

# 华中 8 型数控系统简明调试手册（五轴）

V2.4 系列

## 前言

---

本说明书较全面地介绍了 HNC-8 型数控系统调试、编程或应用方法，是用户快速学习和使用本系统的基本说明书。本说明书的更新和升级事宜，由武汉华中数控股份有限公司授权并组织实施。未经本公司授权或书面许可，任何单位或个人无权对本说明书内容进行修改或更正，本公司概不负责由此而造成的客户损失。

HNC-8 型系列数控系统说明书中，我们将尽力叙述各种与该系统应用相关的事件。由于篇幅限制及产品开发定位等原因，不能也不可能对系统中所有不必做或不能做的事件进行详细的叙述。因此，本说明书中没有特别描述的事件均可视为“不可能”或“不允许”的事件。

此说明书的版权归武汉华中数控股份有限公司，任何单位与个人进行出版或复印均属于非法行为，我公司将追究其法律责任。

限于编者水平，书中肯定有很多缺点和不妥之处，望广大用户不吝赐教。



### 注意



关于“限制事项”及“可使用的功能”等的说明事项，机床制造商提供的说明书优先于本说明书。请在进行实际加工前进行空运转，进行加工程序、刀具补偿量、工件偏置量等的确认。



本说明书未加说明的事情，请解释为“不可行”。



本说明书在编写时，假定所有选项功能均已配备。使用时请通过机床制造商提供的规格书进行确认。



各机床的相关说明，请参考机床制造商提供的说明书。



可使用的画面及功能因各 NC 系统(或版本)而异。使用前请务必确认规格。

# 目录

前言.....	i
第 1 章 机电参数联调.....	1
1、多轴匹配优化.....	1
1.1 单轴性能测定.....	1
1.2 多轴联动调试.....	4
2、空间误差补偿.....	7
2.1 概述.....	7
2.2 空间几何补偿原理.....	8
2.3 基于华中 8 型空间误差补偿模块介绍.....	9
2、全闭环优化.....	15
3.1 全闭环介绍.....	15
3.2 相关参数.....	15
3.3 全闭环相关控制参数.....	16
3.4 调试步骤.....	16
3.5 全闭环振动抑制措施.....	17
3、同步控制匹配优化.....	19
4.1 系统参数设置.....	19
4.2 初始阈值设置.....	19
4.3 同步轴位置校准.....	20
4.4 同步轴阈值设置.....	21
5、五轴 RTCP 标定.....	22
5.1 AC 双转台标定方法.....	22
5.2 BC 双摆头标定方法.....	32
5.3 B 摆 C 转混合结构标定方法.....	45
第 2 章 功能调试.....	56
1 五轴 RTCP 功能.....	56
1.1 刀具中心点控制说明(RTCP).....	56
1.2 RTCP 编程格式.....	57
2、3+2 定向加工功能.....	58
2.1 通过三点建立特性坐标系(G68.1).....	58

2.2 通过欧拉角建立特性坐标系(G68.2).....	59
2.3 通过空间角建立特性坐标系(G68.3).....	60
2.4 刀具轴方向控制.....	61
3、自动标定.....	64
3.1 参数设置.....	65
3.2 示教点获取.....	65
3.3 碰撞采点.....	67
3.4 RTCP 参数计算.....	67
3.5 AC 双转台结构自动标定案例.....	73
4、PID 功能.....	83
PLC_PID 指令.....	83
4.1 PID 模块参数.....	83
PID 模块参数设定流程.....	84
PID 原理.....	84
4.2 PID 参数的整定.....	85
4.3 PID 参数调节方法.....	85
4.4 PLC 控制例图(PID 控制主轴位置).....	85
5、五轴刚性攻丝.....	87
6、车铣复合功能.....	88
6.1 车铣转换.....	88
6.2 立卧转换.....	94
7、龙门同步功能.....	101
7.1 功能说明.....	101
7.2 带增量编码器同步轴的调试方法.....	102
7.3 带绝对编码器（绝对光栅尺）同步轴的配置.....	104
7.4 带距离码光栅尺同步轴的配置.....	107
7.5 其他说明.....	111
8、切线跟随功能.....	114
8.1 功能说明.....	114
8.2 功能指令.....	114
8.3 参数说明.....	114
8.4 PLC 控制.....	115

8.5 注意事项.....	116
第3章 加工调试.....	117
1 五轴 NAS 件.....	117
1.1 NAS 圆锥台试件基本情况.....	117
1.2 模型分析.....	117
1.3 加工工艺分析.....	118
1.4 试件检测.....	118
1.5 常见问题反馈.....	119
1.6 说明.....	119
2 “S” 试件.....	120
2.1 “S” 试件基本情况.....	120
2.2 模型分析.....	120
2.3 加工工艺分析.....	120
2.4 “S” 试件三坐标检测.....	123
2.5 机床精度对“S”试件加工效果的影响及改进措施.....	124
第4章 IScope 软件与加工分析.....	127
1 Iscope 软件功能介绍.....	127
1.1 软件安装及运行环境.....	127
1.2 使用说明.....	127
2 Iscope 问题分析解决思路.....	135
3 Iscope 问题分析实例.....	136
3.1 叶轮加工.....	136
3.2 S 件加工.....	139

## 第 1 章 机电参数联调

### 1、多轴匹配优化

一台 CNC 数控机床加工出品质优良的零件，与机床、伺服、系统和工艺都密切相关，它们之间互相关联，任何一个环节出现问题，都会影响最终加工零件的品质。本调试模板主要目的是规范五轴性能调试，以数据指标为依据，指导调试人员进行模板化调试，将五轴运动性能发挥到最佳，降低调试人员经验影响。调试模板主要划分为 3 个部分：单轴性能测定、多轴联动测定和加工调试。

注：在使用本调试模板之前，请确保机床基本的机电联调已完成，包括各轴运行正常（低速、中速、高速）、定位精度和重复定位精度满足要求、打激光做螺距误差补偿、反向间隙补偿、MCP 功能正常、刀库工作正常等。本调试规范主要针对五轴数控机床，其他 3 轴、4 轴或者多轴数控机床调试可以借鉴此模板。

#### 1.1 单轴性能测定

该测定是通过系统自带的伺服调试功能和 SSTT，优化伺服驱动参数，提高伺服刚性和性能。原则上是在条件满足的情况下，尽量使伺服驱动发挥到极限，从现场应用来看，伺服驱动性能越好，加工零件品质越高。

##### A. 位置环

位置环反映了实际加工中跟踪误差大小，影响最终加工零件的精度。

- (1) 不断提高位置比例增益，当轴移动时出现振动声，将此项参数值略微减小，直至移动该轴时声音消失。
- (2) 进入伺服调试界面，选择位置环调试，设定轴的移动行程（加工区域），使用 1000mm/min 移动该轴，系统显示的跟踪误差应在 0.2mm 以下为宜，0.1mm 为佳。若不满足要求，减小位置比例增益。



图 1-1 位置环测试

## B. 速度环

速度环反映了实际加工中速度波动，也就是跟踪误差波动。常见加工中出现的竖纹和振纹都由于速度波动过大引起的。提高伺服驱动的刚性，同时速度波动在合理范围之内是速度环调试的原则。

- (1) 提高速度比例增益，当该轴移动时出现器叫声，将此项参数值略微减小，直到移动该轴时声音消失。
- (2) 打开陷波器功能，对轴的陷波频率进行调整，调试方法见相关调试文档。进一步调高速度环刚性，如果产生震荡可以通过调整【速度环反馈滤波因子】和【转矩指令滤波时间】进行调整，尽量不使用第二陷波器，如果达不到预期效果可以打开。
- (3) 进入伺服调试界面，选择速度环调试，设定轴的移动行程（加工区域），移动速度设为精加工 F 指定的速度，默认情况下选择 3000mm/min 为测定速度。速度波动大概需要在 10mm/min，且加速度最大和最小值基本一致。如果相差较大，说明机械的两个方向受力不均匀，需要适当调整机械。若不满足要求，需减小速度环比例增益。

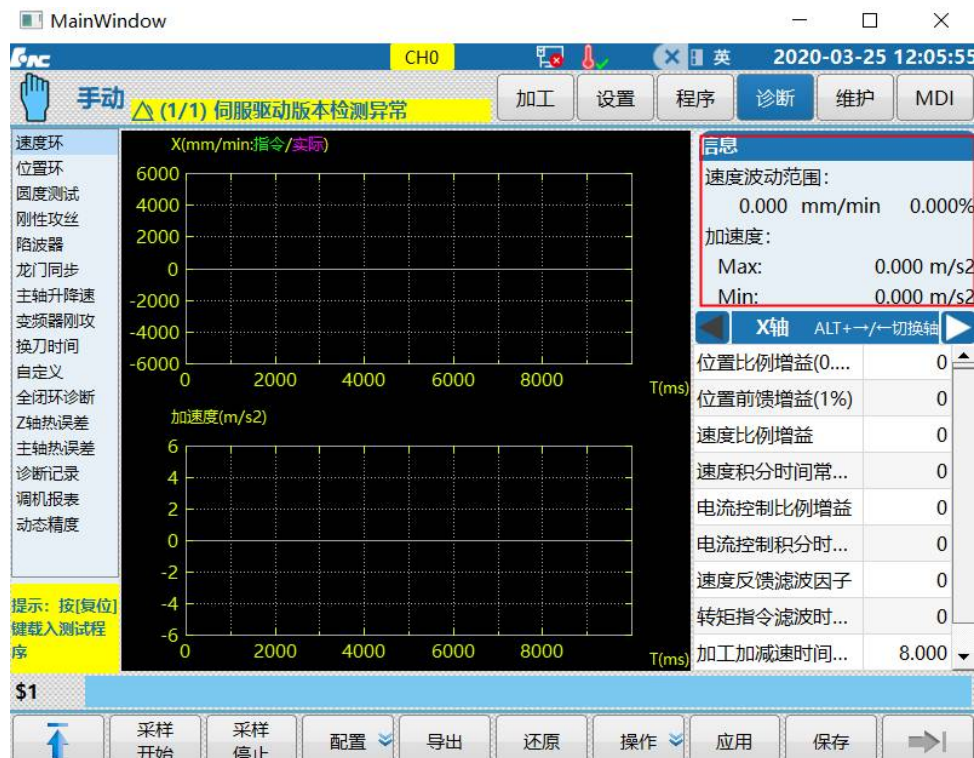


图 1-2 速度环测试

### C. 电流环

硬件电流环的伺服电流环增益 PA27 参数为 6000，普通伺服电流环增益 PA27 参数一般为 3000~4000。

### D. 过冲测定（低速和高速）

从以往调试经验来看，重力轴、承重轴、硬轨轴在加速或减速结束阶段实际速度存在过冲现象，在全闭环控制模式下现象尤为明显。过冲测定关键是聚焦加速或减速结束时刻的速度波动，通过调整速度环参数和轴加减速参数，从而优化轴的反向性能。为便于观察速度波动曲线图形，用 SSTT 工具采集测定轴的指令速度和实际速度波形。

- (1) 设定轴的移动行程（加工区域），往复运动，选择低速、中速和高速几组数据进行测定。
- (2) 观察采样后的实际速度曲线在此区域的波形特征，计算波峰和波谷的最大速度波动幅值。
- (3) 波动幅值应在 40mm/min 以下，若不满足要求减小速度环增益，增大轴的加速度时间常数和捷度时间常数。

注：

- a) 过冲测定速度包括：F100、F200、F500、F1000 和 F3000，这几组速度值供参考，实际选择的速度可进行调整，需涵盖低速、中速和高速三个区间。
- b) 在全闭环控制模式下，特别是低速情况下，速度波动很难调整到理想范围内，此时可放宽测定标准，最差情况下不能超过 100mm/min。



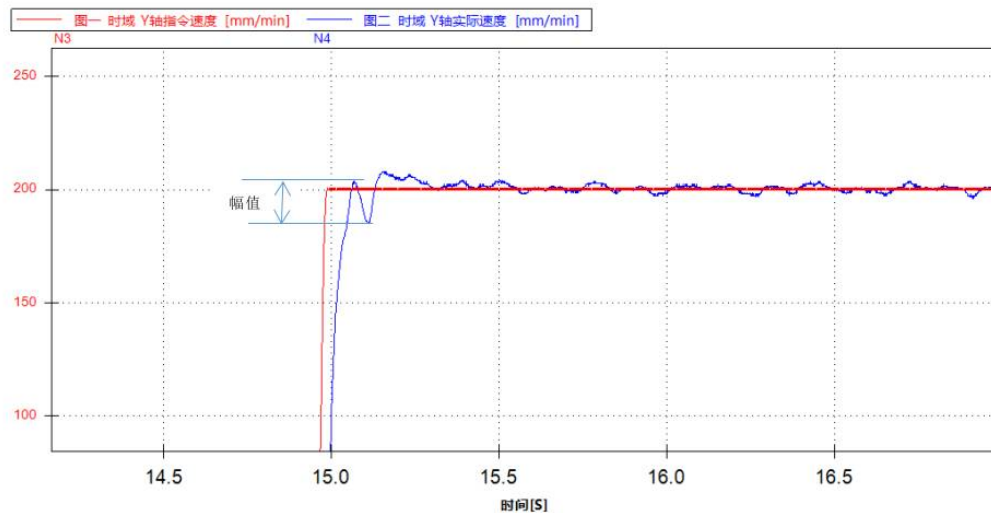


图 1-3 过冲测试

## 1.2 多轴联动调试

多轴联动控制情况下，各轴之间伺服匹配程度，决定了加工零件的轮廓精度和表面质量。该测定是通过系统的圆度测定功能和 RTCP 联动测定功能，进行各轴之间的伺服匹配。其中圆度测定功能进行 2 轴之间的伺服匹配，并可以测定过象限凸跳误差。RTCP 联动测定功能进行 RTCP 五轴之间的伺服匹配。

注：如果系统提供的伺服匹配测定功能无法满足多轴匹配，根据以往调试经验，只需保证多轴的位置环 PA0 参数保持一致。

### A. 圆度测定

系统具有圆度测定功能，可以测定 X、Y、Z 进给轴之间的伺服匹配，过象限凸跳误差。另外 SSTT 软件，具有直线轴和旋转轴的圆度测定功能。条件允许情况下尽量使用球杆仪进行圆度测定，可先用系统圆度测定功能先测定一遍，然后再使用球杆仪进行复测。

推荐测定参数：圆度半径为 100，F 速度为 1000mm/min。

- (1) 两轴之间的伺服不匹配度参考范围为【-1.0,1.0】，如果超出范围，需要调整 PA0 参数。
- (2) 使用百分表测定反向间隙，并将补偿值填入参数表中。已打双向螺补的情况下，可忽略此步骤。
- (3) 测定过象限凸跳误差。关闭反向间隙补偿，先使用 8 型系统自带的伺服调试工具测量出反向跃冲、延时时间、加减速时间，将数据填入补偿表中。再使用球杆仪进行复测，若不满足要求，对补偿数据进行修正。一般情况下，凸跳值 1 丝可以满足要求，小型机床（钻攻机、高光机）要求更严格，凸跳值需达到微米级别。

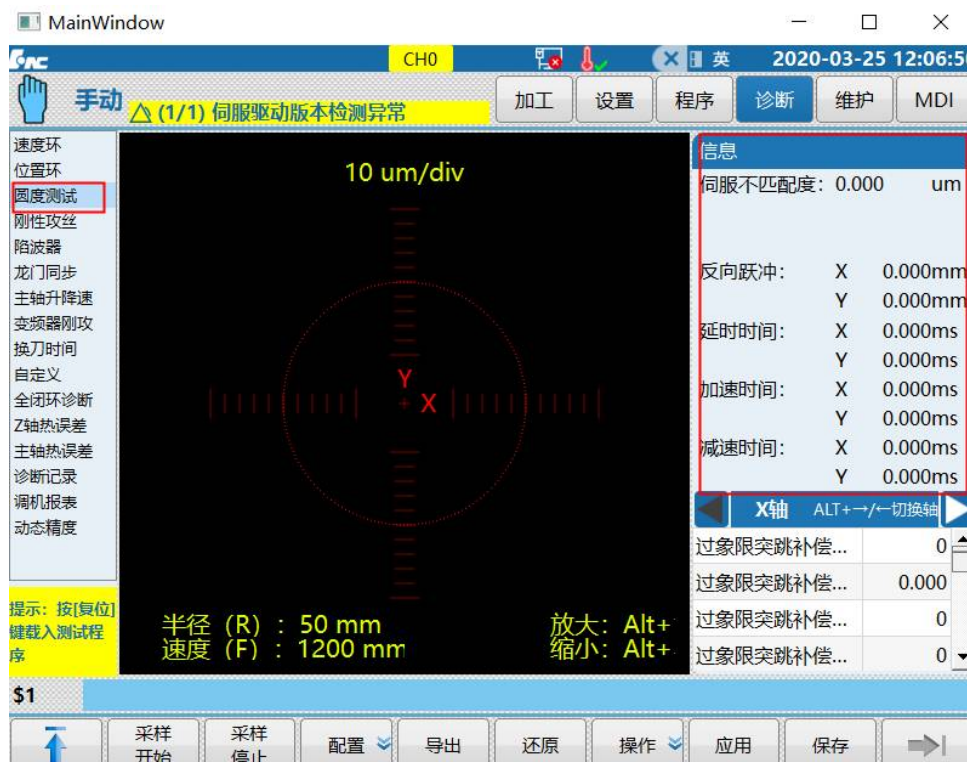


图 1-4 圆度测试

## B. RTCP 联动测定

在测定 RTCP 联动匹配之前，需对五轴机床进行结构参数标定，并简单测试 RTCP 动作。系统伺服调试工具和 SSTT 软件都有五轴动态性能测定功能，用于测定五个轴进行 RTCP 联动时伺服匹配程度，依此对伺服参数进行调整，主要调整

PA0 位置比例增益参数。

- (1) 配置参数项：包括旋转轴、进给速度、刀补号、旋转轴起始角度、旋转轴终止角度、参考点坐标。其中进给速度推荐为 1000mm/min，参考点坐标为 RTCP 联动之前机床初始点坐标，有两个选项：当前刀位点和自定义参考点。



图 1-5 动态精度测试

- (2) 参数设置完成后，按下【确定测试 G 代码按钮】，此时会自动生成测定 G 代码程序。

```
%12345;
G54 X30.71277 Y131.08677 Z195.01965 F3000
G01 C0
G43.4 H1
M00
G91 C360
M00
G90G01 C0
M30
```

- (3) 按下循环启动，执行到第一个 M00 时，开启采样功能，然后按下循环启动
- (4) 测定结束后，会得到直线度不匹配度和旋转轴不匹配度。不匹配度在 1um 范围之内，满足要求，否则根据伺服强弱表，以最弱的轴为基准，调整 PA0 参数。

## 2、空间误差补偿

### 2.1 概述

机床空间误差是指由制造、安装、运动控制不精确和刀具、床身以及热变形等其它因素综合引起的空间初始位置误差与运动误差。几何误差和热变形引起的误差占机床总误差的 53%左右，所以数控机床空间误差补偿对提高机床加工精度具有重大意义。

针对我国数控机床三维空间误差补偿领域的研究现状，采用理论研究、计算机仿真与实验研究结合的研究方法对数控机床的三维空间误差测量、建模以及补偿技术进行研究，为改善机床性能和提高加工精度提供方案。

数控机床的几何误差包括线性位移误差、直线度误差垂直度误差和角度误差等，这些误差决定了数控机床的精度性能。对于包含三个互相垂直的直线轴的数控机床，在假设误差是重复出现的并可以测量的情况下，通过软件补偿空间误差可以大大提高机床的整体加工精度。

机床轴的运动是几何运动，用 6 个自由度来描述该运动，则存在 6 个误差因素，分别为 1 个线性定位误差，2 个直线度误差，3 个角位移误差，因此对于 3 轴机床，加上 3 个垂直度误差，共存在 21 项几何误差，这些误差统称为机床的空间几何误差或体积误差。如果这三个直线进给轴分别用 X 轴、Y 轴、Z 轴表示，则这 21 项误差可以用如下方式表示：

- (1) 线性位移误差： $D_x(x)$ 、 $D_y(y)$ 和 $D_z(z)$
- (2) 垂直平面内直线度误差： $D_y(x)$ 、 $D_x(y)$ 和 $D_x(z)$
- (3) 水平平面内直线度误差： $D_z(x)$ 、 $D_z(y)$ 和 $D_y(z)$
- (4) 滚动角度误差： $A_x(x)$ 、 $A_y(y)$ 和 $A_z(z)$
- (5) 仰角度误差： $A_y(x)$ 、 $A_x(y)$ 和 $A_x(z)$
- (6) 摆偏角度误差： $A_z(x)$ 、 $A_z(y)$ 和 $A_y(z)$
- (7) 垂直度误差： $\Phi_{xy}$ 、 $\Phi_{yz}$ 和 $\Phi_{xz}$

这里 D 表示线性误差，A 表示角度误差， $\Phi$ 表示垂直度误差，下标表示误差产生的方向，括号内为产生误差的各运动轴。

为了提高数控机床加工精度，数控系统必须具有误差补偿功能，例如机床丝杆的制造公差将导致螺距误差，需要针对线性位移误差实施补偿；而对于大型龙门铣床来说，由于其横梁跨度较大，受重力影响容易弯曲变形，需要针对横梁的挠度（直线度误差）实施补偿。

目前使用较为简便快捷的机床空间几何误差测量方法为基于机床 21 项几何误差测量补偿方法，该方法通过 6D 激光干涉仪准确测量出机床的 21 项几何误差（三项线性位移误差、六项直线度误差、三项垂直度误差和 9 项角度误差），针对这 21 项误差实施补偿已经能够满足绝大部分数控机床的精度要求。

以 Y 轴运动为例，在实际移动过程中，Y 轴会在空间产生 6 个不同自由度上的误差。其中包括三个平动误差：Y 轴在 Y 方向上的线性度（定位）误差 $\delta_y(y)$ 、Y 轴在 X 方向上的直线度误差

$\delta_x(y)$ 和 Y 轴在 Z 方向上的直线度误差 $\delta_z(y)$ ；三个转角误差：绕 X 轴转动产生的俯仰角误差

$\varepsilon_x(y)$ 、绕 Y 轴转动产生的滚转角误差 $\varepsilon_y(y)$ 和绕 Z 轴转动产生的偏摆角误差 $\varepsilon_z(y)$ 。在上述误差元素符号表示中，括号内的字母 y 表示该项误差的产生是由 Y 轴运动引起的，误差值与 Y 轴位置有关，平动误差上标用  $\delta$  表示，下标表示误差产生的方向，转角误差上标用  $\varepsilon$  表示，下标表示转动中心轴。Y 轴误差元素如图 2-1 所示：

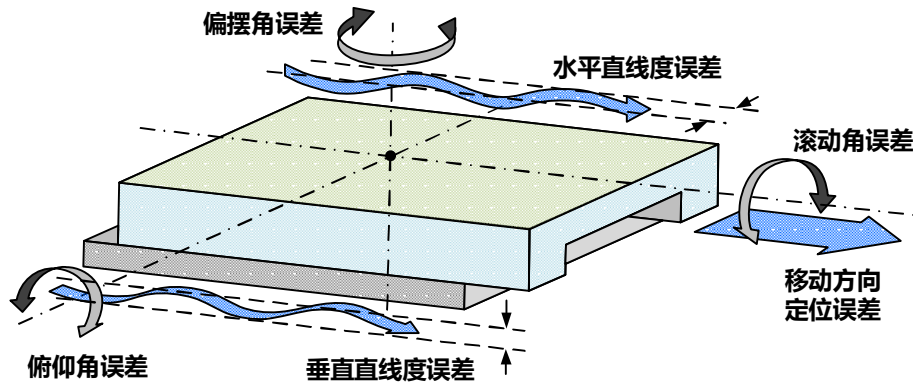


图 2-1 Y 轴误差元素

## 2.2 空间几何补偿原理

### A. 线性位移误差补偿

线性位移误差主要由机床丝杆的螺距误差产生，误差值与当前轴位置相关，且运动轴与补偿轴为同一轴。为实现线性位移误差补偿，必须首先根据误差曲线建立补偿值序列，补偿值序列根据误差曲线采样得到，是行程范围内等间距点处补偿值的集合。

在得到补偿值序列后，当前运动轴在各位置处的补偿值按线性插值法计算得到，其方法如图 2-2 所示。

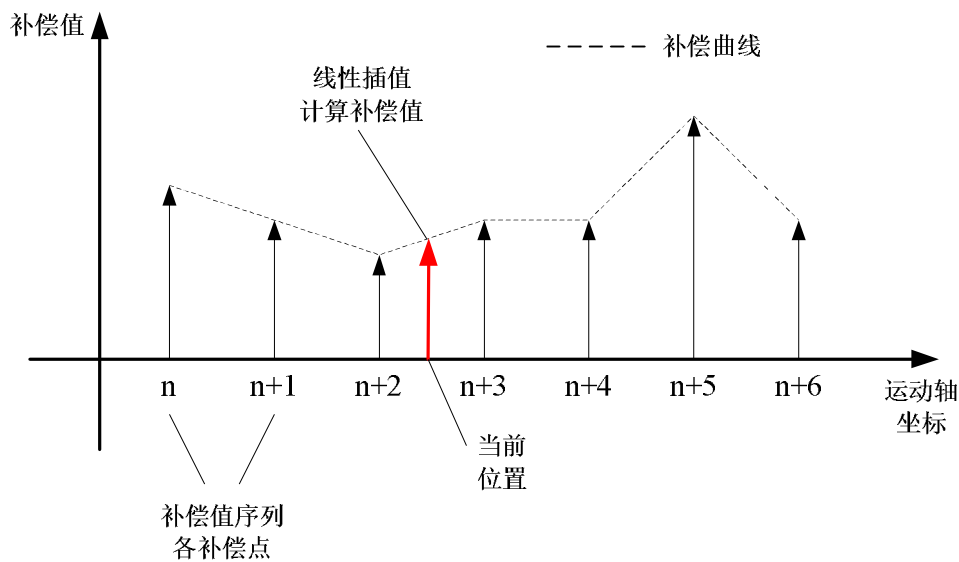


图 2-2 线性插值计算当前位置补偿值

在实施补偿时，补偿值将会与当前运动轴指令坐标叠加，因此当补偿值为正值时将会促使当前轴向正向移动。

### B. 直线度误差补偿

直线度误差补偿与线性位移误差补偿类似，不同之处在于直线度误差补偿的运动轴与补偿轴并非同一轴，根据当前运动轴位置计算得到的补偿值将会与指定的补偿轴指令坐标叠加。

### C. 垂直度误差补偿

垂直度误差如图 2-3 所示：

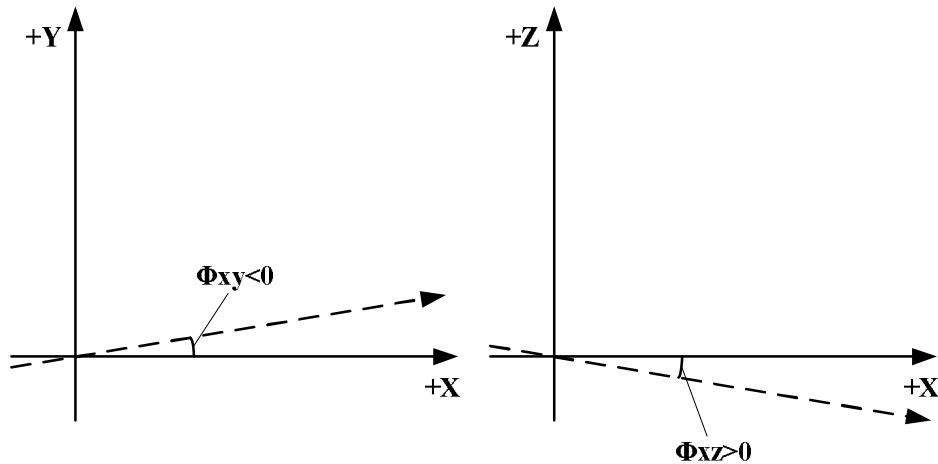


图 2-3 垂直度误差

从图中可以看出，当两轴正向夹角大于  $90^\circ$  时垂直度误差为正，小于  $90^\circ$  时为负。由于垂直度误差与机床运动轴位置无关，因此不需要建立补偿值序列，针对垂直度误差的机床位移补偿量计算公式如下：

$$\text{补偿值} = \text{运动轴坐标} \times \text{垂直度误差}$$

假设机床 X 轴与 Y 轴的垂直度误差为  $\Phi_{xy}$ ，当以 Y 轴作为补偿轴时，补偿值  $\text{Comp}_y = x \times \Phi_{xy}$ ，其中 x 为运动轴 X 当前位置坐标。

## 2.3 基于华中 8 型空间误差补偿模块介绍

### A. 空间几何误差补偿参数解释

误差补偿表是用来描述机床几何误差的参数集合，它存储于数控系统用户内存区域中（数控系统预先分配误差补偿表存储区域大小），为用户输入补偿数据提供必要接口，另一方面，补偿算法通过查询误差补偿表计算机床各轴位移补偿量。

#### （1）线性位移误差与直线度误差补偿表

机床几何误差中，线性位移误差与直线度误差均需要建立补偿值序列才能准确描述，因此这两类误差的补偿表结构如图 2-4 所示，均是包含补偿值序列的误差补偿表。

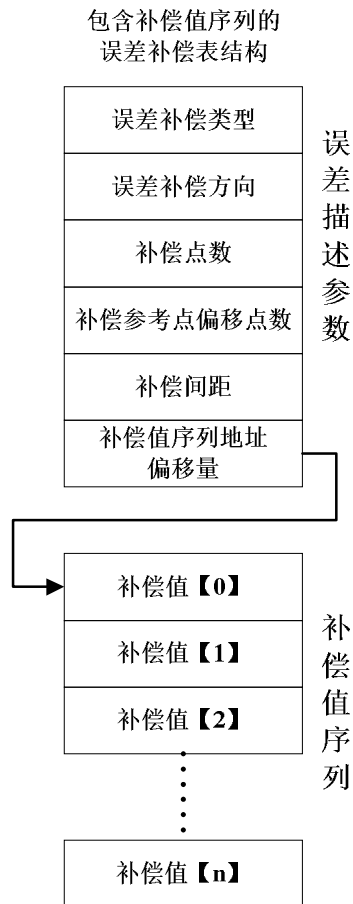


图 2-4 包含补偿值序列的误差补偿表

从图 2.3 可以看出，线性位移误差与直线度误差补偿参数分为两部分，即误差描述参数与补偿值序列，这两部分参数在内存中的存储地址并不连续，需要通过设置补偿值序列地址偏移量才能将当前误差补偿表与补偿值序列进行关联。表中各参数含义如下表 2.1 所示：

表 2.1 误差补偿表各参数含义

参数名	含义
误差补偿类型	0: 无补偿; 1: X_Y; 2: X_Z; 3: Y_X;; 4: Y_Z; 5: Z_X; 6: Z_Y; 7: X_X; 8: Y_Y ; 9: Z_Z;
补偿方向	1: 单向补偿; 2: 双向补偿; 3: 单向取模补偿（用于旋转轴的补偿，可扩展）; 4: 双向取模补偿（用于旋转轴的补偿，可扩展）。
补偿点数	取值范围：0~2147483647 描述：补偿点数将决定补偿值序列的大小(当为双向补偿时，补偿值序列中存储的补偿值个数将为补偿点数的两倍)。 注意：由于数控系统为误差补偿表分配的内存空间有限(由系统参数“空间误差补偿值最大个数 VOL_COMP_VALUE_MAX_NUM”确定)，因此在选取补偿点数时必须考虑内存容量限制，当补偿值个数超出限制

	时将报错。
补偿参考点位置 偏移点数	单位：偏移点的个数。 取值范围：-2147483648~2147483647 描述：该参数用于确定当前运动轴补偿行程。 负向补偿行程= -（偏移点数*补偿点间距） 正向补偿行程=（补偿点数-偏移点数-1）*补偿点间距 例如，当补偿点间距为 60mm，补偿点数为 20，参考点位置偏移点数为 3 时，负向补偿行程为-180mm，正向补偿行程为 960mm。因此各补偿点依次为：-180、-120、-60、0、60、120、.....、900、960。
补偿点间距	单位：对于移动轴，单位为微米μm。 取值范围：0~2147483647
补偿值序列	单位：对于移动轴，单位为微米μm。 取值范围：-2147483648~2147483647 描述：补偿值序列依照对应补偿点坐标顺序（从小到大）依次排列，若为双向补偿，应先输入正向补偿数据，再紧随其后输入负向补偿数据。 例如，当补偿点数设为 10 并采用双向补偿时，则在补偿值序列中，前 10 个为正向补偿值，后 10 个为负向补偿值。 在未开启取模补偿功能的情况下，当机床轴位置超出补偿行程范围时，取边界点处的补偿值作为当前位置的补偿值。

## （2）垂直度误差补偿表

由于垂直度误差补偿表不需要建立补偿值序列，其结构如表 2.2 所示

表 2.2 垂直度误差补偿表

参数名	参数值范围
误差补偿类型	0~6
垂直度误差	-2147483648~2147483647（0.001°）

垂直度误差补偿表描述了机床各轴之间垂直度关系。表中各参数含义如下表 2.3 所示：

表 2.3 垂直度误差补偿表各参数含义

参数名	含义
误差补偿类型	补偿类型由运动轴（误差产生轴）、补偿轴共同决定，取值含义如下： 0：无垂直度误差补偿；1：X-Y；2：X-Z；3：Y-X；4：Y-Z；5：Z-X；6：Z-Y。（以上第一项表示运动轴，第二项表示补偿轴）
垂直度误差	用于计算垂直度误差补偿值

## B. 空间几何误差补偿模块处理流程

数控系统针对机床几何误差实施补偿的处理流程如图 2-5 所示：



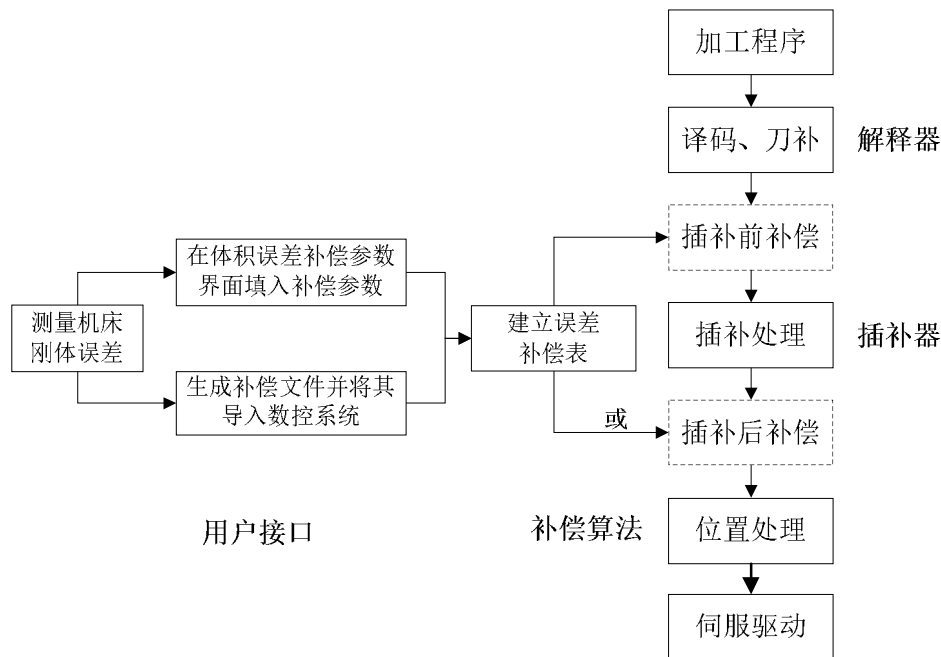


图 2-5 空间误差补偿模块处理流程

从图 2-5 中可以看出，误差补偿模块由以下三部分组成：

（1）数控系统补偿参数的输入。作为误差补偿模块的用户接口，数控系统补偿参数的输入存在两种方式，第一种直接将误差补偿参数值填入空间误差补偿参数界面的对应参数项中；第二种按照数控系统规定的格式生成补偿文件，再将其导入数控系统。

（2）误差补偿表的建立。误差补偿表补偿详细描述了各项误差的补偿类型、补偿值序列等信息，补偿算法通过查询误差补偿表获取机床相应位置的补偿值。

（3）补偿算法。补偿算法通过查询误差补偿表，确定补偿值，实施插补前补偿（或插补后补偿）。

在误差补偿模块的工作过程中必须包含的人工处理过程包括：（1）数控系统空间误差补偿参数的输入；（2）正确配置实施空间误差补偿的空间三轴（相互垂直的 X、Y、Z 轴）。

数控系统 HNC8 系列完成了机床 21 项几何误差补偿界面，通过该界面可以简洁快速的补偿机床的 21 项几何误差（三项线性位移误差、六项直线度误差、三项垂直度误差和 9 项角度误差），针对这 21 项误差实施补偿已经能够满足绝大部分数控机床的精度要求。

软件的操作界面是用户与机床软件进行交互的平台，在对软件的模块和功能分析后，设计合理的操作界面，软件界面设计遵循规范性、合理性、美观性和易用性等原则，根据软件补偿功能，设计的人机交互界面如下所示：



图 2-6 数控系统 21 项空间误差反向间隙补偿功能界面



图 2-7 数控系统 21 项空间误差螺距误差补偿功能界面



图 2-8 数控系统 21 项空间误差直线度误差补偿功能界面



图 2-9 数控系统 21 项空间误差角度误差补偿功能界面

华中 8 型数控系统已经具备机床 21 项空间误差补偿功能，根据仪器测量辨识得到的单项误差元素和相应的机床结构类型以及相关参数，得出机床综合补偿方法。此误差补偿功能的实现了机床误差补偿技术与国产高档数控系统的深度集成和融合，利用国产数控系统的二次开发优势，方便机床用户将机床误差补偿技术在国产数控系统上应用到生产实际中，充分发挥机床误差补偿技术成果提高国产数控机床的精度。

## 2、全闭环优化

### 3.1 全闭环介绍

机床的直线轴或者旋转轴通常包含有多级机械传动部分，而机械传动部分的装配质量、使用带来的磨损和热变形等因素直径影响工件加工的质量和精度。所以有些机床会在最终的负载侧安装光栅尺或圆光栅等反馈部件，进行全闭环控制，以保证加工的精度。

图 3-1 和图 3-2 分别是驱动器半闭环和全闭环的控制框图。半闭环控制时，电机的位置和速度反馈都来自于电机编码器；

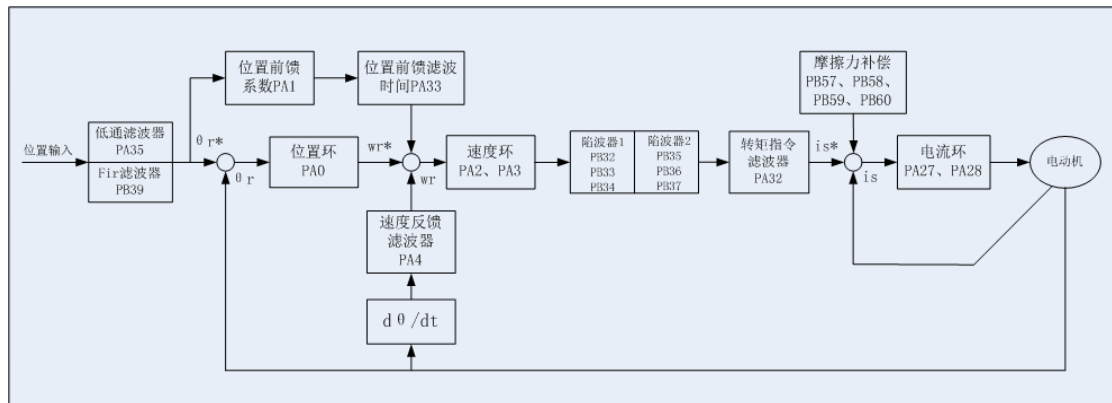


图 3-1 半闭环控制框图

全闭环控制时，速度反馈还是来自于电机编码器，而位置反馈来自于负载侧的反馈部件。

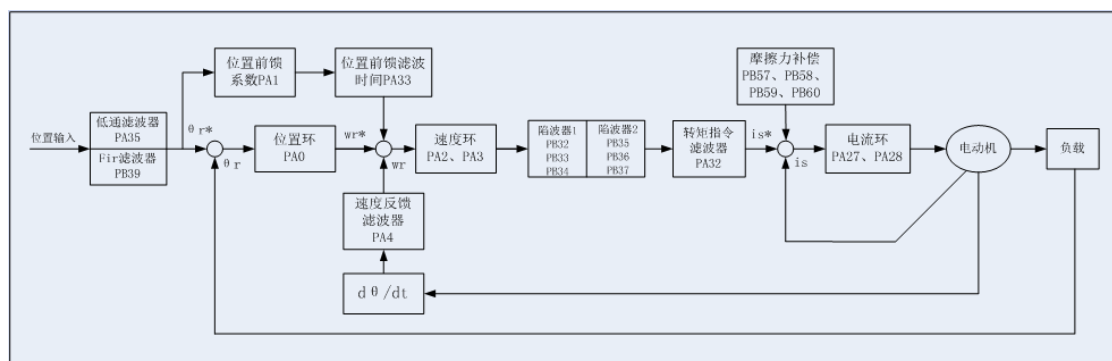


图 3-2 全闭环控制框图

### 3.2 相关参数

#### A. 全闭环反馈类型

驱动器的全闭环反馈支持多种信号类型，通过控制参数 STB13、STB12、STB11 来设置反馈类型，见表 3-1 所示：

表 3-1 全闭环反馈类型



STB13	STB12	STB11	类型	备注
0	0	0	TTL方波	
1	1	0	1V <sub>pp</sub> 正余弦	如：ERA4000系列 等
0	1	0	禹衡绝对值直线光栅尺	JC09/JC12绝对式光栅尺
1	0	1	Endat2.2 绝对式圆光栅	RCN2380/5380/8380 等
1	0	0	Endat2.2 绝对式直线光栅	LC183/483/483/485 等
0	0	1	Fagor SSI 角度编码器 27bit	HA/DA 27bit/32768
0	1	1	Fagor SSI 角度编码器 23bit	HA/DA 23bit/32768
1	1	1	Fagor SSI 线性光栅尺	LA /SA/GA/L2A/S2A/G2A

### 3.3 全闭环相关控制参数

全闭环相关的控制参数主要如表 3-2 所示：

表 3-2 全闭环控制参数

参数	含义
STB13, STB12, STB11	全闭环类型设置
STB14	全闭环使能
PA10	全闭环反馈取反设置（PA10设置为512将全闭环反馈取反）
PB46 （万位以上）	电机旋转一圈对应的全闭环反馈脉冲数 =PB46*10000+PB47
PB47 （万位以下）	
PB54	同步误差检测范围
PB55	第二码盘右移位数
PA30	双环反馈补偿系数
PA39	全闭环减振控制增益

### 3.4 调试步骤

（1）首先正确设置全闭环反馈类型 STB11~STB13，并且根据电机编码器线数、全闭环反馈分辨率、机械传动比等设置 PB46~PB47（电机旋转一圈对应的全闭环反馈脉冲数）。STB14 先设置为 0，半闭环运行电机，设置完成后断电保存。

（2）再次上电后，控制电机增量运行一圈，并观察驱动器侧相关显示项：

- 电机编码器反馈脉冲数（总脉冲数=DP-PFH\*10000+DP-PFL）：  
DP-PFL（电机编码器反馈脉冲数，万位以下）  
DP-PFH（电机编码器反馈脉冲数，万位以上）
- 全闭环反馈脉冲数（总脉冲数=DP-FPH\*10000+DP-FPL）：  
DP-FPL（全闭环反馈脉冲数，万位以下）

