

套接式伸展臂控制程序说明

编制单位：北京航空航天大学机器人研究所

编写：_____

校对：_____

审核：_____

批准：_____

北京航空航天大学机器人研究所

2023 年 6 月

目录

1. 简介.....	3
2. 软件启动及基本界面.....	4
3. 操作流程及面板功能介绍.....	5
3.1. 电机的使用.....	5
3.1.1. 设备启动操作.....	5
3.1.2. 电机使能/失能操作.....	7
3.1.3 自动/手动控制切换.....	7
3.1.3 自动控制模式.....	8
3.1.4. 手动控制模式.....	10
3.2. 传感器的使用.....	16
3.2.1. 张力传感器.....	16
3.2.2. 微动开关.....	17
3.3 数据库的使用.....	18
3.4 其它注意事项.....	19
4. 电机驱动校准规范.....	20
4.1. 电机驱动硬件校准.....	20
4.2 电机同步控制校准.....	22

1. 简介

套接式伸展臂控制器通过上位机（控制柜）内的软件操作界面对整个套筒展开过程进行实时监测与控制，并对数据进行保存记录。其主要功能包括：

- 1 对套接式伸展臂进行实时控制，可对展开速度、驱动端拉力进行设定与实时调整；
- 2 收集六组驱动器获取的动力系统反馈信息，具体为电机输出力矩，电机输入电流以及伸展臂展开速度三项，并实时进行可视化的曲线绘制；
- 3 对张力传感器反馈数据进行收集，并实时绘制曲线显示绳端张力状态；
- 4 预设了自动规划模式，可以根据伸展臂的运行状态对速度和力矩进行调节，实现自动规划控制。

现对软件界面功能以及使用过程中的一些细节进行说明。

2. 软件启动及基本界面

连接电源开启工控机后可进入桌面，点击桌面上的控制软件文件夹，打开上位机软件对套筒展开装置进行控制，如下图所示：



图 1 打开软件流程

打开控制软件后，可看到控制软件界面如图 2 所示，划分为电机控制区、实时状态显示区及总控区三大板块。

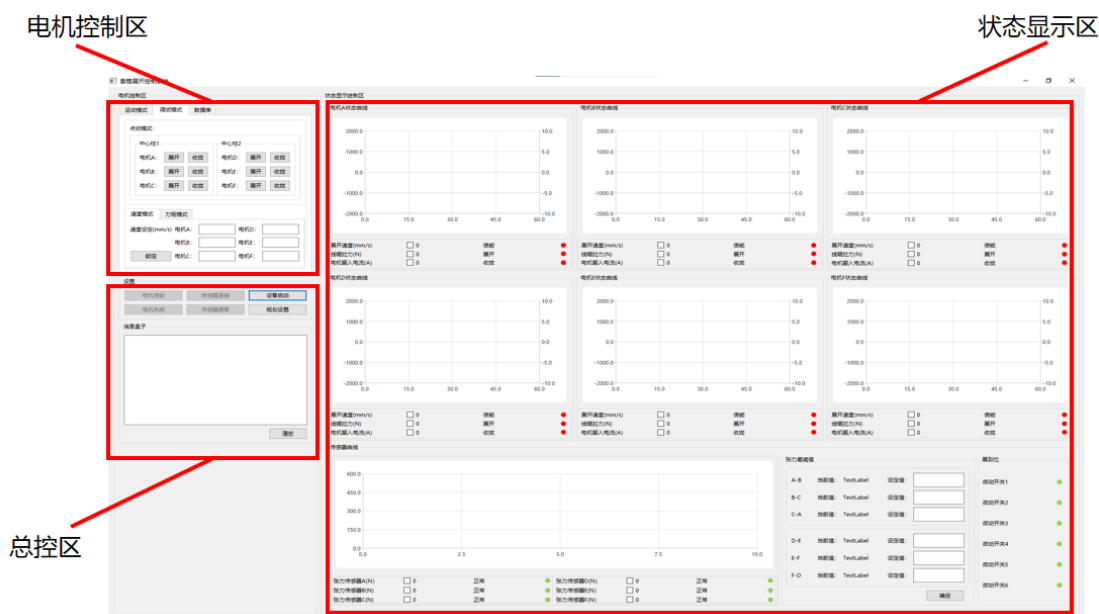


图 2 软件界面

此外如图 3 所示，程序内还设有子窗口，用于对自动控制模式。

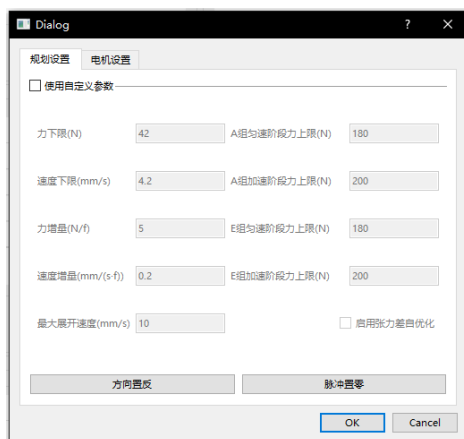


图 3 自动控制设置界面

3. 操作流程及面板功能介绍

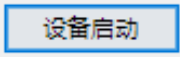
3.1. 电机的使用

3.1.1. 设备启动操作

上位机使用 USB-CAN 设备对驱动及传感器进行通讯，需要首先启动 USB-CAN 模块组件，设备启动操作按钮在设置按钮组中，如图 4 所示：



图 4 设置按钮组

在确保 USB-CAN 模块不被其它软件占用，且电机连接正常的情况下，可以单击按钮（）对设备进行启动连接，设备启动的同时会自动触发一次电机使能。**点击后，可能存在以下三种不同的情况：**

