

# 多轴数控加工机床通用运动学求解软件 (HFUT-CIMS)V1.0

## 设 计 说 明 书

# 目录

1 引言 .....	1
1.1 编写目的 .....	1
1.2 软件开发背景 .....	1
2 总体设计 .....	2
2.1 软件开发环境 .....	2
2.2 软件总体设计 .....	2
3 详细设计 .....	4
3.1 主界面设计 .....	4
3.2 刀位文件处理子界面 .....	5
3.1.1. 刀位数据提取与显示模块 .....	5
3.1.2. 刀位轨迹绘制模块 .....	8
3.3 多轴运动学求解子界面 .....	10
3.2.1. 运动学模型构建模块 .....	10
3.2.2. 运动学问题求解模块 .....	12
3.2.3. 求解结果显示模块 .....	16

# 1 引言

## 1.1 编写目的

本说明文档详细介绍了多轴数控加工机床通用运动学求解软件(HFUT-CIMS)的设计原理,实现方法及实现效果。多轴数控加工机床通用运动学求解软件(HFUT-CIMS)分为刀位文件处理模块与多轴运动学求解模块,刀位信息处理模块主要完成刀具位姿(刀位)数据的提取与显示、刀位点的导入、刀位轨迹绘制;多轴运动学求解模块主要完成运动学模型构建、正运动学问题求解、逆运动学问题求解、结果显示功能。刀位文件处理模块对 CAM 软件生成的刀位文件(CL 文件)进行操作,生成的刀位数据导入多轴运动学求解模块中,求解逆运动学问题,可生成对应的多轴数控机床加工 G 代码,控制多轴数控机床的加工运动。反之,将多轴数控机床加工 G 代码导入到多轴运动学求解模块中,求解正运动学问题,可显示相应的刀位数据,并绘制出其在工件坐标系下的刀具运动轨迹。

## 1.2 软件开发背景

随着数字化的发展,多轴数控加工机床被广泛应用于汽车、飞机、航天、模具等领域的制造。一般数控加工机床按照具有运动轴的数量可以分为三轴、四轴、五轴机床。其中运动轴按运动的类型可以分为旋转轴和移动轴。三轴数控机床配备三个移动轴,四轴数控机床配备三个移动轴和一个旋转轴,最为复杂的五轴数控机床配备三个移动轴和两个旋转轴。根据两旋转轴的配置不同,又可将五轴数控机床分为下述三种结构形式:双转台型,双摆头型,混合型。

为了使得刀位文件具有通用性,加工设计者使用 CAM 软件在与机床机构无关的工件坐标系下按指定参数给出刀具在加工过程中的运动信息,包括刀具相对于工件的位置和方向(合称为刀具的位姿),并按照一定格式保存至刀位文件中。刀位文件还需结合机床拓扑结构进行逆运动学问题求解才能生成该结构适用的加工 G 代码。相反,加工 G 代码需结合机床拓扑结构求解正运动学问题,才能将机床的各轴运动转换为较为直观的刀具运动轨迹,方便设计者进行检查。

繁复的机床运动轴配置方式使得上述过程对不同的数控加工机床需采取不同的处理方式。因此设计一款能对各种数控加工机床结构都通用的运动学求解软件能使得加工设计者仅根据机床拓扑机构修改初始参数,即可完成求解过程,大大提高加工设计的效率,具有重要意义。

## 2 总体设计

### 2.1 软件开发环境

多轴数控机床通用运动学求解软件(HFUT-CIMS)开发平台为 Windows 10 操作系统, MATLAB R2019a。软件开发通过编写 MATLAB 软件中的 m 文件实现, 可在 MATLAB 软件中运行。多轴数控机床通用运动学求解软件所生成的多轴数控机床 G 代码为 txt 文件, 可通过 U 盘或其他形式拷贝至多轴机床的数控系统中执行。

### 2.2 软件总体设计

软件总体结构框架如图 2.1 所示:

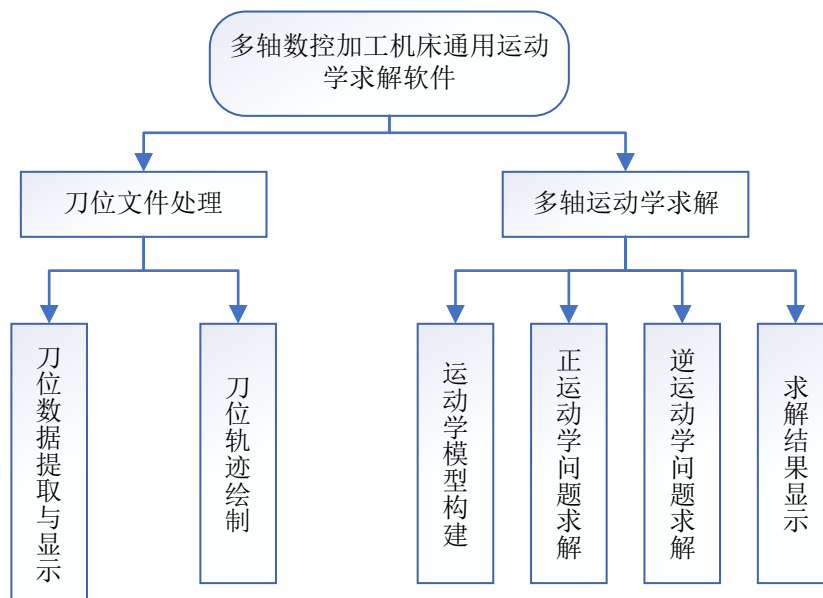


图 2.1 系统软件总体结构

软件分为刀位文件处理模块与多轴运动学求解模块, 刀位信息处理模块主要完成刀位数据的提取与显示和刀位轨迹绘制功能; 多轴运动学求解模块主要完成运动学模型构建、正运动学问题求解、逆运动学问题求解、求解信息显示等功能。

