

双动镜平动式与双动臂旋转式干涉仪动态性能对比

任万杰 毛冲冲 赵建泉 张江浩 孙逊

Comparative on dynamic performance of double-moving mirror translational interferometer and double-moving arm rotary interferometer

REN Wanjie, MAO Chongchong, ZHAO Jianquan, ZHANG Jianghao, SUN Xun

引用本文:

任万杰, 毛冲冲, 赵建泉, 等. 双动镜平动式与双动臂旋转式干涉仪动态性能对比[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 988–995. DOI: 10.5768/JAO202546.0501005

REN Wanjie, MAO Chongchong, ZHAO Jianquan, et al. Comparative on dynamic performance of double-moving mirror translational interferometer and double-moving arm rotary interferometer[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 988–995. DOI: 10.5768/JAO202546.0501005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0501005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地基双波段非对称空间外差测风干涉仪设计

Design of ground-based dual-band asymmetric spatial heterodyne wind interferometer

应用光学. 2025, 46(3): 571–579 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0301004>

傅里叶变换光谱仪角镜二面角误差分析研究

Error analysis on dihedral angle of corner-cube reflectors in Fourier transform spectrometer

应用光学. 2022, 43(5): 959–966 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0503005>

等光程干涉仪中参考镜楔角最优补偿方式研究

Optimal compensation methods of wedge angle of reference mirror in equal optical path interferometers

应用光学. 2022, 43(5): 950–958 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0503004>

光电成像系统中探测器的精密装调与测试

Precision assembly and testing for imaging detector in photoelectric imaging system

应用光学. 2025, 46(1): 163–169 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0105001>

变间隙法布里-珀罗干涉仪光程差线性分析

Linear analysis of optical path difference of variable-gap Fabry-Perot interferometer

应用光学. 2021, 42(3): 494–498 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0302007>

基于轻量化校准反射镜的旋转平移干涉绝对检验技术

Absolute test technology for rotation and translation interference based on lightweight calibration mirror

应用光学. 2023, 44(1): 122–127 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0103002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-0988-08

引用格式: 任万杰, 毛冲冲, 赵建泉, 等. 双动镜平动式与双动臂旋转式干涉仪动态性能对比 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 988-995.

REN Wanjie, MAO Chongchong, ZHAO Jianquan, et al. Comparative on dynamic performance of double-moving mirror translational interferometer and double-moving arm rotary interferometer[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 988-995.



在线阅读

双动镜平动式与双动臂旋转式干涉仪 动态性能对比

任万杰^{1,3}, 毛冲冲², 赵建泉², 张江浩³, 孙 逊⁴

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044; 2. 陆装驻济南地区军事代表室, 山东 济南 250021;

3. 山东省非金属材料研究所, 山东 济南 250031; 4. 山东大学 机械工程学院 高效清洁机械制造教育部

重点实验室, 山东 济南 250061)

摘 要: 双动镜平动式和双动臂旋转式干涉仪虽能较好地降低动镜倾斜的影响, 但现有研究未能明确两者的差异特征, 导致在高精度场景中常因性能误判而选型错误。该文通过构型对比揭示了两类干涉仪差异, 设计了功能和尺寸近似的两类干涉仪, 其中, 平动式干涉仪尺寸为 443.546 mm×243.773 mm, 旋转式干涉仪的尺寸为 387.546 mm×300 mm。模拟了动镜倾斜情况下的干涉范围, 其中, 平动式干涉仪的动镜倾斜角与调制深度呈负相关, 旋转式干涉仪可通过延长反射镜尺寸来消除调制深度降低的影响; 推导了临界安装误差阈值, 平动式干涉仪的动镜倾斜角 $\leq 0.39''$, 安装误差角 $\leq 0.1''$, 旋转式干涉仪的动镜倾斜角 $\leq 0.23''$, 安装误差角 $\leq 0.066''$ 。所得差异量化结果为不同环境下干涉仪的构型选择提供了直接判据, 可有效规避传统“经验驱动”设计模式导致的性能损失风险。

关键词: 干涉仪; 动镜倾斜; 调制深度; 安装误差

中图分类号: TH744.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0501005

Comparative on dynamic performance of double-moving mirror translational interferometer and double-moving arm rotary interferometer

REN Wanjie^{1,3}, MAO Chongchong², ZHAO Jianquan², ZHANG Jianghao³, SUN Xun⁴

(1. School of Electronics and Information Engineering, University of Information Science and Technology, Nanjing

