

# 直线度平面度测量技术

张善锤 于瀛洁 张之江 编

中国计量出版社

# 直线度平面度测量技术

张善鍾 于瀛洁 张之江 编著

中国计量出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

直线度平面度测量技术/张善锤等编著. —北京:中国计量出版社,1997

ISBN 7-5026-0929-6

I. 直… II. 张… III. ①直线度测量②平面度测量 IV. TG83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 15170 号

## 内 容 提 要

主要包括:直线度、平面度各种测量方法及测量器具的基本原理;激光直线度测量中功率波动和激光束漂移的补偿方法;双频激光渥拉斯顿棱镜直线度测量系统测量机理及误差的理论分析和计算;最小条件法评定直线度误差及平面度误差计算机精确计算实用新方法;直线度误差及平面度误差测量不确定度的计算方法及计算公式。本书可作为从事精密测试及精密加工工作的科技人员及高校本科生、研究生、教师的参考用书。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*

850×1168毫米 32开本 印张7.5 字数192千字

1997年9月第1版 1997年9月第1次印刷

\*

印数1—3000 定价:12.00元

## 前 言

直线度、平面度是表示零件形状的主要几何要素之一,在许多场合下,它们是影响仪器和机器精度、性能和质量的重要因素,在一些场合,甚至是决定因素。直线度、平面度测量是几何量计量中最基础的测量之一。本书专门就直线度、平面度测量技术作全面系统的讨论。

全书共分五章。第一章导论。介绍了有关术语,直线度、平面度公差的定义以及平面度计量器具国家计量检定系统等内容。第二章直线度测量。介绍了直线度测量中的各种直线基准;详细讨论了各种通用的和专门用途的直线度测量方法和测量器具的基本原理;介绍了直线度测量的某些新进展;讨论了激光直线度测量中激光功率波动及光束漂移的补偿方法和控制方法;讨论了双频激光渥拉斯顿棱镜直线度测量系统的测量机理及误差,对此从理论上作了详细的分析推导和计算;最后,本章对各种直线度测量方法的特点作了综评,并提出了在设计和拟定直线度测量方案时建议遵循的几条测量原则。第三章直线度误差的评定方法及其测量不确定度。介绍了采样点读数值和采样点偏差值的概念和采样点读数值的归一处理方法;介绍了直线度误差的几种评定方法;本章提出了一种新的最小条件法评定直线度误差计算机精确算法——构造凸多边形法,详细介绍了该方法的计算原理及步骤,并给出了运算实例;本章还提出了根据采样点读数值直接作用和非直接作用两种不同情况,以及测量数据对评定基线单侧分布和两侧分布两种不同情况,分析直线度误差测量不确定度的方法,对此进行了详细的讨论,并给出了各种情况下的直线度误差测量不确定度的计算公式。第四章平面度测量。对测量大、小平面平面度的各种方法作

了介绍;介绍了平板测量的两种布线方法,还介绍了用于建立高精度基准平面的一些测量方法及测量装置的原理。第五章平面度误差的评定方法及其测量不确定度。介绍了平面度测量中两种布线的采样点读数值的归一处理方法;介绍了目前评定平面度误差的两种方法:对角线评定法和最小条件旋转评定法;本章提出了一种新的最小条件法评定平面度误差计算机精确算法——分区排序交叉判别法,详细介绍和讨论了该方法的原理及计算步骤,并给出了运算实例;本章还详细讨论了在两种布线时的各采样点偏差值的测量不确定度的计算方法,详细推导了在按不同评定准则即按三角形准则、交叉准则、直线准则评定时的平面度误差测量不确定度的计算公式,可以在已知各采样点读数值测量不确定度的条件下,求得在各种不同情况下的平面度误差的测量不确定度。全书最后列出两个附录。附录Ⅰ:直线度误差最小区域评定法——构造凸多边形法源程序;附录Ⅱ:平面度误差最小区域评定法——分区排序交叉判别法源程序,供读者参考。

本书由中国计量科学研究院毛起广同志审稿,他对本书内容提出了许多宝贵意见和修改建议,在此谨表深切谢意!本书在编写过程中,中国计量科学研究院陈耀煌、毛起广,中国科学院长春光学精密机械研究所朱应时,青岛永前电子测量设备有限公司朱志先,黑龙江省技术监督情报研究所付太智,黑龙江省计量检定测试研究所马圣等专家提供了不少资料并给予热情帮助,在此表示衷心感谢!

