

高等学校教材

# 逆向建模与 三维测量

徐静 编



化学工业出版社

高等学校教材

# 逆向建模与 三维测量

徐静 编



化学工业出版社

·北京·

本书按照逆向工程实际过程的顺序讲解了从三维测量到逆向建模的技术,首先介绍三维测量的点接触式测量、光学非接触式测量操作方法,然后基于这两种不同测量方法所获取的数据,利用 Imageware 软件对数据进行后处理,构造出所测工件的 CAD 图形。在现代机械产品设计中,逆向工程的应用不只是简单还原原型,还要在原型基础上进行二次创新。本书针对逆向工程的关键技术,在实际操作步骤中讲解技术要点、前后步骤的关联等,包含了丰富的实践经验。本书所选实例具有代表性,步骤叙述简洁,读者可以举一反三,触类旁通。

本书可供高等学校机械类专业教学使用,也可供机械设计、制造部门参考。读者可以通过微信公众号“基于 Imageware 的逆向工程”或在 [www.cipedu.com.cn](http://www.cipedu.com.cn) 搜索“逆向建模与三维测量”获得本书学习资料。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

逆向建模与三维测量 / 徐静编. —北京: 化学工业出版社, 2019.12

ISBN 978-7-122-35454-9

I. ①逆… II. ①徐… III. ①产品设计-计算机辅助设计-应用软件 IV. ①TB472-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 244360 号

---

责任编辑: 李玉晖

责任校对: 刘颖

装帧设计: 韩飞

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印装: 三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 6 $\frac{3}{4}$  字数 106 千字 2020 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

逆向建模是在三维测量基础上,通过逆向工程软件再现物体的三维设计,又称逆向工程。其过程是利用三坐标测量设备对物体原型进行数据测量,获取逆向建模所需的点云数据或尺寸数据,再利用图形处理软件对测量数据进行构造,形成所需的线条、曲面等几何元素,最后对几何元素进行优化,重新创建出所需的物体模型。

三维测量技术作为现代逆向工程技术的基础之一,是集光学、电子、传感器、图像及计算机技术为一体的综合性技术。只有应用先进的测量技术、测量手段,才能设计、制造出综合性和单项性能均优良的产品。

逆向工程处理软件 Imageware 于 1995 年由美国 EDS 公司出品,最初用于 UG NX 中的逆向工程造型,之后在机械制造行业得到广泛应用。各大汽车、摩托车、模具制造企业等均使用这个软件。它具有强大的点云数据处理、曲面造型、误差检测功能,给使用者处理点云数据带来极大方便。

本书按照工程实际过程的顺序讲解了从三维测量到逆向建模的技术要点,首先介绍三维测量的点接触式测量、光学非接触式测量操作方法,然后基于这两种不同测量方法所获取的数据,利用 Imageware13.2 版本软件对数据进行后处理,构造出所测工件的 CAD 图形。

本书第 1 章介绍逆向工程概念、三维测量方法和手段以及逆向建模常用软件,重点对 Imageware 软件的几个模块进行介绍。第 2

章对三坐标测量机进行简单介绍，以德国 WENZEL 三坐标测量机为例讲解了使用方法；还介绍了已知 CAD 模型的数据测量、数据对比输出。第 3 章基于 Imageware13.2，介绍三坐标接触式测量数据逆向建模流程，详细地举例介绍建模主要界面与操作步骤。第 4 章对 Handyscan 手持式扫描仪进行介绍，并阐述它获取数据的操作步骤。第 5 章基于 Imageware13.2，介绍光学扫描获取鞋楦数据的逆向建模流程，详细地介绍鞋楦建模的主要界面、操作步骤。本章的实例在刘佩军编译的《UG/Imageware 逆向工程培训教程》(基于 Imageware12.0 英文版软件)第 15 章基础上进行提升，这个实例全面地阐述了 Imageware 软件的功能，非常具有代表性。本书使用 Imageware13.2 中文版软件重新演示该逆向建模的操作步骤，希望能给读者学习带来便利。读者可以通过微信公众号“基于 Imageware 的逆向工程”或在 [www.cipedu.com.cn](http://www.cipedu.com.cn) 搜索“逆向建模与三维测量”获得本书学习资料。

