

# 容差方案设计在直升机活动罩阶差计算上的应用

## Application of Tolerance Scheme Design in Step Difference Calculation of Helicopter Activity Cover

中航工业昌河飞机工业(集团)有限责任公司 吴事兵 张炜才 徐少林 高剑烽

**[摘要]** 针对直升机活动罩阶差问题,建立了活动罩累积误差和阶差的计算方法,结合活动罩和缘条零件制造和装配过程工艺分析的基础上,计算出了活动罩和缘条的累积误差和阶差,并进行数据分析,分析表明活动罩的外形误差是引起活动罩阶差的主要因数。应用实例的结果表明,该研究方法可推广到整流罩其他类似部件的计算分析,指导容差分配,提高整流罩装配质量。

**关键词:** 累积误差 阶差 工艺分析 计算方法

**[ABSTRACT]** For the step difference of helicopter activity cover, a calculation method of accumulated error and step difference is established, on the basis of the analysis of manufacturing and assembly process of activity cover and the outer parts, accumulated error and step difference is calculated, and their data is analyzed analyzed. The results show that shape tolerance of activity cover is the main factor of step difference of activity cover. The results of the application examples indicate that the calculation method can be applied to the outer parts of the fairing assembly of helicopter, to guide the tolerance allocation and improve the quality of the fairing assembly of helicopter.

**Keywords:** Accumulated error Step difference Process analysis Calculation method

飞机产品的零部件数量多,且结构和外形往往异常复杂,在零件制造和装配过程中,受变形、重力、温度、振动、测量等系统因素和不可预测的随机因素的影响,基于模拟量传递方式为主的模线-样板-标准工装的装配工作方法,很难从理论上精确分析装配准确度的累积误差<sup>[1]</sup>。飞机部件对接装配中,装配准确度主要取决于部件的制造准确度,制造准确度是指部件的实际尺寸与图纸上所规定的名义尺寸相符合的程度,制造准确度越高,装配准确度就越容易保证<sup>[1-2]</sup>。

本文以直升机整流罩典型结构件活动罩为研究对象,建立活动罩累积误差和阶差的计算方法,结合活动罩和缘条零件制造和装配过程工艺分析的基础上,计算其累积误差和阶差,并对计算结果进行分析,以期找到

活动罩产生阶差的主要原因,并为整流罩其他类似部件阶差的分析研究提供系统思路和指导方法。

### 1 活动罩装配结构特点

图1为直升机活动罩装配结构示意图,铆接在活动罩上的合页通过通条与平台合页相连,活动罩其余边搭接在缘条、边框和固定罩板侧边上面,活动罩上面装有锁闭机构,通过锁闭机构的锁闭关闭活动罩。