其中各模块主要实现的功能简介如下:

#### (1) 刀位数据提取与显示模块:

该模块子窗口主要对 CAM 软件生成的刀位文件进行译码, 提取出刀位信息, 并完成刀具在工件坐标系(WCS)下的位姿数据的显示, 包括刀尖点坐标(x,y,z)、刀轴向量(i,j,k)、刀触点坐标(xc,yc,zc)。对于不含刀触点坐标信息的刀位文件中,

默认以刀尖点坐标作为刀触的坐标信息进行显示。

(2) 刀位轨迹绘制模块:

该模块子窗口将导入的刀位点(位姿数据)在工件坐标系下绘制出对应的三维坐标下轨迹,以便用户可以将抽象数据转换为直观图像进行查看。

(3) 运动学模型构建模块:

该模块子窗口为用户提供一个运动学模型信息输入及运动链显示的窗口,用户输入信息完成工件参考结构建立、刀具参考结构建立、线性轴旋量参数输入、旋转轴旋量参数输入后,可以在软件底层通过旋量理论构建运动学模型,供后面求解正逆运动学问题使用。并且在线性轴参数输入、旋转轴参数输入后,可在已添加运动轴及运动链显示窗口实现工件侧至刀具侧的运动链显示。

(4) 正运动学问题求解模块:

该模块为用户提供两个功能按键,在构建好运动学模型后,用户可以导入对应机床的各轴运动指令,软件底层可在用户点击功能键后自动完成正运动学问题求解。

(5) 逆运动学问题求解模块:

该模块子窗口为用户提供逆运动学问题求解信息输入及加工代码生成功能,在构建好运动学模型后,用户可以导入对应设计好的刀位数据,指定机床旋转轴的运动范围后,软件底层可在用户点击功能键后自动完成逆运动学问题求解并生成包含加工 G 代码的 txt 文件。

(6) 求解信息显示:

该模块子窗口为用户提供多个显示窗口以判断求解结果是否符合预期,完成正运动学问题或逆运动问题的导入文件数据、输入和结果数据,另外还提供两个轨迹功能键,用户可在点击后得到相应轨迹图,方便用户与期望轨迹进行对比。

### 3 详细设计

#### 3.1 主界面设计



图 3.1 软件主界面

图 3.1 为主界面，分为 3 个部分，每个部分对应了不同的功能模块：

模块（1）是软件的开启画面部分，显示了软件的名称，版本，以及通过图片简要说明软件的功能。

模块（2）是功能按键区，通过功能选择的几个按钮，可分别调用出几个相关的子界面，每个子界面分别完成不同的功能：如按下“刀位文件处理”按键，将弹出刀位文件处理子界面，其界面如图 3.2 所示；如按下“多轴运动学求解”按键，将弹出多轴运动学求解子界面，其界面如图 3.12 所示。

模块（3）是软件“退出”按键，点击后可关闭软件。

### 3.2 刀位文件处理子界面

刀位文件处理子界面下的主要功能包括对 CAM 软件生成的刀位文件（需转存为 txt 文件）进行处理、提取出刀位信息并显示。如图 3.2，该子界面可分为 2 个部分，每个部分对应了不同的功能模块：模块（1）为刀位数据提取与显示模块，模块（2）为刀位轨迹绘制模块。

