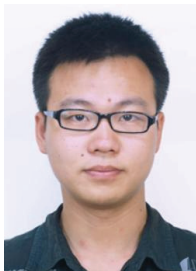


基于 CREO 的虚拟装配路径规划技术研究

赵佳琪

(天津航天机电设备研究所, 天津 300458)



摘要: 基于 CREO 三维设计软件, 利用 Pro/TOOLKIT 和 MFC 编程技术, 设计开发出带有干涉检查的虚拟装配路径规划功能模块。在已知装配体数模的基础上, 利用矩阵变换技术规划出产品的拆卸过程, 设有干涉检查保证整个拆卸过程安全无误, 并将拆卸过程反演形成装配动画, 指导装配。虚拟装配路径规划技术保证了航天器产品装配过程的安全性, 同时能显著提高装配效率。

关键词: 虚拟装配; 路径规划; 位姿矩阵; 矩阵变换; Pro/TOOLKIT; 二次开发

Research on Virtual Assembly Path Planning Technique based on CREO Software

Zhao Jiaqi

(Tianjin Institute of Aerospace Mechanical and Electrical Equipment, Tianjin 300458)

Abstract: Based on CREO software, a module of virtual assembly path planning with interference checking is developed by Pro/TOOLKIT and MFC programming technique. The disassembly process of product can be calculated by the technique of matrix transform based on its digital model. Interference checking can ensure the safety during disassembly process. Assembly animation which can guide assembly is formed by the inversion of the disassembly process. The virtual assembly path planning technique can not only ensure the safety during spacecraft product assembly process, but also improve assembly efficiency significantly.

Key words: virtual assembly; path planning; position and orientation matrix; matrix transform; Pro/TOOLKIT; secondary development

1 引言

随着科学技术的发展, 数字化制造成为装备制造领域重要的新兴领域, 而虚拟装配技术作为数字化制造的一项核心技术也越来越引人注目。航天器产品成本高、精度大, 需要保证产品装配过程“零缺陷”。目前设计部门大多用 CREO 软件进行航天器产品的造型设计, 如果能够基于 CREO 软件开发出一种能够模拟产品装配过程、保证整个装配过程安全可靠的功能模块, 对保证航天器产品的质量具有重要意义。

基于 CREO 的虚拟装配路径规划技术, 是利用 CREO 软件自带的 Pro/TOOLKIT 二次开发包和 MFC

编程技术, 提取装配体的层级关系和相对位置等信息, 通过矩阵变换技术实现对产品装配过程的仿真验证, 保证产品装配过程的准确性和安全性。

2 装配信息提取

装配信息包括层级关系信息、配合信息和位姿信息等。

2.1 层级关系信息提取

在 CREO 三维设计软件中, 装配体的层级关系用结构树来表示, 如图 1 所示。

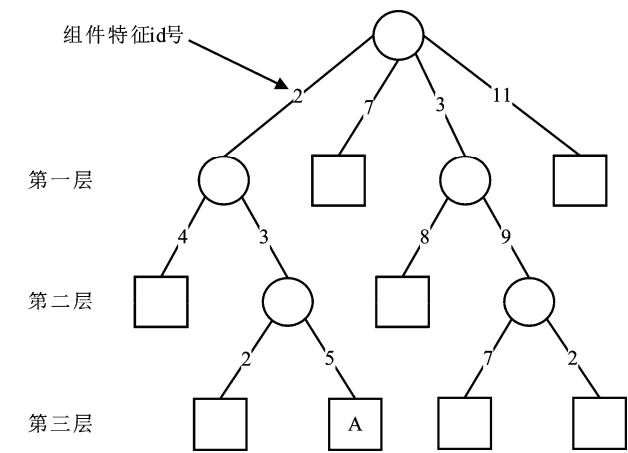


图 1 某装配体组成的树型层级结构
(○代表部件, □代表零件)

CREO 中用组件特征 id 表来表示组件在装配体中的层级位置, 例如组件 A 的组件特征 id 表为: num=3, table[0]=2, table[1]=3, table[2]=5。

