

文章编号: 1672-8785(2010)03-0030-07

基于红外热像技术的服装舒适性研究

李云红^{1,2} 孙晓刚¹ 张 龙²

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001;

2. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 根据热辐射理论和红外热像仪的测温原理, 建立了基于红外热像技术的服装舒适性研究的测试平台, 并用红外热像仪直接测量不同环境里的服装在穿着状态下表面温度场的分布。通过采集到的热图像来进行温度场分析和数据处理, 直观判断出服装在真实穿着条件下衣内的实际温度变化情况, 进而推出服装及服装面料的隔热性能。通过对紧贴皮肤部位的服装面料的最高温度来比较服装面料的热阻大小, 从而判断整个服装隔热值的相对大小。分析了穿着实验的客观结果和主观评价结果, 并得知三种实验服装中 50/50 大豆 / 棉服装的热湿舒适性能最好。红外热像技术测评方法在服装热舒适研究领域和实际应用中不失为一种行之有效的方法, 是判断服装的热舒适性能的重要工具之一。

关键词: 红外热成像技术; 服装隔热性; 热阻; 服装舒适性

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.03.007

Clothing Comfort Research Based on Infrared Thermal Imaging Technology

LI Yun-hong^{1,2}, SUN Xiao-gang¹, ZHANG Long²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Electronics & Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: According to the theory of heat radiation and the temperature measurement principle of an infrared thermal imager, a platform for testing clothing comfort based on the infrared thermal imaging technology is built. The surface temperature field distribution of the clothing worn by a person is directly measured by using an infrared thermal imager in different environment. The collected thermal images are used to analyze the temperature field and judge the change of the actual temperature of the clothing worn by the person, so as to deduce the thermal insulation properties of the clothing and the cloth used. The objective experiment result and the subjective assessment result are analyzed. The analysis result shows that among three experimental clothing, the clothing made of the cloth containing 50% soybean fiber and 50% cotton has the best thermal-wet comfort. This evaluation method based on the infrared thermal imaging technology is effective and can be used as one of the important tools for judging the thermal comfort of clothing.

收稿日期: 2009-11-04

基金项目: 中国纺织工业协会科技指导性项目 (2008012); 陕西省自然科学基金 (2009JQ8022); 陕西省教育厅自然科学基金 (09JK468); 西安工程大学 2009 年度校基础研究基金项目资助课题 (09XG06)

作者简介: 李云红 (1974-), 女, 满族, 辽宁锦州人, 博士研究生, 副教授, 主要从事红外热成像技术及红外热像仪的温度测量技术的研究。E-mail: hitliyunhong@163.com

Key words: infrared imaging technology; clothing insulation; thermal resistance; clothing comfort

1 引言

在人体-服装-环境系统中,服装与人体及环境的关系是复杂的。人是必须保持恒定体温的恒温动物。人体通过出汗、血管收缩及扩张来调节温度变化以保持体温。在各种气候和生理条件下,服装在人体和环境之间起到热阻的作用,从而保证人体的热状态处在人体生理调节的范围之内。人体的散热在大部分情况下是处于微汗状态,因此在绝大多数的纺织服装面料都具有一定的透汽能力的情况下,服装面料的隔热性能就是人体保持热舒适性的一个重要指标^[1,2]。

热湿舒适性领域的研究一直受到许多学者的重视,国外学者在20世纪40年代初就开始从生理学和气候学的角度对服装穿着的热湿舒适性进行研究。进入20世纪60年代,随着合纤的广泛应用,常规合纤面料在使用中所产生的闷热感促进了服装热湿舒适性的研究。20世纪70年代以后,关于服装热湿舒适性的研究进一步活跃,研究者除了以生理方法、人体穿着实验方法和仪器模拟实验方法对服装热湿舒适性进行大量研究外,还以数学和物理的方法对服装系统热湿交换过程作了大量的研究。目前,研究服装面料的热湿舒适性的方法主要有微气候参数评价法、暖体假人法、生理学评价法、心理学评价法和综合评价法^[3,4]。李俊等人^[5]通过测量相同的冷刺激条件下的人体主要部位温度的动态变化来评价服装的热湿舒适性。Fato等人^[6]通过对室内气候参数的调查和问卷形式的心理舒适评价,得出一种适用调查区域的舒适气候算法。Ji, X.L.等人^[7]对上海地区无空调建筑的室内气候的热湿舒适性进行调查,以研究环境条件对人体热舒适性的影响。

