

# 两周学会压铸件在机测量

西安研发中心应用技术部 编著

北京精雕集团

北京精雕集团·西安研发中心  
应用技术部

版权所有，侵权必究！

网 址：<http://www.jingdiaosoft.com>

地 址：陕西省西安市高新区西部大道 119 号

电 话：029-84503040-8502

邮 编：710119

传 真：029-88443241

邮 箱：[xian-tech@jingdiao.com](mailto:xian-tech@jingdiao.com)

版 次：2019 年 3 月第 1 版

字 数：22 千字

印 次：2019 年 3 月第 1 次印刷

## 前言

压铸件的制造过程分为两个阶段：第一个阶段是使用压铸机制造出压铸毛坯件；第二个阶段是应用 CNC 设备加工一些定位或装配使用特征（基本都是平面、孔和边加工）。这些加工特征简单，但是分布在不同的加工方向，需要多角度定位加工。

传统加工方式主要采用三轴多工序或者“三轴+四轴”多工序加工，这是目前压铸件的主流生产工艺。但是在大批量的压铸件生产过程中，由于每件毛坯都存在变形，导致不能准确定位工件坐标系，进而很难保证批量零件加工的稳定性。

精雕在机测量技术出现后，可以实现自动变换工件坐标系，使之与设计的编程坐标系相重合，实现一次装夹，多面加工，为解决压铸件加工难题提供了一种新的思路。

了解到在机测量技术可以为压铸件加工提供一套完整的解决方案，您是不是已经迫不及待想要掌握这门技术？到底怎么实现？零基础能不能学会？不用担心，我们为您精心策划了两周的学习课程。下面跟随我们的脚步，带您探索压铸件在机测量技术的奥秘。



以下是两周学习内容安排：

---

### 压铸件在机测量学习内容

---

- |                       |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| ● 绪论 (Day1)           | ● 在机测量变换工件坐标系 (Day6-10)  |
| ● 压铸件在机测量应用流程 (Day2)  | ● 在机测量修正同轴度误差 (Day11-13) |
| ● 在机测量建立工件原点 (Day3)   | ● 在机测量实现精准检测 (Day14-15)  |
| ● 在机测量监控余量状态 (Day4-5) |                          |
-



# 目 录

前 言.....	1
目 录.....	1
<b>第一章 绪 论</b>	
1.1 什么是在机测量技术? .....	1
1.2 在机测量技术的基本构成.....	1
<b>第二章 压铸件在机测量应用流程</b>	
2.1 压铸件在机测量应用流程.....	4
2.2 压铸件在机测量工作划分.....	5
2.3 实例应用.....	7
<b>第三章 在机测量建立工件原点</b>	
3.1 功能介绍.....	8
3.2 实例应用.....	8
<b>第四章 在机测量监控余量状态</b>	
4.1 功能介绍.....	11
4.2 实例应用.....	11
<b>第五章 在机测量变换工件坐标系</b>	
5.1 功能介绍.....	14
5.2 坐标系变换详解.....	14
5.3 实例应用.....	16
<b>第六章 在机测量修正同轴度误差</b>	
6.1 功能介绍.....	21
6.2 实例应用.....	21
<b>第七章 在机测量实现精准检测</b>	
7.1 功能介绍.....	25
7.2 实例应用.....	25
<b>第八章 结 语</b>	
附录一：在机测量基础参数检查.....	28
附录二：在机测量使用规范.....	31
附录三：在机测量基础标定.....	34
附录四：在机测量转台轴心误差.....	38
附录五：在机测量变换工件坐标系示例.....	42



## 第一章 绪论

### 1.1 什么是在机测量技术？

一个完整的加工系统主要由 CNC 机床、刀具、生产人员、生产物料四个要素组成，这四个要素之间需要协同工作，才能维持整个加工系统的稳定运行。为了达到这个目标，很多生产管理者采取了一系列的改进手段，比如强化 SOP、不断投入装备条件等，但是产品的品质良率还是不受控。最终，他们发现，维持产品稳定生产的最根本因素就是做好过程品质管控，而在机测量技术就为实现这种品质管控提供了新的思路。

那么，到底什么是在机测量技术呢？

简单来讲，在机测量技术就是将三坐标、二次元、测刀仪等设备的功能移植到了机床内部，实现了产品品质的机内监测，让生产过程变得更加顺畅。

北京精雕自主研发的在机测量技术通过无缝集成 CAD/CAM 编程技术、精雕数控控制技术和精雕精密加工技术，不仅能准确测量复合误差，而且还可以基于误差实现自动修正，形成“制检合一”的生产模式。

### 1.2 在机测量技术的基本构成

精雕在机测量技术的灵活应用主要依托于硬件和软件的无缝集成。其中，硬件模块包括常用的接触式测头、对刀仪、CCD、机床内部传感器等，软件模块主要包括 JD50 数控系统、CAM 编程软件、JDNcEdit 程序编辑软件等。

#### 1.2.1 在机测量系统硬件构成

在机测量可以接入多种硬件测量工具，其中最主要的硬件为测头和接收器。其中，接触式测头和接收器是在机测量技术常用的硬件仪器，接触式测头用于信号的采集（如图 1-1），接收器用于信号的传输与处理。



图 1-1 接触式测头

#### 1.2.2 在机测量系统软件构成

##### (1) JD50 数控系统

精雕数控系统集成了在机测量技术，为精雕机床实现智能化数控加工提供了重要保障。其中，G100 特色指令已经封装多项检测算法，是在机测量技术应用的核心指令，如图 1-2 所示：

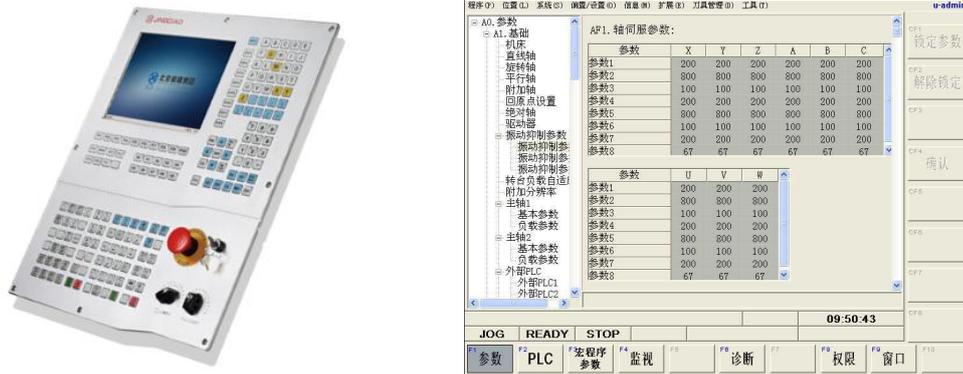


图 1-2 JD50 数控系统

(2) 在机测量 CAM 编程软件

精雕在机测量技术将编程部分的工作融合到 JDsoft-SurfMill 软件中，使得测量编程和加工编程一样，降低了在机测量技术的使用难度。如图 1-3 所示：

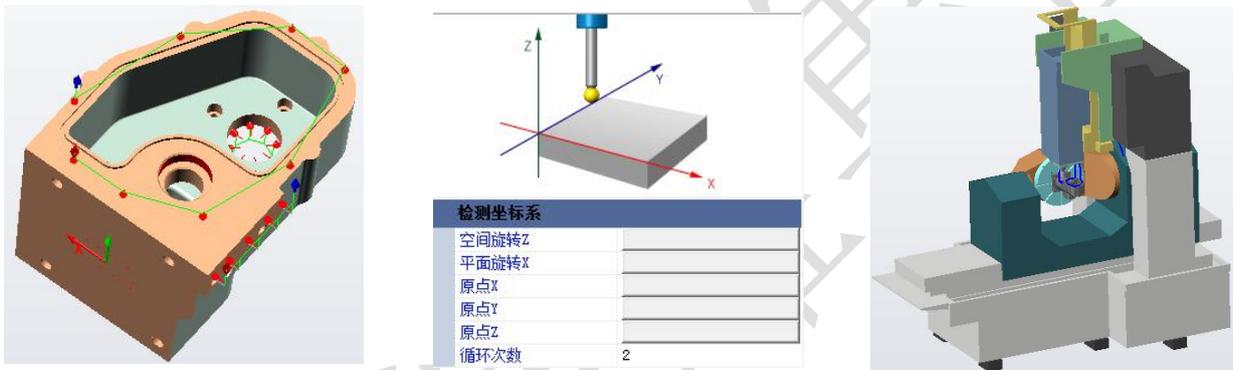


图 1-3 在机测量 CAM 软件

软件主要实现的功能为：

- ①基于 CAD 模型的编程，能够实现的功能包括坐标系建立、特征检测、补偿加工、报表结果输出等，通过不同功能模块的组合，可以实现复杂的测量需求；
- ②通过 CAM 软件进行规范化编程，建立虚拟加工环境、实现全过程干涉、过切检查以及防呆管控，保证输出的 NC 程序更加安全；
- ③编制的测量程序可在 CAM 软件端直接完成，减少了机床的占用时间。

(3) 在机测量程序编辑软件 JDNcEdit

JDNcEdit 软件是一款 NC 文件编辑软件，除常用的代码编辑功能外，还具有以下辅助功能，帮助用户进行代码审阅、结构调整，如图 1-4 所示：

- ①对话框形式输入或编辑 G/M 代码指令和常用程序段；
- ②树形式显示程序结构；
- ③自动代码提示功能，方便新用户使用；
- ④多行注释、书签、查错等功能。

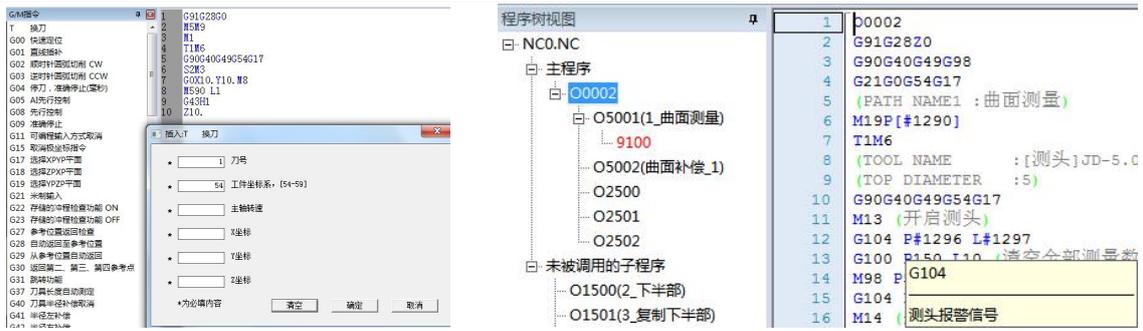


图 1-4 JDNCedit 编辑软件

## 第二章 压铸件在机测量应用流程

### 2.1 压铸件在机测量应用流程

当拿到一款待加工的压铸件毛坯后，我们会遇到很多棘手的问题，比如：

- 1) 当压铸件安装完成后，如何快速确定工件在机床上的位置？
- 2) 压铸件成型后变形量不可控，来料一致性差，如何快速获取加工面的余量状态？
- 3) 确定余量状态后，如何快速找准工件坐标系，使其与理论编程坐标系一致？
- 4) 对于需要多面加工的工件，如何确保各面特征位置准确加工，同时保证异面特征之间的准确位置关系？
- 5) 加工完成后，特征尺寸是否加工到位？各项公差是否满足要求？是否可以放心下机？

针对以上五个问题，我们都可以通过在机测量技术进行一一解决，形成一套完整的方案流程，如图 2-1：



图 2-1 压铸件在机测量流程

具体解释如下：

#### 2.1.1 在机测量建立工件原点

压铸件装夹在机床上后，通过在机测量确定工件装夹在机床上的位置，相较于传统刀具与分中棒分中，操作简便，结果准确，节省时间与人力。

#### 2.1.2 在机测量监控余量状态

压铸件来料变形大，不同特征的加工余量无法准确预知，导致工艺安排难，需要人工不断试切确认，效率低下。在机测量技术可以在加工前和加工中准确获取加工特征的余量状态，确保加工过程稳定，产品品质可靠。

#### 2.1.3 在机测量变换工件坐标系

对于压铸件来说，以前需要在加工前通过多次调整工件，来保证加工位置的准确性，这些工作全部是由人来完成。而在机测量技术可以很方便地识别工件位置，变换工件坐标系，整个过程完全可以自动实现，并且支持多种方式建立工件坐标系，适应不同工况下的要求。

#### 2.1.4 在机测量修正位置误差

大多数压铸件形状结构复杂，基本都需要多面加工，而且存在很多不同刀具平面下有相对位置关系的特征。那么，在机测量技术介入以后，可以在机床上自动探测并加工基准面，然后基于基准面修正相互位置误差，实现一次装夹完成多面加工。

### 2.1.5 在机测量实现精准检测

压铸件加工完成后，特征尺寸是否加工到位？各项公差是否满足公差要求？在机测量技术可以直接在机内对加工后的尺寸进行测量，并同步判断和输出测量结果，实现制检合一。

## 2.2 压铸件在机测量工作划分

压铸件在机测量应用过程中，主要有以下参与人员：编程人员、设备人员及操作人员，不同人员的分工也不一样，具体的工作安排如下。

### 2.2.1 编程人员

编程人员在拿到压铸件后，需要考虑的问题有：工序安排、刀具防呆、工件防呆、设备选型，工艺调整。根据以上问题，现场的编程人员首先对产品进行进行分析，进行夹位及工艺安排，在此过程中考虑设备能力以及刀具、刀柄的选择。当这些前序工作完成后，编程人员使用 SurfMill 软件根据不同的产品特征进行测量程序编辑，并且使用 SurfMill 软件编辑生成加工路径。



