式小流量测量仪,将会使测量装置复杂。针对Durst等^[14]提出使用一定时间里测量质量的方法,本文采用称重法——在固定时间里对流体称重的方法测量加湿及凝结水的流量。

考虑到加湿水量和凝结水量这种小流量的微小变化会造成较大的误差,故用对时间积分来消除瞬时流量 q'_m 变化带来的误差^[15-16]。理想状态时,

$$q_m = \frac{\int q'_m dt}{t_2 - t_1}$$

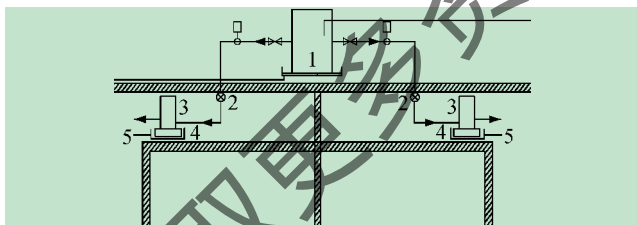
式中 $t_2 \rightarrow +\infty$, $t_1 = 0$,所得 q_m 为精确值。 t_1 是测试开始时间; t_2 测试结束时间。为保证测量的准确性,通常选择在系统稳定后,从开始测量时记录加湿水量和凝结水量直到测试结束。

3 中小冷量测量优化设计

房间量热计的加湿水来自通过蒸馏水机制取的蒸馏水,经水泵供至放置在量热计测试室顶部的高位加湿蒸馏水箱。蒸馏水经进水电磁阀分别进入室内侧测试室和室外侧测试室加湿器进水箱,然后经电加热制取水蒸汽,分别将水蒸汽送入室内侧测试室和室外侧测试室,进而完成空气的加湿。

3.1 凝结水量测量

采用称重消耗水量的方式代替测试室除湿水量,将加湿器进水箱置于高精度电子秤上,实时记录水箱质量并通过数据采集仪送入计算机分析模块,求得数据对时间的积分。此时室内侧测试室加湿器进水量即为被测空调器的除湿量。图2是被测空调器额定制冷运转凝结水测量系统示意图。



1 - 高位加湿器蒸馏水箱 2 - 进水电磁阀 3 - 加湿器进水箱 4 - 高位电子秤 5 - 排水盘

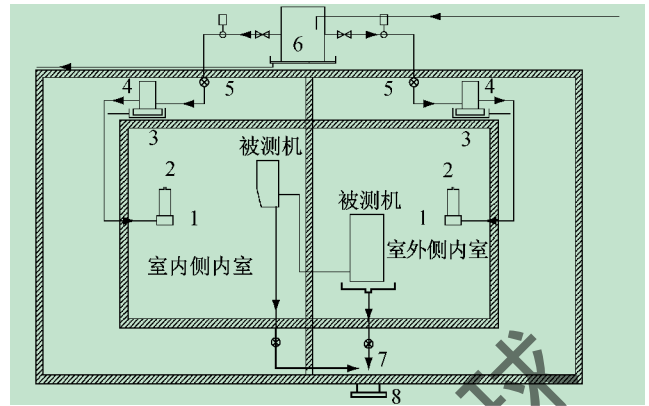
图2 空调器凝结水测量设计图

室外侧测试室按式(2)进行测试,但此时被测室外机处于制热状态,所以 W_{e1} 为空气处理柜的除湿量。当室内侧为制热模式,外侧测试室除湿量计算与制冷模式相似。

3.2 小制冷能力时凝结水量测量

当被测机为中小冷量或测试25%额定制冷量时,此时不足以抵偿量热计测试室输入功率热量,空气再处理器将进行制冷除湿。按照标准,文献[1]中建造的传统量热计将不能有效测试,为解决此困难,设计如

下优化方法。



1 - 电力测定 2 - 加湿器 3 - 高位电子秤 4 - 加湿器进水箱 5 - 进水电磁阀 6 - 高位加湿器蒸馏水箱 7 - 凝结水箱 8 - 电子秤

图3 空调器凝结水测量设计图

当循环空气处理柜表冷器通冷水承担室内侧内室冷负荷和湿负荷时,加湿器进水分两部分:①表冷器除湿量;②被测空调器除湿量。为准确测量被测空调器的除湿量及表冷器除湿量,增加一台高精度电子秤测量空调器的凝结水量变化。设计如图3增加实线加粗7和8部分表示,在被测空调器的凝结水处增设凝结水箱和电子秤。