210044, China; 2. Jinan Military Representative Office of Army Equipment Department, Jinan 250021, China;

3. Shandong Institute of Non-Metallic Materials, Jinan 250031, China; 4. Key Laboratory of High Efficiency

and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, School of Mechanical

Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Although both double-moving-mirror translation interferometers and double-arm rotary interferometers can effectively mitigate the influence of mirror tilt, existing studies have failed to clarify their differential characteristics, leading to frequent performance misjudgment and selection errors in high-precision scenarios. This study reveals the differences between the two configurations through comparative analysis. Two functionally and dimensionally analogous interferometers were designed, and the size of translation interferometer was 443.546 mm×243.773 mm, while that of rotary interferometer was 387.546 mm×300 mm.

收稿日期: 2025-03-17; 修回日期: 2025-05-25

基金项目: 某装备发展部项目; 山东省自然科学基金 (ZR2024QB182)

第一作者: 任万杰, E-mail: renwanjie53@126.com

The interference ranges under mirror tilt conditions were simulated. Results indicate that the tilt angle of the moving mirror in the translation interferometer negatively correlates with the modulation depth. In contrast, the rotary interferometer can compensate for modulation depth reduction by extending reflector dimensions. Critical installation error thresholds were derived. For the translation interferometer, the permissible moving mirror tilt angle was $\leq 0.39''$ and installation error angle was $\leq 0.1''$, while for the rotary interferometer, these values were $\leq 0.23''$ and $\leq 0.066''$, respectively. The quantified differences could provide direct criteria for selecting interferometer configurations in diverse environments, effectively mitigating the performance loss risks caused by traditional experience-driven design paradigms.

Key words: interferometer; moving mirror tilt; modulation depth; installation error

引言

红外光谱仪因其具有高分析精度、宽域检测能力及非破坏性检测等优势^[1], 在光谱分析领域展现出卓越性能, 现已在化工成分分析、生物医学检测、军事目标识别及航天环境监测等重要领域得到广泛应用^[2-3]。红外光谱仪可以分为非色散型、光栅色散型和傅里叶变换型三种类型。相对于其他两类光谱仪, 傅里叶变换红外光谱仪具有单点检测、多路传输、光谱范围宽、高光通量等优势^[4-5], 已成为工业界和学术界的研究热点。

傅里叶变换红外光谱仪以干涉仪为核心部件, 通过干涉仪的运动部件产生光程差, 从而形成干涉图, 一系列干涉图经过傅里叶变换后获得对应光谱^[6]。傅里叶变换红外光谱仪内部的干涉仪为迈克尔逊干涉仪, 迈克尔逊干涉仪的动镜易受到环境的影响产生倾斜, 造成干涉误差。为减小动镜倾斜现象, 学者们又提出了旋转式干涉仪^[7-8]。为了减小光谱仪尺寸并增大光谱仪分辨率, 学者们对这两种干涉仪做出多种改进研究, 以减少动镜倾斜的影响, 但缺乏对这两种类型干涉仪进行差异性的研究。

平动式干涉仪结构简单、尺寸小、调制深度高, 但存在动镜在移动过程中受环境影响易发生倾斜和振动等问题^[9-10]。穆廷魁^[11]等人提出用移动楔形棱镜代替干涉仪的动镜, 并采用六边形分束器, 使系统光程差小于棱镜移动距离的两倍, 降低环境震动和速度不稳定对干涉图样的影响; 冯明春^[12]等人提出采用定镜动态校正技术校正定镜和动镜之间的夹角, 以减少动镜倾斜; BEER R^[13]等人提出用猫眼动镜优化光线的反射路径, 克服了平面动镜倾斜带来的问题。

旋转式干涉仪本身结构受动镜倾斜的影响较小, 但光学结构较为复杂, 且存在旋转过程中调制

深度降低等问题。MANDAL L^[14]等人提出使用直角棱镜, 使干涉仪在倾斜时经历相同的倾斜, 可避免动镜倾斜和速度不稳定问题; CAI Q S^[15]等人提出了一种具有一对旋转平行反射镜的傅里叶变换红外光谱仪, 避免了在平移系统中出现倾斜的问题, 同时提高了光程差, 进而提高了光谱仪的分辨率。

