

## 声光扫描与激光束偏转技术研究

声光偏转器 (Acousto-Optic Deflector, AOD) 作为无机械运动的固态光束扫描器件, 依托声光布拉格衍射效应实现激光束高速、高精度角度调控, 在精密激光加工、半导体光刻、光学检测等领域具备显著应用价值。本文系统梳理声光偏转器基础物理机理, 建立扫描角、访问时间、射频带宽、光斑分辨率量化工程模型, 修正有限声波填充时间下的有效分辨率计算公式, 剖析高速扫描产生的空间声光啁啾自聚焦效应并给出焦距补偿方案; 对比声束布拉格跟踪转向 (多电极相位调控)、啁啾偏转器 (脉冲式扫频)、正交双轴 XY 扫描三种高性能优化技术; 对比  $\text{TeO}_2$ 、钼酸铅、锗、石英等主流声光介质的声光品质因数、声速、适用波段特性, 推导衍射效率与饱和射频功率的对应关系; 结合 G&H AODF 4055 商用器件完成全套参数量化算例, 定量分析声光扫描与机械振镜扫描的性能差异。研究表明, 低声速高优值  $\text{TeO}_2$  剪切晶体可在有限射频带宽下获得更大扫描角与更高分辨率; 啁啾偏转器能够消除传统器件填充时间带来的分辨率损耗, 实现接近零回扫的高速扫描; 声束转向多电极结构可大幅拓宽器件射频工作带宽、稳定宽频衍射效率。本文建立的计算模型可为高速精密激光扫描系统的 AOD 器件选型、射频驱动设计与光学系统补偿优化提供工程参考。

**关键词:** 声光偏转器 (AOD);  $\text{TeO}_2$  声光晶体; 布拉格衍射; 啁啾效应; 声束转向; 双轴 XY 扫描; 射频驱动

随着微细加工、半导体晶圆检测、共聚焦显微成像等光电技术的发展, 激光扫描系统对光束定位速度、重复精度、动态响应能力的要求持续提升。传统机械振镜扫描系统依靠电机驱动反射镜完成光束偏转, 具备大扫描视场优势, 但转子惯性限制了扫描切换速度, 毫秒级响应难以满足微秒级高速随机定位场景, 长期连续工作也存在机械漂移、振动干扰等稳定性问题。

声光偏转器 (AOD) 是基于弹光效应与布拉格衍射的固态光束调控器件, 不含机械运动部件, 通过改变射频驱动信号频率即可连续调控一级衍射光偏转角度, 可实现微秒级光束跳转、纳秒级快速重定位, 在高速精密小视场扫描场景具备明显优势。

现有商用器件的原厂技术手册通常只给出基础经验公式，对高速扫描下的分辨率衰减、啁啾动态像差、双轴扫描光束截断等工程约束缺少系统梳理，也没有统一的计算流程，直接用于光电系统集成设计时容易出现参数遗漏或量纲错误。

**基于上述背景，本文完成以下工作：**

1. 阐明单电极声光偏转器的基础结构与布拉格衍射机理，统一规范扫描角、访问时间等核心公式；
2. 建立访问时间、固有理论分辨率、连续扫描有效分辨率的完整模型，结合商用器件完成分步量化算例；
3. 区分矢量随机扫描与连续线性扫描两类模式的适用场景与性能局限，推导啁啾等效焦距并给出柱面透镜补偿方案；
4. 阐述声束转向、啁啾偏转器、双轴正交扫描三类高性能优化技术，说明其对传统单电极 AOD 带宽与扫描速度限制的改善；
5. 对比主流声光介质材料性能，建立衍射效率与射频驱动功率的匹配模型，给出大孔径器件声波衰减的光强加权补偿方法；
6. 定量对比声光扫描与机械振镜扫描的性能边界，梳理不同应用场景下的器件选型思路。

全文按“**基础机理—性能模型—扫描模式—优化技术—材料与效率—工程应用**”的顺序展开，公式均给出适用条件、参数定义与单位，并配套算例、图表，供激光扫描光学系统工程设计参考。

**需要特别说明：**本文所有公式均为忽略高阶损耗、基于理想化假设（平面波、均匀声场、恒温晶体等）的理论模型，给出的是相应物理量的理论理想值；文中在公式适用条件明确受限、或需要工程经验系数修正处（如式(9)饱和功率的  $k_{loss}$  修正、双轴孔径约束的高斯光束安全余量等），已在对应小节单独标注为工程修正值或工程参考范围。除非特别说明，正文算例结果均为理论计算值，实际工程设计中应结合器件实测数据进一步校核。

## 1 声光偏转器基础原理与器件结构

## 1.1 声光偏转基本原理

声光偏转器的核心组成单元包括声光晶体、压电换能器、射频电极、声波吸收体，结构如图 1 所示。

射频信号加载至压电换能器后，压电材料因逆压电效应产生机械振动，并以超声波形式在声光晶体中定向传播；超声波引起晶体周期性弹性形变，基于弹光效应使晶体折射率沿声波传播方向呈周期性调制，等效形成一个可动态调控的相位光栅。

准直入射激光通过该动态光栅后发生声光布拉格衍射：零级光沿入射方向继续传播，一级衍射光按布拉格匹配条件发生偏转；连续改变射频驱动频率即可改变光栅空间周期，实现一级衍射光束角度的连续扫描。

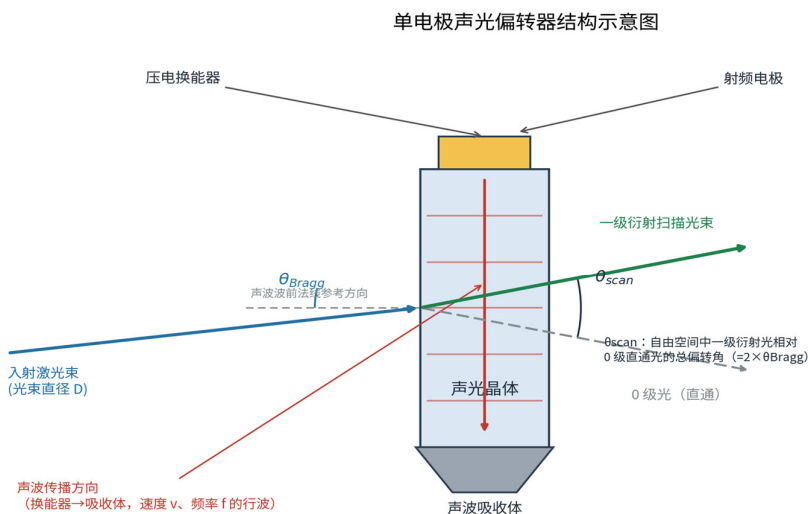


图 1 单电极声光偏转器结构示意图

图注：图中  $\theta_{scan} = 2\theta_{Bragg}$  的几何关系仅适用于器件工作在某一固定射频频率（如中心频率  $f_c$ ）时的静态光路——此时入射角固定为该频率对应的设计布拉格角，一级衍射角恰为其 2 倍。当射频频率在带宽  $\Delta f$  内连续扫描时，入射角保持固定不变，而一级衍射角随频率近似线性变化（ $d\theta/df \approx \lambda/v$ ），此时实际扫描角范围为  $\theta_{scan, range} = \theta(f_{max}) - \theta(f_{min})$ ，而非固定值  $2\theta_{Bragg}$ 。

## 1.2 典型声光介质材料性能参数

声光偏转器的扫描角度、衍射效率和射频驱动功率需求，主要由声光介质的固有物理参数决定，核心指标包括声波传播速度  $v$ 、声光品质因数  $M^2$ 、光学折射率  $n$  及透光工作波段。 $M^2$  是衡量材料声光耦

合能力的核心参数，数值越高，同等射频功率下的衍射效率越高；声速越低的材料，在固定射频带宽下可获得的扫描角越大。不同声光介质的典型性能参数如表 1 所示（表中声速单位 mm/μs，代入公式计算需转换为 SI 单位 m/s，换算关系 1mm/μs=1000m/s）。

**表 1 典型声光材料性能参数**（声速单位 mm/μs，计算必须换算为 m/s，换算系数 1 mm/μs = 1000 m/s）

| 声光材料                      | 声速<br>(mm/μs) | 品质因数<br>$M^2(\times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W})$ | 折射率 n          | 工作波段        |
|---------------------------|---------------|-----------------------------------------------------|----------------|-------------|
| TeO <sub>2</sub> (轴向剪切模式) | 0.617         | 793                                                 | 2.26 @0.633 μm | NUV/VIS/NIR |
| TeO <sub>2</sub> (离轴剪切模式) | 0.650         | 660                                                 | 2.26 @0.633 μm | NUV/VIS/NIR |
| TeO <sub>2</sub> (纵波模式)   | 4.2           | 34.5                                                | 2.26 @0.633 μm | NUV/VIS/NIR |
| PbMoO <sub>4</sub>        | 3.63          | 36.3                                                | 2.38 @0.633 μm | VIS/NIR     |
| Ge                        | 5.5           | 150                                                 | 4 @10.6 μm     | 8~12 μm(IR) |
| SF Glass                  | 3.41          | 8                                                   | 1.8 @0.633 μm  | VIS/NIR     |
| Quartz                    | 5.7           | 2.38                                                | 1.54 @0.633 μm | UV          |
| Fused Silica (纵波模式)       | 5.96          | 1.51                                                | 1.46 @0.633 μm | UV/NIR      |

表 1 注：① 表中 TeO<sub>2</sub> 离轴剪切模式声速为典型材料标称值（0.650 mm/μs），不同厂商、不同切向工艺的器件实测值可能有 ±1%~2% 的偏差，工程计算应以具体器件手册标称值为准。

② 声速单位换算：1 mm/μs = 1000 m/s，代入公式时必须换算为 SI 单位 m/s。

③ Ge（锗）仅适用于 8~12 μm 中远红外波段，可见光、近红外波段完全截止，不可用于 VIS/NIR 扫描系统。

TeO<sub>2</sub> 剪切模式兼具较高的声光品质因数与较低的声速，是可见光、近红外波段高速扫描器件的首选介质：在相同射频带宽下，可获得更大的扫描角度、更高的衍射效率与光斑分辨率，因此广泛应用于各类一维、二维精密声光扫描系统。

## 2 核心性能参数理论与计算模型

### 2.1 布拉格衍射匹配条件与扫描角范围模型

声光偏转器的光束偏转基于声光布拉格衍射效应。在小角度近似（ $\sin\theta \approx \theta$ ，工程上通用的简化条件）下，布拉格角计算公式为式 (1)：

$$\theta_{\text{Bragg}} = \lambda \cdot f_c / (2v) \quad (1)$$

式中： $\theta_{\text{Bragg}}$  为布拉格匹配角，rad； $\lambda$  为激光波长，m； $f_c$  为器件中心射频频率，Hz； $v$  为晶体中超声波传播速度，m/s。

在给定射频频率下只有唯一角度能完全满足布拉格条件；改变射频频率会破坏这一相位匹配，衍射效率随频率偏移而衰减。需要强调的是，式 (1) 给出的  $\theta_{\text{Bragg}}$  是某一固定频率下的静态布拉格角，它决定了入射光应如何对准器件，而非扫描范围。真正描述扫描能力的物理量是扫描角范围——即射频频率从  $f_{\min}$  变化到  $f_{\max}$  时，一级衍射光方向的变化量

1. 单一射频频率  $f$  对应的外部衍射角精确表达式：

$$\theta(f) = \arcsin(\lambda \cdot f / (2v)) \quad (2a)$$

2. 射频带宽区间  $[f_{\min}, f_{\max}]$  对应的最大总扫描角为两端频率衍射角之差：

$$\theta_{\text{scan, exact}} = \arcsin(\lambda \cdot f_{\max} / (2v)) - \arcsin(\lambda \cdot f_{\min} / (2v)) \quad (2a)$$

3. 满足  $\Delta f \ll f_c$  且  $\Delta f$  关于中心频率对称时，可近似简化为：

$$\theta_{\text{scan, exact}} \approx \theta(f_{\max}) - \theta(f_{\min}) \quad (2b)$$

式中： $\theta_{\text{scan}}$  为器件最大单向扫描角，rad； $\Delta f$  为射频工作带宽，Hz。

由式 (2b) 可知：材料确定后（ $v$  固定），增大激光波长或拓宽射频带宽均可提升扫描范围。式 (1)、式 (2) 描述的均为光束在声光晶体中发生偏转、并经出射端面折射后在自由空间中测得的实际偏转角。需要明确区分晶体内部与外部两个角度：

