

## 优化

### 6.1 控制性能

#### 功能概述

使用功能“自动伺服优化”可以为电流环、转速环和位置环加前馈，进行优化。目标是使用 **SINUMERIK Operate** 来精整进给轴或主轴。

- 频率响应测量
- 转速环计算
- 电流设定值滤波器设定
- 位置环计算
- 验证优化后控制环的实际特性
- 前馈控制类型：等转速控制时间
- 轨迹插补

#### 闭环控制

被控对象上有三个相连的控制闭环：

- 电流环
- 转速环
- 位置环

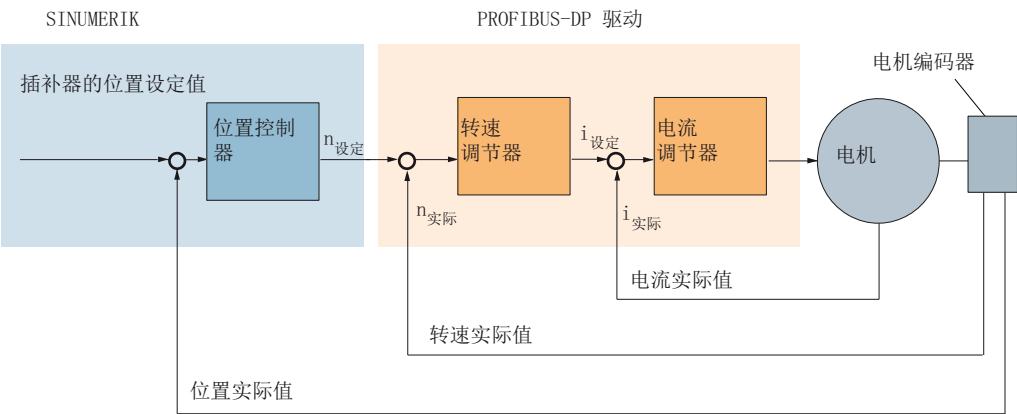


图 6-1 被控对象

控制环是依次优化的：首先是电流控制器，然后是转速控制器，最后是位置控制器。速度、加速度和急动度的动态限幅在插补器中设置。转速环通常由电机编码器来构成闭环；而位置环既可由电机编码器，也可由直接测量系统来构成闭环。

前提条件

在开始自动优化前，须设置激活动态刚性控制：

MD32640[0] \$MA\_STIFFNESS\_CONTROL\_ENABLE = 1

位置环因此可以更短的周期时间工作。使用动态刚性控制时还须设置以下机床数据：

MD32110 \$MA\_ENC\_FEEDBACK\_POL = 1

需要反转极性时，必须在驱动中通过参数 p0410 设置编码器实际值取反：

- p0410[0]=1 转速实际值取反
- p0410[1]=1 位置实际值取反

在主主轴上使用“自动伺服优化”功能时，可能会缺少伺服使能 PLC 信号。机床厂商应向用户提供使能该信号的方法，以使用户能进行优化。比如：可以通过一个特殊的按键或者设置一个 PLC 状态标记来给出使能。

## 保存驱动数据

在驱动上电或执行了驱动复位操作后，SINAMICS S120 的数据会从保存文件载入对应的驱动。必须对这些数据执行保存操作，以便在下次上电或执行驱动复位操作后驱动数据修改仍能永久保存。

---

### 说明

“复位 (po)” 操作对驱动数据没有影响。

---

操作步骤：

1. 按下软键“驱动参数”，然后按下软键“保存/复位”。
2. 按下软键“保存”，最后按下软键“驱动系统”。

屏幕左下方会显示提示，指出当前保存进度。保存操作结束后，屏幕上会显示以下提示：“所有驱动对象已保存”。

## 文档

更多信息请参见以下手册：

- SINUMERIK Operate 调试手册 (828D\_IH9)，章节“跟踪”
- 功能手册之基本功能分册；章节“速度，设定值/实际值系统，闭环控制 (G2)”
- 功能手册之扩展功能分册；章节“补偿 (K3)”

## 另见

下文详细介绍了用 SINUMERIK Operate 优化控制环的各个步骤：

- 自动伺服优化 (页 178)
- 轴急动度 (页 190)
- 转矩使用率 (页 199)
- 主轴优化 (页 203)
- 圆度测试 (页 214)
- 摩擦补偿 (页 223)

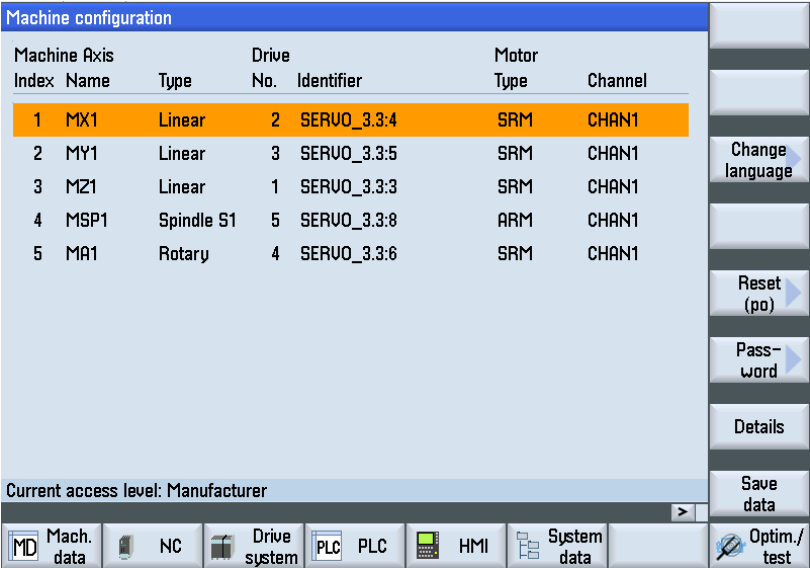
6.2 自动伺服优化

6.2.1 启动前的选项

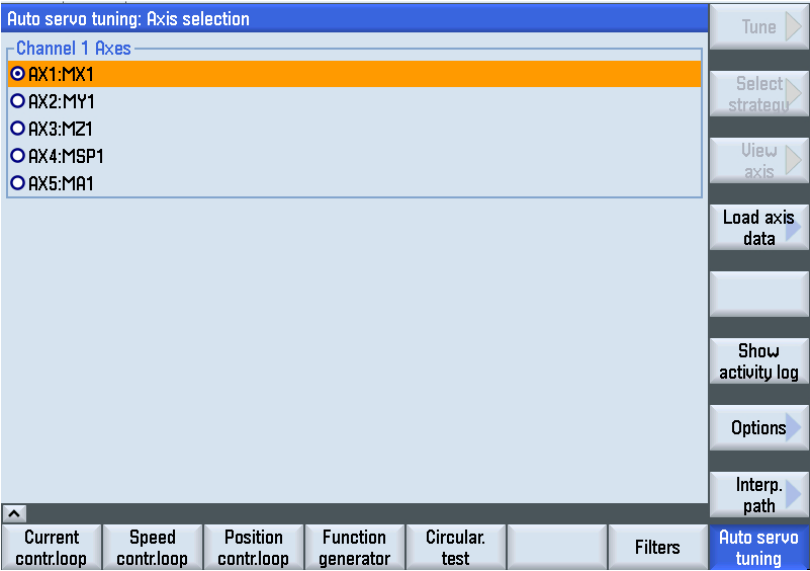
启动功能

步骤:

- 1. “自动伺服优化” 功能在操作区 “调试” 中按下软键 “优化/测试” 启动。



- 2. 用方向键浏览，然后按下<SELECT> 键选中轴，此处选择 X1 轴：

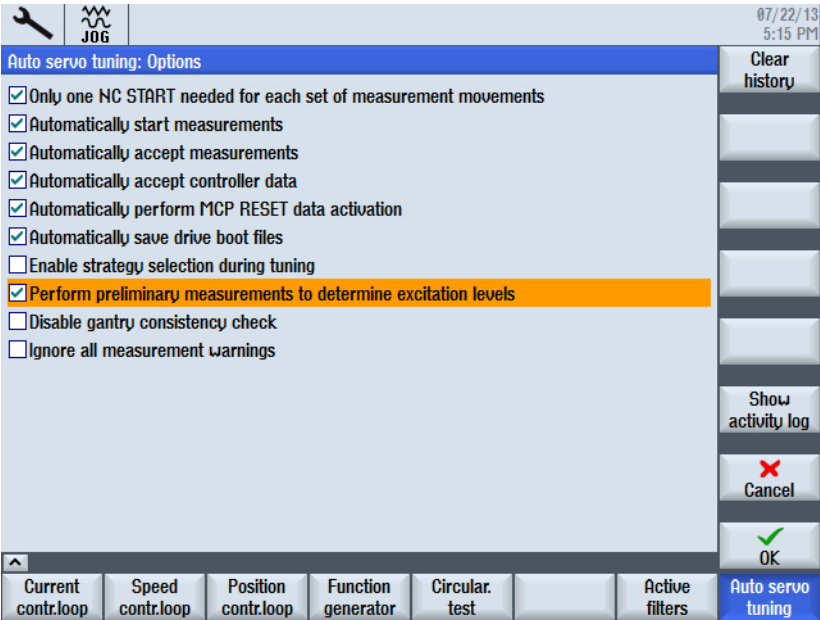


对话框会显示，该轴是否经过优化。经过优化的轴会标有优化时间和日期。



### 选择选项

按下软键“选项”，检查是否已经设置了所有自动优化所需的选项。设置了所有选项后，只需按下一个软键，便可自动完成优化。按照屏幕上的提示操作。



选项“允许在优化期间选择方案”只建议专家使用。

## 6.2.2 选择优化方案

### “轴”方案的缺省设置

通过软键“选择方案 >”选择用于轴、转速控制器和位置控制器的优化方案。推荐使用方案 102、303 和 203:

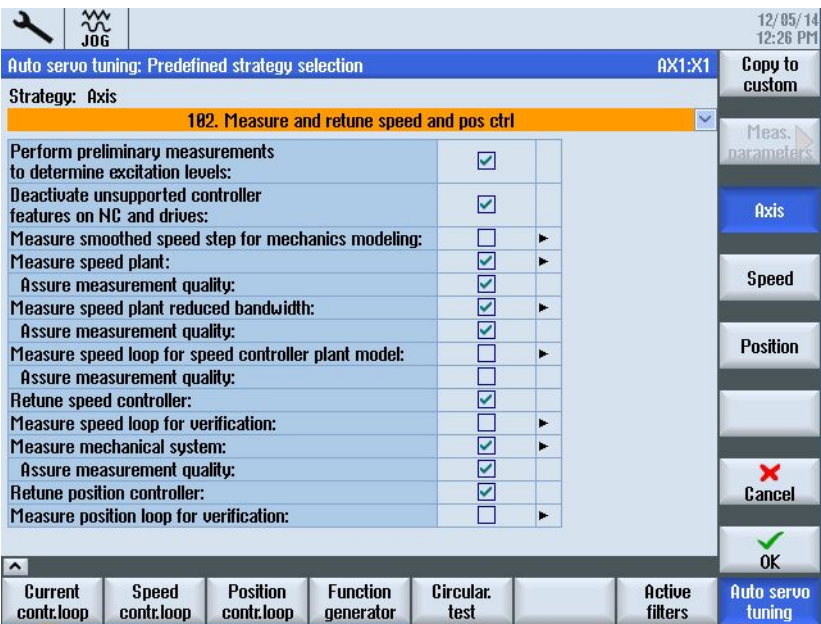


图 6-2 “方案：轴” - 缺省设置 102

在“轴”方案中选择需要优化的控制器。此时也可对经过优化的闭环进行测量，以检查结果。选择了“用户自定义的方案（108）”时，所有选件都激活并可进行设置：

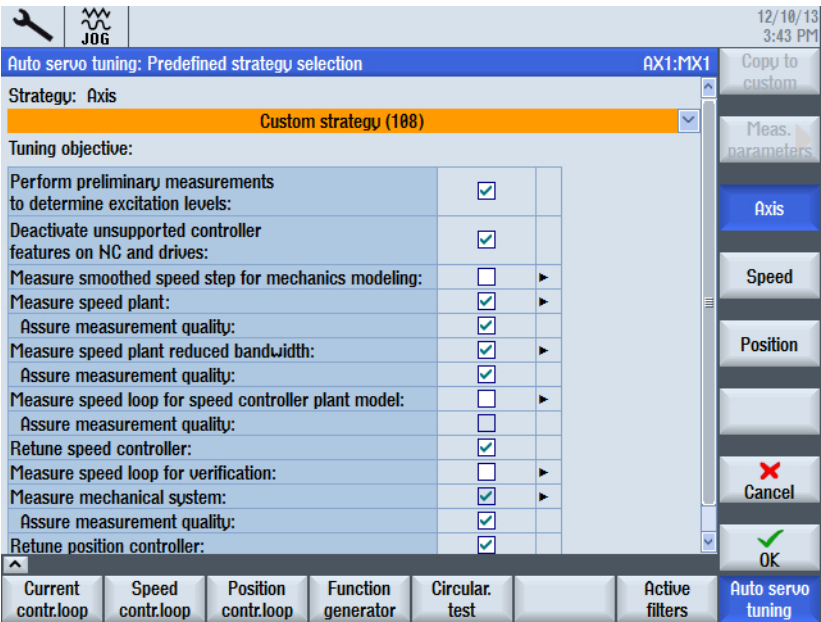


图 6-3 “方案：轴” - 示例 (108)

