

航空发动机涡轮叶片温度测量综述

王超^{1*}, 苟学科¹, 段英¹, 胡俊¹, 张泽展¹, 杨洋¹, 姜晶¹, 蒋洪川¹, 丁杰雄²,
程玉华³, 李力³, 张江梅⁴, 陈洪敏⁵, 熊兵⁵, 刘先富⁵, 石小江⁵

- (1. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731;
2. 电子科技大学 机械与电气工程学院, 四川 成都 611731;
3. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 611731;
4. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621900;
5. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 江油 621700)

摘要: 简要介绍了航空发动机涡轮叶片表面温度的几种主要测量方法, 总结了热电偶、晶体、示温漆、荧光、光纤、以及红外辐射、多光谱等测温方法的测温原理、技术特点和国内外研究现状, 并在此基础上对将来涡轮叶片温度测量发展方向进行了展望。

关键词: 涡轮叶片; 温度测量; 辐射测温

中图分类号: TK311, V23 **文献标识码:** A

A review of aero-engine turbine blade temperature measurement

WANG Chao^{1*}, GOU Xue-Ke¹, DUAN Ying¹, HU Jun¹, ZHANG Ze-Zhan¹, YANG Yang¹,
JIANG Jing¹, JIANG Hong-Chuan¹, DING Jie-Xiong², CHENG Yu-Hua³, LI Li³,
ZHANG Jiang-Mei⁴, CHEN Hong-Min⁵, XIONG Bing⁵, LIU Xian-Fu⁵, SHI Xiao-Jiang⁵

- (1. School of Electronic Science and Engineering, Univ. of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Univ. of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
3. School of Automation Engineer, Univ. of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
4. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621900, China;
5. AVIC Gas Turbine Establishment, Jiangyou 621703, China)

Abstract: The paper briefly introduces several main temperature measurement methods of aero-engine turbine blades, and summarizes the temperature measurement principle, technical characteristics and current research status of thermocouple, crystal, temperature sensitive paint, fluorescence, optical fiber, infrared radiation and multispectral. Finally, the future development trend of turbine blade temperature measurement is prospected.

Key words: turbine blade, temperature measurement, radiation temperature measurement

PACS: 06. 30. -k

引言

航空发动机作为现代飞机的动力来源, 正不断地向高性能、高推重比发展, 推动涡轮叶片的温度不

断升高, 目前推重比达到 9 ~ 10 的第四代发动机的涡轮进口温度达到了 1977 K, 预期未来第五代发动机推重比到 12 ~ 15 时, 涡轮叶片进口温度甚至可达到 2000 ~ 2250 K^[1].

收稿日期: 2017- - , 修回日期: 2018- -

Received date: 2017- - , revised date: 2018- -

基金项目: 装备预研教育部联合基金(14JL163502A); 国家自然科学基金(No. 61727818, 51672037); 四川省科技计划项目(2016JQ0022); 国家重点研发计划(2017YFC0602102)

Foundation items: The Open Fund of the Chinese Ministry of Education Joint Fund Youth Talent Fund(14JL163502A); the National Natural Science Foundation of China(No. 61727818, 51672037); the Department of Science and Technology of Sichuan Province(2016JQ0022); the subproject of the National Key and Development Program of China(2017YFC0602102)

作者简介(Biography): 王超(1978 -), 男, 博士, 教授, 研究领域为涡轮叶片温度测量, 半导体高端设备. E-mail: cwang@uestc.edu.cn

长期在高温、高压、高负荷、高转速状态下工作,会导致热端部件的可靠工作寿命减少,材料强度降低导致热端材料蠕变甚至发生断裂,造成严重的后果^[2]. 涡轮转子叶片作为发动机最为重要的热端部件,是发动机工作温度最高的旋转部件,其耐高温能力直接决定发动机最高的工作温度,准确测量航空发动机涡轮叶片温度对研究叶片材料耐高温能力至关重要.

针对航空发动机内部的复杂环境,研究人员尝试了基于各种原理的测温技术,本文对这些测温技术的原理和研究进展进行了大致的介绍. 目前航空发动机涡轮叶片的温度测量技术可分为热电偶、晶体、示温漆为代表的接触式测温法以及荧光测温、红外辐射测温、光纤测温等非接触式测温法两类. 接触式测温方法在测量时需要与被测物体充分接触,达到热平衡之后,获取被测对象和传感器的平均温度;非接触式温度测量方法则是不需要与被测物体相接触而获取物体温度信息的方法.

1 接触式测温方法

1.1 热电偶

热电偶测温原理基于温差电效应,两种不同成分的导体两端接合成回路,当两接合点存在温差时,回路内就会产生热电流,此时测量仪表将会显示出热电偶产生的热电势所对应的温度值. 根据加工以及安装方式的不同,可以分为埋入式热电偶、薄膜热电偶以及火焰喷涂微细热电偶三种.

埋入式热电偶是先在被测物体表面加工开槽,再将铠装热电偶埋入至沟槽中,进行等离子喷涂使之与基体结合. 埋入式热电偶制作工艺简单,但对被测表面温度场影响较大. 火焰喷涂微细热电偶丝测量涡轮转子叶片表面温度原理是通过火焰喷涂涂层的方法固定热电偶丝测量温度,该方法不破坏试验件,存活率较高,避免了铠装热电偶的缺点,但是涂层会影响原温度场,需要对该影响进行评估,提高测温精度. 伴随薄膜技术的发展,薄膜热电偶应运而生. 薄膜热电偶是采用电镀、真空蒸镀、真空溅等技术,将2种厚度仅为几微米的金属薄膜直接镀制在沉积有绝缘材料层的被测部件表面而制备^[3]. 薄膜传感器的构造如下图1所示,其由与叶片基体成分相近的中间合金膜、生成和溅射 Al_2O_3 的介质膜和蒸镀电极的测量膜三层薄膜构成,前两种膜构成测量膜与叶片基体之间的电气绝缘,测量膜构成传感器的敏感元件.

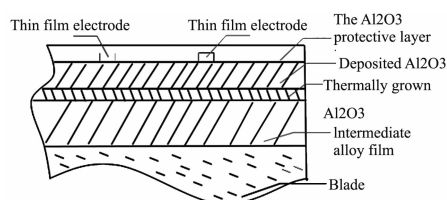


图1 薄膜热电偶结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of thin film thermocouple structure



图2 美国第4宇航局在涡轮叶片上制备的薄膜热电偶
Fig.2 The thin-film thermocouple produced on turbine blades by NASA^[4]

美国国家航空航天局 Lewis 研究中心 (LeRC) 为研究薄膜热电偶技术在涡轮发动机的应用,专门建立了薄膜传感器实验室^[5],现已成功研制出了测温上限达 1100°C ,精度 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 的温度应力测量 Pt-13% Rh/Pt (R 型) 薄膜传感器^[6-7]. 美国 NASA 的格林研究中心 (GRC)^[4] 从 20 世纪 60 年代就开始致力于开发用于应变、温度、热通量和表面流量的多功能传感器系统. 2006 年,该研究中心在镍基超合金制成的多层测量基片上成功制备了 R 型薄膜热电偶,其在高压燃油涡轮泵环境用于涡轮叶片的温度测量试验中,能保持良好的高粘附性和耐久性到 1000°C ,图2即为 NASA 在涡轮叶片上制备的薄膜热电偶^[4]. 美国惠普公司^[3] 研制的 Pt/Pt-10% Rh (S 型) 型薄膜热电偶能够在燃烧室废气测试条件下,测量到 1250 K 的涡轮叶片温度分布,经历 71 个热循环,六个薄膜热电偶系统的平均故障时间为 47 h. 此外,英国罗罗公司^[8] 将研制成功的铂铑薄膜热电偶应用于燃气涡轮发动机,测量了导向叶片高达 1200°C 的温度分布,其不确定度为 $\pm 2\%$.

