

# 飞机舱门开关机构数字化模型构建技术研究

吴扬<sup>1</sup>,张乐<sup>2</sup>,裘旭冬<sup>1</sup>,周石恩<sup>2</sup>,陆玥<sup>2</sup>,朱骏<sup>2</sup>

(1. 上海飞机设计研究院,上海 201210; 2. 上海无线电设备研究所,上海 201109)

**摘要:**根据飞机舱门开关机构工作时各零件之间的运动关系,构建连杆、凸轮等简单机构的复合数字化驱动模型,并进行运动形式的仿真,为其尺寸优化提供技术理论支持。应用 Visual Components 软件的机构建模模块,以简单机构数学模型推导为基础,逐层求解被动件与驱动件的实时位置关系,得到舱门整体开关过程的数学表达式,并在软件中实现可视化。通过与实际飞机舱门开关过程进行比对,验证了数字化驱动模型结果是真实有效的。

**关键词:**飞机;舱门;开关机构;数字化模型;机构建模;Visual Components

**中图分类号:**TH131.6 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)04-0136-03

## Digital Model Construction Technology Research of Aircraft Door Switching Mechanism

WU Yang<sup>1</sup>, ZHANG Le<sup>2</sup>, QIU Xudong<sup>1</sup>, ZHOU Shien<sup>2</sup>, LU Yue<sup>2</sup>, ZHU Jun<sup>2</sup>

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

2. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** As to the motion relationship between various parts of aircraft door switching mechanism, a digital model involving linkages and cam mechanisms is constructed and simulation in movement form is undertaken, which provides theoretical support for the structural optimization of components. Visual Components software is applied to construct mechanism modeling module. Based on the derivation of simple mechanism mathematical model, the real-time positional relationship between passive and driven parts is solved layer by layer, mathematical expression of door switching mechanism is obtained and its trajectory is visualized in the software. By comparing with motion results of actual aircraft cabin door, the digital model is verified to be true and effective.

**Keywords:** aircraft; cabin door; switching mechanism; digital model; mechanism construction; Visual Components

## 0 引言

飞机舱门机构系统是飞机的主要机构系统之一(图1),其能否完成预期的功能将直接关系到飞机的飞行安全性<sup>[1]</sup>。作为舱门系统的主要测试门类之一,舱门开关机构联动姿态测试是一项流程复杂、工作量大的工程。通过仿真模拟与物理测试相结合的方式,并且未来逐步以虚拟试验为主,物理试验为辅,是提高测试效率的有效途径<sup>[2]</sup>。在投产和正式试验启动前对试验过程进行预演和分析,能够提高试验设计的准确性,对于减少试验成本、缩短试验件结构优化周期具有重要意义<sup>[3]</sup>。



图1 飞机舱门示意图

传统机构运动仿真方法大都是以特定运动副来约束组成零件,一般只适用于较为简单的机构,而对于飞机舱

门开关机构这种零件层级多、串并联混合的复杂系统则难以模拟<sup>[4-5]</sup>。本文通过构建简单机构的数学模型及机构间的串并联关系,以驱动件运动参数为自变量,逐层求解各个被动件运动表达式,可视化显示任意时刻的舱门状态。

## 1 系统介绍

### 1.1 飞机舱门开关机构

飞机舱门开关机构由凸轮手柄传动机构、铰链臂机构、锁钩开闭机构等众多子机构组合而成<sup>[6-7]</sup>,如图2所示。本文研究对象舱门为外开式,整个开门过程包括舱门抬升和舱门平移两个步骤<sup>[8]</sup>。打开后的舱门与机身平行,其机构状态如图3所示。

### 1.2 Visual Components 软件系统

所采用的软件系统为 Visual Components 软件,简称 VC。VC 是全方位的数字化工厂仿真软件,集离散物流仿真模拟、机器人离线编程以及 PLC 虚拟调试三大功能于一体。VC 支持绝大多数的 CAD 格式文件导入,包含丰富的组件库,具有独创的 PnP 即插即用功能,可实现机构组件的属性、行为定义和运动仿真。

