



Central-I 总线型

直流驱控一体型

交流驱控一体型

运动控制器

Agito 产品系列

Agito 控制器力控使用手册



www.agito-akribis.com

Member of Akribis Systems group

版本记录

版本	描述	日期
1.0	首版发布	2023/5/15

※本公司保留不定期更新的权利，根据产品硬件及软件的升级或更新迭代以及市场需求，本手册将会不定期进行内容上的更新调整，恕不另行告知，如需最新本本文档，请联系 Agito-Akribis 公司获取相应支持。

目录

1	介绍	4
1.1	关于手册	4
1.2	力控简介	4
2	操作步骤	6
2.1	力控界面介绍	6
2.1.1	闭环力控界面介绍	6
2.1.2	开环力控界面介绍	12
2.2	力控步骤介绍	19
2.2.1	闭环力控操作步骤	19
2.2.2	开环力控操作步骤	28
3	PCSuite IDE+编程环境中执行力控操作	37
3.1	闭环力控 IDE 程序	37
3.2	开环力控 IDE 程序	37
4	常见问题解答 (FAQ)	39

1 介绍

1.1 关于手册

感谢您选择 Agito 系列运动控制产品，我们将竭力为您提供追求速度与精度的极致运动控制方案，并提供全方位的技术支持。

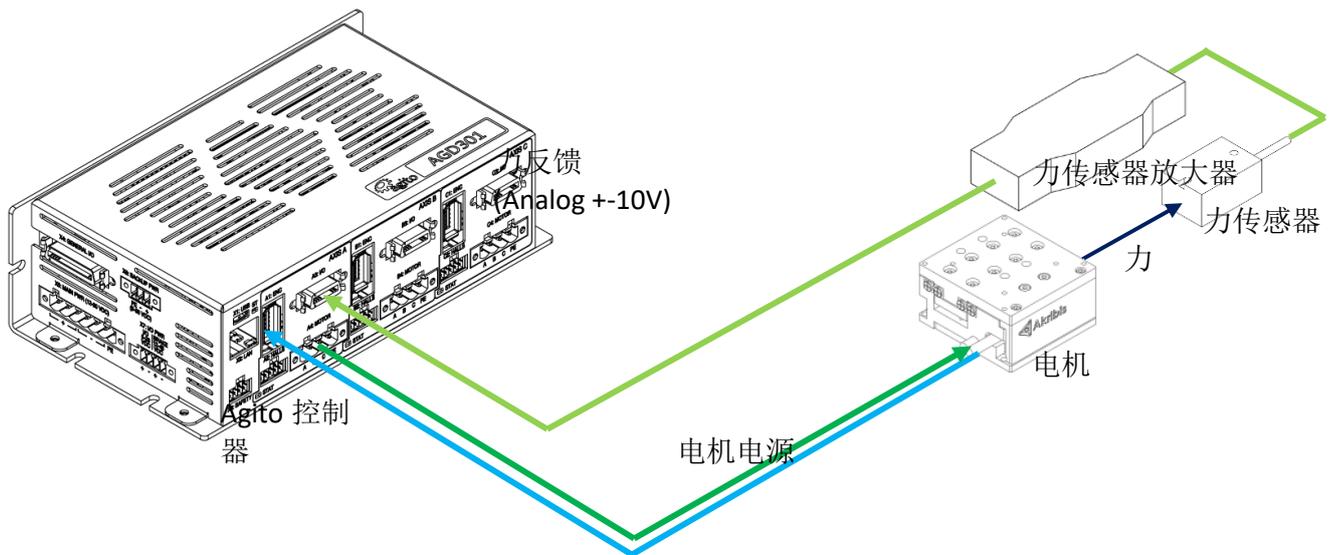
本手册主要介绍 Agito 运动控制器的闭环与开环力控模式使用方法。

手册中仅详细介绍与力控相关的配置内容，其他参数设置请参阅《Agito 快速入门手册》中的详细介绍，本文档将不再累述。

值得注意的是力控动作需要在基本参数设置完成并确保电机可以正常运动之后才能进行。

1.2 力控简介

以闭环力控作为分析对象，闭环力控使用到的设备主要有 4 个：Agito 控制器，电机，力传感器和力传感器放大器：

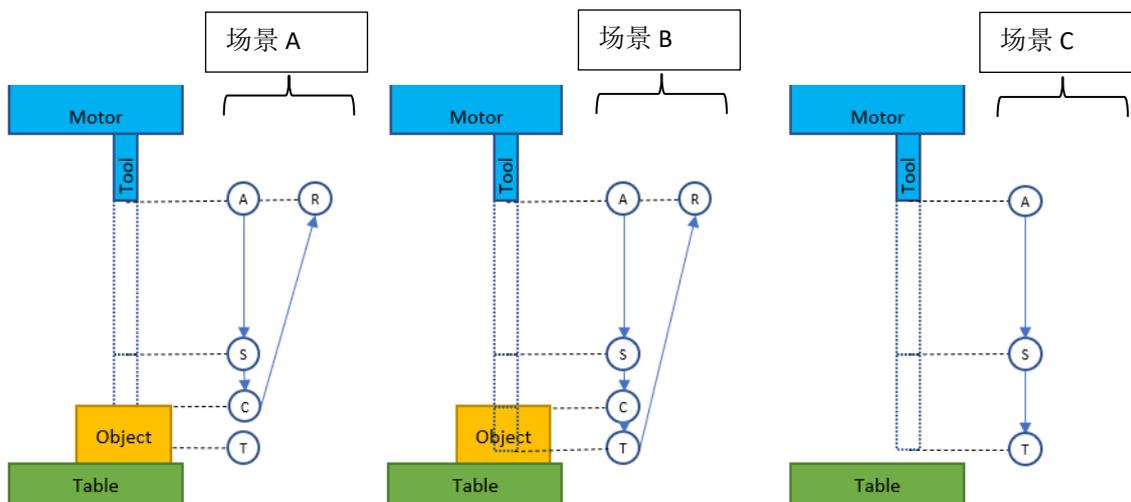


可使用力控的控制器包括：AGD301，AGC301，AGD200，AGC300，AGD155，AGM800+AGAseries, 电机带动力传感器按压物体，力传感器通过力传感器放大器放大为模拟量输出信号接入控制器的模拟量输入作为力反馈，来做闭环力控制。

而开环力控则是去除力传感器和力传感器放大器，或者只是接入力反馈信号，但只是用于观察，并不参与控制，开环力控实际只是通过电流环闭环去输出电流值。

编码器反馈

典型的力控场景分析，其中力传感器都安装在电机的下端，跟随电机一起运动，并在按压物体时和物体直接接触：



场景 A（最常见的力控场景）：

1. 从初始位置 A 高速移动到接近物体的位置 S；
2. 经过位置 S 后切换为较低的速度准备接触所要压的物体；
3. 一旦力传感器接触到物体，切换为开环或者闭环力控模式；
4. 对受压物体施加预先编辑好的电流指令或者力指令；
5. 离开受压物体回到位置 R；

场景 B（受压物体形变过大的情况）：

1. 从初始位置 A 高速移动到接近物体的位置 S；
2. 经过位置 S 后切换为较低的速度准备接触所要压的物体；
3. 一旦力传感器接触到物体，切换为开环或者闭环力控模式；
4. 对受压物体施加预先编辑好的电流指令或者力指令；
5. 在开环或闭环力控过程中，如果物体形变导致位置反馈超过位置 T 时，切换为位置模式；
6. 离开受压物体回到位置 R；

场景 C（受压物体不存在或模式转换参数设置不合理的情况）：

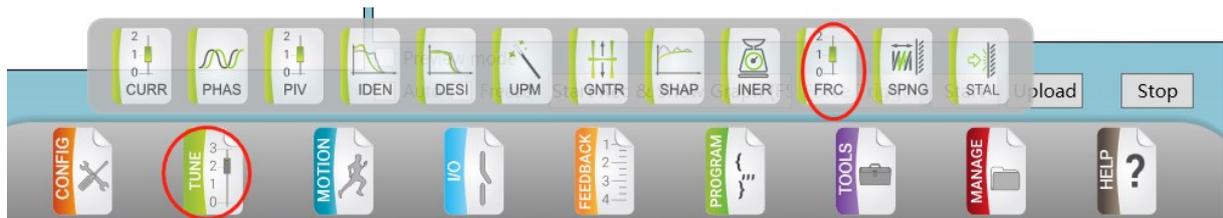
1. 从初始位置 A 高速移动到接近物体的位置 S；
2. 经过位置 S 后切换为较低的速度准备接触所要压的物体；
3. 如果受压物体不存在或是转换控制模式的阈值设置的过大，则会继续 PTP 运动直到目标位置点 T；

2 操作步骤

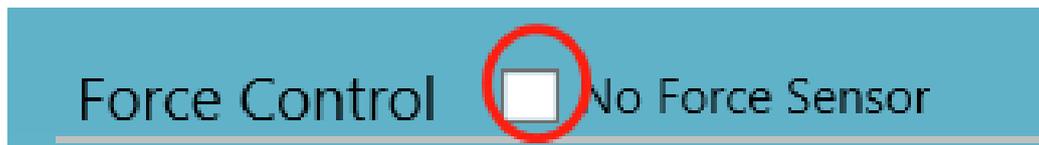
力控步骤通过 Agito PCSuite 中的 Force control 界面来设置相关参数，也可以通过 IDE 程序来执行想要的力控指令。**执行开环或者闭环力控之前确保电机相关参数已配置正确并已调参，电机可以正常运动。**

2.1 力控界面介绍

点击 PCSuite 菜单栏到 **TUNE-->FRC**，切换到力控界面。

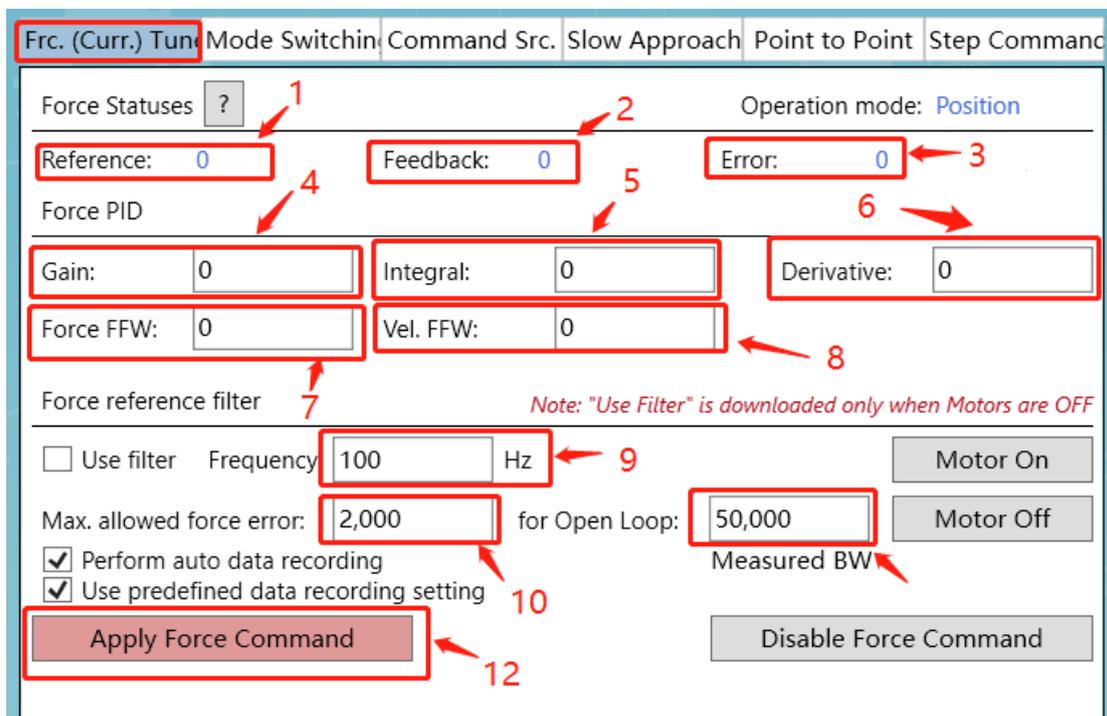


界面左上角的勾选框，当选中时，显示开环力控的界面，当取消选中时，显示闭环力控界面：



2.1.1 闭环力控界面介绍

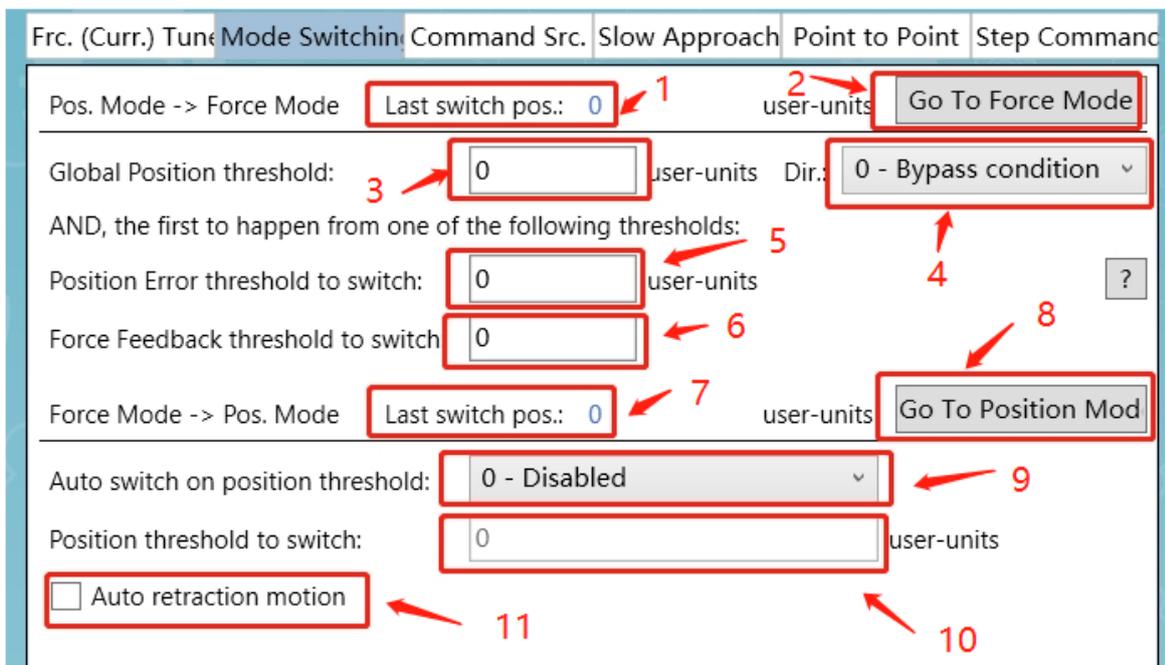
Frc.(Curr.) Tune 界面



- ① **ForceRef**: 闭环力控的指令值，单位是 Force-unit，当不处于闭环力控模式时，此关键字的值始终等于关键字 Force 的值，也就是力传感器的反馈。