DP-FPH（全闭环反馈脉冲数，万位以上）

若电机编码器反馈脉冲数和全闭环反馈脉冲数变化的方向相反，则将 PA10 设置为 512，将编码器反馈取反。然后将 STB14 设置为 1，使能全闭环运行。根据一个螺距对应全闭环反馈脉冲数，重新设置数控系统“坐标轴参数”中的<电子齿轮比分子>和<电子齿轮比分母>；如果驱动器 PA10 设置为 512，还需要相应设置“设备接口参数”中的<编码器反馈取反标志>，设置完成后断电保存。

（3）再次上电后，全闭环运行电机。根据运行情况，可以按照下述方式逐步调整速度和位置增益参数。

先将位置环比比例增益（参数 PA0）和速度环比比例增益（参数 PA2）都设置为 200。控制工作台以 F1000mm/min 的速度来回运行，运行过程中逐步提高速度环比比例增益值，直到出现振动为止，则当前的值为临界速度环增益，然后设置速度环增益值为临界速度环增益的 80%。随后再逐渐增加位置环增益值，直到出现振动为止，则当前值为临界位置环增益，一般设置位置环增益值也设为临界位置环增益的 80%。

### 3.5 全闭环振动抑制措施

由于传动轴的弹性，以及间隙和摩擦等非线性因素的影响，使用全闭环控制时，容易出现机械振动的现象，可以尝试采用如下几种方式来消除振动。

#### A. 调整增益

最直接的方式是降低位置环比比例增益（参数 PA0）和适当增大系统轴参数中的加减速时间常数。但是过度降低位置环增益值或者提高加减速时间常数，会使系统的动态响应性能变差，并产生较大的位置跟随误差，难以满足加工的动态要求，在调整增益的方式无法满足要求时可以考虑下面几种抑振措施。

#### B. 使用陷波器

使用陷波器可以抑制机械部分的谐振。如果使用 SSTT 或者系统的诊断工具测试出的机械谐振是固定频率（振动频率不随进给速度发生变化）的持续振动，并且振动频率大于 400Hz，可以考虑开启陷波器来抑制机械谐振。如果振动频率小于 400Hz，或者是间歇性振荡，则不建议开启陷波器。关于陷波器的调试和振动频率的测试方法可以参考 SSTT 陷波器的调试说明。

#### C. 双环反馈控制功能

双环反馈功能机理就是使轴在运行过程中位置偏差按半闭环控制，停止时按全闭环控制，用于提升全闭环运行的动态特性，同时避免出现振动现象。该功能适用于机械传动间隙较大，半闭环能稳定地运行，但是全闭环特性较差，位置和速度增益加大后容易出现振动的情况。

参数 PA30 是双环反馈补偿系数，单位：0.1ms，在线生效。PA30 默认值是 0，调试的时候，把 PA30 每次增加 30，随后同步增大 PA2 速度比例增益和 PA0 位置比例增益，PA0 和 PA2 可以按照 50 的步距来增加。可以把上述步骤重复进行，PA30 最大设置值一般不超过 300。

#### D. 阻尼减振控制功能

阻尼减振控制功能是一种通过将电机端与机床负载端的速度差反馈给扭矩指令以减少负载端振动的功能，这种方式等同于增大系统的阻尼系数。如果电机和机械负载的之间的刚性较差或者存在弹性变形，运行中电机端和负载端容易产生较大的速度差，造成负载端的速度难以稳定的控制，这时可以考虑使用阻尼减振控制。

将 PB72 设置为 1，打开阻尼减振控制功能。PA39 是阻尼减振控制增益，默认值是 0，调试的时候，可以按照步距为 100 来逐步增大 PA39 的值，同时观察运行中负载端的振动能否抑制。

### 3、同步控制匹配优化

#### 4.1 系统参数设置

同步轴基本设置包括：系统参数、PLC 设置等，在后面章节“龙门同步轴功能”进行了详细说明，在此仅着重强调同步轴阈值设置。

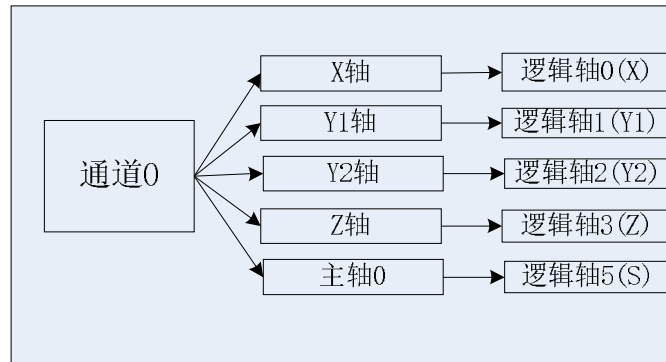


图 4-1 轴配置

Y1 为主动轴，Y2 为从动轴，从动轴阈值参数如下

表 4-1 同步轴阈值参数表

参数号	参数名称	参数解释	推荐值
102106	同步位置误差补偿阈值	允许最大同步误差补偿值	备用参数暂不设置
102107	同步位置误差报警阈值	同步位置误差超过此值报警	
102108	同步速度误差报警阈值	同步速度误差超过此值报警	备用参数暂不设置
102109	同步电流误差报警阈值	同步电流误差超过此值报警	

由上图中可知，逻辑轴 2 为从动轴，同步相关阈值的设定如下

#### 4.2 初始阈值设置

初始时，以下同步的阈值设置为 0，不开启检测。



	参数号	参数名	参数值	生效方式
NC参数 机床用户参数 + 通道参数 - 坐标轴参数 逻辑轴0 逻辑轴1 逻辑轴2 逻辑轴3 逻辑轴4 逻辑轴5 逻辑轴6 逻辑轴7	102106	同步位置误差补偿阈值(mm)	0.000	复位
	102107	同步位置误差报警阈值(mm)	0.000	复位
	102108	同步速度误差报警阈值(mm/min)	0.000	复位
	102109	同步电流误差报警阈值(A)	0.000	复位
	102126	同步时从轴显示方式	0	复位
	102127	同步轴是否镜像	0	复位
	102128	同步轴正方向反向	0	复位
	102129	同步轴机床零点偏差值	0.000	重启
	102130	最大误差补偿率(mm或度)	0.010	复位
	102131	最大误差补偿值(mm或度)	1.000	复位
	102132	进给轴反馈偏差(mm)	0.000	立即

图 4-2 系统阈值表设置

参数保存，断电重启系统。

4.3 同步轴位置校准

某些情况下，同步轴的位置需要进行校准。我们可以将同步轴的同步解除后，使用手摇进行微调。

系统解除急停，切换到手摇模式，同时 PLC 中将同步轴同步功能解除。对同步轴位置进行微调，微调完成后，设置坐标零点。

PLC 设置如下

- (1) 添加从轴使能信号

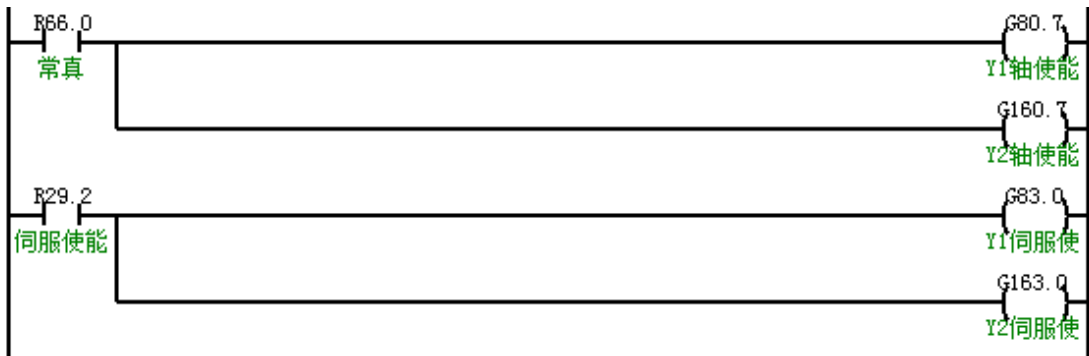


图 4-3 轴使能 PLC 设置

- (2) 复位时，添加外部复位标志 G2960.3。

**注：**不添加外部复位标志 G2960.3 时，当系统界面出现“从动轴跟踪误差过大报警提示”，复位清除不了该提示信息，只有 PLC 中添加该标志后，才能清除该提示信息。



图 4-4 外部复位信号

- (3) PLC 中添加同步轴从轴同步解除。

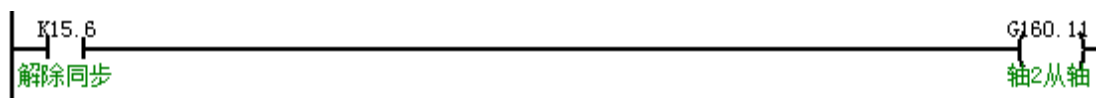


图 4-5 从动轴接触同步

#### 4.4 同步轴阈值设置

- (1) 开启同步轴的自动调整功能

102062	柔性同步自动调整使能	1	复位
--------	------------	---	----

图 4-6 开启柔性同步

- (2) 设置同步轴的补偿阈值和报警阈值，就完成了同步轴的配置。

102106	同步位置误差补偿阈值(mm)	0.0000	复位
102107	同步位置误差报警阈值(mm)	0.0000	复位
102108	同步速度误差报警阈值(mm/min)	0.0000	复位
102109	同步电流误差报警阈值(A)	0.0000	复位

图 4-7 阈值设置

#### 需要注意以下几点：

- ①. 目前同步位置误差补偿阈值与同步速度误差报警阈值为系统备用参数，暂不用设置。
- ②. 同步位置误差报警阈值与同步电流误差报警阈值需要根据实际情况进行设置。
- ③. 可用 SSTT 采样 Y 和 Y1 的位置和电流

通过 SSTT 的同步误差功能，计算出 Y 和 Y1 位置和误差电流的最大值，然后取其 1.2~1.5 倍填入系统中

同步误差	2	将输入的两个通道数据相减后输出（输出=通道1-通道2）
------	---	-----------------------------

图 4-8 SSTT 同步误差设置

#### 注意：

- ①. 当开启柔性同步自动调整使能后，如果同步位置误差值小于同步位置误差报警阈值时，当进行解急停操作时，从动轴电机位置会进行自动调整，保证主动轴与从动轴机床实际坐标一致；如果同步位置误差值大于同步位置误差报警阈值时，系统会报警，“同步超差”，从动轴电机位置也不会自动调整。
- ②. 当柔性同步自动调整使能未打开，则当出现同步位置误差时，系统解急停时，同步轴位置不会进行自动调整。

## 5、五轴 RTCP 标定

### 5.1 AC 双转台标定方法

#### 1. 机床标定前检测

- 1) 保证机床 X、Y、Z 轴的几何精度已经测量过。
- 2) 测定 A 轴的轴线，C 轴的轴线，A 轴零位。

##### ◆ A 轴的轴线

A 轴的轴线必须保证与 X 轴平行，将百分表安装在主轴头上。在工作台上找一个 YZ 平面，表压在平面上，此时转动 A 轴，观察表的数值是否有变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

##### ◆ C 轴的轴线及 A 轴零位

将百分表安装在主轴可转动部分，表针打在工作台面上，用手转动主轴，观察表读数变化，调整转台安装使 X 方向误差在允许范围内，调整 A 轴角度，使 Y 方向误差在允许范围内，并将此时的 A 轴位置定为其零位。（此种测量方法假设已保证工作台面与 C 轴轴线垂直）

C 轴的轴线必须保证与 Z 轴平行，将百分表安装在主轴头上。A 轴零位时，在工作台上找一个 XY 平面，表压在平面上，此时转动 C 轴，观察表的数值是否有变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

#### 3) 检查 A 轴及 C 轴的定位精度

##### ◆ A 轴位置

步骤 1:

- a) A 轴、C 轴回零。
- b) 安装百分表在主轴头上，将百分表打在工作台上表面。
- c) 沿 Y 方向来回移动工作台。
- d) 观察表数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

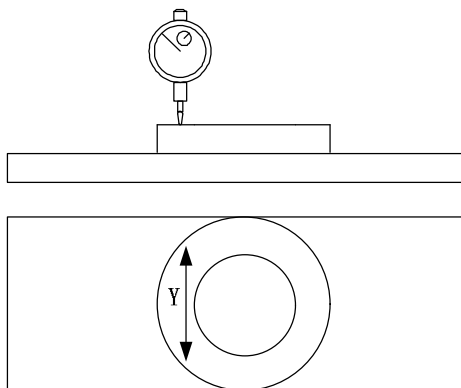


图 5-1 A 轴精度检测

步骤 2:

- a) A 轴 90 度、C0 度。

- b) 安装百分表在主轴头上，将百分表打在工作台上表面。
- c) 沿 Z 方向来回移动主轴头。
- d) 观察表数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

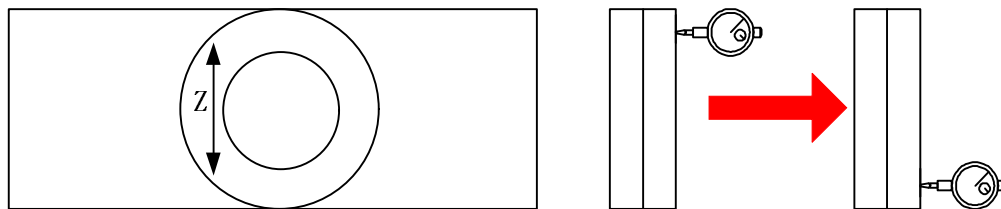


图 5-2 A 轴精度检测

### ◆ C 轴位置

- a) 在转台上安装方规，C 轴 0 度时，使方规的一个平面与 YZ 平面平行；
- b) 将 C 轴分别旋转 0 度、90 度、180 度、270 度；
- c) 百分表安装在主轴上，表针打在竖直平面上，上下移动主轴，观察读数变化。

A、C 轴定位精度合格的前提下，才能进行后面的 RTCP 参数标定，否则，需要对旋转轴做相应的调整或补偿。

## 2. 机床 RTCP 参数标定

RTCP 需要标定的参数包括：C 转台中心矢量，AC 轴线偏移矢量。

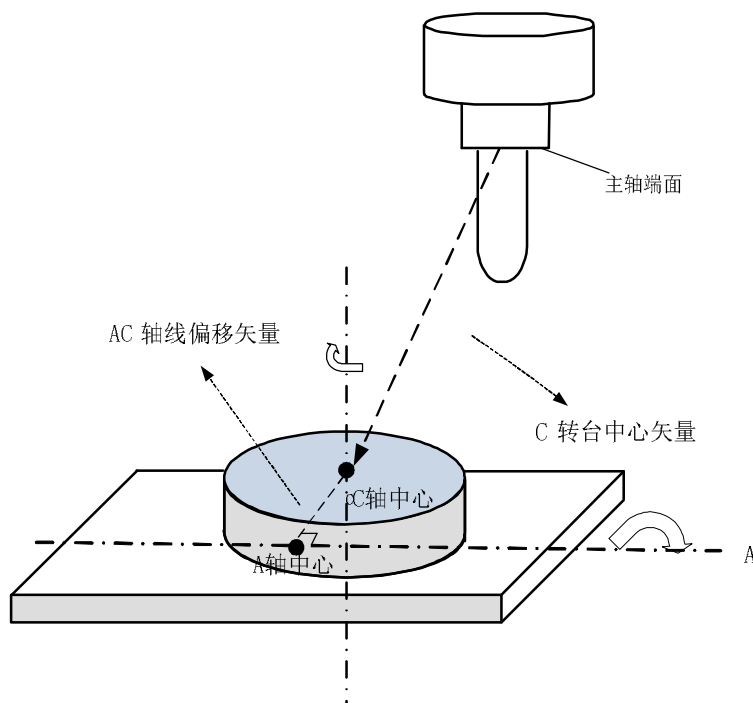


图 5-3 RTCP 参数示意图

### (1) C 转台中心 X、Y 偏移矢量

步骤 1:

- a) A 轴 0 度，C 轴 0 度。
- b) 安装寻边器在主轴头上，将下检测头打到 C 轴边缘高度。
- c) 将下测头打至 C 轴内径左右边缘，记录 X 轴坐标为 X1、X2。
- d) 计算 C 轴的 X 坐标： $X_c = (X1 + X2) / 2$ 。

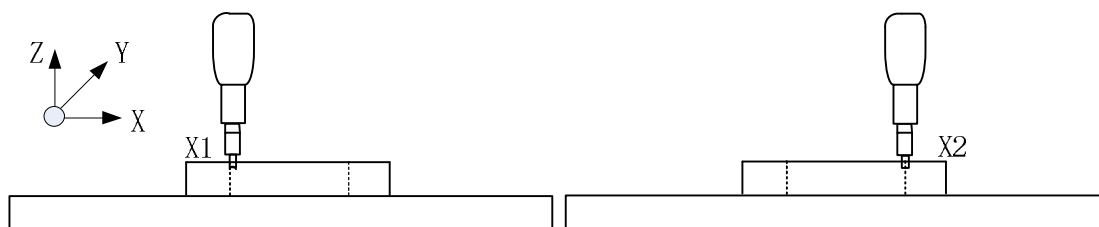


图 5-4 C 轴 X 方向回转中心

- e) 将下测头打至 C 轴内径前后边缘，记录 Y 轴坐标为 Y1、Y2。
- f) 计算 C 轴的 Y 坐标： $Y_c = (Y1 + Y2) / 2$ 。

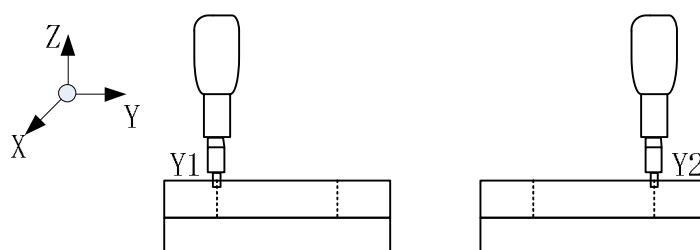


图 5-5 C 轴 Y 方向回转中心

步骤 2:

- a) 安装百分表在主轴头上。
- b) 调整工作台 X、Y 坐标为 Step1 中计算出的位置。
- c) 主轴头安装检棒。
- d) C 轴旋转，微调 X、Y 坐标，使 C 轴转一圈百分表读数在 2 丝以内。
- e) 记录当前坐标  $X_c$ 、 $Y_c$  为 C 轴 X、Y 坐标。

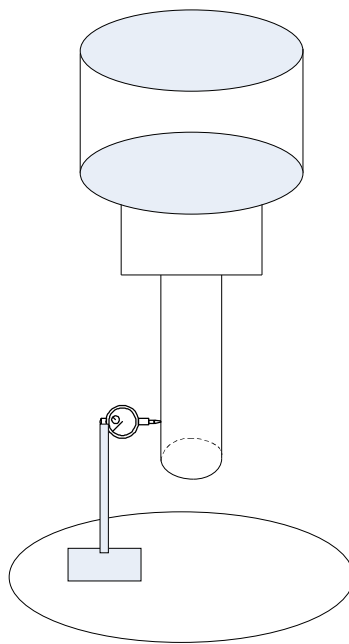


图 5-6 C 轴回转中心检测

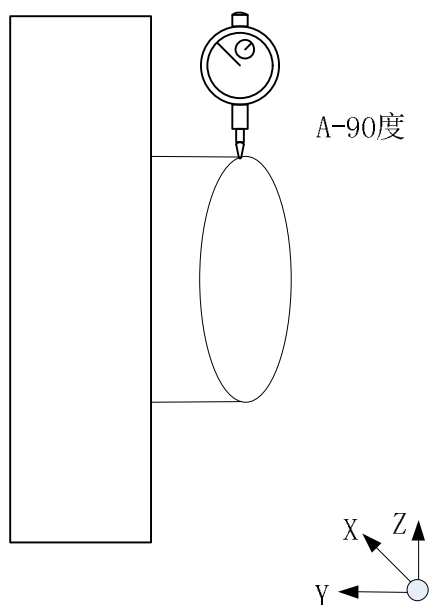
## (2) AC 轴线的偏移矢量

这里只需要标定 AC 轴线 Y 方向偏移矢量。根据 A 轴的行程范围，采用不同的标定方法。

### ➤ A 轴能转 90 度和-90 度

步骤 1:

- a) A 轴转-90 度。
- b) 安装百分表在主轴上。
- c) 将百分表打到 C 轴转台外径最高点。

图 5-7 A 轴可 $\pm 90^\circ$  旋转时 AC 轴线偏移矢量

d) Z 轴相对清零。

步骤 2:

a) A 轴转 90 度。

b) 将百分表打到 C 轴转台外径最高点，保持与 Step1 的读数相同。

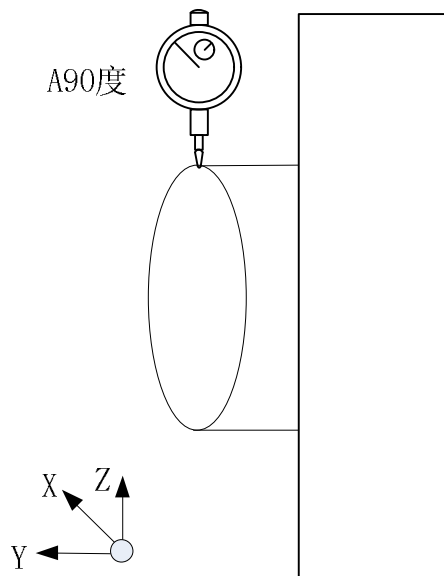


图 5-8 A 轴可 $\pm 90^\circ$  旋转时 AC 轴线偏移矢量

c) 读取 Z 轴的相对坐标值，记录为 Z1。

d) 则  $OFFY = Z1/2$ 。

#### ➤ A 轴不能转 90 度，或者-90 度

选取靠近 A 轴正负行程最大位置，本例子为  $A \pm 40$  度。

步骤 1:

a) 将百分表安装在主轴头上。

b) A 轴 0 度位置，找到工作台 X 轴方向最高点，X 轴相对清零。

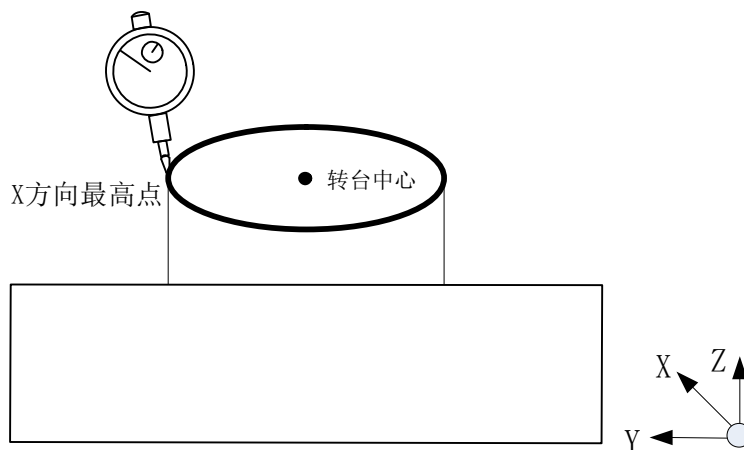


图 5-9 A 轴不可 $\pm 90^\circ$  旋转时 AC 轴线偏移矢量

步骤 2:

- a) A 轴-40 度，C 轴 0 度。
- b) 保证 X 轴相对零位，移动 Y 和 Z 轴，将百分表打到下图所示工 作台面边缘点。 Z 轴相对清零。

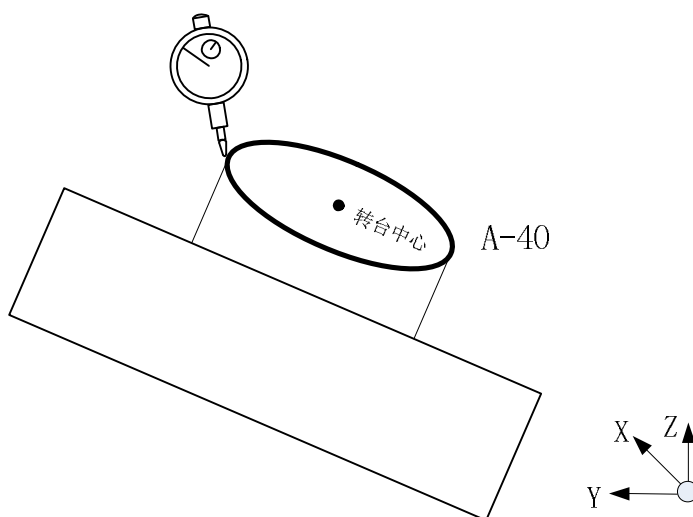


图 5-10 A 轴不可±90° 旋转时 AC 轴线偏移矢量

步骤 3:

- a) A 轴 40 度，C 轴 0 度。
- b) 保证 X 轴相对零位，移动 Y 和 Z 轴，将百分表打到下图所示工作台面边缘点。保证与 Step2 读数相同。

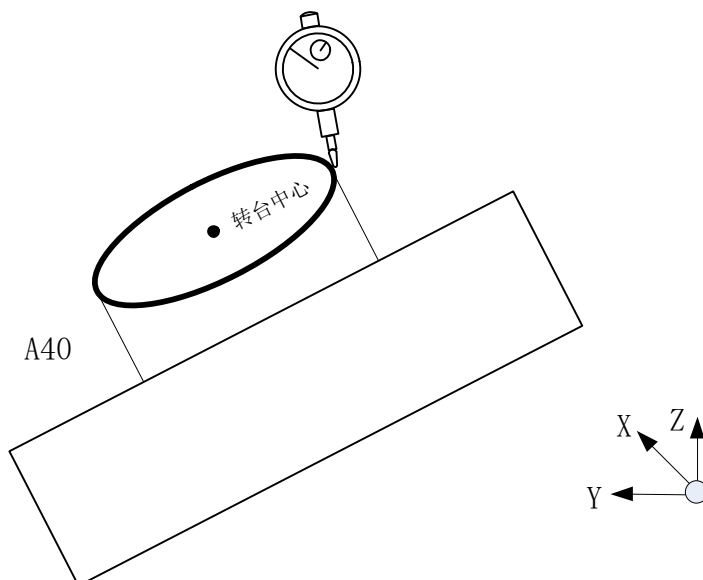


图 5-11 A 轴不可±90° 旋转时 AC 轴线偏移矢量

- c) 读取当前 Z 的相对坐标，记录为 Z1。
- d) 则  $AC\_OFFY = Z1/2$ 。



注意：AC 轴线 Y 方向偏移矢量通过手动标定不太方便，由于其值一般情况下比较小，可以暂时设定 AC\_OFFY 为 0，最后通过标准球来进行修正。

### (3) C 轴中心 Z 偏移矢量

步骤 1:

- a) A 轴 0 度，C 轴 0 度。
- b) 装夹工件毛坯在工作台上，安装刀具。
- c) 将工作台打到 C 轴中心 X、Y 偏移矢量位置处，Y 轴坐标相对清零。
- d) 将刀尖打到工件上表面，记录当前 Z 坐标为 Z1。

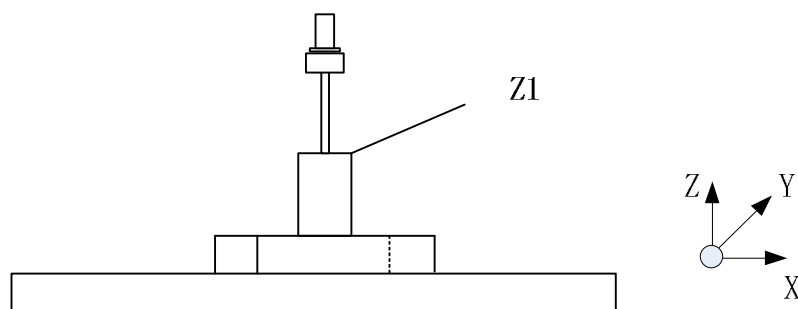


图 5-12 C 轴中心 Z 向偏移矢量

步骤 2:

- a) A 轴-90 度，C 轴 0 度
- b) 对刀使刀具边缘打在工件表面。

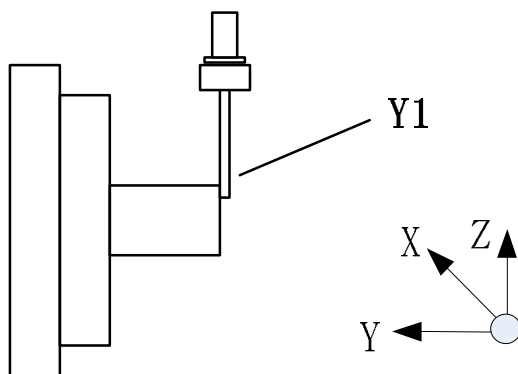


图 5-13 C 轴中心 Z 向偏移矢量

- c) 记录当前 Y 坐标为 Y1。
- d) 工件上表面距 A 轴的高度  $H = Y1 - AC\_OFFY + R$ （其中 AC\_OFFY 为 AC 轴线 Y 方向偏置距离，R 为刀具半径）。

步骤 3:

- a) 安装刀具在主轴上。
- b) 安装百分表在工作台上。
- c) 将百分表表头打在刀尖位置，Z 轴坐标相对清零。

d) 将百分表表头打在主轴端面，当前 Z 坐标为 Z2。

e) 刀具长度  $L = -Z2$ 。

f) C 轴 Z 方向偏移矢量  $Z_c = Z1 + H - L$ 。

完成上述标定过程后，将各标定数据填入下表的通道参数中。

040400	刀具初始方向(X)	0.0
040401	刀具初始方向(Y)	0.0
040402	刀具初始方向(Z)	1.0
040425	转台结构类型	AC
040426	转台第一旋转轴方向矢量 X	-1.0
040427	转台第一旋转轴方向矢量 Y	0.0
040428	转台第一旋转轴方向矢量 Z	0.0
040429	转台第二旋转轴方向矢量 X	0.0
040430	转台第二旋转轴方向矢量 Y	0.0
040431	转台第二旋转轴方向矢量 Z	-1.0
040432	转台第一旋转轴偏移矢量 X	0.0
040433	转台第一旋转轴偏移矢量 Y	AC_OFFY
040434	转台第一旋转轴偏移矢量 Z	0
040435	转台第二旋转轴偏移矢量 X	Xc
040436	转台第二旋转轴偏移矢量 Y	Yc
040437	转台第二旋转轴偏移矢量 Z	Zc

注意：进行参数设置时，一定要根据当前的旋转轴的旋转方向来设置方向矢量，具体观察旋转方向请查看五轴参数说明书部分。

### 3. 机床 RTCP 功能有效性检测

#### (1) C 轴 RTCP 功能检测

a) C 轴 0 度

b) 安装标准球，测量标准球的长度为 L，球半径为 R，此时填入刀补表的数据为 L-R。

c) 按照下图在 X 负方向安装百分表。

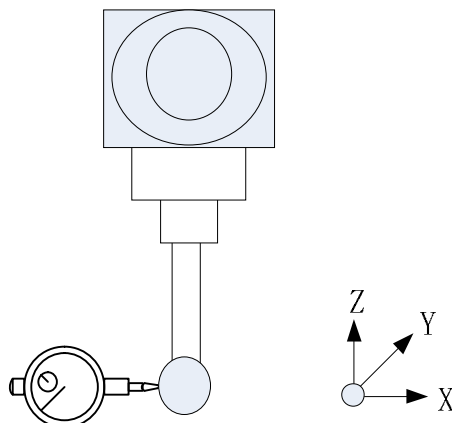


图 5-13 C 轴 RTCP 精度检测

d) 编写 G 代码测试程序，如下：

```
G54
F500
G43.4H1（打开 RTCP 功能）
G90C0
C90
C180
C270
G49
M30
```

e) 观察表的数值变化，正常情况下，C 轴旋转一圈，表数值变化在 2 个丝范围之内。如果表数值读数大于 2 丝，可以通过表针的读数来对标定参数进行修正。

➤ 观察 X 方向数据，以 C0 度为基准，C0 度和 C180 度之间的表的误差值为  $dx$ ，则转台第二旋转轴偏移矢量 X 的调整后的值为：

$$X_c = X_c + dx/2$$

➤ 观察 Y 方向数据，以 C90 度为基准，C90 度和 C270 度之间的表的误差值为  $dy$ ，则转台第二旋转轴偏移矢量 Y 的调整后的值为：

$$Y_c = Y_c - dy/2$$

**注意：**由于上面的  $dx$ ,  $dy$  是有正负方向的，如果弄不清楚怎么算，可以用尝试法，先填一个数据进行测试，如果不对说明补反了，直到满足测试的基本要求。

## (2) A 轴 RTCP 功能检测

a) A 轴 0 度。

b) 安装标准球，测量标准球的长度为  $L$ ，球半径为  $R$ ，此时填入刀补表的数据为  $L-R$ 。

c) 按照下图安装百分表。

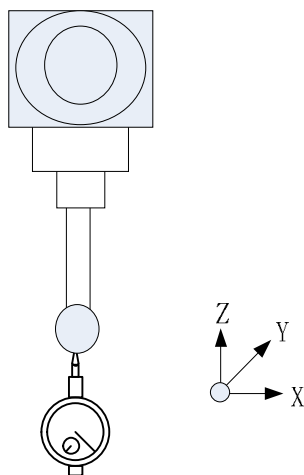


图 5-14 A 轴 RTCP 精度检测

d) 测定 AC 轴线 Y 偏置距离有效性，编写 G 代码测试程序，如下：

```
G54
F500
G43.4H1（打开 RTCP 功能）
G90A0
A30
A0
A-30
G49
M30
```

观察表的数值变化，比较 A30 和 A-30 时的表的读数，如果在 1 丝范围之内，则不需要调整 AC\_OFFY 的值。如果在范围之外，以 A30 为基准，两次表的读数差为 doffy，则调整后的值为：

$$AC\_OFFY = AC\_OFFY + doffy/2$$

e) 测定 C 轴中心 Z 偏移矢量有效性，编写 G 代码测试程序，如下：

```
G54
F500
G43.4H1（打开 RTCP 功能）
G90A0
A-90
M30
```

观察表的数值变化，比较 A0 和 A-90 时的表的读数，如果在 1 丝范围之内，则不需要调整 Zc 的值。如果在范围之外，以 A0 为基准，两次表的读数差为 dz，则调整后的值为：

$$Zc = Zc - dz$$

**注意：**和 C 轴有效性测试一样，doff 和 dz 有正负值，如果弄不清楚怎么算，可以用尝试法，先补一个数据进行测试，如果不对说明补反了，直到满足测试的基本要求。

f) 再次执行步骤 e 的测试程序，观察整个运动过程中，表指针的跳动情况

## 5.2 BC 双摆头标定方法

### 1. 机床标定前检测

(1) 保证机床 X、Y、Z 轴的几何精度已经测量过。

(2) 测定 B/C 轴轴线及零位。

C 轴为主动轴，不受 B 轴影响，所以应先测 C 轴。

#### ◆ C 轴的轴线

C 轴的轴线必须保证与 Z 轴平行，将百分表安装在主轴头上。在工作台上找一个 XY 平面，B 轴摆动一个角度，表压在平面上，此时转动 C 轴，观察表的数值是否有变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内，如果超差，需要对 C 轴机械进行调整，以保证精度。

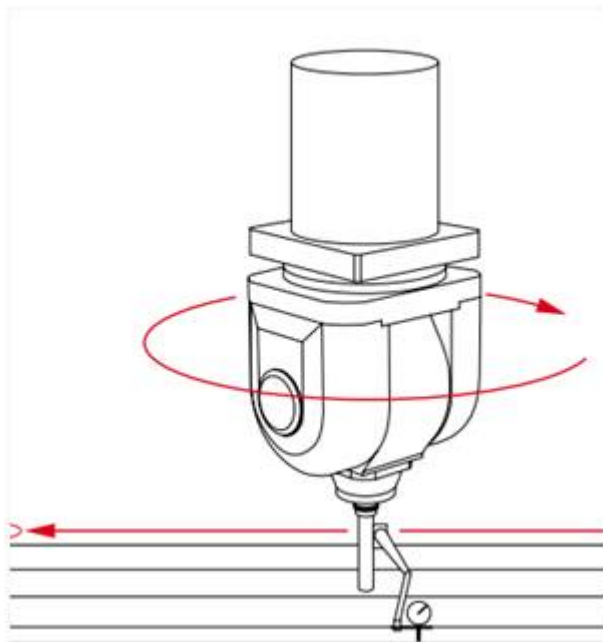


图 5-15 C 轴轴线精度检测

#### ◆ B 轴的轴线及 C 轴零位

B 轴的轴线必须保证与 Y 轴平行，将百分表安装在主轴头上。在工作台上找一个 XZ 平面，表压在平面上，此时转动 B 轴，观察表的数值是否有变化。调整 C 轴，使读数变化在允许的误差范围内，将此时的 C 轴位置定为其零位。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

#### ◆ B 轴零位

- B 轴、C 轴回零。
- 安装检棒，将百分表打到检棒上，方向与机床 XZ 平面垂直。
- 上下移动 Z 轴。

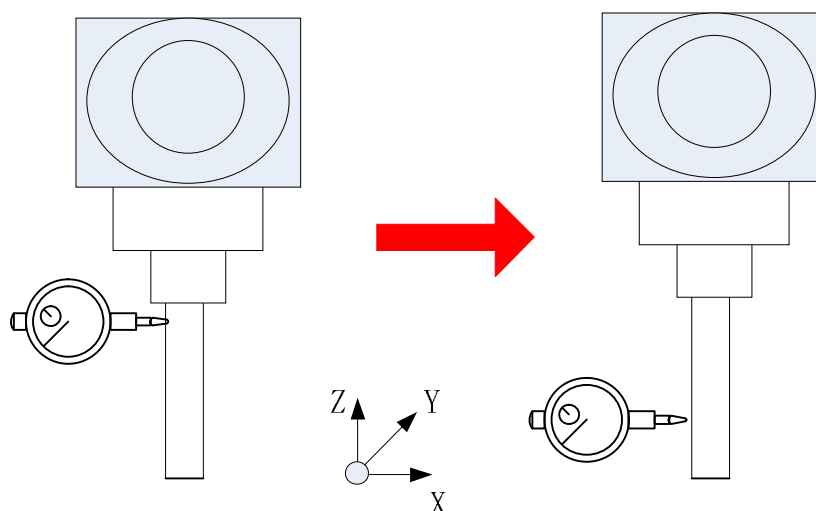


图 5-16 B 轴零位测试

d) 调整 B 轴，使表读数变化在允许的误差范围内，将此时的 B 轴位置定为其零位。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

### (3) 检查 B 轴和 C 轴定位精度

#### ◆ B 轴位置

步骤 1:

- a) B 轴 90 度
- b) 百分表打到检棒上，方向与机床 XY 平面垂直。
- c) 来回移动 X 轴。

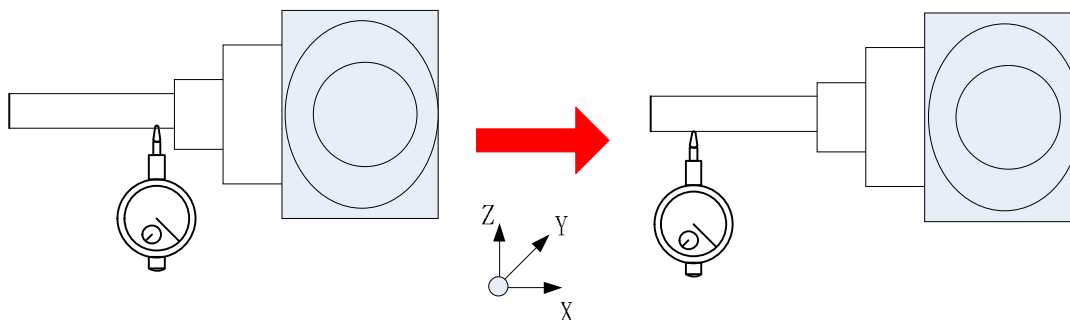


图 5-17 B 轴 90° 定位精度检测

d) 观察表数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

步骤 2:

- a) B 轴 -90 度
- b) 百分表打到检棒上，方向与机床 XY 平面垂直。
- c) 来回移动 X 轴。

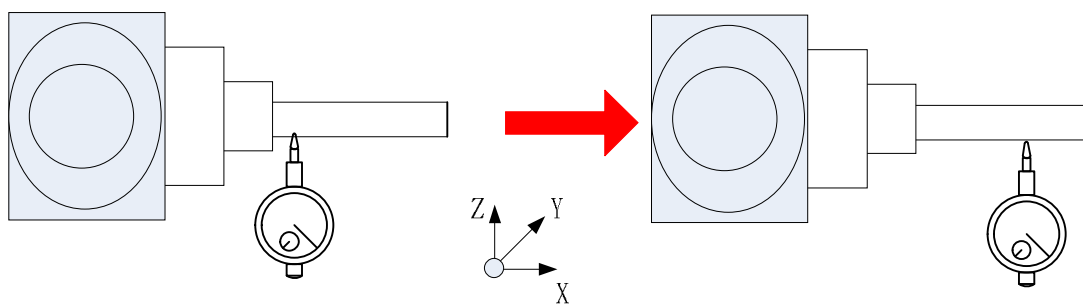


图 5-18 B 轴-90° 定位精度检测

观察表数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

#### ◆ C 轴位置

B 轴 90 度或者 B 轴-90 度

步骤 1:

- a) C 轴 0 度
- b) 百分表打到检棒上，方向与机床 XY 平面垂直。
- c) 来回移动 X 轴。

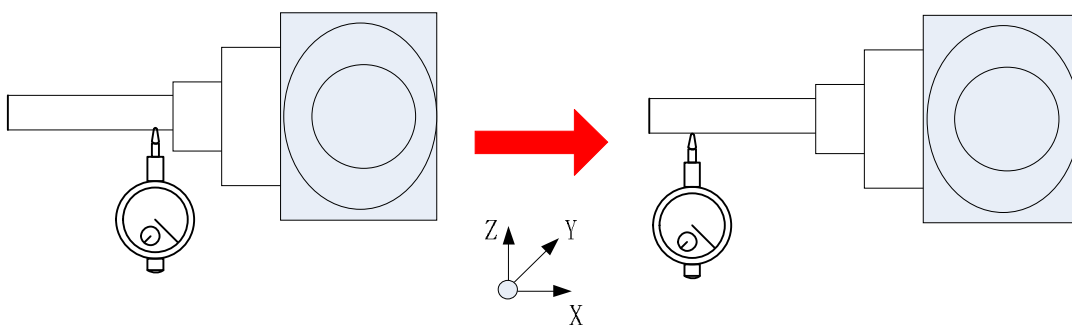


图 5-19 C 轴定位精度检测

- d) 观察表数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

步骤 2:

- a) C 轴 90 度
- b) 百分表打到检棒上，方向与机床 XY 平面垂直。
- c) 来回移动 Y 轴。

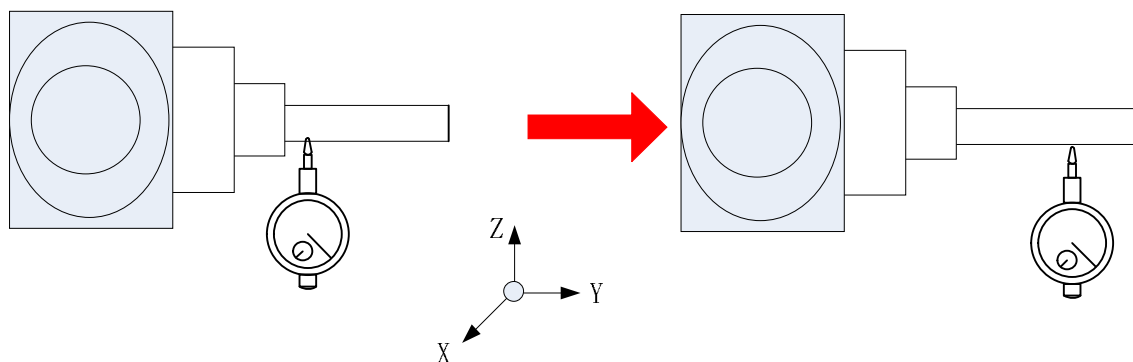


图 5-20 C 轴定位精度检测

d) 观察表数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

步骤 3:

- a) C 轴 180 度
- b) 百分表打到检棒上，方向与机床 XY 平面垂直。
- c) 来回移动 X 轴。

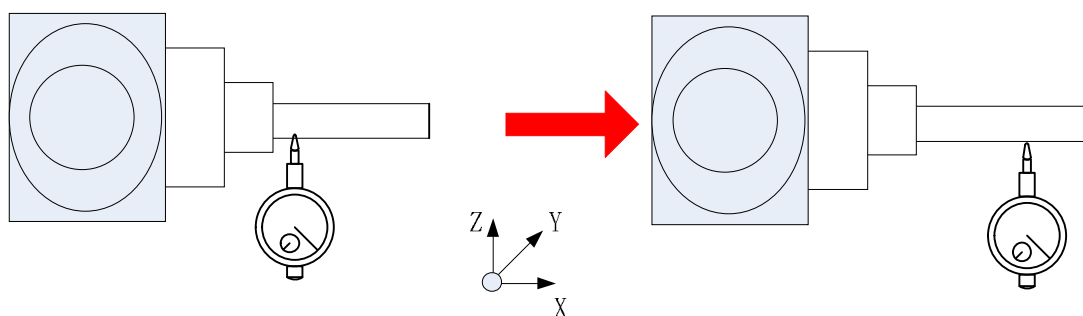


图 5-21 C 轴定位精度检测

d) 观察表数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

步骤 4:

- a) C 轴 270 度
- b) 百分表打到检棒上，方向与机床 XY 平面垂直。
- c) 来回移动 Y 轴。

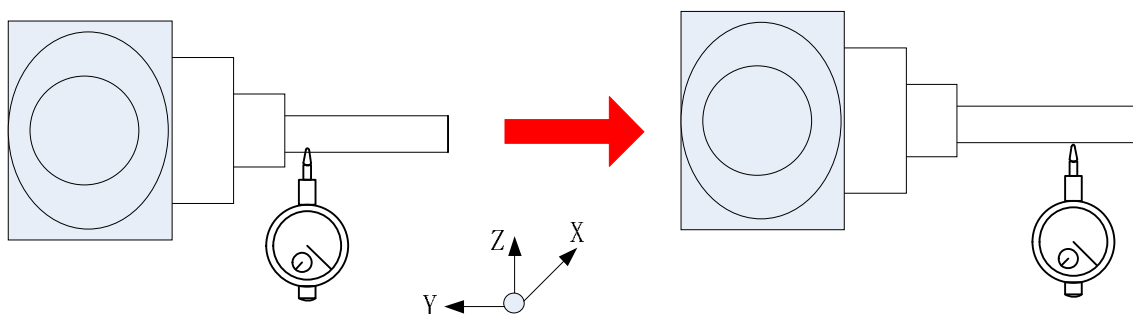




图 5-22 C 轴定位精度检测

观察表数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

B、C 轴定位精度合格的前提下，才能进行后面的 RTCP 参数标定，否则，需要对旋转轴做相应的调整或补偿。

#### （4）机床 RTCP 参数标定

RTCP 需要标定的参数包括：B 轴线 X 偏置距离，B 轴线 Y 偏置距离，BC 轴线偏置距离，主轴头长度。

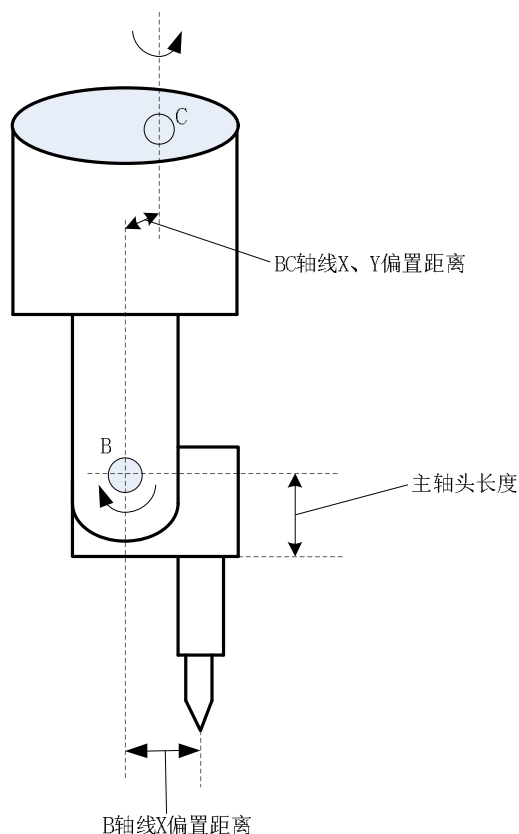


图 5-23 RTCP 参数标定示意图

##### 1) B 轴线 X 偏置距离

##### ◆ B 轴线 X 偏置距离

步骤 1:

- a) B 轴 90 度，C 轴 0 度
- b) 百分表打到检棒最低处(大径)。

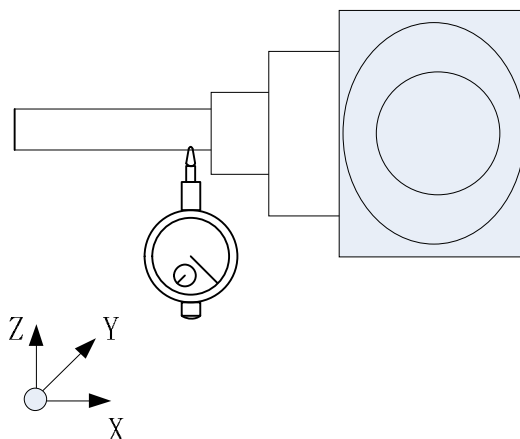


图 5-24 B 轴的轴线 X 向偏移距离

c) 设置表的读数为 0。

d) Z 轴相对清零。

步骤 2:

a) B 轴-90 度, C 轴 0 度

b) 再次将百分表打到检棒最低处(大径), 保证表的读数与 step1 相同。

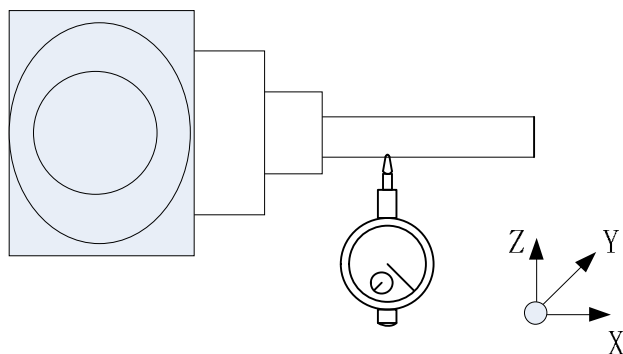


图 5-25 B 轴的轴线 X 向偏移距离

c) 设置表的读数为 0。

d) 查看 Z 轴的相对坐标值记录为 Z1。

e) 计算 B 轴轴线相对于主轴轴线 X 偏移距离:

$$SPOFFB_x = Z1/2$$

## 2) BC 轴线 X、Y 偏置距离

### ◆ BC 轴线 X 偏置距离

步骤 1:

a) B 轴 0 度, C 轴 0 度。

b) 百分表安装在检棒的 X 负方向位置, 将表打到检棒上。(X 方向)

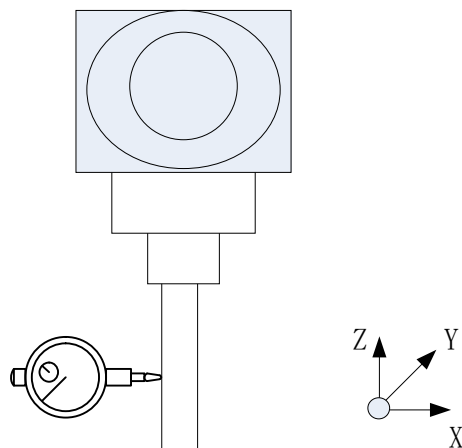


图 5-26 BC 轴线 X 向偏移距离

- c) 设置表的读数为 0。
- d) X 轴相对清零。

步骤 2:

- a) B 轴 0 度，C 轴 180 度。
- b) 再次将百分表打到检棒 X 负方向位置，保证表的读数与 step1 相同
- c) 查看 X 轴的相对坐标值记录为 X1。
- d) 计算 C 轴轴线相对于主轴轴线 X 偏移距离：

$$SPOFFC_x = (-x1) / 2。$$

- e) 计算 BC 轴线的 X 偏置距离

$$BCOFF_x = SPOFFC_x - SPOFFB_x$$

#### ◆ BC 轴线 Y 偏置距离

设定 B 轴控制点与主轴中心点 Y 方向位置相同，那么 BC 轴线 Y 偏置距离，就相当于 C 轴轴线与主轴轴线 Y 偏置距离。

步骤 1:

- a) B 轴 0 度，C 轴 0 度。
- b) 百分表安装在检棒的 Y 负方向位置，表打到检棒上。(Y 方向)

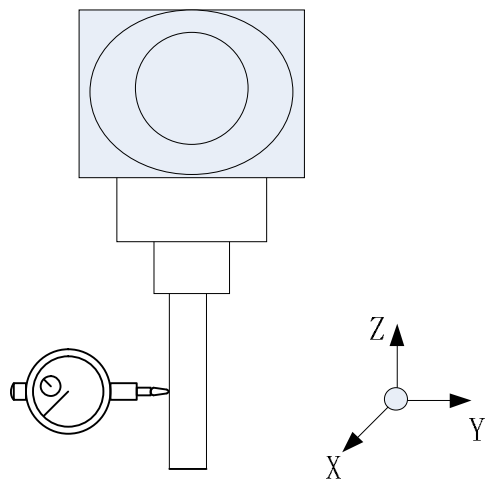


图 5-27 BC 轴线 Y 向偏移距离

c) 设置表的读数为 0。

d) Y 轴相对清零。

步骤 2:

a) B 轴 0 度，C 轴 180 度。

b) 再次将百分表打到检棒 Y 负方向位置，保证表的读数与 step1 相同。

c) 查看 Y 轴的相对坐标值记录为 Y1。

d) 计算 B 轴轴线相对于主轴轴线 Y 偏移距离：

$$BCOFF_y = (-y1)/2。$$

### 3) 主轴头长度

步骤 1:

a) B 轴 0 度，C 轴 0 度。

b) 百分表打到主轴端面上。

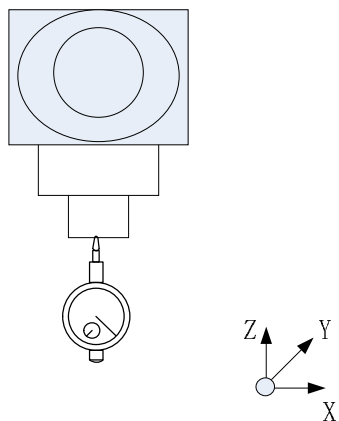


图 5-28 主轴头长度测试

c) Z 轴相对清零。

步骤 2:

a) B 轴 90 度, C 轴 0 度。

b) 百分表打到检棒的最低处(大径), 保证表的读数与 step1 相同。

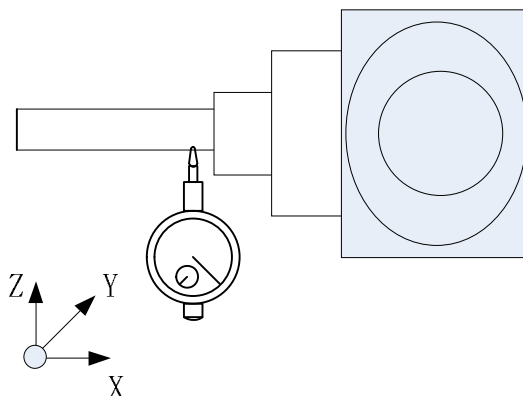


图 5-29 主轴头长度测试

c) 设置表的读数为 0。

d) 查看 Z 轴的相对坐标值记录为 Z1。

e) 主轴头的长度:

$SPLN = -(z1 + d/2) - SPOFFB_x$ 。(B 轴轴线 X 方向偏置为 SPOFFB<sub>x</sub>, 检棒的直径为 d)

完成上述标定过程后, 将各标定数据填入下表的通道参数中。(转台结构类型确保为空)

040400	刀具初始方向(X)	0.0
040401	刀具初始方向(Y)	0.0
040402	刀具初始方向(Z)	1.0
040410	摆头结构类型	CB
040411	摆头第一旋转轴方向矢量 X	0.0
040412	摆头第一旋转轴方向矢量 Y	0.0
040413	摆头第一旋转轴方向矢量 Z	1.0
040414	摆头第二旋转轴方向矢量 X	0.0
040415	摆头第二旋转轴方向矢量 Y	1.0

040416	摆头第二旋转轴方向矢量 Z	0.0
040417	摆头第一旋转轴偏移矢量 X	BCOFF <sub>x</sub>
040418	摆头第一旋转轴偏移矢量 Y	BCOFF <sub>y</sub>
040419	摆头第一旋转轴偏移矢量 Z	0.0
040420	摆头第二旋转轴偏移矢量 X	SPOFFB <sub>x</sub>
040421	摆头第二旋转轴偏移矢量 Y	0.0
040422	摆头第二旋转轴偏移矢量 Z	SPLEN

注意：进行参数设置时，一定要根据当前的旋转轴的旋转方向来设置方向矢量，具体观察旋转方向请查看五轴参数说明书部分。

#### 4. 机床 RTCP 功能有效性检测

##### 1) B 轴定位精度检查

采用法向进退刀功能来检测系统中 B 轴定位精度。

- a) B 轴旋转一个角度。
- b) 将表压到直杆上。

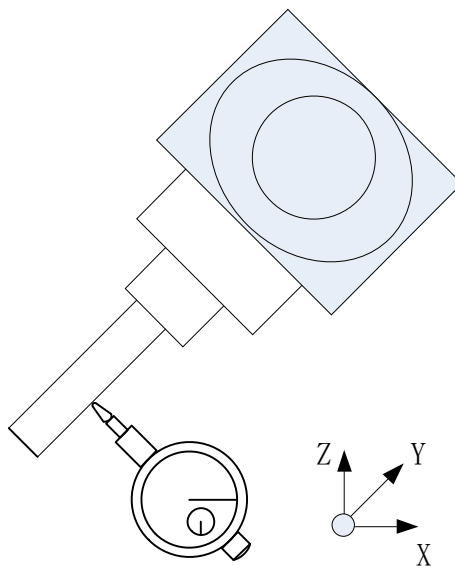


图 5-30 B 轴定位精度检测

- c) 通过法向进退刀指令 G53.3L<sub>-</sub>，沿着法向移动刀轴。注意在使用该指令之前需要开启 RTCP 功能，调用 G43.4 指令。
- d) 观察表的数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

## 2) RTCP 功能检测

### ◆ C 轴 RTCP 功能检测

- a) C 轴 0 度
- b) 安装标准球，测量标准球的长度为 L，球半径为 R，此时填入刀补表的数据为 L-R。
- c) 按照下图在 X 负方向安装百分表。

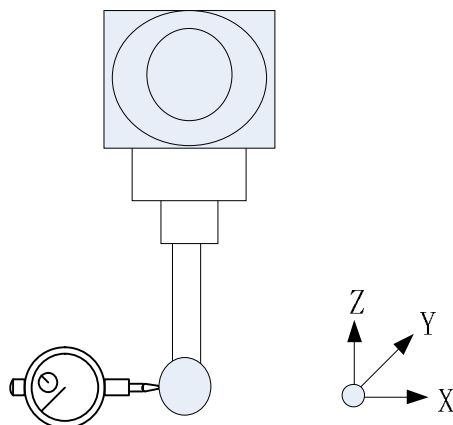


图 5-31 C 轴 RTCP 精度检测

- d) 编写 G 代码测试程序，如下：

```
G54
F500
G43.4H1（打开 RTCP 功能）
G90C0
C90
C180
C270
G49
M30
```

- e) 观察表的数值变化，正常情况下，C 轴旋转一圈，表数值变化在 2 个丝范围之内。如果表数值读数大于 2 丝，可以通过表针的读数来对标定参数进行修正。

- 观察 X 方向数据，以 C0 度为基准，C0 度和 C180 度之间的表的误差值为 dx，则转台第二旋转轴偏移矢量 X 的调整后的值为：

$$X_c = X_c - dx/2$$

- 观察 Y 方向数据，以 C90 度为基准，C90 度和 C270 度之间的表的误差值为 dy，则转台第二旋转轴偏移矢量 Y 的调整后的值为：

$$Y_c = Y_c + dy/2$$

**注意：**由于上面的  $dx, dy$  是有正负方向的，如果弄不清楚怎么算，可以用尝试法，先填一个数据进行测试，如果不对说明补反了，直到满足测试的基本要求。

#### ◆ B 轴 RTCP 功能检测

- a) B 轴 0 度。
- b) 安装标准球，测量标准球的长度为  $L$ ，球半径为  $R$ ，此时填入刀补表的数据为  $L-R$ 。
- c) 按照下图安装百分表。

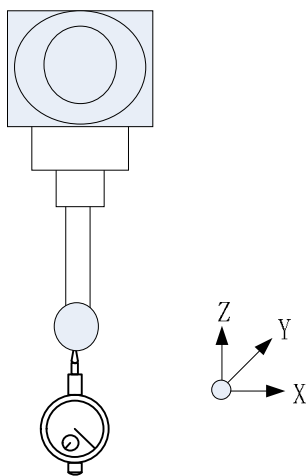


图 5-32 B 轴 RTCP 精度检测

- d) 编写 G 代码测试程序，如下：

```
G54
F500
G43.4H1（打开 RTCP 功能）
G90b0
B90
B0
B-90
G49
```

- e) 观察表的数值变化，正常情况下，B 轴运动过程中表数值变化在 2 个丝范围之内。如果表数值读数大于 2 丝，可以通过表针的读数来对标定参数进行修正。

- 比较 B90 度和 B-90 度表的读数，以 B90 度为基准，B90 度和 B-90 度之间的误差值为  $dx$ ，则摆头第二旋转轴偏移矢量 Y 调整后的值为：

$$SPOFFB_x = SPOFFB_x + dx/2$$

修正完  $SPOFFB_x$ ，达到精度要求后，需要修正  $BCOFF_x$  的值

$$BCOFF_x = BCOFF_x - dx/2$$



- 比较 B0 度和 B90 度表的读数，以 B0 度为基准，B0 度和 B90 度之间的误差值为 dz，则摆头第二旋转轴偏移矢量 Z 调整后的值为：

$$\text{SPLEN} = \text{SPLEN} - dz$$

**注意：**由于上面的 dx, dz 是有正负方向的，如果弄不清楚怎么算，可以用尝试法，先填一个数据进行测试，如果不对说明补反了，直到满足测试的基本要求。

**补充说明：**

- (1) AC 双摆头结构机床可以借鉴该文档。最主要不同是，BC 双摆头计算 B 轴轴线相对于主轴轴线的偏移距离，和 AC 双摆头计算 A 轴轴线相对于主轴轴线的偏移距离，在计算公式上符号要取反。

$$\text{SPOFFAy} = -Z1/2$$

- (2) 在用标准球进行 RTCP 检测时，修正值得计算公式符号也需要取反：

$$\text{SPOFFBAy} = \text{SPOFFAy} - dy/2$$

$$\text{BCOFFy} = \text{BCOFFy} + dy/2$$

### 5.3 B 摆 C 转混合结构标定方法

#### 1. 机床标定前检测

- (1) 保证机床 X、Y、Z 轴的几何精度已经测量过。
- (2) 测定 B 轴的轴线和零位，C 轴的轴线。

##### ◆ B 轴的轴线

B 轴的轴线必须保证与 Y 轴平行，将百分表安装在主轴头上。在工作台上找一个 XZ 平面，表压在平面上，此时转动 B 轴，观察表的数值是否有变化。

##### ◆ B 轴零位

- a) B 轴、C 轴回零。
- b) 安装检棒，将百分表打到检棒上，方向与机床 XZ 平面垂直。上下移动 Z 轴。

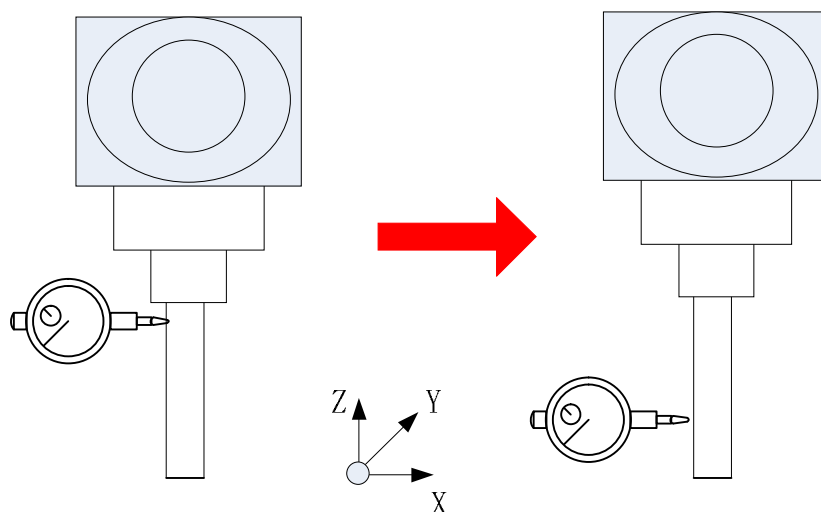


图 5-33 B 轴零位检测

- c) 调整 B 轴，使表读数变化在允许的误差范围内，将此时的 B 轴位置定为其零位。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

##### ◆ C 轴的轴线

C 轴的轴线必须保证与 Z 轴平行，将百分表安装在主轴头上。在工作台上找一个 XY 平面，表压在平面上，此时转动 C 轴，观察表的数值是否有变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

- (3) 检查 B 轴的定位精度

##### ◆ B 轴位置

步骤 1:

- a) B 轴回零。
- b) 安装检棒，将百分表打到检棒 X 负方向位置。
- c) 上下移动 Z 轴。

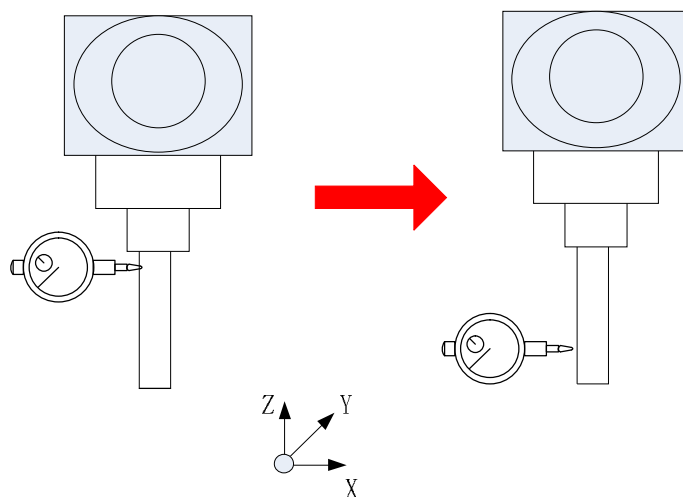


图 5-34 B 轴定位精度检测

d) 观察表数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

步骤 2:

- a) B 轴 90 度。
- b) 百分表打到检棒下侧。
- c) 来回移动 X 轴。

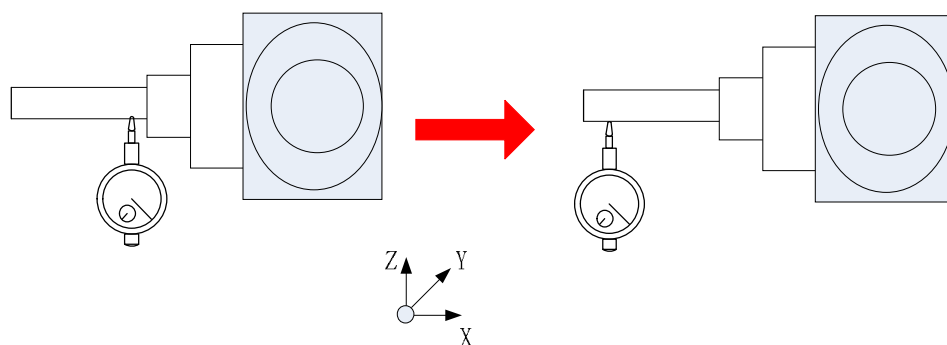


图 5-35 B 轴定位精度检测

d) 观察表数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

步骤 3:

- a) B 轴-90 度。
- b) 百分表打到检棒下侧。
- c) 来回移动 X 轴。

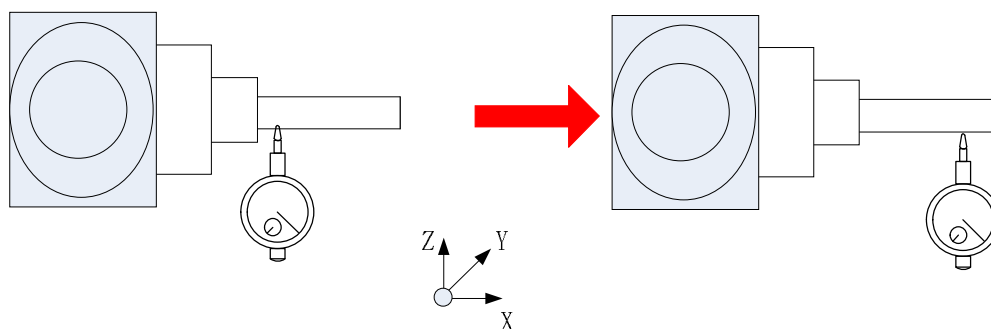


图 5-36 B 轴定位精度检测

d) 观察表数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

### ◆ C 轴位置

- 在转台上安装方规，C 轴 0 度时，使方规的一个平面与 YZ 平面平行；
- 将 C 轴分别旋转 0 度、90 度、180 度、270 度；
- 百分表安装在主轴上，表针打在竖直平面上，上下移动主轴，观察读数变化。

## 2. 机床 RTCP 参数标定

RTCP 需要标定的参数包括：B 轴线 X 偏置距离，主轴头长度，C 轴中心位置。

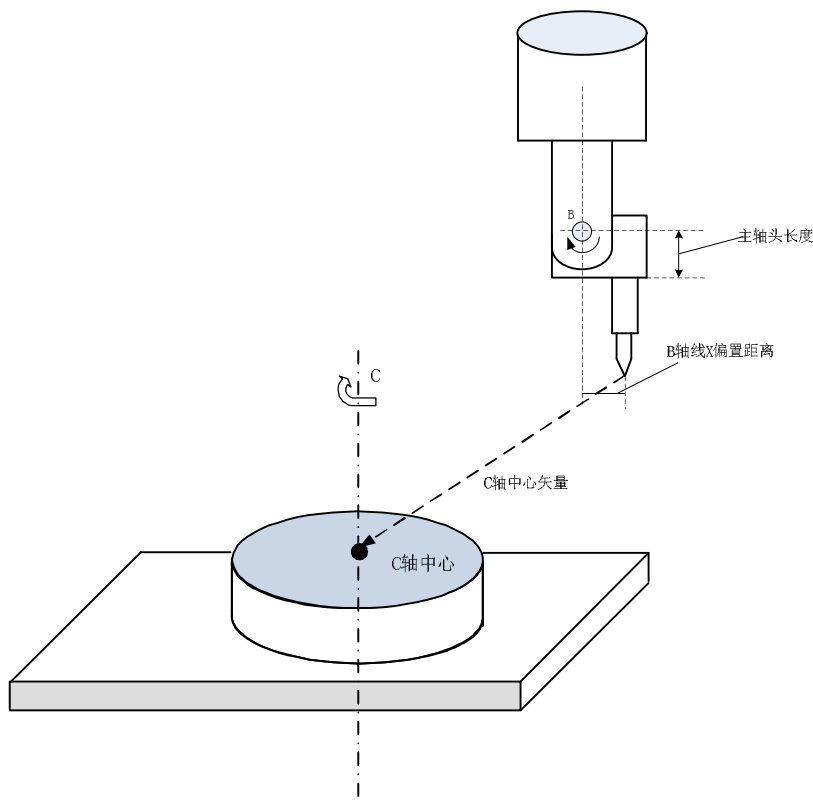


图 5-37 机床 RTCP 参数示意图

**(1) B 轴线 X 偏置距离**

步骤 1:

- a) B 轴 90 度
- b) 百分表打到检棒最低处(大径)。

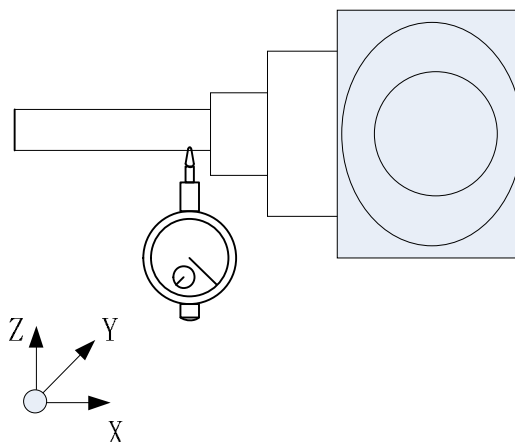


图 5-38 B 轴的轴线 X 向偏移距离

- c) 设置表的读数为 0。
- d) Z 轴相对清零。

步骤 2:

- a) B 轴-90 度, C 轴 0 度
- b) 再次将百分表打到检棒最低处(大径), 保证表的读数与 step1 相同。

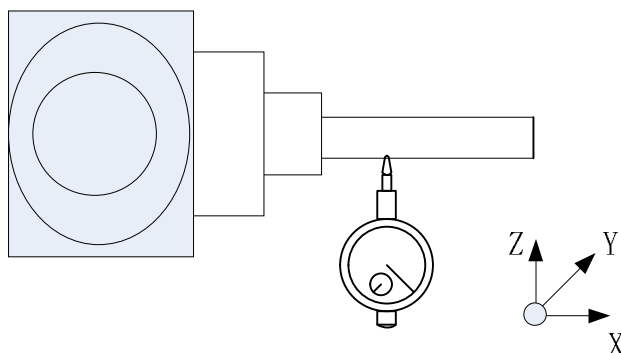


图 5-39 B 轴的轴线 X 向偏移距离

- c) 设置表的读数为 0。
- d) 查看 Z 轴的相对坐标值记录为 Z1。
- e) 计算 B 轴轴线相对于主轴轴线 X 偏移距离:

$$SPOFFB_x = Z1/2$$

**(2) 主轴头长度**

步骤 1:

- a) B 轴 0 度, C 轴 0 度。

- b) 百分表打到主轴端面上。

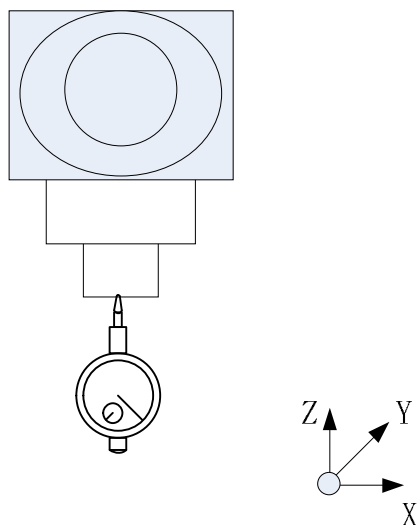


图 5-40 主轴头长度测量

- c) Z 轴相对清零。

步骤 2:

- a) B 轴 90 度, C 轴 0 度。  
b) 百分表打到检棒的最低处(大径), 保证表的读数与 step1 相同。

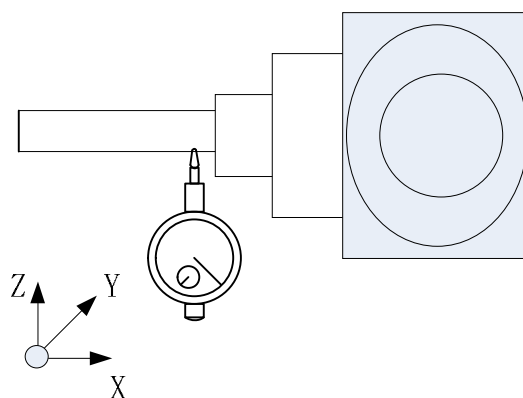


图 5-41 主轴头长度测量

- c) 设置表的读数为 0。  
d) 查看 Z 轴的相对坐标值记录为 Z1。  
e) 主轴头的长度:

$$SPLEN = -(z1 + d/2) - SPOFFBx.$$

(B 轴轴线 X 方向偏置为 SPOFFBx, 检棒的直径为 d)

### （3）C 轴中心 X、Y 偏移矢量

步骤 1:

- a) A 轴 0 度，C 轴 0 度。
- b) 安装寻边器在主轴头上，将下检测头打到 C 轴边缘高度。
- c) 将下测头打至 C 轴内径左右边缘，记录 X 轴坐标为 X1、X2。
- d) 计算 C 轴的 X 坐标： $X_c = (X1 + X2) / 2$ 。

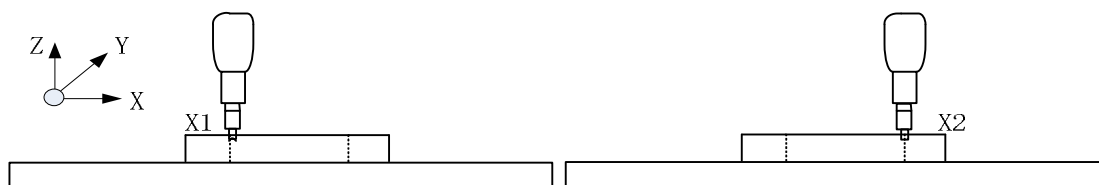


图 5-42 C 轴中心 X 方向偏移量

- e) 将下测头打至 C 轴内径前后边缘，记录 Y 轴坐标为 Y1、Y2。
- f) 计算 C 轴的 Y 坐标： $Y_c = (Y1 + Y2) / 2$ 。

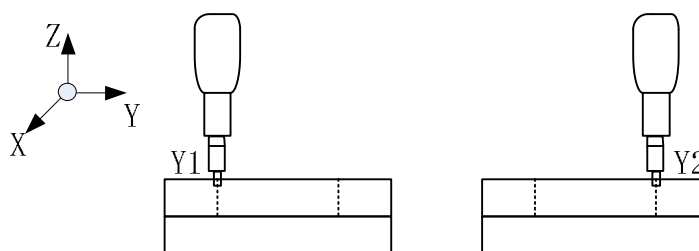


图 5-43 C 轴中心 Y 方向偏移量

步骤 2:

- a) 安装百分表在主轴头上。
- b) 调整工作台 X、Y 坐标为 Step1 中计算出的位置。
- c) 主轴头安装检棒。
- d) C 轴旋转，微调 X、Y 坐标，使 C 轴转一圈百分表读数在 2 丝以内。
- e) 记录当前坐标  $X_c$ 、 $Y_c$  为 C 轴 X、Y 坐标。

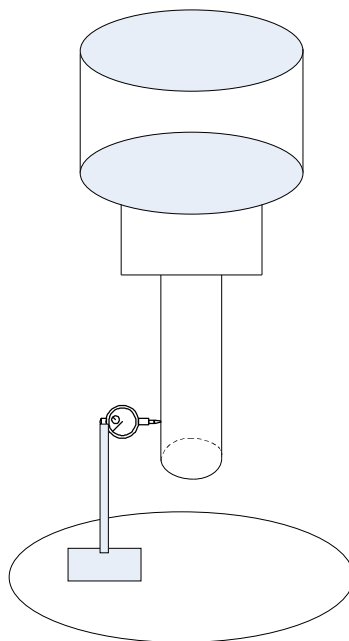


图 5-44 C 轴中心位置检测

## ◆ C 轴中心 Z 偏移矢量

Z 坐标不用标定，可以为任意值，直接置 0 即可。

完成上述标定过程后，将各标定数据填入下表的通道参数中。

040400	刀具初始方向(X)	0.0
040401	刀具初始方向(Y)	0.0
040402	刀具初始方向(Z)	1.0
040410	摆头结构类型	B
040411	摆头第一旋转轴方向矢量 X	0.0
040412	摆头第一旋转轴方向矢量 Y	0.0
040413	摆头第一旋转轴方向矢量 Z	0.0
040414	摆头第二旋转轴方向矢量 X	0.0
040415	摆头第二旋转轴方向矢量 Y	1.0
040416	摆头第二旋转轴方向矢量 Z	0.0
040417	摆头第一旋转轴偏移矢量 X	0.0
040418	摆头第一旋转轴偏移矢量 Y	0.0
040419	摆头第一旋转轴偏移矢量 Z	0.0
040420	摆头第二旋转轴偏移矢量 X	SPOFFBx
040421	摆头第二旋转轴偏移矢量 Y	0.0
040422	摆头第二旋转轴偏移矢量 Z	SPLEN



040425	转台结构类型	C
040426	转台第一旋转轴方向矢量 X	0.0
040427	转台第一旋转轴方向矢量 Y	0.0
040428	转台第一旋转轴方向矢量 Z	0.0
040429	转台第二旋转轴方向矢量 X	0.0
040430	转台第二旋转轴方向矢量 Y	0.0
040431	转台第二旋转轴方向矢量 Z	-1.0
040432	转台第一旋转轴偏移矢量 X	0.0
040433	转台第一旋转轴偏移矢量 Y	0.0
040434	转台第一旋转轴偏移矢量 Z	0.0
040435	转台第二旋转轴偏移矢量 X	Xc
040436	转台第二旋转轴偏移矢量 Y	Yc
040437	转台第二旋转轴偏移矢量 Z	0

注意：进行参数设置时，一定要根据当前的旋转轴的旋转方向来设置方向矢量，具体观察旋转方向请查看五轴参数说明书部分。

### 3. 机床 RTCP 功能有效性检测

#### (1) B 轴定位精度检查

采用法向进退刀功能来检测系统中 B 轴定位精度。

- a) B 轴旋转一个角度。
- b) 将表压到直杆上。

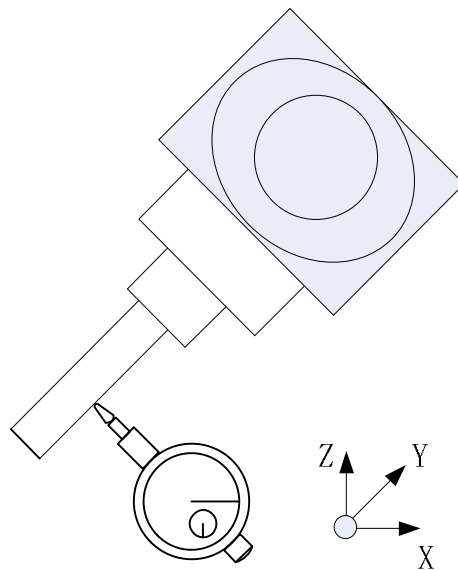


图 5-45 B 轴定位精度检测

- c) 通过法向进退刀指令 G53.3L<sub>z</sub>，沿着法向移动刀轴。注意在使用该指令之

前需要开启 RTCP 功能，调用 G43.4 指令。

- d) 观察表的数值变化。正常情况下，表数值变化在 2 个丝范围之内。

## (2) RTCP 功能检测

### ◆ B 轴 RTCP 功能检测

- a) B 轴 0 度。
- b) 安装标准球，测量标准球的长度为  $L$ ，球半径为  $R$ ，此时填入刀补表的数据为  $L-R$ 。
- c) 按照下图安装百分表。

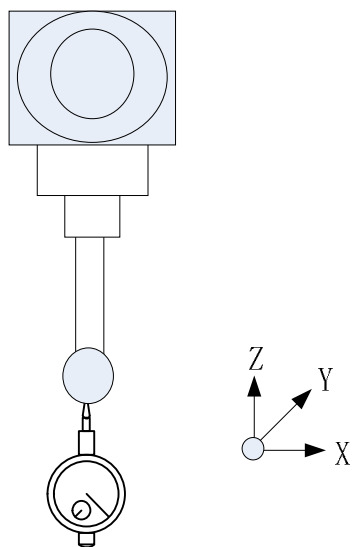


图 5-46 B 轴 RTCP 精度检测

- d) 编写 G 代码测试程序，如下：

```
G54
F500
G43.4H1（打开 RTCP 功能）
G90 B0
B90
B0
B-90
G49
```

- e) 观察表的数值变化，正常情况下，B 轴运动过程中表数值变化在 2 个丝范围之内。如果表数值读数大于 2 丝，可以通过表针的读数来对标定参数进行修正。

➤ 比较 B90 度和 B-90 度表的读数，以 B90 度为基准，B90 度和 B-90 度之间的误差值为  $dx$ ，则摆头第二旋转轴偏移矢量  $Y$  调整后的值为：

$$SP0FFB_x = SP0FFB_x + dx/2$$

- 比较 B0 度和 B90 度表的读数，以 B0 度为基准，B0 度和 B90 度之间的误差值为  $dz$ ，则摆头第二旋转轴偏移矢量  $Z$  调整后的值为：

$$SPLEN = SPLEN - dz$$

**注意：**由于上面的  $dx, dz$  是有正负方向的，如果弄不清楚怎么算，可以用尝试法，先填一个数据进行测试，如果不对说明补反了，直到满足测试的基本要求。

#### ◆ C 轴 RTCP 功能检测

- C 轴 0 度
- 安装标准球，测量标准球的长度为  $L$ ，球半径为  $R$ ，此时填入刀补表的数据为  $L-R$ 。
- 按照下图在 X 负方向安装百分表。

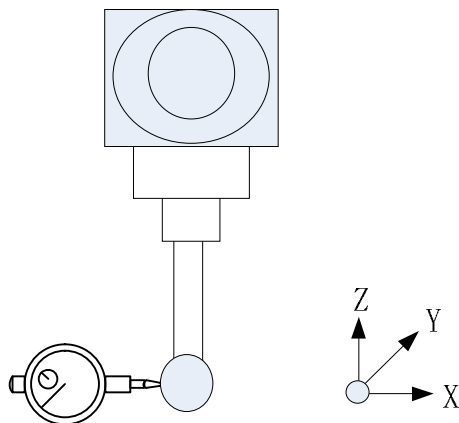


图 5-47 C 轴 RTCP 精度检测

- 编写 G 代码测试程序，如下：

```
G54
F500
G43.4H1（打开 RTCP 功能）
G90C0
C90
C180
C270
G49
M30
```

- 观察表的数值变化，正常情况下，C 轴旋转一圈，表数值变化在 2 个丝范围之内。如果表数值读数大于 2 丝，可以通过表针的读数来对标定参数进行修正。

- 观察 X 方向数据，以 C0 度为基准，C0 度和 C180 度之间的表的误差值

为  $dx$ ，则转台第二旋转轴偏移矢量  $X$  的调整后的值为：

$$X_c = X_c + dx/2$$

- 观察  $Y$  方向数据，以  $C90$  度为基准， $C90$  度和  $C270$  度之间的表的误差值为  $dy$ ，则转台第二旋转轴偏移矢量  $Y$  的调整后的值为：

$$Y_c = Y_c - dy/2$$

**注意：**由于上面的  $dx, dy$  是有正负方向的，如果弄不清楚怎么算，可以用尝试法，先填一个数据进行测试，如果不对说明补反了，直到满足测试的基本要

## 第 2 章 功能调试

### 1 五轴 RTCP 功能

传统的三轴数控机床设备，在加工过程中刀轴的方向始终保持不变，机床只能沿着三个线性轴进行插补运动。当加工图1 中的零件的时候，三轴加工短板尤为突显。相比三轴机床，五轴联动机床增加了两个旋转自由度，刀具运动姿态可以灵活变化，有利于刀具保持最佳的切削状态及有效避免加工干涉。因此在加工复杂自由曲面的时候，五轴联动数控加工具有显著的优势。

