



第七章 数字化测量技术

7-1 概述—数字化测量的基本概念

7-2 坐标测量机及其编程

7-3 大尺寸测量

- ☐ 大尺寸测量概述
- ☐ 常用大尺寸测量仪器及分类
- ☐ 便携式测量机
- ☐ 激光跟踪仪
- ☐ 大尺寸测量仪器的典型应用

7-4 在机测量

- ☐ 在机测量系统的组成
- ☐ 数控机床的测头系统
- ☐ 在机测量的应用场合和实例



7-1 概述

一、计算机辅助质量管理（CA Quality management, CAQ）

CAQ技术：是指利用计算机技术对企业质量管理工作与过程提供支持辅助的一系列技术。

CAQ系统：运用计算机技术实现**质量数据采集、分析、处理和传递的自动化**，实现质量控制和质量管理的自动化。CAQ系统是CIMS(集成数字化制造)的重要组成部分： **$CIMS = MIS + CAD/CAPP/CAM + MAS + CAQ$**

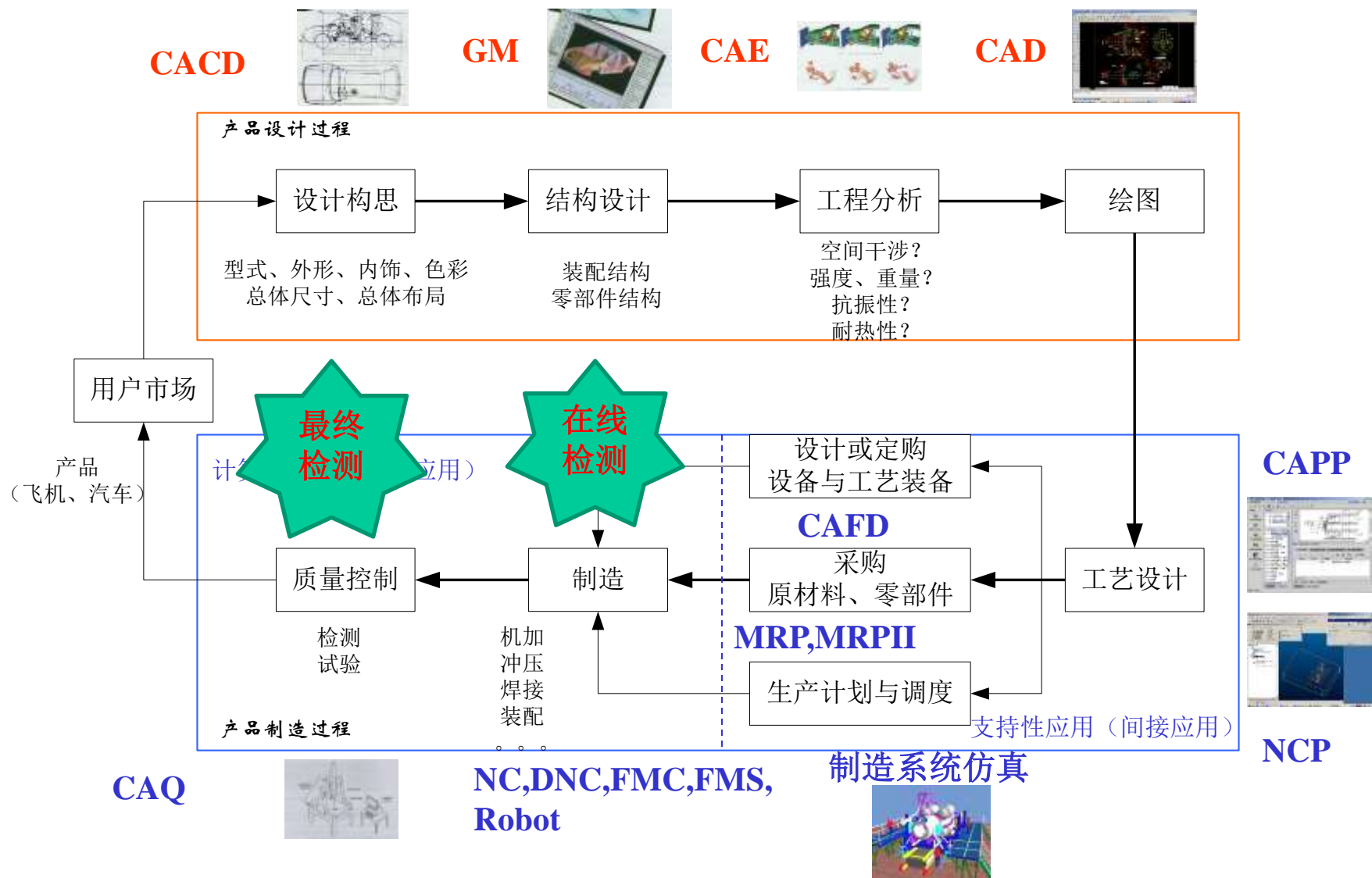
与产品设计（CAD）和制造过程（CAPP/CAM）相比，计算机技术在质量管理中（**CAQ**）的**系统性应用相对较晚**。很长一段时间计算机的应用仅限于**在线检测技术和现场质量控制技术（最基础）**，而没有形成完整的技术体系和应用系统。

从现代质量工程观点看，一个完整的CAQ系统应包括以下几个部分：

- 质量计划
- **检测与质量数据采集**
- 质量评价与控制
- 质量综合管理（质量成本、计量器具、质量指标统计）



计算机辅助质量控制在制造工程中的地位





计算机辅助测量的概念

二、计算机辅助测量/检测的概念

计算机辅助测量（**Computer Aided Measurement/Metrology**）/数字化测量
相关名词术语：

- 数控测量
- 计算机辅助检测（Computer Aided Inspection, CAI）
- 计算机辅助质量控制（Computer Aided Quality, CAQ）

外延：Metrology/M Measurement < Inspection < Quality

计算机辅助测量技术的趋势：

设计、加工/装配、测量技术三者相互促进而向前发展。计算机辅助测量是现代制造技术中的重要一环。随着CAD、CAPP/CAM、CNC技术的发展，对测量技术(**CAI**)提出了更高要求（**自动化、高效、高精度**等）。

计算机辅助测量的概念：（类似数控加工，又称数控测量）

在计算机控制或辅助下，测量设备或仪器按照预先编制的**测量程序**顺序地进行坐标测量或数据采集，并把测量数据记录在存储设备（内存/硬盘）或直接打印输出结果和有关分析报告。见下图。

数控测量（检测）的概念

坐标测量机

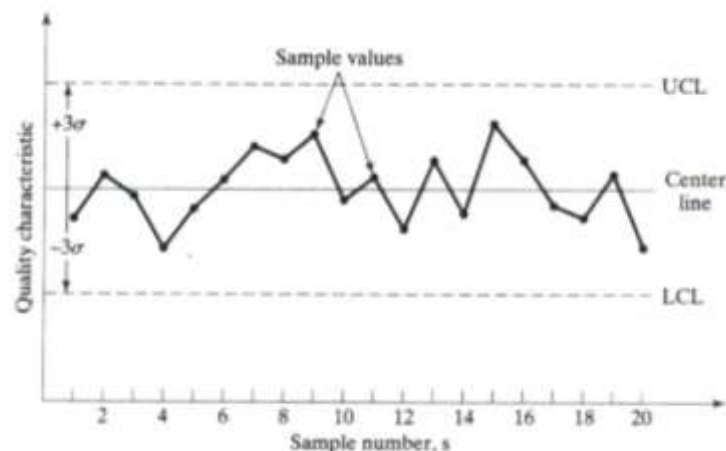
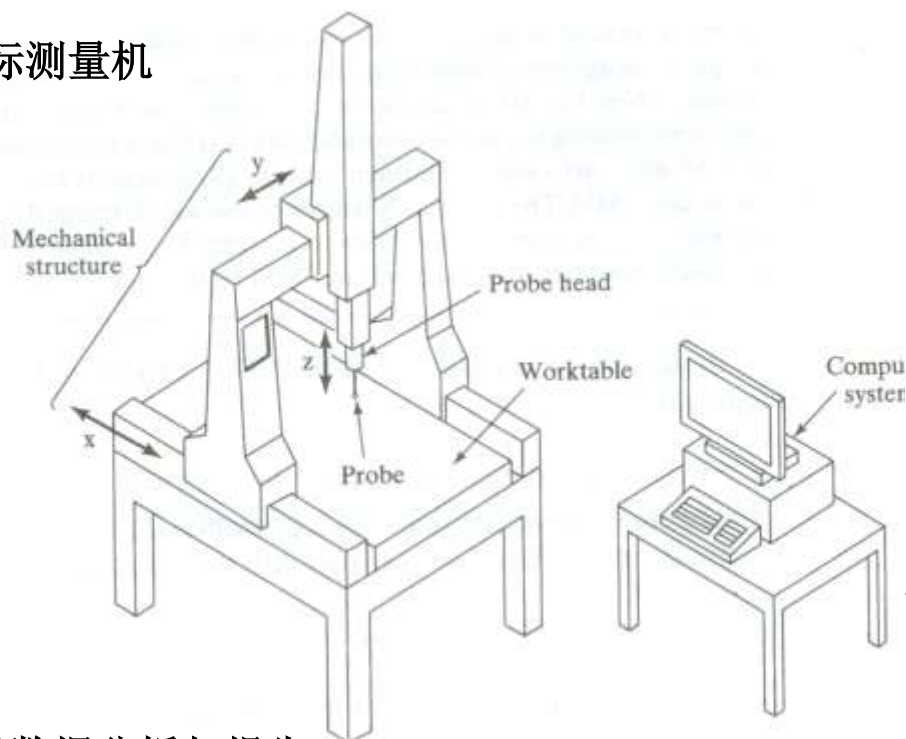


Figure 21.2 Control chart.

控制图

测量数据分析与报告

| Process Capability Index (PCI) | Tolerance = Number of Standard Deviations | Defect Rate (%) | Defective Parts per Million | Comments |
|--------------------------------|---|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 0.333 | ± 1.0 | 31.74 | 317,400 | Sortation required. |
| 0.667 | ± 2.0 | 4.56 | 45,600 | Sortation required. |
| 1.000 | ± 3.0 | 0.27 | 2,700 | Tolerance = process capability. |
| 1.333 | ± 4.0 | 0.0063 | 63 | Significant reduction in defects. |
| 1.667 | ± 5.0 | 0.000057 | 0.57 | Rare occurrence of defects. |
| 2.000 | ± 6.0 | 0.000002 | 0.002 | Defects almost never occur. |

计算机辅助测量系统的分类 (1)

三、计算机辅助测量系统的分类

- (1) 坐标测量机 (Coordinate Measurement Machine, CMM) 系统
- (2) 便携式坐标测量机 (Portable CMM) --便携式测量机系统(测量手臂)

CMM

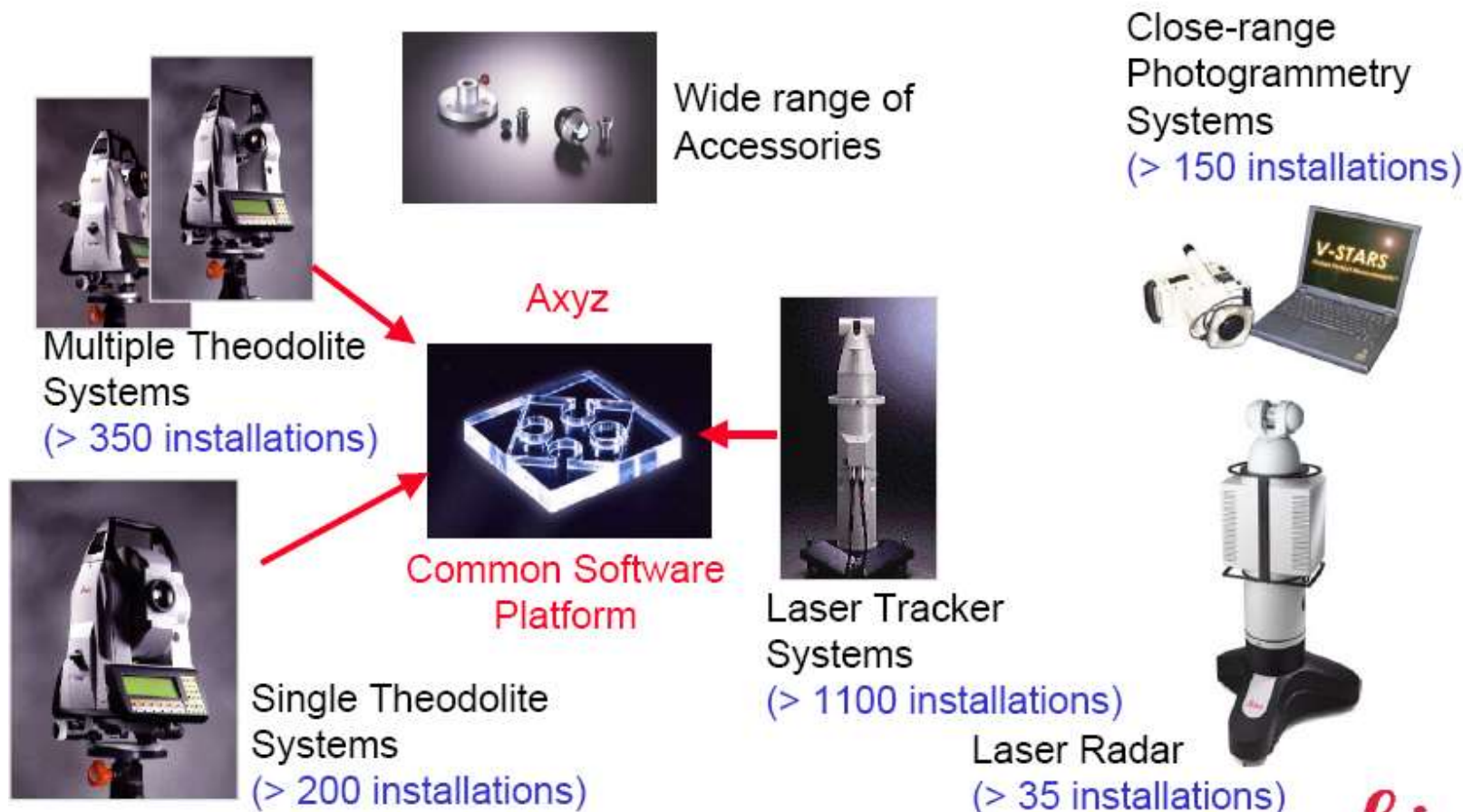


Portable CMM



计算机辅助测量系统的分类 (2)

- (3) 经纬仪 (Theodolites) 测量系统
- (4) 激光跟踪仪 (Laser Tracker) 系统
- (5) 数字照相 (摄影) 系统 (Photogrammetry)
- (6) 激光扫描系统 (Laser Scanner)





7-2 坐标测量机及其编程

- 一、坐标测量机
- 二、测头（探测系统）与测量方法
- 三、数控测量编程与执行

7-2 坐标测量机及其编程

一、坐标测量机

(CMM, Coordinate Measurement Machine)

1. 什么是坐标测量机？

坐标测量是以**直角坐标**为参考系，检测零件轮廓上各被**测点的坐标值**，并对其数据进行处理，求得零件各几何形状、位置和尺寸精度的测量技术。

CMM 是集**光、机、电、计算机及自动控制等技术**为一体的**高技术机电一体化设备**，是制造工程中实现检测和质量管理的坐标测量自动化所必不可少重要设备。可纳入自动化生产和柔性加工线中。



观看视频：测量机组成及运行



坐标测量机的发展沿革

2. 坐标测量机的发展历史、现状

国外：

1959年，英国Freeanti公司，世界上第一台数字移动式三坐标测量机。

60年代末，初级阶段。约有近10个国家、10多个公司生产测量机。

80年代，快速发展阶段。德国蔡司（Zeiss）和莱茨（Leitz）、意大利DEA、美国布朗-夏普（Brown&Sharp）和日本的三丰（Mitutoyo）等公司不断推出新产品。

90年代，广泛应用阶段。

国内：

第一阶段，70年代。三坐标测量机的研制和样机试制。

第二阶段，80年代。引进国外先进技术，初步形成国产测量机的生产能力。

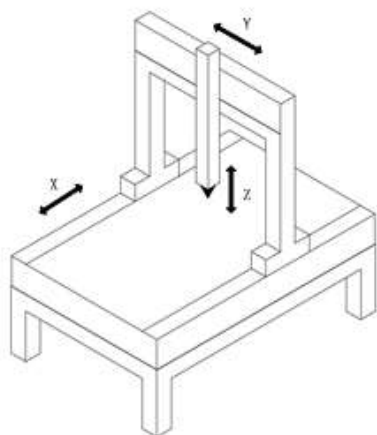
第三阶段，90年代至今。目前已具备生产精密坐标测量机的生产能力，并开始占领国内市场。

主要厂商：航空精密机械研究所（303所）、青岛前哨测量设备公司(海克斯康-Hexagon集团)、西安爱德华测量设备公司、上海机床厂、北京机床研究所等

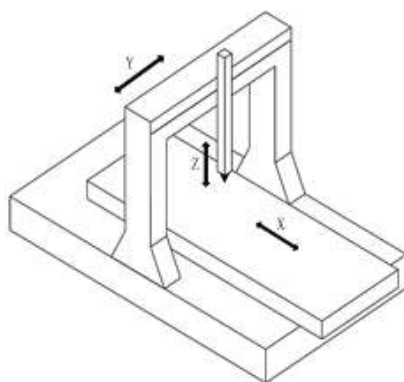
(1) 坐标测量机的结构形式

3. 坐标测量机的结构形式

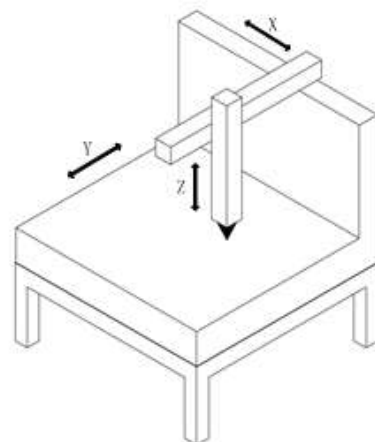
基本要求： 1) 空间开阔、便于工件安装和操作； 2) 正常运动条件下有足够刚度。



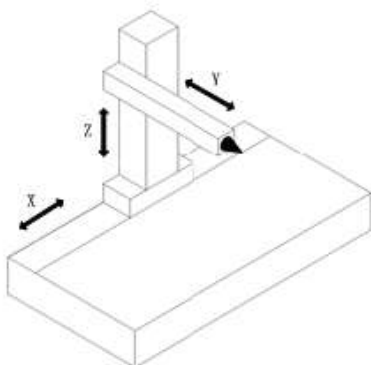
(a) 移动桥式



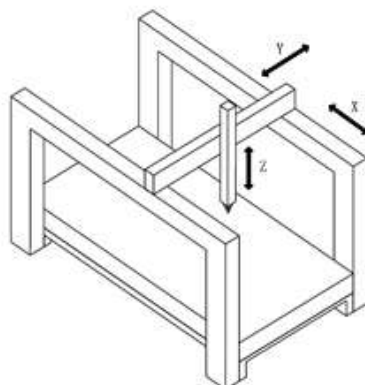
(b) 固定桥式



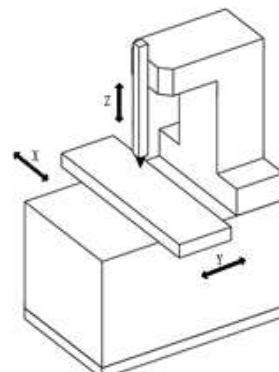
(c) 固定工作台悬臂式



(d) 水平臂式



(e) 龙门式



(f) 立柱式

(2)典型产品：桥式坐标测量机

桥式测量机

通用的、高精度桥式坐标测量机，可满足现代制造企业生产的 80% 工件的检测需要。经过多年验证的设计技术，能够完成各种精密的检测任务，并为不同形状工件提供了完美的检测方案，可广泛使用在车间现场、质量控制、设计、工艺等各个部门。

