

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.04.005

# 飞机起落架收放机构静态装配的误差灵敏度分析方法

张黎, 聂宏, 魏小辉, 印寅

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 为了更好地保证飞机起落架收放机构的装配成功率, 对 2 种收放机构误差灵敏度分析方法进行对比研究。以正在研发的某大型民机主起落架收放机构为原型, 建立基于误差全微分和基于概率方法的 2 种误差灵敏度分析模型, 并基于 3DCS 软件, 分析起落架的静态装配过程, 研究各环节误差对装配封闭环的灵敏度影响大小, 并对基于概率的分析方法进行仿真分析。仿真结果表明: 2 种分析方法的灵敏度基本一致, 上扭结与上侧杆的连接处对尺寸链 1 封闭环的影响较大, 达到 31.7%; 上、下锁杆连接处对尺寸链 2 封闭环的影响尤大, 达到 45.3%。

**关键词:** 灵敏度; 误差; 起落架; 尺寸链; 3DCS

**中图分类号:** TP302.7 **文献标志码:** A

## Analysis Method of Static Assembly Error Sensitivity of Aircraft Landing Gear Retraction Mechanism

Zhang Li, Nie Hong, Wei Xiaohui, Yin Yin

(State Key Laboratory of Mechanical Structure Mechanics & Control, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to ensure success assembly of the aircraft landing gear, two error sensitivity analysis methodologies was studied. The main landing gears for the aircraft are developed as the prototype. The sensitivity model is established based on the total differential error by the probability method. The 3DCS software was used as the simulation tool. The paper has analyzed the static assembly process for the landing gear, studied the sensitivity of the assemble rings. The results of the two methods were given and they are approximately equivalent. The contribution of the link between the top joint and the rod 2 is 31.7%, the contribution of the link between the foot joint and the rod 1 is 45.3%, they are both very large.

**Key words:** sensitivity; error; landing gear; dimension chain; 3DCS

### 0 引言

起落架是飞机重要承力并兼有操纵特性的部件, 在严重影响飞机安全的起降过程中, 担负着极其重要的使命<sup>[1]</sup>。收放机构是飞机起落架的重要组成部分。为了更好地保证收放机构的装配成功率, 对其进行误差灵敏度分析显得尤为重要。

传统的容差设计以经验和标准为基础, 但是最后的容差结果通常并不是最优解, 或多或少影响到产品的装配性能。近年来, 国际上在数字化装配技术方面的研究为我们提供了新的解决方法; 与此同时, 灵敏度分析方法在各个领域的广泛应用也为我们提供了新的解决思路。Reich J 等<sup>[2]</sup>基于 3DCS 软件, 运用蒙特卡罗实验模拟的方法, 对某国际热核反应实验装置进行了装配分析, 对不合理的容差位置进行了改进。国内周吴等<sup>[3]</sup>基于误差灵敏度分析方法对静电刚度式谐振微加速度计进行了频率鲁棒性设计。张旭明等<sup>[4]</sup>运用解析法对某悬臂梁进行了灵敏度分析。张义民等<sup>[5]</sup>运用可靠性设计理论和灵敏度分析方法对某平面连杆机构进行了运动精度可

靠性的研究。程耿东等<sup>[6-7]</sup>运用半解析法对梁的自由端挠度相对于长度的变化进行了灵敏度分析。因此, 笔者针对某国产大型民机主起落架, 建立误差全微分模型和误差概率模型并进行仿真分析, 研究各环节对封闭环的灵敏度影响大小。

### 1 灵敏度模型

#### 1.1 对象描述

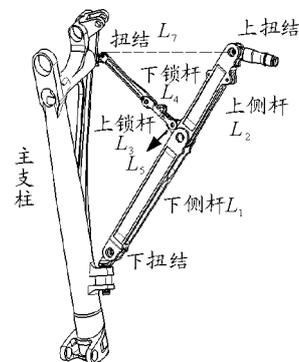


图 1 起落架结构

起落架结构模型如图 1, 对于此起落架, 可以建

收稿日期: 2011-11-09; 修回日期: 2011-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51075203, 51105197); 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目资助(NS2010023)

