

形位误差测量

曾宪锋 编

目 录

编者的话	7
第一章 形位公差的基本概念	1
§ 1-1 形状误差和最小条件	1
一、形状误差	1
二、最小条件	1
§ 1-2 位置误差及其基准	3
一、位置误差	3
二、基准	4
§ 1-3 形位公差和公差带	6
一、形状公差和位置公差	6
二、公差带	6
§ 1-4 相关公差	10
一、独立公差和相关公差	10
二、相关公差中的几个概念	12
第二章 不直度	14
§ 2-1 概述	14
一、不直度误差和公差带定义	14
二、不直度公差的标注	15
三、不直度误差测量方法分类	18
§ 2-2 直接读数法测量不直度误差	19
一、光隙法	19
二、测微法	21
§ 2-3 作图计算法求不直度误差	21
一、作图法求不直度误差	22
二、计算法求不直度误差	26
§ 2-4 基准旋移法求不直度误差	32
一、基准变换的目的	32
二、旋移法的原则	34
三、旋移的方法	35
四、举例	36

§ 2-5 用综合量规检验不直度误差	39
一、不直度为独立公差时孔用量规	39
二、不直度为相关公差时孔用量规	40
第三章 不 平 度	41
§ 3-1 概 述	41
一、不平度误差和公差带定义	41
二、不平度公差的标注	42
三、不平度误差测量方法分类	43
§ 3-2 基面旋移法求不平度误差	45
一、判别准则	46
二、旋移的方法	47
三、举例	49
§ 3-3 线值误差算法求不平度误差	55
一、一般计算公式	55
二、计算举例	60
§ 3-4 作图法求不平度误差	63
一、线值误差作图法	63
二、正投影作图法	68
第四章 不圆度和椭圆度	73
§ 4-1 不圆度	73
一、不圆度误差和公差带定义	73
二、不圆度公差的标注	74
三、不圆度误差的测量	75
四、棱圆度的测量	78
§ 4-2 椭圆度	81
一、椭圆度误差和公差定义	81
二、椭圆度公差的标注	82
三、椭圆度误差的测量	83
第五章 不柱度和不圆柱度	84
§ 5-1 不柱度	84
一、不柱度误差和公差定义	84
二、不柱度公差的标注	85
三、不柱度误差的测量	86
§ 5-2 不圆柱度	86
一、不圆柱度误差和公差带定义	86

二、不圆柱度公差标注	87
三、不圆柱度误差的测量	88
第六章 不平行度	89
§ 6-1 概述	89
一、不平行度误差和公差带定义	89
二、对不平行度误差定义的几点说明	91
三、对不平行度公差带定义的几点说明	92
四、不平行度公差的标注	93
§ 6-2 不平行度误差的测量方法	95
一、平面对平面不平行度误差的测量	95
二、直线对平面不平行度误差的测量	99
三、平面对直线不平行度误差的测量	101
四、直线对直线不平行度误差的测量	102
第七章 不垂直度	105
§ 7-1 概述	105
一、不垂直度误差和公差带定义	105
二、对定义的几点说明	107
三、不垂直度公差的标注	107
§ 7-2 不垂直度误差的测量	110
一、平面对平面不垂直度误差的测量	110
二、直线对平面不垂直度误差的测量	113
三、平面对直线不垂直度误差的测量	122
四、直线对直线不垂直度误差的测量	124
第八章 不同轴度	127
§ 8-1 概述	127
一、不同轴度误差和公差带定义	127
二、对定义的几点说明	127
三、不同轴度公差的标注	129
§ 8-2 不同轴度误差的测量	130
一、打表法	130
二、瞄准法	140
三、影像法	142
四、用专用量规检验不同轴度	143
第九章 不对称度	146
§ 9-1 概述	146

