

《机械工程基础实验》

实 验 指 导 书

互换性测量实验 2

粗糙度测量实验

齿轮测量 1：齿形测量

齿轮测量 2：齿轮综合测量

浙江大学机械工程实验教学中心

2024 年 9 月

实验二 粗糙度测量

一、实验目的和要求

1. 了解光切法显微镜、表面粗糙度测量仪、表面轮廓测量仪的测量原理；
2. 掌握仪器的使用方法；
3. 熟悉表面粗糙度的评定标准。

二、测量原理与仪器说明

1. 光切法显微镜

光切法显微镜是利用“光切原理”测量表面粗糙度的常用仪器之一，主要用于测量基本评定参数 R_z 。其外形如图 2—1 所示：

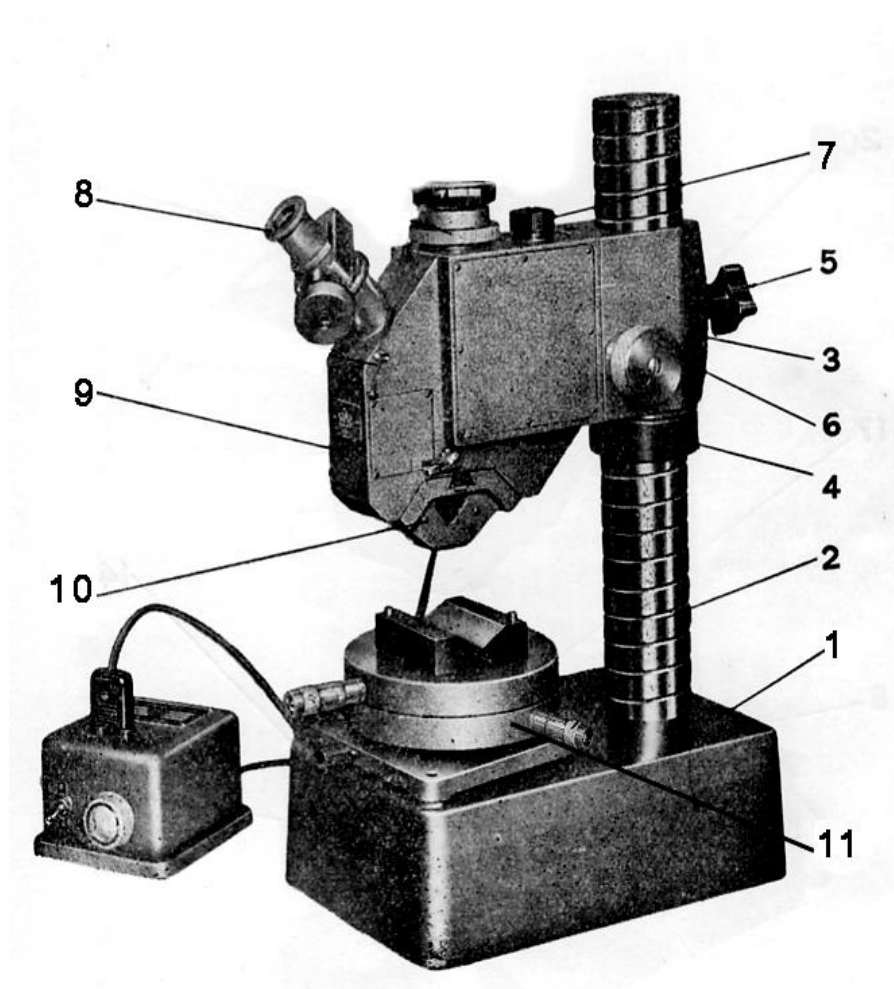


图 2—1 光切法显微镜

- 1—基座；2—立柱；3—横臂；4—横臂升降螺母；5—横臂固定螺钉；6—调焦手轮；
7—光源；8—观察目镜；9—微调节手轮；10—观察物镜；11—工作台；

测量原理如图 2—2a 所示。由光源 1 发出的光线经狭小缝 2 及物镜 3 以 45° 的方向投射到被测工

件表面上。该光束如同一平面（也叫光切面）与被测表面成 45° 角相截（如图 2-2b），由被测表面反射，经物镜 4 成像在分划板 5 上，通过目镜 6 就可观察到一条放大的凸凹不平的光带影像，由图 2-2b 可知，被测表面的实际不平度高度 h 与分划板上光带影像的高度 h' 的关系为

