

某型飞机货舱门操作力分析与优化

Analysis & Optimization about Operating Force of the Cargo Door In a Certain Type Aircraft

罗涛 张引妮

(中航西飞民用飞机有限责任公司、西安、710089)

摘要: 本文以 HyperWorks 软件中的 MotionView/MotionSolve 及 HyperStudy 模块为基础, 通过对某型飞机货舱门机构进行多体动力学建模分析, 找出机构的薄弱和不足之处, 并对机构交点和气弹簧参数进行优化。应用表明通过多体动力学建模, 并经过实物对标和调试能够准确地模拟舱门机构的运动过程; 通过优化设计技术, 可以使舱门机构的目标性能得到优化。

关键词: 货舱门 多体动力学 分析优化 MotionView

Abstract: Based on the MotionView/MotionSolve and the HyperStudy of HyperWorks, this article found weaknesses of the mechanism by modeling and analyzing multi-body dynamics models of cargo door in a certain type aircraft, and optimized the points of the mechanism and the parameter values of gas spring. According to the multi-body dynamics modeling and debugging with the real cargo door, this application shows the accurate movement of the door mechanism. Meanwhile, with the optimization, the performance of the door mechanism can be improved and achieved.

Key words: cargo door, multi-body dynamics, analysis & optimization, MotionView

1 概述

舱门是民用飞机机身中的重要且特殊的运动部件, 而货舱门是某型飞机机身舱门中重要的部件, 它的主要功能是提供乘客行李装载的通道及应急撤离通道。

使用 HyperWorks 软件的 MotionView 模块建立货舱门的多体动力学模型, 根据货舱门开启和关闭的运动原理, 分别建立内手柄操纵舱门解锁和锁定及操作推杆打开和关闭舱门时的分析工况。另外根据货舱门实际使用情况, 通过调整锁定机构部分部件的安装方式后模拟仿真, 从而找出舱门解锁和锁定时手柄力值过大的原因。同时, 通过利用 HyperStudy 优化模块对开启机构交点坐标和气弹簧参数同时进行优化, 为气弹簧研制提供参数指标, 使货舱门满足开启和关闭力值的要求。

2 多体动力学模型的建立

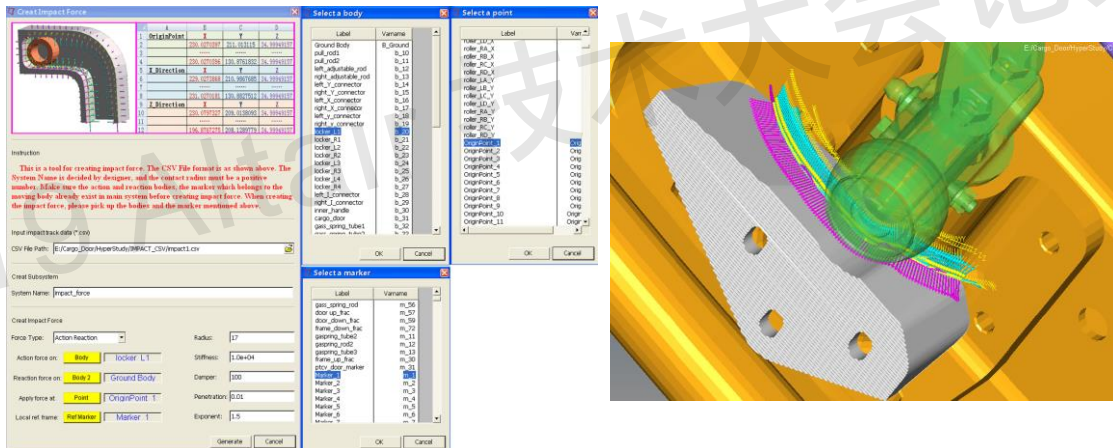
由于货舱门的锁定机构和开启机构是两套相对独立的运动机构，且操作方式关联性小，因此，将舱门解锁/上锁过程和打开/关闭过程分别建立多体动力学模型进行分析，这也有利于后续开启机构铰点和气弹簧参数的优化设计。