1) 设备启动失败

该情况下会出现弹窗，同时按钮变为红色（）警告启动失败。

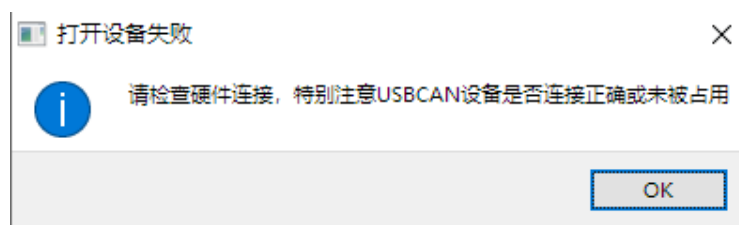


图 5 启动失败提示

故障原因：

USBCAN 设备故障、未连接或被其它软件占用，需首先检查连接情况，如 USBCAN 连接正常，则检查是否存在其它软件占用。若以上原因皆排除，则推测原因为设备故障，可重启工控机后再次尝试。

2) 设备启动成功，但电机使能失败


该情况会出现卡顿现象，卡顿结束后，弹出窗口提示指令发送失败，但按钮呈现绿色（），且提示文字变为关闭设备，原禁用按钮变为可用状态。该现象说明 USBCAN 设备已启动，但与驱动板通讯失败，具体如图 5 所示。



图 6 启动失败过程

故障原因:

由于使能电机时共发送电机使能、模式选择与使能模式三种指令。初始时电机未接通电源，指令得不到反馈，由于程序内设置了约 100ms 的阻塞等待，因此产生卡顿现象。此时 USBCAN 正常工作，但驱动端可能未连接电源或供电导线接触不良。故应在确保电机电源供给无误后，点击关闭设备按钮（关闭设备），再重新启动设备。也可以关闭软件后重新打开并再次尝试。

3) 设备启动成功，电机使能成功

该情况不会出现卡顿，且不会有指令发送失败的窗口弹出，其余状态与第二种情况一致。电机状态显示区域内的拉力示数出现轻微跳动，表明电机启动成果。此时电机已处于使能状态，默认进入**速度模式**，可观察到电机使能灯变为绿色，可进行下一步操作，具体表现如下图 6 所示。



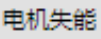
图 7 启动成功状态变化过程

3.1.2.电机使能/失能操作

在对电机进行控制前，请确保电机处于**使能状态**，可通过前述使能灯状态以及按钮组内的电机使能、电机失能按钮进行判断：



图 8 电机使能/失能操作流程

电机使能时使能按钮处于锁定状态，失能按钮处于可点击状态，失能时相反。电机使能时，上位机会循环发送同步信号以请求驱动反馈电机状态信息，以此进行数值读取及曲线绘制，零位时由于存在扰动会出现小范围的数值波动。点击失能后不再接受电机反馈数据，曲线与数值将不再更新。如需对电机进行急停操作，可按下**电机失能**按钮（），对电机进行失能操作。

3.1.3 自动/手动控制切换

控制界面启动后将默认进入手动控制模式，手动/自动切换开关如图 9 所示。通过勾选/取消勾选**规划设置**中的**使用自定义参数**，即可完成模式切换，切换成功后在消息盒子中会出现如下图中的状态提示。