$$h = h' \cos 45^\circ M$$

式中： M 是与物镜的放大倍数有关的参数。

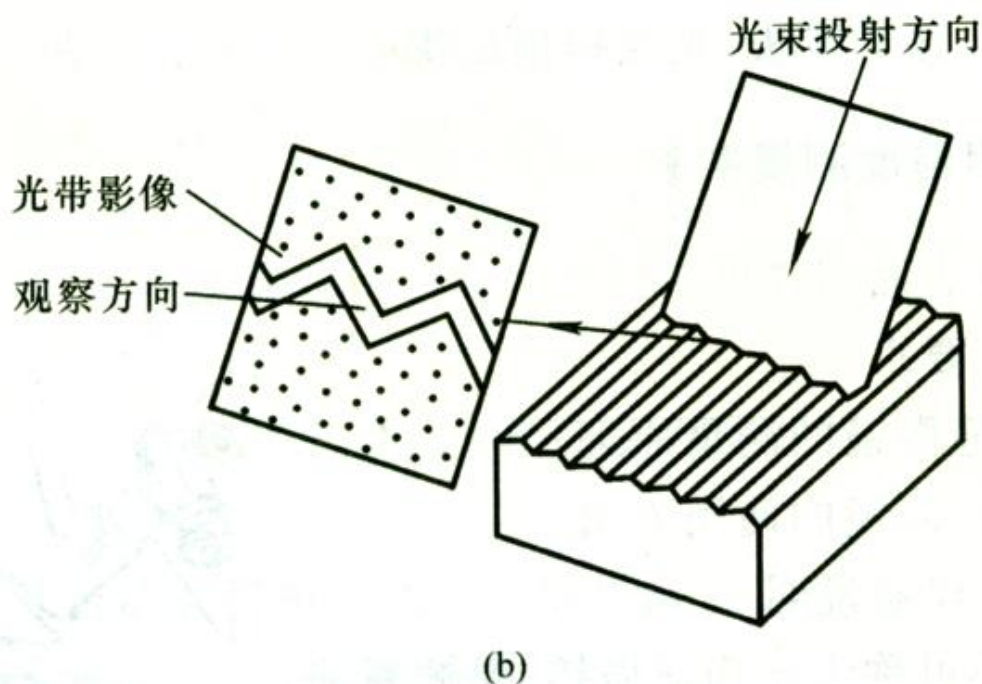
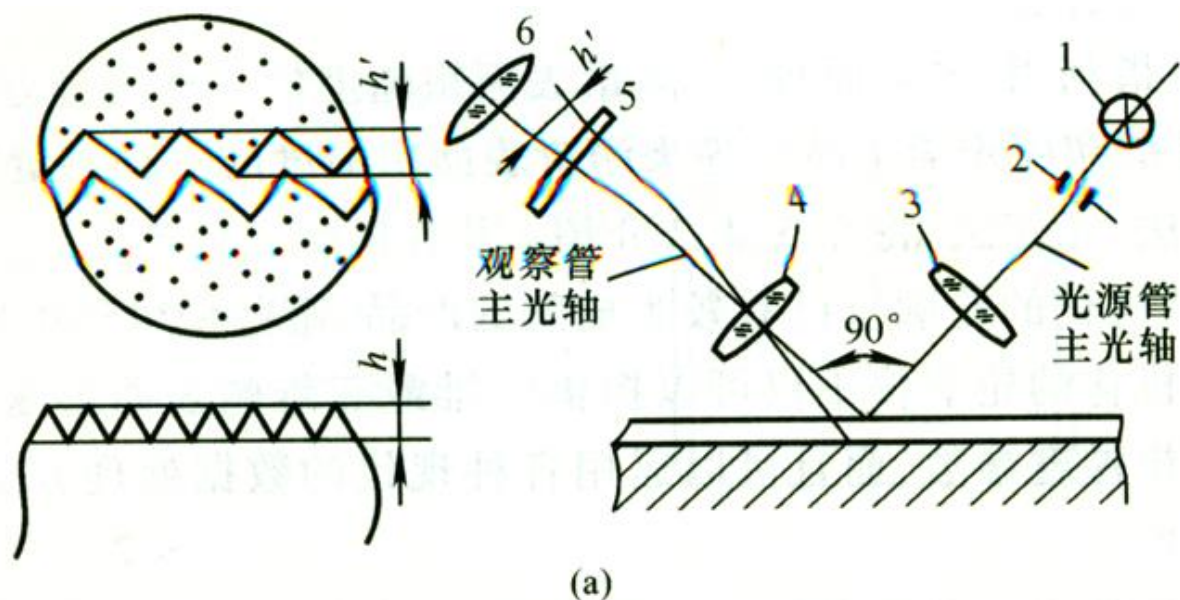


图 2-2 光切法显微镜测量原理图

1—光源；2—狭缝；3、4—物镜；5—分划板；6—目镜

光带影像的高度 h' 用读数目镜（图 2-3a）读出。读数目镜中有一块固定分划板和一块活动分

划板。固定分划板上刻有 0-8 刻度线，活动分划板与微动丝杆相连，上面刻有十字线及双标线，转动刻度套筒可使其移动。测量时转动刻度套筒，让十字线中的一条线（如图 2-3b 中的水平线）先后与影像的峰、谷相切，由于十字线移动方向与影像高度方向成 45° 角，所以影像高度 h' 与十字线移动距离 h'' 的关系为：

$$h' = h'' \cos 45^\circ$$

而被测表面的实际不平度高度为：

$$h = h'' M / 2$$

令 $M/2 = E$ ，则：

$$h = E h''$$

式中： h'' 为测量工件时刻度套筒峰、谷两次读数之差， E 为刻度套筒上每一小格刻度值。

在测量工件前，需校正 E 的数值。将一标准刻尺（镀有金属薄层的玻璃刻尺，在一毫米长度内，均匀地刻有 100 格）放在物镜下，将目镜千分尺的十字线交点与刻尺的某一刻线重合，并记下目镜千分尺的读数（见图 2-4），然后移动十字线，使与另一条刻线重合，记下刻度套筒转过的格数。则