晶体内部布拉格角满足：

$$\sin \theta_{\text{in}} = \lambda \cdot f_c / (2nv) \quad (1a)$$

式中  $n$  为晶体折射率，晶体内波长为  $\lambda/n$ 。

当声光晶体出射光学面严格垂直于一级衍射光束传播方向时，由斯涅尔定律：

$$n \cdot \sin \theta_{\text{in}} = \sin \theta_{\text{out}} \quad (1b)$$

将式 (1a) 代入式 (1b)，折射率  $n$  直接消去，得到外部衍射角简化关系。因此，工程用的外部扫描角公式中不再出现折射率项。但需强调：上述折射率消去成立的必要条件是出射光学面严格垂直于一级衍射光束传播方向。若晶体出射端面存在楔角或一级衍射光以非垂直方向出射，则完整外部衍射角应通过斯涅尔定律完整求解：

$$\sin\theta_{out} = n \cdot \sin(\theta_{in} - \theta_{wedge})$$

其中  $\theta_{wedge}$  为端面法线与入射光方向的夹角。工程中应根据实际带宽与中心频率比值判断是否需要使用差值精确形式，参见附录 B 表 7.1。

## 2.2 扫描角计算实例

以 G&H AODF 4055-4 声光偏转器为例（该型号为中心频率 52.5 MHz、带宽 35 MHz 的子型号），器件采用  $\text{TeO}_2$  离轴剪切晶体，根据该型号技术手册，标称声速  $v = 0.656 \text{ mm}/\mu\text{s} = 656 \text{ m/s}$ （与表 1 中同类材料的典型值  $0.650 \text{ mm}/\mu\text{s}$  略有差异，系器件具体切向与工艺批次不同所致，本例以手册标称值为准）；工作激光波长  $\lambda = 830 \text{ nm} = 830 \times 10^{-9} \text{ m}$ ；有效射频带宽  $\Delta f = 35 \text{ MHz} = 35 \times 10^6 \text{ Hz}$ 。

将参数代入式(2)：

$$\theta_{scan} = (830 \times 10^{-9} \times 35 \times 10^6) / 656 \approx 0.0443 \text{ rad} = 44.3 \text{ mrad}$$

按  $1 \text{ rad} = 57.3^\circ$  换算：

$$\theta_{scan} \approx 2.54^\circ$$

即：G&H AODF 4055-4 声光偏转器在 830 nm 工作波长、35 MHz 有效射频带宽条件下，理论最大扫描角约为 44.3 mrad（约  $2.54^\circ$ ）。声光偏转器的扫描角度普遍小于机械振镜，但调谐速度具备数量级优势，能够以微秒级响应实现高速光束定位。

**需要说明：**本算例中的波长、有效射频带宽为特定工作条件下的取值，用于演示式 (2b) 的计算方法；同一型号器件在不同工作波长或有效射频带宽下，实际可用扫描角会随之变化，选型时应以具体工作条件下的计算结果为准。本算例中  $\Delta f/f_c = 35/52.5 \approx 0.667$ ，属于中等带宽。

采用精确差值形式式(2a)复核结果为  $\theta_{scan, exact} \approx 44.3 \text{ mrad}$ ，与式(2b)近似结果差异  $< 0.1\%$ ，近似误差可忽略。本例  $f_{max} = 52.5 + 17.5 = 70 \text{ MHz}$ ，代入式(2)计算最大单频衍射角  $\theta(f_{max}) \approx 0.0495 \text{ rad} < 0.1 \text{ rad}$ ，满足小角度近似适用边界，因此近似误差可忽略。一般工程判断准则为：当最大单一频率衍射角  $\theta(f_{max}) < 0.1 \text{ rad}$  (约  $5.7^\circ$ ) 时，式(2b)引入的误差  $< 0.2\%$ ，可安全使用。当  $\theta(f_{max}) > 0.2 \text{ rad}$  时，建议改用式(2a)精确差值形式。

## 2.3 声光访问时间与动态响应模型

超声波完整穿过激光有效通光孔径所需的时间称为访问时间 (Access Time, 又称声波填充时间)  $\tau$ ，表征器件建立完整声光光栅所需的最短时间，计算公式为式(3)：

$$\tau = D / v \quad (3)$$

式中： $D$  为激光沿声波传播方向的有效光斑孔径，m； $v$  为声速，m/s。

光斑孔径越小、材料声速越高，访问时间越短，光束切换的响应速度越快；孔径较大的器件可承载更高的激光功率，但会牺牲动态响应速度，二者需要在设计中权衡。

## 2.4 光斑分辨率理论模型

在均匀平面波照明光学孔径的条件下，声光偏转器的固有理论可分辨光斑数量由访问时间与射频带宽的乘积决定，见式(4)：

$$N_{ideal} = \tau \cdot \Delta f \quad (4)$$

$N_{ideal}$  为不考虑扫描速度限制时的理想最大分辨点数：访问时间越长、射频带宽越宽，系统的理论空间分辨能力越强。

## 2.5 固有分辨率算例

已知  $\tau = 4.5 \mu\text{s} = 4.5 \times 10^{-6} \text{ s}$ ， $\Delta f = 40 \text{ MHz} = 40 \times 10^6 \text{ Hz}$ ，代入式(4)：

$$N_{ideal} = 4.5 \times 10^{-6} \times 40 \times 10^6 = 180$$



即 G&H AODF 4055 声光偏转器的理论固有分辨率约为 180 个扫描点。该结果代表理想条件下的最大空间分辨能力，实际系统还会受到扫描方式、光学设计、射频响应及声波传播过程的影响，连续高速扫描时有效分辨率会进一步下降。

在连续扫描模式下，如果扫描周期接近声光器件的访问时间，声光孔径就无法完全建立新的声波状态，导致实际有效分辨率降低。设完整扫描周期（扫描段+回扫段）为  $t$ ，当  $t$  与  $\tau$  量级接近时，超声波无法充满整个光学孔径，晶体内部新旧频率声波共存，衍射光斑模糊，有效分辨点数下降。计入填充时间损耗后的修正公式为式(5)：

$$N_{effective} = N_{ideal} \cdot (t - \tau) / t = \tau \cdot \Delta f \cdot (t - \tau) / t \quad (5)$$

式(5)的适用条件需要明确：① 适用于单向连续线性扫描，即一个完整周期  $t$  内，仅正向扫描段产生有效衍射光斑，回扫段射频关闭或频率快速跳变回起始点（回扫时间不计入有效扫描时间）。此时有效扫描时间占比为  $(t - \tau)/t$ 。② 若采用双向往复扫描（正扫和回扫均输出有效光斑），且正扫与回扫行程对称，则有效分辨率模型修正为：

$$N_{effective,bi} = 2 \times N_{ideal} \cdot (t/2 - \tau) / (t/2) \quad (5a)$$

该式的物理含义是：每个半周期（ $t/2$ ）内，有效扫描时间同样受填充时间  $\tau$  损耗，但正扫和回扫各贡献  $N_{ideal} \times (t/2 - \tau)/(t/2)$  个分辨点，合计为式(5a)。工程上需注意正扫/回扫衔接处的光斑位置校准和像差补偿。③ 式(5)和(5a)均要求  $t > 2\tau$ （单向）或  $t/2 > \tau$ （双向）；若扫描周期  $t \leq 2\tau$ ，传统连续扫描模式已失效，此时应改用第 4.2 节的啁啾偏转器模式，其分辨率由式(7)给出，不受扫描周期  $t$  的约束。

④ 实际工程中，因射频开关延迟、声波过渡区等因素，建议在式(5)或(5a)计算结果基础上乘以 0.7~0.9 的经验折减系数，具体数值需通过实测标定。

**补充说明：**在实际双向往复扫描中，若回扫阶段也持续扫频，则正扫与回扫各产生一条扫描线，但受限于声波填充时间，正扫末段与回扫初段均存在分辨率劣化区域，系统有效分辨率通常低于式(5)单向往复模型的预测值。工程上保守设计时，建议在式(5)基础上额外乘以 0.7~0.9 的经验折减系数，具体数值需通过实测标定。



该式在  $t > \tau$  的适用范围内恒满足  $N_{\text{effective}} < N_{\text{ideal}}$ ：扫描速度越快、 $t$  越接近  $\tau$ ，分辨率衰减越严重。

取扫描周期约为访问时间 2 倍的典型工程场景，即  $t = 9 \mu\text{s}$ ， $\tau = 4.5 \mu\text{s}$ ， $N_{\text{ideal}} = 180$ ，代入式(5)：

$$N_{\text{effective}} = 180 \times (9 - 4.5) / 9 = 90。$$

在扫描周期约为访问时间 2 倍的连续扫描条件下，G&H AODF 4055 的有效分辨点数仅为理想值的 50%，这一衰减是传统 AOD 光栅扫描的核心工程缺陷：随着扫描速度提高，扫描周期逐渐接近访问时间，系统的空间分辨能力会相应受限。

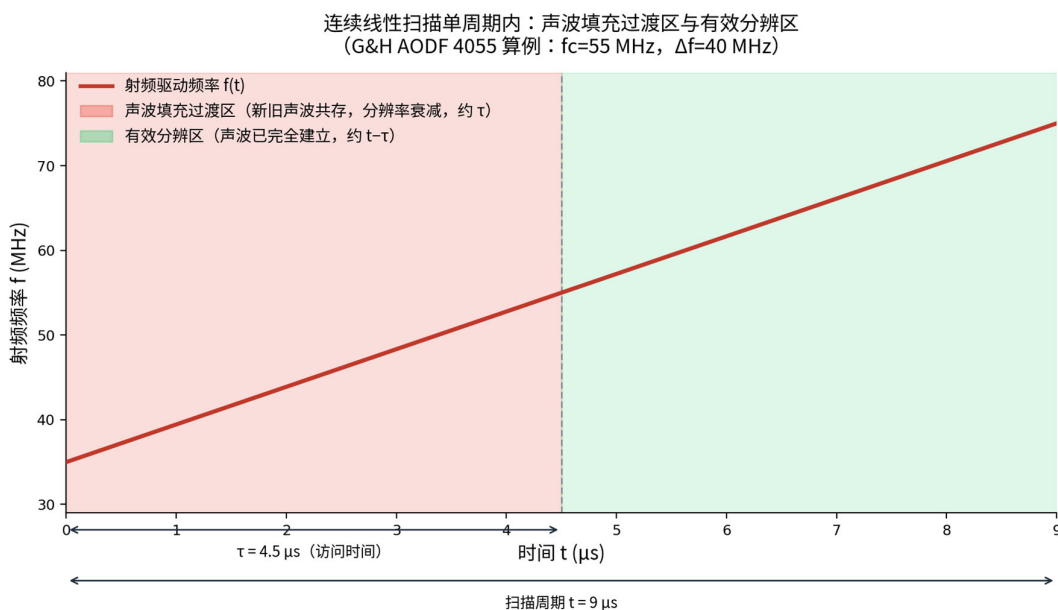


图 2 连续扫描模式下频率-时间关系与有效分辨率示意图

### 3 传统声光扫描模式性能分析

声光偏转器按控制方式 and 应用需求，通常分为矢量随机扫描模式和连续线性扫描模式两类。两种模式均通过射频频率变化控制一级衍射光方向，但在扫描速度、定位方式、分辨率及系统结构上存在明显差异。

#### 3.1 矢量随机扫描模式

声光偏转器工作于矢量随机扫描模式时，每个目标扫描坐标对应一组固定单频射频信号，系统通过频率合成器切换射频频率，实现光斑在二维平面任意坐标间的无轨迹跳转。光束定位精度由射频源频率稳定度、相位噪声及器件频响特性共同决定。

