高温风洞机器视觉系统: 原理、设计与装备

张金松¹, 屈哲¹, 岳孟坤¹, 唐云龙¹, 王显^{1,2}, 陈连忠³, 杜百合⁴, 冯雪^{1*}

1. 清华大学航天航空学院应用力学教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 浙江清华柔性电子技术研究院, 嘉兴 314006;

3. 中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074;

4. 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000

* E-mail: fengxue@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2020-04-25; 接受日期: 2020-05-25; 网络版发表日期: 2020-06-02

国家自然科学基金(批准号: 11625207, 11320101001, 11972326)资助项目

摘要 在航空航天等领域, 高温风洞模拟试验是对飞行器关键材料/结构进行防热性能评估和优化设计的重要方式. 结合试验环境特点, 发展面向高温风洞的机器视觉系统, 以实现全方位、多角度的试验过程信息的获取, 对于高温地面模拟试验技术的发展具有重要意义. 本文综述了面向高温风洞的机器视觉系统的概念原理、关键技术与装备设计, 同时结合课题组在该领域的相关研究成果, 对高温风洞机器视觉系统的应用实例进行了介绍. 最后, 基于高温风洞模拟试验的发展需求, 对高温风洞机器视觉系统的未来发展方向和应用前景进行了展望.

关键词 机器视觉系统, 高温风洞, 高温地面模拟试验, 热防护系统, 光学测量, 氧化烧蚀

1 引言

在航空航天等领域, 关键结构部件在服役条件下需面临高温复杂环境. 以高速飞行器为例, 随着巡航速度和突防能力的进一步提升, 飞行器在高速巡航和再入时, 发动机涡轮叶片、鼻锥和前缘等关键结构部件所处的极端环境伴随着热化学烧蚀、气动热效应、边界层转捩和气动外形演化等诸多物理化学过程^[1~5]. 为了保证关键结构部件的完整性及其功能的稳定性, 保障内部仪器设备的正常工作, 一方面, 需要对结构部件自身使用材料进行选择优化, 以满足服役条件要求; 另一方面, 需要施加合适的热防护系统. 热防护系统是由一些特殊材料(如高温陶瓷、高温合金及高温聚合

物等)以一定结构形式构成的. 在服役前, 对这些材料的热、力综合性能进行地面试验与验证, 对于高速飞行器稳定、安全服役具有重要意义.

目前, 地面模拟试验主要有部分因素模拟和全因素模拟两种方式. 其中, 部分因素模拟主要采用红外加热笼^[6~8]、加热板^[9]、燃气火焰喷枪^[10,11]、辐射加热装置^[12]、激波管^[13]等试验设备实现对服役环境中部分特征的模拟, 其局限性在于不能完全反映材料/结构的真实演化或反应过程; 全因素模拟能最大限度接近材料或结构的真实工作环境, 以高温风洞模拟试验^[14]为代表. 尽管高温风洞模拟试验成本很高, 但对于一些关键材料或结构, 其所扮演的角色仍不可替代. 国际上, 利用高温风洞模拟试验的研究开始于20世纪

引用格式: 张金松, 屈哲, 岳孟坤, 等. 高温风洞机器视觉系统: 原理、设计与装备. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 742–762
Zhang J S, Qu Z, Yue M K, et al. Machine vision system for high-temperature wind tunnel: Principle, design and application (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 742–762, doi: 10.1360/SST-2020-0170

60年代^[15-20], 以美国和俄罗斯为主. 美国国家航空航天局(NASA)针对超高温陶瓷^[21]、再入飞行器^[22]及其热防护系统^[23]开展了大量的高温地面模拟试验^[21-26], 极大推动了相关技术的积累和发展, 其中一些实验数据和结果作为重要参考, 一直被沿用至今. 国内高温风洞模拟试验技术起步较晚, 但近些年发展迅速, 逐渐发展形成了适用多种尺度、多种材料结构和多种测试工况的完备风洞试验体系, 为我国的航空航天事业的迅猛发展提供了重要支撑^[27-30]. 图1展示了典型的高温电弧风洞设备的示意图.

高温风洞模拟试验作为全因素模拟的重要方式之一, 可以最大程度上模拟真实环境作用, 但复杂的环境因素对试验过程信息的获取造成了极大挑战. 同时, 高温风洞模拟试验成本很高, 在测试中也需要尽可能多地获取有效数据. 传统的测试方法通过对比、分析考核前后试样的表面形貌, 以及获取线烧蚀量和质量损失等信息^[31], 进而分析材料的氧化烧蚀机理, 评估其高温热、力性能^[32-34]. 但这种离线、不连续的测试表征手段获取的数据量十分有限, 且不能实现对材料、结构在考核环境中的演化、失效过程的实时跟踪观测, 更无法获取应力、应变场和温度场等关键信息. 因此, 发展能够实现在线、可视化的测量技术, 对材料、结构在高温风洞模拟试验中的热、力行为和复杂演化过程进行有效观测十分必要.

为了达到对试验对象“看得清”、“拟得真”、“测得准”的目标, 近些年来面向高温风洞模拟试验的在线、可视化测量技术不断发展^[35-38], 并在高温模拟试验中取得了诸多成功的应用, 而基于在线、可视化测量技术发展起来的“机器视觉系统”正展现出强大的优势^[39-44]. 通过图像采集和图像处理技术的升级及其智

能化集成, 面向高温风洞的机器视觉系统可以达到媲美甚至超过生物视觉系统的功能, 在复杂环境下实现图像的智能采集、处理和反馈. 通过图像采集装置在线获取高质量图像, 通过高鲁棒性算法对图像进行处理, 进而实现对被测物体的演化过程分析、力学性能评估和缺陷失效行为表征等.

由于高温风洞模拟试验环境的复杂性, 高温风洞机器视觉系统的发展存在很多亟待解决的挑战, 主要包括高温强光辐射^[35]、散斑退化^[45]和气动光学效应^[46]等, 图2展示了高温风洞模拟试验在航空航天等领域内的关键作用, 以及目前高温风洞机器视觉技术面临的一系列测试挑战. 地面模拟试验带来的测试挑战极大推动了高温风洞机器视觉技术的发展, 而基于该项技术获取的数据和分析结果又可以为材料和结构的设计研发提供重要指导, 二者紧密联系. 现阶段, 为解决高温风洞模拟试验的测试挑战, 通过将理论建模分析、处理算法优化与系统硬件定制等手段相结合, 可以降低或者消除高温风洞模拟试验中不利因素的影响, 进而使高温风洞机器视觉系统获得更详细、更准确的信息.

2 高温风洞机器视觉系统的原理

2.1 机器视觉的概念和组成

“机器视觉”, 即通过机器代替人眼完成目标的观测, 并加以处理和分析实现相应的功能. 从应用层面讲, 通常采用光学成像技术(如光学摄像机)对目标图像进行采集, 并通过计算终端实现对图像的处理分析, 进而执行决策驱动机器设备(如智能机器人)执行工业生产中的测量、检测、识别、引导等重要过程^[40]. 图3

图1 (网络版彩图)典型的高温电弧风洞设备示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the typical high-temperature arc wind tunnel.

图 2 (网络版彩图)高温风洞模拟试验关键作用、测试挑战及高温风洞机器视觉系统的应用
Figure 2 (Color online) Crucial role and challenges of simulation tests in the high-temperature wind tunnel, and applications of the machine vision system for high-temperature wind tunnel.