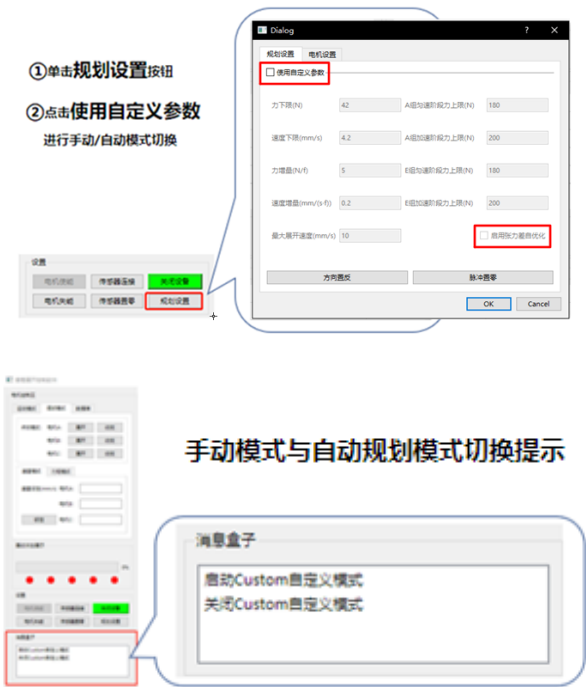


图 9 手动/自动切换操作流程与状态提示

3.1.3 自动控制模式

自动状态下，程序将自动切换为力矩模式并在展开过程中自动调整速度和力的输入值，在出现绳端张力差较大及各级展开到位时进行自动调节。

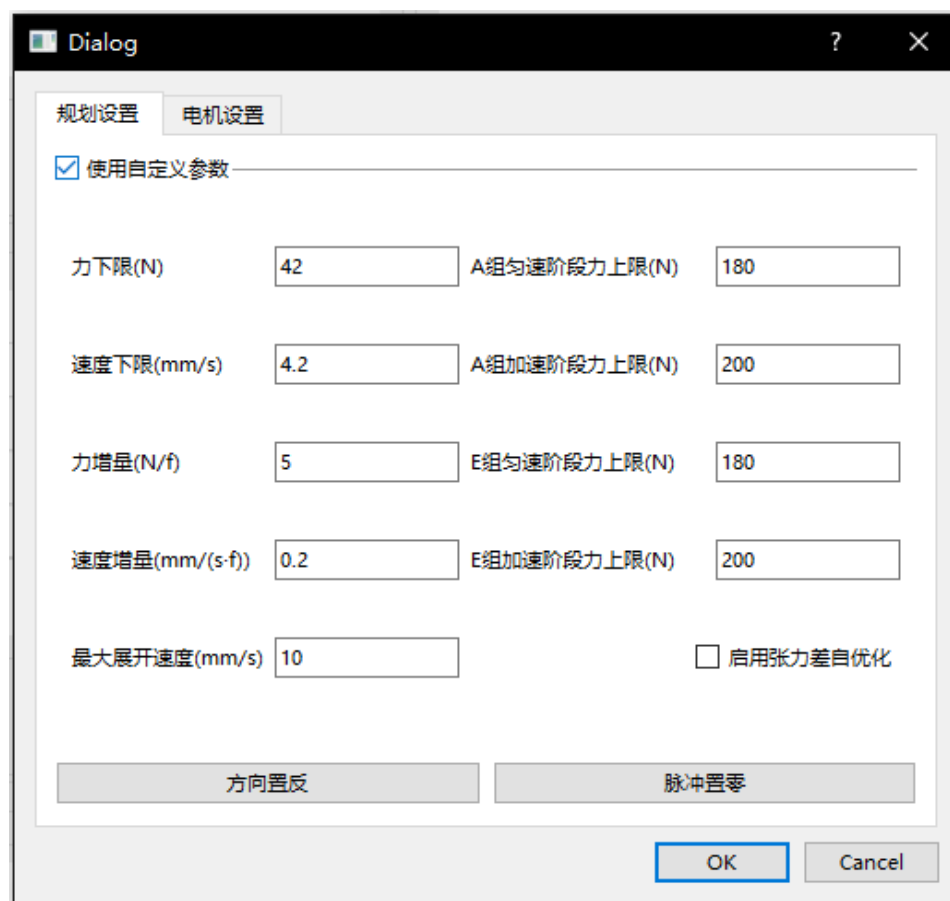


图 10 自动展开自定义参数

如上图 10 所示，进入自动模式时需要先对部分自定义参数进行设定。为说明上述参数，需按整体展开过程进行说明。

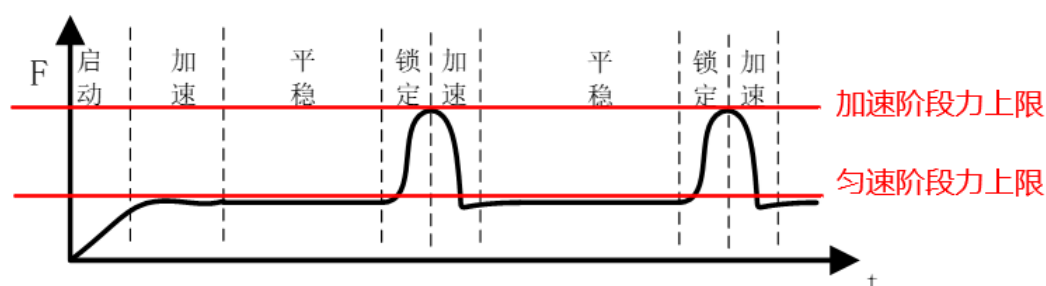


图 11 展开过程中的绳张力变化曲线示意图

在套筒展开过程中，存在两个主要的运行阶段：如上图 11 所示，当遭遇套筒卡顿阶段（如启动或套筒展开至各级到位）时，速度降低，力矩将无法满足展开

需要。此阶段可命名为加速阶段，由于**此阶段驱动器内部运动模式算法将优先保证输出力，而展开速度无法到达设定阈值**。此时程序将自动按**力增量**逐渐增加电机输出力矩（最大可达**加速阶段力上限**）直至套筒继续展开，为避免卡顿过后阻力突然减小导致突然提速对系统产生冲击，程序会在增力的同时按**速度增量**将速度值调小（最小可达**速度下限**）。

当套筒越过障碍后，阻力减小，套筒在短时间内完成加速。此时将进入匀速阶段，由于**此阶段驱动器内部运动模式算法将优先保证展开速度，而输出力无法到达设定值**。此时程序将按**速度增量**自动增加展开速度直至**最大展开速度**。为避免再次进入卡顿状态时绳张力突然增大对系统产生冲击，程序将自动减小电机力矩至**匀速阶段力上限**，使套筒进入高速稳定运行状态。

展开过程中程序会按实际展开速度自动判断进入上述两种阶段的条件并运行相应的控制逻辑。由于匀速阶段时三根绳存在张力差较大的情况，因此还增加了张力差自动优化控制。如需在展开过程中调节三根钢丝绳张力，需勾选（☐ **启用张力差自优化**），并在展开前设置好期望张力差，手动输入后点击锁定。

张力差阈值		
A-B	当前值:	设定值: 20
B-C	当前值:	设定值: 20
C-A	当前值:	设定值: 20
D-E	当前值:	设定值: 20
E-F	当前值:	设定值: 20
F-D	当前值:	设定值: 20
		锁定

图 12 张力差阈值设置

在运行该控制逻辑时，程序将自动根据张力传感器实时数据，计算两两钢丝绳间的张力差，并与设定值做比较，并对各绳展开速度进行微调，以维持三根绳上的拉力处于接近的范围内。此控制逻辑将在套筒展开过程中循环运行，实现自动展开。

备注：展开过程中，力矩和速度初始设定值取自电机控制区中力矩模式下的滑

条值，之后可根据自定义参数实时自动调整。

3.1.4.手动控制模式

在使用软件时务必确保对操作流程已熟悉可进行操作。

手动与自动控制共用电机控制区，功能区域划分如图 13 所示。从图中可以看出，控制区内有两组**切页操作按钮**，其中一组用于选定**操作模式**，而另一组包含于**第一组切页的界面中**，用于选定**运动模式**。