1992 年沈阳航空发动机研究所安保合^[9] 将其研制成功的铂铑 10-铂热电偶用于涡轮叶片测温实

验. 在电炉, 煤油喷灯以及叶栅燃气流三个试验, 得到实验结论: 薄膜热电偶可在 $200 \sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内进行测量, 精度为 $\pm 3\%$, 使用时间大于 10 h , 能承受 5 次以上的冷热循环和 3 h 以上的最高试验温度. 电子科技大学^[10]与中国燃气涡轮研究院合作, 在涡轮叶片表面制备了 NiCr/NiSi (K 型)、PtRh/Pt (S 型) 和 Pt/ITO:N 三种类型的薄膜热电偶. 静态考核结果表明: K 型热电偶在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下考核 10 h 之后结构保持完整, 经数值修正后的测温误差小于 $\pm 2.5\%$; S 型热电偶最高温度能测到 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, 误差小于 $\pm 4\%$, 使用寿命大于 10 h ; 当测试温度高于 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, Pt/ITO:N 薄膜热电偶能存活 20 h 以上, 测量误差小于 $\pm 1.5\%$. 已经成功应用到了发动机涡轮转子叶片表面温度测量, 涂层厚度小于 0.3 mm . 此外, 中国燃气涡轮研究院最近开发了一种火焰喷涂热电偶丝的方法, 其测量温度范围与精度能达到与薄膜热电偶一致.

与埋藏式热电偶相比, 薄膜热电偶采用薄膜沉积技术直接沉积在被测物表面, 故对表面结构影响较小; 响应速度快 (小于 1 ms), 质量小, 耐磨耐压; 且其一般厚度为微米级, 对被测物体内部换热和表面燃气流干扰小, 不会对叶片的温度场产生干扰, 比较适合高温转动物体表面温度的测量^[11]. 但高温高速情况下, 由于热应力影响, 薄膜的附着性能降低, 容易脱落. 此外, 薄膜材料与旋转物体表面材料不同还会引起温度分布局部扰动, 产生测温误差, 并随转速增大^[1]. 工程应用中还面临绝缘性、重复性、引线困难等难题, 无法实现涡轮叶片上的大规模分布, 进而测量涡轮叶片表面的温度.

1.2 晶体测温技术

辐照晶体测温技术^[12-14]源于俄罗斯, 其原理是被高能粒子辐照过的晶体会产生大量晶格缺陷, 这种缺陷可以通过高温退火来逐渐消除. 物质的残余缺陷浓度与退火温度的有关, 可通过测量残余缺陷浓度获取退火温度的信息. 但残余缺陷浓度通过常规方法难以测定. 所以, 可以通过建立残余缺陷浓度对物性的影响与退火温度的函数关系作为测温依据. 晶体安装示意图如图 3 所示, 将被辐照过的晶体安装于被测物体事先打好的孔内, 使用高温粘接剂灌封, 待粘接剂干燥后在被测物体表面焊接薄金属压片封口. 当物体上升到一定温度并保持稳定后, 将测温晶体取下采用一定的测试分析手段, 分析晶体缺陷导致宏观物性的变化, 试验过程中晶体经历的最高温度即可通过对事先标定好的温度曲线

获得.

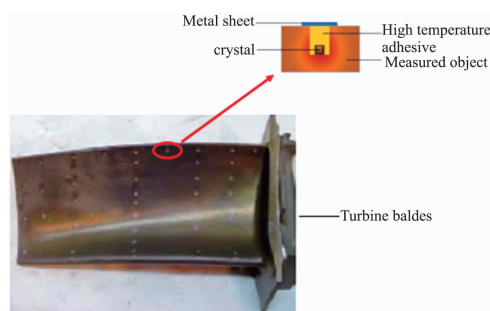


图 3 晶体的安装图

Fig. 3 The installation diagram of crystal

自前苏联提出晶体测温技术, 美国、德国以及俄罗斯等国家就开始了这一领域的研究, 并将其用于燃气涡轮叶片温度测量. 美国、乌克兰开发了一种材料为 3C-SiC 的晶体测温技术, 测量上限达 $1\,400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 精度 $\pm 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. 2003 年德国西门子公司通过晶体测温技术获取商用涡轮 GTX-800 热端部件温度数据, 以此提升燃气轮机的性能. 与此同时, 利用该技术和 S 型热电偶同时对涡轮机叶片温度进行测量, 发现晶体测温技术引起的温度局部扰动相对较小, 在测温范围和方便性方面, 比传统的热电偶测温方法更有优势^[13, 15-16].

在国内, 中国沈阳航空发动机研究所张志学等人^[12, 17]与天津大学都用 6H-SiC 测温晶体和热电偶在涡轮叶片上进行了晶体考核实验和冷效试验, 测量温度高达 $1\,600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 精度分别为 1% , 2% . 中国航发四川燃气涡轮研究院李杨等人^[14]用 5 点测温晶体安装于涡轮转子叶片叶盆和缘板上, 在高温、高压、高速燃气流冲击和叶片高速旋转的工况下进行了晶体测温实验, 试验存活率高达 100% , 验证了晶体的牢靠性, 并得到了精确测点的温度值. 但是由于没有准确温度值进行对比, 无法验证该实验测温结果的准确性.

晶体测温技术具有微尺寸、微重量、非侵入性、无引线、测温上限高、精度高的特点, 可应用于发动机高温转动体和封闭结构系统的壁温测量, 如涡轮转子叶片的壁温测量^[17]. 但是此种方法测量的是被测物经历的最高温度, 对于实时测量旋转中的涡轮叶片温度具有局限性. 并且在被测物表面开孔埋设晶体, 需要对被测件进行强度评估.

1.3 示温漆

示温漆测温是航空发动机测温中非常重要的一种接触式测温方法, 应用广泛^[18]. 示温涂料在温度

升高过程中会发生某些物理或者化学的反应,其分子构成改变导致颜色变化,指示所测部件表面最高温度的温度分布.示温漆涂料可根据涂料颜色随温度发生变化后再回到变色前的温度环境下是否变回原色分为可逆与不可逆示温漆,航空发动机测温中一般使用不可逆的示温漆^[19].根据随温度上升发生的变色次数又可将示温漆分为单色与多色示温漆,当变色次数越多,说明其中每一种颜色所指示的温度范围越小,所得到的测温结果精度越高;故多变色示温漆的研究备受科研人员的关注.

世界各国都很重视对多变色不可逆示温漆的研制^[20].早在1938年,德国的I.G法贝宁达斯公司最早研制出示温涂料,目前已有几十个品种,温度跨度为60~1400℃.在20年代50世纪,英国RR公司就已经广泛采用示温漆指示涡轮叶片的表面温度分布情况,测温范围为240~1600℃,品种多达12个,间隔为50~70℃,判读精度达±20℃左右.美国TPIT生产的示温漆等温线测量精度达±17℃.

国内从20世纪60年代就开始了示温漆的研究,我国的北方涂料工业研究设计院^[21]先后研究了25个品种单变色不可逆示温漆,7个品种多变色不可逆示温漆,研制的SW-M-1~8系列温度跨度为400~1250℃,其精度可达±20℃;2007年沈阳航空发动机研究所王从瑞等人^[22]在发动机的测试实验中使用示温涂料来指示涡轮叶片表面温度,单变色示温涂料精度可达±5℃,多变色示温涂料精度可达±20℃.至2013年中国燃气涡轮研究院^[23]已研制了20多个品种的单、多变色示温漆,温度范围300~1100℃,等温线上的测量精度达±10℃.

示温漆具有使用方便、成本低廉、使用温度范围广等优点,不破坏所涂抹表面形貌,也不干扰被测表面气流状态,是一种非干涉式的测温涂料^[21].更重要的是,对于涡轮叶片这种内部结构复杂、空间狭窄的物体,要想获得其温度分布非常困难.示温涂料具有的不受测试结构影响、适用于恶劣环境测温等特点,使其可以涂抹在涡轮叶片任意位置上以实现大面积表面温度分布的测量,这是其它测温方法难以实现的.但示温漆在使用过程中也存在着一定的缺点,这是科研工作者正致力于改进的地方^[20].首先该方法只能测量热端部件最高温度,无法进行实时监测,温度分辨率低;其次不可逆示温漆不能连续使用,每次测温均需要拆卸叶片才能进行涂漆和判读,同时示温漆的颜色变化会受到加热速度、时间、环境污染的影响,导致其测温精度低于一般的测温方

法^[24].随着图形处理技术的发展,虽然诞生了示温漆自动判读技术,但是判读过程依然受人经验因素干扰,精度较低,目前示温漆的判读方法还有待进一步地发展^[25].