图 2-2 SurfMill 软件编程

测量程序与加工程序编辑完成后，可根据实际情况使用 JDNcEdit 编辑软件对测量程序及加工程序进行相应的调整。



图 2-3 使用 JDNcEdit 调整 NC

编程人员的主要工作流程如下：

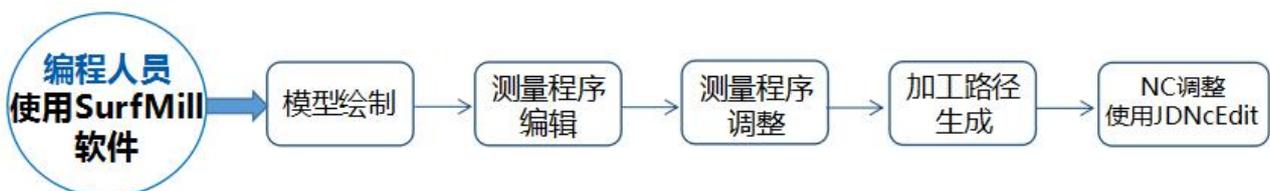


图 2-4 编程人员对应工作

### 2.2.2 设备人员

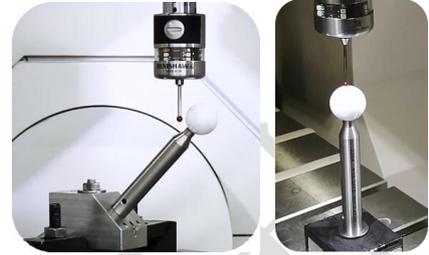
在压铸件在机测量的应用中，测头与测针的清洁、校正以及报警处理都对测量结果有着直接的影响。因此在加工过程中，设备人员需要对设备进行定期的检查和维护，定期进行测针偏摆的校正（如图 2-5），使用标准球进行测头标定（如图 2-6）。



图 2-5 测针偏摆校正



图 2-6 标准球标定



设备人员需定期对标准球、测针、工件表面进行清洁（如下图 2-7），并且能够对异常报警进行处理。

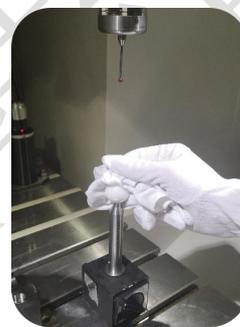


图 2-7 清洁维护

设备人员的主要工作为以下几项：



图 2-8 设备人员的主要工作

### 2.2.3 操作人员

操作人员在整个生产环节中是最重要的，因为程序单中的基准及流通过程中的基准全靠他们保证。在压铸件生产过程中，操作人员主要的工作是进行上下料，使用测头代替分中棒进行分中（如图 2-9），并且根据弹框提示等进行一系列的操作（如图 2-10）。



图 2-9 机床端操作

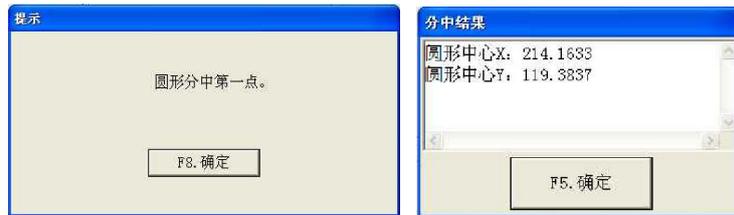


图 2-10 弹框提示

操作人员同时使用 JD50 数控系统中的 MDI 部分功能进行对刀等操作，完成以上工作后，在机床端执行测量程序与加工程序。基于以上，操作人员的主要工作如下图 2-11 所示：



图 2-11 操作人员对应工作

## 2.3 实例应用

现有一款压铸件产品需进行加工，要求保证工件加工完成后 $\phi 32\text{mm}$ 和 $\phi 35\text{mm}$ 两孔同轴度公差在 $0.02\text{mm}$ 以内（如图 2-12），下面我们来看看在此案例中如何应用以上五个流程步骤来分析解决问题。

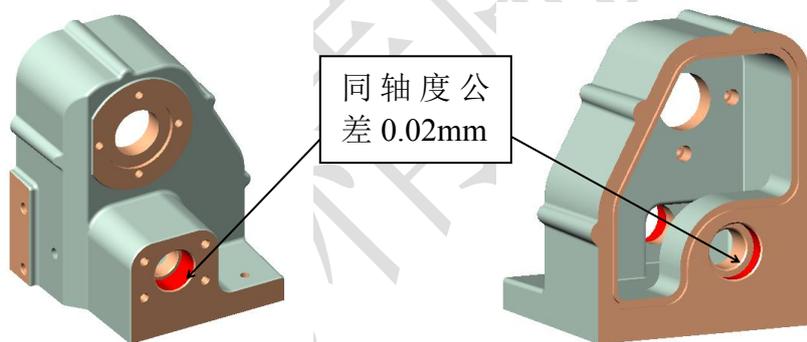


图 2-12 某款压铸件

- Step1 将此工件安装在机床上进行分中，通过在机测量建立工件原点；
- Step2 工件原点建立完成后，使用在机测量技术准确获取待加工特征的余量，根据余量分布情况确定工件基准面测量位置；
- Step3 确定工件基准面作为变换工件坐标系所需元素，进行迭代计算，自动变换工件坐标系，建立准确工件坐标系，确保压铸件加工尺寸合格；
- Step4 加工过程中，在机测量技术可自动探测工件基准面的位置，基于工件坐标系修正位置误差，保证工件同轴度公差合格；
- Step5 加工完成后，在机台上进行重点尺寸精度检测与形位公差测量，实现放心下机。

说了这么多，是不是已经迫不及待的想要了解具体的解决方法了？那么请跟随我们的步伐，一起来寻找答案吧！

### 第三章 在机测量建立工件原点

#### 3.1 功能介绍

在机测量建立工件原点这一功能主要是解决确定工件位置的问题。工件装夹在机床上，可是机床并不知道工件具体放在工作台的哪个位置，无法执行后续的操作，怎么办呢？我们可以采用在机测量技术来解决这个问题。

在机测量技术通过测头采集数据，接收器接收后传递给机床，JD50 数控系统接收到这些数据后进行分析，就可以知道工件的位置了，并将位置显示在机床上。相较于传统的刀具和分中棒分中，不仅操作简便，而且结果更准确。这一功能具体在铸件中如何使用，下面我们进行详细的介绍。

#### 3.2 实例应用

如图 3-1 所示为前文中提到的铸件在机床上的装夹方式，采用零点快换工装可以保证工件装夹位置精度，因此对零点快换工装进行分中确定工件原点。

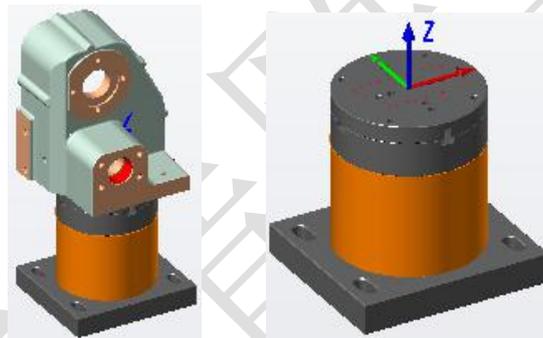


图 3-1 分中模型示例

将工件装夹在机床工作台上，根据以下步骤使用在机测量实现分中。

##### 3.2.1 在机测量工件原点 X、Y

1) 点击操作面板上的【MDI】→【加载】→【F9.进入系统扩展 MDI 环境】→【工件测量】→【圆形分中探针手动】，分中方式选择“外轮廓”，选择分中结果设置的坐标系(G54~G59)其他参数默认，如图 3-2 所示；



图 3-2 MDI 手动分中

2) 【程序启动】→【手轮】，首先会弹出如图 3-3 对话框，按下“确定”。根据提示顺序，定位测头至相应①位置（即工件左壁大致中间位置），距离工件面大约 5mm 处（根据实际情况而定），关闭【手轮】，按下【程序启动】自动完成碰触过程。



图 3-3 分中定位提示

3) 切换回【MDI】→【程序启动】根据弹框提示“圆形分中第二点”，点击“确定”后，在没有干涉的情况下，摇动手轮仅移动 XY 轴，将测头定位至②位置，关闭【手轮】，按下程序启动，完成第二点探测；

4) 重复步骤 3 完成第三点探测；

5) 分中结束后，弹出如图 3-4 所示结果提示框。点击“确定”完成 XY 向分中，结果将存储在最初设置的存储坐标系变量中，如图 3-5 所示；



图 3-4 分中结果提示



代码	X	Y	Z	B	C
G54 (Ext)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
G54	214.1633	119.3837	0.0000	0.0000	0.0000
G55	214.1427	119.3550	0.0000	0.0000	0.0000
G56	214.1626	119.3973	-217.1599	0.0000	0.0000
G57	214.1631	119.3898	0.0000	0.0000	0.0000
G58	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
G59	214.1626	119.3973	-217.1599	0.0000	0.0000
G54.1 (P1)	214.1616	119.3809	-217.1466	0.0000	0.0000
G54.1 (P2)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
G54.1 (P3)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
G54.1 (P4)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
G54.1 (P5)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
G54.1 (P6)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
G54.1 (P7)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
G54.1 (P8)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
G54.1 (P9)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
G54.1 (P10)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

机床坐标	
X	214.9988
Y	124.8133
Z	-83.3000
B	0.0000
C	161280.0000

相对坐标	
X	214.9988
Y	124.8133
Z	-83.3000
B	0.0000
C	161280.0000

图 3-5 XY 向坐标存储

6) 将主轴 Z 向抬至安全位置。

### 3.2.2 在机测量工件原点 Z

1) 在 MDI 环境下输入 M13，开启测头；

2) 切换到“手轮”模式，通过调节 XY 轴，将测头移动至工件 Z 向基准平面可探测范围；

3) 切换手轮的控制档位至“Z”，脉冲档位调至“X100”；摇动手轮使 Z 轴向下运动，直至测头即将靠近工件 Z 向基准面时；切换脉冲档位至“X10”，摇动手轮使 Z 轴向下运动直至测头碰触到工件面，测头信号灯变红；切换脉冲档位至“X1”，转动手轮使信号灯由红退一格变绿后，保持测头不动。

4) 切换至工件原点存储界面，选中存储工件 Z 原点的变量，然后点击“MZ”，如图 3-6 所示，工件 Z 向原点坐标将存储在相应变量中，如果已完成测头对刀，Z 向原点坐标需减去测头刀长值。

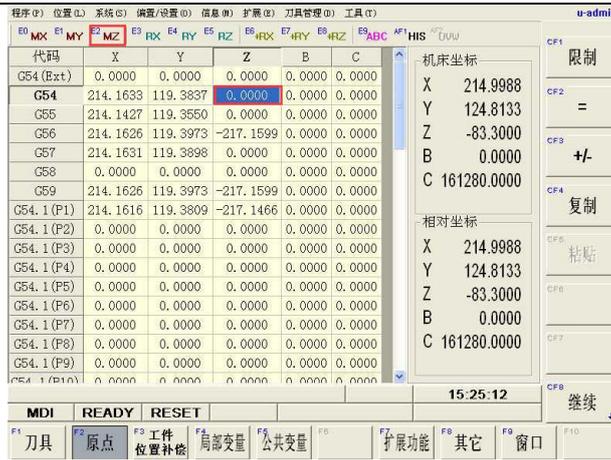


图 3-6 工件 Z 向原点存储

5) 在 MDI 环境下输入“M14”指令关闭测头，然后将测头安全抬起，完成工件坐标原点确定。

## 第四章 在机测量监控余量状态

### 4.1 功能介绍

上一章中，我们已经确定好了工件在机床上的位置，那么对于工件自身的加工特征我们怎么能够知道其准确的测量位置呢？这一章中我们就来帮助大家寻找工件特征的准确测量位置。

在机测量余量监控主要针对压铸件装夹在机床上后，不同特征的加工余量无法准确预知，导致工艺安排难，效率低下等问题进行解决。通过在机余量检测可以在加工前和加工中准确获取加工特征的余量状态，获取其余量分布状态，根据余量分布情况确定测量位置，确保加工过程稳定，产品品质可靠。

下面我们就该款压铸件的余量检测做详细了解。

### 4.2 实例应用

完成上一章中的建立工件原点后，如图 4-1 所示为压铸件装夹后的状态，需对图 (c) 中橙色面位置进行加工，加工前使用在机测量技术准确获取特征余量，根据余量分布情况确定测量位置。

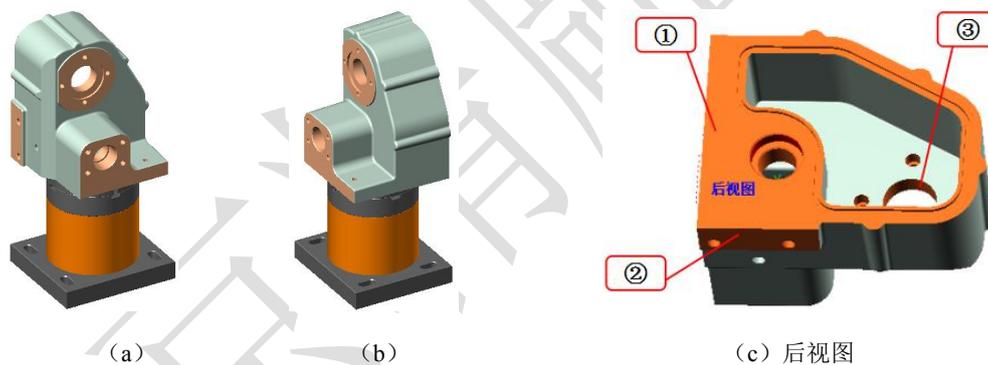


图 4-1 压铸件示意图

首先将转台 A 轴旋转-90°，将工件摆到图 4-1 的 (c) 中所示后视图位置，探测待加工特征曲面①、②、③三面余量，来确定测量位置。

本教程严格按图 4-2 流程进行规范化编程操作，默认前期编程准备工作已完成，教程中涉及到的编程操作，从“路径创建”开始。



图 4-2 规范化编程操作流程

#### 4.2.1 测量点设计

余量检测路径编制步骤如下：

- 1) 在加工环境下新建路径，选择“在线检测组”→“点（组）元素检测”→“编辑检测域”，

如图 4-3 所示：



图 4-3 编辑检测域

2) 选择“曲面自动/曲面手动”→拾取曲面”→“通过输入点”→在曲面需要测量位置点击布点→根据测量方向判断是否勾选“反向探测”，操作流程如图 4-4 所示；



图 4-4 检测域编辑示意

3) 在检测参数界面设置深度范围、局部坐标系、加工刀具、测量设置、安全策略等参数，保证路径运行安全，如图 4-5 所示；



图 4-5 参数设置

4) 【测量设置】标签下，“检测数据输出类型”→“报表格式”，同时【测量计算】标签下，“测量特征”中勾选“距离”→调整“上下公差”（如图 4-6）；



图 4-6 数据输出格式选择

5) 按照上述步骤，分别对各特征面进行余量检测路径设置，点击“计算”完成路径编辑，路径计算的同时进行过切和碰撞检查，若有干涉及时调整测针长度、测球半径、测量点位置、测量连接高度，如图 4-7 所示；