服装面料的热阻通常用平板仪、圆筒仪来测定,其基本公式 $R = \Delta t/q$ 由傅里叶导热基本定律导出。但上述测量方法都无法直接测量面料的表面温度,而使用环境温度代替面料的表面

温度实际上包含了面料外附面空气层的热阻,这就需要对附面层空气的热阻进行测量后再相减才能得到面料的热阻。而影响附面空气层热阻的因素有很多,实际的附面空气层也常处于不稳定状态,精确测量就很难达到。也就是说,使用上述方法测得的面料的热阻是一个随附面空气层的变化而变化的相对值。另一方面,平板仪等装置的测量结果也不能代替人体对服装面料隔热性能的直接感觉。

红外热像技术可敏锐地感知到物体表面的红外辐射,还可精确地测量出物体表面的温度分布^[8-11],并以热图的方式体现出来。因此,通过红外热像仪直接测量服装在穿着状态下的表面温度场情况,进而推出其及服装面料的隔热性能,为服装舒适性研究提供了一种新方法。

2 理论基础

红外辐射是自然界中存在的一种最为广泛的电磁波辐射。温度在绝对零度以上的物体都会因自身的分子运动而辐射出红外线,从而在表面形成一定的温度场。物体的红外辐射的能量大小及其波长的分布都与它的表面温度有着十分密切的关系,因此,通过对物体自身辐射的红外能量进行测量,便能准确地测定物体的表面温度。

$$E_{i\tau} = e_{i\tau} c_1 l^{-5} \frac{1}{e^{c_2/lT} - 1} \quad (1)$$

式中, $E_{i\tau}$ 为一定温度的物体在某个红外波段中的辐射能,单位是 $W/(m^2 \cdot \mu m)$; l 为波长,单位是 mm ; T 为物体的热力学温度; c_1 为第一辐射常数,等于 $3.742 \times 10^{-4} W \cdot m^2$, c_2 为第二辐射常数,等于 $1.439 \times 10^4 mm \cdot K$; $e_{i\tau}$ 为物体表面发射率。通常,纺织面料的发射率在0.84左右。

根据热量传导的傅里叶定律,人体、服装、环境组成多层传热介质的传热结构,其模型如图1所示。假设服装是一层紧贴皮肤的均匀传热(隔热)介质,则下式成立:

$$q = \frac{t_c - t_a}{R_c + R_b + R_a} \quad (2)$$

$$q = \frac{t_c - t_s}{R_c} = \frac{t_s - t_b}{R_b} = \frac{t_b - t_a}{R_a} \quad (3)$$

式中, t_c 、 t_s 、 t_b 、 t_a 分别为身体内部的温度、身体表面的温度、服装表面的温度和环境温度, 单位是 $^{\circ}\text{C}$; R_c 、 R_b 、 R_a 分别为身体的热阻、服装的热阻和环境空气层的热阻, 单位是 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ 。身体内部的温度 t_c 及其热阻 R_c 和环境空气的温度 t_a 及其热阻 R_a 可以认定为恒定值。如果测得服装面料表面的温度 t_b 升高, 根据式 (3), 则 q 增加, t_s 降低, R_b 减小。此时, 皮肤表面的温度下降, 服装面料的热阻值减小, 说明该服装具有较好的散热性。