桥式三坐标测量机

| 机型 * | 行程范围 (mm) | MPE _E (μ m) |
|---------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Micro-Hite 3D | 460 x 510 x 420 460 x 710 x 420 | 3.0 + 4L/1000 |



瑞士精密制造，并成为当今同类产品性价比最好的机型之一。采用广泛验证的技术，操作简便，使得操作者能够使用几个小时后就可以测量复杂的工件。具有手动和自动两种版本。



Inspector 是面向现代制造企业的通用检测方案，为各种规模的零部件加工和制造企业提供了一种方便、快捷、可靠的几何量计量解决方案。不仅能够及时获取产品几何量计量数据，为高品质的产品制造提供保证，同时还能够缩短用户的投资回报周期，获取最大的收益。

- 通用性好、
- 精度高、
- 可满足80%零件检测

(2) 典型产品：龙门式坐标测量机



龙门式测量机

大尺寸工件的测量需要坚固的开敞式龙门结构，从而可减少工件的上/下料时间，同时允许操作者在操作时能够靠近被测工件。来自于意大利 DEA 的三大龙门式测量机系列，能够有效地完成测量工作，同时保持很高的精度完成大型和超大型工件的测量和对于复杂形状和自由曲面的扫描。

龙门式测量机

| 机型* | 行程范围 (mm) | MPE _E (μm) |
|-------------------------|---|--------------------------------|
| Alpha Status | 2000 x 3300 x 1000 到 2500 x 5000 x 1800 | 6 + 7 L/1000 12 + 12 L/1000 |
| Alpha Image | 2000 x 3300 x 1000 到 2500 x 5000 x 1800 | 4 + 4 L/1000 8 + 8 L/1000 |
| Delta Slant Classic | 2000 x 3300 x 1800 到 3000 x 8000 x 2500 | 5.5 + 6L/1000 10 + 10L/1000 |
| Delta Slant Performance | 2000 x 3300 x 1800 到 3000 x 8000 x 2500 | 4.5 + 4L/1000 8 + 9L/1000 |
| Lambda SP | 3000 x 5100 x 2500 到 4000 x 10000 x 2500 | 7 + 7 L/1000 8 + 8 L/1000 |

* 具体尺寸和性能，请参考具体产品技术数据表



DEA 推出的 Alpha 系列，是经济有效的中大型龙门把高效率、高精度与良好的操作可靠性有效地结合在一起，减少了保有成本。

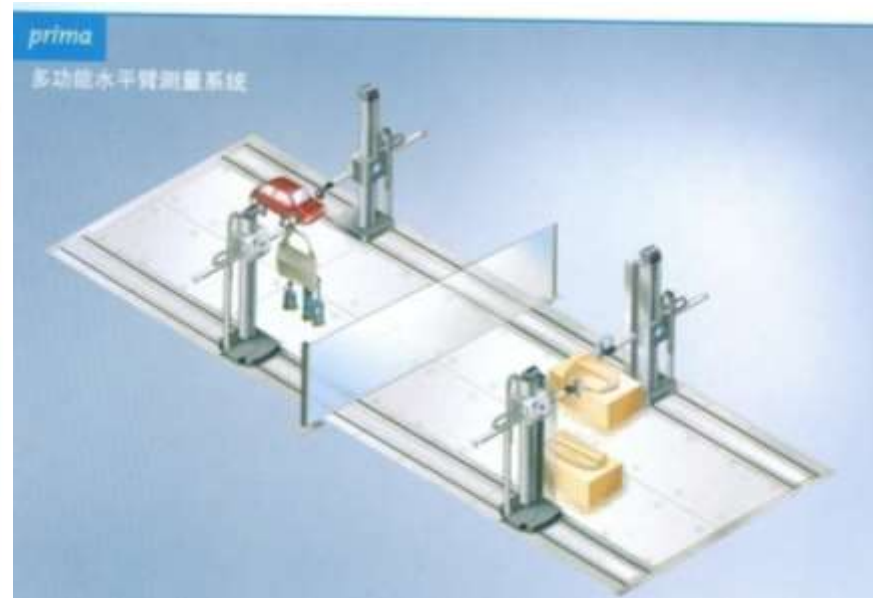
配置各种开关式测头、模拟测头、旋转测头、自型、非接触式测头。使 Alpha 测量机能满足各种工



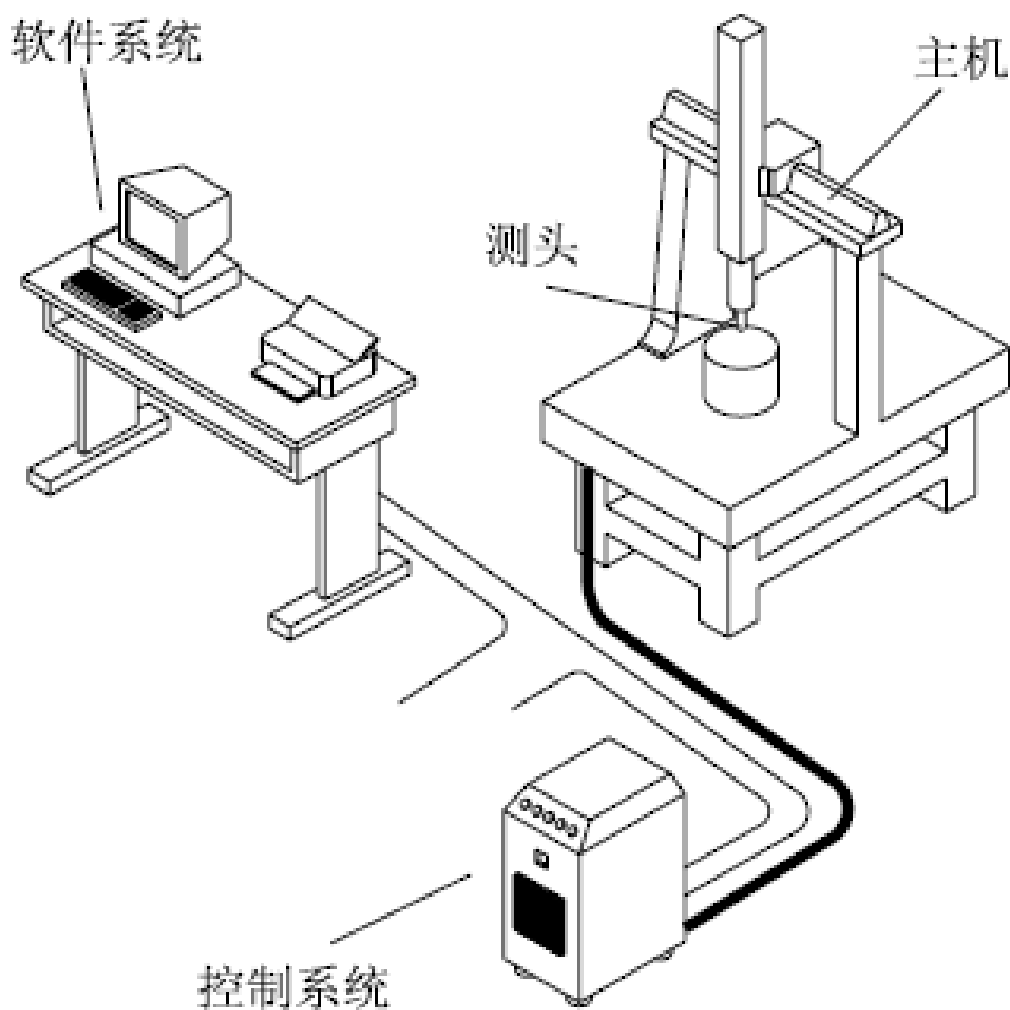
(2) 典型产品：水平臂式坐标测量机



Toro 系列水平臂测量机结构紧凑，功能强大，在节约资金的同时，为测量形状、尺寸和位置提供了足够的灵活性。是一种实用的，具备很高性价比的测量机，可广泛应用于生产现场，实现对各种零件的精密测量，完成逆向工程应用，从而有效保证了客户产品的质量，并为设计、制造提供了必要的检测数据。



(3) 坐标测量机的组成



1、主机（机械）系统

2、测头系统

关键部件，其精度的高低很大程度决定了测量机的测量重复性及精度。

3、控制系统

实现运动、通信控制、逻辑控制等。

4、测量软件系统

用于操作测量机及相关装置的一组程序。

硬测头与软测头

二、测头与测量方法

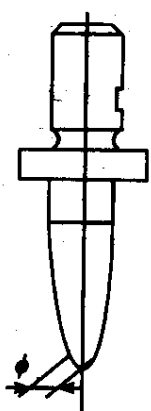
1. 测头

测头作为一种测量工具（相当于加工时的刀具），装于测量机的垂直运动部件（相当于机床主轴）中。测头触到工件表面即发出信号。

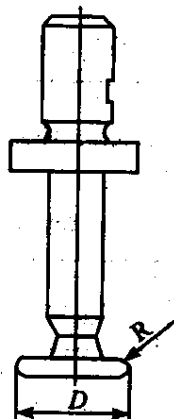
测量机的工作效率和精度与测量头密切相关。

2. 测头的分类（接触式、非接触式两大类）

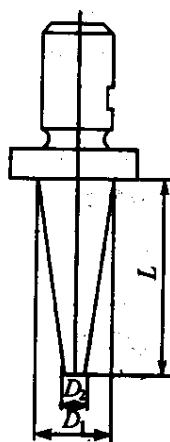
接触式测头：硬测头和软测头



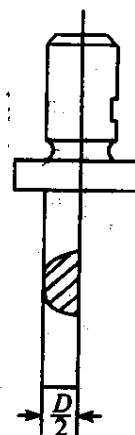
(a) 球形测头



(b) 盘形测头



(c) 锥形测头



(d) 回转1/4柱面测头

硬测头



软测头

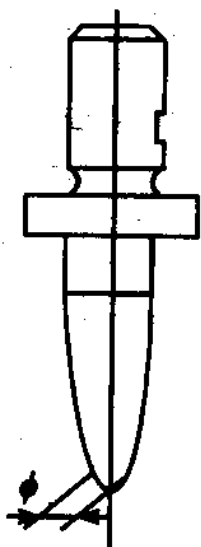
接触式测头

(1) 机械接触式测头——硬测头

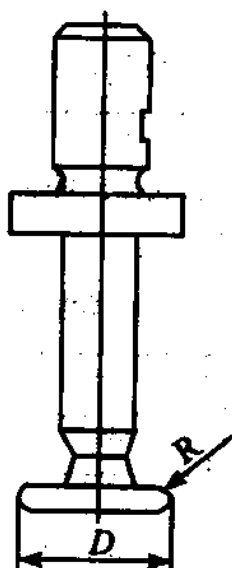
又称为“刚性测头”、“硬测头”，一般用于静态测量，大多作为接触元件使用。这种测头**没有传感系统，无量程、不发讯**，只是一个**纯机械式**接触头。

主要**用于手动测量**。由于人工直接操作，故测头的测量力不易控制，只适于作一般精度的测量。由于其明显的缺点，目前这种测头已很少使用。

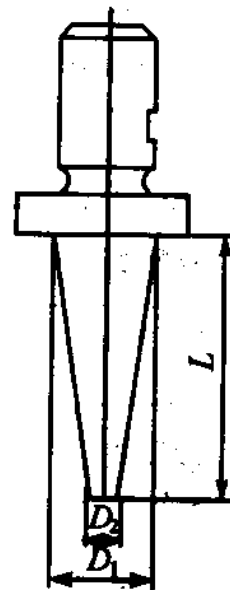
硬测头



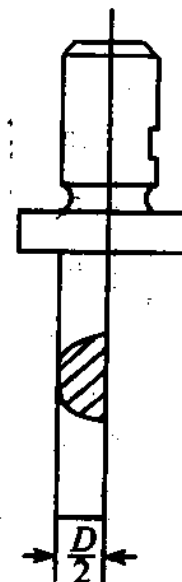
(a) 球形测头



(b) 盘形测头



(c) 锥形测头



(d) 回转1/4柱面测头

接触式测头

(2) 电气接触式测头——软测头

电气接触式测头又称为“软测头”，适于动态测量。这种测头作为**测量传感器**，是**唯一与工件接触的部件**，每测量一个点时，测头传感部分总有一个“**接触—偏转—发讯—回复**”的过程，测头的测端与被测件接触后可作偏移，传感器输出模拟位移量的信号。

这种测头不但可用于**瞄准(即过零发讯)**，还可用于**测微(即测出给定坐标值的偏差值)**。因此按其功能，电气接触式测头又可分为：

作瞄准用的开关测头——触发式测头

具有测微功能的三向测头——扫描式测头

电气接触式测头是目前使用最多的测头。



展示教具：在机测头

坐标测量机的软测头

- 1, 测尖为球状**红宝石**。一种刚玉，硬度高、密度小，因此特别耐磨且惯量小
- 2, 单测尖、多测尖。
- 3, 测杆的长短不一。



观看视频：更换测头

分度式测头座

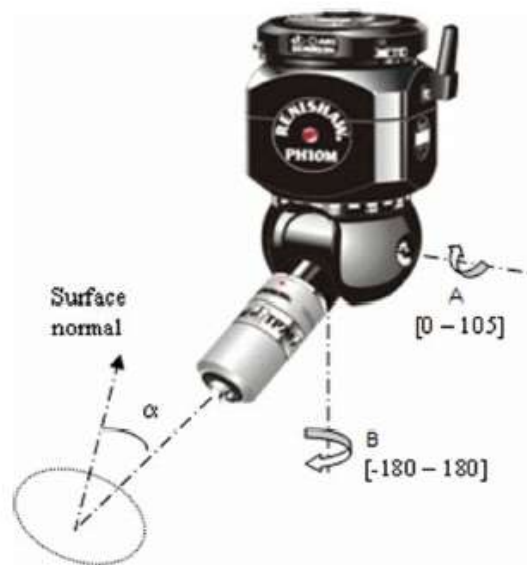
手动分度测头座



测头轴的动力可以手动也可以由坐标测量机的轴来提供，而且测头被锁死在一系列离散可重复的位置上。

该测头在A轴上分度为30度，有7个位置，B轴分度为15度，有24个位置。故共有168个可重复位置。即在竖直水平两个方向可达168个测头角度组合。

自动分度测头座



分度式测头的动力由测头系统自己提供。

PH10测头的分度为7.5度，在A轴（210度）和B轴（360度）上分别有27、48个可重复位置。即在竖直水平两个方向上，可达1296个测头角度组合。

软测头的测量方法

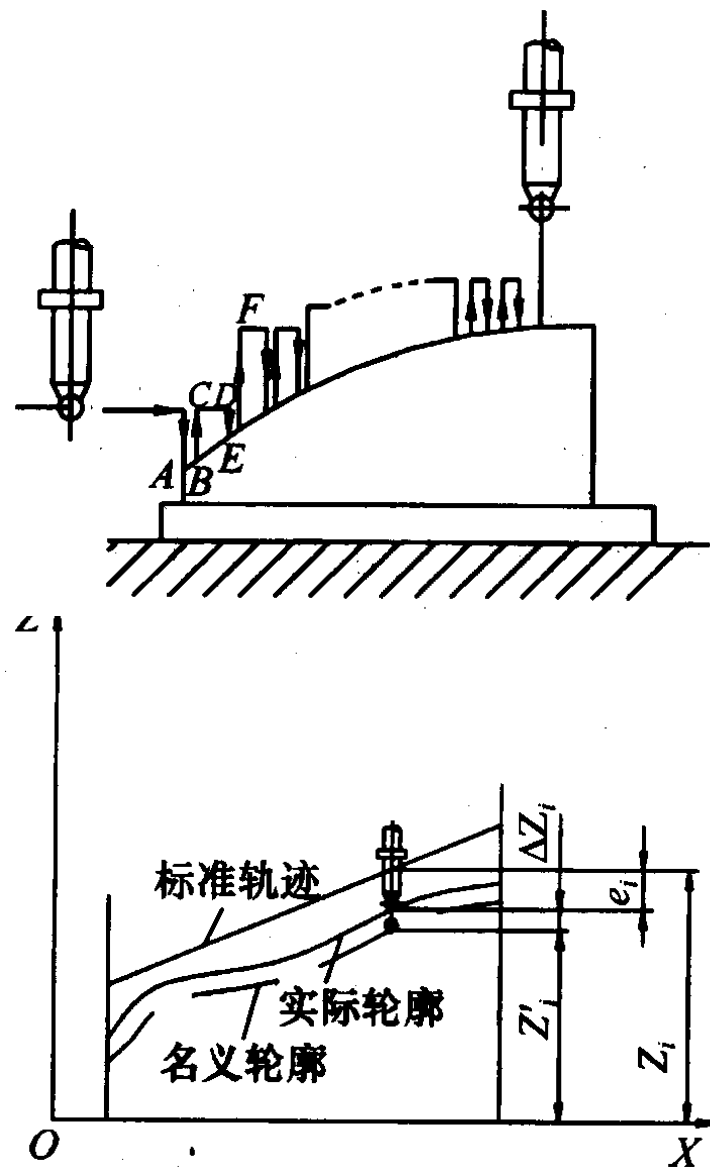
(1) 点位测量法：用触发式测头

接触零件并发出锁存（瞄准）信号，
实时的锁存被测表面坐标点的三维坐标值。

(2) 连续轮廓扫描法：用扫描式测头

能输出与探针的偏转成比例的信号（模拟电压或数字信号）。

测头测端在接触被测工件后，连续测得接触位移，测头的转换装置输出与测杆的微小偏移成正比的信号，该信号和精密量仪的相应坐标值叠加便可得到被测工件上点的精确坐标。





非接触式测头（光学测头）

非接触式测头：激光测头和光学视频测头

□非接触式测头一般采用**光学的方法**进行测量,由于**测头无需接触被测工件**,故不存在测量力,更不会划伤被测工件,同时可以测量软质介质的表面形貌。

□非接触式测头的局限:

- 1) **外界影响因素较多**,如被测物体的形貌特征、辐射特性以及表面反射情况都会影响测量结果。
- 2) **测量精度还不是很**高,还无法取代接触式测头在精密量中的地位。

□非接触式测头的好处:

提高效率—非接触式测头无需接触,在运动中采样测量,可避免精密量仪的频繁加速、减速、碰撞等,从而大大提高了测量效率;

适用更多工件—因为非接触式测头的测量力为零,可以测量各种柔软、易于划伤的工件;

细节测量—可以形成很小光斑,对一些接触测端不易伸入的部件进行测量,或对一些细节进行测量,并且有很大的测量范围;

因此,**精密测头的应用趋势就是非接触式测头将得到越来越广泛的应用。**

测量机用的激光扫描测头

以色列NEXTEC 公司的WIZPROBE 激光扫描测头采用独特的三角法测量原理,测量精度受材料类型、表面加工形式激光光柱角度和环境条件影响较小。适用于扫描小型、精密、软轻薄等特殊零件,也可用于覆盖件的扫描。

该测头性能指标:

- 采样频率50 点/s ;
- 激光光斑直径为 $30\mu\text{m}$;
- 测量范围为 $50\text{mm} \pm 5\text{mm}$;
- 测量分辨率 $1\mu\text{m}$;
- 单点精度为 $6\mu\text{m}$;
- 单点重复性可达 $0.13\mu\text{m}$ 。



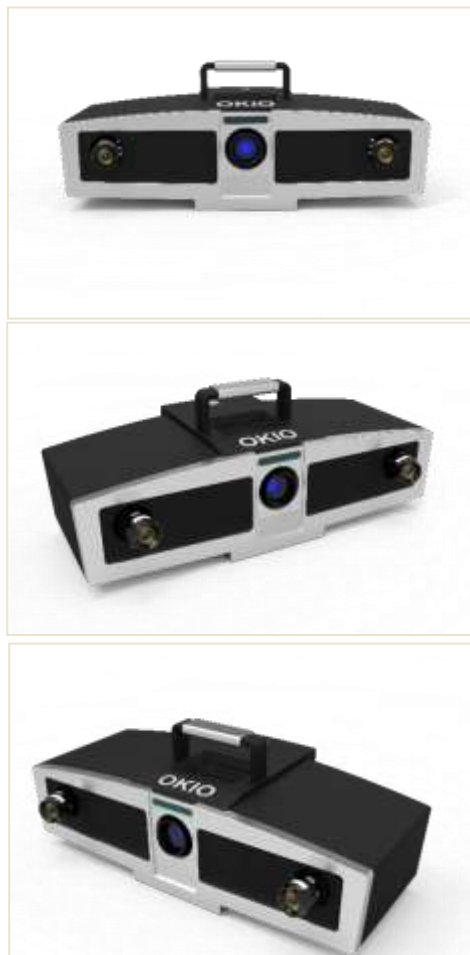
图 8 WIZPROBE 激光扫描测头

手持的激光扫描测头

激光手持三维扫描仪



蓝光高精度三维扫描仪



机器人在线三维扫描检测



视频演示：天远激光扫描测仪



测头选用原则

兼顾精度要求和经济性，一般原则如下：

- 在可以应用接触式测头的情况下，慎选非接触式测头；
- 在只测尺寸、位置公差的情况下，尽量选接触式触发测头；
- 对形状及轮廓精度要求较高的情况下选用接触式扫描测头；
- 易变形零件、精度不高零件、要求超大量数据的零件测量，可以考虑采用非接触式测头；



测量编程模式

三、数控测量编程与执行

1、编程模式:

(1) **联机编程** (**自学习/示教编程**，在联机状态下的实际工件上进行)

为了精确测量某一零件或为了能自动测量相同的一批工件，**计算机把操作者手动操作的过程及相关信息记录下来，并储存在文件中。重复测量时，只需调用该文件，便可自动完成以前记录的测量过程。**

优点：简单易学；缺点：占用太多的测量机时间。



测量编程模式



1、编程模式:

(2) 脱机编程（脱机代码编程）

在远离坐标测量机机房的任意一台计算机上，使用任意的编辑工具，
根据零件图样（图纸）按照测量机专用/标准语言编制零件测量程序，然
后下载到CMM的控制机上运行。（类似数控加工的数控语言自动编程）

优点：可脱机；缺点：必须精通测量编程语言，不能事先查错

(3) CAD数模编程

在独立的测量软件（导入CAD模型）或直接在集成的CAD/CAM系
统中进行。基于CAD数据文件，交互/半自动生成检测规划和测量路径。
是行业追求的目标。（类似数控加工中的图形交互自动编程）

优点：可仿真模拟，事先验证程序正确性；

无需测量机和实际工件就可进行，极大提高测量机效率和利用率。

数控测量过程

2、数控测量主要步骤:

(1) 测量要素（特征）定义与获取

(2) 检测工艺规划

—确定装夹方式

—选择测头及附件

—定义测量项、测量表面的顺序

—规划测点及测头路径

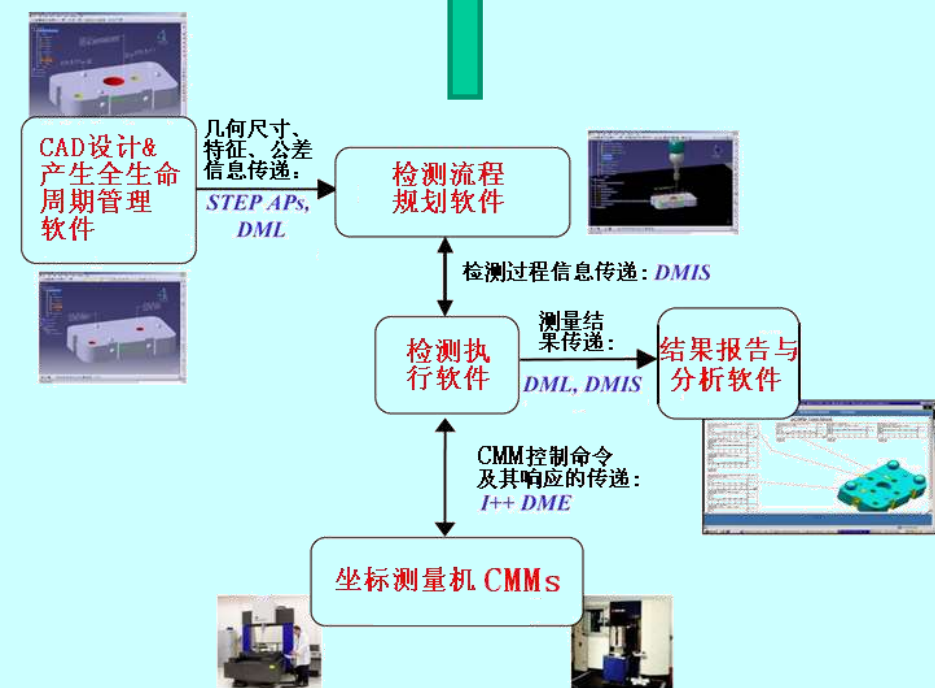
—测量过程仿真

(3) 检测规划的后置处理

(输出测量机程序代码—**DMIS**)

(4) 测量程序执行（在测量机上）

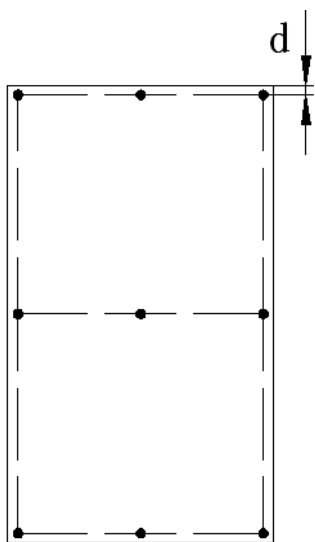
(5) 测量结果的处理与输出、反馈



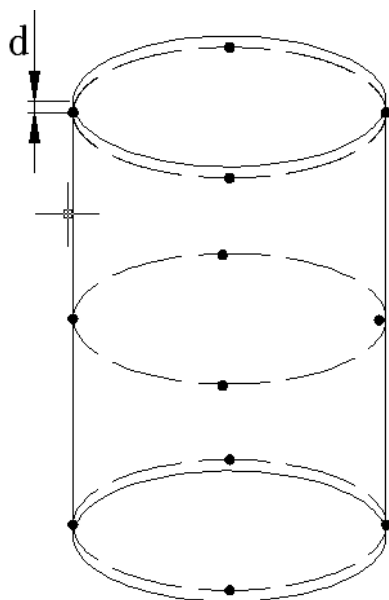
测点规划——测点数目及分布

| 几何公差 | 平面 | 圆柱面 |
|------|-----|-----|
| 直线度 | 3×2 | 6×2 |
| 平面度 | 3×3 | - |
| 圆度 | - | 6×2 |
| 圆柱度 | - | 5×3 |
| 轮廓度 | 3×2 | - |
| 同轴度 | - | 6×2 |
| 平行度 | 4×2 | 6×2 |
| 垂直度 | 4×2 | - |
| 倾斜度 | 3×2 | - |

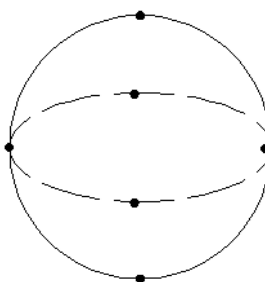
不同公差类型对平面和圆柱面基本测点的要求



平面测点3×3分布



柱面测点3×4分布

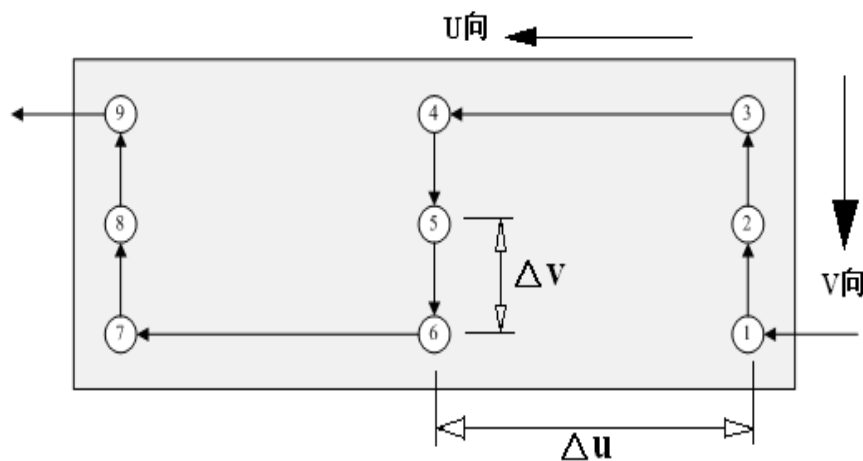


球面测点分布

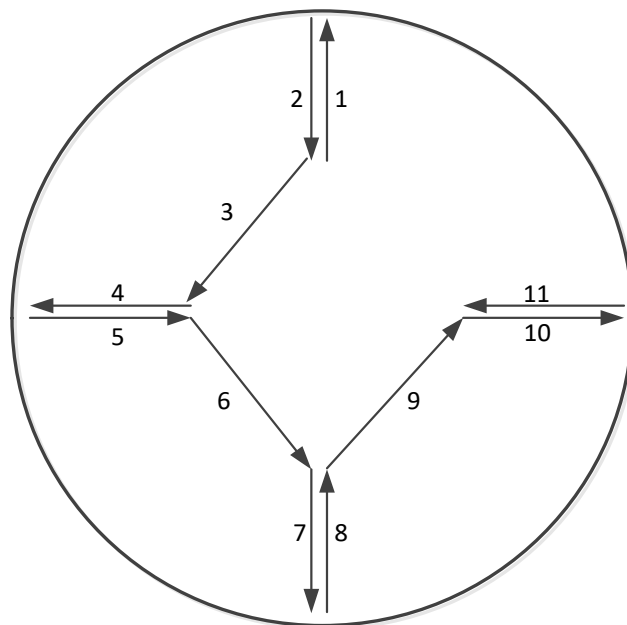
测量路径规划

平面测量路径

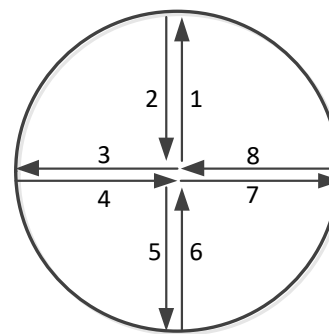
$\Delta V < \Delta U$ 时, V向优先;
 $\Delta V > \Delta U$ 时, U向优先;



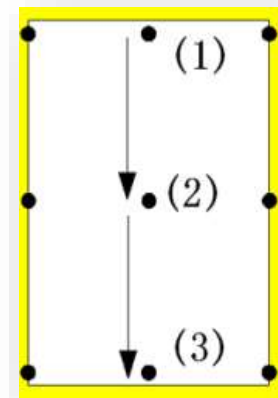
内孔测量路径



a 大孔



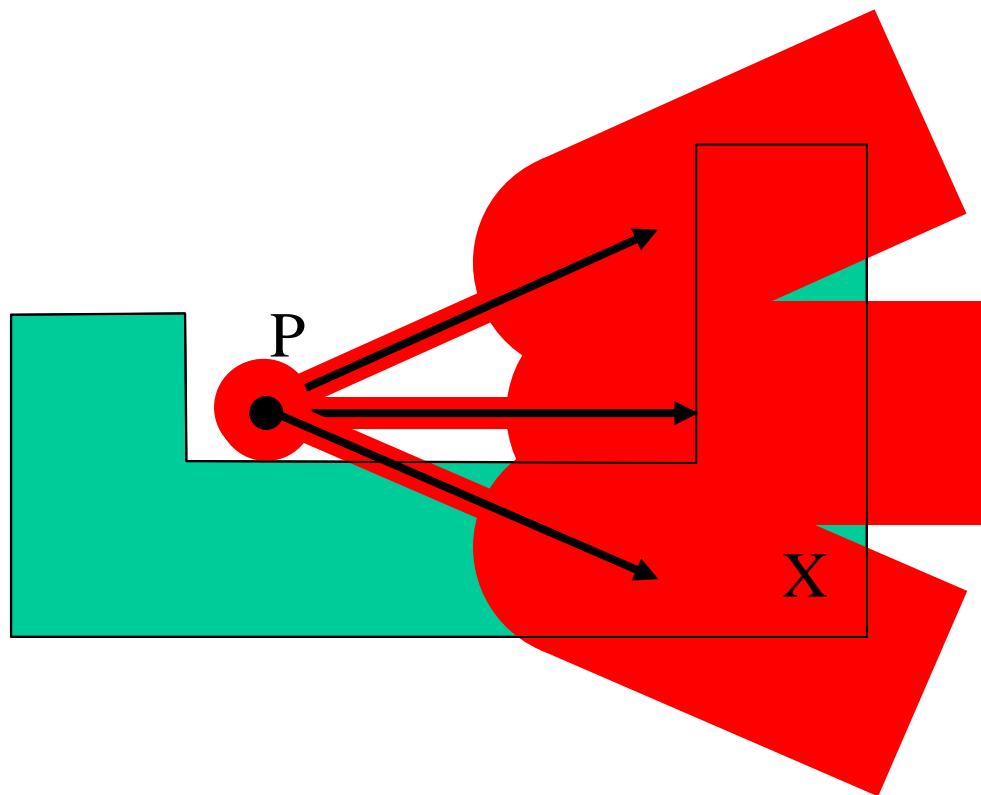
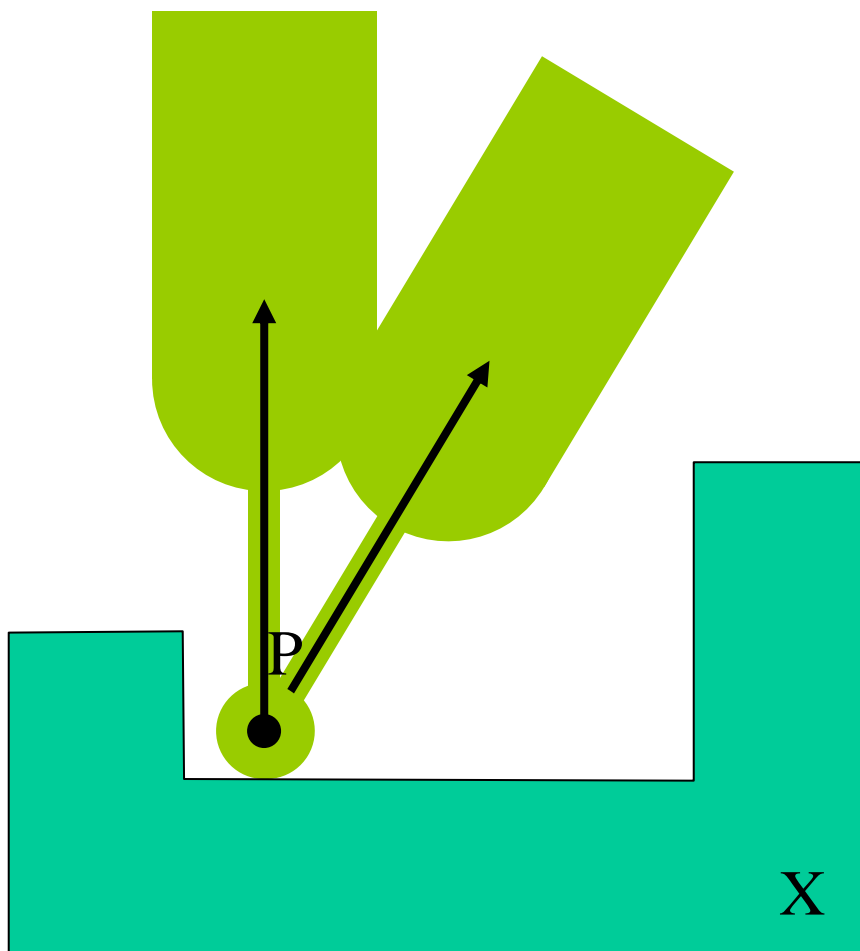
b 小孔



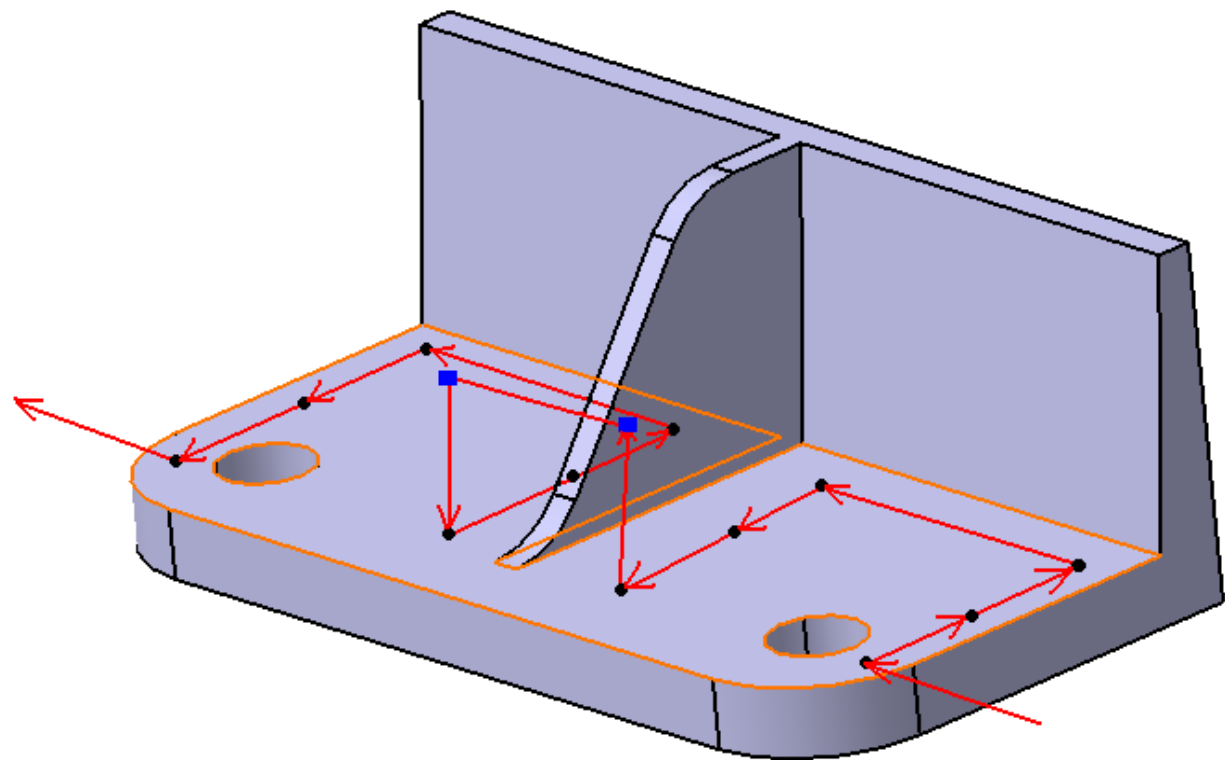
高度方向: 从上到下3层

测头可达性分析

演示



测量规划中设置避障点



→ 测量路径 • 测量点 ■ 避障点



测量机程序格式——DMIS标准

DMIS: Dimension Measurement Interface Specification (尺寸测量接口规范)

