

“西光所建所六十周年暨《光子学报》创刊五十周年”专辑

引用格式: LI Jingzhen. Progress in Rotating Mirror Ultra-high Speed Imaging Technology (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(7):0751402

李景镇. 转镜式超高速成像技术进展(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7):0751402

转镜式超高速成像技术进展(特邀)

李景镇

(深圳大学 物理与光电工程学院 光子工程研究所, 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘 要: 转镜式超高速成像摄影机具有大画幅、大画幅数、高空间分辨率、宽光谱波段, 以及摄影频率宽广和使用可靠方便的优势, 在微秒级成像领域具有重要应用, 至今依然没有任何一种电子类摄影机在画幅数、摄影速度、空间分辨率和动态范围诸方面能和转镜式摄影机相匹敌。本文论述了转镜式超高速摄影技术在其信息论的拓扑、转镜动力学的探索、转镜摄影机现代设计理论和“皇冠上的珍珠”等待型分幅扫描同时成像系统研究诸方面的进展, 期望能诠释中国何以能成为转镜式超高速摄影技术的强国。

关键词: 高速摄影时空信息量; 时间信息量; 分幅摄影; 扫描摄影; 等待型; 同步型; 转镜式成像原理

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225107.0751402

0 引言

1964年10月16日15时, 新疆罗布泊的荒漠上空冲天而起的巨大蘑菇云, 向世界宣告中国第一颗原子弹爆炸成功了, 中国人民打破了超级大国的原子弹垄断, 中国人民从此自立于世界科技之林! 中国科学院西安光学精密机械研究所(西光所)研制的ZDF-20型高速摄影机拍摄到原子弹引爆后 $360\ \mu\text{s}$ 黄金时间里的72幅珍贵照片^[1]。该转镜摄影机被称为“20万次/秒的半周等待型转镜摄影机”, 是西安光机所的开山之作, 并逐渐成为我国转镜式超高速成像技术研究中心的奠基石。

转镜式超高速成像技术具有大画幅、大画幅数、高空间分辨率、宽光谱波段、摄影频率宽广和使用可靠方便的优势, 在爆轰物理、激波物理和爆炸力学等领域的研究中处于主导地位, 同时也是研究高温等离子体物理、再入段物理、高密度能量传递、弹导和穿甲、爆炸碎裂、高电压放电、喷气燃料化学和高超音速风洞等超快过程的不可或缺的重要设备^[2-4]。

20世纪以来, 电子类超高速成像技术得到了长足发展, 转镜式超高速成像理论和技术取得突破性进展。转镜的设计理论和驱动技术的新进展、摄影机无原理误差的新设计理论、照明技术的不断提升、固体成像器件的应用、可外触发同步的大速比光学加速偏转器的研制成功使摄影频率和时间分辨率提高一个量级。FRANK A M^[5]通过对比测试实验, 得出“转镜摄影机在微秒级成像领域一直是主战设备, 至今依然没有任何一种电子摄影机在画幅数、摄影速度、空间分辨率和动态范围诸方面能和转镜式胶片摄影机相匹敌”的结论。LAI C C^[6]开展了脉冲转镜扫描摄影机和电子变像管扫描摄影机对比测试实验, 结果表明, 在纳秒时间分辨扫描成像领域, 脉冲转镜扫描摄影机的所有关键性能指标均优于变像管扫描摄影机”。但变像管超高速摄影至今难以达到大画幅、大画幅数, 这和高空间分辨率有关, 也和自分幅固体光电成像技术的发展不成熟有关, 无论是“就地存储”(IS1S)型^[7], 还是光学分幅型CCD超高速摄影机^[8-9], 要达到高的空间分辨率、大的画幅和大的动态范围, 目前尚有技术上的难题要克服。

我国超高速转镜成像技术在理论研究、关键器件研究、光学系统研究、相机结构研究等方面的成果在国

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(No. 61827815)

通讯作者: 李景镇(1940—), 男, 教授, 主要研究方向为瞬态光学成像技术和光子学。Email: lijz@szu.edu.cn.