选择列表中还有其他方案并可与优化目标进行组合。通过“调整方案”可以激活并设置各个选件。

“转速” 示例：方案 303

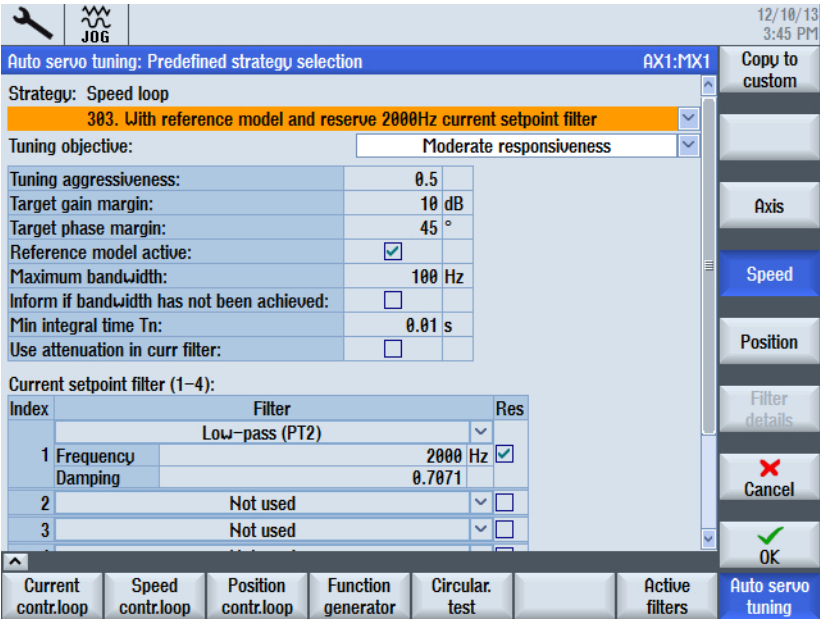


图 6-4 “方案：转速/速度控制器” 示例

重要设置：优化程度和最小积分时间 Tn。

- 优化程度：
 

该参数基于稳定性限值确定了 Kp 和 Tn 的设置。在该设置下，会预设相位裕度和振幅裕度。

  - 缺省值 = 0.5
  - 最小值 = 0 [最大稳定性]
  - 最大值 = 1 [最小稳定性]
- 最小积分时间 Tn：
 

该参数可避免自动伺服优化将转速环的积分时间设置过低。如果自动伺服优化设置的 Tn 时间比该参数更低，系统将采用该参数的值。

如果可能出现质量或转动惯量的变化，较高的积分时间有助于更稳定的控制。这适用于直接驱动和车床的主主轴。

  - 缺省值 = 10 ms
  - 最小值 = 0.5 ms
  - 最大值 = 100 ms

“位置” 示例：方案 203

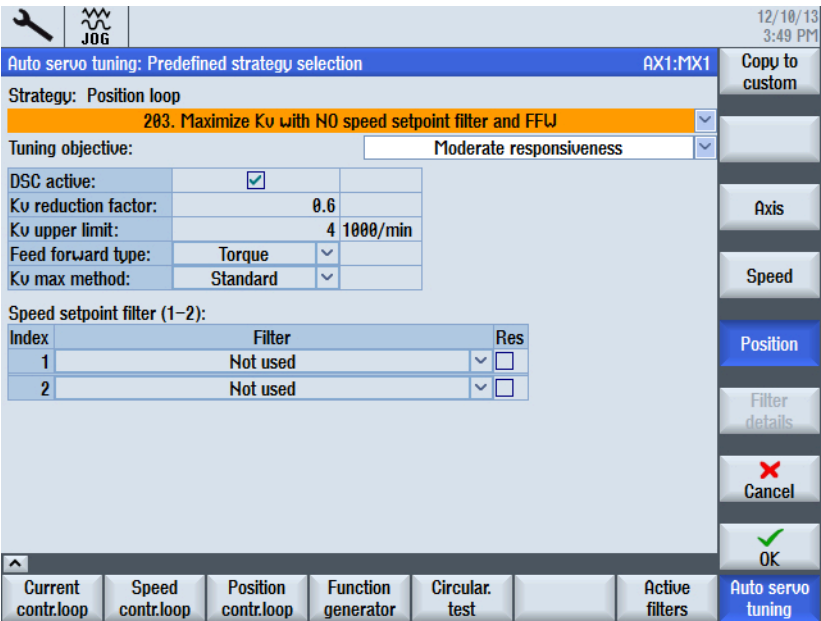


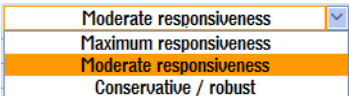
图 6-5 “方案：位置环” 示例

Kv 降低系数和 Kv 上限值取决于所选的优化目标。

- Kv 降低系数：  
该参数会降低由自动伺服优化计算出的最大 Kv。在位置环中不可以有过冲。最大 Kv 是尚不会导致过冲的值。为使调整更稳固（防止出现机械变化），可以降低可能的最大 Kv 值。“正常控制” 优化目标下设置的裕度是 40%。此外，Kv 被限制在 4 mm/min 内。
  - 缺省值 = 0.6
  - 最小值 = 0.1
  - 最大值 = 1（无降低）
- 前馈控制类型：建议采用转矩前馈控制。  
使用报文 136 时，转矩前馈控制可实现最高轮廓精度。

优化目标

通过选择优化目标调整转速控制器和位置控制器的预设置。



- **快速控制:**

转速控制器和位置控制器以最大增益系数和最低稳定性进行优化。

应用：需要最大程度地降低阻力的高速加工（阻力比如有：摩擦力、传动带齿轮、强大的切削力，例如：钛加工中）。高速加工推荐采用直线电机。

前提条件：机床必须具有刚性结构；运动质量不能有明显变化。

- **正常控制（= 缺省设置）:**

对于大多数机床和应用，该控制器动态响应已经足够。设置比“快速控制”更耐用。

应用：轴的转矩或负载量只需改变一点点，因为该设置适用于很多应用。

- **稳定控制:**

仅选择较小的控制器增益，以确保最高的稳固性。

对转速控制器进行优化，使其达到最大阻尼来避免振动并达到良好的位置控制器增益。

应用：推荐用于轴机械或负载量变化较大的机床。也适用于响应振动的轴，例如：车削机床上的主主轴或负载量较大的大型轴。

推荐用于对加工时间要求较低的应用。

6.2.3 启动自动伺服优化的步骤

启动自动伺服优化

操作步骤：

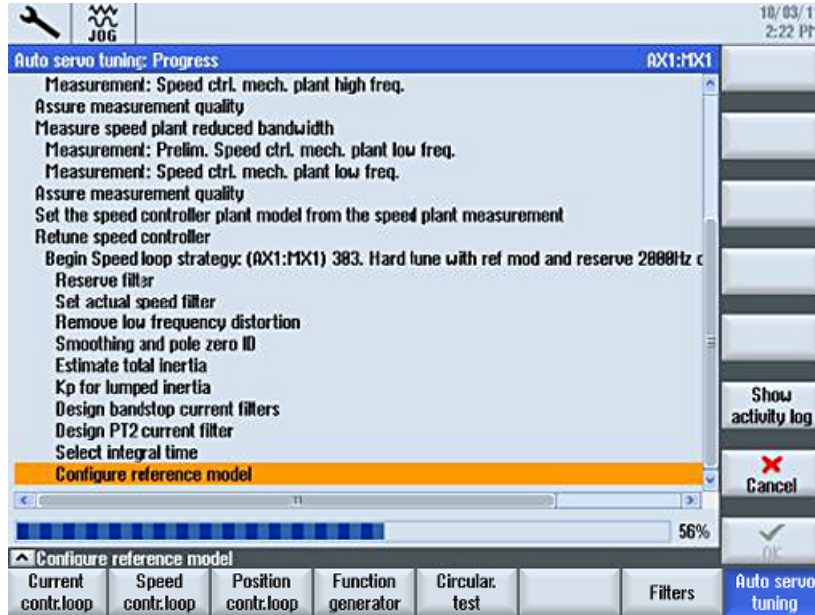
- 1. 确认需要优化的轴处于安全位置。 如果不处于安全位置，在 JOG 模式中将轴移动到其行程中心：



- 2. 按下“确认”。之后界面上会弹出提示，要求按下机床控制面板上的“CYCLE START”键：



3. 在自动伺服优化的后续过程中还会弹出此类提示。需要多次按下“CYCLE START” 键以开始下一个测量。





4. 在优化结束后会显示以下画面，在其中可以检查优化后的新值和优化前的原始值。  
示例： 位置控制器

Auto servo tuning: Controller reviewAX1:MX1

Position loop

Channel: 1

Axis: AX1:MX1

Drive data set: DDS0

Axis param set: 1

	Manual	Auto tuned	Original
Kv factor:	17.78	17.78	2 1000/min
Feed forward type:	Speed	Speed	Speed
Equivalence time for FFW:	6.284e-4	6.284e-4	8e-3 s
Inertia for torque FFW:	0	0	0 kgm²
DSC active:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Estimated dead time:	0	0	0 s

Manual filters:

		Frequency	Damping	Numerator frequency	Numerator damping	Res	EN
SS	PT1	3999				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SS	PT1	3999				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

SS=Speed setpoint

Auto tuned filters: None

Original filters: None

Current contr.loop

Speed contr.loop

Position contr.loop

Function generator

Circular test

Filters

Speed ctrl

Bode plots

Machine data

Show activity log

Cancel

Accept

Auto servo tuning

示例： 转速控制器

Auto servo tuning: Controller reviewAX1:MX1

Speed loop

Channel: 1

Axis: AX1:MX1

Drive data set: DDS0

Axis param set: 1

	Manual	Auto tuned	Original
Proportional gain Kp:	0.1611	0.1611	0.008612 Nms/rad
Integral time Tn:	5e-3	5e-3	0.01 s
Reference model active:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reference model frequency:	290.2	290.2	0.5 Hz
Reference model damping:	0.7071	0.7071	1
Reference model time:	0	0	0 s
Act speed filter time const:	0	0	0 s
Estimated total inertia:	9.065e-5	9.065e-5	9.065e-5 kgm²
Motor inertia:	2.8e-5	2.8e-5	2.8e-5 kgm²

Manual filters:

		Frequency	Damping	Numerator frequency	Numerator damping	Res	EN
CS	PT2	2003	0.707			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CS	2nd order	1533	0.6156	1538	0.0277	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CS	PT2	1993	0.7			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CS	PT2	1003	0.7			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Current contr.loop

Speed contr.loop

Position contr.loop

Function generator

Circular test

Filters

Position ctrl

Bode plots

Machine data

Show activity log

Cancel

Accept

Auto servo tuning

按下软键“接收”后，采用新值。

5. 以下信息会提示还有其他轴需要进行优化，以获得良好的插补结果：

自动伺服优化

提示：所有轴的优化完成后，还需采取额外措施确保轴在轨迹插补中相互协调。

更多详细信息参见记录。



优化结果

接着显示优化的时间和日期：

Auto servo tuning: Axis selection		AX1:MX1
Channel 1 Axes		
<input checked="" type="radio"/> AX1:MX1		Tuned: 11/15/11 9:53:37 AM
<input type="radio"/> AX2:MY1		Untuned
<input type="radio"/> AX3:MZ1		Untuned
<input type="radio"/> AX4:MSP1		Untuned
<input type="radio"/> AX5:MA1		Untuned

其他轴可按同样方式优化：

Auto servo tuning: Axis selection		AX5:MA1
Channel 1 Axes		
<input type="radio"/> AX1:MX1		Tuned: 11/15/11 9:53:37 AM
<input type="radio"/> AX2:MY1		Tuned: 11/15/11 10:07:30 AM
<input type="radio"/> AX3:MZ1		Tuned: 11/15/11 10:11:39 AM
<input type="radio"/> AX4:MSP1		Tuned: 11/15/11 10:27:50 AM
<input checked="" type="radio"/> AX5:MA1		Tuned: 11/15/11 10:31:00 AM

6.2.4 开始轨迹插补

引言

插补表明参与轮廓加工的轴必须具有相同的跟随误差。在对单轴进行优化后，各个轴具有不同的控制特性，这种特性只对于轴本身而言是最佳的。为确保各轴有相同的跟随误差，必须以轴组中的“最慢轴”为准来调整控制特性。这其中包含 Kv 系数和前馈控制方式。

插补轴组的优化方案选择

在此为轨迹插补定义方案：

缺省设置“1105：采用动态响应自适应滤波器的轨迹优化（推荐）”

- (1103) 不降低转速控制器增益的轨迹优化

采用等效时间调整的轨迹优化：

轴优化完成后，控制器的等效时间针对各个轴进行不同的设置。在方案 1103 中会对采用等效时间调整的轨迹优化进行补偿。力矩前馈时 MD32800 中的等效时间以及转速前馈时 MD32810 中的等效时间会被提高至所有插补轴中最大的时间常数。

- 轴优化的转速控制器比例增益  $K_p$  不会降低。
- $K_v$  系数 (MD32200) 在力矩前馈时不再进行调整。轴优化结束后保留最大的  $K_v$  系数。
- 前馈控制 (MD32800 或 MD32810) 的等效时间常数被提高至所有轨迹轴中最大的时间常数。
- 积分时间 (p1462)、参考模型 (p1433 及之后的参数) 以及所有的转速设定值滤波器都会在转速前馈时进行调整，在力矩前馈时会保持各个经过轴优化的值。

- (1104) 采用用户自定义方案的轨迹优化

所有调整均和 1105 中一样进行。此外，用户可以输入转速控制器比例增益  $K_p$  的降低系数。

- 调整生效  $K_p$ : ✓
- $K_p$  最小的降低系数：根据需要才可降低  $K_p$  的系数。
- 主轴可能会限制其他轴：只要主轴是动态性能最弱的轴，主轴便可导致伺服轴  $K_p$  值降低。
- 其他轴可能会限制主轴：若伺服轴为最弱的轴，则其也可能引起主轴的  $K_p$  降低。
- 在 MD32900 \$MA\_DYN\_MATCH\_ENABLE 中激活动态响应自适应  
需要将轴的动态响应自适应时间常数记入 MD32910[n] \$MA\_DYN\_MATCH\_TIME 中。

- (1105) 采用动态响应自适应滤波器的轨迹优化（推荐）”

特别推荐采用此方案：

动态响应不同又相互插补的轴可使用作为动态响应自适应的时间常量调整为最慢的控制环。动态响应自适应的时间常数是慢控制环与各轴的等效时间常数之差。轴优化完成后不同的等效时间一般都会通过时间常数 (MD32895) 进行补偿。