- 是制造检测中尺寸测量程序和数据通信的定义性标准
- 可作为CAD系统与CMM内部检测语言
- 也可以作为CMM的直接控制内部编程语言

DMIS标准是一个解决设备间尺寸测量数据双向通信的标准，其目的是规范测量设备间数据和格式的统一。



测量机DMIS程序的例子

下面是一个典型DMIS程序

- 1 **FINPOS/ON**
- 2 **F(CIRCLE-1)=FEAT/CIRCLE, INNER, CART, 10, 10, 5, 0, 0, 1, 40**
- 3 **MEAS/CIRCLE, F(CIRCLE-1), 3**
- 4 **GOTO/10, 10, 5**
- 5 **PTMEAS/CRAT, 30, 10, 5, -1, 0, 0**
- 6 **PTMEAS/CRAT, -10, 10, 5, 1, 0, 0**
- 7 **PTMEAS/CRAT, 10, 30, 5, 0, -1, 0**
- 8 **ENDMES**

- 第一行是命令语句，指定尺寸测量设备（DME）的精确定位机构开始工作。
- 第二行定义一个圆特征。名字是CIRCLE_1；INNER说明测量圆的内部，即一个孔；CART说明是直角坐标系，坐标是(10, 10, 5)。后面的数字说明圆特征所在平面的方向向量：0, 0, 1。最后定义圆的直径是40。
- 第三行是命令语句。DME测量该圆特征，取点数为3。
- 第四行的GOTO语句是运动语句，说明测头运动到坐标为10,10,5的位置。
- 三行PTMEAS语句说明在三个指定点上取测量值。每行后部的6个数字的意义是：头三位表示指定点的坐标值，后三位是方向向量，它的指向是远离特征表面，最后一行表示测量程序结束。



数控测量演示



DELCAM公司的PowerINSPECT软件

**视频演示：STEP-NC标准测试件的测量
(用PowerInspect软件)**



第七章 数字化测量技术



7-3 大尺寸测量

- ❑ 大尺寸测量概述
- ❑ 常用大尺寸测量仪器及分类
- ❑ 便携式测量机
- ❑ 激光跟踪仪
- ❑ 大尺寸测量典型应用

一、大尺寸测量概述—几何量测量涉及的领域

工程测量/测绘

宇宙空间:

- 行星
- 星际
- 银河系

< 1000 Km

大尺寸:

- 地球
- 山脉
- 城市
- 建筑
- 隧道
- 河流

< 10 m

中尺寸:

- 飞机
- 汽车
- 轮船
- 火车
- 货车

< 100 μm

工业大尺寸/大尺度测量

(20 μm --100 μm ; 几m-几百m; >100m³)

工业的中小尺寸测量

(1 μm --20 μm ; 几mm-几百 mm)

小尺寸:

- 工业零件
- 电子零件

< 20 μm

纳米:

- 生物
- 微电子

< 0.3 μm

一、大尺寸测量概述—主要应用行业与产品

Passenger Aircraft

Rolls Royce
Airbus



Military Transport Aircraft

Airbus
Rolls Royce



Spacecrafts

EADS
Astrum



Power Generation

Vestas



Helicopters

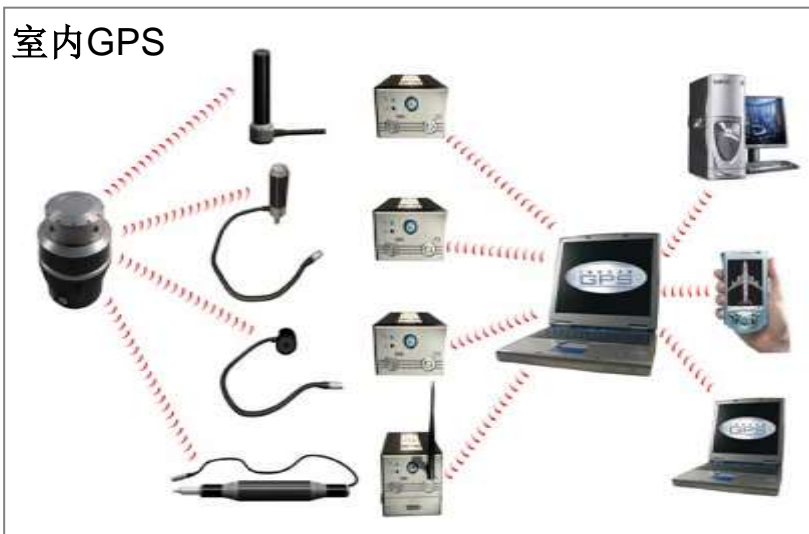
(to be Confirmed)

Westland
Helicopter



二、常用大尺寸测量仪器/系统

室内GPS



激光跟踪仪



激光雷达



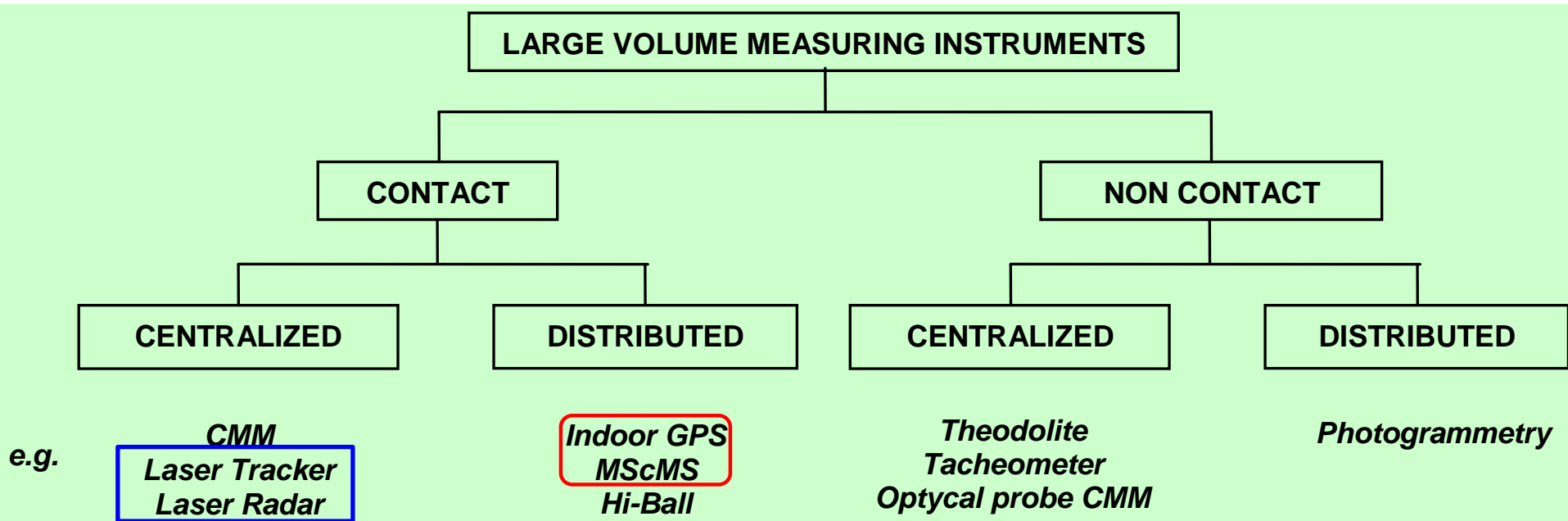
照相测量仪



高精度大尺寸CMM



二、大尺寸测量仪器的分类



两大类：接触式/非接触式 → 集中式/分布式

接触：测量传感器/器件与被测物体表面上接触

集中：单台仪器可以独立完成测量任务。

分布：需要在空间多个位置（站）布置多台仪器，或一台仪器移站到多个空间位置，通过多个测量站协作才能完成测量任务。



第七章 数字化测量技术



7-3 大尺寸测量

- ❑ 大尺寸测量概述
- ❑ 常用大尺寸测量仪器及分类
- ❑ 便携式测量机（关节臂测量机）
- ❑ 激光跟踪仪
- ❑ 大尺寸测量典型应用

三、关节臂测量机

1. 关节臂测量机的定义及结构形式

(1) 定义：一种由**几根固定长度的臂**通过绕相互垂直轴线而**转动的关节**（分别称为肩、肘和腕关节）互相连接而成，在最后的转轴上装有**探测系统**（测头）的坐标测量装置。

探测系统：接触式测头和或激光扫描测头

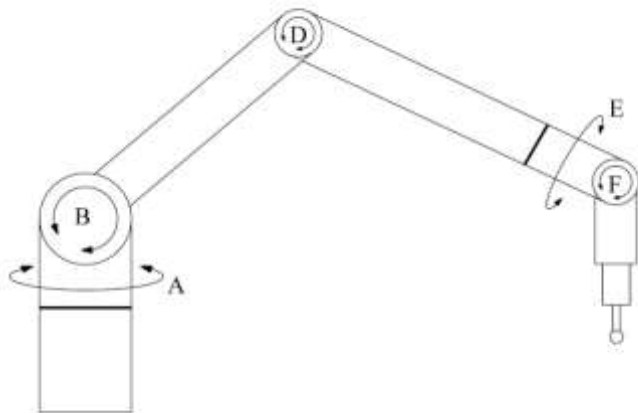


演示：Faro 关节臂测量机组成及工作原理-质量检测

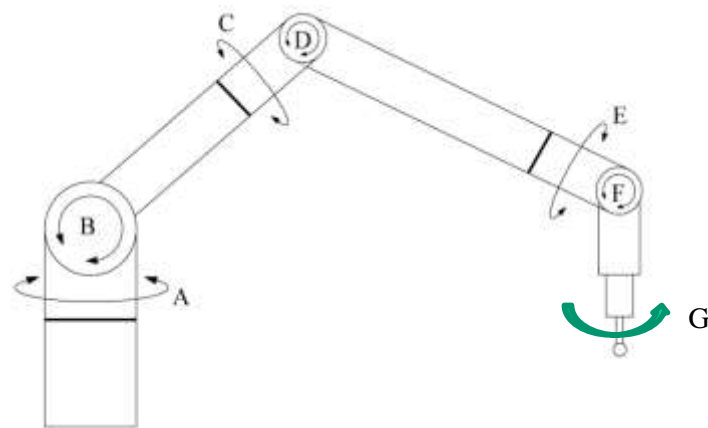
关节臂测量机的附件 (1)



(2) 结构形式 (关节数一般小于7个)



配置为2-1-2的关节臂
(a° - b° - d° - e° - f° 角度转动)



配置为2-2-3的关节臂
(a° - b° - c° - d° - e° - f° - g° 角度转动)

- 根据各段臂长和各个关节转过的角度求出目标探测点的坐标。
- 在检测空间一固定点坐标时，在测头确定情况下，直角坐标测量机各轴的位置X, Y, Z对固定空间点是唯一的、完全确定的，而关节臂测量机各臂在空间的角度和位置是无穷多、不唯一的。
- 探测系统距各关节的距离不同，不同级的转角误差对测量结果的影响不同，越靠近基座处关节的转角误差对测量结果的影响越大。

关节臂测量机应用

2. 关节臂测量机的应用

汽车零部件检测：



轿车车灯自由曲面的检测



汽车车门的检测



汽车车门的检测

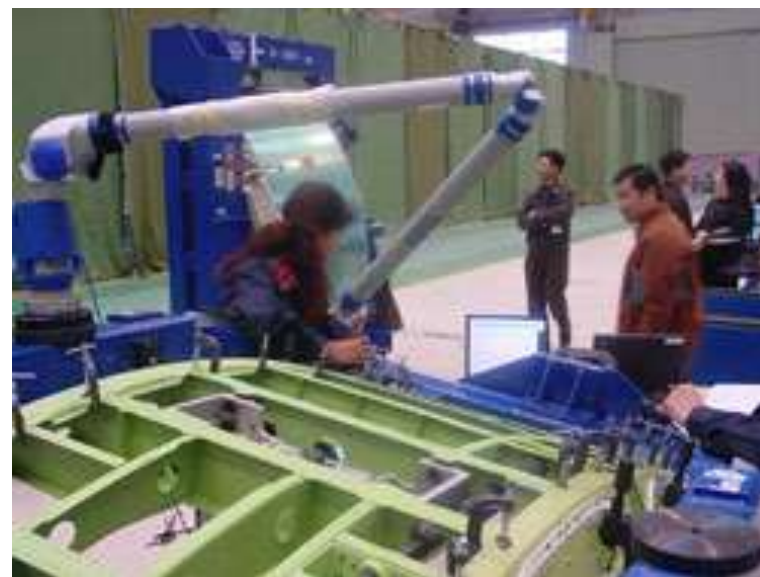
汽车装配检测



发动机、汽轮机叶片检测



飞机零部件的检测



工装夹、模具的检测



管件、齿轮等零件检测



带扫描头的测量臂

演示：Faro 关节臂扫描仪测量

经济型精度：

LASER SCANARM三维激光扫描测量臂经济

从设计到生产，大范围到细节，更多的公
FARO — 便携式计算机辅助测量全球的

内置式双模式
自动触发和硬测头
用户可随时更换各
种校准测头，
精度尽在掌握。

快速重复性安装
无需重复校准即可快
速更换测头

FARO 激光扫描头
内置式LED探测器
高效地确定
最佳扫描距离





三、关节臂测量机

3. 关节臂测量机的特点

优点： 结构简单、体积小、重量轻；
可自由移动；测头具有六自由度；（灵活方便）
可测量任意空间点和隐藏点的位置。（测量范围大）

缺点： 手动测量；精度较低（ $10\mu\text{m}+$ ）；

| 比较项目 | 传统CMM | Portable ARM CMM |
|----------|----------------|------------------|
| 测量方式 | 接触（龙门架或立柱式） | 柔性三维测量 |
| 测量速度 | 慢 | 很快 |
| 测量精度 | 理论上单点精度高 | 统计（整体）精度高 |
| 测量死角 | 多 | 很少 |
| 对被测物体的要求 | 重量轻、体积小、不易变形 | 无特殊限制 |
| 在线检测 | 不可 | 很好 |
| 环境要求 | 恒温室、防震 | 一般工作环境即可 |
| 可移动性 | 不可 | 好 |
| 操作简便性 | 差 | 很好 |
| 其他 | 适合规则物体的测量，如孔距等 | 适合复杂曲面和非规则物体的测量 |



第七章 数字化测量技术



7-3 大尺寸测量

- ❑ 大尺寸测量概述
- ❑ 常用大尺寸测量仪器及分类
- ❑ 便携式测量机
- ❑ **激光跟踪仪**
- ❑ 大尺寸测量典型应用

激光跟踪仪的工作原理

工作原理：（原理演示）

(1) P点在空间的坐标有矢径（距离） d 及 水平角 h_z 及天顶角 vt 决定。通过数学变换可以进行直角坐标系运算。

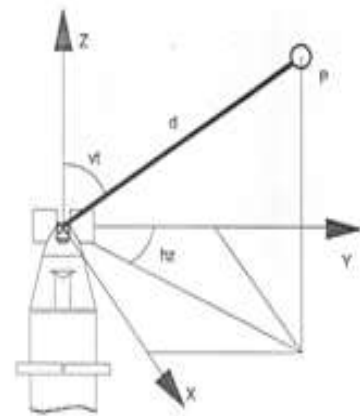
(2) 距离 d 由**激光的波长**和**激光从反射镜反射回来所经历的时间**而确定（激光干涉测距，IFM）。 H_z 由**水平角度编码器**测得， V_t 由**垂直编码器**测得。

(3) 利用**影像（位置）探测器**上反射回的激光与伺服控制点的位置来控制两个电机转动进行靶标跟踪。

测距（变化）：激光干涉系统（IFM）
+反射镜

测角：水平和垂直角度编码器
跟踪：位置探测器+伺服电机

续光：绝对距离探测器（ADM）



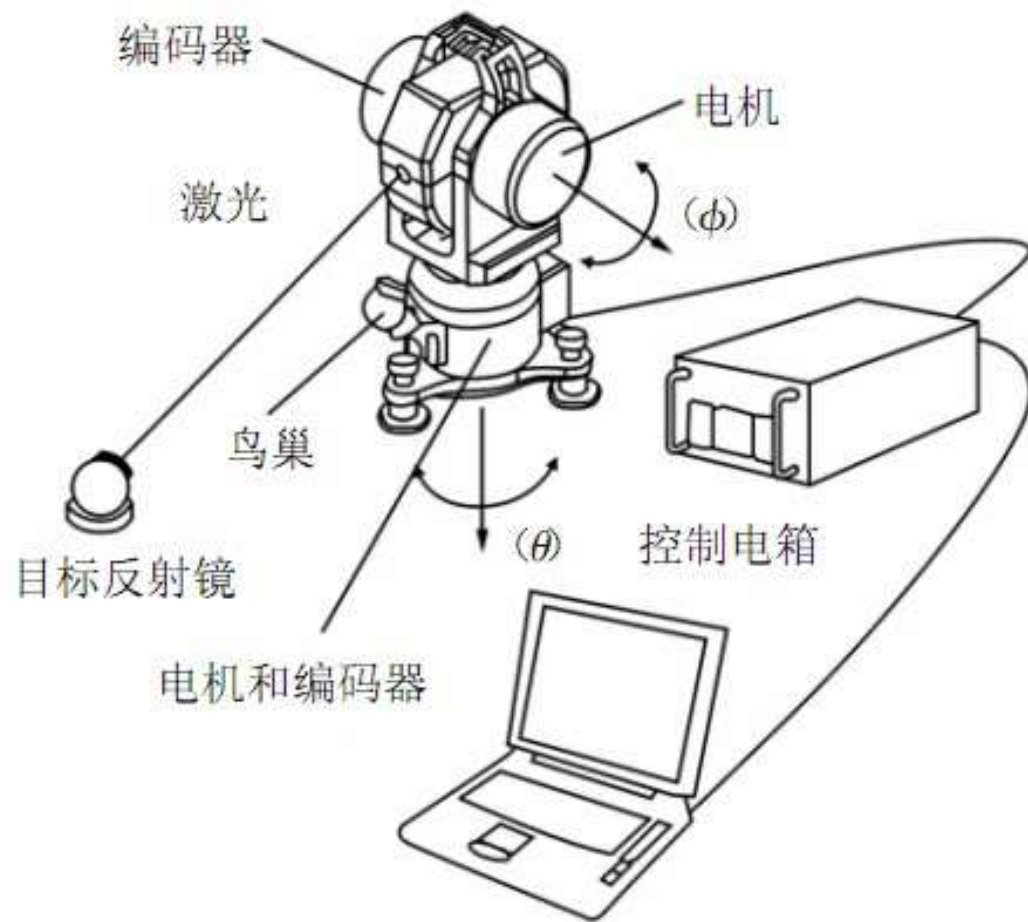
激光跟踪仪的概念和基本组成

概念（定义）：

是一台以**激光测距**手段配以**反射靶标（镜）**的仪器，它同时配有**绕两个轴转动的测角机构**，形成一个完整**球坐标测量系统**。

它的靶标（或测头）与被测物体**无机械的联系但有接触**，可以工作在**40m**的甚至更大的测量半径范围内。

可用来测量**静止目标**，也可跟踪测量一个或多个**移动目标**。



组成： 跟踪头（主体）、目标反射镜、控制器和测量软件（计算机）等。

激光跟踪仪的反射器

反射靶标:



立方角

($\pm 20^\circ$)

由三个镜片组成

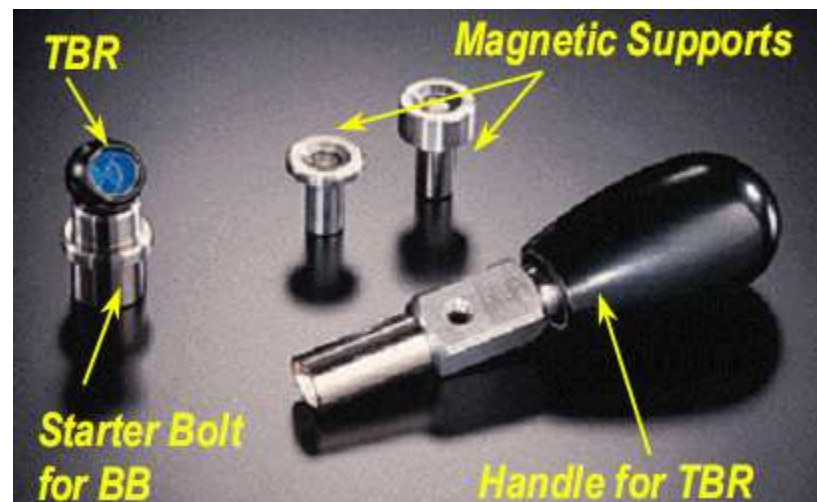
90度的角锥



猫眼

($\pm 60^\circ$)

由两个玻璃半球组成



反射器 安装座

(Ball Reflector Tooling)

激光跟踪仪的应用

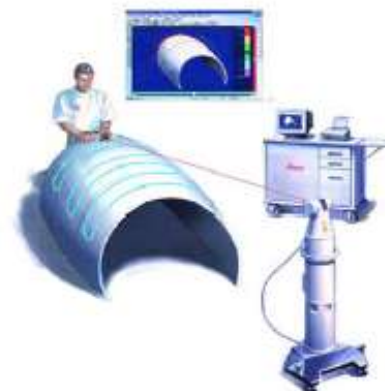
Tooling Assembly



Large scale metrology



CAD based inspection & reverse engineering



Machine calibration and guidance



Tooling



激光跟踪仪的应用

Contour Meas

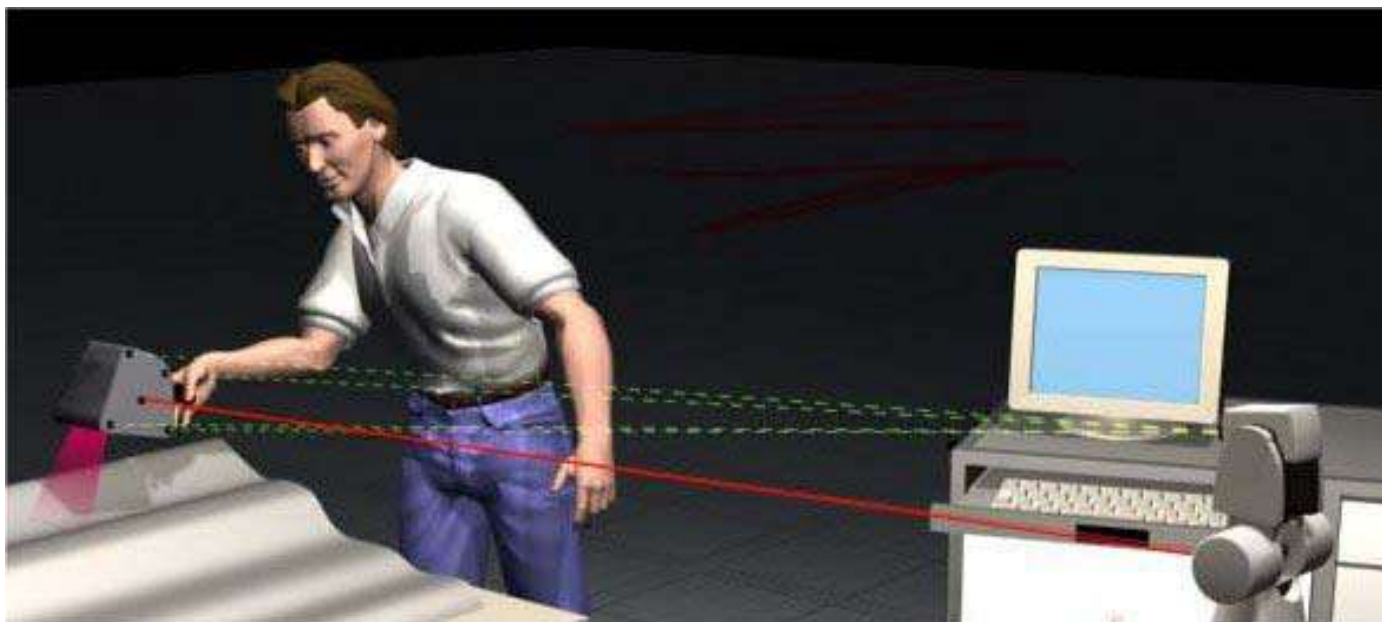


激光跟踪仪与关节臂的组合应用



反射标靶安装在关节臂的测头部，跟踪定位测头部位。

激光跟踪仪与手持扫描仪/探测仪的组合应用



演示

“Ready to go” hand held scanner

- **Millions of points in minutes**
- **Largely insensitive on different materials**
- **Radial Range of 15 Meters from Tracker**
- **Accuracy 0.15mm**

室内GPS在飞机装配中的应用



激光雷达 (Laser Radar)



Laser Tracker

Laser Tracker is a **portable contact measurement system** that uses laser technology to accurately measure large parts and machinery up to 30m across a wide range of industrial applications.

Laser Radar

Laser Radar can provides **automated, non-contact measurement capability** for large-volume applications of up to 60 meter radius. The new generation of metrology instruments precisely measures large-scale geometry without requiring any auxiliary component for scanning.

The Reflectors are not need.



Wind Turbine Blade Inspection

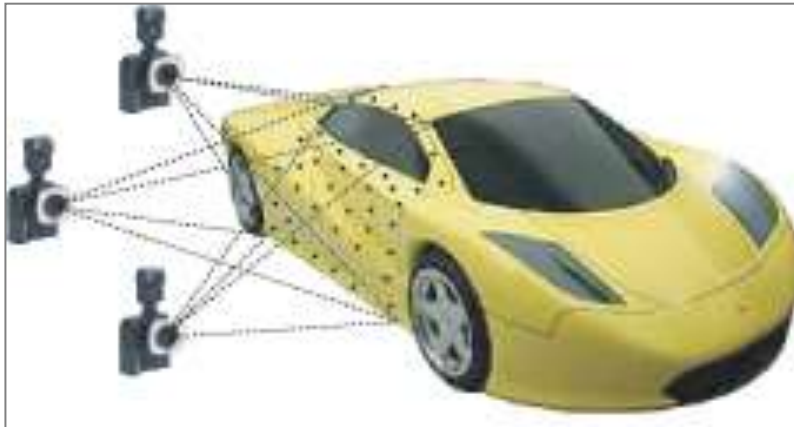




照相测量系统(Photogrammetric Systems)

Photogrammetry is a measurement technology in which the three-dimensional co-ordinates of points on an object are determined by measurements made in **two or more photographic images taken from different positions**

Reverse Engineering of Large Prototype Models



Inspection of Large Size Components





主要大尺寸测量仪器性能比较

| 测量系统 | 需求 | | | | | | | |
|----------|-----|-------|----|------|------|------|------|----|
| | 便携性 | 安装/设置 | 成本 | 测量性能 | 测量体积 | 简便使用 | 室内工作 | 柔性 |
| 经纬仪 | 高 | 快 | 低 | 低 | 大 | 中 | 是 | 低 |
| 三坐标测量机 | 低 | 慢 | 高 | 高 | 小 | 高 | 是 | 高 |
| 激光跟踪仪 | 中 | 中 | 中 | 高 | 大 | 低 | 是 | 中 |
| 照相测量仪 | 中 | 慢 | 中 | 中 | 中 | 低 | 是 | 中 |
| GPS | 高 | 快 | 中 | 低 | 大 | 高 | 否 | 低 |
| 多传感器移动测量 | 高 | 中 | 低 | 中 | 大 | 高 | 是 | 高 |



第七章 数字化测量技术



7-3 大尺寸测量

- ❑ 大尺寸测量概述
- ❑ 常用大尺寸测量仪器及分类
- ❑ 便携式测量机
- ❑ 激光跟踪仪
- ❑ 大尺寸测量典型应用



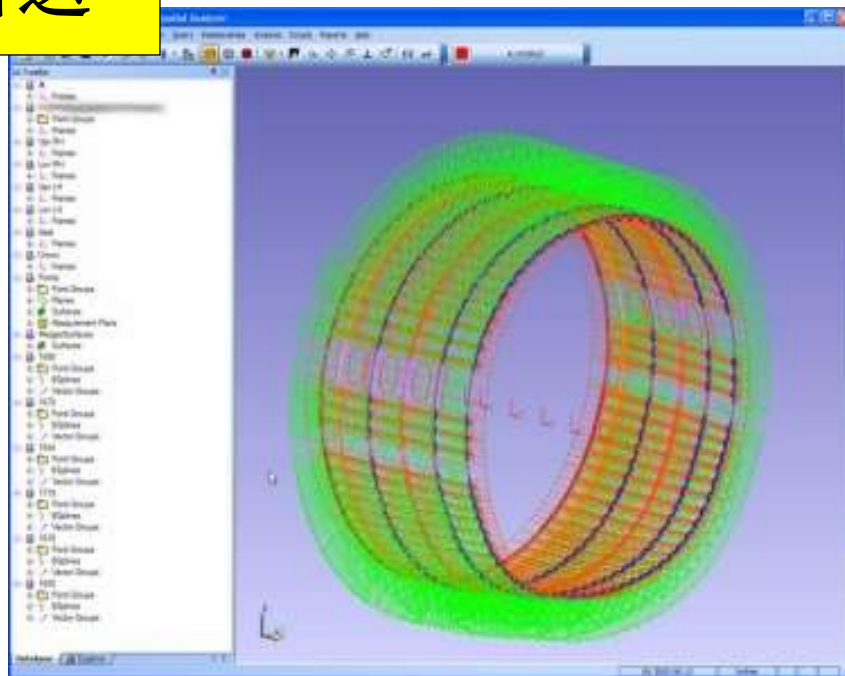
大尺寸测量技术的应用

- 产品及工装检测（性能验证）
- 测量辅助装配
- 产品（零部件）及工装的逆向工程
- 大型机床的空间误差检测及补偿
- 大尺寸制造系统的在机检测
- 机器人位姿的标定与测量



产品及工装检测（性能验证）(1)

激光雷达



波音采用三台激光雷达对全复合材料机身进行快速检测与误差分析



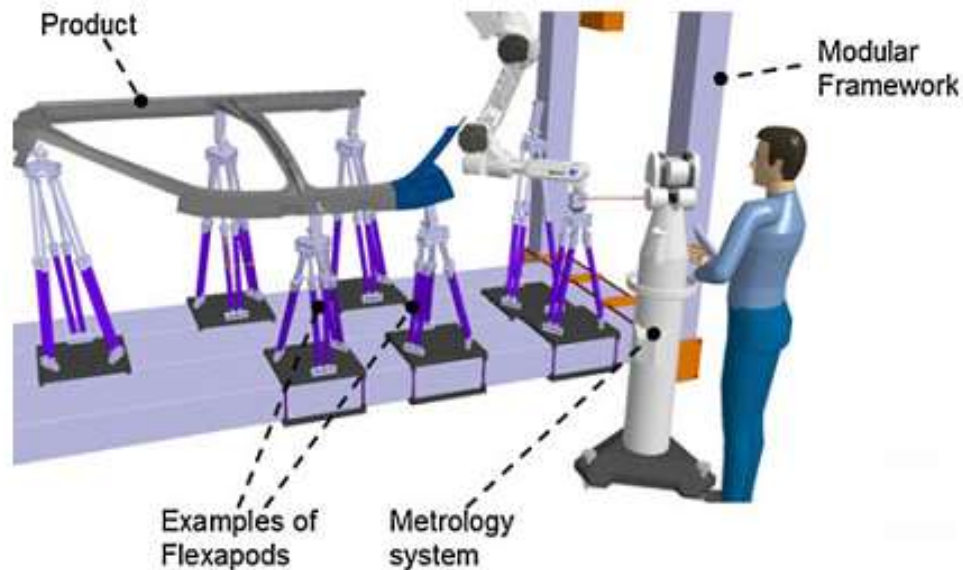
产品及工装检测（性能验证）(2)

激光跟踪仪



使用T3激光跟踪仪进行
飞机座舱的装配工装检测

使用激光跟踪仪进行
可重构柔性工装检测

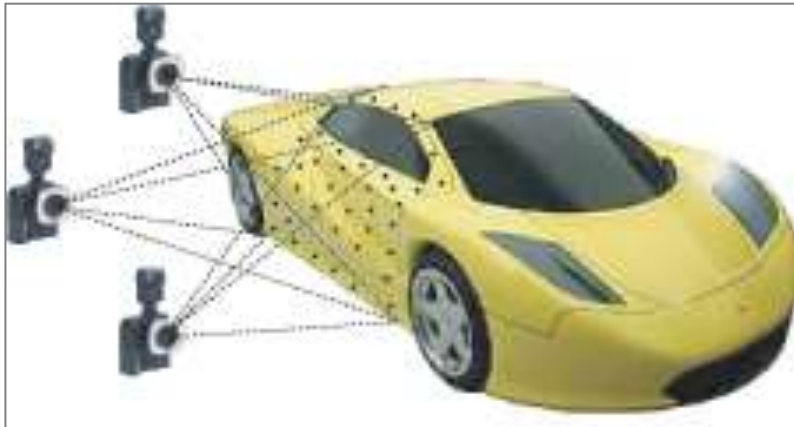




产品及工装检测（性能验证）(3)

Photogrammetry is a measurement technology in which the three-dimensional co-ordinates of points on an object are determined by measurements made in **two or more photographic images taken from different positions**

Reverse Engineering of Large Prototype Models



Inspection of Large Size Components



使用工业相机（摄影测量系统）对汽车、飞机产品进行检测

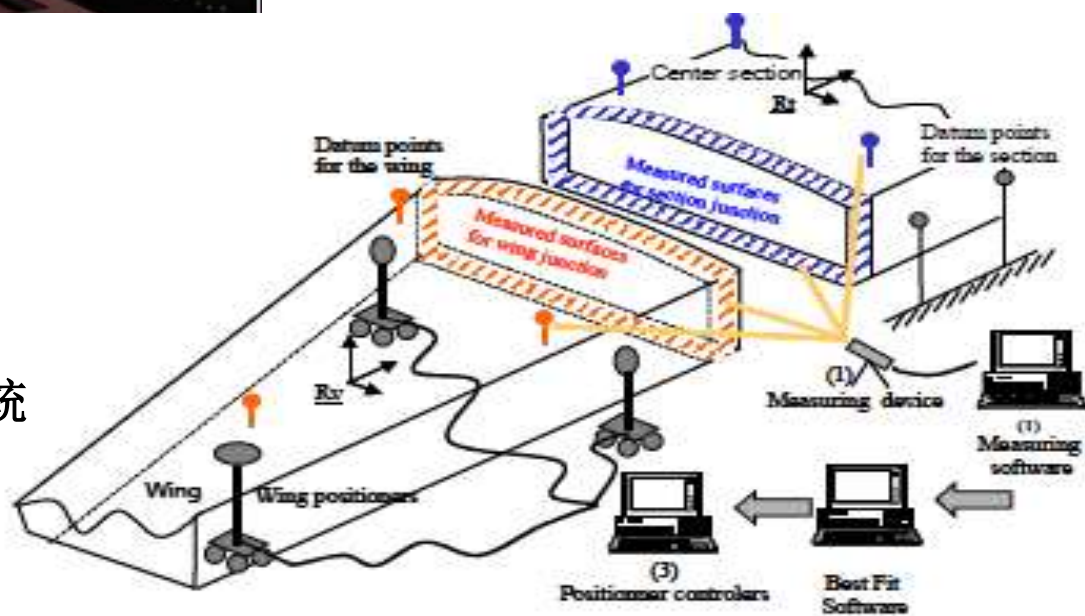


测量辅助装配 (MAA)