展示了典型的机器视觉系统的基本组成部分。

在工业4.0时代，机器视觉在工业生产、自动驾驶、虚拟现实、智能识别、电子加工、医疗健康等领域展现出十分广阔的应用前景。硬件系统的更新换代特别是图像采集装置、图像处理装置等的迅猛发展，使得机器视觉可以快速、精确获取外界信息并及时处理反馈；软件系统的优化尤其是处理算法的不断进步使得机器向“智能化”和“多功能化”发展。硬件系统和软件系统的不断进步推动了机器视觉在多个领域的应用，而面向不同领域的需求也促进了各项技术的革新和发展(图4)。

2.2 高温风洞机器视觉的概念与组成

高温风洞模拟试验中获取有效信息的需求推动了机器视觉在该领域的应用和发展，而机器视觉也凭借其全场、在线、可视化、非接触的优势以及高速、高精度的测量表现，近些年来在高温风洞测试中受到了越来越多的关注。如图5所示，多波段(包括X射线、紫外、可见光、红外等)的光学测试设备和试验方法的不断发展，使得机器视觉的测试系统不仅可以实现从二维到三维的形貌测试，还可以实现从表面到内部信息的获取，如采用CT扫描成像技术，可以实现对内部

图 3 (网络版彩图)机器视觉系统的基本组成部分
Figure 3 (Color online) Basic components of the machine vision system.

结构的三维重构。而不同类型的机器视觉设备的组合，还可以获取目标对象的表面缺陷、粗糙度、内部结构等多维信息，根据所采集的数字图像进行处理分析，可实时获得变形、受力、温度等状态，为材料性能评估和结构优化设计提供支撑，极大克服了传统数据获取方式的不足。

然而，在高温风洞极端试验环境下，上述机器视觉

图 4 (网络版彩图)机器视觉技术在多个领域的应用

Figure 4 (Color online) Applications of the machine vision technology in multiple fields.

图 5 (网络版彩图)高温风洞机器视觉系统的组成与应用

Figure 5 (Color online) Components and applications of the machine vision system for the high-temperature wind tunnel.

系统需要克服复杂因素的挑战. 围绕相关测试难题, 研究者也进行了大量的探索. 一方面, 通过发展适用高温复杂环境的图像采集装置, 获取高温物体的清晰图像, 为后续处理、分析提供高质量的图像支撑; 另一方面, 发展基于数字图像处理技术的相应算法, 对采集到的图像进行计算和处理, 提取关键信息, 以达到测试目标. 总体而言, 当前研究主要从发展高温测试方法入手, 结合工程实际, 对系统整体或局部进行设计、优化, 进而提高高温风洞机器视觉系统的测试能力和工程适应范围. 下文将从多个角度阐述高温风洞机器视觉系统的关键技术问题以及在工程测试中的重要应用.

3 高温风洞机器视觉系统的关键技术

3.1 动态高温成像技术

高温风洞机器视觉系统在应用中首先需要解决的是“看得清”的问题. 在高温风洞模拟试验中, 试验温度往往达 2000°C 以上, 由此产生的强光辐射给基于机器视觉系统的光学测量带来了极大的干扰, 因此首先要解决强光辐射对图像获取带来的挑战.

根据黑体辐射定律, 随着温度增加, 物体表面辐射功率随之增加, 且最大光谱辐射功率对应波长向短波方向移动^[47](图6). 在高温风洞模拟试验环境下对试件进行测量时, 可将强光辐射问题归为两大类: 一类是试

图6 (网络版彩图)不同温度下黑体辐射功率与波长关系 ($\lambda_{\max}$ 表示不同温度下最大辐射功率对应的波长)

Figure 6 (Color online) Black body thermal emission intensity as a function of wavelength for various absolute temperatures ($\lambda_{\max}$ represents the wavelength corresponding to the maximum radiant power at different temperatures).

件表面温度变化范围很大(室温~2000°C以上), 如此大的温度变化范围意味着辐射光强度变化剧烈, 即要求在用相机进行拍摄的过程中, 需要动态调节光圈和曝光时间以获取亮度值稳定的图像; 另一类是试件表面所能达到最高温度很高(最高可达3000°C), 如此高温条件下通过调整相机光圈和曝光时间已不能完全抑制强光辐射, 图像将会出现局部甚至全部过曝光的现象. 过曝光问题的出现则要求测试过程中必须通过其他手段以获取亮度值稳定的图像.

为解决上述高温图像采集的难题, Grant等^[35]首次将黑体辐射理论引入到高温测量中, 通过采用带通滤波技术结合发光二极管(LED)补偿光源照明的方法, 实现对相机获取的过高辐射亮度的抑制. 带通滤波片透过率曲线及LED光源发光强度曲线如图7所示. 通过给出滤波片后的辐射亮度计算公式, 准确获取了

1100°C环境下镍基高温合金试件的变形场.

Novak和Zok^[48]采用类似的做法, 将LED补偿光源照明强度量化, 引入辐射光亮度与照明亮度比值, 预估出该方法在LED照明波长范围为440~460 nm, 功率为12.5 W时, 可以保证最高达1700°C环境下稳定的图像亮度. 他们基于该方法测得了1500°C环境下镍基高温合金和C/SiC复合材料的高温变形场.

Fang等^[10]和Qu等^[37]将类似的方法分别应用于超高温陶瓷材料表面的氧化烧蚀形貌观测以及紫铜试件在高温环境中的变形测量, 获得了理想的效果. 其中, Fang等^[10]通过采用滤波片和单色光补偿有效降低了样品表面在高温条件下的过曝光问题, 获得了清晰稳定的高温图像. 图8展示了窄带滤波片和单色光补偿的技术结合对高温测试图像质量的提升, 其中, 图8(a)为未加热时试件表面的初始图像, 图8(b)为强光辐射下所拍摄试件表面的图像, 此时图像表面信息已被完全湮没, 图8(c)为采集系统添加窄带滤波片后衰减光亮得到的较暗图像, 在利用对应波长的单色光照明补偿后, 得到了如图8(d)所示的清晰图像.

此外, Guo等^[49]还通过带通滤波片、线性偏振片和衰减片的有效组合, 清晰获取了2600°C条件下碳纤维试件用于变形计算的表面图像; Berke和Lambros^[50]将补偿照明光源及带通滤波片所对应的波长范围推广到紫外波段(光源峰值波长为365 nm), 并在实验中对白光照明不添加滤波片、蓝光照明添加对应波长范围滤波片以及紫外光照明添加对应波长范围滤波片三种不同照明及滤波形式, 通过统计所拍摄图像的亮度值, 得出在紫外波段的照明和滤波措施效果最好, 能获取稳定亮度值图像的最高温度能达到1200°C左右.

图7 (a) 滤波片透过率曲线; (b) LED光源发光强度曲线^[35]

Figure 7 (a) Transmittance curve of filter; (b) intensity curve of the LED light [35].

图 8 高温环境下的带通滤波和单色光补偿方法。(a) 未加热时试件表面的初始图像; (b) 高温条件下强光辐射下所拍摄的试件表面图像; (c) 添加窄带滤波片衰减光亮度后得到的较暗图像; (d) 利用对应波长的单色光照明补偿后得到的高温条件下的清晰图像^[10]

Figure 8 High-temperature measurement method using the band-pass filtering technique with monochromatic light compensation. (a) Initial surface image of the specimen before thermal heating; (b) surface image under strong light radiation in high-temperature environment; (c) surface image with lower brightness using the narrow-band filter; (d) clear surface image after illumination compensation with the corresponding wavelength [10].