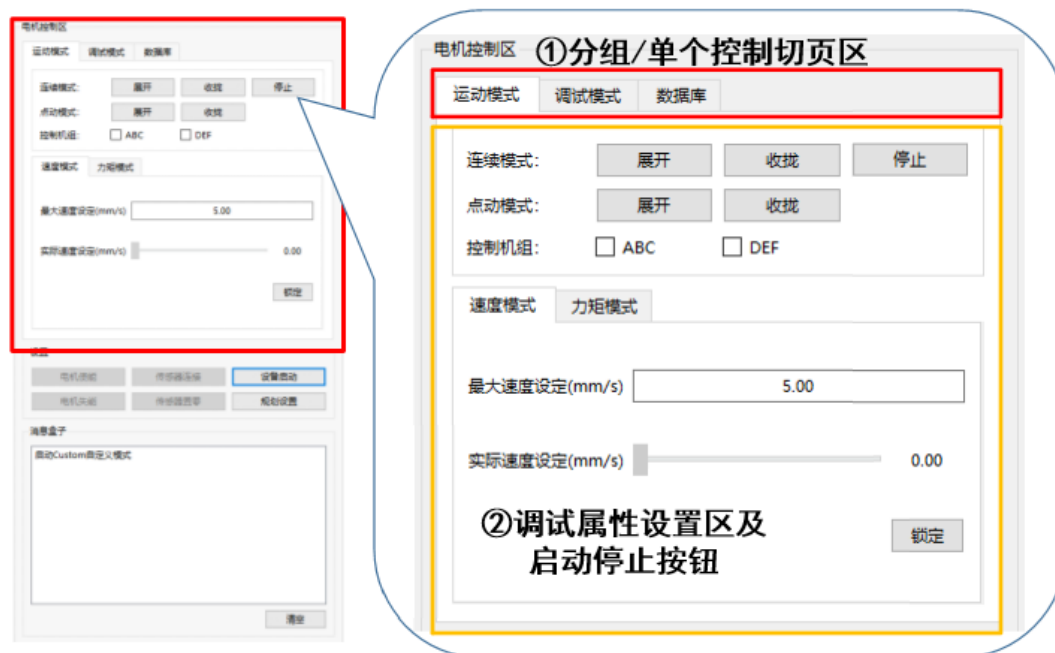


图 13 切页操作

操作模式选择：

在进行手动操作时，首先需要选定操作模式。通过点击正上方切页按钮，该激活不同的操作模式。如图 13 所示，操作模式分两种：**单电机运动的调试模式**和**三电机同步运动的运动模式**。

调试模式下，可对单个电机进行单独测试；而运动模式则可控制三个电机同步运动。

切换操作模式时，如电机处于使能状态，软件会自动根据切页后页面内运动模式进行运动模式切换。

运动模式选择：

分为速度控制为主的**速度模式**，和以力矩控制为主的**力矩模式**两种。

以图 14 为例，图中选定了速度模式，该切页被激活，软件控制电机采用速度模式。



图 14 运动模式切换

速度调试模式操作示例：

默认模式选择已为调试模式下的速度模式，如图 15 所示。



图 15 模式选择示意

该模式激活后，用户需要在速度设定栏中输入期望速度（此处已进行换算，输入值为**驱动装置线辊端的实际展开速度**），设定完毕后**点击锁定按钮**（**锁定**），对设定参数进行确认。



图 16 参数设置流程

可观察到锁定后按钮由（**锁定**）变为（**解锁**），且参数变为只读

状态(), 无法修改, 说明参数输入正确且已保存。



图 17 调试模式电机运行按钮组

在调试模式下点击图 15 电机控制区内按钮, 通过**持续按压**按钮（展开按钮 , 收拢按钮 ）控制电机运行。当鼠标按键**松开**时, 自动发送停止指令, 电机停止运动。

力矩调试模式操作示例:

力矩模式的操作流程与速度模式大致相同。

首先点击调试模式下的力矩模式切页按钮, 切换成功可观察到**消息盒子**的信息提示如下图所示。

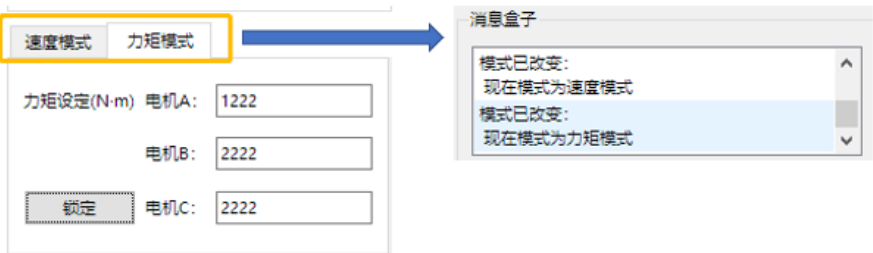


图 18 运动模式切换

随后锁定设置参数, 通过**持续按压**电机运行按钮（展开或收拢）进行控制。



图 19 调试模式下的力矩模式操作流程

调试注意事项:

发出运行指令（展开或收拢）后, **需注意观察电机的速度反馈**（可通过电机状态曲线或显示的数值进行观察）, 即便速度设定值较低也会有速度反馈。



图 20 电机状态观察

若电机模式正确，可观察到展开速度或电流数值增大，在速度曲线的复选框被激活的情况下，蓝色的速度曲线呈上升趋势。如无以上现象，说明电机未运动，应立即停止发送运动指令，并在运动/调试模式间进行一次切换操作，检查电机是否处于使能状态（查看 3.1.2.电机使能/失能）。检查并确认无误后再次按下运动按钮，确保电机处于正常运行状态。

