

飞机制造协调准确度与容差分配

FEIJIZHIZAO
XIETIAOZHUNQUEDU YU
RONGCHAFENPEI

程宝策 编著

国防工业出版社 出版

飞机制造协调准确度与容差分配

程宝藻 编著

国防工业出版社

前 言

在飞机制造中，无论是采用按实物相互关联地传递尺寸和形状的常规协调方法，或是采用按数据综合应用电子计算技术和数控技术的“一体化”制造方法，或者综合应用这两类方法，都要根据现实条件高效且经济地保证外形轮廓、工艺孔、接头交点配合面与结合孔的分别协调和综合协调。

协调误差一般由多个相互独立的环节误差所组成。协调方法的改变，能改变误差环节的数目和环节的准确度，从而获得不同的效果。在既定的协调方法下，给各误差环节分配合理的工艺容差，给协调要求制定合理的技术条件，可不增加任何投资就能使生产达到既快又好的效果。

协调方法和协调路线设计得是否合理，工艺容差和技术条件制定得是否恰当，最后都要通过生产实践来鉴定，但这要经过很长的周期，付出很大的代价，拖延新机的设计定型和生产定型。飞机研制和成批生产的实践提出，需用准确、可靠且简易实用的计算方法，预先计算出协调准确度这个重要的质量鉴定指标，从而帮助合理地解决与协调有关的一系列问题。

然而，过去对这一问题没有得到系统的解决，仅在单纯外形轮廓的协调方面提出了一些计算方法，对孔-轴配合所产生的孔位误差则仅在理论上做了许多工作，对按孔定位或按孔装配的问题只作了一些研究和试验，对部分典型工序的

误差也只作了实验分析，但尚未提出切实可行的计算方法，生产实践上仍然基本上凭经验分配工艺容差、制定技术条件和处理协调问题。许多具有丰富实际经验的工艺人员，深感对协调方法和工艺容差分配知其然不知其所以然，影响工艺技术水平的进一步提高。学校的有关教学内容，局限于部分经验总结和概念性的定性分析，不足以解决实际问题。

在许多战斗在生产第一线的同志们的热情鼓励、积极支持和大力帮助下，通过反复调查研究，选取了计算累积偶然误差的已有实用经验公式，推导出一系列交点协调准确度的计算公式，并在十余个机种的百余实例中得到验证，从而形成了易于掌握的较完整的体系。这些内容经过学校两次选修课和工厂四次学习班的教学试用后编写成本书。本书编完后曾请崔赞斌同志进行过校阅，编者在此深表感谢。

本书第十一章是几个例子用以阐明准确度理论的普遍意义。

为改正书中存在的缺点和错误，热切地希望读者批评指正。

编著者 1978

目 录

第一章 与协调有关的一般概念

一、飞机制造的准确度要求	3
1. 部件气动力外形准确度	3
2. 部件相对位置的准确度	7
3. 部件内部组合件和零件位置的准确度	8
4. 零件或装配件间的配合准确度	8
二、协调问题涉及的各个方面	10
三、飞机制造中所用的协调方法	12
1. 相互关联的协调方法	12
2. “一体化”协调方法	15
四、准确度的基本概念	17
1. 准确度与精确度 (精度)	17
2. 条件准确度	19
五、误差的基本概念	20
1. 误差的来源	20
2. 误差按其性质分类	25
3. 系统误差和偶然误差的并存与转变	26
六、对协调方案和协调路线设计的要求	27

第二章 系统误差的分析

一、温度影响的分析	30
1. 热平衡条件下温度对尺寸协调的影响	30
2. 温度变化过程对尺寸协调的影响	36

3. 地温和室温差的变化对设备和工艺装备的影响	37
二、解决温差影响装配协调问题的途径	37
1. 消除或减少产生温差协调误差的因素	37
2. 对温度协调误差的设计补偿和工艺补偿	39
三、协调过程中的变形	39
1. 工艺装备的变形	40
2. 零件制造过程中的变形	41
3. 装配变形	41

