

© Copyright by Dai-Hua, Wang 2009
All Rights Reserved.

Lecture 6 Precision Design of Instruments

王代华, 博士, 教授, 博士生导师

Dr. Wang, Daihua, Professor

PILab

精密與智能實驗室

Precision and Intelligence Laboratory

重庆大学, 光电工程学院, 重庆 40004

<http://www.pilab.coe.cqu.edu.cn/>

Email: dhwang@cqu.edu.cn

Tel: 023-65112105, 65102511, Fax: 65112105

Outline

❑ Basic Concepts

❑ Determine Precision Specifications of Instr.

✍ 基本概念

✍ 微小误差原理

✍ Mcp检测能力指数法

❑ Error Assignment Methods

❑ Ex: Spherometer Error's Assignment and Adjusting



Introduction

□ Precision Design of Instr.

✍ 仪器精度设计是仪器精度综合的反问题，其根本任务是将给定的仪器总误差合理地分配到仪器的各个组成部件上，为正确设计仪器的各个组成部件以及制定零部件的公差和技术要求提供依据

□ 合理的精度设计离不开对仪器各组成部分源误差对仪器总精度影响程度的正确估计，在满足仪器总精度要求的前提下使成本降至最低

✍ 对仪器精度影响较大的环节给予较严的精度指标

✍ 对仪器精度影响较小的环节给予较宽松的精度指标

Introduction

- ❑ 随着科学技术的发展，对仪器精度提出了愈来愈高的要求，仅从提高仪器各组成部件的制造与装调精度出发来保证仪器高精度的设计思想是不可行的
- ❑ 在掌握误差规律的前提下普遍的作法
 - ✍ 采取误差补偿措施确保仪器高精度
 - ✍ 采取误差修正措施确保仪器高精度
 - ✍ 扩大关键部件的制造公差以降低仪器总的制造成本

Determine Precision Specifications of Instr.

- ❑ 基本概念
- ❑ 微小误差原理
- ❑ Mcp检测能力指数法



Determine Precision Specifications of Instr.

- ❑ 仪器的总精确度指标根据设计任务或仪器的使用要求确定
- ❑ How to determine the precision specifications of instr.?
 - ✍ 传统上以微小误差原理来确定仪器总精度指标
 - ✍ **Mcp**检测能力指数法为更加科学合理地确定仪器总精确度指标提供了有效途径
- ❑ Determine the specifications
 - ✍ 微小误差原理
 - ✍ **Mcp**检测能力指数法

微小误差原理

□ 微小误差

- ✍ 与所有误差的总影响相比是微不足道的某一误差
- ✍ 若略去某项误差对总误差的影响小于不略去结果的 $1/10$, 则该项误差可视为微小误差

微小误差原理

□ 若要实现准确测量，需要由人借助测量仪器，在一定的环境条件下，利用一定的测量原理和方法，将被测量同标准量相比较

✍ 测量人员、测量仪器、环境条件、原理方法、测量对象和标准件都将导致测量误差，此时，测量结果的合成不确定度为

$$U_c = \sqrt{U_{\text{人}}^2 + U_{\text{器}}^2 + U_{\text{条}}^2 + U_{\text{方}}^2 + U_{\text{象}}^2 + U_{\text{标}}^2}$$

✍ 若测量仪器 (包括测量标准) 的不确定度为 U_1 ，其余误差的合成不确定度为 U_2 ，考虑到一般两者不相关，上式可改写成

$$U_c = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$$

微小误差原理

□ Assumption

✍ 假定 U_1 为微小误差, 则

$$\sqrt{U_1^2 + U_2^2} - U_2 \leq \frac{1}{10} \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$$



$$U_1 \leq \frac{1}{3} \sqrt{U_1^2 + U_2^2} = \frac{1}{3} U_c \approx \frac{1}{3} U_2$$

□ Conclusion



微小误差原理

- 测量仪器和标准的误差只需为测量总误差的 $\frac{1}{3}$ ，其对测量精度的影响是微不足道的，可略去不计
 - ✍ 这就是通常希望测量仪器和标准精度高于测量结果总精度指标一个等级的原因 (**$\frac{1}{3}$ Law**)
- 根据微小误差原理，所确定的仪器总精度指标应在测量总精度指标中所占的比重是微不足道的，可以忽略不计
 - ✍ 为此，需使仪器自身总精度指标小于或等于被测参数测量总不确定度的 $\frac{1}{3}$
- 在机械行业的参数检测中，确定测量仪器或设备精度的通行的原则
 - ✍ 仪器或设备总误差与被测参数的公差值之比保持在 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{10}$ 的范围内

Mcp检测能力指数法

□ 测量仪器按测量的性质分为三类

✍ 参数检验

✍ 参数监控

✍ 参数测量



Mcp检测能力指数法

□ 参数检验

✍ 特点

✍ 通过测量判断被测参数的量值是否处在事先规定的范围 T 之内

✍ 为了保证判断的可靠性，测量结果的总不确定度 U 应该尽量小，即 $U \leq T$ (U 针对被测参数提出)

Mcp检测能力指数法

□ 参数监控

✍ 特点

✍ 不仅要进行检测，还要利用测出的信息去控制生产过程，以实现将被测参数的量值控制在规定的范围内

✍ 因此，无论是人工监测控制，还是自动调节控制，就其本质而言，都与检验是类似的，都是通过测量将被测参数控制在某个事先规定的范围内

✍ 所不同的是监控是在生产过程中进行，检测结果要干预生产过程，以排除不正常的生产状态，属于主动测量

✍ 对监控过程的测量精度要求应该比参数检验更高

Mcp检测能力指数法

□ 参数测量

- ✍ 参数测量与检验和监控不同，它的目的仅仅要求测定被测参数的具体量值，只要求测量结果的总不确定度 U 满足 $U \leq \Delta_{\text{允}}$ （ $\Delta_{\text{允}}$ 针对测量过程提出）

Mcp检测能力指数法

□ Mcp检测能力指数用以衡量检测能力的状况，定义为

$$M_{cp} = \frac{T}{6u} = \frac{T}{2U_c}$$

为测量结果的总(展伸)不确定度

测量结果的标准不确定度

✍ T的不同含义

✍ 针对参数检测， T 是被测参数允许的变化范围，即被测参数公差

✍ 针对参数监控， T 是被监控参数允许的变化范围，即被控参数的制造误差

✍ 针对参数测量， T 为两倍允许的测量误差（ $2\Delta_{允}$ ）

✍ 显然， M_{cp} 越大，检测能力越高

Mcp检测能力指数法

❑ How to determine Mcp?