2.1 货舱门解锁/上锁多体动力学建模

货舱门解锁/上锁多体动力学模型中共有 40 个运动体，60 个运动副（其中包括 1 个点线副和 1 个耦合副），1 个扭簧，5 个阻尼器（即 5 根气弹簧的阻尼特性），8 组接触力（即 8 组滚轮与锁座的碰撞力），10 对作用力与反作用力（其中包括 1 对门框对密封带的挤压力、1 对门框对密封带的摩擦力、1 对外手柄与手柄座的碰撞力、2 对门体挡块与门框挡销的碰撞力、5 对气弹簧缸体与活塞的二线力），1 个内手柄角位移驱动。

A. 滚轮与锁座接触力创建

滚轮与锁座间的接触力是以子系统方式呈现的，共有 8 个子系统，每个子系统中创建了 100 个碰撞力，每个碰撞力通过 1 个 IF 函数来控制其失效与否。接触力的创建是通过自主二次开发的工具来实现的，具体过程如图 1 所示。



(a) 接触力创建工具

(b) 锁座接触力

图 1 滚轮与锁座接触力创建

B. 气弹簧模型创建

气弹簧的多体动力学模型分为两个部分，其一为气弹簧的助力作用，它是通过绘制气弹簧在压缩和伸展过程中的“位移-力值”曲线，然后将该曲线通过二线力的创建施加给活塞杆和缸体，通过活塞杆相对于缸体的位移来输出与位移有关的作用力，其力值函数表达式为 $IF(VZ(\{m_0.idstring\},\{m_1.idstring\},\{m_1.idstring\}):AKISPL(555-DZ(\{m_0.idstring\},\{m_1.idstring\},\{m_1.idstring\}),0,\{crv_cps.idstring\}),AKISPL(555-DZ(\{m_0.idstring\},\{m_1.idstring\},\{m_1.idstring\}),0,\{crv_cps.idstring\}),AKISPL(555-DZ(\{m_0.idstring\},\{m_1.idstring\},\{m_1.idstring\}),0,\{crv_stc.idstring\}))$ ，其中 $\{m_0.idstring\}$ 为缸体的局部坐标系， $\{m_1.idstring\}$ 为活塞杆的局部坐标系， $\{crv_cps.idstring\}$ 为气弹簧压缩曲线， $\{crv_stc.idstring\}$ 为气弹簧伸展曲线。

其原理就是通过活塞杆相对于缸体的速度方向来实现对气弹簧压缩与伸展状态的判断,从而输出与气弹簧状态相对应的力值大小。

其二为气弹簧的阻尼作用,它是通过弹簧阻尼器来实现的,在这里将弹簧阻尼器的刚度设为 0,阻尼设为需要的数值,即能使弹簧只起阻尼作用。气弹簧模型的创建如图 2 所示。