第三章 偶然误差的理论基础

一、概率的基本概念	49
二、概率的基本运算	50
1. 概率的属性	50
2. 独立事件同时出现的概率——概率乘法定理	51
3. 互斥事件出现其中任一事件的概率——概率加法定理	53
三、偶然误差的分布特性	58
1. 偶然数 x 的平均值 $\bar{x}$	60
2. 偶然数 x 的方差 $D(x)$	62
3. 偶然数 x 的均方差 $\sigma(x)$	69
4. 偶然数的相对离散系数 k	70
5. 偶然数的相对不对称系数 α	71
四、几种常见的偶然误差的理论分布曲线	74
1. 正态分布 (或称高斯分布)	74
2. 等概率分布	80
3. 等腰三角形分布	81
4. 截断正态分布	86
5. 偏心分布	87
6. 双凸峰分布	89
五、偶然误差的综合——解误差尺寸链的顺算方法	90

1. 极大极小法 91
2. 概率法的基本公式和实用经验公式 92

第四章 外形协调准确度的计算与容差分配

- 一、用标准样件法协调的机械加工套合件的
协调准确度与容差分配 101
- 二、副翼对机翼的吻合性准确度与容差分配 106
- 三、双曲面蒙皮零件与型架内型板的协调准
确度与容差分配 111
- 四、型架卡板工作外形上相同百分点连线的
直线度与容差分配 119
- 五、飞机制造中外形工艺容差分配方法的特点 126

第五章 叉耳配合交点中心距协调准确度计算与容差分配

- 一、叉耳中心位置的相对误差 140
- 二、两对叉耳配合交点的中心距协调误差 143
- 三、叉耳配合交点中心距的典型协调路线的
准确度计算与容差分配 145
- 四、计算实例 149
 1. 某型机垂直安定面与后机身叉耳结合交点中心距协
调准确度的计算与分析 149
 2. 某型机机翼与机身中段叉耳结合交点中心距协调准
确度的计算与分析 153

第六章 孔-轴-孔配合交点的孔位和孔中心距协调

准确度的计算与容差分配

- 一、孔-轴-孔配合交点的孔位协调误差 158
- 二、交点孔位协调准确度计算与容差分配的实例 161
 1. 某型机左、右水平安定面平面围框式接头螺栓孔孔
位协调准确度计算与容差分配 161

2. 某型机前、后机身平面围框式接头螺栓孔孔位协调 准确度计算与容差分配·····	167
三、两对孔-轴-孔配合交点的孔中心距协调误差 ·····	170
四、孔-轴-孔配合交点的孔中心距协调准确度 计算与容差分配的实例 ·····	173
1. 某型直升机旋翼桨叶数控加工的样板之基准 孔协调问题·····	173
2. 某型机机身与机翼结合交点的螺栓孔协调问题·····	175
五、孔-轴-孔配合交点中心距工艺容差分配的 试定标准 ·····	188

第七章 孔-轴-孔配合交点的不同轴度计算与容差分配

一、交点不同轴度制造误差 ·····	190
二、交点不同轴度移制误差 ·····	191
三、协调路线中交点不同轴累积偶然误差和两部 件结合时中部交点的不同心偶然误差 ·····	194
1. 一个部件上的交点不同轴累积误差·····	194
2. 两部件结合时中部交点孔的不同心误差·····	198
四、交点不同轴度的计算方法在多交点部件对接 时计算交点孔横向不同心度中的应用 ·····	201

第八章 孔-轴-孔配合交点的不同面度计算与容差分配

一、四个交点孔中心的不同面误差 ·····	204
二、对接时第四对叉耳接头交点孔的不同心误差 ·····	207
三、计算实例 ·····	208
1. 某型机的机身与机翼对接交点的第四对孔的 不同心度计算·····	208

2. 某型机的炮弹箱在机身中安装时交点的第四对孔的 不同心度计算.....	210
--	-----

第九章 深孔的协调问题与容差分配

一、单配合面上的深孔协调要求与容差分配	214
1. 自由定位时的销棒插孔条件.....	216
2. 约束定位时的销棒插孔条件.....	219
二、双配合面上的深孔协调要求与容差分配	222
1. 自由定位时销棒插孔的条件.....	222
2. 约束定位时销棒插孔的条件.....	225
三、深孔不垂直度工艺容差分配的问题	226

第十章 孔和外形轮廓的综合协调问题与容差分配

一、孔位误差和孔-轴-孔配合对外形轮廓协 调的影响	229
二、部件相对位置的协调准确度与容差分配	232

第十一章 准确度原理的其他应用

一、工件尺寸坐标变换时的公差换算	241
二、在某型激光准直自动调整型架安装机中 光敏元件线路参数的准确度	243
三、梁的抗弯挠度计算值的准确度	245

小 结

附录一、正态分布的概率密度函数的曲线方程

$$\varphi(\Delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \text{ 的推导} \dots\dots\dots 249$$