作者简介: 张黎(1985—), 女, 辽宁人, 满族, 南京航空航天大学在读博士研究生, 从事飞机起落架容差设计研究。

2 条装配尺寸链，尺寸链 1 在上扭结、上侧杆、下侧杆、下扭结及主支柱之间建立；尺寸链 2 在主支柱、上锁杆、下锁杆、上侧杆及上扭结之间建立，如图 2。

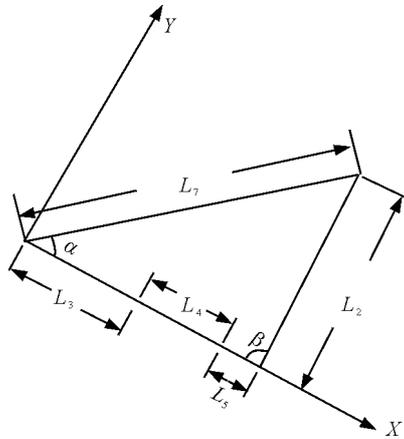


图 2 尺寸链 2

### 1.2 误差全微分模型

若  $N$  代表封闭环容差要求，且封闭环和组成环尺寸  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  之间存在着一定的函数关系，即

$$N = f(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) \quad (1)$$

这个函数关系式中有多个独立的自变量，各自变量都在一定的区间内产生独立的增量变化。这个微小的增量就是尺寸链中各组成环的误差<sup>[8]</sup>。笔者对此式全微分后得：

$$\Delta N = \frac{\partial N}{\partial A_1} \Delta_1 + \frac{\partial N}{\partial A_2} \Delta_2 + \dots + \frac{\partial N}{\partial A_n} \Delta_n \quad (2)$$

在式 (2) 中，封闭环  $\Delta N$  代表着各组成环误差  $\Delta_i$  的综合与累积， $\frac{\partial N}{\partial A_i}$  代表误差传递比即每一组成环的灵敏度系数，表示为

$$S_i = \frac{\partial N}{\partial A_i} \quad (3)$$

相对贡献度为

$$\bar{S}_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n |S_i|} \quad (4)$$

尺寸链 1 为直线尺寸链，上下侧杆连处  $L_{01}$  为封闭环。尺寸链方程为：

$$L_{01} = L_6 - L_1 - L_2$$

则对此关系式进行全微分可得尺寸链的误差模型为：

$$\Delta L_{01} = \Delta L_6 - \Delta L_1 - \Delta L_2$$

对其求导后可得每一环节灵敏度： $S_6=1, S_1=-1, S_2=-1$  相对贡献度： $\bar{S}_1=33.3\%, \bar{S}_2=33.3\%$ ，

$\bar{S}_3=33.3\%$ 。

尺寸链 2 为平面尺寸链， $L_4$  与  $L_5$  连接处  $L_{02}$  为封闭环，尺寸链方程为：

$$L_{02} = L_7 \cos \alpha - L_2 \cos \beta - L_3 - L_4 - L_5$$

于是误差模型为： $\Delta L_{02} = \Delta L_7 \cos \alpha - \Delta L_2 \cos \beta - \Delta L_3 - \Delta L_4 - \Delta L_5$ ，对其求导后每一环节的灵敏度  $S_7 = \cos \alpha, S_2 = -\cos \beta, S_3 = -1, S_4 = -1, S_5 = -1$ 。

其中  $\alpha = 41.1^\circ, \beta = 93.2^\circ$ 。于是  $S_7 = 0.75, S_2 = -0.05$ ，则相对贡献度为： $S_7 = 20\%, S_2 = 1\%, S_3 = 26\%, S_4 = 26\%, S_5 = 26\%$ 。