真五轴有RTCP功能。能根据主轴的摆长及旋转台的机械坐标进行自动换算。在编制程序时，只需要考虑工件的坐标，不需要考虑五轴机床运动链结构。是否是真五轴，不是看五个轴是否联动，假五轴也可五轴联动。主要关键是系统有RTCP 真五轴的算法。应用RTCP 模式后，编程5 坐标加工就可以直接在工件坐标系下规划刀尖的轨迹，因此编程就会变得简单、高效很多。不具备RTCP 的数控系统必须依靠CAM编程和后处理，事先规划好刀路，将机床第四轴、第五轴中心位置输入到后处理模块中，生成的CNC 程序为机床坐标点，实际加工中刀尖点运动的轨迹趋近与编程路径，这样精度得不到保证，另外同样一个零件，机床换了，或者刀具换了，就必须重新通过后置出程序，实际应用极其不方便。

#### 1.1 刀具中心点控制说明(RTCP)

在五轴机床加工中，由于旋转轴的加入和机床结构的误差，导致刀具中心的轨迹发生了改变。在G 代码程序中通过相应的指令开启RTCP 模式，系统将控制点定在刀具中心点，通过实时刀具长度补偿确保刀具中心点沿着指定的路径移动。用户只需要在工件坐标系下进行五轴编程，并不需要考虑机床结构的误差，大大简化了CAM 编程和提高了加工精度。

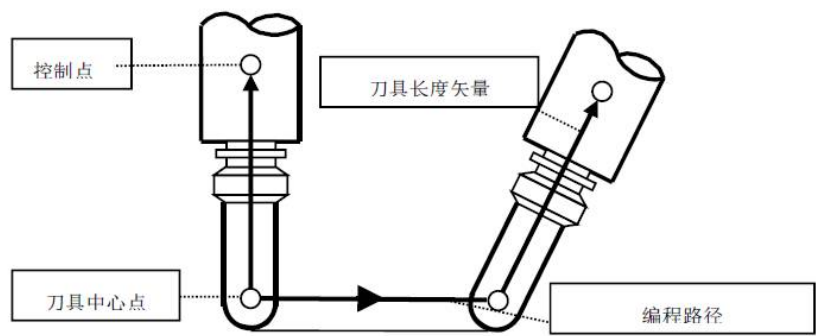


图 1-1 刀具中心点编程

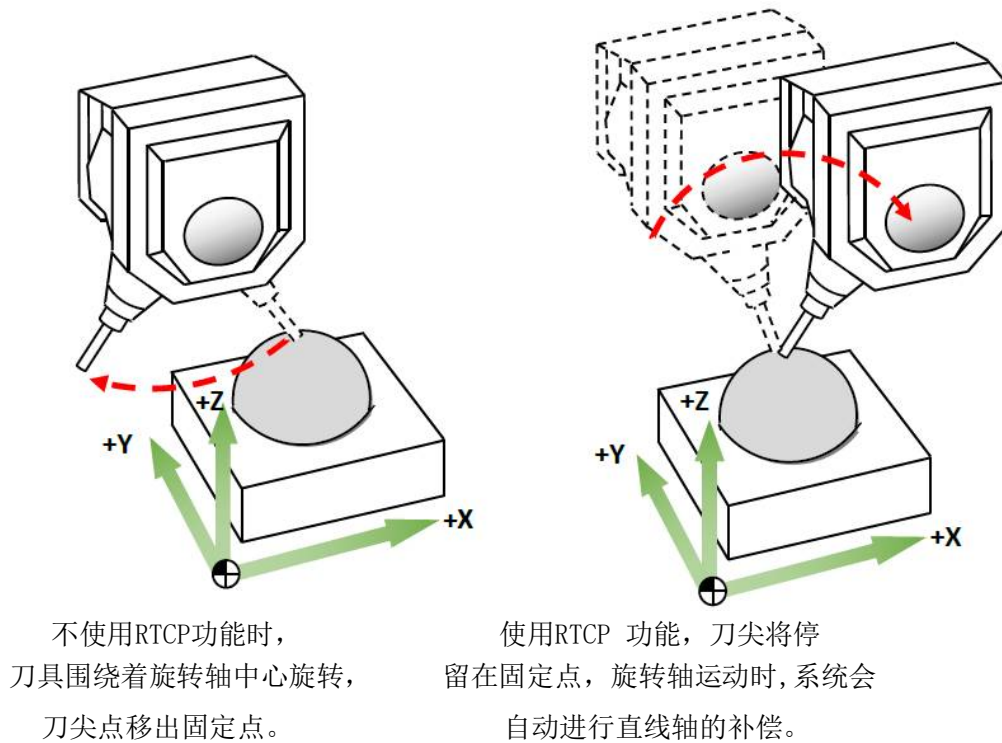


图 1-2 RTCP 示意图

## 1.2 RTCP 编程格式

编程格式

G43.4 (G43.5) H\_ ;开启RTCP 功能

G43.4:旋转轴角度编程

G43.5:刀具矢量编程

G49 ;取消RTCP 功能

其中G43.4(G43.5)开启RTCP 功能；H 指定刀具长度补偿号，使刀具中心点沿着刀轴线往控制点方向偏移一个刀具长度补偿；G49 取消RTCP 功能。

## 2、3+2 定向加工功能

五轴加工经常还用到3+2定向加工功能加工，该功能可以在斜面上建立一个特性坐标系（TCS），并在该坐标系中进行编程。由于特性坐标系与斜面相适应，因此在斜面上的编程与平面上的编程同样简单。如下图所示

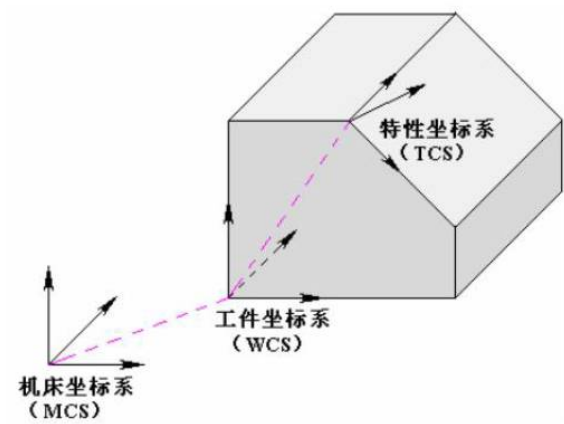


图2-1 特性坐标系示意图

工件上的特性坐标系可以通过三种方式来指定：第一种方式是在CNC 界面上输入特性坐标系数，然后程序中使用G68.1 指令选择哪一组数据来建立特性坐标系；第二种方式是直接在程序中使用G68.2 指令通过欧拉角方式建立特性坐标系，G69 取消当前建立的特性坐标系。第三种方式是直接在程序中使用G68.3指令通过空间角方式建立特性坐标系，G69 取消当前建立的特性坐标系。

注意：

1)使用特性坐标系前应指定G43.4/G43.5 开启特性坐标系功能。

2)建立特性坐标系后，所有编程坐标都是特性坐标系下的坐标值。

### 2.1 通过三点建立特性坐标系(G68.1)

特性坐标系的建立，可以通过指定以下三点来建立：

- P1：特性坐标系零点
  - P2：特性坐标系X 轴正方向任意一点
  - P3：特性坐标系XY平面一二象限任意一点
- （以上各点坐标均为该点在工件坐标系中的坐标值。）

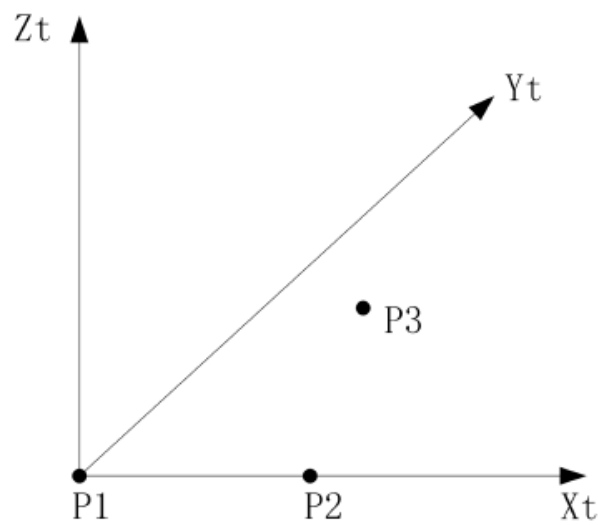


图2-2 特性坐标系建立示意图

P1、P2、P3 可以在CNC 界面输入，系统支持20 组特性坐标系，程序中使用G68.1 指令选择使用哪一组参数建立特性坐标系：

编程格式：

G68.1 Q\_

指令说明：

Q：选择建立特性坐标系的参数。取值范围为 1-20

2.2 通过欧拉角建立特性坐标系(G68.2)

欧拉角是围绕旋转坐标系的坐标轴旋转的角度，其定义如下：

- 1) 进动角 (EULPR)：围绕 Z 轴旋转角度。
- 2) 盘转角 (EULNU)：围绕由进动角改变后的 X 轴旋转的角度。
- 3) 旋转角 (RULROT)：围绕由盘转角改变后的 Z 轴旋转的角度。

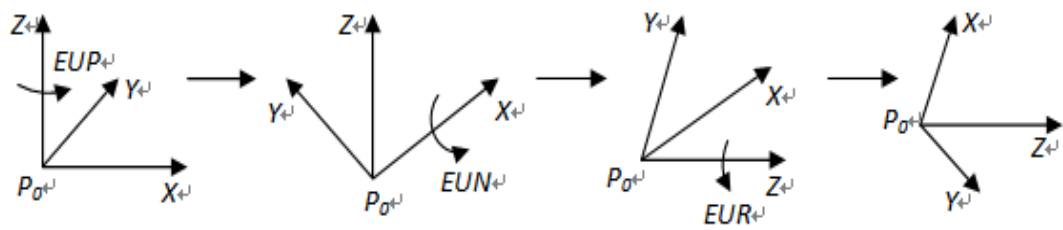


图 2-3 G68.2 翻转顺序示意图

编程格式：

G68.2 X\_Y\_Z\_I\_J\_K ；建立特性坐标系

指令说明：



参数	含义
X	工件坐标系下X值，是特性坐标系的X轴零点
Y	工件坐标系下Y值，是特性坐标系的Y轴零点
Z	工件坐标系下Z值，是特性坐标系的Z轴零点
I	进动角，工件坐标系下，围绕Z轴轴C旋转的角度
J	盘转角，工件坐标系下，进动角改变后围绕X轴轴A旋转的角度
K	旋转角，工件坐标系下，盘转角改变后围绕Z轴轴C

详细说明：

根据G68.2 Xx Yy Zz Ia Jb Kc的指令，CNC执行特性坐标系过程如下：

- （1）将G68.2指令指定的Xx Yy Zz作为特性坐标系原点。
  - （2）经过偏移后的特性坐标系，围绕Z轴旋转a度。
  - （3）然后围绕旋转后的坐标系的X轴旋转b度。
  - （4）最后围绕旋转后的坐标系的Z轴旋转c度。
  - （5）此时的坐标系成为在倾斜面上建立的坐标系，即特性坐标系。
- 以上坐标系的旋转角度，以相对于各自的旋转中心轴正方向，旋转中心轴的逆时针方向为正方向进行旋转。

应用举例

NC程序段格式举例

G43.4 H1	开启刀具中心点控制
G68.2X30. Y-40. Z0.0 I90. J45. K-90.	使用欧拉角建立特性坐标系
G53.2(G53.1)	刀具轴摆动到与特性坐标系Z轴平行的方向
G01 X0 Y-15 F2000	在特性坐标系下，X轴移动到0mm，Y轴移动到-15mm位置

2.3 通过空间角建立特性坐标系(G68.3)

G68.3与G68.2功能一样都是建立特性坐标系，但是G68.3的IJK分别是通过空间坐标系下绕X轴、Y轴、Z轴旋转的角度。

指令格式：

G68.3X_Y_Z_I_J_K_	； 建立特性坐标系
G69	； 取消特性坐标系

参数	含义
X	工件坐标系下X值，是特性坐标系的X轴零点
Y	工件坐标系下Y值，是特性坐标系的Y轴零点

Z	工件坐标系下Z值，是特性坐标系的Z轴零点
I	工件坐标系下，围绕X轴轴A旋转的角度
J	工件坐标系下，围绕Y轴轴B旋转的角度
K	工件坐标系下，围绕Z轴轴C旋转的角度

2.4 刀具轴方向控制

倾斜面加工时，除使用G43.4（或G43.5）定义刀轴方向外，还需执行刀具轴方向控制指令。本数控装置可使用G53.1或G53.2两种方式进行刀具轴方向控制，使刀具轴方向摆动到与特性坐标系Z轴平行的方向（即垂直于特性坐标系XY平面）。在指定G68.1/G68.2/G68.3建立特性坐标系后，可以指令G53.1/G53.2 来控制刀具轴摆动到与特性坐标系Z 轴平行的方向。

编程格式：

G53.1/G53.2

指令说明：

G53.1 指令执行时，只有旋转轴运动，直线轴不作补偿运动；

G53.2 指令执行时，移动旋转轴的同时，直线轴作补偿运动，以保持刀尖与工件的相对位置不变。

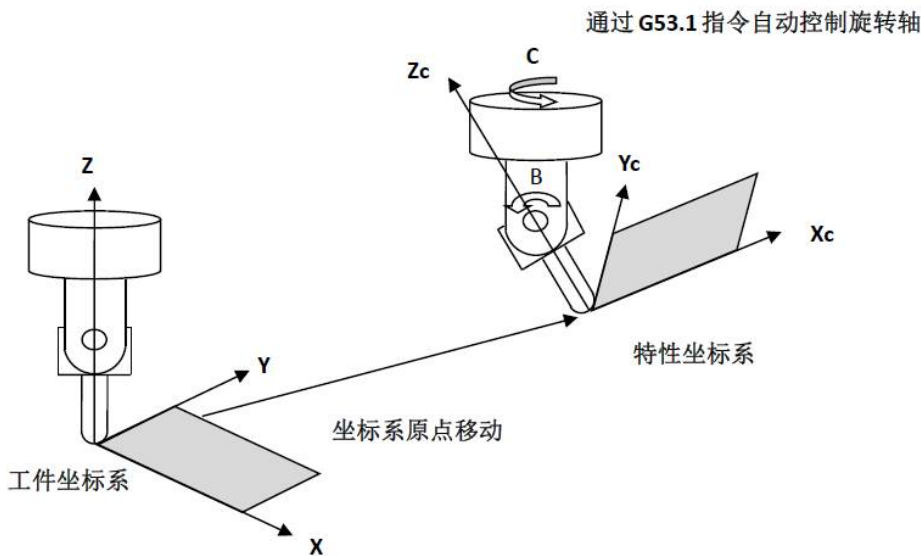


图 2-4 G53.1 刀具轴方向控制

使用G53.1时，A、C轴产生移动，X、Y、Z轴线性轴不移动。使刀具轴方向成为特征坐标系的Z轴。  
使用G53.2时，X、Y、Z 、A、C五轴同时移动，即刀尖跟随固定位置。使刀具轴方向成为特征坐标系的Z轴。

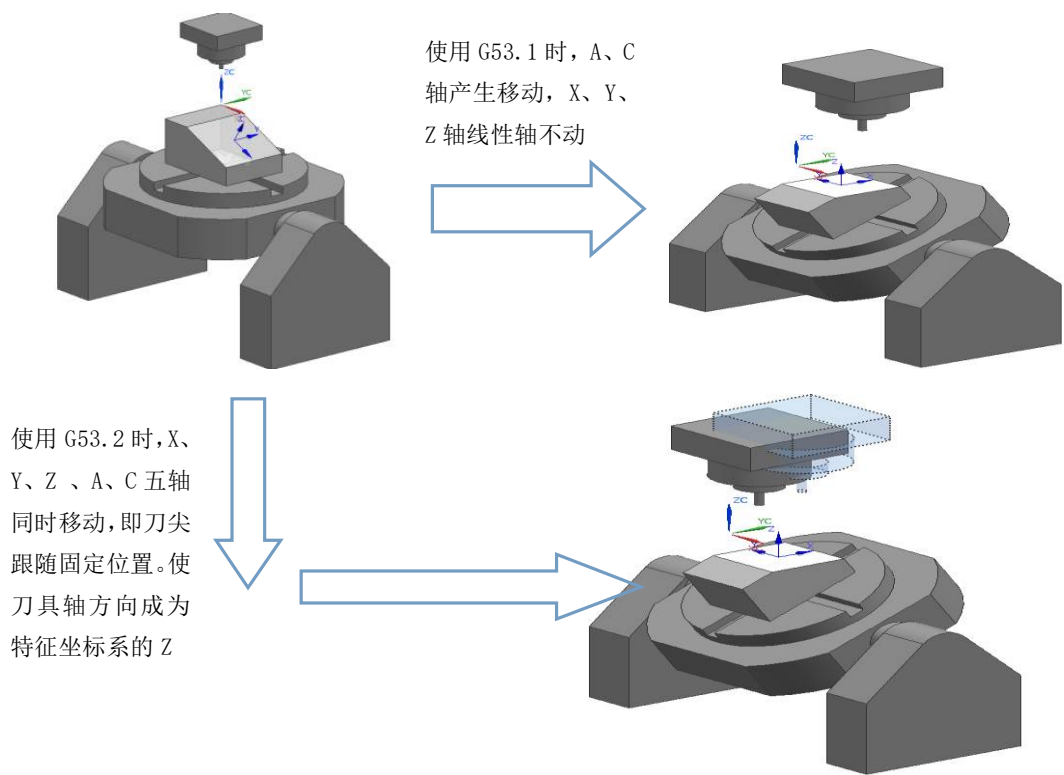


图 2-5 AC 双转台机床指令 G53.1 和 G53.2 的区别

NC程序段格式举例

G43.4 H1	开启刀具中心点控制
G68.2X30. Y-40. Z0.0 I90. J45. K-90.	G68.2指令建立特性坐标系
(G68.1 Q1)	(G68.1指令建立特性坐标系)
G53.1	刀具轴摆动到与特性坐标系Z轴平行的方向，A、C轴产生联动。
(G53.2)	(刀具轴摆动到与特性坐标系Z轴平行的方向，X、Y、Z、A、C轴产生联动)
G01 X0 Y-15 F2000	

注意：

- 1) 刀具轴方向控制与特性坐标系必须同时使用，且放在特性坐标系后面一行，即：指令 G68.1/G68.2/G68.3是建立特性坐标系，后面一行必须跟随G53.1或G53.2，以使刀具轴垂直于倾斜面。且要单段一行，否则不执行旋转角度，仅移动线性轴，此时移动的坐标值不是指定值，或报警。
- 2) 在执行倾斜面加工时，程序运行到指令G68.1/G68.2这一行时，并不产生移动，只是建立特性坐标系，程序运行到G53.1/G53.2时，才开始移动，且移动速度是继承了F值的速度。如果程序行前面仅仅只有G00，则运行参数040030 “通道的缺省进给速度”。
- 3) 在使用G53.2时，如果机床所处位置不合适，在运行这一行联动时很容易报警：“某个轴超程”。或容易刀具与工件、工作台发生干涉。
- 3) G68.2 X\*Y\*Z\*I\*J\*K\* P1/2，G68.2 指令的基础上，若到达指定倾斜面旋转轴运动方向存在多解，

P 参数可指定正反解，实现正反旋转方向的选择。

即特性坐标系刀具定向角度有正值和负值 2 组解，系统提供三种方式由用户选择：

将靠近刀具的第一个旋转轴定义为特征轴，以此特征轴为判断依据

P=0 时，特征轴沿最短路径旋转

P=1 时，特征轴沿正方向旋转

P=2 时，特征轴沿负方向旋转

### 3、自动标定

为解决手工测量精度缺陷和使用局限性，最大限度实现测量的自动化，实现旋转刀具中心点精确控制，本系统提供五轴机床关键几何尺寸自动标定功能。标定过程中，采用触发式测头和标准球，通过测量宏程序，采集数据点经过拟合，自动计算生成五轴机床结构参数，从而提高测量精度和测量效率。自动标定适用于检测ISO/CD 10791-6规范之A、B 及C 等三种机型，使用便利性高，不需要专业操作人员，即可完成RTCP参数标定。测量工具使用雷尼绍应变式测头和标准球磁力表座，硬件如图。



图 3-1 触发式测头与标准球

基于华中 8 型高档型数控的五轴机床结构参数自动测量模块，提高了测量精度，更显著提高了测量效率。自动测量流程如图所示

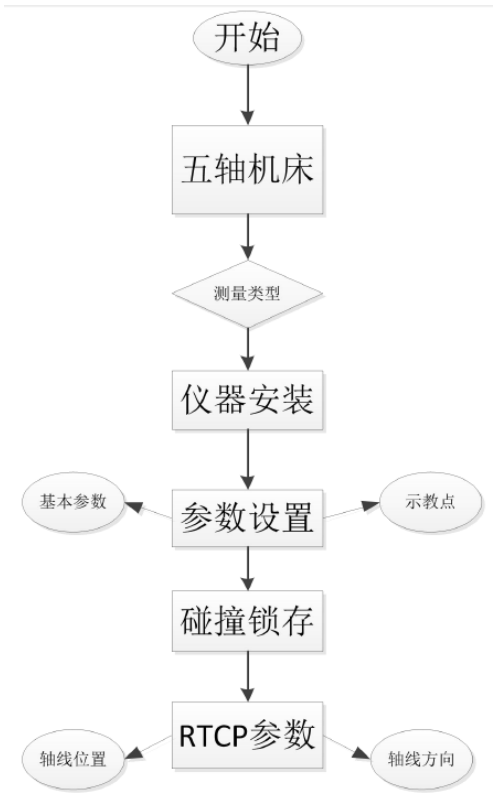


图 3-2 自动测量流程

RTCP 参数自动测量详细流程说明如下

3.1 参数设置

设置测量参数，包括测量类型、旋转轴显示顺序、旋转轴名、安全高度、定位速度、中间速度、触发速度、标准球半径、刀具长度和刀具半径 10 个基本参数以及多个主动轴示教点和多个从动轴示教点，软件界面如下图 3-3 所示。

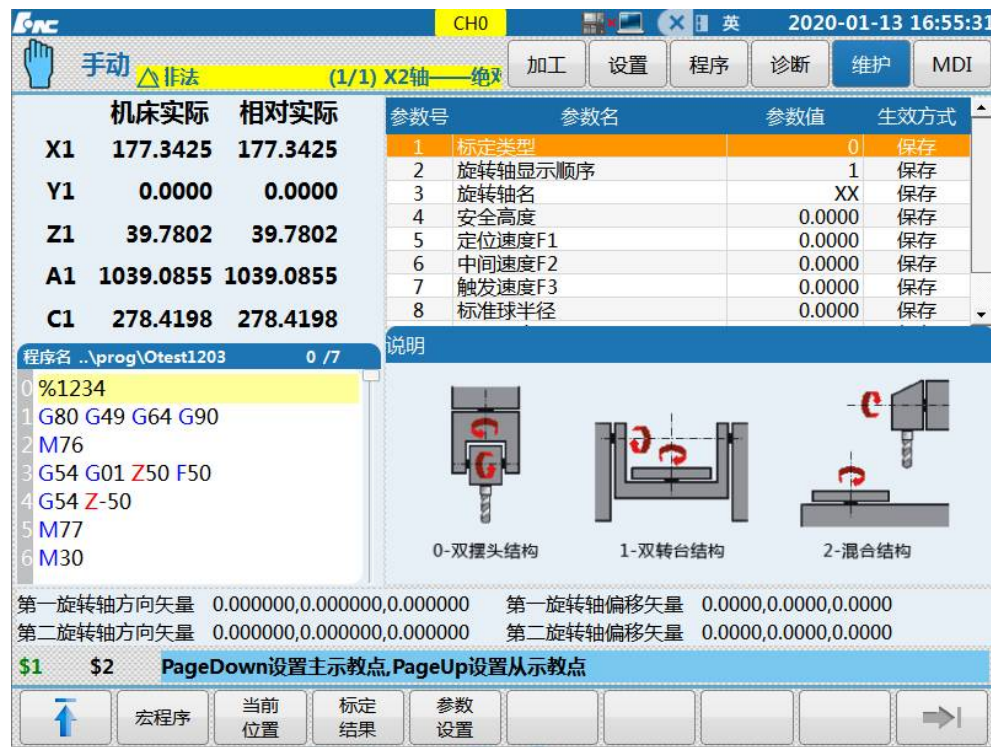


图 3-3 自动标定界面

基本参数中，“测量类型”、“旋转轴显示顺序”和“旋转轴名”为测量五轴机床属性参数；“安全高度”、“定位速度”、“中间速度”、“触发速度”为控制触发式测头与标准球碰撞过程参数；“标准球半径”、“刀具长度”和“刀具半径”为测量仪器属性参数。

3.2 示教点获取

示教点：示教点用于确定标准球在圆周上的分布位置，便于循环启动后自动找到标准球大致位置，并进行有效碰撞。采点时用手动进刀，取标准球最高点（非精确最高点，肉眼观察即可）。

不同结构机床示教点获取方式不同，测头安装在主轴，标准球在工作台时，探针刚好与球顶点相碰时，此时的机床坐标作为示教点，如图 3-4 所示；测头安装在工作台，标准球安装在主轴时，探针刚好与球底端相碰时，此时的机床坐标作为示教点，如图 3-5 所示。通过示教点这个基准点，已知标准球半径，可以控制探针与标准球表面多点碰撞并锁存坐标而不产生干涉，从而确定标准球球心机床坐标。

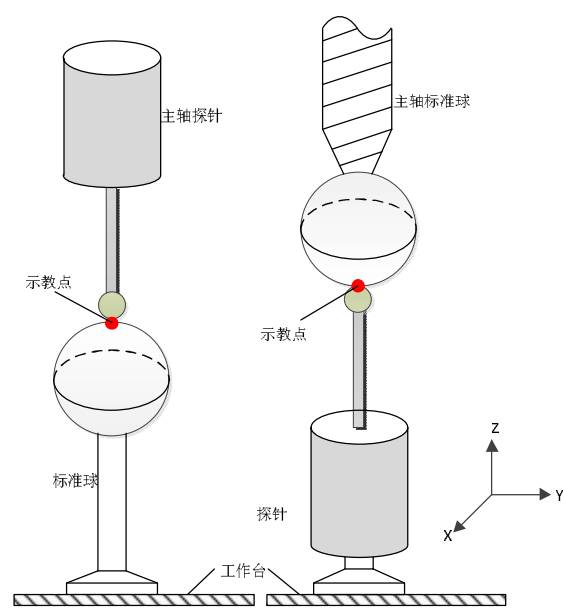


图 3-4 主轴测头示教点（左） 主轴标准球示教点（右）

对于双摆头结构五轴机床，标准球固定在主轴上随着摆头旋转，在不同的摆角处，可以获得多个示教点，如图 3-6 所示（标准球不同位置并不限制示教点个数）；对于双转台结构五轴机床，标准球固定在转台上随着转台旋转，在不同的角度，可以获得多个示教点（标准球不同位置并不限制示教点个数）。混合型结构机床摆头轴如图 3-6 选取示教点。

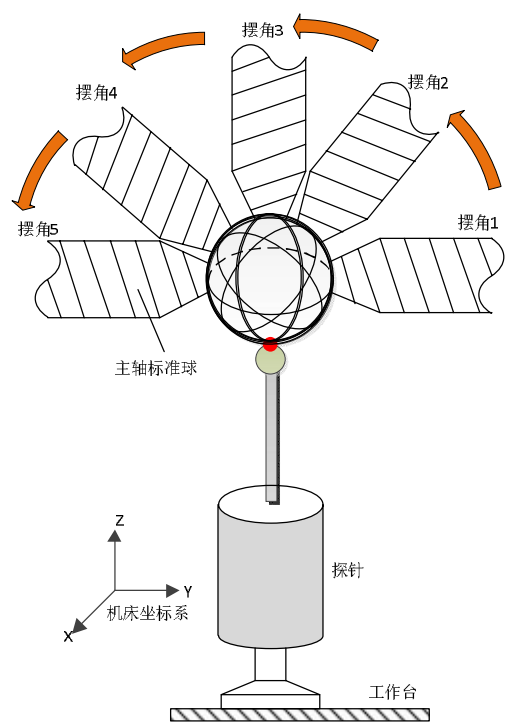


图 3-5 双摆头多个示教点



图 3-6 双转台多个示教点

示教点获取（以 C 转台为例）：标准球用磁力球座放于转台上，以手动方式进刀，估摸球最高点，并记录示教点 1。转台转动一个角度，同样方法获得示教点 2，以此类推，得到 8 个示教点。

3.3 碰撞采点

测量宏程序依据设置的基本参数、多个主动轴示教点和多个从动轴示教点坐标，控制测头探针与标准球进行碰撞并锁存碰撞点机床坐标系下的坐标 X、Y、Z，每个示教点处，测头撞标准球，采集最高点（并非严格最高点）和赤道上三个点，此四点坐标用宏变量保存，在八型二次开发平台进行计算球心坐标。在其它示教点处同样获得其它 7 个精确球心。注意：为编程方便，赤道三点以 90 度分布，标准球碰撞点示意图如下图 3-8 所示。

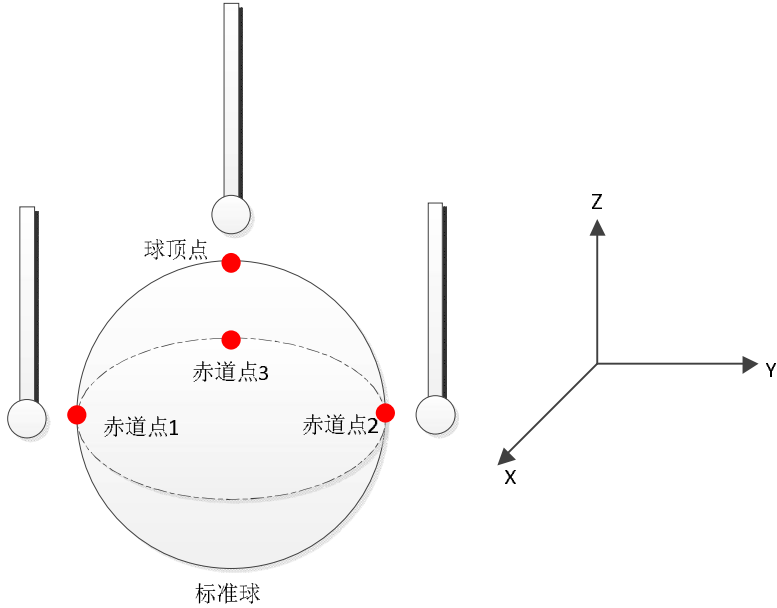


图 3-7 标准球碰撞点示意图

3.4 RTCP 参数计算



根据锁存的碰撞点坐标，计算各个示教点相对应的标准球球心坐标；使用最小二乘数据处理方法，对各个标准球球心坐标拟合主动旋转轴与从动旋转轴轴线方向与空间位置，最终得到 RTCP 参数，包括主动轴轴线方向矢量、从动轴轴线方向矢量、主动轴轴线偏移矢量和从动轴轴线偏移矢量。

具体实现过程如下：

1、雷尼绍测头安装

在 HNC-8 中开发了 M40 与 M41 指令来开启测头和关断测头，图 4-1 为测头信号接收仪器电气接线图，其中青绿色为测头状态输入，与数控系统 I/O 输入 X 点位连接，当测头发生形变时，信号接受仪器接收形变状态，青绿色端由低电平输出高电平，上升沿信号使得数控系统 G31 跳断指令激活。G31 指令激活 PLC 梯形图如图 4-2，其中 X4.5 为青绿色端接入 I/O 点位示例。

白色为测头开启输入控制端，与数控系统 I/O 输出 Y 点位连接，当数控系统 Y 点位输出高电平时，信号接收仪给测头开启信号，测头开始工作。M70 测头开启和 M71 测头关断 PLC 如图 4-3 所示。

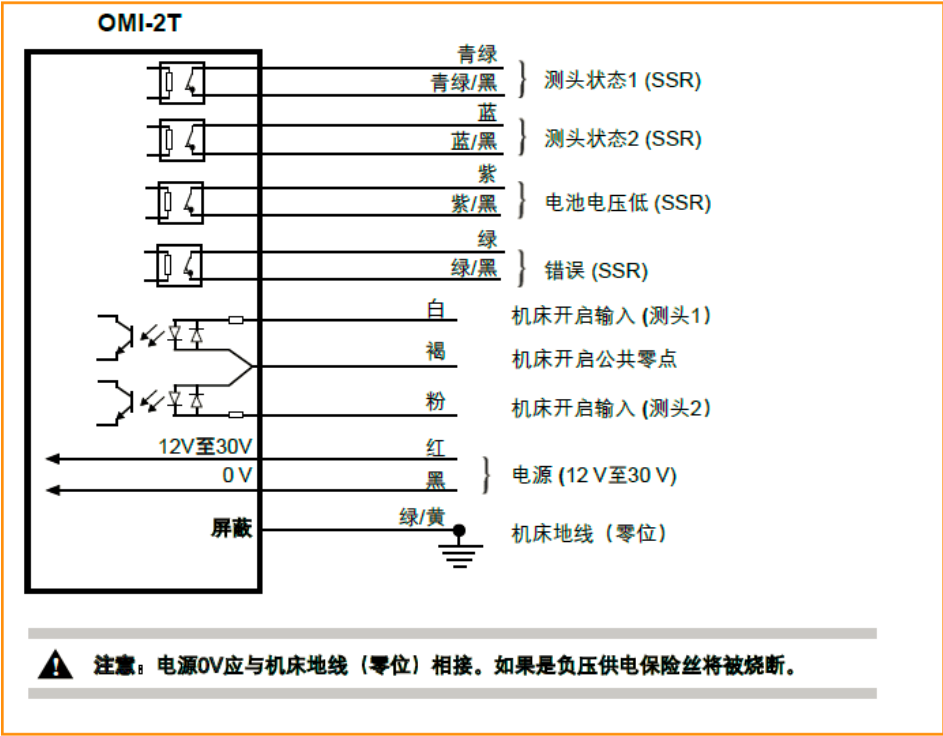


图 3-8 为测头信号接收仪器电气接线图

在 HNC-8 中增加了 M70 与 M71 指令来开启测头和关闭测头，G31 指令跳段激活。PLC 如下所示

注：G31 指令跳段激活 PLC 模块需放在 PLC1 中



图 3-9 G31 跳断功能激活

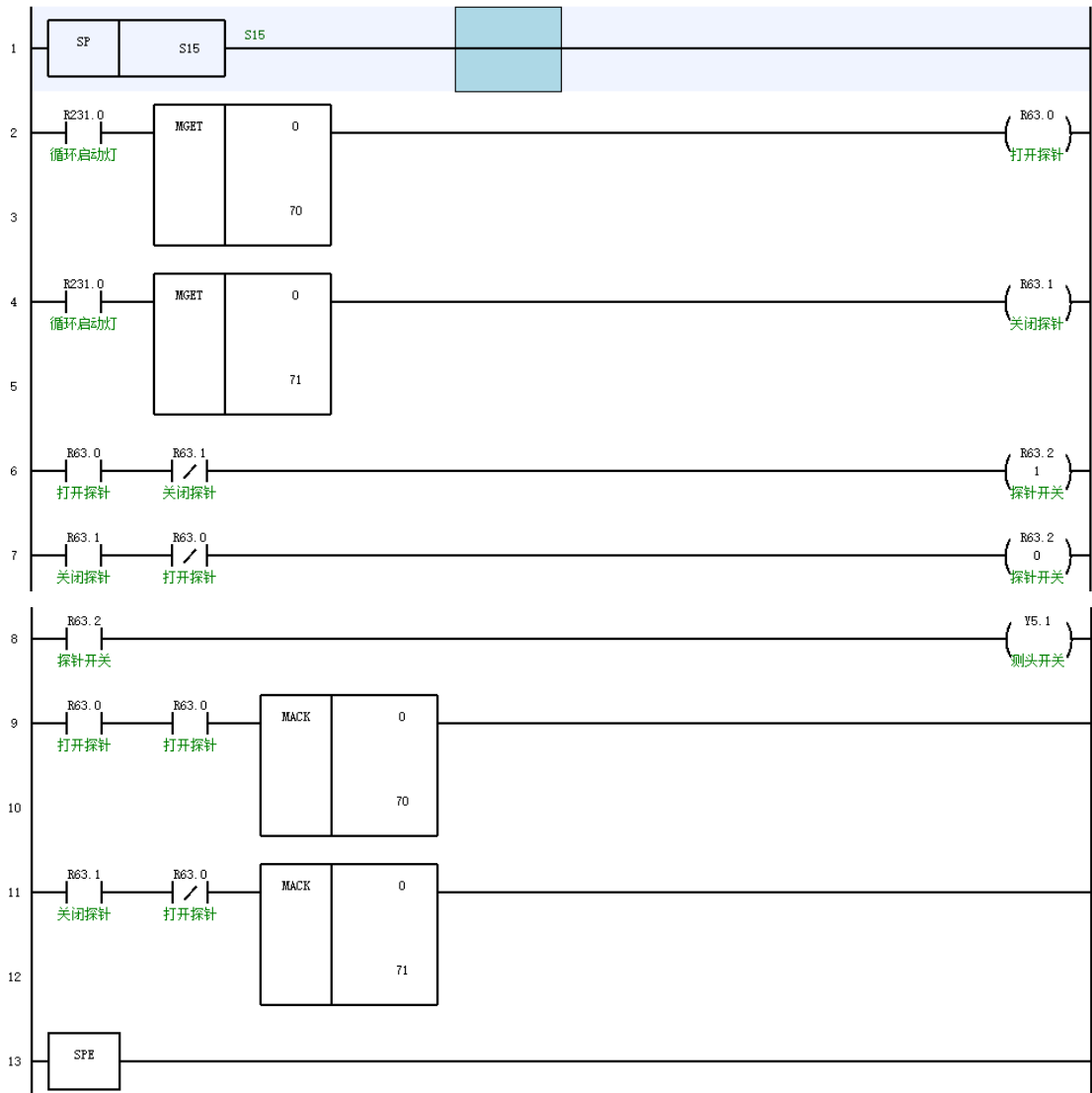


图 3-10 M70 和 M71 测头开启和关闭

2、 通过点击“设置”—“机床标定”菜单，进入机床自动标定界面



图 3-11 机床自动标定界面

软件界面包括机床坐标区、参数设置区、宏程序区、RTCP 参数区，软件功能包括“宏程序”、“当前位置”、“测量结果”和“参数导入”，区域以及功能说明如下。

区域说明：

- (1) 机床坐标区：用于显示当前机床坐标以及相对坐标；
- (2) 参数设置区：用于基本参数（测量类型、旋转轴显示顺序、旋转轴名、安全高度、定位速度、中间速度、触发速度、标准球半径、刀具长度和刀具半径）、多个主动轴示教点和多个从动轴示教点输入。
- (3) 宏程序区：用于测量宏程序显示；
- (4) RTCP 参数区：用于 RTCP 参数测量结果显示。

功能说明：

- (1) 当前位置：用于主动轴示教点和从动轴示教点机床 5 坐标获取并设入“参数设置区”对应参数表中；
- (2) 宏程序：测量软件根据“基本参数”中“测量类型”加载对应的测量宏程序，并显示在“宏程序区”；
- (3) 测量结果：宏程序控制探针与标准球碰撞并锁存碰撞点机床坐标，系统依据碰撞点坐标拟合计算 RTCP 参数，并显示在“RTCP 参数区域”；
- (4) 参数导入：测量 RTCP 参数结果设定入数控系统中生效。

3、根据实际需要在标定参数栏填入相应参数

表 标定参数解释

参数名称	参数解释
标定类型	0：表示双摆头结构 1：表示双转台 2：表示 1 个摆头和一个转台的混合结构
旋转轴显示顺序	0：第二旋转轴显示在前 1：第一旋转轴显示在前

旋转轴名	第一旋转轴在前，第二旋转轴在后
安全高度	测头以定位速度 F1 快速接近标准球后，在 Z 向应与标准球顶点保持的安全距离
定位速度 F1	测头快速接近标准球的速度
中间速度 F2	超过安全高度后与标准球产生碰撞并回退的速度，比定位速度小
触发速度 F3	中间速度回退后，继续与标准球碰撞并精度采集位置的速度，比中间速度小
标准球半径	标准球半径
刀具长度	主轴端面到测球中心的位置
刀具半径	测球半径