下列参数将得到调整：

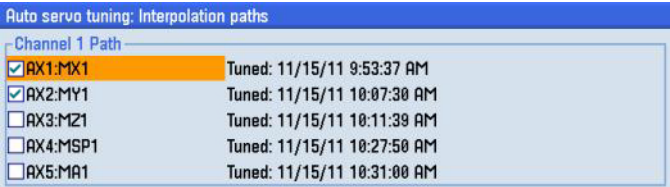
- 在使用转速前馈时，只对数值进行调整。接着会对转速控制器值如  $K_p$ 、 $T_n$ ，参考模型和转速设定值滤波器进行调整。
- $K_v$  系数 (MD32200)：如在力矩前馈时未调整，则会保持经过轴优化的值。
- 如果 MD32895 中存在时间常数，则设置 MD32890 \$MA\_DESVAL\_DELAY\_ENABLE=1 并使用 MD32895 中的时间常数。否则会设置 MD32900 \$MA\_DYN\_MATCH\_ENABLE = 1 并使用 MD32910 \$MA\_DYN\_MATCH\_TIME。

# 轨迹插补

下一步是选择需要进行轨迹插补的轴。

操作步骤：

1. 按下软键“轨迹插补”。一起插补的轴属于“通道 1”。
2. 按下软键“编辑&优化”。
3. 只能选择可以一起插补的轴。  
选择 X 轴和 Y 轴用于以下示例：

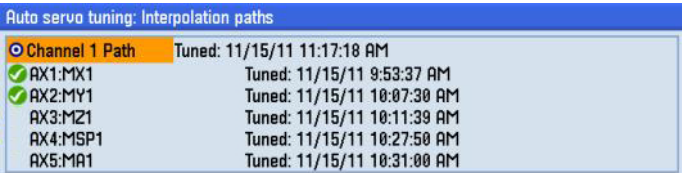


4. 所选的轴会显示计算出的轨迹优化值。各个轴优化的轴优化值显示如下，进行比较：

Auto servo tuning: Interpolation path review				CH1:CHAN1	View axis
Channel 1 Path					
Path optimal:					
Parameter	AX1:X1	AX2:Y1	Unit		
Kv factor:	4		1 1/min		
Proportional gain Kp:	1.388		4 Nms/rad		
Kp/inertia:	628.3	382.2	1/s		
Integral time Tn:	0.01	0.01	s		
Reference model active:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
Reference model frequency:	131.2	71.14	Hz		
DSC active:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
Feed forward type:	Torque	Torque			
FFW always active:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
Curr ctrl EQ time for Torque FFW:	8.844e-4	9.14e-4	s		
Curr ctrl EQ time MD32800:	0.001884	0.001914	s		
Speed delay time (P1429):	7.594e-4	7.89e-4	s		
Inertia for torque FFW:	0.001988	8e-3	kgm²		
Interpolation speed pre-control:	Linear	Linear			

Auto servo tuning: Interpolation path review				CH1:CHAN1	View axis
Channel 1 Path					
Axis optimal:					
Parameter	AX1:X1	AX2:Y1	Unit		
Kv factor:	4		1 1/min		
Proportional gain Kp:	1.388		4 Nms/rad		
Kp/inertia:	628.3	382.2	1/s		
Integral time Tn:	0.01	0.01	s		
Reference model active:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
Reference model frequency:	131.2	71.14	Hz		
DSC active:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
Feed forward type:	Torque	Torque			
FFW always active:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
Curr ctrl EQ time for Torque FFW:	8.844e-4	9.14e-4	s		
Curr ctrl EQ time MD32800:	0.001884	0.001914	s		
Speed delay time (P1429):	7.594e-4	7.89e-4	s		
Inertia for torque FFW:	0.001988	8e-3	kgm²		
Interpolation speed pre-control:	Linear	Linear			

5. 按下“接收”和“确认”，采用新设置。



自动优化到此结束。

## 6.3 优化轴急动度

### 6.3.1 检查轴急动度

#### 急动度限制

下一步是设置急动度限制，优化轴的加速过程：急动度限制通过设置一段加速度变化时间，来平滑加速特性和响应特性。

急动度的单位是“距离单位/ $s^3$ ”，即加速度的时间变化率：加速度（距离单位/ $s^2$ ）除以时间（ $s$ ）。

相应地，加速度变化时间的计算公式为： $t[s] = \text{加速度（距离单位}/s^2\text{）} \div \text{急动度（距离单位}/s^3\text{）}$ 。

各轴的急动度不一定要相同。设置急动度限制后，速度曲线上加速阶段开始和结束处的曲线会更加平滑，运动因此更加平稳。

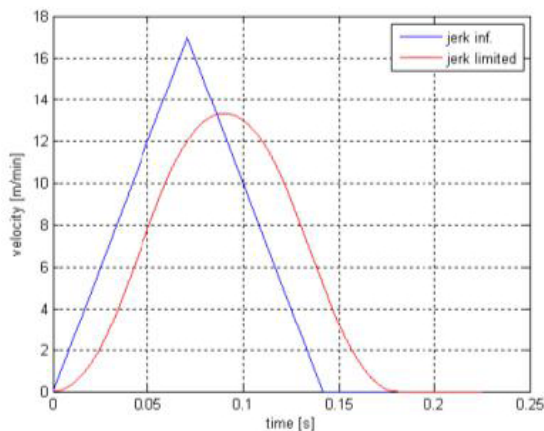
- 在程序中写入 **SOFT** 后，急动度限制激活。
- 在程序中写入 **BRISK** 后，急动度限制关闭。

#### 急动度的相关机床数据

建议采用  $MD20150[20] = 2$  的缺省设置，即“SOFT”。

- $MD20150[20] = 1$ ：“BRISK”在通电后激活（刚性加速模式）。
- $MD20150[20] = 2$ ：“SOFT”在通电后激活（软加速模式）。

示例：



蓝色 速度曲线，不带急动度限制

红色 速度曲线，带急动度限制

## 轴的定位特性

编写一个包含多个进给率、多个目标位置的测试程序，然后执行测试程序，再通过“跟踪”功能便可检查轴的定位特性。

- 如果使用的是光栅尺，可以非常方便地观察出滑块的响应特性。
- 但如果使用的是电机编码器来构成位置闭环（间接反馈），则无法用跟踪功能来观察位置闭环中滑块的响应特性。

在配备 SINUMERIK 828D 的机床上，常用的急动度在 20 到 100 之间。编写测试程序时要注意编写一段足够长的行程，这样轴才能达到程序中的进给速度。

此外，程序中还应编写轴达到进给速度和目标位置后的一段停留时间，比如：0.5 秒。程序中的第一个进给速度应为最大进给速度的 50%。应在所有进给倍率值下检查轴的定位特性，直到轴达到最大进给速度。

### 6.3.2 轴急动度的测试程序

#### 测试程序

下面的数控程序可以在自动模式或 MDA 模式中使用，取决于机床的具体配置。程序包含了用于激活/关闭跟踪触发器的指令：

```
FFWON
```

```
SOFT
```

### 6.3 优化轴急动度

```
$AN_SLTRACE=0; Reset Start Servo-Trace-Trigger
```

```
LAB:
```

```
G01 Y210 F10000
```

```
G04 F0.5
```

```
$AN_SLTRACE=1; Start Servo-Trace-Trigger
```

```
Y260
```

```
G04 F0.5
```

```
GOTOB LAB
```

```
M30
```

查看跟踪结果:

选择 <MENU SELECT>，选择操作区“诊断”，按下菜单扩展键、软键“跟踪”，按下 <CYCLE START>:

轴开始移动，系统会跟踪选中的信号 5 秒钟。之后显示结果。

**机床数据:**

为检查不受位置控制器影响的定位特性，应将位置控制器增益系数  $K_v$  设为 0。并调整定位公差，避免在测试时系统报错:

- MD32200 \$MA\_POSCTRL\_GAIN = 0
- MD36012 \$MA\_STOP\_LIMIT\_FACTOR = 100
- MD36400 \$MA\_CONTOUR\_TOL = 20

#### 初始化跟踪功能

按下软键“启动跟踪”后，跟踪功能启动并初始化。初始化过程取决于对话框“设置”中的选择。在本例中，跟踪功能是由程序指令启动的。按下软键“启动跟踪”，来初始化跟踪。

跟踪成功初始化，一旦通过程序设置了触发器便立即启动。

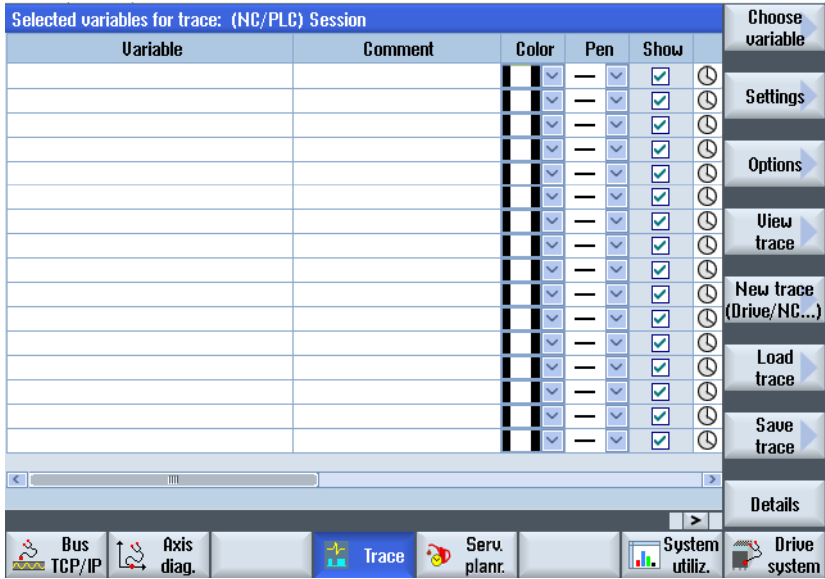
### 6.3.3 选择跟踪信号

#### 选择跟踪信号

现在，需要跟踪位置设定值和位置实际值。

操作步骤：

1. 用以下按键调用跟踪功能：  
 <MENU SELECT → 操作区 “诊断” → 菜单扩展键 → 软键 “跟踪”。



2. 按下软键 “选择变量”，选择所需变量。
3. 按下软键 “筛选/搜索”，以筛选变量。有以下筛选条件：
  - 系统变量
  - NC
  - 轴
  - 通道
  - 操作方式组（BAG）
  - 伺服
  - 全局用户数据(GUD)
  - PLC
  - PLC 报警
  - 全部（无筛选）
4. 设置筛选条件 “伺服”，从中选择两个变量，比如：Y 轴位置设定值和位置实际值：

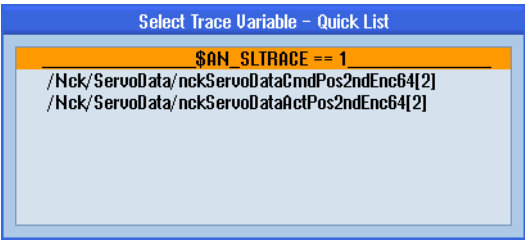
Selected variables for trace: (NC/PLC) Session					
Variable	Comment	Color	Pen	Show	
ervoDataCmdPos2ndEnc64[2]	Position setpoint (64 bit)				
ervoDataActPos2ndEnc64[2]	Position actual value meas.system				

### 跟踪时长和触发条件

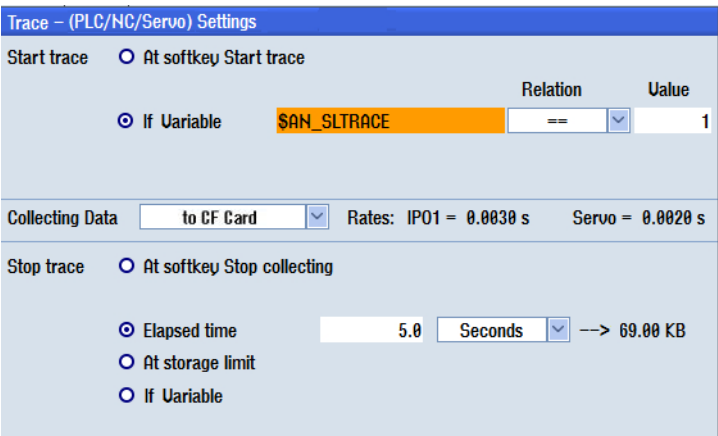
跟踪功能可以手动或自动启动。另外还可设置跟踪时长。在本例中，跟踪功能是由程序指令启动的。变量可通过软键 “快捷表” 选择。

