

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.03.009

# 复杂机构设计中的载荷敏感性分析

## The Load Sensitivity Analysis for Complex Linkage Design

陆波 / LU Bo

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

### 摘要:

设计复杂机构,涉及的载荷种类往往很多,为达成设计目的,每一载荷的敏感性均应进行分析,并完成作用力等效综合。载荷敏感性分析目的是找出机构中对实现功能会造成较大影响的载荷因素,通过作用力等效综合,回答系统在全工作包线内能否满足设计需求,以保证机构功能顺利实现。以某型飞机前起落架机构设计为例,对其运动过程中的各种载荷进行了敏感性分析,再现了实际工作中出现的问题,并提出解决方案,体现了载荷敏感性分析在复杂机构设计中的应用和重要性。

**关键词:** 复杂机构; 载荷敏感性; 起落架收放; 作用力等效综合

**中图分类号:** V215

**文献标识码:** A

[Abstract] Complex Linkage design must deal with multiplicate loads. The sensitivity of each load must be analyzed, as well as the load equivalent integration. The main cause of sensitive loads shall be discovered by means of sensitivity analysis, the load equivalent integration ensures design function can be achieved. As the example shows, an aircraft nose landing gear cannot be normally and alternatively extended on some conditions during flight test and iron bird test. The load sensitivity analysis and load equivalent integration method are used to reappear and solve the problem. The application and importance of this method for complex linkage design are showed.

[Keywords] complex linkage; load sensitivity; landing gear retraction and extension; load equivalent integration

## 0 引言

复杂机构往往有很多的连接点以及机构元件、驱动元件等,以实现复杂的受控运动,满足系统设计目标。机构工作时会有各种各样的载荷因素,如重力、弹簧力、摩擦力和流体动力等。对于复杂系统而言,为了保证能够顺利实现设计功能,需要完成运动学/动力学分析,找出对系统工作影响最大的载荷因素,并保证该因素在可能的范围内,不会阻碍系统功能的实现。

本文以某型飞机前起落架机构为例,重点考虑各种将载荷或位移放大的机构,分析各载荷的敏感性,提出需要重点关注的因素,为设计提供参考和依据。

## 1 概述

载荷敏感性分析的根本方法是将各种载荷因素等效到同一约束处(下称目标约束),通过该约束对应的等效力或力矩来判断各载荷因素的敏感性。分析时需要考虑各载荷的敏感度,还要考虑各载荷的实际大小,使用其综合作用效果来完成各载荷的敏感性分析。

对于等效用的目标约束,有多种不同的选择,一般也都可以得到相似的结论;其中以机构的驱动约束为目标进行等效,得到各载荷对驱动约束的广义等效力,不但可以完成敏感性分析,还可以直接与驱动的能力进行对比,对于机构能否完成设计功能的结论会更加明确。

将各载荷因素等效到目标约束的方法可以通

过传力路径逐一等效,但此方法要覆盖机构运动的全过程,计算工作量将会非常大。采用目前成熟的运动学/动力学分析软件,可以很好地解决这一问题。

## 2 实例分析

在某型飞机前起落架收放系统的设计中,起落架迎风气动力和重力是比较明显的载荷因素,因其帮助放下而阻止收上,使设计分析工作的重点集中在收上而非放下过程,导致该机型前起落架在放下过程中,出现了非预期的情况。飞行试验发现自由放和超过一定速度后,前起落架不能放下上锁。

该问题目前已经得到妥善解决,但付出了很大代价,最后解决问题的根本就是完成了完整的载荷敏感性分析。对复杂机构设计而言,完整的载荷敏感性分析至关重要。在该实例中,无论收上还是放下,均应完成完整的载荷敏感性分析,然后重点关注敏感性很大的载荷因素,对其提出较为精确的数据要求。如果设计初期完成分析,将不会出现后续的设计问题。

