

## 典型物体表面温度的测量及初步计算

龚璐<sup>1</sup>, 沈国土<sup>1</sup>, 蔡继光<sup>1</sup>, 董占海<sup>2</sup>, 高景<sup>2</sup>

(1.华东师范大学物理系, 上海 200241; 2.上海交通大学物理系, 上海 200240)

**摘要:** 热特性模拟广泛应用于电力、消防、工业、医疗、安防等国民经济及军事部门, 而验证是模拟软件优化发展过程中重要的一个环节; 对于热特性模拟软件来说, 一般通过实验验证对软件进行验证。为了有效快速地进行验证, 将地面物体简单处理为 CUBI 及立方体模型。放置于各实验模型物体表面特征位置(面中心、中线)的热电偶可获得物体的实测温度数据, 模拟软件所需的某些输入参数可以通过风速仪等相关仪器获得。通过对实验及计算数据的比较验证了该模拟软件的精确度基本符合要求, 并且还发现了在模拟软件中应该注意的一些问题。

**关键词:** 热特性模拟; CUBI; 实验验证; 发射率; 模型表面温度

中图分类号: P422.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2013)07-0439-04

## Measurement and Preliminary Calculation of Typical Object Surface Temperature

GONG Lu<sup>1</sup>, SHEN Guo-tu<sup>1</sup>, CAI Ji-guang<sup>1</sup>, DONG Zhan-hai<sup>2</sup>, GAO Jing<sup>2</sup>

(1.Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2.Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Thermal characteristics modeling is widely used in national economic and military departments, such as electric power, fire control, industry, medical treatment and security; and validation is an important step in the development and optimization of modeling software. For thermal characteristics modeling software, experimental validation is usually utilized to verify. In order to test rapidly and effectively, we simply take the geometry of ground vehicles as CUBI or cube. The thermocouples installed in feature positions of the surface of experimental model (surface center, the center line) to obtain measured temperature data of the object; some input parameters the modeling software requires can be gained via the anemometer and related instruments. Through the comparison of the experiment and calculation data, the accuracy of the modeling software is proved to basically conform to requirements; and some problems of the modeling software which should be paid attention to are also found.

**Key words:** thermal characteristics modeling, CUBI, experimental validation, emissivity, model surface temperature

### 0 引言

热特性模拟技术应用于传感器性能研究、目标自动识别等诸多领域<sup>[1-2]</sup>, 随着相关技术的飞速发展要求对应用的模拟软件进行验证以提高其精确度并评价软件的相关性能。而实验验证是一种典型的方法, 实验具有相当的复杂性; 根据国外的文献一般采用标准体进行实验测量<sup>[3]</sup>。本文为了验证相关软件也设计了类似的具有基本几何框架的 CUBI、立方体这两类实验模型物体, 此外为了研究物体发射率对模拟的影响

分别构造了 3 种不同发射率的立方体实验模型物体。在适宜的气象条件下于户外测量各模型物体表面的中心温度并与相应的计算模拟数据比较, 为软件的优化提出了一些想法。

### 1 装置与实验

如图 1 所示实验所在地点为上海交通大学大草坪, 其地理位置为东经 121°36′、北纬 31°15′<sup>[4]</sup>, 主要实验装置包括 1 个 CUBI 模型和 3 个具有不同发射率的立方体模型。CUBI 模型高、长均为 0.5 m, 宽 0.25

收稿日期: 2013-03-04; 修订日期: 2013-04-07.

