

某型号导弾位标器对跟踪能力的影响因素分析

刘建东*, 丁德秋, 李雪辰

陆军装备部驻沈阳地区军代局, 辽宁沈阳, 中国

*通讯作者

【摘要】针对某型号导弾位标器影响跟踪能力的问题, 本文从光学器件、陀螺组件与探测器链路梳理各部分影响, 围绕整流罩、次镜、线包与探测器, 按部件、症状和指标对应关系比较装配与调试差异, 发现透过率劣化与曲率漂移致像能衰减与波形畸变, 动平衡失调与线包缺陷致稳速偏差与调制频错, 致冷退化引起信噪比下降并易失锁, 据此提出“光学优先、稳速托底、信噪比保底”路径, 强调镀膜与同轴装配控制、动平衡与线包筛选、阈值标定及振动温度筛检, 以提升可靠性与适应性。

【关键词】 导弾跟踪; 位标器; 稳速失稳; 调制信号; 信噪比

1. 机械部件加工工艺对跟踪能力的影响分析

某型号导弾的位标器一般是由整流罩、陀螺组件、线包以及探测器构成的, 导弾系统的稳定跟踪性能取决于光学传递能力, 陀螺组件的稳速问题等的因素的共同作用。根据实际安装的经验显示, 其中整流罩往往最先暴露出问题的: 当整流罩在制作时, 当制作材料内部存在微小的杂质或者细小的颗粒时, 会引起散射和折射率的改变, 导致光线路径发生畸变, 使得调制后的能量难以在接收面形成聚集的能量中心点[1], 最终会导致探测器因得到漂移的信号从而导致导弾的跟踪能力下降。除了整流罩材料的制作工艺因素外, 零件装配也会在无意间影响导弾的跟踪性能下降。当搬运或装配时硬物可能会划伤整流罩, 在整流罩表层形成微棱镜效应, 使能量在透过后分裂并衰减, 减少了探测器接受到的能量信号; 还有可能在装配整流罩时整流罩的轴线和弹体的轴线会出现微小的不同轴现象使主入射角产生偏离现象, 入射的光线无法沿设计路径传播, 导致产生错误的方位判断信号[2]。

对于陀螺组件方面, 影响因素主要集中于稳速条件对调制信号时频特性的约束从而导致导弾跟踪性能的下降。当调制频率与相位将出现抖动时, 对应的脉冲串计数与到达时序也会随之产生紊乱, 电子舱的门限判决与锁相过程会频繁被打断, 会产生虚假的方位修正信号, 或者直接丢失目标信号。造成不稳速的原因, 主要集中于三类部件: 光学器件、线包组件与探测器。

1.1 光学器件

在导弾导引系统中, 基准信号的精度直接决定了控制力的生成效能。该基准信号源于大磁铁磁场与感应线包之间的相互作用, 一旦出现相位偏差, 便会引发比相输出波形与幅值的畸变, 最终导致对导弾的控制失准。此类偏差的根源可追溯至两个方面: 其一在于主镜, 其材质特性易引发磁场空间分布不均, 若在生产中再经历温度或机械冲击, 将进一步导致磁场强度衰减; 其二在于陀螺组件的机械状态, 若轴承因损坏、污染或装配不当而产生过大摩擦, 将破坏陀螺转速的稳定性[3]。其后果是电子舱的滤波电路会错误识别调制频率, 继而向舵机发出偏离实际的指令, 致使目标跟踪功能失效。此外, 陀螺组件在动平衡调试中, 若配重铅块设置不当, 会引入显著扰动, 同样削弱导弾的跟踪性能。还需注意的是, 若陀螺碗柱结构的粘接胶层存在厚度不均或气泡等缺陷, 在导弾飞行振动环境下, 易引起陀螺转速下降。此时, 稳速系统所提供的补偿力矩若无法及时恢复转速, 最终可能导致陀螺停转。电子舱无法准确接收目标信号也是常见故障来源之一。次镜作为光学系统的关键组成部分, 其可靠性尤为重要——在研制阶段曾出现镜片开裂或粘接不牢的情况[4]。若次镜固定不稳固, 光学反射路径将偏离理想圆锥扫描轨迹, 在振动条件下进一步引起信号波动; 而次镜若偏离光轴中心, 即使正对目标, 解调出的波形也会呈现偏离状态的异常特征。目标丢失可归因于指令生成链路的早期故障: 光学偏差会误导进动系统, 使得由大磁铁和线包产生的进动力矩偏离理论值。