$$E = \frac{TZ}{2A} = \frac{10Z}{2A}$$

式中： Z 为十字线交点在标尺所移过的 50 小格（14X 物镜）； T 为标准刻尺的刻度值 $10\mu\text{m}$ ； A 为刻度套筒转过的格数。

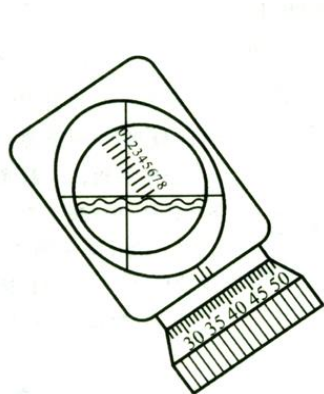


图 2-3 读数目镜

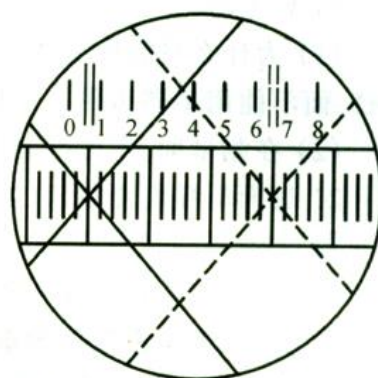
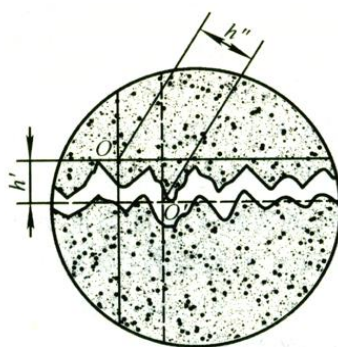


图 2-4 用刻尺确定刻度值

● 光切法显微镜实验步骤提示

(1) 用标准刻尺确定目镜千分尺的套筒分度值。接通电源，调整工作台 16 和横臂 1，使投入光束照亮标准刻尺，转动支架升降手柄 11 使支架 12 向下，使物镜 9、15 距离标准刻尺 2-4mm，然后慢慢提升支架，直至刻尺影像清晰。计算 E 值。