4、 点击“PageDown”按钮，进行第一旋转轴试教点的采集

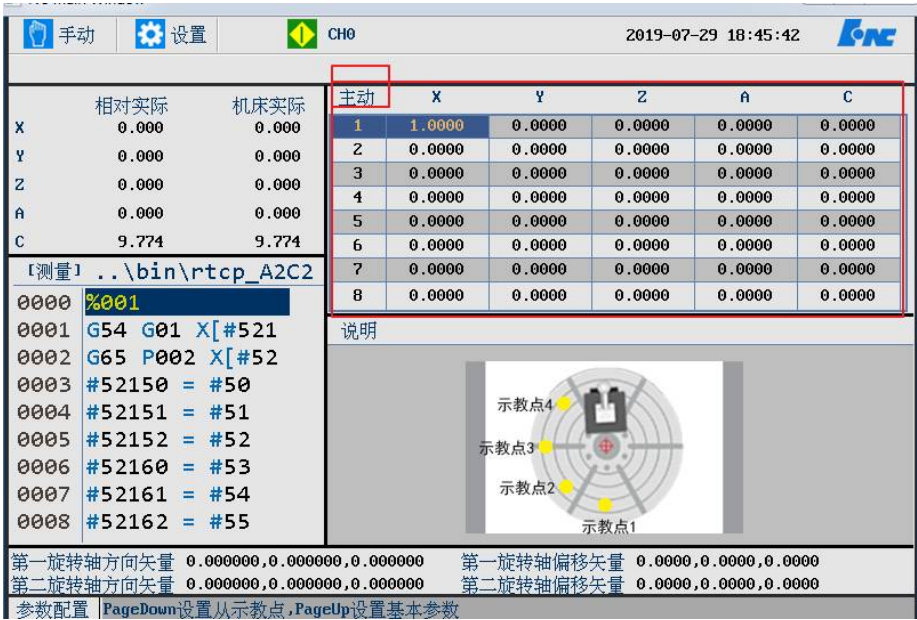


图 3-12 第一旋转轴试教点的采集

5、 点击“PageDown”按钮，进行第二旋转轴试教点的采集

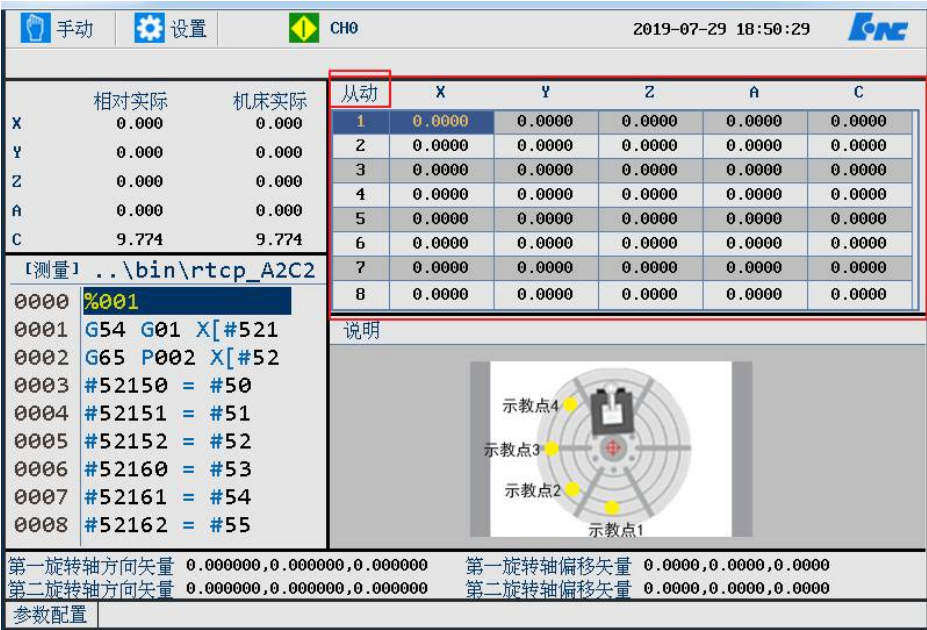


图 3-13 第二旋转轴试教点的采集

6、点击“宏程序”按钮，生成测量程序

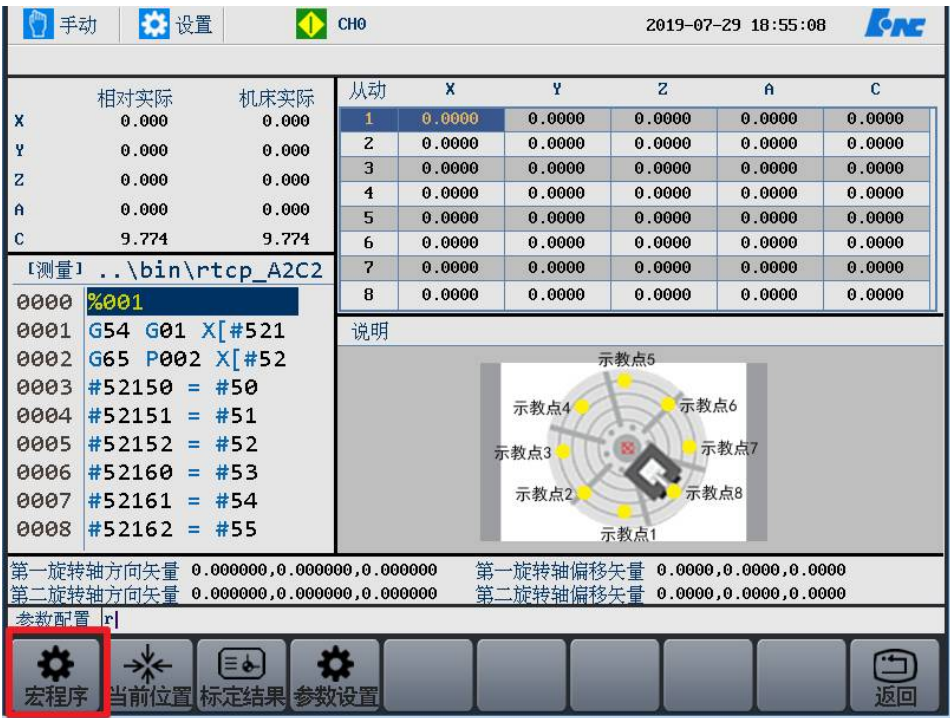


图 3-14 生成测量程序

- 7、按下“循环启动按钮”，系统自动开始测量
- 8、测量完成后点击“参数设置”，将标定结果写入系统



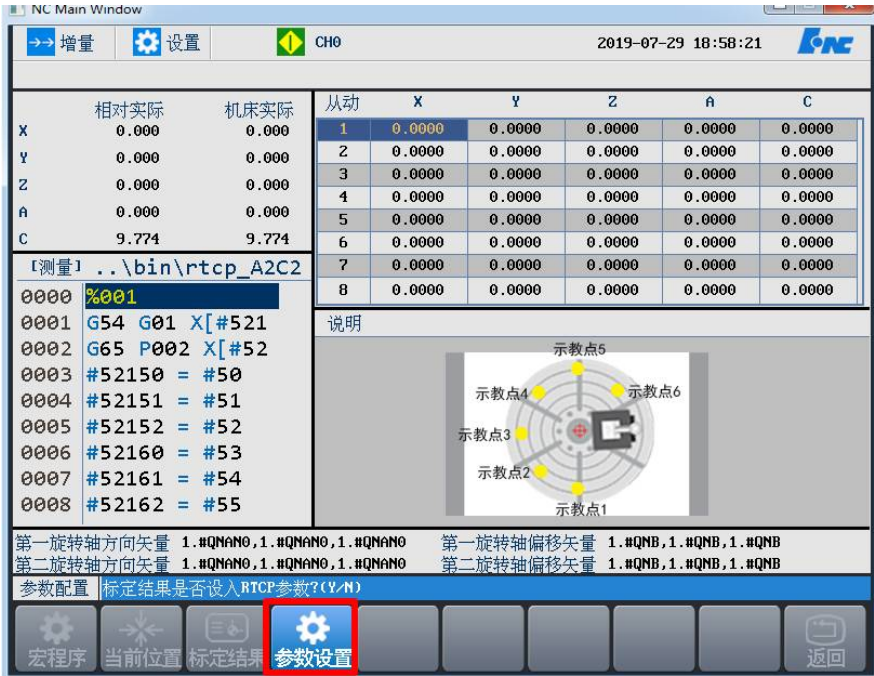


图 3-15 标定结果写入

对于五轴联动机床结构参数自动测量方法进行了大量实际五轴机床测试验证，测量结构包括双摆头、双转台和混合型，并对测量结果进行 RTCP 定位精度测试，充分验证了自动测量方法的正确性和精确性。

测试时工作台用标准球使用雷尼绍公司 $\varnothing 25\text{ mm}$  标准球，球圆度公差  $0.1\mu\text{m}$  以内、直径公差  $\pm 1\mu\text{m}$ ，满足测量精度要求，对测量结果影响可以忽略不计。主轴用标准球使用带刀柄一体成型 $\varnothing 25\text{ mm}$  标准球，千分表在机床坐标系 XY 平面指向标准球赤道，回转主轴，表针跳转  $4\mu\text{m}$  以内，标准球除具有工作台用标准球圆度与尺寸精度，还具有良好主轴同心度，满足测量精度要求，对测量结果可以忽略不计。

RTCP 参数结果精度测试时，在五轴机床主轴安装标准球，千分表与标准球赤道或者底端接触，激活 RTCP 功能，先进行从动轴全行程单轴旋转，在不同角度处暂停，记录表针跳动；再进行主动轴全行程单轴旋转，在不同角度处暂停，记录表针跳动。RTCP 参数测量精度直观反映在表针跳动上，若主动轴与从动轴单轴联动表针跳动均能控制在  $20\mu\text{m}$  以内，则认为 RTCP 参数测量结果达到高精要求。

### 3.5 AC 双转台结构自动标定案例

#### 1、标定机床

AC 双转台结构机床



图 6-2 标定机床

2、标定工具

雷尼绍 OMP-600 测头  
标准球：雷尼绍直径 25mm



图 6-3 标定工具

3、标定过程

3.1 雷尼绍测头安装

在 HNC-8 中开发了 M40 与 M41 指令来开启测头和关断测头，图 D-3 为测头信号接收仪器电气接线图，其中青绿色为测头状态输入，与数控系统 I/O 输入 X 点位连接，当测头发生形变时，信号接收仪器接收形变状态，青绿色端由低电平输出高电平，上升沿信号使得数控系统 G31 跳断指令激活。G31 指令激活 PLC 梯形图如图 D-4，其中 X4.5 为青绿色端接入 I/O 点位示例。

白色为测头开启输入控制端，与数控系统 I/O 输出 Y 点位连接，当数控系统 Y 点位输出高电平时，信号接收仪给测头开启信号，测头开始工作。M70 测头开启和 M71 测头关断 PLC 如图 D-5 所示。

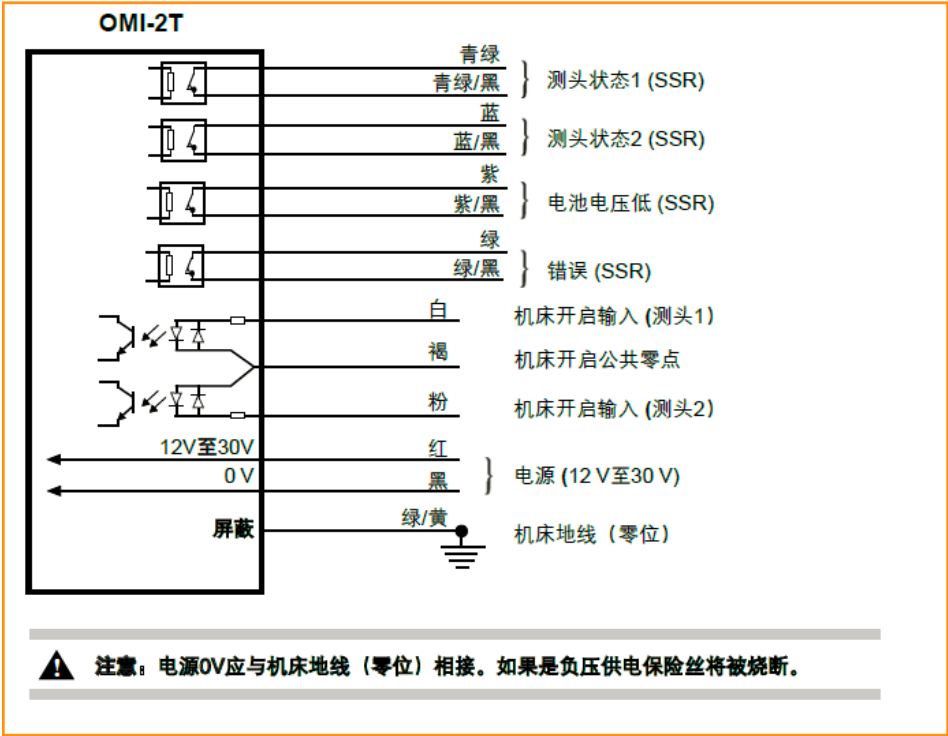
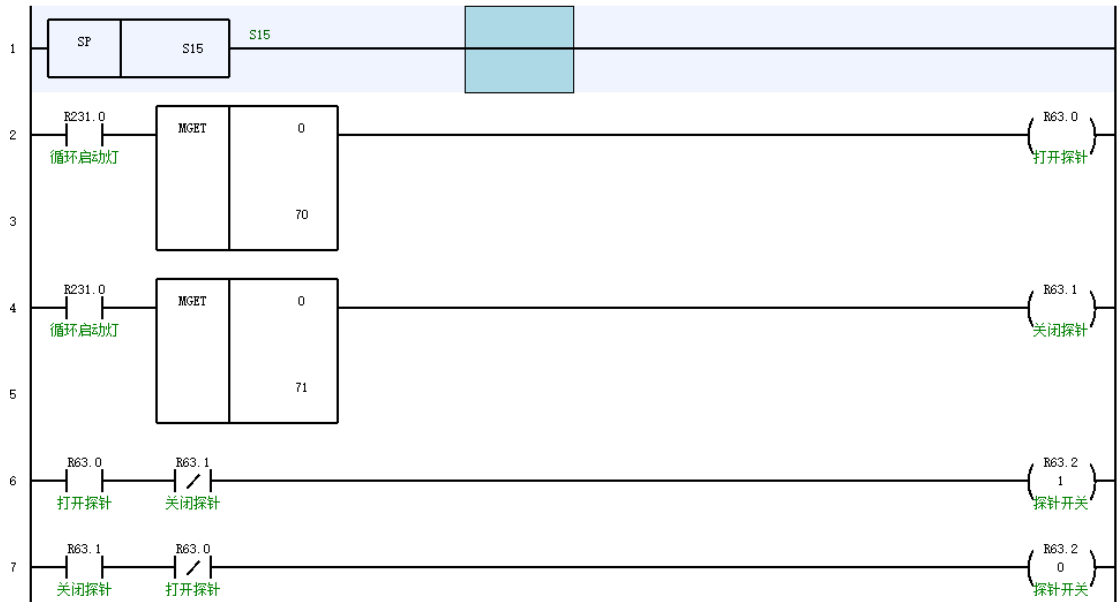


图 6-4 为测头信号接收仪器电气接线图

在 HNC-8 中增加了 M70 与 M71 指令来开启测头和关闭测头，G31 指令跳段激活。PLC 如下所示  
注：G31 指令跳段激活 PLC 模块需放在 PLC1 中



图 6-5 G31 跳断功能激活





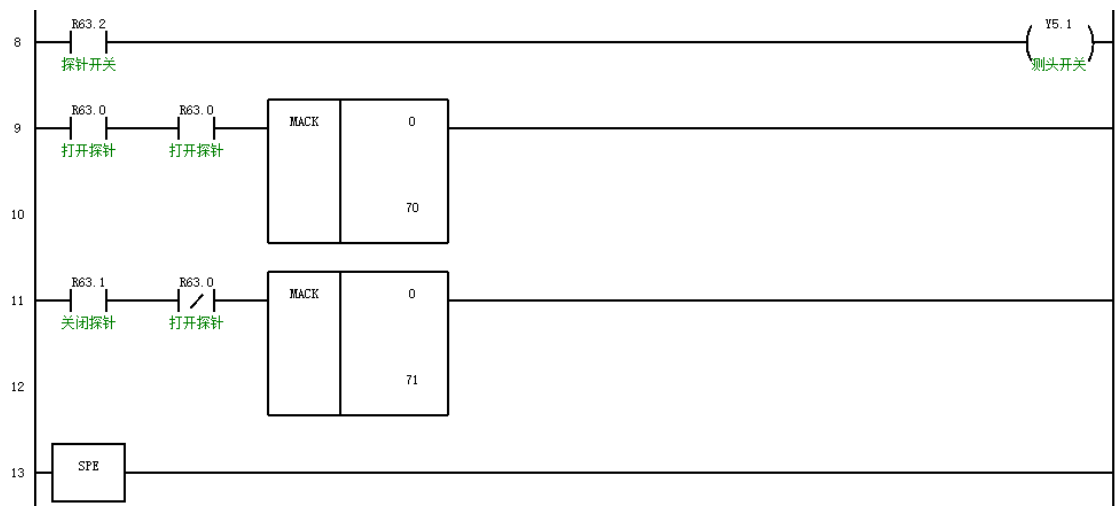


图 6-6 M70 和 M71 测头开启和关闭

3.2 G31 功能测试

标准球放于 C 转台上，探针在 X 方向慢速接近标准球表面，在快要接近时改用最小倍率接近，信号灯刚好亮时记录此时的机床坐标 X-228.1001，以这个值作为碰撞处真实机床坐标，使用以下 G 代码进行自动碰撞并返回机床锁存的坐标值。

测试 G 代码：

G54

G31 L1 G01 G90 X-229.1001 F100

G01 G91 X20

M30

坐标记录：-228.1031

真实坐标：-228.1001

结论：G31 指令正确，PLC 连接正确，测头工作状态正确

3.3 探头主轴同心校准

转动主轴千分杠杆表跳动 2um 以内

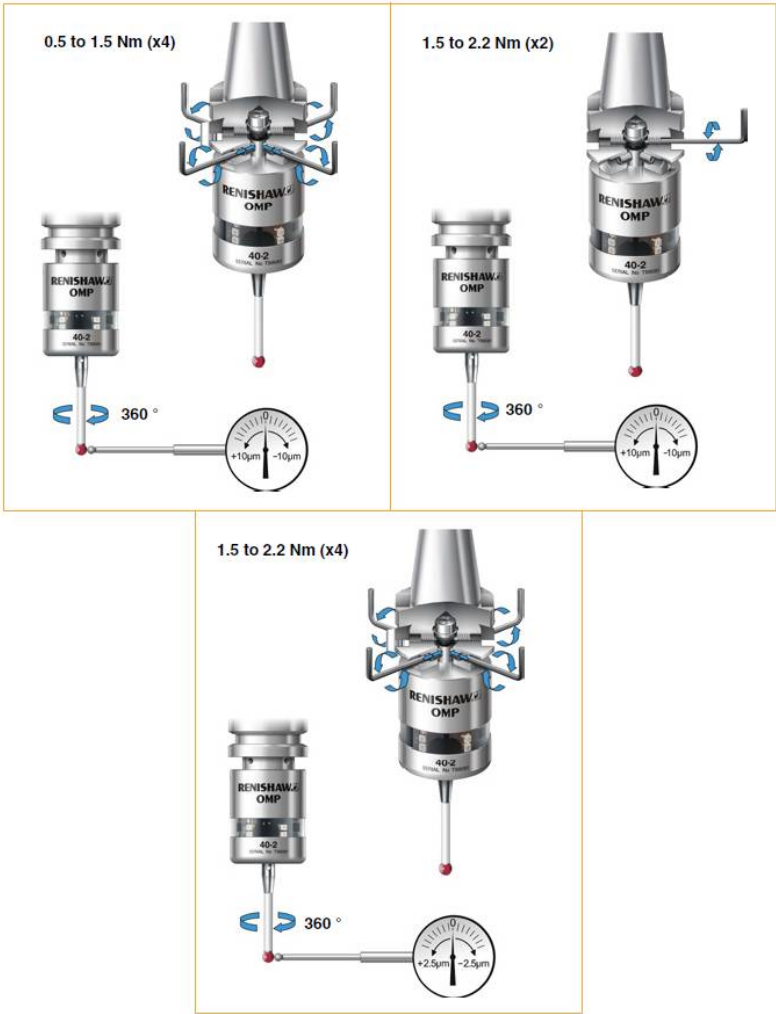


图 6-7 测头校准

3.4 自动标定测试过程

- (1) 通过点击“维护”——“机床标定”菜单，进入机床自动标定界面



图 6-8 机床自动标定界面

软件界面包括机床坐标区、参数设置区、宏程序区、RTCP 参数区，软件功能包括“宏程序”、“当前位置”、“测量结果”和“参数导入”，区域以及功能说明如下。

区域说明：

- 1) 机床坐标区：用于显示当前机床坐标以及相对坐标；
- 2) 参数设置区：用于基本参数（测量类型、旋转轴显示顺序、旋转轴名、安全高度、定位速度、中间速度、触发速度、标准球半径、刀具长度和刀具半径）、多个主动轴示教点和多个从动轴示教点输入。
- 3) 宏程序区：用于测量宏程序显示；
- 4) RTCP 参数区：用于 RTCP 参数测量结果显示。

功能说明：

- 1) 当前位置：用于主动轴示教点和从动轴示教点机床 5 坐标获取并设入“参数设置区”对应参数表中；
- 2) 宏程序：测量软件根据“基本参数”中“测量类型”加载对应的测量宏程序，并显示在“宏程序区”；
- 3) 测量结果：宏程序控制探针与标准球碰撞并锁存碰撞点机床坐标，系统依据碰撞点坐标拟合计算 RTCP 参数，并显示在“RTCP 参数区域”；
- 4) 参数导入：测量 RTCP 参数结果设定入数控系统中生效。

(2) 根据实际需要在标定参数栏填入相应参数

自动标定参数解释

参数名称	参数解释
标定类型	0：表示双摆头结构 1：表示双转台 2：表示 1 个摆头和一个转台的混合结构
旋转轴显示顺序	0：第二旋转轴显示在前 1：第一旋转轴显示在前
旋转轴名	第一旋转轴在前，第二旋转轴在后
安全高度	测头以定位速度 F1 快速接近标准球后，在 Z 向应与标准球顶点保持的安全距离
定位速度 F1	测头快速接近标准球的速度
中间速度 F2	超过安全高度后与标准球产生碰撞并回退的速度，比定位速度小
触发速度 F3	中间速度回退后，继续与标准球碰撞并精度采集位置的速度，比中间速度小
标准球半径	标准球半径
刀具长度	主轴端面到测球中心的位置
刀具半径	测球半径

测头刀具长度（标准球安装在主轴上，刀具长度指的是标准球球心到主轴端面的距离）：  
236.6080mm（三次测量）  
定位速度 2000mm/min  
中间速度 200mm/min  
触发速度 50mm/min

(3) 点击“PageDown”按钮，进行第一旋转轴试教点的采集

AC 双转台主轴安装测头，转台放置标准球。C 转台 360° 每隔 45° 取一点，A 转台受行程限制 -25° ~80° 每隔 15° 取点



图 6-9 第一旋转轴试教点的采集

(4) 点击“PageDown”按钮，进行第二旋转轴试教点的采集

AC 双转台主轴安装测头，转台放置标准球。C 转台 360° 每隔 45° 取一点，A 转台受行程限制 -25° ~80° 每隔 15° 取点



图 6-10 第二旋转轴试教点的采集

(5) 点击“宏程序”按钮，生成测量程序





图 6-11 生成测量程序

(6) 按下“循环启动按钮”，系统自动开始测量

生成标定结果

A 轴方向矢量-1.000000, 0.000000, 0.000093  
C 轴方向矢量 0.000200, 0.000010, -1.000007  
A 轴偏移矢量-0.0000, 0.1028, -0.0000  
C 轴偏移矢量-200.3605, -190.1897, -516.0118

(7) 测量完成后点击“参数设置”，将标定结果写入系统



图 6-12 标定结果写入

系统参数设置中参考结果：  
A 轴方向矢量-1， 0， 0  
C 轴方向矢量 0.0002， 0， -1  
A 轴偏移矢量 0， 0.1032， 0  
C 轴偏移矢量-200.3521， -190.1937， -516.0228

(8) RTCP 数据精度测试：

1) C 转台精度测试：

千分杠杆表表针压一圈至 0， 每转 45° 暂停 10 秒， 压表为正， 回表为负。

使用主轴标准球和千分表进行 RTCP 精度 C 轴测试。主轴安装标准球， C 转台固定安装千分表， 将表针指向标准球赤道压至一定的示数， C 轴回转联动， 并在不同转角处记录表针偏摆示数， 用来评价 C 轴 RTCP 联动定位精度的高低。

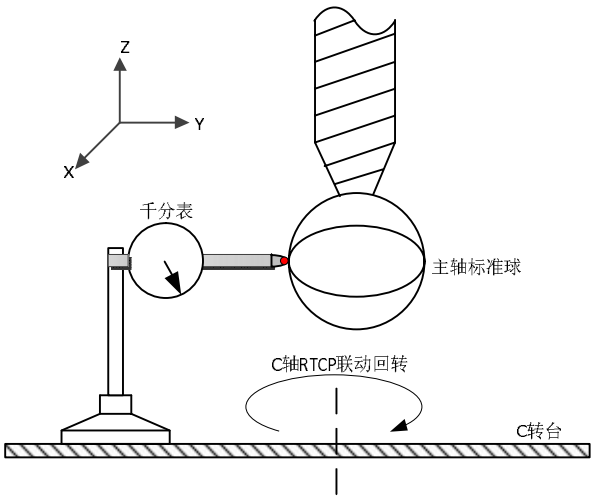


图 6-13 AC 双转台 C 轴 RTCP 精度测试

测试 G 代码：

G54  
G43.4 H1  
G01 C45  
G04 X10  
G01 C90  
G04 X10  
...

测试数据：

角度	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
示数(um)	0	-2	-10	-18	-20	-12	-14	+4	-3

2) A 转台精度测试：

千分杠杆表表针压一圈至 0， A 轴±90° 测试， 压表为正， 回表为负。

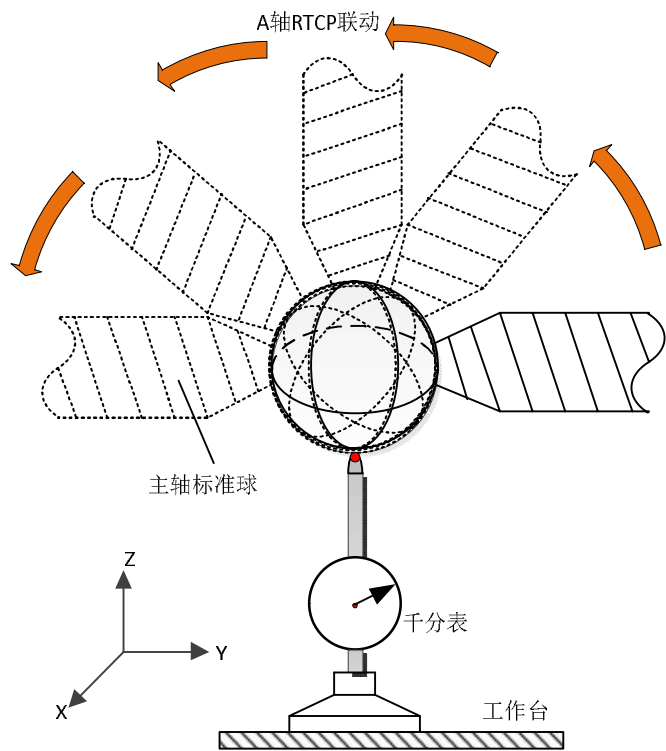


图 6-14 AC 双转台 A 轴 RTCP 精度测试

测试 G 代码:

```
G54
G43.4 H1
G01 A45
G04 X10
G01 A90
G04 X10
G01 A45
G04 X10
G01 A0
G04 X10
...
```

测试结果:

角度	0°	-25°	-10°	5°	20°	35°	50°	65°	80°
示数(um)	0	-8	+8	+14	+22	+20	+22	+24	+20

## 4、PID 功能

在工业控制中，PID 控制（比例-积分-微分控制）得到了广泛的应用，这是因为 PID 控制具有以下优点：

- 1) 不需要知道被控对象的数学模型。实际上大多数工业对象准确的数学模型是无法获得的，对于这一类系统，使用 PID 控制可以得到比较满意的效果。据日本统计，目前 PID 及变型 PID 约占总控制回路数的 90%左右。
- 2) PID 控制器具有典型的结构，程序设计简单，参数调整方便。
- 3) 有较强的灵活性和适应性，根据被控对象的具体情况，可以采用各种 PID 控制的变种和

改进的控制方式，如 PI、PD、带死区的 PID、积分分离式 PID、变速积分 PID 等。随着智能控制技术的发展，PID 控制与模糊控制、神经网络控制等现代控制方法相结合，可以实现 PID 控制器的参数自整定，使 PID 控制器具有经久不衰的生命力。

### PLC 实现 PID 控制的方法

如图所示为采用 PLC 对模拟量实行 PID 控制的系统结构框图。

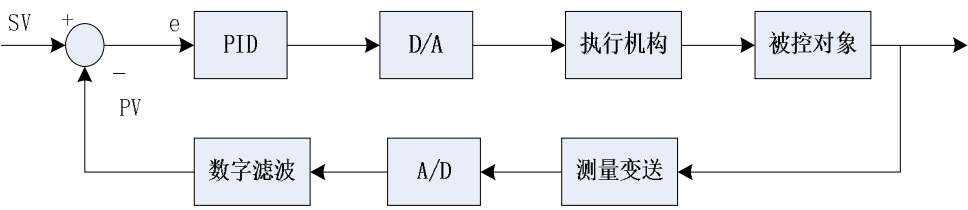


图 4-1 PLC 实现模拟量 PID 控制的系统结构框图

使用 PID 功能指令:在 PLC 标准模块中提供 PID 控制用的功能指令，即 PLC 的 PID 指令。它实际上是用于 PID 控制的子程序，与 A/D、D/A 模块一起使用，可以得到类似于使用 PID 过程控制模块的效果。

### PLC\_PID 指令

PID 指令的模块名称为 PID，如图所示操作数 [S1]、[S2]、[S3] 、[S4]。 [S1] 和 [S2] 分别用来存放目标值给定值 set 和当前测量到的采样反馈值 act，B 寄存器从 [S3] 到[S3]+14 用来存放控制参数的值，运算结果 out 存放在 [S4] 中。后面会说明每个 B 寄存器对应的变量。

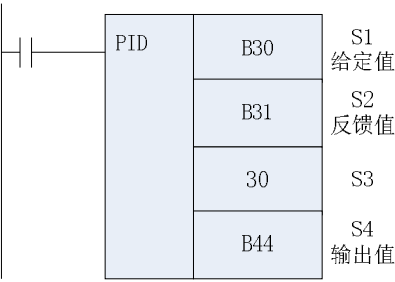


图 4-2 PID 模块示意图

### 4.1 PID 模块参数

操作数 [S1]、[S2]、[S4]均为数据寄存器 B，操作数[S3]为常数。

[S1]：目标值。

[S2]：采样值。

[S3]：占用从 [S3] 开始的 14 个 B 寄存器(不可超出 B 寄存器总数)。

[S4]：PID 输出结果值。



在 PID 运算导通开始之前，应先设定好 B 寄存器的 [S3] ~ [S3]+13 对应需要设定的参数的值。如果使用有断电保持功能的数据寄存器，不需要重复写入。每次重新使用 PID 模块前需将 B 寄存器的[S3] +11, [S3] +12 清零，下表中包含 PID 控制参数及设定：

B 寄存器	参数	意义及设定范围
[S3]	目标值 set	期望值
[S3] +1	本次采样值 act_n	本周期采样实际值
[S3] +2	上次采样值 act_l	上个周期采样值（一阶滤波使用）
[S3] +3	滤波常数 L	输入滤波常数:0~99（%）（0 时无滤波作用）
[S3] +4	采样周期 Ts	采样周期（Ts）:1~32767ms(默认设置 1ms)
[S3] +5	比例增益 kp	比例增益（Kp）:1~32767（%）
[S3] +6	积分时间 Ti	积分时间（Ti）:0~32767（0 时无积分作用）
[S3] +7	微分时间 Td	积分时间（Td）:0~32767（0 时无微分作用）
[S3] +8	输出上限 out_max	根据实际情况设定（0 时无上限,32000 对应 10V 或 20mA）
[S3] +9	输出下限 out_min	根据实际情况设定（0 时无下限，-32000 对应 -10V 或-20mA）
[S3] +10	PID 作用周期 Tc	多少 msPID 作用一次（默认为 PLC1 周期 1ms）
[S3] +11	Err_next	上次周期采样误差（需清零）
[S3] +12	Err_last	上上次周期采样误差（需清零）
[S3] +13	计时 Ntime	模块导通即开始计数
[S3] +14	PID 输出 out_s	PID 控制输出值。
[S3] +15	PID 反向输出标志	默认 0，部分需要 PID 模块反向输出时修改 1

表 参数对照表

PID 模块参数设定流程

- 1) 选定 PID 模块将使用的 14 个 B 寄存器(这里假设 PID 模块将选用寄存器 B30 到 B44)。
- 2) 在 PLC 中通过类似 MOV 的指令，给 PID 模块的目标值 B30 与本次采样值 B31 赋值，这两个值作为 PID 模块的输入(上次采样值不需设定)。
- 3) 在状态显示菜单下设置 PID 模块七个参数对应的 B 寄存器的值(B33 到 B40)，设定规则见表 1。
- 4) 在 PLC 中功能模块中添加 PID 模块，PID 四个参数从上到下分别设为: B30,B31,30,B44；首个 B 寄存器序号对应 PID 模块第三个参数[S3] 故这里[S3]设为 30。
- 5) 当 PID 模块导通时，B44 的值即为 PID 模块的输出。

说明：1) PID 指令可以同时多次使用，但是用于运算的 B 数据寄存器元件号不能重复。  
2) 控制参数的设定和 PID 运算中的数据一定按标准范围内输入，不然会发生不可知错误。

PID 原理

PID 指令采用增量式 PID 算法，控制算法中还综合使用了反馈量一阶惯性数字滤波，使该指令比普通的 PID 算法具有更好的控制效果。

PID 控制中最重要是离散化的增量式 PID 运算。PID 运算公式如下：

$$\Delta lnc= kp*((err-err\_next) + (ts/ti)*(err) + (td/ts)*(err-2*err\_next+err\_last) ) ;$$
$$Out+ = \Delta lnc$$

以上公式中：Δlnc 是本次和上一次采样时 PID 输出量的差值，out 是本次的 PID 输出量；e 和 e\_next 和 e\_last 别是本次和上一次和上上次周期采样值与期望值的误差，Kp 是比例增益，Ts 是采样周期，Ti 和 Td 分别是积分时间和微分时间。

## 4.2 PID 参数的整定

PID 控制器有 4 个主要的参数  $K_p$ 、 $T_I$ 、 $T_D$  和  $T_S$  需整定，无论哪一个参数选择不合适都会影响控制效果。在整定参数时应把握住 PID 参数与系统动态、静态性能之间的关系。

在 P（比例）、I（积分）、D（微分）这三种控制作用中，比例部分与误差信号在时间上是一致的，只要误差一出现，比例部分就能及时地产生与误差成正比的调节作用，具有调节及时的特点。比例系数  $K_p$  越大，比例调节作用越强，系统的稳态精度越高；但是对于大多数系统， $K_p$  过大会使系统的输出量振荡加剧，稳定性降低。

积分作用与当前误差的大小和误差的历史情况都有关系，只要误差不为零，控制器的输出就会因积分作用而不断变化，一直要到误差消失，系统处于稳定状态时，积分部分才不再变化。因此，积分部分可以消除稳态误差，提高控制精度，但是积分作用的动作缓慢，可能给系统的动态稳定性带来不良影响。积分时间常数  $T_I$  增大时，积分作用减弱，系统的动态性能（稳定性）可能有所改善，但是消除稳态误差的速度减慢。

微分部分是根据误差变化的速度，提前给出较大的调节作用。微分部分反映了系统变化的趋势，它较比例调节更为及时，所以微分部分具有超前和预测的特点。微分时间常数  $T_D$  增大时，超调量减小，动态性能得到改善，但是抑制高频干扰的能力下降。

选取采样周期  $T_S$  时，应使它远远小于系统阶跃响应的纯滞后时间或上升时间。为使采样值能及时反映模拟量的变化， $T_S$  越小越好。但是  $T_S$  太小会增加 CPU 的运算工作量，相邻两次采样的差值几乎没有什么变化，所以也不宜将  $T_S$  取得过小，一般设置为 1ms 即可。

## 4.3 PID 参数调节方法

PID 是比例、积分、微分的简称，PID 控制的难点不是根据现场各种使用情况，调节 PID 的各项参数以达到控制效果。参数整定的关键是正确地理解各参数的物理意义。在整定 PID 控制器参数时，可以根据控制器的参数与系统动态性能和稳态性能之间的定性关系，用实验的方法来调节控制器的参数。

为了减少需要整定的参数，首先可以采用单纯比例 P 控制器。为了保证系统的安全，在调试开始时应设置比较保守的参数，例如比例系数不要太大，以避免出现系统不稳定或超调量过大的异常情况。给出一个给定信号，根据被控量的输出波形可以获得系统性能的信息，例如超调量和调节时间。应根据 PID 参数与系统性能的关系，反复调节 PID 的参数。

如果阶跃响应的超调量太大，经过多次振荡才能稳定或者根本不稳定，应减小比例系数、如果阶跃响应没有超调量，但是被控量上升过于缓慢，过渡过程时间太长，应按相反的方向调整参数。然后若需要更好的控制性能则加入积分环节，在上述  $K_P$  基础上，先设定一个很大的积分时间常数，根据系统反应逐渐减小积分时间直到振荡，如果消除误差的速度较慢，可以适当减小积分时间，增强积分作用。反复调节比例系数和积分时间，直到稳定，PI 控制可以满足一般控制需求。但如果超调量仍然较大，可以加入微分控制，微分时间从 0 逐渐增大，反复调节控制器的比例、积分和微分部分的参数。

总之，PID 参数的调试是一个综合的、各参数互相影响的过程，实际调试过程中的多次尝试是非常重要的，也是必须的。

## 4.4 PLC 控制例图(PID 控制主轴位置)

以下为主轴位置控制中 PLC 中 PID 部分的使用方法（具体设定可参照 2.2），PID 模块的输入为 B30 与 B31，输出为 B44。（相关 B 寄存器参数调节在诊断->状态显示中）

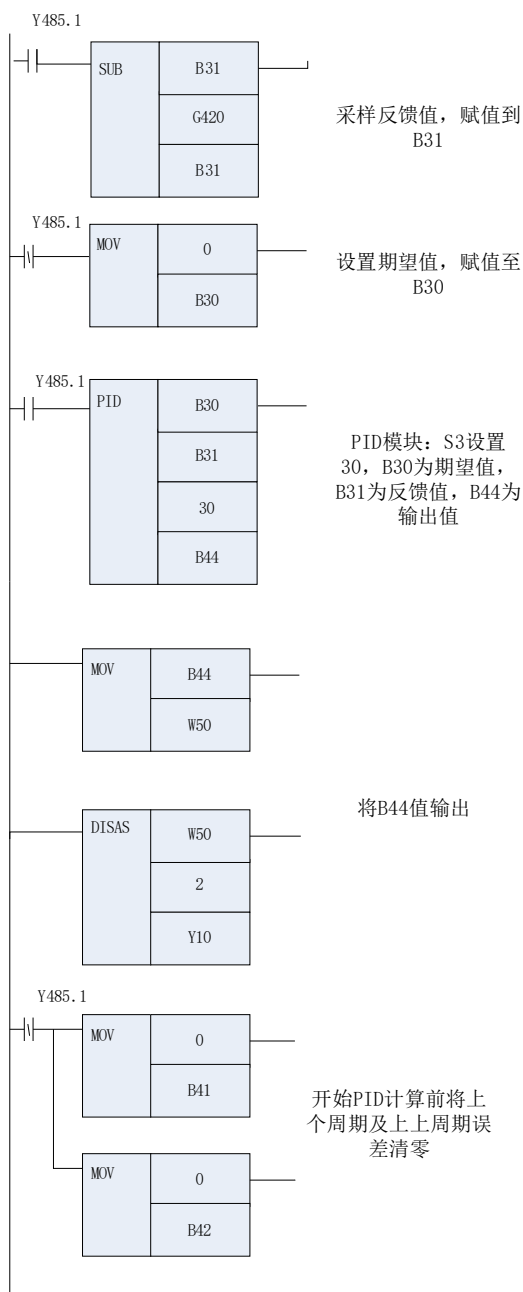


图 4-3 PID 控制例图

## 5、五轴刚性攻丝

在多轴某些应用场景下，A，B，C 轴地址都被实际轴所占用，需要用 U、V 或者 W 编程轴进行刚性攻丝，通过参数 J 来定义攻丝轴类型。

在通道参数中将需要攻丝轴的“坐标轴轴号”设置为-2

### 编程格式

```
G84 X_Y_Z_R_Q_P_F_L_H J_;
```

参数名	参数值	含义
J	1	指定 A 轴攻丝
	2	指定 B 轴攻丝
	3	指定 C 轴攻丝
	4	指定 U 轴攻丝
	5	指定 V 轴攻丝
	6	指定 W 轴攻丝

以 U 轴攻丝为例，将”040007 U 坐标轴轴号”设置为-2

NC参数

机床用户参数

+ 通道参数

+ 坐标轴参数

+ 误差补偿参数

+ 设备接口参数

数据表参数

参数号	参数名	参数值	生效方式
040000	通道名	CH0	重启
040001	X坐标轴轴号	0	重启
040002	Y坐标轴轴号	1	重启
040003	Z坐标轴轴号	2	重启
040004	A坐标轴轴号	3	重启
040005	B坐标轴轴号	-1	重启
040006	C坐标轴轴号	4	重启
040007	U坐标轴轴号	-2	重启
040008	V坐标轴轴号	-1	重启

最大值：127

默认值：-1

最小值：-3

说明：

该组参数用于配置当前通道内U轴的轴号，即实现通道进给轴与逻辑轴之间的映射。

0~127：指定当前通道进给轴的轴号。

-1：当前通道进给轴没有映射逻辑轴，为无效轴。

-2：当前通道进给轴保留给C/S轴切换，切换后在位置方式下轴类型为旋转轴。

-3：当前通道进给轴保留给C/S轴切换，切换后在位置方式下轴类型为直线轴。

\$1

参数设置成功,保存后重启生效

↑

保存

输入

置出

厂值

恢复

前值

自动

偏置

➡

图 5-1 参数设置

## 6、车铣复合功能

### 6.1 车铣转换

车铣复合功能，需要修改系统相应的参数，具体参数设置如下。

参数类型	参数号	参数名称	参数值	说明
NC 参数	000065	车刀直径显示使能	1	X 轴直径显示
机床用户参数	010001	通道 0 切削类型	2	车铣复合系统
通道参数（通道 0）	040032	直径编程使能	1	X 轴直径编程方式开
通道参数（通道 0）	040094	断电机床类型	0	机床上电后，自动选择为断电前工作方式
通道参数（通道 0）	040101	主轴上刀具数	2	--

#### 6.1.1 车铣复合切换编程指令

LATHE：车床模式切换指令

MILL：铣床模式切换指令

#### 6.1.2 车铣复合模式切换可视化界面

上方栏显示当前通道为(车削/铣削)



图 6-1 状态显示

#### 6.1.3 车铣复合图形仿真

在“加工”菜单下，点击“轨迹显示”，可进入图形仿真界面

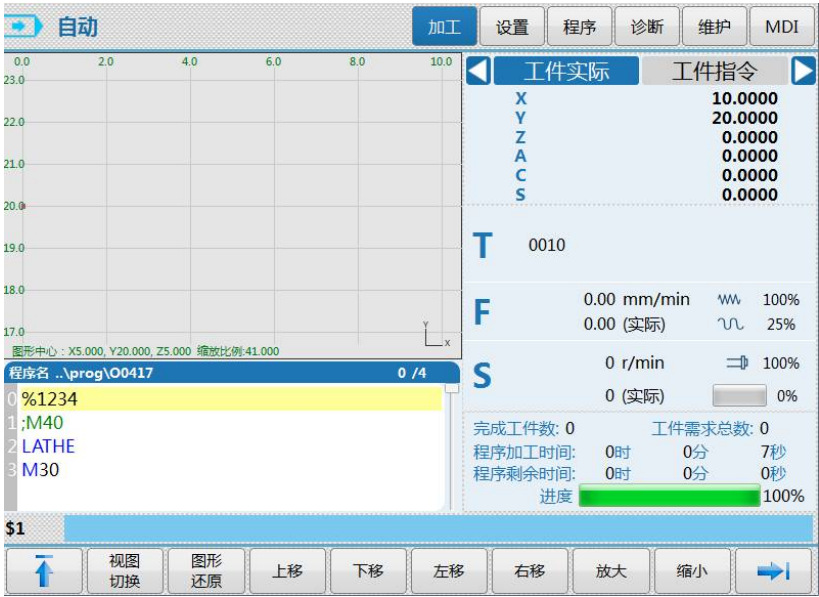


图 6-2 轨迹显示

6.1.4 机床工作方式选择

通道参数“040094 断电机床类型”

- 0: 机床上电后，自动选择为断电前工作方式（车床或铣床）。
- 1: 机床上电后，当前工作方式为铣床。
- 2: 机床上电后，当前工作方式为车床。

参数号	参数名	参数值	生效方式
040094	断电机床类型	0	重启

6.1.5 综合刀具表管理



刀具类型分为:

无刀具(无效刀具), 铣刀(有效刀具), 车刀(有效刀具), 通用刀具(有效刀具)

其中:

1. 无刀具不允许设置除刀具类型外其他值
2. 从有效刀具设为无刀具时, 清空该刀具所有信息(长度 X-刀尖方向列)同时清空该刀具磨损值
3. 铣刀生效菜单为:当前位置(会清除对应磨损值), 增量输入, 相对实际(会清除对应磨损值), 不生效的菜单不显示
4. 通用刀具生效菜单为:当前位置(会清除对应磨损值), 增量输入, 相对实际(会清除对应磨损值), 不生效的菜单不显示
5. 车刀生效菜单为:  
试切直径(会清除对应磨损值), Y 轴试切(会清除对应磨损值), 试切长度(会清除对应磨损值), 不生效的菜单不显示
6. 全部清零:会清除所有刀具信息, 包括磨损

