

基于SINUMERIK 840D sl系统的前轴零件 一次装夹加工工艺及程序设计

赵剑峰

一汽锻造（吉林）有限公司 吉林长春 030000

摘要：主要讨论利用双主轴立式加工中心对重型货车前轴零件一次装夹完成成品加工的数控加工工艺及程序编制的问题。探讨一种通过利用SINUMERIK 840D sl系统支持的用户变量，以特征驱动模块化编程的思路。

关键词：前轴；西门子；数控编程；参数化

1 序言

目前国内重型货车前轴零件主要制造商制造工艺均已成熟，主要技术路线为两个方向^[1]：一种是通过分序加工，对各独立部位在不同工序分别加工，该路线对设备要求较低，均为标准机床或单工序组合机床，优点为整线节拍快、灵活性高，缺点为柔性小、空间尺寸及几何公差保证难度大；另一种是以荷兰优利山（Unisign）公司生产的Unitwin系列前轴加工中心为代表，采用可旋转主轴结构的双主轴立式加工中心，一次装夹后通过主轴摆动到达主销孔倾角，完成全部工序加工，此路线优点是换型难度低，加工精度高，工件尺寸波动小，缺点为设备投资较高，生产节拍较分序加工偏慢，因主轴旋转存在坐标系变换导致编程难度高。

我公司采用的技术路线是后者，使用设备为沈阳机床生产的SUC2800DVM6s双主轴立式加工中心，设备结构原理与Unitwin6000类似，数控系统为西门子SINUMERIK 840D sl，集成桁架机械手自动线，实现从上料到成品打标完全自动化生产。

货车前桥总成系列繁杂，对应前轴零件规格也五花八门，但基本加工特征均大同小异，差异主要在空间尺寸及孔径、拳部厚度等细节特征上。由于主轴在加工过程中频繁摆动角度，伴随工件坐标系同时发生变换，因此按常规方法无法确定程序加工坐标点。一般解决方法为换型后首件加工，尤其

是首次加工新品种时，采用夹具装夹定位后以毛坯面对刀试切，再根据试切件检验结果修正程序，反复检验、修正以达到合格水平。期间会产生3~5件调整废品，且编程完全无依据，新品种编程难度较大，需具有丰富经验的编程员结合检验反馈进行反复修正补偿。

针对此问题，结合西门子SINUMERIK 840D sl系统特点，充分利用用户参数功能对前轴全工序加工程序进行模块化参数编写，达到可根据产品图样通过简单换算得出关键参数，修改对应参数直接生成新产品加工程序的目标，理论上使用该程序加工首件即为图样要求标准尺寸。达到这一效果后，可大大降低调整难度，一般熟练操作工即可完成新产品换型调试工作，且完全不产生调试废品。

2 工艺路线说明

2.1 夹具原理

本工艺路线采用前轴板簧配合面作为Z向定位基准，在长度方向上两端采用对心V形夹块进行X和Y方向定位。工件Z向向下为主夹紧，Y向向内为辅助夹紧。工件放置姿态为桥部拱起向上，板簧配合面向下，垂直放置于夹具上。夹具夹紧后，不同工件对称中心、夹具对称中心相对机床坐标系均为固定值。夹具如图1所示。

2.2 机床及系统原理

沈阳机床SUC2800DVM6s双主轴立式加工中

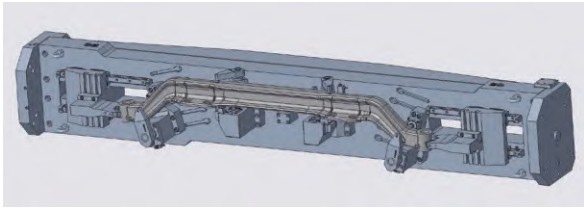


图1 夹具示意

心是针对前轴所有加工工序设计的龙门立式加工中心，集成一体化四轴转台夹具，可绕X轴360°旋转（A轴），主轴在X-Z平面内可分别实现 $\pm 13^\circ$ 摆动（B轴）。双主轴可独立编程，单独控制。

机床数控系统为西门子SINUMERIK 840D sl系

统，采用3通道，其中双主轴各分配1个通道，即通道1/通道2（CHAN1/CHAN2）；桁架机械手自动线分配1个通道，即通道3（CHAN3）。双主轴X、Z轴独立，其中左右主轴在X方向有400mm重合量，共用Y轴。因桁架机械手通道与加工过程并不直接相关，本文暂不深入讨论，仅以CNAN1/CHAN2通道编程进行研究。

