

基于三维激光扫描的固体发动机绝热层烧蚀形貌测量

巫 恒, 沈 飞, 谢俊彦
(西安航天动力测控技术研究所, 西安, 710025)

摘要: 为优化火箭固体发动机热结构, 合理设计内绝热层厚度, 需要对固体发动机绝热层烧蚀形貌进行准确有效的测量。采用三维扫描技术测量固体发动机绝热层烧蚀形貌, 其中针对固体发动机绝热层缠绕特性以及壳体的圆柱筒段特性提出了相应的三维激光扫描策略以及固体发动机三维数据处理方法, 实现了对于固体发动机绝热层烧蚀形貌的三维数据描述, 并且可以得出相应的绝热层烧蚀量。该方法相较于传统的固体发动机绝热层烧蚀厚度的测量更加智能、全面以及高效, 在绝热层烧蚀形貌测量方面有较大应用前景。

关键词: 三维激光扫描; 固体发动机; 绝热层; 点云数据; 三维可视化

中图分类号: V435

文献标识码: A

Measurement of Ablative Morphology of Solid Motor Insulation Layer Based on 3D Laser Scanning

WU Heng, SHEN Fei, XIE Junyan
(Xi'an Aerospace Propulsion Testing Technology Research Institute, Xi'an, 710025)

Abstract: In order to optimize the rational design of the thermal structure of solid rocket motor and accurately measure the erosion morphology of the insulation layer, a three-dimensional scanning technology is employed for this purpose. This study proposes a three-dimensional laser scanning strategy and a method for processing solid rocket motor three-dimensional data to analyze the wrapping characteristics of the insulation layer and cylindrical cylinder section of the shell. The proposed approach enables realization of three-dimensional data on erosion morphology in solid rocket motor insulation layers, facilitating determination of corresponding erosion amounts. Compared to traditional methods, this intelligent, comprehensive, and efficient method offers great application prospects for measuring erosion thickness in solid rocket motor insulation layers.

Keywords: three-dimensional laser scanning; solid motor; insulation layers; point cloud data; three-dimensional visualization

0 引言

固体发动机是一种采用固体推进剂作为化学动力的推进设备, 在导弹兵器、运载火箭和空间飞行器等领域中都有广泛的应用。其最大特点是结构简单, 具有机动性较强、可靠性高、生存能力强等优点, 满足现代战争的要求, 因此在导弹兵器领域和航天系统均有广泛的应用^[1]。

随着固体发动机的发展、各项性能指标的提升, 热防护问题成为了固体发动机设计的一项关键问题。由于发动机在工作时, 燃烧室和喷管一直暴露在高温高压的燃气流之下, 因此做好热防护是发动机设计的重中之重^[2]。因而在发动机结构设计中不得不采取热防护措施, 应用耐烧蚀的复合材料作为内衬绝热层。

内绝热层黏结于燃烧室内壁, 使燃烧室壳体避免高温、高压、高速燃气作用下的侵蚀^[3]。内绝热层作为燃烧室的关键部件之一, 若厚度设计过薄, 或者内绝热层与壳体脱粘则可能使燃烧室被局部烧穿, 从而导致发动机工作失败。然而过厚的内绝热层一方面会增加固体发动机的消极质量, 另一方面会减小推进剂药柱的有效体积, 缩短其工作时间^[4]。然而, 由于固体发动机内流场的复杂性, 以及对流、辐射热流、燃气温度、横向流速和燃气组分在测量上的困难性, 目前大多数燃烧室内绝热层厚度还是靠经验确定的^[5]。因此, 随着固体发动机各项性能指标的发展, 为了优化火箭发动机的热结构, 合理设计内绝热层的厚度与材料, 国内外广泛开展了对内绝热层烧蚀试验的

研究^[6]。

本文将基于固体发动机内绝热层烧蚀的特性,采用非接触式三维激光扫描技术对点火完成的发动机进行三维形貌数据测量,并进行相应的点云数据处理,以实现发动机内绝热层烧蚀的准确智能测量。采用三维激光扫描技术对固体发动机绝热层进行烧蚀量与烧蚀形貌的检测,是中国首次对于固体发动机烧蚀后全筒段绝热层烧蚀量的测量。传统的对于固体发动机绝热层烧蚀量的测量方法是将点火完成的固体发动机按照某一象限剖开并展成平面形状,在破坏壳体三维结构后利用卡尺进行人工测量。传统的试验测量方法具有较大的局限性,首先其试验测量过程破坏了固体发动机三维结构,导致其测量完成后壳体无法再进行其他试验评估,传统的试验测量是对于剖开壳体绝热层某一烧蚀严重的区域展开定点测量,这种测量方式可能遗漏一些烧蚀区域并且测量全过程耗时耗力。三维测量技术注重整体的完整性并且可以得出较为精确的全体积内绝热层烧蚀数据。非接触式三维激光扫描测量在测量过程中使用的测量系统不会直接接触待测物,利用光学原理,通过一定视觉算法得到待测物表面三维点云信息,避免待测物表面产生变形。因此本文基于三维激光扫描的固体发动机绝热层烧蚀形貌测量、精确智能化的数据分析与直观可视化的数据显示,有助于更进一步地理解发动机的工作过程和烧蚀机理,改善固体发动机中的热防护效应,为绝热层的设计提供参考,可有效提升固体发动机性能。

1 基于三维激光扫描的三维数据获取

1.1 三维激光扫描仪成像原理

本文所采用的三维激光扫描设备是基于激光三角测量原理的双目视觉三维成像技术,激光三角法是一种原理和结构都较为简单的方法,是利用激光—待测物—相机三者的三角关系来换算待测物高度的一种方法。激光三角法光路结构如图1所示,扫描仪激光器发出激光束照射在被测物体表面,形成光斑 H_0 ,跟踪成像系统对激光的漫反射光进行汇聚,光斑在光敏元件成像为 M_0 点,当被测物表面形状尺寸向激光轴发生位移量变化到 H_1 时,反射光的角度随之产生改变,光敏器件的成像点发生位移到点 M_1 ,被测物体表面点由式(1)得出对应像点的位置,若已知像点的位置则可由式(2)计算得到物体表面点到参考平面的尺寸^[7]。

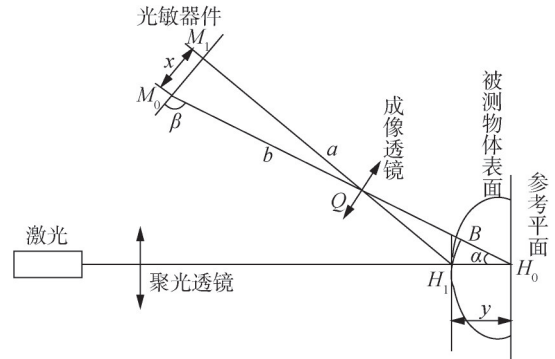


图1 激光三角法光路结构

Fig.1 Structure of laser triangulation method

$$\frac{x \times \sin \alpha}{y \times \sin \beta} = \frac{a - y \times \cos \alpha}{b + x \times \cos \beta} \quad (1)$$

$$y = \frac{ax \sin \beta}{b \sin \alpha + x \sin(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