附录二、正态分布函数 $\Phi(Z)$ 的积分值

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^Z e^{-\frac{z^2}{2}} dZ \dots\dots\dots 255$$

本书中常用符号的索引

- Δ ——误差或剩余误差，有时用 Δ' 表示剩余误差，以示区别；
- $\bar{\Delta}$ ——偶然误差 Δ 的平均值；
- Δ_0 ——偶然误差 Δ 的分布带中点值；
- Δ_r ——偶然误差的上边界；
- Δ_x ——偶然误差的下边界；
- Δ_Σ ——累积误差或尺寸链封闭环的误差；
- ∇ ——协调误差或不同轴、不同面误差； ∇_{AB} 表示工件 A 与 B 的协调误差；
- $\triangle$ ——叉耳配合或孔-轴-孔配合中心位置的相对误差；
- $\overset{\circ}{\Delta}$ ——深孔的轴心线对端面的不垂直误差。
- ω 、 ω_Σ ——分别表示误差与累积误差的分布带宽度之半；
- δ ——公差带宽度之半；以公差来控制误差且无超差时，可用 δ 表示相应的误差带宽度之半；
- δ_0 ——公差带的中点值；
- δ_r ——公差带的上限；
- δ_x ——公差带的下限；
- δ ——孔-轴-孔配合和叉耳配合中心位置的相对误差分布带宽度之半，或深孔不垂直误差分布带宽度之半；
- $\dot{\gamma}$ ——叉耳配合和孔-轴-孔配合中心位置相对误差的检验公差带宽度之半；或在多交点协调问题中，交点的不同心误差分布带宽度之半；

- γ ——叉耳配合和孔-轴-孔配合中心距协调误差的检验公差带宽度之半;
- $D(\Delta)$ ——偶然误差 Δ 的方差;
- $\sigma(\Delta)$ 或 σ ——偶然误差 Δ 的均方差;
- $\varphi(\Delta)$ ——偶然误差 Δ 分布的概率密度函数;
- k ——偶然误差分布的相对离散系数;
- α ——偶然误差分布的相对不对称系数; 但 $\alpha/^\circ\text{C}$ 表示材料的线膨胀系数;
- f ——偶然误差在某一区间出现的频率;
- $P(A)$ ——事件 A 出现的概率;
- Z ——偶然误差 Δ 与均方差 σ 的比值, 即 $Z = \frac{\Delta}{\sigma}$;
- N ——随机试验的总次数。但用作下标时, 表示公称尺寸;
- J ——叉耳配合或孔-轴配合之间的间隙;
- a ——叉耳配合的耳子厚度或孔-轴配合的轴径;
- b ——叉耳配合的叉子宽度或孔-轴配合的孔径;
- H ——计算累积误差分布带宽度之半 ω_z 用的修正系数;
- $f(n)$ ——按尺寸链增环和减环总数 n 所确定的, 用于近似计算累积误差分布带宽度之半 $\tilde{\omega}_z$ 的修正系数;
- M ——考虑到轴在孔中的不同松紧程度计算孔位或孔距误差的修正系数;
- m ——深孔结合时, 考虑到有限约束时对孔位协调误差乘的修正系数;
- L 和 l ——长度尺寸。

