

空调假人温度修正试验研究

张艺伦, 牟连嵩, 伊虎城

(中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300)

摘要: **目的** 使空调假人得到的温度数据更加接近真实数值。**方法** 采集相同环境下真人衣服表面温度与空调假人的温度, 并将二者的数据进行对比和拟合。**结果** 揭示了空调假人温度与真人衣服表面温度之间的关系, 将二者的关系拟合为二次方程, 得到了空调假人温度修正公式, 使空调假人温度数据更接近真人衣服表面的实测温度数据。**结论** 对比发现, 空调假人所采集的温度数据与真人温度数据有较大不同。得到的修正公式可用于基于空调假人的热舒适性评价, 可以提高热舒适性计算的准确性。与传统方法相比, 该方法计算简便, 有利于工程中的实际应用。

关键词: 空调假人; 衣服表面温度; 修正试验; 热舒适性

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.11.013

中图分类号: U467.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)11-0069-05

Temperature Correction Test of Air Conditioning Dummy

ZHANG Yi-lun, MU Lian-song, YI Hu-cheng

(China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: Objective The paper aims to make air conditioning dummy data closer to real data. **Methods** The air conditioning dummy temperature and human's surface temperature in equivalent environment were collected, compared and fit. **Results** The relationship between air conditioning dummy temperature and human's surface temperature was revealed and fit into a quadratic equation. A correction formula was developed through the experiment, which made air conditioning dummy temperature get closer to real people's status. **Conclusion** There is a big difference between air conditioning dummy temperature and people temperature. The correction formula obtained can be applied to thermal comfort evaluation based on air conditioning dummy. It can increase the calculation accuracy of thermal comfort. This method is more convenient than traditional calculation and easy to be used in engineering practice.

KEY WORDS: air conditioning dummy; surface temperature of human clothes; correction test; thermal comfort

随着人们对汽车驾乘舒适性的要求越来越高, 汽车乘员舱的热舒适性已成为汽车空调开发中的重要考虑因素之一。在汽车空调开发流程中, 对于乘员舱的热舒适性评价研究主要采用主观评价方法, 由于评价人员个体的差异, 很难得到客观真实的结果。因此, 基于空调假人的 PMV 指数开展乘员舱的热舒适性客观评价逐渐成为主要手段。由于空调假人无法模拟人体新陈代谢过程产生的热量, 导致空调假人不能完全

模拟真人在车内的实际温度状态, 带来温度测试数据的差异。真人人体表面温度是人体与周围热环境达到热平衡的状态, 而空调假人缺少人体所拥有的温度调节过程, 导致采集到的空调假人表面温度与真人衣服表面的温度存在一定偏差。目前对于人体与环境热交换的研究主要通过 CFD 方法进行, 2010 年, 倪冬香用人体热调节模型与热环境的相互作用进行 CFD 计算来模拟汽车乘员舱热舒适性。对于该课题的试验研

究目前进行得很少。文中通过设计修正试验,建立了空调假人体表温度与真人衣服表面温度之间的关联模型。通过该关联模型,在利用空调假人模拟真人进行乘员舱舒适性试验时,可对试验测得的温度数据进行修正,使其更接近真人的温度状态,为客观评价乘员舱的热舒适性提供了依据。

1 空调假人温度修正试验

1.1 空调假人

空调假人为能够采集环境数据的人型假人系统,一般装备有温度、湿度、风速、热辐射四类传感器,并广泛用于汽车、飞机、建筑等各类环境的空调试验中。本试验中用到的空调假人为沈阳新科精密仪器设备有限公司的 SJR 型空假人,材质为玻璃钢,身高为 170 cm,四种传感器分布在假人表面,如图 1 所示。在汽车空调开发过程中,空调假人一般用来采集车内环境数据,用于热舒适性的评价。本试验采用的空调假人的相关数据见表 1。



图 1 空调假人

表 1 空调假人参数

假人材质	玻璃钢
高度	170 cm
质量	28 kg
温度传感器	pt100
温度测试范围	-30~70 ℃
温度测试精度	±0.5 ℃
使用温度	-30~70 ℃
使用湿度	0~100%相对湿度

1.2 修正试验

由于人体散热对车厢内的湿度、风速、热辐射等影响很小,因此本修正试验中仅对温度进行修正。文中将空调假人温度直接修正为真人衣服表面温度,原

因是相比人体皮肤表面温度,人体衣服表面温度在舒适性评价的研究中应用更广泛。针对汽车空调降温试验的工况范围,模拟夏季人坐在车内时的状态,可用于空调降温工况乘员舱内热环境舒适性的研究。

