

# 复杂变直径狭小空间谱域光学低相干三维测量方法

张涛<sup>1</sup>, 夏仁波<sup>1\*</sup>, 赵吉宾<sup>1\*</sup>, 李心锴<sup>1</sup>, 陆洋<sup>2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110169;

2. 中国石油大学(华东)控制科学与工程学院 青岛 266580)

Email: zhangtao2@sia.cn; xiarb@sia.cn; jbzhaos@sia.cn;

lixinnuo@sia.cn; luyang@upc.edu.cn

**摘要:** 高端制造业存在大量对部件性能影响极大的复杂变直径狭小空间, 这类空间的三维几何量测量难度大。为此, 提出了复杂变直径狭小空间谱域光学低相干三维测量方法, 研制了长悬臂小直径光学旋转扫描测头, 搭建并验证了测量系统的性能。实验结果表明, 系统可测直径范围5~30 mm、深径比范围5~10的狭小空间, 精度优于0.005 mm, 测量速度500点/秒。

**关键词:** 变直径狭小空间、谱域低相干、三维测量

## Spectral-domain Optical Low-coherence 3D Measurement Method of Complex Variable Diameter Narrow Space

ZHANG Tao<sup>1</sup> XIA Renbo<sup>1</sup> ZHAO Jibin<sup>1</sup> LI Xinnuo<sup>1</sup> LU Yang<sup>2</sup>

1. Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110169

2. School of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (UPC), Qingdao, 266580

**Abstract:** There exist a large number of complex narrow spaces with variable diameters that have a significant impact on the performance of components in high-end manufacturing, making it difficult to measure the three-dimensional geometric quantities of such spaces. Thus, an spectral-domain optical low-coherence 3D measurement method for complex narrow spaces with variable diameters is proposed. A long-cantilever small-diameter optical rotary scanning probe is developed, and the performance of the measurement system is built and verified. Experimental results show that the system can measure narrow spaces with diameters ranging from 5~30 mm and depth-to-diameter ratios ranging from 5~10, with an accuracy better than 0.005 mm and a measurement speed of over 500 points per second.

**Key words:** complex variable diameter narrow space; spectral-domain low-coherence; 3D measurement.

### 1、研究背景

航空、航天、兵器等高端制造业存在大量对零部件工作性能影响极大的复杂变直径狭小空间。

航发鼓筒内腔内轮廓的尺寸与粗糙度与航空发动机的震颤几率直接相关。此类狭小空间的直径变化范围普遍在 5~30 mm、深径比范围 5~10、加工精度误差要求小于 0.02 mm，部分呈现孔小腔大的特点。现有加工手段难以保证其加工精度 [7-10]。为保证加工构件的性能与理论设计值相符，目前普遍采用的方式是先加工构件，然后进行整机性能测试，并根据测试结果对构件进行再加工。但这种方式效率低、废品率高、成本大，而且会导致所加工出来的复杂变直径狭小空间与理论设计值无法闭环的问题，严重制约了构件性能和效能的精确评价与调控，更使得研究人员无法通过大量精密测量数据的积累找到构件不合格的根源与规律。

通过测量变直径狭小空间的各种几何量，进而利用测量结果来指导其加工过程，使其尽可能的不断逼近理论设计值，可在很大程度上缓解当前复杂变直径狭小空间精密加工水平不足导致的构件性能与理论设计值不符的瓶颈问题。因此，准确测量构件内部复杂变直径狭小空间点间的三维几何量具有重要意义。

根据复杂变直径狭小空间的特点，测量仪器应具备以下几个特点：1) 测量精度优于 0.005 mm；2) 测量动态范围 0~25 mm；3) 较高的测量效率（测量速度优于 500 点/秒）；4) 优异的空间可达性。现有测量复杂变直径狭小空间的方法主要有三坐标测量法、共聚焦法、全光纤频域干涉法、光学低相干干涉法等 [1-3]。但是三坐标法效率低且接触式测量可能造成零部件表面划伤、全光纤频域干涉法测量精度差、共聚焦法与光学低相干法测量动态范围小进而导致可达性不足。综上所述，现有方法无法满足复杂变直径狭小空间高效率、高精度、无损测量的综合性需求。

为此，本文提出了基于正交色散的高精度大动态范围谱域光学低相干测量方法，研制了长悬臂小直径内窥式光学旋转扫描测头，搭建了复杂变直径狭小空间三维扫描系统，并通过实验验证了系统的性能。