一、不对称度误差和公差带定义	146
二、对定义的几点说明	147
三、不对称度公差标注	149
§ 9-2 不对称度误差的测量	151
一、平面对平面不对称度的测量	151
二、平面对轴线不对称度的测量	155
三、轴线对平面不对称度的测量	158
四、用综合量规检验不对称度	159
第十章 径向跳动和端面跳动	163
§ 10-1 径向跳动	163
一、径向跳动误差和公差定义	163
二、径向跳动公差标注	164
三、径向跳动误差的测量	166
四、径向跳动和不同轴度的关系	172
§ 10-2 端面跳动	173
一、端面跳动误差和公差定义	173
二、端面跳动公差标注	174
三、端面跳动误差的测量	175
四、端面跳动和不垂直度的关系	178
§ 10-3 圆锥面、球面和圆弧面的跳动	179
一、概述	179
二、测量方法	180
§ 10-4 跳动误差测量注意事项	183
一、测量基准的选择	183
二、基准孔用心轴的要求	184
三、指示仪表的选择	184
四、跳动为相关公差时的测量	185
第十一章 位移度	187
§ 11-1 概述	187
一、位移度误差和公差带定义	187
二、位移度的优点	190
三、位移度公差标注	196
四、位移度的基准	198
五、孔组位移度标注方法对公差带位置的影响	200
六、位移度的相关公差	202

§ 11-2 位移度误差的测量	204
一、用专用量规检验位移度	205
二、坐标计算法求位移度误差	210
三、误差点图法求位移度误差	214

附 录:	227
一、形位公差的公差值	227
二、形位公差和表面光洁度的关系	231
三、形位公差标注综合示例	231

第一章 形位公差的基本概念

§ 1-1 形状误差和最小条件

一、形状误差

实际形状对理想形状的变动量，称为形状误差。

实际形状是指零件上所要测量的实际线或实际面的形状。理想形状是指没有误差的形状，例如一条直线就是绝对直的，一个平面就是绝对平的，一个圆就是绝对圆的。

由于形状误差是实际形状相对于理想形状而确定的，所以在实际检验形状误差和进行数据处理时，必须首先选定理想形状的位置。如果理想形状的位置不同，则所得的误差值也不同，如图 1-1 所示，理想直线和实际直线相接触的位置不同时，得到不同的误差值 Δ ， Δ_1 和 Δ_2 。



$$\Delta < \Delta_1 < \Delta_2$$

图 1-1

那么，到底哪一个误差值才是正确的呢？这就需要明确理想形状的位置，即明确评定基准。标准中规定：

测量时，理想形状相对于实际形状的位置，应按最小条件来确定。

在这里，提出了一个最小条件的问题，指出在测量形状误差时，应按最小条件来确定理想形状的位置，这就给“形状误差”的测量规定了一个前提条件。

二、最小条件

最小条件是指在确定理想形状的位置时，应使该理想形状与

实际形状相接触，并使二者之间的最大距离为最小。

这就是说，按最小条件确定理想形状的位置时，必须满足两点要求：一是理想形状和实际形状相接触（不能相割）；二是理想形状和实际形状相接触后的位置，应是与实际形状之间的最大距离为最小。

如图 1-1 所示，有二条理想直线从上侧分别和实际直线相接触，实际直线上各点到这二条理想直线之间的最大距离分别为 Δ_1 、 Δ_2 ；还有一条理想直线是从下侧两端点与实际直线相接触，实际直线上各点到这条理想直线之间的最大距离为 Δ ，比较这三个误差值（最大距离），显然， $\Delta < \Delta_1 < \Delta_2$ ，因此 Δ 所在的理想直线的位置（通过实际直线两端点的连线）是正确的位置，符合“最大距离为最小”这一点要求。如果用 Δ_1 或 Δ_2 作为不直度误差，由于没有按最小条件来评定，将得到偏大的误差值，所以最小条件是检验时正确选择评定基准的前提条件，必须正确地加以理解和掌握。例如图 1-2 所示，用光隙法测量不直度误差时，对于中间凸起的零件，应转动刀口尺，使二侧的最大光隙相同（ $\Delta_1 = \Delta_2$ ），此时读出的误差值才符合最小条件的要求。

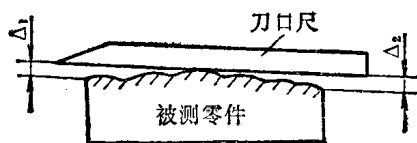


图 1-2

以前测量不直度误差时，常采用两端点连线法来确定理想直线的位置，如图 1-3 所示，将被测实际轮廓线两端点 A 、 B 连接起来，把 AB 直线当作理想直线，取实际轮廓上各点至 AB 直线的距离中最大正负绝对值之和，作为不直度误差，即： $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ 。