活动罩关闭后,在图1中缘条处截面形成阶差示意图(图2),零件制造和产品装配过程中误差的积累,导致活动罩机上装配后,活动罩周边与其搭接的缘条产生

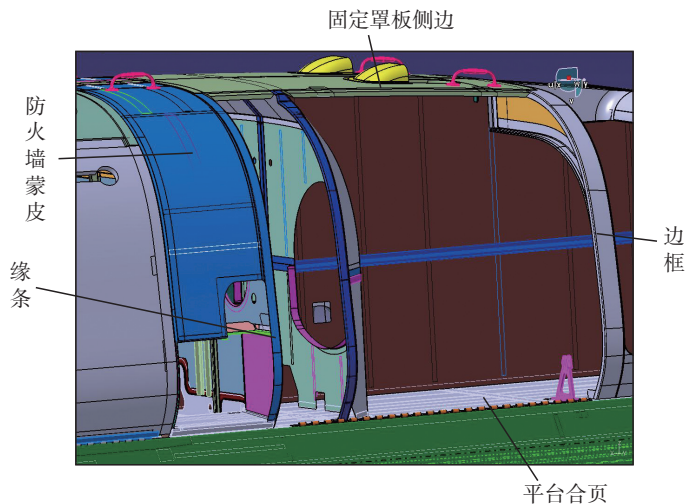


图1 活动罩装配结构示意图  
Fig.1 Diagram activity cover of structure

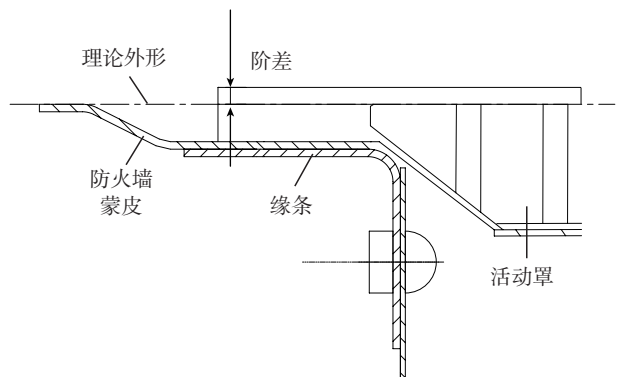


图2 活动罩阶差示意图  
Fig.2 Diagram of step difference of activity cover

垂直航向上对缝阶差。

## 2 计算方法

图2表明,活动罩阶差与缘条和活动罩的制造和装配过程中多个环节产生的误差有关,且其尺寸是互相平行的,形成线尺寸链,其封闭环累积误差<sup>[3]</sup>公式:

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n A_i \Delta_i \quad (1)$$

式中,  $\Delta_i$  为第  $i$  个基本环误差,  $A_i$  为  $\Delta_i$  对  $\Delta_{\Sigma}$  传递的尺寸因子(或称传递系数),  $n$  为与  $\Delta_{\Sigma}$  有关的基本环总数。

制造误差包括了系统误差和随机误差,在直线尺寸链中,封闭环的系统误差很难量化计算,主要采取成因分析和统计的稳定值来确定<sup>[4]</sup>。随机误差的分析,主要采用极值法和概率法两类方法进行封闭环误差的定量计算。结合直升机活动罩及缘条制造和装配工艺特点,选用由程宝蕖等<sup>[2]</sup>提出的“正态分布修正系数”计算封闭环累积误差值,即:

$$(\Delta_{\Sigma})_x = (\Delta_{\Sigma})_0 \pm \omega_{\Sigma} \quad (2)$$

$$(\Delta_{\Sigma})_0 = \sum_{i=1}^n A_i (\delta_i)_0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \omega_{\Sigma} = H \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \delta_i^2} \\ H = 1.8 - 0.8 \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \delta_i^2} / \sum_{i=1}^n |A_i| \delta_i \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $H$  为正态分布修正系数,其值在 1~1.8 之间,  $(\Delta_{\Sigma})_0$  为随机误差  $\Delta_{\Sigma}$  分布带中点值,  $\delta_i$  为容差带半带宽,  $(\delta_i)_0$  为容差带中点值,  $\omega_{\Sigma}$  为  $\Delta_{\Sigma}$  的分布带的半带宽,  $(\Delta_{\Sigma})_x^s$  为封闭环累积误差上、下极值。