收稿日期: 2022-06-27; 录用日期: 2022-07-20

<http://www.photon.ac.cn>

际上有举足轻重的地位,如分幅成像摄影机 ZDF-20 型、ZDF-250 型、ZDF-50 型、ZDF-180 型、ZKF-250 型、ZKF-500 型、ZKF-2000 型和 S-150 型等;扫描成像摄影机 ZSK-29 型和 WPG-30 型;斜入射等待型分幅扫描同时成像记录仪 SSF 分幅扫描同时成像摄影机。就控制方式来分,有同步工作方式摄影机和等待工作方式摄影机。还有与其它技术相结合构成的转镜全息摄影、冲击转镜摄影、转镜网格摄影、转镜焦平面快门摄影和转镜扫描光谱仪等^[10-13]。

等待型分幅扫描同时成像记录仪是一种成像功能完善的时空信息精密测试系统,能提高测量精度,避免原理性信息丢失和误判,但难度大,在超高速转镜式成像领域素有“皇冠上的珍珠”之称^[14-16]。分幅扫描同时成像技术经历过不同的发展阶段:从同一时间基准、不同空间基准阶段,到同一空间基准、不同时间基准(二套高速转镜系统或者二台摄影机)阶段,最后发展到同一时间基准、同一空间基准阶段;从记录模式上,由同步型发展到等待型。我国研制的等待型分幅扫描同时成像记录系统最为精密、复杂,没有原理性信息丢失和结构性原理误差,具有一定的实用价值。

1 高速摄影(成像)信息量

高速摄影的先驱,德国科学家 SCHARDIN H 根据光学信息论中的 Lause-Lukosz 自由度不变定理^[17-18],建立了高速摄影的信息论,推导了高速摄影时空信息量的方程式,从而解决了 19 世纪高速摄影领域评价混乱的“战国”局面,为高速摄影学术界指出了高速摄影性能的评价标准和高速摄影工作者的努力方向。SCHARDIN H 时空信息量的方程式表示为^[19-21]

$$\begin{cases} \mathfrak{S} = \mathfrak{S}_R \mathfrak{S}_T = F \cdot n^2 \cdot \ln \kappa \cdot f_\omega \cdot g^{2/3} \\ \mathfrak{S}_T = f_\omega \cdot g^{2/3} \\ \mathfrak{S}_R = F \cdot n^2 \cdot \ln \kappa \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathfrak{S} 是高速摄影系统的时空信息总量,即高速摄影机单位时间内传递和记录的比特数,也就是时空信息率,它是评估各类超高速摄影技术性能的最基本依据,具有普适性。时空信息率由时间信息量 \mathfrak{S}_T 和空间信息量 \mathfrak{S}_R 两部分组成。

时间信息量 \mathfrak{S}_T 表达式中高速摄影机的摄影频率 f_ω , 是表征摄影机时间分辨本领的基本参量。为了准确描述时间信息量, SCHARDIN H 在考虑取样时间误差和大量试验的误差统计规律之后,推导了时间信息修正因子 $g^{2/3}$, g 是分幅时间 t_f 和有效曝光时间 t_e 的比值。在高速摄影机中, g 值一般 ≥ 1 , g 愈大,说明摄影机中单幅图像曝光时间愈短,则时间取样误差小,图像的运动模糊也小;但 g 也不能太大,太大会丧失时间信息量。 g 小于 1, 意味相邻两画幅会产生时空信息重叠,例如 CUP 类飞秒成像技术^[22-24]中的 g 值已达 0.17, 则时间信息修正因子 $g^{2/3} = 0.31$, 时空信息严重重叠,严重影响结果的分析价值。

空间信息量 \mathfrak{S}_R 是单幅图像的空间带宽积 $F \cdot n^2$ 和单像素(单信道)信息量 $\ln k$ 的乘积, $k = 1 + m$, m 是信息级,一般指信噪比。式(1)中 $F = b \times h$ 是图像的面积, b 为图像沿时间方向的宽度; h 是图像空间方向的高度; n^2 是图像的空间分辨率(时间和空间方向的空间分辨率相等的情况)。

用 \mathfrak{S} 综合评价各种原理高速摄影机的质量,既反映了摄影机记录高速信息的能力,也评估了摄影机的综合设计制造水平。

1.1 转镜式超高速摄影信息量和 Schardin 极限

Lause-Lukosz 自由度不变定理的内涵是一个动态光场系统的总自由度不能无限增大,是有限的、不变的、守恒的,各个自由度的变化是相互制约的。作为特例,一个光学系统所能传递(记录)空间信息量(空间带宽积)受该光学系统的 Lagrange 不变量(即折射率、物高和孔径角三者的乘积)制约。对于转镜式超高速摄影系统的时空信息总量则受 Schardin 极限的制约^[25-26]。

转镜式超高速分幅成像原理是转镜式超高速成像技术的理论基础,是一种底片静止的成像技术,由 MILLER C D^[27]提出,成像时,中间像面要成在转镜附近,入瞳经转镜后与中继透镜入瞳共轭;转镜扫描时,光学快门依次扫过中继透镜入瞳,起到时序曝光和分幅功能;但是,转镜的厚度在曝光时间内会产生像移和离焦,影响成像质量,这是 Miller 原理固有的误差。Schardin 极限阐明了转镜式超高速成像的成像频率 f 、时间方向的空间分辨率 n 和时间方向上的画幅尺寸 B 三者之间的制约关系;三者之间的乘积取决于转镜边缘

