

飞机舱门机构运动仿真 分析技术研究

Mechanism Motion Simulation Analysis Technology of Aircraft Door

上海飞机制造有限公司 庞微 卢鹤 张涛 陈凯



庞微
工程师,主要从事飞机数字化装配
仿真技术的研究,包含装配工艺的仿真
和生产线的仿真等。

一架飞机有大小十几个舱门,包含登机门、服务门、货舱门、应急门等。舱门结构设计复杂,连杆、铰链数量众多,机构运动过程多阶段,运动关系复杂多变。由于舱门上的机构运动关系复杂,如何将这些舱门安装到位一直是飞机装配的一个难点。为了理清舱门各个机构运动的原理,指导现场工艺人员更好地进行工艺分析,采用 CATIA 的 DMU 模块对舱门进行运动机构仿真分析^[1]。通过虚拟仿真技术的研究应用,验证

为了理清舱门各个机构运动的原理,指导现场工艺人员更好地进行工艺分析,采用 CATIA 的 DMU 模块对舱门进行运动机构仿真分析。通过虚拟仿真技术的研究应用,验证舱门机构运动,找出机构中的可调节量,能够指导工人现场安装调试,确保安装的顺利进行,缩短研制及安装周期。

舱门机构运动,找出机构中的可调节量,能指导工人现场安装调试,确保安装的顺利进行,缩短研制及安装周期^[2]。

民用飞机舱门结构特点分析

民用飞机舱门:指民用飞机上带铰链机构,供人员进出或作为舱段主要维护通道的开口。完整的舱门包含的主要功能有:开关功能、应急开启功能、安全性功能、滑体预位功能、指示功能、辅助功能等。

民用飞机舱门结构一般采用金属材料。由于结构厚度较高,没有内蒙皮,采用连接角片连接横纵梁,采用预变形设计,飞行中正常飞行压差下为 30% 压缩量,以保证良好的密封性能。

舱门结构方式主要有 2 种:外翻式打开方式与抛放式打开方式。外

翻式,如 ARJ 的货舱门、大客的应急门等,重力方向与舱门运动方向一致;抛放式主要为 ARJ 的应急门、大客的登机门等,舱门提升后与机身平行沿航向前方打开,各位置垂直提升高度有所不同。

舱门的开启过程一般分为 3 个阶段:首先是对舱门进行解锁;然后对开启手柄进行提升;最后是将门推开的过程。在整个过程中包含的主要机构有:提升机构、导向机构、平移机构、内手柄及齿轮盒、外手柄机构、扭矩杆机构、阵风锁机构、外伸机构、增压预防、内外手柄机构、滑梯启动机构、驱动机构等。

舱门机构的简化

机构由若干个相互联接起来的构件组成。机构中两构件之间直接接触并能作相对运动的可动联接,称

为运动副。机构每个运动模块里面包含若干个运动副。舱门机构运动仿真中涉及到的运动副有：固定副、旋转副、球面副、圆柱副、点线副、滑移副等。其中固定副、旋转副、圆柱副等运动副在舱门机构中形式单一也相对简单。在舱门机构中有些特殊形式的运动副，出现的概率高且相对复杂，以下将对这些特殊形式的运动副进行介绍。

1 特殊球面副

球面副是一种很常见的运动副，主要有3个特点：球面副连接2个连杆，有3个旋转自由度；球面副不能添加驱动，不能规定其运动极限^[3]；球面副的原点位于球和铰套的公共中心点，球面副没有方向，当创建球面副时，只需制定连杆和球面副的原点。