由于作者水平所限,本书无论在内容和体系上,不足和错误在所难免,恳请读者指正。

张善钟

1997.5

于哈尔滨工业大学

# 目 录

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| <b>第一章 导论</b> .....            | (1)   |
| 一 引言 .....                     | (1)   |
| 二 有关术语 .....                   | (1)   |
| 三 直线度、平面度公差 .....              | (3)   |
| 四 形状误差评定准则及评定方法 .....          | (6)   |
| 五 平面度计量器具国家计量检定系统 .....        | (10)  |
| <b>第二章 直线度测量</b> .....         | (11)  |
| 第1节 测量基准 .....                 | (11)  |
| 第2节 无直线基准测量法 .....             | (12)  |
| 一 多面互检法 .....                  | (12)  |
| 二 误差分离法 .....                  | (18)  |
| 第3节 有直线基准测量法 .....             | (25)  |
| 一 实体直线基准测量法 .....              | (25)  |
| 二 重力基准测量法 .....                | (43)  |
| 三 光线基准测量法 .....                | (50)  |
| 四 光线基准干涉法 .....                | (72)  |
| 五 物理光学法 .....                  | (79)  |
| 第4节 双频激光直线度测量装置机理及误差分析 .....   | (82)  |
| 一 渥拉斯顿棱镜作用原理 .....             | (82)  |
| 二 激光束漂移对测量的影响 .....            | (89)  |
| 三 渥拉斯顿棱镜和双面反射镜倾角对测量的影响 .....   | (103) |
| 四 双面反射镜平面度误差对测量的影响 .....       | (104) |
| 五 结论 .....                     | (104) |
| 第5节 各种直线度测量方法的特点及直线度测量原则 ..... | (105) |

|            |                                 |              |
|------------|---------------------------------|--------------|
| 一          | 各种直线度测量方法的特点 .....              | (105)        |
| 二          | 直线度测量原则 .....                   | (108)        |
| <b>第三章</b> | <b>直线度误差的评定方法及其测量不确定度 .....</b> | <b>(112)</b> |
| 第 1 节      | 采样点读数值的归一处理 .....               | (112)        |
| 一          | 采样点的读数值和偏差值 .....               | (112)        |
| 二          | 采样点读数值的归一处理 .....               | (113)        |
| 第 2 节      | 直线度误差的评定方法 .....                | (116)        |
| 一          | 两端点联线法 .....                    | (117)        |
| 二          | 最小二乘法 .....                     | (122)        |
| 三          | 最小包容区域法(最小条件法) .....            | (122)        |
| 第 3 节      | 最小条件法评定直线度误差的计算机精确算法 .....      | (125)        |
| 一          | 构造包容线法 .....                    | (125)        |
| 二          | 构造凸多边形法 .....                   | (126)        |
| 第 4 节      | 直线度误差的测量不确定度 .....              | (132)        |
| 一          | 各采样点读数值直接作用时直线度误差的测量不确定度 .....  | (132)        |
| 二          | 各采样点读数值非直接作用时直线度误差的测量不确定度 ..... | (138)        |
| <b>第四章</b> | <b>平面度测量 .....</b>              | <b>(142)</b> |
| 第 1 节      | 小平面平面度测量 .....                  | (142)        |
| 一          | 平面平晶法测量 .....                   | (142)        |
| 二          | 等厚干涉仪测量 .....                   | (143)        |
| 三          | 高精度光学基准平面的测量 .....              | (144)        |
| 第 2 节      | 大平面平面度测量 .....                  | (150)        |
| 一          | 水平仪、自准直仪法 .....                 | (151)        |
| 二          | 标准平板打表法 .....                   | (155)        |
| 三          | 光线扫描法 .....                     | (156)        |
| 四          | 液面法 .....                       | (159)        |
| <b>第五章</b> | <b>平面度误差的评定方法及其测量不确定度 .....</b> | <b>(162)</b> |
| 第 1 节      | 采样点读数值的归一处理 .....               | (162)        |
| 一          | 水平仪测量方形网格布线读数值归一处理 .....        | (162)        |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 二 自准直仪测量网格——对角线布线读数值归一处理 .....  | (164) |
| 第2节 平面度误差的评定方法 .....            | (171) |
| 一 对角线评定法 .....                  | (171) |
| 二 最小条件评定法 .....                 | (171) |
| 三 计算机近似评定法 .....                | (174) |
| 四 最小条件计算机精确算法 .....             | (175) |
| 第3节 最小条件法评定平面度误差的计算机精确算法        |       |
| ——分区排序交叉判别法 .....               | (175) |
| 一 方法原理要点 .....                  | (175) |
| 二 程序流程及步骤 .....                 | (188) |
| 三 计算例题 .....                    | (190) |
| 第4节 平面度误差的测量不确定度 .....          | (192) |
| 一 按三角形准则评定平面度误差时的测量不确定度的分析 ..   | (192) |
| 二 按交叉准则评定平面度误差时的测量不确定度的分析 ..... | (194) |
| 三 按直线准则评定平面度误差时的测量不确定度的分析 ..... | (196) |
| 四 平面度测量中两种布线形式的采样点偏差值的测量不确定度    |       |
| .....                           | (198) |
| 附录 .....                        | (211) |
| 参考文献 .....                      | (225) |