本书编写工作得到了华南理工大学“十三五”本科教材《逆向建模与三维测量》建设项目的资助，特此感谢！

在本书编写过程中，刘桂雄、赖建康、梁柱、李秋平等专家学者给予了大力协助，在此深表感谢。鉴于编者水平有限，书中难免有不足之处，希望各位专家、同行批评指正。

编者

2019 年 9 月

<b>第 1 章 逆向工程概述</b>	<b>1</b>
1.1 逆向工程技术基本概念	1
1.2 三维数据获取硬件条件	2
1.3 常用逆向工程软件	3
1.4 逆向工程设计前准备工作	7
<b>第 2 章 三坐标测量机及其应用</b>	<b>8</b>
2.1 三坐标测量机概述	8
2.2 三坐标测量机的分类	9
2.3 三坐标测量机的标尺系统和探测系统	12
2.4 三坐标测量机的发展趋势	14
2.5 德国 WENZEL LH65 型三坐标测量机介绍	15
2.6 凸轮测绘实验	17
2.7 基于已知 CAD 模型的零件测量	19
<b>第 3 章 基于 Imageware 三坐标测量数据的逆向建模</b>	<b>28</b>
3.1 凸轮的逆向建模	28
3.2 板件的逆向建模	35
3.3 多曲面规则零件逆向建模	41
<b>第 4 章 Handyscan 扫描仪应用</b>	<b>56</b>
4.1 Handyscan 扫描仪概述	56

4.2	应用 Handyscan 扫描仪操作流程 .....	57
4.3	不规则曲面零件测绘实验 .....	62

## 第 5 章 基于 Imageware 激光扫描数据的鞋楦逆向建模实例 64

5.1	减少数据点和多边形网络化 .....	64
5.2	对齐数据 .....	66
5.3	将点云数据与全局坐标系对齐 .....	69
5.4	可视化点云和提取特征 .....	72
5.5	有用的多边形操作 .....	74
5.6	创建顶部曲面的线框 .....	77
5.7	为零件的两侧创建线框 .....	82
5.8	创建过渡区域曲线以定义曲面端部 .....	84
5.9	使用侧面的框架创建曲面 .....	88
5.10	创建并修改曲面补片 .....	92
5.11	调整和分析顶部曲面 .....	95
5.12	创建过渡区域曲面和底部零件边界 .....	96
5.13	完成的模型 .....	98

## 参考文献

# 第 1 章

## 逆向工程概述

### 1.1 逆向工程技术基本概念

随着计算机技术的发展，CAD 技术已成为产品设计人员进行研究开发的重要工具，其中三维造型技术已被制造业广泛应用于产品及模具设计、方案评审、数控加工制造及管理维护等各个方面。在实际开发制造过程中，设计人员接收的技术资料可能是各种数据类型的三维模型，但很多时候，却是从上游厂家得到产品的实物模型。设计人员需要通过一定的途径，将这些实物信息转化为 CAD 模型，这就需要应用逆向工程（reverse engineering）技术。

逆向工程技术的工程概念是：通过对已有产品模型进行三维数字化扫描，来获取产品模型的表面轮廓的点云数据，将点云数据通过专业逆向工程软件进行处理，最终形成三维数学模型，用于产品的重新设计、数控加工以及结构分析。它不同于通常的由二维草图设计到三维立体模型设计再到加工或快速成形的正向设计思路，而是一种基于实体而没有数学模型的设计方法。

逆向工程技术与传统的正向设计存在很大差别。传统的正向产品造型设计，一般是对市场进行调研并确定了大量需求信息后，由设计人员分析、构思产品模型，草绘出产品零件平面图，进行必要的设计计算与校核，形成产品稍完整的设计方案后，即着手完成三维简约几何造型，再根据需要绘制效果图、三视图或试做简易的实物模型。而逆向工程则是从产品原型出发，获取产品的三维数字模型，再进一步利用 CAD/CAE/CAM 以及 CIMS 等先进技术对其进行处理。

逆向工程的意义在于它不是简单地把原有物体还原，还要在还原的基础上进行二次创新，所以逆向工程作为一种创新技术现已广泛应用于工业领域并取得了重大的经济和社会效益。

一般来说，产品逆向工程包括形状反求、工艺反求和材料反求等几个方面，在工业领域主要有以下实际应用：

- ① 新零件的设计，主要用于产品的改型或仿型设计。
- ② 已有零件的复制，再现原产品的设计意图，进行数据管理和存档。
- ③ 从已有产品零件直接快速生成 STL 模型，用于快速成形（RP）或模具设计。
- ④ 损坏或磨损零件的还原和修复。
- ⑤ 数字化模型的检测，例如检验产品的变形分析、有限元分析等，以及进行模型的比较。