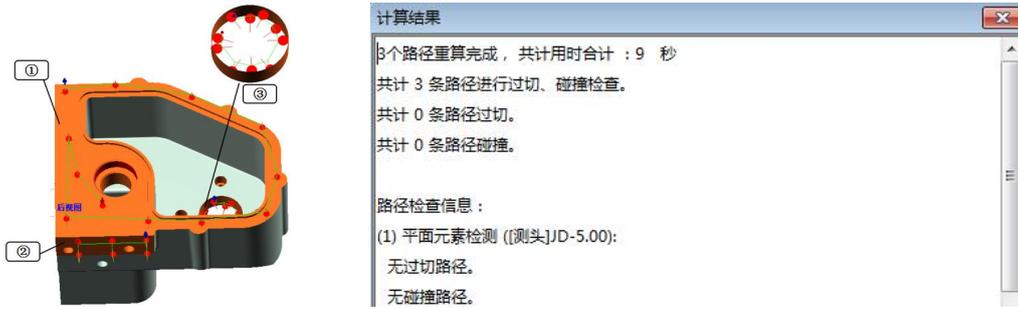


图 4-7 路径计算结果

6) 路径计算结果为无过切和碰撞危险后, 进一步进行机床模拟, 检查工件工装与机床是否存在碰撞风险。

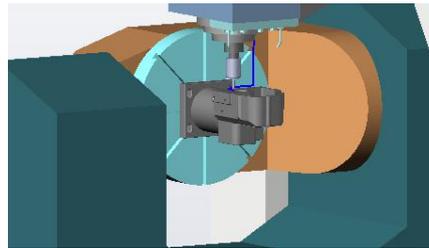


图 4-8 机床模拟

#### 4.2.2 测量路径输出

1) 输出测量路径前, 点击“机床设置”→“测量设置”→勾选“3D 测量”→“根据机床主轴选择是否定向”→点击“确定”, 如图 4-9 所示;



图 4-9 输出路径

2) 点击“刀具路径”→“输出刀具路径”→“确定”, 输出程序。

#### 4.2.3 测量结果显示

上机运行余量检测程序, 测量数据结果会在程序运行结束后自动打印, 根据数据可分析余量的实际分布状态。

检测结果数据默认保存在 D:\EngFiles\Report.txt 中, 图 4-10 所示为②位置的检测数据, 分析数据可知此曲面余量均匀, 可作为测量位置。

编号	路径名称	检测项	理论值	实际值	上公差	下公差	偏差	超差%
1	余量检测_ID 1	距离	0.0000	0.3998	1.0000	-1.0000	0.3998	0.00
2	余量检测_ID 2	距离	0.0000	0.4006	1.0000	-1.0000	0.4006	0.00
3	余量检测_ID 3	距离	0.0000	0.4001	1.0000	-1.0000	0.4001	0.00
4	余量检测_ID 4	距离	0.0000	0.3996	1.0000	-1.0000	0.3996	0.00
5	余量检测_ID 5	距离	0.0000	0.3981	1.0000	-1.0000	0.3981	0.00
6	余量检测_ID 6	距离	0.0000	0.3979	1.0000	-1.0000	0.3979	0.00



图 4-10 数据打印格式

## 第五章 在机测量变换工件坐标系

### 5.1 功能介绍

由于压铸件的材料特征及加工情况，导致毛坯来料变形大（铸造应力变形、飞边、分模线），无精确定位基准，加工中经常出现特征加工不到或偏位的情况。分析其原因，主要是实际的工件坐标系与理论编程坐标系不重合。在机测量技术为解决这类问题提供了新的思路，通过测量各工件基准面，迭代计算，自动变换工件坐标系，建立准确工件坐标系，确保压铸件加工尺寸合格。

在上一章中，我们已经通过余量检测获取了各工件基准面的测量位置，这章中我们则可以根据已经确立好的测量位置进行探测，变换工件坐标系，使工件位置更加精确。

下面我们详细介绍变换工件坐标系的过程与操作流程。

### 5.2 坐标系变换详解

坐标系变换原软件与数控系统这两个实现层达到坐标变换的目的。下面介绍 SurfMill 和数控系统的坐标系。

#### 5.2.1 SurfMill 和数控系统的坐标系

##### 1) SurfMill 的 CAM 坐标系

SurfMill 软件上的 CAM 相关的重要坐标系：模型世界坐标系、路径的局部坐标系、输出坐标系、评价坐标系、检测坐标系（如图 5-1）。



图 5-1 SurfMill 的坐标系变换过程

##### (1) 模型世界坐标系

模型世界坐标系是 CAD 造型的世界坐标系，其它坐标系都是其子坐标系。即其它坐标系的坐标值都可以通过模型世界坐标系进行转换。

模型世界坐标系在 SurfMill 中是基础坐标系。

##### (2) 路径的局部坐标系

路径的局部坐标系主要应用于多轴定位加工，路径的局部坐标系 Z 轴确定刀轴方向。

路径的局部坐标系在 SurfMill 中主要用于生成多轴定位路径。

##### (3) 输出坐标系

输出坐标系是输出 NC 中的基础坐标系，与数控机床的工件坐标系相对应，解决 SurfMill 坐标系与数控机床坐标系对齐。

输出坐标系在 SurfMill 中主要用于输出 NC。

##### (4) 评价坐标系

评价坐标系用于描述检测元素/检测特性的数据，用户可以用不同的坐标系描述相同的物体位置。

评价坐标系在 SurfMill 中主要用于描述数据。

(5) 检测坐标系

检测坐标系用于补偿工件位置的 6 个自由度的偏差。可以修正三轴/多轴定位/多轴联动检测，多轴定准/多轴联动加工。

2) 数控系统的坐标系

数控系统的坐标系主要包括：机床坐标系、工件坐标系、工件位置补偿、局部平移和二维旋转、特性坐标系。数控系统坐标系与 SurfMill 坐标系之间的关系如图 5-2。

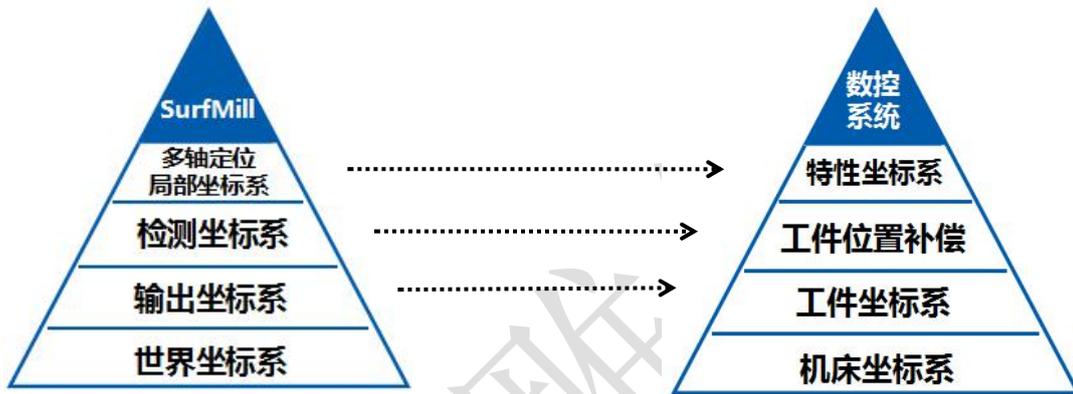


图 5-2 坐标系之间关系

5.2.2 SurfMill 检测坐标系计算原理

从上一部分介绍中可以知道检测坐标系是通过数控系统的工件位置补偿进行补偿的，其中补偿的参数是坐标系的 6 个自由度 ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta a, \Delta b, \Delta c$ )。下面就如何计算坐标系的六个自由度进行介绍。

物体的坐标系可以确定物体的位置，描述物体的 6 个自由度 ( $x, y, z, a, b, c$ )。检测坐标系就是使用被检测物体的坐标系来确定物体实际与理论位置的偏差 ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta a, \Delta b, \Delta c$ ) 来修正机床上物体的位置。其中，检测坐标系的理论坐标系是使用物体的一些基准特征（平面、圆、圆柱等）来建立的，检测坐标系的实际坐标系是通过探测上述基准特征的数据来建立的。

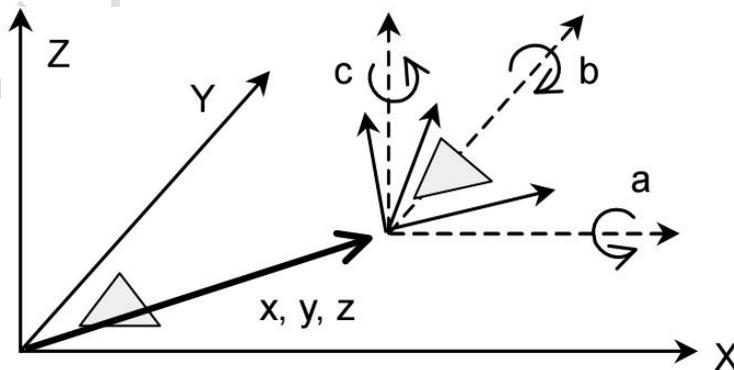


图 5-3 坐标系变换

## 5.3 实例应用

### 5.3.1 工艺分析

如图 5-4 所示压铸件产品的尺寸和加工要求如下表所示。

产品名称	毛坯材料	尺寸 (mm)	重点管控尺寸
某压铸产品	6063-T5 压铸件	155.893*136*190.973	两孔同轴度要求 0.02mm



图 5-4 加工位置示意图

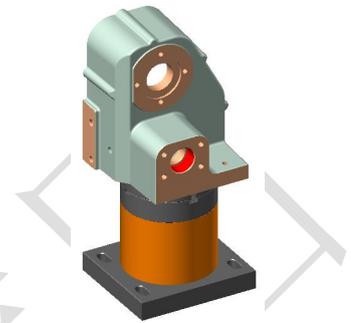
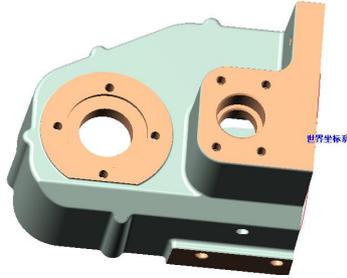


图 5-5 工件装夹示意图

工件装夹方式如图 5-5 所示，转台 A 轴旋转 $-90^{\circ}$ ，将工件摆到图 5-4 所示的后视图位置，建立准确工件坐标系。

根据特征面余量的测量结果，选择如图 5-11 右所示①②③位置来建立准确工件坐标系。测量①位置点，将工件摆平，同时确定准确工件坐标系原点 Z；测量②位置点，将工件摆正；测量③位置点，确定准确工件坐标系原点 XY，具体操作步骤见下文。

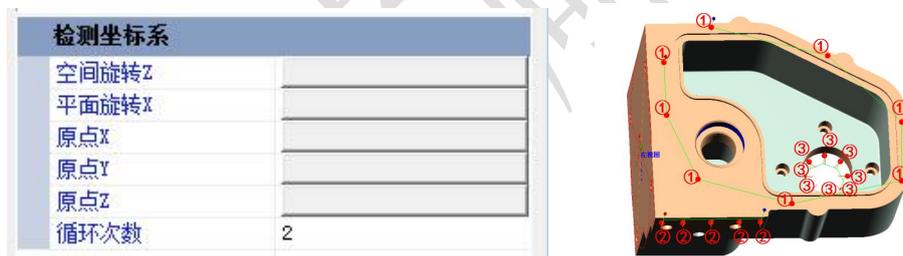


图 5-6 坐标系建立示例说明

### 5.3.2 探测工件基准元素

#### 1) 确定“空间旋转 Z”元素

根据模型特征，确定图 5-6 的①位置点所在平面为“空间旋转 Z”元素，将工件摆平，测量路径生成方式如下：

(1) 点击“刀具路径”→“路径向导”→“在机检测组”→“平面元素检测”；

(2) 平面元素检测路径中选择“加工域”→“编辑检测域”→“曲面手动/曲面自动”创建测量点，如图 5-7 所示；



图 5-7 创建测量点

(3) 在平面元素检测参数界面设置加工刀具、操作设置、测量连接等参数，保证路径运行安全，如图 5-8 所示；



图 5-8 参数设置

(4) 【测量设置】标签下，“测量数据输出”→“检测数据输出类型”→“报表格式”，如图 5-9 所示；

(5) 【测量计算】标签下，“测量特征”→勾选“平面度”→调整“公差”，图 5-10 所示，勾选后的特征计算结果会打印在图 5-9 输出的报表内，在机测量结果超差时机床会弹框报警提示；