6.1.6 主轴刀具数

1. 当通道参数“040101 主轴上刀具数”设为 1 (非 2 的情况按 1 处理)时, FST 显示与车床相同,如下图:

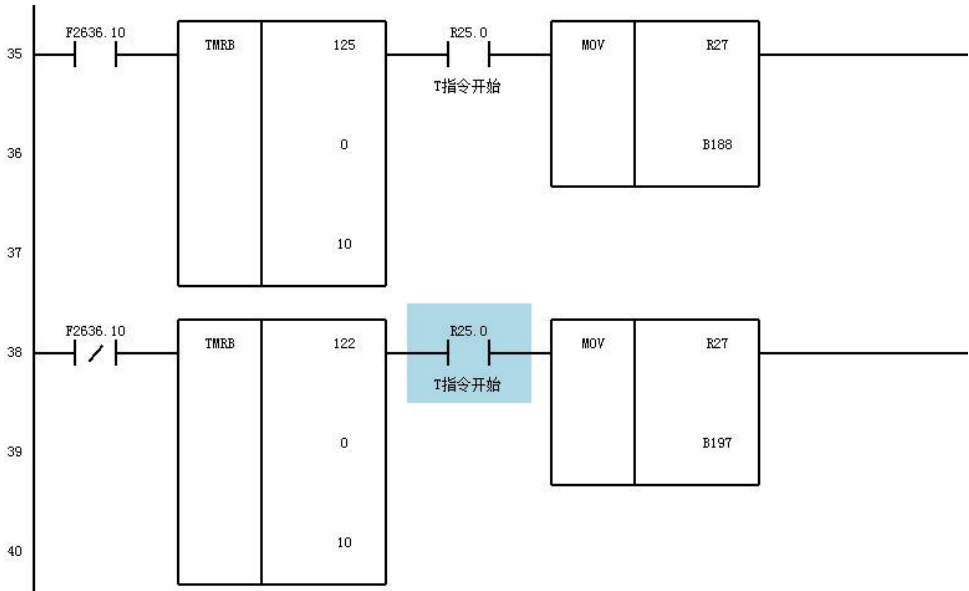


2. 当通道参数“040101 主轴上刀具数”设为 2 时,T 区域显示变换为同时显示当前车刀和铣刀,如下图:



此时主轴上刀号通过读取寄存器获得，PLC 中需要进行相应修改

寄存器	含义	
F2636.10	F2636.10=0，表示 0 号通道为铣床模式	F2636.10=1，表示 0 号通道为车床模式
B188	车床模式下，主轴当前刀具号	
B197	铣床模式下，主轴当前刀具号	



6.1.7 车铣复合刀库表显示

1. 当通道参数“040101 主轴上刀具数”设为 1(非 2 的情况按 1 处理)时，显示如下:





表中“刀号”和“加工模式”可以设值。当刀号为 0 或刀具类型为“无刀具”时，不允许设置“加工模式”。

2. 当通道参数 40101 主轴上刀具数设为 2 时，显示如下



注意事项：

- 1. 刀库表前两行分别为:刀库当前车刀信息和刀库当前铣刀信息
- 2. 表中“刀号”和“加工模式”可以设值。当刀号为 0 或刀具类型为“无刀具”时，不允许设置“加工模式”。

6.1.8 双通道车铣复合配置

1. 参数配置

通道 0 和通道 1 的参数类型都设置为车铣复合类型，0 号通道切换为铣床模式，1 号

通道切换为车床模式，具体参数设置如下。

参数类型	参数号	参数名称	参数值	说明
NC 参数	000065	车刀直径显示使能	1	X 轴直径显示
机床用户参数	010001	通道 0 切削类型	2	车铣复合系统
机床用户参数	010002	通道 1 切削类型	2	车铣复合系统
通道参数（通道 0）	040032	直径编程使能	1	X 轴直径编程方式开
通道参数（通道 0）	040094	断电机床类型	1	机床上电后，当前工作方式为铣床
通道参数（通道 0）	040101	主轴上刀具数	1	--
通道参数（通道 1）	041032	直径编程使能	1	X 轴直径编程方式开
通道参数（通道 1）	041094	断电机床类型	2	机床上电后，当前工作方式为车床
通道参数（通道 1）	041101	主轴上刀具数	1	--

2.多刀库管理

- （1）通道 0 为铣床模式，刀库中所有刀具类型为铣刀；通道 1 为车床模式，刀库中所有刀具类型为车刀
- （2）0 号通道主轴当前刀具号通过寄存器 B188 获取，1 号通道主轴当前刀具号通过寄存器 B204 获取
- （3）系统参数中刀库数据也要进行相应修改

参数类型	参数号	参数名称	参数值	说明
通道参数 （通道 0）	040125	起始刀库号	1	--
	040126	刀库数目	1	--
	040127	起始刀具号	1	--
	040128	刀具数目	24	该参数可以根据实际情况修改
通道参数 （通道 1）	041125	起始刀库号	2	--
	041126	刀库数目	1	--
	041127	起始刀具号	40	该参数要根据实际情况填写，但是必须大于通道 0 最后一把刀号
	041128	刀具数目	24	该参数可以根据实际情况修改

设置成功后通道 0 和通道 1 刀补界面显示如下



铣床通道（通道 0）

车床通道（通道 1）

6.2 立卧转换

6.2.1 功能说明

当机床为车模式使用的时候，有 2 种状态，立车状态和卧车状态。  
例如：B 摆头 C 转台五轴结构的车铣复合，主轴安装于 B 摆头上，当 B 为 0 度时为立车，B 为 90 度时为卧车。可参考如下示意图

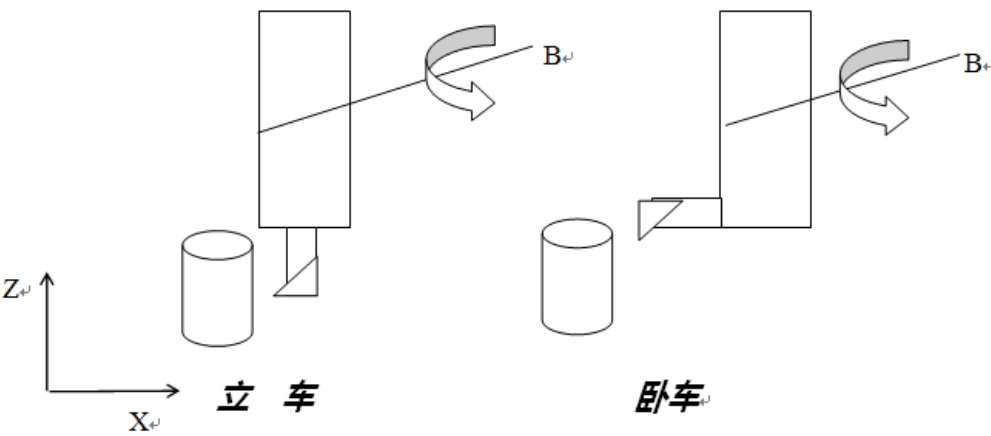


图 6-3 立卧转换

- 车床立卧转换后，满足以下特性：
- 1. 车床立卧转换后，仍然按照车床方式进行编程，轴向 Z 轴，径向 X 轴。  
通过 GETD 指令进行轴交换，Z 轴编程，实际移动 X 轴；X 轴编程，实际移动 Z 轴。
  - 2. 立卧转换后，手摇和手动按转换后的方式运动。例如轴选 X 轴，实际运动物理 Z 轴。  
立卧转换后，能够按车床使用习惯正常对刀，建立工件坐标系和刀偏表。
  - 3. 立车转卧车后，保证车刀刀尖点能够重合。机床只需要进行一次对刀，就可以完成立车和卧车两种方式下的加工。
  - 4. 界面显示部分：机床坐标系坐标轴会相互调换，工件坐标系会保持不变；

若为两列显示，并且其中一列为机床坐标系时，以机床坐标系为主。



图 6-4 坐标显示

### 2.6.2.2 车床立卧转换后，仍然按照车床方式进行编程

立卧转换后，仍然按照车床方式进行编程，轴向 Z 轴，径向 X 轴。通过 GetD 指令进行轴交换，Z 轴编程，实际移动 X 轴；X 轴编程，实际移动 Z 轴

## 功能配置

### (1) 参数修改

通道参数“040102 动态切换轴掩码”，根据需要切换的轴来，例如：XZ 轴切换，就填 0x1；YZ 轴切换，就填 0x2。



图 6-5 参数设置

(2) 用 M 代码调用固定循环, 注意 M 代码没有被占用



	参数号	参数名	参数值	生效方式
NC参数	010166	准停检测最大时间(ms)	1000	保存
机床用户参数	010169	G64拐角准停校验检查使能	0	保存
通道参数	010170	G1007对应M代码	45	保存
通道0	010171	G1008对应M代码	0	保存
通道1	010172	G1009对应M代码	0	保存
通道2	010173	G1010对应M代码	130	保存
通道3	010174	G1011对应M代码	131	保存
坐标轴参数	010175	G1012对应M代码	0	保存
逻辑轴0	010176	G1013对应M代码	0	保存
逻辑轴1				
逻辑轴2				
逻辑轴3				

最大值：1000

默认值：0

最小值：0

说明：用于设置对应的M代码，通过M代码调用用户自定义宏程序

图 6-6 参数设置

(3) 固定循环文件

a) 在固定循环文件 USERDEF.CYC 中增加 G1010 和 G1011 固定循环

1	%1010
2	;车床立卧转换（X轴和Z轴进行互换）
3	FREE X-1 Z-1
4	GETD X2 Z0
5	M49 ;配合PLC，实现手动和手摇方下，按转换后的方式运动
6	M99
7	
8	%1011
9	;车床解除立卧转换
10	FERR X-1 Z-1
11	GETD X0 Z2
12	M48 ;配合PLC，实现手动和手摇方下，按转换前的方式运动
13	M99

图 6-7 固定循环

b) 说明

FREE X-1 Z-1

该指令表示把轴 X 和轴 Z 进行释放

GETD X2 Z0

该指令表示把逻辑轴 2 映射到 X 轴上，把逻辑轴 0 映射到 Z 轴上

c) 举例

%1234

G54

M130; 立卧转换，X 轴和 Z 轴交换

M131; 解除立卧转换，

M30

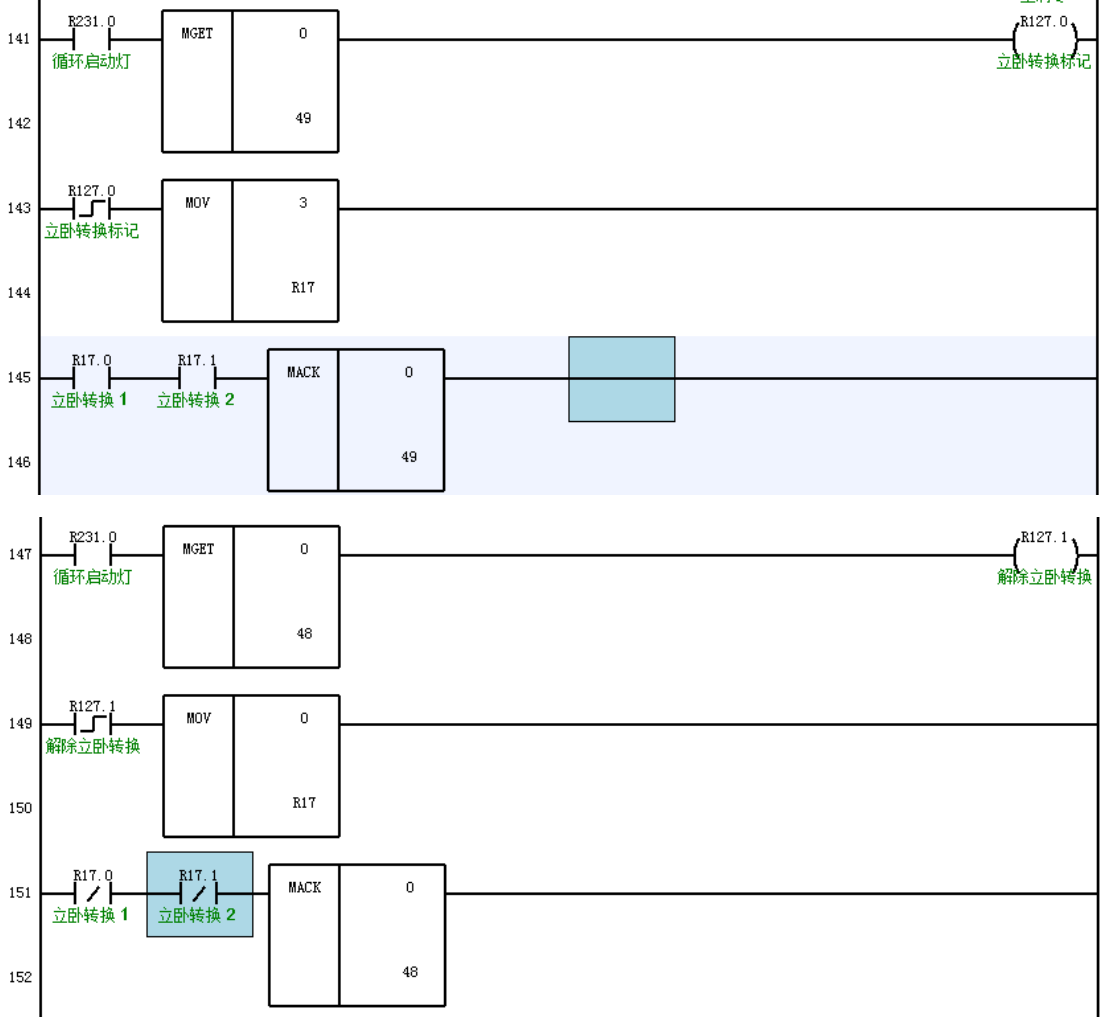
2.6.2.3 立卧转换后，手摇和手动按转换后的方式运动

立卧转换后，手摇和手动按转换后的方式运动。例如选定 X 轴，实际运动是物理 Z 轴。立卧转换后，能够按车床使用习惯正常对刀，建立工件坐标系和刀偏表。

应用举例

以 818D 面板为例子进行说明

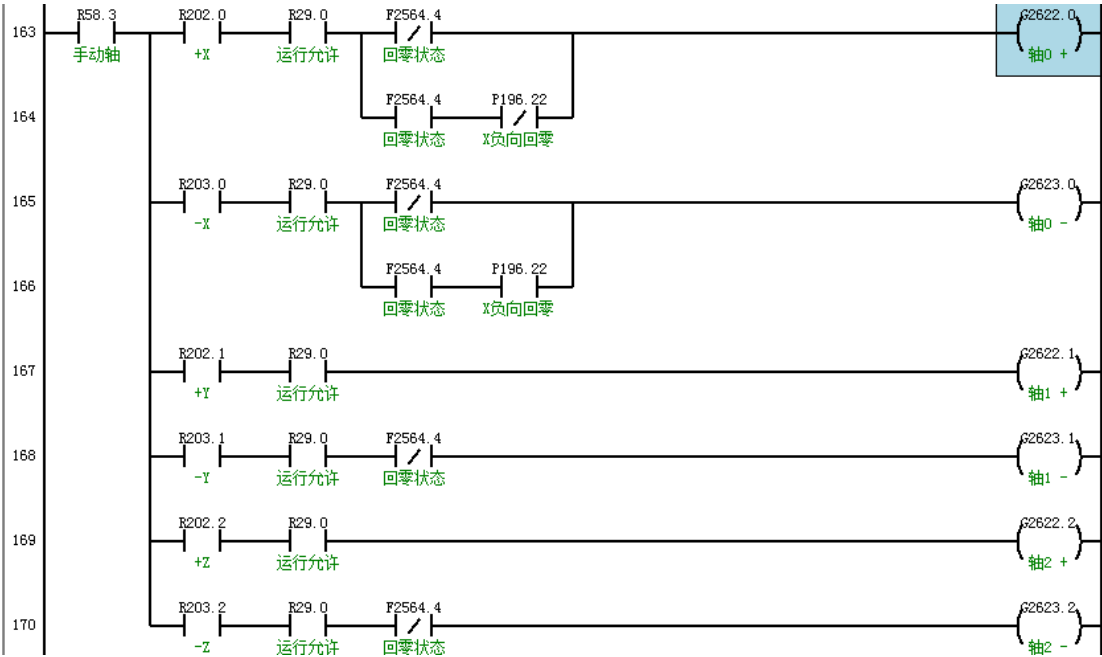
（1）在 PLC1 中加上 M48（解除立卧转换），M49 进行立卧转换



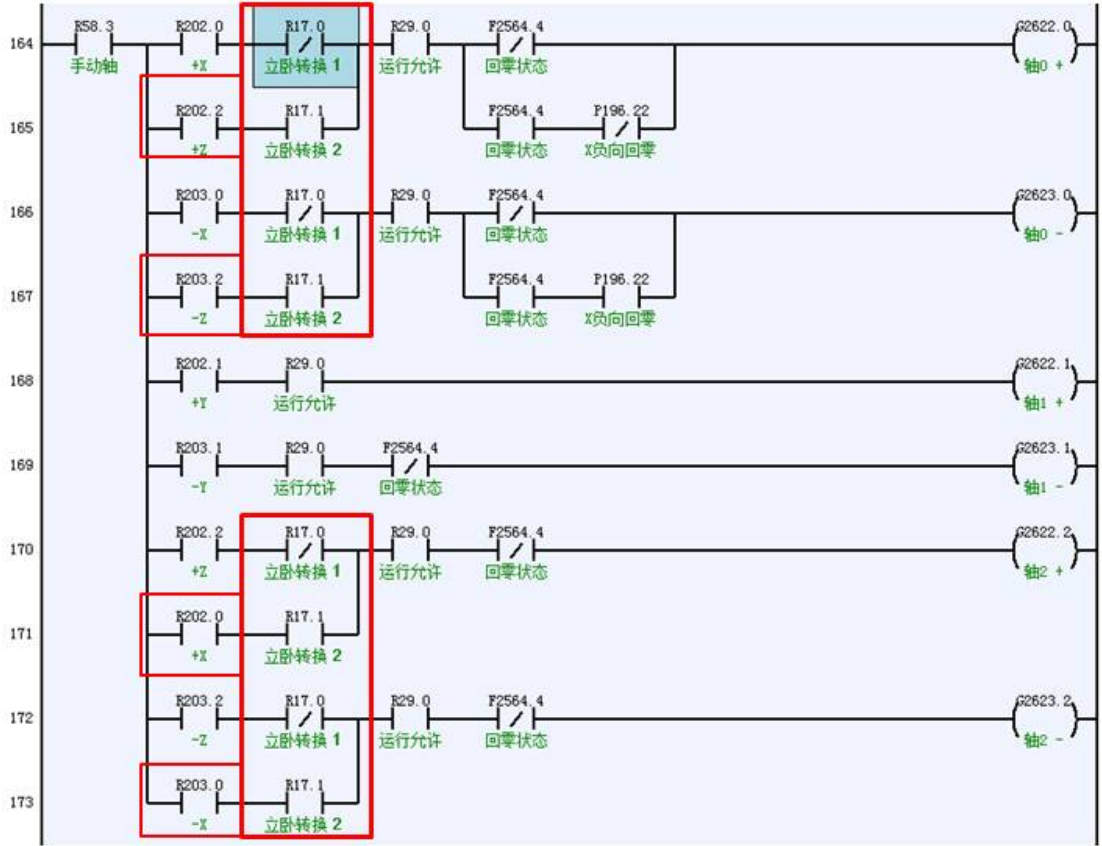
（2）手动部分修改

查找 G2622.0，修改切换条件

修改前 PLC 如下

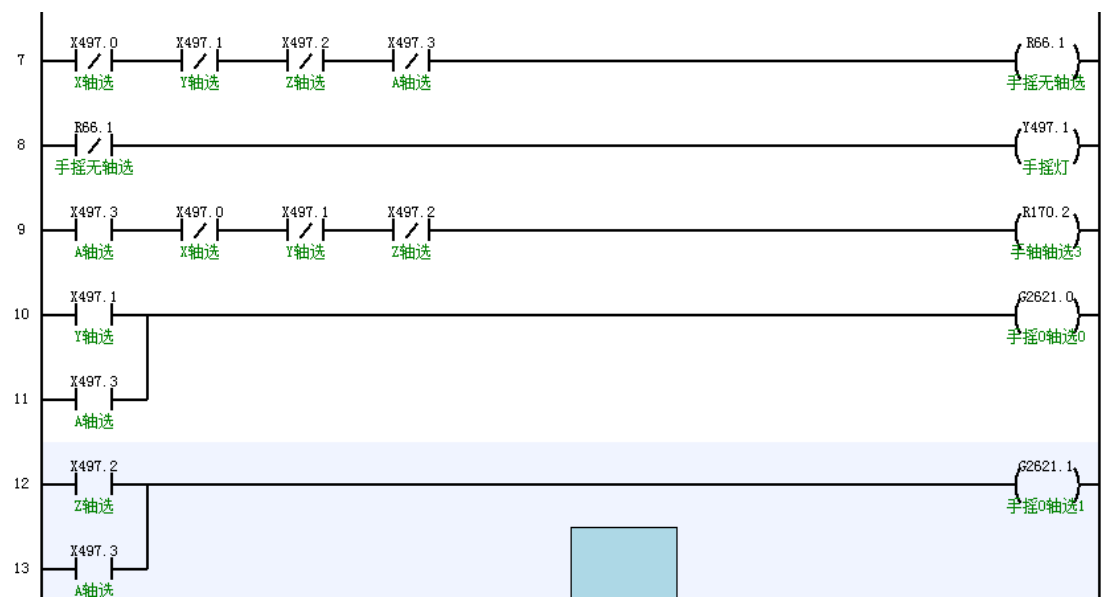


修改后 PLC 如下



(3) 手摇部分修改  
查找 G2621.0

修改前 PLC 如下



修改后 PLC 如下



### 2.6.2.4 立卧转换后，刀尖重合

立车转卧车后，保证车刀刀尖点能够重合。机床只需要进行一次对刀，就可以完成立车和卧车两种方式下的加工。

#### 1. 功能配置

- (1) 参数修改，用 M 代码调用固定循环，确保 M 代码没有被占用



	参数号	参数名	参数值	生效方式
NC参数	010169	G64拐角准停校验检查使能	0	保存
机床用户参数	010170	G1007对应M代码	45	保存
通道参数	010171	G1008对应M代码	0	保存
通道0	010172	G1009对应M代码	0	保存
通道1	010173	G1010对应M代码	130	保存
通道2	010174	G1011对应M代码	131	保存
通道3	010175	G1012对应M代码	132	保存
坐标轴参数	010176	G1013对应M代码	133	保存
逻辑轴0	010177	G1014对应M代码	0	保存
逻辑轴1				
逻辑轴2				
逻辑轴3				

最大值：1000

默认值：0

最小值：0

说明：用于设置对应的M代码，通过M代码调用用户自定义宏程序

图 6-8 参数设置

(2) 固定循环文件 USERDEF.CYC  
增加 G1012 和 G1013 用户固定循环，如果固定循环号被占用，可选用其他的。  
G1012 固定循环内容如下

```
%1012
IF [AR[#7] EQ 0] ;H 号没有定义
  G110
ENDIF
IF #7 LT 0 ;H 号小于零
  G110
ENDIF
G10 L43 P[#7] X0Y0Z0A0C0 R100
G10 L43 P[#7] X0Y0Z0A90C0 R105
#110 = #105-#100;X 偏置
#111 = #106-#101;Y 偏置
#112 = #107-#102;Z 偏置
G52 X[#110] Y[#111] Z[#112]
G80
M99
```

G1013 固定循环内容如下

```
%1013
G52 X0Y0Z0
G80
M99
```

2. 说明：  
G10 L43 P\_ X\_ Y\_ Z\_ A\_ B\_ C\_ R\_  
该指令通过给定的工件坐标位置，计算 RTCP 下的机床坐标，并写入系统变量中。其中 X、Y、Z、A、B 和 C 为给定的工件坐标，R 为写入的宏变量号，P 为刀具补偿号。  
注意事项

### 3. 例子

%1234

G54

M132 H1；卧式状态下，当前刀具号为 1，调用 G1001 完成立卧转换刀尖重合

M133；恢复为立式状态下的坐标系

M30

### 4. 注意事项

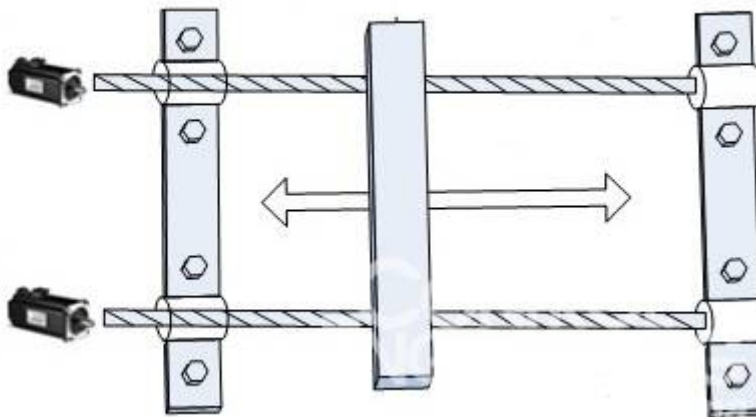
(1) 该功能在固定循环中，通过 G10 L43 指令分别计算立式和卧式下刀尖点的机床坐标位置，然后得到刀尖点偏置量，放入 G52 局部坐标系中。执行固定循环时，不做 RTCP 联动运动，在后续指令做位移运动时，系统会补偿刀尖点偏置量，保证不用重新对刀，即可进行车削加工。

(2) 车刀刀补设置。通道参数【040409】直角头双向刀长补设置为 1，将车刀刀补值填入刀补表：长度 X 和长度 Z。

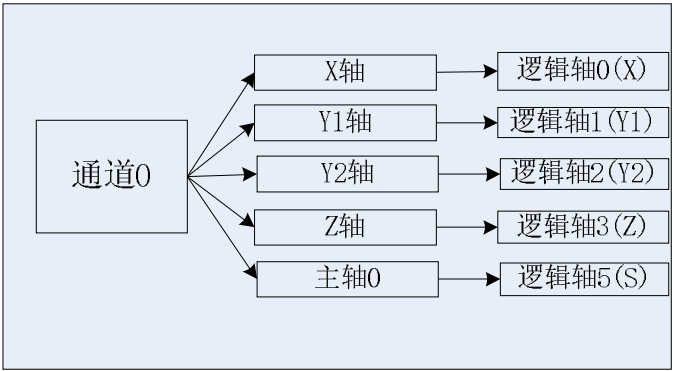
## 7、龙门同步功能

### 7.1 功能说明

龙门同步即一个机械轴需要使用最少 2 个伺服电机控制，其中一个为主动轴，其他为从动轴。一般龙门铣机构的机床经常会使用该功能。



由于同步轴的反馈方式不同（包括增量编码器、绝对编码器、带距离码的光栅尺和绝对式光栅尺），HNC-8 系统的配置也不同。以下将会对同步轴的配置进行说明。在说明中将以下图配置为例，Y 轴是由 Y1 和 Y2 两个轴组成的同步轴，Y1 轴为主动轴，Y2 轴为从动轴。



7.2 带增量编码器同步轴的调试方法

A、参数设置

1)机床用户参数设置

参数号 010050, PMC 及耦合从站总数设置为 1。从动轴只有一个 Y2 轴，所以该参数设置为 1。  
参数号 010051, PMC 及耦合从轴编号[0]设置为 2。坐标轴参数里逻辑轴 2 为从动轴，所以该参数设置 2。

	参数号	参数名	参数值	生效方式
NC参数	010045	半径补偿=半径减/加磨损	0	复位
机床用户参数	010046	半径补偿干涉控制	0	复位
通道参数	010047	半径补偿干涉检查段数	0	复位
坐标轴参数	010049	机床允许最大轴数	10	重启
误差补偿参数	010050	PMC及耦合从轴总数	1	重启
设备接口参数	010051	PMC及耦合从轴编号[0]	2	重启
数据表参数	010052	PMC及耦合从轴编号[1]	-1	重启
	010053	PMC及耦合从轴编号[2]	-1	重启
	010054	PMC及耦合从轴编号[3]	-1	重启

2)坐标轴参数设置

逻辑轴 1（主动轴），参数号 101000，显示轴名设置为 Y1。

参数号	参数名	参数值	生效方式
101000	显示轴名	Y1	保存

逻辑轴 2（从动轴），参数号 102000，显示轴名设置为 Y2。

参数号	参数名	参数值	生效方式
102000	显示轴名	Y2	保存

逻辑轴 2（从动轴），轴类型，齿轮比，轴移动速度，轴加减速等按照逻辑轴 1 的参数设置。

参数号	参数名	参数值	生效方式
102000	显示轴名	Y2	保存
102001	轴类型	1	保存
102004	电子齿轮比分子[位移](um)	10000	重启
102005	电子齿轮比分母[脉冲]	131072	重启

注：主动轴与从动轴移动方向相反时，可以修改电子齿轮比分子的正负符号。  
逻辑轴 2（从动轴），参数号 102100，轴运动控制模式，设置为 1。

102100	轴运动控制模式	1	复位
--------	---------	---	----

注：设置为 1，表示为同步轴。

逻辑轴 2（从动轴），参数号 102101，导引轴 1 编号，设置为 1。

102101	导引轴1编号	1	复位
102102	导引轴2编号	-1	复位
102103	导引轴3编号	-1	复位
102104	导引轴4编号	-1	复位
102105	导引轴5编号	-1	复位

主动轴为 Y1 轴，对应的逻辑轴为 1，所以导引轴 1 编号设置为 1，对应主动轴编号。

逻辑轴 2（从动轴），参数号 102062，柔性同步自动调整使能，设置为 0。

102062	柔性同步自动调整使能	0	复位
--------	------------	---	----

初始时要先关闭柔性同步的自动调整功能，所以该值设置为 0。

逻辑轴 2（从动轴），同步相关阈值的设定。

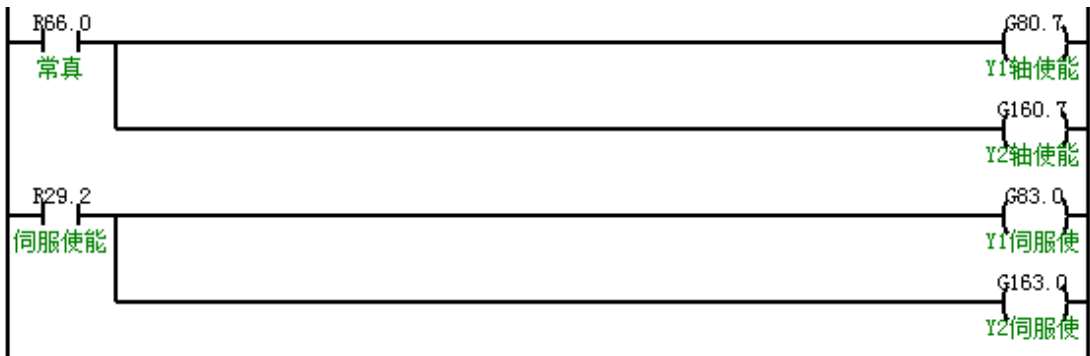
102106	同步位置误差补偿阈值(mm)	0.0000	复位
102107	同步位置误差报警阈值(mm)	0.0000	复位
102108	同步速度误差报警阈值(mm/min)	0.0000	复位
102109	同步电流误差报警阈值(A)	0.0000	复位

初始时，以上同步的阈值设置为 0，不开启检测。

参数保存，断电重启系统。

B、PLC 设置

添加从轴使能信号

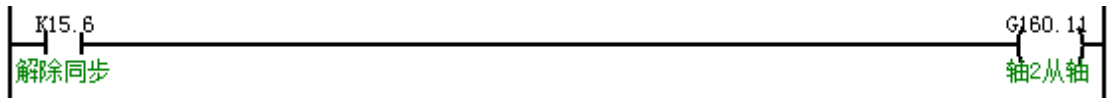


复位时，添加外部复位标志 G2960.3。



注：

不添加外部复位标志 G2960.3 时，当系统界面出现“从动轴跟踪误差过大报警提示”，复位清除不了该提示信息，只有 PLC 中添加该标志后，才能清除该提示信息。  
PLC 中添加同步轴从轴同步解除。



某些情况下，同步轴的位置需要进行校准。我们可以将同步轴的同步解除后，使用手摇进行微调。系统解除急停，切换到手摇模式，同时 PLC 中将同步轴同步功能解除。对同步轴位置进行微调，微调完成后，PLC 中开启同步功能。  
通道模式切换到回零模式，然后启动回零。  
回零成功后，打开同步轴的自动调整功能（设置 Parm102062“柔性同步自动调整使能”为 1）。

102062	柔性同步自动调整使能	1	复位
--------	------------	---	----

设置同步轴的补偿阈值和报警阈值，就完成了同步轴的配置。

102106	同步位置误差补偿阈值(mm)	0.0000	复位
102107	同步位置误差报警阈值(mm)	0.0000	复位
102108	同步速度误差报警阈值(mm/min)	0.0000	复位
102109	同步电流误差报警阈值(A)	0.0000	复位

同步位置误差报警阈值与同步电流误差报警阈值需要根据实际情况进行设置。

目前同步位置误差补偿阈值与同步速度误差报警阈值为系统备用参数，暂不用设置。

注：

- 当开启柔性同步自动调整使能后，如果同步位置误差值小于同步位置误差报警阈值时，当进行解急停操作时，从动轴电机位置会进行自动调整，保证主动轴与从动轴机床实际坐标一致；如果同步位置误差值大于同步位置误差报警阈值时，系统会报警，“同步超差”，从动轴电机位置也不会自动调整。
- 当柔性同步自动调整使能未打开，则当出现同步位置误差时，系统解急停时，同步轴位置不会进行自动调整。

设置完成后，重启系统，完成同步轴的配置。

7.3 带绝对编码器（绝对光栅尺）同步轴的配置

A、参数设置

机床用户参数设置

参数号 010050，PMC 及耦合从站总数设置为 1。从动轴只有一个 Y2 轴，所以该参数设置为 1。  
参数号 010051，PMC 及耦合从轴编号[0]设置为 2。坐标轴参数里逻辑轴 2 为从动轴，所以该参数设置为 2。



	参数号	参数名	参数值	生效方式
NC参数	010045	半径补偿=半径减/加磨损	0	复位
机床用户参数	010046	半径补偿干涉控制	0	复位
+ 通道参数	010047	半径补偿干涉检查段数	0	复位
+ 坐标轴参数	010049	机床允许最大轴数	10	重启
+ 误差补偿参数	010050	PMC及耦合从轴总数	1	重启
+ 设备接口参数	010051	PMC及耦合从轴编号[0]	2	重启
数据表参数	010052	PMC及耦合从轴编号[1]	-1	重启
	010053	PMC及耦合从轴编号[2]	-1	重启
	010054	PMC及耦合从轴编号[3]	-1	重启

逻辑轴 1（主动轴），参数号 101000，显示轴名设置为 Y1。

参数号	参数名	参数值	生效方式
101000	显示轴名	Y1	保存

逻辑轴 2（从动轴），参数号 102000，显示轴名设置为 Y2。

参数号	参数名	参数值	生效方式
102000	显示轴名	Y2	保存

逻辑轴 2（从动轴），轴类型，齿轮比，轴移动速度，轴加减速等按照逻辑轴 1 的参数设置。

参数号	参数名	参数值	生效方式
102000	显示轴名	Y2	保存
102001	轴类型	1	保存
102004	电子齿轮比分子[位移](um)	10000	重启
102005	电子齿轮比分母[脉冲]	131072	重启

注：主动轴与从动轴移动方向相反时，可以修改电子齿轮比分子的正负符号。

逻辑轴 2（从动轴），参数号 102100，轴运动控制模式设置为 1。

102100	轴运动控制模式	1	复位
--------	---------	---	----

设置为 1，表示为同步轴。

逻辑轴 2（从动轴），参数号 102101，导引轴 1 编号，设置为 1。

102101	导引轴1编号	1	复位
102102	导引轴2编号	-1	复位
102103	导引轴3编号	-1	复位
102104	导引轴4编号	-1	复位
102105	导引轴5编号	-1	复位

主动轴为 Y1 轴，对应的逻辑轴为 1，所以导引轴 1 编号设置为 1，对应主动轴编号。

逻辑轴 2（从动轴），参数号 102062，柔性同步自动调整使能，设置为 0。

102062	柔性同步自动调整使能	0	复位
--------	------------	---	----

初始时要先关闭柔性同步的自动调整功能，所以该值设置为 0。

逻辑轴 2（从动轴），同步相关阈值的设定。

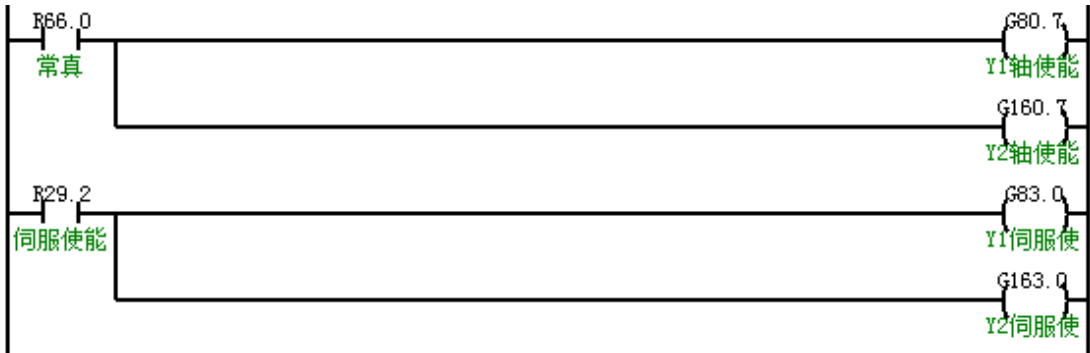
102106	同步位置误差补偿阈值(mm)	0.0000	复位
102107	同步位置误差报警阈值(mm)	0.0000	复位
102108	同步速度误差报警阈值(mm/min)	0.0000	复位
102109	同步电流误差报警阈值(A)	0.0000	复位

初始时，以上同步的阈值设置为 0，不开启检测。

参数保存，断电重启系统。

B、PLC 设置

添加从轴使能信号

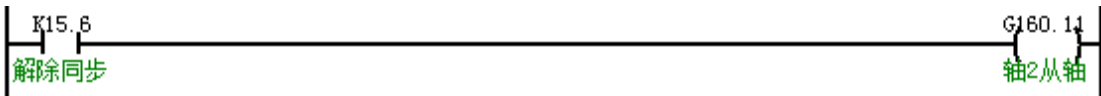


复位时，添加外部复位标志 G2960.3。



注：不添加外部复位标志 G2960.3 时，当系统界面出现“从动轴跟踪误差过大报警提示”，复位清除不了该提示信息，只有 PLC 中添加该标志后，才能清除该提示信息。

PLC 中添加同步轴从轴同步解除。



某些情况下，同步轴的位置需要进行校准。我们可以将同步轴的同步解除后，使用手摇进行微调。系统解除急停，切换到手摇模式，同时 PLC 中将同步轴同步功能解除。对同步轴位置进行微调，微调完成后，设置坐标零点。

坐标零点设置

通过“自动偏置”按键设置主动轴，从动轴零点。

点击“自动偏置”按键，出现对换框“请输入轴号:”输入 1，回车。系统对话框显示“轴 1 编码器反馈偏置量设为 XX”。继续点击“自动偏置”按键，出现对换框“请输入轴号:”输入 2，回车。系统对话框显示“轴 2 编码器反馈偏置量设为 XX”。点击保存。保存成功后，进行一次拍急停，解急停操作。

将轴移动到需要被设置为零点的位置，重新进行坐标零点设置。

坐标零点设置步骤与 3.5 操作步骤一致。

开启同步轴的自动调整功能。

102062	柔性同步自动调整使能	1	复位
--------	------------	---	----

设置同步轴的补偿阈值和报警阈值，就完成了同步轴的配置。

102106	同步位置误差补偿阈值(mm)	0.0000	复位
102107	同步位置误差报警阈值(mm)	0.0000	复位
102108	同步速度误差报警阈值(mm/min)	0.0000	复位
102109	同步电流误差报警阈值(A)	0.0000	复位

同步位置误差报警阈值与同步电流误差报警阈值需要根据实际情况进行设置。

目前同步位置误差补偿阈值与同步速度误差报警阈值为系统备用参数，暂不用设置。

注：

当开启柔性同步自动调整使能后，如果同步位置误差值小于同步位置误差报警阈值时，当进行解急停操作时，从动轴电机位置会进行自动调整，保证主动轴与从动轴机床实际坐标一致；如果同步位置误差值大于同步位置误差报警阈值时，系统会报警，“同步超差”，从动轴电机位置也不会自动调整。

当柔性同步自动调整使能未打开，则当出现同步位置误差时，系统解急停时，同步轴位置不会进行自动调整。

设置完成后，重启系统，完成同步轴的配置。

7.4 带距离码光栅尺同步轴的配置

A、机床用户参数设置

参数号 010050，PMC 及耦合从站总数设置为 1。从动轴只有一个 Y2 轴，所以该参数设置为 1。

参数号 010051，PMC 及耦合从轴编号[0]设置为 2。坐标轴参数里逻辑轴 2 为从动轴，所以该参数设置为 2。

	参数号	参数名	参数值	生效方式
NC参数	010045	半径补偿=半径减/加磨损	0	复位
机床用户参数	010046	半径补偿干涉控制	0	复位
+ 通道参数	010047	半径补偿干涉检查段数	0	复位
+ 坐标轴参数	010049	机床允许最大轴数	10	重启
+ 误差补偿参数	010050	PMC及耦合从轴总数	1	重启
+ 设备接口参数	010051	PMC及耦合从轴编号[0]	2	重启
数据表参数	010052	PMC及耦合从轴编号[1]	-1	重启
	010053	PMC及耦合从轴编号[2]	-1	重启
	010054	PMC及耦合从轴编号[3]	-1	重启

坐标轴参数设置

逻辑轴 1（主动轴），参数号 101000，显示轴名设置为 Y1。

参数号	参数名	参数值	生效方式
101000	显示轴名	Y1	保存

逻辑轴 2（从动轴），参数号 102000，显示轴名设置为 Y2。



参数号	参数名	参数值	生效方式
102000	显示轴名	Y2	保存

逻辑轴 2（从动轴），轴类型，齿轮比，轴移动速度，轴加减速等按照逻辑轴 1 的参数设置。

参数号	参数名	参数值	生效方式
102000	显示轴名	Y2	保存
102001	轴类型	1	保存
102004	电子齿轮比分子[位移](um)	10000	重启
102005	电子齿轮比分母[脉冲]	131072	重启

注：主动轴与从动轴移动方向相反时，可以修改电子齿轮比分子的正负符号。  
逻辑轴 2（从动轴），参数号 102100，轴运动控制模式设置为 1。

102100	轴运动控制模式	1	复位
--------	---------	---	----

设置为 1，表示为同步轴。

逻辑轴 2（从动轴），参数号 102101，导引轴 1 编号，设置为 1。

102101	导引轴1编号	1	复位
102102	导引轴2编号	-1	复位
102103	导引轴3编号	-1	复位
102104	导引轴4编号	-1	复位
102105	导引轴5编号	-1	复位