运动模式操作示例：

设定参数操作与调试模式基本一致，具体步骤如下图 18 所示：

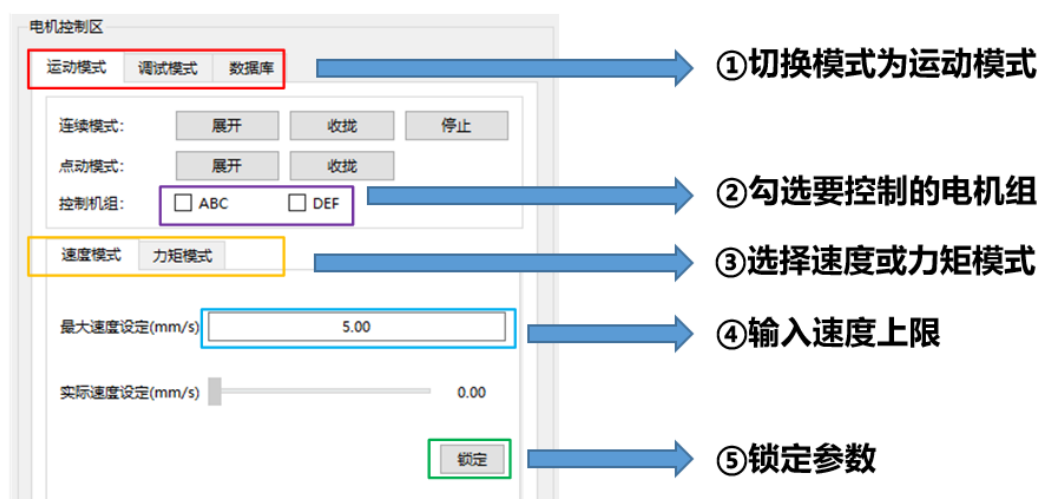
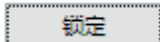


图 21 运动模式下的速度模式参数设定流程

点击锁定按钮（）后，速度设定窗口变为灰色，速度设定滑条变为激活状态，用户可在点击运行按钮（展开或收拢）前，通过移动滑条对输入的期望速度进行调整：

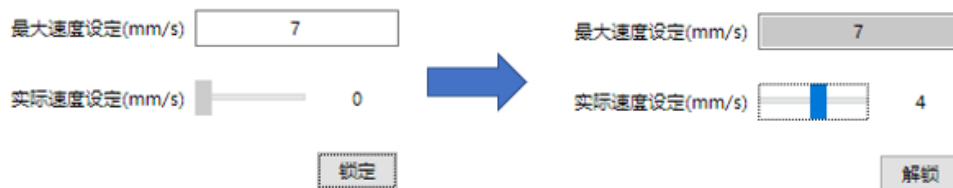


图 22 运行前输入值调整操作流程

确认输出值设定无误后方可 **点击** 上方运行按钮进行控制。



图 23 运动模式下的速度模式操作流程

注意：

实际操作中，可先设定一个较大的上限值，但调节至较小的期望输入值，以确保控制的灵活性。另需注意，锁定后输入驱动内的输入值自动调节为设定的最大值，因此在点击运行按钮前，请务必先确认输入值是自己想要的值。

点动模式与连续模式的区别：

点动模式：与调试模式相同，**持续按压**运行按钮（展开或收拢）持续发送运行指令，**松开**即默认发送停止指令。

连续模式：一次**点击**后即发送运行指令，电机持续运动，直到点击停止按钮（**停止**），或收拢按钮（**收拢**）进行反向运动后才对前指令进行打断。

在连续模式中，电机开始运行后仍可通过**速度设定滑条**对实际输出速度进行实时调整。



图 24 运行中输入值调整操作界面

力矩模式与速度模式的操作流程基本相同，除力矩设定外还增设了速度阈值设定功能，如下图所示：



图 25 运动模式下的力矩模式参数设定界面

设定值:

该处设定的输入拉力为经过电机输出端传动比及机械效率换算的**驱动装置线辊输出力**，当前实际电机输出拉力应根据电机状态曲线及反馈的数值掌握。

限制条件:

该模式下电机输入电流的限制条件并非只有**拉力—电机输出力矩**一项，在力未达设定上限而**速度已达设定阈值**时，电流的优先限定条件是**速度**，即该模式的输入电流受**速度**与**力矩**双重条件限制，故在速度设定合理且有速度的条件下无需担心出现电机输出力矩过大，电流过载烧毁电机的状况。

备注:

1. 实际运用过程中，输出端由于工艺装配等多种原因，导致各减速器上的机械传动阻力不可能完全相等。因此在设定力时，优先考虑设定**足够大**的线辊端**输出拉力**以克服摩擦力影响，避免**电机转速不同步**的现象产生。根据已做实验的反馈，此处建议在无重力卸载条件下至少应将拉力在**150N~200N**以上（如担心值过大，请先阅读上一段关于设定值的介绍）。
2. 为避免由于通讯故障导致的电机不同步，在设定初速度时可采用一个较小值进行实验，此处建议为**0.5mm/s~2.0mm/s**。
3. 速度模式下的参数（速度上限）与力矩模式下的参数（速度、力矩上限）有隔离保护，互相之间没有联系、互不影响，即只有当前所在页面内的参数设置会起作用，通过切页切换模式不需要担心参数受影响，且已锁定的参数不解锁就不会被改变，无需重新锁定。