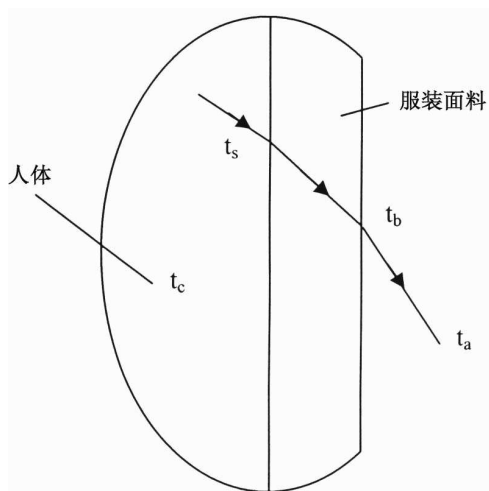


图 1 人体-服装-环境散热结构模型

3 服装面料的红外测温实验

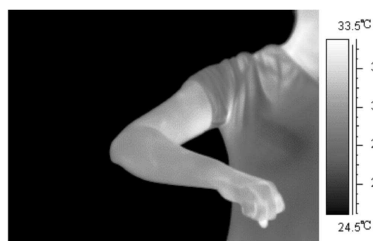
采用 ThermoCAMTM SC3000 制冷型红外热像仪来拍摄紧贴皮肤表面的面料的温度场图像, 此时面料与皮肤之间没有空气层, 这就可以把面料和皮肤表面空气层的影响降到最低。扫描温度图像显示以后, 截取最高温度值。因为对于同一面料, 最高温度处代表面料与皮肤表面最服贴的地方, 也最能表现织物的性能; 对于不同面料, 只有截取最高温度, 才能最有效地进行对比。

3.1 实验条件

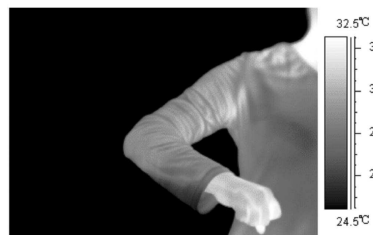
在 25°C 、相对湿度为 55% 的恒温恒湿条件下, 将 6 种面料的织物覆盖于手臂上, 待织物表面的温度稳定后, 用红外热像仪分析并比较织物

表面的温度变化, 得到的红外图像如图 2 所示。之所以拍摄手臂上的温度分布图, 是因为袖子的服贴性比较好, 测试的温度比较准确; 同时降低了实验难度, 用于面料的性能测试也比较快捷。

图 2(a) 是裸臂的红外图像, 可作为参考。图 2(b) 所示为覆盖了用待测织物制成的袖子且表面温度稳定后的红外图像, 通过红外图像处理软件分析出所选区域中的最高温度值 t_b 。



(a) 裸臂的红外图像



(b) 有面料包裹的手臂的红外图像

图 2 红外图像

3.2 实验数据

依据式 (3) 可判断出面料的隔热值 (热阻) 的相对大小, 结果如表 1 所示。

表 1 测试面料及其隔热值的大小排序

面料编号	成分	$t_b (^{\circ}\text{C})$	排序
A	35% 粘胶 / 65% 天丝	31.6	2
B	45% 涤纶 / 55% 天丝	30.6	4
C	40% 锦纶 / 60% 天丝	33.1	1
D	100% 涤纶	30.7	3
E	100% 粘胶	28.7	6
F	100% 棉	29.0	5

3.3 实验结果

人们通过穿着适当的服装来创造人体表面与服装里层之间的舒适气候以适应外界的环境。人体穿上衣服并能感到舒适时, 服装内的

气候在 $(32 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的温度、 $(50 \pm 10)\%\text{RH}$ 的湿度、 $(25 \pm 15)\text{cm/s}$ 的气流左右, 这是标准服装气候。如果衣内的温湿度超出这个范围, 人体就会感到不舒适。

由表 1 可知, 6 种服装面料的隔热性排序为: $C < A < D < B < F < E$ 。使用同样的方法可直接对人体穿着的不同服装面料的隔热值进行相对比较, 进而对整件服装的隔热性能进行评价, 如图 3 所示。

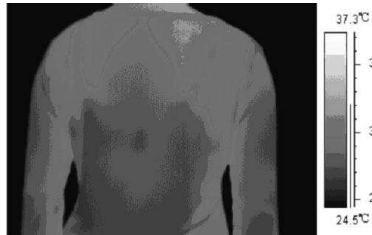


图 3 人体穿着服装时的红外图像

4 服装面料的热传递性能实验

采用 ThermoCAMTM SC3000 制冷型红外热像仪拍摄紧贴皮肤表面的面料的温度场图像。通过比较受试者穿着不同服装时的体表温度变化, 结合面料的热传递性能来研究不同混纺织物的热舒适性。