# 第一章 导 论

## 一 引 言

机器和仪器的质量和性能受到零件尺寸、形状、位置等几何要素的影响。直线度和平面度是表示零件形状的主要几何要素之一，在许多场合下，它们是影响仪器和机器精度、性能、质量的重要因素，在有些条件下，甚至是决定的因素。美国韦恩·R·穆尔（Wayne. R. Moore）在其1970年出版的著作《机械精度基础》（Foundations of Mechanical Accuracy）中提出：有四种机械技术构成了机械精度的基础。这四种机械技术是：①几何精度；②长度标准；③圆分度；④圆度。其中保证几何精度的基础则是平面和直线。例如，机床的全部几何精度是以平面为基础的。由此可以看出直线度和平面度在机械精度中的重要地位和作用。事实上，就测量而言，所有形式的几何量测量也都能归结到线值、圆分度、圆度、以及直线度和平面度这四种几何量计量中最基本参量的测量，这四种参量的测量是几何量计量中最基础的测量。随着科学技术的发展，直线度和平面度的测量技术也取得了许多进展，但就整体而言，它们目前达到的测量水平，似尚落后于其它三方面的测量水平，尚有待于测量技术工作者的进一步努力。怀着这一愿望，本书专门对直线度、平面度的测量技术，作了系统的讨论，希望有助于其更好地发展。

## 二 有关术语

直线度和平面度是形位公差中的基本项目，分类上属于形状公差。为便于往后的讨论，现根据国家标准GB 1183—80的规定，

将与形状公差有关的几个术语介绍如下：

## (一) 要素：构成零件几何特征的点、线、面

### 1. 理想要素

具有几何学意义的要素(图 1-1)。图中的球面、圆锥面、圆柱面、平面、轴线、素线、球心、点都是具有几何学意义的要素。

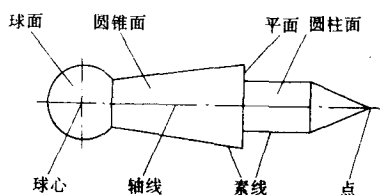


图 1-1 具有几何学意义的要素

### 2. 实际要素

零件上实际存在的要素。测量时由测得要素来代替，此时它并非该要素的真实状况。

### 3. 被测要素

给出了形状或（和）位置公差的要素。

### 4. 单一要素

仅对其本身给出形状公差要求的要素。

## (二) 形状公差

单一实际要素的形状所允许的变动全量称为形状公差。

## (三) 形状公差带

限制单一实际要素变动的区域称为形状公差带，构成零件几何特征的单一实际要素必须在此区域内方为合格。

## (四) 形状误差

被测实际单一要素对其理想要素的变动量称为形状误差。如果被测实际要素与其理想要素相比较能完全重合，表明形状误差为零。如有偏差，表明有形状误差，其偏离的程度就是该实际要素的形状误差值。

### 三 直线度、平面度公差

直线度、平面度公差在技术图样中的标注符号见表 1-1。

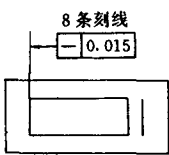
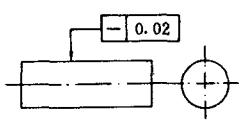
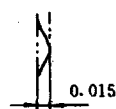
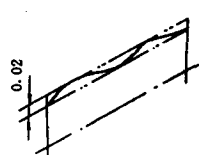
表 1-1 直线度、平面度公差标注符号

|         | 项 目   | 符 号 |
|---------|-------|-----|
| 形 状 公 差 | 直 线 度 | —   |
|         | 平 面 度 | □   |