2.3 工艺设计

工件为左右对称结构（见图2），双主轴加工内容完全一致，工艺路线仅以一侧主轴说明，工序设计见表1（主销孔倾角为 α ）。

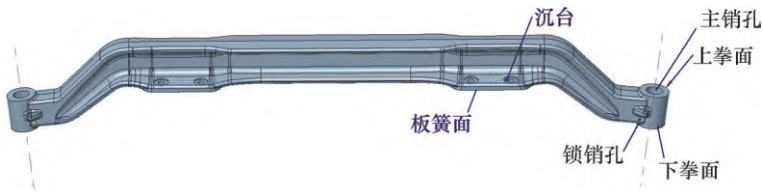


图2 工件示意

表1 工序设计

工序号	加工内容	A轴角度/ (°)	B轴角度/ (°)
OP10	粗铣上拳面	270	α
OP20	粗铣下拳面	90	$-\alpha$
OP30	引钻锁销孔	0	0
OP40	钻锁销孔	0	0
OP50	螺旋铣锁销沉台	0	0
OP60	钻主销孔底孔	270	α
OP70	扩主销孔	270	α
OP80	精铣上拳面	270	α
OP90	精铣下拳面	90	$-\alpha$
OP100	主销孔倒角	90	$-\alpha$
OP110	精铰主销孔	90	$-\alpha$
OP120	钻板簧面孔系及攻螺纹	90	0
OP130	螺旋铣板簧背面沉台	270	0

整个加工过程涉及A轴5次翻转，B轴6次摆动。加工结束后由桁架机械手取成品在线内打标，同时送入毛坯进行下一个加工循环。由于不同产品加工特征复杂度不同，所以整线节拍在8~15min。

2.4 编程思路

各通道分别编制一个主程序，用以声明用户参

数。排列加工工序同时调用子程序，并对加工状态进行自动判断，从而实现意外中断程序循环后可以继续加工。

将各工序加工程序都分别编制成子程序，由主程序直接调用，子程序头通过引用用户参数声明程序原点及刀具路径相关参数。

换型时只需要更改确认刀具匹配，更新主程序中用户参数，调整主程序中子程序调用状态及顺序，并确认子程序头相关声明。整个程序组90%以上内容完全无需改动即可完成新产品程序调整。

2.5 SINUMERIK 840D sl用户参数

SINUMERIK 840D sl系统提供丰富的用户参数设置选择^[2]，本文通过修改R参数（即预定义通道专用用户变量）来实现用户参数声明。系统对各通道分别提供的用户变量点位有1000个（R0~R999），足以满足各类型参数的声明与设置。

2.6 坐标系变换

在加工过程中，存在两种类型的坐标系变换。一种是由A轴旋转角度导致工件坐标系相对工件发生的变化，此种变换由于变换前后均为笛卡尔坐标系，仅是Y、Z轴的方向及正负发生相互转换，相对容易解决，在A轴3个加工方向（0°、90°、270°）分别设置独立坐标系，并按各自坐标系进行

坐标赋值即可。

另一种类型是由于B轴摆动，产生的Z轴相对X-Y平面倾斜后发生的坐标系变换。变换后的坐标系Y轴不受影响，X、Z轴会发生数值飘移，相应的坐标值需经过一系列三角运算来进行转化。针对这种情况，笔者通过excel二次开发VBA功能定义了一套自定义函数，将原始笛卡尔坐标系坐标值与变换后的坐标值进行转化。

3 程序编制

整个工件的加工程序编制是一个繁琐且复杂的过程，包括大量重复性标准化的操作，在此仅对关键步骤及特殊点进行展开说明。

3.1 确定工件特征R参数

确定工件特征R参数的主要手段是利用excel编制辅助计算模型。首先通过使用安装于两侧主轴的雷尼绍机内测量测头，分别测量A轴不同角度处夹具定位中心点坐标值，即夹具基准点机械坐标值（见表2），然后将测得的坐标值作为A轴3个加工角度的程序原点。整理工件几何信息，制作工件基本信息表单，部分示例见表3。

表2、表3中，夹具基准点机械坐标为固定值，除非夹具进行拆解或机床机械坐标原点发生变化需要重新测量外，均不需要更改；工件基本信息中大部分为可以从工件产品图样上直接读取的数值，其