✍ The key problem is to determine U_c .

$$M_{cp} = \frac{T}{6u} = \frac{T}{2U_c}$$

为测量结果的总(展伸)不确定度

测量结果的标准不确定度

Mcp检测能力指数法

- 由于测量环境、测量条件、测量人员等方面的误差难以估计，使得获取测量的总不确定度 U_c 比较困难，但获取测量仪器精度是比较容易的
- 测量的总合成不确定度为

$$U_c = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$$

除测量仪器以外的所有因素
造成测量的合成不确定度

测量仪器(包括标准)
的不确定度

Mcp检测能力指数法

□ 测量的总合成不确定度为

$$U_c = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$$

□ 从经济性和精度这两个方面来考虑U1与U2的比例关系

✍ 从经济性方面看, 尽量增大U1有利于降低测量仪器造价

✍ 从测量精度方面看应尽量使U1成为微小误差

✍ 根据微小误差原理, $U_1/U_c < 1/3$, $U_c = 1.5 U_1$

✍ 用测量仪器的不确定度U1去估计Mcp检测能力指数

$$M_{cp} = \frac{T}{6u} = \frac{T}{2U_c}$$



$$M_{cp} = \frac{T}{3U_1} \quad \text{or} \quad M_{cp} = \frac{2\Delta_{允}}{3U_1}$$

Mcp检测能力指数法

□ 检测能力指数Mcp表

级档		A	B	C	D	E
检验 与 监控	Mcp	3~5	2~3	1.5~2	1~1.5	<1
	T / Uc	6~10	4~6	3~4	2~3	<2
	T / U1	9~15	6~9	4.5~6	3~4.5	<3
测量	Mcp	1.7~2	1.3~1.7	1~1.3	0.7~1	<0.7
	Δ 允 / U1	2.6~3	2~2.6	1.5~2	1~1.5	<1
	T / UI	5~6	4~5	3~4	2~3	<2
检测能力评价		足够	一般		不足	低

□ 在仪器精度设计中，通常根据设计任务所提出的检测能力指数Mcp的大小和被测参数的变化范围或者检测精度的要求，确定测量仪器或设备的精度指标

Mcp检测能力指数法

□ Advantage

- ✍ 充分考虑了测量性质的不同以及检测能力要求的不同，从而使测量仪器精度指标的制定更加科学合理



Error Assignment Methods

- ❑ Systematic error's assignment methods
- ❑ Random error's assignment methods

- ✍ 按等作用原则分配
- ✍ 按加权作用原则分配
- ✍ 误差调整



Assign Systematic Errors

❑ 系统误差数目较少但对仪器精度影响较大，其分配是在完成仪器的原理与方案设计之后进行的

❑ 误差分配过程

 **Next Slide...**

❑ 方法

 **Next Slide...**



Assign Systematic Errors: Procedure

- ❑ 先算出原理性的系统误差，再依据误差分析的结果找出产生系统误差的可能的环节（即系统性源误差），根据一般经济工艺水平给出这些环节具体的系统误差值，算出仪器局部的系统误差，最后合成总系统误差
- ❑ 方法

 **Next Slide...**

Assign Systematic Errors: Procedure

□ 方法

- ✍ 如果合成总系统误差大于或接近仪器允许的总误差，说明所确定的系统误差值不合理，要重新考虑采取技术措施减小系统误差，或推翻原设计方案，重新设计
- ✍ 如果系统误差大于 $1/2$ 或小于仪器允许的总极限误差，一般可以先减小有关环节的误差值，然后再考虑采用一些误差补偿措施
- ✍ 如果系统误差小于或接近仪器允许的总误差的 $1/3$ ，则初步认为所分配的系统误差值是合理的，待确定随机误差值时，再进行综合平衡

Assign Random Errors

□ 随机误差和未定系统误差的分配同时进行

✍ 特点：数量多，一般用方和根法进行综合

□ 在仪器允许的总误差中扣除总已定系统误差，剩下的是允许的总随机误差和总未定系统误差之和

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_s - \Delta_k$$

允许的仪器总误差

总已定系统误差

□ Assignment of random errors

✍ 按等作用原则分配

✍ 按加权作用原则分配

✍ 误差调整

Assign Random Errors

□ 按等作用原则分配

✍ 等作用原则认为仪器各环节和各零部件的源误差对仪器总精度的影响是同等的，即每个源误差所产生的局部误差是相等的

✍ 每个单项误差 δ_i 为

$$\delta_i = \frac{\Delta_z}{p_i \sqrt{n+m}}$$

Number of indeterminate systematic errors

Influence coefficients

Number of random errors

Assign Random Errors

□ 按加权作用原则分配

- ✍ 加权作用原则认为在仪器的误差分配过程中，不仅要考虑仪器中的各个环节的误差对仪器总精度的影响程度的不同，还应考虑仪器不同环节误差控制的难易程度
- ✍ 在误差分配的过程中，对难以实现或成本高的环节应该给予较大的误差，反之则给予较小的误差
- ✍ 通常，由一综合权 A_i 来表征某一环节误差控制的难易程度，权 A_i 愈大表明此误差控制愈难，应允许该环节有较大的误差
- ✍ 按加权作用原则分配各环节误差 δ_i 的公式

$$\delta_i = \frac{A_i \Delta_\Sigma}{p_i \sqrt{\sum_{i=1}^{n+m} A_i^2}}$$

Assign Random Errors: Basic Concepts

❑ 误差调整

✍ 按等作用原则分配仪器误差并没有考虑仪器各个组成环节的结构与制造工艺的实际情况，更没有考虑技术经济指标的要求，从而造成有的环节误差的允许值偏松，有的偏紧，不很经济

✍ 所以，应对按等作用原则分配结果进行结构、工艺与经济性分析，从实际出发进行误差调整

❑ 经济公差 Economical tolerance (ET)

❑ 生产公差 Product tolerance (PT)

❑ 技术公差 Technical tolerance (TT)

Assign Random Errors: Basic Concepts

❑ 误差调整

❑ 经济公差 **Economical tolerance (ET)**

✍ 指在通用设备上，采用最经济的加工方法所能达到的加工精度

❑ 生产公差 **Product tolerance (PT)**

✍ 指在通用设备上，采用特殊工艺装备，不考虑效率因素进行加工所能达到的加工精度

❑ 技术公差 **Technical tolerance (TT)**

✍ 指在特殊设备上，在良好的实验室条件下，进行加工和检测时所能达到的加工精度

Assign Random Errors: Steps

- ❑ **Step 1.** 评价已制定出的各环节误差的允许值，看各允许误差值在三个公差极限上的分布情况，以确定调整对象
 - ✍ 一般是调整系统误差项目、误差影响系数较大的误差项目和较容易调整的误差项目
- ❑ **Step 2.** 把低于经济公差极限的误差项目(不论系统误差或随机误差)都提高到经济公差极限上。将其对仪器精度的影响从允许的仪器总误差中扣除，得到新的允许误差值
- ❑ **Step 3.** 将新的允许误差值按等作用原理再分配到其余环节中，得出其余环节新的允许误差值

Assign Random Errors

□ Goal of error adjustment

✍ 经过反复多次的调整，使得

- ✍ 多数环节的误差都在经济公差极限范围之内
- ✍ 少数对仪器精度影响大的环节的误差允许值提升到生产公差内
- ✍ 对于个别超出技术公差的误差环节实行误差补偿，使其误差的允许值扩大到经济公差水平

✍ 公差调整成功的标志

✍ ...

Assign Random Errors

□ Goal of Error Adjustment

✍ 经过反复多次的调整，使得

✍ ...