建立以上子系统,结合事先整理好的货舱门的各种数据和文件,便可建立其对应的多体动力学模型,如图 3 所示。

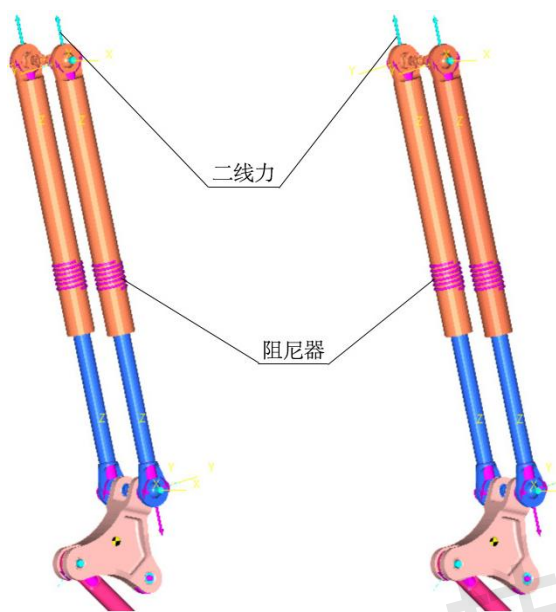


图 2 气弹簧模型

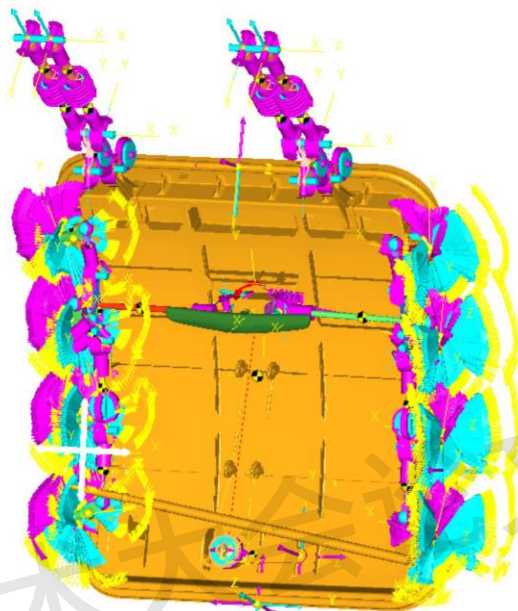


图 3 货舱门解锁/上锁多体模型

2.2 货舱门打开/关闭多体动力学建模

由于货舱门开启机构和锁定机构是两套相对独立的运动机构,特别是在分析舱门打开/关闭过程时,锁定机构对仿真分析结果影响很小(主要是锁定机构解锁后舱门重心位置有少许改变);因此,在货舱门打开/关闭多体动力学模型中,不再建立与锁定机构有关的多体模型,同时将锁定机构重量赋予舱门。

操作撑杆打开舱门时,由于气弹簧同时存在助力和阻尼作用,当舱门开启速度过快时,会感觉撑杆操作力增大,气弹簧阻尼效果明显。为了避免阻尼力对舱门开启/关闭操作力的干扰,故在仿真模型中屏蔽了气弹簧的阻尼作用。同时,为方便后续气弹簧的参数优化,我们将气弹簧的行程、力值、自由长度和弹性比率进行了参数化。

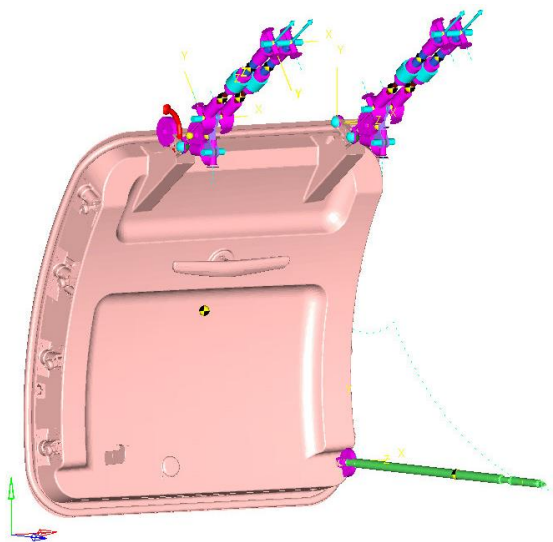


图 4 货舱门打开/关闭多体模型

货舱门打开/关闭多体动力学模型如图 4 所示。

3 货舱门机构多体动力学分析及优化

3.1 货舱门锁定机构仿真结果对比分析

在不考虑锁定机构交点优化的情况下,以货舱门整体为分析对象对其进行受力分析,货舱门在解锁/上锁过程中主要受以下几个力的作用:止动接头对货舱门的碰撞力 F_{c1} 、八组锁座对滚轮的碰撞力 F_{c2} 、门框对密封带的压缩力 F_n 、门框对密封带的摩擦力 F_r 、气弹簧通过三角摇臂和拉杆对舱门的作用力 F_{gsp} 。其中,密封带型式和安装位置的改动会带来压缩力 F_n 和摩擦力 F_r 的改变,止动接头上止动销位置的调整会使碰撞力 F_{c1} 发生改变,气弹簧参数的改变会使作用力 F_{gsp} 发生改变,但锁座位置的更改涉及的问题较为复杂——若锁座向客舱内侧移动,舱门阶差增大的同时手柄操作力也将增加,若锁座向客舱外侧移动,舱门的气密性将会变差。因此,在这里不考虑锁座的更改。原始多体动力学模型内手柄力矩曲线如图 5 所示。