## 2 装配灵敏度仿真分析

基于误差概率模型的误差灵敏度分析是在统计意义下研究因装配加工等因素造成的组成环误差对封闭环误差的影响程度<sup>[9]</sup>。3DCS 是一款容差设计软件，蒙特卡罗统计试验方法是其基本装配误差分析方法，误差概率模型是其基本灵敏度分析模型。

### 2.1 误差概率模型

据式 (2) 可得误差概率模型

$$E(\Delta N) = \sum T_i E(\Delta_i) \quad (5)$$

式中： $E(\Delta N)$  表示封闭环的误差均值； $E(\Delta_i)$  表示各个组成环误差均值； $T_i$  表示各组成环灵敏度系数。假设  $E(\Delta_i)$  在统计意义下独立且均值为零，于是  $E(\Delta N) = 0$ ，则

$$D(\Delta N) = E(\Delta N^2) = E(\sum T_i^2 \Delta_i^2) = \sum T_i^2 E(\Delta_i^2) \quad (6)$$

则标准差为

$$\sigma(\Delta N) = \sqrt{\sum T_i^2 \sigma(\Delta_i)} \quad (7)$$

则灵敏度为

$$S_i = \frac{T_i}{\sum T_i^2} \quad (8)$$

### 2.2 起落架各杆件参数数值设定

经研究人员设计及航空制造工程手册<sup>[10]</sup>，将制定好的各杆件尺寸及容差列出，如表 1、表 2。

表 1 各杆件尺寸及容差 mm

杆件序号	尺寸	上下偏差
$L_1$	1 158.80	$\pm 0.03$
$L_2$	757.50	$\pm 0.02$
$L_3$	504.00	$\pm 0.02$
$L_4$	285.43	$\pm 0.02$
$L_5$	120.00	$\pm 0.01$
$L_6$	1 916.30	$\pm 0.03$
$L_7$	1 149.20	$\pm 0.02$

表 2 各杆件配合处公差 mm

各杆件	孔处	轴处
上、下扭结	$\phi 65_{-0.019}^{+0.019}$	$\phi 65_{-0.013}^{+0.013}$
上、下侧杆	$\phi 65_{-0.019}^{+0.019}$	$\phi 65_{-0.019}^{+0.019}$
主支柱	$\phi 24_{-0.013}^{+0.013}$ $\phi 65_{-0.019}^{+0.019}$	$\phi 24_{-0.009}^{+0.009}$ $\phi 65_{-0.013}^{+0.013}$
扭结	$\phi 24_{-0.013}^{+0.013}$ $\phi 28_{-0.013}^{+0.013}$	$\phi 24_{-0.009}^{+0.009}$ $\phi 28_{-0.009}^{+0.009}$
上、下锁杆	$\phi 28_{-0.013}^{+0.013}$ $\phi 32_{-0.016}^{+0.016}$	$\phi 28_{-0.009}^{+0.009}$ $\phi 32_{-0.011}^{+0.011}$

