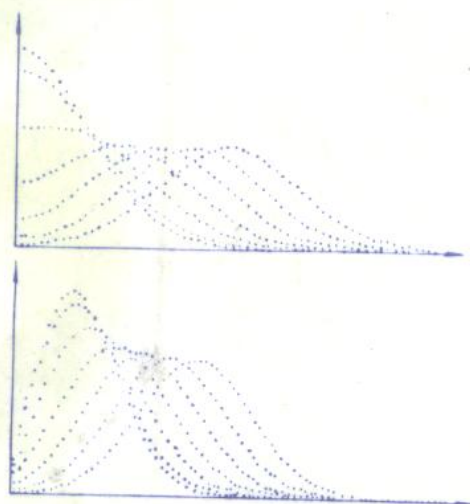
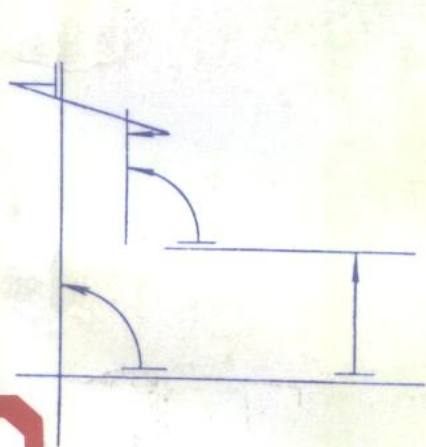


零件与工装的 形位精度理论与应用

吴永宽 于连璋 编著



机械工业出版社

H161

零件与工装的形位精度 理论与应用

吴永宽 于连璋 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

DV05/17

本书较系统地介绍了有关零件及其工艺装备的形状和位置精度的理论与应用,阐述了运用几何要素自由度规律对零件位置公差要求的分析,零件与产品位置公差的换算,工艺装备设计中形位精度的分析与计算,形位误差分布的基本规律及其应用。

本书内容新颖,对某些传统的工艺精度理论提出了新的概念与见解。为了便于形位精度理论在生产实践中广泛应用,书中还给出了大量的应用实例以及有关数值计算用表。

本书可供从事机械设计、制造工艺、质量管理和计量检验工作的工程技术人员使用,也可供高等院校有关专业师生参考。

零件与工装的形位精度理论与应用

吴永宽 王廷璋 编著

责任编辑: 张佳

封面设计: 方 芬 版式设计: 冉晓华

责任印制: 王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码: 100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $5^{1/4}$ · 字数112千字

1994年1月北京第1版·1994年1月北京第1次印刷

印数 0 001—2 800 · 定价: 6.80元

*

ISBN 7-111-03779-0/TG·832

前 言

现代机械工业的发展,对零件的精度要求越来越高。传统的机械制造工艺精度理论中,一般仅注重了尺寸精度的研究,而对形状和位置精度的研究,从理论探讨到实践应用则还远远不够。从某些生产实际中可以看到,有的产品由于零件或部件的形位精度存在问题,已严重地影响了产品质量的提高。为此,应研究新的形位精度理论,传统的工艺精度理论与工装设计中的某些概念应予以更新,使设计人员能据此正确地进行产品与零件设计,工艺人员能切实保证零件与产品技术要求的全部实现。

作者在对零件与工装的形位精度理论进行了多年研究的基础上编著了《零件与工装的形位精度理论与应用》一书。全书共分五章。第一章介绍了形位精度的基本概念以及有关工艺基础知识,提出了运用几何要素自由度规律分析零件图的位置公差与公差带图的方法;第二章介绍了在设计与工艺中有关零件与产品位置公差的换算方法——公差带图解法和尺寸链解法;第三章论述了工艺装备设计中形位精度的分析与计算;第四章论述了形位误差分布的基本规律;第五章讨论了形位误差分布规律的应用。为了便于形位精度理论在生产实践中广泛应用,书中还给出了大量应用实例与有关数值计算用表。