- ② **Force**: 力传感器的反馈值，单位是 Force-unit，需要在模拟量输入口接入力传感器信号，并且把输入口的模式设置为 Force feedback。
- ③ **ForceErr**: 力控误差，单位是 Force-unit，是用 Force 减去 ForceRef 得到的值，当处于非闭环力控模式时，ForceErr 始终是 0。
- ④ **ForceGain**: 闭环力控调试的增益参数。
- ⑤ **ForceKi**: 闭环力控调试的积分参数。
- ⑥ **ForceKd**: 闭环力控调试的微分参数。
- ⑦ **ForceFFW**: 闭环力控调试的力前馈参数。
- ⑧ **ForceVelFFW**: 闭环力控调试的速度前馈参数。
- ⑨ **ForceRefFilt**: 对闭环力控指令施加的低通滤波频率，使用关键字 ForceRefFOn 来决定是否开启滤波。
- ⑩ **MaxForceErr**: 最大允许的闭环力控误差，超过这个值，就会触发保护下使能，在闭环力控里，这个值表示 ForceRef 与 Force 之间的差值。
- ⑪ **MaxForceErrOL**: 最大允许的开环力控误差，超过这个值，就会触发保护下使能，在开环力控里，这个值表示 CurrRef 与 MotorCurr 之间的差值。
- ⑫ **Apply Force Command**: 按下后输出在 Step Command 里设置的力指令，便于调试力控的 PIV 参数。

Mode switching 界面



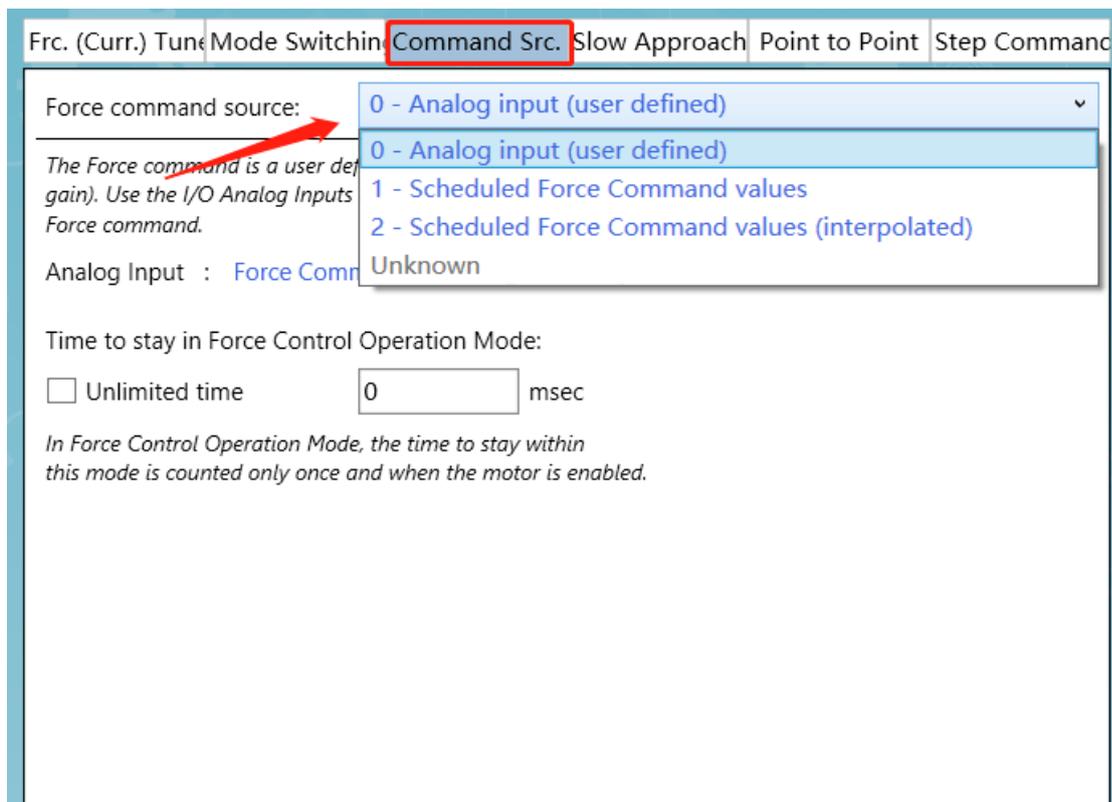
- ① **ModeSwitchPos[1]**: 该关键字记录了上一次从位置模式切换到力控模式时所处的反馈位置。
- ② **GoToForceMode**: 把当前运动模式切换为闭环力控模式。
- ③ **CurrPosTh**: 该关键字设置了一个全局的阈值来决定什么情况下转换为开环或闭环力控模式，当右边的 CurrPosThDir 参数设置为 0-Bypass condition 时，CurrPosTh 不起作用，当 CurrPosThDir 设置为 1-On PosRef>Threshold（或-1-On PosRef<Threshold）时，必须满

足位置指令大于（或小于）设置的 CurrPosTh 值，并且同时满足下方的位置误差阈值和力反馈阈值中的一个的情况下，才会转换为闭环力控模式。

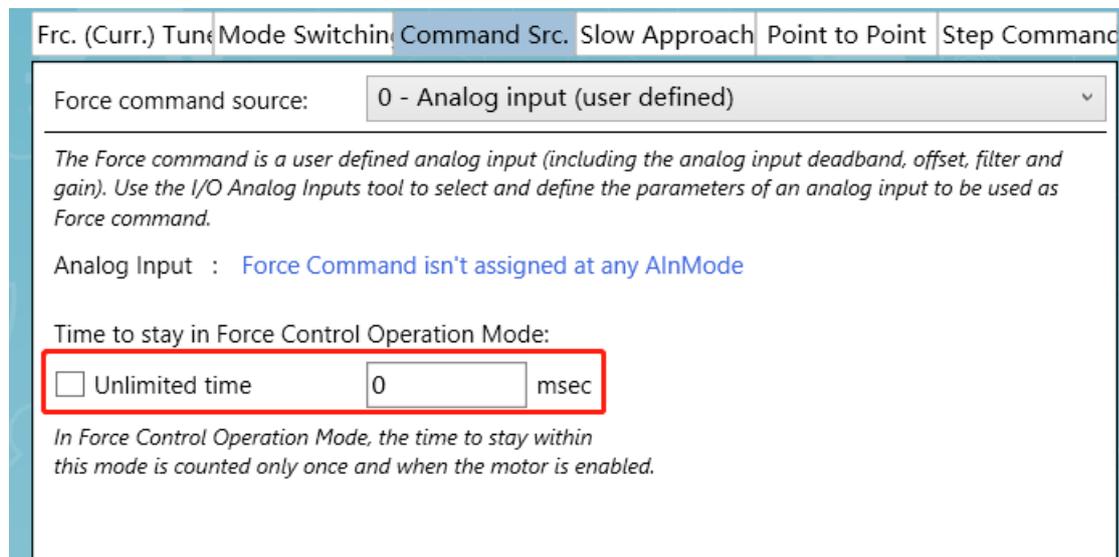
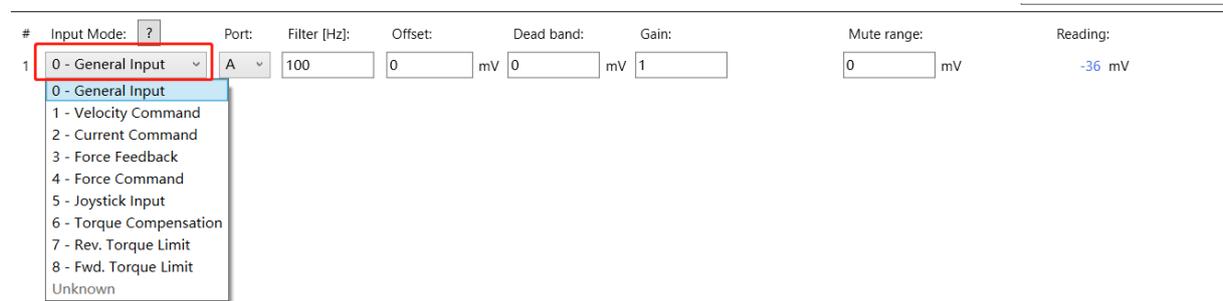
- ④ **CurrPosThDir**: 如上一条所述，与 CurrPosTh 关键字搭配使用。
- ⑤ **ForcePosErrTh**: 该关键字用于设置自动切换闭环力控的位置误差阈值，当设置为 0 时不启用这个切换条件，当设置为正值时，位置误差大于所设值则自动切换为闭环力控模式，当设置为负值时，位置误差小于所设值则自动切换为闭环力控模式。（注：当 CurrPosThDir 关键字启用时，必须同时满足 CurrPosTh 条件才能转换为力控模式）
- ⑥ **6-ForceAlnTh**: 该关键字用于设置自动切换闭环力控的模拟量输入力反馈阈值，当设置为 0 时不启用这个切换条件，当设置为正值时，力反馈大于所设值则自动切换为闭环力控模式，当设置为负值时，力反馈小于所设值则自动切换为闭环力控模式。（注：当 CurrPosThDir 关键字启用时，必须同时满足 CurrPosTh 条件才能转换为力控模式）
- ⑦ **ModeSwitChPos[2]**: 该关键字记录了上一次从力控模式切换到位置模式时的位置反馈值。
- ⑧ **GotoPosMode**: 把当前运动模式切换为位置控制模式。
- ⑨ **PosPosFlag**: 该关键字等于 0 时不启用功能，当等于 1 时，表示处于力控模式下，位置反馈如果小于下方 PosPosTh 关键字所设置的值，则强制切换为位置模式，当等于 2 时，表示如果在力控模式下位置反馈大于 PosPosTh 所设置的值，则强制切换为位置模式。
- ⑩ **PosPosTh**: 与上条关键字 PosPosFlag 配合使用。
- ⑪ **BeginOnToPos**: 当该关键字设置为 1 时启用功能，从力控模式切换回位置模式时会立即执行设置好的位置指令。

Command Src.界面

该界面主要用于设置闭环力控的指令形式，通过图中的 **ForceCmdSrc** 参数来决定形式

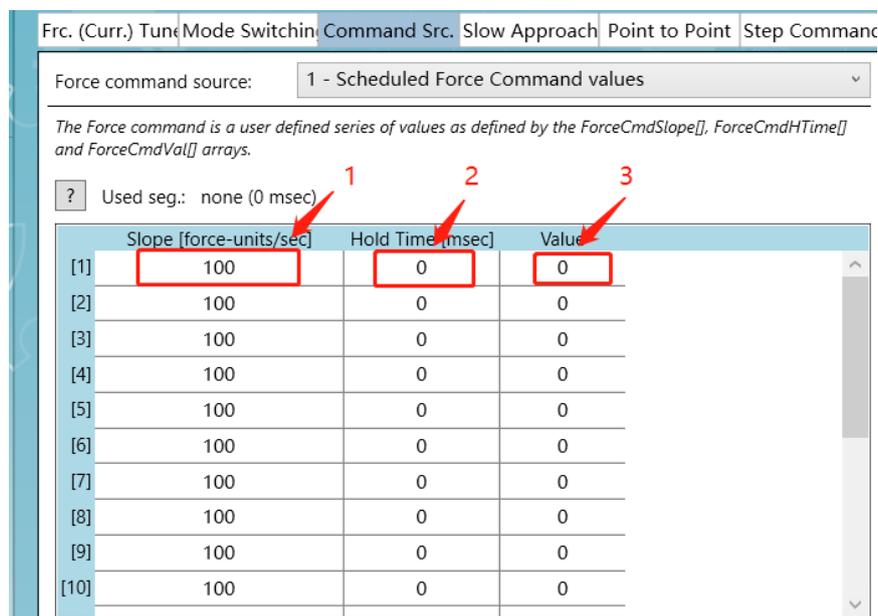


第一种形式是 0-Analog input(User defined), 这种模式下, 闭环力控指令来自于模拟输入信号, 需要预先在模拟输入界面把输入力控指令信号设置为 4-Force Command 模式, 在开启闭环力控模式后, 电机会跟随 Force Command 的信号去做闭环力控制。



在该模式下, 只需要设置力控的持续时间, 该时间在进入力控模式时就会开始计时, 关键字为 ForceCmdHTime[1], 单位为毫秒, 当设置值为-1 时, 则持续时间为永久。

第二种形式为 1-Scheduled Force Command Values:



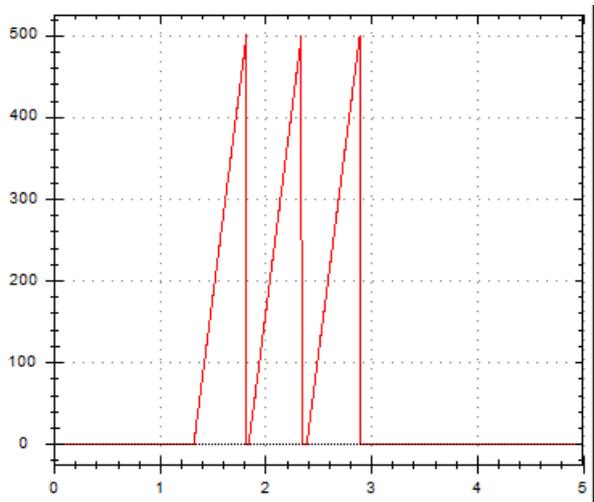
- ① **ForceCmdSlope[*]**: 该段闭环力控指令变化的斜率。
- ② **ForceCmdHTime[*]**: 该段闭环力控指令的持续时间。
- ③ **ForceCmdVal[*]**: 该段闭环力控指令的目标值。

当选择这种形式时，进入闭环力控模式，会根据表格从上往下逐段执行，每一段由 3 个参数决定：斜率，持续时间和目标值，总共可以添加 20 段力指令，从上往下执行直到碰到 HoldTime 为 0 的力指令，比如只需要执行 1, 2 段力指令，则需要把 ForceCmdHTime[3] 设置为 0。

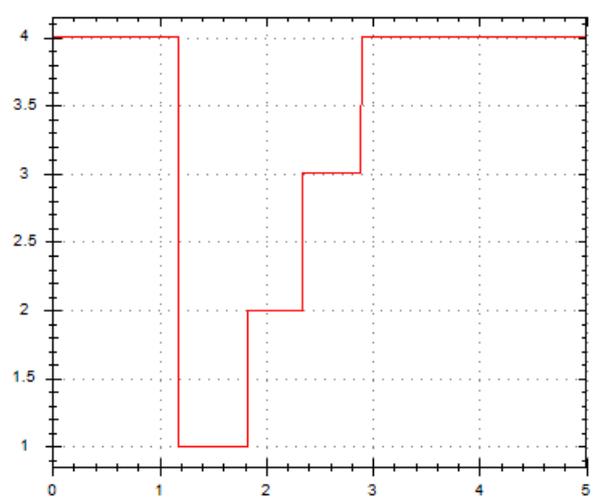
执行结束后，会自动切换为位置模式，也可以设置某一段的 Hold Time 为-1，永久保持力控模式。

关于闭环力控指令的额外参数介绍：

ForceCmdCntr: 该参数用于计数闭环力控过程中每段力控指令的执行时间，比如示例中使用了 3 段每段 500ms 持续时间的闭环力指令，那么过程中采集到的 ForceCmdCntr 波形就如下图所示：



ForceCmdIndex: 该参数用于表示闭环力控过程中当前所执行的闭环指令编号，比如示例中用了 3 段闭环力指令，那么过程中采集到的 ForceCmdIndex 波形就如下图所示：



Slow Approach 界面

Frc. (Curr.) Tune Mode Switchin Command Src. **Slow Approach** Point to Point Step Command

Slow approach state: Disabled

When armed and when moving in the selected direction and when passing the defined position, the motion speed will automatically change to the new speed value. Upon speed automatic change, this functionality will be disabled and must be re-armed again for the next change.