图 5-9 数据输出格式选择图



图 5-10 平面元素测量特征

(6) 参数设置完成后点击“计算”生成平面元素检测路径，如图 5-11 所示。

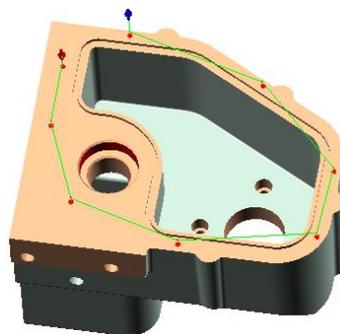


图 5-11 平面元素检测路径

2) 确定“平面旋转 X”元素

在图 5-12②位置点（左视图的加工面），测量一条直线，确定“平面旋转 X”，将工件

角度摆正。

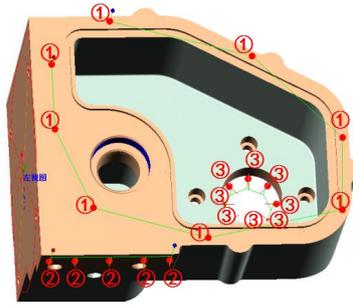


图 5-12 左视图的加工面

(1) 3D 环境下点击“曲线绘制”→“借助曲面生成”→“曲面边界线”→“拾取曲面边界”（选择左视图的加工面上边界线）；

(2) 保证测量准确性，测量位置避开边界位置，3D 环境下点击“变换”→“3D 平移”→“拾取对象”（选择边界线）→“DY”→“-2.5”（测球半径）→“√”，如图 5-13 所示；

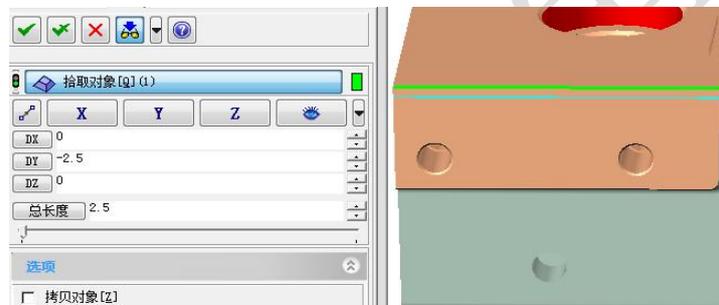


图 5-13 3D 平移示意图

(3) 点击“刀具路径”→“路径向导”→“在线检测组”→“2D 直线元素检测”；

(4) 测量点创建方式与上述类似，“拾取曲线”选择 (2) 中的边界线→用“曲线手动/曲线自动”方式创建测量点；

(5) 设置 2D 直线元素检测参数；

(6) 测量数据输出选择“报表格式”；

(7) 【测量计算】标签下，“测量特征”→勾选“直线度”→调整“公差”，如图 5-14 所示，勾选后的特征计算结果打印在报表中，并且当测量结果超差时机床会弹框报警提示；



图 5-14 2D 直线元素测量特征

(8) 参数设置完成后点击“计算”生成 2D 直线元素检测路径，如图 5-15 所示。

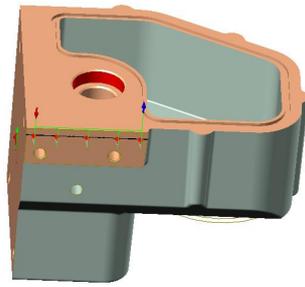


图 5-15 2D 直线元素检测路径

3) 确定准确工件坐标系“原点”元素

测量图 5-16 中③位置点，对工件进行分中，以工件圆孔中心为工件坐标系原点 X、Y，以“空间旋转 Z 元素”平面为准确工件坐标系原点 Z。

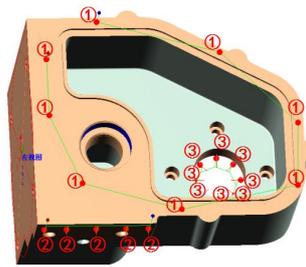


图 5-16 加工位置

- (1) 3D 环境下提取内圆孔合适位置截面线；
- (2) 点击“刀具路径”→“路径向导”→“在机检测组”→“圆元素检测”；
- (3) 用“曲线手动/曲线自动”方式创建测量点；
- (4) 设置圆元素检测参数；
- (5) 测量数据输出选择“报表格式”；
- (6) 【测量计算】标签下，“测量特征”根据需要勾选圆心坐标 X/Y/Z、圆直径/圆半径、圆度，特征计算结果打印在报表内，当测量结果超差时机床会弹框报警提示；



图 5-17 圆元素测量特征

- (7) 参数设置完成后点击“计算”生成圆元素检测路径，如图 5-18 所示。

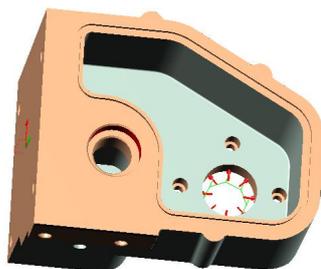


图 5-18 圆元素检测路径

### 5.3.3 建立准确工件坐标系

- 1) 点击“刀具路径”→“路径向导”→“在机检测组”→“检测坐标系”；
- 2) 建立准确工件坐标系的五个要素根据前期探测的基准要素确定，循环次数设置2，表示循环测量两次，迭代计算坐标系，建立准确工件坐标系的各元素检测路径如图 5-19 所示。



图 5-19 准确工件坐标系测量路径显示

### 5.3.4 产品展示

建立准确工件坐标系后进行图 5-20 左所示特征面的加工，加工效果如图 5-20 右所示。

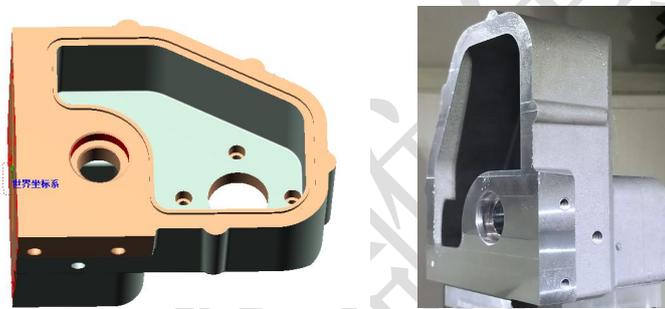


图 5-20 加工效果

## 第六章 在机测量修正同轴度误差

### 6.1 功能介绍

压铸类产品大多形状结构复杂，需要多面加工，精雕在机测量技术可以自动探测工件基准面的位置，然后基于工件坐标系变换局部坐标系，修正位置误差，不仅减少了夹具数量，而且大幅降低了制造周期和制造成本。

本章中我们继续解决该款压铸件在加工过程中的问题，在工件坐标系都已经建立完成后，需要多面加工圆孔特征，如何保证两孔的同轴度误差在 0.02mm 之内呢？下面我们就来详细介绍在机测量修正同轴度误差的具体操作流程。

### 6.2 实例应用

#### 6.2.1 加工特征分析

如图 6-1 所示，该款压铸件加工特征不在同一平面内，具体加工方案如下：

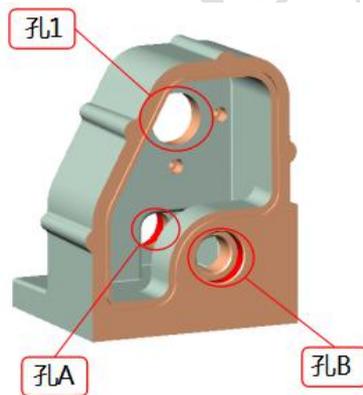


图 6-1 压铸件加工特征

1) 建立准确工件坐标系后加工后视图中橙色面，如图 6-2 (a) 所示；加工完成后，后视图的孔 1 加工到位，此过程在第二节中已经完成；

2) C 轴旋转 180°后，加工前视图中橙色面，如图 6-2 (b) 所示，以孔 1 为基准准确变换局部坐标系。①测量前视图 A 位置作为空间旋转 Z 元素，将工件摆平；②测量底视图中 B 位置作为平面旋转，将工件角度摆正；③测量过的 A 位置的圆心作为原点 X、Y，测量 C 位置作为原点 Z。

**注：**按照工艺要求，需保证孔 A、孔 B 的同轴度在 0.02mm 以内，加工孔 B 需要以孔 A 为基准，而孔 A、孔 B 布置在不同的刀具平面下。由于孔 A 不能直接检测，且两孔之间距离较远，故不能通过孔 A 作为基准确定孔 B 的加工位置，这时需要公共基准保证孔 A、孔 B 的同轴度要求，由于孔 1 与孔 A 在同一加工条件下完成，两者加工精度可同时保证，可间接通过孔 1 作为过程基准实现对孔 B 的加工，满足同轴度要求。

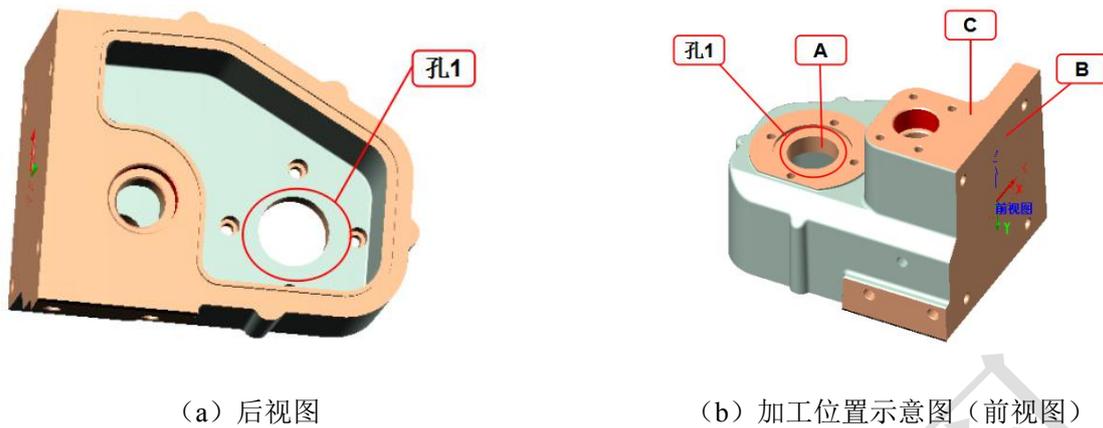


图 6-2 检测孔示例

### 6.2.2 确定变换局部坐标系元素

#### 1) 确定空间旋转 Z 元素

测量如图 6-2 (b) 所示孔 1 内圆柱面轴线作为空间旋转 Z 元素，具体操作如下：

- (1) 点击“刀具路径”→“路径向导”→“在机检测组”→“圆柱元素检测”；
- (2) 圆柱测量点创建：

①如图 6-3 左所示，圆柱元素检测路径中选择“检测元素与策略”→“编辑检测域”→“拾取圆柱面”（孔 1 内圆面）→点击“”；

②如图 6-3 右所示，设置“圆柱界面”参数：设置“最小截面点数”→设置“截面个数”→调整“起始高度”和“目标高度”使测量点尽量接近圆柱上下边界线→勾选“反向探测”调整探测方向→点击“”。



图 6-3 创建测量点

(3) 在圆柱元素检测参数界面设置局部坐标系（图 6-3），选择加工刀具、设置安全策略、测量连接等参数，保证路径运行安全，如图 6-4 所示；

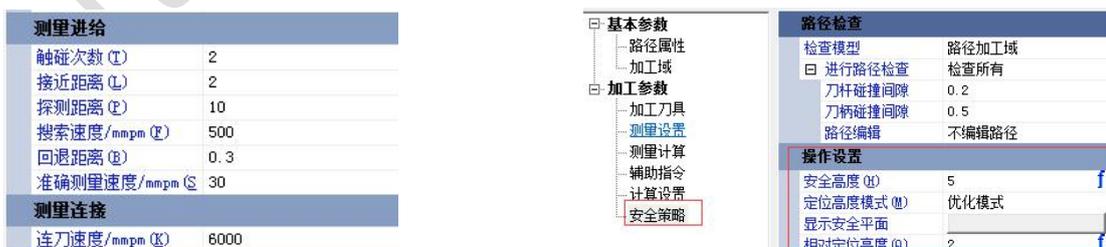


图 6-4 参数设置

(4) 【测量设置】标签下，【测量数据输出】中“检测数据输出类型”→“报表格式”，如图 6-5 所示；

(5) 【测量计算】标签下，【测量特征】中勾选“圆柱度”→输入“公差”，如图 6-6 所示，勾选后的特征计算结果会打印在图 6-5 输出报表内，在测量结果超差时机床会弹框报警提示。



图 6-5 数据输出格式选择图



图 6-6 圆柱元素测量特征

(6) 参数设置完成后点击“计算”生成圆柱元素测量路径，如图 6-7 所示。

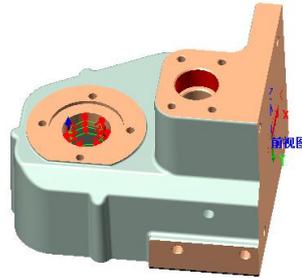


图 6-7 圆柱元素测量路径

## 2) 确定平面旋转 X 元素

测量如图 6-2 (b) 所示 B 面，由于装夹位置限制，选择测量面上一条直线作为平面旋转 X 元素。具体操作：创建直线元素测量路径方法参照第六章中“2.2 确定平面旋转 X 元素”创建方式，最后生成的测量路径如图 6-8 所示。

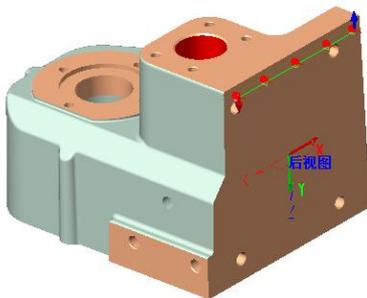


图 6-8 2D 直线测量路径

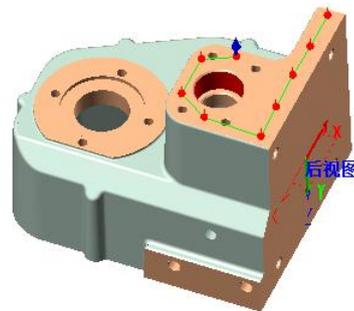


图 6-9 原点 Z 平面检测路径

## 3) 确定检测坐标系原点的元素

选择已测圆柱 A 圆心作为坐标原点 X, Y，测量方式在此不再赘述。测量如图 6-2 (b) 所示 C 面，测量平面作为坐标系原点 Z。具体操作：创建平面元素测量路径方法参照第六章的“2.1 确定空间旋转 Z 元素”创建方式，最后生成的测量路径如图 6-9 所示。