(2) 标准刻尺校对后，换上洗净的工件，调焦使加工表面影像清晰。

(3) 按图 2-5 所示，测量取样长度内峰和谷的读数。按下式计算 R_z 值：

$$R_z = E(h_{\max} - h_{\min}) = E(h_{10} - h_7)$$

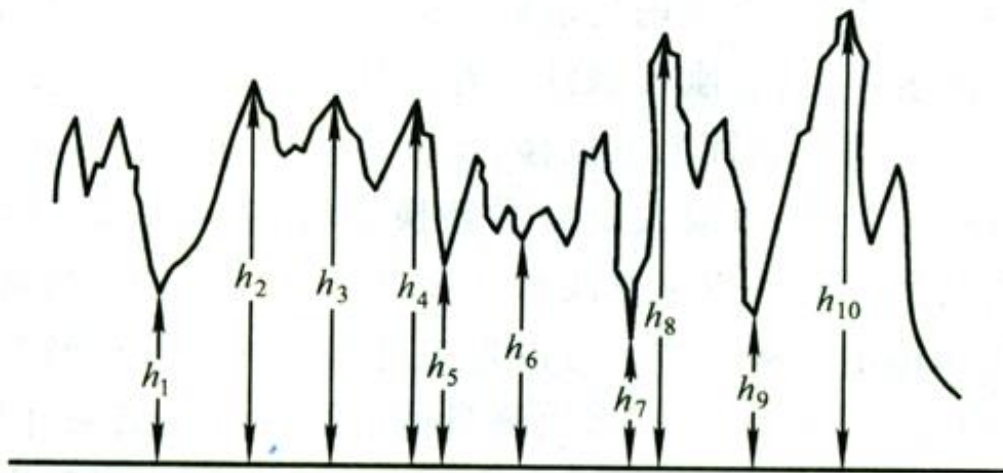


图 2-5(a) 读数示意图

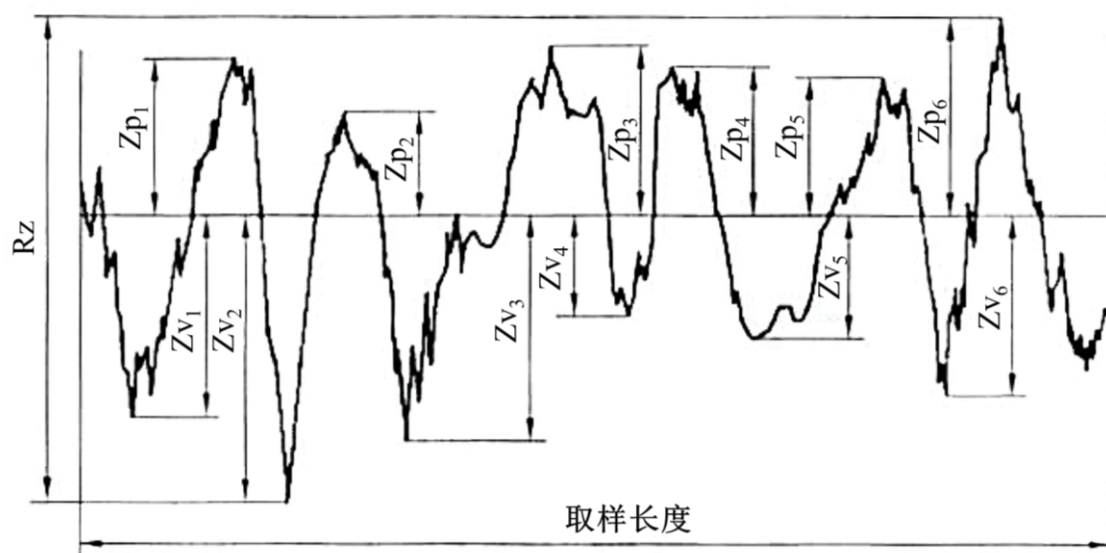


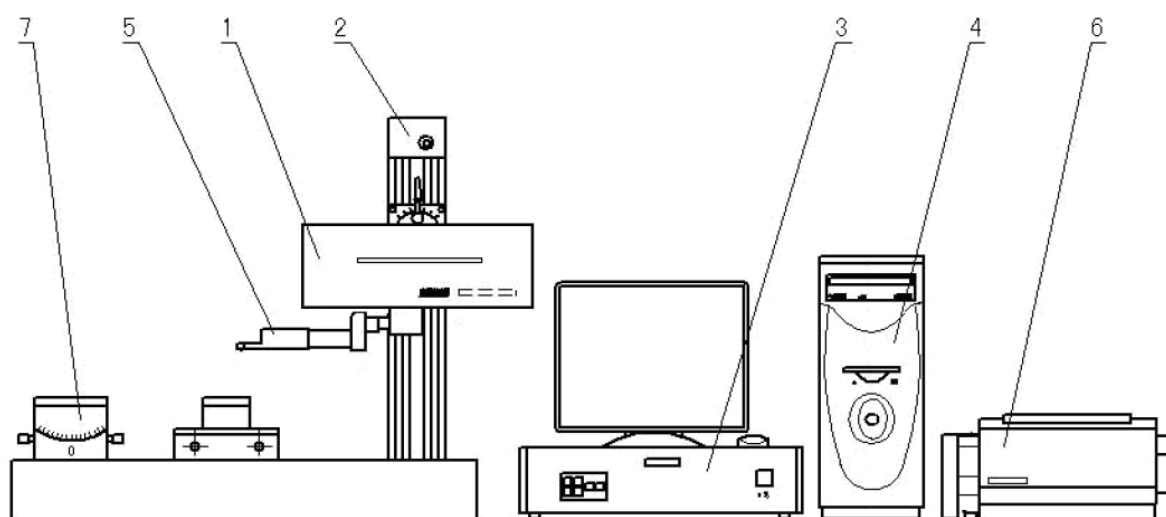
图 2-5(b) 轮廓最大高度 R_z 示意图

2.表面轮廓测量仪

触针式表面轮廓测量仪（哈量集团的 2300A-R 型）设备实物图如图 2—6 所示，具备表面结构微观轮廓测量功能；设备采用高精度电感结构的粗糙度传感器，可测量 Ra 不小于 $0.02\mu m$ 的工件表面粗糙度，通过测量工件表面粗糙度、波纹度、原始轮廓以及微观形貌等参数，可以对平面、柱面、曲面等工件微观表面的表面结构进行精密测量评定。



图 2—6 设备实物图



1—驱动箱 2—自动伺服立柱和大理石底座 3—电箱
4—计算机 5—传感器 6—激光打印机 7—工作台

图 2—7 设备组成

表面轮廓测量仪由传感器、驱动箱、立柱、电箱、计算机和打印机组成，如图 2—7 所示。仪器原理框图如图 2—8 所示，当计算机发出测量命令时，电箱接收到控制命令，发出控制信号，控制驱动箱电机转动，通过丝杠传动系统，带动驱动箱导轨滑行，传感器与导轨做同步运动，使测针沿工件表面滑行。驱动箱导轨装有光电编码器或光栅系统用作水平方向的采样基准，由传感器将测针位移量转换为电信号，经接口电路送入计算机，以采集一组表面轮廓的坐标数据，由计算机进行数据处理。计算机显示测量参数值和轮廓图形，并可将测量结果打印输出。

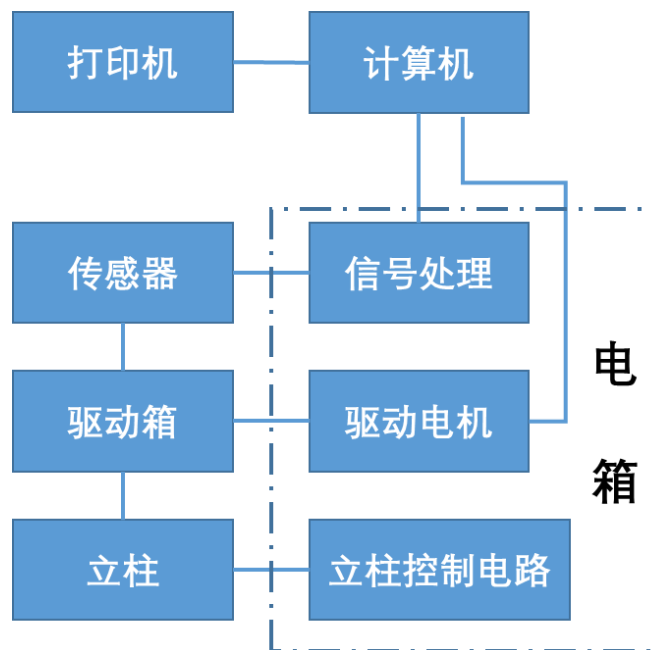



图 2—8 仪器原理框图

●表面轮廓测量仪实验步骤提示

- (1) 开机，打开设备和计算机电源，打开测量控制软件。
- (2) 利用电箱上的 Auto 位置的向上按钮将驱动箱升起（双箭头快移，单箭头慢移），将工件装卡到工作台上；观察工件摆放位置、传感器测针位置是否适中，以便顺利完成测量过程等。
- (3) 点击软件测量主界面主菜单的  按键，即可直接进入“原始轮廓、粗糙度和波纹度误差评估系统”界面（简称表面结构测量界面），在表面结构测量界面单击“测量”按键，出现“测量控制”界面。
- (4) 在“测量控制”窗口单击“测量参数”按钮（齿轮图标），可以设定测量控制条件，包括“测量范围”、“测量速度”、“测量行程”、“取样长度”、“评定长度”、“滤波器”、“返回方式”等。
- (5) “测量控制”窗口界面右上角光标位置显示当前测头与被测表面的接触状态，通过电箱的上下按键移动测头位置，当测头靠近被测表面时，需要使用立柱上方的微调旋钮移动测头，以免移动速度过快损坏测头。

