

文章编号 1004-924X(2010)09-1959-06

# 反射温度补偿法及其实验验证

杨 楨, 张士成, 杨 立

(海军工程大学 船舶与动力学院动力工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**为补偿环境辐射对红外测温的影响,根据红外辐射理论和红外热像仪的测温原理,提出了反射温度补偿法。介绍了该方法的原理,给出了该补偿方法的理论计算公式。相关实验显示,在被测物体周围存在高温物体的情况下,采用提出的反射温度补偿法可补偿高温物体的反射能量。红外反射镜的选取与被测物体的表面状况有关,若被测物体可视为朗伯体,则可选铝箔为红外反射镜;若被测物体为非朗伯体,则需选用与被测物体表面结构相似的材料为红外反射镜。经过反射温度补偿,能较为准确地得到朗伯体的表面温度,误差可控制在2%以内;该方法亦能够较大地提高对非朗伯体的测温精度,其误差不超过5%。这些结果表明该方法简单易行,精度较高,适用于大部分的红外热像仪。

**关键词:**红外测温;红外热像仪;反射温度补偿法;朗伯体;非朗伯体

**中图分类号:**TN219 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101809.1959

## Reflected temperature compensation method and its experimental verification

YANG Zhen, ZHANG Shi-cheng, YANG Li

(Academy of Ship and Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** According to the theory of infrared radiation and principles of temperature measurement using infrared imagers, a reflected temperature compensation method was proposed to compensate the effect of environmental radiant on the infrared temperature measurement. The principles and implementary methods of reflected temperature compensation were introduced, and the theoretical calculation formula was obtained. Through the relevant experiments, it was indicated that the method can be used to compensate the reflective energies of the high-temperature objects under the condition that measured objects are surrounded by high-temperature objects. The selection of infrared mirror is related to the surface of a measured object. If the measured object can be regarded as Lambertian, the aluminum foil can be chosen as the infrared mirror; if the measured material is non-Lambertian, the infrared mirror should be replaced by a material that has a similar structure with the measured object surface. After temperature compensation, it can be more accurate to measure the surface temperature of the Lambertian and the measuring error is within 2%; Furthermore, the accuracy of the temperature measurement is also greatly improved for the non-Lambertian and the measuring error is not more than 5%. Experimental results show that the method is simple and of high accuracy, and is applicable

收稿日期:2009-09-24;修订日期:2009-12-28.

基金项目:海军预研基金资助项目(No. 10105020202)

to the most of infrared imagers.

**Key words:** infrared temperature measurement; infrared imager; reflected temperature compensation method; Lambertian; non-Lambertian

## 1 引言

热成像测温技术具有测温速度快、测温面积大、测温分辨率高和非接触、不干扰被测表面温度场等优点,已在高压电线巡检,电站、配电设备等电气设备和机器设备的状态监测,半导体元件和集成电路的质量筛选和故障诊断,石化设备的故障诊断,火灾的探测,材料内部缺陷的无损检测和传热研究等领域得到广泛的应用,并取得了可观的经济效益<sup>[1-4]</sup>。红外热像仪的测温不仅受被测物体表面的发射率、反射率、环境温度、大气温度、测量距离以及大气衰减等因素的影响<sup>[5-6]</sup>,还受到被测物体周围高温物体辐射的干扰,特别是在机舱等真实的环境中,被测设备周围存在大量高温物体,降低了红外热像仪测温的准确性<sup>[7]</sup>,影响了红外检测与故障诊断的精度。文献[7]给出了在周围存在高温物体的情况下,被测物体真实温度的计算公式,该计算方法精度较高,但是计算过程复杂,某些参数的获取比较麻烦,特别是若存在多个高温物体则计算十分繁杂,在实际测温过程中实施困难。

对于周围高温物体对红外测温的影响,国内外现行的方法是采用遮蔽物来减小其影响,但是在复杂情况下(比如在机舱中)采用遮蔽物不太现实,所以研究一种不采用遮蔽物即可补偿周围高温物体对红外测温影响的方法来准确测量物体温度很有必要。反射温度补偿是一种红外测温时补偿目标附近物体(特别时高温物体)的反射能量的方法。有些热像仪本身设计有反射温度补偿功能,比如美国 Fluke 公司的 Ti30<sup>[8]</sup>,但是该补偿仪仅可以运用于朗伯面,若运用到非朗伯面反而造成较大的测温误差。鉴于大部分红外热像仪都没有反射温度补偿功能,本文提出了一种反射温度补偿方法,该方法同时适用于朗伯面和非朗伯面的温度测量。