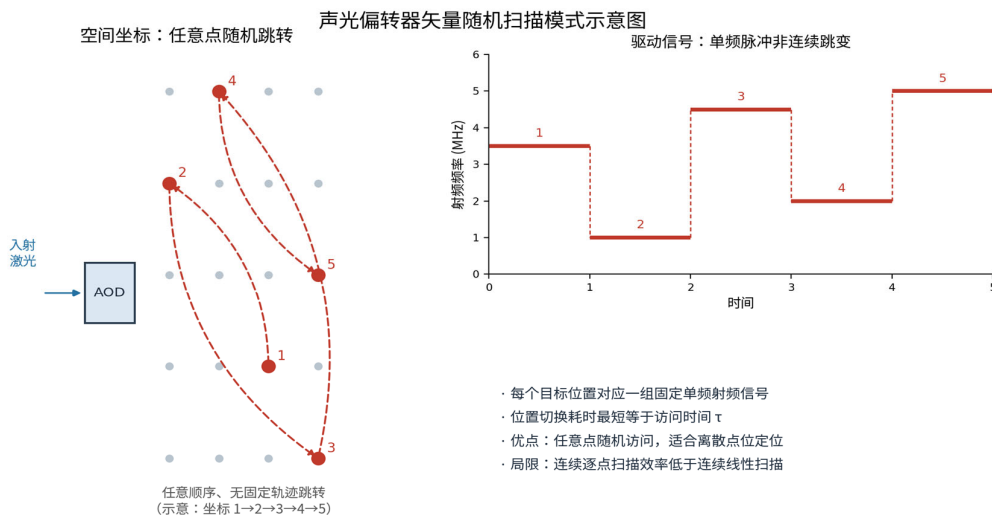


图 3 声光偏转器矢量随机扫描模式示意图

该模式下光束位置切换的最短耗时等于访问时间  $\tau$ ，任意点随机访问能力优异，适合光镊、单点激光检测等离散点位定位场景；缺陷是连续逐点扫描效率较低，高速光栅扫描场景下吞吐量受限。矢量随机扫描与连续线性扫描的选型边界并非固定点数阈值，而应比较两种模式完成同一任务的总耗时：矢量模式访问  $N$  个离散点的总耗时约为  $N \times \tau$ （各点独立寻址，与点位空间分布无关），连续模式则取决于总扫描行程与线性扫描速度；当目标点位数量较多、且点位近似排列在可光栅化的规则路径上时（如 PCB 微孔阵列加工），连续扫描通常总耗时更短、效率更高，而目标点位稀疏、离散、无规律分布时（如共聚焦显微单点探测），矢量随机扫描的优势更明显。具体选型应结合点位数量、空间分布及单点访问时间  $\tau$  逐案核算，而非套用统一数量阈值。

### 3.2 连续线性扫描模式

连续线性扫描采用线性连续扫频射频信号驱动 AOD，使光束匀速单向移动，通常搭配独立声光调制

器 (AOM) 完成激光光强控制：常规光路设计中，AOD 专用于实现光束角度扫描，独立 AOM 负责高速光强调制，二者功能定位不同；但窄带宽、小扫描角的声光器件也可在有限范围内同时承担偏转与调制功能，二者并非绝对隔离，器件同时复用偏转与调制会造成射频信号耦合串扰，衍射效率动态波动，仅适用于低速、低对比度简易检测光路，高精度扫描系统必须将 AOM、AOD 光路分离独立使用，具体分工应根据系统对扫描范围与调制速度的要求确定。

器件同时复用偏转与调制会造成射频信号耦合串扰，衍射效率动态波动，仅适用于低速、低对比度简易检测光路，高精度扫描系统必须将 AOM、AOD 光路分离独立使用

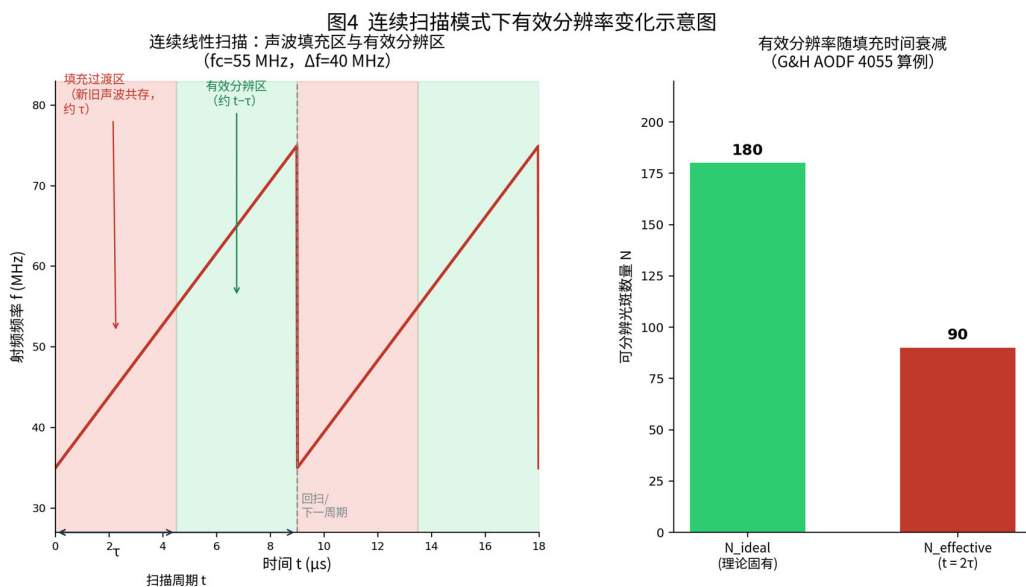


图 4 连续扫描模式下有效分辨率变化示意图

图注：本图结果仅适用于单向连续线性扫描，完整扫描周期  $t=2\tau$ ，双向往复扫描不可直接套用数值。

该模式单向连续扫描速度远高于矢量模式，适用于激光光栅刻蚀、大面积成像扫描；其主要约束是高速扫描时声波填充不足引发的分辨率衰减，同时伴随啁啾动态聚焦像差。

### 3.3 高速扫描啁啾效应与补偿方法

本节讨论的啁啾效应特指连续射频线性扫频驱动引发的空间声光啁啾——即晶体内部沿声波传播方向出现的瞬时频率线性梯度，导致等效柱面聚焦像差；这与超声脉冲自身在时间维度上的调制（时域

啁啾) 是完全不同的物理机制, 后者不在本文讨论范围内。

直观理解: 这就好比在某一瞬间“冻结”了晶体内的声波分布——靠近换能器一端记录的是刚发射的当前频率, 而远离换能器一端记录的是更早时刻发射的频率。由于发射频率一直在变化, 晶体内部沿声波传播方向便形成了一个连续变化的“频率梯度”。这个梯度使得激光束横截面上不同位置“看到”的等效光栅周期不同, 其效果等价于一个柱面透镜——一侧光束会聚、另一侧发散, 从而产生聚焦或散焦像差, 即本研究所说的啁啾动态聚焦像差。

由此产生的效果相当于声光偏转器叠加了一个柱面透镜, 其等效焦距为式 (6):

$$F_L = v^2 / (\lambda \cdot (df/dt)) = v^2 \cdot t_{\text{sweep}} / (\lambda \cdot \Delta f) \quad (6)$$

式中:  $F_L$  为等效动态焦距, m;  $df/dt$  为射频频率扫描速率, Hz/s。  $t_{\text{sweep}}$  纯线性扫频持续时长 (仅射频频率从起始值扫描至终止值的时间, 不含回扫间隔), 与完整扫描周期  $t$  (扫频 + 回扫总时长) 定义不同, 在单向无回扫连续扫描场景中  $t_{\text{sweep}} = t$ ; 若存在回扫阶段, 则  $t_{\text{sweep}} < t$ 。  $F_L$  的正负号取决于衍射级次与入射几何配置。本文以+1 级衍射、升频扫描 ( $df/dt > 0$ ) 为例, 该配置下等效为会聚柱面透镜 ( $F_L > 0$ )。若采用-1 级衍射或降频扫描, 符号将反转, 补偿透镜光焦度需同步反向。

式(6)的适用条件:

1. 仅适用于+1 级布拉格衍射、小角度近似光路; 高衍射级次或大角度下, 空间频率梯度呈现非线性, 式(6)失效;
2. 模型假设声波振幅沿传播方向均匀、晶体内部无声波衰减。对于大孔径  $\text{TeO}_2$  器件, 声波沿传播方向存在显著衰减 ( $\sim 17.9 \text{ dB}/(\mu\text{s} \cdot \text{GHz}^2)$ ), 光栅调制深度不均匀, 等效焦距沿孔径渐变, 单一  $F_L$  无法完全描述像差;
3. 若入射光本身为高斯会聚/发散光束, 还需叠加输入光束自身的波前曲率一并考虑, 不能直接套用本式。

大孔径高衰减器件的啁啾像差补偿, 通常需搭配孔径光阑优化有效光斑区域, 或采用分段式补偿透镜

阵列。

在单向无回扫扫描光路中，可在 AOD 出射端增设一片反向光焦度的柱面补偿透镜，取补偿透镜焦距  $f_{\text{comp}} = -F_L$ ，即可基本抵消该动态聚焦像差；补偿透镜的母线方向须与声光晶体的声波传播方向严格平行，否则无法有效抵消该柱面像差。

以 G&H AODF 4055（标准型号， $\Delta f = 40 \text{ MHz}$ ）为例，本算例为单向连续扫描无回扫场景，满足  $t_{\text{sweep}} = t$ ；已知射频扫描带宽  $\Delta f = 40 \text{ MHz}$ （升频扫描， $df/dt > 0$ ）、扫描周期  $t = 9 \text{ } \mu\text{s}$ 、声速  $v = 0.656 \text{ mm}/\mu\text{s} = 656 \text{ m/s}$ 、激光波长  $\lambda = 830 \text{ nm}$ ，分步计算如下：

$$df/dt = \Delta f / t = (40 \times 10^6) / (9 \times 10^{-6}) \approx 4.444 \times 10^{12} \text{ Hz/s}$$

$$F_L = v^2 / (\lambda \cdot (df/dt)) = 656^2 / (830 \times 10^{-9} \times 4.444 \times 10^{12}) \approx 0.1167 \text{ m} \approx 117 \text{ mm}$$

工程上可配套约 117 mm 焦距、母线与声波传播方向平行的反向（发散）柱面透镜，取  $f_{\text{comp}} \approx -117 \text{ mm}$ ，完成像差补偿。

### 3.4 传统扫描模式技术特点总结

表 2 传统扫描模式技术特点对比

| 扫描模式    | 优点           | 局限             |
|---------|--------------|----------------|
| 矢量随机扫描  | 任意位置访问，定位灵活  | 受访问时间限制，扫描速度较低 |
| 连续线性扫描  | 扫描速度高，适合光栅扫描 | 存在填充时间和啁啾效应限制  |
| 单电极 AOD | 结构简单，成本较低    | 带宽和扫描角有限       |
| 高速连续扫描  | 可实现高速加工      | 需要动态聚焦补偿       |

## 4 高性能声光扫描优化技术

传统单电极声光偏转器（AOD）虽然能实现高速光束扫描，但性能受限于射频带宽、布拉格匹配范围及声波传播时间。为进一步提高扫描角度、分辨率和扫描速度，工程上发展了声束布拉格跟踪转向、啁啾偏转器与双轴正交扫描三类技术，它们针对的物理限制各不相同：

- 声束转向技术：解决宽频扫描范围内布拉格匹配效率下降的问题，主要拓宽射频带宽，适用于需要大扫描角或宽调谐范围的应用；
- 啁啾偏转器技术：解决传统 AOD 填充时间导致的高速扫描分辨率下降问题，主要提升扫描速度与分辨率，适用于超高速光栅扫描；
- 双轴 XY 扫描技术：解决二维光束定位需求，是前两类技术向二维空间的扩展。

三类技术可独立选用，也可组合使用（例如宽带宽+高速扫描的二维系统）。

## 4.1 声束布拉格跟踪转向技术

### 4.1.1 单电极 AOD 的带宽限制

声光偏转器一级衍射效率最大化的条件是入射激光满足式(1)所示的布拉格匹配条件，但该条件仅在中心频率附近能够实现理想的相位匹配。当射频频率围绕中心频率  $f_c$  扫描时，声波频率变化会使最佳布拉格角随之偏移，而入射激光的入射角度通常保持固定，二者逐渐产生角度失配，衍射效率随频率偏移增大而降低。

传统单电极 AOD 的换能器只能激发固定传播方向的超声波，无法补偿不同频率下的声波传播角变化，因此仅能在中心频率处获得最佳布拉格匹配，射频带宽的扩展能力受到布拉格匹配窗口的根本限制，难以同时兼顾大频率调谐范围与高衍射效率。