近期, Pan等^[51,52]将紫外波段的数字滤波与补偿技术应用到高温实验中, 发展了一套紫外双目视觉系统, 通过紫外灯补偿和双目紫外相机的有效组合, 实现了对高温电弧风洞试验中试件三维烧蚀量及石英灯加热条件下热防护拼接结构缝隙宽度的测量, 图9(a)和(b)分别展示了紫外双目视觉技术在高温电弧风洞和高温石英灯模拟试验中的应用场景示意图。将测试波段降低到紫外光波段, 更好地滤去了强光辐射的不利影响, 从而提升了图像采集的质量。

除高温强光辐射外, 针对高温风洞模拟试验中由于试件表面光强不均匀分布和高速气流扰动带来的动态成像难题, 清华大学的屈哲^[53]还发展了一种基于图像灰度值分区和曝光序列的自适应曝光技术, 该技术可以用于获取大亮度梯度的高温环境下目标物体的均匀亮度图像, 该方法的流程图如图10所示。

综合上述高温光学成像技术, 冯雪课题组发展了一种基于自适应光学窗口选择的高质量图像获取方

法, 基于前述的高温数字滤波技术建立光学窗口, 通过相应的机器视觉算法的调控实现采集参数的自适应调整, 并采用窄带光源, 对考核件进行辐射抑制和反射补偿, 实现了对高温风洞复杂环境下(1200°C~2500°C)被考核件的高品质图像获取。图11为采用上述技术前后考核件图像的获取示意图, 该种动态成像方法可以清晰获取高温风洞模拟试验环境中材料的边缘轮廓、表面形貌等信息, 极大地拓展了测试范围, 为高温风洞机器视觉系统的图像分析提供了有效数据支撑。

3.2 图像特征识别检测技术

高温风洞机器视觉系统在实际应用中还要实现的是“拟得真”。在高温风洞模拟试验中, 被测试件的典型特征, 如表面形貌、整体结构和边缘细节是进行研究和分析的重点。对这些信息进行有效提取和分析, 具有极其重要的价值。可靠的图像特征识别和检测技术是实现对关键信息提取和直观刻画的关键。

在高温测试中, 材料的烧蚀量变化和拼接结构的缝隙变化是研究人员关注的重点。因此针对材料在高温考核中边缘的变化发展相应的边缘特征检测算法, 能够简化测试设备并提高测量精度。边缘检测技术是图像处理 and 计算机视觉领域的传统而重要的研究课题^[54-58], 在实验力学和工程测量中已有较为广泛的应用, 如裂纹宽度测量^[43,59]、缺陷检测^[60-62], 但在高温测试领域中的应用尚未成熟。

Qu等^[63]将边缘检测技术运用到高温测试中, 并将图像处理精度提升到亚像素级别, 利用Zernike矩原理, 将亚像素边缘检测引入到直线变换中, 大大提升了检测的精度。在典型隔热材料高温性能的测试实验中, 将相机的通道分离策略与基于图像灰度梯度的自适应边缘检测阈值方法相结合, 提高了算法的适用性。同时, 针对升温过程中金属铜材料等的表面氧化现象, 提出了种子点策略以精确识别边缘, 进而实现对金属铜的线膨胀系数的测量, 大大提高了在高温环境中的测量精度。图12(a)为基于种子点策略的亚像素边缘检测算法流程图, 利用该方法, 准确提取了金属紫铜试件在高温氧化环境下的边缘变化(图12(b))。

另一方面, 基于数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术的变形计算方法也对高温环境下图像的特征识别提出了新的需求^[64-67]。数字图像相关方法基于所采集图像上随机分布纹理或散斑对变形前后图

图 9 (网络版彩图)紫外双目视觉技术在高温模拟试验中的应用. (a) 高温电弧风洞烧蚀试验^[51]; (b) 石英灯加热试验^[52]
Figure 9 (Color online) Application of the ultraviolet binocular vision technology in high-temperature tests. (a) Ablation tests in the high-temperature wind tunnel ^[51]; (b) thermal heating tests with infrared quartz lamps ^[52].

图 10 基于图像灰度值分区和曝光序列的自适应曝光技术流程图^[53]
Figure 10 Flow chart of the adaptive exposure technology based on image gray value partition and exposure sequence ^[53].

像进行匹配, 从而获取全场变形信息. 然而, 在高温环境下, 材料表面纹理或散斑极易发生减弱或消退的现象, 大大影响了数字图像相关方法的计算精度. 目前, 解决该问题的方法大都集中在对高温散斑性能的改进上^[35,36,48,68,69], 以提升散斑的极限使用温度. 但对于高温风洞模拟试验, 某些材料或结构由于受其测试需求及测量指标所限, 无法对试件表面进行加工处理以得到散斑, 而仅能将试件表面本身纹理用作散斑, 因此

从变形测量算法角度出发, 发展对散斑退化鲁棒性较强的图像处理算法进而提高变形测量精度十分关键.

图像区域特征是计算机视觉领域的重要概念^[70], 其中应用最为广泛的是尺度不变变换特征(scale invariant feature transform, SIFT)^[71]和最大极值稳定区域特征(maximally stable extremal regions, MSER)^[72]. 这些特征在图像发生变换时仍能保持较好的稳定性和可识别性, 对于变形前后尤其是散斑发生退化前后的图像

图 11 (网络版彩图) 基于自适应光学窗口选择的高质量图像获取方法示意图. (a) 传统测试方法的实验装置; (b) 传统测试方法获得的图像; (c) 动态光学成像方法的实验装置; (d) 动态光学成像方法获得的图像

Figure 11 (Color online) Schematic diagram of the high-quality image acquisition method based on adaptive selection of optical window. (a) Experimental device of the traditional test method; (b) image obtained by the traditional test method; (c) experimental device of the dynamic optical imaging method; (d) images obtained by the dynamic optical imaging methods.

间的匹配精度较高, 其中尺度不变变换特征对于图像尺度变化及旋转具有较好的稳定性, 已被成功应用于应变集中区域变形的测量^[73]. 将上述图像区域特征方法应用到高温图像的识别和处理中, 具有广阔的应用前景.

Fang等^[10]提出了一种基于图像特征点的处理算法, 利用MSER作为图像的不变特征将变形前后识别出的特征区域进行匹配, 降低了散斑退化的影响, 得到了超高温陶瓷材料在2100°C下表面较为精确的变形场信息(图13(a)). Qu等^[37]利用SIFT, 结合双调和样条插值方法(biharmonic spline interpolation, BSI), 提出了一种SIFT-BSI的图像处理方法来获取物体的变形, 数值模拟结果表明该方法的测量精度可达50 μm , 通过对镍基高温合金的高温拉伸测试并与传统DIC方法的结果进行对比(图13(b)), 发现所发展的方法得到了更为稳定和均匀的拉伸应变场, 大大提高了测试精度.

3.3 温度变形同步测量技术

除上述技术外, 在高温风洞模拟试验中, 最为重要的是要保证“算得准”. 高温地面模拟试验不仅关注材料烧蚀演化和表面形貌变化过程, 还需要了解材料和结构的受力、变形和温度信息等.

在现有的高温机器视觉技术的基础上, 变形场的获取主要是基于数字图像相关方法(DIC), 这项技术已经在宏微观各个层次的位移场和应变场的测量中有较为成熟的应用^[74,75]. 但在高温测试中, DIC技术面临着强光辐射等技术挑战, 基于本文3.1节所述的动态高温

图 12 (网络版彩图) (a) 基于种子策略的亚像素边缘检测算法流程图. (b) 粗糙试件表面种子点策略: (b1) 氧化后紫铜试件表面图像; (b2) 亚像素边缘检测结果; (b3) 直线检测结果; (b4) 种子点筛选后边缘检测结果^[63]

Figure 12 (Color online) (a) Flow chart of the sub-pixel edge detection algorithm based on seed strategy. (b) Seed point strategy for rough specimen surface: (b1) surface image of copper specimen after oxidation; (b2) result of sub-pixel edge detection; (b3) result of straight line detection; (b4) result of edge detection after seed point screening ^[63].

图 13 (网络版彩图) (a) 利用MESR方法计算得到的变形场^[10]: (a1) ε_{xx} ; (a2) ε_{yy} ; (a3) ε_{xy} . (b1), (b2) 传统DIC计算得到的位移场和应变场; (b3), (b4) SIFT-BSI方法计算得到的位移场和应变场^[37]

Figure 13 (Color online) (a) Deformation fields calculated by the MESR method [10]: (a1) ε_{xx} ; (a2) ε_{yy} ; (a3) ε_{xy} . (b1), (b2) The displacement field and strain field calculated by the DIC method, respectively; (b3), (b4) the displacement field and strain field calculated by the SIFT-BSI method, respectively [37].

