

# 光栅尺 Encoder 技术白皮书

---

## 第一章 光栅尺是什么？

### 1.1 基本定义与核心功能

光栅尺是高精度线性位移检测传感器，通过光学 / 磁性 / 电容 / 感应原理，将机械直线位移转化为电信号，为控制系统提供实时、精准的位置反馈。

- 什么是位移检测？

位移检测是对设备运动部件的位置、距离、速度进行实时测量与反馈，是自动化设备实现精准运动的基础。

- 为什么需要光栅尺？

无精准位移反馈 → 定位偏差、加工报废、运动失控、产品一致性差。

光栅尺 = 机器的眼睛 + 尺子，是高精度制造的核心感知部件。

### 1.2 光栅尺组成结构

#### 1) 标尺（主尺）

- 玻璃标尺：精度高、热稳好，适合精密设备
- 钢带标尺：韧性强、耐振、可长行程，适合大行程机床

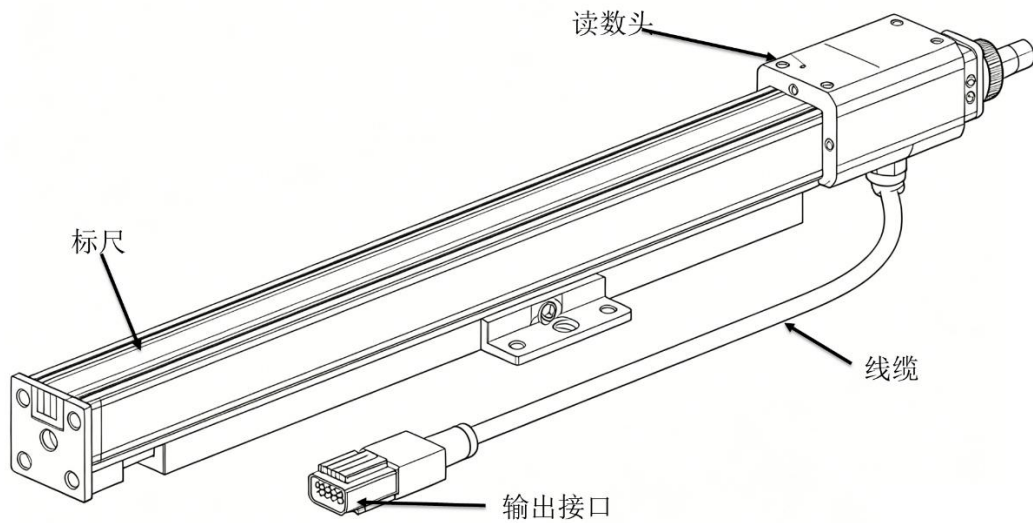
#### 2) 读数头（副尺）

- 光源 / 感应芯片 → 读取栅格 → 光电转换 → 输出位移信号

#### 3) 信号输出接口

- 1Vpp / TTL / SSI / 串行总线 → 连接系统的“桥梁”

**【结构示意图说明】**



---

## 第二章 光栅尺家族 —— 四大技术路线详解

### 2.1 光学式光栅尺

- 原理：光透过栅线产生莫尔条纹，光电转换输出信号
- 优点：最高精度、最高分辨率，可达纳米级
- 缺点：怕油污粉尘，需防护
- 场景：精密机床、三坐标、半导体设备

### 2.2 磁性式磁栅尺

- 原理：磁性栅格 + 磁传感检测磁场变化
- 优点：抗污染强、耐油污粉尘、耐振动
- 缺点：精度低于光学尺
- 场景：木工、石材、注塑、恶劣工况机床

### 2.3 电容式容栅尺

- 原理：极板电容变化测位移
- 优点：低成本、低功耗、结构简单
- 缺点：精度低、距离短、抗干扰弱

- 场景：数显卡尺、小型量具

## 2.4 感应式感栅尺 / 感应同步器

- 原理：电磁感应耦合输出位置信号
- 优点：极强抗干扰、高可靠
- 缺点：响应较慢
- 场景：重型机床、冶金、强电磁环境

## 2.5 四大技术对比表

技术类型	精度	分辨率	环境适应性	成本	典型场景
光学光栅尺	极高	极高	一般	高	精密加工、测量、半导体
磁性磁栅尺	中等	中等	强	中低	恶劣工况、大行程
电容容栅尺	低	低	弱	低	手持量具、小型设备
感应感栅尺	中高	中等	极强	中高	重型机床、强干扰环境