第一章 与协调有关的一般概念

一、飞机制造的准确度要求

飞机机体准确度的技术要求，一般包括以下几方面：

1. 部件气动外形准确度

部件表面的实际外形相对于理论外形（常常以部件的检验设备的工作外缘来代替）存在着误差。这些误差按其表现形式可划分为以下三种：

（1）实际外形相对理论外形的误差 Δh （见图 1-1）

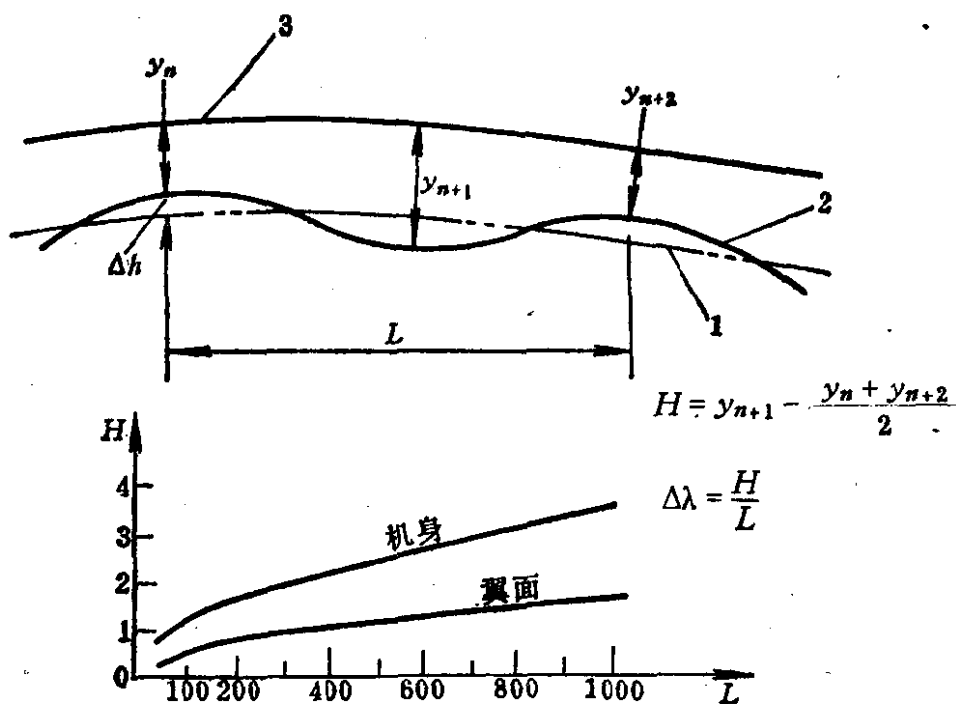


图1-1 部件外形误差和波纹度

1—理论外形，2—实际外形，3—等距样板或等距卡板的工作外缘， Δh —外形误差， L —波长， H —波深， y_n 、 y_{n+1} 、 y_{n+2} —在相邻波峰波谷处蒙皮外形与等距样板或等距卡板的间距。

各截面间的相对扭转和相对位移，当用部件检验型架进行检验时，也包括在这个误差之内；当用分散的检验样板进行检验时，则不包括在这个误差之内。在部件进行水平测量时，各测量点相对高度尺寸的误差，既包括了各该测量点处截面间的相对扭转和相对位移，也包括了各该测量点处的外形误差。

用数控坐标测量机检测部件外形时，既可检测外形综合误差，也可检测不包括截面间相对扭转和相对位移的各截面外缘型值误差。

各类飞机的气动外缘型值公差（不包括各截面间的相对扭转和相对位移）（表 1-1），与飞机的气动性能要求、机型大小、各部件的功能和结构特点，特别是工艺方法及工艺水平有关。

表 1-1 中的分类，以空机重 10~15 吨为大、小飞机的分界；以速度 600~700 公里/小时为高、低速飞机的分界，一般螺旋桨式为低速飞机，喷气式为高速飞机。I 区为各部件中气动力性能要求较高的部位，II 区为要求较低的部位。

（2）外形波纹度 $\Delta\lambda$

外形波纹度是指相邻两波峰与波谷的平均高度差 H 和波长 L 的比值（图 1-1），即

$$\Delta\lambda = \frac{H}{L}$$

式中
$$H = y_{n+1} - \frac{y_n + y_{n+2}}{2}$$

用直尺或样条检查波纹度时， $y_n = y_{n+2} = 0$ ，则 $H = y_{n+1}$ 。

$\Delta\lambda$ 仅与部件类型和与外形曲率大小相关联的波长 L 有

表1-1 各类飞机的气动外缘型值公差

(单位: 毫米)

部 件 差	飞 机 类 别		大 型		小 型	
			高 速	低 速	高 速	低 速
机身、起落架短舱、 腹鳍、垂尾前缘整流罩、 背鳍	I 区	基 本	± 2.0	± 2.0	± 1.0	± 2.0
		局 部	± 3 (10%)	± 3 (10%)	± 1.5 (10%)	± 2.5 (20%)
	II 区	基 本	± 3.0	± 3.0	± 1.2	± 2.5
		局 部	± 4 (10%)	± 4 (10%)	± 1.7 (10%)	± 3 (20%)
机翼、襟翼、副翼、吊 挂、发动机吊舱	I 区	基 本	± 1.0	± 1.5	± 0.6	± 1.5
		局 部	± 2 (20%)	± 2.5 (15%)	+ 0.6 - 1.2 (10%)	± 2.5 (20%)
	II 区	基 本	± 2.0	± 2.0	+ 0.6 - 1.0	± 2.0
		局 部	± 2.5 (10%)	± 3 (10%)	+ 0.6 - 1.5 (10%)	± 3 (20%)
水平安定面、垂直安 定面、方向舵、升降舵	I 区	基 本	± 1.0	± 1.5	+ 0.6 - 1.0	± 2.0
		局 部	± 2 (20%)	± 2.5 (15%)	+ 0.6 - 1.2 (10%)	± 3 (20%)
	II 区	基 本	± 2.0	± 2.0	+ 0.6 - 1.0	± 2
		局 部	± 2.5 (10%)	± 3 (10%)	+ 0.6 - 1.5 (10%)	± 3 (20%)

