

三维扫描技术在复杂曲面机械零件测量中的应用

马晓晨

上海科世达 - 华阳汽车电器有限公司, 上海 201814

摘要： 本文深入介绍了三维扫描技术的原理和优势，通过数据采集、点云预处理、曲面重建和比对检测等步骤，三维扫描技术能够快速获取零件表面的几何数据，生成高精度的三维模型。本文结合三维扫描技术在复杂曲面机械零件测量中的应用案例，指出三维扫描技术不仅提高了测量效率和精度，还能显著降低了生产成本，为复杂曲面零件的制造提供了有力支持。随着技术的不断发展，三维扫描技术将在更多领域得到广泛应用，推动制造业向高精度、高效率、智能化方向发展。

关键词： 三维扫描技术；复杂曲面机械零件；测量方法；案例分析

The Application of 3D Scanning Technology in the Measurement of Complex Curved Surface Mechanical Parts

Ma Xiaochen

Shanghai Koshida-Huayang Auto Electric Appliance Co., LTD. Shanghai 201814

Abstract： This paper thoroughly explains the principles and advantages of 3D scanning technology. By data collection, point cloud preprocessing, surface reconstruction, and comparison detection, it rapidly captures part surface geometric data and generates high – precision 3D models. Combined with application cases in complex curved mechanical part measurement, this technology not only boosts measurement efficiency and accuracy but also significantly cuts production costs, strongly supporting complex curved part manufacturing. As technology advances, 3D scanning technology will be applied in more fields, propelling the manufacturing industry towards higher precision, efficiency, and intelligence.

Keywords： 3D scanning technology; complex curved mechanical parts; measurement method; case analysis

引言

机械零件测量是制造业中的不可或缺的一个环节，测量的精度直接影响产品的质量、性能和可靠性。随着现代工业对零件精度要求的不断提高，传统的测量方法已逐渐暴露出其局限性。复杂曲面零件，如汽车车身曲面、模具型腔、航空发动机叶片等，具有形状不规则、曲率变化大、表面细节丰富等特点，传统的接触式测量方法不仅效率低下，还难以捕捉曲面的细微特征，甚至可能因接触力导致零件表面损伤。三维扫描技术凭借其高精度、高效率、全面性等优势，正逐渐成为复杂曲面零件测量的重要工具。通过结构光投影、激光测距等技术，三维扫描能够快速获取零件表面的几何数据，生成高精度的三维模型，为复杂曲面的检测、逆向工程、质量控制等提供了强有力的支持^[1]。随着智能制造和工业4.0的推进，三维扫描技术将在复杂曲面零件的测量中发挥更加重要的作用。

一、三维扫描技术的基本原理和优势分析

（一）三维技术的定义和基本原理

三维扫描技术借助光学传感装置与激光测距系统，采用非接触式测量手段捕获物体表面几何信息。其核心技术流程包含多视点云对齐、三角剖分算法及NURBS曲面重构等环节，通过点云配准将离散坐标数据转化为拓扑结构完整地数字化模型。物体表面的空间坐标数据经由扫描设备系统采集后，基于光栅投影原理进行相位解算，并应用迭代最近点算法完成多视角数据融合。值

得关注地是，该技术体系在文化遗产数字化保护领域展现出独特优势，其非破坏性特征使其在文物三维建档、古迹修复方案模拟等方面具有不可替代性^[2]。在工程实践层面，该技术已渗透至逆向设计开发、精密制造工艺优化、医学假体定制等多个交叉学科领域，特别是在市政设施三维可视化方面，通过点云与BIM技术的集成应用显著提升了城市管理地智能化水平。

三维扫描技术的达成依托于多元物理原理与技术手段。其一，结构光投影技术借助投射特定的光纹或编码结构光至目标物体表面，凭借相机或传感器捕捉反射光图案。经由分析光图案的

