# 空间自由曲面测量技术的动态与发展(一)

张凤林　虞和济　　虞　钢

(东北大学, 沈阳　110006)　(中科院力学所, 北京　100080)

**摘要**: 本文第一部分在定义空间自由曲面的基础上论述了空间自由曲面测量技术——扫描测量的定义、扫描测量分类及其优缺点。

**关键词**: 空间自由曲面　测量　扫描　分析

## 一、空间自由曲面与典型零件

根据被测零件的几何特性, 可将其分为两大类。一类零件的主要表面或被加工部位由标准体素如立方体、矩形体、圆柱体、球体、锥体等构成, 这类零件比较常见, 如轴类、箱类等, 其形状比较规范, 易于测量且测量精度高; 另一类零件的主要表面或加工部位由空间自由曲面构成, 常见的有汽车车身模具(凸凹模)、注塑模、轮机叶片等, 其表面形状比较复杂, 测量比较困难, 测量精度低, 尤其是内曲面测量更是如此。本论文讨论的就是针对第二类零件的测量。

## 二、扫描测量——空间自由曲面的测量技术

扫描方式是获得空间自由曲面形状与尺寸的基本方法。各种测量装置都是靠扫描方式完成对空间自由曲面的测量的, 尽管实现扫描的方法不同。

所谓扫描就是利用测头等传感器对待测表面进行坐标点测量的过程, 其测量方式可以是连续的, 也可以是间断的。突出特点是运动轨迹有很强的规律性, 图1所示的就是一种接触式扫描测量。测头与工件表面相接触, 测头的运动轨迹彼此平行。

针对不同形状的工件表面测量, 其扫描轨迹也有所区别, 图2是目前测量系统常用的扫描轨迹。通过对其轨迹分析可以看出, 大多采用两个坐标运动, 而另一坐标(这里指X、Y、Z 直角坐标)步进的测量方式, 见图2a、2b、2c、2d、2e; 有时三轴同时运动, 但此时有两个轴运动规律性很强, 运动轨迹在其所在的平面投影为直线, 如图2f、2g、2h。这样做的目的是对运动轨迹的控制尽量简单, 以降低成本, 同时数据处理也方便。

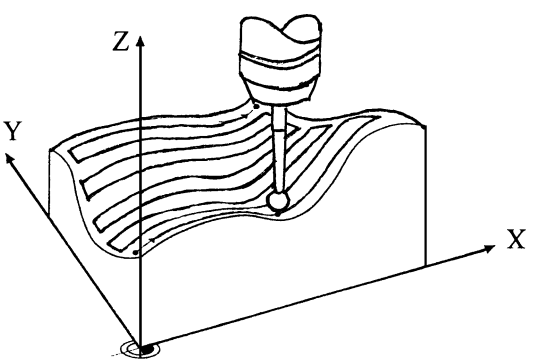


图1　扫描测量示意图

对工件表面的测量范围即测量区域也有规定。当扫描到测量区域边界限后, 或进给停止, 或反向。规定测量区域的方法常见的有两种:

(1) 设置极限位置, 如设置$+x$, $-x$, $+y$, $-y$,



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$+z$, $-z$ 的极限。

(2) 定义一个多边形区域为测量区域, 该多边形由若干个点构成。

第1种测量区域的设定方法需设定的参数比较少, 占内存少, 设置容易, 控制也方便, 适合于比较规矩的形状或表面测量。第2种设定方法与第1种正相反, 适合于复杂的表面测试。空间自由曲面主要由复杂的曲线、曲面构成, 测量区域也较复杂, 常采用第2种测量区域的设定方式。