同一种组件在一个装配体中可能有多个, 例如在某航天器产品中可能会有多个同种规格的螺钉, 如果这几个螺钉的模型完全相同, 那么它们就属于同一个

实体对象 ProSolid, 但是在该装配体中需要把相同零件或部件区分开来, 此时就可以用组件特征 id 表进行区分。

获取组件层级关系, 需要从装配体的顶层开始访问下面的所有组件, 如果确定是所要找的组件, 那么就要从该组件往上级走, 一直到最顶层的装配体, 并记录过程中每个组件的特征 id 号。例如, 如果想获得组件 A 的层级关系, 那么可以从组件 A 往上走, 依次获得各组件的特征 id 号是 5、3、2。不过 Pro/TOOLKIT 中并没有提供由一个组件对象获得其父对象的函数, 无法从下往上走。但是, 可以通过利用上面的程序, 在树控件的树节点里存放一个参数, 这个参数记录该组件的特征 id 号。当需要获取某个组件的特征 id 表时, 就可以通过找其父节点并获得该节点的相关参数, 一步一步找到根节点, 最终获得该组件的特征 id 表。

层级关系信息提取过程中所用到的 Pro/TOOLKIT 函数如表 1 所示。层级关系信息提取后保存在产品结构树数据表中, 如图 2 所示。

表 1 层级关系信息提取所用到的 Pro/TOOLKIT 函数

序号	函数表达式	变量	含义
1	ProMdlDataGet	ProMdlhandle, ProMdldata* p_data	获取指定模型数据信息
2	ProMdlIdGet	ProMdl model, int* p_id	获取指定模型 id
3	ProAsmcompMdlGet	ProAsmcomp* p_feat_handle, ProMdl* p_mdl_handle	获取装配组件模型句柄

■ 产品结构树：表									
序号	模型名称	模型类型	所在层级	模型ID	组件特征ID	存储路径	父装配体名称	父装配体ID	
1	水下连接器	ASM	0	0	-1	\rj29\sh			
2	HOUSING	PRT	1	0	40	\rj29\sh	水下连接器	0	
3	SPACERRING	PRT	1	1	43	\rj29\sh	水下连接器	0	
4	SPACERRING	PRT	1	1	45	\rj29\sh	水下连接器	0	
5	SPACERRING	PRT	1	1	46	\rj29\sh	水下连接器	0	
6	RETAININGPI	PRT	1	2	48	\rj29\sh	水下连接器	0	
7	SOCKET	PRT	1	3	49	\rj29\sh	水下连接器	0	
8	SCREW	PRT	1	4	50	\rj29\sh	水下连接器	0	
9	SCREW	PRT	1	4	54	\rj29\sh	水下连接器	0	
10	SCREW	PRT	1	4	55	\rj29\sh	水下连接器	0	

图 2 产品结构树数据表

2.2 配合信息和位姿信息提取

部件配合信息包括匹配、对齐、插入、相切等多种类型, 反映装配体各组件间的约束关系。部件位姿信息是一个 4×4 的数字矩阵, 其中包括平移信息和旋转信息, 在装配路径规划时, 需要提取各个帧的零部件装配位姿信息, 将这些信息按照一定的顺序存储,

作为指导装配路径规划的重要依据。

部件配合信息提取过程中所用到的 Pro/TOOLKIT 函数如表 2 所示。部件位姿信息提取过程中所用到的 Pro/TOOLKIT 函数如表 3 所示。部件配合信息和位姿信息提取后保存在装配组成信息表中, 如图 3 所示。

表 2 部件配合信息提取所用到的 Pro/TOOLKIT 函数

序号	函数表达式	变量	含义
1	ProAsmcompConstraintsGet	ProAsmcomp* zujian, ProAsmcompconstraint** yueshu	获取装配约束
2	ProAsmcompconstraintTypeGet	ProAsmcompconstraint yueshu, ProAsmcompConstrType* leixing	获取约束类型
3	ProAsmcompconstraintAsmreferenceGet	ProAsmcompconstraint yueshu, ProSelection* cankao, ProDatumside* chushi	获取组件约束参照和方向
4	ProAsmcompconstraintCompreferenceGet	ProAsmcompconstraint yueshu, ProSelection* cankao, ProDatumside* chushi	获取元件约束参照和方向
5	ProAsmcompconstraintOffsetGet	ProAsmcompconstraint yueshu, double* pianzhi	获取约束偏置值