成像技术较好地解决了图像采集的一系列问题, 提高了在高温环境下位移场和应变场的测量精度, 并已有诸多成功应用。

除变形外, 温度信息也是高温风洞模拟试验中极为重要的一项数据。一方面, 大量的材料属性如弹性模量、强度和热膨胀系数等均与温度相关, 常温下的数值往往不能直接使用^[76,77]; 另一方面, 包括DIC方法在内的大部分方法所测得的应变实际是热应变和由应力引起的应变的耦合。而对于力学研究, 与应力相关的应变是具有重要意义的, 因此希望能够解耦热应变和应力应变, 这就需要同步获取温度场和变形场。再者, 当获取到温度场时, 如果测试试件还存在位移, 则温度场已经不是原位的, 还需要借助于位移场得到温度场的真实物理坐标位置。因此必须要解决变形场和温度场原位测试的问题, 实现温度和变形的同步测量^[78,79]。

在高温下辐射光在可见光区已经有足够的强度, 因此可以直接利用两个可见光通道通过比色法^[80~82]进行高分辨率的温度场测量。由于温度测量是基于辐

射光强度进行计算的, 但采用DIC等方法进行变形测量又需要抑制辐射光, 因此如何分配光谱和图像通道, 以达到同时进行变形测量和温度测量的目的, 是在高温复杂环境下进行变形场和温度场同步测量需要考虑的关键问题。同时, 传统的比色法测量要求相机的光圈、曝光时间、增益等参数固定不变, 但对于高温风洞测试等环境, 图像采集过程中存在明显的亮度变化, 此时必须通过动态调整光圈、曝光时间等手段以保证整个测试过程能够获取有效的光学信息, 传统的比色法难以胜任这种高温复杂环境下的测试。

Su等^[79]在传统的比色测温法的基础上发展了一种“增强比色测温法”, 通过引入一个参考点温度大大简化测温过程, 并提出一种同步测量变形场和温度场的方法。通过光源、光路和滤波片的设置同时捕获并区分辐射光和反射光, 使用增加亮度校正的DIC算法进行变形计算, 使用增强的比色法进行温度场计算, 以适应高温复杂环境。

图14所示为该种温度变形同步测量方法的原理

图 14 (网络版彩图)温度变形同步测量原理

Figure 14 (Color online) Principle of synchronous measurement of temperature and deformation.

图. 根据黑体辐射理论, 在常规的高温环境下辐射能量在可见光区域内红光(R)波段最强, 绿光(G)次之, 蓝光(B)最弱, 因此选择蓝光通道作为反射光通道测量位移, 红光和绿光通道组合用于测量温度. 在假设材料发射率近似和波长无关的情况下, 可以消除发射率随温度变化的影响.

上述方法自提出以来在高温测试中特别是高温风洞模拟试验中得到了许多较为成功的应用, 但Tang等^[83]发现对于该方法, 基于简单的相机通道分配, 无法实现辐射光与反射光的完全解耦, 在较低温度或材料较高反射率的条件下, 会给温度和变形的测量带来很大的误差. 因此, 基于Su等^[79]的方法, Tang等^[83]基于相机各通道光强的平衡关系, 发展了一种迭代算法, 实现了辐射光、反射光的分离, 提高了温度变形同步测量的计算精度. 拓宽了“增强比色测温法”的适用范围, 图15所示为该种改进的温度变形同步测量方法的迭代算法的流程图. 利用该方法他们测得了C/SiC材料在1000°C左右的温度场和变形场信息, 达到了较好的计算精度.

除此之外, 在高温风洞模拟试验中, 试件由高温高速气流加热, 则在近气流出口处试件表面温度较高, 并随着距离变大温度急剧衰减, 因此导致试件表面较小区域内存在较大温差, 进而产生较大的亮度梯度. 在该种情况下, 难以获取高质量的图像来实现对温度场和变形场的同步测量. 为解决该类问题, Tang等^[84]提出了一种简单有效的连续曝光图像序列提取算法, 结合指数衰减的曝光时间设置, 成功减小了大亮度梯度带来的干扰. 电弧风洞和氧丙烷火焰加热试验表明, 与单次曝光时间的图像相比, 该方法在1100°C以下可以有效地获得全场光强适中的图像, 并可实现对温度场和变形场的同步测量计算. 图16展示了其运用的连

图 15 实现辐射光、反射光分离的温度变形同步测量迭代算法^[83]

Figure 15 Iterative algorithm for synchronous measurement of temperature and deformation by the separation of radiated and reflected light [83].

续曝光算法原理示意图.

4 高温风洞机器视觉系统的装备及应用

4.1 高温风洞机器视觉系统的设计与装备

发展高温环境下的机器视觉技术, 提升测试精度的根本目的是为高温地面模拟试验服务, 尽可能多地获取有效、可靠的试验数据, 充分挖掘高温风洞试验的价值. 基于高温风洞模拟试验的测试需求, 冯雪课题组在高温风洞机器视觉领域经过长期的探索和积累, 攻克多项技术难关, 设计制造了可应用于高温风洞等多种高温测试环境的机器视觉系统.

为满足高温风洞地面模拟试验的复杂环境挑战(如强光辐射、强电磁干扰、强噪声干扰等), 高温风洞机器视觉系统需要在硬件设计上保持面向极端复杂环境的高度适应性和精确度. 基于前述的高温风洞测试需求和机器视觉技术, 现有的高温风洞机器视觉系

图 16 (网络版彩图)曝光算法原理示意图. (a) 自动单次全局曝光; (b) 自动多次、连续局部曝光^[84]

Figure 16 (Color online) Schematic showing the principles of the exposure algorithm. (a) Automatic single global exposure; (b) automatic multiple, serial local exposure [84].

统主要由四大部分硬件组成. 其中, 数据采集采用高精度 CCD 相机、单点测温仪和窄带滤波系统; 数据传输通过具有电磁屏蔽的快速传输线缆和集成于计算机的高速采集卡实现; 数据分析基于远端的一体化工作站, 具备高性能的计算能力; 可调支撑通过多个快速组装拆卸支架的组合, 实现对相机、测温仪、光源等设备的多种姿态调节, 可适应多种测试工况. 图 17 展示了该高温风洞机器视觉系统的基本组成硬件.

除硬件设备外, 高温风洞机器视觉系统的另一个核心是控制模块和相关处理算法的实现. 如图 18 所示, 冯雪课题组开发了功能丰富的控制软件, 可以协调系统各部分协同工作, 如实现对光源、CCD 相机、单点测温仪的实时动态调控. 同时, 他们发展了一系列处理算法, 可实现对温度场、变形场等的快速计算, 并具有对物体三维形貌进行快速重建等功能.

面向高温风洞的机器视觉系统需要具备如下技术特点:

- (1) 可实现在常温到高温、超高温范围内对实际结构件和材料的实时在线测试;
- (2) 软硬件结合干扰控制技术, 可在高温辐射干扰、气流扰动等环境下测试;
- (3) 优秀的用户交互设计, 可自主定制测试流程和输出, 集中管理测试任务;
- (4) 支持大规模并行计算, 充分发挥多核运算能力, 高效处理测试数据;
- (5) 支持高速长时间采集;
- (6) 高精度的姿态控制;
- (7) 完善的测试分析功能, 如变形测量、温度测量、缝隙监测、烧蚀量测量、表面形貌三维重构等.

目前, 冯雪课题组研制的高温风洞机器视觉系统

图 17 (网络版彩图)高温风洞机器视觉系统的硬件组成

Figure 17 (Color online) Hardware of the machine vision system for high-temperature wind tunnel.

已成功应用于国内多个工程单位的高温风洞模拟试验中. 图 19 所示为国内某高温电弧风洞上集成的高温风洞机器视觉系统的装置示意图和实物图.

4.2 高温风洞机器视觉系统的测试实例

现阶段, 利用高温风洞机器视觉系统可以实现对风洞测试的在线可视化观测, 并为烧蚀量分析、温度场和变形场分析、烧蚀机理研究等提供强有力的支撑. 为了展示高温风洞机器视觉系统在工程中的应用, 下面列举部分高温风洞测试实例.