在干涉仪微型化和高分辨率化进程中, 双动镜平动式与双动臂旋转式干涉仪虽都有抑制动镜倾斜的优势, 但二者在动态响应特性、环境适应性等核心维度存在本质差异。当前研究多聚焦单一构型优化, 却忽视系统性的对比分析, 导致工程实践中频现“性能预测偏差”与“设计冗余累积”。为此, 本研究对这两类干涉仪建立对比框架, 主要涉及干涉仪尺寸、调制深度及干涉强度。尺寸方面, 通过光学建模解构两类干涉仪的空间特征, 揭示紧凑化设计的关键约束条件。调制深度方面, 解析倾斜扰动下光束耦合的构型敏感机制, 构建调制深度优化的差异化补偿路径。干涉强度方面, 基于光程差传递模型推导系统鲁棒性判据, 为高振动等极端工况下的干涉系统选型提供理论锚点。这种差异驱动的对比如式, 可突破传统“孤立优化”思维局限, 从根本上规避因构型认知模糊导致的技术迭代风险。

1 双动臂结构干涉仪干涉原理

1.1 平动式干涉仪

YANG Q^[16]等人提出了一种基于双动镜结构的平动干涉仪, 能够有效降低动镜倾斜的影响。双动镜结构平动干涉仪的简化光路图如图 1 所示。该干涉仪主要由分束器、固定镜和 2 个移动镜组成。入射光进入干涉仪被分束器分成两束: 反射光束和透射光束。反射光束经过移动镜 M_1 后反射回分束器, 透射光束经过固定镜反射到

移动镜 M_2 后又依照原路反射回分束器。该干涉仪通过 2 个移动镜的移动, 使两束光的光程不同, 两光束汇聚到分束器后产生干涉, 从而在检测器上生成干涉图。相较于传统迈克尔逊干涉仪, 该干涉仪将 2 个移动镜耦合起来, 产生了 2 倍的光程差。因为所需的光程差降低, 从而降低了动镜倾斜的影响。该干涉仪固定镜 M_F 与水平轴成 45° , 因此产生的光程差 L_t 为

$$L_t = 2[|OM_F| + |M_F M_2|] - |OM_1| \quad (1)$$

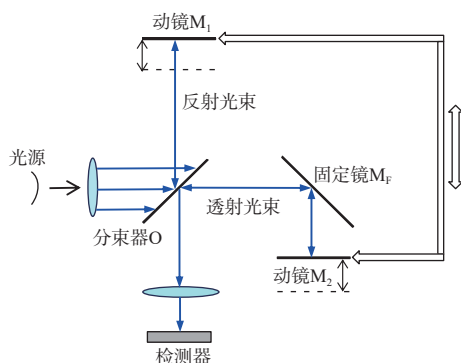


图1 基于双动镜结构的平移式干涉仪简化光路图

Fig.1 Simplified optical path diagram of translational interferometer based on double-moving mirror structure.

1.2 旋转式干涉仪

旋转式干涉仪简化光路如图2所示。该干涉仪主要由分束器O、两对动臂反射镜(A, A', B, B')、2个固定镜(C, C')及探测器组成。两动臂耦合在一起, 并围绕旋转轴R旋转。旋转轴R位于动臂反射镜B和B'的轴对称中心。两对动臂反射镜分别固定在两动臂上, 每对动臂反射镜在安装位置上互相平行, 并由动臂带动进行旋转运动。由于旋转的反射镜是固定在双动臂上, 运动过程中动臂发生旋转, 从而带动反射镜旋转, 有效降低了传统干涉仪运动时发生动镜倾斜的影响。

该干涉仪同样是通过分束器将光束分成两束光, 通过旋转动臂使两束光之间产生光程差, 从而形成干涉图。该光程差 L_r 为

$$L_r = 2[|OA| + |AB| + |BC|] - (|OA'| + |A'B'| + |B'C'|) \quad (2)$$

干涉仪位于初始位置时, 分束器、动臂及动臂上的反射镜都与水平位置成 45° , 且光束从分束器到定镜C和C'的光程相同, 因此初始位置干涉仪产生的光程差为零。当动镜旋转时, 动臂上各个