经过仿真分析, 封闭环误差在规定范围  $6\sigma$  之内, 如图 3 所示。在此基础上对其进行灵敏度分析。

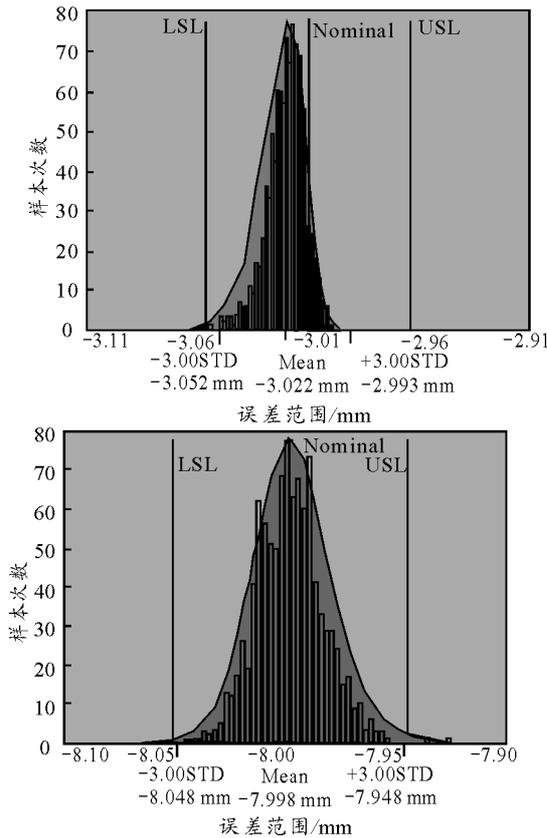


图 3 尺寸链 1、2 容差仿真分析结果

### 2.3 灵敏度仿真分析

Index1	Point	Part	Range	Cont.
1	Tole6 Surf1_3	6228-0301	0.023(mm)	16.107 5%
2	Tole6 Surf1_1	6228-0301	0.023(mm)	15.604 4%
3	Tole5 Surf3_6	6228-0201	0.015(mm)	9.532 7%
4	Tole5 Surf3_4	6228-0201	0.015(mm)	8.320 8%
5	Tole18 3	6225-0101	0.020(mm)	7.436 3%
6	Tole36 3	Product1	0.020(mm)	7.436 3%
7	Tole19 1	6225-0501	0.020(mm)	7.436 3%
8	Tole35 Surf3_3	6225-0501	0.015(mm)	5.797 8%
9	Tole35 Surf3_6	6225-0501	0.015(mm)	5.665 6%
10	Tole1 Surf1_3	6225-0101	0.015(mm)	4.757 9%
11	Tole4 Surf4_4	6228-0101	0.009(mm)	3.885 7%
12	Tole4 Surf4_6	6228-0101	0.009(mm)	3.001 2%
13	Tole2 Surf1_1	6225-0501	0.009(mm)	2.500 2%
14	Tole1 Surf1_1	6225-0101	0.015(mm)	0.776 8%
15	Tole10 Surf1_3	Part2_1	0.009(mm)	0.590 9%
16	Tole2 Surf1_4	6225-0501	0.009(mm)	0.579 6%
17	Tole10 Surf1_1	Part2_1	0.009(mm)	0.508 3%
18	Tole5 Surf1_1	6228-0201	0.015(mm)	0.020 5%

图 4 尺寸链 1 各环节灵敏度百分比

建立基于 CATIA/V5 的仿真模型并导入 3DCS 软件。基于误差概率模型, 尺寸链 1 组成环误差对封闭环影响程度的仿真结果如图 4; 尺寸链 2 组成环误差对封闭环误差影响程度的仿真结果如图 5。

Index1	Point	Part	Range	Continue.
1	Tole39 Surf1_3	6229-0201	0.005(mm)	30.889 8%
2	Tole39 Surf1_1	6229-0201	0.005(mm)	14.425 4%
3	Tole40 Surf3_6	6225-0101	0.006(mm)	9.004 3%
4	Tole40 Surf3_4	6225-0101	0.006(mm)	7.009 9%
5	Tole6 Surf1_1	6228-0301	0.023(mm)	6.995 3%
6	Tole3 Surf2_6	6225-0601	0.011(mm)	5.794 3%
7	Tole6 Surf1_3	6228-0301	0.023(mm)	5.227 2%
8	Tole3 Surf2_4	6225-0601	0.011(mm)	4.811 5%
9	Tole4 Surf4_4	6228-0101	0.009(mm)	3.797 5%
10	Tole4 Surf4_6	6228-0101	0.009(mm)	3.266 3%
11	Tole3 Surf1_1	6225-0601	0.011(mm)	1.903 8%
12	Tole2 Surf1_1	6225-0501	0.009(mm)	1.551 6%
13	Tole3 Surf1_3	6225-0601	0.011(mm)	1.484 4%
14	Tole1 Surf1_3	6225-0101	0.015(mm)	0.971 2%
15	Tole2 Surf1_4	6225-0501	0.009(mm)	0.540 2%
16	Tole1 Surf1_1	6225-0101	0.015(mm)	0.502 2%
17	Tole14 Surf1_1	Part7_1	0.006(mm)	0.189 2%
18	Tole18 3	6225-0101	0.020(mm)	0.164 8%