表 3 部件位姿信息提取所用到的 Pro/TOOLKIT 函数

序号	函数表达式	变量	含义
1	ProMdlToModelitem	ProMdl mdl, ProModelitem* p_model_item	将模型变换为模型项
2	ProAsmcompPositionGet	ProAsmcomp* component, ProMatrix position	获得装配元件的初始矩阵
3	ProSelectionAsmcomppathGet	ProSelection selection, ProAsmcomppath* p_cmp_path	获得所选元件的装配路径
4	ProAsmcomppathMdlGet	ProAsmcomppath* p_path, ProMdl* p_model	根据元件的装配路径获得其模型
5	ProAsmcomppathTrfGet	ProAsmcomppath* p_path, ProBoolean bottom_up, ProMatrix transformation	根据元件的装配路径获得其转换矩阵

■ 装配组成信息表：表									
序号	模型名称	模型类型	X方向姿态矩阵	Y方向姿态矩阵	Z方向姿态矩阵	平移矩阵	约束1	约束2	约束3
1	GONGZHUAI	ASM							
2	LUOSHUAN	PRT	(1.000000, 0.000000, 0.000000)	(0.000000, 1.000000, 0.000000)	(0.000000, 0.000000, 1.000000)	(530.0000, 0.000000, 0.000000)	固定	固定	固定
3	DAOXIANG	PRT	(1.000000, 0.000000, 0.000000)	(0.000000, -1.000000, 0.000000)	(0.000000, 0.000000, 0.000000)	(290.0000, 0.000000, 0.000000)	匹配	匹配	匹配
4	DIAOGOU	PRT	(1.000000, 0.000000, 0.000000)	(0.000000, -1.000000, 0.000000)	(0.000000, 0.000000, 0.000000)	(290.0000, 0.000000, 0.000000)	对齐	插入	定向
5	DIAOGOU	PRT	(1.000000, 0.000000, 0.000000)	(0.000000, 0.000000, 0.500000)	(0.000000, 0.000000, 0.866025)	(290.0000, 0.000000, 0.000000)	对齐	插入	定向
6	DIAOGOU	PRT	(1.000000, 0.000000, 0.000000)	(0.000000, 0.000000, 0.500000)	(0.000000, -0.866025, 0.000000)	(290.0000, 0.000000, 0.000000)	对齐	插入	定向
7	SHOUYING	PRT	(0.000000, 1.000000, 0.000000)	(0.000000, 0.000000, 0.000000)	(1.000000, 0.000000, 0.000000)	(560.0000, 0.000000, 0.000000)	对齐	定向	插入
8	WANGUAN	PRT	(1.000000, 0.000000, 0.000000)	(0.000000, -1.000000, 0.000000)	(0.000000, 0.000000, 0.000000)	(270.0000, 0.000000, 0.000000)	对齐偏	匹配	对齐偏
9	XIAO-1	PRT	(1.000000, 0.000000, 0.000000)	(0.000000, 1.000000, 0.000000)	(0.000000, 0.000000, 0.000000)	(560.0000, 0.000000, 0.000000)	对齐	插入	插入
10	XIAO-3	PRT	(1.000000, 0.000000, 0.000000)	(0.000000, 1.000000, 0.000000)	(0.000000, 0.000000, 0.000000)	(290.0000, 0.000000, 0.000000)	插入	对齐	对齐
11	XIAO-3	PRT	(1.000000, 0.000000, 0.000000)	(0.000000, -0.866025, 0.000000)	(0.000000, -0.500000, 0.000000)	(290.0000, 0.000000, 0.000000)	插入	对齐	对齐
12	XIAO-3	PRT	(1.000000, 0.000000, 0.000000)	(0.000000, -0.866025, 0.000000)	(0.000000, 0.500000, 0.866025)	(290.0000, 0.000000, 0.000000)	插入	对齐	对齐