## 3 缘条和活动罩累积误差计算

### 3.1 缘条累积误差计算

图3为缘条的制造和装配路线图。缘条材料为 0Cr18Ni9,拉弯成形模整体成形后,在地面组合夹具上

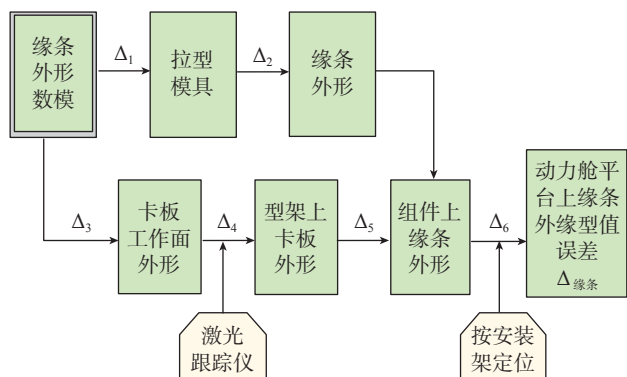


图3 缘条的制造和装配路线图

Fig.3 Route diagram of manufacture and assembly of frame

外形卡板定位并完成组合,最后通过机上安装架定位并装配在平台上。

图中:  $\Delta_1$  为拉弯成形模模面相对于缘条外形数模的误差;  $\Delta_2$  为缘条外形相对于拉弯成型模的误差;  $\Delta_3$  为缘条在装配型架卡板上的定位误差;  $\Delta_4$  为卡板工作面外形相对于数模外形的加工误差;  $\Delta_5$  为激光跟踪仪在组合夹具上的安装误差;  $\Delta_6$  为缘条地面组合夹具和机上安装架安装定位的综合误差;  $\Delta_{\text{缘条}}$  为缘条外形对数模的累积误差。

分析缘条制造和装配的工艺流程,得出了缘条各工艺容差分布值,见表1。本文设定误差偏向机体内侧为负差、偏向机体外侧为正差原则确定各环节尺寸传递系数。

表1 缘条各工艺容差分布值 mm

$\Delta_i$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\Delta_4$	$\Delta_5$	$\Delta_6$
工艺容差	+0.1 -0.1	0.5 0	+0 -0.3	+0.1 -0.1	+0.1 -0.1	+0.1 -0.1

图3表明,缘条的累积误差为:

$$\Delta_{\text{缘条}} = \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_6 - \Delta_1 - \Delta_2$$

采用正态分布修正公式(2)、(3)和(4)计算,得出缘条累积误差上、下极限值为:

$$(\Delta_{\text{缘条}})_x^s = \begin{matrix} +0.112 \\ -0.912 \end{matrix} \text{ mm}$$

计算结果表明,缘条外形对数模的累积误差主要偏向机体内侧,利于活动罩装配后阶差的减少。

### 3.2 活动罩累积误差计算

活动罩是蜂窝夹层结构的复合材料构件,采用热压罐成形工艺制造,采用凹模控制其外形,成形模具面形状按照外形数模数控加工。图4为活动罩的制造和装

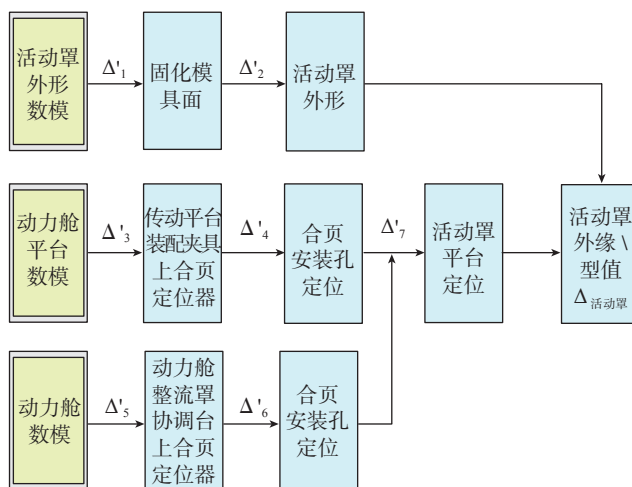


图4 活动罩的制造和装配路线图

Fig.4 Route diagram of manufacture and assembly of activity cover

配路线图。其中， $\Delta'_1$  为活动罩数模加工的固化成形模面形状误差； $\Delta'_2$  为活动罩外形按固化模具固化成形后的形状误差； $\Delta'_3$  为传动平台装配夹具合页定位器对数模的误差； $\Delta'_4$  为合页定位器定位并制取合页在平台上安装孔的误差； $\Delta'_5$  为动力舱整流罩协调台合页定位器对数模的误差； $\Delta'_6$  为合页定位器定位并制取合页在协调台上安装孔误差； $\Delta'_7$  为活动罩由合页定位安装的定位误差； $\Delta_{\text{活动罩}}$  为活动罩处于锁闭状态时，其外形相对于数模的累积误差。