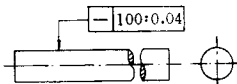
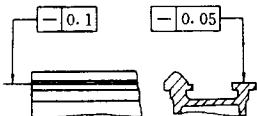
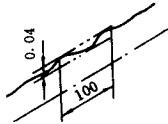
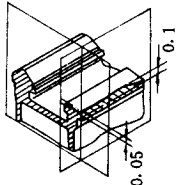
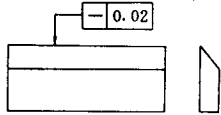
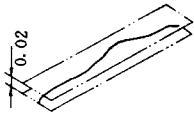
按照 GB 1183—80 的规定,直线度、平面度公差带的定义、示例及其说明见表 1-2 及表 1-3。

由表 1-2 可见,直线度公差带有以两平行直线之间、两平行平面之间、 $t_1 \times t_2$  的四棱柱内和  $\Phi t$  的圆柱面内的区域表示的四种形式;平面度公差带只有以两平行平面之间的区域表示的一种形式。

表 1-2 直线度公差带定义、示例及说明

| 公差带定义                                   | 示 例                                                                                                                                                                                       | 说 明                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 在给定平面内<br>公差带是距离为公差值 $t$ 的两平行直线之间的区域 | <p>a.</p>  <p>b.</p>  | <p>a. 每条刻线必须位于该表面上距离为公差值 0.015 的两平行直线之间</p>  <p>b. 圆柱表面上任一素线必须位于轴向平面内距离为公差值 0.02 的两平行直线之间</p>  |

续表

| 公差带定义                                                                                                                                   | 示 例                                                                                                                                                                                     | 说 明                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                         | <p>c.</p>  <p>d.</p>  | <p>c. 圆柱表面上任一素线在任意 100 长度内必须位于轴向平面内距离为公差值 0.04 的两平行直线之间</p>  <p>d. 当在同一表面的两个方向上给定不同的直线度公差时,在该表面两个方向上的任一素线必须分别位于距离为公差值 0.1 和 0.05 的两平行直线之间</p>  |
| <p>2. 在给定方向上</p> <p>当给定一个方向时,公差带是距离为公差值 <math>t</math> 的两平行平面之间的区域;当给定互相垂直的两个方向时,公差带是正截面尺寸为公差值 <math>t_1 \times t_2</math> 的四棱柱内的区域</p> | <p>(1) 一个方向</p>                                                                                      | <p>(1) 棱线必须位于箭头所示方向距离为公差值 0.02 的两平行平面内</p>                                                                                                                                                                                    |

续表

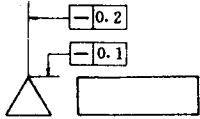
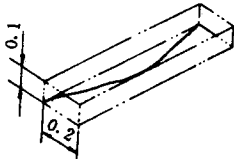
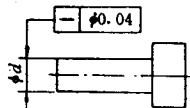
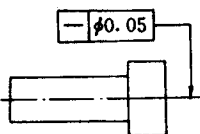
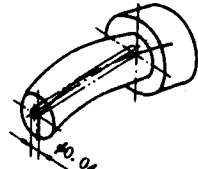
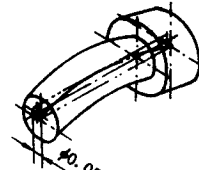
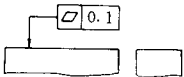
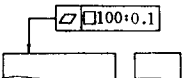
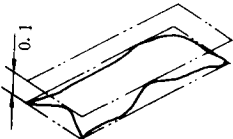
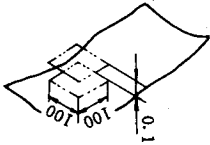
| 公差带定义                                                      | 示 例                                                                                                                                                                                       | 说 明                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                            | <p>(2) 互相垂直的两个方向</p>                                                                                     | <p>(2) 棱线必须位于水平方向距离为公差值 0.2, 垂直方向距离为公差值 0.1 的四棱柱内</p>                                                                                                                                 |
| <p>3. 在任意方向上</p> <p>公差带是直径为公差值 <math>t</math> 的圆柱面内的区域</p> | <p>a.</p>  <p>b.</p>  | <p>a. <math>\phi d</math> 圆柱体的轴线必须位于直径为公差值 0.04 的圆柱面内</p>  <p>b. 整个零件的轴线必须位于直径为公差值 0.05 的圆柱面内</p>  |