逆向工程技术为快速设计和制造提供了很好的技术支持，它已经成为制造业信息传递重要而简捷的途径之一。

## 1.2 三维数据获取硬件条件

几何量测量主要包括角度、距离、位移和空间位置等量的测量，其中最为通用和普及的就是确定位置的三维坐标测量。在逆向工程技术设计时，首先需要从设计对象中提取三维数据信息。三维扫描设备的发展为产品三维信息的获取提供了硬件条件。三维扫描设备的测头按结构不同可分为接触式、非接触式两种。接触式测头又可分为硬测头、软测头两种，这种测头与被测物体直接接触，从而获取数据信息。非接触式测头则是应用光学及激光扫描原理进行的。

不同的测量对象和测量目的，决定了测量过程和测量方法的不同。在实际三坐标测量时，应该根据测量对象的特点以及设计工作的要求确定合适的扫描方法，并选择相应的扫描设备。例如，材质为硬质且形状较为简单、容易定位的物体，应尽量使用接触式扫描仪。这种扫描仪成本较低，设备损耗费相对较少，且可以输出扫描形式，便于扫描数据的进一步处理。但在对橡胶、油泥、人体头像或超薄形物体进行扫描时，则需要采用非接触式测量方法，它的特点是速度快，工作距离远，无材质要求，操作简易方便。

三维扫描设备分为第一代、第二代和第三代。

**第一代：点测量。**

点测量代表系统有三坐标测量仪、点激光测量仪、关节臂扫描仪（精度不高）。通过每一次的测量点反映物体表面特征，优点是精度高，但速度慢，如果要做逆向工程，只能在测量较规则物体上有优势。

应用场合：适合做物体表面误差检测用。

**第二代：线测量。**

线测量代表系统有三维台式激光扫描仪、三维手持式激光扫描仪、关节臂+激光扫描头。通过一段（一般为几厘米，激光线过长会发散）有效的激光线照射物体表面，再通过传感器得到物体表面数据信息。

应用场合：适合扫描中小件物体，扫描景深小（一般只有5cm），精度较低，属于过渡性产品。

**第三代：面扫描。**

面扫描代表系统有三维扫描仪（结构光、光栅式扫描仪）、三维摄影测量系统等。通过一组（一面光）光栅的位移，再同时经过传感器而采集到物体表面的数据信息。

应用场合：适合大中小物体的扫描，精度较高，扫描速度极快（精易迅三维扫描仪单面面积400mm×300mm，时间≤5s），测量景深很大（一般为300~500mm，甚至更大）。

### 1.3 常用逆向工程软件

目前比较常用的四大逆向工程软件为 Imageware、Geomagic、CopyCAD 以及 RapidForm。

#### (1) Imageware

由美国 EDS 公司出品，是最著名的逆向工程软件，被广泛应用于汽车、航空、航天、消费家电、模具、计算机零部件等设计与制造领域。Imageware 作为 UG NX 中提供的逆向工程造型软件，具有强大的测量数据处理、曲面造型、误差检测功能，可以处理几万至几百万的点云数据。根据这些点云数据构造的 A 级曲面具有良好的品质和曲面连续性。Imageware 的模型检测功能可以方便、直观地显示所构造的曲面模型与实际测量数据之间的误差以及平

面度、圆度等几何公差。Imageware 逆向工程软件的主要功能包括:

### 1) Imageware 检测

该模块针对的是复杂数字形状的测量和检测,它为被测量的物理组件与名义数据之间的比较提供了多功能的、易用的数据分析。用户可以输入从零件实体获得的参考数据或者离散的坐标测量值,直接比较测量点与曲面、点与点或者点与数据。数据可以自动地定位和对齐,以达到所需的最大可能精度。而一旦对齐,软件又提供了一系列功能对零件与扫描数据进行定性和定量的对比分析。此外,系统还为点云提供了很多功能,同时为文档和报表工作提供了一定范围的标注工具。比较结果以图形和文字形式通过颜色代码偏差图(云图)进行汇报。这些颜色图提供了一个强大的可视化的提示,能够精确地找到误差的主要根源和整个零件的偏差趋势。在工模具交付之前就可以将设计和加工所关心的问题可视化,会大大缩短制造时间。另外,定量分析和查询功能对于所选择的测量点或者局部区域提供了详细的数字报表,可就关键的制造信息进行全球范围的沟通。