为了得出人体衣服表面温度与空调假人温度的修正关系,采用试验方法,得到在相同热环境下,空调假人表面与真人衣服表面的温度数据,并对二者进行拟合得到修正关系。进行试验的试验室相关参数见表 2。

表 2 环境模拟试验室参数

温度范围	-40~+60 ℃
相对湿度范围	10%~90%
温度精度	±0.5 ℃
相对湿度精度	±5%
温度均匀性	±1 ℃
相对湿度均匀性	±5%

相比车内环境,或者其他试验环境,整车环境模拟试验室中温、湿度均匀性好,并且可以精确控制。车内环境虽然更接近真实环境,但是由于车内温度环境均匀度非常差,无法保证真人与假人处于相同的温度环境条件下,不利于得到真人假人的温度修正关系,因此本试验选择在整车环境试验室中进行。

选取 4 名试验人员,统一穿着夏季工服与工装鞋,热阻约为 0.08 m²·K/W。试验中,试验人员与空调假人一起置于环境模拟试验室内,保证试验人员与空调假人都处于相同的夏季汽车乘员舱环境中。试验室湿度设定为 30%,接近夏季车内湿度环境。利用试验室循环风机模拟乘员舱内风速,约为 1 m/s,与乘员舱内风速接近。试验室内温度从 45 ℃缓慢降低至 20 ℃,同时采集真人衣服表面温度与空调假人表面温度。

由于人体不同部位的新陈代谢与人体活动强度不同,并且汽车乘员舱不同位置的热环境差异较大,所以人体不同部位的修正关系也会有所不同。因此,需要将人体分为若干部分,针对每一部分采集温度数据,并分别进行拟合。本试验中,人体被划分为额头、下巴、左胸、右胸、左大臂、右大臂、左小臂、右小臂、腹部、左大腿、右大腿、左小腿、右小腿、左脚、右脚等 15 个部分。温度传感器分布如图 2 所示。

对于空调假人,采集相同位置的温度数据作为对比。试验采用 K 型热电偶作为温度传感器,将热电偶的感应端用布基胶带粘贴在衣服表面,测量衣服表面温度。对于无衣服覆盖的面部等部分则将热电偶直接贴在皮肤表面,此情况认为面部衣服热阻为 0。4 名试验人员选择了健康的青年男性。试验时所有试验人员穿着统一的带有传感器的工服,与空调假人并排坐于环境模拟试验室中部,面向试验室蒸发器,可保

证风速条件与温度均匀性达到预期要求。试验情况如图 3 所示。试验过程中，所有试验人员需保持静坐，以保持人体新陈代谢活动的稳定，不受温度以外其他因素的影响。

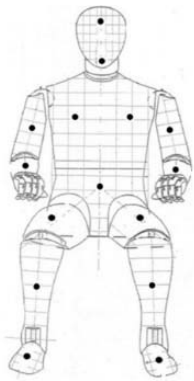


图 2 温度传感器分布位置

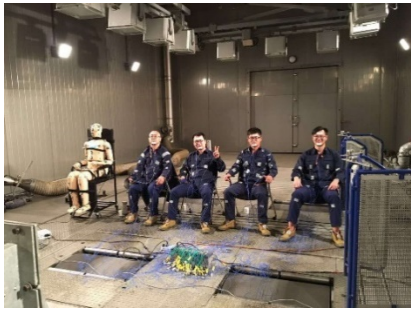


图 3 修正试验

2 空调假人与真人衣服表面温度的修正关系

2.1 试验数据分析

试验测得在同一时刻空调假人温度和真人衣服表面温度，便可将同一时刻的空调假人温度与真人衣服表面温度一一对应起来。选取 4 名试验人员衣服表面各位置的平均温度作为真人衣服表面不同位置的最终温度。从试验数据可以看出，在假人温度从 18℃ 上升至 44℃ 的过程中，人体温度从约 20℃ 上升至约 42℃（不同部位变化范围不同）。人体不同位置温度与空调假人的温度差别见表 3。

表 3 选取了假人温度 20、30、36、40℃ 四个温度点与真人温度进行对比。由于人体正常体温约为 36℃，因此在 20℃ 时，人体温度普遍高于假人温度。随着环境温度的上升，真人假人的温差不断缩小，并在 36℃ 左右接近。随后假人的温度高于真人温度，温差不断扩大，并且没有衣服遮盖的额头和下巴部分的温差明显大于其余有衣服遮盖的部分。