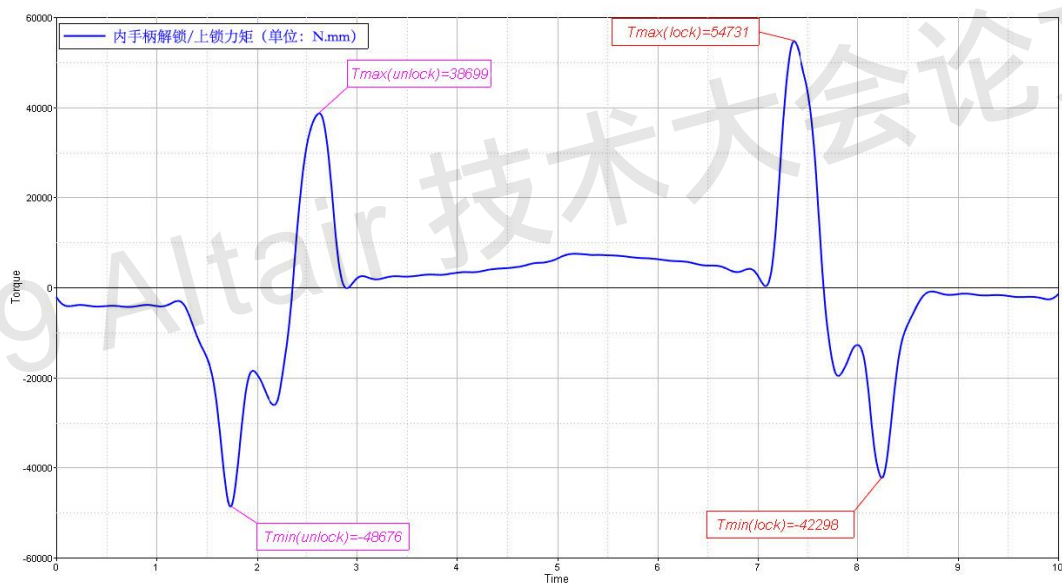


图 5 操作内手柄解锁/上锁舱门

仿真得到的内手柄操作力矩值与试验测得的内手柄操作力矩值对标结果如表 1 所示。表中仿真力矩值与试验数据基本吻合,误差均保证在 10%之内。

表 1 内手柄操作力矩值对标

力矩值情况	试验数据 (N·mm)	仿真数据 (N·mm)	误差
内手柄解锁力矩值	45700	48676	6.5%
内手柄上锁力矩值	50100	54731	9.2%

下面分别将摩擦力 F_r 降低 60%、压缩力 F_n 降低 50%、碰撞力 F_{c1} 的刚度 K 降低 50% (相当于将止动销和止动座之间的金属垫圈更换为刚度更小材质的垫圈)、气弹簧力值增大之后的多体动力学模型与原多体动力学模型中内手柄力矩进行对比,各种状态下内手柄力矩