### 6.2.3 在机测量修正同轴度误差

准确变换局部坐标系的操作与上一章的“3.建立准确坐标系”方式相同，区别在于建立坐标系选择的元素不同。坐标系建立要素选择和元素检测路径，如图 6-10 所示。



图 6-10 动态重建加工基准测量路径

#### 6.2.4 产品展示

变换局部坐标系后进行图 6-11 左的橙色特征面的加工，加工效果如图 6-11 右所示。

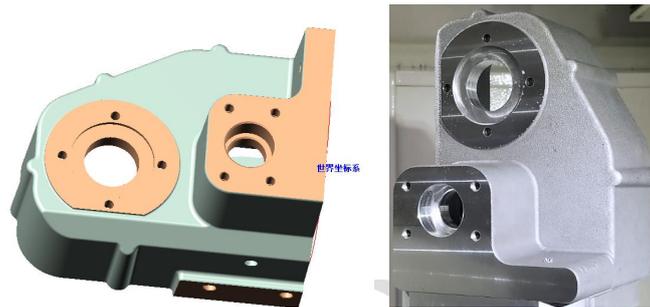


图 6-11 加工效果

## 第七章 在机测量实现精准检测

### 7.1 功能介绍

上几章中我们已经解决了压铸件在加工过程中的一些问题，那么在加工完成后，我们如何能够知道加工是否合格？是否可以放心下机呢？传统压铸件加工完成后，需下机通过离线检测获取特征尺寸数据，若不合格需要再次上机加工。现在引入在机测量这一智能化的检测手段，可以在加工完之后直接在机台上进行检测，减少了中间周转环节，整个过程避免了人工过多的干预，提高了自动化程度。

在机测量可以实时检测压铸件重点管控特征的尺寸精度与形位公差，判断是否加工合格，放心下机。本章就下机前的在机检测问题进行具体讲述。

### 7.2 实例应用

该压铸件重点管控尺寸如图 7-1 所示的 $\phi 35\text{mm}$ 和 $\phi 32\text{mm}$ 两孔同轴度（公差要求 $0.02\text{mm}$ ）。

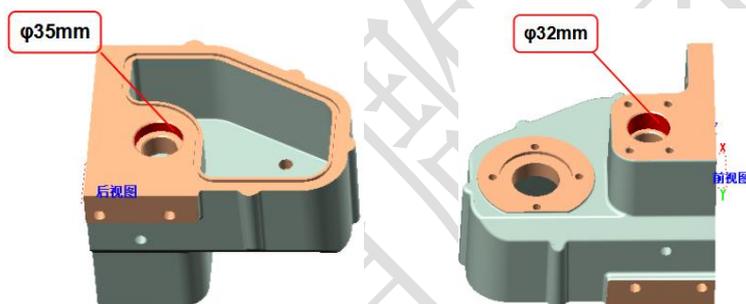


图 7-1 测量同轴度孔示意图

加工完成后，在机检测同轴度是否合格。为保证两段同轴度的测量准确度，每段柱形面分三层测量，每层测量 8 个点，评价两孔同轴度。具体操作如下：

#### 7.2.1 元素测量

圆柱测量方式参照上节中圆柱测量方式，两圆柱测量路径如图 7-2 所示。

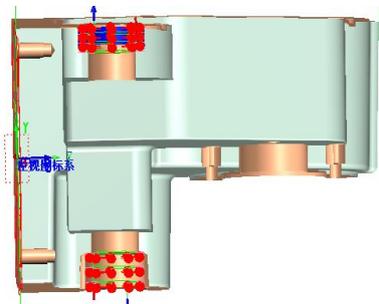


图 7-2 两圆柱测量路径

#### 7.2.2 特性评价

评价同轴度操作如下所示：

- 1) 点击“刀具路径”→“路径向导”→“在机检测组”→“检测同轴度”；

2) 同轴度参数设置如图 7-3 所示，选择“被测元素和基准元素”，调整“公差”；

检测同轴度	
被测元素	孔3圆柱检测
基准元素	孔2圆柱检测
公差	0.02

图 7-3 同轴度检测参数设置

3) 【测量数据】标签下，测量数据默认输出检测报表格式，并将数据打印输出。

### 7.2.3 其他功能展示

在机检测组主要功能：元素检测、检测坐标系、特性评价（尺寸与形位公差）。此部分功能集成了 CMM 测量机的部分功能（如图 7-4），与精雕数控平台结合，不仅可以利用在机测量对坐标系进行高精度的智能修正，而且可以对工件进行在机检测，评价工件的余量、尺寸、位置、形状等。



图 7-4 在线检测组功能展示

## 第八章 结语

从上面五章中我们可以看到压铸件在机测量的整个流程是一套完整的解决问题的思路，主要是由加工前、加工中到加工后三个时间点贯穿始终，分别解决了压铸件的主要加工问题：①变形量不可控，来料一致性差，加工前如何确定工件的准确位置？②加工过程中如何保证异面特征加工准确，且相对位置准确？③加工完成后如何确保加工到位，是否可以放心下机？以上这些问题，我们都可以从上述几章中找到答案。

在此，我们带领大家对于压铸件在机测量的详细流程再进行一个完整的回顾：①加工前，对工件进行位置确立，即通过在机测量结合 JD50 数控系统建立工件原点；②在机检测加工特征的余量分布情况，确定准确测量位置；③根据余量检测结果确定工件基准面，探测工件基准面变换工件坐标系；④加工过程中，自动探测工件基准面的位置修正位置误差；⑤加工完成后，在机检测重点管控特征的尺寸精度和形位公差。掌握以上这五个步骤，拿到压铸件后我们再也不必担心，可以轻松完成加工，放心下机！

## 附录一：在机测量基础参数检查

### 1. JD50 数控系统中测头参数检查

#### 1.1 PLC 配置参数检查

从机床控制面板进入“系统→PLC→配置”页面，机床有使能功能的情况下需要检查“测头控制使能”是否为“1”，在“系统→PLC→变量”中检查“测头是否脉冲类型”雷尼绍测头设置是否为“1”，若不是则需设置为“1”。

#### 1.2 IO 属性配置检查

调试前需要根据接收器型号检查相关信号的属性，具体方法如下：

选择“系统→参数→IO 属性”检查 X43.5、X43.6、X43.7 的常开属性，确保信号使能都设为 1，常闭信号将常开属性设成 0，常开信号将常开属性设成 1，IO 属性的设置界面如图 1 所示，IO 信号属性表见表 2。

信号	使能	常开	EMG	ALM	LMT	RNG	PAUSE	ORG	EXT1	EXT2
X042.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X043.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X043.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X043.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X043.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X043.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X043.5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
X043.6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X043.7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 1 IO 属性的设置界面

表 2 IO 信号属性表

信号名称	OM1-2 接收器	马波斯接收器
X43.5 测头低电压报警	常开	常开
X43.6 测头故障报警	常闭	常闭
X43.7 测头触发	常闭	常开

#### 1.3 测头参数配置检查

检查“偏置/设置---公共变量---保持型”中#1296，#1297，#1298 参数，如图 2 所示。

#1296 为测头信号索引，填写为 351；

#1297 为测头信号报警开启属性，雷尼绍为 578，马波斯为 834；

#1298 为测头信号报警关闭属性，雷尼绍为 576，马波斯为 832。

No. 1280	No. 1281	No. 1282	No. 1283
No. 1284	No. 1285	No. 1286	No. 1287
No. 1288	No. 1289	No. 1290	No. 1291
No. 1292	No. 1293	No. 1294	No. 1295
No. 1296	No. 1297	No. 1298	No. 1299
351.0000	578.0000	576.0000	

图 2 参数配置

#### 1.4 测头转速限制

测头是比较精密的测量工具，如果主轴上是测头，则应禁止主轴旋转。可以通过 PLC 变量界面的“刀具限速”来完成。例如，如果 T1 为测头，在相应的限速界面中填写 T1 为“-1”，在程序运行时，测头旋转会报警。

组号	名称	类型	数据
2	刀位21中刀具号	INT	21
2	刀位22中刀具号	INT	22
2	刀位23中刀具号	INT	23
2	刀位24中刀具号	INT	24
2	T1限速(0不限,-1禁)	INT	-1

图 3 测头转速限制设置

### 1.5 测头慢速换刀设置

在 PLC 的变量界面，可以设置每把刀具的慢速换刀使能。如果设置某把刀具的慢速换刀使能为 1，则机械手在换刀时，将以较慢的速度完成换刀。如果 T1 为测头，则应在相应的变量中填写“1”。

组号	名称	类型	数据
3	T22限速	INT	0
3	T23限速	INT	-1
3	T24限速	INT	-1
3	T25限速	INT	0
3	T1换刀慢速使能	BIT	1
3	T2换刀慢速使能	BIT	0

图 4 慢速换刀设置

## 2. 测头故障检查

### 2.1 基础故障处理

首次调试测头，开启、关闭测头时报警：

- 1) 检查测头是否允许控制、测头刀号是否正确设置；
- 2) 执行程序时一直停止在 M13 行，不往下执行，检查测头脉冲类型设置是否正确；
- 3) 检查测头 IO 信号中 X43.5、X43.6、X43.7 是否使能；
- 4) 未开启测头时，检查接收器是否三个红灯亮，不亮则需要检查接收器接线是否正常；
- 5) 检查测头信号灯，和接收器拔码开关，检查测头和接收器配置；
- 6) 打开 PLC 文件，检查 X43.5、X43.6、X43.7 三个信号是否被其他模块占用；
- 7) 执行 G104 P#1296 L#1297 或 G104 P#1296 L#1298 报警，检查#1296-#1298 变量设置；

### 2.2 异常故障报警

- 1) 如条件允许，可以将发生故障的测头、接收器依次与其他机床调换，确认是否为硬件问题；
- 2) 测头电池放入一直闪红灯、蓝灯或不亮灯则表示测头电池电量不足；
- 3) 如测头使用过程中不稳定，经常异常触发或报警，检查接收器接线，避免虚接（建议尽量使用压线帽）。

### 2.3 根据信号排除问题

输入回路异常是造成测头无法启动的原因之一，需要按以下方法排查输出信号是否异常。

### 1) 硬件异常

未执行 M13 时，测头接口 8 脚与 9 脚之间电位差应为 0V，执行 M13 之后，8 脚与 9 脚之间电位差变为 24V；

如果出现无论 M13 执行与否，8 脚与 9 脚一直有 24V，那么转接板上控制输出的三极管有可能被击穿，需要重新更换转接板。

### 2) 接地异常

接收器如果出现接地异常，接收器上的指示灯会闪，此时可重新处理地线及其接法，若正常接地，指示灯即恢复正常。

### 3) 输入信号异常

输入回路异常也是造成测头无法启动的原因之一，若要排除该问题，需要先在“系统→参数→IO 属性”将 X43.5、X43.6、X43.7 的常开属性都设置成 1，然后分别将 1 脚与 3 脚、2 脚与 3 脚、4 脚与 5 脚短接，对应查看 X43.7、X43.5 和 X43.6 是否有 0 和 1 的变化，如果未出现相应变化，则输入回路异常。

**注意：**按上述方法排查了故障之后，请将 X43.5、X43.6、X43.7 的 IO 属性按正确的属性配置。

## 2.4 数控系统报警

### 1) 测头无法正常报警

执行 G104(M510)P#1296L#1297/L#1298 时报警，此时应检查对应的公共变量#1296、#1297 和#1298 的设置值，特别是对于#1296(测头信号索引)，在新旧机床上的设置值不一致；#1297 和#1298 设置不正确也会导致测头报警信号触发。

### 2) 滞后错误报警

在探测过程中测头信号有一定的持续时间，数控系统在信号传递上有延时，造成测头回退信号未消除引起报警，此时应减小探测速度或增大回退距离。二者的数值关系应为：回退距离=搜索速度/2+0.05。

## 附录二：在机测量使用规范

### 1. 测头组装

测头刀柄通过 6 个螺钉与测头连接，四个平底螺钉用于调节测针同轴度，两个锥底螺钉用于锁住测头以防止其脱落。组装完成后的测头如图 5 所示：



图 5 测头组装图

### 2. 测针选择

测针的安装，测杆的长度，以及测球的材料与尺寸等都会影响测量结果的准确性，因此在选择测针时需注意以下几点：

- 1) 尽量选用短测针（长测针相对于短测针来说弯曲变形量大，精度低）；
- 2) 尽量减少接头数量（增加接头或者加长杆，就会增加潜在的弯曲和变形点）；
- 3) 选用的测球直径要尽量大（减少工件表面粗糙度对测量精度的影响，减少触碰到测杆的机会）；
- 4) 红宝石测针为通用式。但也可根据被测材料成分选择测针材质，例如：测量铝材料可选用氮化硅测针，测量铸铁材料则可选择氧化锆测针；

### 3. 测头保养维护

#### 3.1 测头安装

测头安装和使用过程中需要注意以下问题：

- 1) 测头顶部必须使用锥形螺钉，平底螺钉会压伤配件，并且测头同轴度稳定性也会变差；
- 2) 校正测头同心度时用力不能过大，否则顶丝会压伤测头配件；
- 3) 注意将测针拧紧，否则测针松动会造成测头异常报警或测量数据异常；
- 4) 接收器连接线应使用螺帽将绝缘外皮拧紧，保护线路不受到侵蚀；
- 5) 避免切削液喷在测头上，特别是电池部位（轻度进液即可导致测头不稳定，经常异常报警）；
- 6) 如顶丝滑牙应及时更换，否则可能出现取不出顶丝的情况。