Measurement Aided Assembly

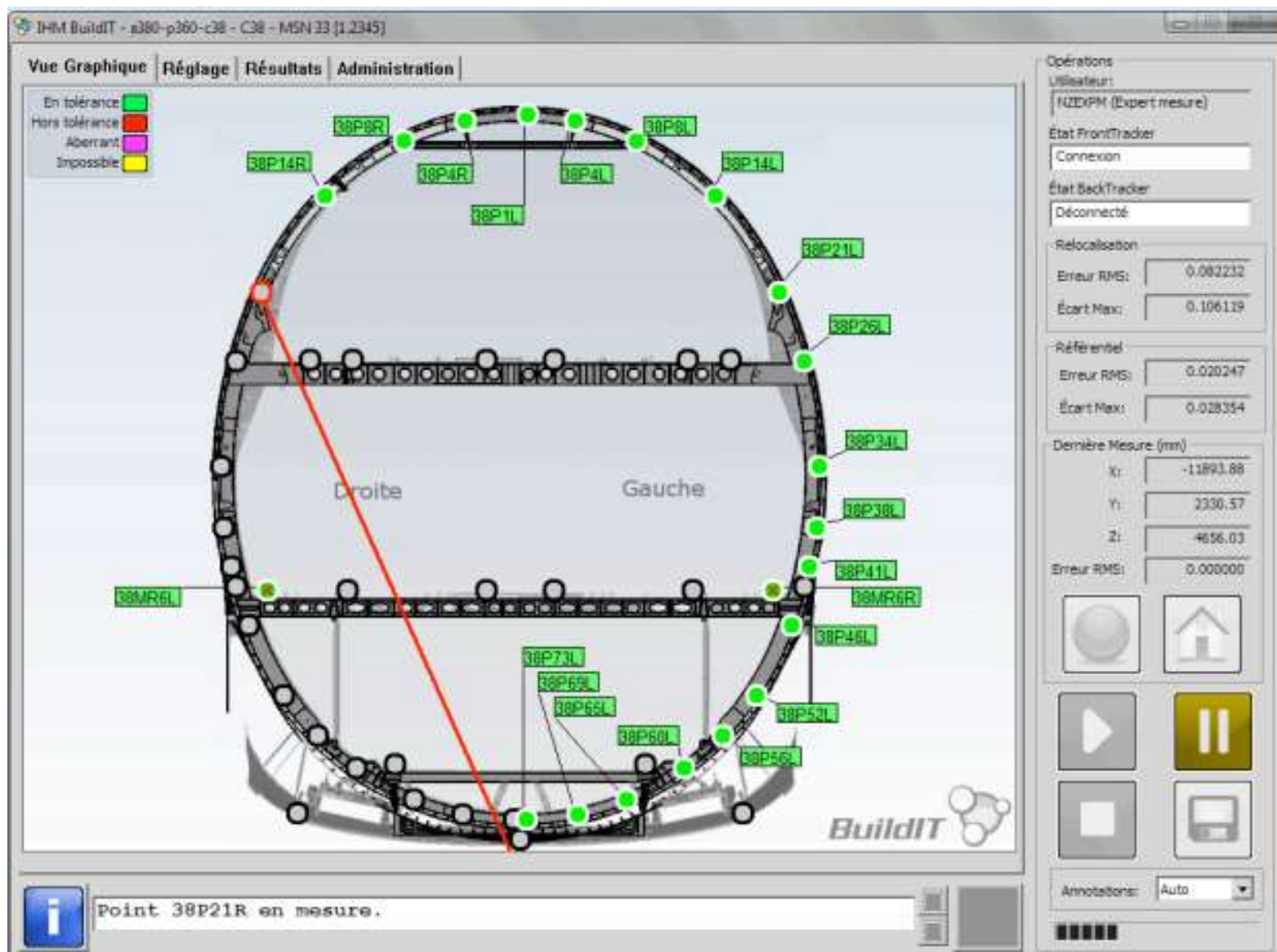


A380总装现场测量辅助装配系统





测量辅助装配 (MAA) 的软件人机界面

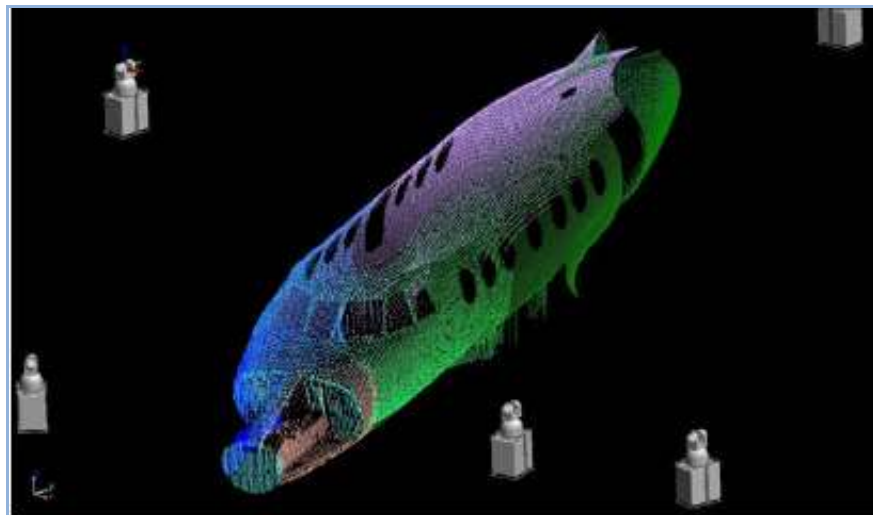




产品及工装的逆向工程



某商用飞应用激光雷达
进行飞机外形反求工程



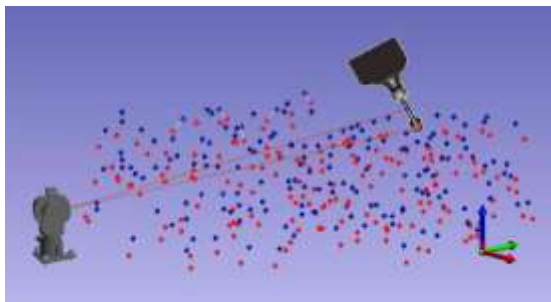


大型机床的空间误差检测及补偿



SmartTrack and Active Target

基于T3激光跟踪仪的机床空间误差补偿系统(VEC)





大尺寸制造系统的在机检测

基于激光雷达的787机翼蒙皮的闭环水切割系统

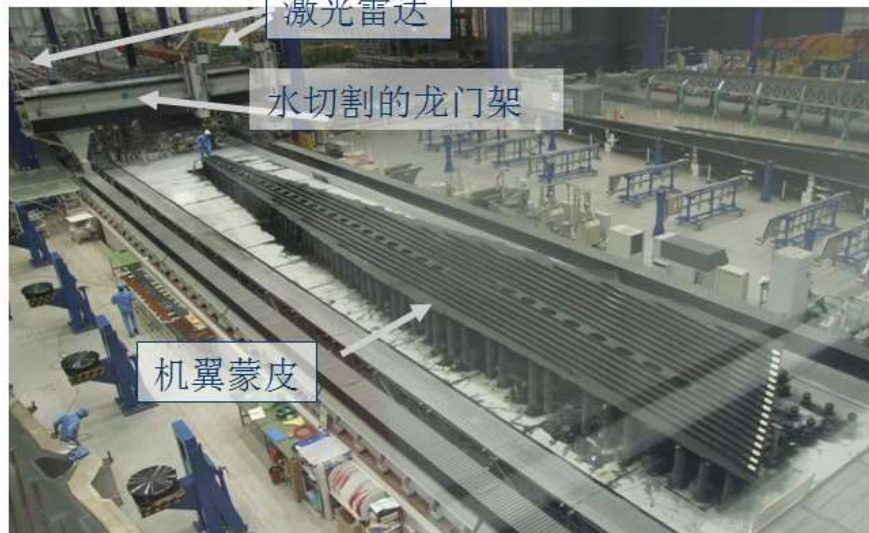
龙门架



激光雷达

水切割的龙门架

机翼蒙皮



公共点

可识别靶标

激光雷达的使用使得787机翼蒙



测量区域

不涨钢支撑柱

此项技术为对一些大型复杂部件的三维自动化测量提供一种有效的解决方案



机器人位姿标定与测量



机器人技术已在飞机大型零部件的自动钻铆、激光焊接、表面材料涂覆、复合材料加工中得到较广泛的应用。在这些应用中，为提高机器人操作臂的绝对定位精度，标定是必需的步骤。机器人标定是，利用先进的测量手段和基于模型的参数识别方法辨识出机器人模型的准确参数，从而提高机器人绝对精度。标定过程中，测量手段是一个极其重要的因素，大尺寸测量系统，如CCD照相测量系统，激光跟踪测量系统等，都广泛地应用于工业机器人的标定。工作过程中再自动测量其位姿。