电子秤作为测量除湿量的重要工具,其量程和最小刻度的大小对整个测试结果的误差起到了很大的影响,应经过仔细计算来选择电子秤的规格:①秤重范围。按最大5HP空调器算,除湿量5~6 kg/h,按5h为1试验工况并考虑不锈钢水箱的质量和富余量,采用量程60 kg电子秤。②秤重精度。按约2 kW制冷量的被测空调器,除湿量约1.0 kg/h,根据水量秤重误差对制冷量的误差的贡献,计算要求的精度约为5 g。该系统使用了3台梅特勒托利多WU60M-560、准确度Ⅲ级的电子台秤。

4 测试数据结果分析

为验证经优化前、后的平衡环境型房间量热计对被测空调器实际制冷能力的符合程度,现对2台典型低额定制冷量空调器和1台中额定制冷量空调器分别进行测试。空调器的制冷量分别约为1.8、2.5和3.5 kW,应用未优化时量热计在规定工况下测试一组数据,在不改变3台空调器的制冷量的情况下,增大测试内室的输入功率,以此改变空气处理柜的制冷或制热工况,并与上一组量热计测得数据进行比较。应用优化后的量热计按照优化前的测试方法,再次测得两组数据并比较。

4.1 对中小额定制冷量空调器进行测试

根据标准^[1]的要求,选取平衡环境型房间量热计的测试工况点。室内侧内室环境:干球温度27.0℃;

湿球温度 19.0 °C; 室外侧内室环境: 干球温度 35.0 °C; 湿球温度 24.0 °C。当系统运行稳定后测得数据, 采用变频 KFR-26GW 系列空调器产生 1.8 kW 制冷量, 定频 KFR-35GW 系列空调器产生 3.5 kW 制冷量。表 1 列出了采用优化前量热计测试制冷量约 3.5 和 1.8 kW 的空调器主要参数。

表 1 测试数据

测试项目	制冷量约 3.5 kW		制冷量约 1.8 kW	
	室内侧	室外侧	室内侧	室外侧
设备功率/W	3 496.88	6 908.38	2 451.67	6 346.89
被测机功率/W	0.00	1 021.32	0.00	650.72
墙体导热./W	0.59	11.26	4.59	11.27
中间隔墙露热/W	45.72	45.72	45.72	45.72
表冷器进水温度/°C	23.34	14.15	14.28	14.15
表冷器出水温度/°C	22.73	22.41	21.32	22.35
凝结水进口温度/°C	27.28	34.51	27.28	34.51
凝结水出口温度/°C	12.78	29.07	12.78	29.07
表冷器水流量/ (kg·h ⁻¹)	0.012	1 099.876	81.720	915.500
凝结水流量/(kg·h ⁻¹)	0.602	0.027	0.421	0.023

应用平衡型环境房间量热计测试空调器需按室内侧和室外侧分别计算制冷量, 比较其测量偏差。表 1 中测试的两种空调器内、外室制冷量测量偏差分别为 0.69%、1.12%。将室内输入功率增大 1 kW 后继续对空调器测试, 在不改变空调器的制冷量工况下, 室内侧内室表冷器需通冷冻水以稳定测试工况。利用量热计测试并计算其内、外室测量偏差分别为 0.91%、1.34%。按相同方法测试并计算另一台空调器内、外室测量偏差, 其对比结果如图 4 所示。

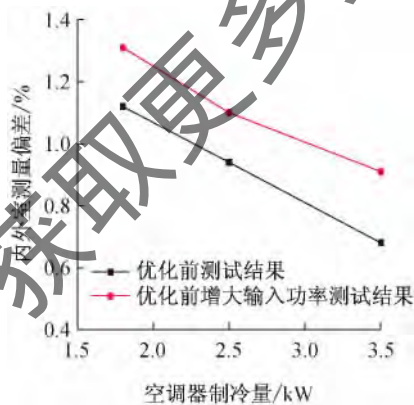


图 4 制冷量测量偏差

4.2 优化后测试

采用优化后量热计, 按照以上方法测试同样 3 台空调器。计算分析测试结果, 将优化前、后的测试结果进行对比见图 5。由图可知, 利用优化后量热计测试时, 改变测试室输入功率不影响测试结果。