表 1-3 平面度公差带定义, 示例及说明

| 公差带定义                      | 示 例                                                                                                                                                                                     | 说 明                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 公差带是距离为公差值 $t$ 的两平行平面之间的区域 | <p>a.</p>  <p>b.</p>  | <p>a. 上表面必须位于距离为公差值 0.1 的两平行平面内</p>  <p>b. 表面上任意 <math>100 \times 100</math> 的范围, 必须位于距离为公差值 0.1 的两平行平面内</p>  |

## 四 形状误差评定准则及评定方法

### (一) 理想要素位置

理想要素的位置, 分两种情况:

#### 1. 对于中心要素 (轴线、中心线、中心面等)

其理想要素位于被测实际要素之中。如图 1-2, 被测实际要素为一圆柱面的轴线 (它有直线度误差), 图中包容被测实际要素的两个圆柱面  $\phi d_1$  和  $\phi d_2$  的轴线  $L_1$  和  $L_2$  是其理想要素的两个不同的位置。

#### 2. 对于轮廓要素 (线轮廓度、面轮廓度除外)

其理想要素位于实体之外, 且与被测实际要素相接触。如图 1-3, 被测实际要素为一给定平面内的轮廓直线 (它有直线度误差), 直线  $A_1B_1$ 、 $A_2B_2$ 、 $A_3B_3$  为其理想要素的三个不同位置。

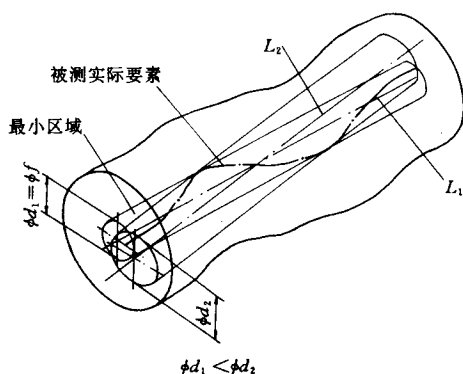


图 1-2 中心要素

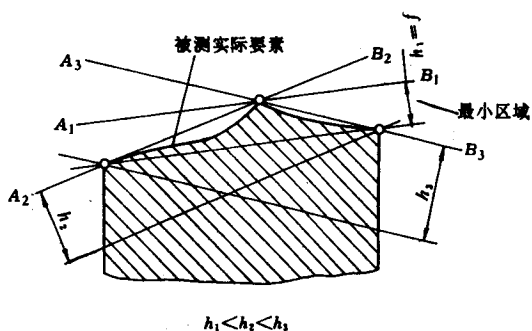
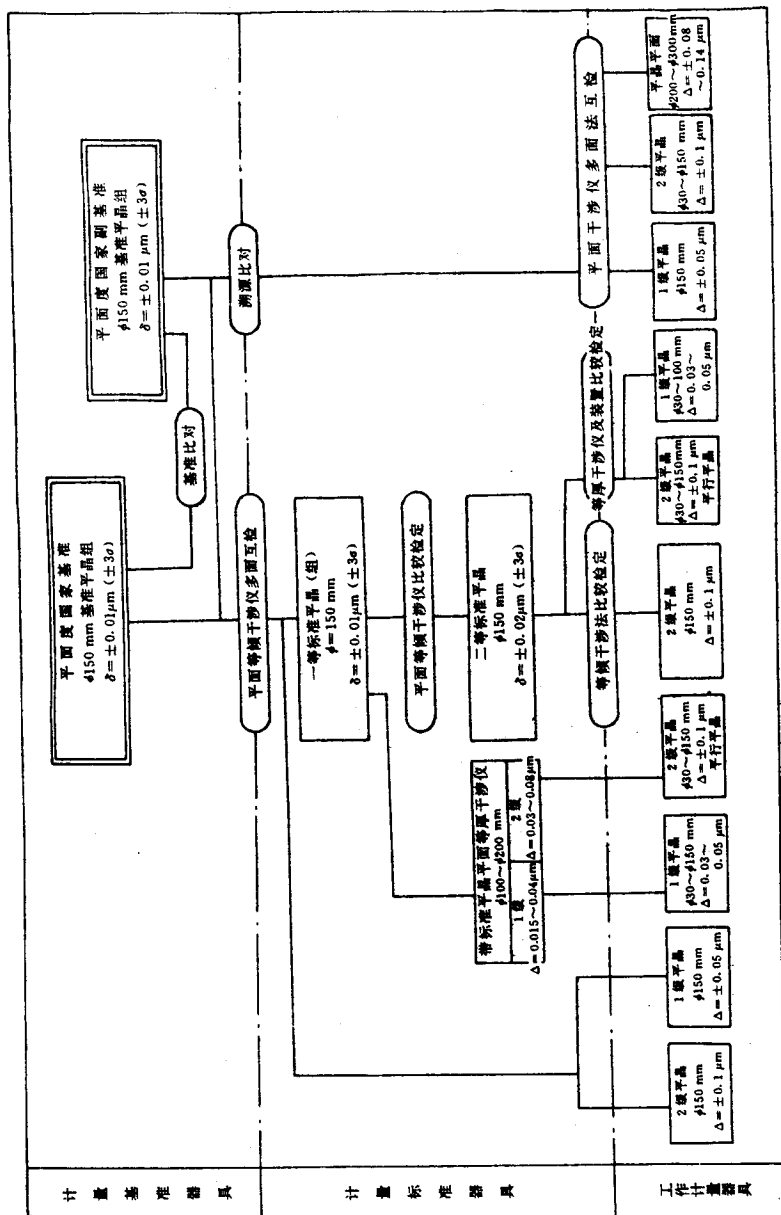