式中 x 为对应像点平移量; y 为物点的平移量; a 为入射光与反射光的夹角; β 为反射光与光敏面的夹角; a 为 H_0 的成像物距; b 为 H_0 的成像像距。

双目三维视觉成像技术的理论模型为由两个激光三角测量原理的单目激光系统组成,其成像技术的关键是获取两个相机之间的三维空间位置关系,如图2所示, $O_{cl}-X_{cl}Y_{cl}Z_{cl}$ 为左图像的坐标系, f_l 为左相机的焦距, $O_{rl}-X_{rl}Y_{rl}Z_{rl}$ 为右图像的坐标系, f_r 为右相机的焦距, $O_{cr}-X_{cr}Y_{cr}Z_{cr}$ 为右相机的坐标系,点 P 为世界坐标系中的任意一点, P_l 、 P_r 分别是 P 在左、右两个图像坐标系中的投影点^[8]。

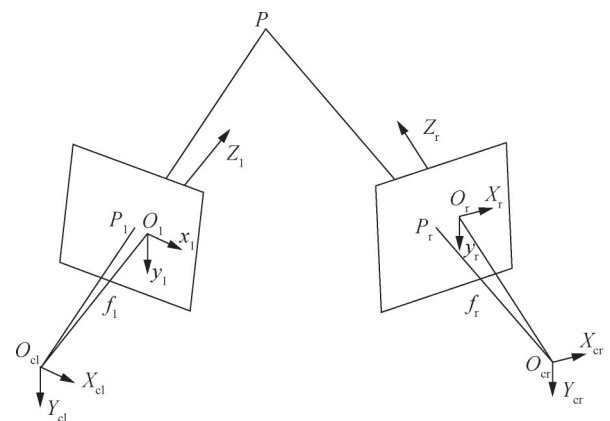


图2 双目相机成像原理示意

Fig.2 Imaging principle of binocular camera

为简化相应的计算过程,本文将以左相机为世界坐标参考系,则由相机的透视变换模型可得:

$$Z_{cl} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_l & 0 & 0 \\ 0 & f_l & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Z_{cr} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r & 0 & 0 \\ 0 & f_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cr} \\ Y_{cr} \\ Z_{cr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设三维空间中的一点 P 在左右相机中投影成像，则可得该点在左右相机图像坐标系下的坐标转换关系如下：

$$Z_{cr} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{cl} & \mathbf{T}_{cl} \\ \mathbf{O} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r r_1 & f_r r_2 & f_r r_3 & f_r t_x \\ f_r r_4 & f_r r_5 & f_r r_6 & f_r t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{Z_{cl} x_1}{f_1} \\ \frac{Z_{cl} y_1}{f_1} \\ \frac{Z_{cl}}{f_1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中， $\mathbf{R}_{cl} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 为左相机坐标和右相机坐标之间的旋转矩阵； $\mathbf{T}_{cl} = [t_x \ t_y \ t_z]$ 为两个相机的平移量。由此可得该点在现实世界的三维坐标：

$$\begin{cases} X_{cl} = \frac{Z_{cl} x_1}{f_1} \\ Y_{cl} = \frac{Z_{cl} y_1}{f_1} \\ Z_{cl} = \frac{f_1(f_1|t_x| - |x_1|t_z)}{x_1(r_7|x_1| + |r_8|y_1| + |r_9|f_1) - f_r(r_1|x_1| + |r_2|y_1| + |r_3|f_1)} = \frac{f_1(f_1|t_y| - |y_1|t_z)}{x_1(r_7|x_1| + |r_8|y_1| + |r_9|f_1) - f_r(r_4|x_1| + |r_5|y_1| + |r_6|f_1)} \end{cases} \quad (6)$$

双目立体视觉模型中两个相机坐标系之间的转换关系为刚体变换，通过旋转以及平移，利用最小二乘法即可计算出现实世界中 P 点的三维坐标。

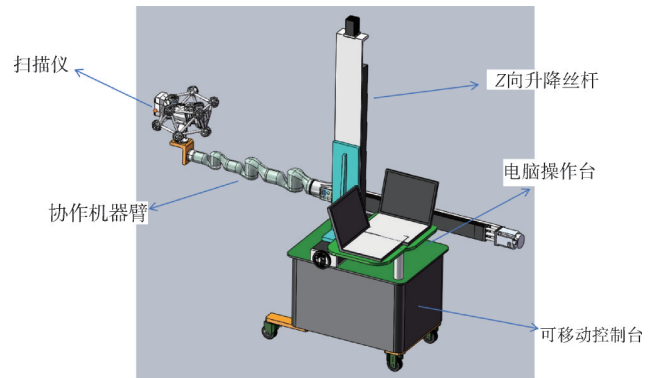
1.2 大筒径固体发动机三维数据获取

由于固体发动机前封头端拆除点火器后留下的开口尺寸过小，无法将手持式三维激光扫描设备深入到筒段内部，以及后封头端喷管开口尺寸过小，当手持扫描设备扫描筒段内部时，测量人员有一定可能遮挡激光跟踪器。这个因素严重影响对筒段内部的扫描，并且某些型号发动机的长度尺寸较大，若三维激光扫描设备不深入筒段内部，则多数型号的发动机都无法得出完整的内部三维形貌数据。因此需要设计一个针对全尺寸固体发动机的移动式测量台，以完成大直径范围、大长度筒件的动态三维扫描，并且辅以相应的自动扫描策略，这是实现智能快速三维数据获取的必要方式。

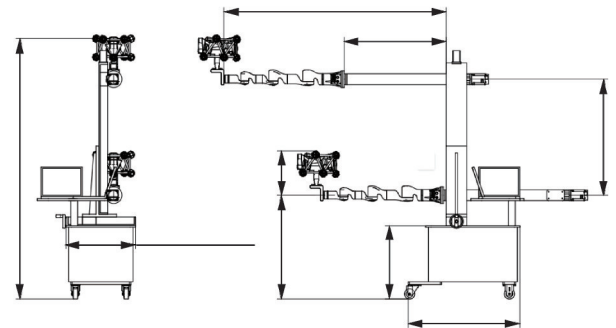
1.2.1 三维激光扫描测量台

本文所设计的全尺寸固体发动机的移动式三维激

光扫描测量台的模型与工程图如图3所示。其中移动测量台主体由多普康M3A-2000微数控机床系统的XYZ三轴进动支架组成，可实现在尺寸范围内的平移进动，且具有数控自动进动功能可实现一定的智能测量。X轴前端装有睿尔曼RM65的六自由度协作机械臂，其前端抓取激光三维扫描设备，可利用电脑或平板电脑进行控制，实现复杂场景的测试测量任务，并且也可以进行编程，实现自动空间路径移动，以配合三维激光扫描设备的快速全面地获取空间形貌数据。



a) 移动式测量台模型



b) 移动式测量台工程图

图3 移动式测量台模型与工程图

Fig.3 Simulation and engineering drawing of mobile measuring table

其操作步骤为，在使用固体发动机三维激光扫描仪之前，确保扫描仪的电源正常连接、工作环境良好、软件和设备正常联机。在使用过程中z轴电动可实现快速升降，以适应不同直径工件测量；x轴电动可实现快速移动，以调节测量深度；y轴通过手动移动，用于微调激光扫描仪和工作的测量距离；用平板电脑或笔记本电脑调节末端机械臂姿态，以适应复杂测量场景。若需要实现快速智能的扫描测试方案可实现对于进动支架以及机械臂的编程，三维激光扫描设备按照预定的扫描策略可以自动获取三维数据。