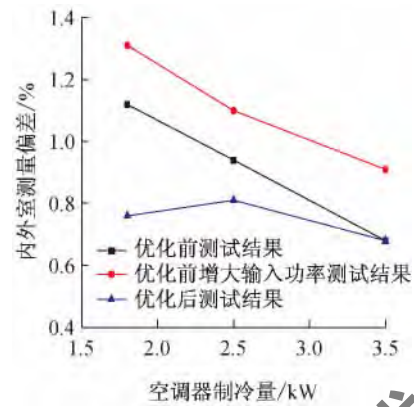


图 5 制冷量测量偏差

5 结语

通过以上的数据和图表验证, 平衡环境型房间量热计检测中小冷量的空调器, 分别测量加湿水和凝结水将提高测试精度, 减小测试内、外室偏差。采用优化后量热计测试空调器性能, 当空调器额定制冷量较小时, 其测试效果较优化前更能得到提高。实验证明, 在保证电子秤精度的情况下, 采用称重法测量量热计加湿水和凝结水, 能够测量空调器的最小制冷量, 且非常好的提高测试精度。特别是在测试变频空调器季节能效比时, 此优化后的平衡环境型房间量热计可以准确测试多种工况。

参考文献 (References):

- [1] 全国家用电器标准化技术委员会. GB/T7725—2004 房间空气调节器[S].
- [2] Tran C T, Riviere P, Marchio D, et al. Refrigerant-based measurement method of heat pump seasonal performances [J]. International Journal of Refrigeration 2012, 35: 1583-1594.
- [3] 黄支美, 薛国典. 全自动平衡环境型房间量热计试验室[J]. 暖通空调, 1991(4): 41-44.
Huang Zhi-mei, Xue Guo-dian. Automatic balanced environmental room-type calorimeter laboratory [J]. Journal of HVAC, 1991(4): 41-44.
- [4] 肖湘, 刘波峰, 赵静, 等. 基于焓差法的空调机性能测试方法的研究[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(3): 332-334.
Xiao Xiang, Liu Bo-feng, Zhao Jing, et al. Research on Test Methods of Air-condition Capacity Measurement of Enthalpy Difference [J]. Computer Measurement and Control, 2007, 15(3): 332-334.
- [5] Chua K J, Chou S K, Yang W M, et al. Achieving better energy-efficient air-conditioning—A review of technologies and strategies [J]. Applied Energy 2013, 104: 87-104.
- [6] Ma Z, Wang S. Energy efficient control of variable speed pumps in complex building central air-conditioning systems [J]. Energy Build, 2009, 41(2): 197-205.
- [7] 曹小林, 李雄林, 喻首贤, 等. 空调器性能测试平台测量不确定度的研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(5): 58-62.

(下转第 147 页)