## 2 研究内容

### 2.1 谱域光学正交色散低相干测量方法与测头设计

基于正交色散的谱域光学低相干测量方法的原理如图 2 (a) 所示。宽带光源 (SLD) 发出的光被耦合器分为两路，一路为参考光，其被镜面返回，另一路为测量光，被待测件返回。返回的测量光与参考光在耦合器相遇形成低相干干涉，干涉光通过准直镜后被柱透镜聚焦在以利特罗角安装的虚像相控阵列 (VIPA) 上，从而产生水平方向的色散。水平方向色散光随后经过光栅进一步产生垂直方向的色散，随后通过聚焦透镜聚焦在面 CCD 阵列相机的成像靶面上。计算机对采集到的干涉光谱信号进行解调即可实现干涉光与测量光光程差的解算。该方法理论上可将传统谱域低相干测量方法的测量动态范围提升超过一个数量级。

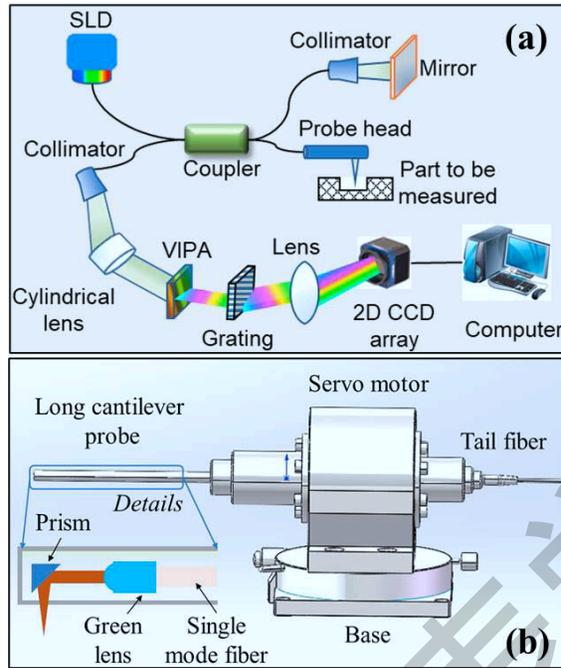


Figure.1 Principle of spectral-domain low-coherence and probe design

为适应复杂狭小空间变直径和孔小腔大的特点，研制了如图 2（b）所示的长悬臂光学旋转扫描测头。测头由长悬臂探针、伺服电机、尾纤等组成，前端探针可高速旋转带动测量光做圆周运动。

## 2.2 复杂变直径狭小空间三维测量系统搭建

如图 2（a）所示，将长悬臂光学旋转扫描测头固定在多轴位移平台上，并标定测头与多轴位移台的相对位姿关系，建立以位移台坐标系为基准的统一坐标系的狭小空间三维测量系统。

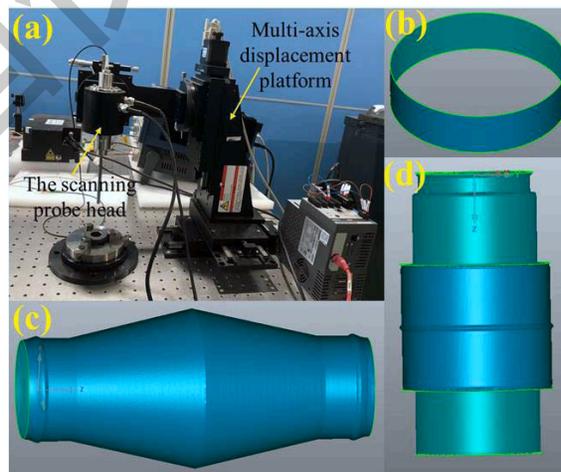


Figure.2 Complex variable diameter narrow space 3D measurement system and measurement results

如图 2 (b) 所示, 利用系统测量规格为 19.9980 mm 标准环规的直径。重复测量 25 次, 结果分布在 19.9959 mm~20.0006 mm, 测量速度为 500 点 / 秒。最大测量误差为 0.0026 mm。如图 2 (c) 和图 2 (d) 所示, 利用系统扫描了变直径狭小空间, 进一步验证了所提出方法的有效性。

### 3、结论

本文提出了复杂变直径狭小空间三维几何量光学谱域低相干三方法, 研制了面向大深径比狭小空间的长悬臂小直径光学旋转扫描测头, 搭建了精度高、速度快、可达性强的测量系统, 为狭小空间的测量提供了新的解决方案。

#### 参考文献

- [1] 何学军. 几何量数字化测量方法与装备的现状与发展趋势 [J]. 计测技术, 2021, 41(02): 35-40.  
HE Xuejun. Present Situation and Development Trend of Geometric Digital Measurement Method and Measuring Equipment[J]. Metrology and Measurement Technology, 2021, 41(02): 35-40.
- [2] ZHANG Tao, XIA Renbo, ZHAO Jibin, et al. Low coherence measurement methods for industrial parts with large surface reflectance variations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023,75: 1-14.
- [3] ZHANG Tao, XIA Renbo, ZHAO Jibin, et al. A Spectral Domain Low Coherence Method for Measuring Composite Windshield Thickness[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024,72: 1-14.