Slow approach: ← 1

Change speed at: user-units ← 2

Slow approach direction: ← 3

New speed: user-units/sec ← 4

- ① **SpeedChgOn:** 是否开启速度切换功能。
- ② **SpeedChgPos:** 设置切换速度的位置点。
- ③ **SpeedChgDir:** 设置切换速度位置点的判断方向，设置为 0 为正向，当位置从小到大经过 SpeedChgPos 的位置点进行速度切换，设置为 1 时为负向，当位置从大到小经过 SpeedChgPos 的位置点时进行速度切换。
- ④ **SpeedChgNew:** 设置切换速度后的速度值。

Slow Approach 界面用于设置在接近受压物体时，从高速接近到慢速接近的速度切换

Point to Point 界面

Frc. (Curr.) Tune Mode Switchin Command Src. **Point to Point** Slow Approach Step Command

Acceleration: X user-units/sec²

Deceleration:

Emergency decel.:

Smooth: (msec)

Speed: user-units/sec

Rep. wait: msec

Target 1: user-units

Target 2: user-units

Relative dist.: user-units

Track. mode:

PTP 界面与通常的 PTP 界面没有区别，不再赘述各个功能，在力控界面里放入 PTP 界面是为了方便用户进行测试，比如把电机移动到接触面附近，或者测试转力控阈值是否合适。

Step Command 界面

Frc. (Curr.) Tuning Mode Switching Command Src. Slow Approach Point to Point Step Command

Type: 3 - Square wave direct inje Motor On

Frequency: 5 Hz Motor Off

Amplitude: 100

Use predefined command

Perform auto data recording Measured BW

Use predefined data recording setting

Apply Force Command Disable Force Command

此界面类似于调整电流环速度环和位置环的 Step command 界面，不同的是给出的是力指令，默认是方波，频率 5Hz，幅值 100 Force-unit，也可以取消勾选 Use predefined command 来自由设置不同频率不同幅值不同波形的力指令。（PS：在执行指令前，要保证电机按压在被压物体上，因为一旦点下 Apply Force Command 会立即转换为闭环力控模式并发送力指令）

2.1.2 开环力控界面介绍

当勾选上方的 No force sensor 时显示的就是开环力控界面：



Frc.(Curr.) Tune 界面

The screenshot shows the 'Frc. (Curr.) Tune' interface with the following elements:

- Navigation tabs: Frc. (Curr.) Tune, Mode Switching, Command Src., Slow Approach, Point to Point, Step Command.
- Current Statuses: Reference: 0 mA (labeled 1), Feedback: 0.001 mA (labeled 2). Operation mode: Position.
- Current PI parameters: Current PI, gain: 107 (labeled 3); Current PI, integral: 306 (labeled 4).
- Buttons: Motor On, Motor Off, Measured BW: NA, Apply Current Command (labeled 5), Disable Current Command.
- Checkboxes: Perform auto data recording; Use predefined data recording setting.

- ① **CurrRef**: 电流指令值，单位 mA。
- ② **MotorCurr**: 电流反馈值，单位 mA。
- ③ **CurrGain**: 电流环调试的增益参数。
- ④ **CurrKi**: 电流环调试的比例参数。
- ⑤ **Apply Current Command**: 按下后输出在 Step Command 界面设置的电流指令，用于测试电流环 PI 参数。

Mode switching 界面

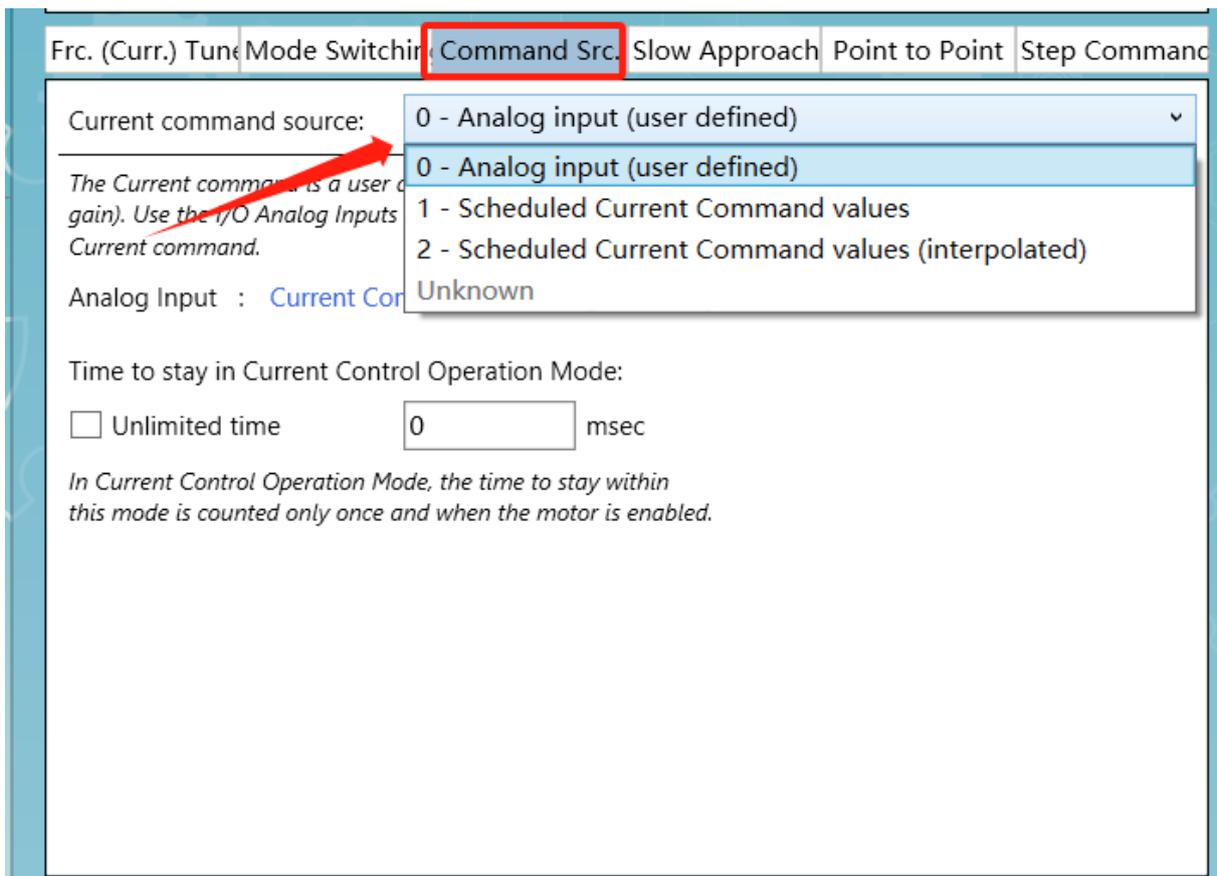
Frc. (Curr.) Tune	Mode Switching	Command Src.	Slow Approach	Point to Point	Step Command
Pos. Mode -> Current Mode	Last switch pos.: 0	user-units	Go To Current Mode		
Global Position threshold:	0	user-units	Dir.: 0 - Bypass condition		
AND, the first to happen from one of the following thresholds:					
Position Error threshold to switch:	0	user-units			
Current threshold to switch:	0	mA	Dir.: 0 - On CurrRef > Thr		
Force Feedback threshold to switch:	0				
Current Mode -> Pos. Mode	Last switch pos.: 0	user-units	Go To Position Mod		
Auto switch on position threshold:	0 - Disabled				
Position threshold to switch:	0	user-units			
<input type="checkbox"/> Auto retraction motion					

- ① **ModeSwitchPos[1]**: 该关键字记录了上一次从位置模式切换到力控模式时所处的反馈位置。
- ② **GoToCurrMode**: 把当前运动模式切换为开环力控模式。
- ③ **CurrPosTh**: 该关键字设置了一个全局的阈值来决定什么情况下转换为开环或闭环力控模式，当右边的 **CurrPosThDir** 参数设置为 0-Bypass condition 时，**CurrPosTh** 不起作用，当 **CurrPosThDir** 设置为 1-On PosRef>Threshold（或-1-On PosRef<Threshold）时，必须满足位置指令大于（或小于）设置的 **CurrPosTh** 值，并且同时满足下方的位置误差阈值和电流阈值以及力反馈阈值中的一个的情况下，才会转换为开环力控模式。
- ④ **CurrPosThDir**: 如上一条所述，与 **CurrPosTh** 关键字搭配使用。
- ⑤ **CurrPosErrTh**: 该关键字用于设置自动切换开环力控的位置误差阈值，当设置为 0 时不启用这个切换条件，当设置为正值时，位置误差大于所设值则自动切换为开环力控模式，当设置为负值时，位置误差小于所设值则自动切换为开环力控模式。（注：当 **CurrPosThDir** 关键字启用时，必须同时满足 **CurrPosTh** 条件才能转换为力控模式）
- ⑥ **CurrCurrTh**: 根据 **CurrCurrThDir** 的设置，当电流指令大于（或小于）所设置的阈值时切换为开环力控模式。（注：当 **CurrPosThDir** 关键字启用时，必须同时满足 **CurrPosTh** 条件才能转换为力控模式）
- ⑦ **CurrCurrThDir**: 决定电流转换条件时大于还是小于阈值。
- ⑧ **CurrAlnTh**: 该关键字用于设置自动切换开环力控的模拟量输入力反馈阈值，当设置为 0 时不启用这个切换条件，当设置为正值时，力反馈大于所设值则自动切换为开环力控模式，当设置为负值时，力反馈小于所设值则自动切换为开环力控模式。（注：当 **CurrPosThDir** 关键字启用时，必须同时满足 **CurrPosTh** 条件才能转换为力控模式）
- ⑨ **ModeSwitchPos[2]**: 该关键字记录了上一次从力控模式切换到位置模式时的位置反馈值。
- ⑩ **GotoPosMode**: 把当前运动模式切换为位置控制模式。

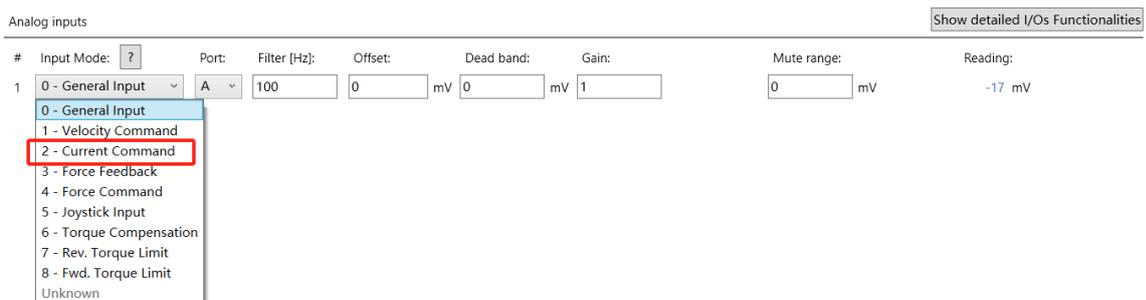
- ⑪ **PosPosFlag:** 该关键字等于 0 时不启用功能，当等于 1 时，表示处于力控模式下，位置反馈如果小于下方 PosPosTh 关键字所设置的值，则强制切换为位置模式，当等于 2 时，表示如果在力控模式下位置反馈大于 PosPosTh 所设置的值，则强制切换为位置模式。
- ⑫ **PosPosTh:** 与上条关键字 PosPosFlag 配合使用。
- ⑬ **BeginOnToPos:** 当该关键字设置为 1 时启用功能，从力控模式切换回位置模式时会立即执行设置好的位置指令。