6.3 优化轴急动度

选择选项“\$AN\_SLTRACE==1”，用一个变量来触发跟踪：

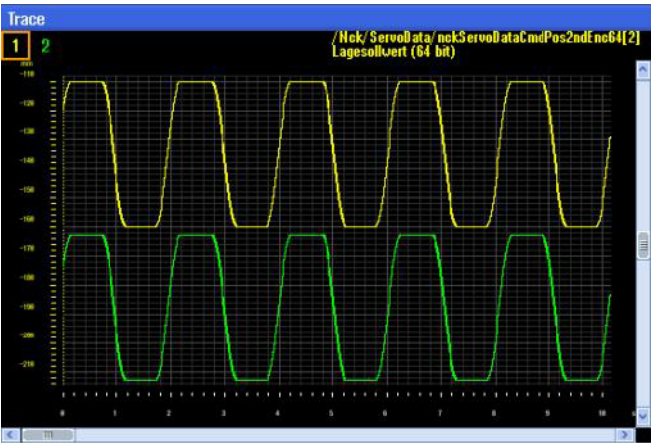


另外，跟踪还可以由选中信号的某个值来触发，或由一个通过软键“插入变量”插入的系统变量来触发。



跟踪结果

轴开始移动，系统会跟踪选中的信号 5 秒钟。之后显示结果。



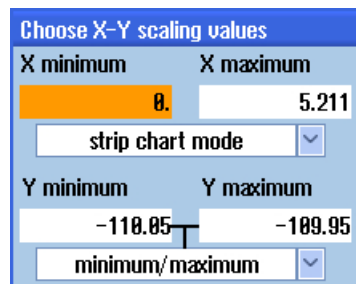


### 设置跟踪的显示比例

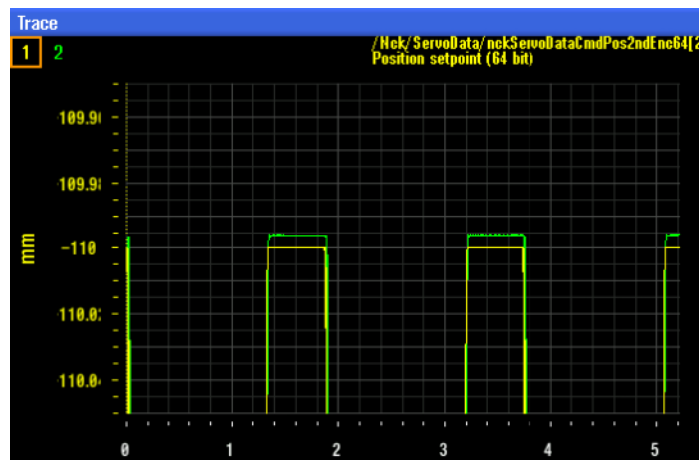
现在需要观察的是轴移动到目标位置这一阶段的跟踪结果。为观察细节，需要调整显示比例：软键“显示跟踪”→软键“比例”

为观察 -110 毫米处轴的定位过程，本例的比例设置如下。该设置得出的窗口为：上下各 100 毫米，以目标位置 -110 毫米为中心。根据机床/轴的具体情况，比例设置可与此不同。

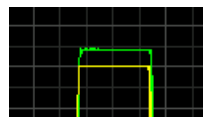
必要时也可以调整 X 轴最小值和最大值。



Choose X-Y scaling values	
X minimum	X maximum
0.	5.211
strip chart mode	
Y minimum	Y maximum
-110.05	-109.95
minimum/maximum	



细节图：



目标位置（黄线）和实际位置（绿线）不重合，这是因为位置控制器没有激活。

### 6.3.4 优化急动度设置

#### 优化目标

急动度优化的目标是：轴不越过实际位置。当急动度设的过高时会出现此情况。

但急动度设的过低对机床来说也是缺点，因此这表明轴需要很长的时间才能完成定位。不加位置控制器时轴的定位过程无超调。

不加位置控制器时的定位会导致定位误差，此时轴仅仅根据进给信号移动。定位结束后会出现超调，这是由机械装置导致的，可以通过使用急动度限制排除。

首先检查以下机床数据是否正确设置：

- MD32200 \$MA\_POSCTRL\_GAIN = 0
- MD32610 \$MA\_VELO\_FFW\_WEIGHT = 1
- MD32620 \$MA\_FFW\_MODE = 3
- MD32810 \$MA\_EQUIV\_SPEEDCTRL\_TIME = 优化得出的结果

下例展示了不同的急动度对轴定位的影响。

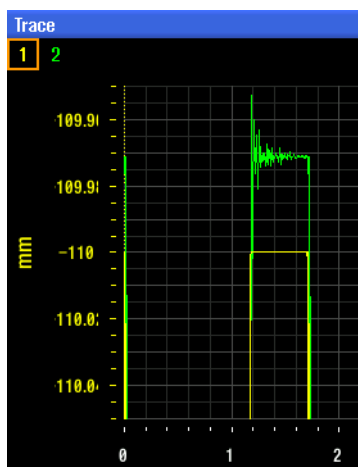
#### 示例

急动度由轴机床数据 MD32431 设置。

**示例 1:** MD32431 \$MA\_MAX\_AX\_JERK = 600 ⇒ 急动度过高。

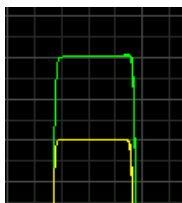
1. 重新启动跟踪，然后执行测试程序。
2. 按下软键“启动跟踪”，然后按下<RESET>和<CYCLE START>。
3. 调高 MAX\_AX\_JERK，排除超调。

下面的示意图展示了急动度不断升高，直到机械装置导致超调这一过程。



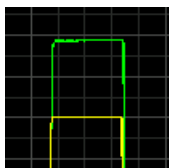
示例 2: MD32431 \$MA\_MAX\_AX\_JERK = 2 ⇒ 急动度过低。

急动度过低时定位轮廓有圆角。



示例 3: MD32431 \$MA\_MAX\_AX\_JERK = 65 ⇒ 优化后的急动。

急动度经过优化后，超调极少或根本没有，定位轮廓比较尖锐。



#### 示例：加入了前馈和位置控制器的定位

急动度经过优化后，必须激活位置控制器和前馈。

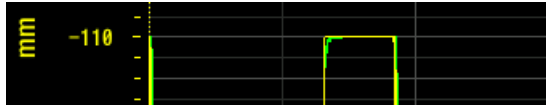
必要时设置以下机床数据：

- MD20150[23] = 2 : 前馈作为缺省设置自动激活。
- MD32200 \$MA\_POSCTRL\_GAIN = 优化得出的结果
- MD32610 \$MA\_VELO\_FFW\_WEIGHT = 1.0
- MD32620 \$MA\_FFW\_MODE = 3

### 6.3 优化轴急动度

- MD32810 \$MA\_EQUIV\_SPEEDCTRL\_TIME = 优化得出的结果
- MD32431 \$MA\_MAX\_AX\_JERK = 65
- MD36012 \$MA\_STOP\_LIMIT\_FACTOR = 原始值
- MD36400 \$MA\_CONTOUR\_TOL = 原始值

对前馈和急动度进行正确优化后，可以获得以下没有超调的定位过程：



## 6.4 转矩使用率

### 检查最大轴加速度

在优化了  $K_v$  系数和前馈后，还需要检查最差条件下的转矩使用率，以避免超出转矩限值：

- 高速条件
- 重载条件

“跟踪”功能可用于跟踪有效测量系统的速度设定值和转矩使用率，其中转矩使用率等于“转速设定值除以转速设定值限值”。如果跟踪信号“转矩使用率”= 100%，则表明驱动达到电流限值。修改跟踪功能中的测量参数，便可查看转矩使用率。

MD32300 \$MA\_MAX\_AX\_ACCEL 定义了轴的最大加速度。缺省设置是 [1 m/s<sup>2</sup>]（公制单位）、[ 39.37 inch/s<sup>2</sup>]（英制单位）和[ 2.77 rev/s<sup>2</sup>]（回转轴）。每根轴可以有不同的加速度设置。

如果机床厂商允许，MD32300 可设为一个适当值，使最差条件下加速阶段的转矩使用率一直保持在限值的 80% 到 90% 之间，具体百分比取决于期望的安全系数。

---

#### 说明

机床的机械结构对最大加速度有一定限制。机床厂商必须规定理想的设置值！如果机床厂商没有规定该值，使用缺省值；如果机床厂商允许，可相应地调高该值。

---

### 示例：测试程序

在该测试程序中，轴要移动一段足够长的行程（300 mm），以达到程序中的快速移动速度。对测试程序作如下更改：

```
SOFT

$AN_SLTRACE=0; Reset Start Servo-Trace-Trigger

LAB:

G0 X10

$AN_SLTRACE=1; Start Servo-Trace-Trigger

X310

GOTOB LAB

M30
```

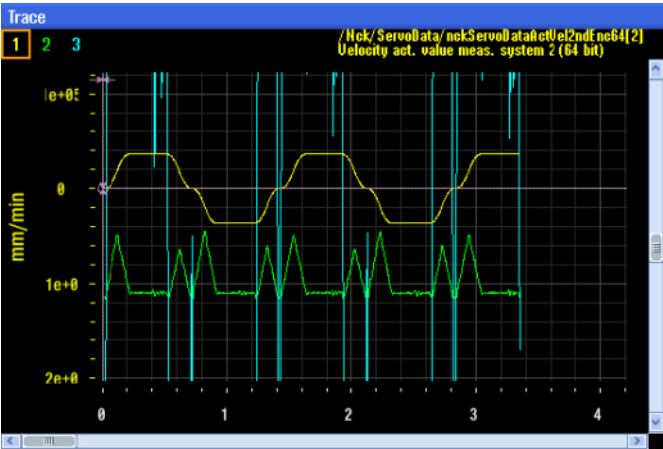
6.4 转矩使用率

选择以下信号进行跟踪：

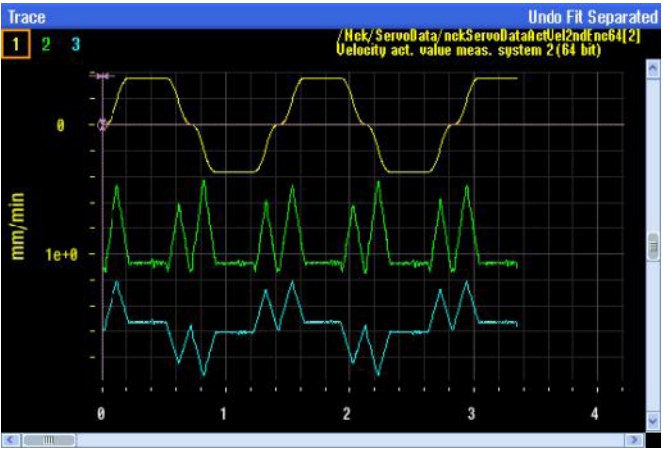
- 测量系统 2 提供的速度实际值
- 转矩使用率
- 转矩电流实际值 i(q)

Selected variables for trace: (NC/PLC) Session					
Variable	Comment	Color	Pen	Show	
ServoDataActVel2ndEnc64[2]	Velocity act. value meas. system				
/nckServoDataDrvLoad64[2]	Load (m_set/m_set,limit) (64 bit)				
a/nckServoDataActCurr64[2]	Torque-prod. Current act. Val. i(q)				

软键 “启动跟踪” → <RESET> → <CYCLE START>:



按下软键 “平铺显示”，显示所有三幅曲线图：

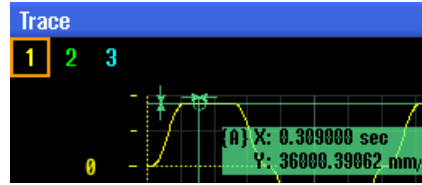


按下软键 “指针”，将指针移动到需要标出最大值的曲线图上：软键 “指针” → “指针 A”。

按下软键“指针”，将指针移动到需要查看最大值的曲线图上：

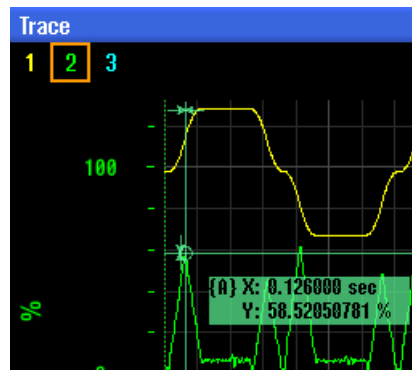
- 速度

跟踪曲线图上的指针表明，达到的最大速度为 36 m/min：



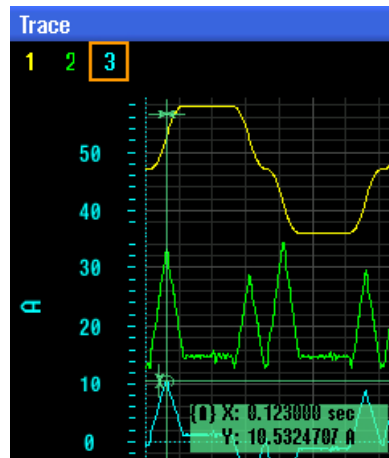
- 使用率

跟踪曲线图上的指针表明达到的最大使用率为 58.52 %：



- 电流

跟踪曲线图上的指针表明达到的最大电流为 10.53 A：



## 概要

达到最大使用率 58.52% 时，达到最大速度 36 m/min。信号“转矩使用率”是电流达到电流限值的百分比值。电流限值为：p0640 = [有效值 A]

## 6.4 转矩使用率

p0640 被限制在 p0338（电机电流限值，有效值 A）以下，或被限制在 r0209（驱动电流限值，有效值 A）以下，取决于其中的较低值。

本例中  $p0640 = 18 \text{ A}$

电流值因此为  $18 \text{ A} \times 58.52/100 = 10.53 \text{ A}$ 。

本测试是在工作台上有夹具的铣床 Y 轴上进行的。58% 的使用率表明可继续增加重量。使用率可最高达到 85%。可修改加速度来控制使用率。



## 6.5 优化主轴

### 6.5.1 设置主轴的机床数据

#### 检查机床数据设置

参考下表中的机床数据来调整用于主轴/进给轴插补的预设置的机床数据以及全部相关参数。本例为不带机械齿轮箱的主轴电机，转速为 8000 rpm。

机床数据可以设为表中指出的推荐值。可根据实际应用调整该值。

序号	名称	值	含义
MD30300	\$MA_IS_ROT_AX	1	回转轴和主轴
MD30310	\$MA_ROT_IS_MODULO	1	回转轴/主轴的模数转换
MD30320	\$MA_DISPLAY_IS_MODULO	1	回转轴和主轴的 360 度模数显示
MD32000	\$MA_MAX_AX_VELO	8000	最大轴速度
MD32010	\$MA_JOG_VELO_RAPID	60	JOG 快速移动速度
MD32020	\$MA_JOG_VELO	10	JOG 轴速度
MD32040	\$MA_JOG_REV_VELO_RAPID	60	JOG 带快速移动速度的旋转进给率
MD32050	\$MA_JOG_REV_VELO	10	JOG 旋转进给率
MD32200[0]	\$MA_POSCTRL_GAIN	x	K <sub>v</sub> 系数：优化得出的结果
MD32200[1]	\$MA_POSCTRL_GAIN	x	
MD32620	\$MA_FFW_MODE	3	前馈控制方式
MD32640	\$MA_STIFFNESS_CONTROL_ENABLE	1	动态刚性控制
MD32810[0]	\$MA_EQUIV_SPEEDCTRL_TIME	x	转速环前馈控制的等效时间常数：优化得出的结果
MD32810[1]	\$MA_EQUIV_SPEEDCTRL_TIME	x	
MD33000	\$MA_FIPO_TYPE	3	精插补类型
MD34000	\$MA_REFP_CAM_IS_ACTIVE	0	带减速档块的坐标轴
MD34020	\$MA_REFP_VELO_SEARCH_CAM	30	回参考点速度
MD34020	\$MA_REFP_VELO_SEARCH_CAM	30	