线速度 V 和光波波长 λ , 转镜边缘线速度受到转镜材料、加工工艺和处理、转镜截面形状和转镜横向结构的制约。利用光学加速技术可以突破 Schardin 极限, 极限公式为

$$I = Bnf = k \frac{4V}{\lambda} \quad (2)$$

式中, k 是光学加速倍数, 取决于光学加速的方式, 加速倍数一般在 2~200 之间。光学加速是提高转镜式超高速摄影信息量的主要技术, 一直是专业科技工作者研究的课题。

1.2 光学加速

到目前为止, 光学加速技术有三种类型: 用旋转多面体反射器的多次反射, 用楔隙形反射器的多次反射和预偏转曲面反射放大技术。光学加速的普适方程为

$$\Omega = 2N \frac{\partial \gamma}{\partial \varphi} \omega \quad (3)$$

式中, Ω 是出射光束的角速度, ω 是转镜的角速度, N 是光束在转镜镜面上反射次, $d\gamma/d\varphi$ 是预偏转曲面反射放大倍数, 光学加速倍数 $k = \Omega/\omega$ 。

1.2.1 旋转多面体反射镜的多次反射

多面体反射镜与静止反射镜的多种组合会产生不同的加速比。典型的组合方式有八面体转镜和静止反射镜的三种组合^[28], 反射的次数根据需要可以设计成 2 次、4 次、6 次, 但是反射次数多的结构设计有较大的难度; 另一种是九面体转镜、准直透镜和三棱镜组合, 反射次数为 2, 是一种相对简单又有实用价值的组合^[29]。如果进一步增加光学加速的倍数就要用楔隙形反射器的多次反射和预偏转曲面连续反射。

1.2.2 楔隙形多次反射

楔隙形多次反射有两种形式, 见图 1。图 1(a) 所示的光学加速器是动镜与静镜相结合的楔形间隙多次反射器, 一般采用反方向旋转的双动镜。图中固定反射镜是入射光束在楔形空间里完成两个来回反射加速的关键元件, 反射次数 $N=16$, 光学加速倍数 $k=2N=32$, 反射次数和入射光束的入射角、楔形角的比值有关。这种楔隙形多次反射的光学加速把转镜式超高速扫描摄影机推到一个新的高度, 与纳秒级变像管扫描摄影机相比, 有灵敏度更高、线性动态区域更广、空间对比度更细、时间分辨率更高、信息容量更大、适应性更好等优点^[6]。

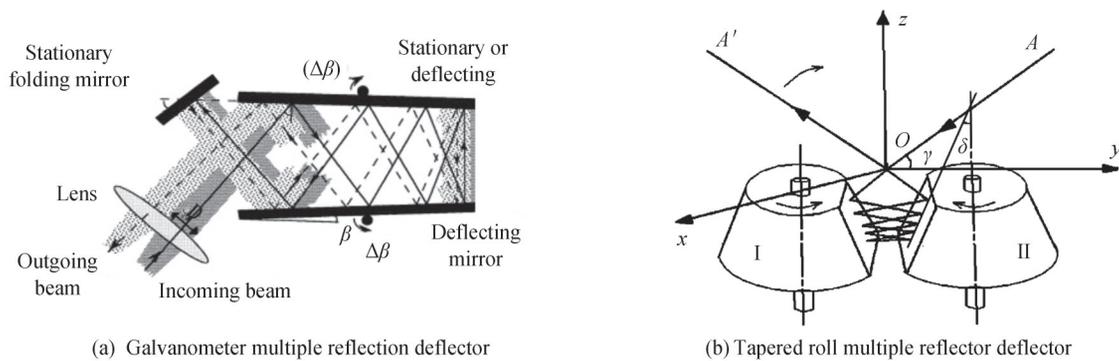


图 1 楔隙形多次反射器
Fig.1 Wedge gap multiple reflector

图 1(b) 是两个圆锥对辊式多次反射偏转器, 楔隙形, 反射次数取决于入射光束入射角 γ 和圆锥角 δ 的比值, 反射次数 $N=10$ 。该光学加速技术可把摄影频率提高到 32×10^6 fps, 不足之处是像旋, 但 10 次反射的情况下对于 65° 的工作角转镜仅转动 4.5° , 所造成的测量误差不超过 0.3%。