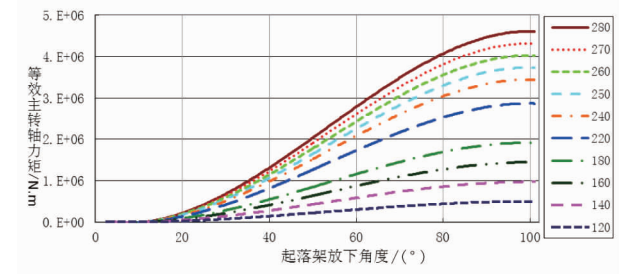
对此前起落架机构进行载荷敏感性分析时,很多时候会选择起落架主转动轴作为等效目标,得到需要克服各载荷因素的等效主转轴力矩,对敏感性分析而言是足够的,但驱动能力能否满足设计需求,则需要将驱动能力也等效为主转轴力矩后,才能得出结论。对于由线性油缸驱动的起落架系统而言,如果直接针对油缸的线性力进行等效,则不但可以完成敏感性分析,还可以直接得到系统能力是否满足设计要求的结论。

### 2.1 数据准备

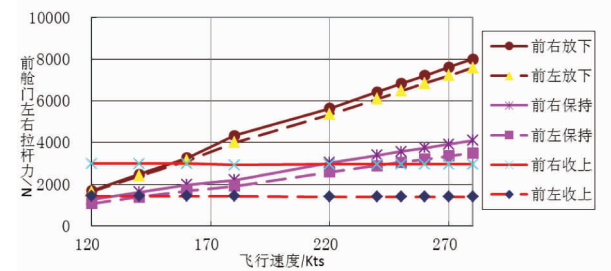
在敏感性分析时,由于良好润滑的各约束的摩擦力理论上对机构运动的影响不大,因此重点考查其它的载荷因素:其中重力、弹簧力和最大液压力是明确的,各舱门气动力会随飞行速度、起落架姿态发生变化;敏感性分析时,将明确的载荷直接进行等效;而各气动力则需要按单位载荷进行等效,然后根据不同飞行速度下,运动过程中每一时刻的气动力,得到实际气动力的等效载荷曲线;再将全部载荷综合,与驱动能力对比,即可得出能否达成设计目标的结论。

分析前需要准备机构的惯性载荷、最大液压

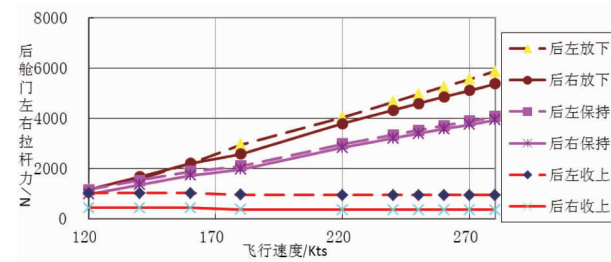
力、锁弹簧力、运动过程中各速度对应的气动力。其中,气动力包括起落架本体的迎风气动力和各起落架舱门的气动力。起落架本体的迎风气动力一般根据迎风面积,使用近似公式计算。而舱门气动力一般早期可以结合相似型号的数据或风洞试验数据,后期使用飞行试验测量结果进行校准。在不同飞行速度下,完成多次收放动作,测量各舱门相连拉杆的轴力,得到完整运动过程的气动载荷历程。图1为分析得到的迎风气动力随飞行速度和起落架位置的变化曲线、前舱门左右拉杆和后舱门左右拉杆在三个起落架收放角度时,随飞行速度的变化曲线。其中,图1(a)横轴为收放角度,纵轴为迎风气动力对起落架转轴等效力矩的计算结果。每个速度一条曲线,图1(b)和1(c)横轴为飞行速度,纵轴为拉杆力。每根拉杆在起落架放下锁定、自由放下不能上锁的静力平衡点和收上锁定三个位置各有一条曲线。力的单位均为N,力矩单位均为N·m。



(a) 迎风气动力计算值



(b) 前舱门拉杆力测量值



(c) 后舱门拉杆力测量值

图1 各速度迎风气动力计算值和舱门气动力测量值

## 2.2 模型建立

该机型前起落架机构主要由支柱柱和与之联动的前后舱门组成,在上位和下位均由过中心的锁撑杆进行锁定,并由锁弹簧帮助维持锁定位置。驱动装置有开锁作动缸和收放作动缸。当正常放下功能失效时,由自由放下手柄通过钢索,驱动各液压缸两腔都接通回油、解除上位锁后,依靠重力和气动力自由放下。