## 6.5 优化主轴

序号	名称	值	含义
MD34040[0]	\$MA_REFP_VELO_SEARCH_MARKER	30	关闭转速
MD34040[1]	\$MA_REFP_VELO_SEARCH_MARKER	30	
MD34060[0]	\$MA_REFP_MAX_MARKER_DIST	370	到参考脉冲的最大距离
MD34060[1]	\$MA_REFP_MAX_MARKER_DIST	370	
MD35000	\$MA_SPIND_ASSIGN_TO_MACHAX	1	将主轴指定为机床轴
MD35100	\$MA_SPIND_VELO_LIMIT	8000	最大主轴转速
MD35110[0]	\$MA_GEAR_STEP_MAX_VELO	8000	自动齿轮换挡时的主轴最大转速
MD35110[1]	\$MA_GEAR_STEP_MAX_VELO	8000	
MD35130[0]	\$MA_GEAR_STEP_MAX_VELO_LIMIT	8000	各个齿轮档的最大转速
MD35130[1]	\$MA_GEAR_STEP_MAX_VELO_LIMIT	8000	
MD35200[0]	\$MA_GEAR_STEP_SPEEDCTRL_ACCEL	x	转速控制方式下的加速度：优化得出的结果
MD35200[1]	\$MA_GEAR_STEP_SPEEDCTRL_ACCEL	x	
MD35210[0]	\$MA_GEAR_STEP_POSCTRL_ACCEL	x	位置控制方式下的加速度：优化得出的结果
MD35210[1]	\$MA_GEAR_STEP_POSCTRL_ACCEL	x	
MD35500	\$MA_SPIND_ON_SPEED_AT_IPO_START	2	主轴达到规定转速后使能进给
MD35550[0]	\$MA_DRILL_VELO_LIMIT	4000	攻丝时主轴最大转速
MD35550[1]	\$MA_DRILL_VELO_LIMIT	4000	
MD36000	\$MA_STOP_LIMIT_COARSE	0,4	粗准停
MD36010	\$MA_STOP_LIMIT_FINE	0,1	精准停

序号	名称	值	含义
MD36030	\$MA_STANDSTILL_POS_TOL	5	静态公差
MD36040	\$MA_STANDSTILL_DELAY_TIME	1	停止监控延迟时间
MD36050	\$MA_STOP_ON_CLAMPING	1	夹紧公差
MD36060	\$MA_STANDSTILL_VELO_TOL	2	阈值速度/转速 “进给轴/主轴静止”
MD36200	\$MA_AX_VELO_LIMIT	8800	速度监控极限值
MD36200	\$MA_AX_VELO_LIMIT	8800	
MD36300[0] ]	\$MA_ENC_FREQ_LIMIT	1000000	编码器极限频率
MD36300[1] ]	\$MA_ENC_FREQ_LIMIT	1000000	
MD36400	\$MA_CONTOUR_TOL	30	轮廓监控公差带
p1433	SPEED_CONTROLLER_REFERENCE_MODEL_NATURAL_FREQUENCY	x	转速控制器参考模型固有频率：优化得出的结果

## 6.5.2 主轴：检查转速控制器的方式

### 检查转速控制器的加速度

转速控制器的加速度已检查：首先必须规定一段加速时间，在该时间内，NC 不控制加速度。设置以下机床数据：

- MD35200[0] \$MA\_GEAR\_STEP\_SPEEDCTRL\_ACCEL = 9999
- MD35200[1] \$MA\_GEAR\_STEP\_SPEEDCTRL\_ACCEL = 9999  
( $t=V/a$   $t=9000/60s/9999$   $t=15ms$ ，因此没有影响)。

电机技术数据表

示例：异步电机 1PH8089-1VM02-0MG1

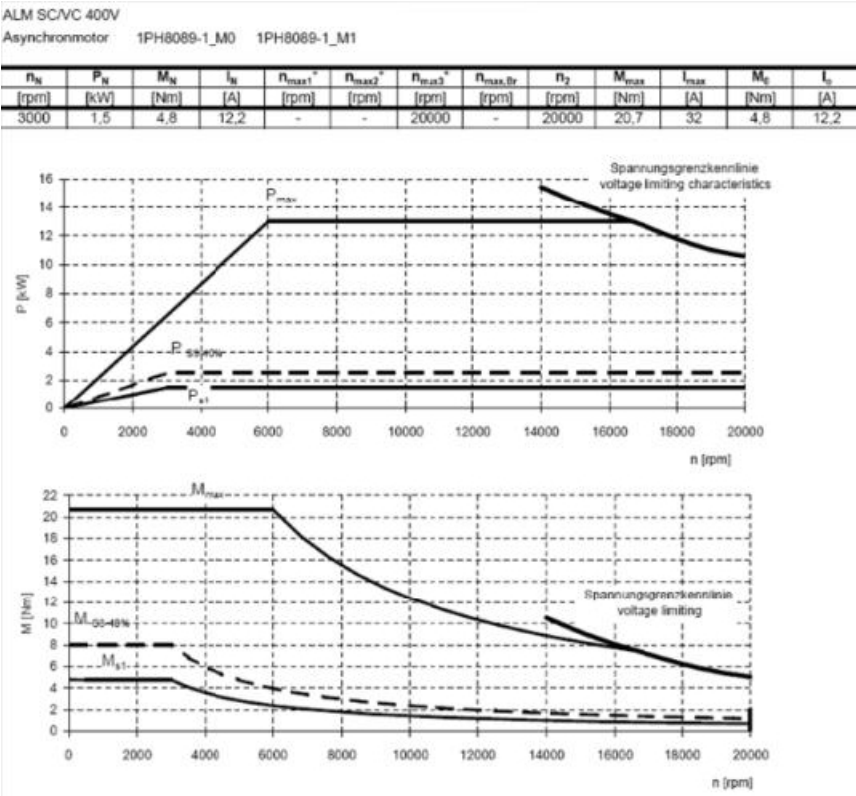


图 6-6 1PH8 异步电机

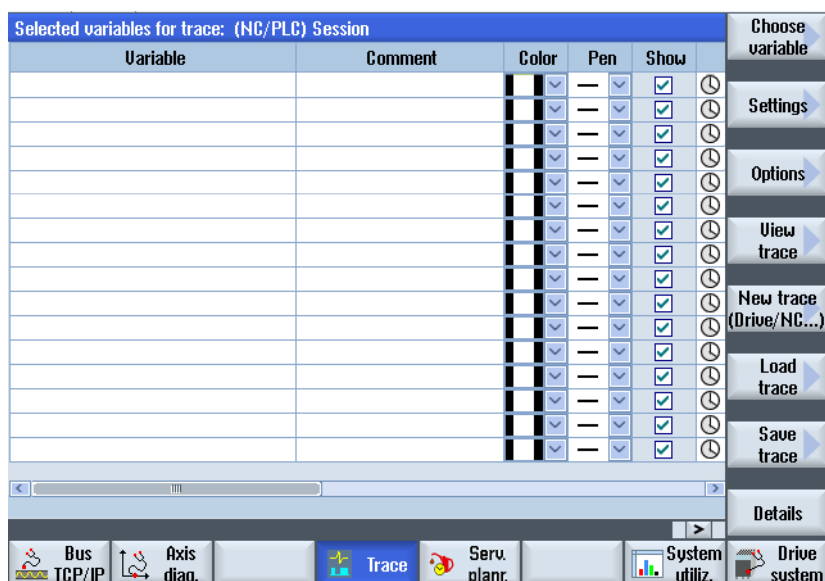
电机的初始加速和减速方式符合 S1 曲线。

序号	名称	值
p0640	电流限值（p0305 电机额定电流 x 1.5）	17.7 A
p1520	CO:电动式转矩上限	4.8 Nm
p1521	CO:再生式转矩下限	-4.8 Nm
p1530	电动式功率限值	1.5 kW
p1531	再生式功率限值	-1.5 kW

## 记录跟踪

操作步骤：

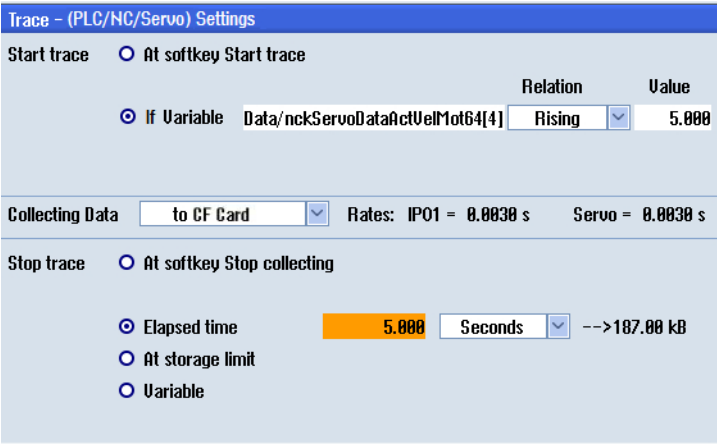
1. 用以下按键调用跟踪功能：  
<MENU SELECT> → 操作区 “诊断” → 菜单扩展键 → 软键 “跟踪”。



2. 按下软键 “选择变量”，选择所需变量。
  - 电机转速/速度实际值
  - 有功功率
  - 转矩电流实际值  $i(q)$
  - 转矩/推力实际值（限幅后）
3. 选择所需变量：软键 “选择变量”
4. 按下软键 “筛选/搜索”，以筛选变量。
5. 确保在插入变量前已选择主轴：

Selected variables for trace: (NC/PLC) Session					
Variable	Comment	Color	Pen	Show	
ickServoDataActVelMot64[4]	Speed / velocity act. Value motor	Yellow	—	<input checked="" type="checkbox"/>	
nckServoDataActPower64[4]	Active power (64 bit)	Black	—	<input checked="" type="checkbox"/>	
a/nckServoDataActCurr64[4]	Torque-prod. Current act. Val. $i(q)$	Cyan	—	<input checked="" type="checkbox"/>	
ckServoDataCmdTorque64[4]	Torque / force setpoint (limited) (f	Magenta	—	<input checked="" type="checkbox"/>	
		Black	—	<input checked="" type="checkbox"/>	

6. 按下软键 “设置” 。



7. 按下 “确认” 。

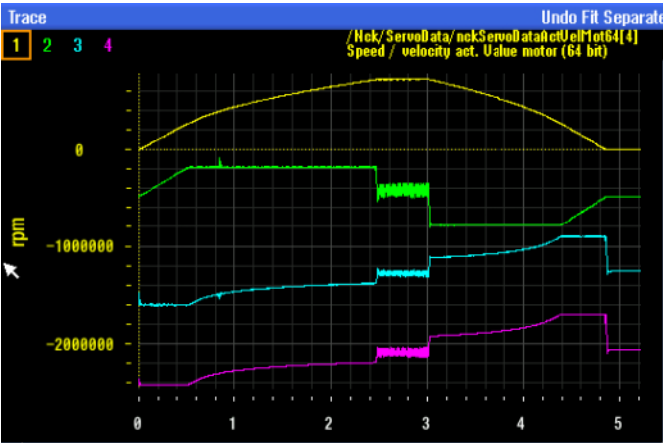
8. 在 MDA 方式中输入以下程序：

```
S8000 M03
G04 F5
M30
```

9. 初始化跟踪，执行程序：  
软键 “跟踪” → 软键 “显示跟踪” → 软键 “启动跟踪” → 按键<RESET> → 按键<CYCLE  
START>

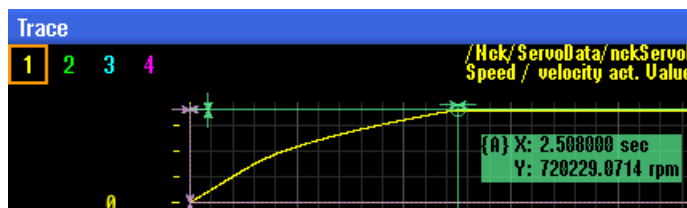
分析

在跟踪结束后，按下软键 “平铺显示” ：

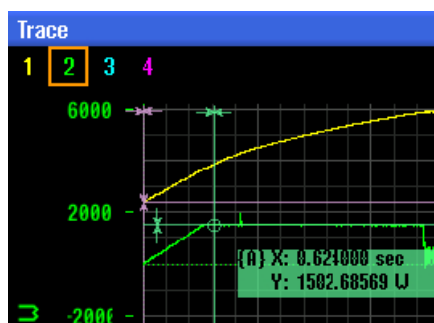


用方向键调整加速时间。

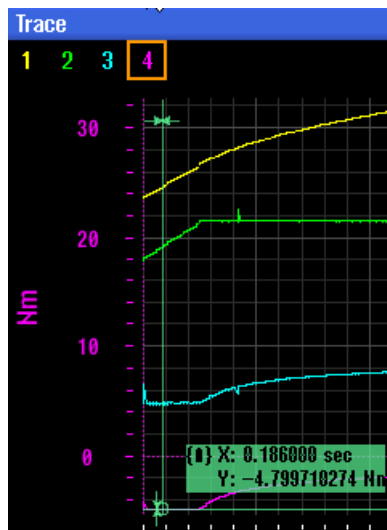
- **跟踪选择：实际转速（跟踪 1）：**  
指针会移动到曲线图开头，并定位在达到设定转速的点上。  
加速到设定转速需要 2.5 秒。