这种方法不符合国家标准规定的最小条件，往往得到偏大的

误差值。图 1-3 所示实际轮廓线不是单凸的或单凹的，不能用两端点连线法来确定其理想直线的位置，应该用包容线法来确定其

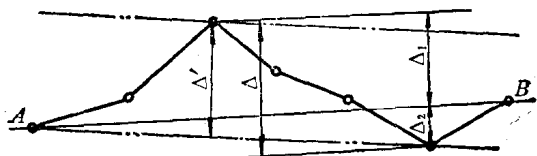


图 1-3

理想直线的位置，当采用最小条件所作二条平行的包容直线和实际轮廓线接触时，不直度误差应为 Δ' 。显然， $\Delta > \Delta'$ ，即按两端点连线法不能求得正确的误差值（只有单凸或单凹的实际轮廓线可用两端点连线法确定其理想直线的位置）。

这里要说明一点，即在某些形状误差的实际测量过程中，可能不容易完全按最小条件来确定理想形状的位置（或者比较麻烦），在这种情况下，如果能够保证产品质量，可以按比较接近最小条件的测量方法来决定误差值（即按这种近似方法测得的误差值小于允许的公差值时，可以采用这种测量方法）；但当发生争议，需要仲裁时，则必须按最小条件来评定。

§ 1-2 位置误差及其基准

一、位置误差

实际位置对其理想位置的变动量，称为位置误差。理想位置由基准的理想形状的位置来确定，测量时，确定基准的理想形状的位置应符合最小条件。

位置误差比形状误差复杂一些。一个表面的位置是相对于某一指定的基准表面而言的。所谓“基准”，就是“起点”或“根据”的意思。在设计、加工或测量时，零件表面的位置必须根据指定的一些面、线或点来确定，这些指定的面、线或点称为基准。

由于零件上的被测表面和指定的基准表面都是加工后得到的

实际表面，都可能存在加工误差——形状误差，所以在位置误差定义中，有两个理想形状的位置问题，一个是被测表面理想形状的位置，一个是基准表面理想形状的位置，它们之间的误差，即为位置误差，而被测表面理想形状的位置是根据基准表面理想形状的位置来确定的。

二、基 准

前面说过，实际零件上指定的基准也可能存在形状误差，如果以它为基准进行测量，则基准的形状误差必然要反映到被测表面的位置误差中去，这样就造成所测得的位置误差值不准确。怎样才能排除基准表面形状误差对位置误差的影响呢？那就要求基准表面按理想形状考虑，并且基准理想形状的位置应符合最小条件。一般可用平板的基准表面来代替被测件的基准表面。

例如图 1-4 a 所示，测量上平面对下平面的不平行度，下平面是基准，可将零件放在平板上。此时，零件的基准表面由平板的基准平面所代替，即平板的表面就是零件基准表面理想形状的位置。但在测量时，应注意按最小条件来调整被测零件基准表面的位置。如图 1-4 c 所示，当被测零件的基准表面为中间凸出时，应使两边的间隙相等，即 $\Delta_1 = \Delta_2$ ，这时零件基准表面相对于测量基准（即评定基准）的位置才符合最小条件，才是正确的。

基准的理想形状的位置确定后，即可确定被测表面的理想位置，它是相对于基准平面按位置误差的特征来确定的。例如不平行度误差，被测表面的理想位置应平行于基准平面。即是说，在位置误差中，被测表面的理想位置是有条件的，它受基准表面的约束，不一定符合最小条件。如图 1-4 b 所示，在测量上表面对下平面的不平行度误差时，按定义，误差值为“包容被测表面并平行于基准平面且距离为最小的两平行平面间的距离 Δ ”。定义中的“距离为最小”，与形状误差中的“最小条件”是不同的，因为这时所说的“距离为最小”的两平行平面是有条件的，它首先

