

# 电传飞控驾驶杆操纵系统的 动力学仿真分析

## The Kinetics Simulation of Fly-by-Wire Aircraft Control Column System

田金强 薛瀛 郭建伟 / Tian Jinqiang Xue Ying Guo Jianwei

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

对电传飞控驾驶杆操纵的机械传动部分采用 CATIA 和 LMS/MOTION 动力学仿真软件进行动力学仿真, 对该操纵系统的杆力、杆位移及阻尼特性进行分析, 提供直观和形象的杆力信号传递过程, 同时验证其提出的设计参数的正确性和合理性。

**关键词:** 电传飞控; 驾驶杆; 动力学仿真; CATIA; LMS/MOTION

[Abstract] This article uses CATIA and LMS/MOTION (kinetics simulation software) to simulate the motion and force characteristic of Fly-by-Wire aircraft control column system. It can support engineers to get the force and motion transmission process directly and visually and it also can validate the design rationality during the development progress.

[Key words] Fly-by-wire; Control Column; Kinetics Simulation; CATIA; LMS/MOTION

## 0 引言

驾驶杆的杆力、杆位移特性的好坏将直接影响飞机俯仰品质。飞机的驾驶杆用来控制升降舵, 对飞机进行俯仰操纵, 驾驶杆行程与舵面行程具有对应关系, 飞行员可以观察驾驶杆行程判断舵面行程。过去大多数飞机驾驶杆都是通过连杆、摇臂、钢系、滑轮机构操纵舵面运动的。在现代电传飞机中驾驶杆已经不需要直接连接舵面, 通过拉杆摇臂运动, 将机械信号通过传感器转变为电信号发往作动器, 使舵面运动<sup>[1]</sup>。

因此, 在驾驶杆机构的设计阶段, 对操纵系统进行动力学仿真, 根据结果分析其操纵特性, 可提前发现问题并对相关方案进行修改; 在试验阶段, 可利用试验结果对仿真结果进行验证, 仿真结果也能给予操纵系统试验提供有力的支持。

本文以多体动力学理论为基础, 应用机械系统仿真软件 LMS/MOTION, 建立了电传飞机飞控驾驶杆操纵系统动力学模型, 对驾驶杆、感觉力和传感

器系统运动学动力学进行了动态仿真。

## 1 电传飞控驾驶杆系统介绍

### 1.1 杆力的组成

由于电传飞机不能从舵面直接感受到舵面载荷, 为了还原真实的飞机操纵感受, 让飞行员直观地感受飞机的状态, 避免飞行员出现误操纵影响飞机安全, 所以合理的感觉力设计是电传飞机的一个重要组成部分<sup>[2]</sup>。对于目前主流的设计思路, 电传飞机的杆力感觉系统主要包括静态感觉力系统和动态感觉力系统<sup>[3]</sup>。

静态感觉力系统与操纵位移有关系, 主要包括: 弹簧力、启动力和动摩擦力, 如图 1 所示。

启动力, 又称定中力, 具有操纵器件维持中立位置的特性。启动力主要来自机械系统本身的静摩擦力, 例如飞行员操纵驾驶盘由静止到运动会产生一个操纵力, 该力就是启动力。