1.2.2 大筒径固体发动机扫描策略

基于上述三维激光扫描设备以及机械臂辅助测量台, 需要进行最优扫描路径算法研究, 以便在精确、完整的前提下进行高效扫描。因此本文将兼顾三维激光扫描仪的特点并对完整智能的形貌测量要求提出一种快速高效、完整精确的大筒径固体发动机扫描策略。

a) 快速高效的扫描路径。

在微分几何中, 测地线是指在表面上的各点处测地曲率均为零的曲线, 可以看作二维平面上的直线段在三维表面上的衍生, 可用于描述表面上两点之间的最短曲线^[9]。固体发动机壳体的筒段部分皆为回转体, 而在发动机的筒段直段处为回转的圆柱体, 因此对于固体发动机筒段而言, 从前端一点到后端一点的最短曲线路径便是圆柱曲面的测地线。

根据微分几何中对测地线的定义, 可证明在圆柱曲面上各点处测地曲率均为零的曲线为圆柱螺旋线^[10]。图4为圆柱螺旋线进动轨迹, 由此建立圆柱螺旋线的参数方程。

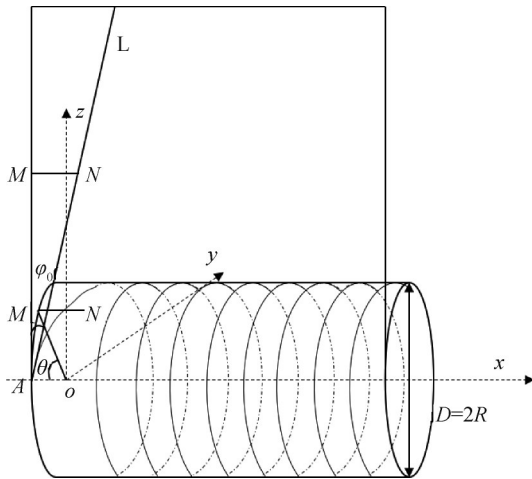


图4 圆柱螺旋线进动轨迹

Fig.4 Cylindrical spiral precession trajectory

根据上图中的圆柱曲面参数可得以下等式:

$$\begin{cases} AM = R\theta \\ NM = AM \cdot \tan\phi_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 R 为圆柱曲面半径; ϕ_0 为圆柱面展开的矩形中斜线 L 与矩形边的夹角; N 为圆柱螺旋线上的任意一点; MN 为垂直于 yz 平面的垂线; θ 为 OM 与 y 轴的夹角。

圆柱曲面进动螺旋线的参数方程为

$$\begin{cases} y = R \cdot \cos\theta \\ z = R \cdot \sin\theta \\ x = R\theta \cdot \tan\phi_0 \end{cases} \quad (8)$$

b) 全面完整的扫描路径。

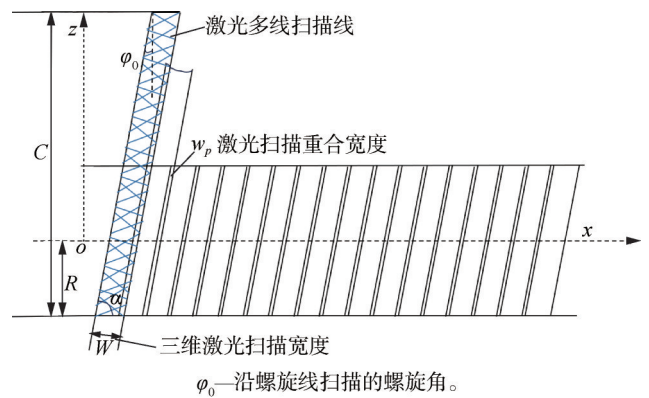
对于大筒径固体发动机的三维激光扫描, 扫描路径既要兼顾扫描的快速高效, 又要保证固体发动机烧蚀形貌的整体性与完整性。由此扫描路径需要考虑到三维激光扫描设备在多线模式下的扫描宽度, 并且为获取可靠完整的扫描形貌, 扫描路径需要对于多线扫描宽度进行部分重合以确保扫描宽度拼接处的三维形貌的完整性。由于三维激光扫描设备的光学特性, 仅进行同一方向的螺旋进动难以保证整体性, 考虑到实际试验的固体发动机烧蚀后的碳化层形貌可能遮挡, 首次螺旋进动的多线覆盖如图5所示, 其中左右图分别展示了测量过程中自上而下以及自下而上的扫描路径中对激光线的遮挡, 该烧蚀形貌会影响单次螺旋进动扫描的完整性。



图5 固体发动机绝热层烧蚀形貌

Fig.5 Ablation morphology of solid motor insulation layer

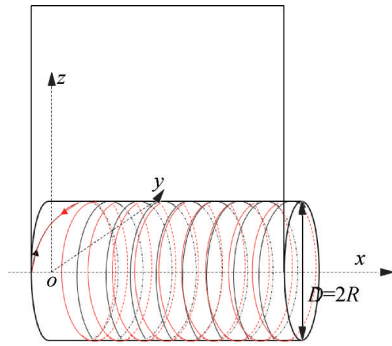
本文采取正向的螺旋进动扫描至发动机尾部, 再进行反方向的逆向进动扫描策略。重合扫描策略与双螺旋扫描策略如图6所示。



a) 多线扫描宽度重合扫描策略

图6 大筒径固体发动机扫描策略

Fig.6 Large diameter solid rocket motor scanning strategy



b) 双螺旋进动式扫描策略

续图6

由图6a中的多线宽度重合扫描策略可得：

$$\begin{cases} \cos\alpha = \frac{W - w_p}{C} \\ C = 2\pi R \end{cases} \quad (9)$$

式中 R 为固体发动机壳体半径； W 为多线激光扫描宽度； C 为固体发动机壳体周长； w_p 为激光多线扫描之间的重合宽度； α 为激光多线扫描宽度中心线与发动机轴线之间的夹角，定义为扫描角。

由式 (9) 可知，在固体发动机尺寸参数已知的情况下，可由固体发动机的壳体半径计算出三维激光扫描策略中的螺旋扫描角度：

$$\alpha = \arccos\left(\frac{W - w_p}{2\pi R}\right) \quad (10)$$

因此根据圆柱曲面进动螺旋线的参数方程，即式 (8)，以及式 (10) 可得大筒径固体发动机扫描策略的参数方程：

$$\begin{cases} x = R\theta \cdot \cot\left[\arccos\left(\frac{W - w_p}{2\pi R}\right)\right] \\ y = -R \cdot \cos\theta \\ z = R \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (11)$$