2 非接触式测温方法

非接触式测温不接触被测物体,不会对被测物体的温度场产生干扰,响应速度快,适合测量量高温复杂环境下的物体.涡轮叶片温度测量的非接触式测温方法已发展有多光谱、荧光、光纤、激光发射、辐射式、声波测温等许多的测温方式,非接触式测温法除了可以测量涡轮叶片表面的温度及其温度分布,还可以根据燃气、水汽测量涡轮叶片整体环境的温度.目前国内外应用最为广泛的非接触式测温法是辐射测温法.

2.1 荧光测温法

荧光测温法从20世纪80年代开始受到科研人员的关注,荧光测温法可通过荧光光强、荧光光强比、荧光衰减三个原理实现温度测量.其中荧光寿命型的测温效果最佳,应用最为广泛.其测温原理是建立在光致发光这一基本物理现象上的:敏感材料受到激励光的照射使电子跃迁到高能级,当电子从高能级回到基态时会产生荧光辐射,当达到平衡状态时荧光放射稳定后,激励光消失后的荧光辐射衰减时间与荧光寿命(激发态的寿命)有关,由于荧光寿命与温度关系为:

$$\tau(T) = \frac{1 + e^{-\Delta E/kT}}{R_s + R_r e^{-\Delta E/kT}}, \quad (1)$$

式中, R_s 、 R_r 、 k 、 ΔE 为常数; T 为热力学温度.

由上式可知 τ 随 T 单值变化,根据这一原理可得到准确的温度信息.进行涡轮叶片的温度测量时,在涡轮叶片表面上涂抹荧光材料,通过非接触式温度传感器接收荧光信号,最后根据荧光信号衰减的时间计算出叶片表面实际温度.

荧光粉测温的方法最是在1937年荧光灯的发展过程中被提出来的,但真正受到科研人员关注是在1988年以后.1990年美国O.R国家实验室^[26]测量了在700~1000℃的喷涂火焰中涡轮叶片静态温度和旋转温度,证实了荧光测温法在涡轮叶片测量的可用性;Dowell等人^[27-28]研究了一种荧光测温方法在1060℃温度下精度可达0.6%;Hyeyes等人^[29-30]使用 $Y_2O_3:S:Sm$ 荧光剂测量温度在900~1425℃其温度误差精于±1℃;目前世界上已经研制出了非常适合涡轮叶片测温的 $Y_2O_3:Eu$,以及

$Y_2O_3:Sm$ 、 $TP:YAG:Dy$ 和 $Y_2O_3:Eu$ 等许多的荧光材料^[31];英国罗·罗公司^[1]正在研制一套用于精密测量涡轮叶片表面温度的测温系统,该系统采用 266 nm(Uv)工作的 Nd:YAG 脉冲激光器,将它产生的激励脉冲通过光纤传送到探头,经探头投射到涂敷有荧光物的旋转涡轮叶片上。

现在国内尚未有荧光测温法在涡轮叶片上的应用研究,河北工程大学王冬生等人使用 $Y_2O_3S:Eu + Fe_2O_3$ 作为荧光粉设计的荧光光纤测温系统,可以实现从室温到 450℃ 的温度测量,分辨率为 0.5℃^[32]。燕山大学王玉田及其研究团队^[33-36]对荧光测温原理的光纤温度传感器进行了研究,测温精度较高;2014 年中北大学的李彦等人^[37]采用 $Cr_3+:YAG$ 晶体作为荧光材料,蓝色发光二极管激励光源,经光纤将荧光信号输出,测得了 10~450℃ 的温度,误差小于 ±5℃。荧光测温法测量涡轮叶片温度的研究还有待进一步发展,其高精度的测温原理使这种测温方法有极大的研究前景。

荧光测温法优点在于荧光寿命只与温度相关,且不受任何其它因素干扰,测温范围宽、重复性好、测温精度极高,不干扰被测表面温度场。但想要应用于航空发动机涡轮叶片测温,必须要解决荧光材料和耦合的问题。

2.2 辐射测温

从辐射测温原理的提出,经过几十年的发展,如今辐射测温法已经成为工程中应用十分广泛的技术。基于红外辐射理论可知^[38],在物体的温度高于绝对零度的时候,就会向周围发出红外辐射,且发出的热辐射随温度变化有一定关系,即普朗克黑体辐射公式:

$$M_0(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1}, \quad (2)$$

式(2)中: C_1 、 C_2 为第一、二辐射常数, λ 为物体的辐射波长; T 为物体的绝对温度。对于实际物体,其辐射与温度关系为:

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \times M_0(\lambda, T) \quad . \quad (3)$$

式(3)中, $\varepsilon(\lambda)$ 为被测物体在温度为 T 时波长 λ 处的发射率, $M(\lambda, T)$ 为被测物体在温度 T 时发射波长 λ 的辐射值。

辐射测温技术是通过收集被测物体表面发出的热辐射量,得到温度值的方法,其测温原理图如图 4 所示^[39]。根据测量的区域大小,辐射测温系统可以分为全场分析探测系统和逐点分析探测系统两种。逐点分析探测系统是获取较小区域的辐射信号,可

通过辐射量与温度的函数关系得出该区域的温度值;全场分析探测系统是用红外成像镜头把物体的温度分布图像成像在二维传感器阵列上,将物体能量转化为可视的温度图像来获得物体空间辐射场的全场分布,全场分布探测系统称为红外热像仪^[40],可获取被测物体的温度场分布图像。辐射测温方法包括全辐射测温、亮度测温、比色测温以及多波长测温法^[41]。全辐射测温法是通过探测全波长范围内的辐射信号,采用全光谱发射率来得到物体表面实际温度值,故受中间介质及发射率影响大,精度低,不适宜精密测量;亮度测温法是测量选定窄波段的辐射能并选用中心波长发射率,以此推算被测物的实际温度。亮度测温法是目前比较成熟的测温方法,测量温度时响应时间短、灵敏度高,在高温测量中应用广泛;为消除发射率的影响,比色测温法通过求解物体在两个不同的波长下的光谱辐射度之比与温度之间的函数关系进行温度测量,消除了发射率和一些介质的影响。但波长选择困难,适合较低发射率物体的温度测量;基于双波长测温法,多光谱测温法采用多个波段,适当选择发射率与温度之间的函数关系,巧妙地解决了发射率测量的难题,但系统结构复杂,实施较为困难。

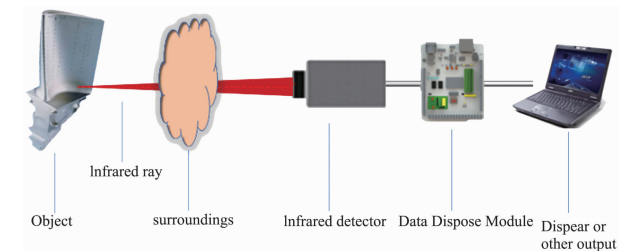


图4 辐射温度测量原理图

Fig.4 The schematic diagram of radiation temperature measurement

辐射测温技术的发展得益于探测器件的不断改进。基于辐射测温原理的探测器件的研究经历了三个阶段,分为隐丝式光学高温计^[42]、光电倍增管高温计^[43]、光电精密测温^[44-45],随着器件的改进,从最初单波长测温发展到了多波长测温,各项性能也有了极大的提升,这为辐射测温在涡轮叶片测温上的应用打下了坚实的基础。国外著名科研机构于上世纪六十年代后期开始了航空发动机涡轮叶片温度监测方面的研究,目前,主要集中在以美国和英国为首的西方国家。1964 年英国 RR 公司就开始了燃气轮机叶片的温度测量,并提出了一套光学系统设计思想^[46],随后又研究出了一些方法修正测温发射

率、信号处理等问题,并形成了产品^[47-49].该公司生产的红外点温仪 ROTAMAPII 温度测量范围为:550~1400℃,分辨率为:±1℃,精度为:±6℃,靶点尺寸(最小尺寸)为:2 mm(探头至被测目标的距离为95 mm时).美国 UTC 公司^[50-53]相继研究出了利用双波段、三波段测温原理的测温系统.欧共体和美国联合课题组的专家 Hiernaut 等人^[54-55]结合辐射测温原理与光纤传感器的优点,研制了一种基于多波长辐射测温的亚毫米级六波长高温计,测量温度范围727~1327℃,精度为1%.2011年美国 GE 公司^[56]提出了一种利用光学传感系统实现涡轮叶片温度测量的方法.英国 land 公司^[57-58]生产的 FP11 型光纤高温计用于涡轮叶片温度测量,测量范围达到600~1300℃,精度为($\pm 0.25\%$)+2℃.