1.2.3 预偏转曲面反射放大技术

图 2 是对微小偏转角进行放大的光学加速系统原理图。利用微小偏转使光束入射到曲面的不同部位, 从而实现光学加速, 偏转加速倍数达到百倍以上^[30]。图 2 中的曲面是正圆柱面, 光束偏转放大系数 β 为

$$\beta = dy/d\phi = 2 \left(\frac{L+r}{r} \right) \frac{\cos \phi}{\cos \theta} + 1 \quad (4)$$

式中, r 是圆柱面半径。从式中可知, 放大系数 β 不是常数; 如果 β 是常数, 则柱面的准线要由超越曲线来描述, 应满足微分方程

$$\frac{dx}{dy} = \tan \left[\left(\frac{\beta - 1}{2} \right) \arctan \left(\frac{y}{x} \right) \right] \quad (5)$$

旋转多面体反射器、楔隙形反射器和预偏转曲面反射放大技术的光学加速被应用于转镜式超高速分幅摄影机、扫描摄影机和光电偏转记录装置。多次反射加速和偏转放大加速提高了入射光束的偏转速度和光学时空信息总量。但多次反射加速结构复杂、成本高, 而偏转放大加速能把微小偏转角放大 1~2 个数量级, 且没有任何机械转动部件, 结构简单, 更适合配合光电偏转和 Goos-Hänchen 位移之类偏转扫描装置。

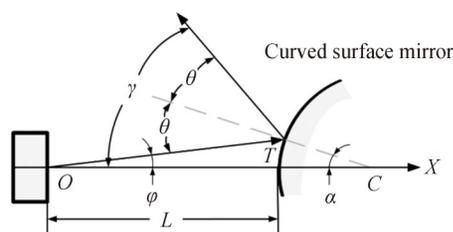


图2 电光偏转曲面放大原理
Fig.2 Principle diagram of curved mirror amplification of electro-optic deflection

2 转镜设计理论进展

转镜是转镜摄影机的核心, 研究其设计理论及其动力学特性非常重要, 包括转镜扫描理论(镜面变换)、转镜的强度理论、转镜的变形理论, 转镜的共振设计和转镜外形尺寸的最佳设计^[31-41]。本文仅讨论转镜扫描理论(镜面变换)、转镜的强度理论、转镜的变形理论的研究进展。

转镜既是超高速摄影系统中的成像元件, 又是超高速形成器件, 它的表面质量和镜面变形影响成像质量, 转镜的边缘线速度决定了高速摄影系统的性能。在 Miller 型分幅摄影系统中, 转镜起到场镜和高速扫描反射镜的双重作用, 因而对转镜表面光洁度要求较高; 转镜的镜面动态横向变形是二阶小量, 仅对像面弯曲、畸变有一定的贡献。在转镜扫描摄影系统中, 转镜起到投影镜和高速扫描反射镜的双重作用, 镜面的动态横向变形直接影响成像质量, 因而探索小变形的转镜材料和小变形的转镜截面形状和结构, 一直是人们研究的课题。

转镜式超高速摄影机的信息量取决于系统的主波长和转镜的边缘线速度(如果采用光学加速, 还要考虑光束在转镜面上的反射次数), 后者与转镜的材料、垂轴截面形状、转镜的横向结构和转镜的超高速驱动水平有关。

超高速转镜一般采用高强度钢、钛合金和高强度挤压铍制造。但是, 这三种材料均有其不足, 所以要探索新材料和新的转镜横向结构。实验和理论研究表明, 高强度铝合金是最佳选择。

2.1 高强度铝合金转镜的动力学特性

高强度钢做转镜材料, 需对材料进行规范淬火才能取得 $RC > 60$ 的高硬度, 才易于获得光学镜面; 但淬火会使材料变脆, 强度下降, 极限破坏速度下降 20%~30%。钛合金转镜虽然可以提高转镜的极限速度, 但是在机械加工中易产生严重的冷作硬化现象, 至使材料的疲劳强度下降; 同时, 钛合金转镜需要用特殊的工艺才能获得优良的光学镜面。高强度挤压铍的比强度、比刚度最高, 泊松比最小, 是理想的转镜材料。但是铍有剧毒、性脆, 机加工中有很深的破坏层和很大的残余应力, 光学镜面难以加工, 加工成本相当高, 一般用在高性能的转镜型扫描摄影机。西安光机所最先采用高强度铝合金做转镜材料。

高强度铝合金具有工艺性好、极限转速高、变形系数不大、驱动功率小和成本低的优点, 但光学镜面较难获得。只是在解决了光学镜面的研、抛、镀和钢轴颈的镶嵌技术之后, 高强度铝合金转镜才能在转镜型超高速摄影系统中发挥优势, 成为分幅摄影机的最佳选择; 随着小变形转镜截面结构研究的进展, 它将会取代挤压铍转镜, 成为扫描摄影机的主战转镜。