#### 3.2 测前清洁

测量前，使用无尘布和酒精对测球、测杆、信号窗、标准球、标定环及待测工件进行清洁，防止灰尘、切屑等影响测量结果，如图 6 所示。

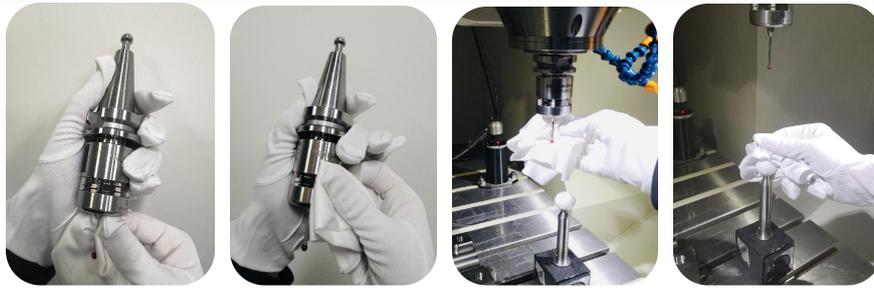


图 6 测前清洁

- 1) 为保证测量精度建议定期清洁测头刀柄，避免磕伤、碰伤、划伤和生锈；
- 2) 建议戴无尘手套取用测头，禁止用手直接接触刀柄；
- 3) 使用过程中测球需要定期清洁，去除表面的油污、碎屑；
- 4) 测量前建议对工件进行清洁，可以保证测量精度，且不污损测针；

### 3.3 定期维护

测头在使用过程中需要定期维护，以保证测量结果。

- 1) 间隔指定时间检测测针磨损情况。带定向主轴可对#1290 赋值，避开磨损区域，非定向主轴可根据实际情况更换测针；
- 2) 间隔指定周期对测针同轴度进行校正。

## 4. 测头校表

测头安装在主轴上时，如果测头中心与主轴中心存在偏心误差，则会影响测量结果的准确性，一般需要校准测头与主轴中心的同心度在 0.002mm 以内，以提高测量准确度。以下是测头校表的具体方法。

### 4.1 主轴定向释放

释放主轴定向有两种方法可供参考：

- 1) MDI 中输入 G80 指令，点击操作面板“程序启动”按钮，完成后切换“手轮”模式，依次在操作面板上完成如下操作【SYS】→【PLC】→【E0.软面板】→“精雕主轴变频器释放”；打表完成后点击“精雕主轴变频器锁住”即可。
- 2) 切换机床权限，点击【SYS】→【PLC】→【调试】→【精雕主轴调试】→【精雕 I\_ST】→【OFF】（数据栏），主轴变频器将会被释放，打表完成后点击【ON】即可，如图 7 所示。



图 7 主轴变频器释放设置

## 4.2 测头校表

将测球中心抵在千分表接触球上，匀速旋转测头观察千分表表针的变化，同时通过调节四个方向的平底螺钉来校正测头精度，（以球形测针为例）具体操作如下：

1) 将测头装卡到主轴上，用千分表抵住测球的最高点（通过手轮上下、左右移动测头找到接触量的最大值），千分表受力不要太大，保持在 20 至 40 格即可；

2) 手动旋转测头，找到千分表受力最大点，此时选择偏向最大点距离最近的一颗顶丝入手，适当松动其对面位置螺钉，后根据情况缓慢拧紧刚才数值最大点的螺钉；

3) 再次旋转测头，重复上一步操作，直到千分表表针的跳动保持在 1 格(0.002mm)以内。

随着调整过程中误差量越来越小，旋拧和松动螺钉的力度也要适度。并且最终要保证四个顶丝全部拧紧，处于受力状态。

### 注意：

1) 适当调整测头的扭力，扭力不要过大，也不要太小。扭力过大，测头中心杆受力的挤压，可使中心杆变形，同时也损伤测头；扭力太小，在测量的过程中，测头会松动，影响测量精度；

2) 当测针为柱形时，用哪个位置检测就打这个位置附近的跳动，例如：用柱形测针底部向上 0.5mm 的位置进行探测，打表时就打这个位置的跳动即可，具体操作同球形探针。

## 4.3 效果检验

调节手轮使测球远离千分表，然后使二者重新缓慢接触，千分表指针处在 20 至 40 格之间任一位置，手动旋转测头刀柄，观察千分表表针的变化幅度，表针跳动保持在 1 格(0.002mm)以内即可。

最后将千分表退回并取下，锁住主轴即可（手动旋转检查主轴是否锁住）。

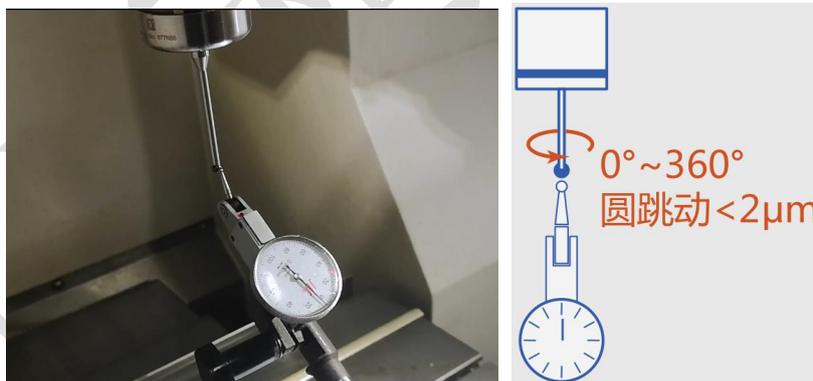


图 8 测头打表

## 附录三：在机测量基础标定

### 1. 为什么要标定？

测头测量误差主要由四部分组成：测头预行程误差、测头各项异性误差、测针结构误差、测针偏心误差。为避免测头物理特性的影响，减少实际测量过程中各影响要素造成的误差累积，降低测量数据的原始误差，应在测量前对测头进行标定，在此我们使用标准环与标准球在测量前对测头进行标定，获取测量误差做为标定补偿量，在测量过程中按照测量方向进行补偿，消除测量误差。

#### 1.1 标定原理介绍

将已知尺寸的标准件装卡在机床上，使用测头对标准件分中。为保证测量数据准确，可以选择使用单次或多次分中，多次分中可获得更准确的中心坐标。分中后测量标准件尺寸，与理论尺寸比较可得到尺寸测量误差，反推得到单向测量误差做为半径标定补偿量。

#### 1.2 标定流程

根据测头型号（OMP400、OMP40-2）、标准件类型（标准球、标准环）、测量模式（3D高精度、2.5D）、机床主轴是否定向等条件，针对不同的工况确定标定模式。

### 2. 标定环标定

#### 2.1 标定环的选型

①标定环建议选用钢材质（与机床本体材质接近，热膨胀系数相同，随温度变化趋势相同），表面粗糙度  $Ra < 0.8\mu m$ ，如下图 9：



图 9 标定环

②标准环的直径建议选用 20~30mm，圆度最好在 0.001mm 以内，平面度在 0.002mm 以内；

③一般选用内圆标定，若为 L 型测针，可采用外圆标定。

#### 2.2 标定程序输出

标定环程序可以通过 SurfMill 软件直接输出，标定程序可同测量程序一起输出，在任意测量路径的测量设置中选择【测量标定】，设置标定类型，采用“圆环标定”，然后根据实际应用需求设定其他标定参数，共输出 3 个程序，如图 10 所示。



图 10 标定环标定程序输出

## 2.3 标定环标定实际操作

### ①安装标定环

将标定环安装在清理干净机床工作台上，确保其安装牢固，且不会与其他单元造成干涉，对标定环进行分中告诉机床标准件在工作台上的位置。

### ②配置参数

将参数配置程序导入机床，一般重点检查参数#1285（测球半径）、#1286（标准环半径）确保参数与实际相符，其他参数一般默认，编译无误后，运行程序完成配参。配置参数所在的变量地址分别是：#1296~#1298 设置测头信号参数；#1285~#1287 设置测量校准几何参数；#1290 设置测量主轴定向参数；#1291~#1295 测量运动参数。

### ③运行标定程序

配参结束后打开标定程序，检查文本程序中的刀长补偿编号是否与当前使用测头刀号对应，编译无误后，依次点击【程序运行】→【手轮试切】→【程序启动】，手动跑完程序后，关闭手轮试切，将标定程序自动运行一遍。程序运行结束后，可在对应的变量里查看标定结果，如表 6、7 所示，运行相应的测量程序时将自动调用相应的标定结果。

## 3. 标定球标定

### 3.1 标定球的选型

标准球直径一般在 4mm 至 60mm 之间，标准球的直径建议选用 20~30 mm，圆度最好在 0.001mm 以内。



图 11 陶瓷标准球



图 12 金属标准球

### 3.2 标定程序输出

标定球程序可以通过 SurfMill 直接输出，输出方式与标定环的区别为标定类型采用“圆球标定”，然后根据实际应用需求设定其他标定参数，共输出 3 个程序，如图 13 所示。



- ENG0.ENG
- ENG0-标定球中心原点校正和测头标定.ENG
- ENG0-配置相关测头参数.ENG

图 13 标定环标定程序输出

### 3.3 标定球标定实际操作

#### ①安装标定球

标准球使用时需要固定在机床工作台上，保证底座底面与工作台良好接触、无松动，注意，固定时不要磕碰标准球球体，且不与其他单元造成干涉，对标准球进行分中告诉机床标定球在工作台上的位置。

#### ②配置参数

基本参数配置与标定环标定一致，有所区别的是，标准球需重点检查的参数为：#1285（测球半径）和#1287（标准球半径）。

#### ③运行标定程序

标定程序运行过程与标定环程序运行过程一致。程序运行结束后，可在对应的变量里查看标定结果，如表 3、表 4 所示，运行相应的测量程序时将自动调用相应的标定结果。

表 3 高精度 3D 标定说明

标准件类型	标定模式	标定结果及存储变量
标准球	G65 P7721 M5	XY 向校准实际测球半径值 #801-#802
		XY 向校准实际测球偏移量 #803-#804
内环	G65 P7721 M-4	30-330 度校准实际测球半径值 #810-#817
外环	G65 P7721 M4	Z 向校准实际测球半径值 #818

表 4 一般 2.5D 标定说明

标准件类型	标定模式	标定结果及存储变量
标准球	G65 P7721 M3	Z 向标定量 #1270
内环	G65 P7721 M-2	XY 向标定量 #1280（定向）
外环	G65 P7721 M2	XY 向标定量 #1281-#1284（非定向）

**注意：**一般情况下，标定程序应与测量程序同步输出、配套使用。

高精密模具采用 3D 标定程序，路径输出时，需要在【高级设置】→【测量设置】中勾选【3D 测量】；若不勾选【3D 测量】，则为 2.5D 标定，用于一般的尺寸测量；根据机床主轴是否可定向选择【主轴定向】，如图 27 所示。如果仅输出测量程序使用，确保在输出测量路径时，测量设置中的【3D 测量】选项与标定程序输出时一致。

## 4. 标定注意事项

### 4.1 标定准备注意事项

- ①使用测头前，要对测头的测针进行打表（测针的同心度调整到 1 $\mu$ m 以内）；
- ②任何物体都会发生热胀冷缩，而影响其标准尺寸，因此标准件使用前一定要等温处理，等温时间视温差及标准件大小确定；
- ③标定前需要充分清洁测球、标准件标定特征位置、工件及接收器表面，以保证数据的准确性。接触式测量系统的精度一般在微米级，粘附的灰尘或污垢都会影响标定精度；
- ④标准件使用后应及时清洁，可先用气枪小气流吹其表面，再用干净的无尘布擦拭标准球表面，并及时归还，不可长时间安放在机床内部；
- ⑤标准件安装前、拆卸后禁止与其他切削刀具及工具堆放在一块，更不允许倾斜防止；
- ⑥标准件转运、使用过程中，不可跌落或强力撞击，否则可能发生变形影响尺寸精度；

### 4.2 标定中注意事项

- ①必须正确设置测头刀号，防止主轴打转速旋转，导致测头甩出，伤及操作人员并且造成测头损坏；
- ②测头标定速度要与测量中搜索速度保持一致；搜索速度的大小会影响测头测量时测针的触发量大小，特别注意标定时机床的倍率要和实际探测的倍率保持一致，
- ③手轮试切探测和自动探测工件的精度差别在 1 $\mu$ m 以内，手轮试切探测的数据可用；
- ④测头标定的方向要和探测方向保持一致，特别是各向异性的测头；例如 OMP40-2 测头，标定的方向如果和测量的方向不一致，最大偏差可达到 15 $\mu$ m，但是 360 度任意方向上的固定角度的重复测量精度在 4 $\mu$ m 以内。因此在测量中，尽量使用主轴定向功能，没有主轴定向功能的机床，最好使用 OMP400 高精度的测头。

### 4.3 重新标定注意事项

除了在首次使用测量系统时执行标定外，有必要不定期重新标定，尤其是下列情况：

- ①测头上更换新测针后；
- ②怀疑测针弯曲或测头发生碰撞时；
- ③定期对机床的机械变化进行误差补偿时；
- ④测头刀柄重复定位精度差时；
- ⑤进行高精密产品检测之前；
- ⑥测量速度变化时。

## 附录四：在机测量转台轴心误差

### 1. 为什么需要测量转台轴心误差？

五轴加工中存在转台运动误差，转台长时间运动及受环境温度波动的影响，往往会造成轴心位置参数的漂移，轴心参数出现偏差会造成产品加工偏位，尺寸超差等现象。为保证机床加工精度，通常需要对多轴机床旋转轴进行误差测量，进行五轴转台轴心校准。

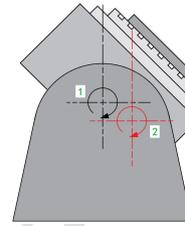
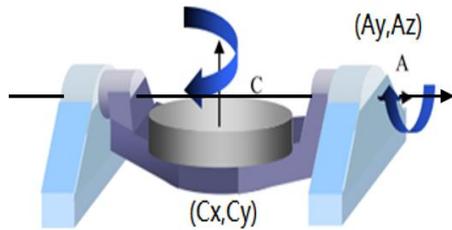