### 2) Imageware 评估

该模块包括了一系列的工具,可对整个产品质量从视觉和数学方面进行评估。高效的连续性管理工具保持了几何体之间的位置、相切和曲率关系,同时偏差检查工具还可评估它们之间的精确误差,在保持自然的、赋予创造性的流程的同时消除了乏味的手工工作。实时诊断工具提供了对用于加工的几何质量的即时分析,它着重于模型美学方面的质量。环境和纹理贴图被广泛地应用,以预见和反映真实测试场景,从本质上减少或消除对昂贵的物理模型或样机的需求。这些工具作为一种手段以可视化的方式识别曲面流属性和高光效果,常用于检查曲面瑕疵、偏差和缺陷。另外,检验还包括检查可加工性、分模线和曲面缝隙,对于在数据传送到后续流程之前即能识别曲面瑕疵是非常有用的。从本地系统创建的模型可以被传送到相应的位置,以对整个模型质量进行全面的评估和诊断。这个高效的扩展功能有利于在开发周期中提高产品的性能,缩短上市时间。

### 3) Imageware 多边形造型

该模块主要针对产品概念设计,为格形和三角面数据的操作提供了一套工具,它能够使用立体印刷数据、有限元分析或数据进行工作。为了最初的可行性研究,用户可以向后续应用提供直接的输入。多边形造型模块是理想的快速封装分析工具,它能够显著地缩短现有过程中进行曲面逆向设计所需

的较长的研制周期。增强的多边形造型功能包括根据点云创建多边形、为封装进行多边形偏置和从多边形数据中截取截面，这些都可用于工程可行性分析和曲面边界定义。为了进行快速样机的准备和测试，用户不仅可通过孔的填补来产生水密模型，而且还可通过布尔运算增加和减少多边形数据，以达到修补多边形网格的目的。在概念开发阶段，已有的交互式的多边形造型和编辑工具保证了用户快速成形的柔性。在开发过程的任何一步，用户都可以利用多边形可视化工具来进一步检查和评估模型的所有方面——这些都是实时的。

#### 4) Imageware 点处理

提供的工具主要用于采集和测量点数据的评估并进行巧妙的处理，其可接受来自几乎所有的光学（照相）扫描仪、三坐标测量系统、激光扫描仪、射线扫描仪和有限元分析结果的数据，对点的数量或文件的大小没有限制。对点数据的处理是逆向工程或者检测的首要任务，用户可以从众多的工具中完全自由地选择对测量数据进行检测、修改和清理。用户可以对采集来的数据进行分类、排序和布置，以达到后续工作所需的最适合的形式。点的显示、密集点的抽样和点的可视化仅仅需要点击鼠标。多个扫描数据集可以被合并为一个，然后进行切割、裁剪或修改，用于建立特定的数据。对于采集数据进行操作最独特的好处是用户对产生什么，何时、何地和怎样使用都有完全的控制权。截面或自动产生，或指定产生，或完全交互，一切都取决于用户。另外的功能，如对采集数据的全局造型（用于偏置），对于用户在可行性研究的早期起到了辅助作用。

#### 5) Imageware 曲面

该模块为复杂自由曲面形状的设计提供了一系列强有力的曲线和曲面创建编辑的功能，它包括曲面生成的主要命令，如扫掠、放样，以及其他产品中所没有的用于复杂形状开发的功能。创建的工具还包括倒角、翻边和曲面偏置。依靠直接编辑控制点，可以对曲线特性和曲面流进行控制，这就是它进行设计的实质。作为控制点编辑的补充，还应用了一个全新的约束解算器，用于曲线网络和生成曲面所需的一个全相关的曲线架构（或实时的历程解算器）。这些工具能够捕捉几何体之间的关系，使得编辑时相关几何体可自动更新，大大提高了设计师的效率。该曲面还为曲面匹配提供了功能强大的控制能力。它允许对相邻曲面在边界或者曲面内部进行位置、相切或者曲率的控制。更大范围的匹配选项还可提供对几何的最大限度的控制。在某些场合，

设计需要使用模型（汽车行业的 classA 质量曲面），这将使用到高阶几何，而 Imageware 曲面可生成高达 21 阶的曲面，在贯穿整个曲面构造过程中能够保证设计者遵循设计、工程和制造的标准。

Imageware 软件是专门用于曲线和曲面的检测、成形和评估的软件。利用三坐标测量机、激光扫描仪等测量设备配合曲面成形软件 Imageware 和加工中心、数控车床等设备，就可以实现产品的逆向制造。