## 2 红外热像仪测温原理与计算

根据红外热像仪的测温原理,在实际温度测量时,热像仪接收到的有效辐射包括 3 个部分:目标自身辐射、目标对周围环境的反射辐射以及大气辐射。

环境反射辐射又包括两部分,即均匀环境反射辐射和非均匀环境反射辐射。均匀环境辐射主要是指大气发射辐射;非均匀环境辐射包括周围物体的反射辐射和太阳辐射的反射辐射等。为了简化运算,将落到被测物体上的总环境辐射等效为温度为  $T_B$  的黑体发出的均匀辐射。根据参考文献[9]、[10],红外热像仪的测温方程可表示为

$$I(T_r) = \tau_a \{ \epsilon_n(T_o) I(T_o) + [a - \epsilon_n(T_o)] I(T_B) \} + (1 - \tau_a) I(T_a), \quad (1)$$

式中  $I(T) = \int_{\Delta\lambda} L_{\text{ba}}(T) d\lambda$  表示辐射亮度  $L_{\text{ba}}(T)$  在热像仪探测器接收波段上的积分。 $T_r$  为热像仪的辐射温度,表示将热像仪接收到的能量等效为温度为  $T_r$  的黑体所发出的能量。 $\tau_a$  为探测器接收光谱区间内的大气平均透射率, $T_o$  为被测物体的温度, $T_a$  为大气温度, $\epsilon_n(T_o)$  为温度为  $T_o$  的被测物体在探测器接收光谱区间内的平均法向发射率。 $a$  表示物体的法向平均发射率与法向平均反射率之和,它与物体种类、表面状况及物体温度有关,物体与朗伯体越接近, $a$  越大,其值越接近于 1;物体表面状况偏离朗伯体越远,表面越光滑, $a$  越小;当物体为灰体时, $a=1$ 。

根据式(1),可得红外热像仪计算物体表面真实温度的公式

$$I(T_o) = \frac{1}{\tau_a \epsilon_n(T_o)} I(T_r) - \frac{a - \epsilon_n(T_o)}{\epsilon_n(T_o)} I(T_B) - \frac{1 - \tau_a}{\tau_a \epsilon_n(T_o)} I(T_a), \quad (2)$$

当近距离测量时, $\tau_a=1$ ,则式(2)变为

$$I(T_o) = \frac{1}{\epsilon_n(T_o)} I(T_r) - \frac{a - \epsilon_n(T_o)}{\epsilon_n(T_o)} I(T_B), \quad (3)$$

### 3 反射温度补偿法及其原理

#### 3.1 实施方法

大部分红外热像仪没有反射温度补偿功能,但也可通过一定的方法来达到同样的反射温度补偿的作用。本文以朗伯面为例,通过以下步骤来实现反射温度补偿功能:

(1)取一张铝箔(红外反射镜),弄皱后再展平,将铝箔放在纸板上,亮面朝上。

(2)调节热像仪的辐射系数,将辐射系数设置为1.00。

(3)将热像仪放置在距待测目标选定测量距离之处,将仪器瞄准目标并调焦。

(4)将铝箔放在热像仪的视场内,放在目标表面前面并与之平行。测量反射镜表面的表观温度,此温度即目标的反射温度。记下此温度值;多次测量,记下平均值。

(5)移去铝箔,按正常的测量方法测量被测目标的温度,当要设定环境温度时,将第4步所得平均值输入,则所测得的温度即是反射温度补偿后的被测物体温度。

对于非朗伯面,其反射温度补偿的实施方法稍有不同。需要选用与被测物体表面结构相似的材料作为红外反射镜,在测得反射镜表面的表观温度后,用式(3)算出等效环境辐射温度 $T_B$ 。然后在测得被测物体的辐射温度后,再根据式(3)算出被测物体的真实温度。