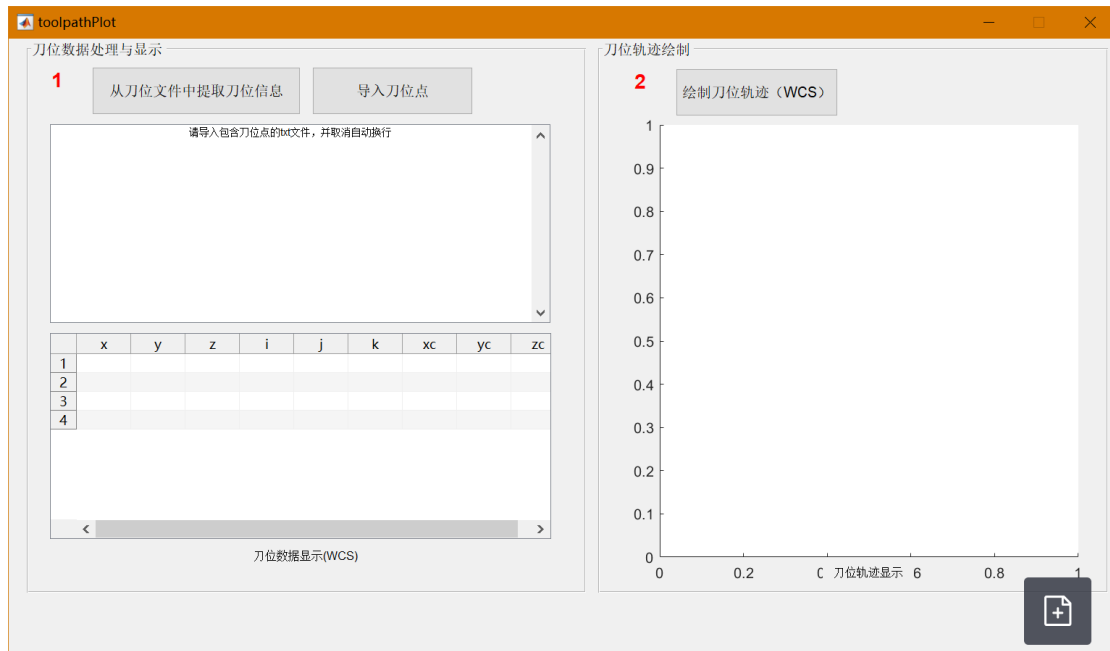


图 3.2 刀位文件处理子界面

#### 3.1.1. 刀位数据提取与显示模块



图 3.3 刀位数据提取与显示模块

刀位数据提取与显示模块有如图 3.3 所示的 3 个功能区域。点击“功能按钮区”中的“从刀位文件中提取刀位信息”按钮，会弹出如图 3.4 所示的刀位文件选择窗口。用户可从对应路径中选取需要处理的刀位文件。如图 3.5 所示，给出三轴机床和五轴机床对应的刀位文件数据示例。成功打开刀位文件后会弹出如图 3.6 所示的数据提取进度显示条，进度条达到 100%时自动关闭，并在软件 m 文件对应的路径中可获得包含刀位点数据的名为“CLpoints.txt”的文件。若用户取消打开刀位文件，则会弹出如图 3.6 所示的未打开文件提示。

若点击“功能按钮区”中的“导入刀位点”按钮，将弹出如图 3.8 所示的确认窗口，提示用户需确认是否已在将要打开的包含刀位数据的 txt 或 mat 文件中第一行补上“0 0 0 0 0”以便软件底层进行处理。在用户确认“是”之后，会弹出如图 3.9 所示的刀位数据文件选择界面。用户可从对应路径中选取需要导入的刀位数据文件，可以选择提取刀位数据成功后生成的“CLpoints.txt”文件，该文件在生成时首行会自动补上“0 0 0 0 0”。若中途取消打开文件或在图 3.8 窗口时选择“否”，软件将会弹出如图 3.7 所示的提示。若成功打开，软件子界面将会如图 3.10 所示，在中间弹出导入完成提示，并在子界面的“刀位点文件显示区”和“刀位数据显示区”分别显示文件内容及处理后的刀位点数据列表。