图 3 装配组成信息表

3 装配路径规划技术

装配路径规划技术是根据组件的装配顺序，寻找一条从初始位置到目标位置无干涉或碰撞的空间运动路径。该技术能够保证航天器产品在装配过程中的安全性。

虚拟装配路径规划的理论基础是运动矩阵和矩阵变换。

3.1 运动矩阵

CREO 中采用运动矩阵表示装配体各零部件在虚拟装配环境中的各种不同类型的运动。零部件在虚拟

装配过程中的空间位姿变换可以简化为如图 4 所示，实际上可归结为如式（1）所示的矩阵变换。

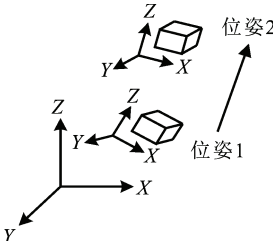


图 4 虚拟装配中零部件的位姿变换

$$[P]_e = [P]_s \cdot [T]$$
(1)

式(1)中, $[P]_e$ 为零件在拆卸路径规划后的最终位姿, $[P]_s$ 是零件在装配体上的初始位姿, $[T]$ 是齐次变换 4×4 矩阵, 如式(2)所示。

$$[T] = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & 0 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & 0 \\ M_x & M_y & M_z & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中, M_x 、 M_y 、 M_z 为待拆卸零部件在拆卸过程中沿装配坐标系 X 、 Y 、 Z 的平移分量, 矢量 X 、 Y 、 Z 描述的是待拆卸单元在拆卸过程中的转动分量, 实现待拆卸零部件从本身坐标系到装配坐标系的空间位姿变换。

3.2 矩阵变换

零件在拆卸过程中的矩阵变换主要包括平移变换和旋转变换。

如果零件的初始位置坐标是 (a_0, b_0, c_0) , 沿着平移方向投影在 X 轴、 Y 轴和 Z 轴方向的分量分别为 M_x 、 M_y 、 M_z , 平移后的零件坐标记作 (a, b, c) , 则零件在拆卸路径规划过程中的平移变换公式如式(3)所示。

$$(a, b, c, 1) = (a_0, b_0, c_0, 1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ M_x & M_y & M_z & 1 \end{bmatrix} \\ = (a_0 + M_x, b_0 + M_y, c_0 + M_z, 1) \quad (3)$$

如果采用右手坐标系, 将该零件分别绕 X 、 Y 和 Z 轴旋转 α 角, 则零件在拆卸路径规划过程中的绕 X 、 Y 和 Z 轴的旋转变换分别如式(4)、式(5)和式(6)所示。

当零件 (a_0, b_0, c_0) 绕 X 轴旋转 α 角时:

$$(a, b, c, 1) = (a_0, b_0, c_0, 1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

当零件 (a_0, b_0, c_0) 绕 Y 轴旋转 α 角时:

$$(a, b, c, 1) = (a_0, b_0, c_0, 1) \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

当零件 (a_0, b_0, c_0) 绕 Z 轴旋转 α 角时:

$$(a, b, c, 1) = (a_0, b_0, c_0, 1) \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

如果零件绕非 X 、 Y 或 Z 轴的其它轴旋转, 则需要矩阵变换。对于空间任意线段, 假设该线段所在直线为旋转轴。若线段的两个端点坐标分别为 (a_1, b_1, c_1) 和 (a_2, b_2, c_2) , 则应将线段的一个端点平移到装配坐标系原点, 之后以装配坐标系原点为转动圆心, 绕 Y 轴旋转使该条线段在 XZ 平面上, 之后再绕 Z 轴旋转使该条线段与 X 轴重合, 此时绕 X 轴旋转所设定的角度, 应用式(4)即可。然后需要按照原路逆向变换矩阵, 即得到最终的空间位姿变换矩阵。公式推导如下:

零件平移到装配坐标系原点的变换矩阵 $[T]_1$ 如式(7)所示。

$$[T]_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -a_1 & -b_1 & -c_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

平移后, 假设该轴线与 XZ 平面的夹角为 θ , 则绕 Y 轴旋转的变换矩阵 $[T]_2$ 如式(8)所示。

$$[T]_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

绕 Y 轴旋转后, 假设该轴线与 X 轴的夹角为 γ , 则绕 Z 轴旋转的变换矩阵 $[T]_3$ 如式(9)所示。

$$[T]_3 = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

经过变换, 此时该轴线已经与 X 轴重合, 此时可以按照所要求旋转的角度旋转, 假设旋转角度为 λ , 则变换矩阵 $[T]_4$ 如式(10)所示。

$$[T]_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ 0 & -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