4.2.1 C/SiC 高温氧化烧蚀试验

C/SiC 复合材料作为一种陶瓷基材料, 以其优异的

图 18 (网络版彩图)高温风洞机器视觉系统的软件处理操作界面^[85]

Figure 18 (Color online) Operation page showing the of the machine vision system for high-temperature wind tunnel ^[85].

图 19 (网络版彩图)高温风洞机器视觉系统. (a) 装置示意图; (b) 装置实物图

Figure 19 (Color online) Machine vision system for high-temperature wind tunnel. (a) Schematic diagram; (b) physical map.

抗烧蚀性能, 在航空航天热防护领域得到了广泛应用^[86]. 在高温环境下, 由于热烧蚀的作用, 该类材料表面会形成 SiO_2 液滴. 了解液体 SiO_2 的形成机理和流动特性, 对于优化结构设计和开发具有更好的抗烧蚀性能的热防护材料具有重要意义. Tang等^[87]利用国内某航天单位的高温电弧风洞(图20(a))开展了C/SiC复合材料的高温风洞烧蚀试验, 并通过高温风洞机器视觉系统实现了对其表面演化过程的在线观测^[87].

通过对C/SiC材料表面烧蚀引起的 SiO_2 液滴/液膜的凝聚、流动、融合等状态的观察分析, 可以发现高温风洞模拟试验中的材料烧蚀液滴存在三种典型的形态. 随着温度的升高, 液滴形态经历由溪流滴转化到瀑布滴, 再到稳定的薄膜滴的复杂过程(图21). Tang等^[87]通过进一步的有限元数值仿真模拟了上述过程, 从而

揭示了 SiO_2 液滴形态的高温演化机理, 指出了表面工艺对C/SiC材料抗氧化烧蚀性能的关键影响, 为材料的制备和结构设计提供了重要参考.

4.2.2 高硅氧酚醛树脂基复合材料烧蚀试验

高硅氧酚醛树脂基复合材料^[88]也是一种典型的烧蚀热防护材料, 为了评估材料的抗氧化烧蚀性能, Qu等^[89]对试件尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 29\text{ mm}$ 的平板试件开展了高温风洞模拟试验, 采用高温风洞机器视觉系统进行在线观测, 试验设备现场安装图及试件初始形貌如图22所示.

安装试件时, 试件表面与出口气流有微小夹角以保证试件表面被充分加热. 类似的, 采用前文所述技术手段和测量方案, 清晰获取了烧蚀过程中试件表面

图 20 (网络版彩图)高温风洞机器视觉试验系统. (a) 高温电弧风洞; (b) 高温风洞机器视觉系统的组成; (c) 设备安装示意图; (d) CCD相机; (e) 带通滤波器; (f) 75 mm定焦镜头^[87]
Figure 20 (Color online) Machine vision system for high-temperature wind tunnel. (a) Arc-heated wind tunnel; (b) components of the system; (c) installation diagram; (d) CCD camera; (e) band pass filter; (f) 75 mm fixed focus lens ^[87].

图 21 (网络版彩图)利用高温风洞机器视觉系统观测的不同表面流动状态. (a)~(e) 液滴在1600°C时的“液滴流”流动状态; (f)~(j) 液滴在1750°C时的“溪流”流动状态; (k)~(o) 液滴在1950°C时的“薄膜流”流动状态(图像中的蓝色是由于使用了蓝光带通滤波片)^[87]
Figure 21 (Color online) Different surface flow patterns observed using the machine vision system for high-temperature wind tunnel. (a)~(e) 0D droplets flow at 1600°C; (f)~(j) 1D rivulets flow at 1750°C; (k)~(o) 2D surface film flow at 1950°C (the blue color in the images is due to the use of blue light band-pass filter) ^[87].

图 22 (网络版彩图) (a) 高温风洞机器视觉系统现场安装实物图; (b) 试件初始形貌^[89]

Figure 22 (Color online) (a) On-site installation of the machine vision system for high-temperature wind tunnel; (b) initial shape of the specimen [89].

的实时烧蚀图像, 选取图像中试件烧蚀较为严重的区域, 通过本文3.2节所述的图像特征识别检测技术, 计算得到了试件表面的三维形貌, 进而得出厚度方向的烧蚀量, 图23展示了随时间变化的平板试样全场平均烧蚀深度.

此外, 试验中还观测到了明显的表面液滴形成和流动过程(图24(a)), 为了表征其流动规律, 选取液滴速度来进行分析. 液滴速度是表征材料烧蚀性能的关键参数, 流动液滴速度的量化有助于验证考虑熔融液层的烧蚀模型, 为了计算液滴在表面上的速度分布, Qu等^[89]发展了一种基于粒子图像速度的图像处理算法(PIV)方法, 并计算得到了不同时刻的速度场分布(图24(b)), 结果表明, 液滴速度总体上与实际气体流动一致, 因此通过设计合理的结构外形, 可以调控液滴的产

图 23 (网络版彩图) 平板试样全场平均烧蚀深度随试验时间的变化^[89]

Figure 23 (Color online) Full-field average ablation depth of the flat specimen over time [89].

生和流动规律. 该结果为烧蚀型热防护材料的烧蚀形貌演化提供了重要参考, 对预测烧蚀型热防护材料服

图 24 (网络版彩图) (a) 平板烧蚀试验观测的不同时刻试件表面液滴状态; (b) 不同时刻速度场分布^[89]

Figure 24 (Color online) (a) Different states of droplets on the surface of the specimen at different times observed during the test; (b) distribution of velocity field at different times [89].

役过程中的气动外形变化奠定了基础, 能够作为烧蚀型热防护系统结构外形设计的数据支撑。

4.2.3 C/SiC复合材料燃气舵烧蚀试验

对于导弹、火箭等具有火箭发动机部件的飞行器, 常采用气动力控制结合推力矢量控制(thrust vector control, TVC)的复合控制方式进行飞行器操控^[90]。其中, 推力矢量控制主要通过将燃气舵置于火箭发动机燃气射流中, 利用燃气舵的偏转角度, 使得发动机燃气射流方向发生偏斜, 进而使发动机主推力方向相对飞行器质心发生偏移, 产生绕质心力矩以改变质心的运动方向。燃气舵服役过程中将面临高温高速燃气射流的正面直接冲刷, 因此要求燃气舵具有较好的耐高温性能。

屈哲^[53]采用如图20所示的高温电弧风洞对C/SiC材料的燃气舵试验件进行模拟试验, 试验件的结构和尺寸如图25所示, 舵面根部开有螺纹孔, 可以利用螺栓将试件紧固于风洞工装位置, 安装时将舵面前缘正对来流。

利用前述的高温风洞机器视觉系统对试验过程进行在线观测和图像实时采集, 在高温高速气流的冲刷下, 随着温度升高, 复合材料舵面的前缘发生了不同程度的烧蚀, 并随着测试时间增长, 烧蚀轮廓进一步向根部演化(图26)。

利用Qu等^[63]提出的亚像素边缘检测算法, 对上述测试件烧蚀过程的轮廓进行边缘检测, 获取了轮廓边缘的演化过程, 并计算得到了不同位置随时间的烧蚀量变化规律(图27), 测试结果为材料的烧蚀性能评估提供了直接的数据资料, 也为材料的制备和燃气舵结

图 25 (网络版彩图)复合材料燃气舵试验件示意图

Figure 25 (Color online) Schematic diagram of the air rudder specimen made of composite material.