式中 θ 为移动式测量台机械臂的旋转角度， $\theta = \omega t$ ， ω 为测量台机械臂旋转的角速度， t 为旋转时间。

由此，本文所提出的针对大筒径固体发动机的三维激光扫描路径规划采用双螺旋进动式的扫描策略。对比此前的人工手动扫描方式，双螺旋进动式的扫描策略首先完成了对于大筒径固体发动机的三维激光扫描，然而此前的人工扫描方式无法深入发动机内部，无法获取固体发动机绝热层的完整三维数据，并且之前的人工扫描方式精度无法确定以及效率十分低下，费时费力。因此针对大筒径固体发动机的双螺旋进动式的扫描策略，符合对于固体发动机烧蚀后的三维形貌获取快速性、整体性以及完整性的要求。在对大筒径固体发动机扫描完成后，双螺旋进动式的扫描策略可将移

动测量台及其机械臂实现复位操作，以便于进行下一个发动机的测量或是针对该发动机的重复测量。

2 固体发动机三维形貌点云数据处理

本文利用三维激光扫描技术对固体发动机筒段内部的烧蚀形貌进行了三维数据采集，该方法可获取固体发动机内部烧蚀形貌的三维表面数据以及三维点云数据。通常情况下，所获取的固体发动机三维表面数据量大，并且其点云数据根据扫描精度的提升，点云中点的密度增大，进而点的数据量也巨大。因此，本文针对固体发动机烧蚀形貌的特点，对其三维表面数据及其三维点云数据进行高效合理的数据处理，令其可以快速准确地反映固体发动机烧蚀形貌。

本文对于固体发动机烧蚀形貌的测量采用烧蚀前固体发动机绝热层的三维数据对比烧蚀后绝热层的三维数据，烧蚀前后的数据变化为固体发动机绝热层的烧蚀量。因此，针对烧蚀前后的三维数据处理，首先需要对于烧蚀前后的点云数据进行配准以实现直观可视的烧蚀量显示，然后针对圆柱筒段的三维点云数据进行圆柱拟合并拟合出相应的固体发动机中轴线，最后计算绝热层烧蚀前后对于中轴线的距离以实现对于绝热层烧蚀量的计算。

2.1 固体发动机三维点云数据配准

2.1.1 三维点云数据形状特征点提取

由于固体发动机三维点云数据通常情况下数据量巨大，本文将首先对待配准的三维点云数据进行形状特征点提取 (Intrinsic Shape Signatures, ISS)，将三维发动机模型的表面划分为多个小区域，遍历每个小区域，计算每个点的曲率和法向量等特征，通过设定一定的阈值，筛选出曲率和法向量变化较大的点作为关键点。通过对三维点云数据形状特征点进行提取，可有效减少数据量，提取特征点之后的数据处理算法可显著提升效率。

ISS 算法可有效表示立体几何形状，提取丰富的点云几何特征信息，并且有效缩减计算数据量，算法求解具体步骤如下：

a) 设点云 P 中含有 n 个点，设其中第 i 个点为 $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ ，对点云 P 中的每个点 p_i 建立局部坐标系，并且设置相应的搜索半径 r ；

b) 确定所有的搜索点 p_i 在搜索半径 r 内的相邻点，并进行加权，其权值设定为 w_{ij} ：

$$w_{ij} = \frac{1}{|p_i - p_j|}, |p_i - p_j| < r \quad (12)$$

c) 计算每个点 p_i 的协方差矩阵:

$$\text{cov}(p_i) = \frac{\sum_{|p_i - p_j| < r} w_{ij} |p_i - p_j| |p_i - p_j|^T}{\sum_{|p_i - p_j| < r} w_{ij}} \quad (13)$$

d) 计算每个协方差矩阵的特征值 $\{\lambda_i^1, \lambda_i^2, \lambda_i^3\}$, 并且以递减顺序排列;

e) 设置相应的阈值 ε_1 和 ε_2 , 根据式(14)筛选关键点, 保证点的 $\lambda_i^1, \lambda_i^2, \lambda_i^3$ 大小相差不大, 以避免这些点在同一平面或直线上。并且在选取的关键点中, 在给定邻域中取最小特征值, 即最大显著值的点为ISS关键点:

$$\frac{\lambda_i^2}{\lambda_i^1} \leq \varepsilon_1, \frac{\lambda_i^3}{\lambda_i^2} \leq \varepsilon_2 \quad (14)$$

2.1.2 三维点云数据粗配准

烧蚀前后三维数据配准时需要采取快速高效的粗配准, 以实现三维点云数据初步配准, 达到快速高效配准数据的目的。基于ISS特征点对点云进行快速全局配准(Fast Global Registration, FGR)^[11], 最后利用生成的变换矩阵实现点云数据的原始配准。

a) 快速点特征直方图(Fast Point Feature Histogram, FPFH)特征描述。

FPFH特征描述算法, 是指在含有 n 个点的点云 P 中, 对点云中的点快速计算出具有旋转不变性, 并且能够抵抗一定噪声的特征描述向量。基于ISS特征点提取的FPFH特征描述算法如下:

1) 首先计算每一个特征点 p_q 与周围邻域内的所有点之间的法向量差异, 通过建立局部坐标系并依此将法向量差异分解为3个分量, 得到一组简化的特征直方图(Simplified Point Feature Histogram, SPFH);

2) 确定每个点的 k 个邻域点, 利用邻近的SPFH计算 p_q 的FPFH特征:

$$\text{FPFH}(p_q) = \text{SPFH}(p_q) + \sum_{i=1}^k \frac{1}{w_i} \text{SPFH}(p_i) \quad (15)$$

式中 w_i 为权重, 由领域内点之间的距离确定。

b) FGR快速全局配准。

通过以上基于ISS特征点提取, 并且利用FPFH特征描述算法, 最后利用FGR快速全局配准将烧蚀前后的固体发动机进行粗配准。

1) 通过计算邻域内所有点的FPFH特征向量对比找到两个点云数据之间相对应的点;

2) 利用互易性以及元组测试提升两组点云数据对应点之间的内联率;

3) 优化结果并且检验算法是否收敛;

4) 实现目标点云与移动点云之间的粗配准。

2.1.3 三维点云数据精配准

为了提高点云的配准精度, 需要用迭代最近点算法(Iterative Closest Point, ICP)对粗配准后的点云进行精配准^[12]。ICP算法为在经过粗配准的目标点云 Q 和移动点云 P 中, 以一定的约束条件在点云 P 中找到 Q 中任意一点 p_i 的最邻近点 q_j , 然后通过计算得出误差函数 $E(R, |T|)$ 最小的点:

$$E(R, T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|q_i - Rp_i - T\|^2 \quad (16)$$