之后再逆向矩阵变换, 利用逆矩阵计算公式

(11),即可得到所需要的位姿变换矩阵 $[T]$,如式(12)所示。其中 $[T]^*$ 是矩阵 $[T]$ 的伴随矩阵。

$$[T]_1^{-1} = \frac{[T_1]^*}{[T_1]}, [T]_2^{-1} = \frac{[T_2]^*}{[T_2]}, [T]_3^{-1} = \frac{[T_3]^*}{[T_3]} \quad (11)$$

$$[T] = [T]_1 \cdot [T]_2 \cdot [T]_3 \cdot [T]_4 \cdot [T]_5^{-1} \cdot [T]_2^{-1} \cdot [T]_1^{-1} \quad (12)$$

在路径规划过程中,任何一个零件都可能经过几次不同的矩阵变换达到最后的位置,这时该零件在整个运动过程中的变换矩阵就是该零件在运动过程中各个变换矩阵的乘积,如式(13)所示。该零件的最终位置坐标计算式如式(1)所示。

$$[T]_e = [T]_1 \cdot [T]_2 \cdots [T]_m \cdots [T]_n \quad (13)$$

式(13)中, $[T]_e$ 表示零件在运动位姿变换过程中最终的位姿变换矩阵。而 $[P]_s \cdot [T]_1 \cdot [T]_2 \cdots [T]_m \cdots [T]_n$ 得到的矩阵即是该零件最终的空间位姿矩阵。

3.3 路径规划

由上述理论基础,虚拟装配路径规划过程如下:

a. 利用开发出的装配顺序制定界面制定产品或部件的装配顺序,将装配顺序存入数据库。装配顺序制定人机交互界面如图5所示。

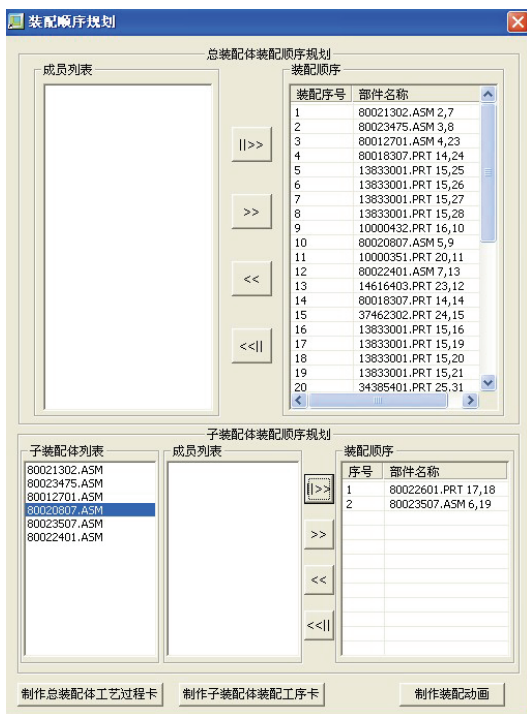


图5 装配顺序制定界面

b. 从装配顺序数据库中逆向读取,得到装配体的

拆卸顺序。根据拆卸路径规划界面(如图6所示),依次规划各个零件的拆卸路径。



图6 拆卸路径规划界面

c. 根据规划好的拆卸路径,进行拆卸仿真。拆卸仿真过程中可以干涉检查,如果整个过程中不存在零件干涉,拆卸过程符合要求;如果存在干涉,需要重新制定该零件的拆卸顺序。

d. 如果拆卸仿真无误,制定拆卸动画。

e. 将拆卸动画反演,即是产品的装配动画,将该产品的装配动画上传至外部服务器,该装配动画就可以指导现场装配过程,装配路径规划到此结束。

干涉检查对于装配路径规划具有十分重要的作用。路径规划要以干涉检查为基础,人工交互规划出无干涉的装配路径。

表4 路径规划过程中所使用到的Pro/TOOLKIT函数

序号	函数表达式	含义
1	pro_compute_global_interference	全局干涉检查
2	pro_compute_volume	获得干涉体积
3	pro_display_interf_volume	显示干涉体积
4	ProAnimmovieCreate	创建装配动画
5	ProAnimobjectCreate	创建装配动画中的动画物体
6	ProAnimframeCreate	创建动画框架
7	ProAnimframeObjAdd	向动画框架中添加动画物体
8	ProAnimmovieFrameAdd	向装配动画中添加动画框架
9	ProBatchAnimationStart	开始装配动画