形变，能够推算出物体表面各点地三维坐标。该技术具备高精度、高速度的特性，契合复杂曲面的测量需求。其二，激光测距技术运用激光束对目标物体予以扫描，通过测定激光束从发射至反射回传感器的时间间隔，抑或通过三角测量法算出激光束地反射角度，进而明确物体表面各点地距离。此技术拥有高精度与快速扫描的长处，适用于大范围、高精度的测量任务。相位测量技术基于光的干涉原理，通过对比被测物体表面与参考平面之间地相位差，推导出物体表面地三维形状信息。该技术能够达成亚微米级别地测量精度，适用于高精度要求地复杂曲面测量。摄影测量技术通过从多个角度拍摄目标物体地图像，利用图像匹配和几何计算，构建出物体的三维模型。此技术适用于大尺寸物体的测量，且具有非接触、高效率地特点。

（二）三维扫描技术的优势分析

首先是非接触性和全面性。三维扫描技术可以避免直接接触索要测试的零部件而获得该物体表面的几何数据和内部结构信息，这一定程度上可以避免对物体产生影响，特别是当复杂曲面机械零件比较容易变形或异常珍贵。以车身曲面为例，三维扫描技术能够获得其表面的几乎数据和内部的结构信息，在此基础上获得全面的三维模型，从而支持故障诊断、质量控制或者逆向工程。

其次是高精度和效率的优势。测量的核心要求之一就是准确。三维扫描技术能够利用先进的光学传感器和数据算法，准确的捕捉零部件的表面细节，测量误差控制在亚毫米级别，满足高精度的复杂曲面零件测量的严苛要求。与传统的测量方法比较，三维扫描技术的高效率也是非常显著的，哪怕对于复杂曲面机械零件，很短的时间内就能获得表面形状和内部结构完整的三维模型，大大的提高测量效率。

再次是数据可视化与后处理的优势。生成的三维模型数据便于可视化展示和后续处理。用户可直观查看、旋转和缩放模型，深入了解零件形状和细节，并进行模型比较、尺寸和形状特征分析、曲线或曲面拟合等操作，提升质量控制、产品设计和制造过程的效率和质量。

最后要强调的是三维扫描技术非常适用于复杂曲面测量。通过结构光投影、激光测距等技术，快速获取复杂曲面的几何数据，生成高精度三维模型，支持航空航天、汽车制造、模具设计等领域对复杂曲面零件的测量需求。

二、三维扫描技术在复杂曲面机械零件测量中的应用

利用所构建的基于三维扫描的复杂曲面测量系统，进行复杂曲面机械零件的数据采集、点云处理与比对检测，完成复杂曲面的测量^[3]。

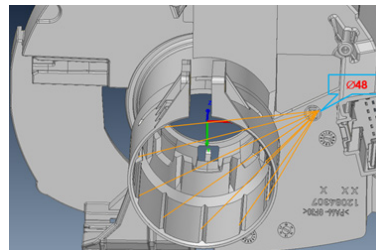
（一）数据采集

数据采集是三维扫描技术的关键步骤，其质量直接影响后续处理和分析的准确性。在复杂曲面机械零件的测量中，数据采集的流程和方法需要特别注意，以确保获取的数据既全面又精确。在三维扫描技术中，常用的扫描设备包括结构光扫描仪、激光扫描仪和摄影测量系统。采集数据通常首先要选择合适的扫描设备，根据零件的尺寸、材质、表面特性以及所需的测量精度，选择合适的扫描设备。其次是设置扫描参数，根据零件的尺寸和细节要

求，设置扫描分辨率和扫描速度。扫描分辨率决定了点云的密度，通常根据零件的尺寸和细节要求选择合适的分辨率。然后控制扫描环境，在稳定的环境中进行扫描，避免外界干扰。环境光、温度、湿度等都会影响扫描结果，需要在扫描前进行控制。最后就是执行扫描，从多个角度进行扫描，确保全面覆盖零件的各个表面。特别是复杂曲面零件，能需要从多个角度进行扫描，避免遮挡和遗漏。