2.1.1 转镜的动态应力和极限边缘线速度

文献[36]研究了矩形截面和等腰三角形截面转镜动态应力和极限边缘线速度, 得出了和实验结果相近

的极限边缘线速度计算公式,即

$$\begin{cases} V_{\text{rec}} = \sqrt{\frac{2\sigma_b}{\rho}} = 1.414 \sqrt{\frac{\sigma_b}{\rho}} \\ V_{\text{isos}} = \sqrt{\frac{3\sqrt{2}\sigma_b}{\rho}} = 2.06 \sqrt{\frac{\sigma_b}{\rho}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, σ_b 为材料的极限强度, ρ 为材料的密度。如果用 BoSi_2CrA 做转镜材料,可计算出 $V_{\text{rec}}=633 \text{ m/s}$, $V_{\text{isos}}=922 \text{ m/s}$,和用严格的弹性力学计算的结果偏离11%(第I强度理论)。

对于横截面为正交多边形的转镜可以推导出较为准确的极限速度 V_{max} ,其解析表达式为

$$V_{\text{max}} = \sec(\pi/s) \sqrt{\frac{\sigma_b}{\rho[(3-2\nu)/8(1-\nu) + I_s]}} \quad (7)$$

$$I_s = \frac{s}{6\pi} \left[\frac{\sin(\pi/s)}{\cos^2(\pi/s)} + \ln \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2s}\right) - \frac{2\pi}{s} \right]$$

式中, s 为正多面体边数, I_s 可称为多面体截面形状修正系数, ν 为材料的泊松比。和用严格的弹性力学理论进行计算分析相比,式(2)的计算有较大的偏离,特别是三面体转镜有10%~20%偏离;同时,多面体横截面的不对称性有利于极限边缘线速度的提高:三面体转镜的是十二面体转镜的两倍。

2.1.2 高强度铝合金转镜横向结构对极限强度、极限速度的影响

正三角形铝合金转镜的尺寸是 $17 \times 32.5 \text{ mm}^2$,转速为 $50 \times 10^4 \text{ r/min}$ 时,无中心通孔三面体转镜中心截面的最大应力为 $0.122 \times 10^9 \text{ Pa}$,极限应力状态下的极限边缘线速度为 1240 m/s ;有中心通孔三面体转镜中心截面的最大应力为 $0.972 \times 10^8 \text{ Pa}$,而中心孔周边的应力分布不均,最大值等于 $0.616 \times 10^8 \text{ Pa}$,极限边缘线速度为 1350 m/s ,较无中心孔情况高出9%。转镜有中心通孔是为了镶箍钢轴之用。实验表明,钢轴和中心孔的配合采用过渡配合、紧配合是有害的。进一步的计算表明,中心孔的大小影响最大应力大小,转镜应力不严格符合和转速平方成正比的结论。

2.1.3 高强度铝合金转镜的动态横向变形

对于转镜型扫描摄影系统,转镜的动态变形直接影响成像质量。转镜的动态横向变形,不仅与材料泊松比 ν 、比刚度 $\eta = E/\rho$ 和工艺规程有关,还和转镜的截面形状、转镜横向的质量分布有关,且材料的泊松比是影响转镜横向变形的主要因素;同样条件下,铍转镜的横向变形最小,有量级差别;转镜截面形状、材料的比刚度不是构成转镜横向变形差别的决定因素;转镜的横向质量分布为研究小变形的非铍转镜开辟了一条新路。

在低速运转和矩形截面转镜情况下,可以用圆柱面来近似转镜镜面的动态变形,但在一般情况下,这种近似大大偏离实际情况。俄国学者ТРАЧУК В С深入探讨了高速转镜镜面的弹性变形,得出了有指导意义的结论^[33],然而尚未涉及到转镜横向质量分布对其横向变形的影响。

ТРАЧУК В С认为,多面体转镜动态弹性变形,可用严格意义上的弹性力学方程进行计算,经简化为

$$\nabla^4 F(r, \theta) = \frac{2(1-2\nu)}{1-\nu} \rho \omega^2 \quad (8)$$

式中, r, θ 为极坐标, $F(r, \theta)$ 为应力函数, ν 为泊松比, ρ 为材料的密度, ω 为转镜的角速度。式(8)的解包括两部分,即

$$F(r, \theta) = f(r, \theta) + \phi(r, \theta) \quad (9)$$

式中, $f(r, \theta) = (1-2\nu)\rho\omega^2 r^4 / 32(1-\nu)$ 为特解,而双调和方程 $\nabla^4 \phi = 0$ 的通解可表示为

$$\phi(r, \theta) = \sum_{m=1}^n A'_m r^{sm} \cos(sm\theta) + \sum_{m=0}^{n-1} B'_m r^{(sm+2)} \cos(sm\theta) \quad (10)$$