图 5 尺寸链 2 各环节灵敏度百分比

从尺寸链 1 的分析结果, 笔者可以得出各组成环的相对贡献度及各孔轴配合处的灵敏度百分比如表 3。

表 3 尺寸链 1 各组成环相对贡献度 %

组成环	$L_1$	$L_2$	$L_6$
A	33.3	33.3	33.3
B	35.2	28.1	36.7
C	1.9	5.2	3.4

表 3 中, A 表示误差全微分模型计算结果; B 表示基于误差概率模型的 3DCS 仿真结果; C 表示相对百分比误差。笔者将图中各环节贡献度代表的位置整理后得表 4。

表 4 尺寸链 1 各孔、轴配合处灵敏度百分比 %

配合位置	I	II	III
灵敏度百分比	31.7	17.9	14.8

表 4 中, I 表示上扭结与上侧杆孔、轴配合连接处; II 表示下扭结与下侧杆孔、轴配合连接处; III 表示下扭结与主支柱孔、轴配合连接处。各组成环误差对封闭环的影响因素有很多, 包括尺寸误差、形位误差等, 从表 4 可以看出, 孔、轴配合处位置误差对封闭环的影响较大, 其中上扭结与上侧杆连接处对封闭环的影响达到了 31.7%。

同理, 根据尺寸链 2 的计算结果, 可以得到各组成环的贡献度及各孔轴配合处的灵敏度如表 5, 其中 A 表示误差全微分模型计算结果; B 表示基于误差概率模型的 3DCS 仿真结果; C 表示相对百分比误差。笔者将图中各环节贡献度代表的位置整理

后得表 6。

表 5 尺寸链 2 各组成环相对贡献度 %

组成环	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_7$
A	1.4	26.3	26.3	26.3	19.8
B	0	24.3	24.3	24.3	19.3
C	1.4	2	2	2	0.5

表 6 尺寸链 2 各孔、轴配合处灵敏度百分比 %

配合位置	IV	V	VI	VII
灵敏度百分比	45.3	16.4	19.1	14.0

表 6 中, IV 表示上下锁杆连接处; V 表示扭结与主支柱连接处; VI 表示上扭结与上锁杆连接处; VII 表示扭结与上锁杆连接处。从表 6 可见, 上下锁杆的连接处对尺寸链 2 的影响尤大, 达到了 45.3%。

### 3 结论

1) 基于误差概率模型的灵敏度仿真分析结果与基于误差全微分模型的理论分析结果表明: 2 种分析方法对于尺寸链 1 的计算偏差在 5.2% 以内, 对于尺寸链 2 的计算偏差在 2% 以内, 结果基本一致。

2) 上扭结与上侧杆的连接处对尺寸链 1 的影响较大, 达到 31.7%, 上下锁杆连接处对尺寸链 2 的影响尤大, 达到 45.3%。

3) 基于结论 1)、2), 建议在实际加工中, 提高上扭结与上侧杆连接处及上、下锁杆连接处 2 个配

合位置的孔、轴加工准确度, 零件加工时采用高精度的加工工具。

### 参考文献:

[1] 高泽迦. 飞机设计手册第 14 册: 起飞着陆系统设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.

[2] Reich J, Chiochio S, Cordier J, et al. Three-dimensional tolerance investigation on main ITER. Components[J]. Fusion and Engineering Design 2009, 84: 1584-1587.

[3] 周吴, 何晓平, 苏伟, 等. 基于误差灵敏度的静电刚度式谐振微加速度计频率鲁棒性设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 14-18.