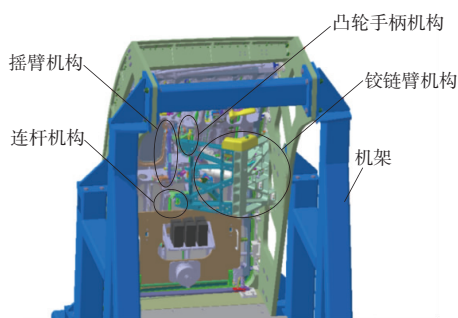


图2 舱门开关机构主要组成部分



图3 舱门开启后状态

## 2 飞机舱门模型前处理

### 2.1 舱门 CAD 模型导入

飞机舱门一般是在 Catia 等专业建模软件中创建,然后导入到 VC 软件中。为防止结构树错乱以及格式转换问题,将 Catia 模型分为多个 cgr 格式部件结构,再导入 VC 软件中。以舱门把手为例,在 VC 软件界面中选择导入“几何元”选项,如图 4 所示。在 VC 软件的“建模”模块,可以看到把手部件的结构树下包括多个子实体。由于后续整个把手保持相同的运动,需使用“组合”功能将把手对应实体部分合并为一个实体,如图 5 所示。



图4 CAD 零件导入 VC 界面

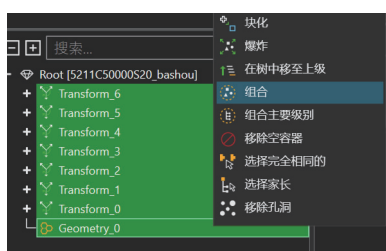


图5 部件结构几何实体合并

### 2.2 机构关节提取及层级确定

选择把手合并后的实体并利用“提取链接”功能生成结构关节,它包含部件坐标、部件名称、部件偏移量以及关节属性等属性,如图 6 所示。将把手作为主动驱动件,运动方式为旋转,将把手零件坐标系调整至  $y$  轴与旋转轴重合,此时旋转方向为  $+y$  轴,新建伺服控制器 Servo Controller 来进行驱动,关节名称为 J1。



图6 把手关节提取与属性编辑

舱门开关机构是由众多子机构通过串并联方式组合完成舱门的开启和关闭。图 7 为舱门铰链臂子机构层级图。通过对多层级的机构串并联关系的分析,确定从动件运动的相对关系,才能够理清舱门开关机构工作机理,又有利于更高层级从动件运动表达式的求解。

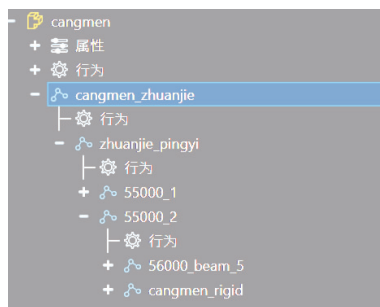


图7 舱门开关机构整体层级表示

## 3 机构关节运动表达式求解

### 3.1 凸轮曲柄机构

图 8 是由把手、内凸轮部件、摇臂以及其他固定件组成的凸轮曲柄机构。内凸轮部件与手柄具有相同的运动状态。第一阶段由于内凸轮前半部分圆弧与把手旋转轴线一致,此时摇臂末端销柱(与摇臂运动形式一致)保持不动;第二阶段则驱使销柱沿内凸轮后半直线部分运动,表现为摇臂绕其轴线的旋转运动。以下求解第二阶段求解摇臂的运动表达式。

将凸轮曲柄机构内凸轮和摇臂投影到二维平面,如图 9 所示,其中  $O_1$  和  $O_2$  分别为摇臂和内凸轮的旋转中心,以  $O_2$  为圆心,  $O_2O_1$  为  $y$  轴建立坐标系。第二阶段初始状态时,  $C$  点和  $A$  点分别为内凸轮直线部分的起点和终点;当把手旋转一定角度  $J_1$  ( $\angle AO_2B$ ) 时,  $C$  点和  $A$  点分别运动到  $E$  点和  $B$  点,此时销柱由  $C$  点运动到  $D$  点,  $\angle CO_1D$  (记