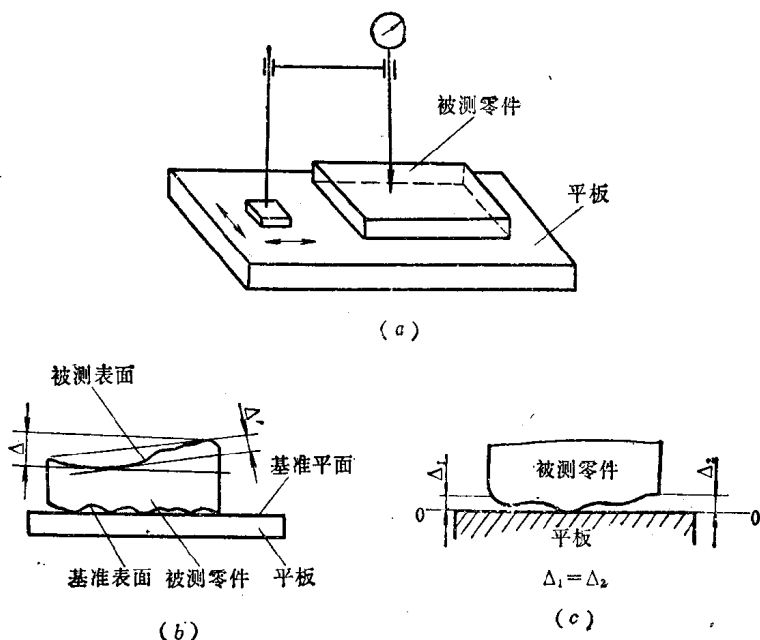


图 1-4

必须平行于基准平面。从图 1-4 b 可以看出, Δ 为不平行度误差, 而符合最小条件计量得出的不平度误差是 Δ' , 二者并不相等。

测量位置误差时, 对于被测表面一般是不排除形状误差的影响, 即测量时, 就在零件的被测表面上直接进行测量。这是因为: (1) 在测量过程中, 排除被测表面的形状误差比较困难; (2) 形状误差相对于位置误差, 一般很小, 可以忽略不计; (3) 位置误差中包含了形状误差, 是对零件的精度要求提高了、不是降低了, 这对提高产品质量有好处; (4) 考虑国际上技术交流, 因为大部分国家在评定位置误差时, 一般也不排除形状误差的影响。

但在标准中又规定: “①必要时, 可排除被测表面形状误差的影响。②实际轴心线可用轴、孔等的实际表面来体现。当用心轴或量规测量时, 用心轴或量规的轴心线来代替。” 这是从实际

出发，考虑测量的简便，并在分析误差产生的原因时，把形状误差和位置误差分开，找出产生误差的原因，以便采取相应的工艺措施以减少位置误差，提高产品质量。

§ 1-3 形位公差和公差带

形状误差和位置误差是否合格，要看图纸上规定的形位公差值和公差带。

一、形状公差和位置公差

形状误差的最大允许值，称为形状公差。

位置误差的最大允许值，称为位置公差。

误差是一个实际数值，通过测量获得，用符号 Δ 表示。

公差是一个给定值，它是根据设计要求给定的，是限制误差的最大允许值，用符号 δ 表示。

形位公差在概念上和尺寸公差是一致的，但在标注时，尺寸公差可标注上下偏差，而形位公差是图纸上给定的允许形位误差的范围，没有正值和负值之分。

二、公差带

限制实际形状或实际位置变动的区域叫公差带。构成实际形状和位置的点、线、面必须在此区域内。

公差带和公差值配合使用，是给定的限制形位误差的空间或平面上的一个区域，零件的实际轮廓应在此区域内才算合格。用公差带来限制形位误差比较形象、确切。形位公差的公差带比尺寸公差的公差带要复杂一些，由以下四个因素来决定（简称公差带四要素）：

1. 公差带的大小

公差带的大小是指它的宽度、直径或半径，由公差值来决定，可以是一倍或二倍的公差值（对于不同轴度、不对称度和位移度

为二倍公差值，其余为一倍)。对于圆形公差带，若公差值为直径值时，在公差值前加注“ ϕ ”；若为半径值时，加注“ R ”。

2. 公差带的形状

公差带的形状由误差的特征和它在图样上的标注来决定。主要有以下八种：(1) 两条平行直线；(2) 一个圆；(3) 一个球；(4) 两个同心圆；(5) 一个圆柱体；(6) 两个同轴的圆柱面；(7) 两个平行平面；(8) 一个四棱柱。