活动罩累积误差是形状误差和定位误差的综合累积作用，考虑到交点和工艺孔的位置精度远远高于零件外形精度，将其看作形状误差和定位误差一维方向的简单累加进行分析，即认为活动罩累积误差是定位误差  $\Delta'_3$ 、 $\Delta'_4$ 、 $\Delta'_5$ 、 $\Delta'_6$ 、 $\Delta'_7$  和形状误差  $\Delta'_1$ 、 $\Delta'_2$  的累积误差：

$$\Delta_{\text{活动罩}} = \Delta'_3 + \Delta'_4 + \Delta'_5 + \Delta'_6 + \Delta'_7 - \Delta'_1 - \Delta'_2$$

分析活动罩制造和装配的工艺过程，得出了活动罩各工艺容差分布值，见表 2。实际生产中，活动罩固化成形后的形状误差  $\Delta'_2$  幅度变化较大，依据实际情况，设定了  $\Delta'_2$  不同工艺容差值，采用正态分布修正公式 (2)、(3) 和 (4) 计算，得出活动罩  $\Delta'_2$  不同形状误差对应的活动罩累积误差，见表 3。

表2 活动罩各工艺容差分布值

	$\Delta'_1$	$\Delta'_2$	$\Delta'_3$	$\Delta'_4$	$\Delta'_5$	$\Delta'_6$	$\Delta'_7$
工艺容差	+0.3 -0.3	0 $x$	+0.1 -0.1	+0.1 -0.1	+0.1 -0.1	+0.1 -0.1	+0.1 -0.1

表3 活动罩  $\Delta'_2$  不同形状误差对应的活动罩累积误差

$\Delta'_2$	0	0	0	0
	-2	-3	-4	-5
$(\Delta_{\text{活动罩}})_x^s$	+2.4152 -0.4152	+3.4514 -0.4514	+4.4796 -0.4796	+5.5011 -0.6011

表 3 的计算结果表明，活动罩累积误差主要偏向机体外侧，随着活动罩形状误差增大，活动罩的累积误差增大，不利于活动罩装配后阶差的减少。

#### 4 活动罩阶差计算及分析

图 1 中活动罩和防火墙蒙皮在缘条处搭接，防火墙蒙皮和活动罩外形理论上阶差为 0mm。依据设计技术要求，防火墙蒙皮采用了厚度为 0.5mm 的 LY12 的薄铝蒙皮，紧密铆接在缘条上，因此可设定防火墙蒙皮与缘条无外形协调误差。而活动罩是蜂窝夹层复合材料构件，刚度和强度较大，通过合页和锁闭机构与平台和防火墙连接，因此活动罩与缘条间的协调误差即为活动罩

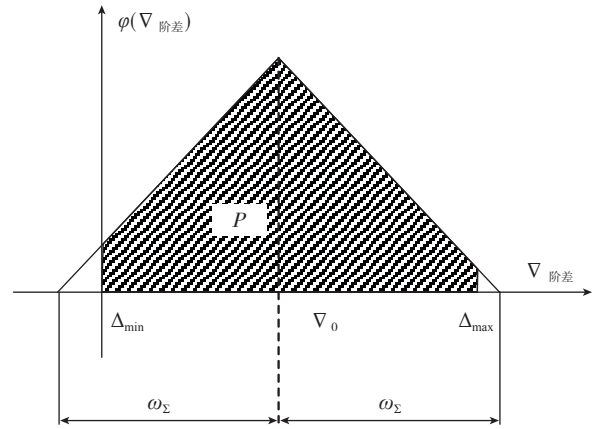


图5 活动罩阶差的分布域

Fig.5 Distribution area of step difference of activities cover

与防火墙蒙皮阶差，其表达式如下：

$$\nabla_{\text{阶差}} = \Delta_{\text{活动罩}} - \Delta_{\text{缘条}}$$

为了计算在无强迫装配情况下活动罩阶差不超差的概率  $P$  (图 5 中阴影部分区域)，选用由程宝冀等 [2] 提出的“等腰三角形分布”计算分析方法，即：

$$P = P\{\Delta_{\min} \leq \nabla_{\text{阶差}} \leq \Delta_{\max}\} = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\nabla_0 + \omega_{\Sigma} - \Delta_{\max}}{\omega_{\Sigma}} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta_{\min} - (\nabla_0 - \omega_{\Sigma})}{\omega_{\Sigma}} \right)^2 \quad (5)$$