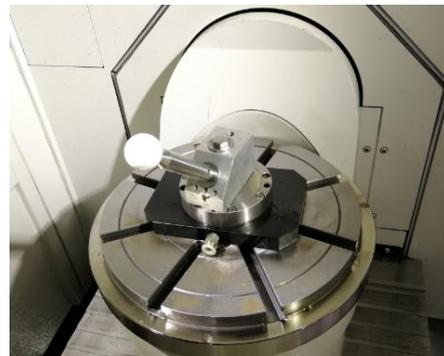
图 14 转台轴心误差

### 2. 硬件资源配置

- 1) 标准球圆度：标准球圆度在 0.001mm 以内；
- 2) 标准球球杆：根据不同机床行程空间以及实际装卡情况，标准球球杆最好备有长短不同配置；
- 3) 标准球底座：标准球底座建议做成强磁力吸座，类似千分表表座，使用方便快捷；
- 4) 标准球安装要求：球杆与转台面成 45 度，标准球球心距离测量轴轴线建议至少 70mm，为避免干涉，安装时球杆在旋转圆面的投影尽量与旋转圆半径方向一致；



(a) AC 轴



(b) BC 轴

图 15 AC 轴（BC 轴）转台安装实物图

### 5) 测针

- ①使用球型测针，禁止使用已磨损的测针；
- ②测针长度可适当长一些，以避免在 90 度位置测量时产生干涉；
- ③为获得精确结果，测头径向跳动要求在 0.002mm 以内。

### 6) 直线轴和旋转轴

- ①直线轴和旋转轴的单轴运动位置已采用激光干涉仪标定，螺距补偿已开启；

②转轴旋转正负方向符合左手定则。

### 3. 测头刀长设置

**方法一：** 主轴刀具换为测头→使用触碰式对刀仪对刀→完成测头对刀（波龙测头建议使用方法二进行测头对刀）

**方法二：** 主轴刀具换为平底刀→使用平底刀铣平面，记录机床Z1坐标→使用触碰式对刀仪对平底刀L1→主轴刀具换为测头→使用测头触碰铣出平面，记录机床Z2坐标→测头的刀长  $L=L1+Z2-Z1$ →完成测头对刀。

备注：若需要将测头设为机床基准刀，测头对刀时勾选“标定”，轴心测量模式必须为【查找】模式（图 30）；若不将测头设置为基准刀，轴心测量前测头按常规流程对刀即可。建议测头对刀时不勾选“标定”。

区别：方法一中，由于测头触碰对刀仪时会存在一定的Z向压缩量，存在刀长计算误差。美德龙对刀仪触发力小，可满足一定的精度要求。方法二中，采用平底刀铣面，然后测头触碰加工面，通过换算获得测头的刀长，完成测头的对刀，精度较高。

### 4. 轴心快速测量校准

#### 1) 基本参数配置

程序运行的第一步会弹出基本参数配置窗口（如图 16），设置是否需要标定测头、转台类型、刀号、测量轴心使用点数等基本参数。

参数配置		参数配置	
参数变量	变量值	参数变量	变量值
机床类型：1[定向机床] 0[非定向机床]	1	拟合标准球球心允许圆度偏差	0.0030
测头长度补偿编号	13	标准球最小旋转半径R	70.0000
坐标系：G54-G59.若使用G54.1, 如G54.1P4则输入-4	59	A轴标准球位置点个数, >3	5
是否进行测头标定：1[是] 0[否]	1	C轴标准球位置点个数, >3	5
选择待测转台：1[A], 2[B], 3[C], 4[AC], 5[BC]		自定义A轴测量最大角度	90.0000
测针名义半径		自定义A轴测量最小角度	-90.0000
标准球直径		选择[左]/[右]旋转圆计算A轴心：-1[-X方向,左]、1[+X/方向,右]	-1
轴心测量模式：0[检测], 1[查找]	0	0[标准球坐标未知] 1[标准球坐标已知]	0
【检测】模式适合：对当前机床轴心进行检测校正	备注1		
【查找】模式适合：机床轴心丢失或新装配的多轴机床的轴心查找	备注2		
【步骤】清洁测针、标准球→测头打表→对刀→运行程序	备注3		

图 16 基本参数配置

(1) 机床类型：依据使用的机床是否定向进行参数配置；

(2) 测头长度补偿编号：依据测头所在刀号进行设置；

(3) 坐标系：选择标准球所在的坐标系（如果标准球已分中，就填写标准球分中所在的坐标系；如果标准球未分中，填写一个未被占用的坐标系即可，程序运行完成后会将标准球的坐标自动填入该坐标系）；

(4) 是否进行测头标定：依据需求选择（若输入 1，选择标定并在参数配置完毕后运行标准球标定程序；若输入 0，选择不标定，则不运行标定程序）；

(5) 选择待测转台、测球名义半径、标准球直径：依据实际情况进行选择；

(6) 标准球坐标系已知（已给标准球分中）；标准球坐标系未知（未给标准球分中）。参数配置完成后点击<F8.完成>。

## 2) 轴心测量

根据图 30 中基本参数设定进行轴心测量:A 轴（B 轴）、C 轴、AC 轴（BC 轴）。以 AC 轴轴心测量（C 轴跟踪定位，A 轴摆正）为例：

C 轴旋转圆的初次跟踪定位完成，将 A 轴运动至使得 C 轴轴线处于竖直状态的位置。首次 C 轴测量，如果将 C 轴轴线摆垂直 A 轴需要旋转的角度大于 0.002 度，则将 C 轴摆垂直后重复测量 C 轴轴心；如果小于等于 0.002 度则直接进行 A 轴轴心测量。

## 5. 测量结果处理

轴心测量结果包括：

- 1) 轴心位置参数；
- 2) 转台的各项位置精度。包括：A 轴（B 轴）轴线与 C 轴轴线的垂直度；A 轴（B 轴）与 YOZ 面（XOZ 面）的垂直度；
- 3) 相应转台的调整方向以及调整量，以方便转台装配时的调整；



图 17 AC 轴测量结果

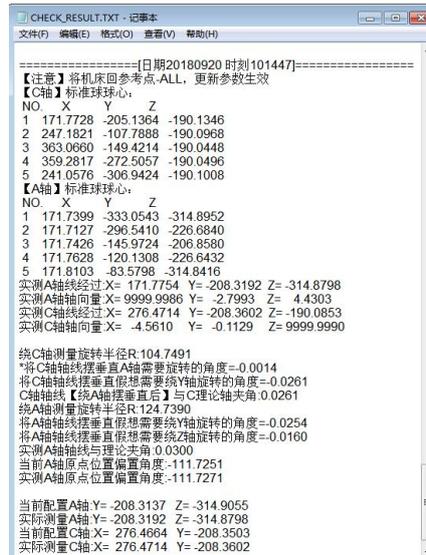
目前，数控系统支持轴心数据的更新和主动轴原点位置偏置角度。

表 5 详细参数选项

内容	选项说明
F1 重复测量	再次运行转台轴心位置测量
F2 结束测量	结束程序
F3 打印输出	测量报告写入 D:\存储文件夹\CHECK_RESULT.TXT
F5 更新参数	测量结果更新到系统→参数→位置→转台轴线位置参数中

<F3.打印输出>中还包括转台的各项位置精度等信息，如图 18 所示：

- 1) A 轴（B 轴）轴线与 C 轴轴线的垂直度；
- 2) A 轴（B 轴）与 YOZ 面（XOZ 面）的垂直度；
- 3) A 轴（B 轴）、C 轴轴线经过机床坐标方向向量（单位向量\*10000 倍）等。



```

CHECK_RESULT.TXT - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
=====日期20180920 时刻101447=====
【注意】将机床回参考点-ALL, 更新参数生效
【C轴】标准球球心:
NO. X Y Z
1 171.7728 -205.1364 -190.1346
2 247.1821 -107.7888 -190.0968
3 363.0660 -149.4214 -190.0448
4 359.2817 -272.5057 -190.0498
5 241.0576 -306.9424 -190.1008
【A轴】标准球球心:
NO. X Y Z
1 171.7399 -333.0543 -314.8952
2 171.7127 -296.5410 -226.6840
3 171.7426 -145.9724 -208.8580
4 171.7628 -120.1308 -226.6432
5 171.8103 -83.5798 -314.8416
实测A轴线经过 X= 171.7754 Y= -208.3192 Z= -314.8798
实测A轴轴向量 X= 9999.9986 Y= -2.7993 Z= 4.4303
实测C轴线经过 X= 276.4714 Y= -208.3602 Z= -190.0853
实测C轴轴向量 X= -4.5610 Y= -0.1129 Z= 9999.9990

绕C轴测量旋转半径R:104.7491
*将C轴轴线摆垂直A轴需要旋转的角度=-0.0014
将C轴轴线摆垂直理想需要绕Y轴旋转的角度=0.0261
C轴轴线【绕A轴摆垂直后】与C理论轴夹角:0.0261
绕A轴测量旋转半径R:124.7390
将A轴轴线摆垂直理想需要绕Y轴旋转的角度=-0.0254
将A轴轴线摆垂直理想需要绕Z轴旋转的角度=-0.0160
实测A轴轴线与理论夹角:0.0300
当前A轴原点位置偏差角度:-111.7251
实测A轴原点位置偏差角度:-111.7271

当前配置A轴 Y= -208.3137 Z= -314.9055
实际测量A轴 Y= -208.3192 Z= -314.8798
当前配置C轴 X= 276.4864 Y= -208.3503
实际测量C轴 X= 276.4714 Y= -208.3602

```

图 18 测量结果打印

**备注：**为保证轴心测量结果可靠和测量效率（若对参数配置中变量含义不清，请保持默认设置）：

- 1) 测量前请全行程暖机（主轴不转）2h 以上。此外，若后续加工为定位加工，则暖机时转台不旋转运动；若后续加工为联动加工，则暖机时相应转台也旋转运动；
- 2) A（B）轴、C 轴标准球位置点个数尽量大于等于 4 个；
- 3) 图 30 中，可以自定义 A/B 轴测量运动最大角度、最小角度，若在 A/B $\pm 90^\circ$ 位置处存在球杆或其他干涉问题，可以设置较小角度进行测量，如 $\pm 60^\circ$ ；
- 4) 若只是对机床当前轴心进行检测校正，如轴心偏离误差在丝/道级别内，则图 30 弹框中建议选择【检测】模式。若轴心偏离超过这个范围或轴心参数丢失或查找新安装多轴机床轴心，可以选择【查找】模式。

## 附录五：在机测量变换工件坐标系示例

随着在机测量技术在五轴加工中的应用越来越广泛，五轴在机测量技术的优势也越来越明显，尤其是在变换工件坐标系方面。三坐标在建立基本坐标系时有五项入参，包括空间旋转、平面旋转、X-原点、Y-原点、Z-原点，其中空间旋转和平面旋转用来确定坐标系的方向，其余三项确定坐标系原点。因此利用在机测量来进行工件坐标系的变换时，在通常情况下，我们也需要确定上述 5 项内容。

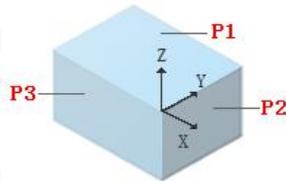
本章从一些有代表性的案例中总结出了几点变换工件坐标系的方法，希望读者能够在面对造型复杂的五轴工件时，灵活应用，将在机测量技术更好的应用于五轴加工中。

### 1. 检测坐标系建立方式

SurfMill 检测坐标系的建立方式分为 6 种：三面法，两圆一面，点线面，回转体，一面一槽和自定义。前 5 种为常用的创建方式，可以指导用户快速建立检测坐标系；自定义方式是一种更加灵活的方式，适用于高级用户和特殊需求。

#### 1) 三面法

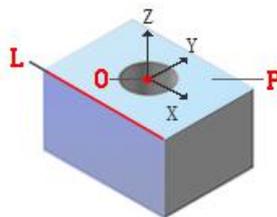
三面法适用于有三个基准面的场景。基准平面 1 确定坐标系 Z 轴方向，基准平面 2 确定坐标系 X 轴方向，三面交点为坐标系原点。



基准类型	可拾取元素类型
基准平面 1	平面
基准平面 2	平面
基准平面 3	平面

#### 2) 面线点

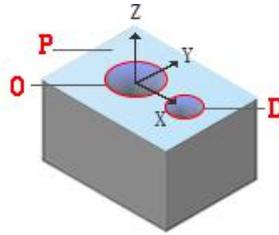
面线点适用于有一个基准圆柱/方槽的场景。基准平面确定坐标系 Z 轴方向，基准直线确定坐标系 X 轴方向，基准中心点在基准平面上的投影为坐标系原点。



基准类型	可拾取元素类型
基准平面	平面
基准直线	2D 直线，圆柱
基准中心点	圆，方槽，圆柱

### 3) 一面两圆

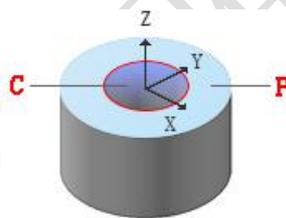
一面两圆适用于有两个基准圆柱/方槽的场景。基准平面确定坐标系 Z 轴方向，基准原点圆的圆心在基准平面上的投影为坐标系原点，坐标系原点和基准方向圆组成的方向确定坐标系 X 轴方向。



基准类型	可拾取元素类型
基准平面	平面
基准方向圆	圆，方槽
基准原点圆	圆，方槽，圆柱

### 4) 回转体法

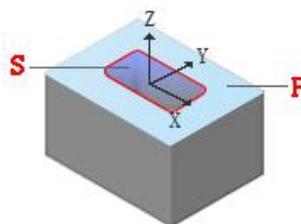
回转体法适用于圆柱形工件的场景。基准圆柱确定坐标系 Z 轴方向，圆柱轴线与基准平面的交点确定坐标系原点。