✍ 公差调整成功的标志

✍ 大多数环节误差在经济公差内

✍ 少数在生产公差内

✍ 极个别在技术公差内

✍ 系统误差值小于随机误差

✍ 补偿措施少而经济效益显著



Assign Random Errors

❑ Disadvantages of error adjustment

- ✍ 并非每个精度设计都能取得令人满意的结果，有些仪器由于精度要求过高，在现行的仪器原理下无法实现成功的精度分配
- ✍ 应考虑增加误差补偿和精度调整环节，如果还不满足精度要求，则只有推翻原有总体设计方案
- ✍ 所以，精度设计应与总体结构设计同步进行

Ex: Spherometer Error Assignment and Adjustment

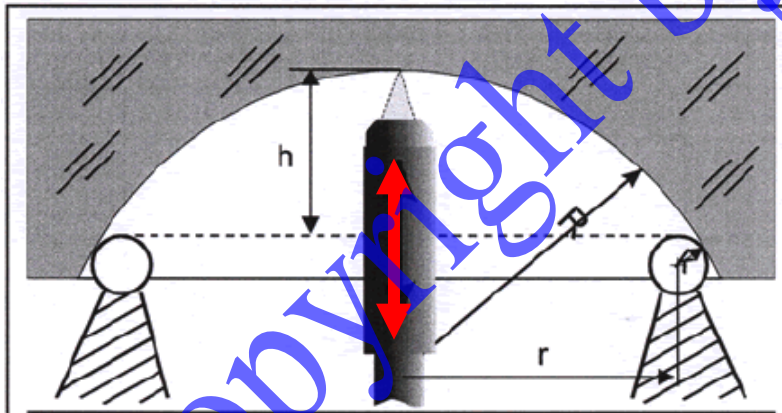


- ☐ Configuration
- ☐ Principle of operation
- ☐ Determine precision specification
- ☐ Error sources
- ☐ Assign systematic errors
- ☐ Assign random errors
- ☐ Error adjustment
- ☐ Questions?

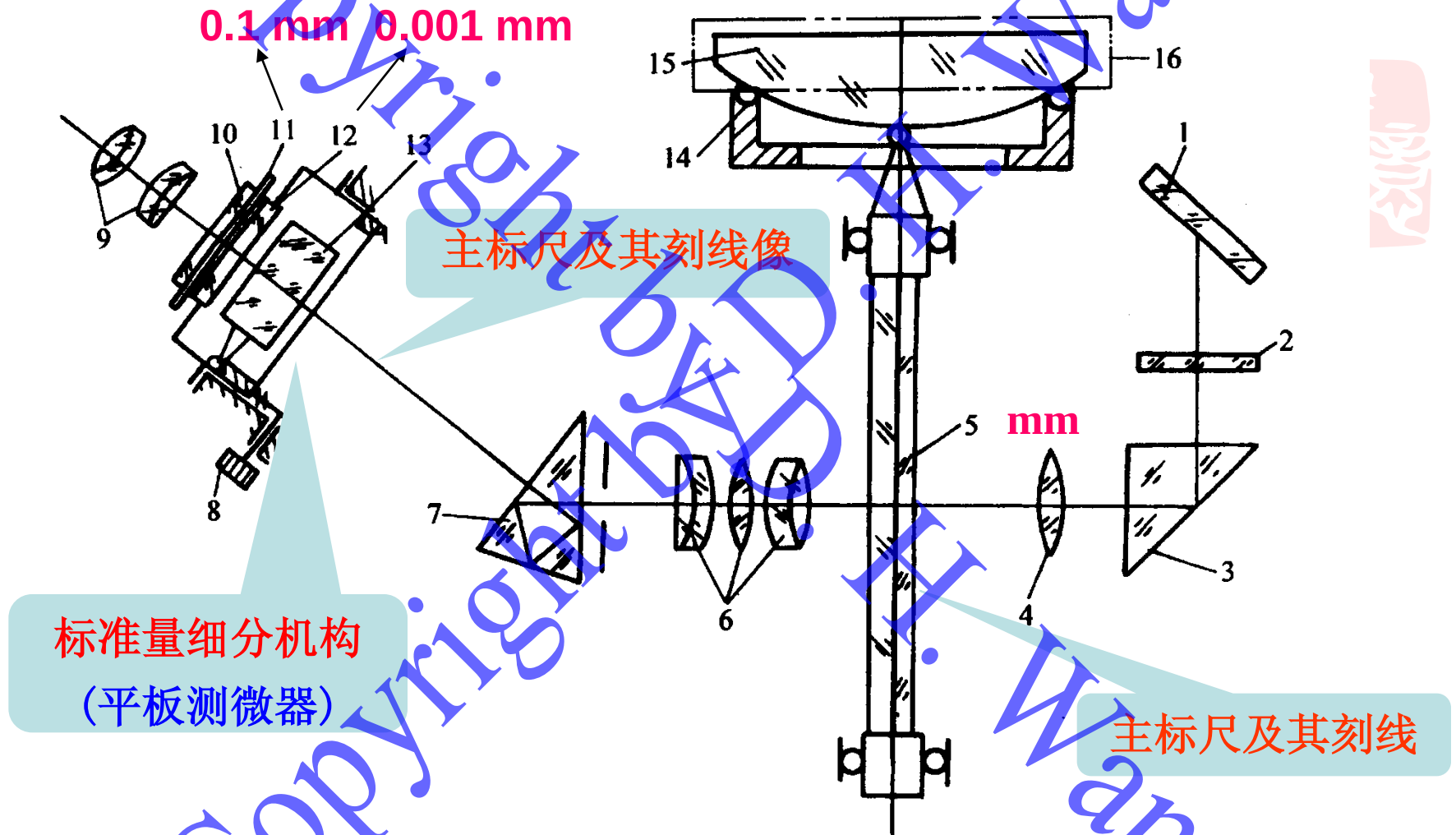
Configuration and Principle

- ❑ Determining the radius length is based on the calculation of the known value r (the Spherometer ring radius), the length of the rise h and in the case of the spherometer ball rings, the radius of the contact ball k .

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} \pm k$$



Configuration and Principle: Optical Layout



标准量的细分方法

□ 光学机械细分

 直读法

 微动对零法

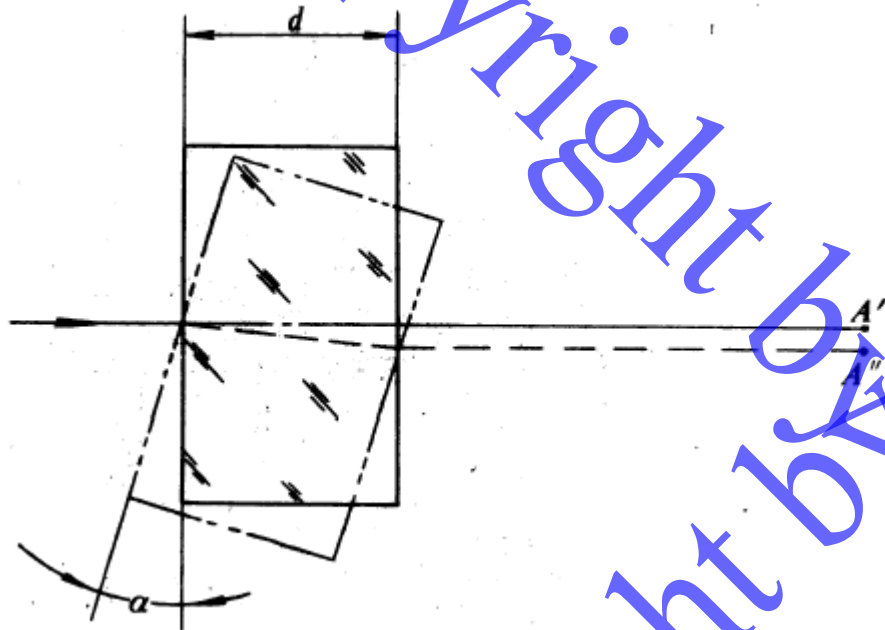
 当主标尺的刻线象不正好对准读数指标时，通过微动机构移动主标尺刻线象或读数指标线，使它们对准，然后由微动机构读出尾数部分

 光学倍程法

□ 电气细分

 ??