曲线如图 6 所示。

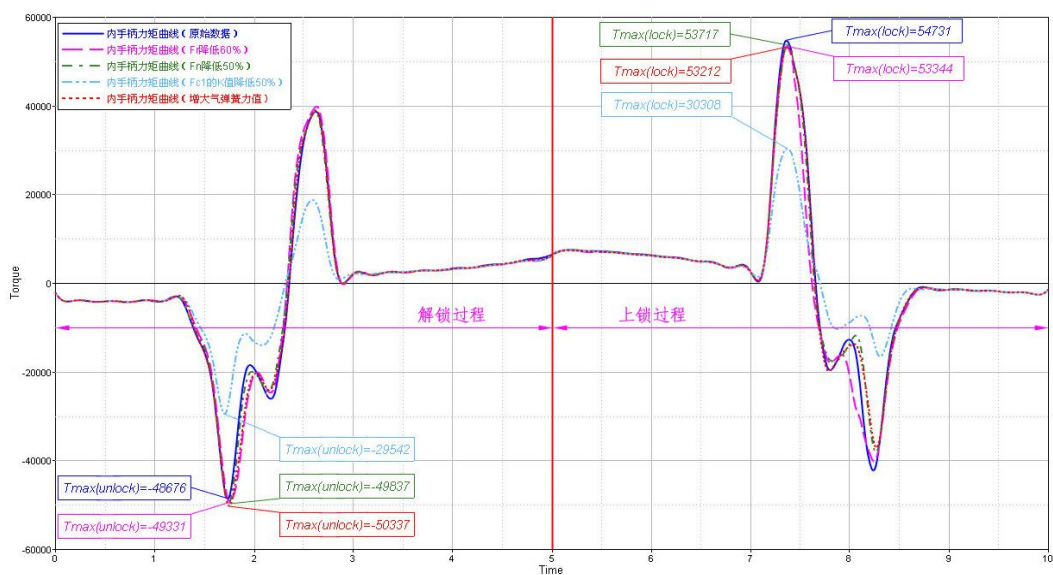


图 6 内手柄力矩曲线对比

从上图可以看出，改变 F_r 、 F_n 以及气弹簧力值对手柄力矩值影响很小，但是减小碰撞力 F_{c1} 对手柄力矩值的贡献却非常大。因此，将止动销和止动座之间的金属垫圈更换为刚度更小材质的垫圈或增大止动销与门体挡块间的间隙是降低手柄力矩值行之有效的方法。

3.2 货舱门开启机构分析

根据上文建立的货舱门多体动力学模型，对货舱门进行多体动力学分析，输出的舱门打开角度与操作力值曲线如图 7 所示。

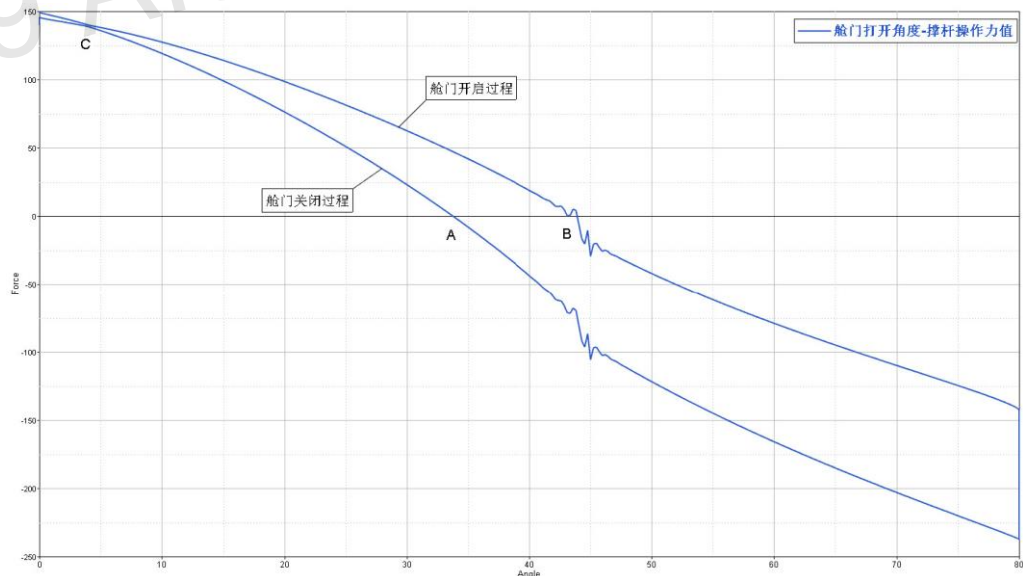


图 7 舱门操作力值曲线

图中，C 点为开启机构死点位置，在该点气弹簧对舱门的助力作用为零；由于该点离舱门关闭位置非常近，在舱门开启机构铰点不改变的情况下，不论气弹簧参数（在合理范围内）如何改变，舱门开启时的最大作用力均在 140~160N 之间。

A 点、B 点分别为舱门关闭和开启时气弹簧助力与舱门重力的平衡点，当舱门在关闭和开启过程中越过该点后，舱门将自行关闭和开启。

舱门开启时的最大推力为 146N，舱门打开 43.5° 后，可自行开启；舱门关闭时的最大拉力为 238N，力值偏大，舱门关闭 33.8° 后，可自行关闭。

3.3 货舱门开启机构优化

气弹簧伸展和压缩时，其参数化方程分别为：

$$F_{\text{伸展}} = F_1 \left[\frac{K-1}{S-2C} (x-C) + 1 \right] \quad x \in [0, S]$$