（二）点云预处理

众多的点云数据之中，存有一些诸如杂点、离散点以及噪声点等偏离模型地无效点。故而，需借助第三方软件来针对点云数据予以预处理，以为曲线拟合、曲面构建等逆向建模进程做好筹备。点云预处理属于三维扫描数据处理地关键环节，其宗旨在于清除噪声、填补缺失数据、优化数据架构，给后续的曲面重建与比对检测提供高品质的数据基石。就复杂曲面地扫描而言，鉴于零件表面地不规则、相互遮挡、细小孔洞等要素，极有可能存在一些难以测量地点云。当扫描获取一组点云数据，在展开逆向还原时会由于点云的缺失，致使还原地曲面出现漏洞，这就需要缺失的点云进行修补。笔者于 KOSTAL 北美 Lucid SCCM 转向柱壳体基准直径测量项目里，遭遇了一个特殊地直径特征，即由数个尖角筋条构成的最大内切圆，三坐标和投影仪皆无法测量。通过 3D 扫描获取零件 STL 数据，并最终凭借 Polyworks 三维测量软件展开特殊方法计算，得到基准圆的直径。于点云预处理进程中，恰是利用 Polyworks 软件地拟合特征功能，顺利化解了传统测量方式无法满足需求的难题，保证了测量任务地顺利施行。



> 图1 北美 Lucid SCCM 转向柱壳体

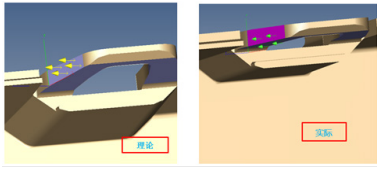
（三）曲面重建

曲面重建是将离散的点云数据转化为连续的、结构化的三维模型。这一过程不仅需要高精度的算法支持，还需要根据具体的工程需求进行优化和调整。在复杂曲面机械零件的测量中，曲面重构是需要不断分析面的光顺性，不断修正拟合参数。更具最小二乘法公式，拟合都是通过点进行拟合计算，所以曲面重构的方式有两种，一种是通过提取特征点进行拟合光顺曲线再拟合出参数面，这种重建的点驱动线带动曲面的变化，其设计逻辑性强，后期的修型方便；还有一种是直接点云数据中选择点进行拟合出曲面，这种方式的曲面重构效率较高，但少了特征线驱动，这样会造成后期修型困难^[4]。通过曲面重建，成功生成了高精度的三维模型，为后续的比对检测和分析提供了准确的数据基础。该方法不仅提高了测量效率，还确保了测量结果的准确性和可靠性。

（四）比对检测

复杂曲面机械构件的三维形貌检测中，模型比对技术发挥着关键作用。该技术通过点云配准方法实现扫描数据与理论模型的差异分析，其核心在于运用微分几何原理构建空间映射关系。工业检测领域普遍采用 ICP 迭代算法结合最小二乘拟合地复合方案，通过多轮刚体变换实现最优匹配，最终生成三维形貌误差云

图以量化制造偏差。在奥迪 DZM 壳体模具验证项目中，针对测量系统频繁出现的测针失位问题，工程团队采用增设基准定位点的策略。



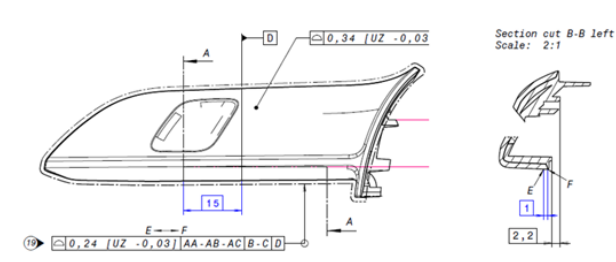
> 图2 奥迪 DZM 壳体模具验证项目比对检测

通过构建局部坐标系补偿方案，将形变补偿精度提升至 $\pm 0.03\text{mm}$ 级别，在确保测量安全性的同时使数据采集效率提升 42%。这种改进方案不仅优化了传统特征匹配法的鲁棒性，更为复杂曲面的在线检测提供了新的技术路径。