主动轴为 Y1 轴，对应的逻辑轴为 1，所以导引轴 1 编号设置为 1，对应主动轴编号。  
逻辑轴 2（从动轴），参数号 102062，柔性同步自动调整使能，设置为 0。

102062	柔性同步自动调整使能	0	复位
--------	------------	---	----

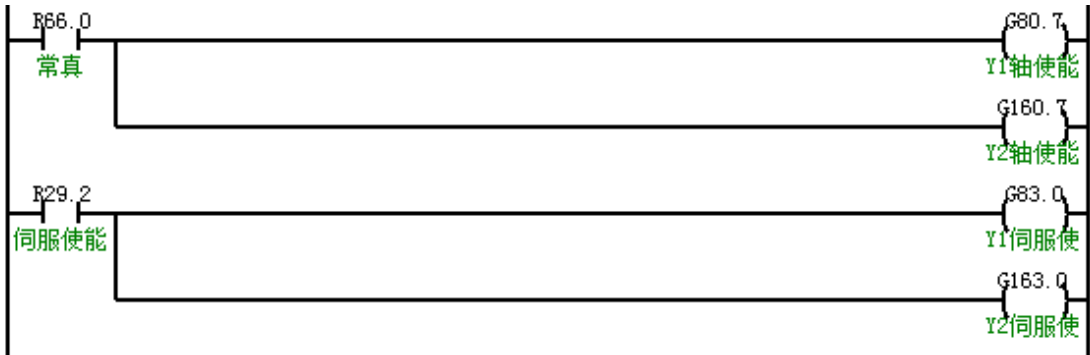
初始时要先关闭柔性同步的自动调整功能，所以该值设置为 0。  
逻辑轴 2（从动轴），同步相关阈值的设定。

102106	同步位置误差补偿阈值(mm)	0.0000	复位
102107	同步位置误差报警阈值(mm)	0.0000	复位
102108	同步速度误差报警阈值(mm/min)	0.0000	复位
102109	同步电流误差报警阈值(A)	0.0000	复位

初始时，以上同步的阈值设置为 0，不开启检测。  
参数保存，断电重启系统。

B、PLC 设置

添加从轴使能信号

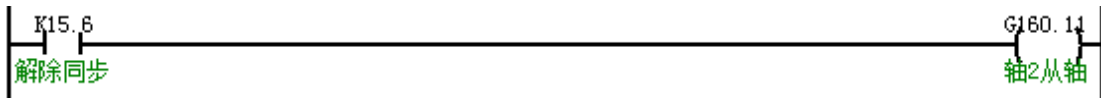


复位时，添加外部复位标志 G2960.3。



注：不添加外部复位标志 G2960.3 时，当系统界面出现“从动轴跟踪误差过大报警提示”，复位清除不了该提示信息，只有 PLC 中添加该标志后，才能清除该提示信息。

PLC 中添加同步轴从轴同步解除。



某些情况下，同步轴的位置需要进行校准。我们可以将同步轴的同步解除后，使用手摇进行微调。系统解除急停，切换到手摇模式，同时 PLC 中将同步轴同步功能解除。对同步轴位置进行微调，微调完成后，启动回零。

坐标零点设置

回零成功后，将同步轴移动到需要设置为零点的位置。将机床实际位置设置到参考点坐标值中。

机床指令		机床实际
Y <sub>1</sub> ⊕	22.7500 毫米	22.7499
Y <sub>2</sub> ⊕	17.1500 毫米	17.1500
102012 编码器反馈偏置量 (mm)	17.1500	重启

开启同步轴的自动调整功能。

102062 柔性同步自动调整使能	1	复位
-------------------	---	----

✧ 设置同步轴的补偿阈值和报警阈值，就完成了同步轴的配置。

102106	同步位置误差补偿阈值(mm)	0.0000	复位
102107	同步位置误差报警阈值(mm)	0.0000	复位
102108	同步速度误差报警阈值(mm/min)	0.0000	复位
102109	同步电流误差报警阈值(A)	0.0000	复位

同步位置误差报警阈值与同步电流误差报警阈值需要根据实际情况进行设置。

目前同步位置误差补偿阈值与同步速度误差报警阈值为系统备用参数，暂不用设置。

注：

- 当开启柔性同步自动调整使能后，如果同步位置误差值小于同步位置误差报警阈值时，当进行解急停操作时，从动轴电机位置会进行自动调整，保证主动轴与从动轴机床实际坐标一致；如果同步位置误差值大于同步位置误差报警阈值时，系统会报警，“同步超差”，从动轴电机位置也不会自动调整。
- 当柔性同步自动调整使能未打开，则当出现同步位置误差时，系统解急停时，同步轴位置不会进行自动调整。

设置完成后，重启系统，完成同步轴的配置。

7.5 其他说明

伺服适用版本

DSP: HSV180UD\_V283\_19.11.6

FPGA: FPGA\_4CE22\_V4662

主要功能改进

- 增加了龙门同步轴同步误差补偿功能，用于减小龙门同步轴动态运行过程中（特别是反向时）的同步误差；
- 增加了龙门同步轴报警同步处理功能，用于单轴出现报警时，实现双轴同步停车，防止龙门同步轴机械位置出现大幅偏差，造成机械扭伤的情况。

伺服相关参数

PB64 同步功能控制字 1

个位	轴同步功能使能	0: 同步功能禁止	1: 同步功能允许
十位	轴类型选择	0: 主动轴	1: 从动轴
百位	主从同步模式	0: 速度跟随	1: 力矩跟随
千位	力矩偏差检测开关	0: 力矩偏差检测开启	1: 力矩偏差检测关闭
万位	从动轴指令取反	0: 从动轴指令不取反	1: 从动轴指令取反

PB65 同步功能控制字 2

个位	龙门轴同步补偿功能开关
0: 同步补偿功能禁止	1: 同步补偿功能允许
十位	龙门轴同步报警功能开关
0: 同步报警功能禁止	1: 同步报警功能允许

PB66 龙门轴同步误差补偿系数/主从轴电流补偿系数

参数设置说明

1. 同步误差补偿功能

使用同步误差补偿功能的时候，龙门轴的主动轴和从动轴之间通过 XS1 接口 485 通道进行数据交换，在从动轴一侧对同步轴之间的同步误差进行补偿。

（1）主动轴参数设置：

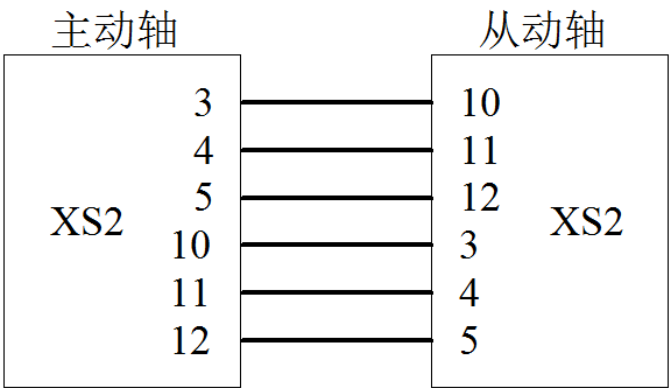
PB64 个位设置为 1，百位设置为 0，

PB65 个位设置为 1；

（2）从动轴参数设置：



具体接线定义如下：



参数 PB64 无需设置，参数 PB65 的十位设置龙门轴同步报警功能开关，为 1 开启同步报警功能。

通过参数 PB45，选择伺服报警时的停车方式。

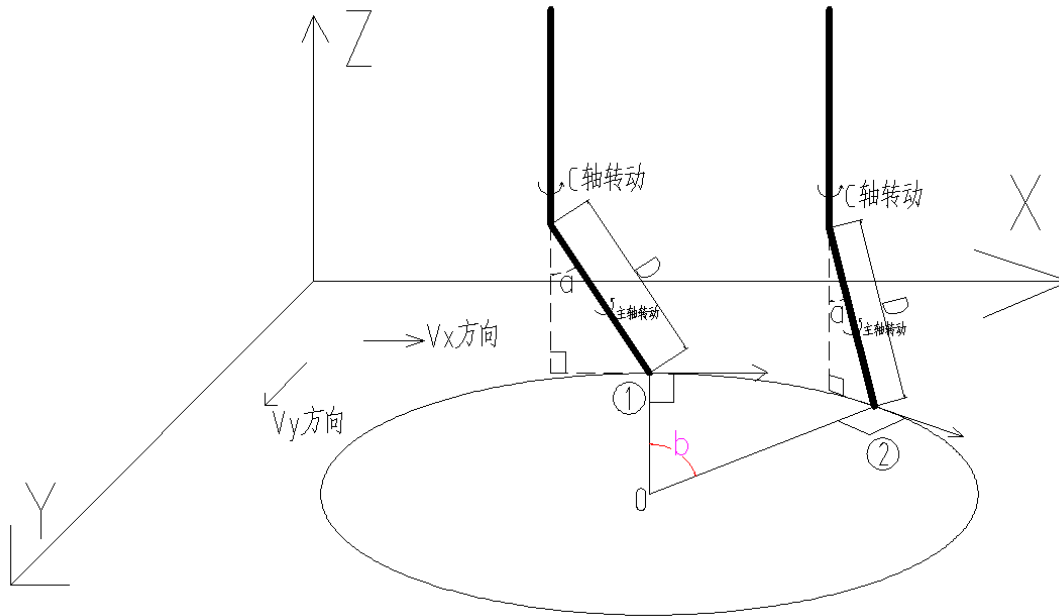
**注意：龙门轴的两个同步轴的参数 PB65 和 PB45 要保持一致。**

- 当其中一个同步轴出现紧急报警时，伺服内部直接关闭 PWM 信号，断掉使能，电机自由滑行。另外一个同步轴通过 XS2 接口接收到报警信息后，报 483 警告，也关闭 PWM 信号，断掉使能，电机自由滑行。
- 当其中一个同步轴遇到一般报警时，另外一个同步轴通过 XS2 接口接收到报警信息后，报 483 警告，两个轴都按照 PB45 设置的方式来停车。

## 8、切线跟随功能

### 8.1 功能说明

按照引导轴确定的轨迹的切线，跟随轴跟踪运行。由此一个刀具可以调整到与轮廓平行。通过 TANGON 指令中编程的角度，刀具可以相对于切线定位



### 8.2 功能指令

激活切向跟随：

tangon P\_

P: 0 为 A 轴，1 为 B 轴， 2 为 C 轴

取消切向跟随：

tangoff P\_

P: 0 为 A 轴，1 为 B 轴， 2 为 C 轴

### 8.3 参数说明

引导轴等待【134】：设为 1 的时候，程序段过渡处旋转轴先定位到目标位置，然后引导轴再运动。推荐设置为 1。

随动轴轴号【135】：2 为 C 轴跟随 XY 轴切线

切线跟随偏差角【136】：C 轴指向 X 轴正方向时的角度，系统返回的切线角度为 X 轴正方向，设置此参数得到 C 轴坐标与 X 轴正方向的偏差。

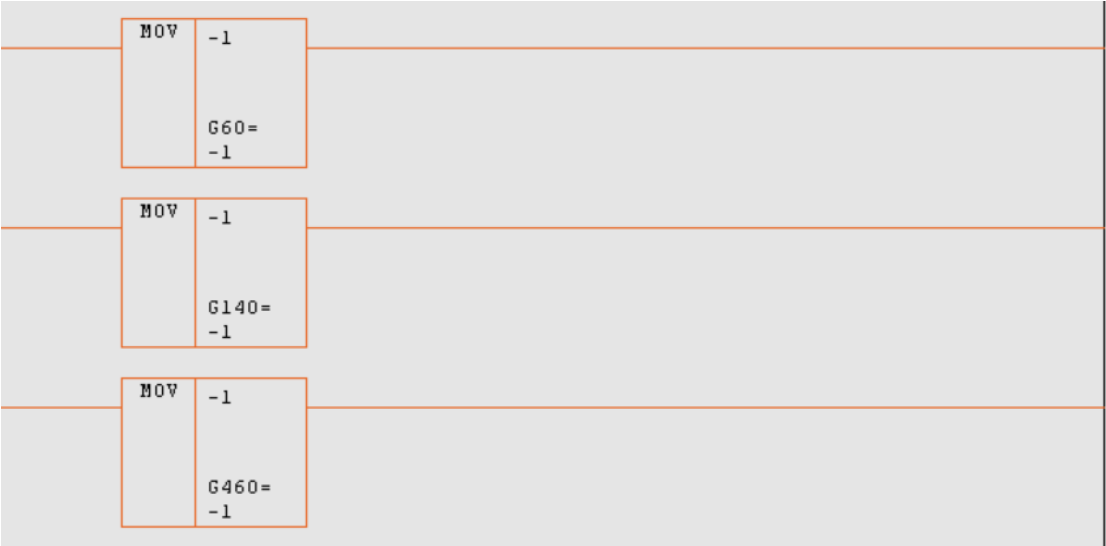
**切线跟随偏差值【137】：**C 轴中心到摩擦头距离，用于计算 X\Y 轴的偏置量。一般情况下，主轴和 C 轴不带角度，该值设为 0。

**引导轴编号 1【101】：**引导轴逻辑轴号

**引导轴编号 2【102】：**引导轴逻辑轴号

8.4 PLC 控制

在复位 S3 模块中增加轴控制模式清空语句，跟随轴和引导轴控制模式都要清空，将 G【X\*80+60】寄存器设为-1。如下：



示例

```
%1234
G01 G90 X-56 Y0 F1000
C89.9734
tangon p2 ;激活切向跟随
N50 G01 X-61.276 Y1.711
N60G02X-65.031Y7.702I1.118J4.873
N80G02X-60.392Y21.058I63.452J-14.556
N90G02X-53.731Y23.431I4.517J-2.144
N100G01X-51.365Y22.308
tangoff p2 ;取消切向跟随
M30
```



## 8.5 注意事项

- （1）指定的切向跟随轴不是旋转轴，系统会报语法错误报警。
- （2）指定的引导轴 1 和引导轴 2 没有配置情况下，系统会报语法错误报警。
- （3）系统内部会根据旋转轴的最高加工速度对编程速度进行校验，防止超速情况。
- （4）引导轴等待参数设置为 1 的时候，切削跟随激活前无须将旋转轴定位到轮廓首行切向位置，系统内部会自动调整旋转轴位置，然后沿轮廓轨迹运动。反之，设置为 0 的时候，切削跟随激活前须将旋转轴定位到轮廓首行切向位置。

### 获取轮廓切向角度方法：

G115 L5 P1 Q10

L：向下预读一行指令，如果指令是 G01/G02/G03 且有 X/Y 轴移动，则算出切向角度保存到#1319 变量中

P：要预读的程序属于哪一层程序。0：当前层；1：上一层；2：上两层

Q：从当前行向下几行

### 旋转轴定位到切向角度：

G01 C[#1319]

### 第 3 章 加工调试

#### 1 五轴 NAS 件

##### 1.1 NAS 圆锥台试件基本情况

此处 NAS 圆锥截体试件，参考了以下 3 个标准而制定的。在工件尺寸、外轮廓斜度、其在机床工作台的安装角度、检测项目和标准方面在原 NAS 试件基础上进行了改动，以尽可能多方面的检测机床的加工精度和性能。

- 1) 美国国家航空航天局（NASA）制定的 NAS979 测试件；
- 2) 我国的国标 JB/T 10792.1——2007《五轴联动立式加工中心第 1 部分：精度检验》圆锥截体测试件；
- 3) 德国 Zimmermann 公司的 NAS979 试件及其检测标准。

##### 1.2 模型分析

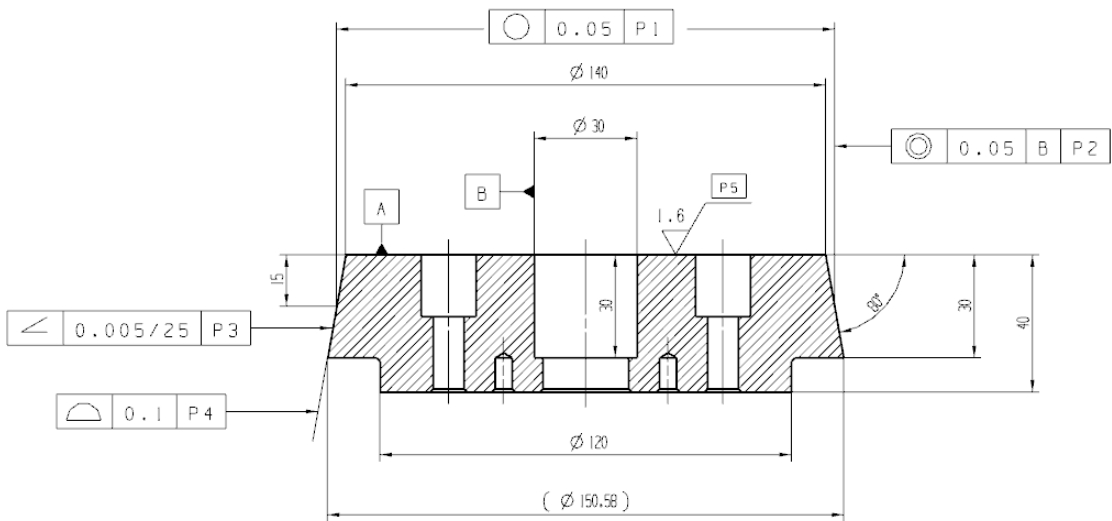


图 1 模型尺寸、检测项目及检验标准（根据机床大小类型，模型尺寸及标准可作相应调整）

如图 1 所示，试件为一圆锥截体，为体现五轴联动加工和 3+2 定向加工，将试件安装在一个底座上面，底座的上表面与下平面倾斜 10° 角（参看图 2）。底座的下平面与工作台平面贴合，用螺钉或压板固定。

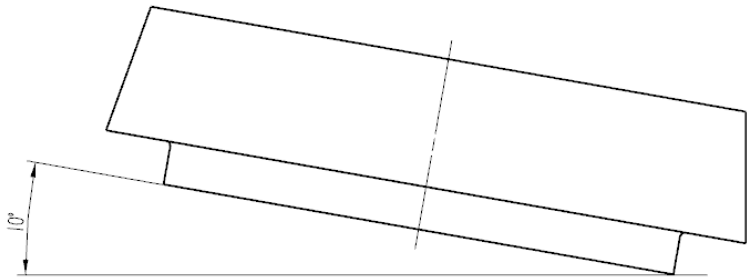


图 2 工件安装

加工部位：用面铣刀铣削圆锥截体上表平面，用镗刀加工中间圆柱孔、用立铣刀的侧刃铣削圆锥截体的侧曲面。圆锥截体切削后可从底座上拆下来测量。

尺寸调整：本模型以五轴立式加工中心机床为切削工具。当切削工具或检验对象

是较为大型的五轴机床（如龙门式五轴加工中心等）时，其模型尺寸可作相应调整（建议：圆锥载体底面直径调整为 254mm，轴向厚度调整为 63.5mm，中间圆柱孔直径调整为  $\phi 50.8\text{mm}$ ，圆锥载体侧面斜度也可调整为  $15^\circ$ 、斜置  $7.5^\circ$  安装），此时部分相关试切刀具亦做相应调整或更换。

试件应该尽量位于 X 轴线行程的中间位置，并沿着 Y 轴和 Z 轴在适合于试件和夹具的定位及刀具长度的适当位置安装。不同结构形式的机床试件的安装可参照图 2 进行，必要可用过度件将底座和机床连接定位。试件上有 4 个螺孔，用 4 条螺钉将试件与底座固定。

当对试件的定位位置和固定方式另有要求时，应在制造厂或用户的协议中规定。

试件可以在切削试验中反复使用，其直径和轴向厚度应不小于本部分所给出尺寸或相应调整尺寸的 90%。当再次使用时，在进行新的精切试验前，应进行一次薄层的切削，以清理原有表面。

1.3 加工工艺分析

1.3.1 毛坯预加工

毛坯的形状和尺寸按图 1 所示。试件在精加工前圆锥载体的曲面、上表面和中间圆柱孔应留有足够的加工余量，其余尺寸按图 1 尺寸加工好。

1.3.2 试件的材料、试切刀具和切削参数，可在制造厂和用户的协议中规定，当用于验收检验时，可默认采用以下条款或根据实际情况调整，不管如何采用，都应做好记录。

1.3.3 试件材料：铸铝或其它铝合金材料。

1.3.4 试切刀具： $\phi 20$  或  $\phi 16$  硬质合金立铣刀， $\phi 50$  面铣刀， $\phi 30$  孔精镗刀

1.3.5 五轴联动加工切削参数建议：

- a) 切削速度：400m/min；
- b) 进给量：0.05~0.10mm/齿；
- c) 切削深度：0.2mm。

1.3.6 刀路规划

根据加工和检测需要，本试件可分 3 道工序加工：3+2 轴定向加工圆锥载体上表面（应用  $\phi 50$  面铣刀）和中间孔镗孔加工（应用镗刀）、五轴联动加工圆锥载体侧曲面（应用  $\phi 20$  或  $\phi 16$  立铣刀）。参考利用相关 CAM 软件规划刀路例如图 3、图 4 所示：

重点是本试件的五轴联动加工中，切削刀轨中的刀位点和刀轴矢量要均匀光顺。

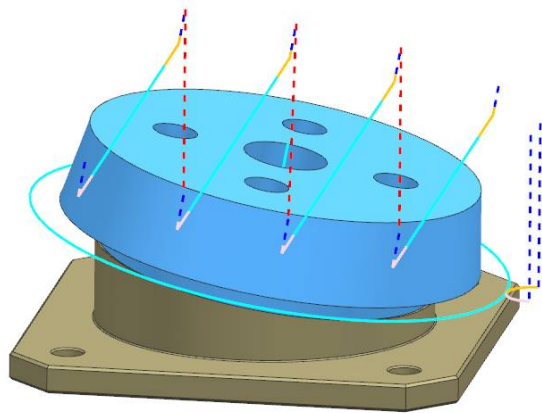


图 3 试件加工刀路规划

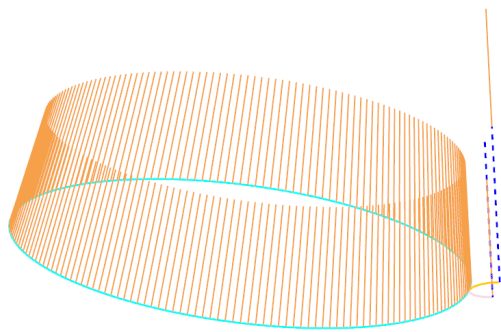


图 4 试件侧曲面五轴联动加工刀路和刀轴矢量

1.4 试件检测

1.4.1 试件件检测项目及检测标准（参看图 1）

	检验项目	建议允差值	实测值
P1	圆度	0.05	
P2	同轴度	0.05	
P3	角度	0.005/25	
P4	轮廓度	0.1	
P5	粗糙度	Ra1.6	

注：如工件尺寸发生变更，上述检测允差值亦可作相应变动

1.4.2 检测工具：  
坐标测量仪。

1.4.3 信息记录  
按本部分对 NAS 试件检验时，应尽可能完整的将下列信息记录到检验报告中去：

- a) 试件材料；
- b) 试切刀具；
- c) 切削速度；
- d) 进给量；
- e) 切削深度。

1.5 常见问题反馈

	问题缺陷	可能的原因
1	同轴度超差	检测机床定位精度、重复定位精度、RTCP 标定精度等
2	轮廓度超差	检测机床 RTCP 标定精度等
3	过/欠切	检测机床反向间隙和反向越冲、速度环增益等
4	棱线或振纹	检查刀具，检查主轴振动，检查各环路增益，抑制振动

1.6 说明

圆锥台 NAS 试件是目前应用最广泛的五轴数控机床动态精度检测试件，本试件其 3+2 轴定向加工和五轴联动加工可方便用于多轴联动机床直线轴和旋转轴精度检测、RTCP 精度检测等。但是在五轴联动加工方面，由于其锥度侧曲面曲率变化的单一性，在检验机床加工复杂曲面的能力、动态加减速性能、动态刚度和多轴联动性能等方面存在不足。而“S”试件以其开闭角变化机理和曲面曲率的连续复杂变化成为机床动态精度和动态特性检测方法的有效补充。

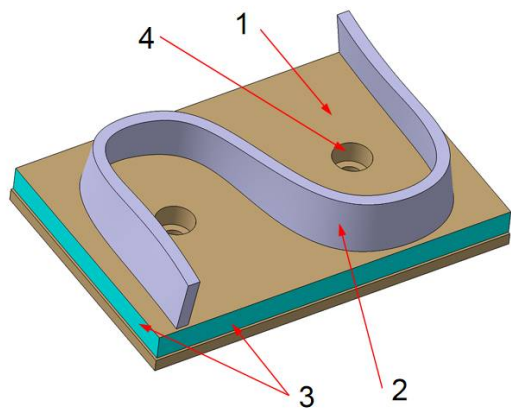
## 2 “S” 试件

### 2.1 “S” 试件基本情况

“S” 试件是一种验证机床开、闭环转换时的性能，更好的反映多轴联动加工中各运动部件的综合精度和动态响应特性的五轴加工试件。

“S” 试件由一个呈“s” 形状的直纹面缘条和一个矩形基座组合而成，组成结构如图所示：

- 1、基座
- 2、“S” 缘条
- 3、测量基准
- 4、安装压紧孔



### 2.2 模型分析

加工材料：铝合金 6061 300mm×200mm×70mm

刀具和刀柄系统：一般采用直径 D20R0 的平底刀，根据加工工件的材料选择合适的刀具，尽量选择较好刀具。比如山特维克的刀具。

形检测试件由一个 S 形的等厚缘条和一个矩形基座组合而成。其中矩形基座上有 4 个用于装夹的阶梯孔，2 个用于安装定位及测量基准的定位孔。设矩形基座的上表面为 Z=0mm 平面，以矩形基准左边的定位孔  $\phi 16H9$  为中心建立基准坐标系。矩形基座高 30mm，4 个阶梯孔位于四角。“S” 试件等厚缘条位于矩形基座上，厚 3mm，与矩形基座不垂直。

### 2.3 加工工艺分析

材料成分是被加工零件的基本特性，决定了零件加工方法及切削参数的选择。“S” 试件所用材料为铝合金 6061。S 形件缘条厚 3mm，属于薄壁件。此外，缘条与矩形基座不垂直，属于非直壁类零件。

依据“S” 试件材料及结构特性制定数控加工工序卡片。“S” 试件的加工大致可分

成四大工序：毛坯粗加工(铣基准面、制压紧孔)；S 缘条粗加工；S 缘条精加工；基准孔加工。S 形件加工基本流程如图 1 所示。

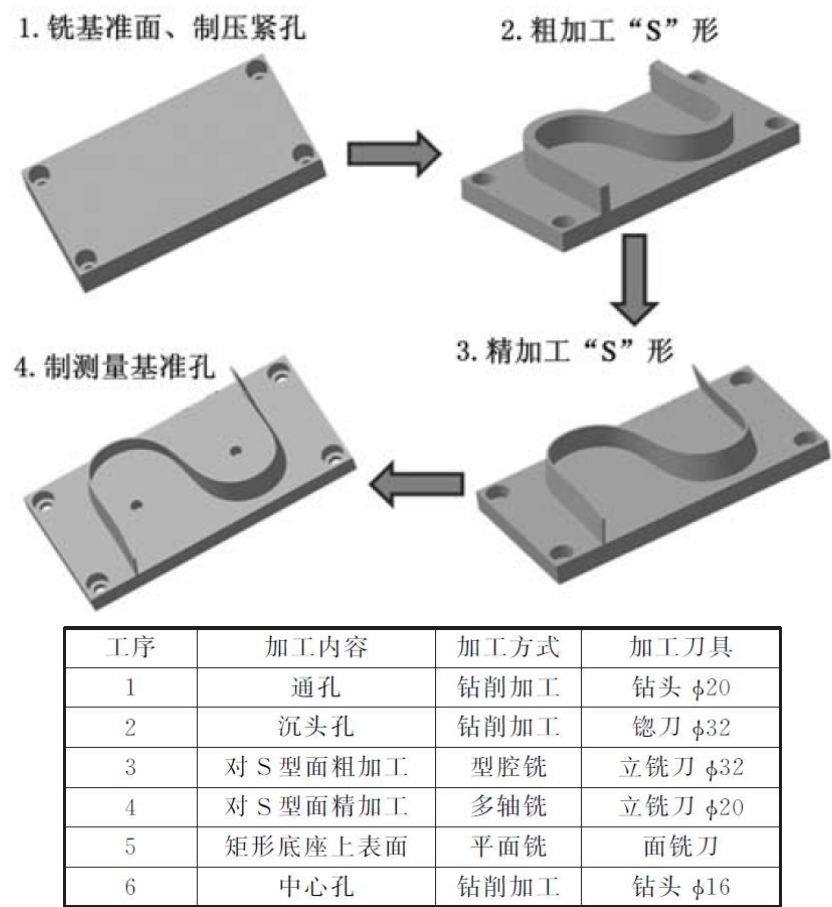


图 1 加工基本流程及采用刀具

所用刀具：

中心钻， $\phi 20\text{mm}$ ,长 65mm，用于打定位孔；

钻头， $\phi 20\text{mm}$ ,长 65mm，用于钻  $\phi 20$  的通孔；

钻头， $\phi 16\text{mm}$ ，钻基准孔；

铰刀， $\phi 32\text{mm}$ ，长 50mm，用于加工  $\phi 32$  的沉头孔；

圆角立铣刀： $\phi 32\text{ mm}$ 、圆角半径 3 mm，主要用于工件粗加工；

立铣刀： $\phi 20\text{ mm}$ ，主要用于“S”试件缘条精加工；

面铣刀：精铣基准面。

工序 1 和工序 2 用来加工沉头孔。即用中心钻钻中心孔，再用钻刀钻  $\phi 20$  通孔，最后利用铰刀铰  $\phi 32$  沉头孔；

工序 3 是创建型腔铣程序，以圆角立铣刀粗加工工件；

工序 4 为“S”试件缘条精加工工序，应用  $\phi 20$  立铣刀，加工刀具路径轨迹如图 2 所示。

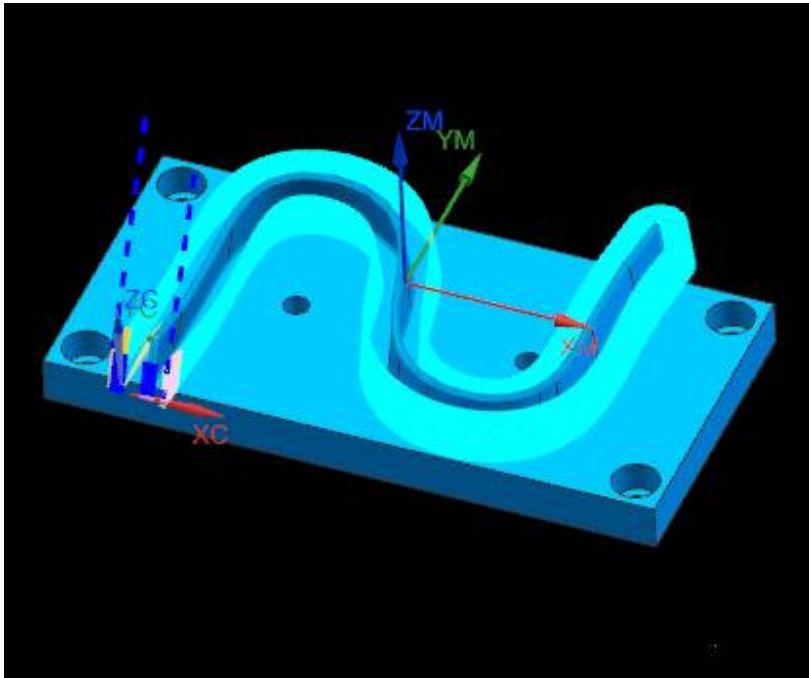


图2 “S” 试件缘条精加工刀路

因仅精加工程序对最终零件表面质量和加工精度影响较大，仅对精加工切削参数列出：

工部	刀具直径 (mm)	刃数	线速度 (m/min)	每刃进给 (mm/T)	转速 (r/min)	进给速度 (mm/min)
1	20	2	408	0.07	6500	1000

工序 5 和工序 6 精加工测量基准平面和基准孔，为“S”试件轮廓误差的测量做准备。需要注意的是：测量基准为三坐标测量的参考元素，直接影响到检测结果，实际加工时需确保加工基准与测量基准一致，或者将加工基准和测量基准两者相对位置关系信息准确传递给三坐标测量部门。

加工采用刀具必须为铝用切削刀具，刀具装入刀柄后在主轴上径向跳动须小于 0.005MM。

被加工材料底面必须平整，避免装夹变形，从而导致三坐标检测超差。



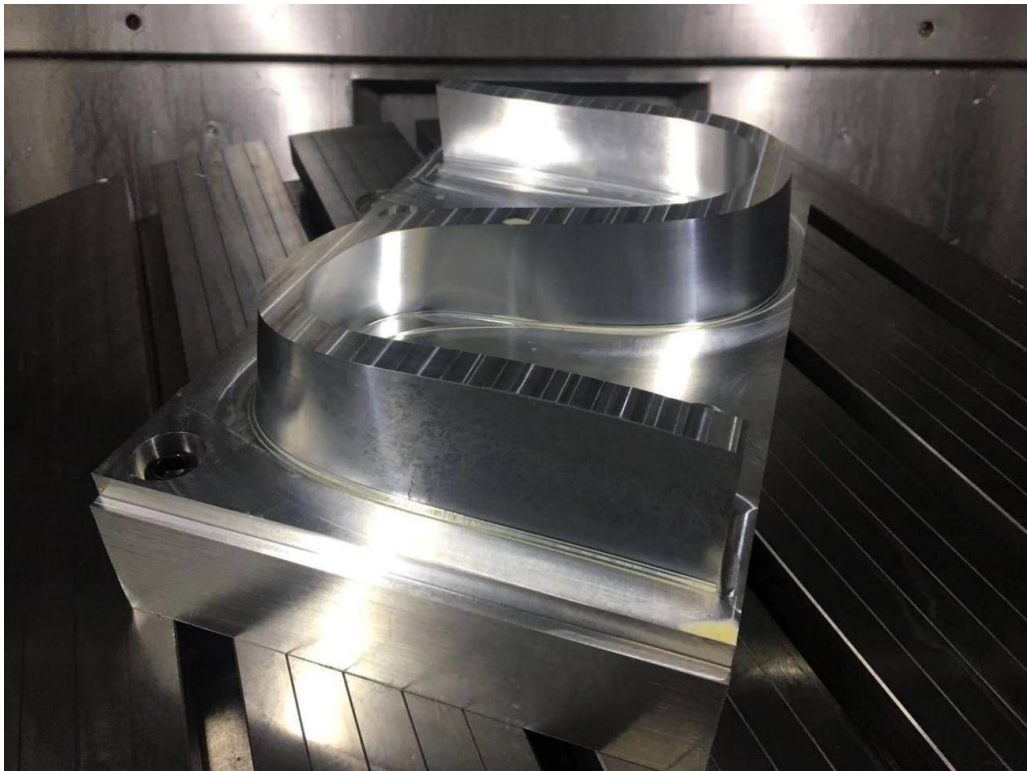


图3 “S” 试件加工完成

2.4 “S” 试件三坐标检测

加工表面与理论曲面之间的偏差，使用三坐标测量机进行测量、统计。

2.4.1 测量基准：

将“S”试件平放在测量机平台上，以 2-M16 螺栓轻压零件，A1~A4 点确定 Z=0 平面，B1、B2 点确定 X 直线及 Y=0 平面，C1 点确定 X=0 平面，建立测量坐标系，如图 4 所示。

需要注意的是：测量基准为三坐标测量的参考元素，直接影响到检测结果，实际加工时需确保加工基准与测量基准一致，或者将加工基准和测量基准两者相对位置关系信息准确传递给三坐标测量部门。

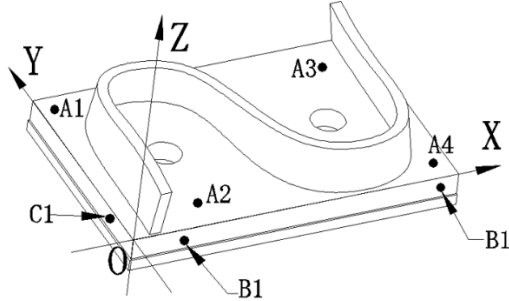


图4 建立测量基准

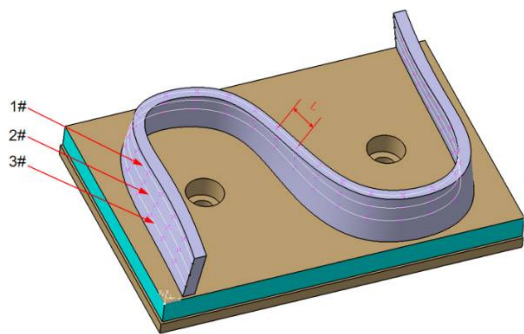


图5 检测点的选取

2.4.2 检测点的选取



沿“S”缘条高度方向取 3 条截线，即 1#4、2#、3#截线，每条截线上以等距 L 测量 30 个点，如图 5 所示。

2.4.3 测量报告

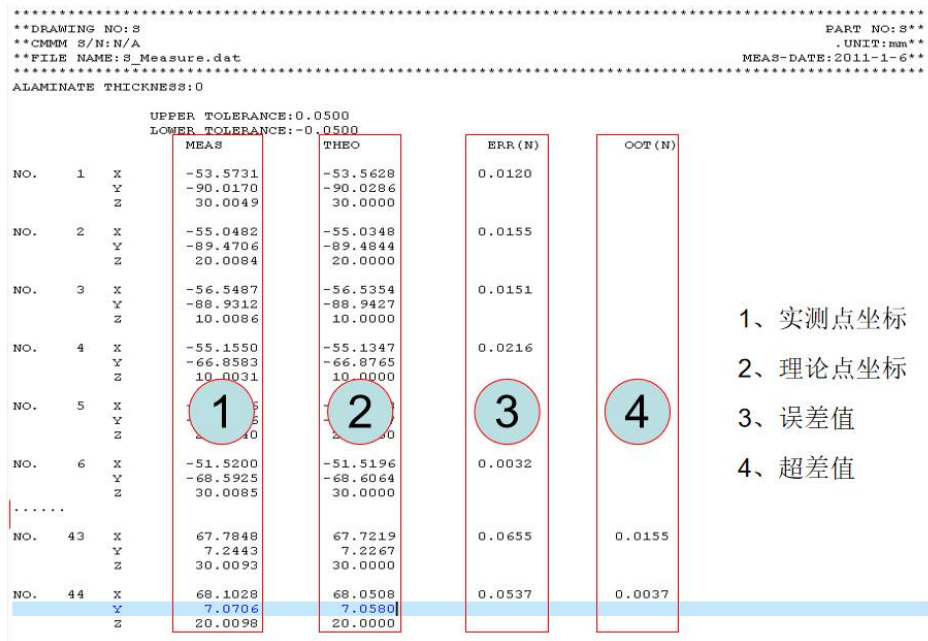


图 6 “S” 试件检测报告

2.5 机床精度对“S”试件加工效果的影响及改进措施

直接或间接测量的机床精度对“S”试件加工的影响因素和现象

	精度检测项目	影响的表现
1	主轴的跳动	S 件表面的刀圈和波纹
2	各线性轴的反向间隙	对应方向上的波纹
3	各摆角轴的反向间隙	换向部位过切形成凹坑
4	各线性轴定位精度、垂直度	整体检测精度偏移
5	圆度误差	转角处过切
6	.....	