4.1 面料

选取几种大豆纤维及其与棉混纺的针织面料, 并选取棉和莫代尔纤维面料作对照。面料都是由纤度为 25tex 的纱线织成的平针织物, 具体参数如表 2 所示。试样 1~5 为成布, 其中试样 3 为大豆纤维本色成布, 6 和 7 为坯布; 含有氨

纶的试样中, 氨纶的比例为 4%~5%。

4.2 实验条件

面料的穿着实验都是在恒温恒湿的室内中进行。其中, 环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(55\% \pm 5\%)$, 风速 $\leq 0.1\text{m/s}$, 测试距离 $\leq 1\text{m}$ 。

选择的受试者为 6 名男性, 年龄为 (23 ± 2) 岁, 体重为 $(65 \pm 5)\text{kg}$, 身高为 $(175 \pm 2)\text{cm}$ 。通过大量的预实验了解到, 在人体以 5.8km/h 的速度运动了 30min 后, 体表的温湿度可以在半小时左右以后恢复到静坐阶段时的水平。根据预实验结果将实验过程分为三个阶段: 第一阶段 (Period1, 简称 Pd1) 为静坐休息阶段, 开始测试受试者静坐 10min 时的体表温湿度; 第二阶段 (Period 2, 简称 Pd2) 为运动阶段, 受试者在运动自行车上匀速运动 30min; 第三阶段 (Period 3, 简称 Pd3) 为恢复阶段, 受试者静坐 30min, 等到体表的温湿度慢慢恢复至初始状态。

实验中选择两个实验测量点 (即热像仪的固定点): 依据人体汗腺的分布特点, 选定前胸和背胛这两个出汗较多的位置。采集热图的时刻分别为运动 15min (实验总时间的第 25min)、停止运动后的 5min (实验总时间的第 45min) 和休息 25min 后 (实验总时间的第 65min)。

4.3 实验结果

实验过程历时 70min, 每分钟可以记录一组数据, 记录的全程数据可连成曲线变化图。以 50/50 大豆 / 棉面料服装为例, 上下午两组受试者穿着实验中的体表测量点的温度变化分别如图 4 所示, 图 (a)、(b)、(c) 为上午受试者的体

表 2 面料规格

编号	成分	厚度 (mm)	横密 (圈 / 5cm)	纵密 (圈 / 5cm)	平方米克重 (g/m^2)
1	大豆纤维 + 氨纶	0.60	90	110	220
2	70/30 豆 / 棉 + 氨纶	0.69	90	130	230
3	50/50 豆 / 棉 + 氨纶	0.68	80	135	240
4	棉 + 氨纶	0.72	80	135	280
5	莫代尔	0.58	70	120	220
6	大豆纤维 + 氨纶	0.83	90	110	230
7	50/50 豆 / 棉 + 氨纶	0.81	80	135	260