采用正态分布修正公式 (2)、(3)、(4) 和概率  $P$  计算公式 (5) 计算活动罩  $\Delta'_2$  不同形状误差对应的活动罩阶差和概率  $P$ ，经计算，得出活动罩阶差和概率  $P$  计算结果，见表 4。

表4 活动罩  $\Delta'_2$  不同形状误差对应的活动罩阶差和概率  $P$

$\Delta'_2/\text{mm}$	0	0	0	0
	-2	-3	-4	-5
$(\nabla_{\text{活动罩}})_x^s/\text{mm}$	+3.0353 -0.2353	+4.1055 -0.3055	+5.1696 -0.3696	+6.2232 -0.4232
$P/\%$	0.990	0.989	0.902	0.776

表 4 计算结果表明，活动罩阶差主要偏向机体外侧，且随着活动罩形状误差增大，活动罩装配后的阶差也增大，无强迫装配情况下活动罩阶差不超差的概率  $P$  变小。

直升机属于低空低速飞机，参照飞机气动外缘容差航标 (HB/Z23-80) 标准，直升机的气动外缘容差参照飞机“大型二类”的标准执行，根据标准可知，活动罩外缘型值容差为  $\pm 3\text{mm}$ ，局部容差 (15%) 允许  $\pm 4\text{mm}$ 。因此可以得出，活动罩的外形误差取值为 3mm 时，无强迫装配情况下活动罩阶差不超差的概率  $P$  为 98.9%，其阶

(下转第 85 页)

气折射率尾数,  $(n-1)_{\text{airy}}$  为实际情况下的空气折射率尾数,  $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ , 单位为  $\mu\text{m}$ 。

当标准空气参数  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $p = 101325\text{pa}$ ,  $f = 1333.22\text{pa}$ , 对 Edlen 公式微分, 得出温度、气压、湿度偏差对折射率产生的修正量:

$$\Delta n_{\text{airy}} = (-93\delta_t + 0.27\delta_p - 0.042\delta_f) \times 10^{-8}, \quad (4)$$

$$\Delta n_s = (0.00268\delta_p - 0.929\delta_t - 0.00042\delta_f) \times 10^{-6}, \quad (5)$$

式中,  $\delta_p$ 、 $\delta_t$ 、 $\delta_f$  为气压、气温及湿度相对于正常态的变化量。

实际测量中, 总波长的修正量为:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \delta\lambda_n + \delta\lambda_w \\ &= -\lambda_s \left[ (0.00268\delta_p - 0.929\delta_t - 0.00042\delta_f) \times 10^{-6} \right. \\ &\quad \left. + (t_w - 20)\alpha \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $\lambda_s$  为正常态的波长值。

激光跟踪测量系统的斜距  $d$  等于基准距离  $d_0$  加上干涉距离  $d_{\text{IFM}}$ , 即:

$$d = d_0 + d_{\text{IFM}} \quad (7)$$

如果基准距离校准存在误差, 会影响所有的距离测量值。

激光跟踪测量设备采用增量式角度编码度盘进行角度测量, 编码度盘刻有 18000 条刻线, 采用光电平衡电位计扫描, 角度分辨率达到  $0.14''$ , 由于度盘刻划不均匀而使测角产生度盘分划误差。