从试验数据可以看出，假人采集的温度数据与实际真人的数据有很大差距，当假人温度与人体正常体

表 3 真人假人试验数据对比分析			
位置	假人温度/℃	真人温度/℃	温差/℃
额头	20	29.9	9.9
	30	34.9	4.9
	36	36.0	0
	40	36.7	-3.3
下巴	20	28.6	8.6
	30	34.0	4.0
	36	36.0	0
	40	37.1	-2.9
胸	20	23.2	3.2
	30	32.5	2.5
	36	36.6	0.6
	40	39.6	-0.4
大臂	20	21.4	1.4
	30	32.0	2.0
	36	36.7	0.7
	40	40.5	0.5
小臂	20	25.2	5.2
	30	32.6	2.6
	36	36.3	0.3
	40	38.9	-1.1
腹部	20	22.5	2.5
	30	32.3	2.3
	36	36.5	0.5
	40	39.2	-0.8
大腿	20	23.5	3.5
	30	32.7	2.7
	36	35.9	-0.1
	40	38.6	-1.4
小腿	20	23.2	3.2
	30	31.9	1.9
	36	36.0	0
	40	39.0	-1.0
脚	20	23.9	3.9
	30	32.3	2.3
	36	35.3	-0.7
	40	38.6	-1.4

温差距越大时，真人假人的温度差距越大。尤其对于头部这种皮肤裸露的部分，在常温 20℃ 时产生了将近 10℃ 的温差，其余有衣服遮盖的部分也有约 3℃ 左右的温差。因此，对空调假人温度数据进行修正非常必要。

2.2 修正公式

以空调假人温度作为横坐标（ x 轴），以真人衣服表面温度作为纵坐标（ y 轴），拟合出人体不同位置真人衣服表面温度相对于空调假人温度的函数关系式： $y=f(x)$ 。采用二次函数进行拟合，拟合度均达