作者对形位精度理论的研究工作得到了全国形位公差标准化技术委员会的指导,孙德有副教授对本书的编写给予了

热忱的帮助，在此一并表示谢意。

限于作者水平，书中难免存在差错与疏漏之处，恳请读者指正。

目 录

第一章 零件的形位精度	1
一、精度的概述	1
1. 精密度和精确度	1
2. 设计精度和加工精度	2
二、位置公差标注及其公差带分析	2
1. 被测要素与基准要素之间的自由度分析	3
2. 位置公差标注的自由度分析	7
3. 位置公差标注的公差带分析	10
三、零件形位精度的主要获取方法与影响因素	17
1. 获取零件形状精度的主要方法	17
2. 影响零件形状精度的主要工艺因素	18
3. 获取零件位置精度的主要方法	19
4. 影响零件位置精度的主要工艺因素	19
第二章 位置公差换算与形位尺寸链	21
一、位置公差的换算方法	21
1. 尺寸链计算法	21
2. 公差带图解法	25
二、零件位置公差换算与零件尺寸链	25
1. 基准排列及其特点	25
2. 定向误差的换算	27
3. 定位误差的换算	33
三、装配公差的解算与装配尺寸链	44
1. 配合件自由配合时装配精度的分析计算	44
2. 配合要素自由度被限制时装配精度的分析计算	46

第三章 工装设计中形位精度的分析与计算	57
一、机床夹具设计中形位精度的分析计算	57
1. 零件公差按相关原则标注时定位误差的分析计算	57
2. 零件被测要素公差按包容原则标注时工序尺寸和夹 具有公差确定	63
3. 关于重复定位	69
4. 关于全形定位元件	83
5. 利用尺寸链原理分析夹具精度对加工精度的影响	89
二、机床夹具装配图技术要求的框格代号标注	94
1. 采用框格代号标注的必要性	95
2. 采用框格代号标注的要点	98
第四章 形位误差分布的基本规律	105
一、折叠正态分布与瑞利分布	105
1. 折叠正态分布	105
2. 瑞利分布	110
二、形位误差的分布规律	115
1. 形位误差的数学模型	115
2. 形位误差的两种概率分布	119
第五章 形位误差分布规律的应用	125
一、零件废品率的计算	125
二、形位误差分散范围的计算	127
1. 形位误差为折叠正态分布时误差分散范围的计算	128
2. 形位误差为瑞利分布时误差分散范围的计算	130
三、形位精度统计分析中常值系统性误差的确定	133
1. 常值系统性误差的传统确定方法不适用于形位精度 的统计分析	134
2. 形位精度统计分析中常值系统性误差的确定方法	137
四、形位误差分布规律在产品设计与工艺设计中的应用	138
附录一 形位误差分布抽样验证20例	143

附录二 数理统计用表	149
表1 标准正态分布函数表	149
表2 χ^2 分布分位数表	150
表3 标准折叠正态分布函数表	152
表4 标准折叠正态分布特征数表	154
表5 标准瑞利分布函数表	155
表6 标准瑞利分布特征数表	157
参考文献	158

第一章 零件的形位精度

零件的形位精度是零件的形状精度和位置精度的简称。零件图中的公差值体现了零件的设计精度，制造中的加工误差反映了零件的加工精度，因此形位公差和形位误差分别体现和反映了形位精度的设计精度和加工精度。围绕形位精度这一主题，本章主要讨论如何运用几何要素自由度规律去分析零件图中的位置公差要求，并简要介绍有关精度的基本概念及加工精度的工艺基础知识。

一、精度的概述

精度是产品或零件质量要求之一，包含了精密度和精确度两个概念。零件精度又包含了设计精度与加工精度两方面。

1. 精密度和精确度

精密度指在精度方面能够达到或应具有的范围。如机床精密度是指加工零件所使用的机床能达到的精度范围，量具精密度是指测量零件所使用的量具能达到的精度范围，零件精密度是指根据零件的功用对其本身提出具有一定范围的精度要求。

精确度指在精度方面相对于理想状态的符合程度。如零件加工后的精度即被加工零件的精确度。

通常为了加工出精确度高的零件，必须备有精密度相应高的机床设备。若掌握、运用工艺精度理论，并采取一定的工艺措施，同样精密度的机床设备可以加工出精确度更高的零

件。

2. 设计精度和加工精度

设计精度指根据整机性能对其组成零件的几何参数提出的一定范围的精度要求，在零件图上以公差表示。

加工精度指加工后零件的几何参数与理想零件的符合程度。它们之间的差异值称为加工误差。

其中几何参数是指零件的尺寸、形状和相互位置，其精度分别称为尺寸精度、形状精度和位置精度。形状精度是指对零件形状方面的要求。直线度、平面度、圆度、圆柱度、线轮廓度、面轮廓度等六项形状公差就是表示形状精度要求的；位置精度是指零件有关要素之间在相互位置方面的精度要求。定向公差（平行度、垂直度、倾斜度）、定位公差（同轴度、对称度、位置度）、跳动公差（圆跳动、全跳动）八项位置公差就是表示位置精度要求的。若零件图中未注形位公差，则说明零件形位精度要求不高，由相应的未注公差予以控制。