3. 公差带的方向

形状公差带的方向，由图纸上给定的方向和最小条件来决定（因为最小条件决定了理想形状的位置）。

位置公差带的方向，由图纸上给定的方向和误差的特征来决定。例如不平行度的公差带，必须平行于基准面，即其方向垂直于基准平面。

4. 公差带的位置

公差带分为固定的和浮动的两种。

“固定”的公差带，其位置是固定的，不受尺寸公差等因素的影响。如不同轴度的公差带——一个圆柱体，它的轴心线与基准轴心线或公共轴心线相重合，不因轴或孔的实际尺寸改变而改变其轴心线的位置。

“浮动”的公差带，其位置随零件的实际尺寸而变动。如平面之间的不平行度公差带，是随被测表面至基准平面之间的距离变化而“浮动”的。但应注意，“浮动”的范围也同样受尺寸公差的控制。

公差带的确定取决于上述四个因素。

表 1-1 列出了公差带四要素一览表，可供参考。

表1-1 公差带四要素一览表

公差项目	图纸给定条件	公差值	公差带			位置
			大小	形状	方向	
形状公差	给定平面内	δ	δ	两条平行直线	按给定方向 与最小条件	浮 动
	给定一个方向	δ	δ	两个平行平面		
	给定二个方向	δ_1 和 δ_2	δ_1 和 δ_2	一个四棱柱		
	在任意方向	$\phi\delta$	$\phi\delta$	一个圆柱体		
		δ	δ	两个平行平面		
		δ	δ	两个同心圆		
不圆度		δ	δ	—	—	—
椭圆度		δ	δ	—	—	—
不柱度		δ	δ	—	—	—
不圆柱度		δ	δ	两个同轴的圆柱面	按最小条件	浮 动
位置公差	平面对平面	δ	δ	两个平行平面	平行于基准平面	浮 动
	直线对平面	δ	δ	两个平行平面	面并按给定方向	浮 动
	平面对直线	δ	δ	两个平行平面	平行于基准方向	—
	直线给定一个方向	δ	δ	两个平行平面	线并按给定方向	—
	给定二个方向	δ_1 和 δ_2	δ_1 和 δ_2	一个四棱柱	—	—
	在任意方向	$\phi\delta$	$\phi\delta$	一个圆柱体	—	—
不垂直度	平面对平面	δ	δ	两个平行平面	垂直于基准平面	浮 动
	直线给定一个方向	δ	δ	两个平行平面	面并按给定方向	—
	给定二个方向	δ_1 和 δ_2	δ_1 和 δ_2	一个四棱柱	—	—
	在任意方向	$\phi\delta$	$\phi\delta$	一个圆柱体	—	—
	平面对直线	δ	δ	两个平行平面	垂直于基准方向	—
	直线对直线	δ	δ	两个平行平面	线并按给定方向	—

不同轴度		$R\delta$	$\phi 2\delta$	一个圆柱体	按基准轴心线	固定：与基准轴心线同轴
不对称度		δ	2δ	两个平行平面	按基准对称中心面	固定：分布于基准对称中心面两侧
位置度	点	δ	2δ	两条平行直线	按给定方向	固定：按理论正确位置尺寸
	给定一个方向	δ_1 和 δ_2	$2\delta_1$ 和 $2\delta_2$	一个四方形	按给定方向	
	给定二个方向	δ_1 、 δ_2 和 δ_3	$2\delta_1$ 、 $2\delta_2$ 和 $2\delta_3$	一个四棱柱	按给定方向	
	给定三个方向	$R\delta$ 或球 δ	$\phi 2\delta$ 或球 2δ	一个圆或球	—	
	在任意方向	δ	2δ	两个平行平面	按给定方向	
	给定二个方向	δ_1 和 δ_2	$2\delta_1$ 和 $2\delta_2$	一个四棱柱	—	
线	在任意方向	$R\delta$	$\phi 2\delta$	一个圆柱体	按给定方向	
面		δ	2δ	两个平行平面	按给定方向	
径向跳动		δ	—	—	—	—
端面跳动		δ	—	—	—	—