在路径规划过程中所使用到的 Pro/TOOLKIT 函

数如表 4 所示。虚拟装配路径规划实现原理图如图 7 如图 8 所示。
所示。基于 CREO 的虚拟装配路径规划使用过程界面

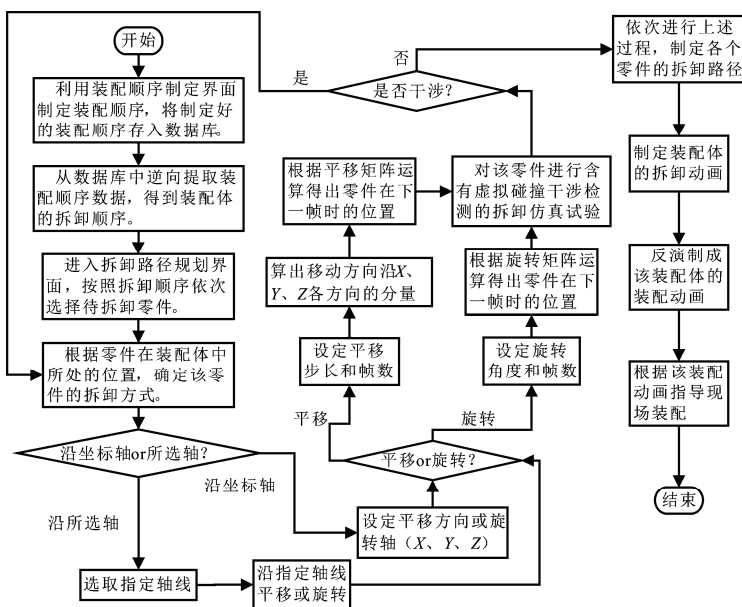


图 7 虚拟装配路径规划实现原理图

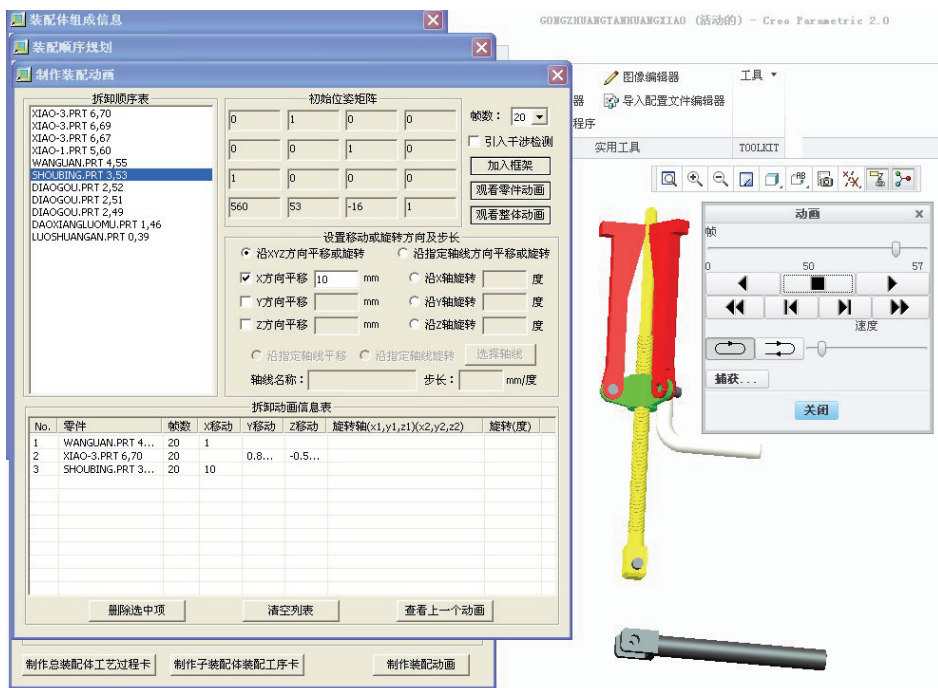


图 8 基于 CREO 的虚拟装配路径规划使用过程界面

4 结束语

提出了一种利用拆卸路径反演成装配路径的虚拟装配路径规划方法。此种方法能够在 CREO 软件中规划出产品最合理的装配顺序和路径, 通过实时的干

涉检查技术保证了整个装配过程安全可行, 生成的装配动画可以直接用于指导航天器产品的装配工作。

参考文献

- 1 李世国. Pro/TOOLKIT程序设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003

- 2 张继春. Pro/ENGINEER二次开发实用教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003
- 3 王文波. Pro/E Wildfire 4.0二次开发实例解析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010
- 4 吴立军, 陈波. Pro/ENGINEER二次开发技术基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006
- 5 张安鹏, 马佳宾, 李永松. CREO Parametric高级应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013
- 6 杨叔子. 机械装配[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012
- 7 陆明, 赵国瑞, 汪大菊. C++程序设计与数据结构基础教程[M]. 天津: 天津大学出版社, 2006
- 8 刘锐宁, 梁水, 李伟明. 学通Visual C++的24堂课[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011
- 9 苏明. 基于Pro/E的三维辅助装配工艺规划(3D-CAAPP)系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007