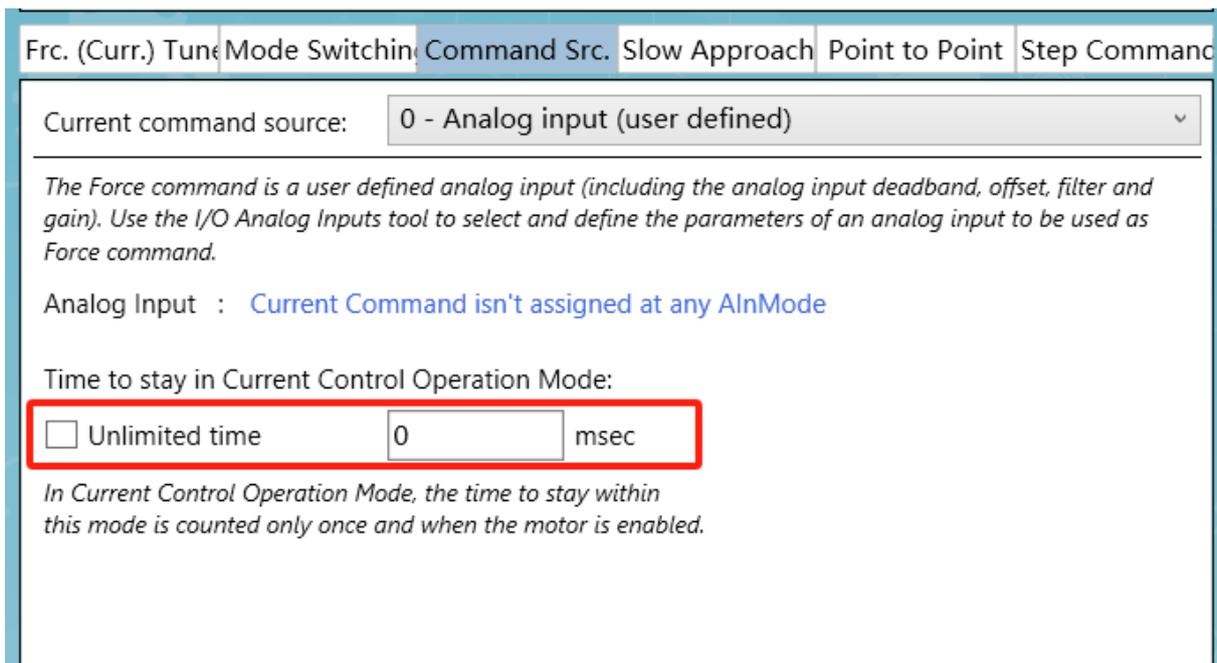
Command Src.界面

该界面主要用于设置开环力控的指令形式，通过图中的 **CurrCmdSrc** 参数来决定形式



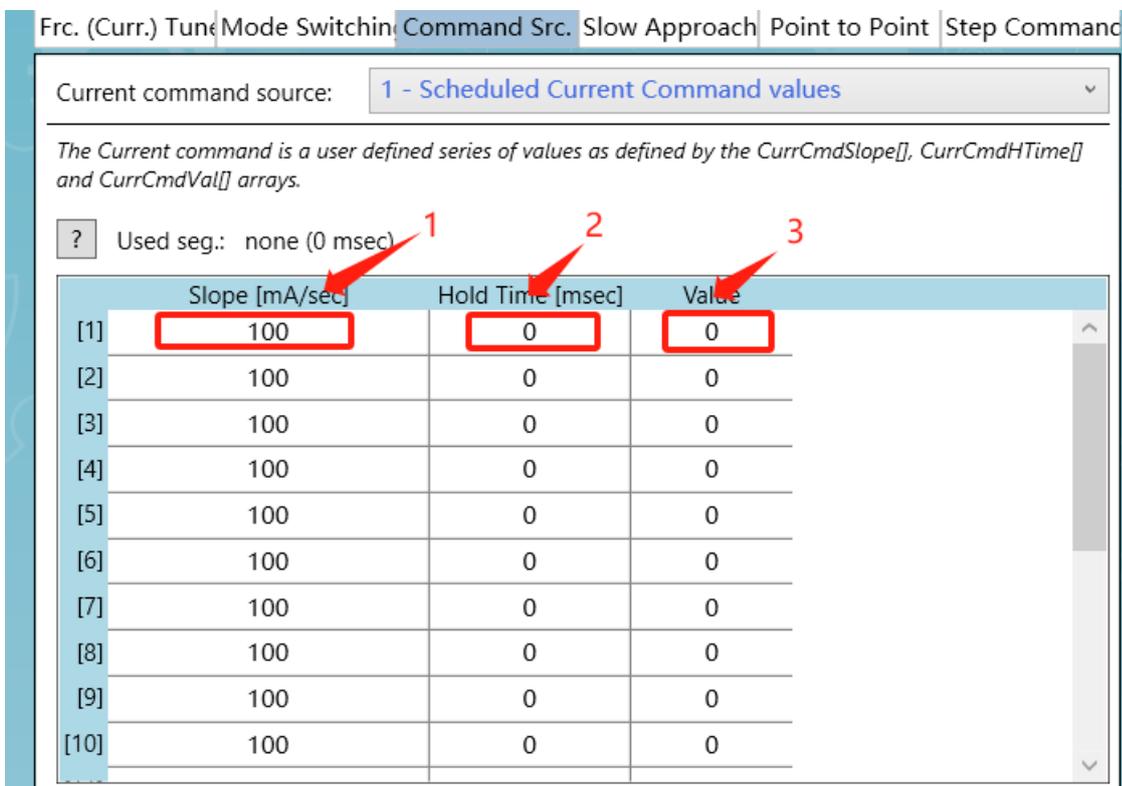
第一种形式是 0-Analog input(User defined), 这种模式下，开环力控指令来自于模拟输入信号，需要预先在模拟输入界面把输入力控指令信号设置为 2-Current Command 模式，在开启开环力控模式后，电机会跟随 Current Command 的信号去做开环力控制。





在该模式下，只需要设置力控的持续时间，该时间在进入力控模式时就会开始计时，关键字为 ForceCmdHTime[1]，单位为毫秒，当设置值为-1 时，则持续时间为永久。

第二种形式为 1-Scheduled Current Command Values:



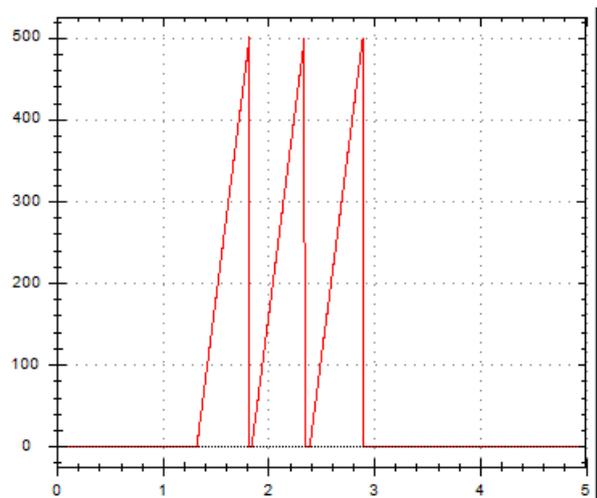
- ① **CurrCmdSlope[*]**: 该段开环力控指令变化的斜率。
- ② **CurrCmdHTime[*]**: 该段开环力控指令的持续时间。
- ③ **CurrCmdVal[*]**: 该段开环力控指令的目标值。

当选择这种形式时，进入开环力控模式，会根据表格从上往下逐段执行，每一段由 3 个参数决定：斜率，持续时间和目标值，总共可以添加 20 段力指令，从上往下执行直到碰到 HoldTime 为 0 的力指令，比如只需要执行 1, 2 段力指令，则需要把 CurrCmdHTime[3] 设置为 0。

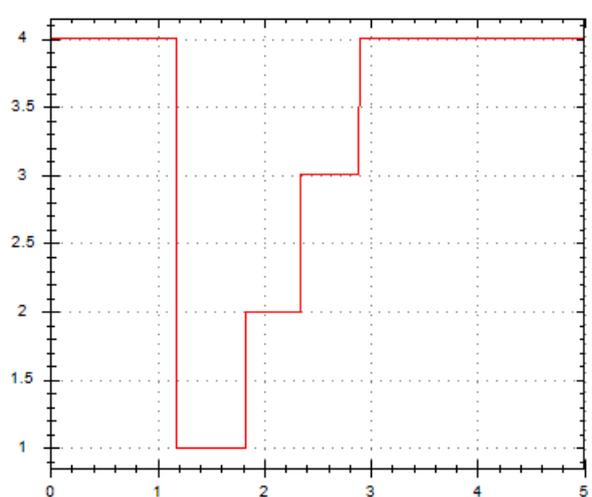
执行结束后，会自动切换为位置模式，也可以设置某一段的 Hold Time 为-1，永久保持力控模式。

关于开环力控指令的额外参数介绍：

CurrCmdCntr: 该参数用于计数开环力控过程中每段力控指令的执行时间，比如示例中使用了 3 段每段 500ms 持续时间的开环力指令，那么过程中采集到的 CurrCmdCntr 波形就如下图所示：



CurrCmdIndex: 该参数用于表示开环力控过程中当前所执行的开环指令编号，比如示例中用了 3 段开环力指令，那么过程中采集到的 CurrCmdIndex 波形就如下图所示：



Slow Approach 界面

Frc. (Curr.) Tune Mode Switchin Command Src. **Slow Approach** Point to Point Step Command

Slow approach state: Disabled

When armed and when moving in the selected direction and when passing the defined position, the motion speed will automatically change to the new speed value. Upon speed automatic change, this functionality will be disabled and must be re-armed again for the next change.

Slow approach: ← 1

Change speed at: user-units ← 2

Slow approach direction: ← 3

New speed: user-units/sec ← 4

- ① **SpeedChgOn:** 是否开启速度切换功能。
- ② **SpeedChgPos:** 设置切换速度的位置点。
- ③ **SpeedChgDir:** 设置切换速度位置点的判断方向，设置为 0 为正向，当位置从小到大经过 SpeedChgPos 的位置点进行速度切换，设置为 1 时为负向，当位置从大到小经过 SpeedChgPos 的位置点时进行速度切换。
- ④ **SpeedChgNew:** 设置切换速度后的速度值。

Slow Approach 界面用于设置在接近受压物体时，从高速接近到慢速接近的速度切换

Point to Point 界面

Frc. (Curr.) Tune Mode Switchin Command Src. **Point to Point** Step Command

Acceleration: X user-units/sec²

Deceleration:

Emergency decel.:

Smooth: (msec)

Speed: user-units/sec

Rep. wait: msec

Target 1: user-units

Target 2: user-units

Relative dist.: user-units

Track. mode:

PTP 界面与通常的 PTP 界面没有区别，不再赘述各个功能，在力控界面里放入 PTP 界面是为了方便用户进行测试，比如把电机移动到接触面附近，或者测试转矩控制阈值是否合适。

Step Command 界面

此界面实际上就是电流环调试的 Step command 界面，因为开环力控等同于闭环电流控制。

2.2 力控步骤介绍

2.2.1 闭环力控操作步骤

在界面上执行闭环力控操作，确保操作前在 Force Control 界面右上角取消勾选 No force sensor 选项：



在进行调试前，需要配置力传感器反馈的输入，选配的力传感器放大器要具备模拟信号输出功能，将模拟量反馈信号接入到 Agito 控制器的任意模拟量输入口里：

Analog_Input_1+	AInPort[1]	±12V, 12-bit resolution.
Analog_Input_1-		Analog input 1 return. Must be connected to GND if analog input is single-ended.

在模拟量 IO 界面上把力反馈信号的模拟输入口 Input Mode 设置为 3-Force Feedback 模式：

注意：力反馈信号的轴号需要与电机轴号一致，如果电机接在 C 轴上，力反馈信号设置为 A 轴，是无法正常工作的。

可以通过按压力传感器观察模拟输入读数，来检查力反馈信号能否正确读取到。

电机处于悬空状态，力传感器没有按压到物体时，所受压力应为 0，但由于机械上的干扰，模拟量信号偏差等原因，导致悬空状态时读取到的模拟输入不为 0，这时需要在模拟输入界面设置 **AlnOffset** 值来做偏置，使得读入的模拟量值显示为 0mV：



同时也可以利用砝码等工具标定力传感器放大器模拟量输出和力之间的比例关系，来填入 **AlnGain** 参数里，让读到的模拟输入力反馈值以力的单位显示：

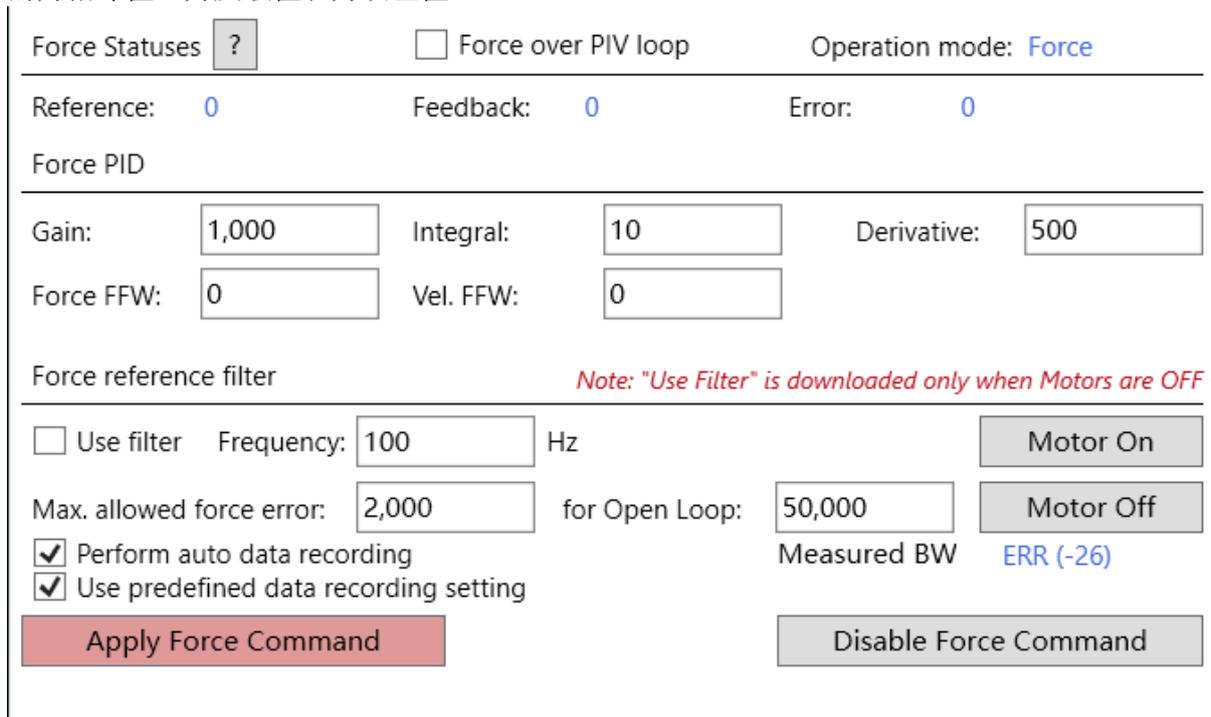


示例中力传感器放大器的模拟量和力之间的比值为 5mV/g，设置 **AlnGain=0.2(force-units)/mV**，则 **force-units** 所代表的单位就变为了克，读入的模拟量力反馈值将以克为单位显示。

注意：力反馈的模拟输入正负方向需要和电机运动方向同向，即电机向下运动按压方向如果为正方向，那力传感器受按压时控制器接收到的模拟输入也应该是正值，否则需要通过 **AlnGain** 取反。

(1) 切换到 **Frc.(Curr.) Tune** 界面，在该界面上可以设置闭环力控的 **PID** 参数，需要注意的是力控 **PID** 参数中的 **Gain** 和 **Derivative** 参数在算法内部除了一个很大的数，所以这两个参数可以设置很大的值，上千上万都是正常的范围。

这个界面也可以设置对闭环力指令的滤波，以及最大允许力误差值。同时也可以实时监视当前的力指令值，力反馈值和力误差值：



注意：请不要使用“**Apply Force Command**”按钮来调试闭环力控参数，此功能存在风险且不易于调试。

(2) 切换到 **Mode switching** 界面，填入从位置模式切换到闭环力控模式的转换条件，其中第一项位置条件，当右侧的 **Dir** 设置为 1 或 -1 时，位置条件为自动切换为力控的必须满足条件。只有当位置条件满足，且下方的两个条件（位置误差，力反馈值）任意满足一个的情况下才会转换为闭环力控模式。

Pos. Mode -> Force Mode Last switch pos.: 8 user-units Go To Force Mode

Global Position threshold: user-units Dir.: 0 - Bypass condition ▾

AND, the first to happen from one of the following thresholds:

Position Error threshold to switch: user-units ?

Force Feedback threshold to switch:

示例中电机与被压物体接触的位置在 3600count，图中设置了位置条件为 3500count，Dir 设置为 1，即当位置大于 3500count 时，才会做判断是否转为闭环力控模式。示例中使用力传感器反馈值作为判断条件，当力传感器反馈大于 5 force-units（5 克力）时切换开环力控模式，位置误差，力反馈值这两个条件可以同时设置，只要有一个触发就会切换闭环力控模式。

Auto switch on position threshold: 2 - On Position > Threshold ▾

Position threshold to switch: user-units

Auto switch on position threshold 功能用于保护，示例中设置为当位置超过 4000count 时从闭环力控模式切换为位置模式。

Auto retraction motion Retract to: Speed:

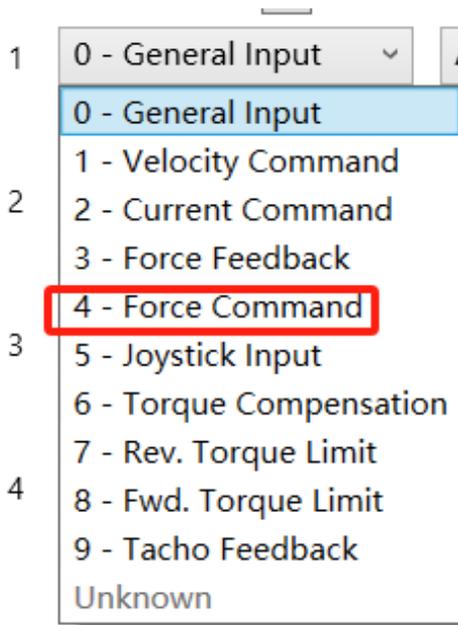
示例中勾选了 Auto retraction motion，当从闭环力控模式切换回位置模式时，会用 20000count/s 的速度去到绝对位置 0count 点。

(3) 切换到 Command Src.界面，在这里选择闭环力控指令的来源，当选择 0-Analog input(User defined)时

Force command source: 0 - Analog input (user defined) ▾

The Force command is a user defined analog input (including the analog input deadband, offset, filter and gain). Use the I/O Analog Inputs tool to select and define the parameters of an analog input to be used as Force command.