作者简介: 龚璐 (1988-), 女, 江西南昌人, 硕士生, 主要从事计算机模拟的研究工作。

通讯作者: 沈国土 (1970-), 男, 浙江宁波人, 副教授, 主要从事物理问题计算机建模方面的研究。E-mail: gtshen@phy.ecnu.edu.cn.

m; 其内层为一定厚度泡沫塑料; 另外 3 个  $0.5\text{ m}^3$  立方体模型依附泡沫塑料模型搭建而成, 面元之间有塑料板相隔, 因此各面元之间的传导可忽略。钢板的物性参数: 密度  $7769\text{ kg/m}^3$ , 比热容  $461\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ , 传导率  $52\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ , 厚度  $0.002\text{ m}$ ; 塑料板的物性参数: 密度  $20\text{ kg/m}^3$ , 比热容  $1350\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ , 传导率  $0.035\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ , 厚度  $0.025\text{ m}$ 。由于涂层有较大的影响<sup>[5]</sup>, 因此这里各模型钢板表面涂层是不一样的: CUBI 及立方体 A 模型表面涂层为酚醛调和漆, 表面呈蓝色, 其红外发射率 $\varepsilon=0.83$ ; 立方体 B 模型表面涂层为混有 2% 铝粉的酚醛调和漆, 表面呈浅蓝色,  $\varepsilon=0.8$ ; 立方体 C 模型表面涂层为混有 3% 铝粉的酚醛调和漆, 表面呈灰色,  $\varepsilon=0.75$ 。这 4 个实验模型都是内部中空、底部开放的, 并且实验装置不是直接放置于地面, 而是放于具有隔热作用的塑料板上, 这样避免了模型的底部被草坪的植被所遮挡而影响实验。



图1 实验地点 Fig.1 The site of experiment

实验过程中我们将 CUBI 较低的部分朝北 (立方体模型朝北的面为热电偶<sup>[6]</sup>11、16、21 所在表面), 如图 2 所示。模型表面中心温度是通过安放于如图所示的圆点位置的 23 个热电偶所获得的, 热电偶温度采集时间间隔  $20\text{ s}$ 。除此之外我们还对一些与热模拟有关的环境参数如: 空气温度、地表温度、湿度、风向等进行测量, 其中地表温度由 24 号热电偶测量, 采集时间间隔  $20\text{ s}$ ; 风速及空气温度采集时间间隔为  $60\text{ s}$ ; 另红外热像仪可对实验模型拍摄其热像图。实验尽量选择在天气较晴朗、云量较少的气候条件下进行。

2 实验结果

2012 年 9 月 11 日及 2012 年 9 月 18 日当日云量少、湿度 40%RH, 气温分别为  $34^\circ\text{C}$ 、 $26^\circ\text{C}$ , 其晴朗的气候条件比较适合实验的进行。我们分别在这两天的上午、中午、下午各时间段对模型表面温度进行测量: 表 1~表 4 分别为 CUBI、立方体 A、B、C 模型在 2012-9-11 9:59:56 和 2012-9-18 13:59:56 的测量结果; 图 3 为热像仪对 CUBI 模型 2012-9-18 17:14:16 所拍摄的热像图, 将同时刻的实验温度数据与热像图像比较可分析实验数据的准确性; 如根据温度采集器所记录 2012-9-18 17:14:23 TC1、TC2、TC3 温度分别为  $24.9^\circ\text{C}$ 、 $24.2^\circ\text{C}$ 、 $24.9^\circ\text{C}$ 。根据图 3, 上述面元温度

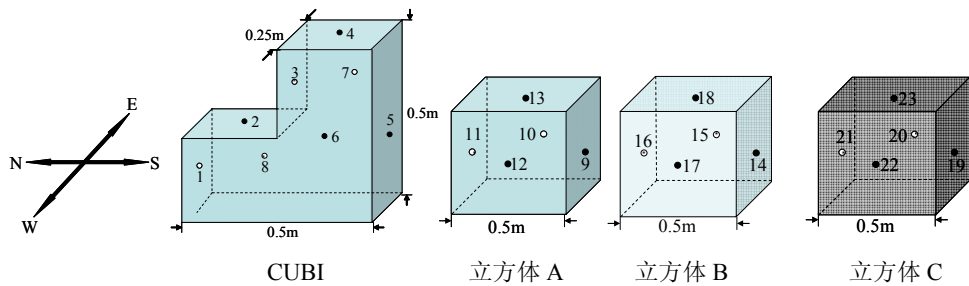


图2 模型放置方位及各热电偶位置图示 Fig.2 Model orientation and drawing of the thermocouple installation