#### 3.2 补偿原理

下面主要介绍朗伯面的反射温度补偿法原理,同样也可类似地得到非朗伯面的反射温度补偿法原理。

根据式(1)可得铝箔的测温方程为

$$I(T_{\text{rtc}}) = \tau_a [\epsilon_{1n}(T_1) I(T_1) + [a - \epsilon_{1n}(T_1)] I(T_B)] + (1 - \tau_a) I(T_a), \quad (4)$$

式中 $T_{\text{rtc}}$ 为测得的反射温度, $T_1$ 为铝箔的表面温度, $\epsilon_{1n}(T_1)$ 为铝箔的表面法向发射率。

铝箔经过处理(弄皱后再展平),其表面可视为朗伯面,同时铝箔温度可视为与大气温度相等,则式(4)可变形为

$$I(T_{\text{rtc}}) = \tau_a [\epsilon_{1n}(T_a) I(T_a) + [1 - \epsilon_{1n}(T_a)] I(T_B)] + (1 - \tau_a) I(T_a), \quad (5)$$

当近距离测温时, $\tau_a = 1$ ,则式(5)变为

$$I(T_{\text{rtc}}) = \epsilon_{1n}(T_a) I(T_a) + [1 - \epsilon_{1n}(T_a)] I(T_B), \quad (6)$$

于是有

$$I(T_B) = \frac{I(T_{\text{rtc}}) - \epsilon_{1n}(T_a) I(T_a)}{1 - \epsilon_{1n}(T_a)}, \quad (7)$$

根据式(3)和式(7),可得

$$I(T_o'') = \frac{1}{\epsilon_n(T_o)} I(T_r) - \frac{1 - \epsilon_n(T_o)}{\epsilon_n(T_o)} \frac{I(T_{\text{rtc}}) - \epsilon_{1n}(T_a) I(T_a)}{1 - \epsilon_{1n}(T_a)}, \quad (8)$$

由于铝箔的反射率很小,即 $\epsilon_{1n}(T_a) \ll 1$ ,则可得 $T_{\text{rtc}} \approx T_B$ 。当被测物体周围不存在高温物体时, $T_B = T_a$ ,则可得 $T_{\text{rtc}} = T_a$ ,反射温度即为环境温度。

一般红外热像仪仅考虑大气温度对测温的影响,则测温公式为:

$$I(T_o') = \frac{1}{\epsilon_n(T_o)} I(T_r) - \frac{1 - \epsilon_n(T_o)}{\epsilon_n(T_o)} I(T_a). \quad (9)$$

进行反射温度补偿后,热像仪测温公式为:

$$I(T_o) = \frac{1}{\epsilon_n(T_o)} I(T_r) - \frac{1 - \epsilon_n(T_o)}{\epsilon_n(T_o)} I(T_{\text{rtc}}). \quad (10)$$

由于 $\epsilon_{1n}(T_a) \ll 1$ ,则可知 $T_o$ 与 $T_o''$ 比较接近。比较式(10)与(8),可知 $\epsilon_{1n}(T_a)$ 越小,则 $T_o$ 与 $T_o''$ 越接近,当 $\epsilon_{1n}(T_a) = 0$ 时,两式完全一样,即 $T_o = T_o''$ 。在同样的条件下,利用式(10)计算所得结果要比式(8)计算所得结果稍大。

### 4 实验测量与结果分析

利用提出的方法进行了实际温度测量并对测得的结果做了对比和分析。

#### 4.1 实验仪器

实验采用了如下仪器和样品:Ti30热像仪,安杰伦数采系统,黑体炉,涂有白油漆的铜板(背面焊热电偶),表面氧化、粗糙的铜板(背面焊热电偶),表面光滑的铜板(背面焊热电偶),加热器(400 W),红外反射镜(弄皱后再展平的铝箔和表面光滑的铜板)。

#### 4.2 实验方法

将被测物体贴于黑体炉表面并将其固定,用黑体炉对其进行加热。将加热器作为高温热源,设置加热器的位置,使其发射的能量投射到被测物体的表面。用安杰伦数采系统读出热电偶测得