构优化提供了很好的参考。

5 总结与展望

综上所述, 面向高温风洞地面模拟试验的测试技术是一个极具挑战的研究方向, 但对于我国航天航空和国防技术的发展起着至关重要的作用, 因此仍是当下和未来研究的重点。高温风洞机器视觉系统的发展是该领域的一项重要突破, 也是未来发展的一个重要方向。现有的技术手段已经在图像的获取、数据的处理上取得了较为成功的应用, 但在一些方面仍有很大的进步空间, 值得深入研究和探索。在此, 面向高温风洞模拟试验的测试需求和测试难题, 展望未来高温风洞机器视觉系统的发展方向, 需要从如下几个方面进行技术攻关。

(1) 完善测量功能, 扩宽应用范围。在现有系统的基础上不断完善硬件组成, 如发展多波段的光源系统

图 26 (网络版彩图)不同时刻舵面前缘的烧蚀轮廓

Figure 26 (Color online) Ablation profile of the front edge of the rudder at different moments.

图 27 (网络版彩图)不同测点分布及其烧蚀量曲线. (a) 高温电弧风洞测试的试样和计算点; (b)~(f) 依次为点1~点5的烧蚀量随时间的变化规律

Figure 27 (Color online) Different measuring points and the corresponding ablation curves. (a) Samples and calculation points for the high-temperature wind tunnel test; (b)~(f) the ablation with time from point 1 to point 5 in turn.

和相机系统(如蓝光、紫外光和X射线等),以满足不同测试环境、不同测试材料的需求.

(2) 发展可靠算法,提升计算精度. 面向高温风洞极端测试挑战,在现有算法基础上发展具有高效率、高精度、高可靠性的图像处理算法,消除或降低因环境干扰造成的图像畸变、退化、模糊的影响,实现对多物理场的精确计算.

(3) 结合前沿科学,实现智能控制. 高温风洞机器视觉系统需要与机器学习、人工智能等前沿科技紧密结合,实现智能化测试和自适应控制,如测量参数的自适应调节、数据的实时动态分析等.

(4) 深入学科交叉,推动空地一体. 借助柔性电子

等新兴技术手段,将高温风洞机器视觉系统轻量化、小型化,进而集成至飞行试验,以满足空天测试和监控的需求,实现空、地信息互通,推动空地一体化建设.

总结而言,高温风洞机器视觉系统仍拥有十分广阔的应用前景和发展空间. 一方面,要在现有技术的基础上不断完善、优化软硬件配置,提升在高温风洞模拟试验中的测试能力;另一方面,通过与人工智能、机器学习等进行融合,打造该项技术发展的新的增长点. 相信通过不断的发展,高温风洞机器视觉系统一定可以为高温风洞的地面模拟试验提供更有力的支持,为我国相关领域的发展做出重要贡献.

参考文献

- 1 Zhuang F, Huang Z, Dong X. Commentary on the theory and experiment of reentry aerodynamics (in Chinese). J Astronaut, 1981, 3: 4–15 [庄逢甘, 黄志澄, 董兴德. 再入气动理论和实验的评述. 宇航学报, 1981, 3: 4–15]
- 2 Yang Y, Yang J, Fang D. Research progress on thermal protection materials and structures of hypersonic vehicles (in Chinese). Appl Math Mech, 2008, 29: 47–56 [杨亚政, 杨嘉陵, 方岱宁. 高超声速飞行器热防护材料与结构的研究进展. 应用数学和力学, 2008, 29: 47–56]
- 3 Yang C, Xu Y, Xie C. Review of studies on aeroelastic of hypersonic vehicles (in Chinese). Acta Aero Astronaut Sin, 2010, 31: 1–11 [杨超, 许赞, 谢长川. 高超声速飞行器气动弹性力学研究综述. 航空学报, 2010, 31: 1–11]
- 4 Wu H, Meng B. A review of hypersonic vehicle control research (in Chinese). Adv Mech, 2009, 39: 756–765 [吴宏鑫, 孟斌. 高超声速飞行器控

- 制研究综述. 力学进展, 2009, 39: 756–765]
- 5 Zhang L, Liu D, Yu C, et al. Hypersonic aircraft (in Chinese). *Aero Weap*, 2010, 2: 13–16 [张丽静, 刘东升, 于存贵, 等. 高超声速飞行器. 航空兵器, 2010, 2: 13–16]
 - 6 Sun X, Zhou Y. Design of movement driving system for infrared heating cage in vacuum thermal tests (in Chinese). *Equip Environ Eng*, 2014, 11: 38–42 [孙兴华, 周艳. 真空热试验红外加热笼运动驱动系统设计. 装备环境工程, 2014, 11: 38–42]
 - 7 Yang X, Sun Y. Research on design method of low heat flow simulation using infrared heating cage (in Chinese). *Spacecr Environ Eng*, 2007, 6: 374–376 [杨晓宁, 孙玉玮. 利用红外加热笼进行低热流模拟的设计方法研究. 航天器环境工程, 2007, 6: 374–376]
 - 8 Yang X. Thermal design of infrared heating cage for thermal vacuum test (in Chinese). *Spacecr Environ Eng*, 2004, 21: 19–24 [杨晓宁. 热真空试验用红外加热笼的热设计. 航天器环境工程, 2004, 21: 19–24]
 - 9 Ji X, Pei Y, Liu G, et al. Numerical simulation of heating plate for spacecraft vacuum thermal test (in Chinese). *Spacecr Environ Eng*, 2010, 27: 607–610 [纪欣言, 裴一飞, 刘国青, 等. 航天器真空热试验用加热板的数值仿真. 航天器环境工程, 2010, 27: 607–610]
 - 10 Fang X, Yu H, Zhang G, et al. *In situ* observation and measurement of composites subjected to extremely high temperature. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 035104
 - 11 Zhao D, Zhang C, Hu H, et al. Ablation behavior and mechanism of 3D C/ZrC composite in oxyacetylene torch environment. *Compos Sci Technol*, 2011, 71: 1392–1396
 - 12 Wang L, Ju Y, Wu Z, et al. Status and significance of radiation heating method in thermal-structural testing (in Chinese). *Struct Environ Eng*, 2010, 37: 58–64 [王乐善, 巨亚堂, 吴振强, 等. 辐射加热方法在结构热试验中的作用与地位. 强度与环境, 2010, 37: 58–64]
 - 13 Yan W, Wang S, Ma W, et al. Experimental study on shock tube of high temperature pyrolysis of phenolic resin (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2009, 41: 463–468 [闫卫锋, 王苏, 马伟, 等. 酚醛树脂高温热解的激波管实验研究. 力学学报, 2009, 41: 463–468]
 - 14 Long Y, Yuan J, Zhao S, et al. Overview of arc-heating equipment testing of scramjet engines (in Chinese). *Aerodyn Miss J*, 2016, 2, 72–79 [隆永胜, 袁竭, 赵顺洪, 等. 电弧加热设备开展超燃冲压发动机试验概述. 飞航导弹, 2016, 2, 72–79]
 - 15 Schaefer W T. Characteristics of major active wind tunnels at the langley research center. Washington DC: NASA, 1965
 - 16 Miller I M, Sutton K. An experimental study of the oxidation of graphite in high-temperature supersonic and hypersonic environments. Washington DC: NASA, 1966
 - 17 Gowen F E, Hopkins V D. A wind tunnel using arc-heated air for mach numbers from 10 to 20. In: *Advances in Hypervelocity Techniques*. New York: Plenum Press, 1962. 27–46
 - 18 Winovich W, Carlson W C A. The 60-MW shuttle interaction heating facility. In: *25th International Instrumentation Symposium*. Anaheim, 1979. A80-12601
 - 19 Brown R D. A 6-inch subsonic high-temperature arc tunnel for structures and material tests. Washington DC: NASA, 1963
 - 20 Boatright W B, Sebacher D I, Stewart R. Testing experience and calibration experiments in a mach number 12, 1-foot hypersonic arc tunnel. Washington DC: NASA, 1964
 - 21 Johnson S, Gasch M, Lawson J, et al. Recent developments in ultra high temperature ceramics at NASA ames. In: *16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*. Bremen, 2009. 7219
 - 22 Lu F, Marren D. Advanced hypersonic test facilities. In: Zarchan P, Ed. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Vol. 198. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2002
 - 23 Ito T, Kurotaki T, Matsuzaki T, et al. Evaluation of surface catalytic effect on TPS in arc-heated wind tunnel. In: *8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*. St. Louis, 2013. 3335
 - 24 Bruce I, W, Horn D, Felderman E, et al. Arc heater development at AEDC. In: *25th Plasmadynamics and Lasers Conference*. Colorado Springs, 1994. 2591
 - 25 Loomis M, Hui F, Polsky S, et al. Arc-jet semi-elliptic nozzle simulations and validation in support of X-33 tps testing. In: *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno. NV, 1998. 864
 - 26 Loomis M, Prabhu D, Gorbunov S, et al. Results & analysis of large scale article testing in the ames 60 MW interaction heating arc jet facility. In: *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Orlando, 2010. 445
 - 27 Chen L, Cheng M, Hong W. Ablative thermal structure test of large-scale anti-insulation components of Φ 1m arc wind tunnel (in Chinese). *Aerosp Mater Technol*, 2009, 39: 71–73 [陈连忠, 程梅莎, 洪文虎. Φ 1m电弧风洞大尺度防隔热组件烧蚀热结构试验. 宇航材料工艺, 2009, 39: 71–73]