根据上述原理可知ICP算法的具体步骤如下:

a) 针对待配准的目标点云 Q 以及移动点云 P , 建立对于点云 P 的 k -d树, 设置 i_{\max} 为最大迭代次数, 设置连续两次配准误差的比值阈值为 $\varepsilon_{\text{error}}$;

b) 对于目标点云 Q 中的每一个点 q_i , 在移动点云 P 中搜寻相对应的欧式距离最近的点, 得出 N 组对应点;

c) 求出 N 组对应点的变换关系, 利用其变换关系实现移动点云 P 的移动, 得到新的移动点云集合 P_{new} , 得到相应的配准误差 e ;

d) 重复b、c步骤, 直至连续两次的配准误差的比值 $\frac{e_i}{e_{i-1}} > \varepsilon_{\text{error}}$ 或是迭代次数大于 i_{\max} , 得到最终的精配准变换矩阵 $[R, T]$, 实现点云精配准。

2.2 固体发动机三维点云数据圆柱拟合

针对固体发动机壳体多为圆柱曲面的特点, 利用固体发动机三维点云数据进行圆柱拟合, 并得到相应的圆柱曲面数据, 获取拟合的圆柱中轴线参数, 以计算绝热层点云到中轴线距离, 实现对于固体发动机内绝热层的烧蚀量计算。圆柱面的拟合主要包含遗传算法、特征值拟合算法、距离函数参数化算法以及Gause-Newton优化算法等^[13-15]。这些算法原理较为复杂, 并且十分占用计算资源, 考虑到固体发动机三维点云数据量巨大以及需要高效快速的数据处理, 本文将采用针对圆柱面的几何原理进行拟合, 适用于固体发动机的大量点云数据处理。

由圆柱面的几何特性可知, 圆柱面是由一组到三维空间的中心轴线距离相等的点云数据的集合。设 $p_0(x_0, y_0, z_0)$ 为圆柱中轴线上的任意一点, (a, b, c) 为圆柱中轴线的方向向量, r 为圆柱曲面底面圆的半径, 可得:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - [a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0)]^2 = r^2 \quad (17)$$

由此可知,求得圆柱中轴线上的任意一点的坐标 (x_0, y_0, z_0) 、圆柱中轴线的方向向量 (a, b, c) 、圆柱曲面底面圆的半径 r 七个参数即可以确定唯一圆柱。

三维点云数据圆柱面拟合具体操作步骤如下:

a) 确定圆柱面拟合参数初值。

圆柱中轴线的方向向量 (a, b, c) 的初值,可通过圆柱面的几何特性得出,即圆柱曲面点云只有在与轴线方向平行时可构成直线,因此采用表面点云三点共线的方式确定中轴线的方向向量初值。具体算法为:在表面点云中选取任意一点 P_0 ,然后查找邻域内另外两点 P_1 和 P_2 ,与 P_0 的方向向量为一条直线,并且其方向向量为 (a^0, b^0, c^0) ,则可确定方向向量 (a^0, b^0, c^0) 为圆柱中轴线的初值。

然后对圆柱进行坐标变换,利用所确定的中轴线的方向向量的初值 (a^0, b^0, c^0) ,将圆柱曲面投影到 XOY 平面内形成二维平面的圆,进行二维圆拟合得到二维圆形的半径 r^0 作为圆柱底面圆半径的初值,拟合得到二维圆形的圆心坐标进行坐标变换,得到 (x_0^0, y_0^0) 作为圆柱轴线一点前两个坐标,将初值 z_0^0 设置为原坐标系下圆柱面上点 z 坐标最大值与最小值和的一半。由此可确定 (a^0, b^0, c^0) 、 (x_0^0, y_0^0, z_0^0) 和 r^0 七个参数的初值。

b) 建立误差方程式求解参数。

圆柱面的误差方程由圆柱曲面上的一点到中轴线的距离等于圆柱底面半径建立方程关系,之后利用全微分进行线性化,采用最小二乘法迭代计算,建立误差方程:

$$v = (X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 - [a(X_i - X_0) + b(Y_i - Y_0) + c(Z_i - Z_0)]^2 - R^2 \quad (18)$$

对式 (18) 进行线性化:

$$V = BX - L \quad (19)$$

其中, $B = \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_0}, \frac{\partial v_i}{\partial y_0}, \frac{\partial v_i}{\partial z_0}, \frac{\partial v_i}{\partial a}, \frac{\partial v_i}{\partial b}, \frac{\partial v_i}{\partial c}, \frac{\partial v_i}{\partial R} \right)$; $X = (\delta x_0, \delta y_0, \delta z_0, \delta a, \delta b, \delta c, \delta R)^T$; $L = -V_0$ 。

将所确定圆柱面拟合参数初值 (a^0, b^0, c^0) , (x_0^0, y_0^0, z_0^0) 和 r^0 代入上述方程组求解:

$$X = (B^T B)^{-1} B^T L \quad (20)$$

采用以上最小二乘方式求解出圆柱面拟合的相关参数,并且进行最小二乘迭代运算,即将每次求解出来的误差值与上一次输入的初值进行修正,作为本次计算的初值,当最终的误差值小于一定的精度要求

时,即可得出圆柱面拟合参数。

3 试验论证

首先,本文为验证测量设备的精确度,采用该三维激光扫描设备对已经经过标定的标准量块进行尺寸测量,测量过程如图 7 所示。经该设备分别对 100 mm、6.5 mm、1.5 mm、0.5 mm 标准量块进行尺寸测量,得到的测量结果如图 7 中所示为 99.988 mm、6.606 mm、1.481 mm、0.642 mm,因此本文认为该设备测量固体发动机绝热层烧蚀量的精确度具有一定的可信度和可靠性。

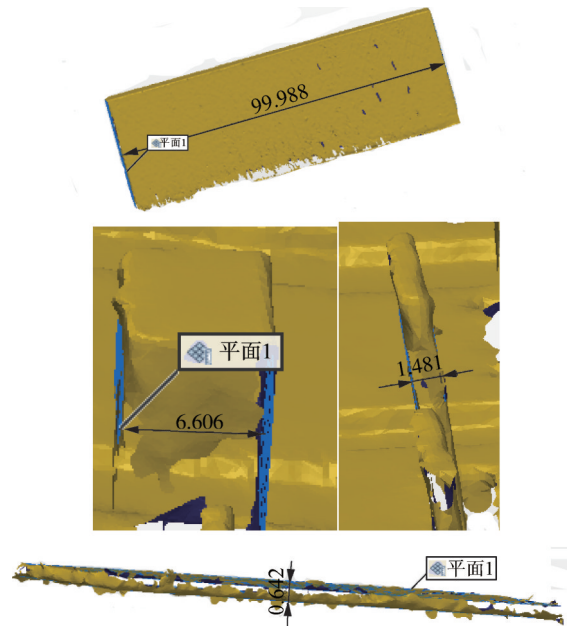


图7 基于三维激光扫描的标准量块测量(单位:mm)

Fig.7 Standard gauge block measurement based on 3D laser scanning

本文对于标准固体发动机进行了基于三维激光扫描的绝热层烧蚀形貌测量,标准发动机进行装药时,药柱具有额外的绝热层进行绝热,因此标准发动机的绝热层烧蚀形貌仅在喷管连接处具有明显的测量辨识度,具体实物信息如图 8 所示。