靶球及附件的制造误差也是影响系统误差的一个原因。激光线必然会以不同的入射角进入靶球, 入射角的变化给测量结果带来入射角变化误差  $\delta_a^2$ , 靶球误差还包括球度误差  $\delta_b^2$ , 棱镜与球座的对中误差  $\delta_c^2$ , 球体直径误差  $\delta_d^2$ , 镜头平整性误差  $\delta_e^2$ , 二面角误差, 顶点位置及偏振特征等。即靶球误差为:

$$\Delta_1 = \sqrt{\delta_a^2 + \delta_b^2 + \delta_c^2 + \delta_d^2 + \delta_e^2} \quad (8)$$

#### 4.5.2 环境误差

在实际测量时, 工作现场温度、气压、气流等变化将影响激光的传播, 增大测量误差。地板的振动幅度、设备用电的电流, 不但会造成测量误差的产品, 严重时会造成仪器的损坏。环境误差还包括被测件温度不准确  $\alpha \cdot \delta t_w$  和线膨胀系数不准确  $(t_w - 20) \cdot \delta\alpha$  造成的误差, 各项误差合成为:

$$\Delta = \pm \sqrt{\begin{aligned} & (93\delta t \times 10^{-3})^2 + (0.27\delta p \times 10^{-3})^2 \\ & + (0.042\delta f \times 10^{-3})^2 \\ & + (\alpha \times \delta t_w)^2 + [(t_w - 20)\delta\alpha]^2 \end{aligned}} \quad (9)$$

#### 4.5.3 人为误差

操作人员对仪器的安装调试应该严格遵守规定, 利用靶球进行测量时应该做到熟练, 减少断光次数, 可以

有效减小测量误差。

## 5 结束语

数字化制造技术逐渐应用于航空制造业, 对于飞机产品, 根据高质量要求, 保证飞机产品装配过程中所用型架的准确度, 具有极大地重要性。基于 MBD 技术结合数字化测量设备装配型架, 利用激光跟踪测量设备对型架装配过程中零件相对位置进行实时测量监测, 可以保证型架装配准确度, 缩短装配周期。

### 参考文献

- [1] 李森, 闫国锋, 刘宁. 激光跟踪仪坐标测量精度分析. 北京测绘, 2013(2):15-18
- [2] 仝志民, 唐文彦, 刘建新, 等. 基于激光跟踪仪和坐标测量臂的工业测量系统. 计量技术, 2008(5):13-16.
- [3] 邹爱丽, 王亮, 李东升, 等. 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用. 航空制造技术, 2011(21):5-6.
- [4] 韩清华, 郑保, 郭宏利, 等. 采用激光跟踪仪测量飞机外形. 航空计测技术, 2004, 24(1):15-16, 33.

(责编 亿霖)

(上接第 74 页)

差的上极限值为  $4.1055\text{mm}$ , 基本满足产品阶差为  $4\text{mm}$  技术要求; 而下极限值为  $-0.3055\text{mm}$  时, 表明活动罩装配时产生轻微的干涉, 通过对装配在活动罩上的锁闭机构施加锁紧力, 使通条、合页以及活动罩产生微量弹性变形即可实现活动罩正确的关闭。

## 5 结论

(1) 活动罩阶差计算分析表明, 活动罩零件的外形误差对阶差影响较大, 基于活动罩和缘条零件制造和装配各环节容差分配的基础上, 活动罩的外形误差控制在  $3\text{mm}$  以内时, 能满足活动罩机上装配的阶差要求。

(2) 本文研究了直升机整流罩典型结构件活动罩阶差的计算方法, 该研究方法可推广到整流罩其他类似部件的计算分析, 指导容差分配, 提高整流罩的装配质量。

(3) 本文的分析没有考虑工装使用变形和热变形等系统因素, 因此容差分配结果有一定的局限性, 可根据前几架机的制造数据来进一步修正。

### 参考文献

- [1] 王云渤. 飞机装配工艺学. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [2] 程宝薰. 飞机制造协调准确度与容差分配. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [3] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [4] 张开富. 飞机部件装配误差累积分析与容差优化方法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

(责编 深蓝)