的温度,此温度即为物体表面的真实温度。

对于白油漆铜板和氧化粗糙的铜板,采用铝箔为红外反射镜;对于表面光滑的铜板,采用表面光滑的铜板作为红外反射镜。用前面所述的反射温度补偿法进行测量。

### 4.3 实验结果及分析

#### 4.3.1 表面氧化、粗糙的铜板

图 1 表示氧化、粗糙的铜板的真实温度,反射温度补偿后的物体温度及未补偿的物体温度随铜板真实温度变化的规律,图 2 表示氧化、粗糙的铜板的反射温度补偿后的测温误差,未补偿的测温误差随铜板真实温度变化的规律。由图 1,图 2 可知,在周围存在高温物体的情况下,如果不对测温进行补偿修正,测温结果将与真实温度产生一

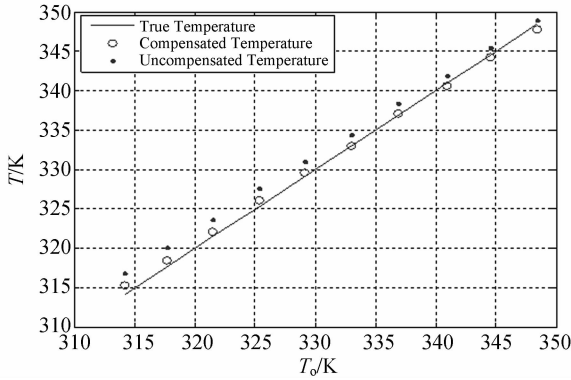


图 1 铜板的真实温度、反射温度补偿后的温度和未补偿的温度随铜板真实温度的变化

Fig. 1 True temperature, reflected compensation temperature and uncompensated temperature vs true temperature of copper plate

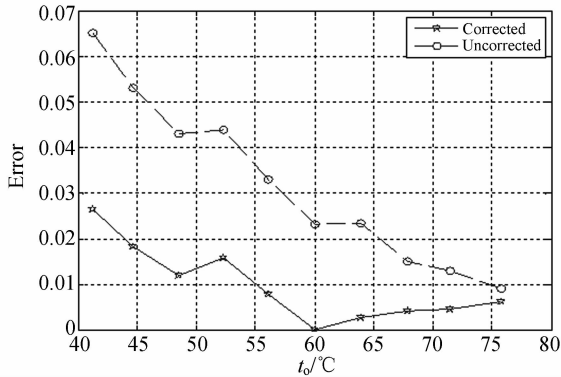


图 2 铜板反射温度补偿后的测温误差、未补偿的测温误差随铜板真实温度的变化

Fig. 2 Reflected compensation temperature error and uncompensated temperature error vs true temperature of copper plate

定的偏差,其最大偏差达到 2.6 K,测温误差的最大值为 6.3%;随着物体温度的升高,测温温差有逐渐减小的趋势,这是因为随着物体温度的升高,周围高温物体对物体的影响逐渐减小。为了提高测温的精度,对测得的温度进行了补偿修正。补偿后,测温结果与真实温度基本符合,其最大偏差只有 0.6 K,测温误差比较稳定,测温误差的最大值只有 1.1%。结果说明经过补偿后,测温精度有了很大的提高,能较为准确地测量铜板的温度。

#### 4.3.2 表面涂白油漆的铜板

图 3 表示白油漆板的真实温度,反射温度补偿后的物体温度,未补偿的物体温度随铜板的真实温度变化的规律,图 4 表示白油漆板的反射温

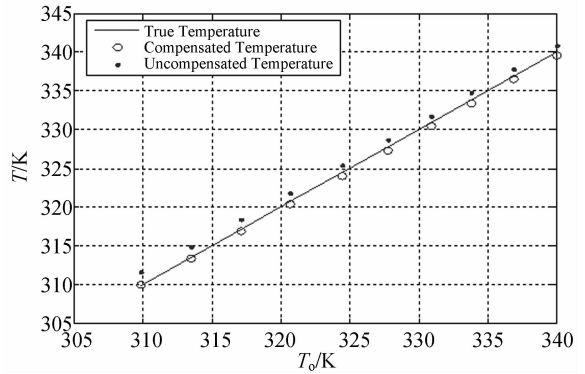


图 3 白漆板的真实温度、反射温度补偿后的温度和未补偿的温度随白漆板真实温度的变化

Fig. 3 True temperature, reflected compensation temperature and uncompensated temperature vs true temperature of white lacquer plate