微动对零法：转动平板玻璃式细分

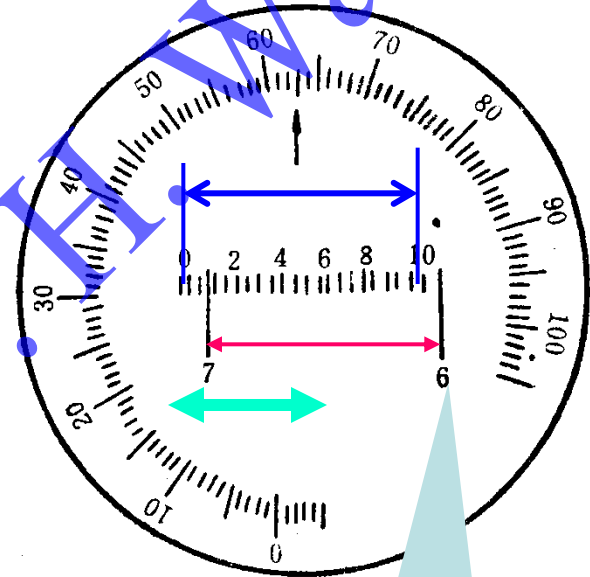
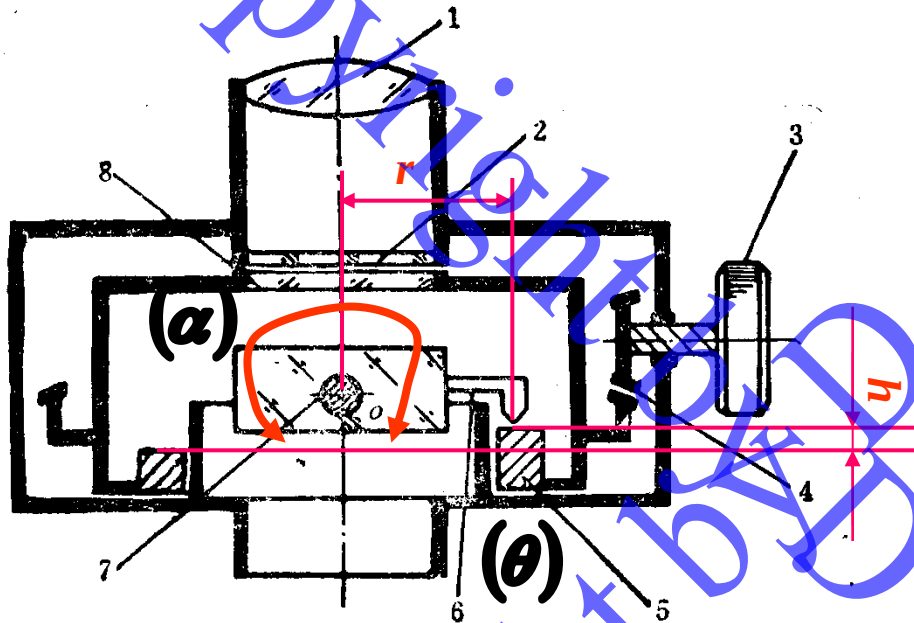


$$A'A'' = d \sin \alpha \left[1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right]$$

$$A'A'' \approx d \left(1 - \frac{1}{n} \right) \alpha$$



微动对零法：转动平板玻璃式细分



读数 7.1630

主标尺刻线象

$$\alpha = \arctan \frac{h\theta}{2\pi r}$$

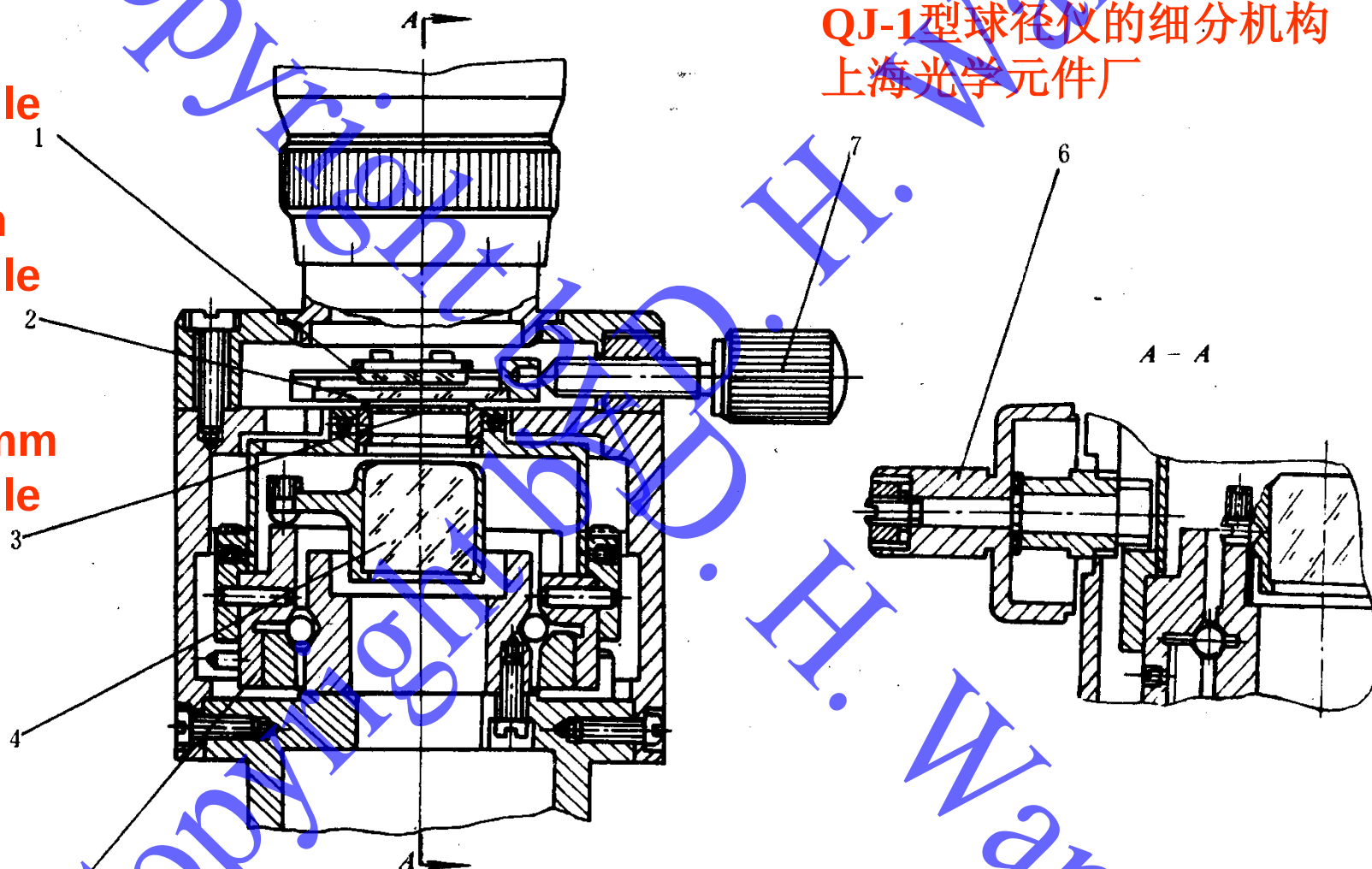
$$A'A'' \approx d \left(1 - \frac{1}{n}\right) \frac{h\theta}{2\pi r}$$