建模时,保留所有具有运动关系的部件和全部的质量特性,加入力学元件和运动约束,得到收上和放下状态的分析模型,如图2所示。

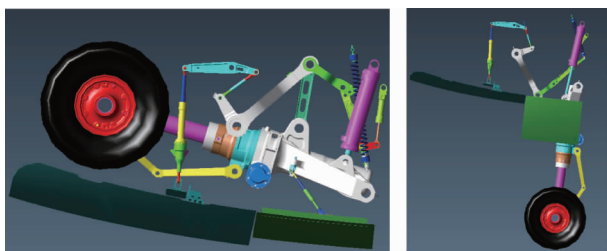
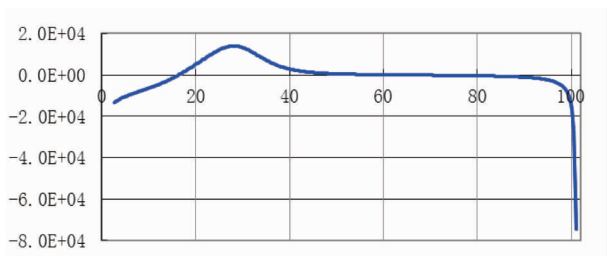


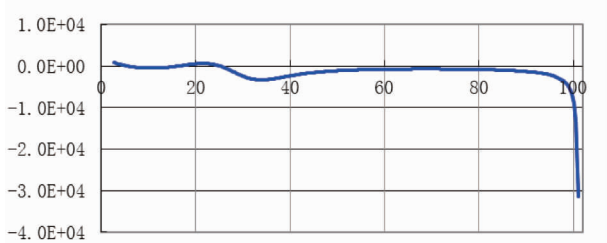
图2 前起落架机构分析模型

## 2.3 分析结果

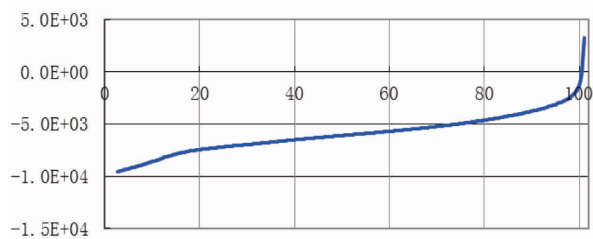
等效约束选择为收放作动缸,所考虑的载荷都向作动缸的线性力进行等效。其中不随飞行速度变化的重力、锁弹簧力、上位最大开锁液压力直接等效,结果见图3。各气动力速度变化,则按单位载荷进行等效,结果见图4。图中,横轴表示起落架的放下角度,0°为收上状态,纵轴表示各实际载荷或单位载荷等效的收放作动缸的轴力,其中为正表示阻止放下,为负表示帮助放下。