弹簧力, 用于模拟飞行员因操纵位移的变化产生的舵面载荷变化。其本质是由于弹簧的形变引

起的,操纵位移越大所需的操纵力越大。

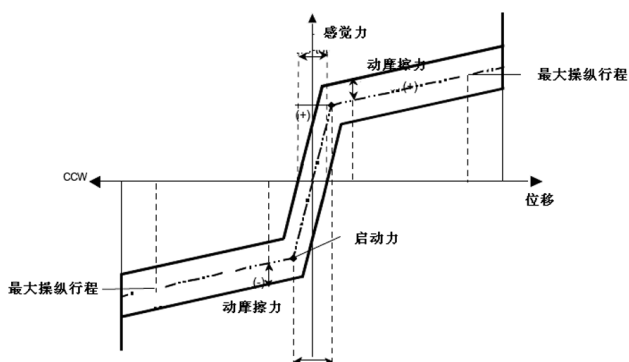


图1 感觉力包线

动摩擦力是系统机械特性所决定的,与接触表面的粗糙程度和相对压力有关,一般来说操纵力越大,动摩擦力越大,感觉力包线就越宽。

动态感觉力系统主要是阻尼力,与操纵速度有关系,运动速度越大阻尼力越大,感觉力包线就越宽,如图2所示。

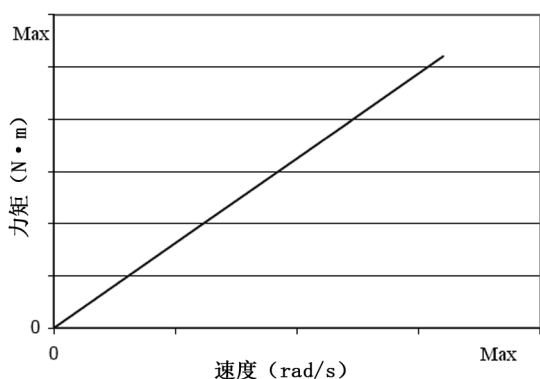


图2 阻尼特性图

## 1.2 杆的运动结构

驾驶杆和感觉力及传感器系统之间为机械连接,将驾驶杆的位移转化为传感器电信号,感觉力系统中的力也通过拉杆传递到驾驶杆上面,如图3所示。

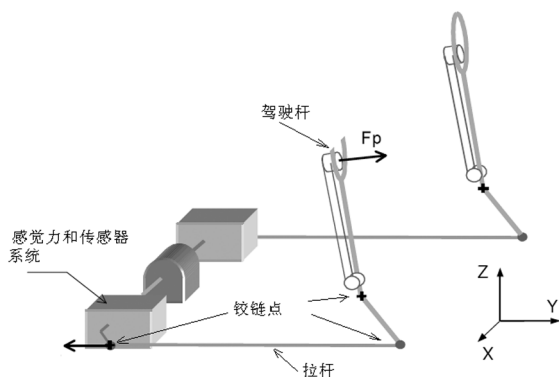


图3 驾驶杆系统结构简图

## 2 仿真模型的建立

### 2.1 仿真的流程

建立机械系统的动力学模型的步骤主要包括以下6个方面<sup>[4]</sup>：

(1)CAD建模,即确定操纵部件的质量、质心和转动惯量;

(2)运动学定义,即定义各部件之间的约束关系;

(3)动力学定义,即定义力,刚度和阻尼;

(4)柔性体定义,即对于变形量会影响动力学特性的部件,需要定义为柔性体,再放入系统中与其他部件进行刚柔耦合仿真;

(5)求解,即求解所关心部件的速度,精度以及系统的稳定性;

(6)后处理,即对求解出的数据结果进行可视化处理。

### 2.2 运动学定义

为减少仿真运算量,将与该系统连接的结构支架省略。因此,在定义约束时,首先应将支架相连的点定义为“与地固连”。之后,定义部件与部件之间的运动副约束。分析系统在XZ平面内运动,各连接点在YZ平面内均为旋转运动。因此,主要用到的运动副为:圆柱副(Cylindrical Joint)和旋转副(Revolute Joint)。运动副分布如图4所示。