微动对零法：转动平板玻璃式细分

Vision
graticule

0.1 mm
graticule

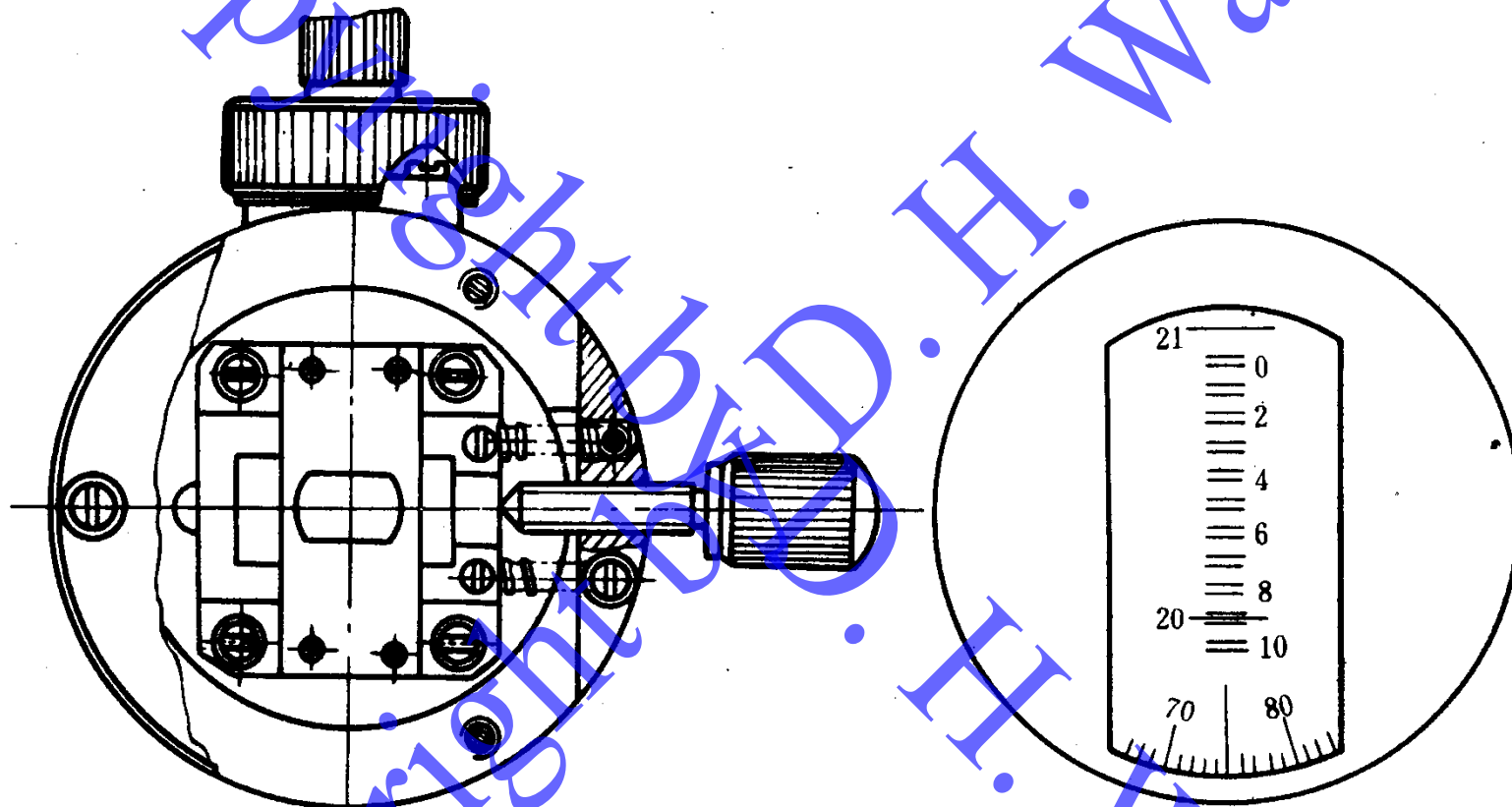
0.001 mm
graticule



QJ-1型球径仪的细分机构
上海光学元件厂



微动对零法：转动平板玻璃式细分



19073

吉祥

吉祥

如意

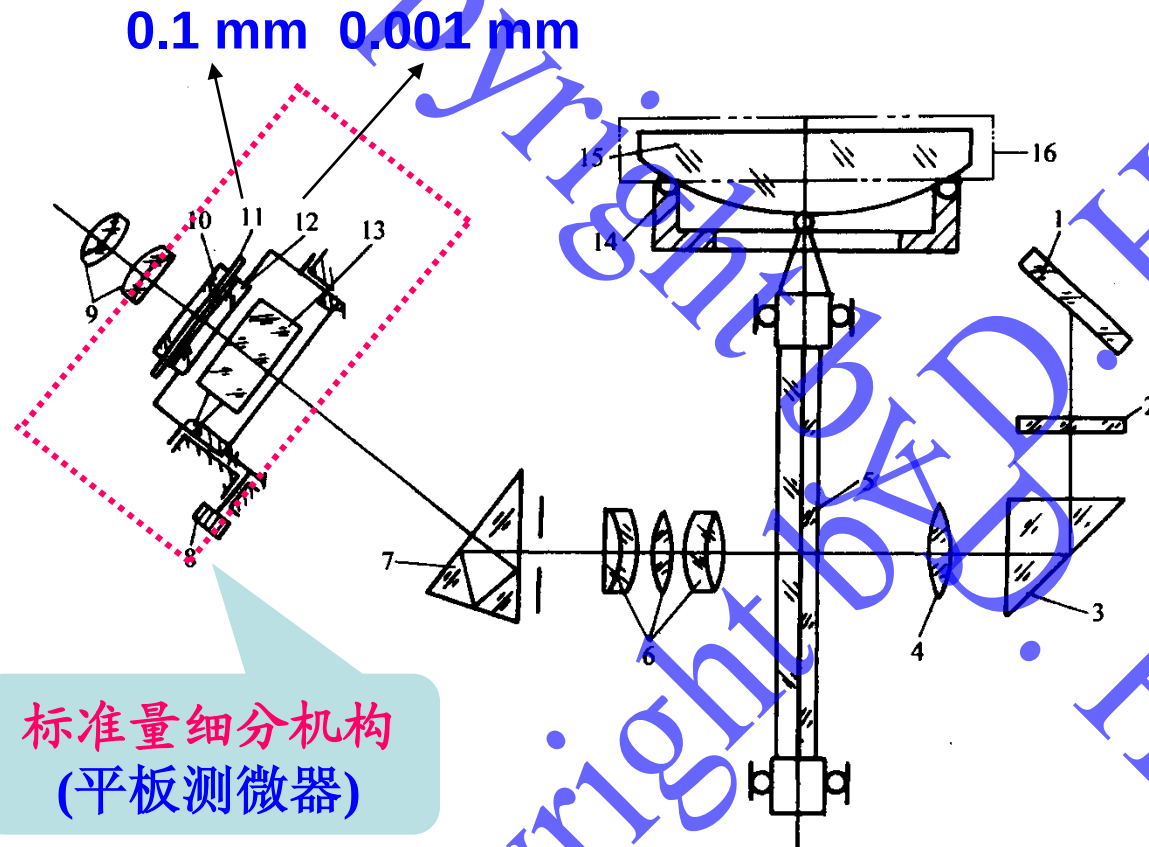
吉祥

Determine Precision Specification

- 根据对该光学仪器分析的结果，参照国内外同类仪器的技术指标，并考虑到本仪器可以用作立式测长仪，确定矢高测量的允许总误差为

$$\Delta h_{\text{允}} = 1 \mu\text{m}$$

Error Sources (11 Items)



标准量细分机构
(平板测微器)

Optical layout of Spherometer

- ❑ 平板测微器原理误差
- ❑ 温度误差
- ❑ 毫米刻尺误差
- ❑ 0.1 mm刻尺误差
- ❑ 0.001 mm尺盘误差
- ❑ 测轴与测环垂直度误差
- ❑ 读数显微镜放大率误差
- ❑ 对准误差
- ❑ 估读误差
- ❑ 测轴偏心误差
- ❑ 凸轮局部误差

Error Sources (11 Items)

❑ 平板测微器原理误差 Δ_1

❑ 温度误差 Δ_2

❑ 毫米刻尺误差 Δ_3

❑ 0.1 mm刻尺误差 Δ_4

❑ 0.001 mm尺盘误差 Δ_5

❑ 测轴与测环不垂直度误差 Δ_6

❑ 读数显微镜放大率误差 Δ_7