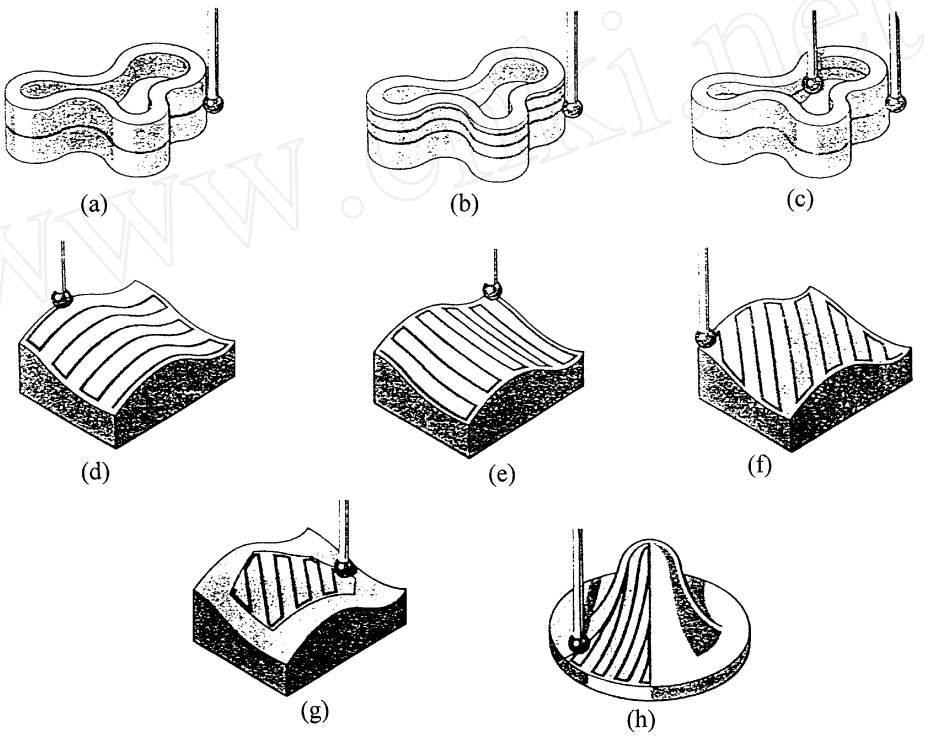


图2　扫描方式与轨迹

## 三、扫描测量分类

### 1. 根据测头与被测件表面空间位置关系分类

根据测头与被测件表面空间位置的关系分类, 可将其分为接触式测量和非接触式两大类。测头测量时与被测工件表面接触的为接触式测量, 否则为非接触式测量。

接触式测头又分为硬测头和软测头两类。硬测头主要用于手动测量和精度要求不高的场合, 而软测头是目前三坐标测量机等普遍使用的测量头。软测量头主要有三维测微测量头和触发式测量头两种。

文献[2]介绍了一种触针式曲面形貌轮廓的传感器, 其工作原理见图3。激光器5发出的光, 入射到全息衍射光栅4表面发生衍射, 产生±1级衍射光, 此二级衍射光分别经反射镜6反射, 合于分光镜7, 并发生干涉, 产生干涉条纹。经放大镜将此干涉条纹放大到适当宽度, 由光电探测器在 $P$ 面接收。

测量时, 触针以一定的速度沿工件表面拖动, 工件表面不平引起触针上下运动, 带动光栅绕支点转动, 从而使干涉条纹发生相应的移动。光电探测器对干涉条纹进行采样计数, 并将在整个测量



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

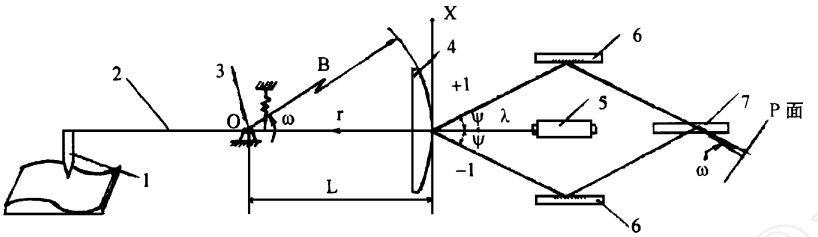


图3　触针式激光测量系统示意图

1. 触针; 2. 测杆; 3. 弹簧; 4. *RCHD* 光栅; 5. 激光器; 6. 反光镜; 7. 分光镜

过程中所获得的一系列数据送计算机进行处理, 即可实现对工件表面形貌的分析及评定。

非接触式扫描测量方法也较多, 如采用光电式、电容式测头, 利用光电效应式电容量等参数的变化求得测头与被测件表面的距离和空间位置关系, 进行位置坐标测量。文献[1]论述了一个利用激光扫描图象测量的方法对三维内轮廓曲面进行非接触测量的实例。图4是测量系统示意图。其主要组成部分是光学系统(*He—Ne* 激光器)、数控扫描、计算机图象处理(*CCD* 图象传感器)和计算机控制系统等, 其中1为被测工件, 2为扫描测量装置。该系统的基本工作原理是主从双三角法测量。内轮廓表面上的各点的坐标与 φ角有关, 固定 φ角, 顺次测量曲面轮廓上对应于 θ角的坐标值, 可得到一条对应 θ角的平面曲线, 改变 φ角, 重复对曲面进行测量, 可得到不同 φ角的各条平面曲线, 经图形处理就可获得工件的三维内曲面轮廓。