### 4.1.2 多电极相位调控原理

为突破布拉格匹配范围对射频带宽的限制，可主动调控声波传播方向，使声束在宽频率调谐范围内始终保持最佳布拉格匹配，该方法称为声束转向技术。其核心结构是在声光晶体换能器表面布置多电极阵列，向不同电极施加同频率、不同相位延迟的射频信号，通过相位控制改变声波的等效传播方向：驱动频率变化时，系统同步调整声束角度使其动态跟随最佳布拉格角，从而在较宽射频范围内保持稳定的相位匹配。

与单电极换能器相比，阵列式分段电极结构通过多通道相位调控实现声束主动偏转，可有效补偿频率扫描过程中的角度失配，提高宽带扫描条件下的一级衍射效率；电极间相位延迟既可采用固定延迟网络实现，也可基于多通道数字频率合成器（DDS）实现动态相位控制，以满足高精度、高稳定性的声束调节需求。

图5 多电极声束转向结构示意图

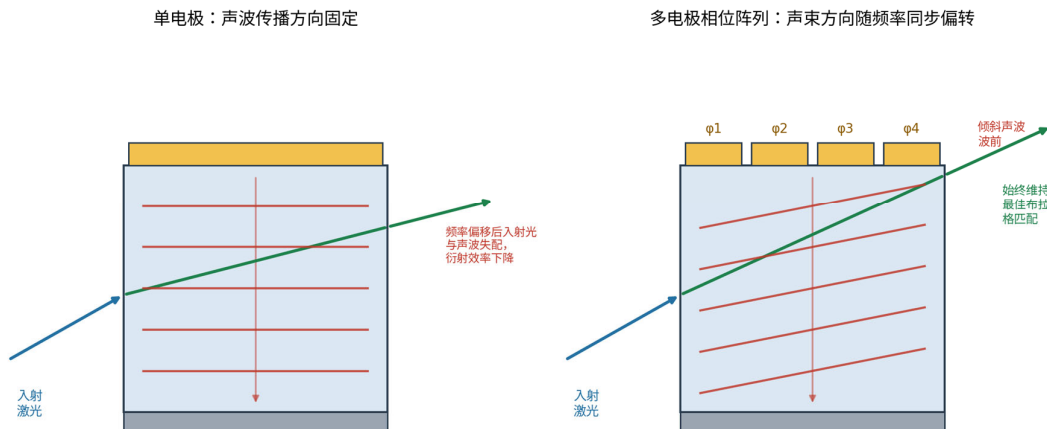


图 5 多电极声束转向结构示意图

声束转向技术已在商用器件中得到应用，例如 G&H AODF 4055、AODF 4060、AODF 4070 等高带宽偏转器均采用了声束转向电极结构，不同型号的射频带宽、通光孔径等具体参数存在差异，用于满足不同扫描范围与响应速度需求，选型时应以厂商具体型号的技术手册参数为准。

声束转向技术在拓宽带宽的同时也存在工程局限。多电极阵列的相位控制精度（例如，DDS 的相位分辨率为  $2\pi/2^m$ ）会引入离散误差，导致扫描光斑的位置抖动。此外，阵列结构固有的周期性会产生寄生声波旁瓣，在设计良好的系统中，这些旁瓣的衍射效率通常被抑制在 -25dB 以下，但对于高对比度成像应用，仍需在光路中增设空间滤波器进行消除。此外，声束转向技术需要多通道、相位精确可编程的射频驱动系统（如多通道 DDS），其硬件成本、功耗和同步控制复杂度相较于单电极 AOD 有成倍增加，工程上需在性能提升与系统代价之间进行权衡。

#### 4.1.3 声束转向技术特点



**表 3 单电极 AOD 与声束转向 AOD 对比**

| 项目      | 单电极 AOD    | 声束转向 AOD  |
|---------|------------|-----------|
| 有效射频带宽  | 窄，受布拉格条件限制 | 大幅拓宽      |
| 最大扫描角   | 较小         | 显著提升      |
| 宽频衍射效率  | 频率偏移后快速衰减  | 全带宽保持稳定高值 |
| 器件结构复杂度 | 简单、低成本     | 电极阵列结构复杂  |

## 4.2 啁啾偏转器近零回扫扫描技术

### 4.2.1 技术背景

传统连续扫描系统完成单向扫描后通常需要预留回扫时间返回起始位置，回扫阶段不产生有效加工或检测信号，构成系统的非工作时间，限制整体吞吐效率；同时随着扫描周期不断缩短，声光器件的响应特性与空间分辨能力之间的矛盾也会进一步造成有效分辨率下降。

传统 AOD 高速扫描的主要瓶颈来自声光填充时间：声波在晶体中传播需要一定时间才能覆盖完整光斑区域，扫描频率越高，填充时间在单次扫描周期中的占比越大，可有效利用的扫描时间随之减少，进而限制扫描速度与分辨率。

啁啾偏转器利用空间啁啾效应产生的动态等效透镜作用，通过声波频率的空间梯度实现光束的同步跟踪扫描，从而突破填充时间对高速单向扫描的约束，实现接近零回扫时间的高效率扫描，提升系统吞吐能力。

### 4.2.2 啁啾偏转器工作原理

驱动信号采用短时长的线性扫频射频脉冲，脉冲持续时间小于声波穿过光学孔径的访问时间；射频脉冲沿晶体声波传播方向持续行进，准直激光束同步跟踪脉冲声波，每一组线性扫频脉冲对应一段无间断的线性扫描光斑。若适度牺牲部分激光能量，还可采用全孔径照明模式，使光学孔径完全被激光填充，脉冲切换在纳秒级完成，基本消除传统回扫耗时。

图6 啁啾偏转器扫描模式示意图

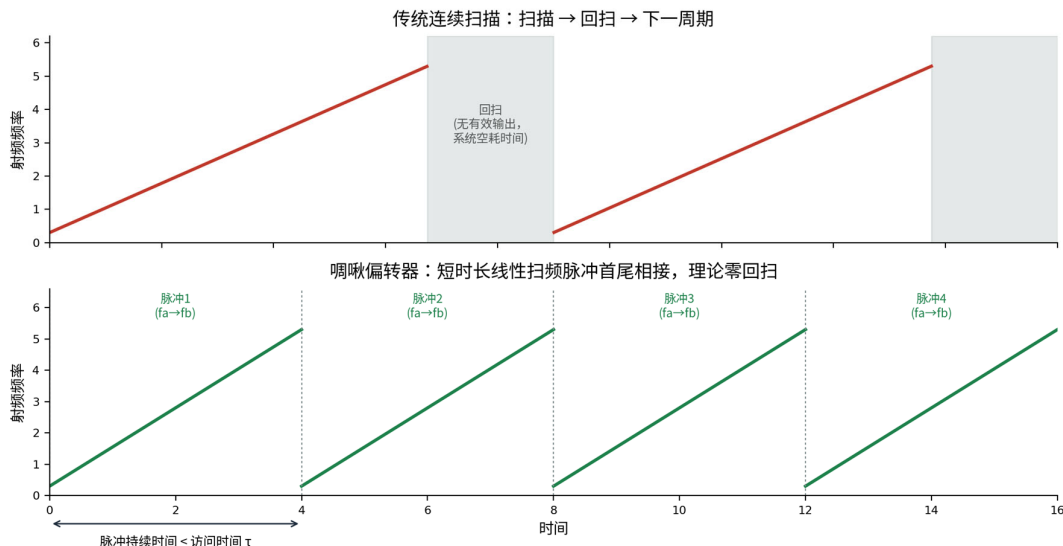


图 6 啁啾偏转器扫描模式示意图

图注：本图为传统连续扫描与啁啾偏转器的扫描时序对比图（射频频率-时间关系），并非光路示意图。上图为传统连续线性扫描：正扫（红色斜线）后需预留回扫时间（灰色区域，无有效输出，属系统空耗时间）。下图为啁啾偏转器扫描：多组短时长线性扫频脉冲（脉冲1~4，起止频率 $f_a \rightarrow f_b$ ）首尾相接，脉冲持续时间小于访问时间 $\tau$ ，理论上不存在回扫死区，实现接近零回扫的连续扫描。该时序对应的物理实现方式是：与传统全孔径照明不同，啁啾偏转器采用光斑尺寸远小于声波孔径的小光斑激光束，通过同步偏转机构（如辅助振镜或电光偏转器）同步跟踪移动的声波脉冲位置（即正文所述“光束跟踪”原理），从而在脉冲持续期间内实现连续偏转输出。实际 DDS 频率切换存在数十 ns 建立延迟，系统吞吐量会有小幅下降，时序设计需预留切换裕量。

#### 4.2.3 啁啾偏转器分辨率模型

啁啾偏转器的分辨点数仅由声波传播时间与射频脉冲总带宽决定，式 (7) 给出的分辨率  $N$  代表一个啁啾脉冲内可分辨的光斑数量，它突破了传统连续扫描中扫描周期  $t$  对分辨率的限制。仅当单脉冲完整覆盖全部扫描行程时，脉冲重复周期约束成立；仅当单个啁啾脉冲覆盖全部扫描行程时，脉冲重复周期必须大于  $\tau$ ，系统最大扫描线速率上限  $1/\tau$ ；分段多脉冲扫描不受该约束。为了确保两个相邻扫描脉冲不产生串扰，脉冲的重复周期仍需大于声波填充时间  $\tau$ ，因此系统的最大扫描线速率仍受限于  $1/\tau$ ：

$$N = \tau \cdot (f_b - f_a) \quad (7)$$

$f_a$ 、 $f_b$  分别为啁啾脉冲的起止射频频率， $\Delta f_{\text{chirp}} = f_b - f_a$  为脉冲带宽。由于脉冲时长小于访问时间  $\tau$ ，脉

冲声波在其持续期间内始终未充满整个光学孔径，晶体中不存在新旧声波共存的过渡区域，因此不再出现连续扫描模式下式(5)中的 $(t-\tau)/t$ 衰减项，分辨点数仅由脉冲带宽与声波传播时间的乘积决定，不受扫描周期 $t$ 的约束。

**设计示例：**某高速光栅扫描系统要求单次扫描分辨点数 $N = 500$ ，采用啁啾偏转器方案，选用的 $TeO_2$ 器件声波传播时间 $\tau = 5 \mu s$ （对应光斑孔径约 $3.3 \text{ mm}$ ，工程上较为典型），所需最小啁啾带宽为：

$$\Delta f_{chirp} = N / \tau = 500 / (5 \times 10^{-6}) = 100 \text{ MHz}$$

即需要 $100 \text{ MHz}$ 啁啾带宽实现 $500$ 点分辨率。若系统可接受更大孔径器件（例如 $\tau = 10 \mu s$ ），则所需带宽降低至 $50 \text{ MHz}$ ，但扫描速度相应下降。该权衡关系与式(3)访问时间的定义一致，设计时应结合系统对速度与分辨率的需求综合选型。

## 4.3 正交双轴 XY 二维扫描系统

### 4.3.1 双轴扫描结构

两台一维声光偏转器沿相互正交的方向串联排布，前级 X 轴 AOD 完成水平方向偏转，后级 Y 轴 AOD 完成垂直方向偏转，实现二维平面光束定位，代表商用型号为 G&H AODF 4085 系列集成双轴偏转器。

图7 双轴 XY 声光扫描结构示意图

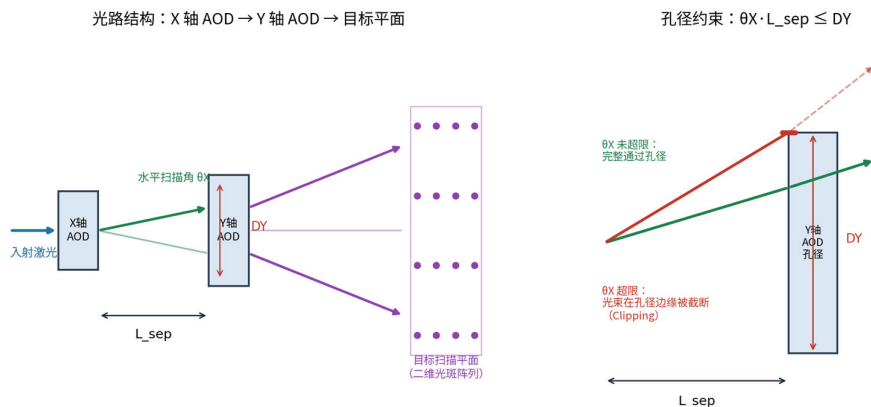


图 7 双轴 XY 声光扫描结构示意图

图注：左图为双轴 XY 声光扫描光路结构示意图（X 轴 AOD→Y 轴 AOD→目标扫描平面）， $L_{sep}$  为两级器件轴向安装间距， $D_Y$  为 Y 轴 AOD 有效通光孔径高度。右图为孔径截断约束示意：绿色光线对应  $\theta_X$  未超限、完整通过 Y 轴孔径的情形，红色光线（含虚线延伸部分）对应  $\theta_X$  超限、光束在 Y 轴孔径边缘被截断的情形。需要说明：图中所示“ $\theta_X \cdot L_{sep} \leq D_Y$ ”为便于示意的简化关系，实际工程设计应以正式式(8a)~(8c)为准——几何中心约束为  $\theta_X \times L_{sep} \leq D_Y/2$ （式 8a），计入高斯光束发散及安全余量后应按式(8c)的保守判据核算。