关。各类飞机的外形波纹度公差无明显的差别，这是因为它主要影响摩擦阻力。

(3) 表面平滑度

表面不平滑误差包括铆钉、螺钉、焊点处的局部凸凹缺陷和蒙皮对缝间隙、阶差等 (见图 1-2)。

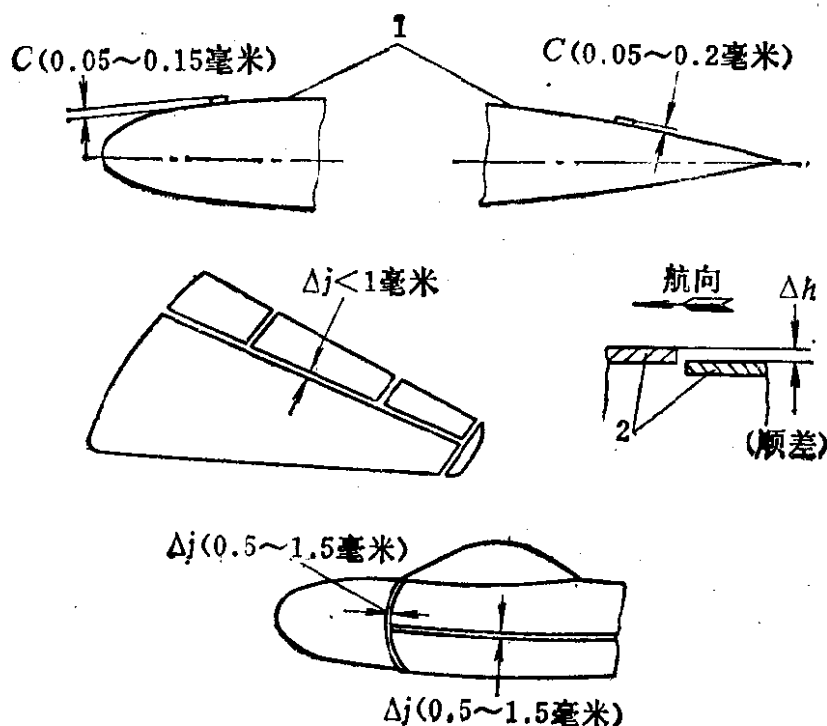


图1-2 对表面平滑度的要求

1—机翼剖面外形，2—外蒙皮； C —局部凸出量； Δj —间隙； Δh —阶差。

对表面局部凸凹缺陷，也有人给出一个极限高度值 C ， C 值在离前缘1米内为0.3毫米，2米内为0.6毫米等等。现常常从强度和气动力性能考虑，允许的 C 值比这个数据规定得严格，如图1-2所示。对蒙皮对缝间隙 Δj 有时按平行和垂直于气流方向分别规定其允许值；对阶差 Δh 则按顺气流和逆气流方向分别规定其允许值（图1-2中所示为顺气流的顺差）。

对难以保证精密间隙和阶差的舱门与机身配合处等，一般给予较大值的适当公差。例如“三叉戟”型旅客机的某些舱门和机身配合处的间隙，公称间隙为3.8~7毫米者，其公差为 $\pm 2.54 \sim \pm 1.9$ 毫米（间隙值和公差规定得较大之处，都是协调关系较复杂的部位）；允许舱门和机身外形的阶差凸出2.54毫米，凹进5.08毫米。

2. 部件相对位置的准确度

表示机翼、尾翼相对于机身位置的准确度参数，包括下反角 β （或上反角）、安装角 α （图 1-3）和后掠角的公差等，一般换算成线性尺寸在飞机水平测量和拉线测量公差中予以规定。

表示各操纵面相对于固定翼面位置的准确度参数是阶差、剪刀差和间隙（图 1-4），它们都包括在操纵面对固定翼面的吻合性公差之内，而吻合性误差是部件相对位置误差和部件制造误差的综合误差。