①光标处于最下位置（红色）：测头与被测表面距离过大，需要进一步向下靠近，如图 2—9a 所示；

②光标处于最上位置（红色）：测头与被测表面距离过小，需要向上移动，如图 2—9b 所示；

③光标处于游离位置（绿色）：测头与被测表面距离未达到平衡状态，需要根据光标相对与基准线的位置向上或向下移动，如图 2—9c 所示；

④光标处于基准位置（橙色）：测头与被测表面距离达到平衡状态，可以开始测量，如图 2—9d 所示。



图 2—9 测量控制界面

（6）全部准备就绪后，点击“测量控制”窗口中的“测量”按钮（右箭头图标），开始测量。

为不影响测量结果，系统自动锁定计算机输入，鼠标和键盘输入无效，电感值也不再实时显示。此时驱动箱带动传感器向右滑行，在“测量实时显示区域”实时画出测量曲线，测量完成后会弹出提示“测量结束”。在测量或返回的过程中，可以按下电箱面板的“STOP”键中断测量过程。

（7）测量完毕后，记录测量结果到实验报告。

三、思考题

1. 在光切法测量时，为什么只能用光带的同一边界上的最高点和最低点计算 R_z ，而不能用不同边界上的最高点和最低点计算？
2. 测量方向与加工纹理方向之间的相互关系是什么？
3. 除本实验所用的两种粗糙度测量仪外，再举例一种其他类型的粗糙度测量仪器，简要说明其测量原理和优缺点。

实验三 齿轮测量 1：齿形测量

一、实验目的和要求

1. 了解单盘式渐开线检查仪测量齿轮齿廓偏差的测量原理；
2. 掌握仪器的使用方法；

二、测量原理与仪器说明

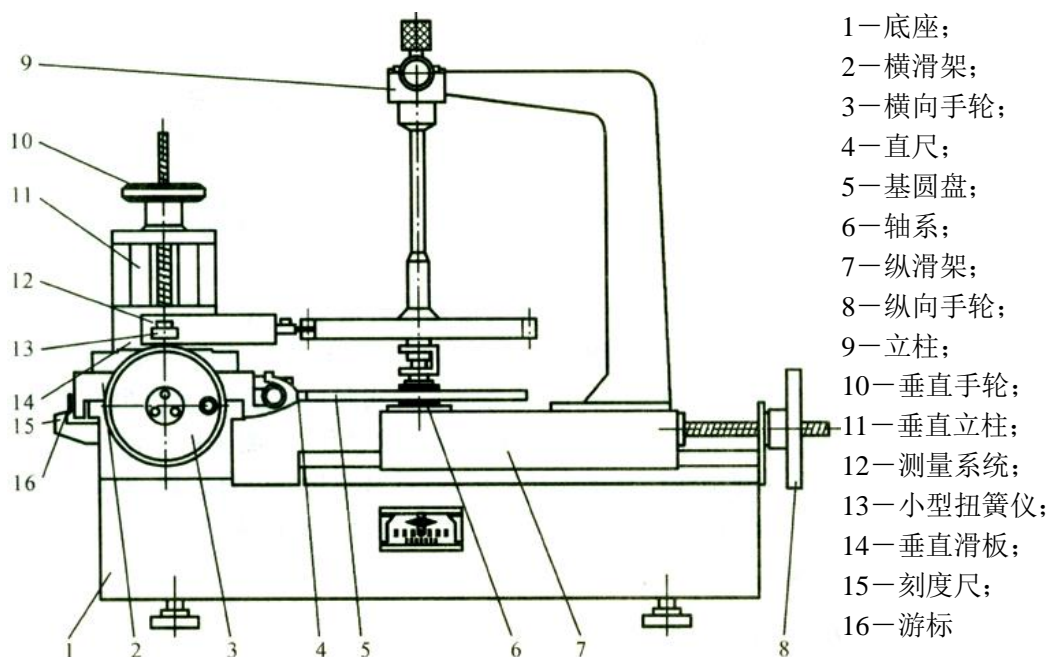


图 3-1 单盘式渐开线检查仪

根据渐开线发生的原理，单盘式渐开线检查仪产生一个理论渐开线轨迹，将实际齿形与该理论轨迹进行比较，从而评定实际齿形的正确性。如图 3-1 所示，基圆盘 5 与被检工件同轴（基圆盘的直径与被测齿轮的基圆直径相等）。基圆盘由弹簧压紧在直尺 4 上。使基圆盘与直尺面相切。直尺移动时，由摩擦力带动基圆盘作相对纯滚动，直尺与基圆盘相切的面上任意一点都相对于基圆盘画出一根理论渐开线轨迹。测量系统 12 中的测头与直尺一起移动，测头的工作点在直尺与基圆盘的接触平面上。所以当直尺与基圆盘作纯滚动时，测头就相对基圆盘走出一条理论渐开线轨迹。

当测头与被测齿廓接触时，如果齿廓无误差，则测头相对于直尺没有移动；如果有误差，测头相对于直尺就有移动。测头的移动量通过测量系统由小型扭簧比较仪 13（读表系统）显示出来。当测头滑过整个齿廓时，扭簧比较仪的最大摆动量，即为齿廓偏差。

三、实验步骤提示

1. 参看图 3-1，转动横向手轮 3，使横向滑架 2 移至零线位置，即游标 16 与刻度尺 15 上的零线对准。刻度尺指零时，测头的中心通过基圆盘中心。

2. 把测量头对准被测齿轮的齿槽，并慢慢转动纵向手轮 8 使纵向滑架 7 移动，当基圆盘与直尺刚好接触时，记住纵向手轮的位置，然后再从这位置继续转动手轮半圈，从而获得工作所需的压紧力。