式中, s 为多面体转镜的面数, A'_m, B'_m 为多项式系数。在式(10)时应注意函数 $\phi(r, \theta)$ 相对于转角 $2\pi/s$ 具有对称性,转镜外表面的法向和切向应力均为零,即可在解出应力的基础上求出镜面横向弹性变形的分量 u_r, u_θ ,即

$$\begin{cases} u_r = \left[(2\nu - 1)\eta^3 - \sum_{m=1}^n A_m sm\eta^{sm-1} \cos(sm\theta) + \sum_{m=0}^{n-1} B_m (2 - sm - 4\nu)\eta^{sm+1} \cos(sm\theta) \right] \frac{(1+\nu)\rho\omega^2 a^3}{(1-\nu)8E} \\ u_\theta = \left[\sum_{m=1}^n A_m sm\eta^{sm-1} \sin(sm\theta) + \sum_{m=0}^{n-1} B_m (4 - sm - 4\nu)\eta^{sm+1} \sin(sm\theta) \right] \frac{(1+\nu)\rho\omega^2 a^3}{(1-\nu)8E} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\eta = r/a$, a 为转镜面的半宽度, E 为材料弹性模量, A_m 、 B_m 分别取决于 A'_m 、 B'_m 和镜体参数。根据式(11), 文献[34]给出了转镜镜面的动态弹性变形与多面体边数 s 的关系曲线族。得出同一材料同一镜面尺寸情况下, 六面体($\nu = 0.25$)、七面体($\nu = 0.30$)、八面体($\nu = 0.35$) 变形最小的结论; 同时还给出了转镜镜面动态弹性变形最大值与材料泊松比 ν 的关系曲线族, 得出不同多面体边数所对应最小变形的泊松比, 但四面体对应的最佳泊松比为零, 三面体没有最佳 ν 值。ТРАЧУК В С 的方程没有考虑转镜横向质量分布对其弹性变形的影响, 因此难以指导探索结构性小变形转镜的计算。

文献[38]基于弹性力学空间问题的基本理论与有限元计算技术, 建立了转镜静力学分析的数值方法。利用该方法精确计算了三、四、五、六、七、八面体铝合金转镜在相同镜面尺寸和相同边缘线速度下的镜面变形及其应力分布, 得出了转镜镜面变形量及内部应力分布的定量数值关系: 转镜镜面变形规律与镜面数目有直接关系, 三面体和四面体转镜镜面变形为内凹, 而五面体及以上转镜镜面变形则为外凸, 并且变形量均在相同的量级; 最大应力区域靠近轴孔处。

同时, 在转速为 50×10^4 r/min 时, 无中心通孔三面体转镜, 中心垂轴截面的镜面横向最大变形量在中心处, 为 4.866 mm, 沿轴向镜面的横向变形最大波动量为 0.5 mm; 有中心通孔三面体转镜, 中心垂轴截面的横向最大变形量在中心处, 为 3.5 mm, 比无中心孔的小, 轴向截面内镜面的横向变形最大波动量约为 0.5 mm, 和无中心孔时几乎无差别。有中心孔能在一定程度上改善转镜镜面的动态变形; 而只有改变转镜的横向质量分布, 才可能得到和铍转镜一样小的变形, 才可能用高强度铝合金转镜来代替昂贵、有毒的铍转镜。

2.2 蜂窝状横向结构铝合金转镜的动态强度及横向变形理论

转镜的动态应力和动态横向变形, 不仅与转镜的材料、处理工艺和截面形状有关, 而且与它的横向结构有关。基于三维弹性力学和动力学, 用数值分析和模拟方法建立有限元模型, 根据实际结构和材料, 得出了有指导价值的计算结果。分析表明, 采用静力学方法来分析转镜强度和模拟其横向变形是有效的, 结果可靠, 转镜静力学特性直接反映了高速转镜的光学性能。以 SSF 成像记录仪三面体高强度铝合金转镜为例进行计算: 镜面尺寸为 17.325×32.5 mm², 转轴轴孔直径为 5 mm, 最高转速为 50×10^4 r/min, 高强度铝合金弹性模量为 0.725×10^{11} Pa, 泊松比为 0.3, 密度为 2 700 kg/m³, 拉伸强度为 700 MPa; 铍的弹性模量为 3.0×10^{11} Pa, 泊松比为 0.02, 密度为 1 800 kg/m³, 拉伸强度为 700 MP; 三面体转镜的蜂窝状结构由一系列有序布局的大小不同的通孔组成, 分别对称于三角形的三条角平分线, 每个通孔的轴线平行于转镜的轴线。SSF 成像记录仪的蜂窝状结构三面体高强度铝合金转镜的内应力分布、应力云图和应力等值线图如图 3 所示。