光程($|OA|$ 、 $|AB|$ 和 $|BC|$ 等)都发生改变。由于整个动臂是轴对称结构, 因此 $|AB| = |A'B'|$, 且 $|\Delta|OA| = |\Delta|BC| = |\Delta|OA'| = |\Delta|B'C'|$ 。所以动臂旋转后, 光程差 L_r 为

$$L_r = 8\Delta|OA| \quad (3)$$

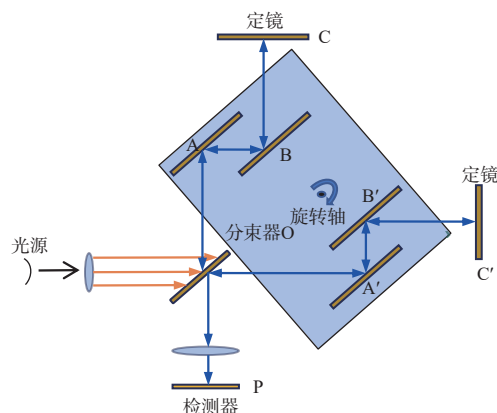


图2 基于双动臂结构的旋转式干涉仪简化光路图

Fig.2 Simplified optical path diagram of rotary interferometer based on double-arm structure

为方便计算, 假设光束直径为 $2d$, 反射器B与旋转轴R的距离为 $\sqrt{2}d$, 反射器的直径和反射器之间的安装距离为 $2d$, 动臂绕旋转轴R旋转的角度为 α 。干涉仪位于零光程差时, α 为 45° 。基于双动臂结构的旋转式干涉仪局部光路结构图如图3所示。由图3可知, $\Delta|OA| = |EH|$, $|EH| = 2(|EG| + |LM| - |LP|)$, 因此, 旋转式干涉仪产生的光程差为

$$L_r = 8d \cdot \sin(\alpha - 45^\circ) \quad (4)$$

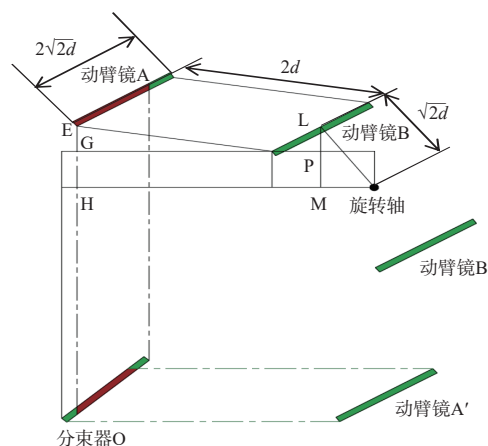


图3 基于双动臂结构的旋转式干涉仪局部光路结构图

Fig.3 Local optical path structure of rotating interferometer based on double-arm structure

光谱的分辨率与干涉仪可移动的最大光程差有关。当光谱仪的截断函数为三角形截断函数

时, 光谱仪分辨率为

$$\delta\sigma = 1/L_{\max} \quad (5)$$

式中 $L_{\max}$ 为干涉仪最大光程差。

1.3 理论建模与仿真方法

通过数值仿真与实验验证相结合的方法, 系统分析动镜倾斜对两类干涉仪(平动式与旋转式)光学性能的影响。基于波动光学理论建立迈克尔逊型干涉仪的光学模型^[15], 并通过对比实验验证了模型的可靠性, 最终构建了两种干涉结构的倾斜容差模型。

基于 Matlab 平台构建了可参数化调控的干涉仪光学模型。依据迈克尔逊干涉原理, 当动镜存在倾斜角 θ 时, 测量臂与参考臂的光程差可表示为

$$\delta(x) = 2\theta x \quad (6)$$

式中 x 为横向坐标。干涉场光强分布由两臂复振幅叠加决定, 即:

$$I(x, y) = |E_{\text{ref}} + E_{\text{meas}} \cdot e^{ik\delta(x)}|^2 \quad (7)$$

式中: k 为波数; E_{ref} 和 E_{meas} 分别是动镜臂和定镜臂的复振幅。仿真采用高斯光束模型:

$$E_0(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right) \quad (8)$$

测量臂光场因倾斜引入的相位调制为

$$E_{\text{meas}}(x, y) = E_0(x, y) \cdot e^{ik\cdot 2\theta x} \quad (9)$$

通过离散傅里叶变换处理不同光程差下的干涉场分布, 可获得光谱强度分布。

2 结果与讨论

2.1 尺寸设计及差异性分析

假设干涉仪的设计目标为: 整体尺寸小于 $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$, 分辨率为 0.045 cm^{-1} , 测量光谱范围波数为 $350 \text{ cm}^{-1} \sim 7\,500 \text{ cm}^{-1}$, 分别设计平动式干涉仪和旋转式干涉仪。为满足测量光谱范围波数为 $350 \text{ cm}^{-1} \sim 7\,500 \text{ cm}^{-1}$ 的要求, 准直透镜的材料选为 Si, 透镜曲率半径约为 35 mm , 厚度选取为 2.66 mm 。经光学仿真可知, 焦距 $f=143.773 \text{ mm}$ 时成像效果最佳。

