

机械工程基础实验

实验报告



姓 名:	徐屹寒
学 院:	机械工程学院
专 业:	机械工程
学 号:	3230103743
分 组:	第 3 组

浙江大学机械工程实验教学中心

2025 年 9 月

实验二 粗糙度测量

一、实验目的

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. 掌握上述仪器的操作与使用方法。
3. 熟悉表面粗糙度的评定标准。

二、实验原理

本实验主要介绍两种不同原理的测量仪器：

1. 光切法显微镜（测量 R_z ）

基本原理：利用“光切原理”。由光源发出的光线经狭缝及物镜以 45° 的方向投射到被测工件表面，光束如同一个平面（光切面）与被测表面相截。反射光线经物镜成像在分划板上，通过目镜观察放大的表面微观几何形状（光带影像）。

计算公式：

被测表面的实际不平度高度 h 与分划板上光带影像高度 h' 的关系为：

$$h = \frac{h'}{\cos 45^\circ \times M}$$

式中 M 为物镜放大倍数参数。实际测量中利用目镜测微器，通过校正系数 E （刻度套筒每格刻度值）直接计算微观不平度十点高度 R_z ：

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

2. 表面轮廓测量仪（测量 R_a 、波纹度等）

基本原理：采用触针式测量（如哈量集团 2300A-R 型）。驱动箱带动传感器沿工件表面直线滑行，传感器端的测针随表面微观几何形状上下位移。该位移通过高精度电感传感器转换为电信号，经数据采集送入计算机进行处理。

功能：可测量 R_a 不小于 $0.02\mu m$ 的表面粗糙度，以及波纹度、原始轮廓等参数，适用于平面、柱面及曲面。

三、实验内容（含设备、步骤）

1. 实验设备

光切法显微镜：包含基座、立柱、横臂、光源、观察目镜（带分划板）、工作台等。

表面轮廓测量仪（触针式）：包含传感器、驱动箱、立柱、电箱、计算机和打印机等。

其他：标准刻尺、待测工件（清洗干净）。

2. 实验步骤

（一）光切法显微镜测量步骤

1. 接通电源，调整光束照亮标准刻尺。利用目镜十字线对准刻尺刻线，根据移动格数计算目镜测微器的每格刻度值 E 。
2. 换上被测工件，调节横臂升降及微调手轮，直至视场中出现清晰的表面加工光带影像。
3. 转动目镜刻度套筒，使十字线分别与光带影像的“峰”和“谷”相切，读取数值。
4. 根据读数差值及公式 $R_z = E(h_{max} - h_{min})$ 计算粗糙度值。

（二）表面轮廓测量仪测量步骤

1. 打开电源及软件。利用电箱按钮升起驱动箱，将工件装卡在工作台上，调整位置使测针适中。
2. 在软件主菜单选择“原始轮廓、粗糙度和波纹度误差评估系统”，点击“测量”进入控制界面。
3. 点击“测量参数”按钮，设定测量范围、速度、行程、取样长度、评定长度及滤波器等。
4. 通过电箱按键或立柱微调旋钮移动测头靠近工件表面。观察软件界面光标颜色：红色表示距离过远或过近；绿色表示处于游离位置；橙色表示处于基准位置（平衡状态），此时方可开始测量。
5. 点击“测量”按钮，驱动箱带动传感器滑行，软件实时绘制曲线。
6. 测量结束后，记录测量结果并打印或保存数据。

四、实验结果

1、光切法显微镜测量

$$\text{目镜千分尺每格示值} E = \frac{TZ}{2A} = \frac{10Z}{2A} = 0.6 \mu\text{m}$$

Z——十字线在标准刻尺上移动的格数

T——标准刻尺的刻度值 ($10 \mu\text{m}$)

A——目镜千分尺转过的格数

测量位置	目镜千分尺 读数 (格)	读数最大值/ 最小值 (格)	高度最大值 L_0 (格)	轮廓最大高度 R_z (μm)
五个高峰	h_2 (103.0) 3.0	$L_2 = \text{Max}(h_2, h_4, h_6, h_8, h_{10})$ = 104.2	$L_0 = (L_2 - L_1)$ = 55.2	$R_z = L_0 E$ = 33.67
	h_4 94.9			
	h_6 (104.2) 4.2			
	h_8 (102.1) 2.1			
	h_{10} 104.2 99.5			
五个低谷	h_1 49.0	$L_1 = \text{Min}(h_1, h_3, h_5, h_7, h_9)$ = 49.0		
	h_3 52.5			
	h_5 54.5			
	h_7 52.5			
	h_9 53.4			