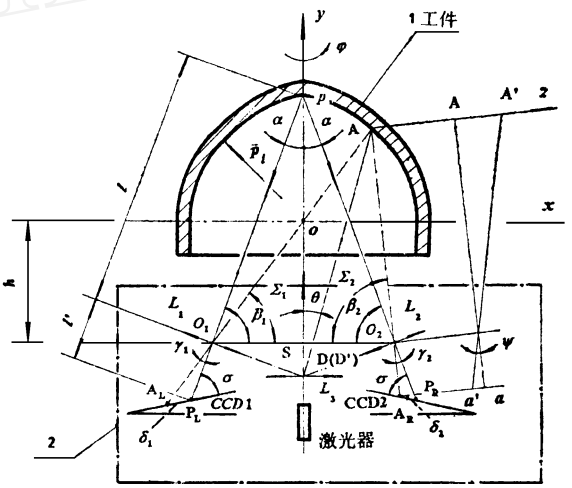


图4　非接触内轮廓激光表面测量原理

激光扫描测量的测量速度比较高, 但工作可靠性及工作稳定程度不如软测头。触发式软测头是通过机械接触发出信号的, 输出信号幅值差较大, 可达5V、12V 或24V , 对环境适应性强。其测量精度一般可以满足加工要求。

**2. 根据加工与测量时间、空间的位置关系分类**

根据扫描测量工件表面时是否同时对工件表面进行加工来分类, 可分为以下三类:

(1) 在线测量　加工与测量同步。典型加工工艺是仿形加工, 这种加工方法在传统加工设备上应用较多, 如各种仿形加工机床。特点是加工与测量同步, 效率高, 无二次装夹误差, 但加工精度不高, 加工后需采用其他方法进行再加工或修整; 需专用的仿形加工设备, 设备投资较大。适合于大批量仿形加工单一或同类型工件, 有被数控机床取代的趋势, 中小批量不宜采用。

(2)　离线测量　加工与测量不在一台设备上进行, 且二者不同步, 先测量, 后加工。这种测量方法目前应用较广, 典型的测量设备是三坐标测量机。进行工件表面测量后, 到另一台加工机床进行加工。离线测量可发挥测量系统的功能, 测量精度高, 同时对加工设备的专用程度要求不高。由于测量与加工不在一台设备上进行, 需对测量数据进行必要的调整以减小两次装夹误差的影响。

(3) 准在线测量　测量与加工在同一台设备上进行, 但不同步, 如配有测量系统的数控铣床和加工中心。这时, 与仿形加工一样, 工件一次装夹就完成测量与加工, 省时且测量成体低, 无二次装



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

夹误差。目前有些公司已开发出类似的产品。

如有可能, 应尽量采用离线测量或准在线测量方式。

**3. 根据对扫描控制的方式分类**

这种分类方法将扫描测量系统分为三类: 手动控制、自动控制和自适应控制。有时一台设备同时具有其中两种或三种控制。

(1) 手动控制测量　这种控制方式是最原始的也是最直观的测量方式, 目前机器人的示教功能属于此类, 它是由人操作控制盒(机器人上为示教盒)控制引导测头, 或直接由人手引导测头到指定位置点进行测量的方法。这种测量方法有如下特点: 智能高, 操作者可根据工件形状、精度等自行更改测量轨迹与点数; 劳动强度大, 速度低, 精度低, 效率低, 适用于简单形状的工件测量。

(2) 自动控制测量　这种测量方式目前应用最多, 特别是三维曲面的测量。根据被测工件表面形状、精度要求等, 设定测量轨迹等参数, 编写测量程序, 由计算机控制完成测量工作, 测头根据计算机的测量程序, 按照给定轨迹、步长、区域等参数, 自动完成对工件表面的测量。其特点是测量速度快, 测量精度高。

(3) 自适应控制测量(AC-Adaptive Control)　这是自动控制测量的发展, 其含义是根据过程参数的测量, 自动调整运动参数, 以达到过程或目标的最优解。测量时控制目标可以是多种多样的, 相应地控制手段也多种。例如, 在扫描过程中如第一次遇到尖角等曲率变化比较大的地方, 那么在以后相同的扫描轨迹中, 当接近该点坐标时, 就自动减速以防碰撞。这种测量方法测量速度高, 精度不低于自动测量, 效率高。

综上所述, 关于空间自由曲面的测量可得出以下结论:

①空间自由曲面的位置测量采用扫描方式, 其扫描轨迹根据工件的不同而不同;

②根据测头的工作原理将扫描测量分为接触式和非接触式测量两种;

③根据测量与加工的时间与空间的位置关系将扫描测量分为在线测量、离线测量和准在线测量三种;

④根据测量系统的控制方式将测量系统分为手动控制、自动控制和自适应控制三种。

# Review of the Development of Measuring Techniques for 3-D Compound Free Surface(Ⅰ)

ZHANG Fenglin, YU Heji
(Northeastern University, Shengyang　110006)
YU Gang
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing　100080)

Abstract: This is the first part of the paper. Based on the definition of 3-D compound free surface, the scanning measurement techniques for 3-D compound free surface, including the definition, classification and features are described.

Key Words: 3-D Compound Free Surface, Scanning Measurement Technique



© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net