国内许多的研究机构都开展了辐射测温法测量涡轮叶片温度的相关研究,并取得了非常丰富的研究成果.哈尔滨工业大学的戴景民、孙晓刚等人多年来对辐射测温仪^[59]、红外热像仪^[60-62]、多光谱测温仪从原理到应用都进行了大量的研究,研究了辐射高温计的标定方法^[63-66]、发射率误差的消除^[67]、并对温度误差进行了补偿算法的研究^[68-70],并大量研究了基于神经网络算法的多光谱辐射测温法^[61-74],提高了测温精度,并利用多光谱辐射仪测量了火焰温度^[75-80];哈尔滨工程大学的冯驰、高山等人研究

了涡轮叶片辐射测温的各种误差并进行了校正^[81-83]、提出了一些数据处理方法^[84],对涡轮叶片测温的误差进行了分析^[85,86],并对多光谱测温在高温恶劣环境下的应用^[87-88]进行了一系列的研究,在2011年^[89]采用红外辐射测温技术在某重型舰用燃气轮机上实现了叶片温度的测量,测量范围为800~1400℃,误差小于7℃;2008年贵州航空发动机研究所杨晨等人^[2]利用辐射测温系统对叶片叶背排气边表面温度进行测,其测量范围为650~1100℃,基本误差±2℃;2013年,中国燃气涡轮研究院李杨等人^[90]采用英国 RR 公司生产的红外辐射高温计 ROTAMAP II 测量了某型燃气轮机二级转子涡轮转子叶片叶背温度场,测量范围为500~1350℃,精度可达±6℃.上海技术物理研究所王跃民等人^[91-93]提出了短波红外辐射测温的信号采集以及消除背景辐射的方法;在2017年热科学与动力工程教育部重点实验室和燃气轮机与煤气化联合循环国家工程研究中心^[94]研究了波长为0.8~15 μm 范围内的涡轮叶片表面发射率的变化趋势.北京航空精密机械研究所^[95]生产的各类机载涡轮叶片测温仪测温范围600~1200℃,误差为±5℃.

辐射测温技术提供了一种既不干扰表面也不干扰周围介质的表面温度测量方法,具有分辨率高、灵敏度高、可靠性强、响应时间短、测温范围广、测量距

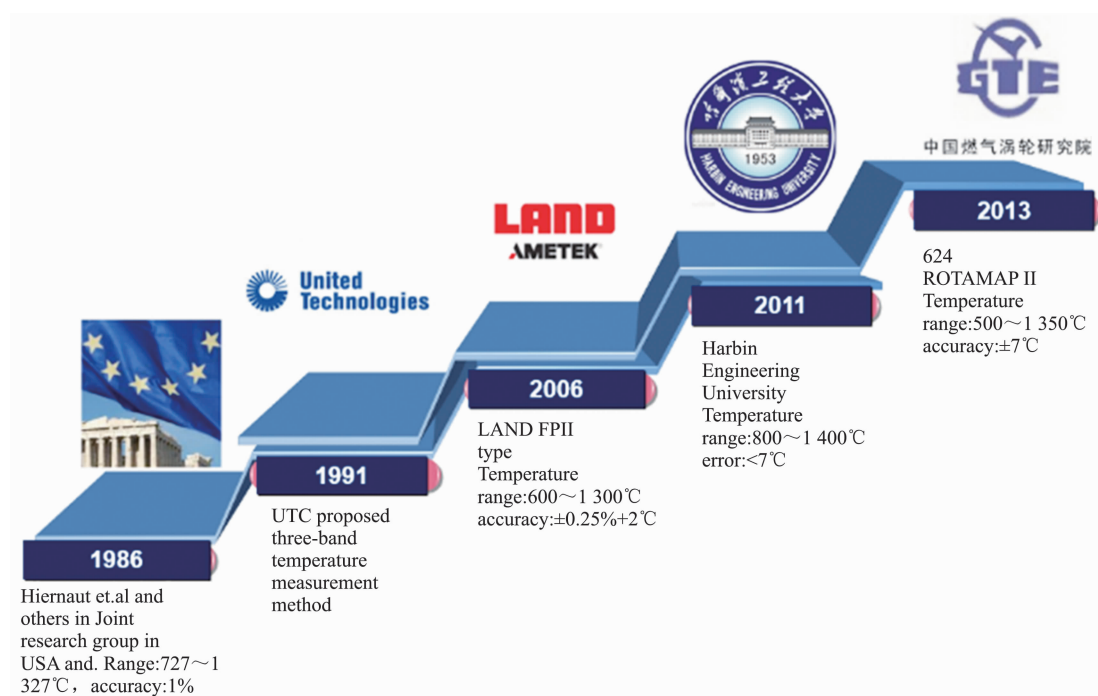


图5 涡轮叶片辐射温度测量的应用研究进展

Fig. 5 Application Research progress of radiation temperature measurement on turbine blades

离可调、测量目标面积(靶点)可以很小等优点^[96]。重要的是,由于辐射测温法不需要接触被测物表面,对于一些无法直接测量的情况,如高速旋转或腐蚀性强的物体,辐射测温法是最佳的选择^[97]。目前针对涡轮叶片的辐射温度测量如火如荼,将来的发展趋势是向减少辐射散失、消除其他物体的反射辐射、空气中的气体吸收以及发射率修正吸收等提高测温精度方向进行,获取叶片温度场分布情况,并实现对涡轮叶片转动时的实时温度监测。

2.3 光纤测温

光纤测温方法^[98]是应用非常广泛的一种测温方法,光纤测温技术可分为两类:一是作为传输光通量的导体,传递具有温度信息的光信号,这一类不需要与被测物体直接接触,是非接触式的;另一种是利用光纤的敏感特性,可直接与被测物体相接触,获取温度信息,常见的有基于拉曼散射的光纤测温^[99-100]和光纤光栅测温方法^[101-103],在工程中应用极其广泛,但在高速旋转的高温涡轮叶片上,受光纤材料的限制,只能埋入涡轮叶片表面,易对叶片表面温度场产生干扰,影响测温精度。因此目前光纤在涡轮叶片上的测温技术应用皆采用非接触式的方法。

在航空发动机内部涡轮叶片等高温环境下,温度、气流、杂质尘埃等环境因素往往影响温度测量的精度,可利用光纤对光信号的低损耗传输能力,将带有温度信息的光波传递到远离高温环境的地方,实现非接触式的温度测量。以蓝宝石、石英等材料制成的光纤具有的宽波段、耐腐蚀、耐高温、抗电磁干扰、可弯曲等特点,不受外界环境的影响,传递光损耗极低^[104]。在 20 世纪 80 年代起国外就已经开始了辐射式光纤的研究^[105-109]。目前光纤测温在涡轮叶片的测温中已经被广泛地研究^[110-116],如在辐射测温中已经介绍过的的英国 land 公司生产的 FP11 型光纤高温计和国内的北京航空精密机械研究所生产的各类机载涡轮叶片测温仪等都采用了光纤测温;清华大学的周炳坤等人国内率先完成蓝宝石光纤黑体腔高温传感器研究,测温范围在 400 ~ 1 300℃^[117];燕山大学王玉田^[118]研制了一种基于黑体辐射的光纤测温系统,采用“接触-非接触”测温方法和光纤光栅窄带滤波技术,其测温范围可达到 2 000℃。

光纤传输光学信号的低损耗性使其可结合许多测温方法,极大地减少测温误差,在涡轮叶片测温中应用广泛。

2.4 其它测温方法

其他可用于航空发动机温度测试的方法包括热

色液晶测温、超声波测温、激光光谱测温等由于适应性、测量精度等问题尚未实现在涡轮叶片上的温度测量。热色液晶法^[119]测温原理是液晶分子结构具有光学各向异性,温度变化引起其分子层间距变化,从而呈现出一定的颜色变化,显示出温度的变化。这种测量方法受材料种类限制测温范围有限,一般是通过分析叶片尾缘复合通道的换热机理和主流湍流度对涡轮叶片气膜冷却特性的影响^[120];声波测温法^[121]主要利用声音在介质中传播速度与介质温度的相关关系,其测量温度高,可以在恶劣环境中工作,但尚未实现在高速旋转物体上的测温;激光光谱测温方法^[122]是通过激光引起被测组分产生散射,如由直径远小于入射光波长的散射粒子引起的瑞利散射和分子与光子产生的拉曼散射,基于拉曼散射的激光光谱测温法可应用到气体的温度测量,在航空发动机内部高温燃气的温度测量中有较好的效果^[123]。