图 1-3 轮廓要素

## (二) 形状误差评定准则

当被测实际要素与其理想要素进行比较时，在图 1-2、1-3 中，不同位置的理想要素将会得到不同大小的被测实际要素对其理想要素的变动量（图 1-2 中为  $\phi d_1$  及  $\phi d_2$ ，图 1-3 中为  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ ），



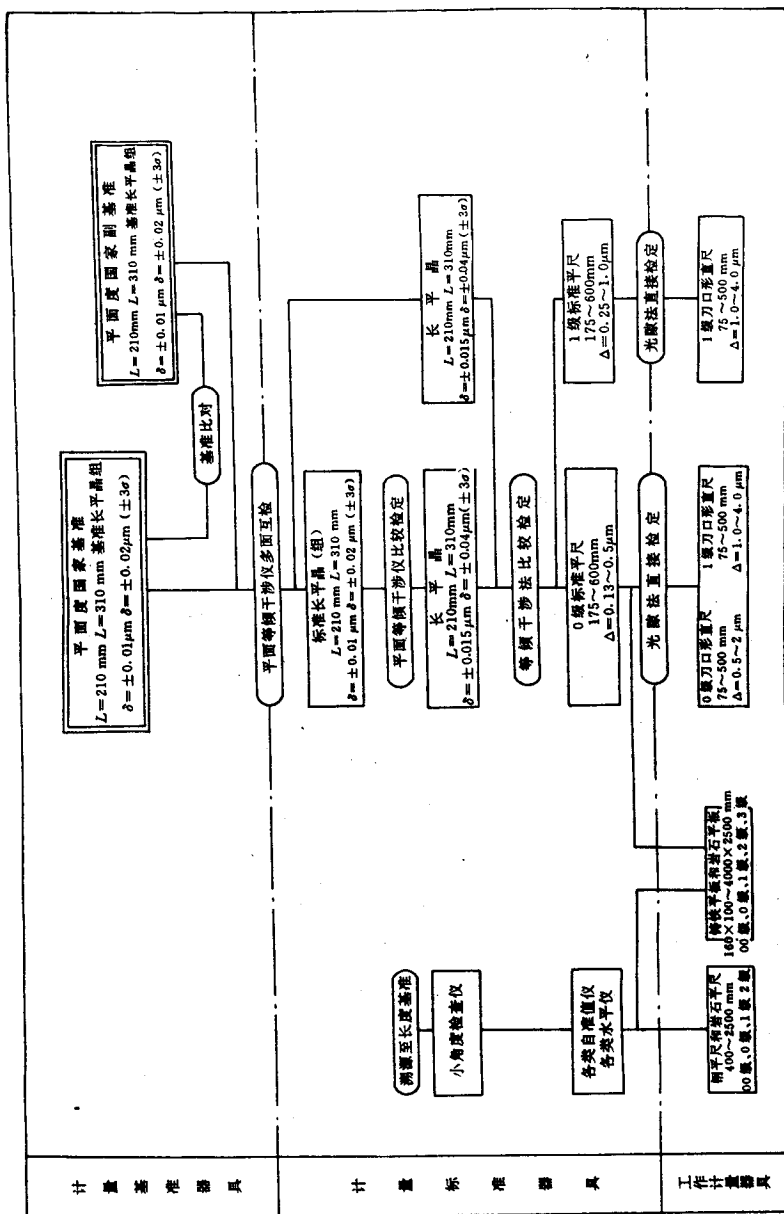


图 1-5 平面度计量器具检定系统框图之二