图8 凸轮曲柄机构

为 $\theta$ )即为摇臂的旋转角度。定义各个尺寸和间距如下:  
 $O_1O_2=h, O_2C=O_2E=R_1, O_2A=O_2B=R_2, O_1C=O_1D=R_3,$   
 $AC=BE=L, \angle AO_2C=\angle BO_2E=\alpha, \angle CO_2O_1=\beta。$

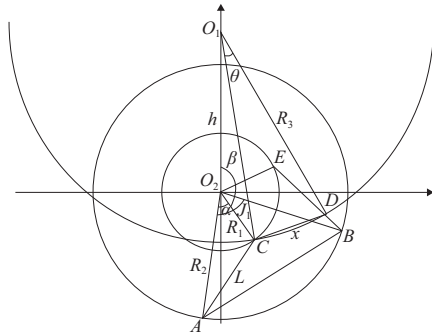


图9 凸轮曲柄机构二维投影分析图

通过图9可以看出, $\theta$ 的大小取决于线段 $CD$ 的长度 $x$ ,可以根据余弦定理求解,如式(1)所示。在VC软件中,定义了三角函数 $sssad$ 用来快速求解三角形参数,则式(1)可以转化为式(2)的形式。点 $C$ 和点 $A$ 的坐标位置可通过测量固定长度项后计算获得,如式(3)所示。

$$\theta = \arccos \frac{R_3^2 + R_3^2 - x^2}{2 \cdot R_3 \cdot R_3} \quad (1)$$

$$\theta = sssad(x, R_3, R_3) \quad (2)$$

$$\begin{cases} [x_C, y_C] = [R_1 \cdot \sin(180-\beta), -R_1 \cdot \cos(180-\beta)] \\ [x_A, y_A] = [-R_2 \cdot \sin(\alpha+\beta-180), -R_2 \cdot \cos(\alpha+\beta-180)] \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中的角度 $\alpha$ 和 $\beta$ 为定值,可用尺寸参数计算获得,如式(4)所示。

$$\begin{cases} \alpha = sssad(L, R_1, R_2) \\ \beta = sssad(R_3, R_1, h) \end{cases} \quad (4)$$

根据旋转变换方法,销柱从初始位置 $(x_D, y_D)$ 随摇臂转动角度 $\theta$ 后,到达新的位置 $(x'_D, y'_D)$ ,二者存在式(5)所示关系,其中 $(x_0, y_0)$ 为旋转中心坐标。

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D - x_0 \\ y_D - y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_D - x_0 \\ y'_D - y_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

销柱初始位置在 $AC$ 连接的直线上,销钉与摇臂旋转中心的距离保持不变,即:

$$y_D = \frac{y_C - y_A}{x_C - x_A} \cdot x_D + \left( \frac{y_C - y_A}{x_C - x_A} \cdot x_C \right) \quad (6)$$

$$(x'_D - x_{o_1})^2 + (y'_D - y_{o_1})^2 = R_3^2 \quad (7)$$

联立方程式(5)、式(6)、式(7)即可求得第二阶段摇臂旋转角度 $\theta$ 随把手转角 $J_1$ 的数学表达式,而第一阶段它的值为0,因此其运动方式为分段函数,曲线如图10所示。