在舱门的机构中，存在一种特殊的机构，2个连杆没有球、铰套和公共中心点，图1为ARJ21货舱门中的一处机构所示，构件1的轴直径小

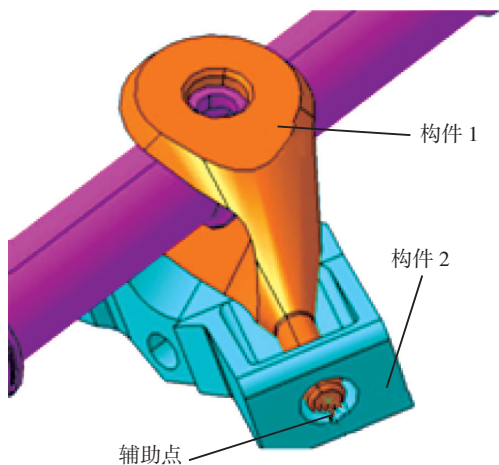


图1 特殊球面副

于构件2的孔直径，该轴能在孔中随意转动。研究发现这种结构的运动原理和球面副是相同的：两个构件间有3个独立的相对运动；具有3个旋转自由度；构件1在构件2的孔隙内做任意角度的旋转。因此，针对舱门机构中这种外形上完全不符合球面副的这类特殊机构，也定义为球面副。

由于两个构件没有公共中心点，在具体定义球面副的过程中需要添加辅助点，假设辅助点就是公共中心点。

2 高副

在平面运动副中，两构件之间的直接接触有3种情况：点接触、线接触和面接触。按照接触特性，通常把运动副分为低副和高副两类。

两构件通过面接触构成的运动副称为低副。根据两构件间的相对运动形式，低副又分为移动副和转动副；两构件通过点或线接触构成的运动副称为高副。如凸轮与尖顶推杆构成高副，如两齿轮轮齿啮合处也构成高副^[4]。

在CATIA的DMU模块中，有点线副、滑动曲线副、滚动曲线副、点面副4种高副，以点线副居多，其中还包含部分滑动曲线副。这类机构结构形式类似，在实际添加过程中容易混淆，不正当的使用会引起后续错误。针对舱门机构中经常用到的2种高副将做详细介绍。

2.1 点曲线副

点曲线副特点有：点线副约束第1个构件的一点在第2个构件上的某个方向上；点线副约束2个构件之间的2个平动自由度；定义的2个构件之间有3个旋转自由度和一个移动自由度；可以添加长度驱动；2个构件在运动过程中有公共点接触。

在ARJ21应急门的上位锁及大客登机门的阵风锁等多处出现点线副。如图2所示，构件1在构件2的某个平面上运动，在构件1的末端有一个突起的锥点，由于构件2的旋转轴和构件1

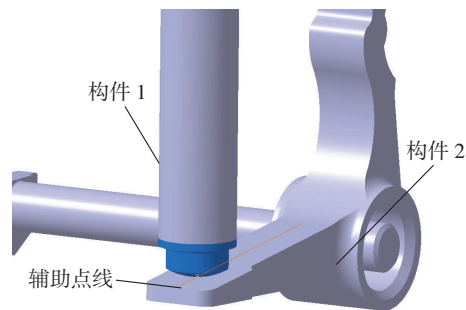


图2 点线副

垂直，在实际的运动过程中构件1的锥点始终都在构件2的某条直线上运动，即点线接触，将该类机构定义为点线副。

2.2 滑动曲线副

滑动曲线副约束一个构件上的一条线与另外一个构件上一条线始终接触，曲线必须是平面曲线，且2个曲线必须在同一个平面内；滑动曲线副约束了2个平动自由度和2个旋转自由度。

在大客阵风锁上出现滑动曲线副，如图3所示。构件2的插销在构件1的凹槽内滑动。在运动过程中，构件2的插销的整个圆柱面和构件1的凹槽面都有接触，且构件1和构件2始终有公共平面。在运动的任何状态下，选取其中一个公共平面与构件1和构件2求交线，得到2条相交的曲线——辅助曲线1和辅助曲线2。由于插销没有绕自身轴的转动，故符合滑动曲线副的定义条件，将此类机构定义为滑动曲线副。