## (2) Geomagic

Geomagic Studio 是美国 Raindrop（雨滴）公司出品的逆向工程和三维检测软件，可轻易地从扫描所得的点云数据创建出完美的多边形模型和网格，并可自动转换为 NURBS 曲面。该软件也是除了 Imageware 以外应用最为广泛的逆向工程软件。

Geomagic Studio 主要包括 Qualify、Shape、Wrap、Decimate、Capture 五个模块。主要功能包括自动将点云数据转换为多边形（Polygons）、快速减少多边形数目（Decimate）、把多边形转换为 NURBS 曲面、曲面分析（公差分析等）及输出与 CAD/CAM/CAE 匹配的文件格式（IGS、STL、DXF 等）。

## (3) CopyCAD

CopyCAD 是由英国 DELCAM 公司出品的功能强大的逆向工程系统软件，它允许从已存在的零件或实体模型中产生三维 CAD 模型。该软件为生成来自数字化数据的 CAD 曲面提供了工具。CopyCAD 能够接收来自坐标测量机的数据，同时跟踪机床和激光扫描器。

CopyCAD 简单的用户界面允许用户在尽可能短的时间内进行生产，并且能够快速掌握其功能，即使初次使用者也能做到这点。使用 CopyCAD 的用户能够快速编辑数字化数据，产生具有高质量的复杂曲面。该软件系统可以完全控制曲面边界的选取，然后根据设定的公差自动生成光滑的多块曲面，同时，CopyCAD 还能够确保在连接曲面之间的正切的连续性。

## (4) RapidForm

RapidForm 是韩国 INUS 公司出品的全球四大逆向工程软件之一。RapidForm 提供了新一代运算模式，可实时将点云数据运算出无缝的多边形曲面，使它成为三维扫描后处理的最佳接口。

RapidForm 主要优势包括多点云数据管理界面、多点云处理技术、快速点

云转换成多边形曲面的算法、彩色点云数据处理及点云合并功能。

## 1.4 逆向工程设计前准备工作

逆向设计工作可能比做正向设计更具有挑战性。在设计一个产品之前，首先要尽量理解原有模型的设计思想，在此基础上还可能要修复或克服原有模型上存在的缺陷。从某种意义上看，逆向设计也是一个重新设计的过程。在开始进行逆向设计前，应该对零件进行仔细分析，主要考虑以下一些要点：

① 确定设计的整体思路，对自己手中的设计模型进行系统的分析。面对大批量、无序的点云数据，初次接触的设计人员会感到无从下手。这时应首先要周全地考虑好先做什么，后做什么，用什么方法做，主要方法是将模型划分为几个特征区，得出设计的整体思路，并找到设计的难点，基本做到心中有数。

② 确定模型的基本构成形状的曲面类型，这关系到相应设计软件的选择和软件模块的确定。对于自由曲面，例如汽车、摩托车的外覆盖件和内饰件等，一般需要采用具有方便调整曲线和曲面的模块；对于初等解析曲面件，如平面、圆柱面、圆锥面等，则没必要因为有测量数据而用自由曲面去拟合一张显然是平面或圆柱面的曲面。

## 第 2 章

# 三坐标测量机及其应用

### 2.1 三坐标测量机概述

#### (1) 三坐标测量机定义

根据 GB/T 16857.2—2017 规定,三坐标测量机是一种使用时基座固定,能产生至少三个线位移或角位移,且三个位移中至少有一个为线位移的测量器具。三坐标测量机是由机械主机、位移传感器及探测部分、控制部分和测量软件等组成的测量系统。通过测头对被测物体的相对运动,可以对各种复杂形状的三维零件表面坐标进行测量。根据坐标测量机的配置不同,测量可以手动、机动或自动进行。通过增加不同附件,如旋转工作台、旋转测座、多探针组合、接触或非接触测头等,可以提高测量的灵活性和适用范围。通过人机对话,可以在计算机控制下完成全部测量的数据采集和数据处理工作。

三坐标测量机是一种高效率的精密测量仪器,它广泛应用于机械制造、仪器制造、电子工业、汽车和航空工业中,测量零部件的几何尺寸和相互位置,例如箱体、导轨、涡轮和泵的叶片、多边形、转子发动机缸体(次摆线形)、齿轮、凸轮、飞机形体等空间型面。三坐标测量机除用做三坐标检验之外,还可划线、定中心、刻制光栅和线纹尺、光刻集成线路板等,并可对连续曲面进行扫描。由于它的测量范围大、精度高、效率高,作为大型精密仪器与数控机床“加工中心”相配合有“测量中心”之称号。