在产品（或工艺装备）设计中提出的形位精度为设计精度，加工后得到的形位精度为加工精度。

二、位置公差的标注及其公差带分析

在零件设计中，零件的位置精度要求一般是通过合理标注零件图中的位置公差来体现的。鉴于在现场实际生产中一些人对零件图中位置公差的标注或理解尚存在一定难度的情况，本节提出了运用几何要素自由度规律去分析零件图中的位置公差及其公差带图，从而为设计和工艺人员提供了一种简便而准确的位置公差的标注与理解方法。

1. 被测要素与基准要素之间的自由度分析

(1) 典型要素的自由度分析

一个在空间处于自由状态的刚体具有六个自由度，即沿三个相互垂直的坐标轴的移动自由度，以及绕这三个坐标轴的转动自由度，如图1-1所示。在机床夹具设计的定位分析中，习惯上用 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 和 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 来表示。如果把这六个自由度都加以限制，则刚体在空间将得到唯一确定的位置。由夹具设计又得知，工件在夹具中定位所需要限制的自由度数目与工件结构形状和加工技术要求有关。例如磨削平板平面时只需限制三个自由度，而磨削光轴外圆面时需限制四个自由度。

若把这一规律加以引伸，可以运用到零件表面的位置关系分析中。零件的各个组成表面可以分别看成是一些独立的刚体，也具有六个自由度，通过图形、尺寸公差和形位公差便可以将被测要素的自由度限制在一定的区域内。由于构成零件各种几何要素形状不同，因此对其位置确定所需限制的自由度数目也是不同的。下面分析诸典型要素的自由度。

1) 点的自由度分析 如图1-2所示，确定空间中一个点的位置，只要求限制三个移动自由度 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 就可以了，而它的三个转动自由度 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 对分析它的位置关系没有实

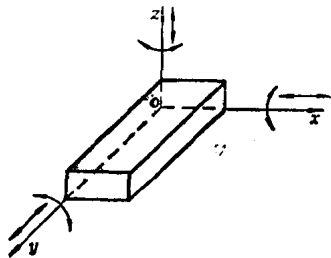


图1-1 刚体的自由度

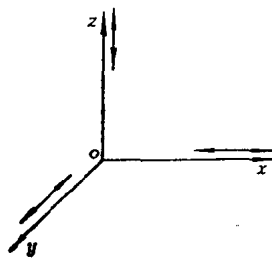


图1-2 点的自由度

实际意义，故认为一个点在空间中只具有三个移动自由度。通常用通过球心的一个点要素来代表球面，故确定一个完整的球面在零件中的位置关系，只需限制三个移动自由度。

2) 直线的自由度分析 如图1-3所示，确定空间中一条直线的位置，只需限制两个移动自由度 $\bar{x}$ 、 $\bar{z}$ 和两个转动自由度 $\bar{x}$ 、 $\bar{z}$ 就可以了，而其余两个自由度 $\bar{y}$ 、 $\bar{y}$ 对分析它的位置关系没有实际意义，故认为一条直线在空间中只具有四个自由度。通常用直线表示圆柱体（轴或孔）的轴线，故确定一个完整的圆柱体在零件中的位置关系，只需限制四个自由度。

3) 平面的自由度分析 如图1-4所示，确定空间中一个平面的位置，只需限制一个移动自由度 $\bar{z}$ 和两个转动自由度 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 就可以了，而其余三个自由度对分析它的位置关系没有实际意义，故认为平面在空间中只具有三个自由度。

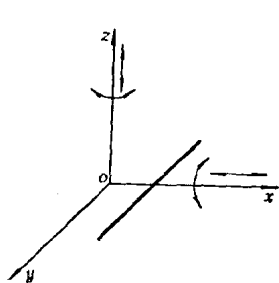


图1-3 直线的自由度

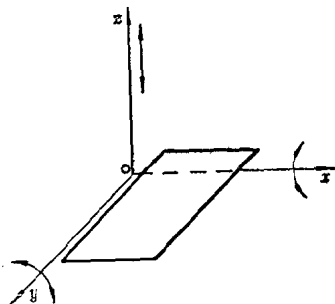


图1-4 平面的自由度

其他形状的表面所需限制的自由度数可以依次类推。例如圆锥面与圆柱面比较还需增加限制沿轴线方向的移动自由度。

(2) 被测要素与基准要素之间的自由度分析

构成零件被测要素和基准要素的有点、线、面，被测要

素与基准要素本身所具有的自由度数目同前所述。但前面分析要素的自由度是采用直角坐标进行分析的，而在实际零件中被测要素的位置是相对于基准要素而言的。因此，掌握各种基准要素能够限制被测要素的哪些自由度是很重要的。