图8 标准固体发动机烧蚀形貌实物

Fig.8 Standard solid state motor ablation morphology

本文利用前文所提的试验原理对标准固体发动机采用激光三维扫描技术,对其三维形貌进行了测量与重构,其中重点对于绝热层烧蚀情况进行检测。本次试验由于其壳体数据量较大,采用的三维扫描分辨率为0.5 mm,生成的点云数据也符合绝热层烧蚀量三维描述,具体生成的烧蚀前后两个点云数据如图9所示。

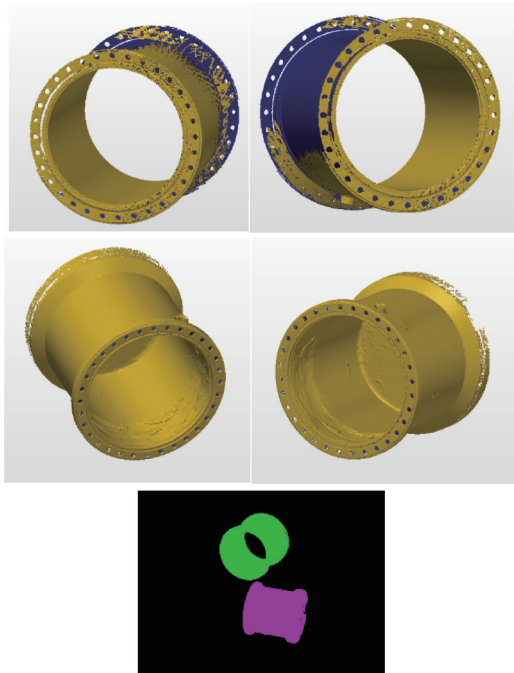


图9 标准固体发动机烧蚀形貌点云

Fig.9 Standard solid state motor ablative morphology point cloud

本次试验分别对3个标准发动机进行了三维激光扫描,并且基于前文中所提出的理论对其三维点云数据进行了粗配准、精配准以及圆柱体轴线拟合的数据处理,得到便于观察、计算以及可靠的处理后点云数据,具体配准结果如图10所示,绿色发动机为烧蚀前个体,紫色发动机为烧蚀后个体,配准后可直观观察到标准固体发动机的三维烧蚀形貌为喷管连接段,圆柱体拟合中轴线具体参数以及圆底面半径见表1。

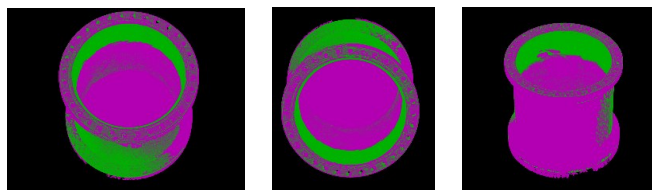


图10 配准后发动机三维点云

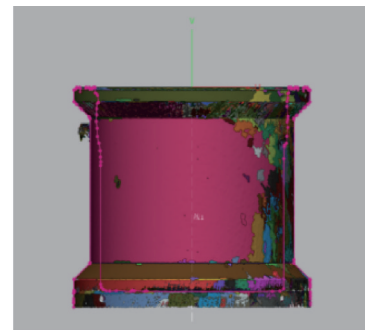
Fig.10 3D motor point cloud after registration

表1 固体发动机圆柱体拟合具体参数

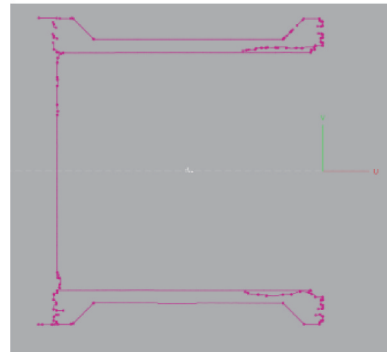
Tab.1 Solid motor cylinder fitting specific parameters

| 试验序号 | 轴线x坐标 | 轴线y坐标 | 轴线z坐标 | 底面圆半径/mm |
|------|----------|----------|---------|----------|
| 1 | 0.027 6 | -0.010 6 | 1.084 5 | 158.35 |
| 2 | 0.013 0 | 0.030 1 | 1.006 4 | 158.42 |
| 3 | -0.003 4 | 0.011 3 | 1.003 2 | 158.21 |

根据上述试验中对发动机三维点云数据的处理,本文将选取第3次试验的固体发动机三维烧蚀形貌,按照某一剖面的绝热层烧蚀量对其进行分析,具体情况如图11所示。



a) 选取配准后的某一剖面



b) 绝热层烧蚀剖面

图11 固体发动机绝热层烧蚀剖面

Fig.11 Solid motor insulation ablative profile

针对标准固体发动机绝热层的烧蚀量,以其测压孔为第I象限基准,将固体发动机4个象限的交接面作为4个剖截面进行烧蚀量分析,烧蚀形面到中轴线的距离见图12,直观显示了标准发动机4个剖截面的绝热层烧蚀量。由图12可看出标准发动机的绝热层烧蚀情况集中在喷管连接处,由图12c可知,由于III-IV象限连接处剖面部分碳化层未完全脱落,因此在一段区域内绝热层烧蚀量显著下降。

如图13所示,依次为该340标准发动机从喷管连

接处向上 20 mm、40 mm 以及 60 mm 处的内绝热层形貌径向截面的烧蚀数据。由轴向和径向内绝热层截面烧蚀数据可得，部分未完全脱落的碳化层主要分布在发动机长度 20~60 mm 之间，且主要分布在发动机第 III 象限内，由烧蚀量数据可得，碳化层的滞留使得烧蚀量数据显著降低 55%~75%。

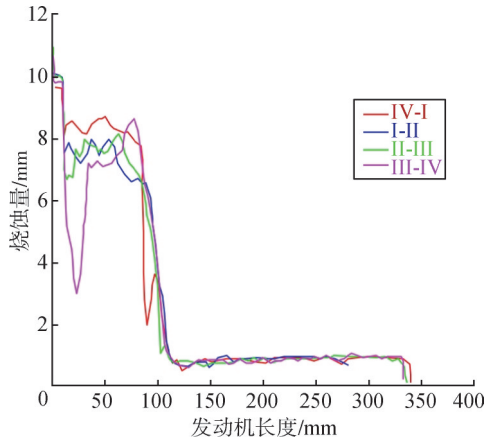
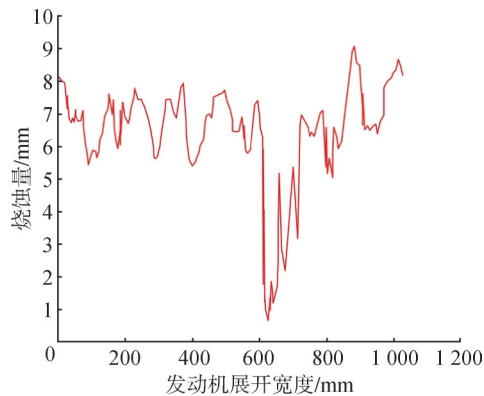
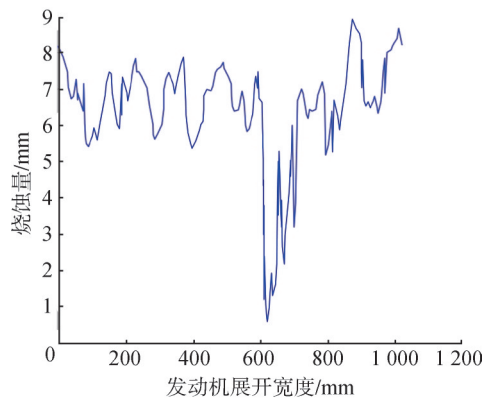