- 28 Ou D, Chen L, Dong Y, et al. Ablation test technique of large scale structure component in arc-heated wind tunnel (in Chinese). *Acta Aerodyn Sin*, 2015, 33: 661–666 [欧东斌, 陈连忠, 董永晖, 等. 大尺寸结构部件电弧风洞烧蚀试验技术. *空气动力学学报*, 2015, 33: 661–666]
- 29 Liu C. A study of blunted-wedge holder and its application in CARDC's arc-heated wind tunnel (in Chinese). Dissertation of Masteral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. 1–10 [刘初平. 电弧风洞钝楔试验技术及其应用研究. 硕士学位论文. 长沙: 国防科技大学, 2004. 1–10]
- 30 Ou D, Chen L, Dong Y, et al. Measurements of gas temperature and atomic oxygen density in the arc-heated wind tunnel based on TDLAS (in Chinese). *J Exp Fluid Mech*, 2015, 29: 62–67 [欧东斌, 陈连忠, 董永晖, 等. 电弧风洞中基于TDLAS的气体温度和氧原子浓度测试. *实验流体力学*, 2015, 29: 62–67]
- 31 Zhang L, Cheng L. Continuous fiber toughened silicon carbide ceramic matrix composites (in Chinese). In: *Composites: Life, Environment and High Technology—Proceedings of the 12th National Conference on Composite Materials*. Beijing, 2002. 16–29 [张立同, 成来飞. 连续纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料. 见: *复合材料: 生命、环境与高技术——第十二届全国复合材料学术会议论文集*. 北京, 2002. 16–29]
- 32 Wang Y, Xu Y, Xie C, et al. Ablation properties and mechanism of three-dimensional needled C/(SiC-TaC) composites (in Chinese). *J Chin Ceram Soc*, 2009, 37: 1718–1723 [王毅, 徐永东, 谢翀博, 等. 三维针刺C/(SiC-TaC)复合材料的烧蚀性能及烧蚀机理. *硅酸盐学报*, 2009, 37: 1718–1723]
- 33 Huang H, Du S, Wu L, et al. Analysis of the ablation of C/C composite (in Chinese). *Acta Mater Compos Sin*, 2001, 18: 76–80 [黄海明, 杜善义, 吴林志, 等. C/C复合材料烧蚀性能分析. *复合材料学报*, 2001, 18: 76–80]
- 34 Ran L, Li W, Yang L, et al. Ablation properties and ablation mechanism of C/C-Cu composites (in Chinese). *Chin J Nonferrous Met*, 2010, 20: 510–515 [冉丽萍, 李文军, 杨琳, 等. C/C-Cu复合材料的烧蚀性能及烧蚀机理. *中国有色金属学报*, 2010, 20: 510–515]
- 35 Grant B M B, Stone H J, Withers P J, et al. High-temperature strain field measurement using digital image correlation. *J Strain Anal Eng Des*, 2009, 44: 263–271
- 36 Chen X, Xu N, Yang L, et al. High temperature displacement and strain measurement using a monochromatic light illuminated stereo digital image correlation system. *Meas Sci Technol*, 2012, 23: 125603
- 37 Qu Z, Fang X, Hou G, et al. Ceramic-based speckles and enhanced feature-detecting algorithm for deformation measurement at high temperature. *Exp Mech*, 2017, 57: 377–386
- 38 Yang F, Zhang X, Han J, et al. Ablation mechanism of ZrB_2 -SiC and $C_{s/f}/ZrB_2$ -SiC ultra-high temperature ceramic composites of (in Chinese). *J Inorg Mater*, 2008: 734–738 [杨飞宇, 张幸红, 韩杰才, 等. ZrB_2 -SiC和 $C_{s/f}/ZrB_2$ -SiC超高温陶瓷基复合材料烧蚀机理的研究. *无机材料学报*, 2008: 734–738]
- 39 Duan F, Wang Y, Lei X, et al. Overview of machine vision technology and its applications (in Chinese). *Autom Panor*, 2002, 19: 59–61 [段峰, 王耀南, 雷晓峰, 等. 机器视觉技术及其应用综述. *自动化博览*, 2002, 19: 59–61]
- 40 Jain R, Kasturi R, Schunck B G. *Machine Vision*. New York: McGraw-Hill, 1995
- 41 Davies E R. *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*. New York: Academic Press, 2004
- 42 Jia Z, Wang B, Liu W, et al. An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts. *J Mater Process Tech*, 2010, 210: 267–271
- 43 Jahanshahi M R, Masri S F, Padgett C W, et al. An innovative methodology for detection and quantification of cracks through incorporation of depth perception. *Machine Vision Appl*, 2013, 24: 227–241
- 44 Sonka M, Hlavac V, Boyle R. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. New York: Cengage Learning, 2014
- 45 Lant C T, Barranger J P. Progress in high temperature speckle-shift strain measurement system. NASA STI/Recon Technical Report. Washington DC: NASA, 1990
- 46 Han Z, Yin X. A review of research methods of hypersonic missile aerodynamic optical effects (in Chinese). *Mod Def Technol*, 2003, 31(3): 13–18 [韩志平, 殷兴良. 高超音速导弹气动光学效应研究方法综述. *现代防御技术*, 2003, 31(3): 13–18]
- 47 Wien W. XXX. On the division of energy in the emission-spectrum of a black body. *Lond Edinb Dubl Phil Mag*, 1897, 43: 214–220
- 48 Novak M D, Zok F W. High-temperature materials testing with full-field strain measurement: Experimental design and practice. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82: 115101
- 49 Guo X, Liang J, Tang Z, et al. High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement captured with filters at 2600°C using spraying to form speckle patterns. *Opt Eng*, 2014, 53: 063101
- 50 Berke R B, Lambros J. Ultraviolet digital image correlation (UV-DIC) for high temperature applications. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 045121