表2 夹具基准点机械坐标

工件状态	A轴角度/ (°)	X ₁	Z ₁	X ₂	Z ₂	Y
板簧面向下，B轴正偏	270.0	- 1438.819	- 564.470	- 1428.862	- 566.340	- 1235.466
板簧面向上，B轴负偏	90.0	- 1438.819	- 735.321	- 1428.862	- 736.846	- 759.419
板簧面向外	0.0	- 1438.819	- 411.837	- 1428.862	- 413.687	- 912.420

表3 工件基本信息（部分）

类别	项目	数值	备注
工件相关	总长	1798.000	
工件相关	中心距	830.000	
工件相关	主销孔倾角	6.000	
基准偏差	270° 上拳面主销中心相对夹具中心距离	903.077	恒正
基准偏差	90° 下拳面主销中心相对板簧面高度	145.666	拱向下，高于板簧面为正
基准偏差	0° 锁销孔中心距夹具中心距离	867.286	恒正
特征相关	主销孔直径	48.000	
特征相关	锁销孔直径	16.000	

中基准偏差类数值通过CAD类软件进行测量或进行一次三角运算即可得出。这两个表单数值确认没有难度。

在确认相关信息后，笔者设计了一组R参数对应数值的计算表单，其中除B轴摆动相关数值（R101、R103、R104和R106）外，均可直接读取或使用excel内置函数计算产生。仅以通道1为例，部分R参数计算结论见表4。

由于不同设备B轴摆动机构组成原理各不相同，相应计算方式也不一致，本设备的计算方法并不适用于其他设备，故详细计算方法在此不展开介绍，仅说明处理思路。

笔者将坐标转化前后的X、Z坐标差值计算通过excel的VBA功能分别封装于4个自定义函数中，通过直接调用函数来生成摆动后相应的坐标值。VBA自定义4个函数相关语句如下。

表4 部分R参数计算结果（通道1）

R参数	数值	物理意义
R60		试切抬刀
R121	-1438.819	夹具基准 X_1 值
R122	-997.650	四轴回转中心Y值
R123	-564.470	270° 板簧面 Z_1 值
R124	-735.321	90° 板簧面 Z_1 值
R101	-414.800	270° 拳面中心点 X_1 值
R102	-1235.466	270° 拳面中心点Y值
R103	-621.215	270° 拳面中心点 Z_1 值
R104	-664.487	90° 拳面中心点 X_1 值
R105	-759.419	90° 拳面中心点Y值
R106	-591.662	90° 拳面中心点 Z_1 值

```

Function BC270X(l, z, a)
Dim Pi As Double
Pi = Application.WorksheetFunction.Pi()
BC270X = (l + Abs(z)) * Tan(a * Pi / 180) + Sheet2.
Range( "b9" ) * ( 1 / Cos(a * Pi / 180) - 1)
End Function

Function BC270Z(l, z, a)
Dim Pi As Double
Pi = Application.WorksheetFunction.Pi()
BC270Z = -(Sheet2.Range( "b9" ) * Tan(a * Pi / 180) + (l +
Abs(z)) * ( 1 / Cos(a * Pi / 180) - 1))
End Function

Function BC90X(l, z, a)
Dim Pi As Double
Pi = Application.WorksheetFunction.Pi()
BC90X = (l + Abs(z)) * Tan(-a * Pi / 180) + Sheet2.
Range( "b9" ) * ( 1 / Cos(-a * Pi / 180) - 1)
End Function

Function BC90Z(l, z, a)
Dim Pi As Double
Pi = Application.WorksheetFunction.Pi()
BC90Z = -(Sheet2.Range( "b9" ) * Tan(-a * Pi / 180) + (l +
Abs(z)) * ( 1 / Cos(-a * Pi / 180) - 1))
End Function

```

各函数中参数“l”“z”“a”分别为主轴端部

机械坐标、转换前Z坐标值及主轴倾角。这3个数值均为表2、表3完整表单中确定的数值，可直接代入。

通过此辅助程序，新产品设计时仅需将工件基本信息中相应内容进行更新，即可直接计算得出各通道的工件特征R参数。将这些R参数在相应通道主程序中进行更新即可完成参数声明操作。

3.2 子程序调用及中断恢复

主程序完成参数声明后，即进入子程序调用语句段，在加工程序文件夹下，两通道子程序均以加工刀号及刀具名命名，并前缀以L/R用以区分左右主轴。根据工件特征设计工序，对子程序顺序及调用与否进行调整，调整后形成完整的加工程序。

在加工中，随时可能停止程序循环进行调整或换刀操作。在程序中断完成调整后，如不对程序进行特殊设置，一般有两种处理方法：一是重新从头执行加工程序，已完成的子程序空走刀；另一种是手动对主程序中已完成的子程序进行注释操作以跳过执行，并在当前工件加工全部完成后再次中断循环取消注释。无论哪种操作方式均不是理想状态。