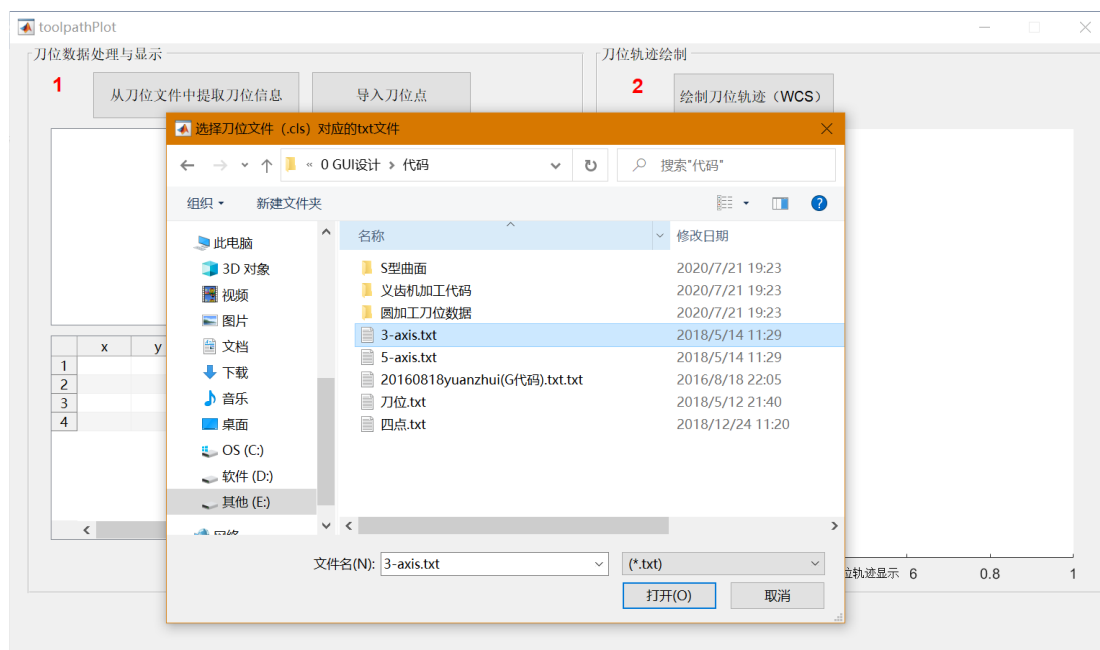


图 3.4 刀位文件选择



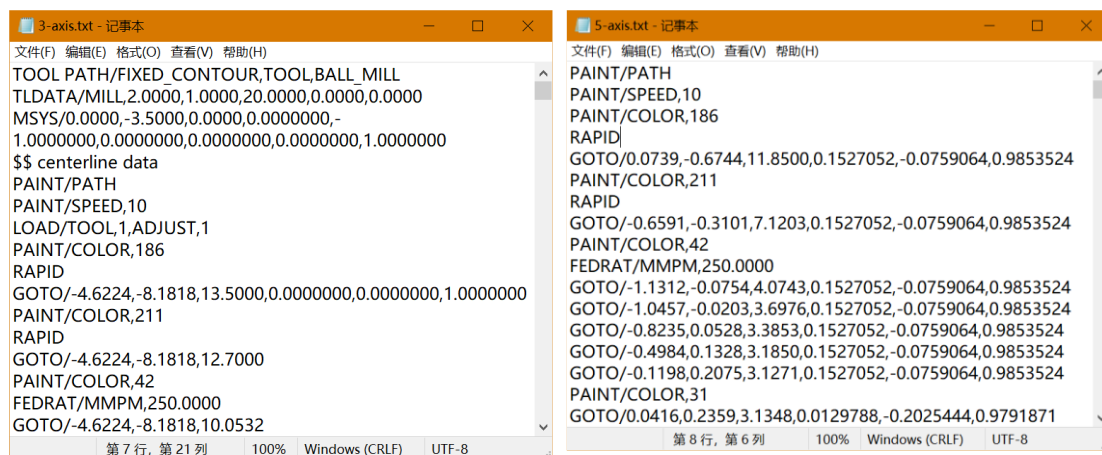


图 3.5 刀位文件数据格式示例



图 3.6 数据提取进度显示条

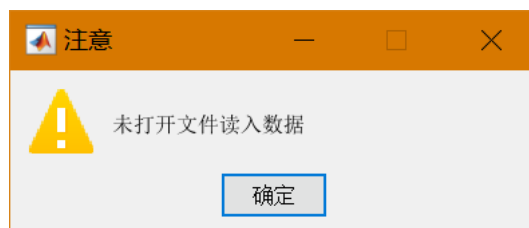


图 3.7 未打开文件提示

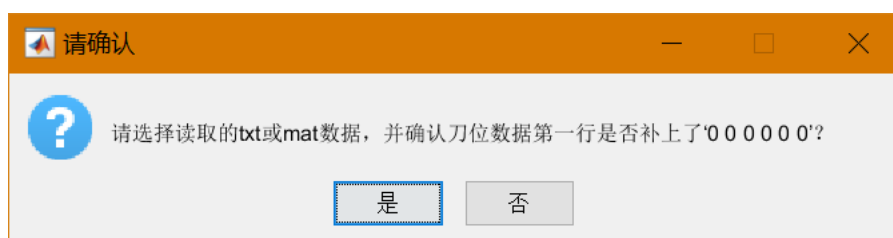


图 3.8 刀位数据文件打开前确认

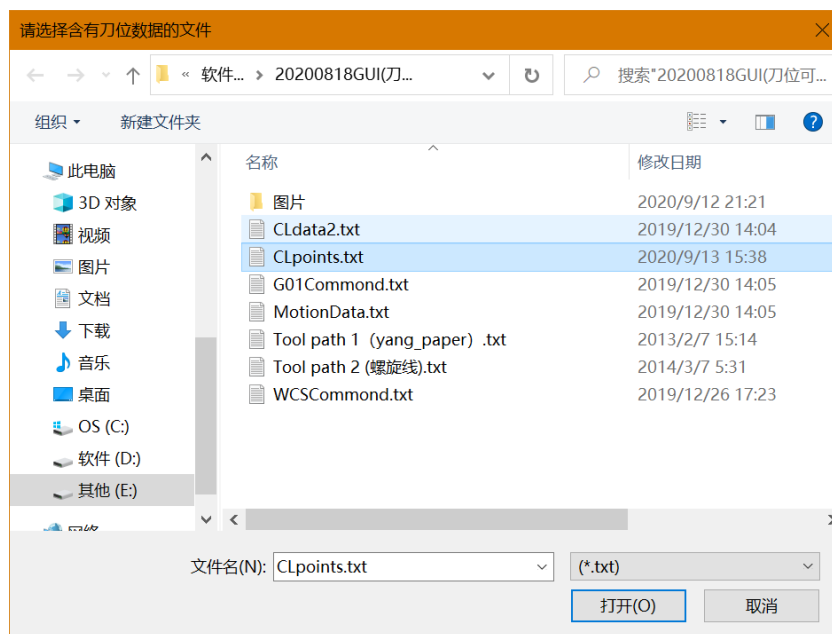


图 3.9 刀位数据文件选择

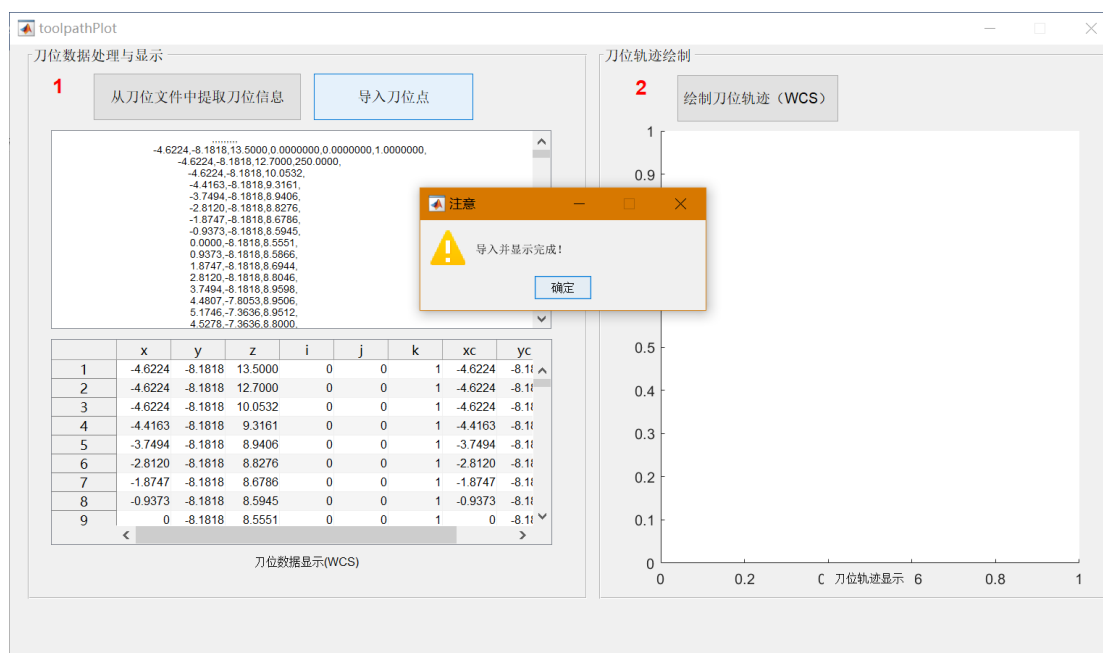


图 3.10 成功打开刀位数据文件