### 4.3.2 双轴扫描限制因素

X 轴偏转后的光束需要入射到 Y 轴器件的通光孔径内，因此 X 轴的最大扫描角度受两级器件安装间距、后级 Y 轴孔径尺寸及光束发散程度的共同约束。两级 AOD 的轴向安装间距统一记为  $L_{sep}$ ：

在小角度近似（ $\sin\theta_X \approx \theta_X \approx \tan\theta_X$ , rad）且光束平行入射的条件下，光束几何中心不被截断需满足约束：

$$\theta_X \times L_{sep} \leq D_Y / 2 \quad (8a)$$

但实际激光多为高斯光束，还需考虑光束在两级 AOD 之间的自由空间发散。设光束在 X 轴 AOD 出射处的半宽为  $w_0$ ，传播距离  $L_{sep}$  后的半宽为  $w(L_{sep})$ ，则更完整的截断约束为：

$$\tan(\theta_X) \times L_{sep} + w(L_{sep}) \leq D_Y / 2 \quad (8b)$$

工程上为简化设计，常用保守判据：

$$\tan(\theta_X) \times L_{sep} \leq D_Y / (1.5 \sim 2) \quad (8c)$$

即按有效光斑直径的 1.5~2 倍预留安全余量，平顶光束可放宽至约 1.1 倍。若扫描角超出上述约束，偏转光束会被 Y 轴晶体边框截断，造成光束能量损耗与光斑畸变；二维系统设计时需要在器件间距、孔径、光束直径和扫描范围四者之间取得平衡。

### 4.3.3 双轴扫描工程设计意义

G&H AODF 4085 系列双轴声光偏转器通过紧凑化设计和高性能声光材料，可实现高速二维扫描，适用于精密激光加工、光刻、检测及高速光束定位系统。双轴 AOD 系统能够实现高速二维扫描、任意位置访问及微秒级响应，但设计时须优化 AOD 间距、光束直径、扫描角度及后级孔径，否则会降低有效扫描范围。

## 5 声光器件材料与衍射效率设计

### 5.1 饱和射频驱动功率模型

在理想布拉格衍射条件下，实现最大衍射效率所需的饱和射频功率由激光波长、电极结构与材料品质因数共同决定，见式 (9)：

$$P_{sat} = \lambda^2 \cdot H / (2 \cdot L_{int} \cdot M^2) \quad (9)$$

式中： $P_{sat}$  为饱和射频驱动功率，W； $H$  为垂直于声波传播方向的换能器电极高度（即光束孔径方向的电极尺寸），m； $L_{int}$  为沿声波传播方向的声光相互作用长度（换能器沿声传播方向的尺寸，与式 (8) 中双轴间距  $L_{sep}$  含义不同），m； $H$  和  $L_{int}$  构成了声光相互作用的有效面积。饱和功率反比于这个作用面积与品质因数的乘积。 $M^2$  为材料声光品质因数。器件电极尺寸与材料确定后，饱和功率与激光波长的平方成正比，因此红外长波长激光系统所需的射频驱动功率远高于可见光系统。

式 (9) 是忽略声波传播衰减、电极阻抗失配及晶体光学吸收的一维理想模型，仅给出饱和功率的理论下限。工程实际中，引入综合损耗系数对理论值进行修正：

$$P_{sat,real} = \lambda^2 \cdot H / (2 \cdot L_{int} \cdot M^2 \cdot k_{loss}) \quad (9a)$$

其中  $k_{loss}$  由三项独立损耗因子相乘构成：

$$k_{loss} = k_{atten} \cdot k_{imp} \cdot k_{abs} \quad (9b)$$

式中： $k_{atten}$  为声波在晶体内传播衰减损耗系数（与声波频率平方成正比， $\text{TeO}_2$  典型值 0.7~0.9，取决于器件长度）； $k_{imp}$  为射频电极与换能器阻抗匹配效率系数（0.8~0.95）； $k_{abs}$  为晶体对激光波长的光学吸收损耗系数（0.85~0.98）。

标定方法： $k_{loss} = P_{sat,实测} / P_{sat,理论}$ 。新器件选型时，可参考厂商手册给出的典型饱和功率值反推  $k_{loss}$ ；无实测条件时，工程上取  $k_{loss} = 0.4\sim 0.8$  作为保守设计范围。

**重要警示：**式(9)的  $P_{sat} \propto \lambda^2$  关系仅在器件结构参数（电极高度  $H$ 、声光互作用长度  $L_{int}$ ）完全相同时才成立。不同型号的 AOD，其孔径尺寸、电极设计、声光互作用长度差异巨大，这些几何因素对饱

和功率的影响远大于波长因素。因此，实际器件的  $P_{sat}$  应以厂商技术手册给出的实测值为准，不可仅凭波长和品质因数在不同型号之间跨器件推算。式(9)的正确用途是：在同一器件上评估不同工作波长下的  $P_{sat}$  变化趋势。在器件选型阶段，应直接查阅手册中的  $P_{sat}$  典型值。

## 5.2 实际射频功率下的相对衍射效率

当实际输入射频功率  $P < P_{sat}$  时，一级衍射相对效率满足正弦平方关系，见式(10)：

$$\eta_r = \sin^2[(\pi/2) \cdot \sqrt{P/P_{sat}}] \quad (10)$$

工程应用中可通过实时编程调制射频功率幅值，补偿宽频扫描下晶体声波衰减带来的光强不均匀问题，实现扫描全场的输出光强平坦化。

TeO<sub>2</sub>剪切模式 AOD 偏振灵敏度修正：设入射激光偏振方向与器件设计最优偏振轴之间的夹角为  $\alpha$  (rad)，则实际衍射效率为：

$$\eta_{real} = \eta_r \cdot \cos^2\alpha \quad (10a)$$

式中  $\eta_r$  为式(10)给出的相对衍射效率。

工程示例：当入射偏振方向偏离器件最优轴 45°时， $\cos^2 45^\circ = 0.5$ ，衍射效率仅为理想值的 50%。因此，高精度系统中必须在 AOD 前级配置偏振片或半波片，精确对准入射偏振方向；对于线偏振激光器，还需确认激光器输出偏振方向是否与器件设计轴一致。

上述模型适用于 TeO<sub>2</sub> 剪切模式 AOD（主流可见光/近红外器件）；纵波模式或各向同性声光介质（如石英、熔石英）的偏振灵敏度较低，但为通用设计起见，仍建议按器件手册要求的偏振方向入射线偏振光。

## 5.3 声波衰减与大孔径补偿

对于大孔径声光器件，还需考虑声波在晶体中的传播损耗。以 TeO<sub>2</sub> 为例，其超声波衰减系数  $\alpha_{ac}$ （区别于 5.2 节偏振失配角  $\alpha$ ）通常在 1.5~2.5 dB/( $\mu\text{s} \cdot \text{GHz}^2$ )量级（具体值取决于晶体切向和频率。工程应

用时，应以器件手册提供的实测曲线为准）。这导致声波沿传播方向能量持续损耗，使远离换能器一端的衍射效率下降，形成孔径内的效率梯度。工程上常用的补偿方案包括：

- ①对入射激光进行空间光强加权——靠近声波吸收端提高入射光功率密度，靠近换能器端降低光强，以抵消声波衰减带来的光斑效率梯度；
- ②分段功率射频驱动——将换能器电极沿声波传播方向分段，各段施加梯度递增的射频驱动功率，直接在声源侧补偿沿途衰减；
- ③晶体切向与工艺优化——选用低声波衰减切向的晶体、优化晶体加工与声学匹配质量，从材料层面降低本征衰减。

**表 4 声波衰减补偿方案对比**

| 补偿方案     | 实现难度        | 附加成本  | 补偿均匀性      | 适用场景       |
|----------|-------------|-------|------------|------------|
| 入射光强空间加权 | 低，仅需光学整形元件  | 中     | 一般，仅全局补偿   | 中小孔径、低精度检测 |
| 分段梯度射频驱动 | 高，需多路独立射频通道 | 高     | 优秀，逐段声源侧补偿 | 大孔径、高精度加工  |
| 低声衰减晶体选型 | 无额外电路，前期决策  | 无附加成本 | 最优，本征无衰减   | 大批量标准化设备   |

三种方案可单独或组合使用：方案①实现简单，适合对现有系统做低成本改造；方案②效果最优，但对驱动系统复杂度要求高；方案③需在器件选型阶段确定，受供应商工艺水平制约。

## 5.4 不同应用场景的声光材料选型建议

**表 5 声光材料选型参考**

| 声光材料                       | 声速<br>(mm/μs) | 品质因数<br>$M^2(\times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W})$ | 折射率 $n$ | 应用特点                        |
|----------------------------|---------------|-----------------------------------------------------|---------|-----------------------------|
| $\text{TeO}_2$<br>(轴向剪切模式) | 0.617         | 793                                                 | 2.26    | 超低声速、高 $M^2$ ，高速高精度 AOD 首选  |
| $\text{TeO}_2$<br>(离轴剪切模式) | 0.650         | 660                                                 | 2.26    | 声速与耦合效率均衡                   |
| $\text{TeO}_2$             | 4.2           | 34.5                                                | 2.26    | VIS/NIR 波段不推荐 AOD， $M^2$ 较低 |



|                        |      |      |           |                                                    |
|------------------------|------|------|-----------|----------------------------------------------------|
| (纵波模式)                 |      |      |           | (约为剪切模式的 4.3%)，声速较高，仅适用于固定角度大功率 AOM 调制；中远红外特殊场景可选用 |
| PbMoO <sub>4</sub>     | 3.63 | 36.3 | 2.38      | 综合性能均衡，成本适中                                        |
| Ge                     | 5.5  | 150  | 4 @10.6μm | 覆盖 8~12μm 红外波段，适用于 CO <sub>2</sub> 激光等中远红外系统       |
| SF Glass               | 3.41 | 8    | 1.8       | 成本较低，光学性能稳定                                        |
| Quartz                 | 5.7  | 2.38 | 1.54      | 紫外透过性能优异，声光耦合较弱                                    |
| Fused Silica<br>(纵波模式) | 5.96 | 1.51 | 1.46      | 激光损伤阈值远高于 TeO <sub>2</sub> ，稳定性优良，适合高功率 UV 检测与精密加工 |

表 5 注：TeO<sub>2</sub>纵波模式声速高达 4.2 mm/μs，同等射频带宽下扫描角远小于剪切模式；同时声光品质因数  $M^2$  仅为 34.5（剪切模式的~5%），需要极高射频功率才能达到饱和衍射效率，可见光、近红外场景不推荐用于高速、大角度 AOD 扫描，仅适合固定角度大功率声光调制（AOM）应用。

## 5.5 声光器件的热管理工程考量

在高功率激光（>50 W）或高占空比连续扫描应用中，声光晶体对激光的残余吸收（通常为 0.1%~1%/cm 量级，取决于镀膜质量与晶体纯度）会转化为热量，在晶体内形成温度梯度，导致以下工程问题：

1. 声速漂移：TeO<sub>2</sub>的声速温度系数约为-0.5%/°C，对应扫描角漂移约 0.05%/°C。对于长时间连续工作的精密扫描系统（如晶圆检测），数摄氏度的温升即可产生不可忽略的定位误差；
2. 热透镜效应：温度梯度引起折射率空间不均匀分布（dn/dT 效应），等效于在光路中叠加了一个热透镜，导致扫描光斑聚焦位置偏移或像散劣化；
3. 换能器性能退化：压电换能器在高温下谐振特性会漂移，导致射频-声波转换效率下降，饱和驱动功率升高。