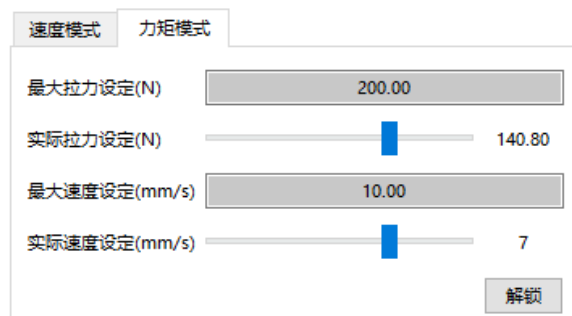


图 26 力矩模式的参数

防错设计:

- 1) 在未对输出值进行锁定确认前，无法驱动电机，若在未锁定情况下点击运行按钮（展开或收拢）会出现如下提示。

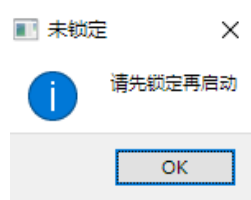


图 27 锁定提示

- 2) 输出值设定的大小无需担心，程序会对过大或过小的设定值进行自动调整，如下图所示。

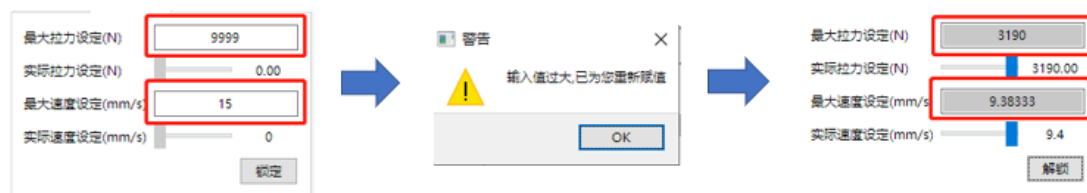


图 28 设定值防错提示

对于过大/过小值在锁定后程序会自动进行上/下限值调整，其**最大拉力**换算后不超过电机的额定力矩，因此无需担心电机因电流过大而烧毁。

3.2.传感器的使用

3.2.1.张力传感器

在启动设备后点击传感器连接按钮（**传感器连接**），此时若观察到按钮变为**断开连接**，且传感器状态曲线和显示数值开始跳变，即传感器连接已成功，开始接收数据。



图 29 传感器状态显示界面

备注：

1. 若长时间未开启传感器，再连接传感器时，由于 CAN 通道存在大量未接受数据，会导致数据时间戳错误，可对传感器进行一次**重启**，以保证数据的准确性。
具体操作为点击**传感器断开**，再点击**传感器连接**。
2. 由于本实验在初始阶段已经完成张力传感器的标定工作，故不再需要使用（**传感器归零**）功能，点击该按钮对实验过程无影响。

关于张力数据的说明：

读取的张力数据张力传感器所获得的张力，并非实际线辊**输出端**作用于绳末端的拉力。保证三组传感器上的力完全一致的实际意义较小，因为在实际展开过程中，不可避免的会出现**重力卸载调平不均**及套筒加工精度不够而导致卡顿等现象，因此作用在每组驱动**绳上的张力不可能一致**，同上述电机**输出力矩**一样，是合理现象。故应优先保证的是**电机转速的同步**，而非力的同步。

3.2.2.微动开关

微动开关作为展开到位检测装置，其启动方式与张力传感器相同，即点击传感器连接按钮（**传感器连接**）时，上位机可接收到微动开关信号。开关共编为 1-6 号，分为 3 个一组，共 2 组分别安置于两套筒根部，**其中 1、2、3 号为一组，4、5、6 号为一组，不得装错，否则无法实现到位功能**。到位信号在软件界面中如图 30 所示。



图 30 微动开关触发效果图

展开前，微动开关处于未触发状态，界面指示灯显示为红色；展开到位时，微动开关触发，指示灯将变为绿色。可通过指示灯的颜色变化，判断当前微动开关的状态，进而可获知是否已展开到位。

除用于到位状态展示外，当微动开关信号触发时，该到位信号还将作为状态转移条件，用于自动模式下停止状态的触发。停止状态触发逻辑为：每组 3 个微动开关中任意两个触发信号，即进入停止状态。

3.3 数据库的使用

在使用上述第一组切页按钮跳转至数据界面后，可根据需要选择记录数据库，程序自动以软件启动时间作为记录起始点，并将数据以“年月日-时分秒.db”的文件格式进行命名并保存。

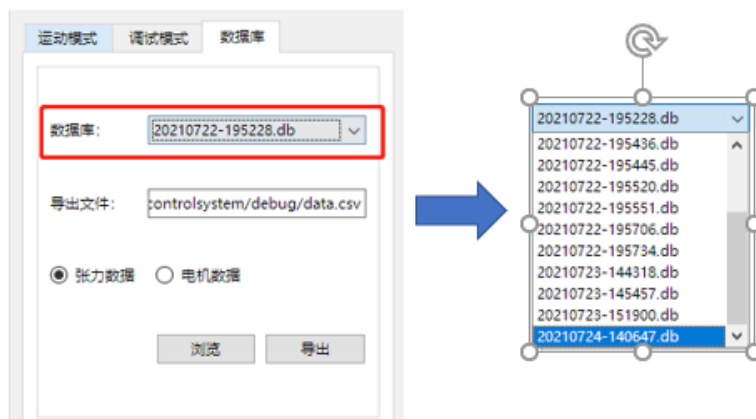


图 31 数据库界面

可点击下拉菜单选择自己所需的数据，并对导出数据类型进行选择。



图 32 数据选择与保存设置

设定 csv 文件名字后即可保存，在设定目录下可找到 csv 文件。点击导出后，在指定路径下，可使用 excel 或 WPS 打开 data.csv 对数据进行处理和分析。