结论: 评定 $R_z = 33.67 \mu\text{m}$

完成日期	班 级	学生姓名	指导教师
11.3		张一多	徐晓东

2、表面轮廓测量仪测量

取样长度 0.8 mm

评定长度 4 mm

测量范围 40 μm

	Ra (μm)	Rz (μm)
1	0.4813	3.1665
2	0.5231	3.8526 3.1178
3	0.5140	3.1939
4	0.5647	4.1178
5	0.5090	3.3711

完成日期	班 级	学生姓名	指导教师
11.3		张一多 徐培杰	高红

五、粗糙度测量实验思考题：

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？

光切法显微镜的原理是将光线经狭缝投射到工件表面，形成一条有一定宽度的光带。这条光带的宽度取决于狭缝的宽度。如果使用光带的同一边界（例如都用上边界或都用下边界）测量最高点和最低点，测量的是表面微观几何形状在某一截面上的真实轮廓高度。如果使用不同边界（例如用上边界测最高点，下边界测最低点），那么测量结果中不仅包含了表面轮廓的高度，还错误地包含了光带本身的宽度，导致测量结果大大偏离实际粗糙度值，产生严重误差。

2. 测量方向与加工纹理方向之间的相互关系是什么？

测量方向应与加工纹理方向**垂直**。表面粗糙度旨在评价表面微观几何形状的高低起伏。加工纹理（如车削、刨削留下的刀痕）通常具有方向性。如果测量方向与纹理垂直，触针或光切面能跨越纹理的“峰”和“谷”，从而测得表面轮廓的最大高度差，反映真实的粗糙度。如果测量方向与纹理平行，触针或光束可能一直沿着同一个“谷底”或“峰顶”移动，测得的高度变化很小，无法真实反映表面的粗糙程度。

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。

举例仪器：干涉显微镜（双管显微镜）。

测量原理：利用光波干涉原理。将光源发出的光分为两束，一束投射到被测表面，另一束投射到仪器内部的标准镜面上。两束反射光在分光镜处汇合发生干涉，形成干涉条纹。被测表面的微观不平度会导致光程差发生变化，从而使干涉条纹产生弯曲。通过测量干涉条纹的弯曲程度来确定表面粗糙度的高度参数。

优点：

1. 非接触测量：不会划伤被测表面，特别适合软金属或精密表面。
2. 测量精度高：利用光波波长作为基准，灵敏度高。

缺点：

1. 测量范围小：主要适用于测量表面粗糙度值较小（通常 $R_z < 1\mu m$ ）的光洁表面，对于较粗糙的表面无法形成清晰的干涉条纹。

2. 视场小：只能观察很小的区域，不能反映大面积的表面状况。

实验三 齿轮测量

一、实验目的

1. 齿形测量：了解单盘式渐开线检查仪测量齿轮齿廓偏差的测量原理；掌握该仪器的使用方法。
2. 齿轮综合测量：理解齿轮测量中心（CNC 3040A）的测量工作原理；掌握齿轮综合测量的设备操作步骤与流程。

二、实验原理

1. 单盘式渐开线检查仪（机械展成法）

利用渐开线发生原理，产生一条理论渐开线轨迹，将其与被测齿轮的实际齿形进行比较。

核心机制：基圆盘（直径等于被测齿轮基圆直径）在直尺上作纯滚动（由弹簧压紧，依靠摩擦力带动）。直尺与基圆盘相切平面上的测头随直尺移动，相对于基圆盘画出理论渐开线。

偏差测定：测头与被测齿廓接触，若有误差，测头会相对于直尺产生移动。该移动量通过测量系统由小型扭簧比较仪显示，比较仪的最大摆动量即为齿廓偏差。

2. 齿轮测量中心（电子展成法）

采用电子展成法，通过微机控制实现全自动循环测量。

核心机制：不同于机械传动，该设备利用长光栅和圆光栅进行数字定位采样。电感测头与被测齿面接触，在齿轮转动的同时，测头沿渐开线的法线移动（长光栅与测头同步，圆光栅与齿轮同轴）。