3. 根据要求，当测量左齿廓时，把方向旋钮按箭头指向左侧；反之测量右齿廓时，把旋钮指向右侧，微调直尺，把扭簧仪读数调到零。

4. 开始测量。转动横向手轮，并进行刻度尺上的读数。起始读数为测头的半径尺寸，以后每移动 2mm，进行一次读数（通过游标 16 及刻度尺 15 直接读出的数值减去测头半径即为被检齿轮的渐开线展开长度），并同时把扭簧比较仪的读数记录下来。

5. 绘制渐开线展开长度 S 与指示表指示偏差 K 的曲线图，分析测量结果。根据 ΔF_a 的数值评定齿轮精度等级或按规定精度评定合格与否。图 3-2 为曲线实例。计算齿廓偏差 ΔF_a 时，可不考虑齿根部齿形的非工作部分线段，可按误差曲线斜率急剧的变化点近似地确定非工作部分的位置。

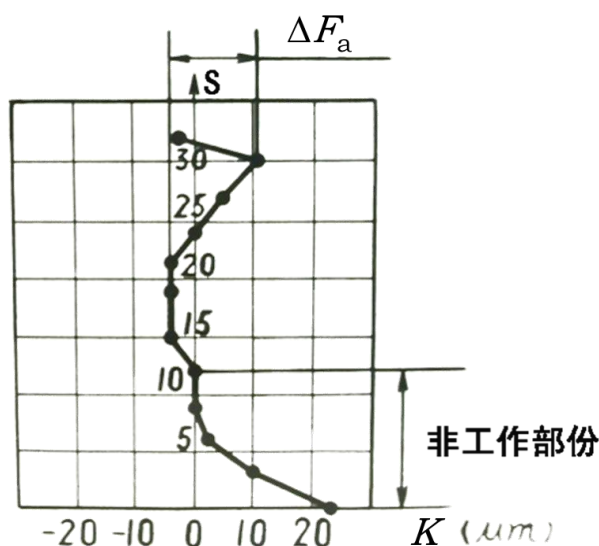


图 3-2 齿廓偏差测量曲线图

四、思考题

1. 齿廓偏差对齿轮传动质量有何影响？

实验三 齿轮测量 2：齿轮综合测量

一、实验目的和要求

- 1、理解设备的测量工作原理。
- 2、掌握齿轮综合测量的设备操作步骤与流程。

二、实验内容与仪器说明

实验主要对渐开线齿轮的齿轮齿廓偏差、螺旋线偏差、齿距偏差和径向跳动等几何形状偏差进行测量，通过连续几何轨迹点扫描(展成)测量方式，所测得的齿轮误差是被测齿轮齿面上被测点的实际位置坐标(实际轨迹或形状)和齿轮测量仪器对应测量运动所形成的测量轨迹之间的差异。通过测量结果评定，可对齿轮(尤其是首件)加工质量进行分析和诊断、对齿轮加工工艺参数进行再调整和优化。

实验设备采用哈尔滨量具刃具集团有限责任公司生产的 3040A 型齿轮测量中心，如图 3—3 所示。3040A 型齿轮测量中心是一种综合性的齿轮测量仪器。采用电子展成法，长、圆光栅数字定位采样，智能化微机控制，可以实现全自动循环测量。3040A 是一种当前主流水平的中规格齿轮测量仪器，可测量最大外径为 400mm 的渐开线圆柱齿轮的齿廓偏差、螺旋线偏差、齿距偏差、径向跳动、以及剃齿刀、插齿刀的齿廓偏差、齿距偏差、径向跳动等，最高可测 4 级精度渐开线齿轮。