❑ 对准误差 Δ_8

❑ 估读误差 Δ_9

❑ 测轴偏心误差 Δ_{10}

❑ 凸轮局部误差 Δ_{11}

Systematic Errors

Random Errors



Assign Systematic Errors

- 通过分析与计算先确定 Δ_1 和 Δ_2
- 根据仪器结构初步设计所规定的尺寸和参数，估计
$$\Delta_1 \leq 0.19 \mu\text{m}$$
- 引起温度误差的主要原因是工件与刻尺的材料不同及温度不等。刻尺材料是火石玻璃，被测工件一般为冕牌玻璃，它们的线胀系数之差为 $2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，该仪器的使用要求规定环境温度变化应控制在 2°C 范围之内，矢高最大测量范围为 30 mm ，最大温度误差为

$$\Delta_2 = 0.12 \mu\text{m}$$

- 综合系统误差为

$$\Delta h_{\text{系}} = \Delta_1 + \Delta_2 = 0.31 \mu\text{m}$$

Determine the Permitted Random Error

□ 扣除系统误差之后，得随机总误差允许值为

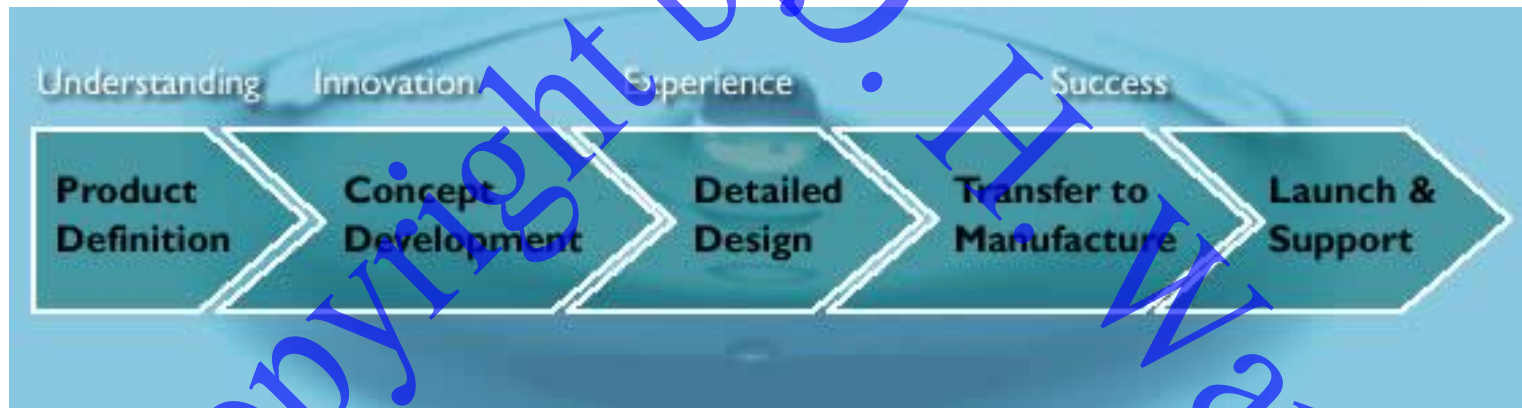
$$\Delta h_{\text{允随}} = \Delta h_{\text{允}} - \Delta h_{\text{系}} = 0.69 \mu\text{m}$$

□ How to assign the random errors?