- **跟踪选择：实际转速（跟踪 2）**  
电机加速度所需的功率在“跟踪 2”中查看：  
最大可用功率 = 1.5 kW = S1 曲线



- **跟踪选择：转矩设定值（跟踪 4）**  
转矩设定值可在“跟踪 4”中查看：  
转矩设定值 = 4.8 Nm = S1 曲线



检查加速度

现在可以根据电机技术数据表在最大值范围内修改加速度/减速度，但也要考虑具体的应用。应输入和具体应用匹配的数值。在本例中，要求比较短的加速/减速时间。

序号	名称	值
p0640	电流限值（p0305 电机额定电流 x 1.5）	32 A
p1520	CO:电动式转矩上限	20,7 Nm
p1521	CO:再生式转矩下限	-20,7 Nm
p1530	电动式功率限值	13 kW
p1531	再生式功率限值	-13 kW

在对应的驱动数据中输入电机技术数据表中的最大值：比如：异步电机 1PH8089-1\_M0, 1PH8089-1\_M1。

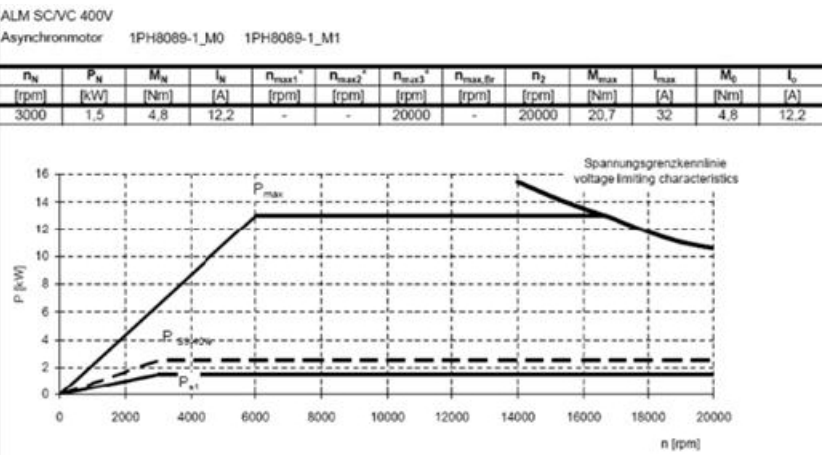


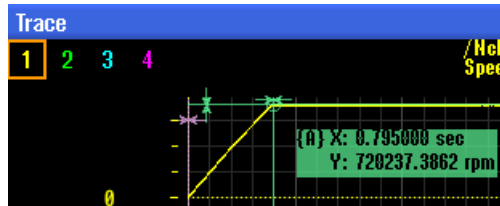
图 6-7 1PH8 异步电机



## 记录新的跟踪

操作步骤：

1. 执行某项主轴功能，然后执行跟踪功能。现在可以检查主轴加速到设定转速所需的时间。  
选择跟踪：实际转速



2. 适当地调整 MD35200，使其满足机床厂商对主轴加速度的要求：  
MD35200[0] \$MA\_GEAR\_STEP\_SPEEDCTRL\_ACCEL  
MD35200[1] \$MA\_GEAR\_STEP\_SPEEDCTRL\_ACCEL

### 6.5.3 主轴：检查位置控制器的方式

#### 测试位置控制器

现在也可以执行一项测试，来设置位置控制的加速度和急动度。该测试在刚性攻丝中进行。

操作步骤：

1. 检查 MD35550 \$MA\_DRILL\_VELO\_LIMIT[0] und [1]；攻丝时的最大速度。
2. 检查设定数据 SD55484 \$SCS\_DRILL\_TAPPING\_SET\_MC[0] = 1；（在攻丝期间主轴保持在定位模式中）。  
使用以下程序，在同一位置上钻出 10 个孔：  

```
SUPA D0 G0 G90 Z-200
FFWON
M19
SOFT
LAB:
G331 Z-214 S4000 K1
G332 Z-200 S4000 K1
REPEAT LAB P=9
M30
```

3. 选择下面的变量：
- 位置设定值（64 位）
  - 测量系统提供的位置实际值（64 位）
  - 轮廓偏差（64 位）
  - 转矩使用率（64 位）

Selected variables for trace: (NC/PLC) Session					
Variable	Comment	Color	Pen	Show	
ruoDataCmdPos2ndEnc64[4]	Position setpoint (64 bit)				
ServoDataActPos1stEnc64[4]	Position actual value meas.system				
/nckServoDataContDev64[4]	Contour deviation (64 bit)				
/nckServoDataDrvLoad64[4]	Load (m_set/m_set,limit) (64 bit)				

说明

确保在监控测量系统时选择了正确的信号，比如：测量系统 1 或 2。

4. 按下软键“设置”，设置跟踪触发条件等项目。本例选择的触发条件是：轴越过实际位置“5 度”。跟踪过程持续 10 秒。

Trace – (PLC/NC/Servo) Settings

Start trace

At softkey Start trace

If Variable

Data/nckServoDataActVelMot64[4]

Relation

>

Value

5.000

Collecting Data

to CF Card

Rates: IP01 = 0.0030 s

Servo = 0.0030 s

Stop trace

Elapsed time

10.000

Seconds

-->100.00 kB

At storage limit

Variable

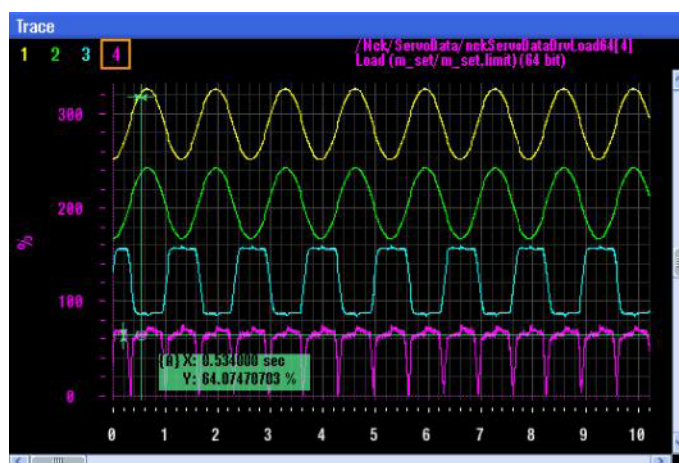
5. 启动跟踪，按下机床面板上的“CYCLE START”。

示例

本例中使用率为 64%，以提高位置环的加速度。但在攻丝期间，主轴运行可能会超过 S1 曲线，因此必须确保使用率不会达到 100%，否则会输出轮廓监控报警。

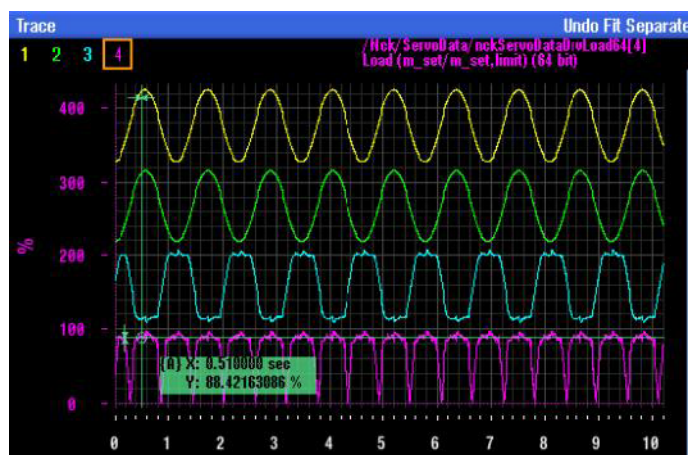
1. 调整机床数据 MD35210 \$MA\_GEAR\_STEP\_POSCTRL\_ACCEL 和 MD32431 \$MA\_MAX\_AX\_JERK，以获得最佳结果。
2. 另外检查主轴的可调范围 p1464, p1465。

主轴： 使用率 64%



本例展示了位置环加速度从 120 提高到 160 产生的影响，使用率因此从 64% 提高到 88%。如果机床是一个纯粹的攻丝机，则可以钻出 100 个螺纹孔来进行测试。接着跟踪便会重复进行，以确保使用率绝不会达到 100%。

**主轴：使用率 88%**



## 6.6 圆度测试

### 6.6.1 圆度测试：功能

圆度测试用于设置并评价插补轴的动态特性，以及用于分析通过摩擦补偿所达到的象限过渡处（圆形轮廓）的轮廓精度。

圆度测试可用于检查共同机床轴的插补。该功能可测量以机床或直接测量系统为参照的圆。结果并不考虑机床机械系统的校准。这可帮助调试人员清楚地区分控制器优化问题与机械问题。

以下轴机床数据和参数会在该操作中进行检查：

- MD32200, MD32400, MD32402, MD32410, MD32490, MD32500, MD32510, MD32520, MD32540 MD32620, MD32640, MD32810, MD32900, MD32910, MD32930, MD32940
- p1421 bis p1426, p1400, p1433, p1434

当执行该操作时，应取消以下的位置误差补偿：

- MD32450 无反向补偿
- MD32500 摩擦补偿生效
- MD32700 编码器/主轴误差补偿
- MD32710 垂度补偿使能
- MD32750 温度补偿类型

---

#### 说明

MD32450 “无反向补偿” 应通过外部设备，如圆度测试或千分表，进行匹配。

---

#### 示例：

用于 X-Y 轴测量的 NC 测试程序：

```
FFWON  
  
SOFT  
  
G90 G01 F3000 X400 Y200 Z500  
  
LAB:  
  
G91 G64 G02 X0 Z0 I10  
  
GOTOB LAB
```

M30

位置、进给率和有效平面应根据机床进行匹配！

结果

当圆度测试结果与轴组合的插补之间在实际尺寸、形状和最小 p/p 方面的差异都在合理范围内时，即达到了最佳的轮廓结果。

MDA 运行方式下的 NC 程序和圆度测试功能都可用于测量和评价该结果。圆半径和轨迹速度的“最差情况”应能实现机床能够达到的实际径向加速度。

机床制造商一般都会对测试圆的半径和进给率进行说明。

一般情况下机床制造商在圆度测试时采用的半径为 100 mm 或 150 mm，进给速度由机床制造商确定。机床制造商定义可接受结果的标准。

高速加工一般对在高速铣床上进行的圆度测试要求较高，圆半径为 10 - 25 mm，进给率为 5 - 10 m/min。对于高速铣床，如果 p/p 误差小于等于 0.010 mm 并且圆的实际尺寸与程序设定的半径相同，最差情况轨迹速度与设定相同，一般就认为结果是可接受的。

6.6.2 圆度测试：执行测量

设置参数

Circularity test measurement

Measurement

Axis:	Meas. system:	Absolute position:	Status:
<div>MX1</div>	<div>1</div>	<div>Active</div>	<div>0.00000 mm</div>
<div>MZ1</div>	<div>3</div>	<div>Active</div>	<div>0.00000 mm</div>

Parameter

Radius:	<div>10.00000 mm</div>
Feedrate:	<div>3000.00000 mm/min</div>
Multiplier:	<div>1.00000</div>
Meas. time:	<div>1257 ms</div>

Representation:

Resolution	<div>0.01000 mm/grad.</div>
Represent.:	<div>Mean radius</div>

Axis+

Axis-

Start

Stop

Graphic

Optimization

Current contr.loop

Speed contr.loop

Position contr.loop

Function generator

Circular. test

Filters

Auto servo tuning

欲执行测量，请输入以下参数：

- “**测量**”：选择要测量的两个轴和测量系统。不提供“已停止的编码器”选项。
- “**参数**”：在输入栏“半径”和“进给率”中设置时，应根据是否启用进给补偿的情况，输入用于控制轴进行圆周运动的零件程序中的相应数值。
- “**显示**”：用于图形显示的参数
  - 图表轴的“分辨率”（比例），单位[mm/Skt]
  - “显示”基于平均半径或程序设定的半径

## 执行测量

步骤：

1. 按下操作区域“调试”中的软键“优化/测试”→“圆度测试”。
2. 使用<SELECT>键或通过软键“轴 +”/“轴 -”选择要测量的轴。
3. 设置用于测量的“参数”：“半径”和“进给率”  
在显示栏“测量时间”中会显示出由“半径”和“进给率”数值所计算出的、圆周运行时用于记录位置实际值的测量持续时间：  
如果测量时间不充足，则只会显示圆的一部分。通过降低进给率可增加测量时间。即使是从静止状态启动圆度测试也同样适用。
4. 设置用于图形显示的参数：  
如果计算出的测量时间超过可显示的时间范围（最大测量时间 = 位置控制器周期 \* 2048），则记录时会计算对应的采样时间（n \* 位置控制器周期），这样就可以显示一个完整的圆。

其它操作：

- 按下软键“启动”来开始测量。
- 按下软键“停止”来终止测量。
- 欲执行对优化的其他调整，请按下软键“优化”。
- 通过新显示的软键条，您可以**直接**进入以下区域：
  - “诊断”操作区域中的“服务轴”
  - “轴机床数据”
  - “驱动机床数据”
  - “用户视图”
- 欲保存测量参数，请按下软键“保存参数”。
- 欲以相同的参数重复执行测量，请点击软键“装载参数”。

## 显示图形

欲以图形方式显示测量结果，请按下软键“图形”。

### 6.6.3 圆度测试：示例

轴急动度限制 MD32400 \$MC\_AX\_JERK\_ENABLE 通过一个时间常量来设置并且始终生效。

位置设定值滤波器的机床数据：

- 推荐设置 MD32402 \$MC\_AX\_JERK\_MODE = 类型 2，类型 1 是缺省值，以保持和旧版本的兼容性。强烈不推荐设置单纯的带阻滤波器。
- MD32402 \$MA\_AX\_JERK\_MODE （滤波器类型）和 MD32410 \$MA\_AX\_JERK\_TIME > 0 只在 MD32400 \$MA\_AX\_JERK\_ENABLE = 1 时生效。