指令来自于设置为 Force command 模式的模拟输入：



当使用 0-Analog input(User defined)模式时，Command Src.界面下方用于设置在闭环力控模式下的持续时间：

Time to stay in Force Control Operation Mode:

Unlimited time msec

In Force Control Operation Mode, the time to stay within this mode is counted only once and when the motor is enabled.

设置为-1 则为无限时间，否则时间结束会自动切换为位置模式。

当选择 1-Scheduled Force Command values 模式，会根据表格从上往下逐段执行，每一段由 3 个参数决定：斜率，持续时间和目标值，总共可以添加 20 段力指令，从上往下执行直到碰到 HoldTime 为 0 的力指令。（Holdtime 设置为-1，则会在该段永久执行）

Force command source: 1 - Scheduled Force Command values

The Force command is a user defined series of values as defined by the ForceCmdSlope[], ForceCmdHTime[] and ForceCmdVal[] arrays.

? Used seg.: 1 - 3 (~1570 msec)

	Slope [force-units/sec]	Hold Time [msec]	Value
[1]	1,000	500	150
[2]	1,000	500	170
[3]	1,000	500	120
[4]	100	0	0
[5]	100	0	0
[6]	100	0	0
[7]	100	0	0
[8]	100	0	0
[9]	100	0	0
[10]	100	0	0

示例中设置了三段闭环力控指令，先后分别是 150 克力保持 500 毫秒，170 克力保持 500 毫秒，120 克力保持 500 毫秒，指令结束后会自动切换为位置模式。

(4) 切换到 Slow Approach 界面，在位置模式切换力控模式时，为了减少过冲，通常在接近被压物体过程中采用两段速度不同的运动，分别是长距离的高速运动和短距离的慢速接近，Slow Approach 界面就是用来设置慢速接近的条件以及切位慢速后的速度值。

Slow approach state: Disabled

When armed and when moving in the selected direction and when passing the defined position, the motion speed will automatically change to the new speed value. Upon speed automatic change, this functionality will be disabled and must be re-armed again for the next change.

Slow approach:

Change speed at: user-units

Slow approach direction:

New speed: user-units/sec

示例中由于 3600count 为接触位置，所以设置在 3400count 的位置切换为慢速，切换后的速度设置为 500count/s，点击 Arm 按钮启用 Slow Approach 功能，那么在下一次位置运动中，小于 3400count 的位置所使用的速度值为 PTP 界面里设置的速度，一旦超过 3400count，则切换为设置的 500count/s 的速度。需要注意的是 Slow Approach 功能启用后只会生效一次，如需再次使用则需要重新启用该功能。

(5) 设置完上述的步骤，就可以切换到 Point to Point 界面来做一次完整的闭环力控测试，由于示例中与被压物体接触的绝对位置为 3600count，所以在 Point to Point 界面里设置绝对目标位置点为大于接触位置的 3800count，随后点击 Go 2 使电机朝 3800count 位置点运动，设置大于接触位置的目标值可以保证电机一定会接触到被压物体，也同时保证了会满足所设置的切换闭环力控条件：

Acceleration:	<input type="text" value="2,000,000"/>	} X <input type="text" value="1"/> user-units/sec ²	<input type="button" value="Motor On"/>
Deceleration:	<input type="text" value="2,000,000"/>		<input type="button" value="Motor Off"/>
Emergency decel.:	<input type="text" value="1,000,000"/>		
Smooth: (msec)	<input type="text" value="0.000"/>		
Speed:	<input type="text" value="20,000"/>	user-units/sec	
Rep. wait:	<input type="text" value="20"/>	msec	
Target 1: >	<input type="text" value="0"/>	user-units	<input type="button" value="Go 1"/> <input type="button" value="Go 1 Rep."/> <input type="button" value="Stop"/>
Target 2: >	<input type="text" value="3,800"/>	user-units	<input type="button" value="Go 2"/> <input type="button" value="Go 2 Rep."/> <input type="button" value="Abort"/>
Relative dist.:	<input type="text" value="-100"/>	user-units	<input type="button" value="Fwd"/> <input type="button" value="Fwd Rep."/>
Track. mode:	<input type="text" value="0 - Disabled"/>		<input type="button" value="Back"/> <input type="button" value="Back Rep."/> <input type="button" value="Stop Rep."/>

设置抓图触发条件为电机开始运动：

Duration: sec Gap: msec Actual Gap: **1.0376** msec

Use Minimal Gap: **1.0376** Detailed Fast

Trigger: ?

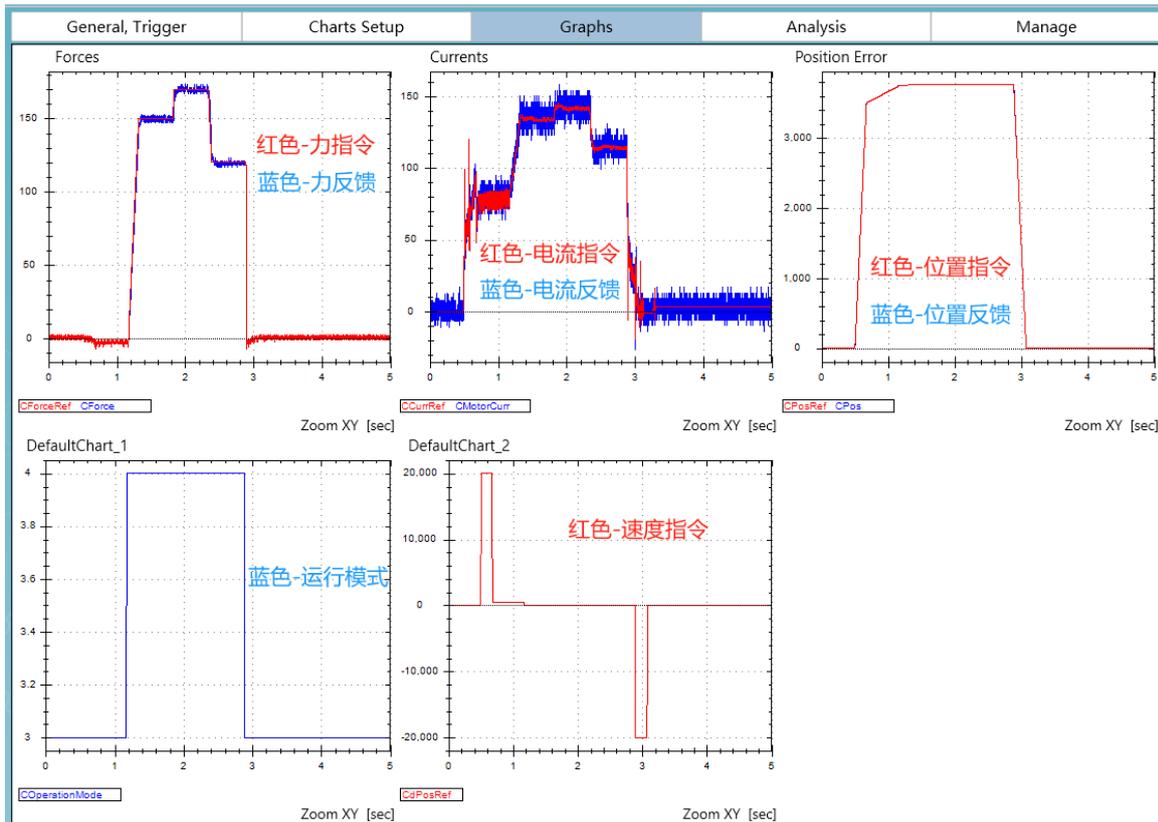
Axis: Category: Keyword:

Source:

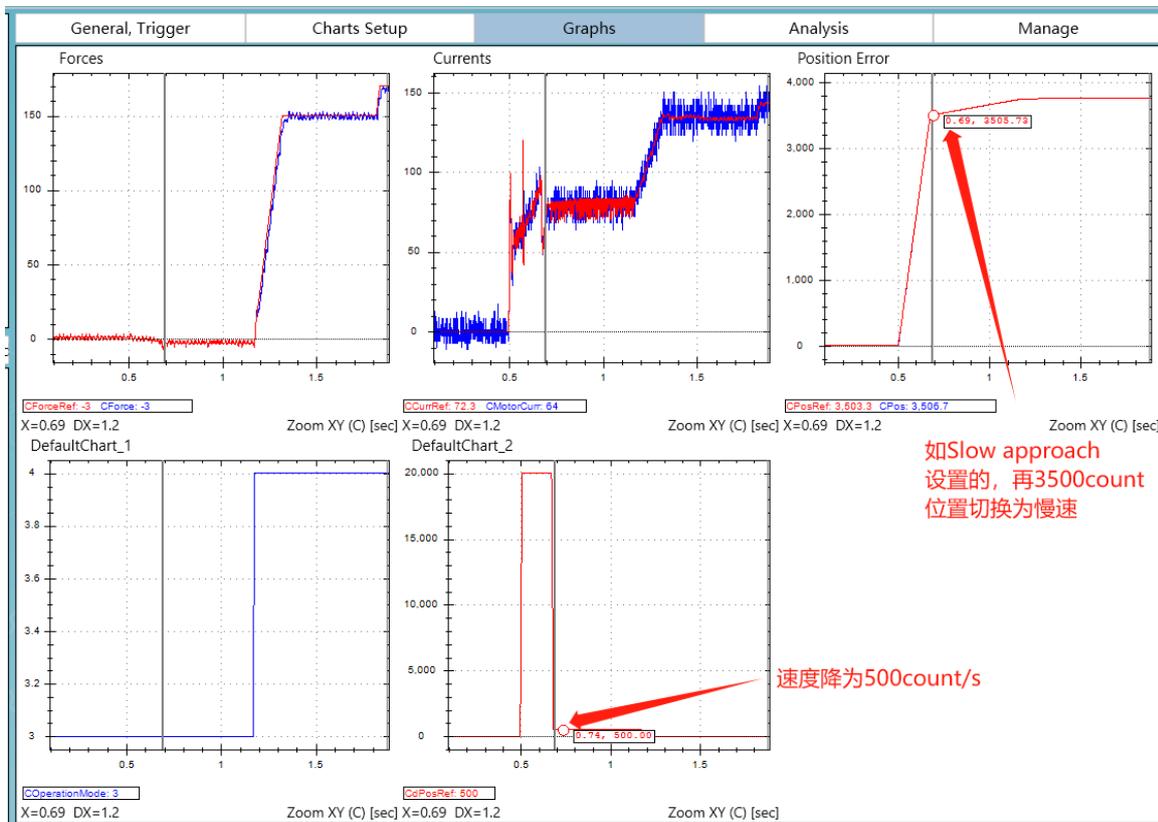
Mask: Value:

Position: %

抓取的五张图分别是力，电流，位置，运行模式和速度：

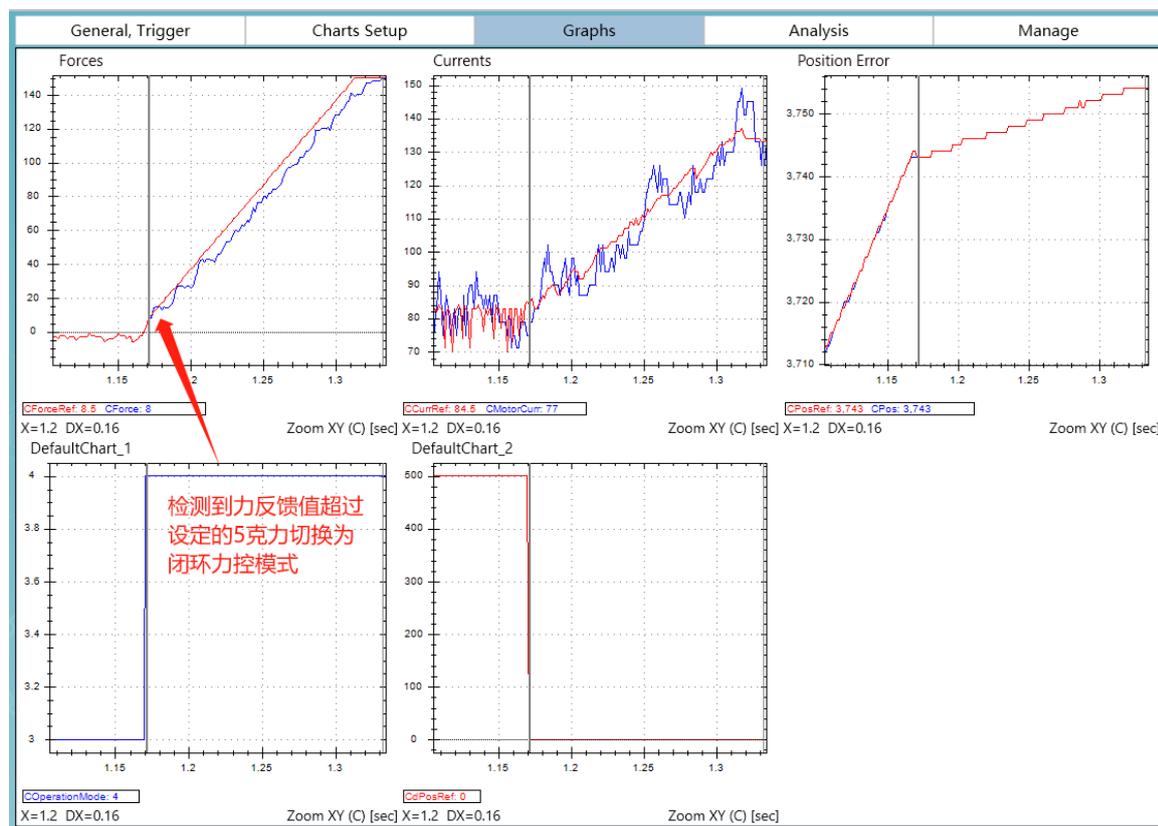


下面分步解释整个运动的过程，第一部分是位置模式运动到接触受压物体：



这个过程中 OperationMode 都等于 3，也就是位置模式，同时也能看到如之前在 Slow Approach 所设置的，在 3500count 以下的位置使用了高速移动，而在 3500count 以上的位置切换到了 500count/s 的慢速。