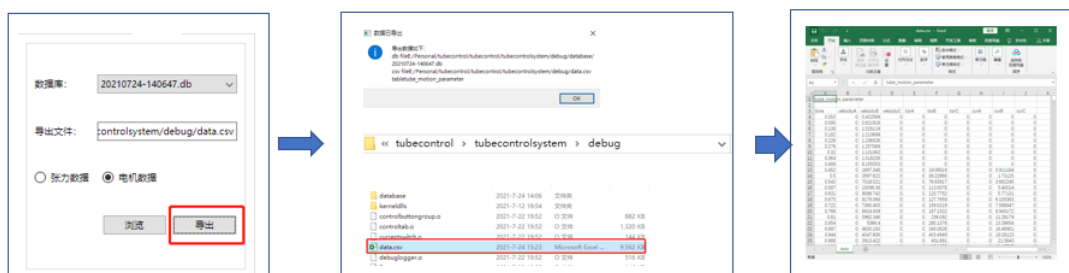


图 33 数据文件查询及浏览

3.4 其它注意事项

(1) **启动设备时**，默认处于**速度模式**，否则，需要先切换到速度模式，再切换回力矩模式，才能使用力矩控制。

(2) 使用力矩模式后，再切回速度模式时，需要首先触发一次**收拢**，才能正常调控速度（这是驱动器逻辑 bug：力矩模式下，第一次设置的速度上限，会被记录，切换到速度模式之后，只有使用收拢指令后，才会重置（底层命令））。