#### 优化示例 1

轴优化结束后的机床数据：

参数/机床数据		X 轴	Z 轴
MD32200	\$MC_POSCTRL_GAIN	8.500	8.500
p1460	SPEEDCTRL_GAIN1	3.01	3.89
p1462	SPEEDCTRL_INTEGRATOR_TIME_1	6.18	6.18
p1463	SPEEDCTRL_REF_MODEL_FREQ	106.3	106.3
p1440	NUM_SPEED_FILTERS	0	0
MD32610	\$MC_VELO_FFW_WEIGHT	1.0	1.0
MD32620	\$MC_FFW_MODE	4	4
MD32810	\$MC_EQUIV_SPEEDCTRL_TIME	0.0022	0.0022
MD32400	\$MC_AX_JERK_ENABLE	0	0

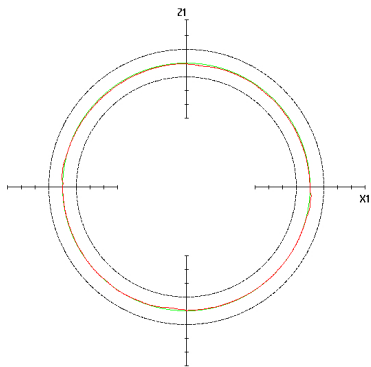
一般在使用优化的进给前馈时，半径的实际值都会过大。这可使用时间常数 MD32410 \$MC\_AX\_JERK\_TIME 来修正。需要时，所有轴可使用统一的一个时间常数。

6.6 圆度测试

圆会显示进给前馈经过优化后的结果。但平均半径会大 0,0019 mm:

X1: 激活的测量系统

Z1: 激活的测量系统



参数

半径: 10.00000 mm

进给率: 3000.00000 mm/min

测量时间: 1257 ms

X1: 激活的测量系统

Z1: 激活的测量系统

显示

分辨率: 0.01000 mm

显示 平均半径

半径: 10.00190 mm

Delta R: 4.02698 µm

参数/机床数据		X 轴	Z 轴
MD32200	\$MC_POSCTRL_GAIN	8.500	8.500
p1460	SPEEDCTRL_GAIN1	3.01	3.89
p1462	SPEEDCTRL_INTEGRATOR_TIME_1	6.18	6.18
p1463	SPEEDCTRL_REF_MODEL_FREQ	106.3	106.3
p1440	NUM_SPEED_FILTERS	0	0
MD32610	\$MC_VELO_FFW_WEIGHT	1.0	1.0
MD32620	\$MC_FFW_MODE	3	3
MD32810	\$MC_EQUIV_SPEEDCTRL_TIME	0.0022	0.0022
MD32400	\$MC_AX_JERK_ENABLE	1	1
MD32402	\$MC_AX_JERK_MODE	2	2
MD32410	\$MC_AX_JERK_TIME	0.012	0.012



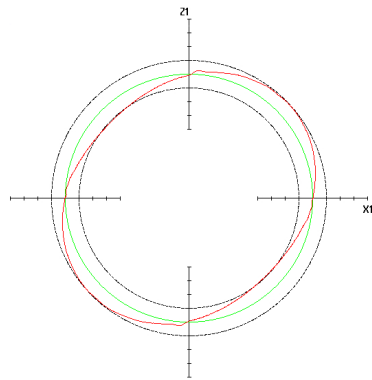
### 优化示例 2

该圆会显示出略有差异的时间常数对轴急动度滤波器的影响。为修正该类误差，应调整时间常数：

参数/机床数据		X 轴	Z 轴
MD32400	\$MC_AX_JERK_ENABLE	1	1
MD32402	\$MC_AX_JERK_MODE	2	2
MD32410	\$MC_AX_JERK_TIME	0.012	0.0125

X1: 激活的测量系统

Z1: 激活的测量系统



#### 参数

半径: 10.00000 mm

进给率: 3000.00000 mm/min

测量时间: 1257 ms

X1: 激活的测量系统

Z1: 激活的测量系统

#### 显示

分辨率: 0.01000 mm

显示: 平均半径

半径: 10.00029 mm

Delta R: 25.47002  $\mu$ m

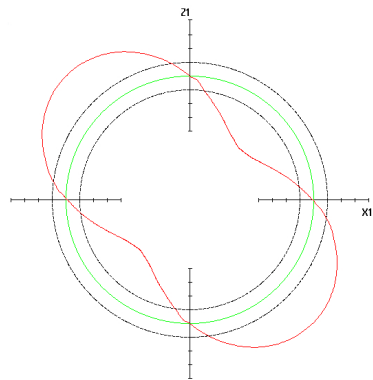
### 优化示例 3

该圆会显示出差异明显的时间常数对轴急动度滤波器的影响。为修正该类误差，应调整时间常数：

参数/机床数据		X 轴	Z 轴
MD32400	\$MC_AX_JERK_ENABLE	1	1
MD32402	\$MC_AX_JERK_MODE	2	2
MD32410	\$MC_AX_JERK_TIME	0.015	0.012

X1: 激活的测量系统

Z1: 激活的测量系统



参数

半径: 10.00000 mm  
进给率: 3000.00000 mm/min  
测量时间: 1257 ms

X1: 激活的测量系统

Z1: 激活的测量系统

显示

分辨率: 0.01000 mm  
显示: 平均半径  
半径: 9.98971 mm  
Delta R: 75.67665 μm

6.6.4 圆度测试：保存数据

在圆度测试时可以保存以下数据：

- **保存参数：** 所输入的参数可以保存为文件。  
默认的保存路径为：user/sinumerik/hmi/log/optimization/cicular/<name>.sup
- **保存图形：** 如果图形被正确保存，则会显示信息“数据已被保存”，否则会输出一条报警“保存文件时出错”。  
默认的保存路径为：user/sinumerik/hmi/log/optimization/cicular/<name>.sud
- **打印图形：** 图形会被保存为 PNG 格式的像素图形。输入一个名称<name>。名称可自由选择。默认的保存路径为：user/sinumerik/hmi/log/optimization/cicular/<name>.png

保存参数

文件格式的结构如下（[]中为附注）

H: CstPar [圆度测试参数的标识]

V: 5.0 [文件格式的版本号]

关于测量

P 1: 1 [第一根轴的编号]

P 2: 2 [第二根轴的编号]

P 3: 0 [测量系统 轴 1 - 0: 有效轴；1: 第一根轴；2: 第二根轴]

P 4: 0 [测量系统 轴 2 - 0: 有效轴; 1: 第一根轴; 2: 第二根轴]

关于参数

P 10: 30 [半径]

P 11: 3000 [进给率]

P 12: 3770 [测量时间]

P 14: 1 [乘法器]

关于显示

P 20: 10 [分辨率]

P 21: 8 [平均/程序设定的半径 - 8 = 平均半径; 9 = 程序设定的半径]

## 保存图形

文件格式的结构如下 (□中为附注):

H: CstPic [圆度测试图形的标识]

V: 5.0 [文件格式的版本号]

关于参数

P 1: 30 [半径]

P 2: 3000 [进给率]

P 3: 3770 [测量时间]

P 4: 0 [测量系统 轴 1 - 0: 有效轴; 1: 第一根轴; 2: 第二根轴]

P 5: 0 [测量系统 轴 2 - 0: 有效轴; 1: 第一根轴; 2: 第二根轴]

关于显示

P 10: 10 [分辨率]

P 11: 9 [平均/程序设定的半径 - 8 = 平均半径; 9 = 程序设定的半径]

P 12: X1 [轴 1]

P 13: Z1 [轴 2]

关于中间值

P 20: 15.6632 [最大半径测量值]

P 21: 10.9326 [最小半径测量值]

P 22: 13.6694 [平均半径测量值]

## 6.6 圆度测试

---

P 23: 1886 [测量值数量]

关于辅助值

P 30: 1000 [精度 (1/P30)]

关于物理单位

P 40: 5370 [半径单位的文本编号]

P 41: 5381 [进给率单位的文本编号]

P 42: 6165 [分辨率单位的文本编号]

P 43: 5346 [Delta 半径单位的文本编号]

P 44: 0 [新建: 运算: 基本长度单位]

关于横坐标

Ai: [横坐标值 i : 0..P23]

关于纵坐标

Oi: [纵坐标值 i : 0..P23]

关于半径

Ri: [半径值 i : 0..P23]

# 6.7 带自适应特性曲线的摩擦补偿

## 前提条件



### 软件选件

使用该功能需要下列选件：  
“带自适应特性曲线的摩擦补偿”

若在该选件未经过授权的情况下为轴激活摩擦补偿，则会触发报警。

仅提供用于选择摩擦补偿的轴，设置 MD32490 = 3 或 4。

机床数据	含义
MD32500 \$MA_FRICT_COMP_ENABLE = 1	使能轴摩擦补偿
带自适应特性曲线的摩擦补偿：	
MD32490 \$MA_FRICT_COMP_MODE = 3	接通时间点取决于速度设定值
MD32490 \$MA_FRICT_COMP_MODE = 4	接通时间点取决于位置控制器输出

在控制系统的“调试”操作区域调用此功能：软键“NC”→软键“摩擦补偿”。

## 备份优化结果

优化时，测量序列期间的轴机床数据会发生以下变化：

- 启动测量序列时，轴机床数据中设置的摩擦补偿值会被复位。
- 结束测量序列时，轴机床数据中会写入新的摩擦补偿值并备份。
- 取消测量序列时，轴机床数据中将重新启用之前的摩擦补偿值。

注意
<p><b>备份优化结果</b></p> <p>若在优化期间发生了掉电，那么会导致优化结果数据丢失。</p> <p>⇒ SINUMERIK 840D sl:为了防止优化结果丢失，建议创建一个含 NC 数据的调试存档，将上一次整套测量序列的轴机床数据备份于其中。<b>不需要</b>选择“含补偿数据”选项。</p> <p>⇒ SINUMERIK 828D:为了防止优化结果丢失，建议创建一个“INDIVIDUAL”类型的数据存档，将上一次整套测量序列的摩擦补偿值备份于其中。</p>

## 文档

更多详细信息参见功能手册之扩展功能中的补偿章节（K3）。

### 6.7.1 轴选择和状态显示

#### 该对话框中显示什么？

在“自动优化的轴选择”对话框中选择每个通道中用于自动摩擦补偿的轴。

**自动优化：****自动优化开始前：**

在一个通道中选择多个轴进行自动优化，这些轴是连续进行自动优化的。自动优化会按通道对选中的轴执行。

**状态显示：**

优化过程中会显示以下状态：

- “等待”：针对还未开始优化过程的所选轴。
- “正在优化”：针对正在优化的轴。
- “已优化”：针对已成功完成并保存优化的轴。

---

**说明****时间需求（半径，进给）**

根据所选的进给和半径计算出自动优化的时间需求：将用于轴优化的通道设定数据 (页 229) 中的进给量与机床的加工速度协调一致。

---

**自动优化完成后：**

为了查看测量结果，在自动执行优化时会在每个步骤后将优化结果以截屏的形式保存在以下路径下： `../user/sinumerik/hmi/data/cst`

进行轴优化时，所有进给率的截屏分辨率都统一设置并不得小于  $1\ \mu\text{m}$ 。

完成通道中轴的优化后，补偿值会被写入轴机床数据并更新状态显示。

**优化性能：**

所显示的最大偏差可能在该轴重复优化时发生变化。如果测量后与初始状态的偏差没有矫正，则不将补偿值写入轴机床数据中。

**调试存档:**

不管是轴机床数据中的优化结果，还是轴的优化状态都会备份到调试存档“NC 数据”中。如果从机床 A 向机床 B 读取含优化数据的调试存档，NC 数据会被完整读取。

- 轴机床数据被读取并生效。
- 轴的优化状态被读取。只有在对话框“摩擦补偿”中选择了不同的系统 CF 卡序列号时才会询问，是接收还是拒绝优化状态。

**自动执行的边界条件:**

- 在进给倍率不为 100% 时，选中的轴会以减小的进给率运行。优化（自动和手动）停止并且只有当进给倍率重新设为 100% 时控制环显示才会恢复。
- MD10200 \$MN\_INT\_INCR\_PER\_MM 和 MD10210 \$MN\_INT\_INCR\_PER\_DEG 中的计算精度至少为 10000。
- 如果选中轴的以下机床数据不为 0，优化不会开始：  
MD32450 \$MA\_BACKLASH  
MD32456 \$MA\_BACKLASH\_DYN  
MD32572 \$MA\_FRICT\_V\_PULSE\_DELAY\_TIME  
MD32575 \$MA\_FRICT\_V\_PULSE\_SMOOTH\_TIME  
MD32578 \$MA\_FRICT\_T\_PULSE\_SMOOTH\_TIME  
MD32579 \$MA\_FRICT\_PRETRIGGER\_TIME

**手动优化:**

按下“手动优化”软键，**启动**手动优化。在以下对话框中选择待优化的轴。

通道中的轴优化结束后，将补偿值写入轴机床数据并更新状态显示。

**⇒ 其它操作:**

- 软键“启动”，用于启动自动摩擦补偿。
- 软键“手动优化 >”，手动输入补偿值启动摩擦补偿。
- 软键“确认”，确认选择。
- 软键“取消”，取消选择。

## 6.7.2 摩擦补偿 - 自动优化

### 在 SINUMERIK Operate 上操作

各通道中所选的轴各自连续自动运行。

## 6.7 带自适应特性曲线的摩擦补偿

步骤:

1. 测量的半径、进给均已在下列通道设定数据中预设，适用于通道中的所有轴：

名称	单位	机床数据
半径（线性轴）	mm	SD55820 \$SCS_FRICT_OPT_RADIUS
半径（回转轴）	°（度）	SD55821 \$SCS_FRICT_OPT_RADIUS_ROT
进给率（线性轴）	[ mm/min ]	SD55822 \$SCS_FRICT_OPT_FEED[0...8]
进给率（回转轴）	[°/min]	SD55823 \$SCS_FRICT_OPT_FEED_ROT[0...8]