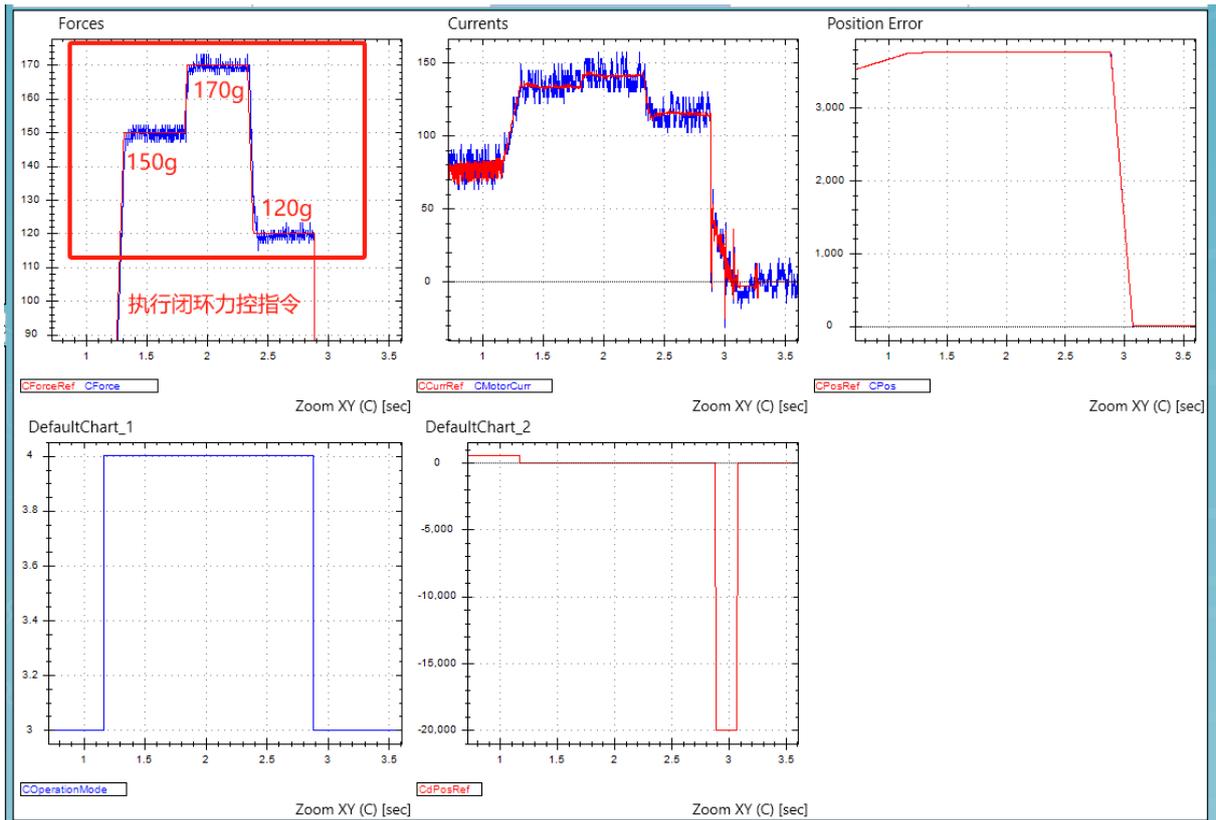
第二部分是通過設置的切換閉環力控條件轉到閉環力控模式：



圖中可以看到在慢速運動的末端，由於接觸到被壓物體導致力反饋值增加達到設置的轉換閾值 5g，OperationMode 從 3 變為了 4，也就是切換到了閉環力控模式，值得注意的是，在整個位置運動接近過程中由於開啟了 Global Position threshold 功能，即使在 3500count 以下的加速運動過程中力反饋值超過了 5g 力，也不會轉換到閉環力控模式，有了這個條件，可以避免高速位置運動下的誤切換：

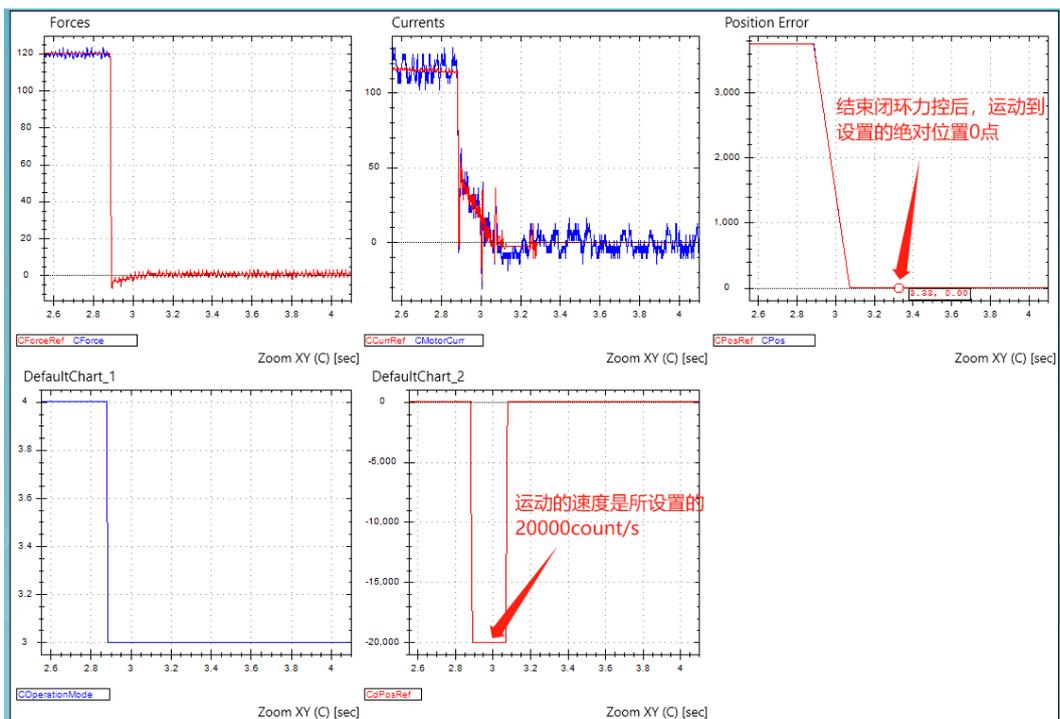
Global Position threshold: user-units Dir.:

第三部分是閉環力控的指令執行，示例中採用了 1-Scheduled Force Command values 的命令模式，總共三段指令，分別是 150 克，170 克和 120 克，從圖中可以看到切換到閉環力控模式後三個指令依次執行：



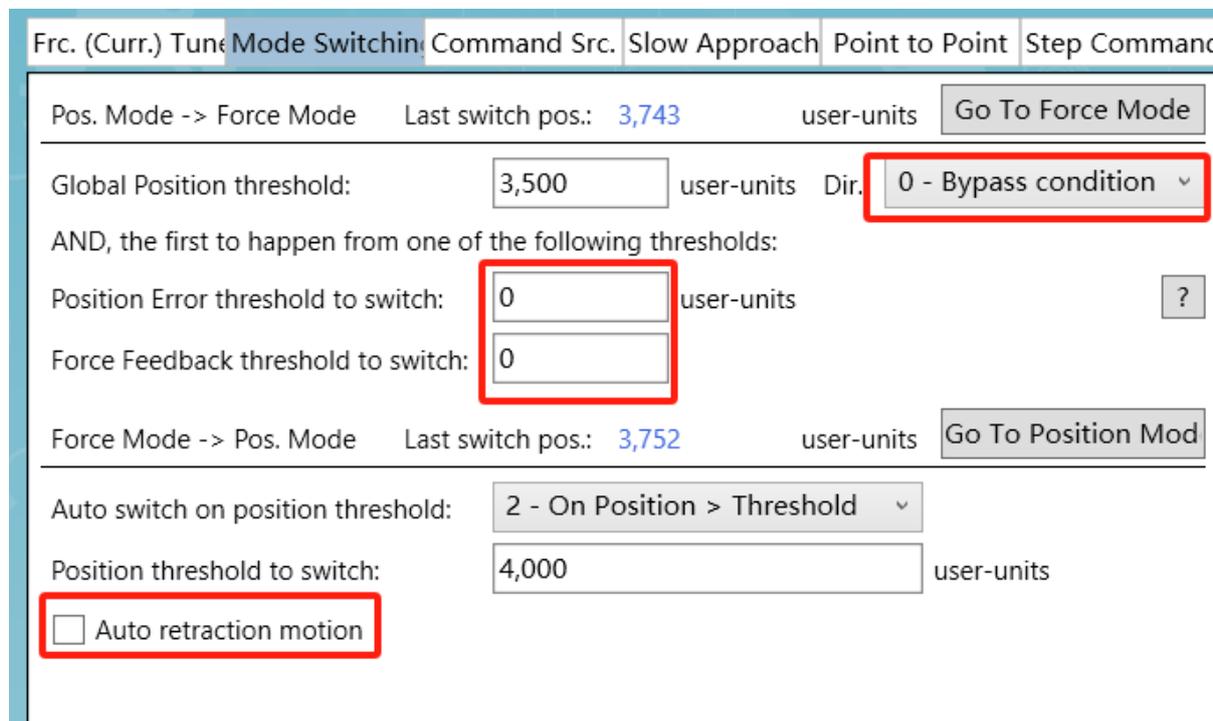
第四部分为结束闭环力控指令后，示例中为 120g 的闭环力指令结束后，OperationMode 变为 3，也就是位置模式。根据示例中 Auto retraction motion 所设置的值，当从闭环力控模式切换回位置模式，会以 20000count/s 的速度移动到位置 0 点：

Auto retraction motion Retract to: Speed:



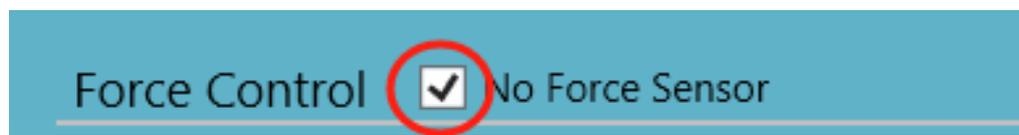
回到 0 点后，一个典型的闭环力控运动就执行完成了。通过调整力控 PID 参数，多次执行力控过程，来验证是否达到想要的结果。

一个值得注意的点是，执行完闭环力控运动后，判断切换闭环力控的条件会自动变为 Bypass 状态，包括 Auto retraction motion 和 Slow approach 都会在执行过后变为不启用状态，如果界面上显示没有还原为非启用状态，可能是由于界面没有刷新，点击左下角的 Refresh all 会显示控制器中当前的状态：

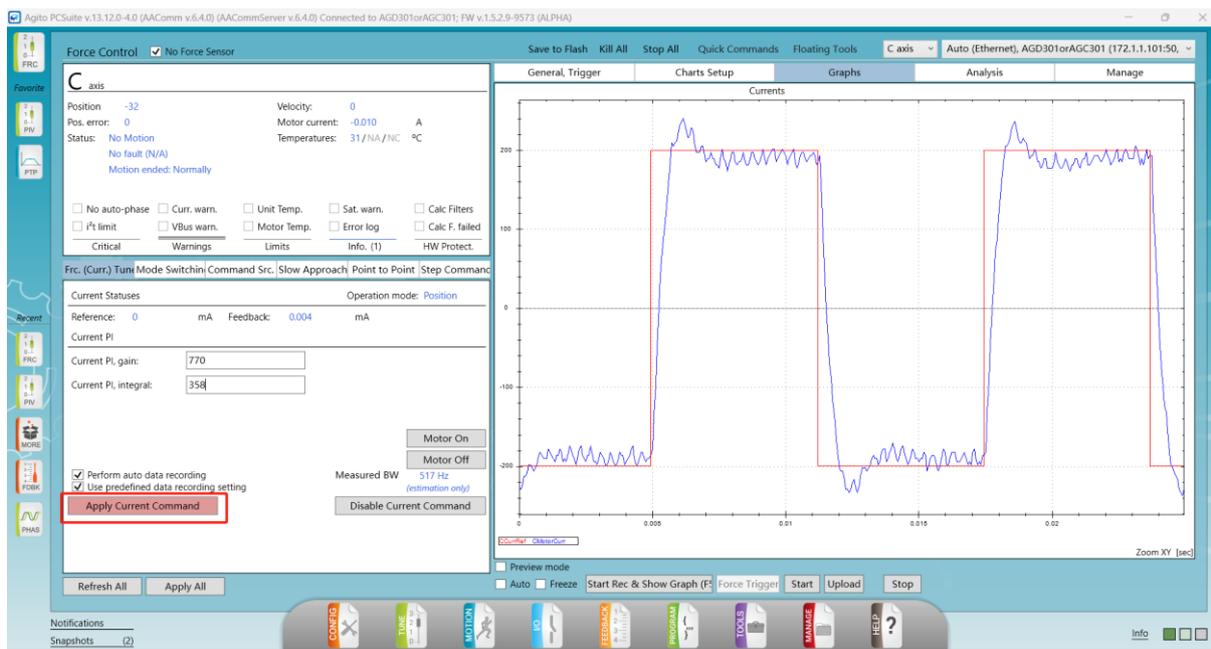


2.2.2 开环力控操作步骤

在界面上执行开环力控操作，确保操作前在 Force Control 界面右上角勾选了 No force sensor 选项：

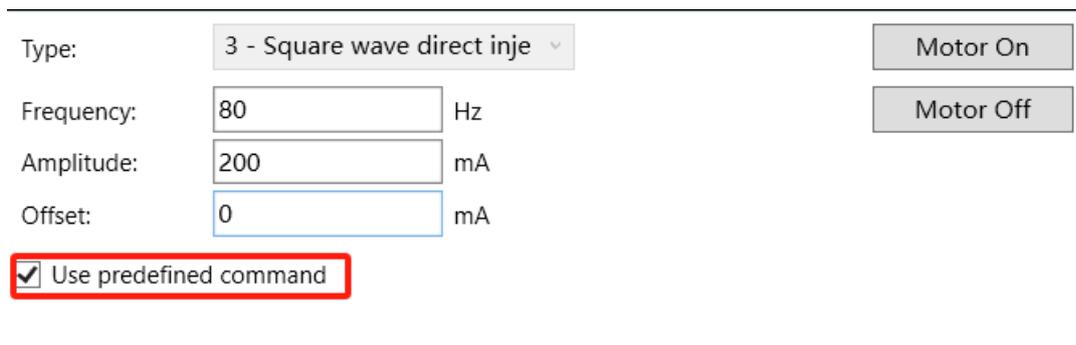


(1) 在 Frc.(Curr.)Tune 界面调整开环力控的 PI 参数，开环力控在使用方波指令调试时不需要电机接触到被压物体，在空中也可以执行调试，点击 Apply Current Command 按钮会向电机发送电流指令，调整电流 PI 参数，使得电流反馈尽量跟随电流指令，但要避免参数过大导致的超调和震荡：

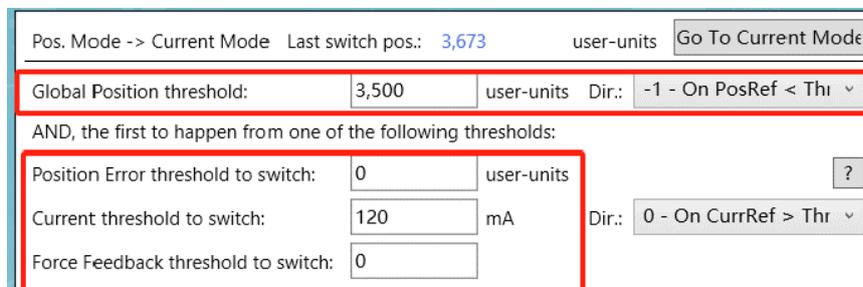


此处参数调整产生的电流跟随性决定了之后开环力控时的跟随性。

也可切换到 **Step Command** 界面，取消勾选 **Use predefined command**，即可自由设置电流指令的类型，频率和幅值：



(2) 切换到 **Mode switching** 界面，填入从位置模式切换到开环力控模式的转换条件，其中第一项位置条件，当右侧的 **Dir** 设置为 **1** 或 **-1** 时，位置条件为自动切换为力控的必须满足条件。只有当位置条件满足，且下方的三个条件（位置误差，电流值，力反馈值）任意满足一个的情况下才会转换为开环力控模式。