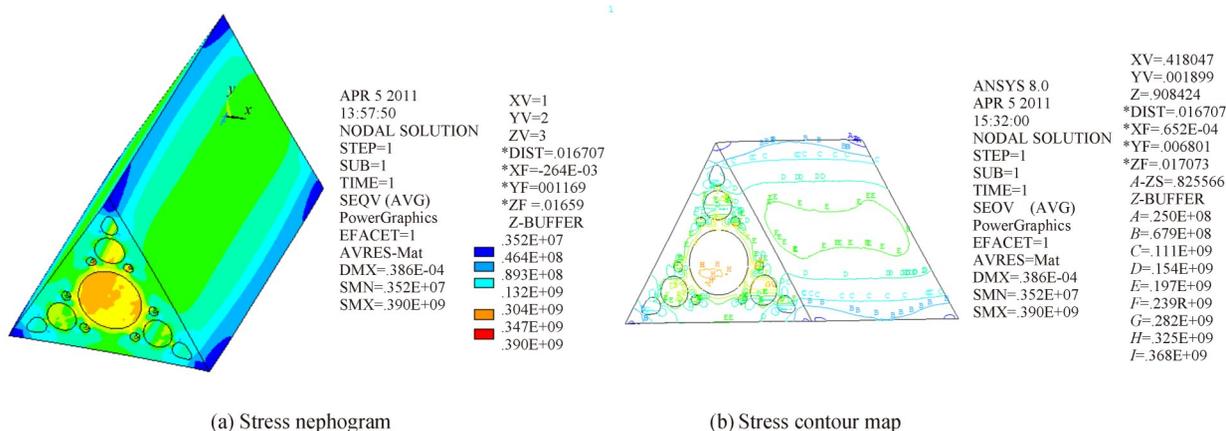


图3 蜂窝状铝转镜的应力分布
Fig.3 Stress distribution of aluminum rotating mirror

转镜轴向横向变形的比较和二次对撞爆轰实验扫描图像如图4所示。由图可知,蜂窝状结构转镜的动力学特性有显著改善:轴孔附近应力状况改善,转镜横向最大变形量为565.6 nm,转镜最大应力为368 MPa,和铍转镜属于同一量级:横向变形远小于无横向结构的高强度铝合金转镜的3.445 μm ,最大应力小于无横向结构的414 MPa。实验证明了转镜横向变形的理论和数字模拟的正确性。分别用蜂窝状铝转镜和无蜂窝结构的铝转镜进行两次对撞爆轰实验,实验条件完全相同,蜂窝状铝转镜的扫描像质量明显优于无蜂窝结构铝转镜的扫描像质量^[42]。