该错误力矩信号被电子舱接收并处理后，将生成一个失真的控制指令发送至舵机，最终导致跟踪中断。次镜表面的裂纹或划痕会引起调制盘上光斑的畸变与分裂，不仅造成信号能量衰减，更会因信噪比恶化导致电子舱无法识别真实目标，从而使系统丧失正常跟踪能力。次镜一旦变形曲率增大，将破坏由垫片厚度保证的最佳焦距，导致像点前移、信号减弱。此信号衰减已被试验证实会改变控制力相位，引发导弹跟踪失稳，并在末段因无法应对近距离目标而造成失控脱靶。若次镜曲率变小，像点将落在最小焦距之后，造成灵敏阈颠倒，系统如同患上“近视”，难以清晰锁定远距离目标。此现象在发射初期尤其显著，极易导致目标丢失[5]，其中像点在调制盘上位置的变化示如图1所示：

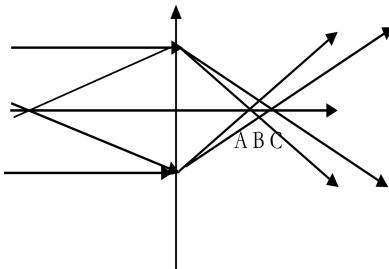


图 1. 像点在调制盘上位置的变化示意图

图 1 中，A 代表能量最大的点，B 代表在相同的能量下，最大与最小焦距能量相同的点，C 代表能量最小的点。

1.1.1 调试状态

位标器焦点调节的设计目标，是使光学像点位于特定区间（A 与 B 之间），以确保在极限焦距处均能实现较高的放大倍数。在此配置下，C 点能量将超越 A 点，从而使导弹在有效射程内获得可靠的目标捕获能力。调试中，当像点处于 A 点前方时，虽会形成尺寸较大、能量密度较低的像斑，但探测器仍可输出较高幅值的信号，经放大后能满足系统对焦范围内信号指标的要求。最理想的调试结果是像点精确汇聚于 B 点，此时系统在远、近焦距下的信号响应达到一致，实现了放大倍数的最佳匹配。然而，受制于实际工艺，光路参数存在漂移风险。在 B 点状态下，焦点前移尚可维持系统性能，但若焦点后移并伴随位标器倒置，将引发“近视”缺陷：最小焦距点信号反超最大焦距点，导致导弹丧失远距离目标锁定能力。

1.1.2 变化状态

(1) 次镜曲率增大导致系统焦距缩短，成像点位置前移。

I . 当像点原本位于 A-B 区间内时，前移会使其超出 A 点，导致其在调制盘上的成像尺寸增大、信号强度降低。在导弹系统中表现为目标信号幅值下降，可能造成目标捕获困难或在跟踪过程中丢失目标（若目标能量较强，此现象可能不明显）。

II . 若像点原本已在 A 点之前，曲率增大将使其进一步前移，影响与情况 I 类似，但通常导弹系统仍可检测到信号变化。

III . 若像点初始位于 B 点，前移一般不会引起如情况 II 所示的显著异常，导弹仍可维持正常跟踪。

(2) 次镜曲率减小会引起焦距变长、像点后移，在不同的像点初始位置时影响不同：

I . 当像点原本位于 A-B 区间内时，若后移幅度过大使其越过 B 点，将导致系统呈“近视眼”状态（最大焦距信息小于最小焦距），影响远距离目标捕获与跟踪。

II . 若像点原本已在 A 点之前，小幅后移对系统影响不大，甚至可能使性能趋近最佳；但若大幅后移越过 B 点，则会出现与 I 相同的问题。

III . 若像点初始位于 B 点，任何后移都会直接引发 I 所述的“近视眼”现象

1.2 线包组件

线包组件在系统中的主要功能是与大磁铁协同工作，实现陀螺的进动控制与转速稳定。其故障通常可归因于进动线包或稳速线包工作异常。例如，在振动环境下线包可能出现断裂或位移，又或者在线包制造过程中混入杂质，导致进动线包电流低于正常跟踪所需值。在这种情况下，线包与磁场磁力线相互作用所产生的进动力不足，无法驱动陀螺准确进动，从而造成目标丢失。若稳速线包发生损坏，陀螺将难以维持额定转速，进而导致导弹系统整体功能失常[6]。

1.3 探测器

探测器作为位标器的核心部件，主要承担接收目标光学信号并将其转换为电信号，再传递至电子舱的功能。其前端装有光敏电阻，用于对经调制盘处理后的光信号进行光电转换。以某型导引头采用的锑化铟探测器为例，该器件需在深冷条件下工作。若探测器的信噪比偏低，将造成输出信号强度不足，有效探测距离随之缩短，从而影响导弹的跟踪性能[7]。在低温环境下，探测器前方的光敏电阻阻值会下降，若阻值变化过于