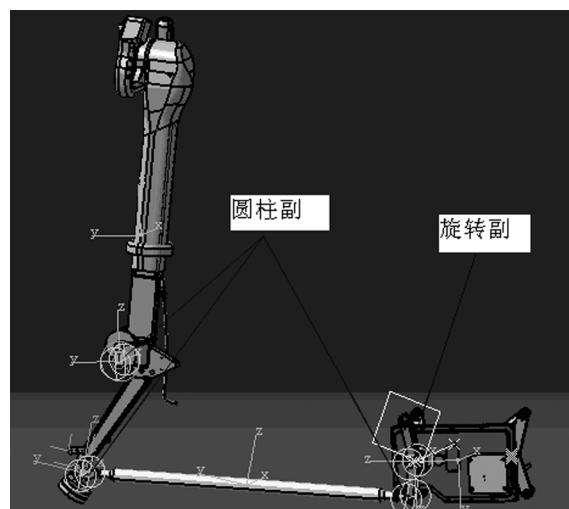


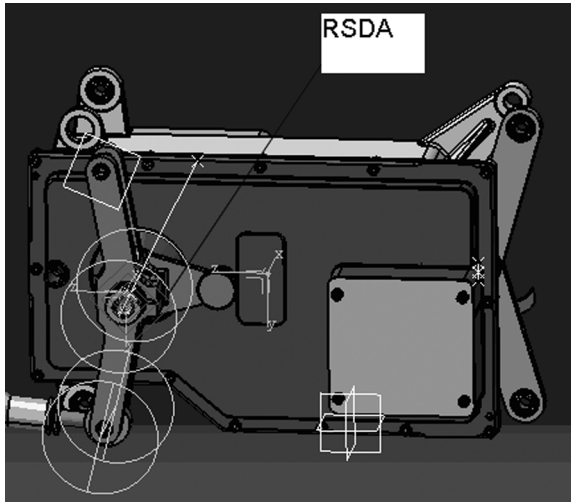
图4 驾驶杆操纵系统运动副约束分布

### 2.3 动力学定义

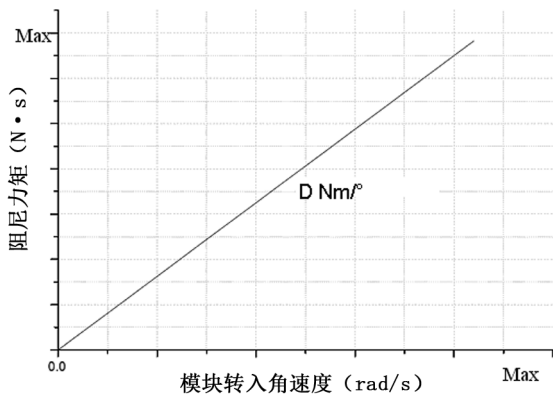
本文中在对模型进行动力学定义时,由于摩擦力和启动力影响较小将其忽略。

在感觉力提供摇臂旋转中心处增加刚度系数

为  $K \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$  的旋转弹簧力特性 (RSDA), 定义了弹簧力特性的模型如图 5(a) 所示。由于 LMS/Motion 中没有固定的阻尼特性可以选择, 因此选择三个特征点自定义直线, 并选择 AKIMA 插值 (线性插值并可预判出区间外的点)。阻尼特性同样在 RSDA 处定义, 添加的阻尼特性如图 5(b) 所示。



(a) 弹簧动力学定义



(b) 阻尼力风力学定义

图 5 弹簧力(a)和阻尼力(b)的动力学定义

### 2.4 驱动方程定义

在该系统中, 驾驶杆为驱动件, 其运动方式为绕旋转中心转动。因此, 在驾驶杆圆柱副处施加角位移正弦驱动。驱动方程为:  $\theta = 5 \times \sin(1.5t)$ , 驱动施加结果如图 6 所示。

在添加了旋转中心正弦驱动后, 可在模型中更改驱动方程。本文通过修改驾驶杆角速率来控制驾驶杆的运动。

## 3 仿真结果与分析

为直观地观察驾驶杆的运动情况, 首先对建立好

的系统进行运动仿真, 系统部件的运动学仿真可以有效地检查运动部件与结构之间的间隙, 从而有效地避免出现干涉或间隙过小的情况。目前, 不止动力学仿真软件提供该功能, 大多数 CAD 软件如 CATIA 也具备该功能<sup>[5]</sup>。驾驶杆的运动包线如图 7 所示。