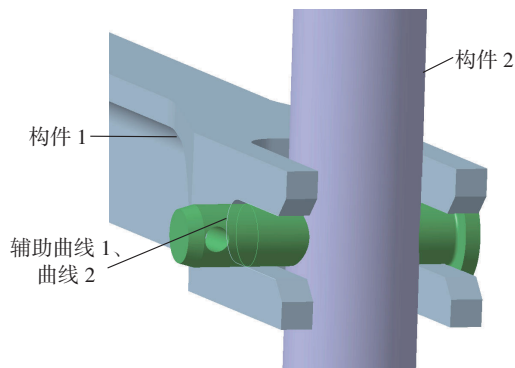


图3 滑动曲线副

复杂组合机构分析

机构每个运动模块中,各个运动副之间都是相互关联的,舱门机构中存在一些复杂机构组合体,在此选取2组进行介绍。

1 可调拉杆与虎克铰组合机构

虎克铰也称为万向铰,在CATIA的DMU模块中又称U型接头,允许2个构件有2个相对转动的自由度,它相当与轴线相交的2个转动副。虎克铰常用来传递2根相交轴之间的运动,它实质上是一个球面铰链4杆机构。当主动轴(相当于球面铰链四杆机构中的主动曲柄)以等速度 ω_1 转动时,其输出轴(相当于球面铰链四杆机构中的从动曲柄)则以变角速度 ω_2 连续转动。 ω_2 的大小在 $\omega_{2min}=\omega_1\cos\alpha$ 与 $\omega_{2max}=\omega_1/\cos\alpha$ 之间变动(式中 α 为输入轴与输出轴之间的夹角)。这种机构的优点在于当两轴之间的夹角略有变化时,传递并不中断,仅仅对两轴之间的瞬时传动比有影响。

在舱门机构中应用极为普遍,且总是和球面副成对出现,在登机门、应急门的解锁,舱门提升和舱门开启的过程中作为主要运动机构,如图4所示,该机构对应舱门开关功能里的提升机构。U型接头机构的特点是,可调拉杆两端的孔径远大于与之相连的轴径。构件2为可调拉杆,在实际安装过程中长度可调节。构件1与构件2之间为带夹角的转动,构件2与构件3也为带夹角的转动,但构件1和构件3的转动轴都是固定的,构件2起到了传递转动的作用。此时将构件1和构件2定义为虎克铰(U型接头),构件2和构件3定义为球面副,即能保证机构系统正常运动且无多余自由度。机构原理简图如图4(b)所示,图中的数字对应图4(a)中的构件序号。

2 带虎克铰的连杆机构

在登机门、应急门的舱门开启过程中有一类空间四连杆机构较为复

杂(见图5)。该机构对应舱门开关功能里的平移机构。在舱门打开过程中如图5(a)所示,三条辅助线的距离是保持不变的,再加上两个平行杆支座在空间上的位置是相对固定的,所以这4个无形之中存在的杆类似平行四连杆机构的4条杆。