3 结论

随着探测器件的发展和测温原理的完善,航空发动机涡轮叶片的温度测量技术水平不断提高。目前薄膜热电偶、示温漆、辐射式测温方法在涡轮叶片测温上应用较多,是目前最受关注的涡轮叶片表面测温方法。涡轮叶片测温技术各有优劣,薄膜热电偶基本消除了埋入式热电偶对叶片温度场的影响,提高了精度,但测温上限、引线问题的存在使其无法测量涡轮叶片表面温度分布;示温漆测温方法成本低廉,在航空发动机测温中仍应用广泛。但受限于材料性质,其测温精度低,易受燃气污染,且只能测量最高温度,难以满足实时精确测温的要求;晶体测温法具有较高的测温上限,但目前只能记录叶片经历的最高温度,不能用于实时温度监测,且安装晶体也会对叶片造成一定程度的损坏,故这种方法还有待进一步地发展;非接触式测温法中辐射式测温仪使用简单、响应速度快、精度较高,在涡轮叶片上的测量被科研人员广泛地研究。科研人员致力于消除环境误差、原理误差,研究了基于比色、多光谱等测温原理的测温系统,取得了非常显著的成果,在航空发动机的研制过程中起了极其关键的作用,但想实现机载实时温度检测还有许多的困难需要克服。荧光测温法是一种原理上不受外界环境干扰的测温方法,其测量精度高,不干扰被测表面温度场,但对荧光粉的材料有一定的要求,且目前适用温度较低,还有待进一步实验改进。涡轮叶片表面的温度是提高航空

发动机推重比,保障航空发动机健康工作的关键参数,特别是在航空发动机启动的瞬间,涡轮叶片表面的温度及其分布参数显得尤为重要。因此,涡轮叶片表面的测温技术,将向着高精度、无干扰、快速响应、测量温度场的分布等特点发展,积极地推动整个航空事业的发展。

References

- [1] YAO Yan-Ling, DAI Jun, HUANG Chun-Feng, A survey of development of modern aeroengine temperature testing technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology* (姚艳玲,代军,黄春峰. 现代航空发动机温度测试技术发展综述. 航空制造技术)2015, **481**(12):103-107.
- [2] YANG Chen, ZHENG Deng-Qiang. Research on surface temperature measurement of aeroengine turbine rotor blades [C]. *Aviation Test and Test Technology Summit* (杨晨,郑登强. 航空发动机涡轮转子叶片表面温度测量研究. 航空试验测试技术峰会), 2008.
- [3] Grant H P, Przybyszewski J S, Claing R G. Turbine blade temperature measurements using thin film temperature sensors[J]. *Turbine Blades*, 1981, NASA, TM X-71844.
- [4] Wrbanek J D, Fralick G C. Thin film physical sensor instrumentation research and development at NASA Glenn research center[R]. 2006.
- [5] Lepicovsky J, Bruckner R, Smith F. Application of thin-film thermocouples to localized heat transfer measurements [C]// *Joint Propulsion Conference and Exhibit*. 1995.
- [6] Liebert C H, Mazaris G A, Brandhorst, et al. Turbine blade metal temperature measurement with a sputtered thin film chromel-alumel thermocouple[J]. 1975, **76**:14124.
- [7] Martin A L C, Holanda R. Applications of thin film thermocouples for surface temperature measurement[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1994, **95**:65-76.
- [8] HUANG Chun-Feng, JIANG Ming-Fu, MAO Mao-Fa. Development of aeroengine thin film thermocouple technology in foreign countries[J]. *Aeroengine* (黄春峰,蒋明夫,毛茂华. 国外航空发动机薄膜热电偶技术发展研究. 航空发动机), 2011, **37**(6):53-57.
- [9] AN Bao-He. Development of thin film temperature sensor and its application [J]. *Journal of Propulsion Technology* (安保合. 薄膜温度传感器的研制及应用. 推进技术), 1992, (1):63-67.
- [10] CHEN Yin-Zhi. Research on fabrication of thin film thermocouples on nickel base superalloy and related technology [D]. *University of Electronic Science and Technology of China* (陈寅之. 在镍基高温合金上制备薄膜热电偶及其相关技术研究[D]. 电子科技大学), 2014.
- [11] CAI Jing, YANG Yong-Jun, ZHAO Jian, et al. Aero-engine hot end surface temperature field measurement [J]. *Metrology & Measurement Technology* (蔡静,杨永军,赵俭,等. 航空发动机热端表面温度场测量. 计测技术), 2009, **29**(1):1-3.
- [12] ZHANG Zhi-Xue, XUE Xiu-Sheng, RUAN Yong-Feng, et al. Research of temperature measurement technology based on Si C crystal [J]. *China Measurement & Test* (张志学,薛秀生,阮永丰,等. SiC 晶体测温技术研究. 中国测试), 2017, **43**(5):1-4.
- [13] WANG Peng-Fei. The defect analysis and application of neutron irradiated 6H-SiC[D]. *Graduate School of Tianjin University* (王鹏飞. 中子辐照 6H-SiC 的缺陷分析与应用. 天津大学), 2013.
- [14] LI Yang, YIN Guang-Ming. Research on crystal temperature measurement technology for aeroengine turbine blade [J]. *Aeroengine* (李杨,殷光明. 航空发动机涡轮叶片晶体测温技术研究. 航空发动机), 2017, **43**(3):83-87.
- [15] Shukin S, Annerfeldt M, Bjorkman M. Siemens SGT-800 industrial gas turbine enhanced to 47MW; design modifications and operation experience [C]// *ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air*. 2008:65-70.
- [16] Romanov D, Devoe J, Ginzbursky L. Optimization of temperature measurement technique used in high heat flux environment[C]// *ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*. 2011:1129-1136.
- [17] ZHANG Zhi-Xue. Non-intrusive thermometry technique research based on SiC crystal material[D]. *Graduate School of Tianjin University* (张志学. 基于 SiC 晶体材料的非侵入式测温技术研究. 天津大学), 2015.
- [18] CHEN Li-Jun, SHEN Hui-Fang, HUANG Hong, et al. The present situation and development trend of the temperature coatings [J]. *Thermosetting Resin* (陈立军,沈慧芳,黄洪,等. 示温涂料的研究现状和发展趋势. 热固性树脂), 2004, **19**(04):36-40.
- [19] LI Yang, CHEN Hong-Min, XIONG Qin-Rong. Development and application of irreversible temperature indicating coatings[J]. *China Coatings* (李杨,陈洪敏,熊庆荣. 不可逆示温涂料的发展及应用. 中国涂料), 2010, **25**(05):16-19.
- [20] MA Chun-Wu. Research on automatic temperature interpretation and digital image processing of temperature-sensitive paint[D]. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics* (马春武. 示温漆温度自动判读与数字图像处理研究. 南京航空航天大学), 2008.
- [21] XU Feng-Hua. Application of temperature paint technology on surface temperature testing of aeroengine high-temperature parts [D]. *University of Electronic Science and Technology of China* (徐凤花. 示温漆技术在航空发动机高温部件表面温度测试上的应用研究. 电子科技大学), 2009.
- [22] WANG Cong-Rui, JIANG Hong-Chuan, et al. Fabrication of NiCr/NiSi thin film thermocouples with the incorporating function and structure[J]. *Measurement & Control Technology* (王从瑞,蒋洪川,陈寅之,等. 功能-结构一体化 NiCr/NiSi 薄膜热电偶的制备. 测控技术), 2011, **30**(10):1-4.
- [23] LI Yang, LI Zhi-Min, XIONG Bing, et al. Present situation and development of temperature measurement technology of aero-engine turbine blade [C]. *China Association of Science and Technology Annual Conference Session 13: Aeroengine Design, Manufacturing and Application Technology Seminar* (李杨,李志敏,熊兵,等. 航空发动机涡轮叶片温度测量技术现状与发展. 中国科协年会第 13 分会场:航空发动机设计、制造与应用技术研讨会). 2013.
- [24] XU Run-Bin, LIU Fang, TIAN Yong-Feng, et al. Status and development trend of temperature indicating coating [J]. *Modern Paint & Finishing* (徐润斌,刘芳,田永丰,等. 示温涂料的研究现状和发展趋势. 现代涂料与涂