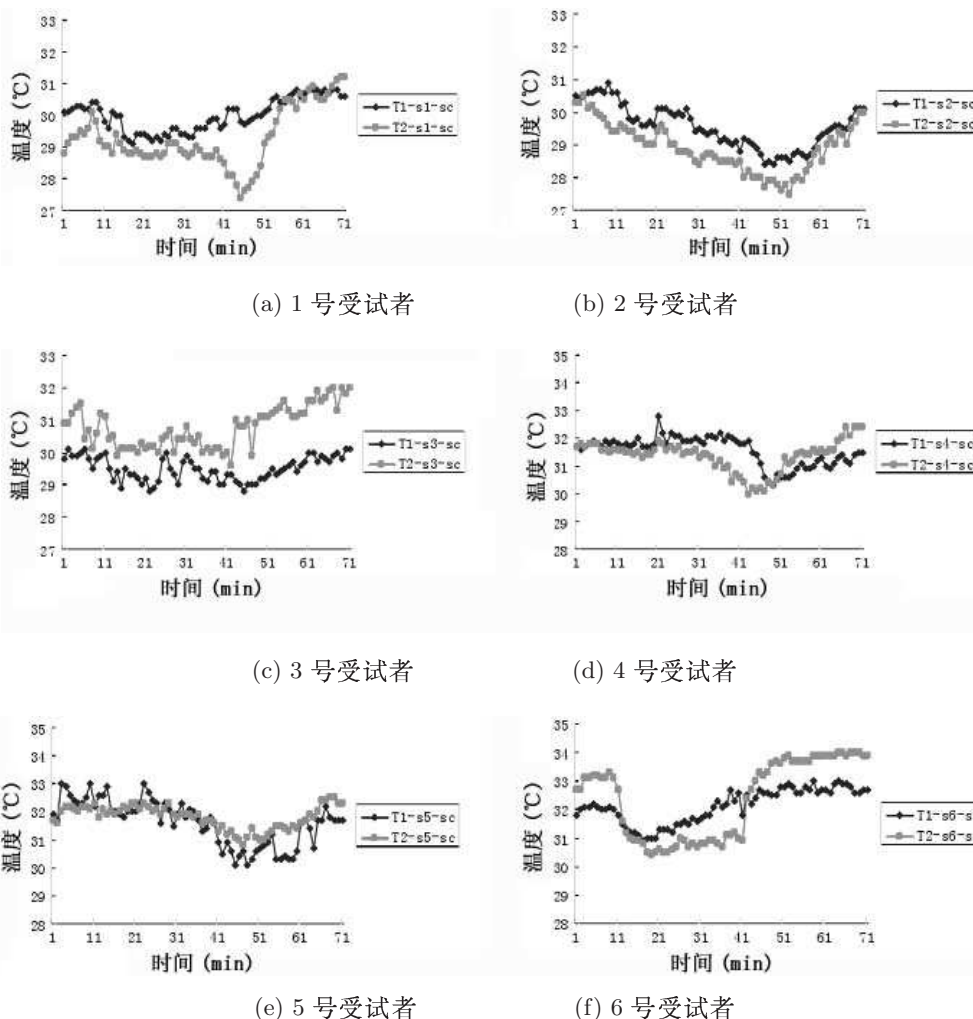


图 4 受试者的体表温度变化图

表温度变化图, 图 (d)、(e)、(f) 为下午受试者的体表温度变化图。图表中符号的意义分别是: S 为大豆纤维试样, SC 为大豆与棉混纺试样, C 为棉纤维试样; T 为温度, 数字 1 和 2 为测量点编号, 1 为后背, 2 为前胸, S1 至 S6 为受试者编号。

4.4 结果分析

由于个体间的差异, 受试者体表温度的大小和变化及受试者出汗时间的早晚和出汗量也不相同。但实验过程中受试者体表温度的变化趋势是一致的, 都是先下降后上升再恢复到原来水平: (1) 在静坐阶段 (0min ~ 10min), 体表温度较稳定; (2) 进入运动阶段后 (10min ~ 40min), 由于运动而产生的热量导致体温上升。当体温

上升到自律调节点时, 人体为了维持体温而开始通过出汗来散热, 此时汗液在蒸发并散失到外环境的过程中带走了大量的热量, 所以体表温度开始下降。(3) 恢复阶段 (40min ~ 70min), 由于体表积聚的大量汗液还在蒸发和散失, 在一定时间内体表温度持续下降, 然后逐渐回升到静坐时的温度。同一个受试者的后背 (T1) 和前胸 (T2) 这两个测量点的温度变化趋势是一致的, 前胸的体表温度变化幅度比后背大。两名受试者 (编号分别为 S1 和 S5) 穿着 SC 服装时, 上午和下午各自的温度变化结果如图 5 所示。两名受试者在上午和下午的体表温度的变化趋势是一致的, 其中下午的体表温度较高。人体在 24h 内的体温呈周期性变化, 且上午的体温低于下

午。本实验测得的上下午的体表温度趋势与这种体温的周期性变化是吻合的。原本较高的下午的体温比上午更早地达到人体的相对稳定的出汗自律调节点, 所以在本实验设定的运动条件下, 下午时人体的出汗时间要早一些。