### 3.1.2. 刀位轨迹绘制模块

刀位轨迹绘制模块有如图 3.11 所示的 2 个功能区域。在完成 3.1.1 节中的“导入刀位点”并成功导入刀位数据后，点击“功能按键区”中的“绘制刀位轨迹（WCS）”按键，如图 3.12 所示，会在刀位轨迹显示区及 MATLAB Figure 窗口中绘制出对应的刀位轨迹，包括刀尖点轨迹、刀触点轨迹、刀轴矢量方向变化。

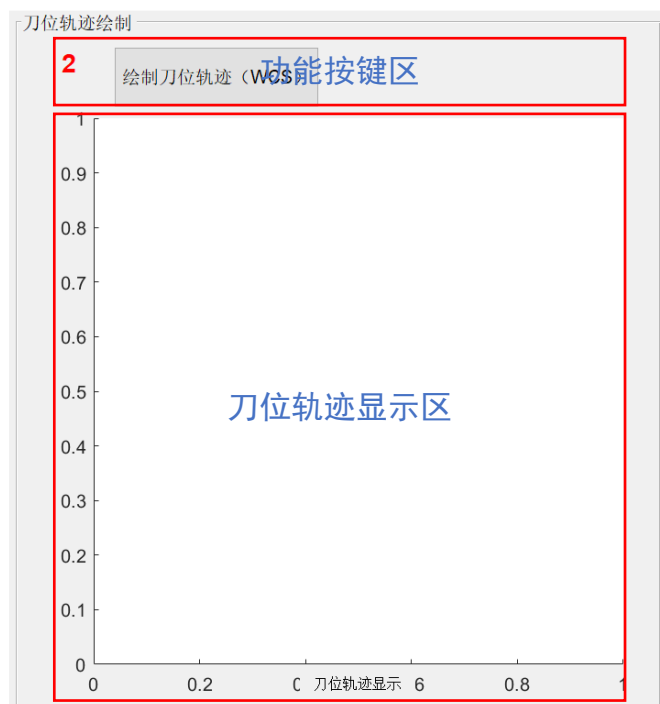


图 3.11 刀位轨迹绘制模块

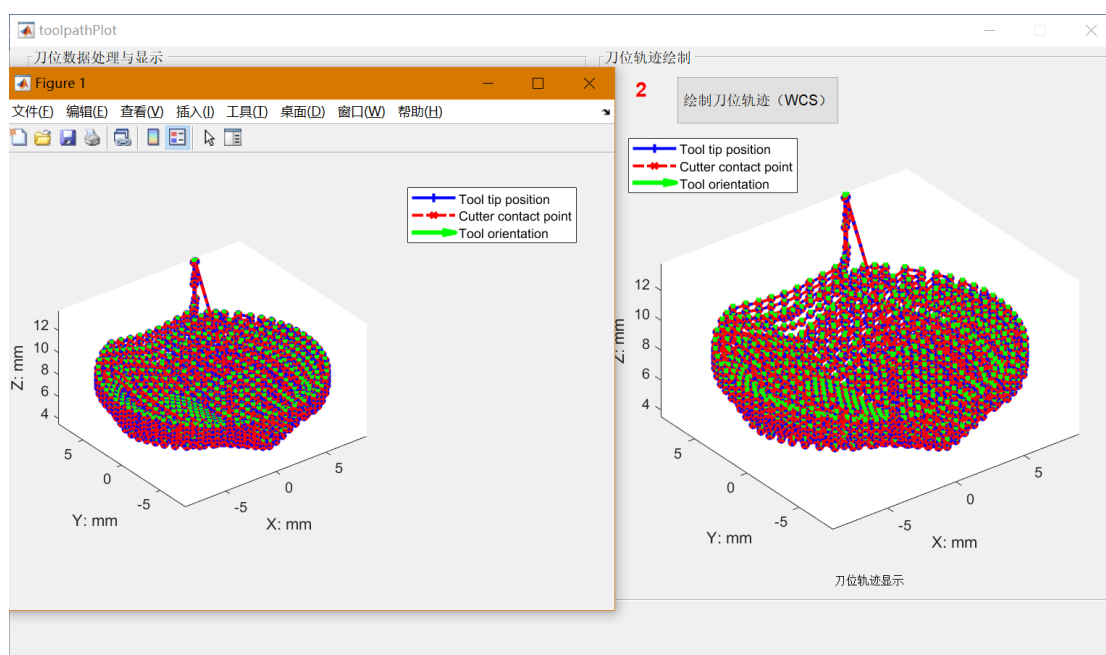


图 3.12 刀位轨迹显示

### 3.3 多轴运动学求解子界面



图 3.13 多轴运动学求解子界面

多轴运动学求解子界面下的主要功能包括运动学模型构建、正逆运动学问题求解、结果显示功能。如图 3.13, 该子界面可分为 4 个部分, 每个部分对应了不同的功能模块: 模块(1)为运动学模型构建模块, 模块(2)为运动学求解模块, 模块(3)为求解信息显示模块, 模块(4)提示用户本通用运动学求解所能处理的对象范围。