- 10 章崇晖. 虚拟装配系统的信息管理技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008
- 11 夏长春. 基于Pro/E的装配尺寸链自动生成[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008
- 12 吴斌. Pro/E装配干涉检查的二次开发[D]. 东南大学, 2006

(上接第 45 页)

将其分别固定在测试装置的固定支架和拉力传感器的一端连接轴上, 拉力传感器另一端固接于移动支架上, 通过旋转手轮, 丝杠导轨移动副带动移动支架向右侧运动, 带动钢丝绳(或涤纶绳)受拉绷紧。随着其所受的拉力线性增加, 拉力值可通过拉力传感器数字显示仪实时显示。加载过程中不断观察金属端套是否有拉脱、松弛现象, 若拉力值高于设计规定数值(如 1000N), 金属端套未出现上述现象, 则认定金属端套夹紧合格; 若拉力值低于设计规定数值(如 1000N), 而金属端套出现上述现象, 则认定金属端套夹紧不合格。产品测试照片见图 13。

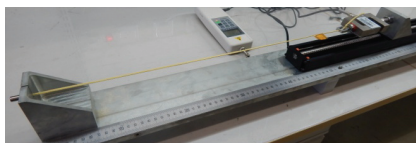


图 13 某机构中金属端套夹紧力测试照片

6 结束语

此工艺方法压制的绳套缔结强度高, 压制部分外

型美观, 耐腐蚀性强, 长度控制精度高, 制造效率高, 成本低, 安全载荷大。

通过改造液压钳槽和设计夹紧钳口, 实现了不同形状金属端套的夹紧装配。通过控制钳口间隙和金属端套直径, 控制金属端套夹紧力, 达到量化、可控制的目的。通过设计便携式微型测量装置, 完成了大量程、小力值的拉脱力测试, 不仅解决了探月二期着陆器转移机构的释放机构和展开联动机构的金属端套夹紧工艺难题, 而且克服普通冲压设备无法在 AIT 和发射场使用的难题, 对探月工程做出贡献。在其他型号分离装置、太阳翼展开机构中推广使用。

参考文献

- 1 刘宾, 李新立, 柴洪友, 等. 嫦娥三号着陆器释放与转移巡视器技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(6): 576~581
- 2 姜华. 常用钢丝绳尾部的固定方法[J]. 机械工程师, 2010(7): 144
- 3 曹荣, 王武军, 高志军. 汽车电线束中端子夹紧的要求[J]. 汽车电器, 2014(8): 45~48
- 4 张海南. 超高压多功能手动液压钳的设计[J]. 液压与气动, 2001(9): 9~10