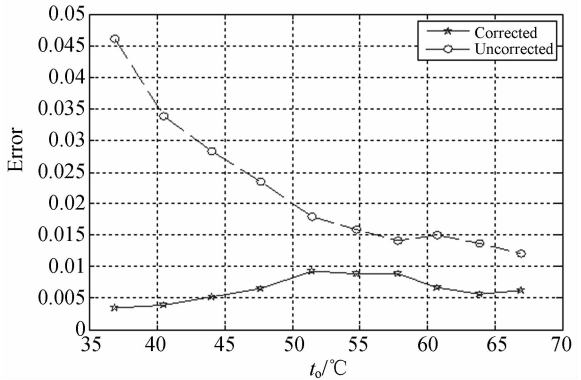


图 4 白漆板反射温度补偿后的测温误差、未补偿的测温误差随白漆板真实温度的变化

Fig. 4 Reflected compensation temperature error and uncompensated temperature error vs true temperature of white lacquer plate

度补偿后的测温误差,未补偿的测温误差随铜板真实温度变化的规律。由图 3,图 4 可知,在周围存在高温物体的情况下,如果不对测温进行补偿修正,测温结果将与真实温度产生一定的偏差,其最大偏差达到 1.7 K,测温误差的最大值为 4.6%;同样,随着物体温度的升高,测温温差逐渐减小,表明随着物体温度的升高,周围高温物体对物体的影响逐渐减小。为了提高测温的精度,对测温进行了补偿修正。补偿后,测温结果与真实温度基本符合,其最大偏差只有 0.5 K,测温误差比较稳定,测温误差的最大值只有 0.9%。结果说明经过补偿后,测温精度有了很大的提高,能较为准确地测量白油漆板的温度。

4.3.3 表面光滑的铜板

图 5 表示表面光滑的铜板的真实温度,反射温度补偿后的物体温度,未补偿的物体温度随铜板的真实温度的变化规律,图 6 表示表面光滑的铜板的反射温度补偿后的测温误差,未补偿的测温误差随铜板真实温度的变化规律。由图 5、图 6 可知,在周围存在高温物体的情况下,如果不对测温进行补偿修正,测温结果将与真实温度产生很大的偏差,其最大偏差高达 16.8 K,测温误差的

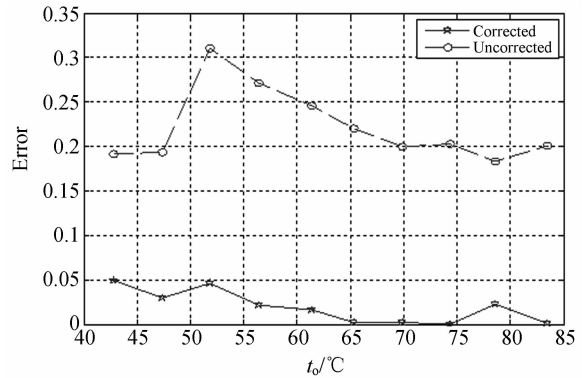


图 6 表面光滑铜板反射温度补偿后的测温误差、未补偿的测温误差随铜板真实温度的变化  
Fig. 6 Reflected compensation temperature error and uncompensated temperature error vs true temperature of smooth-faced copper plate

最大值为 31.1%;随着物体温度的升高,测温温差有逐渐减小的趋势,表明随着物体温度的升高,周围高温物体对物体的影响逐渐减小。为了提高测温的精度,对测温进行了补偿修正。补偿后,测温结果与真实温度基本符合,其最大偏差为 2.1 K,测温误差比较稳定,测温误差的最大值为 5.0%。结果说明经过补偿后,测温精度有了很大的提高,基本能准确地测量表面光滑铜板的温度。

5 结 论

本文提出了一种反射温度补偿方法,并进行了相关实验,结果表明,在被测物体周围存在高温物体的情况下,采用反射温度补偿法可补偿高温物体的反射能量。该方法简单易行,精度较高,适用于大部分的红外热像仪。实验发现,红外反射镜的选取与被测物体的表面状况有关。若被测物体表面可视为朗伯漫反射表面,则可选用铝箔做红外反射镜;若被测物体表面不可视为朗伯漫反射表面,则需要选用与被测物体表面结构相似的材料作为红外反射镜。对于朗伯体,经过反射温度补偿,能较为准确地测量物体的表面温度,将误差控制在 2% 以内;对于非朗伯体,经过反射温度补偿,能够较大地提高测温精度,其误差不超过 5%。