在此笔者通过西门子程序分支跳转功能，再次利用R参数的自动赋值功能，实现对当前加工程序执行进程的自动判断，从程序头执行程序时会自动接续上次加工位置。具体解决思路为：按主程序排列的子程序顺序，在每个子程序加工结束后，声明一个R参数（R20）对其进行一次顺序赋值（第一段子程序赋值为2，第二段子程序赋值为3，依次类推）；主程序执行结束后，在主程序末尾对R20赋值为0。为防止子程序在预读程序段时提前赋值，产生未全部完成加工但已更新赋值的情况，在赋值前加中止预读指令“STOPRE”。子程序R20赋值段语句举例如下。

```

STOPRE
R20=2
M17

```

同时主程序调用子程序之前使用CASE语句通过R20的当前值进行相应跳转。CASE语句的基本句法如下，其含义见表5。

CASE(<声明>) OF <常量_1> GOTOF <跳转目标_1> <常量_2> GOTOF <跳转目标_2> ... DEFAULT GOTOF <跳转目标_n>

根据上述功能，即可通过判断R20参数当前值

表5 CASE语句含义

内容	含义
CASE	跳转指令
<声明>	变量或计算函数
OF	用于编制有条件程序分支的关键字
<常量_1><常量_2>	变量或者计算函数规定的恒定值
DEFAULT	对于变量或者计算函数没有采用规定值的情况，可以用DEFAULT指令确定跳转目标
GOTOF	以程序末尾方向的带跳转目标的跳转指令
<跳转目标_1><跳转目标_2>...<跳转目标_n>	当变量值或者计算函数值符合第一个规定的常量，程序分支到跳转目标

确定程序跳转位置。当R20不为0时，根据R20值分别跳转至标记位置的子程序进行加工；当R20为0时，跳转至主程序下一语句，从头执行子程序。主程序应用CASE语句示例如下。

```
CASE R20 OF 2 GOTOF BB 3 GOTOF CC 4 GOTOF
DD.....18 GOTOF RR DEFAULT GOTOF SS
SS:
.....
STOPRE
AA:
_L01_XS125
BB:
_L01_XX125
CC:
_L07_D160
.....
RR:
_L21_LXX40
```

3.3 多通道同步控制

由于加工设备是双主轴机床，两侧主轴共用Y轴，同时机床系统的通道3（CHAN3）分配给桁架自动线，所以3个通道在程序执行过程中会存在各种需要同步执行的情况。现按同步需求场景，分别对多通道同步控制方式进行说明。

第一类主要包括3种场景：①加工程序通道与自动线通道通信应答同步需求。②双主轴Y轴移动前对加工程序段完成同步度进行确认。③双通道中特定声明或赋值及机床M指令执行前对另一通道上一程序段执行完成同步度进行确认。

这3种场景本质需求是相同的，均需要各自通道在得到其他通道程序执行完成信号前，持续等待

其他通道程序继续执行，得到执行完成信号以后，该通道再执行下一句程序段。此类同步需求，可通过西门子跨通道协调指令WAITM语句来实现。

WAITM语句的基本句法如下，其指令见表6。

WAITM(<MarkNr>,<ChanNr>,<ChanNr>, ...)

表6 WAITM语句含义

内容	含义
WAITM()	预定义步骤，用于等待到达给定通道中的等待标记 在自身通道中会通过WAITM设置给定的等待标记，前一个程序段通过准停结束，等待标记会在同步后被清除 每个通道最多可同时设置10个标记
<MarkNr>	等待标记编号 在一个多通道系统中最多可设置100个等待标记(0~99)
<ChanNr>	通道编号

以通道1、通道2板簧面孔系加工子程序对应位置WAITM语句（见表7）为例，通道1、通道2在执行T9M6换刀语句前，需要确认另一通道同时到达等待标记91位置，方可执行。在两个通道全部完成换刀动作后，到达等待标记92位置，才同步执行备刀T10语句。