(a) 液压开锁力

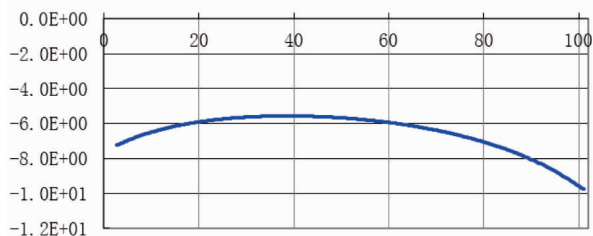


(b) 锁弹簧力

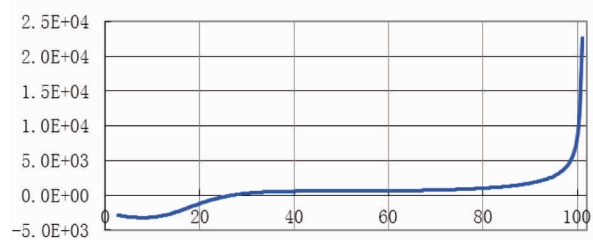


(c) 重力

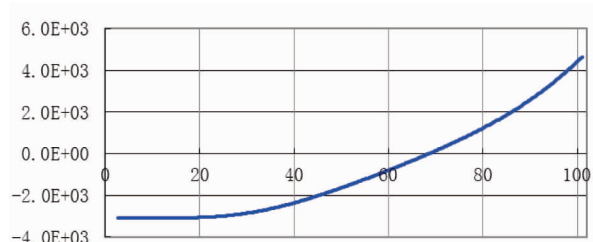
图3 直接等效结果



(a) 迎风气动力



(b) 前舱门气动力



(c) 后舱门气动力

图4 单位载荷等效结果

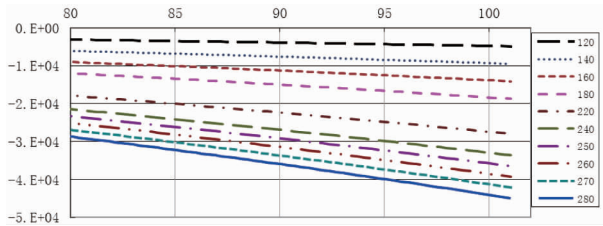
从图3和图4中可以看出,液压开锁力、锁弹簧力、重力、前舱门气动力在放下接近上锁时,等效力突然增加,非常敏感,其中液压开锁力、锁弹簧力帮助上锁,前舱门气动力、重力阻止上锁。后舱门气动力和迎风气动力的敏感性不高。

## 2.4 作用力综合

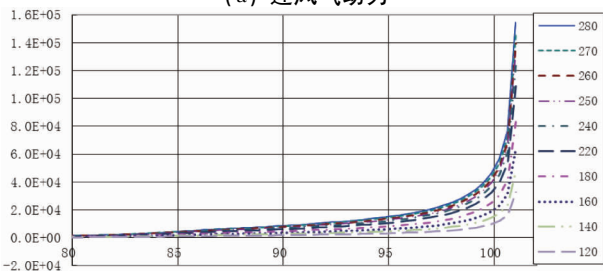
有了各气动载荷的等效值和实测值后,就可以计算得到实测值在运动过程中的等效值,如图5所示,将各等效值累加即可得到实现设计功能需要的驱动力。

在本实例中,有液压的动力放和无液压的自由

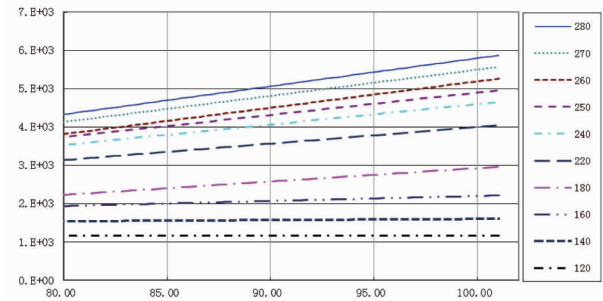
放的作用力综合结果见图6。图中横轴表示起落架放下角度(°),0°为收上状态,纵轴为收放作动缸等效轴力(N),图例中数字表示飞行速度(节)。作动缸能力为0表示无液压,右侧小图为接近放下上锁阶段的局部放大。



(a) 迎风气动力

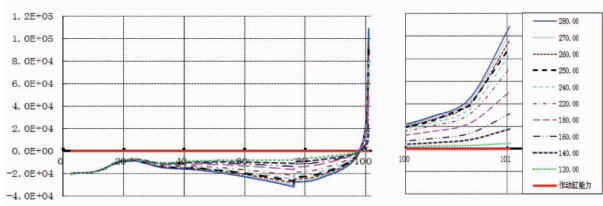


(b) 前舱门气动力

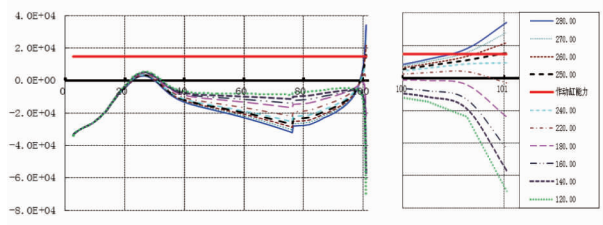


(c) 后舱门气动力

图5 不同速度各气动力敏感度



(a) 自由放



(b) 动力放

图6 作用力综合

由图6可见,动力放时,飞行速度为250节时需要的驱动力已经略超作动缸的能力,如果飞行中没有扰动,此速度将会是起落架能够动力放下的最大速度。而自由放的作用力综合结果显示,全部速度都不能放下上锁。