剧烈，将引起前置放大器增益过高，进而导致导引头比相零位偏大，在跟踪过程中易丢失目标。探测率是评价探测器性能的关键参数之一，其数值与等效噪声功率成反比。在探测器受光面积和照度一定的条件下，提高信噪比是增强探测器整体性能的有效途径[8]。

2. 装配调试对跟踪能力的影响因素分析

位标器的性能优化是一个多参数协同调试的过程，其核心在于确保光学、电学及环境适应性指标的协同达标。首先，光学通道的对准性至关重要，调制盘的同轴度是生成高保真比相波形的基础，该波形的质量直接决定了导弹的末端跟踪精度；任何波形失真都会引发控制指令错误，最终导致脱靶[9]。其次，系统的信号处理能力集中体现为信噪比（或称灵敏阈），该参数直接决定了导引头在最小焦距点区分真实目标与背景噪声的能力。高信噪比是避免“近视”（远距探测能力不足）和近距目标丢失的双重保障[10][11]。导弹在飞行中面临的振动环境会向系统注入额外噪声，因此，通过振动筛选测试来模拟实战条件、筛选出具有高鲁棒性的产品至关重要。若系统噪声抑制能力不足，固有噪声与振动噪声叠加，将显著压缩有效探测距离，严重时噪声甚至会掩没真实目标信号，造成虚警或跟丢。最后，主通道放大倍数的设定是一项关键权衡：过高的增益虽提升信号但亦放大噪声，过低的增益则导致有用信号微弱，因此需寻求信噪比最优的折中点，这一设定是影响跟踪稳定性的决定性技术指标之一。

3. 结论

位标器跟踪可靠性由“光学—陀螺—探测”三个部分协同决定：整流罩透过率与位标器垫片焦点配平直接决定像点能量进而影响跟踪效果，而透过率衰减、同轴偏差或焦点漂移都会压缩跟踪范围；陀螺侧的动平衡、轴承摩擦与稳速线包一致性决定导弹是否可以正常工作，环路失配或电源纹波过大容易导致调制频率出现错误；探测侧的信噪比与噪声谱限定最小可分辨辐照度与门限，致冷与前端匹配不当会放大零位与抖动影响跟踪性能。因此，本文提出的“光学优先、稳速托底、信噪比保底”可以有效改善导弹

的跟踪性能并提升跟踪可靠性与适应性。

参考文献

- [1]周家淳, 高天元.大口径近红外波前检测装置光机设计[J].应用光学, 2023, 44 (5) : 943-951.
- [2]李征, 许昊宇, 梁静远等.四象限探测器光斑检测原理及其研究进展[J].应用光学, 2023, 44 (5) : 927-942.
- [3]李云鹏, 罗嘉诚, 冀若楠等.光刻法制备的长波红外超透镜[J].红外与毫米波学报, 2024, 43 (5) : 603-608.
- [4]Yi S, Ding H, Luo S, et al. Research progress on aero-optical effects of hypersonic optical window with film cooling[J]. Light: Science & Applications, 2024,13(1): 310.
- [5]Ju L, Liu B, Fan Z, et al. Adaptive optimization technology of a conformal infrared dome based on the Von Karman surface under hypersonic conditions[J]. Optics Express, 2023, 31(14): 22323-22342.
- [6]遆小光, 姚郁, 周凤岐.共孔径红外/激光双模成像导引头系统研究[J].红外与激光工程, 2005, 34 (5) : 577-581.
- [7]李柯, 李智军, 梁玉英等.红外成像导引头目标探测与自动识别关键技术分析[J].光电子, 2022, 12 (1) : 1-13.
- [8]邱继进, 梅建庭.烟幕对红外制导武器的干扰研究[J].红外与激光工程, 2006, 35 (2) : 212-215.
- [9]Abbas O, Arvan M R, Mahmoodi A. Real time extraction of tracking error signal in IR seeker with a plus stationary reticle[J]. Infrared Physics & Technology,2020, 104: 103145.
- [10]Si W, Zhou W, Liu X, et al. Recent advances in broadband photodetectors from infrared to terahertz[J]. Micromachines, 2024, 15(4): 427.
- [11]Abbas O, Arvan M R, Mahmoodi A. Improving the Estimation of the Tracking Error Signal in Real Time for IR Seeker Using Nonlinear Kalman Filters[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2020, 29(15): 2050242.