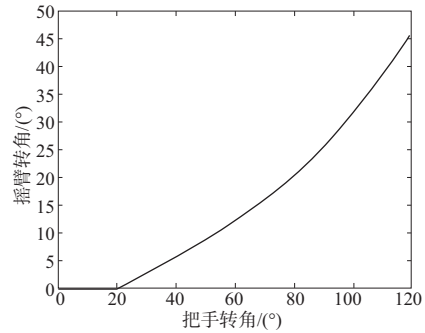


图10 摇臂随把手转动曲线图

### 3.2 四连杆机构

图11是由摇臂 $AB$ 、连杆 $BC$ 和套筒 $CD$ 组成的四连杆机构,在 $ABCD$ 平面内,摇臂的转动中心 $A$ 和套筒的转动中心 $D$ 相对位置保持不变,初始状态时四连杆长度 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 以及各边之间的夹角都可以通过测量得到, $t=0$ 时刻摇臂 $AB$ 与 $AD$ 的夹角大小记为 $A_0$ 。当摇臂 $AB$ 驱动一定角度 $A$ (与3.1节的角度 $\theta$ 一致)时,问题转化为求解连杆 $BC$ 和套筒 $CD$ 的对应运动表达式。由于连杆 $BC$ 绕 $B$ 点运动角度参考对象为摇臂 $AB$ ,因此连杆 $BC$ 与摇臂 $AB$ 间层级关系为串联;套筒 $CD$ 绕 $D$ 点运动角度参考对象为大地,因此套筒 $CD$ 与摇臂 $AB$ 间层级关系为并联。

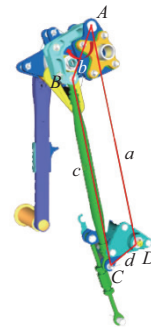


图11 舱门提升四连杆机构

四连杆机构的运动求解主要是通过余弦定理,假设 $BD$ 的长度为 $e$ ,在运动过程中 $e$ 的大小会随着摇臂摆动角度而变化。当摇臂转动角度 $A$ 时(此时摇臂 $AB$ 与 $AD$ 的实际夹角为 $A+A_0$ ),二者存在关系:

$$e = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos(A+A_0) \quad (8)$$

连杆 $BC$ 转动角度 $B$ 由 $\angle DBA$ 和 $\angle DBC$ 相加得到,因此可以求得表达式,如式(9)所示。同理,套筒 $CD$ 的转动角度 $D$ 表达式如式(10)所示。

$$B = \arccos \frac{c^2 + e^2 - d^2}{2 \cdot c \cdot e} + \arccos \frac{b^2 + e^2 - a^2}{2 \cdot b \cdot e} - B_0 \quad (9)$$

$$D = \arccos \frac{d^2 + e^2 - c^2}{2 \cdot d \cdot e} + \arccos \frac{a^2 + e^2 - b^2}{2 \cdot a \cdot e} - D_0 \quad (10)$$

(下转第145页)

设定系统中支路 1 换向阀输入信号为 40, 模拟支路卡死故障工况, 并联压力切断阀设定的压力为 20 MPa, 其他参数保持不变。仿真得到改进前后 LUDV 负载敏感系统各支路速度变化曲线如图 10 所示。改进前 LUDV 负载敏感液压系统中速度发生了突变, 降低到 0.038 m/s。改进后 LUDV 负载敏感液压系统在支路 1 卡死时, 仍能保持支路 2 运行速度恒定。仿真结果表明, 通过并联压力切断阀优化设计方案, 解决了速度突变的问题, 达到了优化效果。

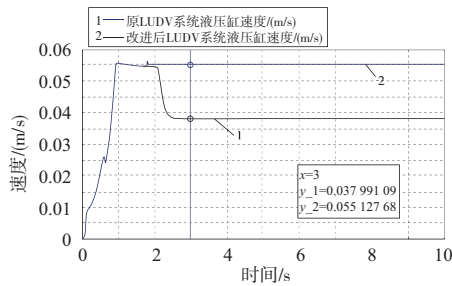


图 10 改进前后 LUDV 系统液压缸速度变化曲线

### 3 结语

本文在对两种负载敏感回路动态特性及故障现象分

析基础上, 对 LUDV 负载敏感液压系统进行了优化设计, 提出了一种新的支路并联压力切断阀的改进 LUDV 负载敏感液压系统, 并利用 AMESim 仿真软件建立仿真模型, 进行了仿真分析。仿真结果表明: 通过并联压力切断阀优化设计方案, 解决了 LUDV 负载敏感液压系统支路速度突变的问题, 达到了优化效果。所得结论为阀后补偿负载敏感液压系统的优化设计提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 刘本通, 姚瑶, 姜鹏, 等. 树莓采摘机闭式静液行走系统研究[J]. 液压与气动, 2018(9): 108-113.
- [2] 虞雷. 履带式果园作业平台液压系统设计优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [3] 扈凯, 张文毅, 余山山, 等. 插秧机升降液压缸位置控制系统设计与仿真[J]. 农机化研究, 2017, 39(3): 165-169.
- [4] 陈晓. 基于 AMESim 的 M4 系列负载敏感比例多路阀动态特性的研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(17): 192-197.
- [5] 梁全, 谢基晨, 聂利卫. 液压系统 Amesim 计算机仿真进阶教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [6] 付永领. AMESIM 系统建模和仿真: 从入门到精通[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [7] 徐学文, 张洪信, 赵清海. 基于 AMESim 的轴向柱塞泵柱塞组件件力学分析[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(5): 123-125.