建立好模型之后, 可以对其进行动力学求解。本文主要针对杆力杆位移特性, 驾驶杆和传感器信号之间的传动比进行了求解和分析。

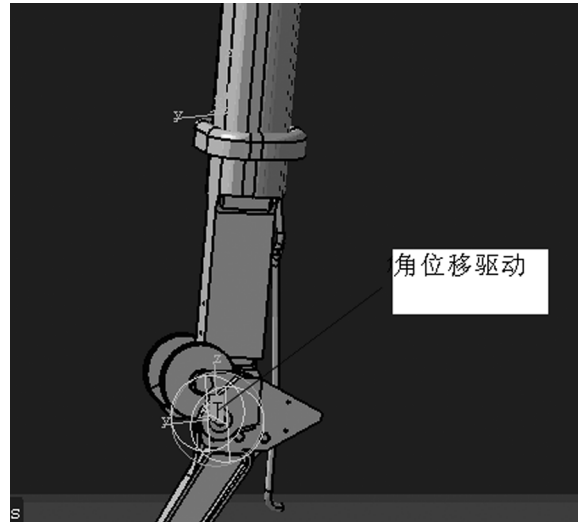


图 6 系统驱动方程定义

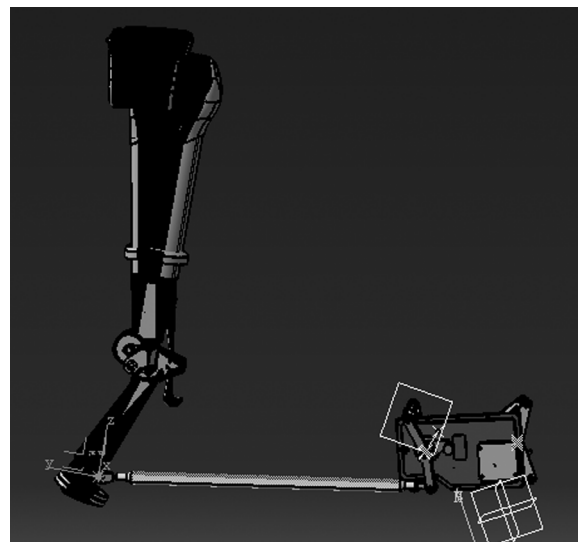


图 7 驾驶杆运动包线

### 3.1 感觉力系统输入轴位移力特性

驾驶杆杆力杆位移特性闭环曲线如图 8 所示。两组曲线分别是对应驾驶杆不同角速率情况下的力矩输出。可以看出, 在驾驶杆输入角速率增加时, 由于感觉力系统的阻尼特性, 则在速率较大的情况下提供更大的输出力矩。

(下转第 56 页)

壁板蒙皮/缘条界面的失效,在此基础上加入复合材料 Hashin 失效准则研究对接结构的承载能力,并校核紧固件强度,最终得出对接结构的失效模式,从而为复合材料关键连接区的细节设计提供一种思路。

#### 参考文献:

- [1] 杨乃宾, 章怡宁. 复合材料飞机结构设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 144-145.
- [2] 张讯. 国外民用客机外翼、中央翼对接结构综述与分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2009(3): 1-3.
- [3] 姜云鹏, 岳珠峰. 单剪螺栓连接复合材料叠层板螺栓孔周边应力场分布[J]. 机械强度, 2006, 28(2): 271-275.
- [4] I. S. Raju, R. Sistla and T. Krishnamurthy. Fracture me-

chanics analyses for skin-stiffener debonding [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 54(3):371-385.

[5] Jeff W. H. Yap, Murray L. Scott, Rodney S. Thomson, et al. The analysis of skin-to-stiffener debonding in composite aerospace structures [J]. Composite Structures, 2002, 57:425-435.

[6] R. Jones, H. Alesi. On the analysis of composite structures with material and geometric non-linearities [J]. Composite Structures, 2000, 50:417-431.