### 3.2.1. 运动学模型构建模块



图 3.14 运动学模型构建模块

运动学模型构建模块有如图 3.14 所示的 3 个功能区域。构建运动学模型首先可完成工件、刀具参考结构的建立，以工件参考结构建立为例，根据工件坐标系初始结构在机床基础坐标系的位姿矩阵，输入对应的平移向量及旋转矩阵。若工件坐标系初始结构和机床基础坐标系重合，可输入如图 3.15 所示数据。输入完成后点击下方“工件坐标系建立”按键，“运动学模型构建确认区”中对应的勾选框会自动选中，使得用户确认工件参考结构已建立完成，若需要修改，可在勾选框取消勾选后修改数据，并再次点击按键确认建立。完成类似步骤，可建立刀具参考结构。

图 3.15 工件参考结构的建立

在完成工件、刀具参考结构的建立后，用户还需要根据机床机构完成构建机床运动链，如图 3.16 所示，运动链构建及显示区有三个子区域：线性轴输入区、旋转轴参数输入区、已添加运动轴及运动链显示区。首先如图 3.17 所示，选择需要添加轴及对应的字母，软件本身已在内部给出常用的字母，用户也可自己指定。然后用户需要根据运动轴相对于机床基础坐标系的位置或方向输入对应参数，并根据实际选择运动轴在运动链中的位置。最后，点击对应的添加按键，即可在右侧的“已添加运动轴及运动链显示区”显示所添加的轴，另外用户还可在“已添加运动轴及运动链显示区”移动或删除已添加轴。将运动轴添加完成并确认运动链后，用户需要手动勾选“动力学模型构建确认区”中对应的勾选框，如图 3.17 所示。

最终，用户在完成前述的步骤后，点击“运动学模型构建确认区”中的“运动学模型构建”按键后，如图 3.18 所示，按键下方的“运动学模型（Gwt）构建完成”旁边的勾选框自动勾选，提示用户运动学模型在软件内构建完成。

从构建过程可以看出本软件适用于不同结构的运动链，具有通用性。

图 3.16 运动链构建



图 3.17 运动轴参数输入



图 3.18 运动学模型构建完成

### 3.2.2. 运动学问题求解模块

用户在完成运动学模型构建后，即可进行运动学问题求解，其对应的模块有如图 3.19 所示的 3 个功能区域。

若用户需求解正运动学问题，首先点击“正运动学问题求解功能区”中的“导入机床各轴运动指令”按键，软件将弹出如图 3.20 左所示的加工 G 代码选择窗口，用户可从对应路径中选取包含机床各轴运动指令的加工 G 代码文件，图 3.20 右给出了该类文件示例。若用户取消打开，将弹出如图 3.7 所示的未打开文件提示。若用户成功打开，软件首先会弹出如图 3.21 所示的加工 G 代码文件导入状态条，告知用户目前软件读取文件的进度。导入完成后，状态条自动关闭，并如图 3.22 左所示“求解结果显示模块”中对应位置，完成导入数据显示，方便用户进行确认。用户确认导入数据正确后，点击“正运动学问题求解功能区”中的“求解正运动”按键，等待一定时间后，将会在“求解结果显示模块”中对应位置得到如图 3.22 右所示的数据列表显示。用户可拖动列表中滚动条，对求解结果进行进一步查看和确认，具体见 3.2.3 节。

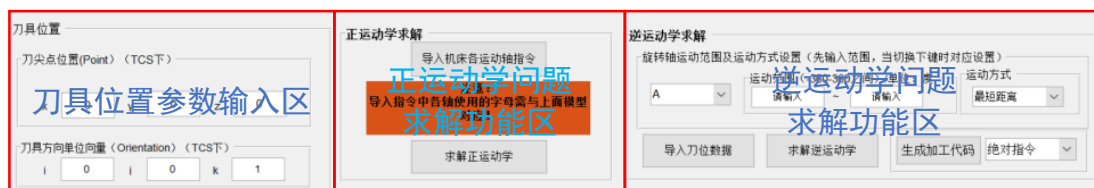


图 3.19 运动学问题求解模块

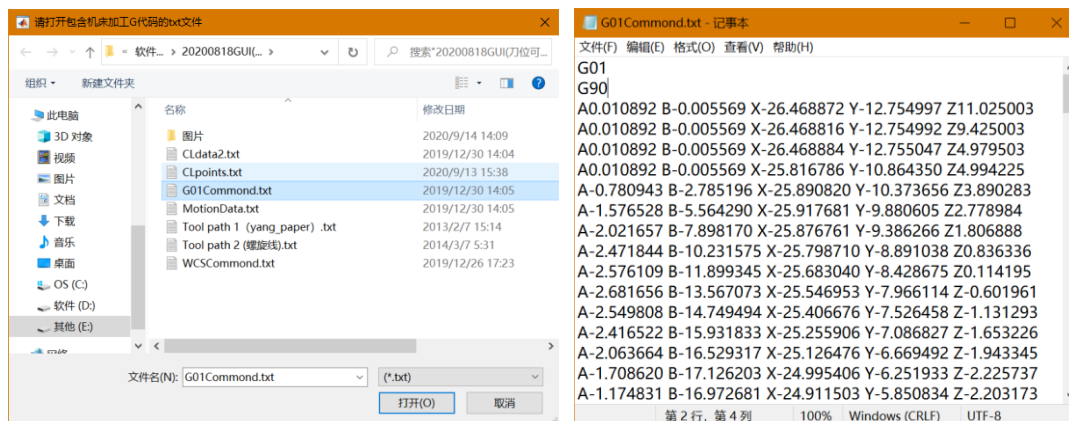


图 3.20 加工 G 代码选择 (左) 及 G 代码示例 (右)