位置公差

§ 1-4 相 关 公 差

一、独立公差和相关公差

标准中规定：形状公差和位置公差可以是独立公差或者是相关公差。

为了说明独立公差和相关公差的概念，先分析一下两个零件相配合（装配）的情况。

图 1-5 a 所示为一圆柱孔，其直径尺寸为 $\phi 10^{+0.03}$ ，轴心线不直度公差值为 $\phi 0.01$ 。

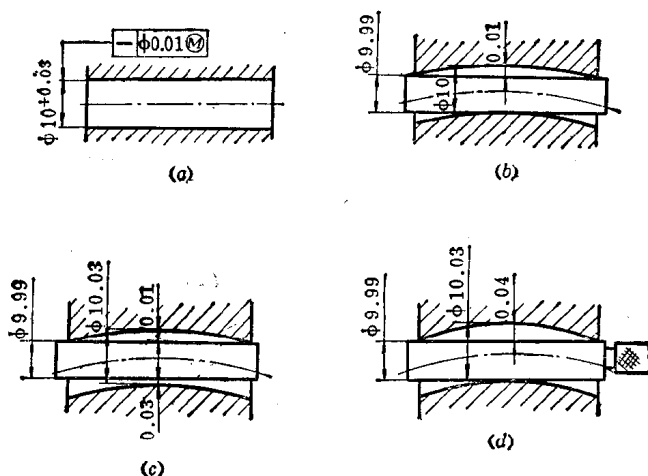


图 1-5

如图 1-5 b 所示，当孔处于最小极限尺寸 $\phi 10$ ，不直度误差也处于最大值 0.01 时，如要将一圆柱销装入此孔内，则圆柱销的最大尺寸应等于孔的最小极限尺寸 $\phi 10$ 减去不直度的误差值 0.01 ，即 $10 - 0.01 = 9.99$ 。此时，圆柱销刚好装入孔内，孔壁与圆柱销之间将无间隙。显然，这是能装配的最坏情况。如果孔做大一点，则圆柱销装入孔内就会有间隙存在。如图 1-5 c 所示，孔处于最大极限尺寸 $\phi 10.03$ ，不直度误差仍为最大值 0.01 时，

同样的圆柱销 $\phi 9.99$ 装入后,有 0.03 的间隙存在。从可装配性来看,还允许孔的不直度误差值增加,增加值最大可到 0.03 。也就是说,当孔处于最大极限尺寸时,孔的轴心线不直度误差值最大可为 $0.01+0.03=0.04$,此时,圆柱销仍能装入,如图1-5d所示。换句话说,仅从可装配性考虑,孔的不直度误差可以用其尺寸公差来补偿。

这个例子可以引出以下概念:

1. 独立公差

独立公差值即为图样上给定的数值,与零件有关表面的实际尺寸无关。

也就是说,独立公差的公差值是固定的,它不允许用有关的尺寸公差来补偿。如图1-5a所示圆柱孔轴心线的不直度,当采用独立公差时,则无论孔的直径处于最大还是最小极限尺寸,它都只允许不直度误差最大为 0.01 ,超过了就不合格。从检验的角度看,这时要用万能量具来检验,不能用综合量规检验了。

2. 相关公差

相关公差值不仅与图样上给定的数值有关,而且与零件有关表面的实际尺寸有关。

这一公差是考虑到零件的可装配性提出来的,它比独立公差的要求低一些。如例中,当孔的轴心线不直度公差采用相关公差时,则只要圆柱销能装入孔内,当孔的直径做成最大极限尺寸时,孔的轴心线不直度误差值到 0.04 ,比给定的数值超差 0.03 也算合格。这种情况的不直度公差值 0.04 ,就称为相关公差。即是说这一不直度公差不仅取决于图样上给定的值 0.01 ,还与孔的实际尺寸有关。可见,应用相关公差可提高产品的合格率,同时,可用综合量规检验,其检验效率也大为提高。

为了区别采用独立公差还是相关公差,给相关公差规定了一个符号 $\textcircled{\Phi}$ 。在图样上,凡公差值后面注有 $\textcircled{\Phi}$ 时,则表示为相关公差;若不注这一符号,则为独立公差。