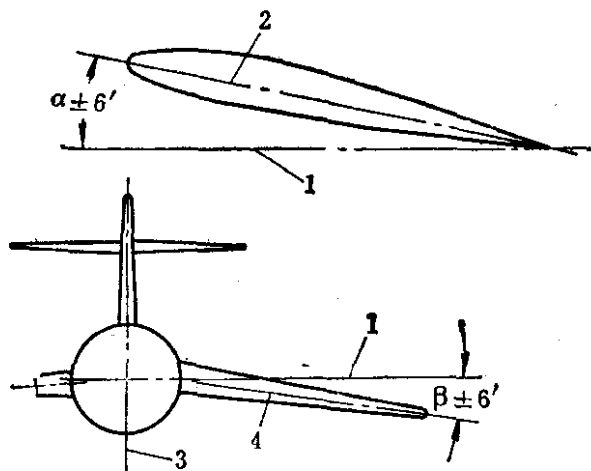


图1-3 机身翼面相对位置的准确度
 α —安装角； β —下反角；1—结构水平线；
2—弦线；3—对称轴线；4—弦平面。

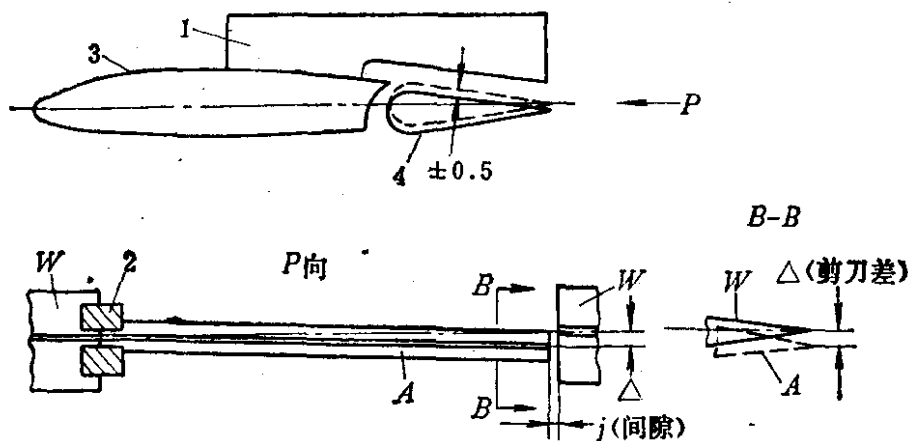


图1-4 副翼相对机翼位置的准确度

1—检验样板；2—夹具；3—机翼外形；4—副翼外形； W —机翼； A —副翼。

表示机身各段之间相对位置的准确度参数是同轴度。同轴度本身的要求并不高，一般为几毫米以内，但要保证各段对接处的阶差不超过表面平滑度的要求，并保证对接交点协

调, 因此, 对同轴度的要求实际上要由工艺方面确定。

3. 部件内部组合件和零件位置的准确度

如大梁轴线、翼肋轴线、隔框轴线、长桁轴线的实际装配位置相对于理论轴线的位置均有一定的准确度要求。它们的位置准确度对部件外形、接头位置和结构强度有影响, 特别是对装配协调常常有明显的直接影响。因此, 一般规定梁轴线允许位置误差和不平度不超过 $\pm 0.5 \sim \pm 1.0$ 毫米, 普通肋轴线的位置误差和不平度不超过 $\pm 1 \sim \pm 2$ 毫米。长桁位置允许误差不超过 ± 2 毫米, 等等。

4. 零件或装配件间的配合准确度

各种不可卸连接对零件间配合间隙的要求见表 1-2。

表1-2 连接方法对配合间隙的要求

连 接 方 法	在一定压力下零件间的允许间隙 (毫米)	备 注
铆接	0	铆钉处
	0.2~0.5	其余区域
胶接	0.01~0.2	
钎接	0.04~0.2	
接触点焊滚焊	$<0.1 \sim 0.15$	
熔焊(对接)	0.5~1.0	

叉耳接头的螺栓连接配合要求如下:

(1) 孔与螺栓的配合一般为 3~4 级精度, 第一种或第三种动配合, 如 $D_3/d_3/D_3$ 、 $D_3/dc_3/D_3$ 、 $D_4/d_4/D_4$ 、 $D_4/de_4/D_4$ 等。

(2) 三对或多于三对叉耳接头的活动面, 其孔轴线设