图 3.21 加工 G 代码文件导入状态条



图 3.22 加工 G 代码文件导入成功后数据显示 (左) 正运动学求解结果显示 (右)

若用户需求解逆运动学问题, 首先需要在图 3.19 中的“刀具位置参数输入区”修改并确认刀具在刀具坐标系下的刀具位置, 包括刀尖点位置和刀具方向单位向量, 软件已给出常用值, 用户也可根据实际坐标系自行修改。确认输入正确后, 用户需要在“逆运动学问题求解功能区”中设置旋转轴的运动范围及旋转



轴运动方式（当前软件仅支持最短距离运动方式，后续将进一步实现其他运动方式）。如图 3.23 所示，软件在下拉框中会根据用户建立的运动链，给出旋转轴符号，用户在右侧文本框中输入运动范围后，选择对应的轴，软件会弹出如图 3.23 右所示的确认窗口，点击后即在软件底层完成设置，用户后续也可再次修改输入并确认。确定好各旋转轴运动范围后，用户可点击“导入刀位数据”按键，导入需要求解逆运动学问题的刀具轨迹对应的刀位数据。点击后软件将会弹出如图 3.8 所示的确认窗口，用户可参考 3.1.1 节中类似步骤选择刀位数据文件。成功导入刀位数据后，软件会弹出如图 3.24 左所示的确认窗口，并在如图 3.24 右所示“求解结果显示模块”中对应位置，完成导入数据显示，方便用户进行确认。用户确认导入数据正确后，点击“求解逆运动学”按键，等待一会后，软件将会弹出如图 3.25 左所示的逆运动学求解完成确认窗口，并在“求解结果显示模块”中对应位置得到如图 3.25 右所示的数据列表显示。用户可拖动列表中滚动条，对求解结果进行进一步查看和确认，具体见 3.2.3 节。用户在确认完逆运动学问题结果后，在如图 3.26 所示的下拉选项中确定指令的形式（“绝对指令”或“相对指令”）后，点击“生成加工代码”按键，并在弹出窗口中选择文件保存路径，并指定文件命名后，点击“保存”。软件会弹出如图 3.27 左所示的保存成功提示，并可在指定路径下生成如图 3.27 右所示的加工代码文件，用户对该加工代码进行简要的手动修改即可用于数控机床进行加工。若点击“取消”则会弹出如图 3.28 所示的取消保存提示。



图 3.23 旋转轴运动范围与运动方式设置示例





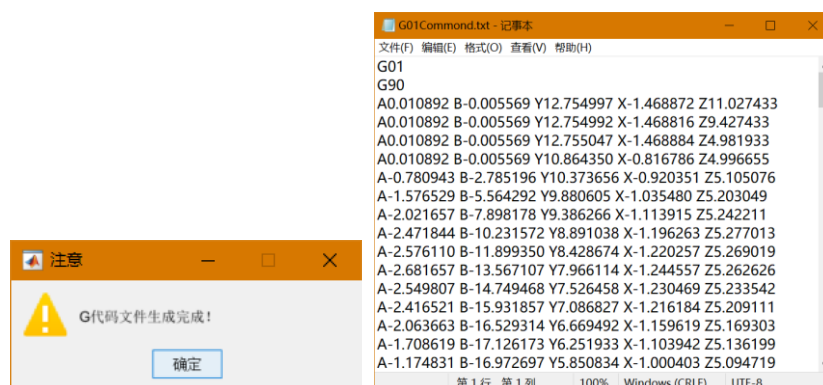


图 3.27 加工代码文件生成成功



图 3.28 取消加工代码指令保存

### 3.2.3. 求解结果显示模块

运动学模型构建模块有如图 3.29 所示的 3 个功能区域。

区域（1）为导入 G 代码/CL 数据显示区，完成正逆运动学问题求解前导入的文本文件的显示，如图 3.22 及图 3.24 中所示。右侧附有滚动条，用户可拖动以在有限区域内查看所有文本数据。

区域（2）为逆运动学问题结果/正运动学问题输入显示区，即运动轴移动量信息显示区。在下方列表中，各移动轴的顺序从左至右对应运动链中从工件侧至刀具侧的顺序。列表第一列对应数据的行号，拖动滚动条可查看所有数据。另外该显示区还带有一个功能键“绘制各轴运动轨迹”，点击后，用户可在 MATLAB Figure 中得到各轴移动量关于数据个数的轨迹图，图 3.30 中给出了相应示例，用户可通过观察图像分析各轴运动是否理想。

区域（3）为正运动学问题结果/逆运动学问题输入显示区，即刀位数据点信息显示区。在下方列表中，依次显示刀位数据中的 (x, y, z, i, j, k)。列表第一列对应数据的行号，拖动滚动条可查看所有数据。另外该显示区也带有一个功能键“绘制轨迹”，点击后，用户可调出中得到如图 3.2 所示的刀位文件处理子界面，由于刀位数据已经存储在底层中，直接点击“绘制刀位轨迹（WCS）”，可得到与图 3.12 类似的刀位轨迹显示图，如图 3.31 所示，用户可通过观察图像分析刀具相对于工件的运动是否理想。