## 第三章 光栅尺的关键参数解读

### 3.1 精度

- 定义：测量值与真实值的接近程度
- 标注解读： $\pm 3 \mu\text{m}/\text{m}$  表示 每米最大误差  $\pm 3$  微米
- 等级： $\pm 0.5 \mu\text{m}$  /  $\pm 1 \mu\text{m}$  /  $\pm 3 \mu\text{m}$  /  $\pm 5 \mu\text{m}$

### 3.2 分辨率

- 定义：可识别最小位移
- 与精度区别：分辨率 = 最小刻度；精度 = 测的准不准
- 信号影响：1Vpp 可细分；TTL 固定脉冲

### 3.3 测量范围

- 选型：设备行程 + 10~20mm 安全余量
- 常见：50mm~ 数米

### 3.4 输出信号类型

- 1Vpp 正弦波：可高细分，高端系统

- TTL 方波：数字脉冲，通用稳定
- 绝对式 SSI / 串行：开机无需回零

### 3.5 其他关键参数

- 最大速度：36~480m/min
  - 防护等级：IP54 / IP64 / IP67
  - 工作温度：0~50℃（宽温 - 20~80℃）
  - 热膨胀：自由伸缩型 / 随基体伸缩型
- 

## 第四章 选型决策指南 —— 五步精准选型

### 第一步：明确需求

- 应用场景：机床 / 测量 / 半导体 / 木工
- 测量行程、定位精度、重复定位精度

### 第二步：确认设备系统（必提供）

1. 数控系统型号（如西门子 840D SL）
2. 编码器模块（SMC20/SMC30/SDU-205）
3. 接口类型（1Vpp/TTL/SSI）

### 第三步：参数匹配

- 精度：高于设备要求 1~2 级
- 分辨率： $\geq$ 定位精度的 1/10
- 信号：与系统完全兼容

### 第四步：安装条件

- 空间、安装姿态、环境（粉尘 / 油污 / 温度）

### 第五步：特殊需求

- 绝对式（贵约 20%，无需回零）
- 高防护 IP64/IP67
- 预算范围

【选型流程图】



## 第五章 安装与使用 —— 避免常见错误

### 5.1 安装前准备

- 基面平面度 $\leq 0.02\text{mm/m}$
- 无毛刺、无杂质、清洁干燥

### 5.2 安装步骤（图文标注）

1. 标尺安装：弹性固定、无应力、保证平直
2. 读数头安装：严格控制间隙、锁紧防松
3. 布线：远离动力线、屏蔽接地、避免弯折

### 5.3 校准调试

- 通电看信号稳定无报警
- 激光干涉仪 / 量块校验精度

### 5.4 维护与故障排查

- 维护：无水乙醇轻擦，禁止硬物刮擦
- 常见故障：
  - 无信号：接线 / 供电 / 接口

- 偏差大：污染 / 间隙 / 安装变形
  - 丢脉冲：干扰 / 超速 / 电缆破损
- 

## 第六章 应用场景案例分享

### 6.1 光刻机与半导体制造设备应用

#### 应用场景

EUV/DUV 光刻机、晶圆检测、晶圆切割、薄膜沉积、刻蚀设备等。

#### 核心需求

纳米级定位、超高重复精度、洁净兼容、高速稳定。

#### 方案与效果

- 采用纳米级绝对式光栅尺，分辨率 $\leq 1\text{nm}$ ，定位精度  $**\pm 0.1 - 0.5 \mu\text{m}**$ 。
- 用于双工件台 X/Y/Z 轴全闭环反馈，实现高速扫描与纳米级对准。
- 支持 Class 1 洁净室、真空、高低温环境稳定工作。

#### 应用价值

- 保障 7nm/5nm/2nm 先进制程光刻图案无畸变。
- 提升光刻机 WPH（每小时晶圆处理数），降低废品率。
- 实现晶圆切割、键合、检测亚微米级精度稳定输出。。

### 6.2 先进封装设备应用

#### 应用场景

倒装焊、固晶机、键合机、植球机、晶圆级封装 WLP、AOI 检测设备。

#### 核心需求

高速高精、多轴同步、微小间距对位、长时间稳定。

#### 方案与效果

- 配置高分辨率光栅尺，分辨率  $0.1 \mu\text{m}$ ，重复定位  $**\pm 0.1 \mu\text{m}**$  内。
- 实时补偿热变形与运动误差，保证焊盘 / 凸点微米级对位。
- 适配直线电机，支持高速往复 + 高精度点动复合运动。

## 应用价值

- 封装良率提升 3% - 8%，返修率大幅下降。
- 满足 MiniLED/MicroLED、Chiplet 等先进封装高精度要求。
- 实现多轴联动同步误差控制在  $^{**}\pm 0.3 \mu m^{**}$  内。