- 装), 2016, **19**(10): 26-30.
- [25] Douglas J, Smith C A, Taylor S J R. An integrated approach to the application of high bandwidth optical pyrometry to turbine blade surface temperature mapping[C]// *International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities. IEEE Xplore*, 1999; 4/1-4/6.
- [26] Tobin K W, Allison S W, Cates M R, et al. High-temperature phosphor thermometry of rotating turbine blades[J]. *Aiaa Journal*, 2012, **28**(8): 1485-1490.
- [27] Dowell L J. Investigation and development of phosphor thermometry[D]. University of Virginia, 1989.
- [28] Allison S W, Gillies G T. Remote thermometry with thermographic phosphors: instrumentation and applications [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, **68**(7): 2615-2650.
- [29] Feist J P, Heyes A L. The characterization of Y2O2S:Sm powder as a thermographic phosphor for high temperature applications [J]. *Measurement Science & Technology*, 2000, **11**(7): 942.
- [30] Khalid A H, Kontis K. Thermographic phosphors for high temperature measurements; principles, current state of the art and recent applications [J]. *Sensors*, 2008, **8**(9): 5673.
- [31] Aldén M, Omrane A, Richter M, et al. Thermographic phosphors for thermometry: A survey of combustion applications [J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2011, **37**(4): 422-461.
- [32] WANG Dong-Sheng, WANG Gui-Mei, WANG Yu-Tian, et al. Fiber temperature sensor based on rare earth fluorescence material [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (王冬生, 王桂梅, 王玉田, 等. 基于稀土荧光材料的光纤温度传感器. *仪器仪表学报*), 2007, **28**(4): 123-127.
- [33] HU Qiao-Li. Study of optical fiber temperature measurement system based on fluorescence mechanism [D]. *YanShan University* (胡俏丽. 基于荧光机理的光纤温度测量系统的研究. 燕山大学), 2010.
- [34] LIU Jun-Tian. The research of optical-fiber temperature measuring set based on fluorescence mechanics [D]. *YanShan University* (刘俊田. 基于荧光机理的光纤温度测量仪研究. 燕山大学), 2009.
- [35] WANG Dong-Sheng. Study of Fluorescence Optical Fiber Temperature sensor [D]. *YanShan University* (王冬生. 荧光光纤温度传感器的研究. 燕山大学), 2006.
- [36] GENG Li-Kun. Study of fluorescence lifetime optical fiber thermometry system and signal processing [D]. *YanShan University* (耿丽琨. 荧光寿命光纤测温系统及其信号处理的研究. 燕山大学), 2006.
- [37] LI Yan, WANG Yan-Hong, WEI Yan-Long. A method of measuring temperature by fiber fluorescence spectrometry [J]. *Sensor World* (李彦, 王艳红, 魏艳龙. 一种光纤荧光光谱测温方法的研究. *传感器世界*), 2014, **20**(11): 23-26.
- [38] Modest M F. Radiative heat transfer [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2003, **12**(10): 1331-1337.
- [39] Usamentiaga R, Garcia D F, Molleda J, et al. Temperature measurement using the wedge method: Comparison and application to emissivity estimation and compensation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2011, **60**(5): 1768-1778.
- [40] SUN Xiao-Gang, LI Yun-Hong. Review of the development of temperature measurement technology with infrared thermal imager [J]. *Laser & Infrared* (孙晓刚, 李云红. 红外热像仪测温技术发展综述. *激光与红外*), 2008, **38**(02): 101-104.
- [41] DAI Jing-Min. Techniques of automation and applications [J]. *Survey of Radiation Thermometry* (戴景民. 辐射测温的发展现状与展望. *自动化技术与应用*), 2004, **23**(3): 1-7.
- [42] WANG Kui-Han. *Temperature measurement technology* [M]. Beijing: Machinery Industry Press (王魁汉. 温度测量实用技术. 北京: 机械工业出版社), 2007.
- [43] XU Gao-Feng. Real-time furnace temperature measurement algorithm and software implementation based on CCD image [D]. *Northwesten Polytechnical University* (徐高峰. 基于 CCD 图像的实时炉温测量算法及软件实现. 西北工业大学), 2004.
- [44] Witherell P G, Faulharber M E. The silicon solar cell as a photometric detector [J]. *Appl. Opt.* 1970, **9**(1): 73-78.
- [45] MA Jin-Bao. Development of wavelength Radiation Pyrometer [D]. *Harbin Institute of Technology* (马金宝. 十波长辐射高温计的研制. 哈尔滨工业大学), 2006.
- [46] ROLLS-ROYCE Ltd. Gas turbine engine; European patent. Pant GB972394A [P]. 1962-01-10.
- [47] HILL R J. Gas turbine engine; European patent. Pant GB1104322A [P]. 1965-05-24.
- [48] Douglas J, Jemmings R P. Data selection circuits, systems and methods; U. S. patent 4,799,190 [P]. 1989-1-17.
- [49] Bird C, Parrish C J. Component temperature measuring method; U. S. patent 7,003,425 [P]. 2006-2-21.
- [50] Gebhart J R, Kinchen B E, Strange R R. Optical pyrometer and technique for temperature measurement; U. S. patent 4,222,663 [P]. 1980-9-16.
- [51] Suarez-Gonzalez E, Kepple D A. In-flight engine control optical pyrometer; U. S. patent 4,657,386 [P]. 1987-4-14.
- [52] Suarez-Gonzalez E, Oglukian R L. Triple spectral area pyrometer; U. S. patent 5,125,739 [P]. 1992-6-30.
- [53] Suarez-Gonzalez E, Oglukian R L, Steinauer C. Turbine pyrometer system for correction of combustor fireball interference; U. S. patent 5,265,036 [P]. 1993-11-23.
- [54] Hernaut J P, Beukers R, Heinz W, et al. Submillisecond six-wavelength pyrometer for high-temperature measurements in the range 2000 to 5000 K [J]. *High Temperature High Press*, 1986, **18**: 617-625.
- [55] LIU Li-Hua, WANG Jun, XIN Li, et al. Applied study and development of fiber-optic temperature sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (刘丽华, 王军, 新力, 等. 光纤温度传感器的应用及发展. *仪器仪表学报*), 2003, **24**(5): 547-550.
- [56] Wang G, Wang A, Nirmalan N V, et al. Optical sensor system for a gas turbine engine and method of operating the same; U. S. patent 9,046,411 [P]. 2015-6-2.
- [57] ZHU Yong-Jing. Study on temperature and displacement detection technique for turbine blades [D]. *YanShan University* (祝永晶. 涡轮叶片温度和位移的检测技术研究. 燕山大学), 2006.
- [58] YANG Xue. Research on real-time measurement system of turbine blade temperature [D]. *XI'AN Technological University* (杨雪. 涡轮叶片温度实时测量系统研究. 西安工