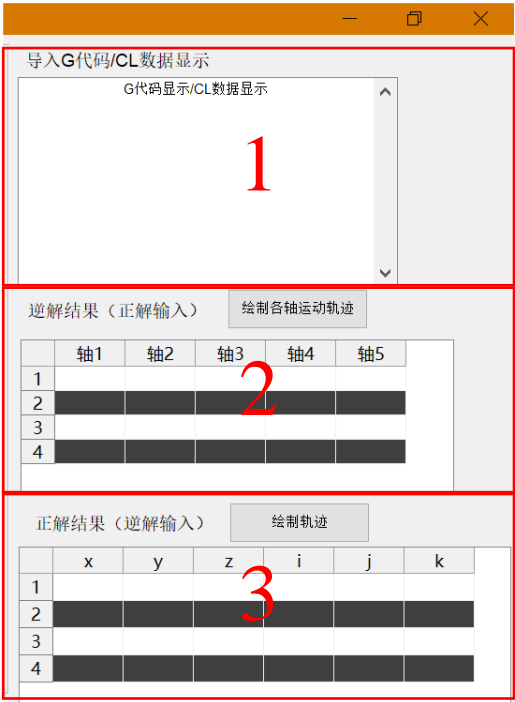


图 3.29 求解结果显示模块

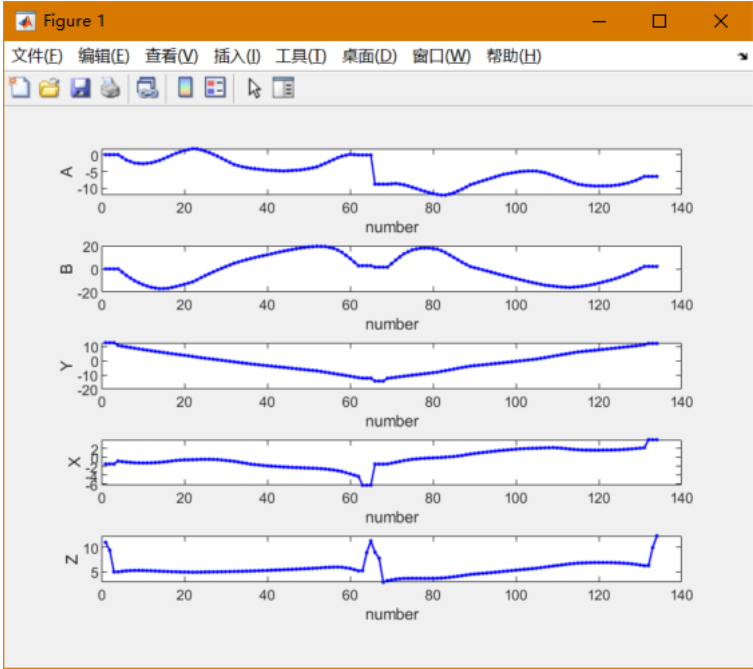


图 3.30 各轴运动轨迹图示例

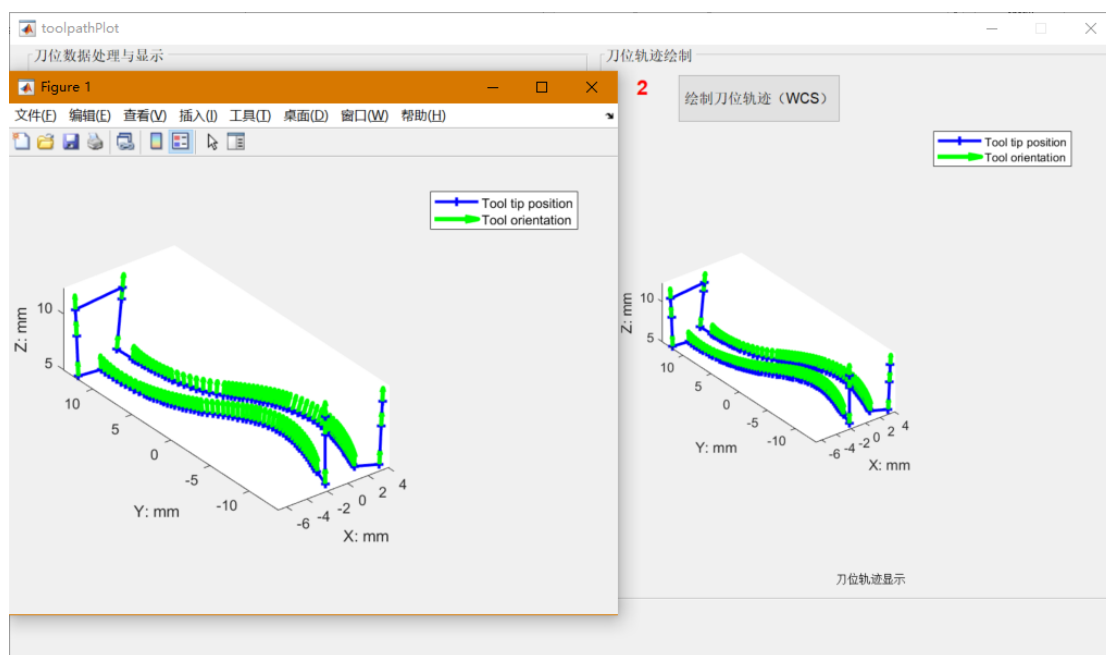


图 3.31 刀位轨迹图示例