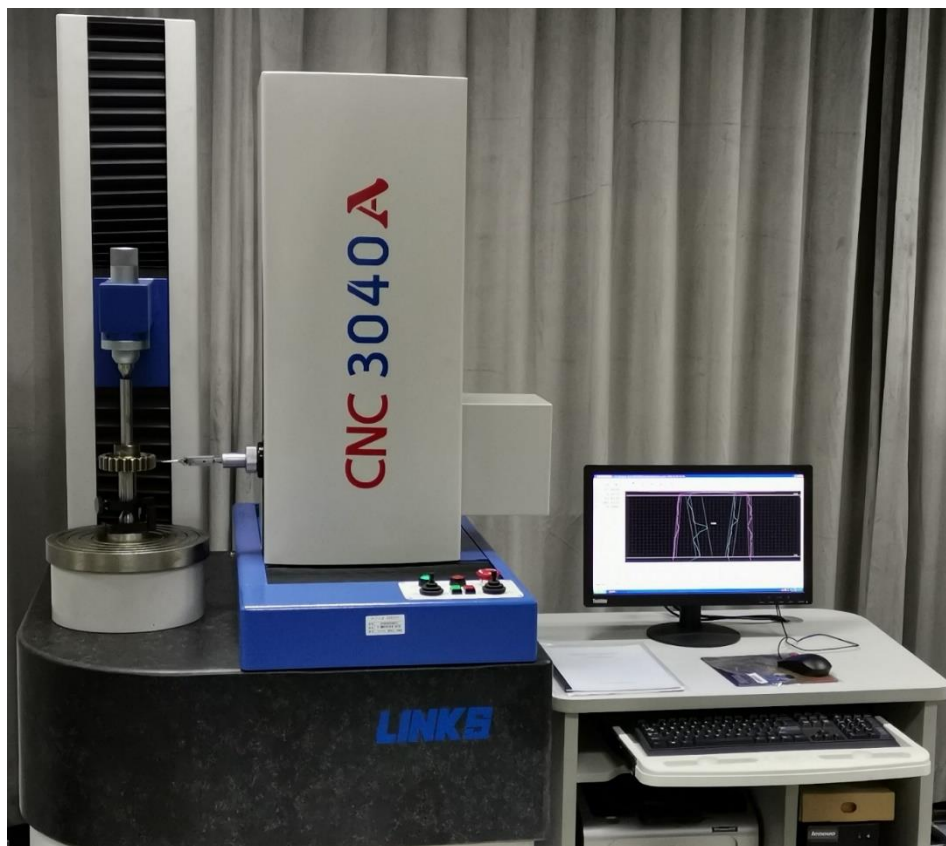


图 3—3 设备外观图

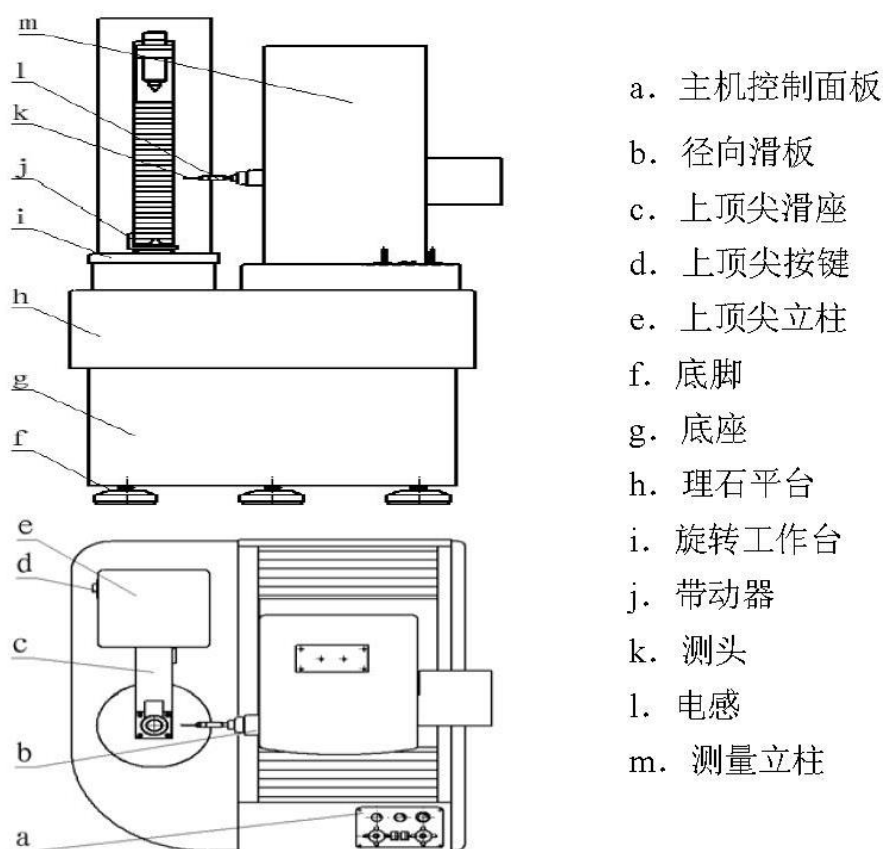


图 3—4 设备主机组成

3040A 型齿轮测量中心不同于机械传动式的齿轮测量仪器，设备主机如图 3—4 所示，采用电子展成的方法（如图 3—5），并采用微机数控方式测量齿轮偏差。以测量齿轮齿廓为例：电感测头（如图 3—6）与被测齿面接触，在齿轮转动的同时电感测头沿渐开线的法线移动，圆光栅编码器与被测齿轮同轴，长光栅编码器与电感测头同步运动，电感测头沿渐开线的法线，以一定间隔连续运动，在每次间隔，电感、长光栅、圆光栅同时采样，微机采集数据后由计算机处理，测量由计算机自动控制，逐点连续测量完毕后，经误差处理后输出检验报告单。