当分辨率为 0.045 cm^{-1} 时, 对应的最大光程差为 222 mm 。基于双动镜平动干涉仪能产生比迈克尔逊干涉仪多一倍的光程差, 因此动镜需要移动 56 mm 。基于双动镜平动干涉仪旋转时, 每个动臂反射镜都能产生光程差, 因此动臂反射镜仅需使光程差改变 28 mm 。

为满足干涉仪整体尺寸需求及动镜的运动需求, 对 2 个干涉仪光学结构进行设计。2 个干涉仪之间的安装参数如下: 在干涉仪处于零光程差位置时, 分束器到反射镜、动镜到固定反射镜及分束器到准直透镜的距离 l 都选为 100 mm ; 光束半径 d 选为 35 mm ; 动臂可旋转角度 α 选为 $14^\circ \sim 76^\circ$ 。该设计能使两者满足干涉仪设计需求, 同时整体结构相近。

利用 Zemax 软件建立 2 个干涉仪的光学模型, 如图 4 所示。由图 4(a)可知, 平动式干涉仪的长度主要受到准直系统长度和 $|M_F M_2|$ 的影响。为了保证干涉仪能够正常运转, $|M_F M_2|$ 需要取能够移动的最大值, 因此, 干涉仪的长为 $2f+l+56$ 。为避免检测器与 $|M_F M_2|$ 相交, 干涉仪的宽主要受光学元件安装距离和准直系统焦距的影响, 具体为 $f+l$ 。由图 4(b)可知, 旋转干涉仪的长度与准直透镜焦距和光学元件安装距离相关, 即 $2f+l$ 。旋转干涉仪的宽度主要与光学元件安装距离相关, 具体为 $3l$ 。

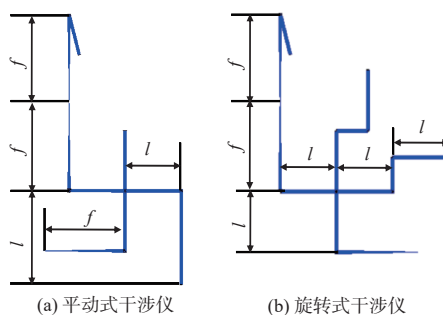


图 4 平动式与旋转式干涉仪尺寸对比图

Fig. 4 Size comparison of translational and rotational interferometers

综上所述, 平动式干涉仪的尺寸为 $443.546 \text{ mm} \times 243.773 \text{ mm}$, 旋转干涉仪的尺寸为 $387.546 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。可见, 平动式干涉仪结构更为简单, 且整体尺寸更小。

2.2 动镜倾斜对调制深度的影响

平动镜干涉仪的动镜运动时, 动镜受到环境的影响发生倾斜, 使透射光束和反射光束无法干涉, 从而造成干涉仪调制深度降低。本研究设动镜发生倾斜角度为 β , 倾斜中心为反射镜中心, 分析动镜倾斜对调制深度的影响。具体光路如图 5 所示。图 5 中 AB 代表动镜 M_2 没发生倾斜时的位置, A'B' 代表动镜 M_2 发生倾斜时的位置。由图 5 可知, $|B'D|$ 和 $|DE'|$ 是动镜 M_2 发生倾斜时透射光束的光程, $|BD|$ 和 $|DE|$ 是动镜 M_2 没发生倾斜时透射光

束的光程。当动镜 M_2 和 M_1 发生倾斜时, 透射光束和反射光束无法在分束器的 $E'F$ 范围内形成干涉, 从而造成调制深度降低。

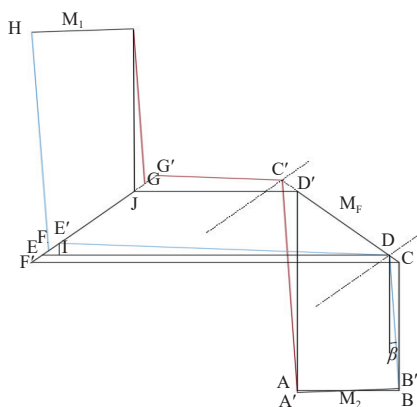


图 5 平动式干涉仪局部光路结构图

Fig. 5 Local optical path structure of translational interferometer

为求解 $|E'F|$, $|E'F|$ 可以视为 $|E'F| = |F'E'| - |F'F|$ 。其中 $|F'E'| = |F'E| + |EE'|$, 且 $|EE'|$ 与动镜倾斜角度及 $|ED|$ 相关。先求解 $|EE'|$, 根据几何关系可知:

$$\frac{|E'I|}{|ID|} = \tan(\beta) \quad (10)$$

$$|EI| + |ID| = |ED| \quad (11)$$

由于分束器与水平方向成 45° , 所以 $|EI| = |E'I|$ 。联立式(10)和式(11)可得:

$$|EI| = |ED| - \tan\beta \quad (12)$$

因此, $|EE'| = (|ED| - \tan\beta) / \cos(45^\circ)$ 。其中 $|ED|$ 与固定反射镜 M_2 直径、反射镜 M_2 到反射镜 M_f 的光程有关。由于动镜倾斜的角度较小, 为方便计算, 假设 B 和 B' 位于同一位置。 $\angle DBC = \beta$, $\angle DCB = 135^\circ$, 根据正弦定理, 有:

$$|CD| = \frac{|CB|}{\sin(45^\circ - \beta)} \cdot \sin(\beta) \quad (13)$$

根据 2.1 节中光束半径 $2d = 35 \text{ mm}$, 则反射镜 M_f 中心到 D 的距离为 $35\sqrt{2} - |CD|$, 从而可得:

$$|ED| = 100 + \sqrt{2} \cdot (35 - |CD|) = 170 - \sqrt{2}|CD| \quad (14)$$

根据式(14)可知, $|EE'|$ 为

$$|EE'| = 170\sqrt{2} - \frac{2|CB|}{\sin(45^\circ - \beta)} \cdot \sin(\beta) - \sqrt{2}\tan(\beta) \quad (15)$$

由几何关系可知, $|F'E| = |CD|$, 可得 $|F'E'|$ 为

$$|F'E'| = |F'E| + |EE'| = 170\sqrt{2} - \frac{|CB|}{\sin(45^\circ - \beta)} - \sqrt{2}\tan(\beta) \quad (16)$$

式中 $|CB|$ 与动镜 M_2 的移动范围有关, 具体范围为

65 mm ~ 121 mm。接着求解 $|FF'|$, 其中 $\triangle BCD$ 与 $\triangle HFF'$ 相似, 因此 $|FF'|$ 求解方式与 $|CD|$ 类似, 具体为

$$|FF'| = \frac{|HF'|}{\sin(45^\circ - \beta)} \cdot \sin(\beta) \quad (17)$$

式中 $|HF'|$ 与动镜 M_2 的移动范围有关, 具体范围为 135 mm ~ 191 mm。根据式(16)可得:

$$|FE'| = 170\sqrt{2} - \frac{|CB| - |HF'|}{\sin(45^\circ - \beta)} - \sqrt{2}\tan(\beta) \quad (18)$$

因为动臂镜 M_1 和 M_2 耦合, 因此有 $70 \text{ mm} \leq ||CB| - |HF'|| \leq 126 \text{ mm}$ 。可以发现, 动镜倾斜角度越大, 干涉仪调制深度会越低。当动臂镜移动到趋近于极限距离时, 动镜倾斜对调制深度的影响变小。同时, 光学元件间安装距离的增大也会使调制深度降低的影响变小。

平动式干涉仪动臂镜发生倾斜时, 除了 $|FE'|$ 位置无法形成干涉外, $|JG'|$ 位置同样也无法形成干涉。这种状况可以通过延长反射镜 M_f 的直径来改善, 但即使通过该方法改善, 仍有 $|GG'|$ 无法形成干涉, 具体公式推导与 $|FE'|$ 的推导类似。

旋转式干涉仪局部光路图如图 3 所示。从图 3 可以看出, 当旋转干涉仪旋转时势必会造成调制深度降低, 但根据光的反射原理可知, 调制深度的降低可利用延长动臂镜直径来改善。由于旋转干涉仪的动臂镜固定在动臂上, 运动产生的倾斜主要发生在整个动臂上, 这相当于动臂额外旋转了所倾斜的角度, 因此, 该情况同样可以通过延长动臂镜直径来抑制调制深度的降低。

2.3 反射镜倾斜对干涉强度的影响

干涉仪的动镜倾斜除了对调制深度造成影响外, 同样也对干涉仪的干涉强度造成影响。对于平动式干涉仪, 除了动镜倾斜会影响干涉强度以外, 还需考虑固定反射镜 M_f 对干涉强度的影响。