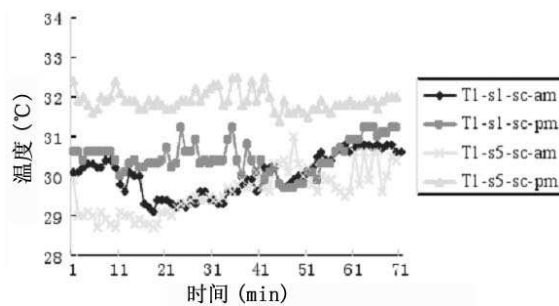


图 5 上下午的温度变化比较

1 号受试者的主观评价分值如表 3 所示, 其后背温度变化如图 6 所示。三种服装穿着的实验结果中, 体表温度下降最快的是 50/50 大豆 / 棉服装, 大豆纤维和棉纤维服装的温度变化趋

势差不多。受试者穿着 50/50 大豆 / 棉服装时, 他在运动阶段的体表温度随着湿度的上升而下降, 停止运动后的体温随着湿度的下降而快速恢复; 受试者穿着棉纤维和大豆纤维服装运动时, 其体表温度下降缓慢, 体表的高湿度持续时间较长。受试者对三种服装的主观热湿感觉评价和体表温度的变化趋势都是一致的。其中, 受试者对 50/50 大豆 / 棉面料服装的热湿舒适感的评价最好。

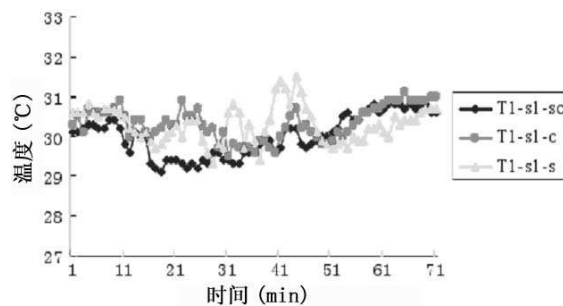


图 6 受试者穿着三种服装时后背温度的变化

表 3 主观评价结果

服装	评价时刻 (min)	潮湿的	闷热的	粘身的	不干爽	不透汽
SC	25	3	2	2	3	3
	45	2	2	2	3	2
	65	1	1	1	1	1
C	25	4	4	2	3	3
	45	3	4	3	4	4
	65	2	2	1	2	3
S	25	4	2	2	5	4
	45	4	3	4	3	3
	65	2	2	3	3	3

5 结论

本文在红外热像测温技术的基础上, 系统研究了大豆纤维与棉混纺服装面料的热湿舒适性。通过红外热像仪直接测量不同环境里的服装在穿着状态下表面温度场的分布, 并由采集到的热图像来进行温度场分析和数据处理, 直观判断出服装在真实穿着条件下衣内的实际温度变化情况, 进而推出服装及服装面料的隔热性能。通过对紧贴皮肤部位的服装面料的最高温度来比较服装面料的热阻大小, 从而判断整个服装隔热值的相对大小。本文分析了穿着实验

的客观结果和主观评价结果, 并得知三种实验服装中 50/50 大豆 / 棉服装的热湿舒适性能最好。红外热像技术测评方法在服装热舒适研究领域和实际应用中不失为一种行之有效的方法, 是判断服装的热舒适性能的重要工具之一。

参考文献

- [1] 徐卫林. 红外技术与纺织材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 115-116.
- [2] 张昌. 服装热舒适性与衣内微气候 [J]. 武汉科技学院学报, 2005, 18(1): 4-7.
- [3] 陈益松, 徐军. 红外热像用于服装面料隔热性能的评测 [J]. 纺织学报, 2007, 28(12): 81-83.