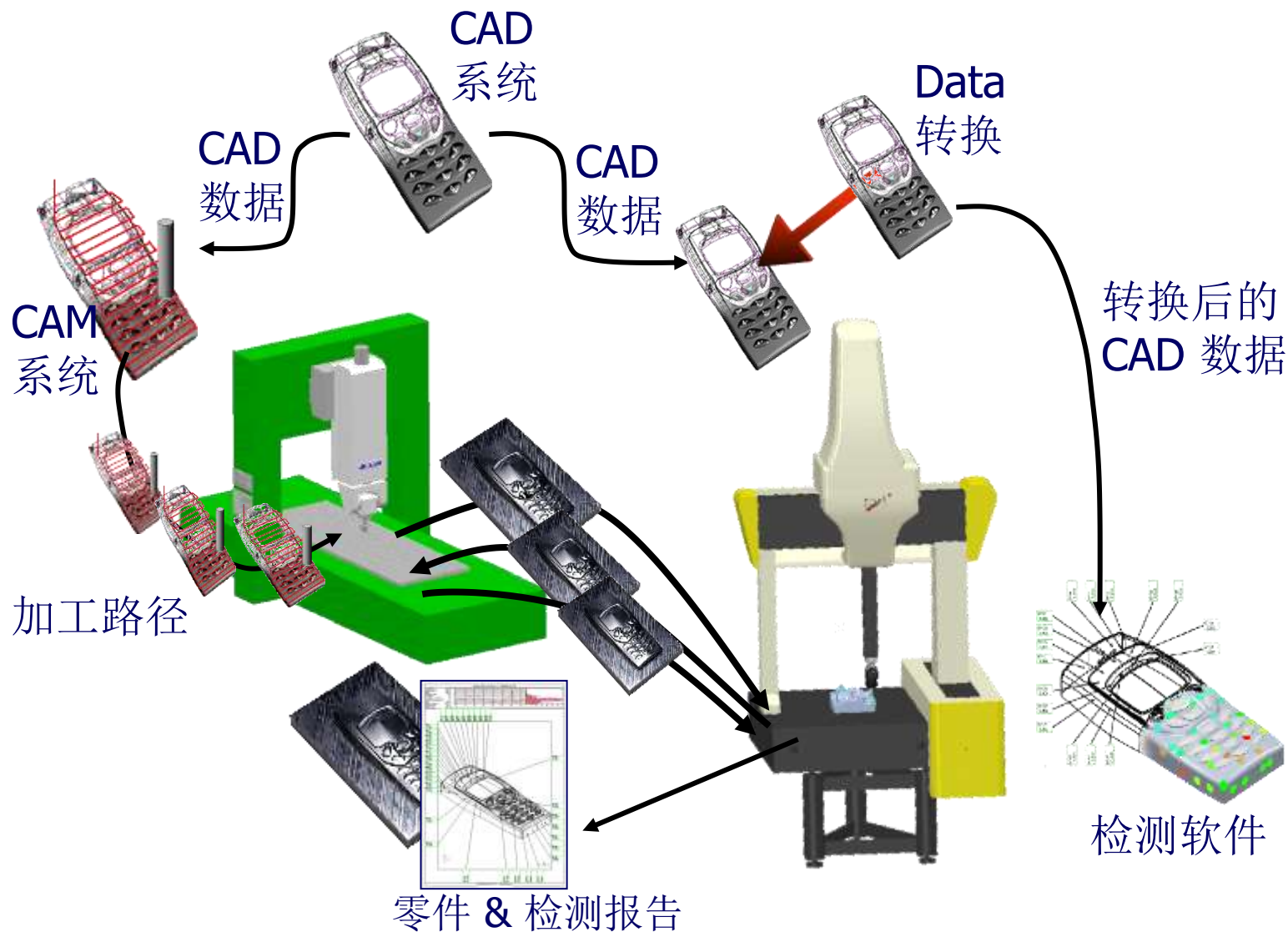
第七章 数字化测量技术



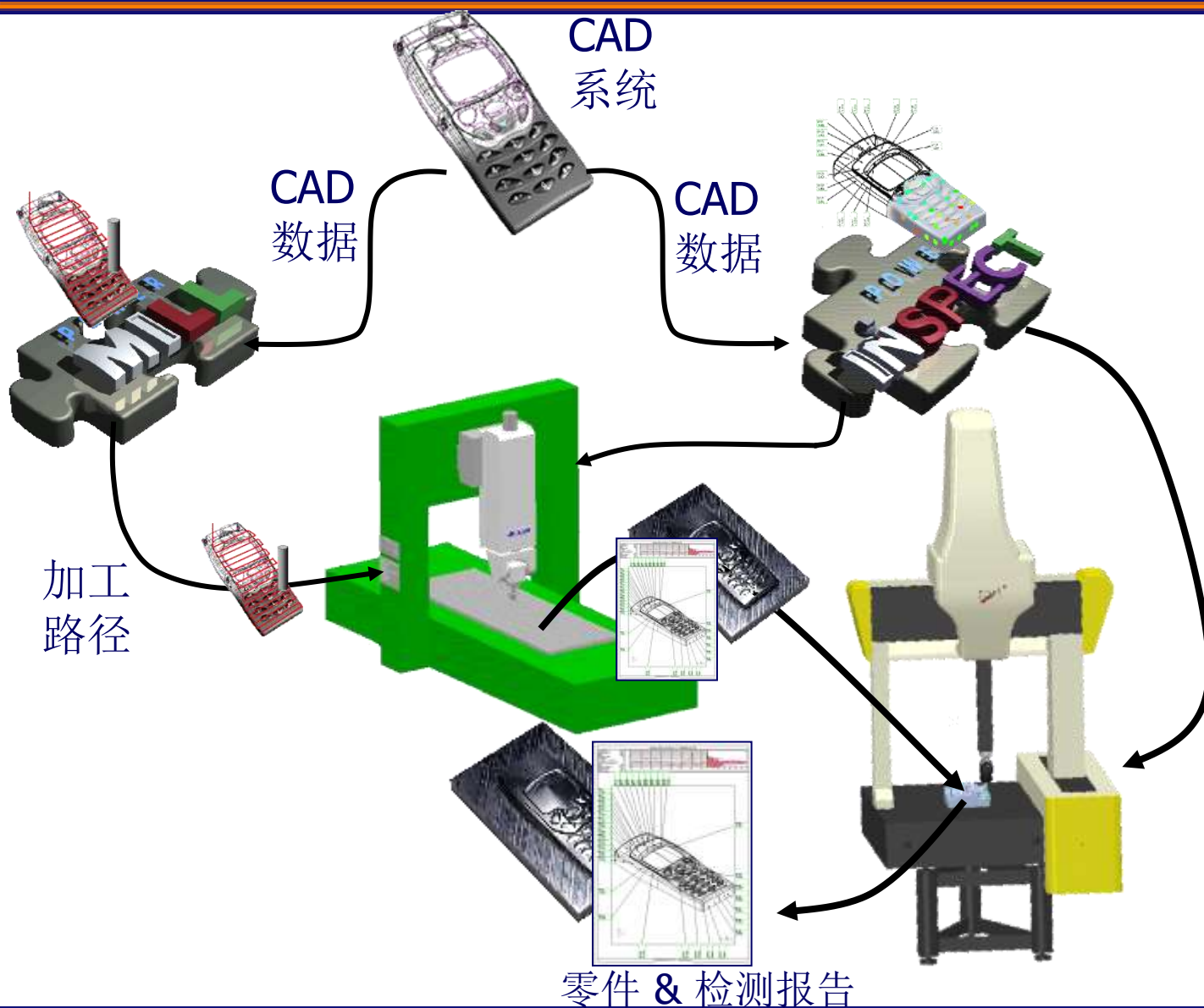
7-4 在机测量

- ☐ 在机测量解决方案
- ☐ 在机测量系统的组成
- ☐ 数控机床的测头系统
- ☐ 在机测量的应用场合和实例

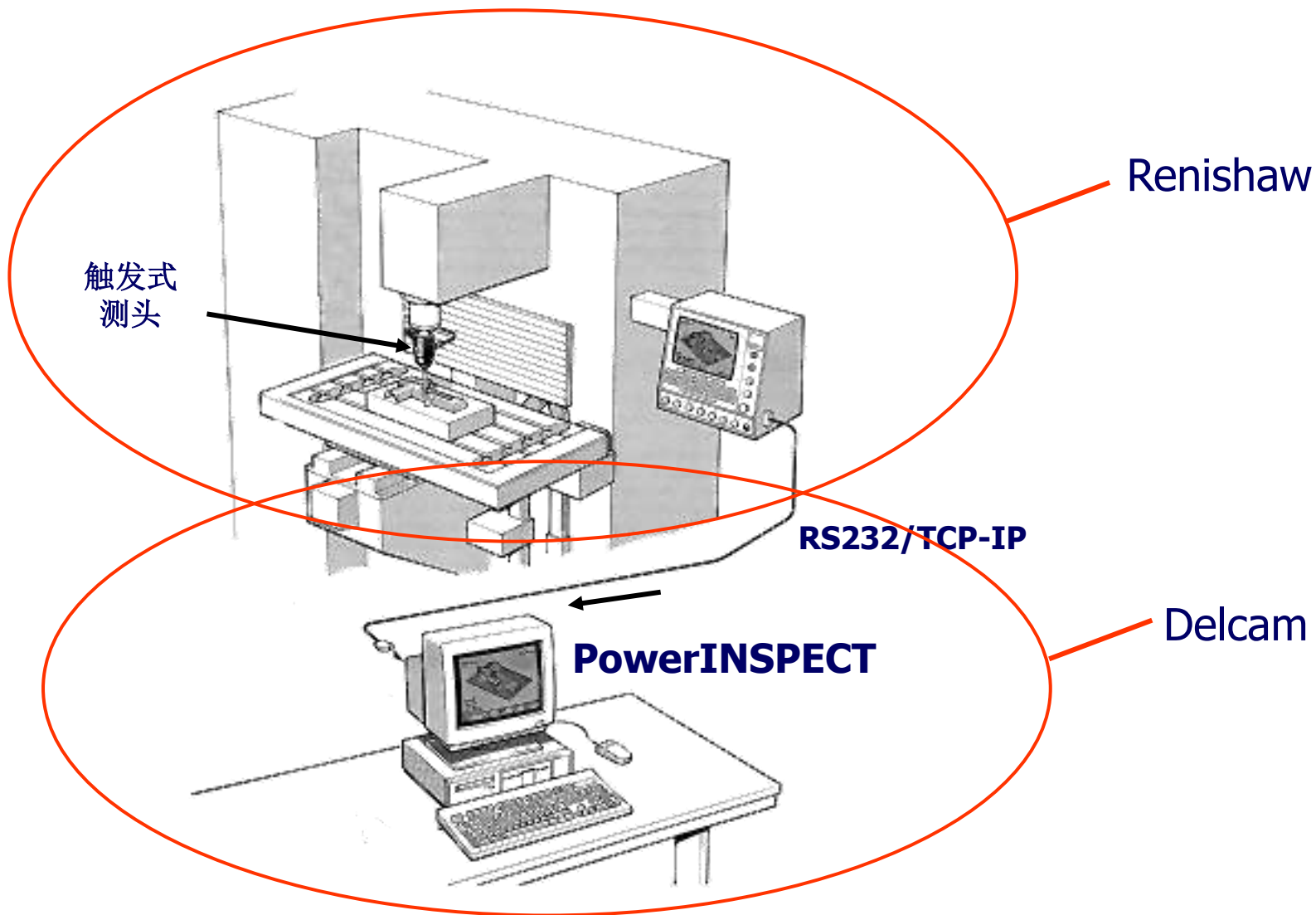
通常的加工生产过程



在机测量解决方案

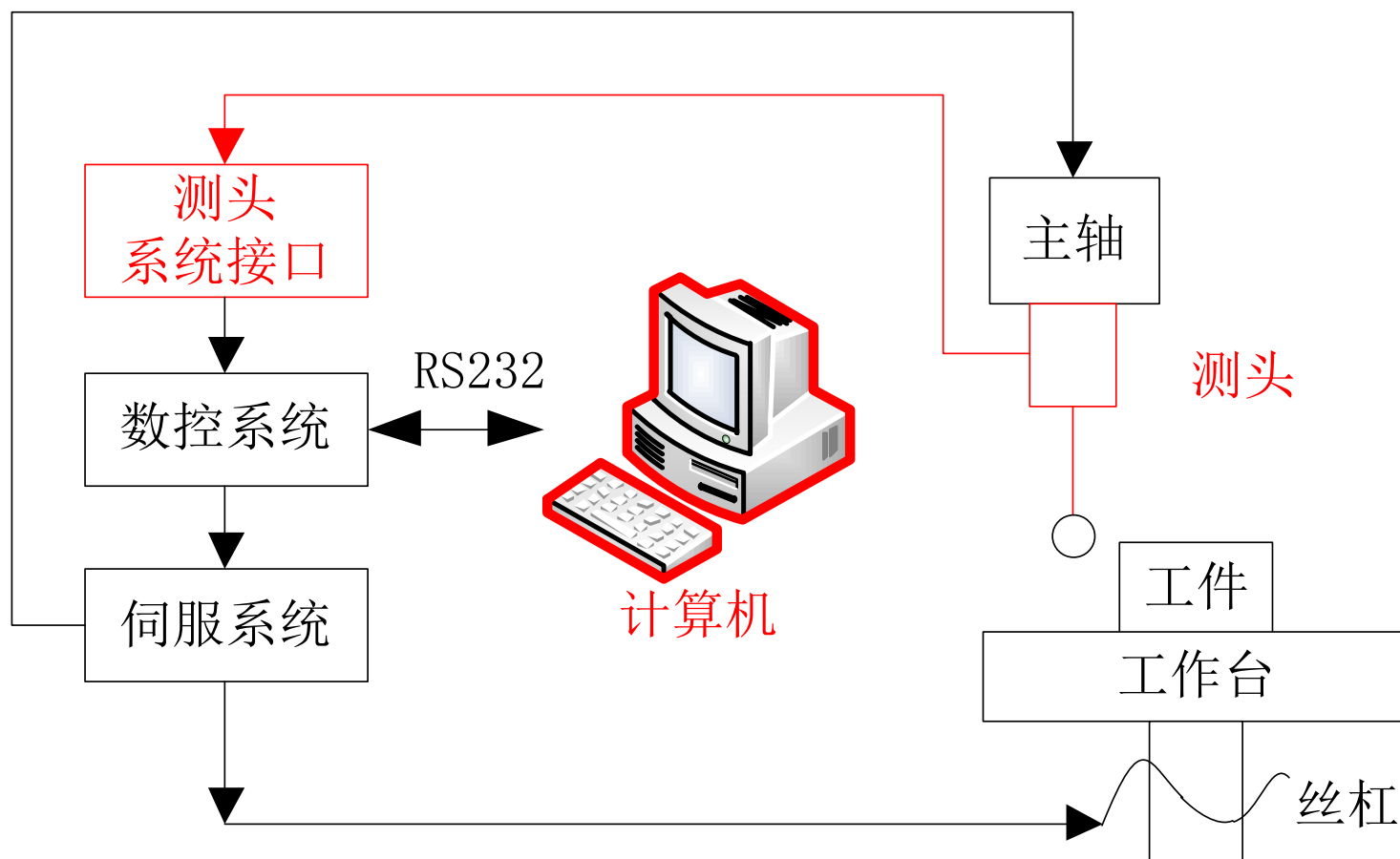


在机检测系统的组成



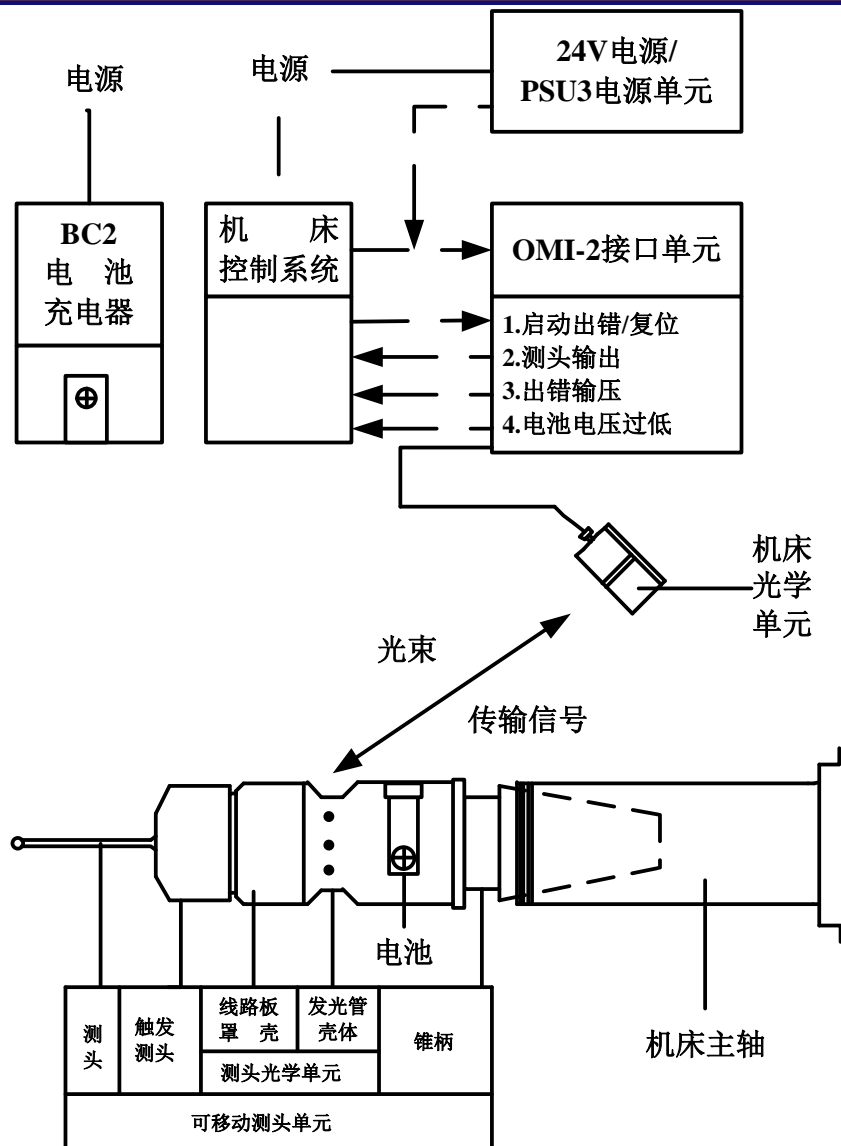
在机测量系统的组成

数控机床、计算机、测头系统



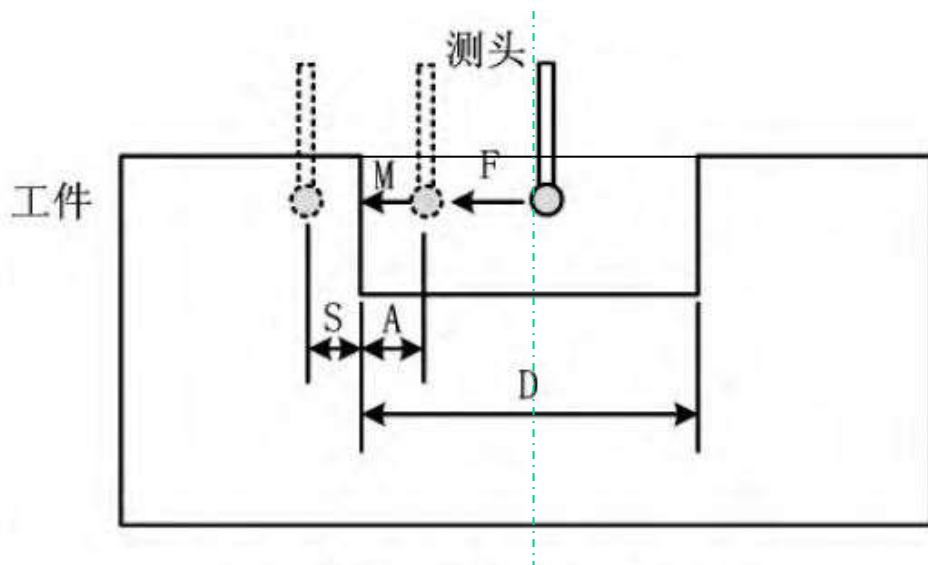
测量宏程序： 常用检测特征的测量程序块

CNC机床的在机测头系统



在机测量宏程序（圆孔半径测量）

- 测量宏程序采用面向特征的数控编程模式，为在机测量工艺规划信息的后置提供了高效的处理方式。
- 测量宏程序对同一类待测特征进行分类，将特征尺寸的大小、工艺参数等信息用变量来表示，在后置在机测量程序时只需要调用相关的宏程序并给相应的变量赋值即可。



图为编制的测量圆孔半径的宏程序示意图，用 **O 9 8 1 4** 表示其程序号，其调用格式为 **G 6 5 P 9 8 1 4 D [F M A S]**。

式中：D 表示圆孔直径，F 表示空行程测量速度，M表示测量速度，A 表示测量接近距离，S 表示搜索距离。其中参数D 为必选项，其余参数为可选项，如不指定则设为默认值。

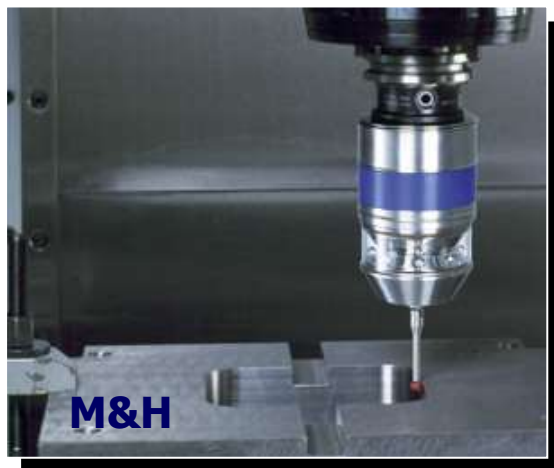
G 6 5 P 9 8 1 4 D 5 0 F 1 2 0 0 M 1 0 0 A 5 S 5

在机测头及接收器的安装





CNC机床及加工中心的测头系统



安装方式:

1. 主轴上（镗铣中心）或刀架上（车削中心）
2. 工作台上或床身上

存放方式：尾部结构与普通刀具锥柄相同，存放于刀库中。



在机测量技术应用—刀具检测

在机测量技术源自于对过程控制及生产周期的深度要求，如何**更快的验证新工艺的准确性**，更及时的**发现机床工具的不良状态**，**提高加工合格率**又能**缩短工期**成为应用在机测量技术的动力。

在机测量主要分为以下几类：

● 对刀具的检测

- 刀具长度的测量
- 刀具半径的测量
- 刀具磨损的检测。

刀具长度和半径的测量是为了设置正确的刀偏置，而刀具的磨损会影响产品的制造精度。



对刀仪



刀具磨损检测仪



在机测量技术应用——工件/夹具的找正和补偿

- 对工件的找正（对齐）：

“找正”（Alignment）：是指为了保证工件的正确安装、定位而采取的相应措施。至于存在“不正”，则既有夹具方面的原因，也受工件自身因素的影响。加工状态的找正是确保工件加工质量的基础。

对于夹具“找正”过程中测得的偏差，以及由于受到温度变化和刀具磨损等渐变因素的作用，加工状态的稳定性会影响到制成品质量的变化，在必要时还需采取一些补偿措施。

演示：在机测量的应用（刀具检测与工件找正）

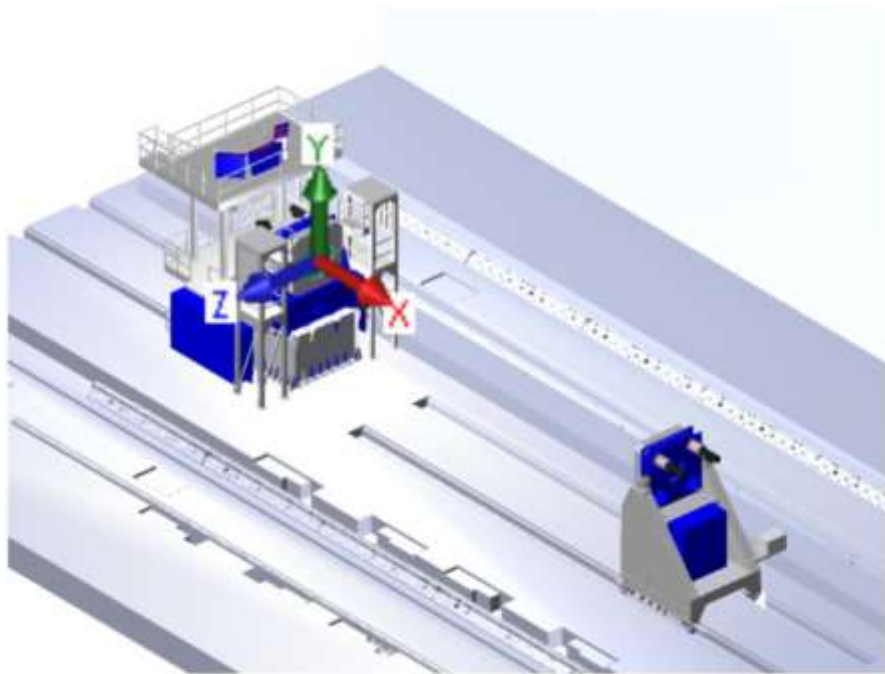
EMO Milano 2015- Primo ‘pay-as-you-go’ twin probe system for CNC machine tools