速度模式达不到设定速度时，尝试点收拢，重置驱动器。

(3) **画面卡住时**，点左侧消息盒子下方的**清零按钮**。此现象是 Qt 软件本身的缺陷，不影响程序的运行，只需让界面刷新一次即可恢复正常。

(4) 使用**自动展开模式**前，需将电机控制区调至**力矩模式**，且勾选控制电机组并点击**锁定**。

(5) 建议：使用运动模式下的力矩模式进行展开；使用运动模式下的速度模式进行收拢；使用调试模式下的速度模式进行微调操作。

4. 电机驱动校准规范

4.1. 电机驱动硬件校准

在使用电机前可对电机驱动进行校准，并对其电流环、速度环以及位置环进行调节验证，以确保电机及驱动器连接完整，可以实施有效稳定的控制。

在使用上位机前，需首先打开 EPOS 软件。随后在 USB 连接中建立与 EPOS 驱动板的连接。

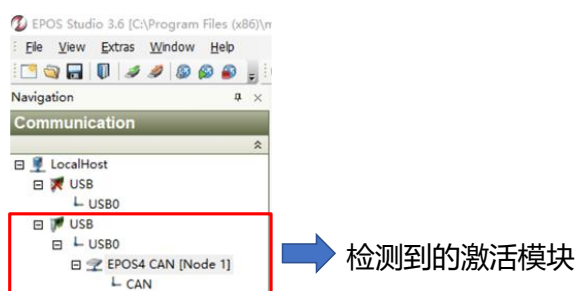


图 34 EPOS 控制接口树状图

在“Wizzad”模块中选择 Regulation Tunning”功能对电机的电流环，速度环与位置环进行分别校准。

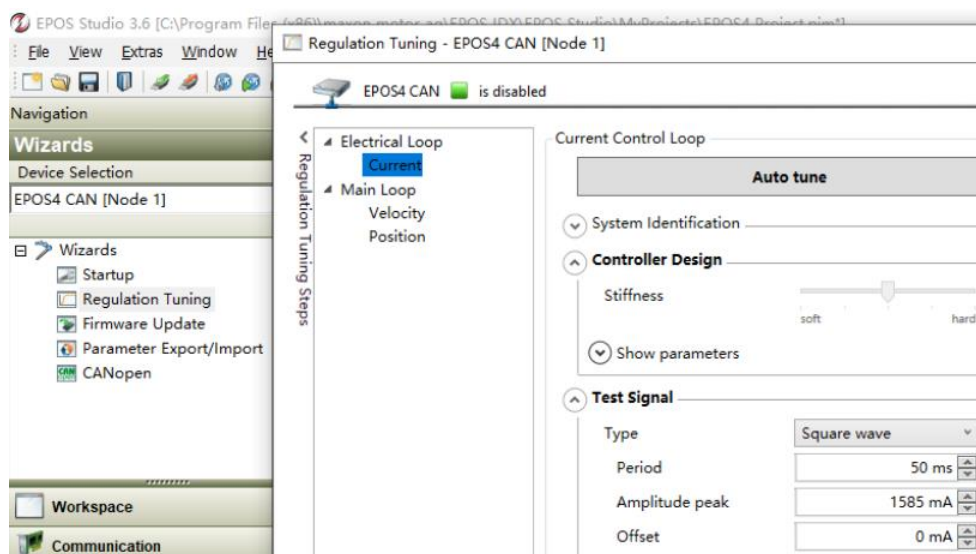


图 35 EPOS Regulation Tunning

在“Regulation Tunning”中各模块功能如下图所示：

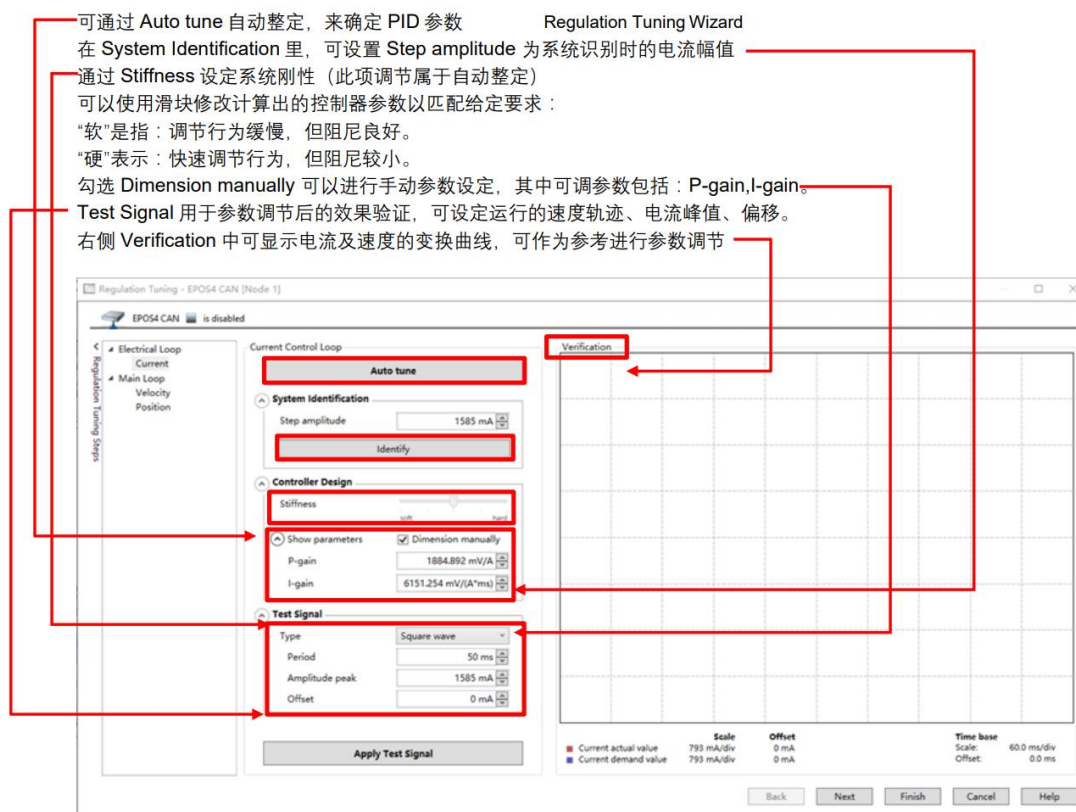


图 36 EPOS 调节模块按键说明

由于在该控制器中 PID 参数已经过校准，通常情况无需改动，故只叙述校准检验硬件电气连接环节的问题，而不过多赘述 PID 的调节。单机“Apply Test Signal”按钮提供校准信号：

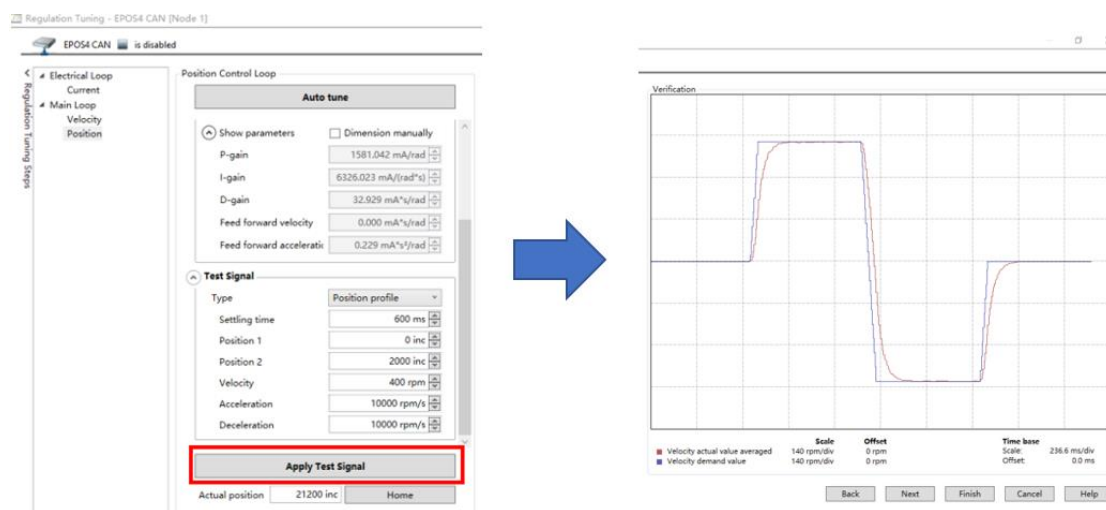


图 37 校准电机步骤

可观察到在硬件连接正常以及软件参数良好的情况下，响应输出信号较快的跟随输入信号。说明整个驱动模块电流环完好，无异常。

照上述步骤依次对速度环以及位置环进行校准即可。

若三个驱动的各自三环响应良好，无明显振荡，则可结束校准。使用上位机进行下一步同步校准。

4.2 电机同步控制校准

在电机硬件驱动校准通过后，可进行电机同步通讯测试如下：

在第一次运行前，点击运行按钮后观察三个电机速度曲线或反馈值，如三个电机曲线同时呈上升趋势，或反馈值同时增大即确保通信无误，可进行自由调节。因此调试时可选用较小速度值，推荐使用 $0.5\text{mm/s}\sim 2.0\text{mm/s}$ 。



若发现有一个或多个电机未同步，请立即点击停止按钮并对速度/力矩模式进行一次切换操作，随后再次进行测试。如依旧出现故障可对电机的使能/失能态进行一次切换操作，再对速度/力矩模式进行一次切换操作后再进行测试。

每次开启程序，启动展开实验前，都应进行上述校准测试，校准测试通过后，只要不关闭程序即无需二次测试，可多次重复进行使用。