到 0.98 以上。其中额头与下巴为裸露皮肤, 其余测点有衣服覆盖。额头、下巴、腹部的温度修正关系如图 4 所示。

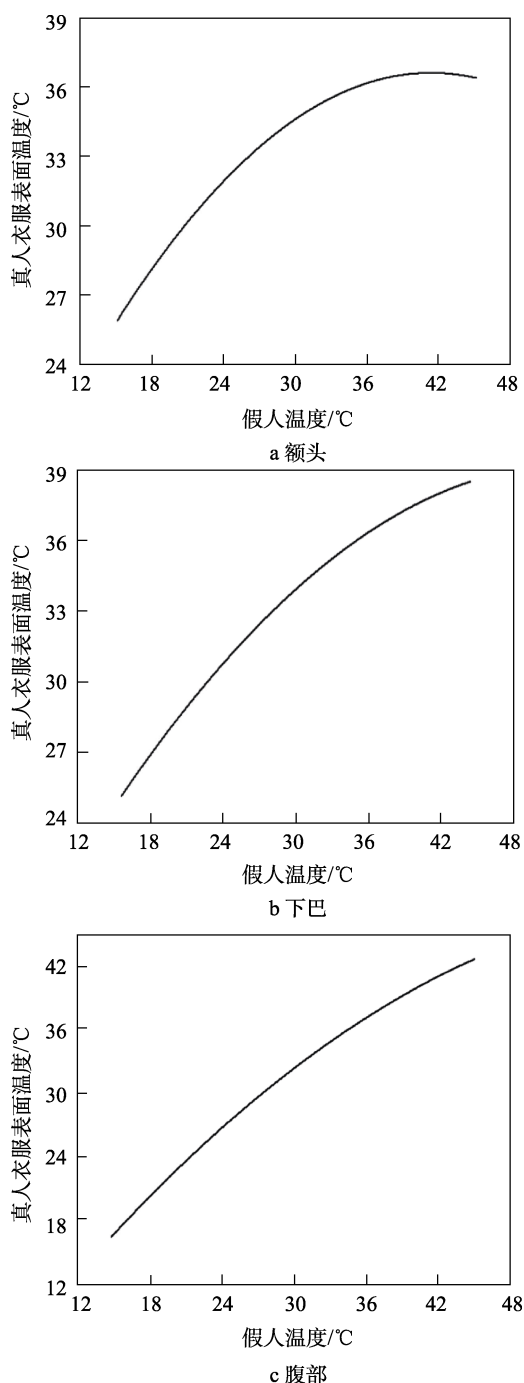


图 4 空调假人与真人衣服表面温度修正关系

从图 4a 中可以看出, 拟合曲线在 40 °C 左右时产生了拐点。表明超过 40 °C 后, 随着温度的上升, 额头表面的温度不再上升, 甚至有了微小下降。这是由于高温环境下人体通过出汗进行降温, 导致了皮肤温度的下降, 并且额头为人体出汗较为严重的部位, 因此有明显的温度下降。下巴部分出汗很少, 环境温度与人体温度正相关, 变化规律接近线性变化。

腹部和其他有衣服包裹的人体表面, 空调假人与真人衣服表面温度的修正关系与下巴的变化规律相似, 拟合曲线接近线性变化。本试验中, 人体 15 个不同位置的拟合公式见表 4。由于人体不同身体部位器官新陈代谢的发热量不同, 并不是左右对称的状态, 并且考虑到试验中的微小测量误差, 因此得到的不同位置的拟合方程不尽相同。在对称位置, 如左大臂右大臂的实际方程计算结果相差无几。

表 4 人体 15 个不同位置的拟合方程

额头	$y = -0.0158x^2 + 1.3028x + 9.8123$
下巴	$y = -0.0092x^2 + 0.9918x + 12.412$
左胸	$y = -0.0086x^2 + 1.3889x - 1.9785$
右胸	$y = -0.0102x^2 + 1.466x - 2.653$
左大臂	$y = -0.0115x^2 + 1.6447x - 7.07$
右大臂	$y = -0.0213x^2 + 2.2697x - 16.167$
左小臂	$y = -0.0113x^2 + 1.5298x - 3.315$
右小臂	$y = -0.0102x^2 + 1.2883x + 3.331$
腹部	$y = -0.012x^2 + 1.5887x - 4.6394$
左大腿	$y = -0.0144x^2 + 1.6048x - 2.8598$
右大腿	$y = -0.012x^2 + 1.3878x + 1.6523$
左小腿	$y = -0.0078x^2 + 1.2467x + 1.3712$
右小腿	$y = -0.0073x^2 + 1.243x + 1.2409$
左脚	$y = -0.0077x^2 + 1.2834x - 0.9407$
右脚	$y = -0.0069x^2 + 1.1452x + 3.6889$

3 修正公式的应用与验证

3.1 热舒适性计算

得到空调假人与真人衣服表面温度的修正关系后, 在利用空调假人模拟真人进行热环境舒适性评价试验时, 空调假人所采集的温度数据可以更好地模拟真人在某一热环境的状态。PMV 指数为目前最广泛使用的热环境舒适度评价方法。PMV (Predicted Mean Vote) 指数为 Fanger 教授提出的人体舒适性评价体系。其结果范围是-3~3: -3 为冷、-2 为凉、-1 为微凉、0 为舒适状态、1 为微暖、2 为暖、3 为热。PMV 指数在-0.5~0.5 区间范围内为人体的舒适状态。根据 PMV 指数的计算公式 (详见 ISO 7730—2005 标准), 它的计算过程包含了若干影响人体舒适性的变量, 分别为人体代谢率、人体所做机械功、空气温度、服装表面温度、环境平均辐射温度、服装系数、水蒸气分压力、对流换热系数。在 ISO 7730—2005 标准中, 也引入了 PMV 指数作为评价建筑热环境舒适性的指标。

3.2 修正公式的用途

从 PMV 计算公式中可以看出, 衣服表面温度直接参与了 PMV 的计算。如果能够直接得到该参数,

则可以使 PMV 的计算更加简单, 并且准确。由于空调假人无法模拟人体发热量, 因此无法测量衣服表面温度, 并且无法模拟人体发热对于环境温度的影响。通过文中的修正公式, 则可以通过空调假人直接得到准确的衣服表面温度。虽然衣服表面温度可以通过计算得到, 但是 ISO 标准中的计算方法需要根据人体代谢、人体所做机械功、服装热阻、衣着系数、对流换热系数、平均辐射温度、环境温度这 7 个参数通过迭代计算得出。这些参数部分可以通过测量得到, 但是人体代谢、人体所做机械功、服装热阻无法获得准确值, 只能选择经验值进行计算。经验参数的计算会使计算结果产生误差, 并且衣服表面温度的计算方法含有迭代过程, 在实际的工程开发应用中存在一定的不便性。汽车空调试验一般持续数个小时, 数据量巨大, 若对每一时刻的舒适性都进行迭代计算, 会消耗大量时间。修正公式的应用可以大大提高计算效率。