- [4] 孙斌. 关于服装舒适性的评价与研究 [J]. *山东纺织经济*, 2009, 4: 93-95.
- [5] Li Jun, et al. Skin sensitive difference of human body sections under clothing-Smirnov test of skin surface temperatures' dynamic changing [J]. *Journal of Dong Hua University (English Edition)*, 2004, 21(6): 149-151.
- [6] Fato Ida, et al. Thermal comfort in the climatic conditions of southern Italy [J]. In *Technical and Symposium Papers-2004 Annual Meeting of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, 2004, United States Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc.
- [7] Ji X L, et al. Predicting thermal comfort in Shanghai's non-air-conditioned buildings [J]. *Building Research and Information*, 2006, 34(5): 507-514.
- [8] 李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9): 1336-1341.
- [9] 王动民, 金尚忠, 陈华才, 等. 棉-涤混纺面料中棉含量的近红外光谱分析 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2051-2054.
- [10] 罗云瀚, 陈哲, 陈星旦. 近红外光谱无创血糖测量的极限检测浓度 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5): 784-788.
- [11] 贾庆莲, 乔彦峰, 邓文渊. 多基地周视红外搜索系统的目标定位与精度分析 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 720-726.

新闻动态 News

法国 Sofradir 公司从伽利略航空公司获得碲镉汞探测器合同

据 www.semiconductor-today.com 网站报道, 作为军事、空间及工业上运用的碲镉汞探测器的制造商, 法国 Sofradir 公司已经同意意大利的空间设备供应商伽利略航空公司 (芬梅卡尼卡集团旗下企业) 签下合同, 为其提供 1000×256 元、像元间距为 $30\mu\text{m}$ 的 Saturn 短波红外探测器, 以用于意大利主持的 PRISMA 卫星计划。

PRISMA 卫星是一个由高光谱成像仪组成的地球观测系统。高光谱成像是一个扫描操作过程, 在此过程中, 每一行图像或物体都在光谱上被分割开来。通过使用合适的红外探测器分辨各个光谱波段中的光, 就能够确定图像中的化学成分。PRISMA 卫星将采用赤道上空平均高度为 700km 的太阳同步轨道。

高光谱数据将会大大增加关于物体化学成分的信息, 这对于该环境监测计划来说是最重要的。采集到的数据还有望能帮助全球的研究人员对环境的质量和保护环境、可持续发展以及气候变化等问题进行探讨。

Sofradir 公司的 Saturn 探测器的任务是对地球的各个部分进行扫描并提供从可见光到红外光的图像。该公司将开发一种适用于被动制冷的特制密封盒, 并生产两种类型的探测器, 它们分别敏感于近红外波段 ($0.4\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$) 和短波

红外波段 ($0.9\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$)。这些探测器的飞行样机将于 2010 年被交付给伽利略航空公司。

Saturn 探测器是一个由碲镉汞材料制成的探测器阵列, 在红外目标识别方面表现出极佳的性能。它是 Sofradir 公司的一系列红外探测器产品中最大的一个, 其长度达到 30mm。Saturn 探测器中的每一列包含有 1000 个像元, 总共 256 列, 且像元间距为 $30\mu\text{m}$ 。其中, 每一列都可赋予不同的增益, 这就使得该探测器特别适用于分光技术和高光谱成像。此外, 采用附加的工艺流程就可以让它的响应范围延伸至可见光谱。Sofradir 公司的负责人表示, 这份合同给了他们一个可将自己的碲镉汞技术在空间上的应用进一步扩展到可见光谱范围的机会。该负责人称 Sofradir 公司是在公开竞标中赢得这份合同的。同时, 伽利略航空公司 PRISMA 项目经理表示, 他们之所以选择 Sofradir 公司, 是因为 Sofradir 公司已表现为生产这类探测器的经验最丰富、信誉最好以及产品价格最低的欧洲制造商。这份合同巩固了 Sofradir 公司与伽利略航空公司之间建立的长达 12 年的商务合作关系。

Sofradir 公司参与了越来越多的卫星和空间任务, 覆盖了地图绘制、环境及灾害监控和行星探测等众多应用领域。他们的碲镉汞红外探测器已经用于在轨的“金星快车”卫星和“太阳神”-2 卫星。目前该公司正在生产用于 SGLI/G-COM 项目和全球环境与安全监测计划中“哨兵”-2 卫星的探测器。

□ 岳桢千