当平动式干涉仪的光路为理想的无动镜倾斜的光路时, 其光程差 L_t 如式(1)所示。当平动式干涉仪的动镜倾斜角度为 β , 固定镜倾斜角度为 β_1 时, 可以视为固定镜没有发生倾斜, 则动镜倾斜角度为 $\beta + \beta_1$ 。

光程差 L'_t 为

$$L'_t = 2 \times \left(-\frac{|OM_1|}{\sin(135^\circ - \beta)} \cdot \sin(45^\circ) + |OM_f| + \frac{|M_f M_2|}{\sin(45^\circ - \beta - \beta_1)} \cdot \sin(135^\circ) \right) \quad (19)$$

反射镜偏移前后之间的光程差 $\Delta L'_t$ 为



图7 迈克尔逊干涉仪

Fig. 7 Michelson interferometer

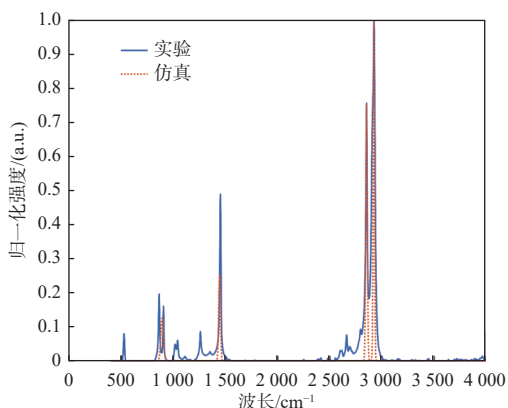


图8 实测光谱与仿真光谱对比

Fig. 8 Comparison of measured and simulated spectra

图9对比了仿真模型下动镜倾斜对两类干涉仪相位调制稳定性的影响：当动镜倾斜在 $0.066'' \leq \theta \leq 0.1''$ 范围内时，平动式干涉仪调制深度维持在0.82~0.83，旋转式干涉仪可保持1左右的调制深度。进一步分析表明，平动式结构因非对称，在发生动镜倾斜时光束会产生与 θ 成正比的横向位移，造成局部干涉失效；旋转式则通过对称补偿设计使 $\Delta x \approx 0$ ，展现出更优的抗倾斜干扰能力。

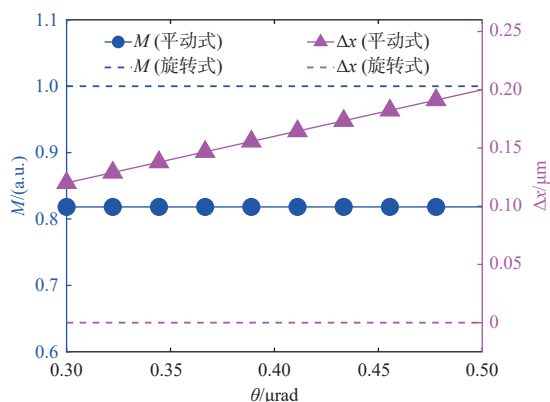
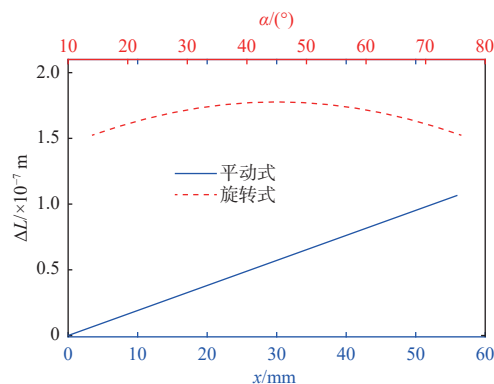


图9 动镜倾斜对两类光谱仪的调制深度及光束偏移的影响

Fig. 9 Effects of moving mirror tilt on modulation depth and beam deviation in two types of spectrometers

信噪比 $SNR=10$ 时两型干涉仪反射镜倾斜导致的光程差对比结果如图10所示。从图10可以看出，平动式干涉仪在整个扫描过程中的光程差均小于 λ/SNR (λ 为 $1.333 \mu m$)，而旋转式干涉仪的光程差变化量超出该阈值约14%。量化分析表明，旋转式干涉仪的动镜安装角公差需控制在 $\pm 0.066''$ 以内，较平动式安装角公差 ($\pm 0.1''$) 严格，这对实际装配工艺提出了更高要求。