- 业大学), 2008.
- [59] YU Wei-Xiong, DAI Jing-Min, WANG Yong. Research of the dynamic radiation scanning thermometer based on colorimetric measurement principle [J]. *Infrared and Laser Engineering* (于为雄, 戴景民, 王勇. 基于比色测温原理的动态辐射扫描测温仪研制. *红外与激光工程*), 2014, **43**(05): 1390 - 1395.
- [60] LI Yun-Hong, SUN Xiao-Gang, LIAN Ji-Hong. Research on performance testing of thermal infrared imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering* (李云红, 孙晓刚, 廉继红. 红外热像系统性能测试研究. *红外与激光工程*), 2008, **37**(S2): 458 - 462.
- [61] LI Yun-Hong, SUN Xiao-Gang, YANG Xin-Fang, et al. Theoretical analysis of temperature measurement precision of infrared thermal imager [J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University* (李云红, 孙晓刚, 杨幸芳, 等. 红外热像仪测温精度的理论分析. *西安工程科技学院学报*), 2007, **21**(5): 635 - 639.
- [62] LI Yun-Hong, SUN Xiao-Gang, YUAN Gui-Bing. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager [J]. *Optics and Precision Engineering* (李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术. *光学精密工程*), 2007, **15**(9): 1336 - 1341.
- [63] DAI Jing-Min. Study of the technique of multi-spectral radiation thermometry [D]. *Harbin Institute of Technology* (戴景民. 多光谱辐射测温技术研究. *哈尔滨工业大学*), 1995.
- [64] ZHANG Fu-Cai, SUN Xiao-Gang, XING Jian, et al. Mensional radiation temperature field using infrared multi-spectral line [J]. *Infrared and Laser Engineering* (张福才, 孙晓刚, 邢键, 等. 红外多谱线二维辐射温度场重建算法的研究. *红外与激光工程*), 2016, **45**(07): 39 - 43.
- [65] ZHANG Fu-Cai, SUN Xiao-Gang. Research on temperature reconstruction method and the precision by non-complete temperature point in infrared high temperature field [J]. *Infrared and Laser Engineering* (张福才, 孙晓刚. 红外高温温度场中非完全温度点重建方法与预测精度的研究. *红外与激光工程*), 2015, **44**(9): 2598 - 2602.
- [66] SUN Xiao-Gang, ZHAO Wei, YUAN Gui-Bing, et al. Methods of data processing in multi-wavelength thermometry [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, **13**(04): 421 - 426.
- [67] LIANG Mei, SUN Xiao-Gang, LUAN Mei-Sheng. Multi-spectral radiation true temperature inversion method based on emissivity model constraint [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (梁美, 孙晓刚, 栾美生. 基于发射率模型约束的多光谱辐射真温反演法. *光谱学与光谱分析*), 2015, **35**(10): 2675 - 2679.
- [68] SUN Xiao-Gang, DAI Jing-Min, LU Xiao-Dong. Multi-wavelength radiation temperature measurement theory and estimation of its fitting error [J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University* (孙晓刚, 戴景民, 卢小冬. 多波长辐射测温理论及其拟合误差的估计. *哈尔滨师范大学自然科学学报*), 1997, **13**(04): 42 - 45.
- [69] QIU Chao, SUN Xiao-Gang, LUAN Mei-Sheng. Wide band light source wave compensation method based on spectral linear fitting [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (邱超, 孙晓刚, 栾美生. 基于光谱线性拟合的宽波段光源波动补偿方法. *光谱学与光谱分析*), 2014, **34**(06): 1702 - 1706.
- [70] SUN Kun, SUN Xiao-Gang, Yu Xiao-Yang. Research on random error resistance of two multispectral pyrometers with passive temperature calibration [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (孙崐, 孙晓刚, 于晓洋. 两种多光谱高温计无源温区标定方法抗随机误差能力研究. *光谱学与光谱分析*), 2013, **33**(06): 1723 - 1726.
- [71] SUN Xiao-Gang, DAI Jing-Min, CHU Zai-Xiang, et al. Research on multispectral thermometry based on neural network [J]. *Infrared Technology* (孙晓刚, 戴景民, 褚载祥, 等. 基于神经网络的多光谱测温方法研究. *红外技术*), 2001, **23**(02): 35 - 37 + 40.
- [72] SUN Xiao-Gang, YUAN Gui-Bing, DAI Jing-Min. Multi-spectral radiation thermometry based on genetic neural network [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (孙晓刚, 原桂彬, 戴景民. 基于遗传神经网络的多光谱辐射测温法. *光谱学与光谱分析*), 2007, **27**(2): 213 - 216.
- [73] LI Yun-Hong, SUN Xiao-Gang, WANG Yan-Nian, et al. Algorithm of measuring temperature with infrared imager based on improved neural network [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (李云红, 孙晓刚, 王延年, 等. 改进神经网络的红外成像测温算法. *红外与激光工程*), 2010, **39**(05): 801 - 805.
- [74] SUN Xiao-Gang, Yuan Gui-Bing, LIN Ke-Long, et al. Data processing method for multi-spectral thermometry based on neural networks [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)* (孙晓刚, 原桂彬, 林科锋, 等. 基于神经网络的多光谱测温数据处理方法. *清华大学学报(自然科学版)*), 2005, **7**: 999 - 1001.
- [75] DAI Jing-Min, JIN Zhao. Study on the measurement techniques of flame temperature [J]. *Acta Metrologica Sinica* (戴景民, 金钊. 火焰温度测量技术研究. *计量学报*), 2003, **4**: 297 - 302.
- [76] XIAO Peng, DAI Jing-Min, WANG Qing-Wei. Development of Multi-target Multi-spectral Radiation High-speed Pyrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (萧鹏, 戴景民, 王青伟. 多目标多光谱辐射高速高温计的研制. *光谱学与光谱分析*), 2008, **11**: 2730 - 2734.
- [77] SUN Kun, SUN Xiao-Gang, YU Xiao-Yang, et al. Development of multispectral thermometer for measuring real temperature of explosion flame—field experiment and measurement accuracy analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (孙崐, 孙晓刚, 于晓洋, 等. 测量爆炸火焰真温的多光谱温度计的研制——现场实验与测量精度分析. *光谱学与光谱分析*), 2013, **33**(06): 1719 - 1722.
- [78] SUN Kun, SUN Xiao-Gang, Dai Jing-Min. Development of multispectral thermometer for measuring true temperature of explosion flame [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (孙崐, 孙晓刚, 戴景民. 测量爆炸火焰真温的多光谱温度计的研制. *光谱学与光谱分析*), 2011, **31**(03): 849 - 852.
- [79] SUN Xiao-Gang, DAI Jing-Min, CONG Da-Cheng, et al. Measurement of plume temperature of solid rocket motor based on multispectral method [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)* (孙晓刚, 戴景民, 丛大成, 等. 基于多光谱法的固体火箭发动机羽焰温度测量. *清华大学学报(自然科学版)*), 2003, **7**: 916 - 918 + 922.
- [80] ZHANG Fu-Cai, SUN Xiao-Gang, XING Jian. Study on the multi-spectral true temperature pyrometer for explosion transient of thermo-baric explosives [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (张福才, 孙晓刚, 邢键. 温压炸药爆炸瞬态多光谱真温高温计的研究(英文). *光谱学与光谱*