### 6.3 工业机器人与精密搬运应用

#### 应用场景

晶圆搬运机器人、SCARA 机器人、Delta 机器人、精密装配机器人、协作机器人。

#### 核心需求

高速动态精度、末端定位稳定、振动抑制、洁净 / 真空兼容。

#### 方案与效果

- 关节 / 直线轴集成微型 / 超薄光栅尺，实现全闭环控制。
- 末端定位精度达  $^{**}\pm 0.5 - 5 \mu m^{**}$ ，高速运动无丢步。
- 真空 / 洁净版可用于 EFEM、光刻腔间晶圆传输。

#### 应用价值

- 解决机器人传动间隙、热飘、振动导致的定位偏差。
- 晶圆传输无碰撞、无划痕，定位一致性提升 99%。
- 实现精密装配、插件、点胶、检测等无人化高精度作业。

### 6.4 高端伺服系统与精密运动平台应用

#### 应用场景

直线电机伺服平台、气浮平台、高速高精测试平台、数控转台、微米 / 纳米定位台。

#### 核心需求

高动态响应、高速度、高精度、强抗干扰、全闭环。

#### 方案与效果

- 光栅尺直接替代旋转编码器，消除丝杠 / 传动误差。
- 支持 1Vpp、TTL、SSI、串行总线，无缝对接主流伺服驱动。
- 速度可达 480m/min，定位精度  $^{**}\pm 0.1 - 1 \mu m^{**}$  可调。

## 应用价值

- 伺服系统从半闭环→全闭环，精度提升 5 - 10 倍。
- 高速启停无累积误差，重复定位稳定。
- 广泛用于检测、激光加工、精密机床、航空航天测试装备。

### 6.5 典型案例总结

应用领域	典型设备	精度要求	光栅尺价值
光刻机/半导体	工件台、晶圆切割	纳米级	保证先进制程良率与稳定性
先进封装	固晶 / 键合 / 植球机	$\pm 0.1 - 1 \mu\text{m}$	提升封装精度与产能
工业机器人	晶圆搬运 / 精密装配	$\pm 0.5 - 5 \mu\text{m}$	高速高精、洁净兼容
伺服系统	直线电机 / 气浮平台	$\pm 0.1 - 1 \mu\text{m}$	全闭环，消除传动误差

## 第七章 技术发展趋势

1. 超高精度：纳米 / 亚纳米级精度
2. 微型化：更小体积、更易安装
3. 智能化：自诊断、温度补偿、预警
4. 数字化：Profinet/EtherCAT 总线、无线传输
5. 高适应性：抗污染、极端环境适用

## 附录

### 附录 A 术语解释

序号	术语名称	英文	详细解释
1	光栅尺	Linear Encoder	利用光学莫尔条纹原理，将直线位移转化为电信号的高精度位移传感器，是精密设备位置反馈核心部件
2	标尺（主尺）	Scale	光栅尺基准测量体，表面刻有均匀栅线，分玻璃标尺、钢带标尺
3	读数头	Read Head	扫描栅线信号的检测单元，完成光电转换、信号放大与输出

4	栅距	Pitch	标尺上相邻两条栅线的间距，基础物理单位（常见 20 $\mu\text{m}$ /10 $\mu\text{m}$ /5 $\mu\text{m}$ ）
5	莫尔条纹	Moiré Fringe	两组栅线重叠形成的放大条纹，将微小位移转为可检测强信号，光学光栅核心原理
6	精度	Accuracy	测量值与真实位置的接近程度，单位 $\mu\text{m}/\text{m}$ ，如 $\pm 3 \mu\text{m}/\text{m}$
7	分辨率	Resolution	系统可识别的最小位移量，代表感知精细度，如 0.1 $\mu\text{m}$ 、1nm
8	重复定位精度	Repeatability	多次回到同一位置的偏差值，体现设备测量稳定性
9	热膨胀系数	Thermal Expansion	温度变化导致标尺长度变化的比率，影响长期测量稳定性
10	最大测量速度	Max Speed	读数头可稳定读取的最高运动速度，单位 m/min，决定设备运行上限
11	增量式光栅尺	Incremental	记录相对位移，开机必须回零，成本较低
12	绝对式光栅尺	Absolute	每个位置有唯一编码，开机直接读位置，无需回零
13	全闭环控制	Full Closed Loop	光栅尺直接检测负载最终位置，消除传动误差，精度最高
14	半闭环控制	Semi Closed Loop	采用电机编码器反馈，未消除传动误差，精度低于全闭环
15	1Vpp 正弦波信号	1Vpp	模拟差分信号，可细分实现超高分辨率，适配高端数控系统
16	TTL/A/B/Z 方波	TTL / Square Wave	数字脉冲信号，抗干扰强、接线简单，通用型设备常用
17	SSI 接口	SSI Interface	同步串行接口，多用于绝对式光栅尺，稳定可靠
18	串行总线接口	Serial Bus	Profinet、EtherCAT、RS485 等，支持智能化、长距离传输
19	DB9 接口	DB9 Connector	工业常用 9 针连接器，用于光栅尺信号与电源输出
20	安装间隙	Air Gap	读数头与标尺之间的距离，需严格按厂家标准调整
21	防护等级	IP Rating	设备防尘防水能力，如 IP54、IP64、IP67
22	自由伸缩安装	Free Expansion	标尺一端固定、一端滑动，消除温度应力变形误差
23	随基体伸缩	Fixed Expansion	标尺全程固定，随设备床身热膨胀同步变化
24	丢脉冲	Lost Pulse	信号丢失导致位置计数错误，表现为定位不准、系统报警