$$F_{\text{压缩}} = F_1 \left[\frac{K-1}{S-2C} (x-C) + 1 \right] + F_r$$

式中， F_1 ——最小伸展力，单位 N；

K ——弹性比率，一般 $K=1.1 \sim 1.5$ ；

S ——最大行程，单位 mm；

C ——备用行程，单位 mm；

F_r ——动态摩擦力，单位 N。

根据货舱门气弹簧实际情况，取参数 F_1 、 K 及 S 作为气弹簧优化的优化变量；同时，根据货舱门开启机构的特点，选取图 8 所示的三角摇臂两交点坐标为优化变量。多参数优化时的约束除了考虑结构空间的限制外，还必须满足舱门操作过程中的人机功效，即不但操纵力值大小合适、气弹簧助力效果明显，且舱门完全关闭和打开后，在气弹簧作用下，舱门无自行打开和关闭的风险。

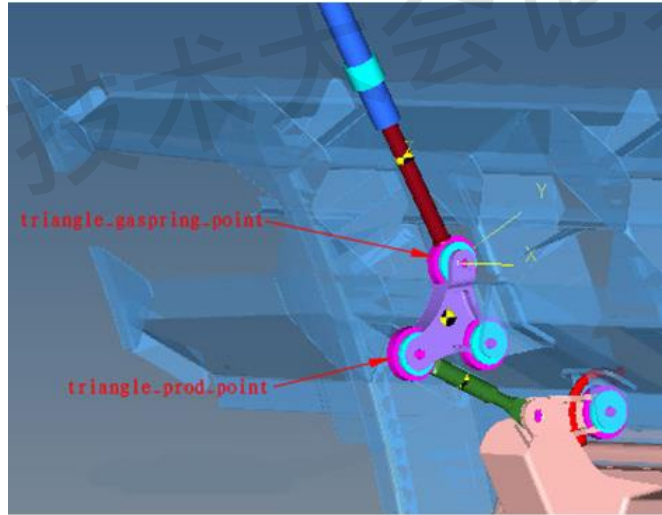


图 8 开启机构优化交点

根据优化结果，将气弹簧参数及交点坐标进行实际工程性处理，再将处理后的结果代入仿真模型中，输出的舱门打开角度与操作力值曲线如图 9 所示。从图中可以看出，舱门开启操作力值由 146N 降低到 102N，舱门关闭操作力值由 238N 降低到 160N，舱门开启和关闭时的操作力值都大幅下降。同时，舱门打开时能自行开启的角度由 43° 降到了 30.5°，气弹簧在开启过程中的助力效果更好。