- 分析), 2016, **36**(05):1598 - 1603.
- [81] Kipngetich K D, Feng C, Gao S. Reflection error correction of gas turbine blade temperature[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2016, **75**:153 - 159.
- [82] Gao S, Wang L X, Feng C, *et al.* Analysis and improvement of gas turbine blade temperature measurement error [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, **26**(10):105203.
- [83] Kipngetich D K, Feng C, Gao S. Single wavelength and ratio pyrometry reflection errors in temperature measurement of gas turbine blade [J]. *Measurement*, 2016, **86**:133 - 140.
- [84] Feng C, Wang L, Gao S. A method for turbine blade temperature data segmentation[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, **887**(1):012067.
- [85] Gao S, Wang L X, Feng C, *et al.* Analyzing the influence of combustion gas on a gas turbine by radiation thermometry[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2015, **73**:184 - 193.
- [86] Feng C, Li D, Gao S, *et al.* Calculating the reflected radiation error between turbine blades and vanes based on double contour integral method [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2016, **79**:171 - 182.
- [87] Kipngetich K D, Feng C, Gao S. Application of multispectral radiation thermometry in temperature measurement of thermal barrier coated surfaces [J]. *Measurement*, 2016, **92**:218 - 223.
- [88] Gao S, Feng C, Wang L, *et al.* Multi-spectral temperature measurement method for gas turbine blade[J]. *Optical Review*, 2016, **23**(1):17 - 25.
- [89] FENG Chi, GAO Xiao-Cheng, CHEN Rui-Bin. Realization of colorimetric temperature measurement based on LabVIEW[J]. *Computer Systems & Applications*(冯驰, 高晓成, 陈瑞斌. 基于 LabVIEW 的比色温度测量的实现. 计算机系统应用), 2011, **20**(2):189 - 192.
- [90] XIONG Bing, HOU Min-Jie, CHEN Hong-Min, *et al.* Application of infrared thermometer in turbine blade temperature field [J]. *Gas Turbine Experiment and Research*(熊兵, 侯敏杰, 陈洪敏, 等. 辐射测温技术在涡轮叶片温度场中的应用. 燃气涡轮试验与研究), 2008, **21**(3):50 - 54.
- [91] Jia J, Wang Y, Zhuang X, *et al.* High spatial resolution shortwave infrared imaging technology based on time delay and digital accumulation method [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **81**:305 - 312.
- [92] Wang Y, Xie F, Wang J. Short-wave infrared signature and detection of aircraft in flight based on space-borne hyperspectral imagery[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, **14**(12):122801.
- [93] WANG Yue-Ming, ZHU Qian, WANG Jian-Yu, *et al.* Characterization of background radiation in SWIR hyperspectral imager [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*(王跃明, 祝倩, 王建宇, 等. 短波红外高光谱成像仪背景辐射特征研究. 红外与毫米波学报), 2011, **30**(03):279 - 283.
- [94] Tian J, Fu T, Xu Q, *et al.* Effective spectral emissivity of gas turbine blades for optical pyrometry [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2017, **139**(7):072701.
- [95] SUN Xi-Ren. *Aviation Sensors Handbook* [Z]. Beijing: Machinery Industry Press(孙希任. 航空传感器实用手册. 北京:机械工业出版社), 1995:301, 31, 624, 58 - 59, 625.
- [96] Xu X, Yang X X. Contactless temperature measurement technology[J]. *Applied Technology*, 2012, **1674-6708**:62 - 0159 - 02.
- [97] WANG Wen-Ge. Survey of radiation thermometry technology[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*(王文革. 辐射测温技术综述. 宇航计测技术), 2005, **25**(4):20 - 24.
- [98] TANG Jin-Ya. Infrared fiber and its application[J]. *Infrared Technology*(汤锦亚. 红外光纤及其应用. 红外技术), 1994, **4**:24 - 28.
- [99] NI Zheng-Chu, YUAN Hong-Yong, SHU Xue-Ming. A survey of modern temperature measurement techniques[J]. *Fire Science and Technology*(倪震楚, 袁宏永, 疏学明. 现代温度测量技术综述. 消防科学与技术), 2003, **4**:270 - 272 + 288.
- [100] LIU De-Ming, SUN Qi-Zhen. Distributed optical fiber sensing technology and its applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*(刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用. 激光与光电子学进展), 2009, **46**(11):29 - 33.
- [101] YU Hai-Ying, LI Qing, SUO Lin, *et al.* Performance analysis of distributed fiber sensing technology [J]. *Optical Instruments*(于海鹰, 李琪, 索琳, 等. 分布式光纤测温技术综述. 光学仪器), 2013, **35**(05):90 - 94.
- [102] CHAI Wei. Study on FBG temperature sensing technology [D]. *Wuhan University of Technology*(柴伟. 光纤布拉格光栅温度传感技术研究. 武汉理工大学), 2004.
- [103] PANG Dang-Dang. Investigation on the novel fiber bragg grating sensing technology [D]. *Shandong University*(庞丹丹. 新型光纤光栅传感技术研究. 山东大学), 2014.
- [104] LIU Tie-Gen, WANG Shuang, JIANG Jun-Feng, *et al.* Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*(刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展. 仪器仪表学报), 2014, **35**(08):1681 - 1692.
- [105] FENG Chi, SU Hai-Yan, GAO Guang-Feng, *et al.* Turbine blade temperature measurement system with fiber [J]. *Applied Science and Technology*(冯驰, 苏海燕, 高广凤, 等. 涡轮叶片光纤温度测量系统. 应用科技), 2009, **36**(07):33 - 36 + 46.
- [106] LI Bing. Study of high-temperature sensor based on black cavum [D]. *Wuhan University of Technology*(李兵. 基于黑体空腔的光纤高温计的研制. 武汉理工大学), 2006.
- [107] HAO Xiao-Jian, SUN Wei, ZHOU Han-Chang, *et al.* Sapphire fiber blackbody pyrometer[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*(郝晓剑, 孙伟, 周汉昌, 等. 蓝宝石光纤黑体腔高温计. 应用基础与工程科学学报), 2004, **2**:218 - 223.
- [108] WU Shi-Jun. Research on high-temperature sapphire optical fiber sensor [D]. *Northeastern University*(吴世均. 蓝宝石光纤高温计的研究. 东北大学), 2009.
- [109] YAO Ling-Shi. Research on sapphire fiber high temperature instrument [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*(姚灵石. 蓝宝石光纤高温计的研究. 沈阳工业大学学报), 2000, **3**:252 - 254.
- [110] LIU Li-Hua, WANG Jun, XIN Li, *et al.* Applied study and development of fiber-optic temperature sensor [J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument* (刘丽华, 王军, 新力, 等. 光纤温度传感器的应用及发展. *仪器仪表学报*), 2003, **5**: 547 - 550.
- [111] WANG Li-Tian, ZHENG Long-Jiang, WANG Yu-Tian, *et al.* Brightness type optical fiber temperature measuring instrument [J]. *Laser & Infrared* (王莉田, 郑龙江, 王玉田, 等. 一种亮度式光纤温度测量仪. *激光与红外*), 1998, **2**: 116 - 118.
- [112] LU Xiao-Bo, WU Zhi-He, XU Hai-Guang, *et al.* An optical fiber sensor and testing system for measuring the temperature of burning gas [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (路小波, 吴志鹤, 徐海光, 等. 光纤燃气温度传感器及测试系统. *仪器仪表学报*), 2000, **21** (4): 422 - 424.
- [113] XIN Jun, LIN Tie-Sheng, FENG Qi-Bo, *et al.* Study on a novel high-precision dual-wavelength fiber-optic pyrometer [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University* (辛军, 林铁生, 冯其波, 等. 新型高精度双波长光纤高温计的研究. *北方交通大学学报*), 1997, **21** (6): 657 - 663.
- [114] DAI Jing-Min, YANG Mao-Hua, CHU Zai-Xiang. Multi-wavelength radiation thermometer and its application [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (戴景民, 杨茂华, 褚载祥. 多波长辐射测温仪及其应用. *红外与毫米波学报*), 1995, **14** (6): 461 - 466.
- [115] Wang Z H, Adams B. Apparatus and method for monitor a temperature using a thermally fused composite ceramic blackbody temperature probe [P]. US Patent, 5364186. 1994.
- [116] ZHOU Bin-Kun, CHEN Jia-Hua, WANG Zhi-Hai. Fiber Black Body Temperature Sensor [P]. China Patent (周炳琨, 陈家骅, 王志海. 光纤黑体腔温度传感器 [P]. 中国专利), 89200371. 5. 1994.
- [117] WANG Zhi-Hai. Research on black body fiber optic thermometer [D]. *Tsinghua University* (王志海. 黑体腔光纤测温仪的研究. *清华大学*), 1989.
- [118] WANG Yu-Tian, YANG Li-Li, LU Xin-Qing. Transient high-temperature measurement system [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics* (王玉田, 杨丽丽, 鲁信琼. 瞬态高温测量系统. *压电与声光*), 2010, **32** (3): 346 - 348.
- [119] FANG Wei, LU Pin. Calibration and error analysis of temperature measurement for thermal sensitive liquid crystal [J]. *Aeroengine* (范玮, 吕品. 热敏液晶测温标定及误差分析. *航空发动机*), 2009, **35** (01): 50 - 52 + 6.
- [120] DING Shui-Ding, LIU Li-Yan, LI Li, *et al.* The effect of different clapboards structure in turbine blade trailing edge complex passages on heat transfer characteristics [J]. *Journal of Aerospace Power* (丁水汀, 刘丽艳, 李莉, 等. 涡轮叶片尾缘复合通道中隔板结构对换热特性的影响. *航空动力学报*), 2006, **21** (3): 523 - 527.
- [121] ZHOU Hui-Ye. Acoustic pyrometer in complicated temperature field [D]. *Southeast University* (周慧焯. 复杂温度场中声学测温系统的研究. *东南大学*), 2015.
- [122] LI Mai-Liang. Study on laser spectroscopy technology and its application to combustion diagnosis in the jet engine [D]. *National University of Defense Technology* (李麦亮. 激光光谱诊断技术及其在发动机燃烧研究中的应用. *国防科学技术大学*), 2004.
- [123] YANG Zhen. Research on quantitative concentration measurements of hydroxyl radical in laminar flames using bi-directional laser induced fluorescence [D]. *Harbin Institute of Technology* (杨振. 双向激光诱导荧光用于层流火焰中 OH 基浓度的测量研究. *哈尔滨工业大学*), 2017.