工程应对措施：

- 主动温控：将 AOD 晶体安装于半导体制冷器（TEC）控温平台上，将晶体温度稳定在设定值  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  以内，适用于高精度计量与检测场景；
- 散热设计：采用导热硅脂+水冷/风冷散热结构，控制晶体外壳温度不超过器件手册规定的上限

(通常为 40~50°C) ;

- 功率密度限制：将入射激光功率密度控制在器件损伤阈值以下（TeO<sub>2</sub>晶体的连续激光损伤阈值典型范围为 10~50 W/mm<sup>2</sup>（取决于晶体切向、镀膜质量及表面加工精度），具体数值应以器件手册给出的损伤阈值上限为准。高功率应用时建议将实际功率密度控制在手册阈值的 50%以下作为安全裕量。），必要时扩大光斑孔径以降低峰值功率密度；
- 周期性校准：在长时间运行系统中，定期（如每 10 分钟）执行一次参考位置扫描，以实时补偿热漂移。

本文的理论模型均基于等温晶体假设，未包含上述热效应，实际工程设计中应根据激光功率与工作占空比评估热管理的必要性。

## 5.6 温度漂移量化修正模型

声光晶体的声速  $v$  随温度变化而漂移，由式(2)及式(4)可知， $v$  的变化会直接传导至扫描角  $\theta_{scan}$  与理论分辨率  $N_{ideal}$ 。

TeO<sub>2</sub>剪切模式声速温度系数典型值：

$$dv/dT \approx -0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

温度  $T$  下的实际声速：

$$v(T) = v_{25^\circ\text{C}} + (dv/dT) \cdot (T - 25) \quad (11)$$

相应的扫描角温度漂移：

$$\theta_{scan}(T) = \lambda \cdot \Delta f / v(T) \quad (12)$$

注意扫描角变化与声速变化方向相反：温度升高  $\rightarrow$  声速  $v$  减小  $\rightarrow$  由  $\theta = \lambda \Delta f / v$  知扫描角  $\theta$  增大。因此温升导致扫描角正向漂移，温降导致扫描角负向漂移。

以基准  $v_{25} = 656 \text{ m/s}$ ，温升  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$  计算：

$$v_{30} = 656 - 0.3 \times 5 = 654.5 \text{ m/s}$$

基准扫描角：

$$\theta_{25} = \lambda \Delta f / 656$$

温升后扫描角：

$$\theta_{30} = \lambda \Delta f / 654.5$$

扫描角相对变化量：

$$(\theta_{30} - \theta_{25}) / \theta_{25} = 656 / 654.5 - 1 \approx 0.229\%$$

扫描角绝对增量  $\Delta\theta = \theta_{25} \times 0.229\%$ ，对应前文示例 44.3 mrad 场景下， $\Delta\theta \approx 0.101$  mrad，与原文描述“温升 5°C，扫描角增加约 0.10 mrad，相对变化 + 0.23%”匹配。

高精度长时间连续工作的系统，建议采取以下措施之一：

1. 主动温控：将 AOD 晶体安装于 TEC 控温平台，稳定至设定值  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ；
2. 实时标定补偿：定期（如每 10 分钟）扫描参考位置，根据实测偏移量反推当前声速，动态修正射频频率指令；
3. 温度-频率前馈补偿：在控制软件中嵌入温度传感器读数，依据上述公式实时计算并调整驱动频率偏移量。

## 6 声光扫描技术综合优势与工程应用总结

声光偏转器基于声光衍射原理，通过调控射频驱动信号实现激光束空间方向的快速控制，是一种无需机械运动部件的固态光束扫描技术。相比传统机械扫描方式，AOD 具有固态结构、真正随机访问控制、极低回扫延迟、高扫描速度以及优异的长期稳定性和定位精度等优势。尽管其最大偏转角通常小于机械振镜等扫描器件，但凭借微秒甚至更快的响应速度、高动态性能和无惯性电子控制特点，AOD 在高速激光加工、精密检测、光刻、显示制造及科研光学系统等领域具有明显的应用优势。

### 6.1 声光扫描与机械振镜扫描对比

表 6 声光扫描与机械振镜性能对比

| 性能指标   | 声光偏转器 AOD    | 机械振镜扫描系统     |
|--------|--------------|--------------|
| 扫描物理机制 | 声光布拉格衍射，电子调谐 | 电机驱动反射镜机械偏转  |
| 内部运动部件 | 无（固态结构）      | 转子、传动机构等机械零件 |
| 光束响应速度 | 微秒级切换        | 毫秒级定位        |

|          |             |                 |
|----------|-------------|-----------------|
| 随机点位访问能力 | 无惯性、任意坐标跳转  | 受机械行程、加速度限制     |
| 最大扫描视场   | 小角度、小范围     | 大角度、大幅面扫描       |
| 长时间稳定性   | 无机械漂移、抗振动   | 长期运行存在温漂、机械磨损   |
| 系统成本构成   | 高带宽射频驱动成本较高 | 伺服电机控制电路成熟、成本较低 |

两类技术并非完全替代关系，而是在不同应用条件下形成互补：AOD 更适用于高速、小范围、高精度扫描；振镜更适用于大视场、大角度扫描。工业复合扫描标准光路顺序为「激光光源→AOD 微尺度高速精密扫描→振镜中幅快速扫描→XY 直线运动平台大范围定位」，三级器件分工明确，协同完成全尺度扫描任务。实际激光系统中常采用"XY 平台+振镜+AOD"的多级扫描架构：XY 平台负责大范围定位，振镜负责中尺度快速扫描，AOD 负责微尺度高速精密扫描。

表 6 中 AOD"小角度、小范围"与振镜"大角度、大幅面"的差异，根源在于二者完全不同的物理机制：由式(2)  $\theta_{\text{scan}} = \lambda \Delta f / v$  可知，AOD 的扫描角受声光介质声速与器件可用射频带宽的物理上限约束，即使采用声束转向等宽带技术，扫描角量级仍在几十毫弧度范围；而机械振镜的偏转角由反射镜的机械转动角度决定，不受声光材料参数限制，因此可实现远大于 AOD 的扫描视场，但代价是响应速度受限于转子惯量。

## 6.2 典型应用领域

- 激光精密加工：微细加工、激光刻蚀、微孔加工及精密切割，优势在于高速定位、无机械惯性，支持复杂扫描路径；
- 半导体与电子制造：光刻曝光控制、晶圆检测、缺陷扫描及精密定位，高速随机访问能力可提高检测效率；
- 激光检测与计量：激光测量、光学检测及共聚焦扫描系统，依托高重复定位精度和稳定扫描响应；
- 科研领域：激光束控制、原子物理实验、光镊系统、光谱分析及高速成像。

## 6.3 声光扫描系统工程设计要点

1. 扫描角与分辨率平衡：拓宽射频带宽可同步提升扫描角与分辨率，但会增加射频驱动硬件成本、抬高信号相位噪声；低声速  $\text{TeO}_2$  晶体可在有限带宽下取得较优的综合性能；

2. 访问时间与速度权衡：缩小入射光斑孔径可缩短访问时间、提升扫描速度，但会降低系统分辨点数，需根据加工精度要求折中选择；
3. 射频驱动系统配套要求：高性能 AOD 须搭配低相位噪声、快速频率切换、多通道功率可编程的射频信号源；声束转向器件还需要多路同步、带相位延迟的射频输出。

## 6.4 技术发展方向

**未来高性能声光扫描系统主要向以下方向发展：**

1. 更高速扫描：采用啁啾偏转器、高带宽射频驱动及高速数字控制技术，突破声光填充时间限制，实现更低延迟、更高扫描速率；
2. 更大扫描范围：结合声束转向技术、多电极阵列换能器及宽带布拉格匹配设计，突破传统 AOD 的带宽限制，提升有效扫描角度；
3. 更高功率适应能力：发展高损伤阈值声光晶体，优化晶体热管理、光学镀膜及声波损耗控制，满足千瓦级工业激光应用需求；
4. 更高集成化与智能化：集成数字扫描射频源、啁啾驱动模块与控制算法，构建一体化声光偏转模组，简化系统设计；
5. 多维复合扫描架构：融合 AOD、振镜、直线运动平台与路径规划算法，实现高速、大范围、高精度的协同扫描。

## 6.5 结论与展望

### 6.5.1 核心研究结论

1. 基于布拉格衍射小角度近似，建立了标准化的声光扫描计算模型，完善了扫描角、访问时间、分辨率、啁啾焦距等工程计算公式，并修正了有限填充时间条件下的有效分辨率模型；结合商用 G&H AODF 4055 器件完成了完整的分步算例，定量验证了填充时间带来的分辨率衰减规律；

2. 矢量随机扫描适合离散点位定位，连续线性扫描适配光栅式大面积扫描；高速线性扫描产生的啁啾等效柱面聚焦像差，可通过反向匹配焦距的柱面透镜基本补偿；
3. 声束转向多电极结构可拓宽射频带宽、稳定宽频衍射效率；啁啾偏转器可大幅缩短传统器件的回馈耗时，突破声波填充时间对分辨率的约束；正交双轴 AOD 可实现二维光束扫描，但设计中需严格规避光束截断损耗；
4.  $\text{TeO}_2$  剪切晶体凭借高声光品质因数、低声速，是可见光高速扫描的优选介质；饱和射频功率随激光波长的平方增长，长波长红外系统需要匹配更大功率的射频驱动器；大孔径  $\text{TeO}_2$  器件可通过入射光强加权补偿声波衰减造成的光斑效率梯度；
5. 声光固态扫描具备微秒级高速响应、无机械漂移、随机访问的优势，适配小视场高精度场景；机械振镜擅长大幅面扫描，工程中可组合搭建多级复合扫描系统。

### 6.5.2 研究局限与后续展望

本文所有公式基于理想平面波、均匀声场、恒温静态晶体等假设，未考虑温度变化引起的声速漂移（已在 5.6 节补充量化修正模型），以及高功率激光下的热畸变效应（热透镜效应），后续需结合具体器件标定数据进一步完善。

文中算例仅基于商用器件技术手册参数完成理论计算，尚未开展实验实测比对，后续可结合实验平台对关键参数进行标定与误差校核。

本文已在 5.2 节建立偏振损耗的  $\cos^2\alpha$  定量模型，但该模型未考虑入射光偏振态在晶体中因应力双折射产生的演化，严格情况下需采用 Jones 矩阵完整建模。

高功率（>50W）连续激光加工场景中，晶体吸收引起的温度梯度导致折射率空间不均匀分布，本文仅给出定性说明与工程阈值参考，未建立完整热-光-声多物理场耦合模型。

本文未包含独立的实验误差分析章节，系统性误差来源及对扫描精度的影响量化见 6.6 节

**未来技术发展方向：**

1. 新型高性能声光晶体（如单晶复合声光材料、铌酸锂薄膜等），兼顾高品质因数、低声波衰减与高热导率；
2. 集成式啁啾射频驱动模组，将数字频率合成、高速扫频与功率控制集成至单芯片，降低系统复杂度；
3. 多通道 DDS 射频驱动芯片模组，降低声束转向等多通道相位同步驱动方案的系统集成难度；
4. 多通道二维宽带声束转向器件，实现单级二维大角度偏转；
5. AOD 与振镜同轴复合光路的消像差结构设计，结合高速数字控制算法，实现高速、大视场、高分辨率的一体化协同扫描系统。