[4] 张旭明, 王德信. 结构灵敏度分析的解析方法[J]. 河海大学学报, 1998, 26(5).

[5] 张义民, 黄贤振, 贺向东, 等. 平面连杆机构运动精度可靠性灵敏度设计[J]. 工程设计学报, 2008, 15(1): 25-28.

[6] 程耿东, 刘英卫. 梁的半解析法计算灵敏度的误差分析[J]. 大连理工大学学报, 1989, 29(4): 415-421.

[7] 程耿东, 韩博平, 顾元宪. 对 CST 单元采用半解析法计算灵敏度的误差分析[J]. 大连理工大学学报, 1990, 30(4): 393-399.

[8] 张荣瑞. 尺寸链原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.

[9] 蔡毅, 邢岩, 胡丹. 敏感性分析综述[J]. 北京师范大学学报, 2008, 44(1): 9-16.

[10] 何文治. 航空制造工程手册-通用基础[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.

\*\*\*\*\*

(上接第 16 页)

#### 2) 动态飞散矢量模型

假定弹丸运动速度矢量为 $(v_x, v_y, v_z)$ , 破片的速度大小为 $V_s$ , 则破片的动态飞散方向矢量 $\overrightarrow{O_1C}$ 为

$$\begin{aligned} & (V_s \sin \varphi \sin \beta + v_x, V_s \cos \varphi \cos \theta_c + V_s \sin \varphi \cos \beta \sin \theta_c + v_y, \\ & -V_s \cos \varphi \sin \theta_c + V_s \sin \varphi \cos \beta \cos \theta_c + v_z) \end{aligned} \quad (4)$$

若弹长为 $L$ , 则可假定炸高为 $L \cos \theta / 2$ , 可得直线 $\overrightarrow{O_1C}$ 的方程为:

$$\frac{x}{V_s \sin \varphi \sin \beta + v_x} = \frac{y}{V_s (\cos \varphi \cos \theta_c + \sin \varphi \cos \beta \sin \theta_c) + v_y} = \frac{z - L / 2 \cdot \cos \theta}{V_s (-\cos \varphi \sin \theta_c + \sin \varphi \cos \beta \cos \theta_c) + v_z} \quad (5)$$

#### 2.2 破片飞散场模型

根据弹丸产生的破片数量 $N$ , 把所有的破片飞散方向矢量组成一个 $N$ 维向量组空间, 成为弹丸的破片飞散矢量模型 $C_{ps}$ 。则 $C_{ps} = \{V(x_i, y_i, z_i)\} (i = 0, 1, 2, 3, \dots, N)$ 。

在虚拟三维交互仿真中, 该计算模型利用杀爆弹对目标进行毁伤仿真, 结果如表 1。

表 1 不同弹道倾角在不同炸高条件下对目标的毁伤面积  $m^2$

炸高/m	落角/(°)						
	20	30	30	50	60	70	80
0.5	295.4	340.9	380.4	391.0	361.0	316.7	296.6
1.0	299.4	345.0	395.3	414.8	398.3	362.4	347.3
1.5	299.1	345.5	404.7	436.2	431.4	402.7	399.1
2.0	303.2	344.8	408.2	455.6	462.1	444.6	443.6
2.5	305.8	343.8	410.4	469.7	488.5	479.5	480.6
3.0	309.2	342.4	408.0	476.7	511.7	512.5	516.6
3.5	313.0	341.8	405.5	481.8	527.9	542.4	542.8
4.0	317.0	343.5	402.8	481.2	544.1	568.7	569.9

### 3 结束语

实验结果表明, 当破片毁伤目标概率在 50% 以上时与实际试验数据情况基本吻合。

### 参考文献:

[1] 刘伯宁, 杨萍, 李冰. 基于 VR 的作战模拟仿真系统[J]. 兵工自动化, 2010, 29(12): 91-92.

[2] 刘怡昕, 杨伯忠. 炮兵射击理论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1998.

[3] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.

[4] 钱林方. 火炮弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.