收稿日期: 2021-01-20

(上接第 138 页)

在 VC 软件中, 定义了特定的函数 sasssa1 用来快速求解四连杆机构参数, 连杆 BC 转动角度 B 和套筒 CD 的转动角度 D 可以表示为式(11)。

$$\begin{cases} B = \text{degree} \{ \text{sasssa1} [ a, \text{radian} (A+A_0), b, c, d ] \} - B_0 \\ D = \text{degree} \{ \text{sasssa1} [ b, \text{radian} (A+A_0), a, d, c ] \} - D_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中 degree 和 radian 分别是 VC 软件中弧度转角度和角度转弧度的函数。

对于存在“交叉”现象的特殊四连杆结构(图 12), 由于使用余弦定理得到的表达式与式(8)和式(9)形式不一致, 因此不能直接使用四连杆机构计算函数 sasssa1, 可通过两个三角函数 sssad 组合求解。

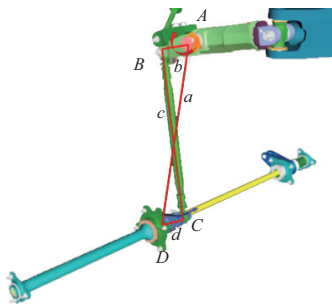


图 12 “交叉”四连杆机构

在“交叉”四连杆机构中, BD 长度 e 与式(7)完全一致, 连杆 BC 转动角度 B 由  $\angle DBA$  和  $\angle DBC$  相减得到, 同理, 套筒 CD 的转动角度 D 由  $\angle BDC$  和  $\angle BDA$  相减得到, 将其用 VC 软件自带的 sssad 表示, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} B = \text{ssad} ( a, b, e ) - \text{ssad} ( d, c, e ) - B_0 \\ D = \text{ssad} ( c, d, e ) - \text{ssad} ( b, a, e ) - D_0 \end{cases} \quad (12)$$

### 4 结语

本文利用简单机构的复合构建了舱门开关机构的数字化模型, 以表达式形式准确表示任意时刻机构组成零部件的所在位置, 实现舱门开关过程的可视化。结果表明: 舱门提升臂、摇臂等关键结构件随把手转动的角度与实际一致; 且舱门提升高度以及平移幅度也与测量结果相同; 证明了本文方法能够准确模拟飞机舱门开关情况。

#### 参考文献:

- [1] 杨小军. 民用飞机舱门提升原理分析研究[J]. 山东工业技术, 2017(19): 275-276.
- [2] 汪性武. 登机门综合设计技术研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2009(3): 18-21.
- [3] 田子阳, 高志慧, 王明. 舱门展收机构运动与结构参数优化设计[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(2): 27-31.
- [4] 庞微, 卢鹤, 张涛, 等. 飞机舱门机构运动仿真分析技术研究[J]. 航空制造技术, 2012, 55(6): 84-87.
- [5] 马超. 组合机构在民用飞机舱门设计中的应用[J]. 现代工业经济和信化, 2015, 5(8): 57-59.
- [6] 董萌. 民用飞机前起落架舱门“拉杆—摇臂”式机构建模与优化[J]. 装备制造技术, 2014(8): 112-113, 116.
- [7] 王楠. 某型飞机舱门机构优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [8] 赵小龙. 基于 CATIA 的客机舱门提升机构设计与仿真[J]. 飞机设计, 2016, 36(5): 39-42.

收稿日期: 2020-11-23