Design Procedure

- ❑ Understanding
- ❑ Innovation
- ❑ Experience
- ❑ Success
- ❑ Assignment of random errors



Procedure of Error Adjustment

- ❑ 确定公差数值 /1
- ❑ 误差影响系数 /2
- ❑ 等作用原则分配 /3
- ❑ 评价? /4
- ❑ 误差调整 /5
- ❑ 局部误差及其综合 /6
- ❑ 确定其余待分配误差允许值 /7
- ❑ 重复 /3-/6

$$\delta_i = \frac{\Delta_{\Sigma}}{p_i \sqrt{n+m}}$$



1	Errors	Name	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_6	Δ_7	Δ_8	Δ_9	Δ_{10}	Δ_{11}
		Unit	um	um	(")	(")	um	um	um	um	um
2	Tolerance	ET	3	1	10	5	10	1	0.5	100	30
		PT	1	0.5	1	0.5	1	0.28	0.1	10	5
		TT	0.2	0.2	0.5	0.1	0.28	0.1	0.05	5	1
3	Error Law Δh_i	Formula		Δ_4/β	Δ_5/θ	$\frac{h}{2}\Delta_6^2$				$\frac{1}{2R}\Delta_{10}^2$	$\frac{(n-1)d}{nr\beta}\Delta_{11}$
		Result	Δ_3	$\Delta_4/5$	$\Delta_5/180$	$15000\Delta_6^2$	Δ_7	$\sqrt{2}\Delta_8$	Δ_9	$\frac{\Delta_{10}^2}{520000}$	$0.05\Delta_{11}$
4	Δ_{i1}		0.23	1.15	41.4	13.4	0.23	0.16	0.23	346	4.6
5	E 1	PT↑	ET↓	ET↓	ET↓	ET↓	TT↑	PT↑	PT↓	ET↓	PT↓
6	Δ'_{i1}			1	10	5			0.1	100	
7	$\Delta h'_{i1}$			0.2	0.06	0.03			0.1	0.02	

□ 引用第三栏局部误差与源误差之间的关系式，将经过第一次调整后的五项误差分量折算成局部误差，这五项局部误差的综合为

$$\sum \Delta h'^2_{i1} = 0.055 \mu\text{m}$$

1	Errors	Name	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_6	Δ_7	Δ_8	Δ_9	Δ_{10}	Δ_{11}
		Unit	um	um	(")	(")	um	um	um	um	um
2	Tolerance	ET	3	1	10	5	10	1	0.5	100	30
		PT	1	0.5	1	0.5	1	0.28	0.1	10	5
		TT	0.2	0.2	0.5	0.1	0.28	0.1	0.05	5	1
3	Error Law Δh_i	Formula		Δ_4/β	Δ_5/θ	$\frac{h}{2}\Delta_6^2$				$\frac{1}{2R}\Delta_{10}^2$	$\frac{(n-1)d}{nr\beta}\Delta_{11}$
		Result	Δ_3	$\Delta_4/5$	$\Delta_5/180$	$15000\Delta_6^2$	Δ_7	$\sqrt{2}\Delta_8$	Δ_9	$\frac{\Delta_{10}^2}{520000}$	$0.05\Delta_{11}$
4	Δ_{i1}		0.23	1.15	41.4	13.4	0.23	0.16	0.23	346	4.6
5	E 1		PT↑	ET↓	ET↓	ET↓	TT↑	PT↑	PT↓	ET↓	PT↓
6	Δ'_{i1}			1	10	5			0.1	100	
7	$\Delta h'_{i1}$			0.2	0.06	0.03			0.1	0.02	
8	$\Delta h'_{允随}$		$\sqrt{\Delta h'^2_{允随} - \sum \Delta h'^2_{i1}} = \sqrt{0.69^2 - 0.055} \mu m = 0.65 \mu m$								
9	❑ 新的（剩余的）随机误差允许值										
10											
11											
12											

1	Errors	Name	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_6	Δ_7	Δ_8	Δ_9	Δ_{10}	Δ_{11}
		Unit	um	um	(")	(")	um	um	um	um	um
2	Tolerance	ET	3	1	10	5	10	1	0.5	100	30
		PT	1	0.5	1	0.5	1	0.28	0.1	10	5
		TT	0.2	0.2	0.5	0.1	0.28	0.1	0.05	5	1
3	Error Law	Formula		Δ_4/β	Δ_5/θ	$\frac{h}{2}\Delta_6^2$				$\frac{1}{2R}\Delta_{10}^2$	$\frac{(n-1)d}{nr\beta}\Delta_{11}$
	Δh_i	Result	Δ_3	$\Delta_4/5$	$\Delta_5/180$	$15000\Delta_6^2$	Δ_7	$\sqrt{2}\Delta_8$	Δ_9	$\frac{\Delta_{10}^2}{520000}$	$0.05\Delta_{11}$
4	Δ_{i1}		0.23	1.15	41.4	13.4	0.23	0.16	0.23	346	4.6
5	E 1		PT↑	ET↓	ET	ET	TT↑	PT↑	PT↓	ET↓	PT↓
6	Δ'_{i1}			1	10	5			0.1	100	
7	$\Delta h'_{i1}$			0.2	0.06	0.03			0.1	0.02	
8	$\Delta h'_{允随}$		$\sqrt{\Delta h'^2_{允随} - \sum \Delta h'^2_{i1}} = \sqrt{0.69^2 - 0.055} \mu m = 0.65 \mu m$								
9	Δ_{i2}		0.34				0.34	0.24			6.9
10	E 2		PT↑				TT↓	PT↑			PT↓
11	Δ'_{i2}		0.3				0.28	0.28			5
12	$\Delta h'_{i2}$		0.3				0.28	0.4			0.25

Error Adjustment

- 引用第三栏局部误差与源误差之间的关系式，将经过第一次调整后的五项误差分量折算成局部误差，这五项局部误差的综合为

$$\sum \Delta h_{i1}'^2 = 0.055 \mu\text{m}$$

- 再次引用第三栏局部误差与源误差之间的关系式，将经过第二次调整后的四项误差分量折算成局部误差，这四项局部误差的综合

$$\sum \Delta h_{i2}'^2 = 0.391 \mu\text{m}$$

□ ...

Error Adjustment

- 对经过两次调整之后各个误差分量进行综合，求得总随机误差为

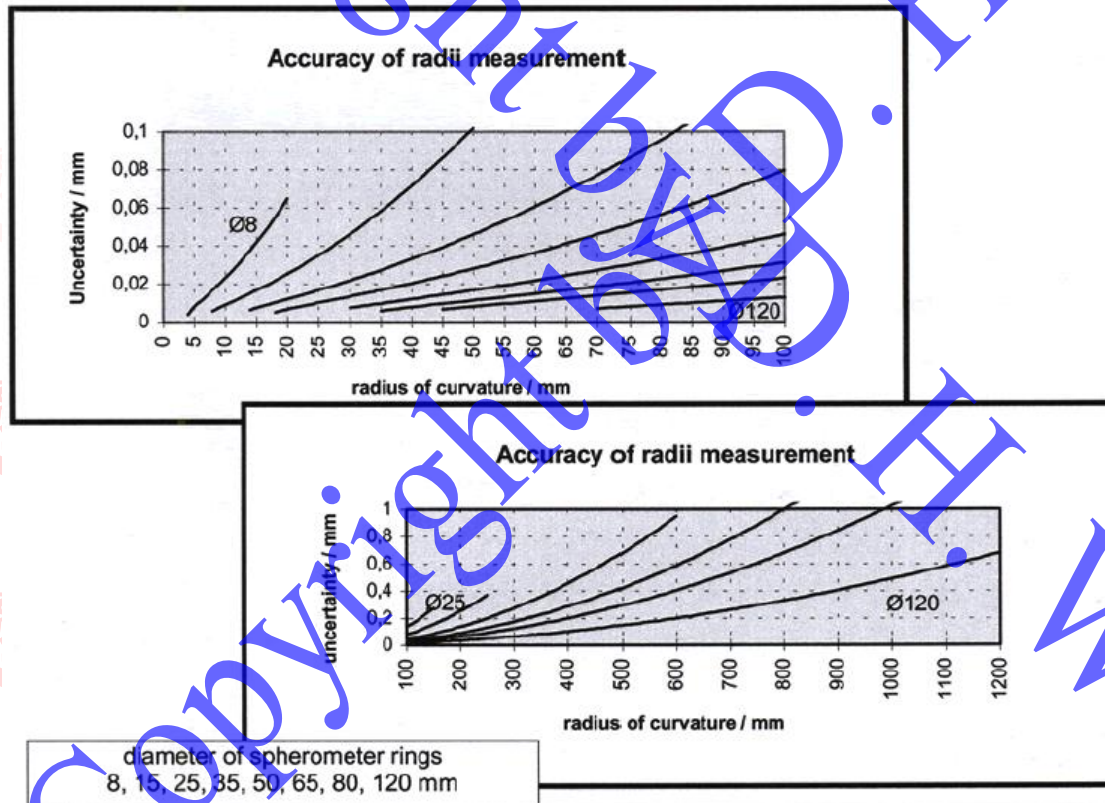
$$\sqrt{\sum \Delta h'^2_{i1} + \sum \Delta h'^2_{i2}} = \sqrt{0.055^2 + 0.391} \mu\text{m} = 0.67 \mu\text{m}$$