图 12 4 个剖截面图的绝热层烧蚀量

Fig.12 The ablative amount of the insulation layer in four profile diagrams



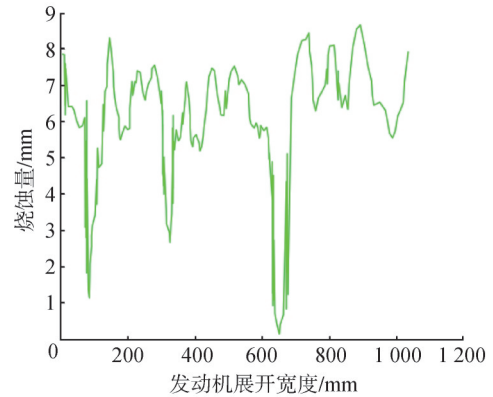
a) 20 mm 处截面烧蚀量



b) 40 mm 处截面烧蚀量

图 13 标准发动机径向截面烧蚀量

Fig.13 Ablation measurement of radial cross-section in standard motor insulation layer



c) 60 mm 处截面烧蚀量

续图 13

根据以上获取的固体发动机三维烧蚀形貌数据，本文提取出了绝热层部分的三维烧蚀形貌数据，并对其进行了三维重构，获得了绝热层烧蚀后完整的三维云图数据，如图 14 所示，可直观全面地展示绝热层烧蚀量。图 14 也可直观显示出标准发动机的绝热层烧蚀情况集中在喷管连接处，从完整的三维烧蚀形貌可知，由于其部分碳化层未完全脱落，某些区域的烧蚀量显著减少，同时也可明显观察到烧蚀量分布不均匀，对此结果进行相应的数据分析，即可有效优化绝热层设计。

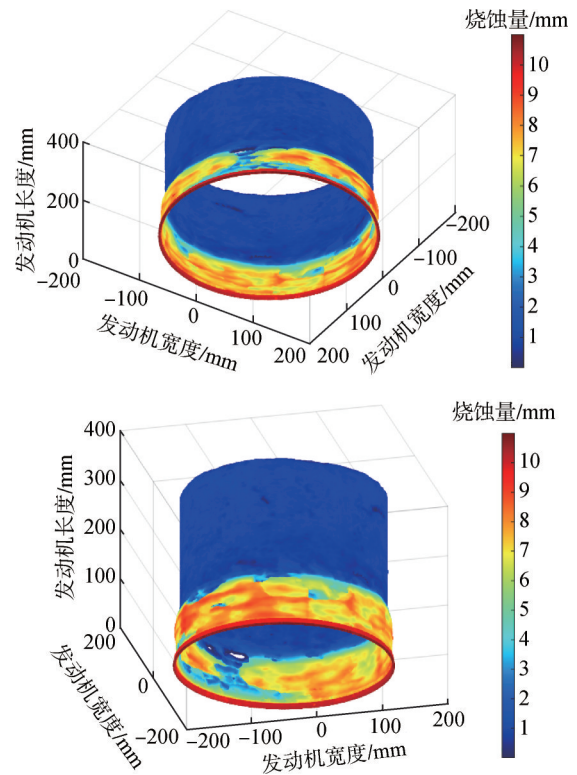
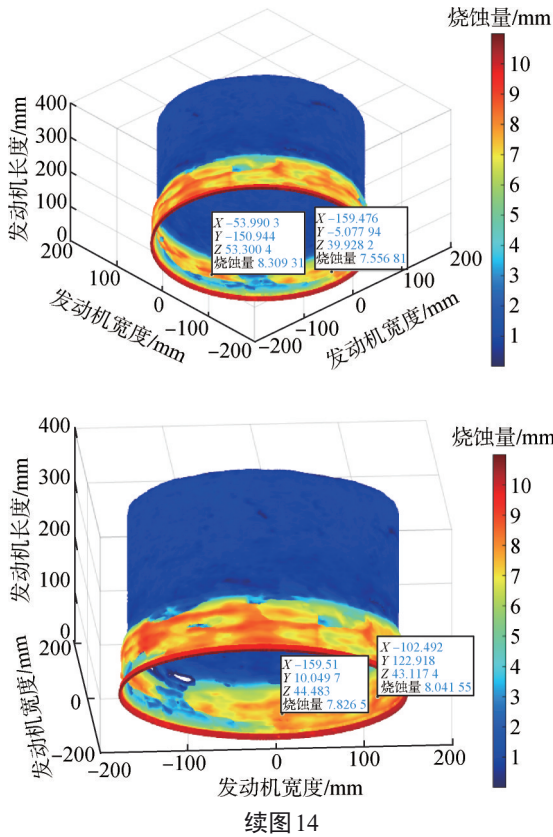


图 14 固体发动机绝热层烧蚀量三维云图

Fig.14 Three-dimensional cloud image of the ablation of solid motor insulation layer



续图 14

4 结束语

基于三维激光扫描的三维重构技术目前在很多领域都有十分广泛的应用，但是在固体发动机领域却鲜有应用。本文聚焦于三维激光扫描技术在固体发动机内绝热层烧蚀形貌的测量，相较于传统的绝热层烧蚀厚度的测量方法，该方法快速、高效、智能、准确。该技术具有较高的应用价值，对于今后绝热层烧蚀量的检测提供了一种新的测量方案。目前该技术在固体发动机领域还有巨大的提升空间，三维激光扫描技术同样可应用于喷管以及喉衬的测量。

本文对于发动机内绝热层的测量也具有较大的提升空间，其可以向全筒段完整烧蚀形貌重构的方向发展，针对发动机内绝热层形成一套完整的烧蚀云图，以便于日后为固体发动机领域绝热层优化提供精确全面的数据，实现固体发动机性能的有效提升。

参 考 文 献

[1] 任全彬, 何景轩, 刘伟凯, 著. 固体火箭发动机设计技术基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2016.
REN Quanbin, HE Jingxuan, LIU Weikai, et al. Fundamentals of solid rocket motor design technology[M]. Xi'an: Northwestern Ploytechnical University Press, 2016.

[2] 李江, 郭梦飞, 刘洋, 等. 固体发动机绝热材料烧蚀研究进展[J]. 宇

航学报, 2019, 40(10): 1146-1156.

LI Jiang, GUO Mengfei, LIU Yang, et al. Review on ablation research of insulation materials for soild rocker motors[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(10): 1146-1156.