图10 $SNR=10$ 时两型干涉仪反射镜倾斜导致的光程差对比Fig. 10 Comparison of optical path differences caused by mirror tilt in two interferometer configurations at $SNR=10$

3 结论

针对旋转式与平动式双动镜干涉仪的差异性问题，通过理论仿真分析取得以下结论：

1) 尺寸对比。在体积尺寸 $450 mm \times 450 mm$ 限制下，平动式干涉仪 ($443.5 mm \times 243.8 mm$) 较旋转式 ($387.5 mm \times 300 mm$) 更具空间优势。采用准直系统焦距 $f=143.773 mm$ 、光程参数 $l=100 mm$ 时，平动式干涉仪通过较优的机械构型 (长为 $2f+l+56$ ，宽为 $f+l$) 实现轴向空间压缩，较旋转式结构减少宽度方向冗余量达18.7%。

2) 调制深度特性。平动式干涉仪对动镜倾斜敏感度更高，但可通过增大反射镜直径补偿部分调制深度；旋转式干涉仪可通过延长动臂镜直径来消除调制深度衰减。

3) 干涉强度容差。平动式干涉仪允许最大动镜倾斜 $\beta \leq 0.39''$ 、安装误差 $\beta'' \leq 0.1''$ ；旋转式干涉仪则需 $\beta \leq 0.23''$ 、 $\beta'' \leq 0.066''$ ；双动臂旋转式对机械加工和装配精度要求更高。

参考文献:

- [1] MILLOT G, PITOIS S, YAN M, et al. Frequency-agile dual-comb spectroscopy[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 27-37.
- [2] PRIMPKE S, WIRTH M, LORENZ C, GERDTS G. Reference database design for the automated analysis of microplastic samples based on Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2018, 410(21): 5131-5141.
- [3] JOZANIKOHAN G, ABARGHOOEI M N. The Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis for the clay mineralogy studies in a clastic reservoir[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2022, 12(8): 2093-2106.
- [4] ZHAO B, LIANG J, LYU J, et al. Reducing the influence of systematic errors in interference core of stepped micro-mirror imaging fourier transform spectrometer: a novel calibration method[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(4): 985.
- [5] ZHU S, WU P, LU Z, et al. Fourier transform spectrometer using spectral reconstruction theory[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 912003.
- [6] CHENG F H, ZHAO W X, FANG B, et al. Mid-infrared optical frequency comb-based fourier transform spectrometer for broadband molecular spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2024, 37(4): 471-480.
- [7] QU L, XU L, LIU J, et al. Numerical simulation analysis of portable high-speed FTIR rotary interferometers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 907001.
- [8] QIN Y, LI X, HAN X, et al. Modeling and simulation of the control system for the plane mirror rotating interferometer[J]. *Engineering Reports*, 2024, 6(12): 1.
- [9] CHEN P, ZHOU Y, ZHU D, et al. The research on the effect of dynamic tilt variation on the phase of cold atomic gravimeter[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2024, 130(7): 111.
- [10] 冯明春, 徐亮, 王玉杰. 基于迈克耳逊干涉仪的准直因素及性能分析研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 290-295.
- FENG Mingchun, XU Liang, WANG Yujie. Collimation factors and performance analysis based on michelson interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 290-295.
- [11] MU T, ZHANG C, ZHAO B. Analysis of a moderate resolution fourier transform imaging spectrometer[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(9): 1699-1705.
- [12] 冯明春, 徐亮, 金岭, 等. 傅里叶变换红外光谱仪动镜倾斜和动态校准研究[J]. *光子学报*, 2016, 45(4): 169-173.
- FENG Mingchun, XU Liang, JIN Ling, et al. Tilt and dynamic alignment for the moving mirror in the Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(4): 169-173.
- [13] BEER R, MARJANIEMI D. Wavefronts and construction tolerances for a cats-eye retroreflector[J]. *Applied Optics*, 1966, 5(7): 1191.
- [14] MANDAL L, SINGH J, GANESAN A R. Michelson interferometer with mirrored right-angled prism for measurement of tilt with double sensitivity[J]. *Journal of Optics*, 2023, 53(2): 1545-1550.
- [15] CAI Q S, MIN H, HAN W, et al. Principle and analysis of a rotational motion Fourier transform infrared spectrometer[J]. *SPIE*, 2017, 10402: 104022P-1-7
- [16] YANG Q, ZHOU R, ZHAO B. Principle of the moving-mirror-pair interferometer and the tilt tolerance of the double moving mirror[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(13): 2486-2493.