[7] Q. D. Yang, K. L. Rugg, et al. Failure in the junction region of T-stiffeners: 3D-braided vs. 2D tape laminate stiffeners [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40: 1653-1668.

[8] 杜凯, 矫桂琼, 王翔. 含离散源损伤复合材料加筋板的拉伸特性[J]. 复合材料学报, 2008, 25(4): 182-186.

(上接第 28 页)

### 3.2 操纵系统传动比

在系统最初设计时,系统往往将输入力和位移的关系设计成为线性的关系。然而在机械系统中,尤其是存在杆系机构的系统,其输入位移和传感器位移的关系通常都是非线性的。因此,在初期使用仿真的手段对位移特性进行判断是非常有用的。

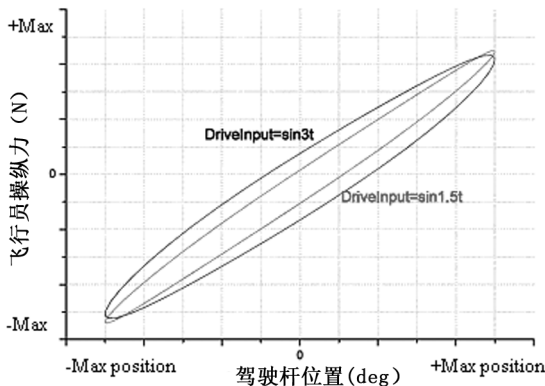


图 8 驾驶员杆位移和飞行员操纵力闭环曲线

在杆操纵系统中,由于传感器系统内部为齿轮传动,可认为从输入轴到感觉力弹簧之间的传动比是线性的,即传感器摇臂的角位移输入和力矩输出之间的关系是线性的。因此,只需要对驾驶员杆到传感器输入轴之间的传动比进行仿真和分析。

系统传动比  $\gamma$  = 驾驶员杆位置/传感器输入轴摇臂位置,但由于驾驶员杆位置为 0 时,对应传感器输入轴摇臂也为 0,此时无法求得系统传动比。因此,在仿真时使用驾驶员杆旋转角速率和模块输入轴角速率之比进行计算。驾驶员杆位置和系统传动比对应关系

如图 9 所示。可以看出,驾驶员杆操纵系统的传动比呈非线性,且最大传动比位于驾驶员杆中立位。

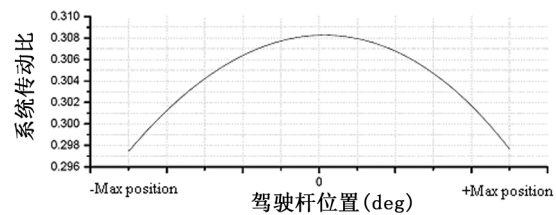


图 9 驾驶员杆位置和系统传动比对应关系

## 4 结论

本文通过对驾驶员杆纵向操纵系统的动力学仿真结果的分析,并将结果与真实台架试验分析报告对照,证明建立的系统模型是能反应真实的系统运动学和动力学特性的;同时,经过对模型的反复修改和优化,进一步深入了解操纵系统的特性,也充分认识到动力学仿真对于操纵系统的重要性。

#### 参考文献:

- [1] 林丰俊. CRJ200 飞机飞行操纵系统设计分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2001(4): 32-39.
- [2] 李浩, 王海燕. 电传操纵系统在民用客机中的新发展[J]. 中国民航学院学报, 2000(6): 8-11.
- [3] 宋祥贵, 张新国. 电传飞行控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003, 1.
- [4] 杨绿云, 郭飞. 基于 simmechan ics 的六杆机构动力学仿真[J]. 华北水利水电学院学报, 2010(8): 86-88.
- [5] 李苏红, 刘记. 基于 CATIA V5 的四连杆机构参数化设计及其运动仿真[J]. 长春理工大学学报, 2009(6): 181-183.