连杆1与连杆3的孔径远大于

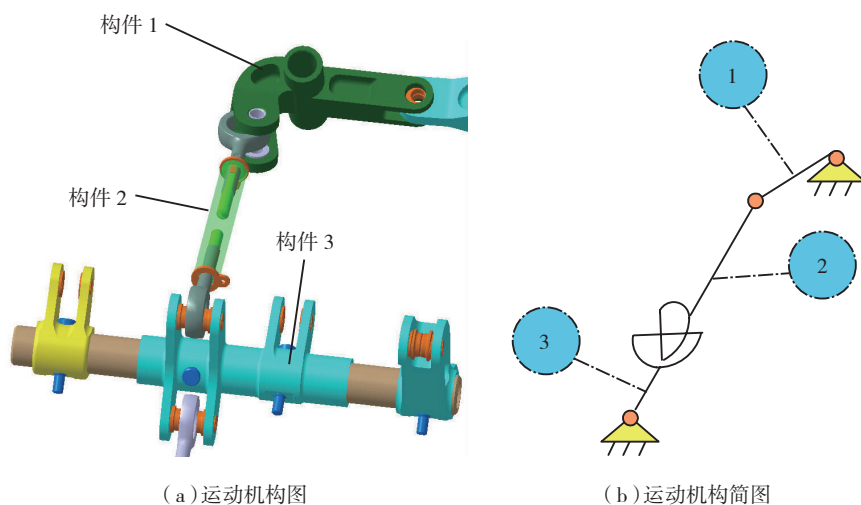


图4 U型接头和球铰机构

与之相连的轴径,构件1与构件3相对与左右两边的支座都在作带夹角的旋转,保证舱门沿外形曲线提升后与机身平行沿航向前方打开。参照可调拉杆与虎克铰组合机构里面提到的组合机构,在此将连杆1和连杆3与左右两边的支座都分别定义为虎克铰和球面副。故该组合机构为带虎克铰的平行四连杆机构。机构原理简图如图5(b)所示。

实例解析

参照以上提到的方法选用ARJ21

后,以应急门为例进行完整的机构运动仿真。ARJ21应急门的开启分为解锁、提升和推开3个过程,对应CATIA软件DMU模块中的3个机制,分别对3个机制进行运动机构分解,如图5所示,转换约束为运动副,添加驱动,运行仿真,最终得到整个舱门开启过程中的每个运动状态。