表 1 CUBI 模型物体表面温度				Table 1 Surface temperatures of CUBI				
时刻	温度/℃							
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
2012-9-11 09:59:56	38.6	40.7	37.5	45.3	46.7	36.3	49.2	47.7
2012-9-18 13:59:56	34.0	40.8	35.4	43.2	43.3	47.5	36.8	35.3

表 2 立方体 A 模型表面温度				Table 2 Surface temperatures of Cube A				
时刻	温度/℃							
	TC9	TC10	TC11	TC12	TC13			
2012-9-11 09:59:56	49.4	52.1	34.4	34.8	52.8			
2012-9-18 13:59:56	43.7	33.4	33.3	49.1	47.4			

时刻	温度/℃				
	TC 14	TC 15	TC 16	TC 17	TC 18
2012-9-11 09:59:56	48.3	52.4	35.1	34.4	50.6
2012-9-18 13:59:56	45.1	34.0	33.7	47.5	46.3

时刻	温度/℃				
	TC 19	TC 20	TC 21	TC 22	TC 23
2012-9-11 09:59:56	44.1	45.6	30.4	31.7	45.1
2012-9-18 13:59:56	42.2	33.0	32.4	44.8	42.8

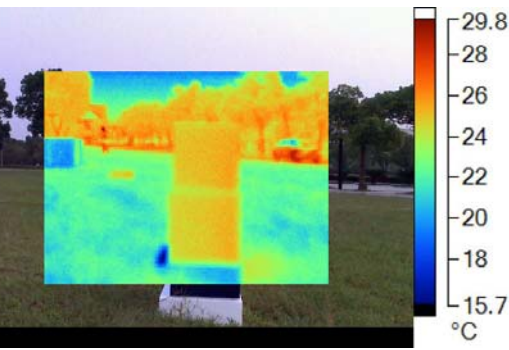


图3 CUBI的热像图(2012-9-18 17:14:16)

Fig.3 IR image of CUBI

应在 24~26℃,由此可知此刻实验数据的测量是较准确的。

从实验结果来看:上午 10 点太阳主要直射东、上朝向的表面,因此 TC4、TC7、TC8、TC10、TC15、TC20 温度较之其他表面温度均较高;TC2 所在表面虽然朝上但是与同样朝上的 TC4 相比温度低 6℃,应是被模型高出部分遮挡所致。在 2012-9-11 9:59:56 时刻,不同发射率的立方体模型相同朝向的各个表面中心温度从高至低依次为 A、B、C,但是在 2012-9-18 13:59:56 时刻基本上为模型 B 的温度较高。

3 实验与计算结果的比较及分析

根据模型的物性参数及实验所测的环境参数设置热特性模拟软件的相关运行参数,我们得到了与实验值对应的计算数据。图 4 为模型的 23 个面元表面温度分别在 2012-9-11 9:59:56 和 2012-9-18 13:59:56 时刻实验与计算值的比较结果,其中 y 轴为计算值减去实验值(单位℃),x 轴为热电偶序号。

总体上实验值与计算值大体符合,差别较大(> 3℃)的面元表面温度集中在太阳光照射面如:2012-9-11 9:59:56 的 TC10(东)、TC13(上)、TC15(东)、TC18(上),2012-9-18 13:59:56 的 TC5(南)、

TC9(南);非太阳光照射面的实验与计算值之差在± 2℃左右。

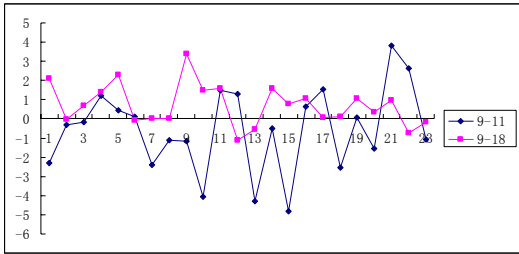


图4 实验与计算结果的比较

Fig.4 Comparison of surface temperatures measured and modelled

分析具有不同红外发射率的立方体模型 A、B、C 各表面温度,发现计算数据显示的结果与实验数据存在以下差异:

- 1) 变化趋势,计算结果在不同时刻不同面元均显示为发射率越大温度越高,而实验数据在不同时刻或者不同照射情况下面元的温度随发射率的变化并不是一成不变的,如 2012-9-18 13:59:56: TC9(模型 A,朝南) 43.7℃ < TC14(B,南) 45.1℃, TC12(B,西) 49.1℃ > TC17(B,西) 47.5℃。
- 2) 变化幅度,计算数据显示发射率 $\epsilon$ 减小 0.1,模型表面温度降低最大值为 2℃,而实验中模型 A( $\epsilon=0.83$ )与模型 C( $\epsilon=0.75$ )同一时刻相同对应位置的最大温度差异会达到 5℃以上。

4 结论与展望

通过对计算数据与实验数据的比较,可认为模拟软件对物体温度场的模拟结果基本符合要求,其差异大致为± 3℃。为了提高软件模拟温度的精确度,在日后的工作中我们需注意以下几点:

- 1) 在温度场模拟软件中,一般将物体假定为灰体,即物体表面的 $\alpha=\epsilon$ <sup>[7]</sup>。通过实验验证这一假定在物体的发射率 $\epsilon$ 较小而物体所处环境有较强的太阳辐

射时并不合理,其太阳能吸收率 $\alpha$ 极可能小于发射率 $\varepsilon$ 。实际上在计算立方体模型 C ( $\varepsilon=0.75$ ) 的表面温度时,我们将物体太阳能吸收率设置为 $\alpha=0.65$ ,而其计算结果与实验值相比于将物体作为灰体的计算结果而言符合的更好。

2) 通过计算与实验结果的比较发现误差较大的面元主要在太阳的照射面,这意味着需改善模拟软件对太阳能辐射部分的计算。

3) 在调整模拟软件的设置参数时发现改变气象视距对物体表面温度有如下影响:气象视距每增加(减小)5 km 照射面中心温度上升(下降)3~4℃,对于非照射面每增加(减小)5 km 温度上升(下降)1~2℃。而对于不同地理位置的气象视距<sup>[8]</sup>可能存在较大变化,因此提高对气象视距的测量精确度是提高模拟软件的精确度的一个改进方向。

4) 在分析实验数据过程中发现由于如热电偶从物体表面脱落等因素造成实验数据的偏差,为了能够对计算与实验结果更精确的比较,我们需提高实验结果及相关气象参数测量值的精确度。另外,由于本次实验对物体模型温度的测量时间间隔较短——20 s,时间跨度也小于1 h,而对物体温度的模拟时间间隔相对来说较长,因此本文并未给出测点测量值和模拟

值随时间变化的对比图;在日后的工作中,我们需获得在不同气候条件下的更全面实验数据,以对计算与实验结果做更精确的比较。

## 参考文献

- [1] Bushlin Y, Lessin A, Reinov A. Comparison of thermal modeling and experimental results of a generic model for ground vehicle[C]//*Proc. of SPIE*, 2006, **6239**: 62390-1-10.
- [2] 林杰,江勇,方浩百,等.飞机整机蒙皮自身红外辐射特性建模与分析[J].*红外技术*, 2012, **34**(5): 286-291.
- [3] Alain Malaplate, Peter Grossmann, Frederic Schwenger. CUBI-a test Body for thermal Object Model Validation [C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6543**: 654305-1.
- [4] Earth Online[EB/OL]. Google Earth. [2013-01-15] <http://www.earthol.com>.
- [5] 李东臻,杨立,张士成.涂料发射率对航行舰艇红外特征的影响研究[J].*红外技术*, 2010, **32**(11): 676-680.
- [6] 张明春,肖燕红.热电偶测温原理及应用[J].*攀枝花科技与信息*, 2009, **34**(3): 58-62.
- [7] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006: 365-384.
- [8] 何立明,王华,阎广建,等.气溶胶光学厚度与水平气象视距相互转换的经验公式及其应用[J].*遥感学报*, 2003, **7**(5): 372-37.