- medical experimental teaching center [J]. *Experimental Technology and Management*, 2013, 30(6):84-87.
- [7] 李玉东,刘景艳. 依托实验教学示范中心_培养大学生工程实践能力的探索和实践 [J]. *实验室研究与探索*, 2012, 31(3):105-108.
LI Yu-dong, LIU Jing-yan. Enhancing practical teaching reform and cultivating outstanding engineers depending on experimental teaching demonstration center [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2012, 31(3):105-108.
- [8] 王贵才,杨九民. 高校实验室开放模式探讨 [J]. *实验室研究与探索*, 2011, 30(9):46-48.
WANG Gui-cai, YANG Jiu-min. Exploration on university laboratory opening [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2011, 30(9):46-48.
- [9] 王 娴,刘 畅. 实验教学及资源信息化管理平台的研究与实现 [J]. *实验室研究与探索*, 2012, 31(3):201-204.
WANG Xian, LIU Chang, etc. Research and implementation of an experimental teaching and laboratory resource management information platform [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2012, 31(3):201-204.
- [10] 丁 文,陈 勇. 信息化、自主化、网络化、多元化 立体化——基于国家精品课程的大学英语网络教学模式实证研究 [J]. *中国大学教学*, 2011(3):70-71.
DING Wen, CHENG Yong. Informatization, independent, network-based, diversified, multidimensional——study of university English teaching mode of National Excellent Course based on network [J]. *China University Teaching*, 2011(3):70-71.
- [11] 杨小云,黄元国. 浅议多校区地方综合性大学教学资源配置的优
- 化 [J]. *中国大学教学*, 2011(3):70-71.
YANG Xiao-yun, HUANG Yuan-guo. Optimization of multi-campus local comprehensive university teaching resource allocation [J]. *China University Teaching*, 2011(3):70-71.
- [12] 郑耀东,蔡 骞. ASP.NET 网络数据库开发实例精解 [M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [13] 黄声烈,孙文广,石景海. 实验教学管理信息系统设计及应用 [J]. *实验室研究与探索*, 2009, 28(11):197-200.
HUANG Sheng-lie, SUN Wen-guang, SHI Jing-hai. Design and application of experimental teaching management information Systems [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2009, 28(11):197-200.
- [14] 宋国利,盖功琪,苏冬妹,等. 开放式实验教学模式的研究与实践 [J]. *实验室研究与探索*, 2010, 29(2):91-93.
SONG Guo-li, GAI Gong-qi, SU Dong-mei, et al. Research and practice of the open experimental teaching mode [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2010, 29(2):91-93.
- [15] 邢邦圣. 谈高等学校实验教学示范中心网络化信息平台建设 [J]. *中国教育信息化*, 2009(7):35-36.
XING Bang-sheng. Discussion on construction of experimental teaching demonstration center in Higher Education in network information platform [J]. *China Journal Education INFO*, 2009(7):35-36.
- [16] 黄道凤,李怀健,朱玉华,等. 提高实验教学质量的措施 [J]. *实验室研究与探索*, 2010, 29(2):120-122.
HUANG Dao-feng, LI Huai-jian, ZHU Yu-hua, et al. Some measures to improve experimental teaching quality [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2010, 29(2):120-122.

(上接第 82 页)

- Cao Xiao-lin, Li Xiong-lin, Yu Shou-xian, et al. Study on measurement uncertainty of conditioner performance testing platform [J]. *Journal of Refrigeration*, 2009, 30(5):58-62.
- [8] 李雄林,曹小林,张明星,等. 空调器性能测试中风量测量不确定度的研究 [J]. *流体机械*, 2008, 36(2):10-13.
Li Xiong-lin, Cao Xiao-lin, Zhang Ming-xing, et al. Study on uncertainty of air flow measurement for conditioner performance testing [J]. *Fluid Machinery*, 2008, 36(2):10-13.
- [9] 王文斌,杜 军,余国瑞,等. 房间型量热计法测量空调制冷量的不确定度评定 [J]. *仪器仪表标准化与计量*, 2012, (2):37-40.
Wang Wen-bin, Du Jun, Yu Guo-rui, et al. The evaluation of uncertainty in room-type calorimeter measurement air conditioning cooling capacity [J]. *Instrument Standardization and Metrology*, 2012, (2):37-40.
- [10] 马最良,陆亚俊,朱 林. 房间热平衡法多功能试验台的研究 [J]. *通风除尘*, 1991(3):29-32.
Ma Zui-liang, Lu Ya-jun, Zhu Lin. Study on Multifunctional Test Bench Based on Room Heat Balance Method [J]. *Ventilation and Dust*, 1991(3):29-32.
- [11] 李 垒,李 瑛,王 芳,等. 平衡环境型房间量热计试验室的研制 [J]. *低温与超导*, 2011, 39(7):59-62.
Li Lei, Li Ying, Wang Fang, et al. Study on Calorimeter Laboratory at an Equilibrium Environmental Room [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2011, 39(7):59-62.
- [12] Ne'stor, Fonseca, Diaz. Methodology for uncertainty calculation of net total cooling effect estimation for rating room air conditioners and packaged terminal air conditioners [J]. *International journal of Refrigeration*, 2009, 32:1472-1477.
- [13] Park K J, Jung D. Thermodynamic performance of HCFC22 alternative refrigerants for residential air-conditioning applications [J]. *Energy and Buildings*, 2007, 39:675-680.
- [14] Durst F, Ünsal B, Ray S, et al. Method for defined mass flow variations in time and its application to test a mass flow rate meter for pulsating flows [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(3):790.
- [15] Beaulieu A, Foucault E, Braud P, et al. A flow meter for unsteady liquid flow measurements [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2011, 22:131-137.
- [16] Catania A, Ferrari A. Development and assessment of a new operating principle for the measurement of unsteady flow rates in high-pressure pipelines [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2009, 20(6):230-40.