基准类型	可拾取元素类型
基准圆柱	圆柱
基准平面	平面

### 5) 一槽一面

一槽一面适用于有一个基准方槽的场景。基准平面确定坐标系 Z 轴方向，方槽的长边方向确定坐标系 X 轴方向，方槽中心在基准平面上的投影确定坐标系 Z 轴方向。



基准类型	可拾取元素类型
基准平面	平面
基准槽	方槽

### 6) 自定义

自定义方式是可以实现上述五种方式，还可以实现以上五种方式以外的建立方式，灵活

性较高。新建坐标系可以选择 5 个元素，分别为空间旋转元素(+Z)、平面旋转元素(+X)、原点(X)、原点(Y)、原点(Z)。

坐标系元素	意义	可拾取元素类型
空间旋转元素(+Z)	此元素用于定义坐标系的 Z 轴	平面、圆柱、方槽
平面旋转元素(+X)	此元素用于定义坐标系的 X 轴	2D 直线、平面、圆柱、圆、点、方槽
原点(X)	此元素用于定义坐标系的原点 X	点、平面、圆、圆柱、方槽
原点(Y)	此元素用于定义坐标系的原点 Y	点、平面、圆、圆柱、方槽
原点(Z)	此元素用于定义坐标系的原点 Z	点、平面、圆、圆柱、方槽

**注意：**平面对称平面

检测坐标系分为旋转和平移两个运动，旋转由空间旋转经和平面旋转元素决定，平移由原点决定。

## 2. 变换工件坐标系示例

### 1) 变换工件坐标系示例 1--三面法

**案例分析：**

某客户使用多轴机床加工一款绣花机头配件，需要在加工完毕后在机检测产品尺寸。如图 19 所示为产品模型，检测特征 1 为检测绿色面和红色基准面的垂直度；检测特征 2 为 5 个圆柱的直径以及圆柱到基准面的距离。



图 19 绣花机头检测特征

由于工件结构复杂，直接安装后拉表找正较为困难，根据上述实际测量需求，在机测量技术采用三面法变换工件坐标系，实现工件位置的找正。

**三面法：**

三面法，需要同时检测三个平面元素。首先，选取其中质量最优的平面元素，作为空间旋转 Z 元素；在此基础上，选取质量较好的平面元素，作为平面旋转 X 元素；最后检测第三个平面元素，以上述三个平面的交点，确定原点。

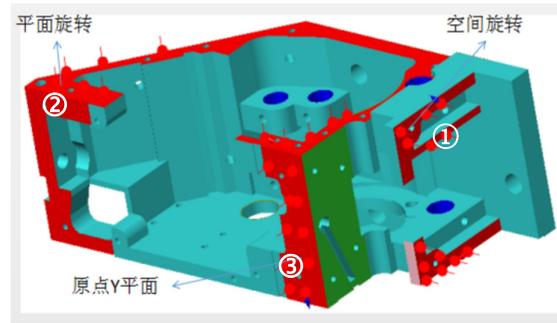


图 20 三面法示意图

### 1) 确定空间旋转 Z 元素

根据模型特征，测量图 20 中①位置点，即工件右侧壁面，作为空间旋转 Z 元素，将工件摆平。

### 2) 确定平面旋转 X 元素

测量图 20 中的②位置点，即工件上平面，作为平面旋转 X 元素，将工件摆正。

### 3) 确定坐标原点

测量图 20 中③位置点，即工件前平面，通过右侧壁面、上平面以及前平面三面交点计算原点偏差。

只需要上述 3 步，即可通过三面法变换工件坐标系，实现工件位置找正。

## 2) 变换工件坐标系示例 2--对称法

### 案例分析：

如图 21 所示方体工件，工件四周对称分布。实际生产中，需要对该工件进行二次修复，且二次修复要保证各个面切削量均匀。

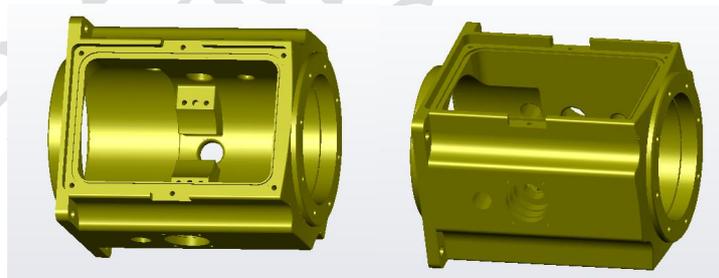


图 21 某方体工件模型

根据工件四周对称分布的特点，并且根据上述实际加工需求，在机测量技术采用对称法变换工件坐标系，保证二次装夹后，待加工特征位置准确。

### 对称法：

对称法的一般思路是构造对称元素，将两元素的中心点作为变换工件坐标系的原点，对称元素选取较为灵活，建议选取质量好，易于测量的对称元素。本例通过两组对称的平面来进行构造。

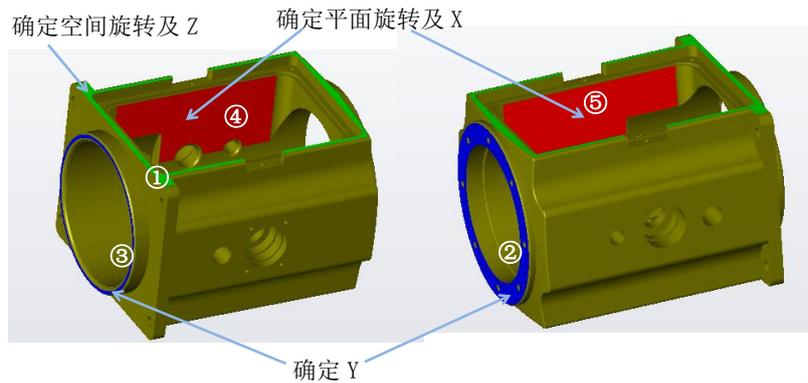


图 22 对称法示意图

1) 确定空间旋转 Z 元素并补偿 Z 向偏差

根据模型特征，测量图 22 中的①位置点，即工件顶面，作为空间旋转 Z 元素，将工件摆平。

2) 确定平面旋转 X 元素并补偿 X 向偏差

基于工件模型特征和各特征面质量，测量图 22 中的④⑤位置点，即内腔前后面，选取内腔前后任意一个平面，作为平面旋转 X 元素，将工件摆正。

3) 确定检测坐标系原点

测量图 22 中②③位置点，即两侧圆孔顶面，取内腔前后面和两侧圆孔顶面分别构造对称面与顶面交点补偿原点偏差。

经过上述步骤，即可得到通过对称法构造的工件变换坐标系。

3) 变换工件坐标系示例 3——圆一面法

案例分析：

如图 23 所示模具模型，为一非规则回转体类工件。



图 23 某模具模型

一圆一面法：

一圆一面法，顾名思义需要分别探测一个平面和一个圆即可。通过平面确定工件的空间旋转和某个方向的偏差，通过圆确定剩下两个方向的偏差。对于回转体类工件，无论如何放置，X、Y 方向无影响，所以可以将平面旋转省略。

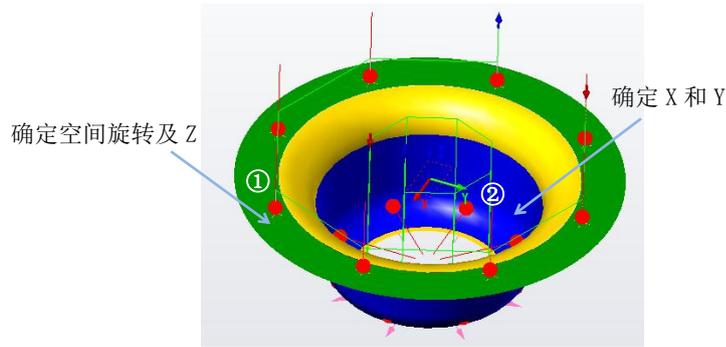


图 24 一圆一面法示意图

#### 1) 确定空间旋转 $Z$ 元素并补偿 $Z$ 向偏差

根据模型特征，测量图 24 中标注的①位置点所在平面，作为空间旋转  $Z$  元素，将工件摆平，同时补偿原点  $Z$  向偏差。

#### 2) 补偿工件原点 $XY$ 偏差

基于工件模型特征，测量图 24 中标注的②位置点，即探测内腔中某一截面圆，计算截面圆的圆心坐标  $X, Y$ ，实现原点  $XY$  偏差的补偿。

#### 4) 变换工件坐标系示例 4—多截面圆拟合法

##### 案例分析：

如图 25 所示为一款细长杆类的钢件模型，该工件长度接近 250mm，需要对其部分孔位进行精加工。基于工件特征，装夹后，受到测针长度的限制，只能对圆柱的上半段进行探测，这样探测无法保证工件摆正的精度。

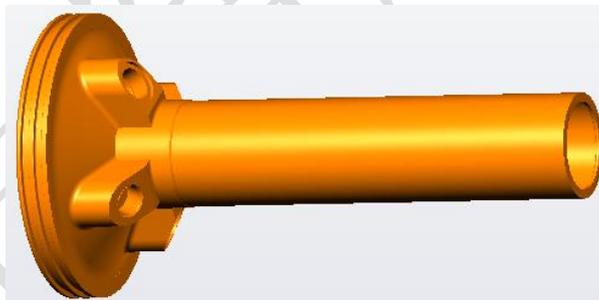


图 25 某钢件模型

根据上述实际需求，在机测量技术可以采用多截面圆拟合轴心法变换工件坐标系，实现对工件的摆平。

##### 多截面拟合法：

多截面拟合法，需要探测圆柱的多个截面和一个端面。由多个截面圆拟合的轴线法失确定空间旋转  $Z$ ；由于圆柱是回转体，无论如何放置， $X, Y$  方向无影响，因此无需选择平面旋转  $X$  元素；圆柱轴线  $X, Y$  确定原点  $X, Y$ ，探测圆柱端面确定原点  $Z$ 。

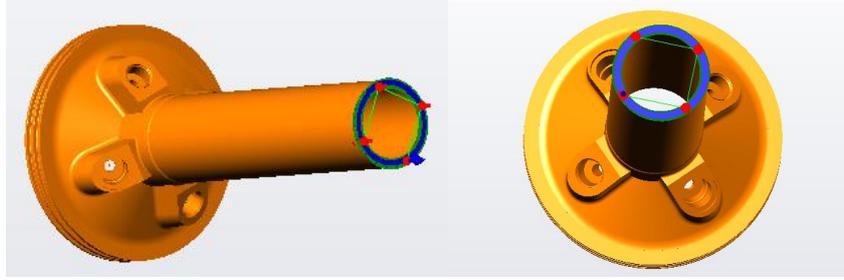


图 26 多截面拟合法示意图 1

### 1) 确定空间旋转 Z 元素

根据模型特征，采用多轴定位的方式，测量图 27 中的多个截面圆，通过坐标转换拟合计算多个截面圆轴线法矢，确定空间旋转 Z 元素，将工件摆平。

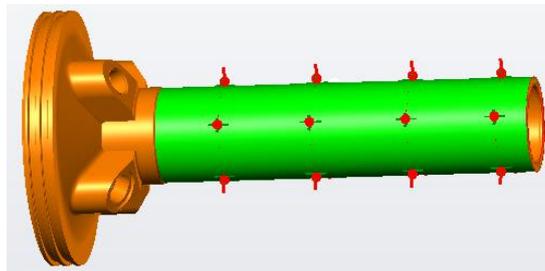


图 27 多截面拟合法示意图 2

### 2) 确定原点 XYZ

利用上述多个截面圆拟合得到的轴心 XY 补偿原点 XY 偏差，探测圆柱端面补偿原点 Z 偏差。

### 5) 变换工件坐标系示例 5—两面一圆法

#### 案例分析：

图 28 所示为某减速机底座工件模型，需要测量该工件的上平面将工件摆平并补偿原点 Z 偏差，测量侧壁面补偿工件角度偏差，测量圆孔补偿工件原点 XY 偏差。

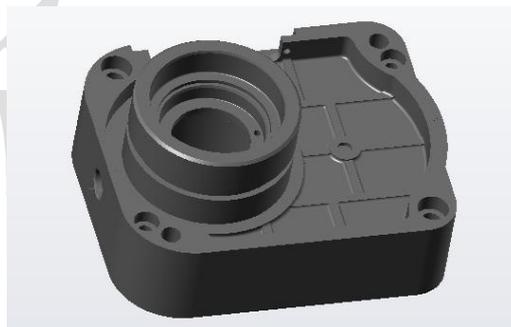


图 28 某减速机底座工件模型

#### 两面一圆法：

实现原理：测量两个平面及一个圆；平面 1 和平面 2 分别确定工件的空间旋转和平面旋转，圆孔的 XY 用来补偿工件的原点 XY 偏差，平面 Z 补偿原点 Z 偏差。

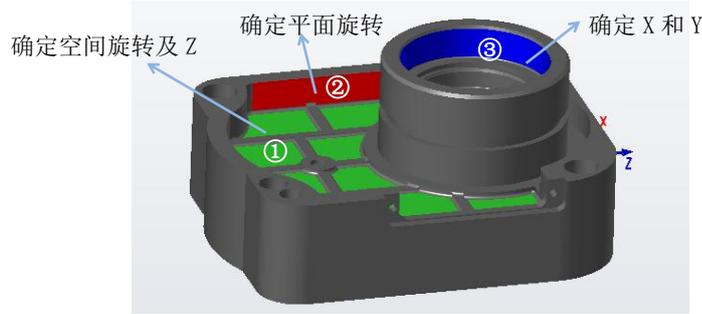


图 29 两面一圆法示意图

### 1) 确定空间旋转 Z 元素并补偿 Z 向偏差

根据模型特征，测量图 29 中标注的①位置点，即工件上平面，作为空间旋转 Z 元素，将工件摆平，同时补偿原点 Z 向偏差。

### 2) 确定平面旋转

基于工件模型特征和各特征面质量，测量图 29 中的②位置点，即工件内侧壁面，作为平面旋转 X 元素，将工件摆正。

### 3) 补偿 X, Y 向偏差

测量图 29 中③位置点，即上部的圆孔，作为原点 XY 元素，补偿工件原点 XY 偏差。经过上述步骤，即可通过两面一圆法变换工件坐标系。