## 6.6 系统误差来源与量化分析

实际声光扫描系统中，扫描定位误差与分辨率损耗由多种因素共同决定。下表汇总主要误差源及其对定位精度/分辨率的影响机制。

**表 7 主要误差源与影响量化**

| 误差源         | 典型量级                                            | 对扫描定位的影响                                                                       | 分辨率损耗估算         | 工程应对措施                                          |
|-------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------|
| 射频相位噪声      | -120~-100 dBc/Hz@10kHz                          | 角度抖动量级： $\delta\theta \approx \lambda \cdot \delta f / v$ ， $\delta f$ 为瞬时频率抖动 | 降低有效分辨信噪比       | 选用低相噪 DDS/锁相环，增加射频带通滤波                          |
| 温度漂移        | 0.3 m/(s·°C)                                    | 扫描角漂移： $\Delta\theta/\theta \approx -\Delta v/v$ ，约 0.05%/°C                   | 理想分辨率不变，但绝对定位偏移 | TEC 控温 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 或实时频率补偿（见 5.6 节） |
| 光斑孔径加工/对准误差 | $\pm 2\% \sim 5\%$                              | 访问时间变化： $\Delta\tau/\tau = \Delta D/D$                                         | 有效分辨率同比例变化      | 光束准直调节，测量实际通光孔径                                 |
| 声波衰减（大孔径）   | 1.5~2.5 dB/( $\mu\text{s} \cdot \text{GHz}^2$ ) | 孔径内衍射效率梯度→扫描光斑重心偏移                                                             | 有效光斑展宽，分辨率降低    | 入射光强空间加权或分段驱动补偿（见 5.3 节）                        |
| 偏振失配        | $\alpha = 1^\circ \sim 5^\circ$ （未对准）           | 衍射效率下降，光强损失                                                                    | 信噪比下降→分辨率有效降低   | $\cos^2\alpha$ 修正，使用偏振片/波片对准（见                  |



|             |            |                       |               |               |
|-------------|------------|-----------------------|---------------|---------------|
|             |            |                       |               | 5.2 节)        |
| DDS 频率线性度误差 | <0.1% (典型) | 扫描速度不均匀→像素位置非线性畸变     | 扫描位置误差累计      | 出厂标定+软件非线性校正表 |
| 机械振动 (外部)   | 取决于安装环境    | 光束指向抖动, 与 AOD 无关的外部扰动 | 光斑模糊, 有效分辨率下降 | 光学平台隔振、器件刚性固定 |

### 系统总误差估算方法:

对于相互独立的误差源, 系统总定位误差可采用方和根 (RSS) 方法近似合成:

$$\Delta\theta_{\text{total}} \approx \sqrt{(\sum(\Delta\theta_i)^2)} \quad (13)$$

其中  $\Delta\theta_i$  为各误差源对应的角度偏差。分辨率损耗则需根据实际应用要求分别评估: 对于成像类应用, 主要关注光斑展宽与对比度下降; 对于定位类应用, 主要关注指向重复性与温漂。

设计阶段建议以本文理论计算结果为基础, 预留 20%~30%的误差裕量 (即实际系统指标要求应优于理论值的 70%~80%) , 并结合具体器件实测数据做最终校核。

## 附录 A 符号说明

表 8 全文主要物理量符号汇总

| 符号                      | 含义                | 单位                       |
|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| $\lambda$               | 激光波长 (真空/空气中)     | m                        |
| $v$                     | 声光晶体中超声波传播速度      | m/s (表中同时给出 mm/ $\mu$ s) |
| $f_c$                   | 声光偏转器中心射频频率       | Hz                       |
| $\Delta f$              | 射频工作带宽 (有效射频扫描范围) | Hz                       |
| $\theta_{\text{Bragg}}$ | 布拉格匹配角            | rad                      |
| $\theta_{\text{scan}}$  | 自由空间中最大总扫描角       | rad                      |
| $\theta_{\text{in}}$    | 晶体内布拉格角           | rad                      |
| $\theta_{\text{out}}$   | 晶体外 (自由空间) 布拉格角   | rad                      |
| $D$                     | 激光沿声波传播方向的有效光斑孔径  | m                        |

|                        |                                                                              |                                               |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| $\tau$                 | 声光访问时间（声波填充时间）                                                               | s                                             |
| $t$                    | 完整扫描周期（扫描段+回扫段）                                                              | s                                             |
| $t_{\text{sweep}}$     | 线性扫频持续时间（射频从起始频率扫描至终止频率所用时间）                                                 | s                                             |
| $N$                    | 啁啾偏转器单脉冲可分辨光斑数（式 7）                                                          | 无量纲                                           |
| $N_{\text{ideal}}$     | 理论固有分辨率（可分辨光斑数）                                                              | 无量纲                                           |
| $N_{\text{effective}}$ | 有限填充时间下的有效分辨率                                                                | 无量纲                                           |
| $f_a, f_b$             | 啁啾脉冲起止射频频率                                                                   | Hz                                            |
| $df/dt$                | 射频频率扫描速率                                                                     | Hz/s                                          |
| $F_L$                  | 啁啾扫描等效动态焦距                                                                   | m                                             |
| $M^2$                  | 声光品质因数                                                                       | $\text{m}^2/\text{W}$ ( $\times 10^{-15}$ 量级) |
| $n$                    | 声光晶体光学折射率                                                                    | 无量纲                                           |
| $P_{\text{sat}}$       | 一级衍射饱和射频驱动功率                                                                 | W                                             |
| $H$                    | 换能器电极高度（垂直声波传播方向）                                                            | m                                             |
| $L_{\text{ac}}$        | 声光相互作用长度（式 9）/ 双轴 AOD 轴向安装间距（式 8）【统一符号】                                      | m                                             |
| $k_{\text{loss}}$      | 饱和功率综合损耗系数（ $= k_{\text{atten}} \cdot k_{\text{imp}} \cdot k_{\text{abs}}$ ） | 无量纲                                           |
| $\eta_r$               | 相对衍射效率                                                                       | 无量纲                                           |
| $\eta_{\text{real}}$   | 计入偏振失配后的实际衍射效率                                                               | 无量纲                                           |
| $\theta_x$             | 双轴系统 X 轴单向最大扫描角                                                              | rad                                           |
| $D_y$                  | Y 轴声光偏转器有效通光孔径高度                                                             | m                                             |
| $w_0$                  | 高斯光束束腰半宽                                                                     | m                                             |
| $w(L_{\text{ac}})$     | 传播距离 $L_{\text{ac}}$ 处的光束半宽                                                  | m                                             |
| $\alpha$               | 入射偏振方向与器件最优偏振轴夹角                                                             | rad                                           |
| $\alpha_{\text{ac}}$   | 超声波传播衰减系数                                                                    | $\text{dB}/(\mu\text{s} \cdot \text{GHz}^2)$  |
| $dv/dT$                | 声速温度系数                                                                       | $\text{m}/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C})$    |
| $\delta f$             | 射频频率瞬时抖动（相位噪声等效）                                                             | Hz                                            |
| $\Delta\theta_i$       | 第 i 项误差源对应的角度偏差                                                              | rad                                           |

说明：为避免歧义，声光相互作用长度统一记为  $L_{\text{ac}}$ （式 9），双轴 AOD 安装间距统一记为  $L_{\text{sep}}$ （式 8），二者物理含义不同，全文及图表已按此区分。

## 附录 B 商用声光器件选型参考

### B.1 G&H 公司简介

G&H (Gooch & Housego) 于 1948 年在英国萨默塞特郡伊尔明斯特创立，是全球领先的光子学技术公司，专注于声光、电光、光纤光学、晶体光学及精密光学系统的研发与制造，业务覆盖工业加工、航空航天与国防、生命科学及科研（大科学装置）等领域。在声光技术方向，G&H 拥有三十余年的声光器件设计与制造经验，具备从二氧化碲（ $\text{TeO}_2$ ）等声光晶体生长、光学材料加工、镀膜、器件封装到测试的全流程垂直整合制造能力，在英国及美国设有多个研发与生产基地。G&H 的声光偏转器（AODF）产品系列可实现一维或二维光束扫描以及固定角度偏转，在扫描角范围内具有高度均匀的衍射效率和稳定的功率输出，广泛应用于材料加工、数字成像等扫描类应用。

#### G&H 声光偏转器 AOD 产品大全

G&H AODF 系列声光偏转器为工业级成熟产品，采用高均匀性声光晶体、低损耗光学镀膜，具备扫描线性度高、温度稳定性好、衍射效率优异、长期无漂移等核心优势，可适配 FPGA 高速控制系统，完美匹配三级协同激光扫描架构。全系产品配套标准化 [6000 系列射频驱动器](#)，即插即用、适配性强。

| 型号                              | 订货号                         | 波长<br>(nm) | 扫描角度<br>(mrad) | 中心频率<br>(MHz) | 射频带宽<br>(MHz) | 通光孔径<br>(mm) | 声光介质           | 射频功率<br>(W) |
|---------------------------------|-----------------------------|------------|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|-------------|
| <a href="#">AODF 4110 UV</a>    | <a href="#">97-03283-01</a> | 343-355    | 1.2            | 110           | 20            | 6 x 6        | 石英晶体           | 12          |
| <a href="#">AODF 4170 355nm</a> | <a href="#">97-03430-01</a> | 343-355    | 3.6            | 170           | 60            | 7 x 7        | 石英晶体           | 16          |
| <a href="#">AODF 4170-UV</a>    | <a href="#">97-03430-02</a> | 343-355    | 4.9            | 170           | 80            | 7 x 7        | 石英晶体           | 20          |
| <a href="#">AODF 4100-2E</a>    | <a href="#">97-02062-05</a> | 364        | 29.5           | 100           | 50            | 4 x 14       | $\text{TeO}_2$ | 1           |
| <a href="#">AODF 4095-3E</a>    | <a href="#">97-02732-03</a> | 364        | 35.4           | 95            | 60            | 1.5 x 2      | $\text{TeO}_2$ | 0.2         |
| <a href="#">AODF 4120-3</a>     | <a href="#">97-02799-02</a> | 413        | 31.8           | 120           | 50            | 3 x 3        | $\text{TeO}_2$ | 0.3         |
| <a href="#">AODF 4120-2</a>     | <a href="#">97-02799-01</a> | 413        | 31.8           | 120           | 50            | 10 x 10      | $\text{TeO}_2$ | 1           |
| <a href="#">AODF 4200-1</a>     | <a href="#">97-01610-51</a> | 442        | 62.3           | 200           | 100           | 4.8 x 4.8    | $\text{TeO}_2$ | 1           |