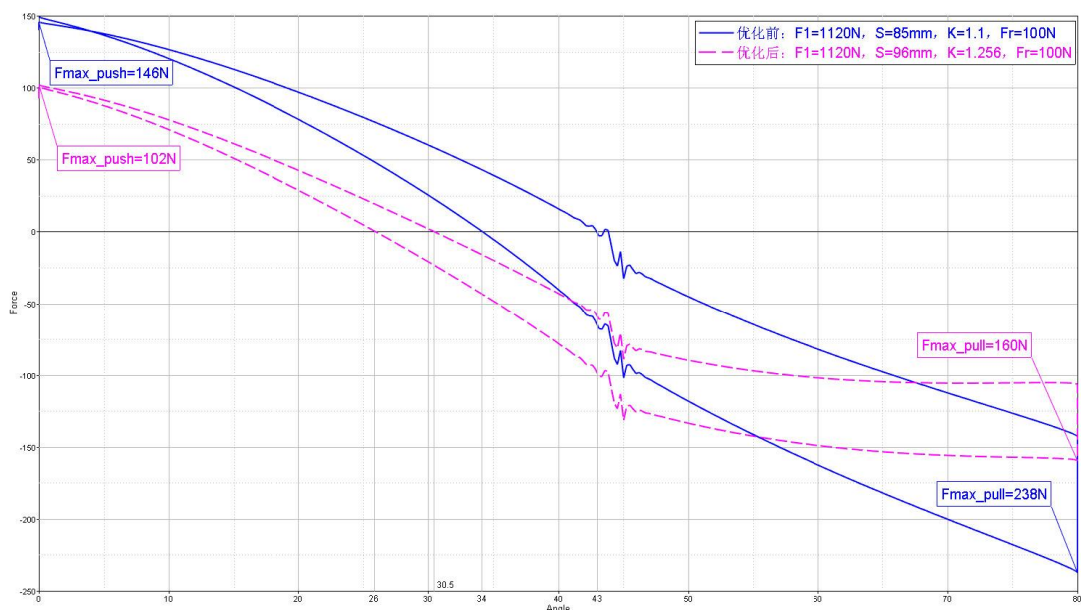


图9 优化前后舱门操作力值曲线对比

由于铰点优化后,气弹簧与三角摇臂的连接点未过死点,当气弹簧所处的环境温度升高,气弹簧公称力值增加时,可能导致舱门有自动打开的趋势。为分析舱门在飞机使用环境条件下($-55^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$)的开关性能,根据气弹簧的温度特性(温度每变化 10°C ,气弹簧公称力值变化约3.3%),输出了极限温度条件下舱门打开角度与操作力值曲线,如图10所示。从图中可知,由于舱门关闭时气弹簧铰点在死点位置附近,即使温度上升,气弹簧公称力值大幅增加后,舱门开启时的最大操作力变化很小,舱门不可能自动打开。

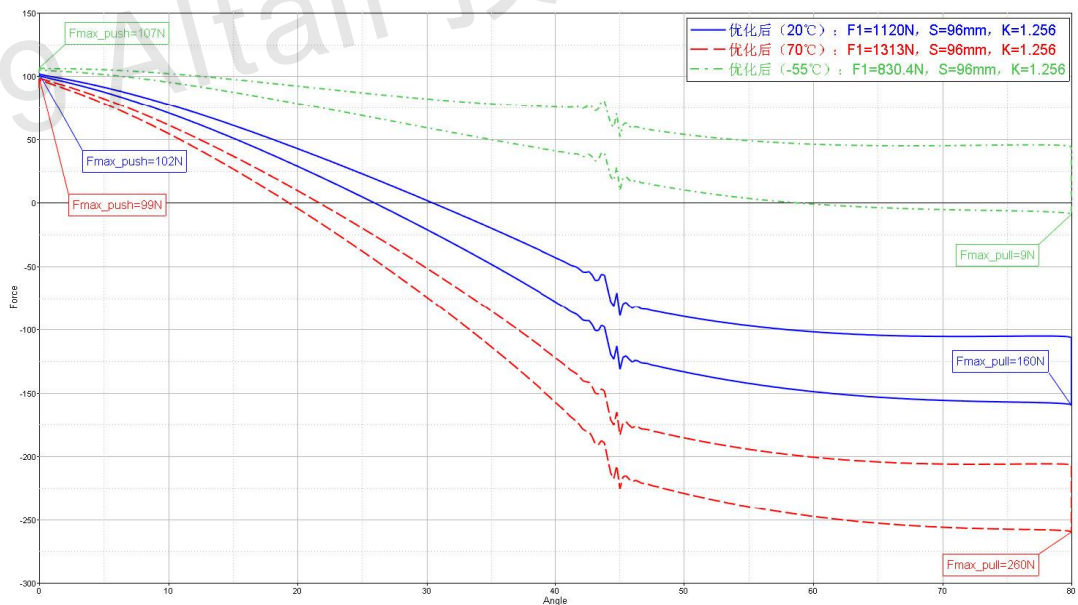


图10 优化后极限温度条件下舱门操作力值曲线

4 结语

本文应用 HyperWorks 系列软件建立了货舱门多体动力学模型,评估了货舱门锁定机构

的设计性能，并提出了改进方法。之后选取货舱门开启机构的交点坐标和气弹簧参数进行了机构优化，得到了满足设计要求的舱门打开/关闭操作力值结果。

在整个仿真优化过程中，可体会到 HyperWorks 系列软件的强大功能，能够帮助设计人员更清楚的了解产品性能，能够提高设计人员的整体水平和缩短产品研发周期。

5 参考文献

- [1] 李修峰、王亚斌、王晨 著 《MotionView&MotionSolve 应用技巧与实例分析》 机械工业出版社 2013
- [2] STABILUS Standard Programme for Gas springs and Dampers

2019 Altair 技术大会论文集