示例中电机与被压物体接触的位置在 **3600count**，图中设置了位置条件为 **3500count**，**Dir** 设置为 **1**，即当位置大于 **3500count** 时，才会做判断是否转为开环力控模式。示例中使用电流指令作为判断条件，当电流指令大于 **120mA** 时切换开环力控模式，位置误差，电流值，力反馈值这三个条件可以同时设置，只要有一个触发就会切换开环力控模式。

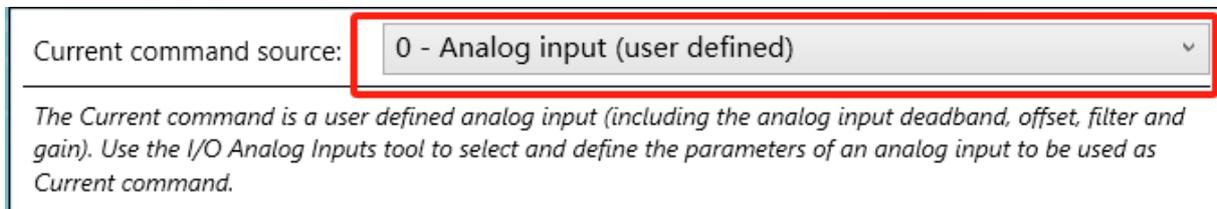
Auto switch on position threshold: 2 - On Position > Threshold
Position threshold to switch: 4,000 user-units

Auto switch on position threshold 功能用于保护，示例中设置为当位置超过 4000count 时从开环力控模式切换为位置模式。

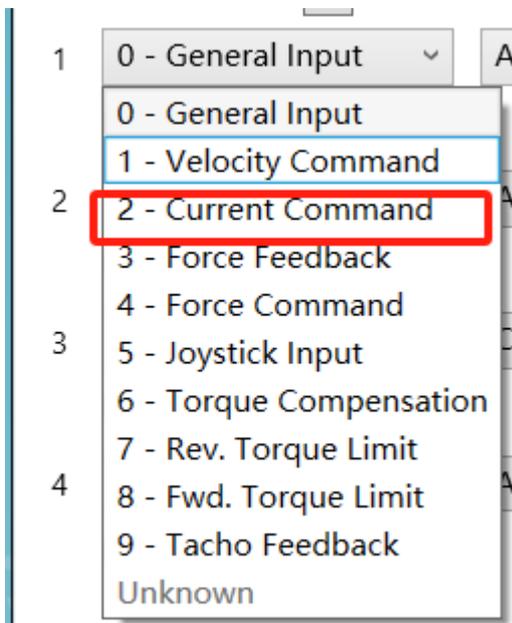
Auto retraction motion Retract to: 0 Speed: 20,000

示例中勾选了 Auto retraction motion，当从开环力控模式切换回位置模式时，会用 20000count/s 的速度去到绝对位置 0count 点。

(3) 切换到 Command Src.界面，在这里选择开环力控指令的来源，当选择 0-Analog input(User defined)时



指令来自于设置为 Current command 模式的模拟输入：



当使用 0-Analog input(User defined)模式时，Command Src.界面下方用于设置在开环力控模式下的持续时间：

Time to stay in Current Control Operation Mode:
 Unlimited time 0 msec

In Current Control Operation Mode, the time to stay within this mode is counted only once and when the motor is enabled.

设置为-1 则为无限时间，否则时间结束会自动切换为位置模式。

当选择 1-Scheduled Current Command values 模式，会根据表格从上往下逐段执行，每一段由 3 个参数决定：斜率，持续时间和目标值，总共可以添加 20 段力指令，从上往下执行直到碰到 HoldTime 为 0 的力指令。（Holdtime 设置为-1，则会在该段永久执行）

Current command source: 1 - Scheduled Current Command values

The Current command is a user defined series of values as defined by the CurrCmdSlope[], CurrCmdHTime[] and CurrCmdVal[] arrays.

? Used seg.: 1 - 3 (~1570 msec)

	Slope [mA/sec]	Hold Time [msec]	Value
[1]	1,000	500	150
[2]	1,000	500	170
[3]	1,000	500	120
[4]	100	0	0
[5]	100	0	0
[6]	100	0	0
[7]	100	0	0
[8]	100	0	0
[9]	100	0	0
[10]	100	0	0

示例中设置了三段开环力控指令，先后分别是 150mA 保持 500 毫秒，170mA 保持 500 毫秒，120mA 保持 500 毫秒，指令结束后会自动切换为位置模式。需要注意的是，开环力控的指令值如果小于维持在接触位置所需要的电流值，会出现切换开环力控后电机离开被压物体的情况。

(4) 切换到 Slow Approach 界面，在位置模式切换力控模式时，为了减少过冲，通常在接近被压物体过程中采用两段速度不同的运动，分别是长距离的高速运动和短距离的慢速接近，Slow Approach 界面就是用来设置慢速接近的条件以及切位慢速后的速度值。

Slow approach state: Disabled

When armed and when moving in the selected direction and when passing the defined position, the motion speed will automatically change to the new speed value. Upon speed automatic change, this functionality will be disabled and must be re-armed again for the next change.

Slow approach:

Change speed at: user-units

Slow approach direction:

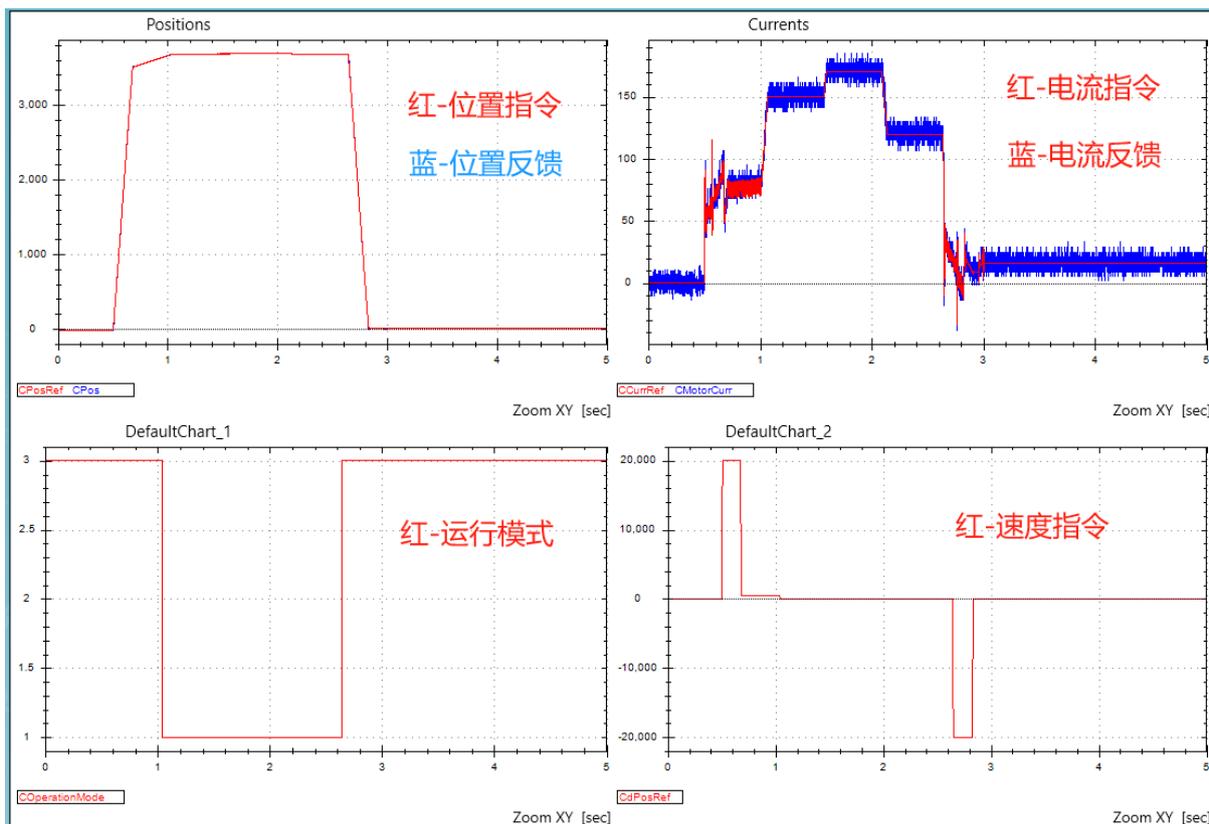
New speed: user-units/sec

示例中由于 3600count 为接触位置，所以设置在 3400count 的位置切换为慢速，切换后的速度设置为 500count/s，点击 Arm 按钮启用 Slow Approach 功能，那么在下一次位置运动中，小于 3400count 的位置所使用的速度值为 PTP 界面里设置的速度，一旦超过 3400count，则切换为设置的 500count/s 的速度。需要注意的是 Slow Approach 功能启用后只会生效一次，如需再次使用则需要重新启用该功能。

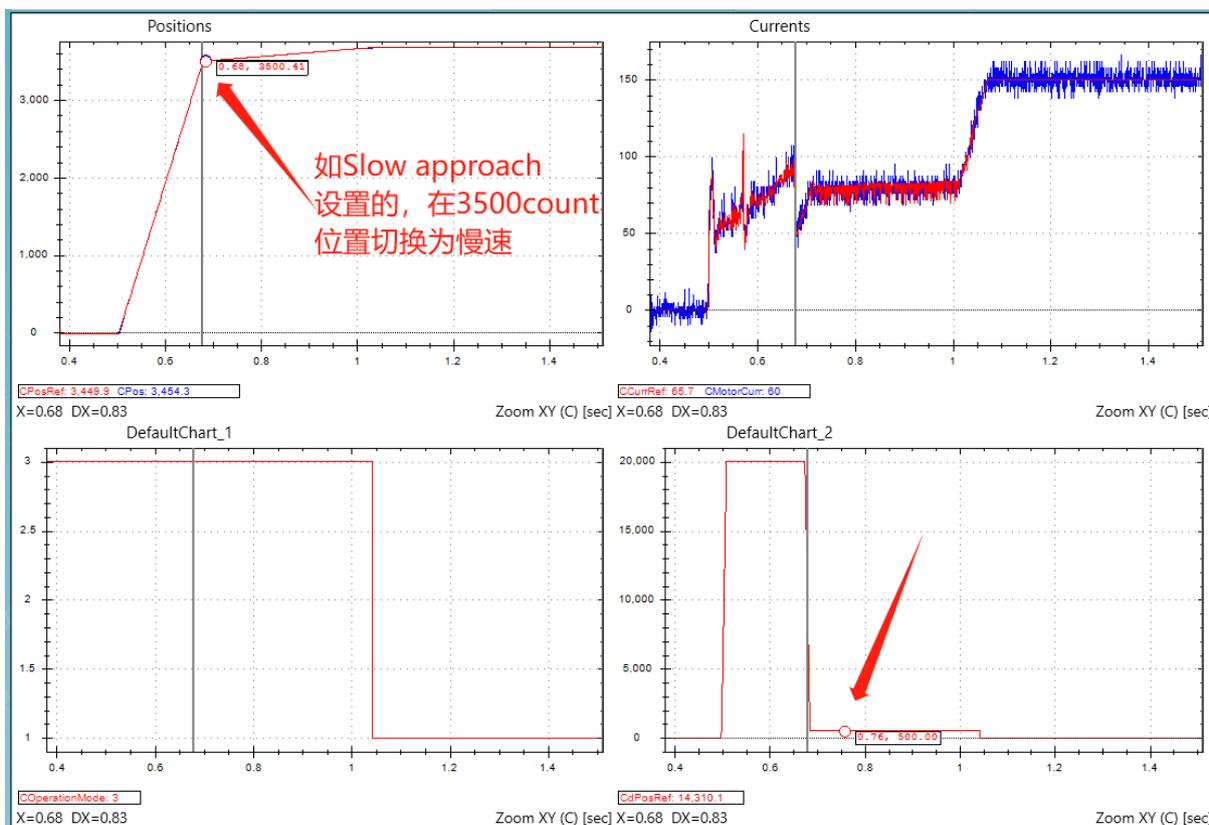
(5) 设置完上述的步骤，就可以切换到 Point to Point 界面来做一次完整的开环力控测试，由于示例中与被压物体接触的绝对位置为 3600count，所以在 Point to Point 界面里设置绝对目标位置点为大于接触位置的 3800count，随后点击 Go 2 使电机朝 3800count 位置点运动，设置大于接触位置的目标值可以保证电机一定会接触到被压物体，也同时保证了会满足所设置的切换开环力控条件：

设置抓图触发条件为电机开始运动：

抓取的四张图分别是位置，电流，运行模式和速度：

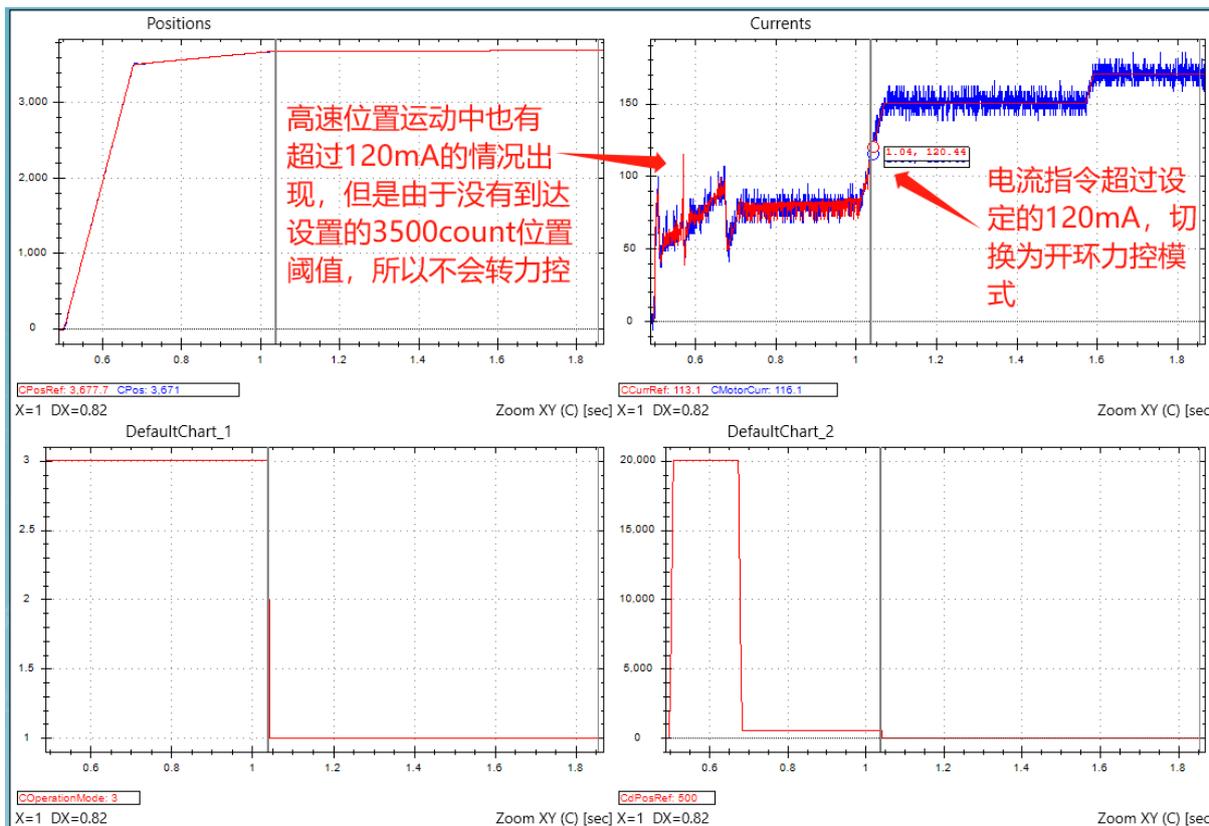


下面分步解释整个运动的过程，第一部分是位置模式运动到接触受压物体：



这个过程中 OperationMode 都等于 3，也就是位置模式，同时也能看到如之前在 Slow Approach 所设置的，在 3500count 以下的位置使用了高速移动，而在 3500count 以上的位置切换到了 500count/s 的慢速。