|                                 |                             |           |      |       |                             |             |                  |      |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------|------|-------|-----------------------------|-------------|------------------|------|
| <a href="#">AODF 4200-2</a>     | <a href="#">97-01610-52</a> | 442       | 93.4 | 190   | 150                         | 4.8 x 4.8   | TeO <sub>2</sub> | 1    |
| <a href="#">AODF 4040</a>       | <a href="#">97-03461-01</a> | 460-690   | 0.9  | 40    | 1                           | 2 x 6       | TeO <sub>2</sub> | 0.1  |
| <a href="#">AODF 4200</a>       | <a href="#">97-03328-01</a> | 461-689   | 6.8  | 200   | 50                          | 0.2 x 1     | TeO <sub>2</sub> | 1    |
| <a href="#">AODF 4140</a>       | <a href="#">97-03271-03</a> | 515-532   | 5    | 140   | 55                          | 7 x 7       | 石英晶体             | 50   |
| <a href="#">AODF 4110 532nm</a> | <a href="#">97-03292-01</a> | 532       | 0.9  | 110   | 10                          | 6 x 6       | 石英晶体             | 25   |
| <a href="#">AODF 4170 532nm</a> | <a href="#">97-03455-01</a> | 532       | 1.9  | 170   | 20                          | 6 x 6       | 石英晶体             | 25   |
| <a href="#">AODF 4140 石英</a>    | <a href="#">97-03404-02</a> | 532       | 7.9  | 147.5 | 85                          | 4 x 10      | 石英晶体             | 30   |
| <a href="#">AODF 4250-5E</a>    | <a href="#">97-02305-04</a> | 532       | 8    | 250   | 63                          | 1 x 3       | TeO <sub>2</sub> | 1.8  |
| <a href="#">AODF 4090-7</a>     | <a href="#">97-03210-01</a> | 532       | 44.3 | 87    | 55                          | 8.5 x 8.5   | TeO <sub>2</sub> | 1.5  |
| <a href="#">AODF 4215-6</a>     | <a href="#">97-02864-01</a> | 532       | 88   | 215   | 130                         | 1.8 x 5     | TeO <sub>2</sub> | 1.3  |
| <a href="#">AODF 4040-190</a>   | <a href="#">97-03099-01</a> | 633-1064  | 1.3  | 40    | 1                           | 2 x 6       | TeO <sub>2</sub> | 0.8  |
| <a href="#">AODF 4080</a>       | <a href="#">97-03437-01</a> | 633       | 1.9  | 80    | 2                           | 2 x 2       | TeO <sub>2</sub> | 0.15 |
| <a href="#">AODF 4065</a>       | <a href="#">97-03438-02</a> | 635-1550  | -    | 65    | 90MHz@635nm<br>40MHz@1550nm | 1.5 x 3     | TeO <sub>2</sub> | 0.7  |
| <a href="#">AODF 4055</a>       | <a href="#">97-03353-01</a> | 680-1300  | 59.7 | 55    | 40                          | 3 x 3       | TeO <sub>2</sub> | 1    |
| <a href="#">AODF 4105</a>       | <a href="#">97-03435-01</a> | 689       | 68.4 | 105   | 70                          | 4 x 4       | TeO <sub>2</sub> | 1.3  |
| <a href="#">AODF 4085 Y 轴</a>   | <a href="#">97-03359-04</a> | 750-1064  | 51.5 | 78    | 40                          | 15 x 15     | TeO <sub>2</sub> | 6    |
| <a href="#">AODF 4085 X 轴</a>   | <a href="#">97-03359-03</a> | 750-1064  | 51.5 | 78    | 40                          | 15 x 15     | TeO <sub>2</sub> | 6    |
| <a href="#">AODF 4060</a>       | <a href="#">97-03092-02</a> | 750-850   | -    | 60    | 24                          | 3.5 x 3.5   | TeO <sub>2</sub> | -    |
| <a href="#">AODF 4040-192</a>   | <a href="#">97-03304-01</a> | 780       | 1.2  | 40    | 1                           | 5 x 10      | TeO <sub>2</sub> | 0.2  |
| <a href="#">AODF 4055-4</a>     | <a href="#">97-01542-01</a> | 830       | 44.3 | 52.5  | 35                          | 3.5 x 14    | TeO <sub>2</sub> | 1    |
| <a href="#">AODF 4100-5</a>     | <a href="#">97-03120-01</a> | 1064      | 12.7 | 102.5 | 50                          | 4 x 4       | TeO <sub>2</sub> | 8    |
| <a href="#">AODF 4075-2</a>     | <a href="#">97-02823-52</a> | 1066-1100 | 8.3  | 75    | 32                          | 2.5 x 2.5   | TeO <sub>2</sub> | 4    |
| <a href="#">AODF 4100-6</a>     | <a href="#">97-03120-02</a> | 1066-1100 | 12.9 | 100   | 50                          | 4 x 4       | TeO <sub>2</sub> | 8    |
| <a href="#">AODF 4130</a>       | <a href="#">97-03155-02</a> | 1100      | 13.1 | 130   | 50                          | 0.8 x 0.8   | TeO <sub>2</sub> | 3.5  |
| <a href="#">AODF 4225-2</a>     | <a href="#">97-02378-02</a> | 1100      | 34   | 225   | 130                         | 0.3 x 0.3   | TeO <sub>2</sub> | 3    |
| <a href="#">AODF 4050 Ge</a>    | <a href="#">97-03477-01</a> | 9100-9500 | 33.8 | 50    | 20                          | 11.6 x 11.6 | 锗                | 150  |
| <a href="#">AODF 4070 Ge</a>    | <a href="#">97-03260-04</a> | 9400      | 68.4 | 70    | 40                          | 11 x 11     | 锗                | 140  |

## B.2 武汉新特光电——G&H 中国授权代理商

武汉新特光电技术有限公司是 G&H 在中国的授权代理商之一，负责 G&H 声光及电光器件产品在国内市场的推广、销售支持及技术咨询服务，产品涵盖声光偏转器（AODF）、声光调制器（AOM）等系列。凭借在声光/电光器件及激光系统集成应用方面的技术积累，武汉新特光电能够协助国内客户完成产品选型、参数计算及应用方案设计，帮助相关产品更快导入精密激光加工、光刻、检测及科研等应用场景。

### 武汉新特光电技术有限公司

地址：武汉市东湖新技术开发区流芳园南路 18 号新特光电工业园

罗经理：手机/微信：18162698939，座机：027-51858939，Email: [lql@SintecLaser.com](mailto:lql@SintecLaser.com)

程经理：手机/微信：18162698959，座机：027-51858937，Email: [czg@SintecLaser.com](mailto:czg@SintecLaser.com)

夏经理：手机/微信：13697356016，座机：027-51858958，Email: [xh@SintecLaser.com](mailto:xh@SintecLaser.com)

网站： <https://www.sintecclaser.com>, <https://www.518168.cn>

### Sintec Optronics Pte Ltd.

Add: 10 Bukit Batok Crescent #07-02 The Spire Singapore 658079

Singapore : Tel: +65 63167112, Whatsapp: [+65 91904616](tel:+6591904616), E-mail: [sales@sintec.sg](mailto:sales@sintec.sg)

India: E-mail: [India@sintec.sg](mailto:India@sintec.sg)

Philippines: E-mail: [sales@sintec.sg](mailto:sales@sintec.sg)

Website: <https://www.sintec.sg>

## B.3 射频驱动配套选型提示

AODF 系列不同细分型号的射频带宽、通光孔径等结构参数存在差异，用以覆盖不同扫描范围与响应速度的应用需求，选型时应以具体型号的厂商技术手册为准，而非按单一型号参数套用全系列产品。

与之相应，不同结构的声光偏转器对射频驱动系统的要求也不同，选型时需一并评估：

- 单电极标准 AOD（如常规窄带型号）：单通道射频信号源即可驱动，对相位同步无特殊要求；
- 声束转向型 AOD（如宽带型号）：换能器为多电极阵列，需要多路同步、带精确相位延迟控制的射频驱动方案（如多通道 DDS 数字频率合成器），普通单通道射频源无法驱动此类器件，选型时需一并确认驱动系统的通道数与相位同步精度是否匹配；
- 啁啾偏转器：需要能够输出短时长线性扫频脉冲的高速射频源，对频率切换速度、脉冲重复精度要求较高。

### 针对啁啾偏转器的射频驱动特殊要求：

啁啾偏转器与普通连续扫描 AOD 的射频驱动存在本质差异，选型时需额外确认以下指标：

| 驱动参数      | 要求指标                      | 说明                                      |
|-----------|---------------------------|-----------------------------------------|
| 工作模式      | 脉冲式线性扫频                   | 普通连续扫频源无法匹配，必须选用脉冲型 DDS                 |
| 射频脉冲宽度    | 可控， $< \text{访问时间 } \tau$ | 典型值 $1 \sim 10 \mu\text{s}$ ，需与器件访问时间匹配 |
| 扫频线性度     | 频率误差 $< 0.1\%$            | 非线性会导致扫描速度不均匀、像素位置畸变                    |
| 脉冲上升/下降时间 | $< 50 \text{ ns}$ （典型）    | 影响脉冲间过渡区损耗                              |
| 脉冲重复频率    | 与所需扫描线速率匹配                | 通常 $10 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$  |
| 触发同步      | 外部 TTL 触发输入               | 需与激光器、采集卡同步                             |

选型协同建议：声束转向型 AOD（多电极阵列）与啁啾偏转器对射频驱动的要求完全不同——前者需要多通道相位同步 DDS，后者需要高速脉冲式扫频源。工程上这两种技术路线往往互斥，鲜有单一射频驱动器能同时满足两者要求。因此，在系统方案设计阶段就应明确选定技术路线（宽带大角度 → 声束转向；超高速扫描 → 啁啾偏转器），并将 AOD 与射频驱动作为整体配套方案一并选型，避免分立采购导致驱动能力不匹配。

## 附录 C 工程算例汇总（G&H AODF 4055）

为便于工程师直接查阅、套用，现将正文中以 G&H AODF 4055-4 为例分散给出的各项关键参数计算结果汇总如下。表中数值均为特定工作条件下的算例结果，实际选型仍应以具体工作波长、带宽等条件重新计算。

**表 9 G&H AODF 4055 算例参数汇总**

| 计算项                          | 工作条件                                                                                       | 结果                                                   | 对应公式 |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------|
| 最大扫描角 $\theta_{\text{scan}}$ | $\lambda=830\text{nm}$ , $\Delta f=35\text{MHz}$ , $v=656\text{m/s}$                       | $\approx 44.3 \text{ mrad}$ ( $\approx 2.54^\circ$ ) | 式(2) |
| 理论固有分辨率 $N_{\text{ideal}}$   | $\tau=4.5\mu\text{s}$ , $\Delta f=40\text{MHz}$                                            | 180                                                  | 式(4) |
| 有效分辨率 $N_{\text{effective}}$ | $t=9\mu\text{s}$ ( $=2\tau$ ), $\tau=4.5\mu\text{s}$                                       | 90 (理想值的 50%)                                        | 式(5) |
| 啁啾等效焦距 $F_L$                 | $\Delta f=40\text{MHz}$ , $t=9\mu\text{s}$ , $v=656\text{m/s}$ ,<br>$\lambda=830\text{nm}$ | $\approx 117 \text{ mm}$ (会聚)                        | 式(6) |
| 访问时间 $\tau$ (定义参考)           | $D$ 、 $v$ 由具体入射光斑与器件决定                                                                     | $\approx 4.5 \mu\text{s}$ (器件标称值)                    | 式(3) |

注：表中“AODF 4055-4”与“AODF 4055”为同系列不同子型号，其中心频率、带宽等参数存在差异，具体以器件手册为准。

## 附录 D 工程计算量纲自查清单

为降低单位换算导致的计算错误，建议在代入本文各公式前，逐项核对以下量纲：

- 声速  $v$ ：表格中通常以  $\text{mm}/\mu\text{s}$  给出，代入公式前需换算为 SI 单位  $\text{m/s}$  ( $1 \text{ mm}/\mu\text{s} = 1000 \text{ m/s}$ ) ；
- 波长  $\lambda$ ：换算为  $\text{m}$  ( $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$ ) ；
- 频率  $f, \Delta f$ ：换算为  $\text{Hz}$  ( $1 \text{ MHz} = 1 \times 10^6 \text{ Hz}$ ) ；
- 时间  $\tau, t$ ：换算为  $\text{s}$  ( $1 \mu\text{s} = 1 \times 10^{-6} \text{ s}$ ) ；
- 角度结果  $\theta$ ：公式计算结果默认为弧度 ( $\text{rad}$ )，换算为角度需乘以  $57.3^\circ$  (即  $180^\circ/\pi$ ) ；
- 功率  $P, P_{\text{sat}}$ ：SI 单位为  $\text{W}$ ，注意射频驱动器铭牌功率单位 (如  $\text{dBm}$ ) 需先换算为  $\text{W}$ ；
- 长度类符号  $L_{\text{ac}}$  (声光相互作用长度/双轴间距) 含义统一，代入前确认对应式(9)还是式(8)；
- 射频功率单位换算： $P(\text{W}) = 10^{(P(\text{dBm})/10)} / 1000$

示例：30  $\text{dBm} = 1 \text{ W}$ , 33  $\text{dBm} = 2 \text{ W}$ , 40  $\text{dBm} = 10 \text{ W}$ 。



## 附录 E 常用单位换算速查

| 换算                              | 系数                                      | 示例                                   |
|---------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 mm/ $\mu$ s $\rightarrow$ m/s | $\times 1000$                           | 0.656 mm/ $\mu$ s = 656 m/s          |
| 1 nm $\rightarrow$ m            | $\times 10^{-9}$                        | 830 nm = $8.30 \times 10^{-7}$ m     |
| 1 MHz $\rightarrow$ Hz          | $\times 10^6$                           | 40 MHz = $4.0 \times 10^7$ Hz        |
| 1 $\mu$ s $\rightarrow$ s       | $\times 10^{-6}$                        | 4.5 $\mu$ s = $4.5 \times 10^{-6}$ s |
| 1 rad $\rightarrow$ degree      | $\times 57.2958$                        | 0.0443 rad = $2.54^\circ$            |
| 1 degree $\rightarrow$ rad      | $\times 0.0174533$                      | $2.54^\circ$ = 0.0443 rad            |
| dBm $\rightarrow$ W             | $10^{(P_{\text{dBm}}/10)/1000}$         | 30 dBm = 1 W                         |
| W $\rightarrow$ dBm             | $10 \cdot \log_{10}(P_{\text{W}}) + 30$ | 2 W = 33 dBm                         |
| 1 inch $\rightarrow$ mm         | $\times 25.4$                           | -                                    |

## 参考资料

1. Gooch & Housego (G&H) AODF 系列声光偏转器官方技术资料
2. US Patent 3,851,951, High Resolution Laser Beam Recorder with Self-Focusing Acousto-Optic Scanner