表7 WAITM语句示例

通道1	通道2
WAITM(91,1,2) T9M6 WAITM(92,1,2) T10	WAITM(91,1,2) T9M6 WAITM(92,1,2) T10

通过WAITM指令控制，可确保各通道动作、加工通道与机械手交互的逻辑顺序与同步性，保证在共用Y轴的前提下顺利完成加工动作。

另一类场景是双主轴在联动加工过程中因Y轴需同时完成多轴联动加工过程产生的同步需求。多轴联动加工一般在圆弧或曲线插补、螺旋铣等加工策略中较为常见，此类同步需求除单段语句同步执行的需求外，额外还有加工刀路完全同步的需求，仅用WAITM语句已不能满足此种加工方式。此类场景下，宜通过西门子多轴联动耦合指令组（TRAILON、TRAILOF）来实现^[3]。其基本句法如下，具体含义见表8。

TRAILON(<跟随轴>,<引导轴>,<耦合系数>)

TRAILOF(<跟随轴>,<引导轴>,<引导轴2>)

表8 TRAILON、TRAILOF指令含义

内容	含义
TRAILON	用于启用和定义耦合轴组合的指令
<跟随轴>	耦合轴的名称 一个耦合轴也可以是其余耦合轴的引导轴，以这种方式可以建立不同的耦合组合
<引导轴>	引导轴的名称
<耦合系数>	耦合系数说明了耦合轴和引导轴位移之间的关系 <耦合系数>=耦合轴位移/引导轴位移 缺省设置：1 负值表明引导轴和耦合轴在相反方向运行
TRAILOF	关闭耦合组合的指令 有2个参数的TRAILOF只会关闭指定引导轴的耦合

以两轴螺旋铣锁销孔沉台部分程序（见表9）为例，通道2通过TRAILON指令，完成X₂、Z₂轴相对通道1的联动；达到等待标记1后，通道1开始执行螺旋铣指令，通道2主轴与通道1主轴联动加工；达到等待标记3后，双通道分别通过TRAILOF断开主轴联动，执行G0的抬刀操作。

通过联动轴指令，可以保证在多轴联动加工过

表9 两轴螺旋铣锁销孔沉台部分程序

通道1	通道2
M3S2000 G0Z3 WAITM(1,1,2) G2I-6 Z-1.5 F500 TURN=5 G2I-6 F500 WAITM(3,1,2) G0Z14	M3S2000 G0Z3 TRAILON(X,X2,-1) TRAILON(Z,Z2) WAITM(1,1,2) WAITM(3,1,2) TRAILOF(X,X2) TRAILOF(Z,Z2) G0Z14

MW 20240717

（上接第65页）

```
M3 S#15 G1 Z-#16 F#9（转速浮动方式进行切削加工）
#7=#7+#8
END1
#7=0
#17=#17+1
END2
G1 X50. F0.3
G0 X100
M30
%
```

4 结束语

经实际加工验证，主轴转速浮动功能的引入，

程中双主轴动作完全同步且加工刀路正常。

4 结束语

本文通过对一次装夹完成前轴零件毛坯到成品的加工工艺路线的探索，对夹具原理、编程思路及主要难点问题进行了阐述。具体子程序编制过程仅涉及基本的G代码与M指令等内容，未做展开论述，主要基于西门子SINUMERIK 840D sl数控系统的变量（R参数）功能、程序跳转功能以及多通道协调、轴耦合等功能进行说明与展示。基于以上这些功能，可实现前轴产品从图样到自动化加工程序的直接转化，实现调整零废品，降低了新产品编程门槛及程序编制难度。

本文工艺及程序设计的思路，可以推广到其余复杂工件的整体编程过程中，即将产品几何参数通过用户变量与机床程序坐标点直接关联，将传统编程调试中找点→验证→补偿这一反复修正过程，转化为计算→加工→合格一次成功的过程。

参考文献：

- [1] 王吟洪. 汽车前轴切削加工技术的改进[J]. 汽车工艺师, 2006 (5) : 56, 58, 60.
- [2] 马辉. R参数编程在数控铣削外球面加工中的应用[J]. 邢台职业技术学院学报, 2013, 30 (5) : 99-101.
- [3] 赵全锦. 西门子数控系统耦合轴功能（COUPLEDAXES）的应用[J]. 制造技术与机床, 2002 (7) : 38-39, 59.

MW 20240717

对改善工件表面质量有着明显的效果。通过PLC程序方式与宏程序方式实现主轴转速浮动功能，既简单又实用，是实现数控机床主轴转速浮动功能比较经济有效的方法。

参考文献：

- [1] 李宏胜. FANUC数控系统维护与维修[M]. 北京：高等教育出版社，2011.
- [2] 曹智军. FANUC PMC控制技术[M]. 北京：机械工业出版社，2015.
- [3] 许云飞. FANUC系统数控铣床编程与加工[M]. 北京：电子工业出版社，2014.

MW 20240716