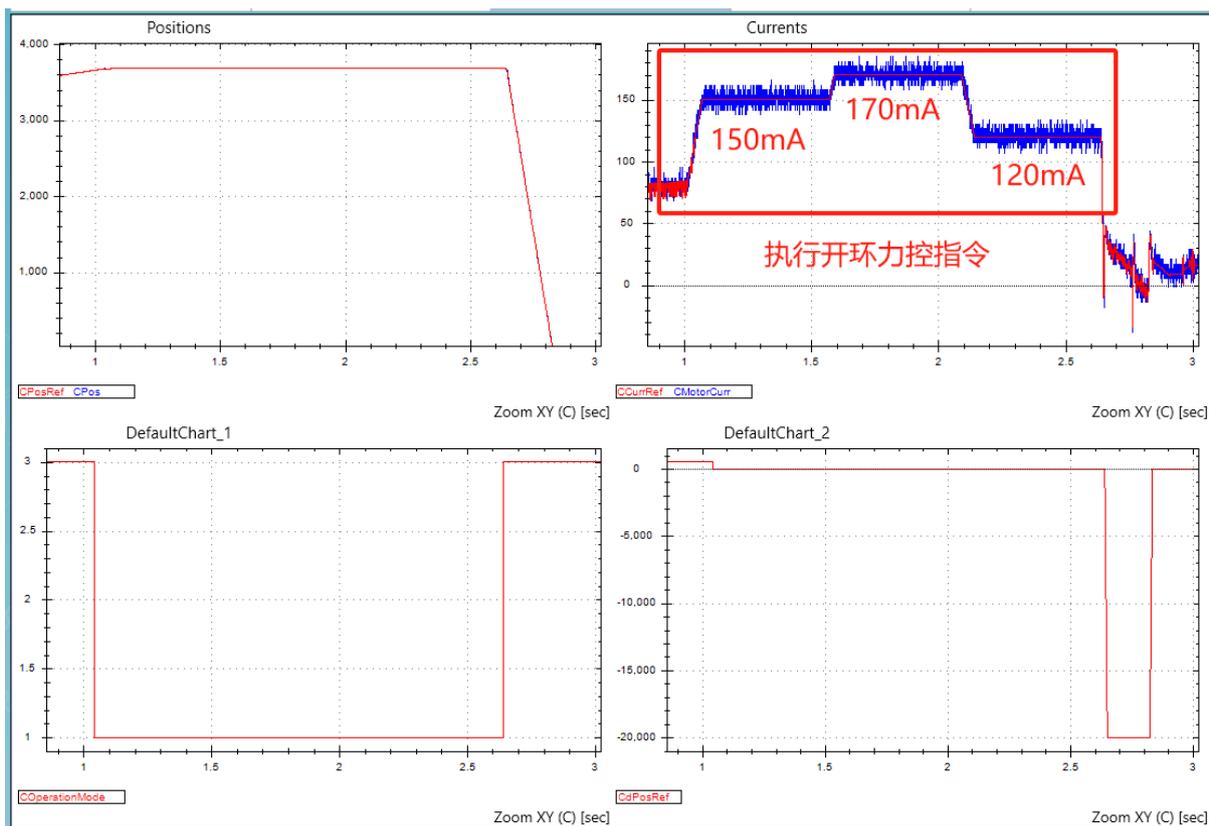
第二部分是通過設置的切換開環力控條件轉到開環力控模式：



圖中可以看到在慢速運動的末端，由於接觸到被壓物體導致電流增加達到設置的轉換閾值 120mA，OperationMode 從 3 變為了 1，也就是切換到了開環力控模式，值得注意的是，在整個位置運動接近過程中不止一次出現過電流指令超過 120mA 的情況，但只有最後一次做到了模式切換，這是在示例中開啟了 Global Position threshold 條件，只有當位置大於 3500count，同時電流指令超過 120mA 的情況下才會切換開環力控模式，有了這個條件，可以避免高速位置運動下的誤切換：

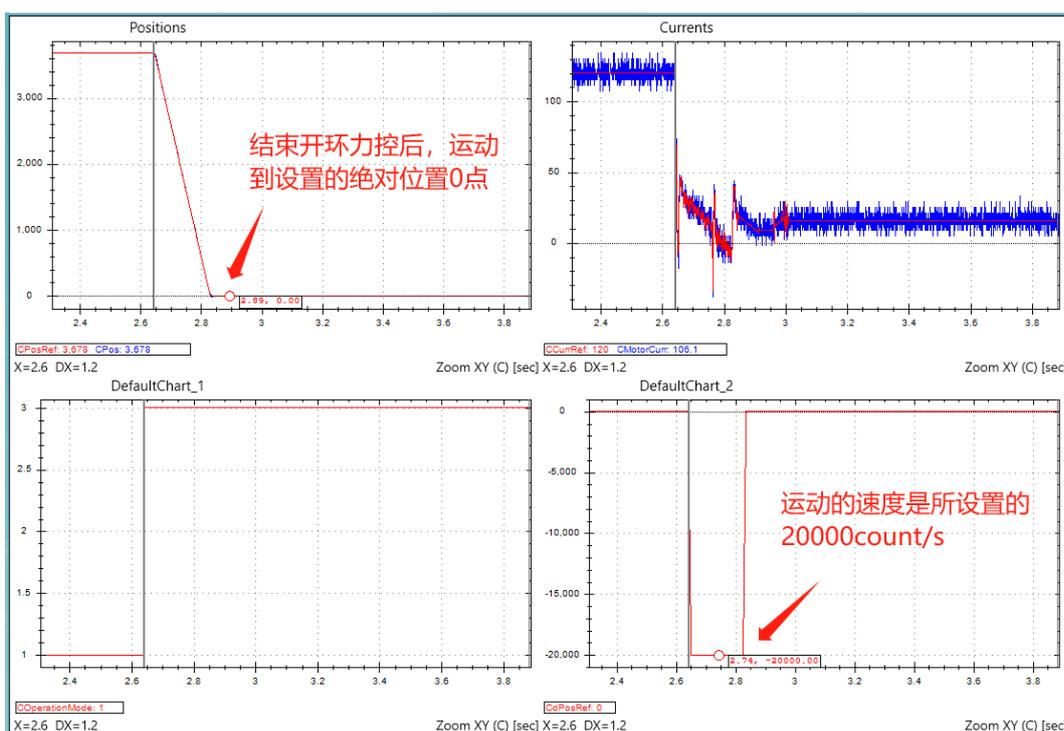
Global Position threshold: user-units Dir.:

第三部分是開環力控的指令執行，示例中採用了 1-Scheduled Current Command values 的命令模式，總共三段指令，分別是 150mA，170mA 和 120mA，從圖中可以看到切換到開環力控模式後三個指令依次執行：



第四部分为结束开环力控指令后，示例中为 120mA 的开环力指令结束后，OperationMode 变为 3，也就是位置模式。根据示例中 Auto retraction motion 所设置的值，当从开环力控模式切换回位置模式，会以 20000count/s 的速度移动到位置 0 点：

Auto retraction motion Retract to: Speed:



回到 0 点后，一个典型的开环力控运动就执行完成了。

一个值得注意的点是，执行完开环力控运动后，判断切换开环力控的条件会自动变为 **Bypass** 状态，包括 **Auto retraction motion** 和 **Slow approach** 都会在执行过后变为不启用状态，如果界面上显示没有还原为非启用状态，可能是由于界面没有刷新，点击左下角的 **Refresh all** 会显示控制器中当前的状态：

Pos. Mode -> Current Mode Last switch pos.: 3,714 user-units Go To Current Mode

Global Position threshold: 3,500 user-units Dir.: 0 - Bypass condition ▾

AND, the first to happen from one of the following thresholds:

Position Error threshold to switch: 0 user-units ?

Current threshold to switch: 0 mA Dir.: 0 - On CurrRef > Thr ▾

Force Feedback threshold to switch: 0

Current Mode -> Pos. Mode Last switch pos.: 3,681 user-units Go To Position Mod

Auto switch on position threshold: 2 - On Position > Threshold ▾

Position threshold to switch: 4,000 user-units

Auto retraction motion

Refresh All Apply All

3 PCSuite IDE+编程环境中执行力控操作

本节分别展示的闭环力控和开环力控的典型 IDE 程序，也可以理解为 2.2 章节在 IDE 里是如何执行的。

3.1 闭环力控 IDE 程序

```
30
31 CGoToPosMode //切换到位置模式，防止悬空状态下力控模式使能造成撞击
32 while (COperationMode==4) //确保切换到位置模式
33   CGoToPosMode
34   CWaitTime, 500
35 end
36
37
38 CMotionMode = 1 // 切换到PTP运动模式
39 CRelTrgt = 0
40 CAbsTrgt = 3800//设置一个一定会碰到受压物体的绝对目标位置
41 CSpeed= 20000//设置高速接近时的速度
42 CAccel = 2000000//设置高速接近时的加速度
43 CDecel = 2000000//设置高速接近时的减速度
44 CJerk = 0
45
46 CMotorOn =1//电机上使能
47
48 CSpeedChgNew=500 //设置切换为慢速后的速度
49 CSpeedChgPos=3400 //设置切换到慢速的位置
50 CSpeedChgDir=0
51 CSpeedChgOn=1 //打开切换慢速功能的开关
52 CBegin //开始PTP运动
53
54
55 CCurrPosTh=3500 //设置转换力控的位置条件阈值
56 CCurrPosThDir=1
57 CForceAIInTh = 5 //设置转换力控的力反馈阈值
58
59 CForceCmdSrc=1 //设置力控指令模式为“Scheduled Force Command Values”模式
60
61 CForceGain=500000 //设置闭环力控的PID参数，下同
62 CForceKi=5
63 CForceKd=0
64 CForceFFW=0
65 CForceVelFFW=0
66
67
68 CForceCmdVal[1]=150 //设置第一段力控指令为150force-unit
69 CForceCmdHTime[1]= 500 //设置第一段力指令持续时间为500毫秒
70 CForceCmdSlope[1] = 1000 //设置第一段力指令的斜率为1000force-unit/s
71 CForceCmdVal[2]=170 //设置第二段力指令为170force-unit
72 CForceCmdHTime[2]= 500 //设置第二段力指令持续时间为500毫秒
73 CForceCmdSlope[2] = 1000 //设置第二段力指令的斜率为1000force-unit/s
74 CForceCmdVal[3]=120 //设置第三段力控指令为120force-unit
75 CForceCmdHTime[3]= 500 //设置第三段力指令持续时间为500毫秒
76 CForceCmdSlope[3] = 1000 //设置第三段力指令的斜率为1000force-unit/s
77 CForceCmdHTime[4]=0 //设置第四段力指令持续时间为0，即只执行三段力控指令
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
```

1.确保在使能前切换为位置模式

2.设置位置模式下高速与慢速接近的相关参数

3.设置切换闭环力控的条件，以及力闭环的PID参数

4.设置闭环力控的指令参数

5.设置力控指令结束后的回退运动

3.2 开环力控 IDE 程序

```
31 CGoToPosMode //切换到位置模式，防止悬空状态下力控模式使能造成撞击
32 while (COperationMode==1) //确保切换到位置模式
33   CGoToPosMode
34   CWaitTime, 500
35 end
36
37
38 CMotionMode = 1 // 切换到PTP运动模式
39 CRelTrgt = 0
40 CAbsTrgt = 3800//设置一个一定会碰到受压物体的绝对目标位置
41 CSpeed= 20000//设置高速接近时的速度
42 CAccel = 2000000//设置高速接近时的加速度
43 CDecel = 2000000//设置高速接近时的减速度
44 CJerk = 0
45
46 CMotorOn =1//电机上使能
47
48 CSpeedChgNew=500 //设置切换为慢速后的速度
49 CSpeedChgPos=3400 //设置切换到慢速的位置
50 CSpeedChgDir=0
51 CSpeedChgOn=1 //打开切换慢速功能的开关
52 CBegin //开始PTP运动
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
```

1.确保在使能前切换为位置模式

2.设置快速和慢速接近受压物体的运动参数

```

54 CCurrPosTh=3500 //设置转换力控的位置条件阈值
55 CCurrPosThDir=1
56 CCurrCurrTh = 120 //设置转换力控的电流指令阈值
57 CCurrCurrThDir=0
58
59 CCurrCmdSrc=1 //设置力控指令模式为“Scheduled Current Command Values”模式
60
61 CCurrGain=770 //设置开环力控的PID参数，下同
62 CCurrKi=358
63
64 CCurrCmdVal[1]=150 //设置第一段力控指令为150mA
65 CCurrCmdHTime[1]= 500 //设置第一段力控指令持续时间为500毫秒
66 CCurrCmdSlope[1] = 1000 //设置第一段力控指令的斜率为1000mA/s
67 CCurrCmdVal[2]=170 //设置第二段力控指令为170mA
68 CCurrCmdHTime[2]= 500 //设置第二段力控指令持续时间为500毫秒
69 CCurrCmdSlope[2] = 1000 //设置第二段力控指令的斜率为1000mA/s
70 CCurrCmdVal[3]=120 //设置第三段力控指令为120mA
71 CCurrCmdHTime[3]= 500 //设置第三段力控指令持续时间为500毫秒
72 CCurrCmdSlope[3] = 1000 //设置第三段力控指令的斜率为1000mA
73 CCurrCmdHTime[4]=0 //设置第四段力控指令持续时间为0，即只执行三段力控指令
74
75 CBeginOnToPos=1 //打开从力控模式切换回位置模式后的回退功能
76 CRetractTarget=0 //设置回退的目标位置点
77 CRetractSpeed=20000 //设置回退的速度
78

```

3.设置切换开环力控条件以及开环力控的PI参数设置

4.设置开环力控指令参数

5.设置从开环力控回到位置模式后的回退指令

4 常见问题解答 (FAQ)

(待补充)