25	细分	Interpolation	将栅距信号电子放大，提升输出分辨率
26	参考点 (Z 相)	Reference Mark	设备唯一基准位置，用于回零与误差校准
27	电磁干扰	EMI	外部电场 / 磁场导致信号异常，需屏蔽线与接地解决

## 附录 B 选型检查清单 (可勾选)

- 应用场景    测量行程    精度要求    分辨率  
 信号类型    系统型号    安装空间    环境条件  
 绝对 / 增量    防护等级    预算

## 附录 C 常见 FAQ

### 1. 光栅尺是什么？主要用来做什么？

光栅尺是高精度线性位移传感器，用于实时检测设备运动位置，给机床、自动化设备提供精准位置反馈。

### 2. 光栅尺、磁栅尺、容栅尺有什么区别？

- 光学光栅尺：精度最高，适合精密设备；
- 磁栅尺：抗污染强，适合恶劣环境；
- 容栅尺：成本低，多用于手持量具。

### 3. 增量式和绝对式光栅尺的区别是什么？

- 增量式：开机必须回零，价格更低；
- 绝对式：开机直接读位置，无需回零，更安全高效

### 4. 精度和分辨率到底有什么不同？

精度 = 测量准不准；分辨率 = 能识别的最小位移。高分辨率 ≠ 高精度。

### 5. $\pm 3 \mu\text{m}/\text{m}$ 这种精度标注怎么理解？

表示每米长度内，最大测量误差不超过  $\pm 3$  微米。

### 6. 如何根据设备选择合适精度的光栅尺？

一般选择比设备要求高 1~2 个精度等级。

### 7. 分辨率怎么选最合适？

建议  $\geq$  设备定位精度的 1/10。

8. 1Vpp、TTL、SSI 三种信号怎么选？

- 1Vpp: 可高细分, 高端系统用;
- TTL: 数字方波, 通用稳定;
- SSI: 绝对式串行信号, 无需回零。

9. 测量行程怎么选才不会错？

设备实际行程 + 10~20mm 安全余量

10. 安装光栅尺对基面有什么要求？

基面平面度 $\leq 0.02\text{mm/m}$ , 无毛刺、无油污、不变形。

11. 读数头和标尺之间的间隙重要吗？

非常重要, 间隙不当会直接导致信号异常、精度变差、丢脉冲。

12. 电缆布线需要注意什么？

必须远离动力线, 屏蔽层可靠接地, 避免强干扰。

13. 光栅尺安装后需要校准吗？

需要, 用标准量块或激光干涉仪校验, 确保精度达标

14. 安装光栅尺对基面有什么要求？

基面平面度 $\leq 0.02\text{mm/m}$ , 无毛刺、无油污、不变形。

15. 读数头和标尺之间的间隙重要吗？

非常重要, 间隙不当会直接导致信号异常、精度变差、丢脉冲。

16. 电缆布线需要注意什么？

必须远离动力线, 屏蔽层可靠接地, 避免强干扰。

17. 光栅尺安装后需要校准吗？

需要, 用标准量块或激光干涉仪校验, 确保精度达标

18. 多粉尘、多油污环境能用光学光栅尺吗？

可以, 但必须选 \*\* 高防护等级 (IP64/IP67) \*\* 或加装防护装置。

19. 长行程设备 (几米以上) 适合哪种尺？

优先选钢带光栅尺或磁栅尺, 抗形变、安装更方便。

20. 半导体 / 精密测量为什么必须用光学光栅尺？

只有光学光栅尺能达到纳米级分辨率与亚微米级精度

---