- 在所分配的误差分量中

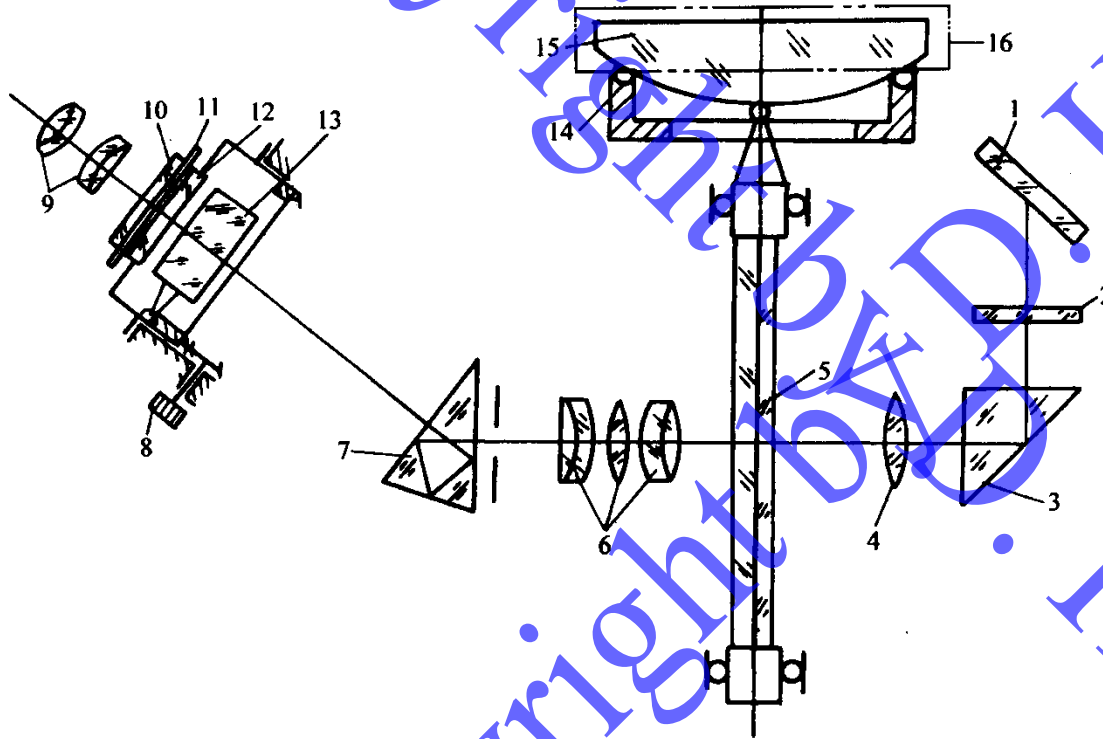
- ✍ 仅一项处于技术公差等级
- ✍ 四项处于生产公差等级
- ✍ 系统误差为总允许误差的1 / 3
- ✍ 误差分配结果较为合理

Characteristic

- ❑ The relationship between the accuracy of radii measurement and the radius of curvature for a *Spherometer*



Questions?

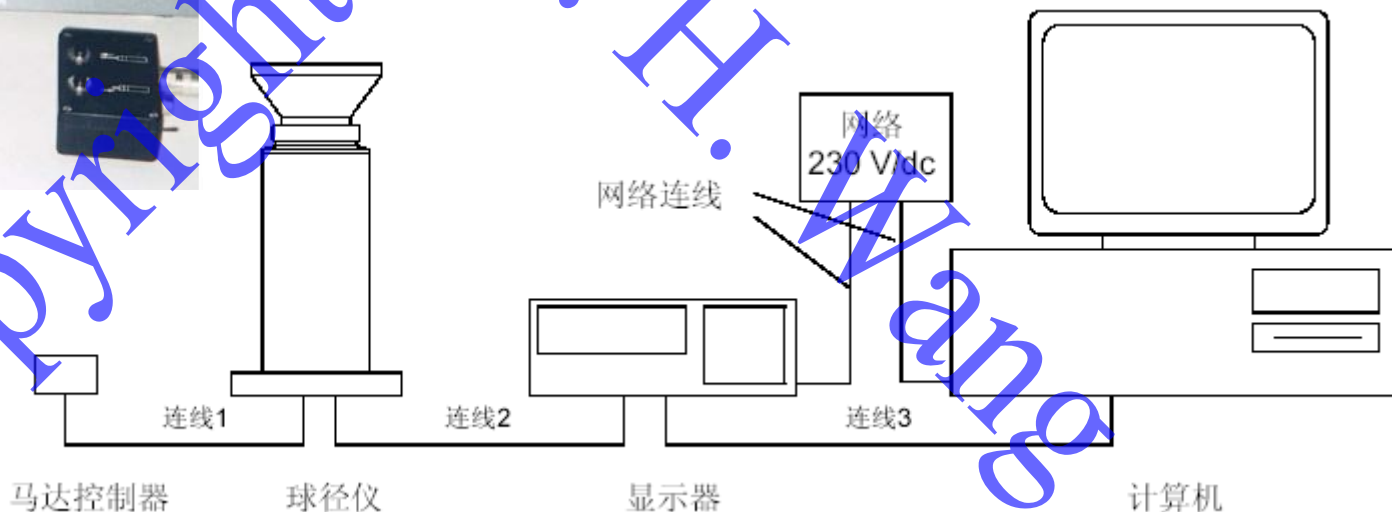


- ☐ How to digitize the optical Spherometer?
- ☐ How to extend the measurement range with a higher degree of accuracy?

Digital Spherometer: Questions



- ☐ How to select the *incremental length measuring system*?
- ☐ How to realize the *automatic measurement*?
- ☐ How to design the *measuring software with friendly Windows*?
- ☐?



The End

*Thank you very much for
your attention!*