针对“S”试件加工缺陷一般通过从以下三个方面进行分析：

- ①通过对工艺是否合理，主要考虑试件缘条加工中的刀轴摆动平稳性、点位的准确性得到有效控制，从而排除工艺造成的影响；
- ②通过修改系统参数提高动态性能。
- ③排查调整机床几何精度，如轴与轴间的平行度、垂直度。



图 7 实际加工缺陷的“S”件

常见的“S”试件缘条型面精加工程序存在的主要问题在于：程序步距不均匀、步距之间刀轴摆动过大等，如图 3 和图 4 所示。

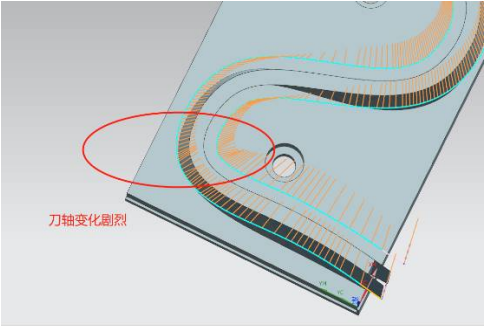


图 8 刀轴摆动存在突变的情况

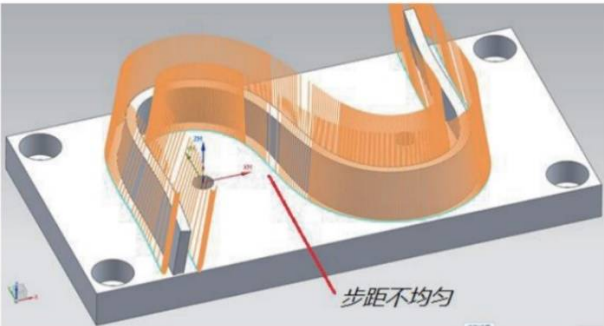


图 9 加工步距不均匀

针对在 CAM 软件中前置处理调整后：

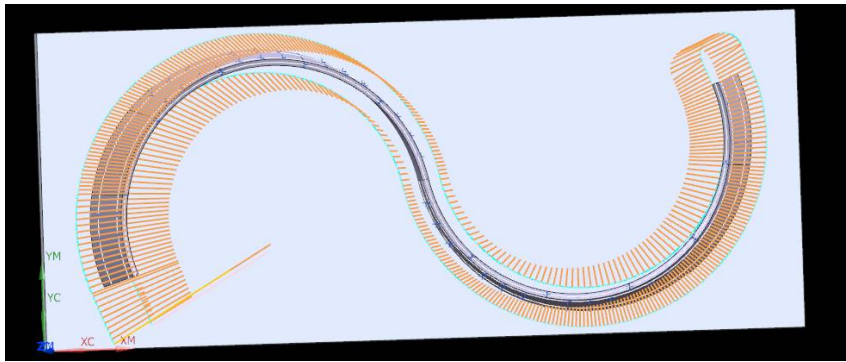


图 10 调整后加工轨迹

通过修改工艺参数，再次加工以排除加工程序对加工缺陷的影响，若仍然有加工缺陷再通过通过修改以下系统参数来改善机床动态性能：

① 在“S”试件加工前，机床静态几何精度满足机床厂家出厂标准，及旋转轴 RTCP 参数标定精度符合《华中数控五轴机床标定规范》；

② 检查机床5个轴位置增益是否一致，在机床轴不异响的情况下将所有轴位置增益与位置增益最小轴一致；

③ 适当更改系统“指令平滑周期数”使加工过程速度过程中速度更加平滑，参考值：“35”；

④ 系统参数“小线段规划允许轮廓误差”修调为“0.01”参数“拐角最小平滑内角”修调为“80~120”。

⑤ 系统参数“向心加速度”修调为“2500-4000”。

针对加工表面质量无缺陷、光洁度正常情况，三坐标检测仍然不能满足验收标准，通常需要检测机床线性轴的定位精度及旋转轴轴线与对应线性轴的平行度是否在允许值内。

## 第 4 章 IScope 软件与加工分析

在五轴加工过程中，由于机床装配、加工工艺和系统等问题，会导致工件表面加工质量不佳，为了定量分析问题，便于调试，针对华中系统开发了 Iscope 分析软件，Iscope 配合 SSTT 软件，可通过可视化分析，快速定位并解决问题。分析步骤如下：

- 1) SSTT 采样，采集参与插补运动轴的指令位置和实际位置，文件保存格式为 .dat；
- 2) 将 SSTT 采样得到的 .dat 文件导入到 Iscope 中，利用色谱图功能分析。

### 1 Iscope 软件功能介绍

通过对华中 8 型五轴数控系统进行实时数据采样，结合系统内 RTCP 参数，实现指令数据和实际数据的三维位置可视化，数据图表，三维色谱图等功能。便于对系统的联动性能进行分析与评估，有效应用于加工工艺的分析与优化。

- 1) 刀具路径显示。根据加工代码生成三维的刀具路径模型，方便使用者进行查看。
- 2) 加工过程数据的时域波形显示。能通过加载加工过程的数据文件，显示加工过程中的速度、误差、电流等数据的波形图。
- 3) 加工参数管理。可以实现对机床 RTCP 参数等的管理。

#### 1.1 软件安装及运行环境

##### 1.1.1 硬件

硬件最低配置要求：主频在 1GHz 以上、内存大于 1G、显卡支持 OpenGL。

##### 1.1.2 软件

系统要求：Windows 平台，系统版本在 win7 及其上。

##### 1.1.3 软件安装

本软件目前不需要运行安装程序，可直接运行程序文件夹下的 iScope.exe 可执行文件启动程序。

#### 1.2 使用说明

1.2.1 软件界面

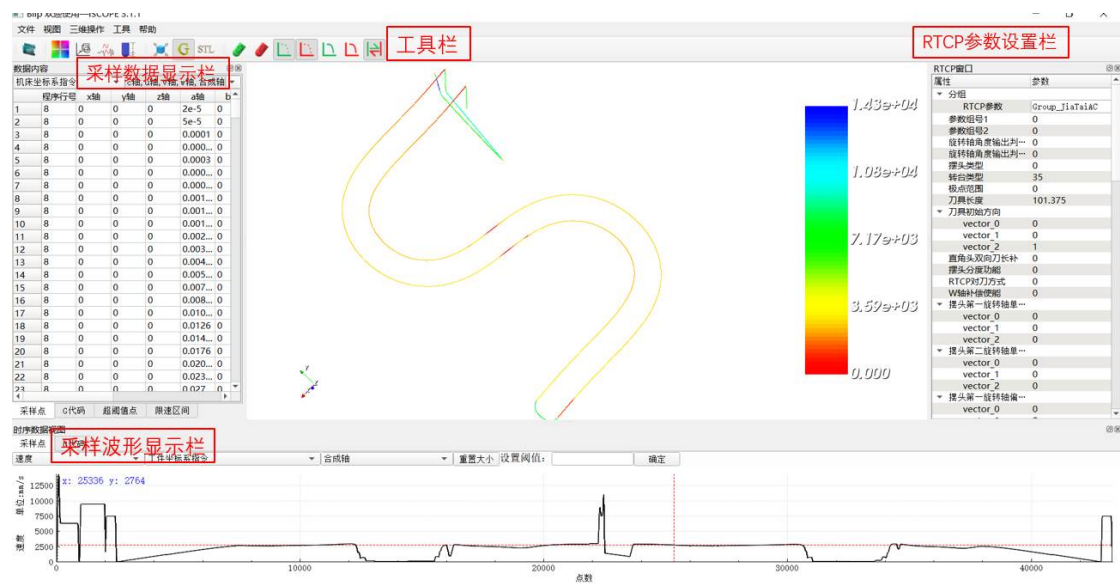


图 1-1 Iscope 软件界面

1.2.2 三维刀具路径显示与操作

三维刀具路径显示可以显示刀具加工轨迹，并可以对刀具轨迹进行平移、缩放、旋转等操作。

A、数据导入

- 1. 在属性窗口中选择或设置对应的机床参数
- 2. 通过菜单栏中“文件”——“打开”选项，加载采样数据文件 (\*.dat)。如图 2-1 。

IScope 支持的文件有：

- 1) \*.dat 文件是华中数控系统实际加工或模拟加工产生的数据，加载后可以显示三维轨迹，采样点数据及通过波形图显示速度，加速度，捷度，电流，更随误差，轮廓误差等时域曲线。
- 2) \*.NC; \*.ptp 加工代码文件，加载后可以三维显示刀位点
- 3) \*.stl; 常见三维模型文件，可以加载后在三维视窗做显示。

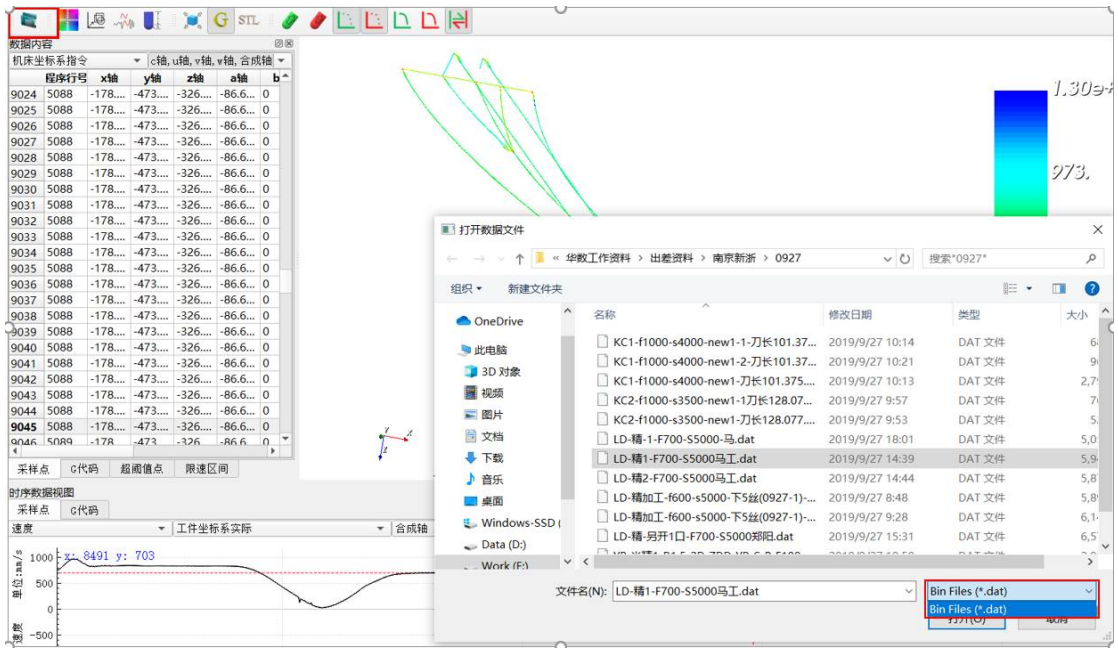


图 2-1 打开数据文件

2. 参数载入后，采样点的几何信息将在三维视图中显示，如图 2-2。

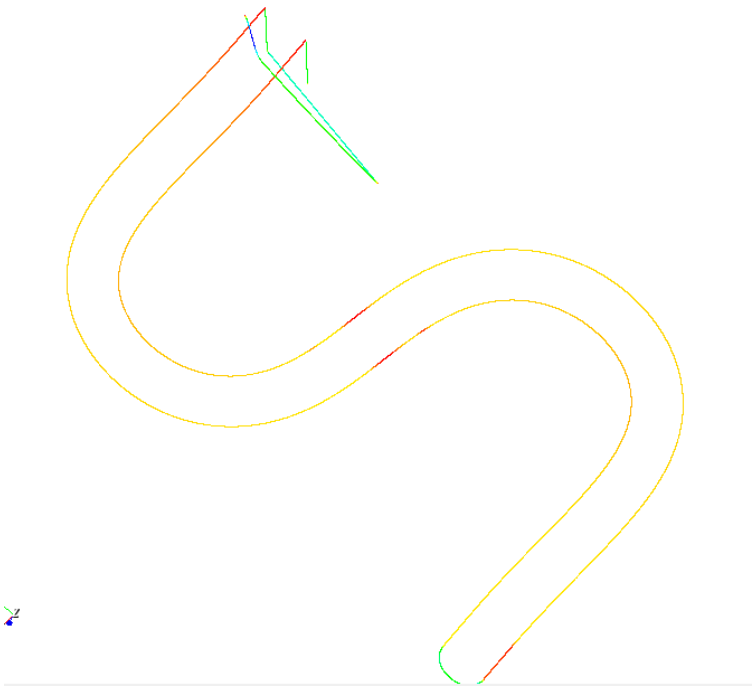


图 2-2 显示出的数据点

B、三维模型的操作

表 1-1 图形三维操作说明

动作	操作
平移	Ctrl + 鼠标滚轮，拖动鼠标
旋转	按下中键，拖动鼠标
缩放	滚动鼠标滚轮
圈选放大	鼠标左键选中某一区域
选择	Shift+鼠标左键

复位操作：在菜单栏“三维操作”中使用“复位”操作对显示模型进行复位。

C、 三维数据显示工具栏



从左到右依次为：

打开插补数据文件：将采样文件导入 Iscope 软件

色谱图选项：色谱图开关以及相关配置选项；

自适应视窗：将三维视窗中的图形适应窗体居中显示；

显示指令刀轴矢量：显示/隐藏指令采样点的刀具轴线矢量；

显示实际刀轴矢量：显示/隐藏实际采样点的刀具轴线矢量；

指令刀位点：显示/隐藏采样的指令刀位点；

实际刀位点：显示/隐藏采样的实际刀位点；

指令路径：显示/隐藏采样的相邻指令刀位点之间的直线；

实际路径：显示/隐藏采样的相邻实际刀位点之间的直线；

工件坐标系与机床坐标系切换：采样点在工件坐标系/机床坐标系下显示；



4.1.2.3 插补数据分析

A、加工过程数据色谱图显示


打开数据后使用分色显示功能，弹出分色显示设置对话框，如图 2-3。



图 2-3 分色显示设置对话框

图 2-4 为色谱图显示结果。（显示的是工件实际坐标系下 X 轴速度的分色显示图）

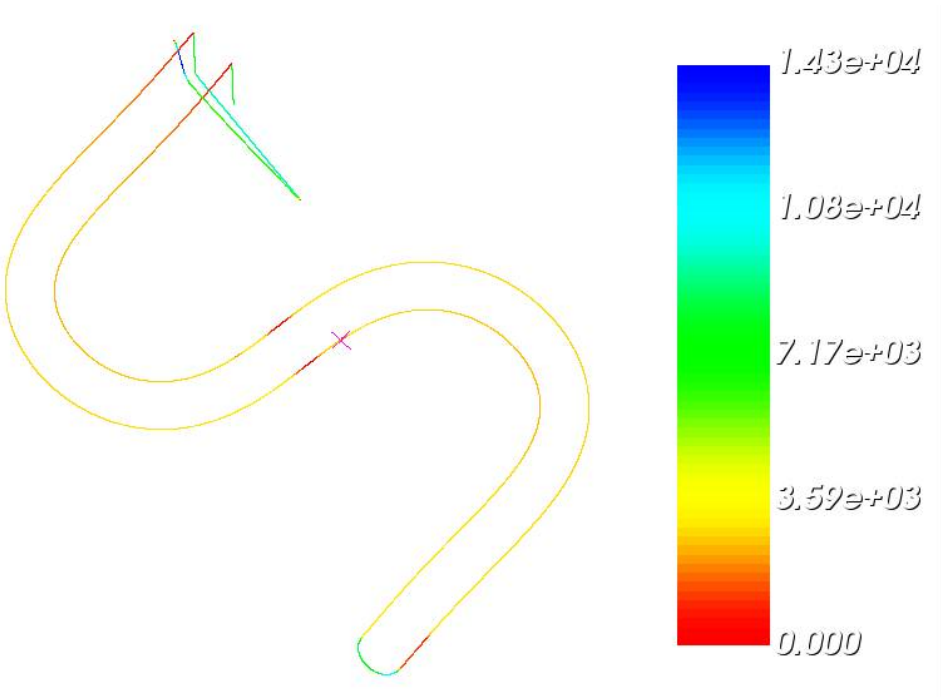


图 2-4 显示结果



## B、加工过程数据的时域波形显示

加载数据文件完成后，在波形图中可以显示机床坐标轴的速度、加速度、捷度，主轴电流，跟随误差等数据波形，并可以设置显示点数。如图 2-5。

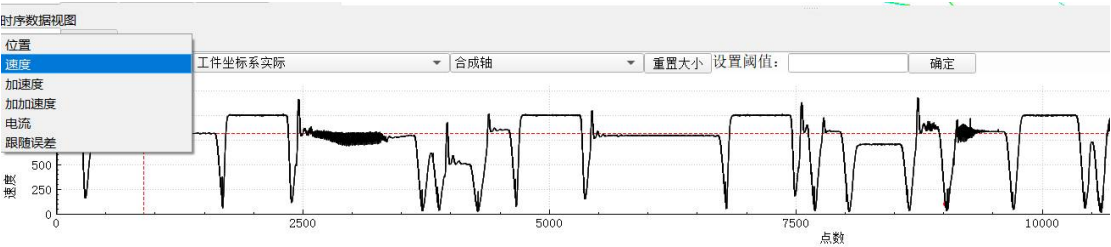


图 2-5 波形图显示

- 鼠标在波形图上移动时，能实时准确显示鼠标所指点的 X 轴坐标及其对应数据，如图 2-6。

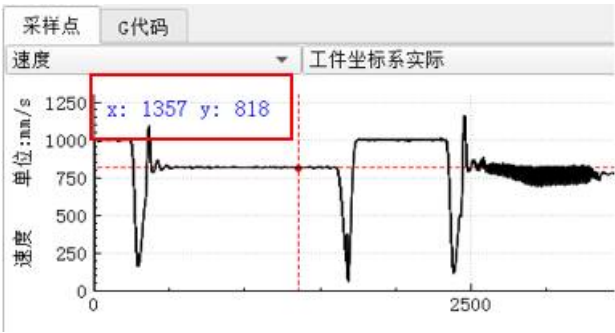


图 2-6 鼠标所指点数据实时显示

- ①. 将鼠标移动到需要放大区域附近，上下滑动滚轮，曲线将沿着 X 和 Y 方向等比例的放大和缩小
- ②. 将鼠标放到 X 轴上，移动到所选区域在 X 轴上的投影附近，滑动滚轮，曲线将沿着 X 轴单方向进行放大或者缩小
- ③. 将鼠标放到 Y 轴上，移动到所选区域在 Y 轴上的投影附近，滑动滚轮，曲线将沿着 Y 轴单方向进行放大或者缩小

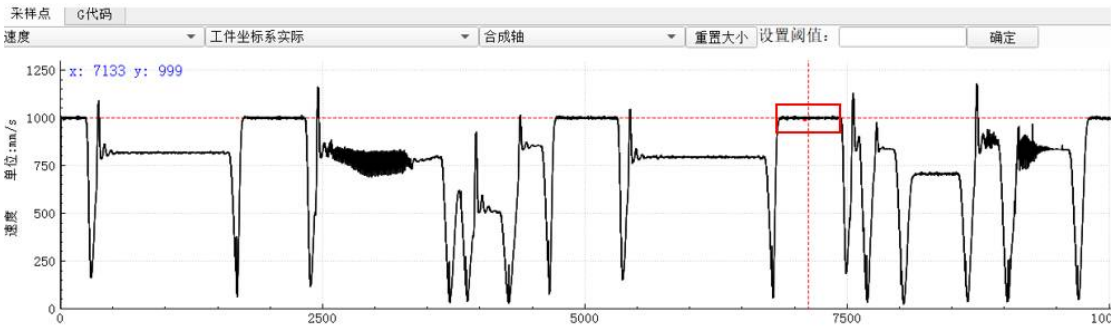


图 2-7 框选如图红框内的波形

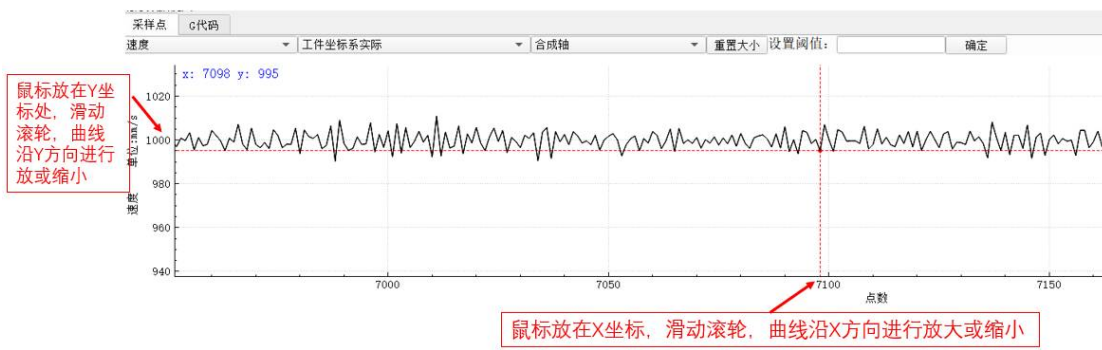


图 2-8 框选后放大的波形

双击波形图上一点，该点同时在三维视图和采样点视图中被标记出来。如图 2-9 。

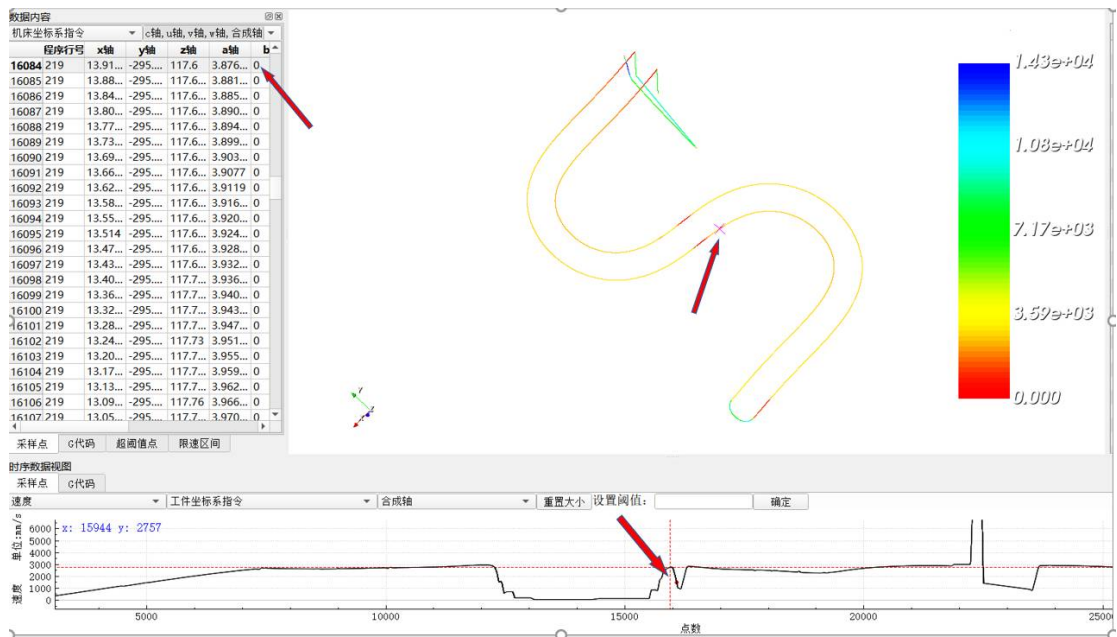


图 2-9 双击选中某一点

4.1.2.4 参数管理

参数管理功能可以管理 RTCP 参数等机床参数。如图 4.11 显示了 RTCP 参数中的基本参数、摆头参数和转台参数等，该参数与系统通道参数中 RTCP 参数对应。刀具长度则与系统刀具长度补偿信息对应。摆头/转台类型中 3/4/5 分别代表 A/B/C. 其意义与数控系统中参数一致。

表 1-2 机床类型参数设置举例

机床类型 Iscope 参数	AC 双转台	CB 双摆头	B 摆 C 转
摆头类型	0	54	4
转台类型	35	0	5

Iscope 最多可以支持 9 个轴的 RTCP 参数，Iscope 软件 RTCP 参数和数控系统 RTCP 对应关系如下

表 1-3 Iscope 软件 RTCP 参数和数控系统 RTCP 对应关系

IScope 参数名称	数控系统参数名称
摆头第一旋转轴	空
摆头第二旋转轴	摆头第一旋转轴
摆头第三旋转轴	摆头第二旋转轴
转台第一旋转轴	空
转台第二旋转轴	转台第一旋转轴
转台第三旋转轴	转台第二旋转轴



图 2-10 参数显示

A、选择参数

软件可存储多组参数，在载入数据时在“RTCP 参数”栏选择对应的参数即可实现参数切换。

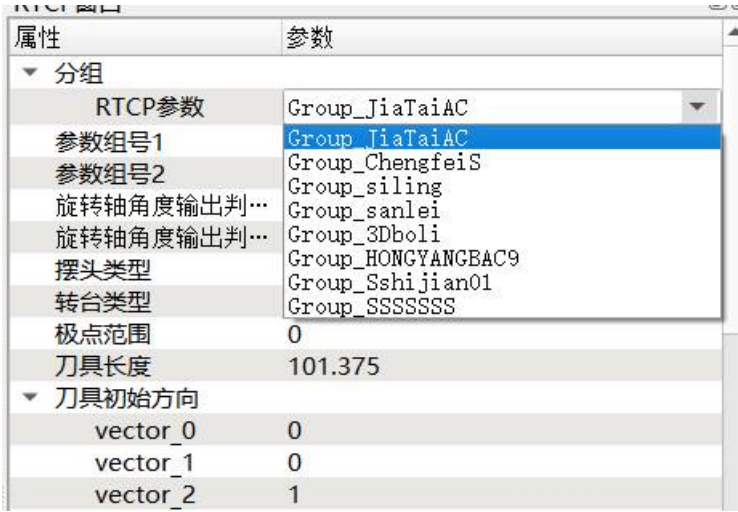


图 2-11 参数选择

B、编辑参数

选择需要编辑的参数组，然修改对应的参数项即可。

C、参数生效时机

参数只有在载入数据之前修改/选择才能生效。数据已载入完成后再修改参数将不会对已载入的数据生效。

若需要修改当前载入数据的参数，则必须在修改参数后重新载入数据。

2 Iscope 问题分析解决思路

问题解决分析思路

5 个轴的位置环增益和加减速时间常数保持一致

- 1) 通过观察工件加工异常点，在色谱图上找到对应区域，
- 2) 优化系统指令速度
  - ①. 勾选“速度”——“工件坐标系指令”——“合成轴”，判断系统指令速度是否存在明显降速
  - ②. 若系统指令异常，通过修改小线段参数，优化系统指令，让系统指令无明显降速
- 3) 若加工异常区域仍然存在，找到具体是哪个伺服轴引起，针对性的进行优化
  - ①. 勾选“速度”——“机床坐标系实际”——“X 轴”（依次勾选其他轴），确定是哪个轴降速导致
  - ②. 确定是哪个轴异常降速引起后，结合程序看看异常降速点在哪里，异常降速点多存有某个

轴或者多个轴反向的地方

- ③. 若存在反向，可考虑优化程序，尽量避免反向
- ④. 针对异常降速轴，优化伺服参数：轴的速度环增益，位置环增益，加减速时间常数等

### 3 Iscope 问题分析实例

#### 3.1 叶轮加工

##### A、现场问题说明

机床为 AC 双转台结构，加工叶轮，精加工表面质量达到客户要求，但流道开粗有凹坑，客户不接受。

分析：现场为了提高加工效率，开粗刀具路径为三角形，存在明显的尖角，因此开粗后留下明显的凹坑

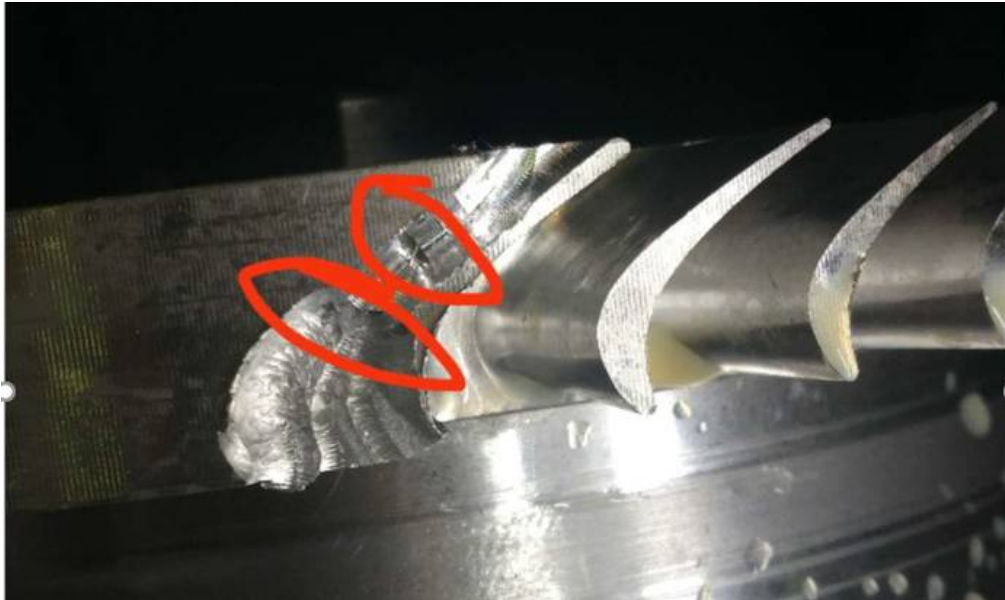


图 3-1 调试前，现场加工照片

通过分析，叶片流道上的凹坑点为工件开粗时留下，客户不接受开粗存在凹坑，在机床边观察，机床在加工凹坑附近存在明显的抖动。

##### B、调试过程

- 1) 通过 SSTT 软件进行采样，采集每个轴的指令位置和实际位置，设置方式如下

自定义采样配置		
通道	通道信息	
1	指令位置	X轴
2	实际位置	X轴
3	指令位置	Y轴
4	实际位置	Y轴
5	指令位置	Z轴
6	实际位置	Z轴
7	指令位置	A轴
8	实际位置	A轴
9	指令位置	C轴
10	实际位置	C轴
11	程序行号	

图 3-2 SSTT 采样设置

采样类型保存为.dat

2) 导入 Iscope 软件中，打开色谱图功能，观察结果如下

通过色谱图功能，凹坑对应位置颜色为红色，说明系统存在明显降速

3) 曲线分析区域设置：勾选“速度”——“工件坐标系实际”——“合成轴”，曲线存在明显波动

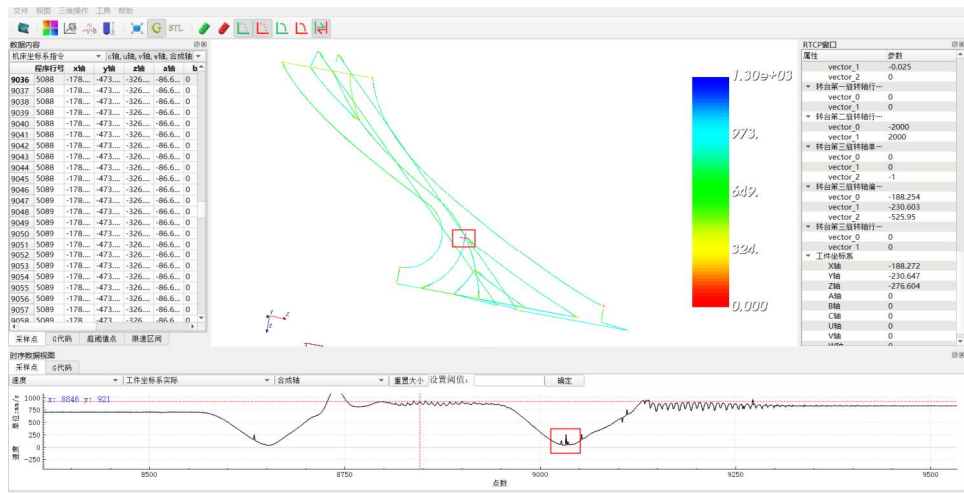


图 3-3 凹坑处——实际合成速度存在明显降速

4) 勾选“速度”——“机床坐标系实际”——“A 轴”，A 轴速度由负方向变为正方向，A 轴存在反向

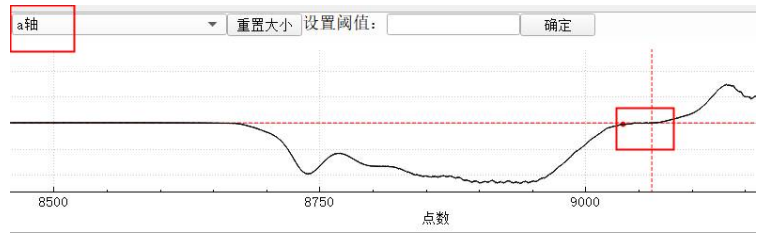


图 3-4 A 轴存在反向 实际速度由负变正

5) 勾选“速度”——“机床坐标系实际”——“Y 轴”，Y 轴速度存在明显波动



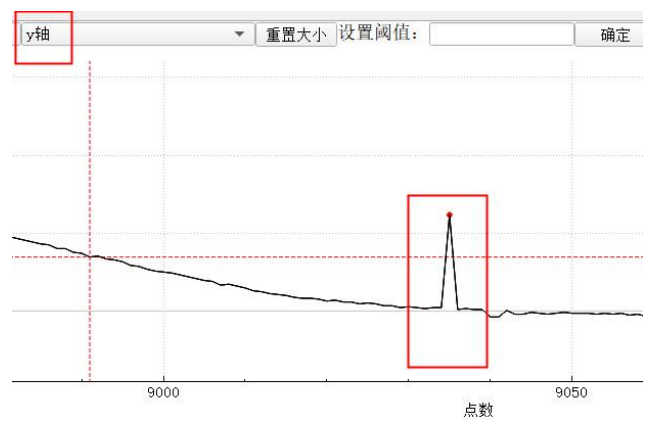


图 3-5 Y 轴速度突变

因此该处的凹坑主要为 A 轴和 Y 轴

6) 重点对 A 轴和 Y 轴进行优化

表 3-1 伺服优化对比表

参数名 参数状态	每个轴的位置 环增益	A 轴速度环增益	Y 轴速度环增益
调试前	2000	1000	1500
调试后	3500	3000	3200

加工效果明显提高



图 3-6 加工效果照片

Iscope 色谱图降速问题明显改善

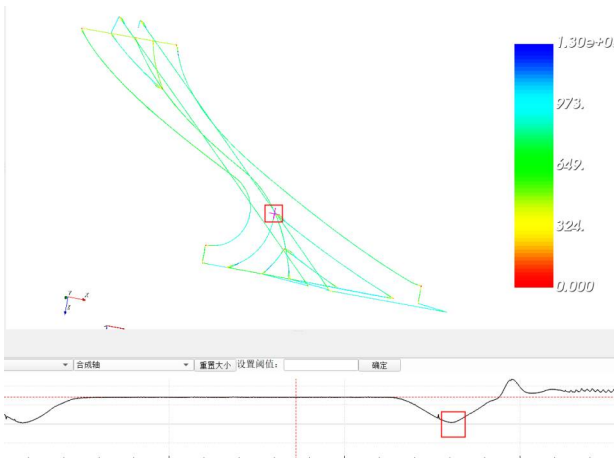


图 3-7 Iscope 分析加工异常点明显优化

3.2 S 件加工

A、现场环境及系统参数

针对用户现场加工 6 米 S 件问题，由于 S 件刀轴较深，换向频繁，且机床伺服动态性，A/B 轴铣头重力前倾，机械结构动态性影响等多种原因会影响精度与表面质量，现场采样分析后，调整系统通道小线段参数，并调整旋转轴与直线轴伺服匹配度，重新检查机床几何精度及 RTCP 精度后，重新加工检验，在加工表面质量及精度方面有一定的改进。

现场设备：	精锐 AB 双摆头
	



B、调试过程

针对表面光洁度进行调试及优化，现场还没有检测设备暂时未考虑精度是否达标。

问题一：调整伺服匹配度

考虑到旋转轴与直线轴的伺服匹配问题，进行相关调整。调整前 BY 轴反向跃冲比较大，有 2.6 个丝，通过调整 PA3 速度比例增益与积分时间常数，加上伺服静摩擦力后，B 轴有明显改善，反向控制在 1 个丝之内。

通过该调整后，表面质量有改善，四处加工缺陷竖棱明显变小，但是依然存在。

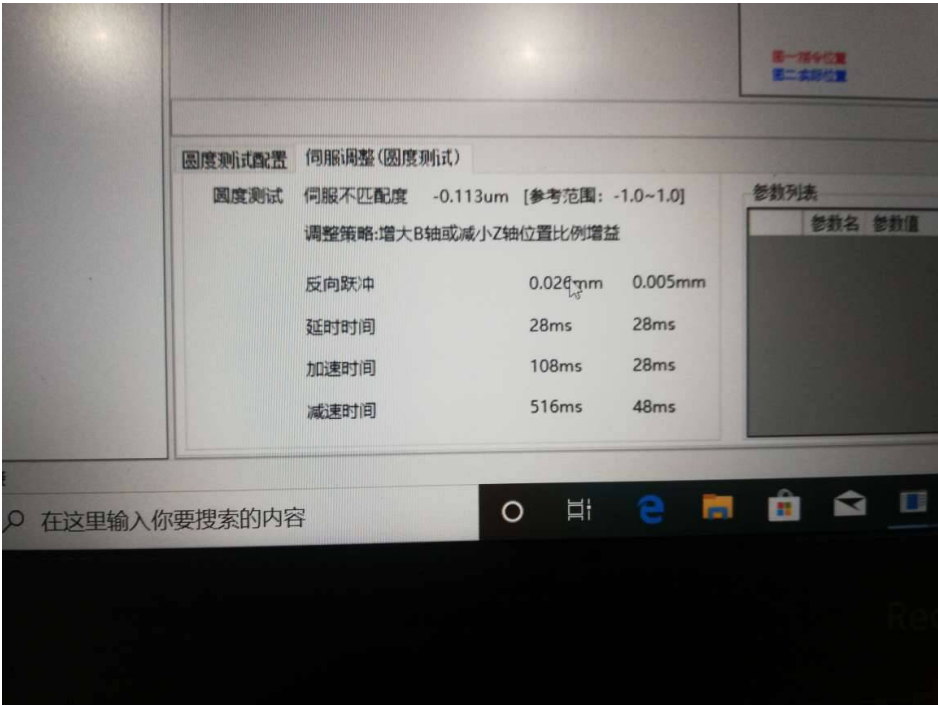


图 3-7 伺服匹配调试

问题二：4 处加工缺陷

优化伺服后， S 件 F2000 或者 5000 加工时，依然有 4 道竖棱，如图 1 与 2 所示，其中 2 道比较严重，用户不接受这样的缺陷。



图 3-8 S 件加工竖棱

根据 Iscope 采样观察，刀尖点的速度并没有波动，然后再根据实际加工缺陷地方定位到指定行号。

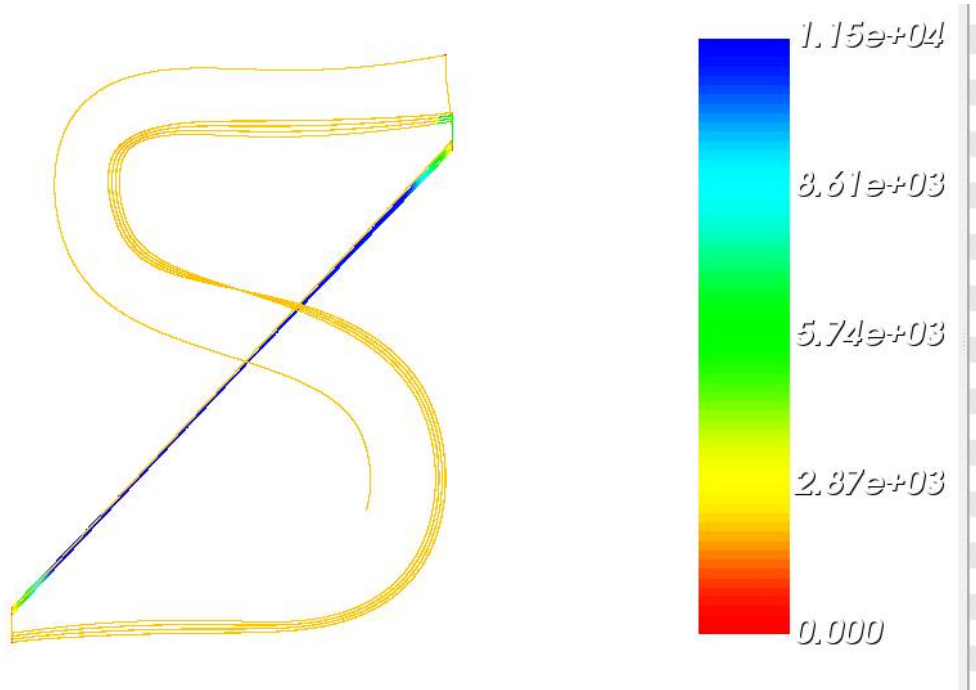


图 3-9 S 件加工色谱图

四个位置如下图所示，其中数字为行号：

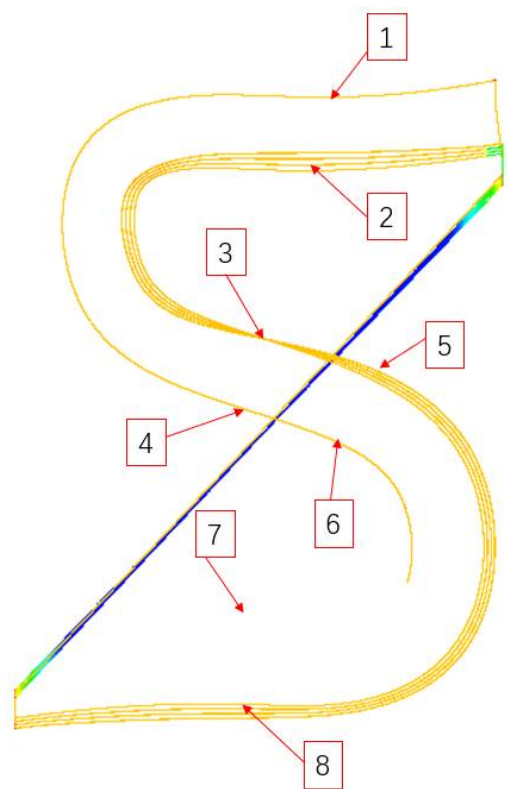


图 3-10 S 件加工竖棱特征分析

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
程序行号	N784	N1521	N1127	N1859	N1215	N1953	N1424	N2169
程序特征	Y/A 轴反向	Y/A 轴反向	A 轴反向	A 轴反向	A 轴反向	A 轴反向	Y/A 轴反向	Y/A 轴反向

故怀疑是 A 轴的问题，根据 iscope 单轴的速度波形发现，A 轴速度锯齿形波动，全闭环控制可能导致实际速度波动较大，一开始怀疑是加速度过大导致的，调节后依然存在，如下图所示

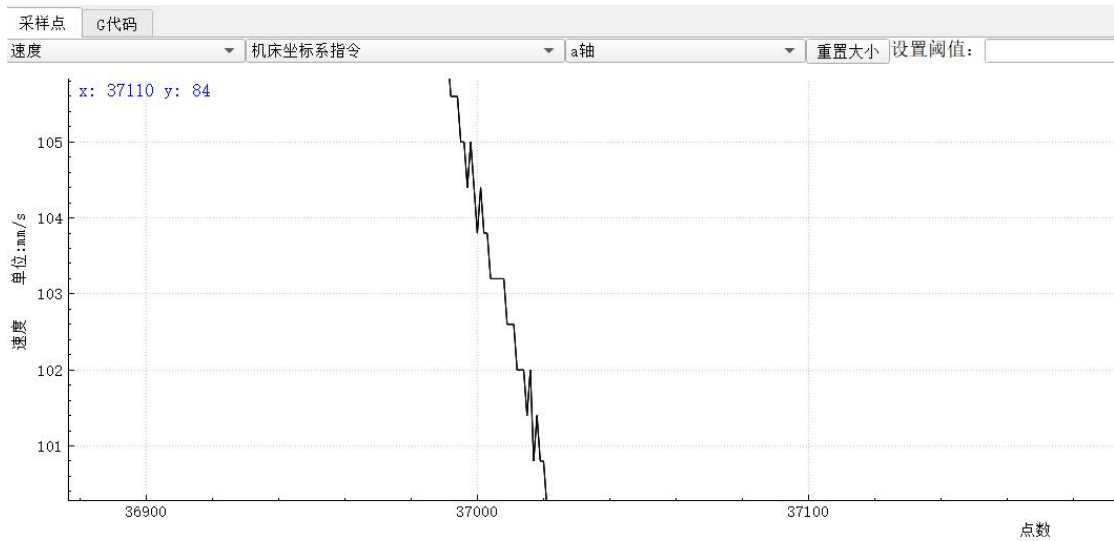


图 3-11

S 件加工竖棱 A 轴速度

不是加速度造成，怀疑是程序小线段太过密集问题，让精锐工艺修改加工精度与最大不连续角度，如下图。

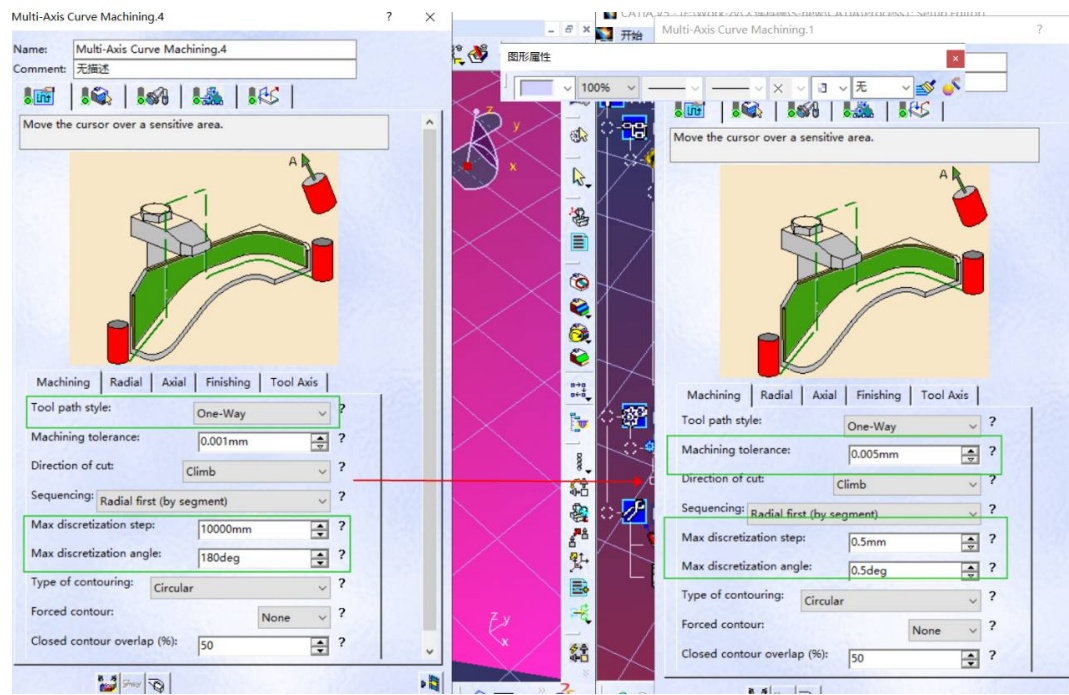


图 3-12 修改加工工艺

修改后，再次进行加工，加工效果如下图，有明显改善，无明显缺陷了，得到精锐认可。



图 3-12 S 件优化后加工效果