2. 按下软键“启动”来开始测量。此时会自动创建一个零件程序，在该程序中调用 CYCLE790，此循环用于以预设的进给率反转轴。在启动零件程序前，系统会自动检查，轴的动态响应是否达到输入的进给率。如果进给率选择的太高，会输出消息，要求降低进给率。
3. 如果输入的进给率检查正常，则零件程序打开，以补充额外的程序指令。按下“确认”关闭窗口并继续测量。

完成通道中轴的优化后，补偿值会被保存在轴机床数据中并更新状态显示。之后会自动开始此通道中下一个轴的优化。

### 说明

#### 龙门轴组

龙门轴组中仅列出了引导轴供选择。优化结束后，系统会将引导轴的补偿值复制到跟随轴中。

#### ⇒ 其它操作:

- 软键“启动”，用于启动优化。
- 软键“图形”，用于切换至图形显示。
- 软键“数据列表”，用于切换轴机床数据列表和通道设定数据列表。
- 软键“取消”，取消优化。



### 6.7.3 摩擦补偿 - 手动优化

#### 在 SINUMERIK Operate 上操作

通过此功能可选择运行一根或两根轴。测量结果以圆弧图的形式显示。所输入的摩擦补偿值仅对标题行中选定的轴生效。

若未手动输入缩放值，系统将自动调整图形显示的缩放比例。可在一个测量过程中执行最多九次采用不同进给率的测量。在 1 轴和 2 轴运行中，优化针对上下的反转点。测量由初始化阶段和测量阶段本身组成。右下方的状态行中会显示当前的测量进度。

步骤：

1. 通过软键“轴 +”或“轴 -”选择摩擦补偿已激活的轴。  
测量的半径、进给率和旋转方向均已在下列通道设定数据中预设，适用于通道中的所有轴。可通过软键“数据列表”加以修改：

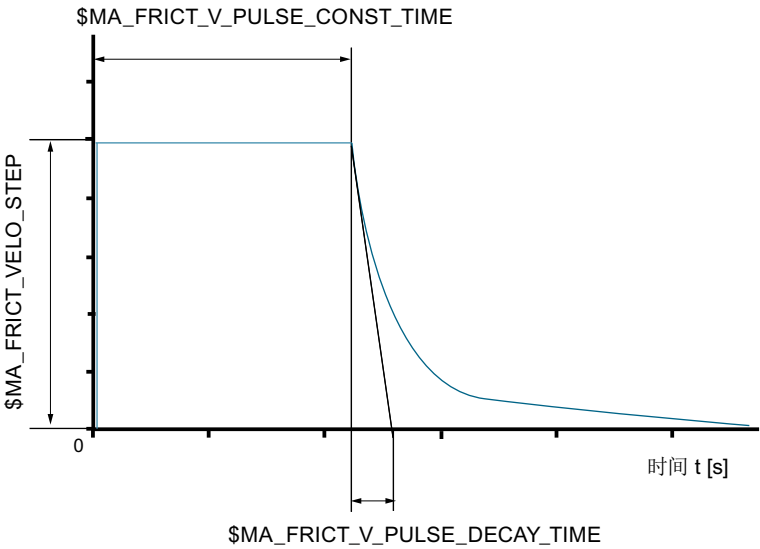
名称	单位	机床数据
半径（线性轴）	mm	SD55820 \$SCS_FRICT_OPT_RADIUS
半径（回转轴）	°（度）	SD55821 \$SCS_FRICT_OPT_RADIUS_ROT
进给率（线性轴）	[ mm/min ]	SD55822 \$SCS_FRICT_OPT_FEED[0...8]
进给率（回转轴）	[ °/min ]	SD55823 \$SCS_FRICT_OPT_FEED_ROT[0...8]
旋转方向（仅在 2 根轴时生效）	---	SD55828 \$SCS_FRICT_OPT_DIR

2. 按下软键“开始”启动测量过程。此时会自动创建一个零件程序并由 NC 选中，在该程序中调用 **CYCLE790**，此循环用于以预设的进给率反转轴。  
在启动零件程序前，系统会自动检查，轴的动态响应是否能达到输入的进给率。如果达不到，会输出消息，要求降低进给率。
3. 之后系统会打开测量序列的零件程序，此时可额外添加指令。按下“确认”关闭窗口并继续测量。
4. 为了启动优化过程，按下“NC 启动”键。

6.7 带自适应特性曲线的摩擦补偿

5. 此时第一步测量会被选中，其采用的是测量序列的首个进给率。请将摩擦补偿值输入以下输入栏：

输入栏	单位	机床数据
振幅	[mm/min] 或 [°/min]	MD32571 \$MA_FRICT_VELO_STEP
失效时间	[ s ]	MD32574 \$MA_FRICT_V_PULSE_DECAY_TIME
生效时间	[ s ]	MD32573 \$MA_FRICT_V_PULSE_CONST_TIME



- 在预设置中，为两个运行方向启用了相同的补偿值。请选择“分别设置换向点”选项可依据运行方向为轴输入不同的补偿值。
6. 按下软键“下一步”，以下一个进给率启动新测量，并输入新值。重复测量时，系统会依据上次的测量建议和进给率匹配的值。
- 在最后一步完成后，按下“确认”结束测量并保存数据。

说明

增量修改数值

若需增量修改补偿值，请使用下列按键组合：

- 使用 <INSERT> 键激活选择的输入栏，此时其颜色会发生变化。
- 使用 <Page Up> / <Page Down> 键及光标键  $\uparrow \downarrow$  以不同的增量步距修改数值。
- 按下 <INPUT> 键完成输入。

⇒ 其它操作:

- 软键“轴 +”、“轴 -”，用于选择摩擦补偿生效的轴。
- 软键“启动”，用于启动测量。
- 软键“下一步”，用于选择下一个进给率。
- 软键“上一步”，用于回到之前的进给率。
- 软键“数据列表”，用于切换至机床数据列表。
- 软键“取消”，用于终止记录并放弃输入。
- 软键“确认”，用于接收在摩擦补偿中测定的值。

#### 6.7.4 数据列表

数据列表中会显示“带自适应特性曲线的摩擦补偿”所涉及的轴机床数据和通道设定数据。

启动前无法更改这些值。优化时无法进行修改。

为了将优化步骤减少到九次以下，可以在通道设定数据

MD55822 \$SCS\_FRICT\_OPT\_FEED 和 MD55823 \$SCS\_FRICT\_OPT\_FEED\_ROT 中不需要的进给率处填写零。进给率 = 0 后如果发现不等于 0 的值，则过程中断。

此外：MD55822[0] ≠ 0 和 MD55823[0] ≠ 0

⇒ 其它操作:

软键“<<”，用于返回至“摩擦补偿”对话框。

#### 6.7.5 线性轴示例（自动优化）

##### 前提条件

已经设置了 Y 轴上用于激活摩擦补偿的机床数据:

- MD32490 = 3
- MD32510 = 1

6.7 带自适应特性曲线的摩擦补偿

根据以下设置测量 Y 轴：

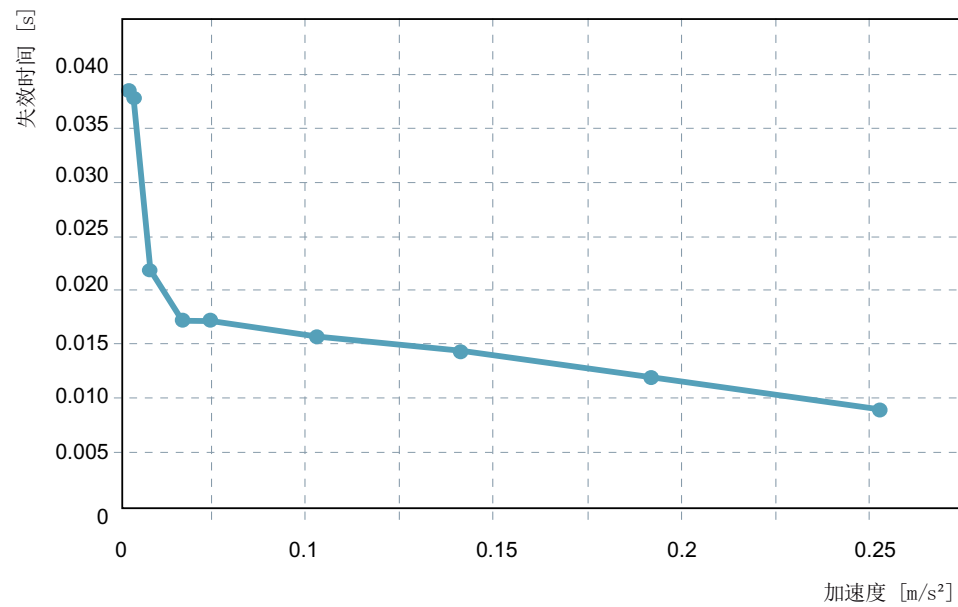
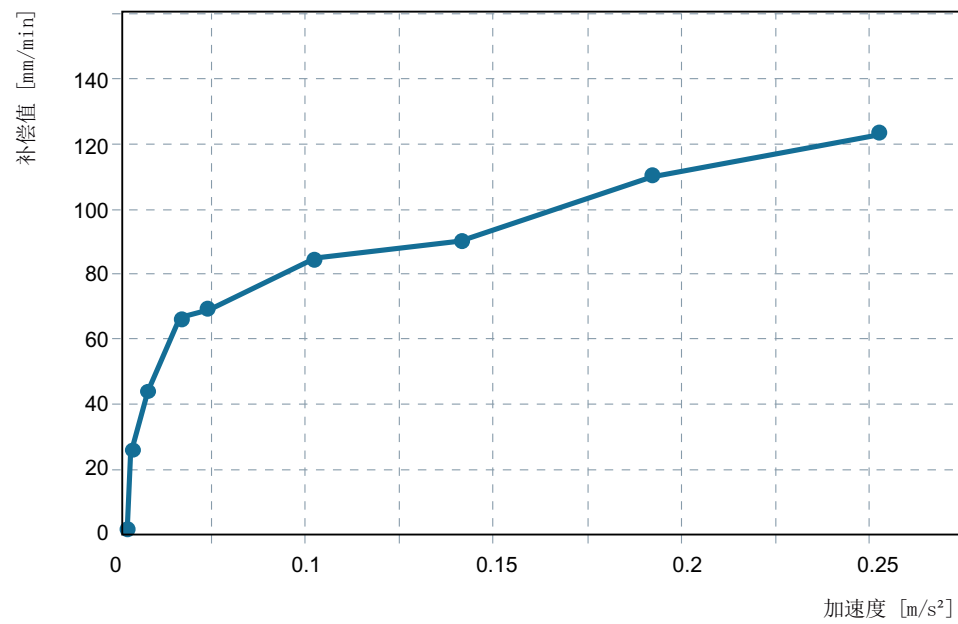
- SD55820 \$SCS\_FRICT\_OPT\_RADIUS 中的半径 5 mm
- SD55822[n] \$SCS\_FRICT\_OPT\_FEED 中的进给速度
- 生效时间未调整。

Y 轴结果

步骤 1/8: 700 mm/min	振幅: 68.696 mm/min 失效时间: 0.017 s
步骤 2/8: 560 mm/min	振幅: 66.240 mm/min 失效时间: 0.017 s
步骤 3/8: 350 mm/min	振幅: 43.330 mm/min 失效时间: 0.021 s
步骤 4/8: 140 mm/min	振幅: 23.848 mm/min 失效时间: 0.038 s
步骤 5/8: 1060 mm/min	振幅: 84.688 mm/min 失效时间: 0.015 s
步骤 6/8: 1410 mm/min	振幅: 90.018 mm/min 失效时间: 0.014 s
步骤 7/8: 1770 mm/min	振幅: 109.839 mm/min 失效时间: 0.012 s
步骤 8/8: 2120 mm/min	振幅: 123.012 mm/min 失效时间: 0.009 s

下面的特性曲线显示了不同加速度下的振幅及失效时间。

## 6.7 带自适应特性曲线的摩擦补偿

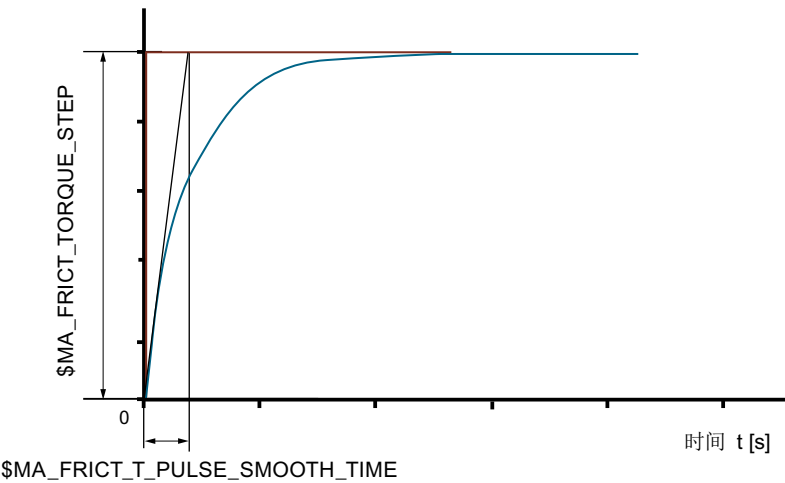


6.7.6 带力矩接通脉冲的摩擦补偿

参数设置机床数据

为了额外使用取决于加速度的摩擦补偿力矩接通脉冲，必须设置下列轴机床数据：

名称	单位	机床数据
取决于加速度的力矩接通脉冲振幅	---	MD32576 \$MA_FRICT_TORQUE_STEP
力矩接通脉冲的延时	[ s ]	MD32577 \$MA_FRICT_T_PULSE_DELAY_TIME
力矩接通脉冲的提升时间	[ s ]	MD32578 \$MA_FRICT_T_PULSE_SMOOTH_TIME
力矩接通脉冲振幅的权重系数	---	MD32588 \$MA_FRICT_T_STEP[0...9]



请在 MD32588 \$MA\_FRICT\_T\_STEP[0...9] 为每个加速度值输入一个 -1.0 至 1.0 之间的系数，用于对力矩接通脉冲进行加权。