## (2) 三坐标测量机的基本原理

将被测物体放在三坐标测量机的测量空间, 获得被测几何面上各测量点的几何坐标尺寸, 根据这些点的空间坐标值, 经过数学计算求出待测的几何尺寸和形状位置误差。坐标测量的数据处理流程框图如图 2-1 所示。

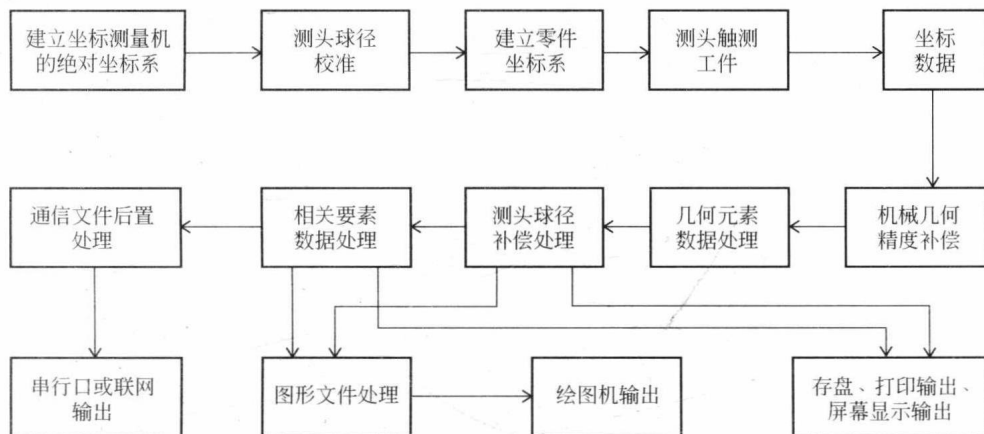


图 2-1 坐标测量数据处理流程图

## 2.2 三坐标测量机的分类

### (1) 按功能分

测量型和划线型。

### (2) 按操作方式分

手动型、机动型和 CNC 自动型。

### (3) 按精度分

A 类, 空间测量不确定度不大于  $(1.5+L/300) \mu\text{m}$  ( $L$  为待测长度)。

B 类, 空间测量不确定度不大于  $(3+L/200) \mu\text{m}$ 。

C 类, 空间测量不确定度不大于  $(5+L/125) \mu\text{m}$ 。

D 类, 空间测量不确定度大于  $(5+L/125) \mu\text{m}$ 。

### (4) 按结构分

#### 1) 移动桥式

移动桥式是使用最广泛的一种结构形式。特点是开敞性好, 承载能力大,

视野开阔，上下零件方便，运动速度快，精度比较高。有小型、中型、大型几种形式，如图 2-2 所示。

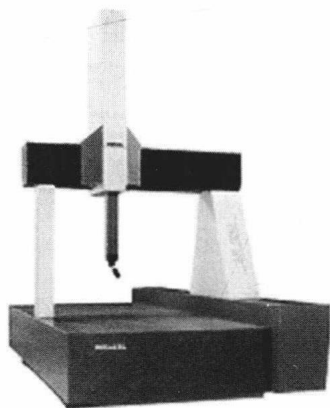


图 2-2 移动桥式

### 2) 固定桥式

固定桥式测量机桥架固定，刚性好，动台中心驱动、中心光栅阿贝误差小，测量精度非常高，是高精度和超高精度测量机的首选结构，如图 2-3 所示。

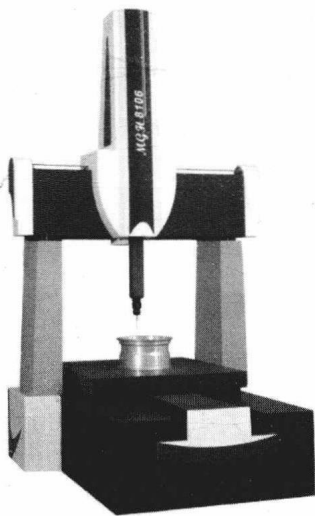


图 2-3 固定桥式

### 3) 立柱式

其结构类似于立式铣床，三轴独立导向运动。这种结构的优点是结构牢靠、运动精度高、开敞性好。局限在于尺寸不能太大，零件的重量对工作台