一般讲来，一个基准要素能够限制被测要素的自由度数目不能超过基准要素本身所具有的自由度数目，具体限制自由度数目与被测要素和基准要素的类型以及它们之间的相互位置关系有关。表1-1列出了基准要素与被测要素分别为三种不同典型要素和几种不同位置关系时所能限制的自由度数目。

表1-1 典型要素的自由度分析

基准要素 (或被测要素)	被测要素 (或基准要素)	位置关系	限制自由度数目	
			转动自由度	移动自由度
点	点	重 合	0	3
		不 重 合	0	1
	直 线	重 合	0	2
		不 重 合	0	1
	平 面	重 合	0	1
		不 重 合	0	1
直 线	直 线	重 合	2	2
		平 行	2	1
		垂 直	1	1
		相 交	1	1
	平 面	重 合	1	1
		平 行	1	1

(续)

基准要素 (或被测要素)	被测要素 (或基准要素)	位置关系	限制自由度数目	
			转动自由度	移动自由度
直 线	平 面	垂 直	2	0
		相 交	1	0
平 面	平 面	重 合	2	1
		平 行	2	1
		垂 直	1	0
		相 交	1	0

从表1-1中可以看出:

1) 当基准要素是一个点要素时,它与三种被测要素的位置关系有六种不同组合情况,而不管被测要素处在什么位置上,其本身的转动自由度都不能被限制住。这是因为作为基准要素的点本身不具有转动自由度,因此,它也就不能限制其他要素的转动自由度。

2) 当基准要素是直线要素时,它与三种被测要素的位置关系可以有十种不同组合情况。其中与点要素的位置关系同前面分析过的点与直线的位置关系是一样的,这说明当基准要素与被测要素相互调换时,其所限制的自由度数目是不变的。

3) 当基准要素是平面要素时,它与三种被测要素的位置关系也有十种不同组合情况。其中与点要素及与直线要素的位置关系同前面分析,只不过是把基准与被测的关系互相调换一下而已,其所限制的自由度数目不变。

顺便说明一点,当作为基准的直线实际要素长度很短(即

所表示的圆柱体长径比很小), 或平面实际要素为狭长平面时, 在工程中通常近似认为前者仅能限制两个移动自由度, 后者仅能限制一个移动自由度和一个转动自由度。

从上述分析中可以看出, 只有当被测要素的某个自由度同时是基准要素的自由度时, 则该自由度才能被限制。同时也看出, 被测要素的自由度, 在多数情况下不能被一个基准要素全部限制, 如果想全部限制被测要素的自由度, 就需要采用两个以上的基准要素, 这正是在位置公差标注中为什么对同一个被测要素常采用两个或多个基准要素的原因所在。

2. 位置公差标注的自由度分析

在位置公差标注中, 若对同一个被测要素同时采用两个以上基准要素作为基准时, 经常会发生重复限制自由度的问题。

如图 1-5 所示, 图中零件 ϕ_1 孔的位置被

A、B、C 三个基准所限制, ϕ_1 孔轴线共具有四个自由度 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 、 $\bar{\gamma}$ (坐标系如图中所示), 其中基准 A 限制了两个转动自由度 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$, 基准 B 限制一个移动自由度 $\bar{y}$ 和一个转动自由度 $\bar{x}$, 基准 C 也限制一个移动自由度 $\bar{x}$ 和一个转动自由度 $\bar{y}$ 、其中基准 B 和 C 所限制的转动自由度 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 与基准 A 重复限制。如果基准要素没有形状误差, 且诸基准要素之