## 2.5 分析

复杂机构设计不能达成设计目的,将会影响机构的工作,必须有可靠的解决方案。通过对图3和图5的分析,在起落架放下即将上锁(放下角度为101°)时,全部飞行速度各载荷因素对应的等效作动缸轴力见表1。

表1 各载荷因素对应等效作动缸轴力(104N)

速度 (节)	重力	锁弹 簧力	液压开 锁力	迎风气 动力	前舱门 气动力	后舱门 气动力
120	0.33	-3.10	-7.50	-0.49	3.25	0.54
140	0.33	-3.10	-7.50	-0.95	4.78	0.74
160	0.33	-3.10	-7.50	-1.41	6.30	1.03
180	0.33	-3.10	-7.50	-1.87	8.37	1.37
220	0.33	-3.10	-7.50	-2.79	10.88	1.87
240	0.33	-3.10	-7.50	-3.36	12.40	2.16
250	0.33	-3.10	-7.50	-3.64	13.16	2.30
260	0.33	-3.10	-7.50	-3.93	13.93	2.44
270	0.33	-3.10	-7.50	-4.21	14.69	2.58
280	0.33	-3.10	-7.50	-4.49	15.45	2.72

以飞行速度为180Kn为例,各载荷敏感度见图7。

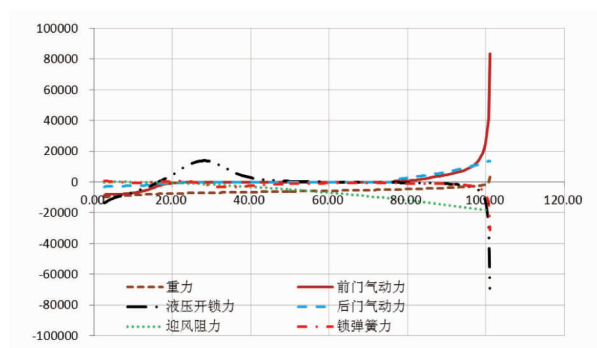


图7 180Kn 各载荷敏感度

根据表1和图7,在起落架放下即将上锁时,前舱门气动力、液压开锁力和锁弹簧力具有很高的敏感度,其中又以前舱门气动力和液压开锁力最为敏

感,这两个载荷的变化会对系统功能实现产生很大影响。前舱门气动力会随飞行速度的增大而增大,而最大液压开锁力和锁弹簧力是恒定的,且自由放时没有液压开锁力。因此机构本身的设计导致存在一个速度门槛值,大于此速度,起落架将不能动力放下上锁。而自由放时没有液压开锁力去克服前舱门气动力的影响,即使低速飞行也会存在不能自由放下上锁的问题。

## 2.6 解决方案分析

通过分析,找到影响前起落架放下的主要原因是前舱门气动力。要解决这一问题,最有效的方法可以是降低前舱门气动力的敏感度,也可以是减小前舱门气动力。要降低敏感度,需要重新设计机构,改变传力路径,对机构及周边的结构作调整;如果要改变气动力,需要更改舱门外形,需要根据飞机的具体情况做出选择。经综合考虑,选取通过修改前舱门气动力的传力路径的方案,使问题得以解决。

## 3 结论

敏感性分析中的等效目标可以有多种选择,但等效目标与驱动有关时,可以减少分析工作量,较容易得出设计是否满足功能要求的结论。

实例中选取收放作动缸为等效目标,通过各载

荷对前起落架放下特性的敏感性分析,再进行作用力综合,分析了机构的能力和可能出现的问题,找到最敏感因素,较准确地再现了某型飞机前起落架的飞行和铁鸟试验现象,并据此提出有效解决方案。结果表明,机构载荷敏感性分析对机构设计至关重要。

### 参考文献:

- [1] 梁立孚,等. 飞行器结构动力学中的几个问题[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- [2] 李有堂. 机械系统动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [3] 汪越胜,税国双. 运动学与动力学[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [4] 徐赵东,马乐为. 结构动力学[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [5] 应祖光. 高等动力学-理论及应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2011.
- [6] 钟永光,等. 系统动力学[M]. 北京:科学出版社,2009.

### 作者简介:

陆波 男,硕士,研究员。主要研究方向:起落架、刹车、液压能源系统设计仿真验证。Tel: 021-20864743, E-mail: lubo@comac.cc