[3] 李飞. 复杂热载荷下固体火箭冲压发动机绝热层烧蚀特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.

LI Fei. Study on ablation characteristics of solid rocket ramjet insulation under complex thermomechanical loading[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology December, 2021.

[4] 王建儒, 何国强, 许团委, 等. 分段式固体发动机绝热环对后封头绝热层烧蚀影响分析[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(3): 318-323.

WANG Jianru, HE Guoqiang, XU Tuanwei, et al. Effect of adoabatic inhibitor on afterward-dome insulation ablation in segmented solid rocker motors[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013, 36(3): 318-323.

[5] 温雄飞, 姜永春, 赵瑜, 等. 固体火箭发动机绝热层粒子侵蚀特性数值模拟研究[J]. 固体火箭技术, 2023, 46(5): 779-786.

WEN Xiongfei, LOU Yongchun, ZHAO Yu, et al. Numerical simulation on particle erosion characteristics of solid rocket motor insulation[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2023, 46(5): 779-786.

[6] 欧海英, 李晓宇, 李洪伟, 等. 固体火箭发动机设计优化参数驾驭技术与应用研究——设计空间确定算法及快速优化方法[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(6): 611-615.

OU Haiying, LI Xiaoyu, LI Hongwei, et al. Design optimization parameter steering method and its applocation in SRM design—design space ascertained arithmetic and quick optimization method[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009, 32(6): 611-615.

[7] 刘士兴, 朱妍, 宋亚杰, 等. 基于激光三角法的三维轮廓测量系统研制[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(12): 85-88.

LIU Shixing, ZHU Yan, SONG Yajie, et al. Development of 3D profile measurement system based on laser triangulation method[J]. Experiment Technology and Mangement, 2017, 34(12): 85-88.

[8] 黄林超. 基于双目立体视觉的三维重建技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

HUANG Linchao. Research on 3D recontruction technology based on binocular stereo vision[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[9] 吴钰莹. 几种特殊曲面上测地线的研究[D]. 通辽: 内蒙古民族大学, 2023.

WU Yuying. The study of godesics on several special curved surfaces[D]. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University, 2023.

[10] 陈斌, 郝厚印, 张晓东, 等. 基于测地线距离的空间非合作目标点云配准[J]. 航空学报, 2023, 44(1): 245-256.

CHEN Bin, XI Houyin, ZHANG Xiaodong, et al. Point cloud registration of space non-cooperative targets based on geodesic distance[J]. Acta Aeronautica er Astronautica Sonica, 2023, 44(1): 245-256.

- hydrogen turbopump[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(2): 86-93.
- [8] 杜家磊, 李铭, 王怡萱, 等. 支承结构参与振动对涡轮泵转子动特性的影响[J]. 推进技术, 2023, 44(4): 190-196.
DU Jialei, LI Ming, WANG Yixuan, et al. Effects of vibration of supporting structure on dynamic characteristics of a turbopump rotor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(4): 190-196.
- [9] 杜家磊, 李铭, 姜绪强, 等. 液体火箭发动机涡轮泵转子瞬态响应特性[J]. 振动, 测试与诊断, 2025, 45(2): 290-295+411.
DU Jialei, LI Ming, JIANG Xuqiang, et al. Transient response characteristics of turbine pump rotor of liquid rocket engine[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(2): 290-295+411.
- [10] 窦唯, 叶志明, 闫宇龙. 液体火箭发动机氢涡轮泵转子动力学特性研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(4): 17-21.
DOU Wei, YE Zhiming, YAN Yulong. Dynamic characteristics analysis of hydrogen turbine pump rotor of liquid-propellant rocket engine[J]. Missiles and Space Vehicles, 2016(4): 17-21.
- [11] 张明根, 郝小龙, 赵经明, 等. 航天伺服超高速涡轮泵转子动力学特性研究[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(5): 22-26.
ZHANG Minggen, HAO Xiaolong, ZHAO Jingming, et al. Study on rotor dynamic characteristics of aerospace servo hyperspeed turbopump[J]. Mechanical Research and Application, 2021, 34(5): 22-26.
- [12] 金路, 李爱民, 陈晖, 等. 配合间隙对涡轮泵转子低速平衡的影响研究[J]. 火箭推进, 2017, 43(4): 14-17+40.
JIN Lu, LI Aimin, CHEN Hui, et al. Effect of tolerance clearance on low-speed dynamic balance of turbopump rotor[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(4): 14-17+40.
- [13] 黄金平, 王珺, 黄道琼, 等. 涡轮泵滚动轴承-转子系统高速运行试验研究[J]. 火箭推进, 2020, 46(2): 50-56.
HUANG Jinping, WANG Jun, HUANG Daoqiong, et al. Experimental study on high-speed running of rolling bearing-rotor system of turbopump[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(2): 50-56.
- [14] 黄金平, 薛杰, 窦昱, 等. 涡轮泵准刚性转子的临界转速识别[J]. 火箭推进, 2022, 48(3): 25-31.
HUANG Jinping, XUE Jie, DOU Yu, et al. Critical speed identification of quasi-rigid rotor for turbo-pump[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(3): 25-31.
- [15] 郑继坤, 吴建军. 氢氧火箭发动机高速氧涡轮泵转子动力学特性研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2005(5): 5-9.
ZHENG Jikun, WU Jianjun. Research on rotor dynamics of LOX turbopump of LH₂/LO_x engine[J]. Missiles and Space Vehicles, 2005(5): 5-9.

作者简介

聂卫健 (1991—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为转子动力学。

唐虎标 (1991—), 男, 工程师, 主要研究方向为转子动力学。

马伟东 (1997—), 男, 工程师, 主要研究方向为转子动力学。

(上接第36页)

- [11] FENG Y, LEUNG K L, LI Y K, et al. An AI-based workflow for fast registration of UAV Produced 3D point clouds[J]. Remote Sensing, 2023, 15(21): 5163.
- [12] ZHANG J, YAO Y, DENG B. Fast and robust iterative closest point[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 44(7): 3450-3466.
- [13] 秦世伟, 潘国荣, 谷川, 等. 基于遗传算法的三维空间柱面拟合[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 604-607.
QIN Shiwei, PAN Guorong, GU Chuan, et al. 3D cylindrical fitting based on genetic algorithm[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(4): 604-607.
- [14] 刘元朋, 张定华. 逆向工程中圆柱体几何特征参数评估方法的研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(3): 310-311.
LIU Yuanpeng, ZHANG Dinghua. Research on the method of evaluating the cylindrical geometric characteristic parameters in reverse engineering[J]. Mechanical Science & Technology, 2005, 24(3): 310-311.
- [15] 王解先. 工业测量中一种二次曲面的拟合方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(1): 47-50.
WANG Jiexian. A quadric surface fitting method in industrial measurement[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(1): 47-50.

作者简介

巫恒 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体火箭发动机测控技术。

沈飞 (1976—), 男, 研究员, 主要研究方向为固体火箭发动机测控技术。

谢俊彦 (1971—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为图像数据处理。