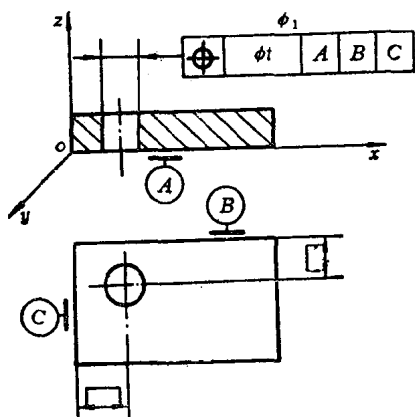


图 1-5 以三个平面为基准标注直线位置公差的示例

间也没有位置误差,那么这种重复限制是无关紧要的。但事实上没有误差是不可能的,实际零件中各个要素都存在不同程度的误差,基准要素的形状误差在基准建立时应当排除掉。由形位公差国家标准中三基面体系的建立规定得知,对于多基准,当第二基准或第三基准发生重复限制时,该第二或第三基准对实际要素就不能按最小条件建立,而只能按关联要素的实效边界作为建立基准的必要条件。这样就可以把基准之间的位置误差排除掉,使基准之间的位置关系处于理想位置上,从而使这种重复限制自由度情况不能产生相互干涉现象。

因此,位置公差标注中,分析各基准限制被测要素的自由度应依据:第一基准为它所限制的全部自由度数,与第一基准不重复限制的自由度为第二基准所限制的自由度数,与第一和第二基准不重复限制的自由度为第三基准所限制的自由度数。应当指出,当基准要素的相对尺寸相差较大时,其重复限制现象亦可忽略不计。如图1-5中若基准B和C高度很小时,便起不到限制 ϕ_1 孔轴线转动自由度的作用,此时重复限制就可忽略不计。

下面再通过两个典型例子,讨论在零件图的位置公差标注中,如何应用自由度规律去分析被测要素与基准要素之间的位置关系。只要掌握了它们的规律性,工艺人员就能正确理解零件图中原设计人员提出的位置公差要求,同时也能使设计人员正确标注零件图中的位置公差要求。

例1 图1-6所示零件图中以直线为主要基准,对点、直线和平面进行标注。零件图中球面 ϕ_2 本身有三个移动自由度,被基准A限制了两个自由度 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$,被基准B限制了一个自由度 $\bar{x}$;圆柱面 ϕ_3 本身有四个自由度 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 、 $\bar{y}'$ 、 $\bar{z}'$,全部被基准A所限制;圆柱面 ϕ_4 本身有四个自由度 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 、

$\hat{y}$ 、 $\hat{z}$ ，其中三个自由度 $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$ 、 $\hat{z}$ 被基准A所限制，还有一个自由度 $\hat{y}$ （即沿半径为R的圆周方向运动自由度）没被限制；端平面B本身有三个自由度 $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$ 、 $\hat{z}$ ，其中两个转动自由度 $\hat{y}$ 、 $\hat{z}$ 被基准A限制，还有一个移动自由度 $\hat{x}$ 没被限制。

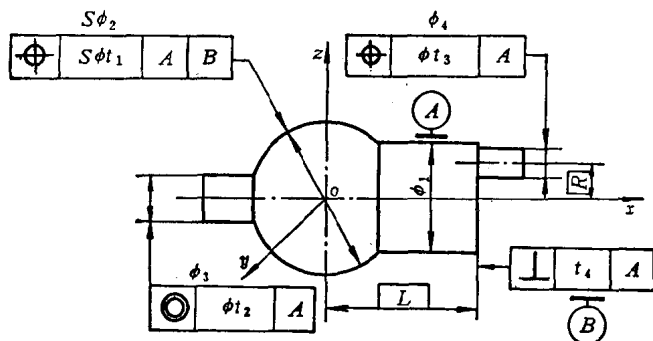


图1-6 以直线为主要基准标注点、直线和平面位置公差示例

例2 图1-7所示零件为由一组相同的点所组成的几何图框位置公差标注的示例。零件端面上有四个半球形表面，其所组成的几何图框为在同一平面上，并按 ϕ_3 均匀分布的四个理想点。这个几何图框本身有六个自由度，被基准A限制了两个转动自由度 $\hat{y}$ 、 $\hat{z}$ 和一个移动自由度 $\hat{x}$ 。基准B虽然也可以限制两个转动自由度 $\hat{y}$ 、 $\hat{z}$ 和两个移动自由度 $\hat{y}$ 、 $\hat{z}$ ，但其中两个转动自由度与基准A重复限制、由于基准B排在A后面，故按规定上述两个转动自由度 $\hat{y}$ 、 $\hat{z}$ 只能由基准A所限制。此外还有一个绕轴线转动的自由度 $\hat{x}$ 未被限制。

通过上面两例分析进一步说明，只有应用自由度规律才能对要素的位置公差标注得到严密的科学解释，尤其对采用