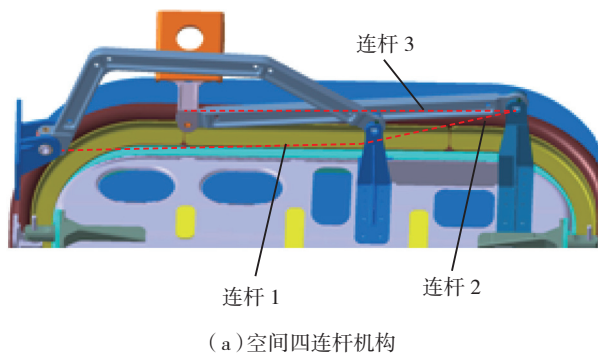


图5 舱门开启四连杆机构

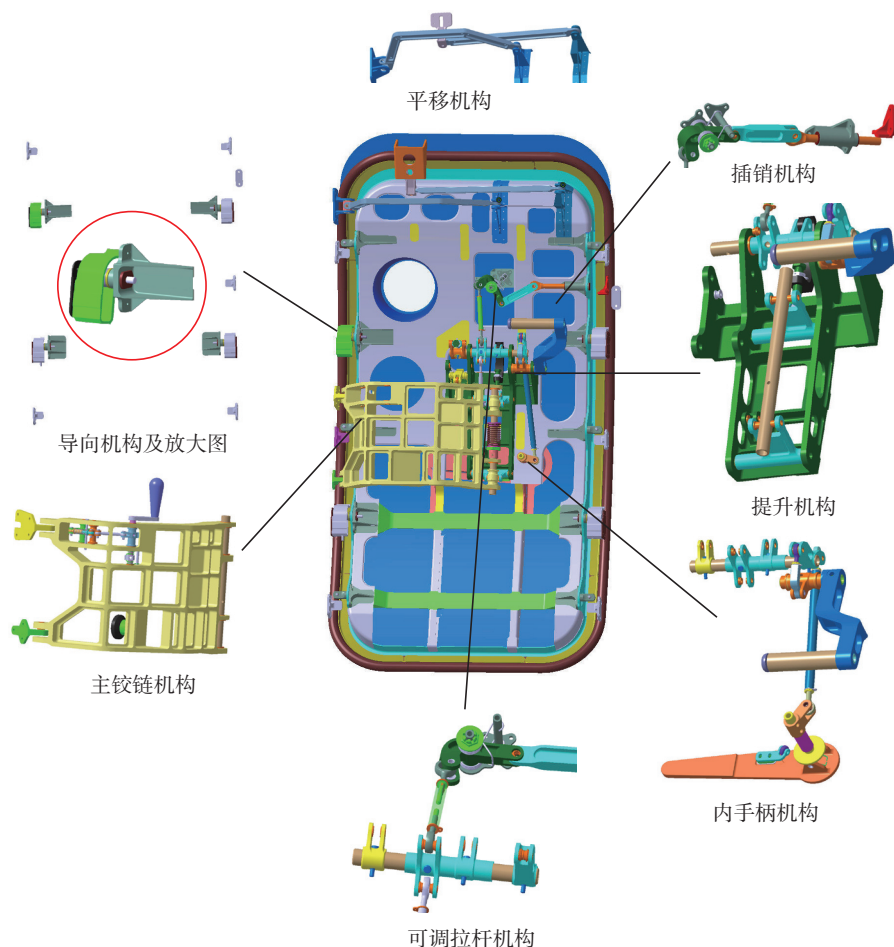


图6 应急门主要机构分解图

1 解锁机制仿真

解锁机制包含的机构主要有：内手柄机构、可调拉杆与虎克铰组合机构、插销机构等，机构详情如图6所示。

其中，在内手柄机构中有一套虎克铰和可调拉杆的组合机构以实现手柄的转动同时带动可调拉杆机构运动，带动插销机构水平移动将插销打开，从而实现解锁的过程。同可调拉杆机构相同，包含的运动副有：U型副、球面副、旋转副。插销机构里面主要有固定副、旋转副、棱形副（移动副）。

2 提升机制仿真

提升机制包含的机构主要有：导向机构、提升机构、平移机构、主铰链机构等。如图6所示，其中平移机构在此作为辅助运动，只作稍微的提升运动，并没有空间转动，主铰链机

构此时也作为辅助运动实现轴线的轻微转动。

内手柄机构在平移机构及主铰链机构的辅助运动下，对整个舱门进行提升，舱门在导向机构限定的轨迹下实现整体上升。在导向机构中包含高副的点线副。提升机构中包含平行四连杆机构、旋转副、圆柱副等。平移机构包含固定副、球面副、虎克铰（U型副）等。

3 推开机制仿真

推开机制包含的机构主要为平移机构，如图6所示。平移机构在此时不同于提升机制的作用，不仅只作上下方向辅助的运动，要实现舱门沿外形曲线提升与机身平行沿航向前方打开的作用。主铰链机构此时也作为主要的运动机构，实现舱门的轴向转动的运动。

推动内手柄机构，实现主铰链机构的轴线转动，在平移机构限定的轨迹下舱门实现完整开启。包含的运动副有：固定副、旋转副、圆柱副、虎克铰（U型副）。

结束语

通过对舱门的机构运动进行仿真技术研究，指导相关工艺人员对ARJ21应急门进行机构运动仿真分析；设计部门提出对舱门的结构件发生更改时，通过仿真查看舱门的整个运动过程中是否存在干涉；在ARJ21货舱门开展相关仿真应用，使工艺人员熟练掌握货舱门的机构运动原理，从而更好地指导现场工人调试安装；在大客各种舱门签图前进行机构运动仿真，帮助工艺人员理清舱门机构运动原理，检验产品设计是否合理，指导工艺人员进行产品的各种舱门的审图工作。

鉴于以上实用价值，民用飞机舱门机构运动仿真研究对制造部门具有重要意义。通过对这种方法的研究，并将其在制造部门推广让更多工艺人员学习运用，能减少飞机舱门安装过程中遇到的问题。目前民用飞机舱门机构运动仿真研究还处于初期阶段，后续将采用专业性更强的机构运动仿真软件ADMAS研究，考虑舱门自身的重力及其他载荷的影响，对它进行更深入的研究，能更好地解决实际问题^[5]。

参考文献

- [1] 尤春风. CATIA V5高级应用. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] 航空制造工程手册, 飞机装配. 北京: 航空工业出版社, 2010.
- [3] 李增刚. ADMAS入门详解与实例. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [4] 张志贤, 刘检华, 宁汝新. 虚拟装配环境下运动副自动识别方法. 计算机集成制造系统, 2011(01):62-68.
- [5] 李宏. 虚拟装配技术的研究现状与发展趋势. 现代制造工程, 2004(12):114-116.

(责编 三丰)