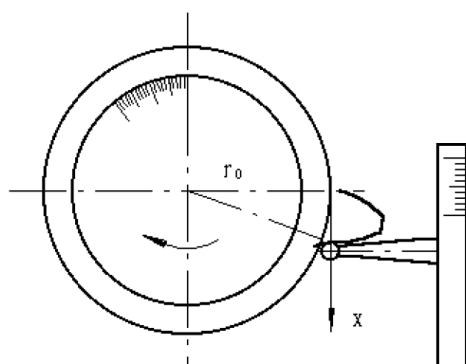


图 3—5 展成法测齿廓

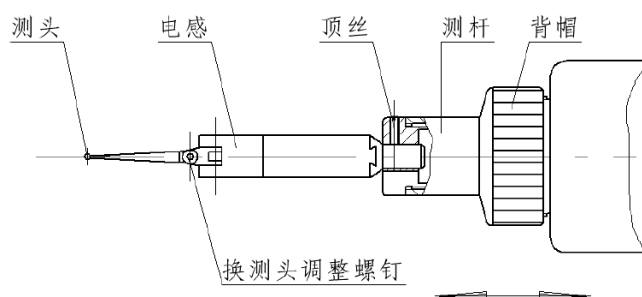


图 3—6 电感测头

三、实验步骤提示

1. 启动计算机和齿轮测量中心, 装夹齿轮, 通过测量立柱的侧面的上下按键控制顶尖压紧齿轮芯杆, 如图 3—7、3—8 所示。

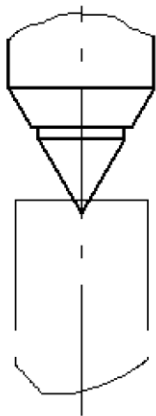


图 3-7 上顶尖压紧齿轮芯杆

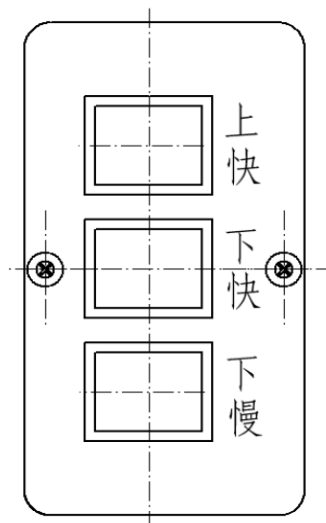


图 3-8 上顶尖移动操作面板

2. 启动测量软件, 选择“外圆柱齿轮”, 进入测量主界面, 如图 3—9 所示。

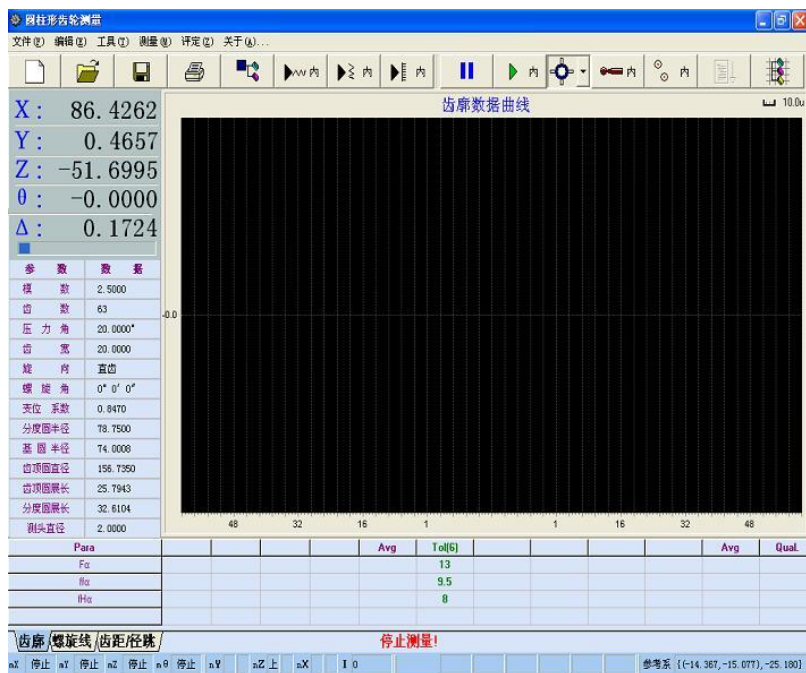



图 3-9 测量主界面

3. 用操纵杆调整 Y、X、Z 轴位置，使电感测头接近芯棒，停在芯棒的正前方约 5mm 处，单击工具栏“通过芯棒校正机器零点”按钮 ，弹出校正零点界面，按提示输入芯棒直径，按下主机控制面板“测量”按键，电感测头就会在微机的控制下自动校正零位。

注：实验中使用上顶尖替代芯棒进行校零操作。校零时，控制上顶尖稍稍抬起，露出侧面圆柱面，替代芯棒进行校零操作，如图 3—10。校零完毕后，控制上顶尖向下移动压紧齿轮芯杆。

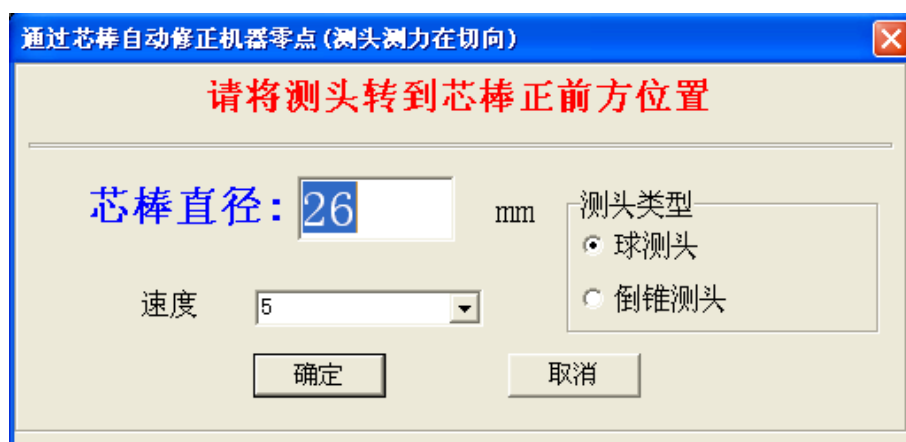


图 3—10 通过芯棒校正机器零点

4. 调整操纵杆使测头停在被测齿轮外径以外的任意位置，最好尽量接近齿轮以便缩短测量时间。测头起始位置在切向零位之后则先测量齿轮左齿面，在切向零位之前则先测量齿轮右齿面。
5. 打开软件的参数设置界面，选择测量速度，输入被测齿轮的齿数、模数、压力角、螺旋角等齿轮参数，输入测量日期、操作者等信息，选择测量项目。
6. 测量时可一次装夹就把齿廓偏差、螺旋线偏差、齿距偏差和径向跳动全部测出，在选择测量项目时，把齿廓、螺旋线、齿距都选择测量。调用选择连续测量程序，按下主机操作面板“测量”按键，自动完成测量。
7. 记录测量结果到实验报告。

四、思考题

- 1、3040A 型齿轮测量中心不同于机械传动式的齿轮测量仪器，采用电子展成的方法进行齿轮测量，试简要论述电子展成法与机械展成法的测量原理。与机械展成法相比，电子展成法有什么特点？