偏差测定：计算机采集数据后，对比被测点的实际位置坐标与仪器运动形成的理论轨迹，计算出齿廓偏差、螺旋线偏差、齿距偏差和径向跳动等。

三、实验内容（含设备、步骤）

（一）齿形测量（单盘式渐开线检查仪）

1. 实验设备

单盘式渐开线检查仪（含基圆盘、直尺、测量系统、小型扭簧比较仪等）。

2. 实验步骤

1. 转动横向手轮，使横滑架移至零位，测头中心通过基圆盘中心。
2. 测头对准齿槽，移动纵向滑架使基圆盘与直尺刚好接触，再转动手轮半圈以保证压紧力。
3. 根据测量左或右齿廓的要求调整方向旋钮，微调直尺使扭簧仪读数为零。
4. 转动横向手轮开始测量。起始读数为测头半径尺寸，此后每移动 2mm 读取一次刻度尺数值，并记录扭簧比较仪的读数。
5. 绘制渐开线展开长度 S 与指示偏差 K 的曲线图，分析齿廓偏差 ΔF_a 。

（二） 齿轮综合测量（齿轮测量中心）

1. 实验设备

3040A 型齿轮测量中心（含主机、电感测头、驱动箱、电箱、计算机及软件）。

2. 实验步骤

1. 启动设备，利用顶尖压紧齿轮芯杆。
2. 选择“外圆柱齿轮”进入测量主界面。
3. 调整测头接近芯棒（或上顶尖侧面），点击“通过芯棒校正机器零点”，系统自动完成校零。
4. 调整操纵杆使测头停在被测齿轮外径以外且接近齿轮的位置。
5. 输入被测齿轮参数（齿数、模数、压力角等），选择测量项目（齿廓、螺旋线、齿距等）。
6. 按下“测量”键，设备自动完成连续测量。
7. 记录并保存测量结果报告。

四、实验结果

1、齿形测量

齿轮压力角 $\alpha = 20^\circ$ 模数 $M = 4$ mm, 齿轮精度等级为 7 级

齿数 $Z = 22$ 齿廓公差值 $F_a = 14$ μm

基圆半径 $r_b = \frac{mZ}{2} \cos \alpha = 41.346$ mm 测头半径 $d_0 = 1.5$ mm

检验结果:

齿轮号	序号	指示表指示偏差 (μm) 及展开长度														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
齿 1 轮廓	展开长度	0	2.5	3.4	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22.7	23.5	24.3
	指示表读数	4	11	11	11	13	15.5	21	24	24	24	31	31	32	31	-00
齿 2 轮廓	展开长度															
	指示表读数															

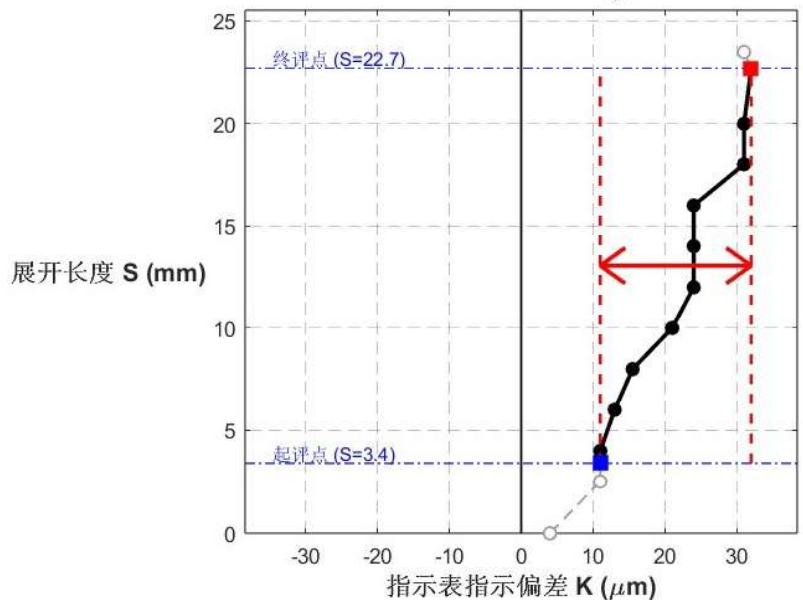
齿廓实际偏差 $\Delta F_a = 21$ μm

适用性结论:

$\Delta F_a > F_a$

不适用

齿形误差测量 (22齿, $\Delta F_a = 21 \mu\text{m}$)



完成日期	班 级	学生姓名	指导教师
		张-多 徐-晓	杨-光

2、齿轮综合测量

被测齿轮参数:

序号	参数名称	参数值	备注
1	旋向	直齿	左旋/右旋/直齿
2	模数	4.00000	mm
3	齿数	22	
4	压力角	20	°
5	齿宽	20.00000	mm
6	变位系数	0	
7	螺旋角	0°0'0"	° ' "
8	分度圆直径	88	计算
9	基圆直径	82.69396	计算
10	齿顶圆直径	96.00000	计算
11	齿顶展开长度	2438173	计算

测量结果记录:

齿廓偏差

参数	左齿面					右齿面					等级
	L-AVG	L17	L12	L6	L1	R1	R6	R12	R17	R-AVG	
齿廓总偏差 (Fa)	21.2	24.0	34.5	17.5	8.3	16.3	12.0	32.1	7.7	16.5	9
齿廓形状偏差 (fa)	13.4	15.4	15.4	12.6	10.0	8.0	13.5	6.7	6.2	8.6	8
齿廓倾斜偏差 (fia)	4.2	-18.9	28.4	11.1	-3.9	-15.4	3.6	30.6	3.8	5.6	10

螺旋线偏差

参数	左齿面					右齿面					等级
	L-AVG	L17	L12	L6	L1	R1	R6	R12	R17	R-AVG	
螺旋线总偏差 (F _β)	12.1	16.3	14.1	9.0	9.0	8.1	14.6	1.6	15.2	9.9	8
螺旋线形状偏差 (f _β)	2.3	1.7	0.6	3.6	3.1	3.0	0.9	1.6	2.1	1.9	4
螺旋线倾斜偏差 (f _{Hβ})	R1.3	R11.5	R8.1	L6.3	L7.9	R1.4	L11.2	L0.0	R9.1	L0.2	8

齿距偏差与径向跳动

参数	左齿面	右齿面	等级
齿距累积总偏差 (F _p)	81.5	99.9	10
单个齿距偏差 (f _{pt})	-28.5	-21.1	10
齿距累积偏差 (F _{pk}), k=3	-43.8	-48.5	10
径向跳动 (F _r)	130.9		12

完成日期	班 级	学生姓名	指导教师
11.3.		张一多 徐屹寒	杨松

五、齿轮测量实验思考题：

1. 齿廓偏差对齿轮传动质量有何影响？

1. 影响传动的平稳性：齿廓偏差会导致齿轮传动过程中瞬时传动比的变化，引起从动轮角速度的波动。这种速度波动会产生额外的动载荷，导致齿轮在高速运转时产生振动和噪声。
2. 影响齿面接触与寿命：齿廓偏差会使齿轮啮合时的接触点偏离理论位置，导致齿面接触不良或载荷分布不均（如出现边缘接触或应力集中）。这会加速齿面的磨损、胶合或点蚀，从而降低齿轮的使用寿命和承载能力。
3. 影响运动精度：虽然齿廓偏差主要影响平稳性，但累积的齿形误差也会在一定程度上影响传递运动的准确性。

2. 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？

（1）电子展成法与机械展成法的测量原理

机械展成法：利用基圆盘与直尺作纯滚动来模拟渐开线的形成过程。基圆盘（直径等于被测齿轮基圆直径）被压紧在直尺上，直尺移动带动基圆盘转动。直尺上测头的工作点轨迹相对于基圆盘就是一条理论渐开线。通过测量实际齿廓与这条由机械运动生成的理论轨迹的差值来获得齿廓偏差。

电子展成法：利用计算机控制与光栅反馈来模拟展成运动。仪器不需要基圆盘，而是通过圆光栅编码器测量齿轮的回转角度，长光栅编码器测量测头的直线位移。在微机控制下，测头沿渐开线的法线方向移动，同时齿轮转动，两者保持严格的运动关系（电子展成）。计算机采集实际采样点的坐标数据，并将其与理论计算出的渐开线轨迹进行比较，从而得出偏差。

（2）电子展成法的特点

1. 通用性强，无需基圆盘：机械法要求基圆盘直径必须与被测齿轮基圆直径相等，因此测量不同规格齿轮需更换不同基圆盘。电子展成法通过软件参数设置即可适应不同参数的齿轮，无需专用机械靠模。

2. 精度高，数据处理能力强：采用长光栅和圆光栅进行数字定位采样，消除了机械传动链（如摩擦传动）带来的误差。同时，智能化微机控制可以实现全自动循环测量，自动进行误差分析、数据处理和报告输出。

3. 功能综合：机械式仪器通常功能单一（如专测齿形），而电子展成法的测量中心（如3040A）可以一次装夹完成齿廓偏差、螺旋线偏差、齿距偏差和径向跳动等多项指标的综合测量。