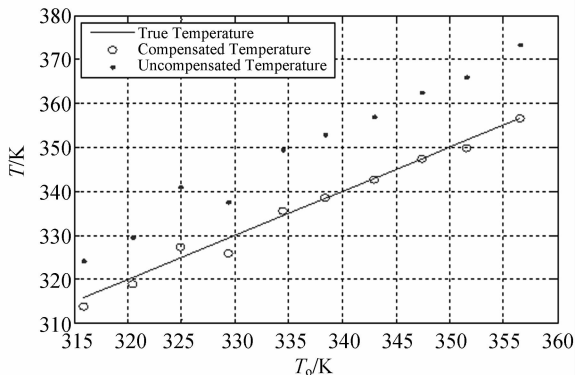


图 5 表面光滑铜板的真实温度、补偿后的温度和未补偿的温度随铜板真实温度的变化  
Fig. 5 True temperature, reflected compensation temperature and uncompensated temperature vs true temperature of smooth-faced copper plate

## 参考文献:

- [1] 李艳红,赵跃进,张存林.半透明材料涂层的红外检测[J]. 光学精密工程,2009,17(7):1502-1506.  
LI Y H, ZHAO Y J, SUN C L. Infrared testing for translucent material coating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(7):1502-1506. (in Chinese)
- [2] 李艳红,赵跃进,冯立春,等.基于脉冲相位的红外热波无损检测法测量缺陷[J]. 光学精密工程,2008,16(1):55-58.  
LI Y H, ZHAO Y J, FENG L C, *et al.*. Measurement of detect depth by infrared thermal wave non-destructive evaluation based on pulsed phase [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):55-58. (in Chinese)
- [3] 张亚萍,张广军,李庆波.空间双光路红外 CO<sub>2</sub> 气体传感器及其测量模型[J]. 光学精密工程,2009,17(1):14-19.  
ZHANG Y P, ZHANG G J, LI Q B. Infrared CO<sub>2</sub> gas sensor based on space double beams and its measurement model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1):14-19. (in Chinese)
- [4] 陈翮,张健,王艳武,等.基于涂料性能参数的红外隐身技术[J]. 光学精密工程,2009,17(2):280-285.  
CHEN X, ZHANG J, WANG Y W, *et al.*. Infrared stealth technology based on performance parameters of camouflage coating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(2):280-285. (in Chinese)
- [5] 杨立.红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技

术,1999,21(4):20-24.

- YANG L. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager [J]. *Infrared Technology*, 1999, 21 (4): 20-24. (in Chinese)
- [6] 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.  
LI Y H, SUN X G, YUAN G B. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1336-1341. (in Chinese)
- [7] 张健,杨立,刘慧开.环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J]. 红外技术,2005,27(5):419-422.  
ZHANG J, YANG L, LIU H K. Effect of environmental object on infrared temperature measurement [J]. *Infrared Technology*, 2005, 27 (5): 419-422. (in Chinese)
- [8] *Ti30 User Manual* [M]. USA: Fluke Corporation, 2005:38-56.
- [9] INAGAKI T, OKAMOTO Y. Surface temperature measurement using infrared radiometer by applying a pseudo-grey-body approximation [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1996,118:73-78.
- [10] 杨楨.红外热像仪测温精度及其补偿修正方法研究[D]. 武汉:海军工程大学,2008.  
YANG Z. *A research on the accuracy and the correction method of infrared imager* [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2008. (in Chinese)

## 作者简介:



杨楨(1982—),男,湖南益阳人,博士研究生,2005年、2008年于海军工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事红外测温 and 红外检测等方面的研究。  
E-mail: ljyangzhen@163.com



张士成(1984—),男,安徽阜阳人,博士研究生,2006年、2008年于海军工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事红外目标特征及隐身等方面的研究。  
E-mail: schzhang@yahoo.com.cn

## 导师简介:



杨立(1962—),男,重庆人,教授,博士生导师,1995年于海军工程大学获博士学位,2003~2004年为英国曼彻斯特大学访问学者,主要从事目标红外特征模拟及其隐身对抗、热力系统红外故障诊断等方面的研究。  
E-mail: lyang39@hotmail.com