在机测量技术应用—机床精度检测

● 对机床性能的检测

机床精度的损失会影响产品的制造精度，因此需要定时地检测校准机床的精度，特别是对于大型CNC机床。





在机测量技术应用-关键工序/工步检测

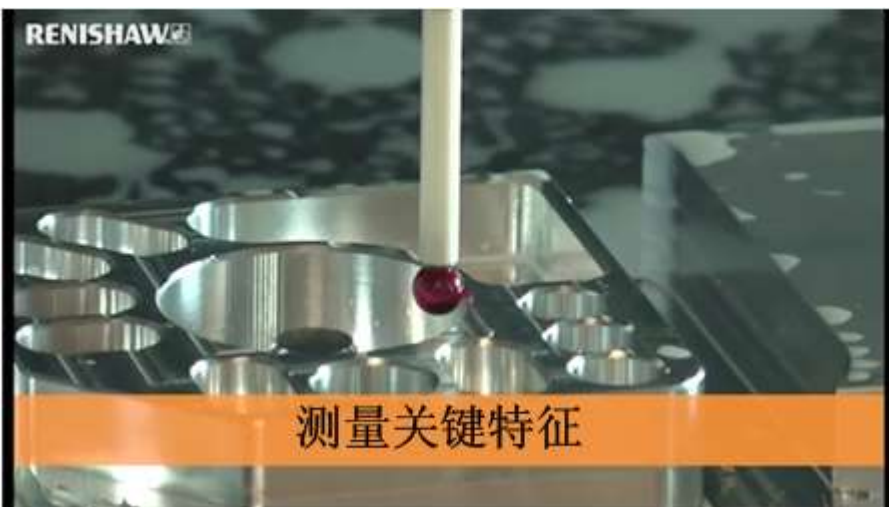
●关键工序的质量控制

——工件原料昂贵、难以加工或其他原因需要控制废品率，

——新产品新工艺处于验证阶段，

急需最快的验证手段以缩短研发周期时，可以对工序中的某些关键特征进行在机测量，实时指导下一道工序加工。

效果：提高加工质量，同时免除工件搬运成本、工期时间浪费以及工件再次返工时带来的重定位累积误差。





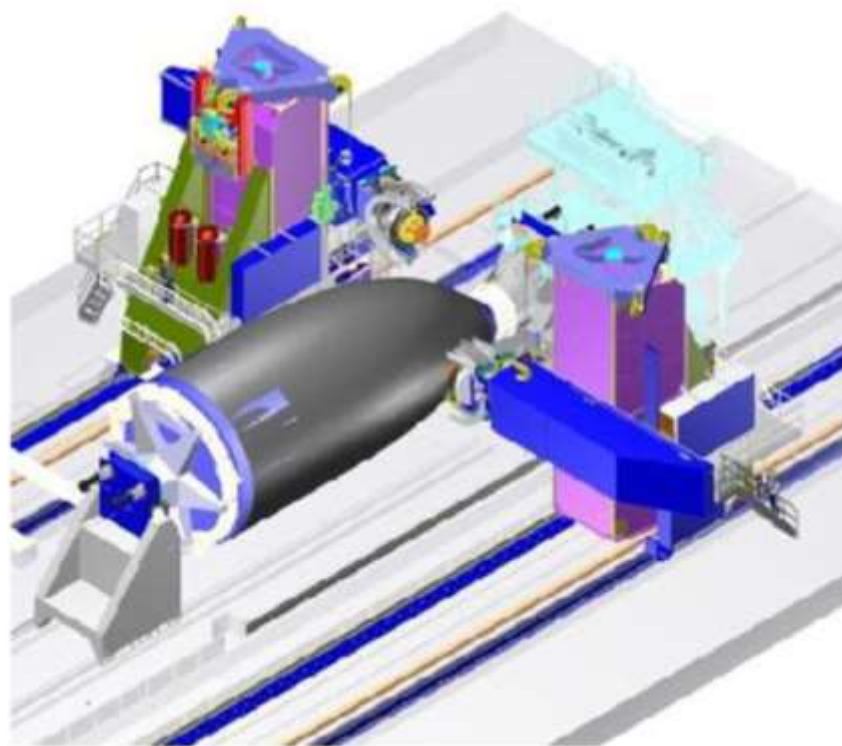
在线/在机测量技术应用—全面检测

●全面的在机检测（测量加工一体化）

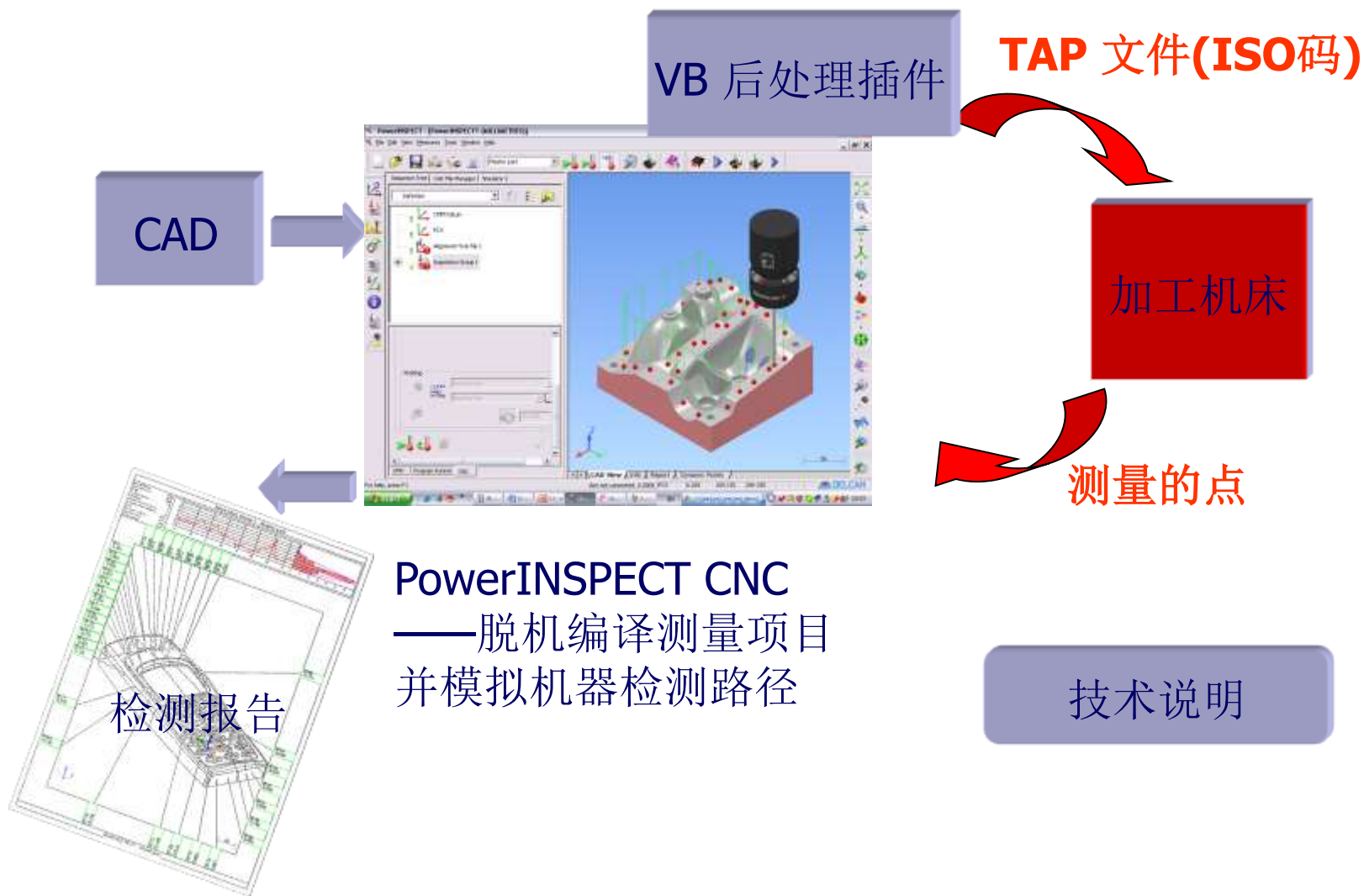
是在机测量技术的另一个重要的典型应用。包括：

- 返修率高的工件（如模具）；
- 易变形且难以重定位的工件（如长框类，薄、扁类零件）；
- 巨型零部件（如航天航空及风电类零部件）；

这些零件的加工过程控制难度比较大，非常需要在工件初加工甚或在毛坯件时就能明确其尺寸质量，以减少不合格品数量甚至追求100%的合格率。



在机测量举例—PowerINSPECT OMV



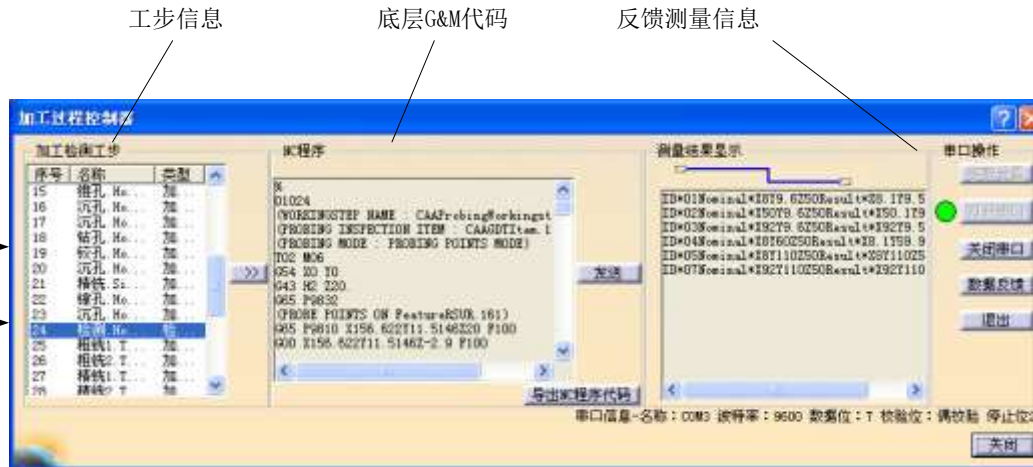
在机测量举例—基于STEP-NC的 闭环加工系统



(a)集成工艺规范树



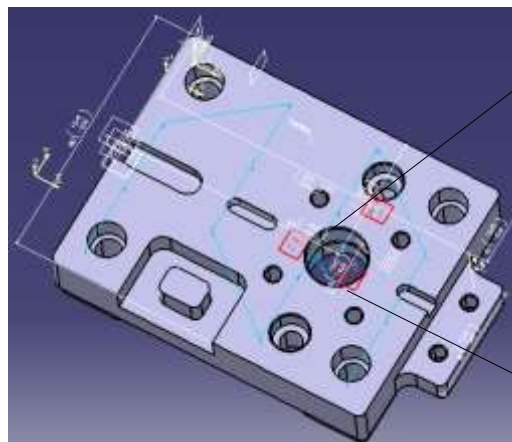
(d)补偿工步



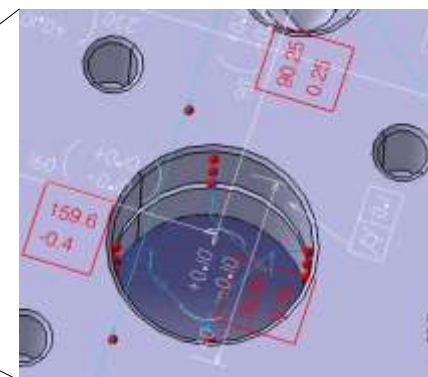
(b)过程控制器



(c2)检测项结果信息



(c1)位置、尺寸结果信息



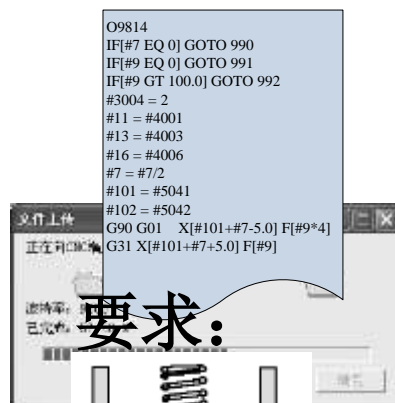
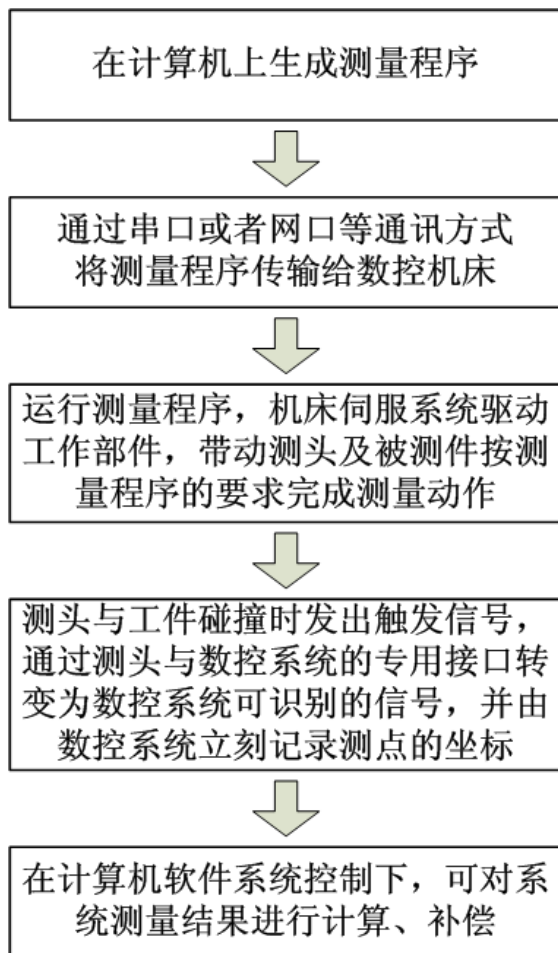
机床: 鲁机XK7132
数控系统: FANUC Oi mate
刀具: 若干
测头: RENISHAW OMP40





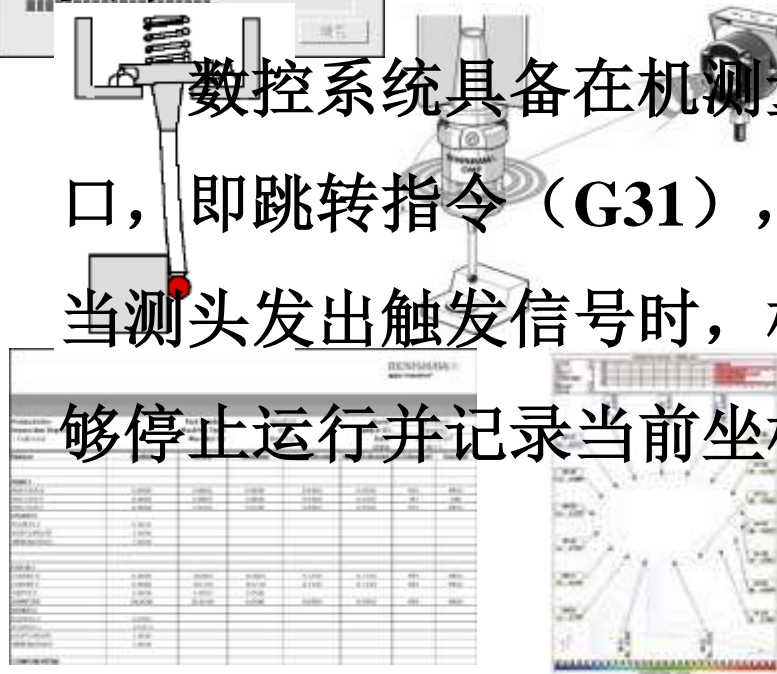
在机测量举例—闭环加工中在机测量过程

小型数控机床在机测量流程



要求:

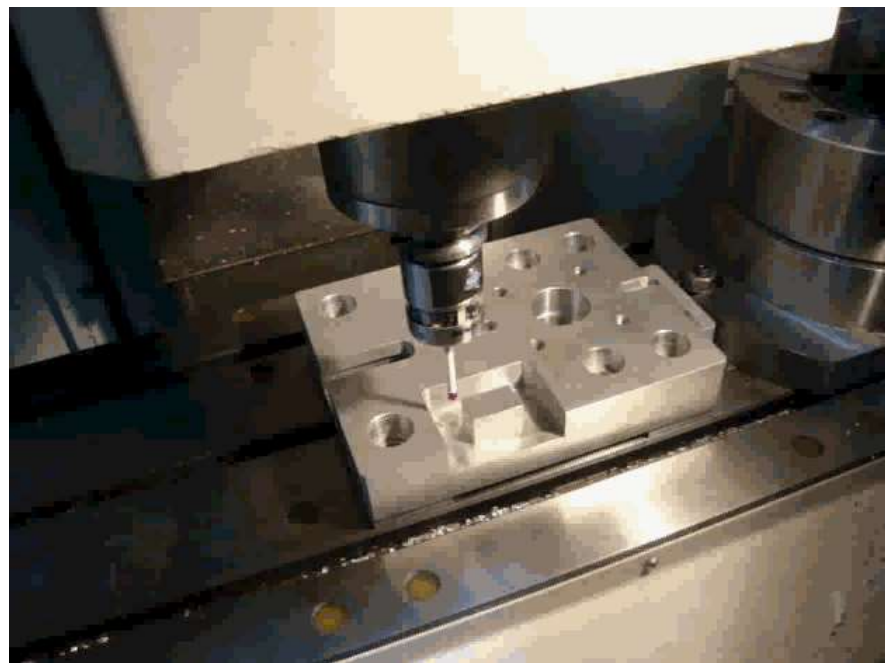
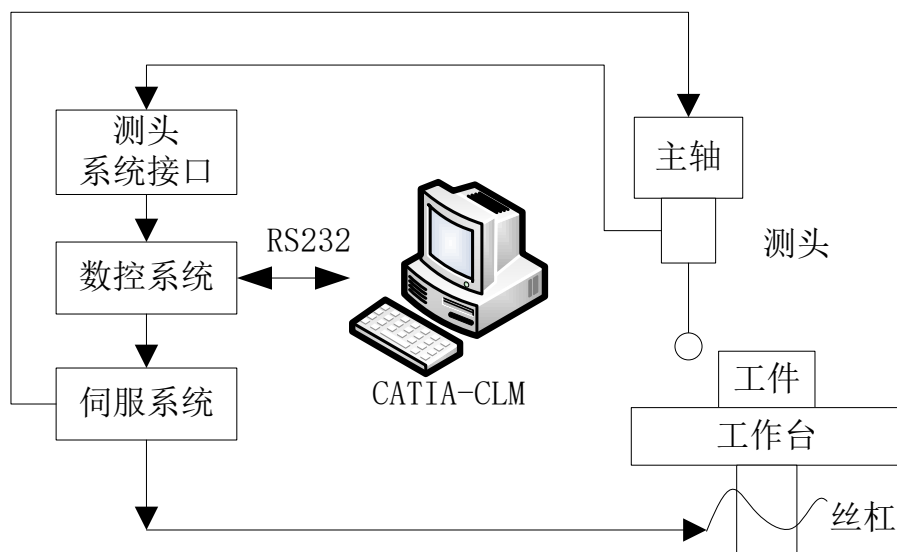
数控系统具备在机测量的接口，即跳转指令（G31），使得当测头发出触发信号时，机床能够停止运行并记录当前坐标值。





在机测量实验现场效果

| | |
|------|--------------------|
| 数控铣床 | 鲁机XK7132 |
| 数控系统 | Fanuc-0i系统 |
| 测头系统 | Renishaw OMP40测头系统 |





STEP-NC测试件在机测量





数控机床在机测量演示



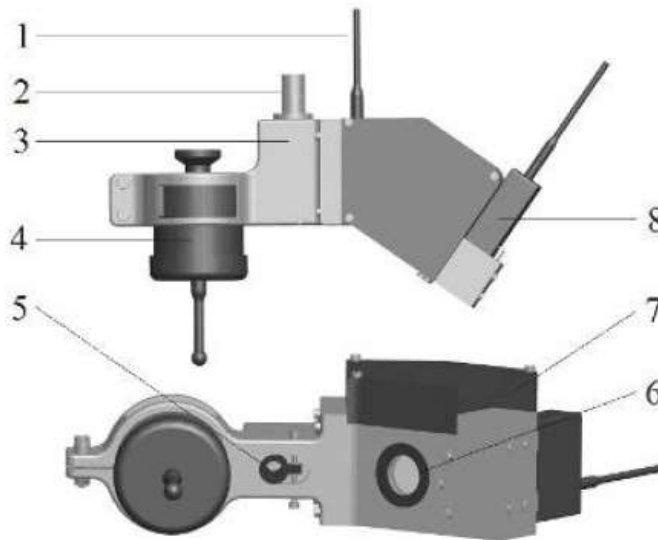
演示1：STEP-NC标准测试件的在机测量

演示2：曲面在机测量（研究项目成果）

- （1）CAD中规划测点、生成CNC测量程序
- （2）五轴CNC机床上执行测量程序、采集数据



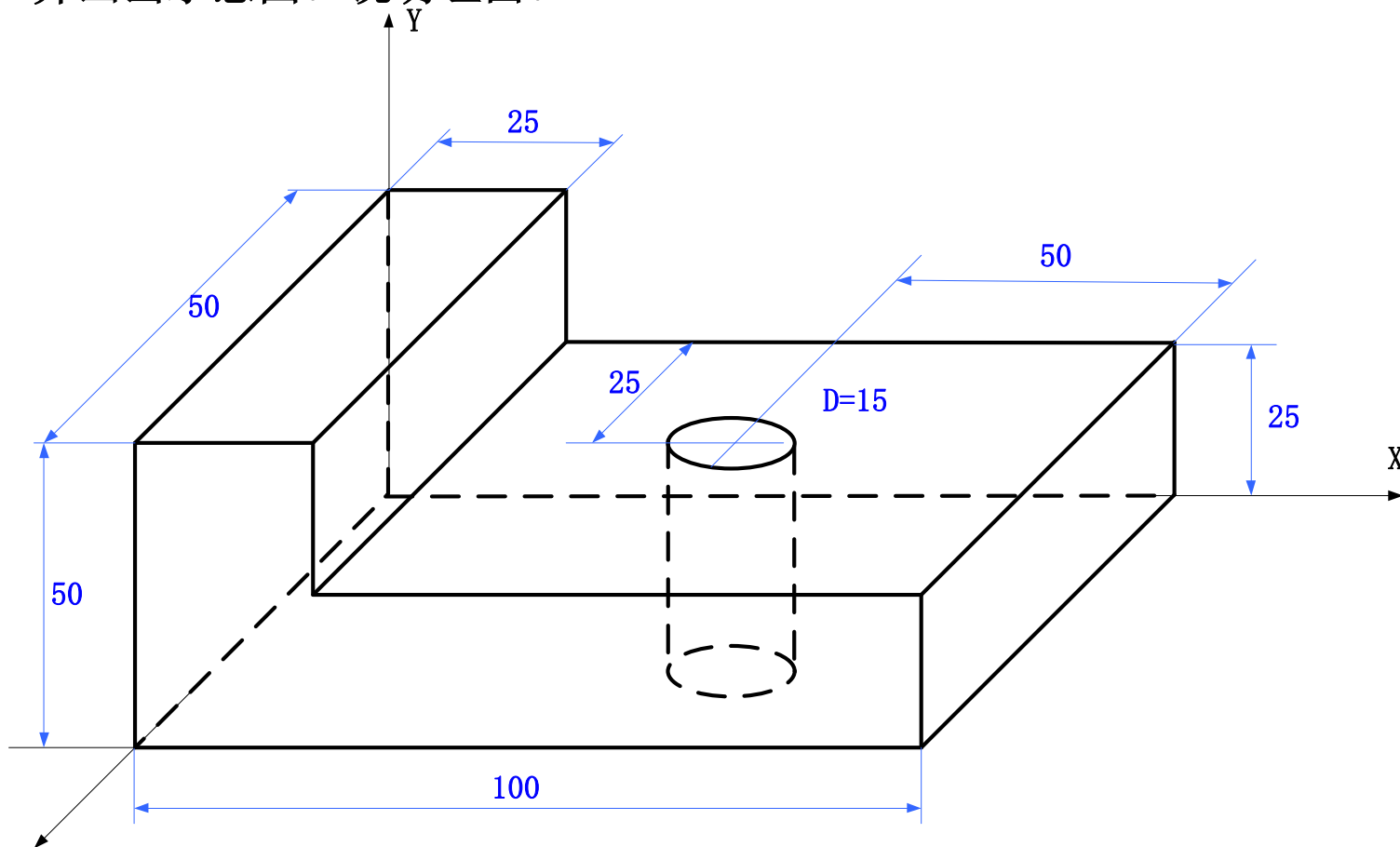
发展：数控加工中心的复合式在机测量



- 1.无线串口 2.刀柄 3.支架主体 4.接触式传感器
5.激光调节套 6.非接触传感器 7.电子支撑 8.无线视频

第五次作业

有下图所示零件及其坐标系，现需要对该零件的台阶面和孔进行三坐标测量，试：
(1) 选择测头类型及尺寸；(2) 进行测点和路径规划，列出所有测点的坐标和顺序（编号），并画出示意图。说明理由。





习题与思考题

- 1、什么计算机辅助测量？计算机辅助测量系统有哪些类型？
- 2、什么坐标测量机？有哪几种结构形式？各自适用于什么场合？
- 3、测量机的测头有哪几种？各适用于什么场合？
- 4、数控测量的主要步骤包括哪些？
- 5、试述数控机床在机测量的系统组成及工作原理。
- 6、试述关节臂测量机的组成及工作原理。
- 7、试述激光跟踪仪的组成及工作原理。
- 8、大尺寸测量仪器主要有哪些？各有哪些应用？
- 9、什么是DMIS？I++？



可选课程论文

- 1、 总结或剖析有关先进测量方法及在汽车、航空航天等行业应用。
- 2、 就数字化测量技术的应用或发展方向之一（如：逆向工程、在机测量/检测（**On-Machine Measurement/Inspection**）、测量辅助装配、测量数据（程序）标准等）搜集文献，撰写文献综述、分析报告。
- 3、 就数字化测量的某一种仪器系统（三坐标测量机、关节臂测量机、激光跟踪仪、照相测量等）的技术原理及应用进行学习总结，撰写总结报告。

可选课程论文

- 4、使用某款测量软件（如PowerInspect、PC-DMIS、SA等），对某实例零件或产品（如STEP标准测试件、飞机/汽车）进行测量编程、模拟，输出测量程序，写出总结报告。