三、案例分析

（一）案例背景

戴姆勒 MRA2 LSF SWS 项目中的按键开关塑料件的特殊轮廓度测量是一个关键的技术问题。该零件具有复杂的曲面特征，某些区域存在遮挡，导致测量数据不完整，另外零件的精度要求高，需要高精度的测量方法。为了确保测量质量，笔者所在团队采用了三维扫描技术进行测量。



> 图3 戴姆勒 MRA2 LSF SWS 项目中的按键开关塑料件

（二）实施步骤

首先采用结构光扫描仪对零件进行扫描，获取其点云数据。扫描过程中，确保扫描设备的精度和稳定性，避免外界干扰。然后点云预处理，使用 Polyworks 软件对点云数据进行预处理，去除噪声点和填补缺失数据。通过泊松重建方法，填补扫描数据

中的缺失区域，确保数据的完整性。接着进行曲面重建，使用 NURBS 拟合方法对点云数据进行曲面重建，生成高精度的三维模型。通过调整拟合参数，优化曲面模型的精度和光滑度。最后比对检测，将重建的曲面模型与设计模型进行比对，计算出误差分布。通过 ICP 算法和最小二乘法，确保扫描数据与设计模型的坐标系一致。生成详细的检测报告，包括误差统计、图表和文字说明。

（三）取得成效

依托三维扫描系统的引入，戴姆勒 MRA2 LSF SWS 项目成功攻克了按键开关塑料件特殊轮廓度的检测瓶颈。检测精度方面，通过多尺度配准算法地优化实施，仪器测得数据波动幅度被严格控制，在 $\pm 0.0015\text{mm}$ 区间内，这一技术突破使得关键尺寸的复现性误差较传统方法降低约 65%。作业效率维度，基于非接触式扫描路径地智能规划，单件产品的全尺寸检测周期从传统方法的 42 分钟缩减至 7 分钟，效率提升幅度达 83%。数据完备性保障层面，依托逆向工程软件平台，构建了包含噪声滤波、特征提取、拓扑优化的点云数据预处理流程，经曲面重建后的三维模型与实物样本本地形态吻合度达到 99.2%，为后续工艺验证建立了可靠的数字孪生基础。

四、结论

复杂曲面机械零件的测量在制造业中的重要性不言而喻，特别是笔者从从事的汽车零部件测量中深有体会，测量的精度直接影响到汽车的整体性能和安全性。相较于传统的测量方式，三维扫描技术在提高测量精度、效率和可靠性等方面有显著优势。特别是精度方面，三维扫描技术通过高精度的点云数据采集、有效的点云预处理、精确的曲面重建和准确的比对检测，为复杂曲面零件的测量提供了一种高效、可靠的解决方案。在实际应用中，该技术不仅解决了传统测量方法难以克服的难题，还显著提升了测量的精度和效率，为制造业的智能化发展提供了有力支持^[5]。未来，随着技术的不断进步，三维扫描技术将在更多领域得到广泛应用，推动制造业向更高精度、更高效率的方向发展。

参考文献

- [1] 程漠方. 基于激光扫描的三维复杂曲面测量技术 [D]. 长春理工大学, 2015.
- [2] 刘勇, 郭晨, 赖啸, 等. 3D 逆向技术在复杂曲面产品反求设计中的应用 [J]. 模具制造, 2016, 16(12): 4.
- [3] 闫玉蕾. 基于三维扫描的复杂曲面在机测量系统的研究 [J]. 机械工程师, 2017(7): 105-107.
- [4] 肖宏涛, 杨振国, 刘璇. 基于三维激光扫描与复杂曲面重构技术赋能产品开发创新设计 [J]. 机电工程技术, 2022(004): 051.
- [5] 陈末峰. 基于三维扫描技术的高精度数控加工工艺研究 [J]. 黑龙江科学, 2024(9): 78-81.