- 51 Dong Y, Pan B. *In-situ* 3D shape and recession measurements of ablative materials in an arc-heated wind tunnel by UV stereo-digital image correlation. [Optics Lasers Eng](#), 2019, 116: 75–81
- 52 Dong Y, Zhao J, Pan B. Ultraviolet 3D digital image correlation applied for deformation measurement in thermal testing with infrared quartz lamps. [Chin J Aeronaut](#), 2020, 33: 1085–1092
- 53 Qu Z. Real-time measurement of deformation based on image feature detection at high temperature and its application (in Chinese). Dissertation of Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2018. 31–33 [屈哲. 基于图像特征检测的高温在线测量方法及其应用. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2018. 31–33]
- 54 Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1986, 8: 679–698
- 55 Duda R O, Hart P E. Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures. [Commun ACM](#), 1972, 15: 11–15
- 56 Illingworth J, Kittler J. A survey of the hough transform. [Comput Vision Graphics Image Processing](#), 1988, 44: 87–116
- 57 Mashford J, Rahilly M, Lane B, et al. Edge detection in pipe images using classification of haar wavelet transforms. [Appl Artificial Intelligence](#), 2014, 28: 675–689
- 58 Nadernejad E, Sharifzadeh S, Hassanpour H. Edge detection techniques: Evaluations and comparisons. *Appl Math Sci*, 2008, 2: 1507–1520
- 59 Abdel-Qader I, Abudayyeh O, Kelly M E. Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges. [J Comput Civ Eng](#), 2003, 17: 255–263
- 60 Su T C, Yang M D, Wu T C, et al. Morphological segmentation based on edge detection for sewer pipe defects on CCTV images. [Expert Syst Appl](#), 2011, 38: 13094–13114
- 61 Elbehriy H, Hefhawy A, Elewa M. Surface defects detection for ceramic tiles using Image processing and morphological techniques. *Int J Comput Inf Eng*, 2007, 1: 1488–1492
- 62 Su C, Zhu X, Liu D. Precise automatic image registration method of the defect detection for ceramic tiles (in Chinese). *J South China Univ Tech: Nat Sci Ed*, 2004, 32: 33–36 [苏彩红, 朱学峰, 刘笛. 用于墙地砖缺陷检测的自动精确图像配准方法. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2004, 32: 33–36]
- 63 Qu Z, Fang X, Su H, et al. Measurements for displacement and deformation at high temperature by using edge detection of digital image. [Appl Opt](#), 2015, 54: 8731–8737
- 64 Chu T C, Ranson W F, Sutton M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. [Exp Mech](#), 1985, 25: 232–244
- 65 Bruck H A, McNeill S R, Sutton M A, et al. Digital image correlation using newton-raphson method of partial differential correction. [Exp Mech](#), 1989, 29: 261–267
- 66 Cofaru C, Philips W, Van Paepegem W. Pixel-level robust digital image correlation. [Opt Express](#), 2013, 21: 29979–29999
- 67 Zhang H, Wang Y, Chen L, et al. High temperature deformation measurement based on ultraviolet DIC. In: *International Conference on Experimental Mechanics 2014*. Singapore, 2015. 93020A
- 68 Yang X, Liu Z, Xie H. A real time deformation evaluation method for surface and interface of thermal barrier coatings during 1100°C thermal shock. [Meas Sci Technol](#), 2012, 23: 105604
- 69 Zhu X, Yue M, Qu Z, et al. High-temperature DIC based on aluminium dihydrogen phosphate speckle. [Measurement](#), 2019, 133: 133–138
- 70 Nixon M, Aguado A. *Feature Extraction and Image Processing for Computer Vision*. New York: Academic Press, 2019
- 71 Lowe DG. Object recognition from local scale-invariant features. In: *Proceedings of the seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. Greece: IEEE, 1999. 1150–1157
- 72 Matas J, Chum O, Urban M, et al. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions. [Image Vis Comput](#), 2004, 22: 761–767
- 73 Gonzles G, Meggiolaro M. Strain field measurements around notches using sift features and meshless methods. [Appl Opt](#), 2015, 54: 4520–4528
- 74 Sutton M A. Computer vision-based, noncontacting deformation measurements in mechanics: A generational transformation. [Appl Mech Rev](#), 2013, 65: 050000
- 75 LeBlanc J, Shukla A. Dynamic response of curved composite panels to underwater explosive loading: Experimental and computational comparisons. [Compos Struct](#), 2011, 93: 3072–3081
- 76 Su H, Fang X, Feng X, et al. The temperature-dependent strength of metals: Theory and experimental validation. [J Appl Mech](#), 2014, 81: 091003
- 77 Su H, Fang X, Feng X, et al. Temperature-dependent modulus of metals based on lattice vibration theory. [J Appl Mech](#), 2014, 81: 041017
- 78 Seidt J D, Kuokkala V T, Smith J L, et al. Synchronous full-field strain and temperature measurement in tensile tests at low, intermediate and high

- strain rates. *Exp Mech*, 2017, 57: 219–229
- 79 Su H, Fang X, Qu Z, et al. Synchronous full-field measurement of temperature and deformation of C/SiC composite subjected to flame heating at high temperature. *Exp Mech*, 2016, 56: 659–671
- 80 Huang Y, Yan Y, Riley G. Vision-based measurement of temperature distribution in a 500-kW model furnace using the two-colour method. *Measurement*, 2000, 28: 175–183
- 81 Hottel H C, Broughton F P. Determination of true temperature and total radiation from luminous gas flames. *Ind Eng Chem Anal Ed*, 1932, 4: 166–175
- 82 Hijazi A, Sachidanandan S, Singh R, et al. A calibrated dual-wavelength infrared thermometry approach with non-greybody compensation for machining temperature measurements. *Meas Sci Technol*, 2011, 22: 025106
- 83 Tang Y, Yue M, Fang X, et al. Synchronous full-field measurement of temperature and deformation based on separated radiation and reflected light. *Optics Lasers Eng*, 2019, 116: 94–102
- 84 Tang Y, Yue M, Fang X, et al. Overcoming high luminance gradient using serial exposure time method for synchronous full-field measurement of temperature and deformation. *Appl Opt*, 2019, 58: 6966–6974
- 85 Su H. Study on theory and experiment of mechanical behaviors of materials under high temperature and complex environment (in Chinese). Dissertation of Doctoral Degree. Chongqing: Chongqing University, 2016. 71–74 [苏红宏. 高温复杂环境下材料力学行为的理论与试验研究. 博士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2016. 71–74]
- 86 Pan Y, Xu Y, Chen Z, et al. Ablation properties analysis of 2D C/SiC composites (in Chinese). *Ordnance Mater Sci Eng*, 2006, 29: 17–21 [潘育松, 徐永东, 陈照峰, 等. 2D C/SiC复合材料烧蚀性能分析. 兵器材料科学与工程, 2006, 29: 17–21]
- 87 Tang Y, Yue M, Fang X, et al. Evolution of surface droplets and flow patterns on C/SiC during thermal ablation. *J Eur Ceramic Soc*, 2019, 39: 3566–3574
- 88 Shi S. Ablation mechanism and thermo-mechanical behavior of silica/phenolic composites (in Chinese). Dissertation of Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. 5–12 [时圣波. 高硅氧-酚醛复合材料的烧蚀机理及热力学性能研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. 5–12]
- 89 Qu Z, Wang X, Tang Y, et al. *In situ* visualization measurement of flat plate ablation in high-temperature gas flow. *J Appl Mech*, 2018, 85: 061006
- 90 Kumar S, Kumar A, Sampath K, et al. Fabrication and erosion studies of C-SiC composite jet vanes in solid rocket motor exhaust. *J Eur Ceramic Soc*, 2011, 31: 2425–2431

Machine vision system for high-temperature wind tunnel: Principle, design and application

ZHANG JinSong¹, QU Zhe¹, YUE MengKun¹, TANG YunLong¹, WANG Xian^{1,2},
CHEN LianZhong³, DU BaiHe⁴ & FENG Xue¹

¹ AML, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 10008, China;

² Institute of Flexible Electronics Technology of THU, Jiaxing 314006, China;

³ China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China;

⁴ China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China

In aerospace and related fields, simulation tests in the high-temperature wind tunnel have been playing an important role in evaluating and optimizing the thermal performance of key materials/structures of the aircraft. Based on the characteristics of the test environment, the development of machine vision system for the high-temperature wind tunnel can obtain the wide ranging and comprehensive process information of the tests, which is of great significance to the development of high-temperature ground simulation tests. Thus, this paper reviews the theoretical principles, key technologies and equipment design of the machine vision system for high-temperature wind tunnel. Meanwhile, several application examples are also introduced along with the relevant research results of our research group in this field. Finally, the development direction and application prospects of the machine vision system for the high-temperature wind tunnel are also forecasted with the future-oriented needs of the simulation tests.

machine vision system, high-temperature wind tunnel, high-temperature ground simulation test, thermal protection system, optical measurement, oxidative ablation

doi: [10.1360/SST-2020-0170](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0170)