3.3 修正公式的验证

为了验证修正公式的准确性, 选择整车空调降温试验这个实际应用的工况进行验证。将真人和假人同时置于车内相同环境的位置, 真人一名坐在驾驶员位置, 空调假人置于副驾驶位置, 以测量真人衣服的表面温度作为标准进行对照, 对比修正公式计算得到的衣服表面温度和传统计算方法 ISO 标准中公式计算得到的衣服表面温度。考虑到过多的传感器会影响驾驶员驾驶汽车, 因此只采集了下巴、右胸、腹部、右大腿四个点的温度数据, 来验证表 4 中相同位置的修正公式。试验进行至 10 min 时, 不同部位的温度见表 5。

表 5 验证试验的温度

	真人实测/℃	ISO 标准		修正公式	
		计算温度	相对误差	计算温度	相对误差
		/℃	/%	/℃	/%
下巴	34.2	31.9	6.7	33.7	4.3
右胸	35.1	34.1	2.8	34.3	2.3
腹部	35.4	34.7	4.8	35.8	1.1
右大腿	35.3	36.3	2.8	35.8	1.4

对比表 5 中的数据可以发现, 修正计算产生的误差在 1%~3%左右, 但是 ISO 公式计算的误差最多则会超过 6%。对于同样位置的温度, 通过修正公式计算得到的值更加接近真人测得的真实值。由此可以认为, 修正公式相比传统方法 ISO 公式计算的结果误差更小。

直接利用真人参与试验, 采集真人的温度数据尽管比空调假人更加准确, 但是大多空调系统试验环境恶劣, 极端环境不利于人体健康。由于不同人体的发热量不同, 会导致试验的重复性很差, 因此利用空调

假人代替真人进行模拟试验是热舒适性研究的最佳研究方法。

4 结论

文中通过试验的方法, 得出了一种空调假人温度与真人衣服表面温度的修正公式。修正公式可以减少甚至避免由于空调假人不存在新陈代谢而导致的与真人体表温度的差异。在利用空调假人进行汽车乘员舱热舒适性评价时, 通过修正公式, 可以将空调假人测得的温度数据修正为真人衣服表面的温度, 并进行 PMV 指数计算。该计算方法将修正后的真人衣服表面温度带入 PMV 指数计算公式可减少有关人体新陈代谢经验值的应用带来的误差, 并且避免了繁琐的迭代计算, 提高热舒适性的计算精确度及计算效率。

由于人体对于不同环境条件的反应有很大区别, 针对夏季空调降温过程进行了试验模拟, 并得出了温度拟合的修正公式, 因此本文的修正公式对于夏季环境的空调降温过程有更好的适用性。对于冬季采暖或者其他环境下的温度修正, 可以按照该试验方法进行相应的修正试验, 得出适用于不同环境下更加准确的修正关系。

参考文献:

[1] 伊虎城. 整车乘员舱空调热舒适性评价体系研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016

[2] 王丹, 刘双喜, 牟江峰. 乘员舱热舒适性评价方法[J]. 汽车工程师, 2015(8): 40-43

[3] BS EN ISO 7730: 2005, Ergonomics of the Thermal Environment —Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria[S].

[4] 许景峰. 浅谈 PMV 方程的适用范围[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(3): 13-18

[5] 尹郁琦. 汽车乘员舱热舒适性研究与改进[D]. 湖南: 湖南大学, 2011

[6] 张文灿. 汽车乘坐空间热环境与成员热舒适性分析关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013

[7] 李进. 汽车乘员舱热舒适性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012

[8] 赵梦洋. 基于人体热调节模型的汽车乘员舱热舒适性探究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015

[9] 倪冬香. 基于人体热调节模型的轿车乘员舱热舒适性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2010

[10] AUGUSTIN K, PROKSCH C, ZIPF C, et al. Thermal Comfort Increase through Advanced Airflow Analysis[J]. SAE Paper 2005-02-2001, 2005.

[11] VAN H J. Forty Years of Fanger' s Model of Thermal Comfort: Comfort for All[J]. Indoor Air, 2008, 18(3): 182-201