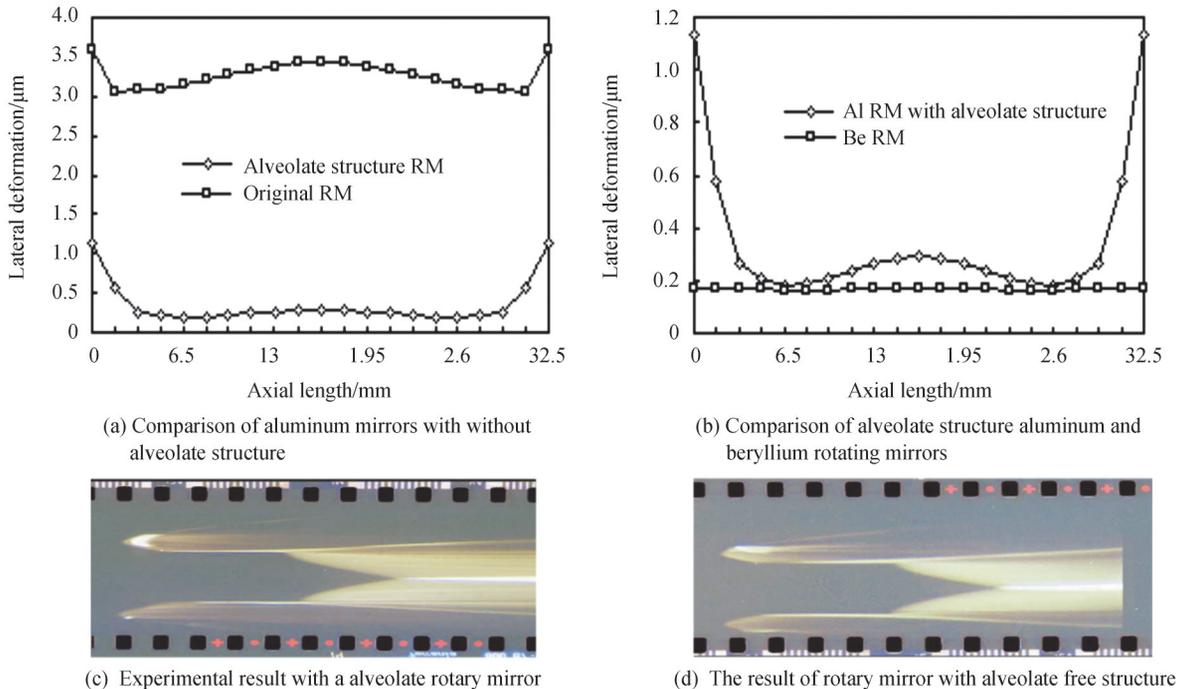


图4 蜂窝状铝转镜的横向变形

Fig.4 Transverse deformation of alveolate aluminum mirror

3 超高速转镜摄影机设计理论进展

我国一直进行超高速转镜摄影技术的理论研究^[43-45],对Miller分幅摄影系统的研究最为深入,见图5。由于转镜有一定的厚度,转镜扫描形成了三条Pascal蜗线,记录像面蜗线、中继透镜前主面环蜗线及其出瞳光阑环蜗线。长期以来,人们仅在光轴垂直入射的框架下对这三条曲线进行了深入研究(经典设计理论只考虑两条曲线),建立了Miller型超高速分幅系统的经典设计理论,即用圆来代替Pascal曲线理论,该理论分离焦设计理论、等速设计理论和共轴设计理论。研究表明,这些设计理论都有原理误差,只能做到误差的最小化,而且任何两种设计理论都不能同时在一个系统中实现,但是可以根据系统的具体要求给出最佳设计。现代设计理论是无原理误差的完美设计,可以同时实现无离焦图像记录、所有中继透镜都能同轴成像和出瞳环弧面上的等速扫描。

3.1 经典设计理论-正入射二维设计理论

我国经典设计理论发展较为成熟,可以根据系统的具体要求给出最佳设计^[46-48]。西安光机所研制的转镜式超高速摄影机ZDF-20型、ZDF-250型、ZDF-50型、ZDF-180型等分幅摄影机,ZKF-250型、ZKF-500型、ZKF-2000型可控分幅摄影机和ZSK-29型可控扫描摄影机是经典设计的成果。图5中中间像与y轴重合,转镜的旋转中心是0点 (x_0, y_0) ,转镜的半厚是r。如果仅研究轴上点,当转镜旋转时,像点的坐标方程可写成

$$\begin{cases} x = (Q + x_0) \cos 2\varphi + y_0 \sin 2\varphi + (x_0 + 2r \cos \varphi) \\ y = (Q + x_0) \sin 2\varphi - y_0 \cos 2\varphi + (y_0 + 2r \sin \varphi) \end{cases} \quad (12)$$

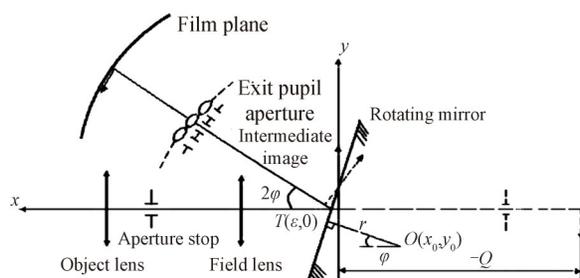


图5 Miller型垂直入射超高速分幅系统原理

Fig. 5 Schematic diagram of Miller type vertical incidence ultra-high speed framing system

即Pascal蜗线方程,式中, φ 是转镜的转角; Q 是坐标原点到转镜镜象的距离,镜象可以是最终像面的,亦可是中继透镜的前主面的,还可以是中继透镜出瞳光阑的。

3.1.1 离焦设计理论

反射方向上Pascal蜗线和代替圆之间的距离 δ 为像面离焦,离焦在工作角内愈小愈好。考虑出发点和具体采用的方法不同,又可分为三种:

1)工作角范围内离焦平方的积分值最小原则。即令

$$\frac{\partial}{\partial C} \left(\int_{\varphi_0}^{\varphi_k} \delta^2 dy \right) = 0 \quad (13)$$

式中, x_c, y_c, R 为代替圆的圆心坐标和半径, φ_0 是起拍角, φ_k 是终拍角。但该方法因为只能用数字解,难以得出解析解,很少用。

2)三点圆法。在Pascal蜗线上找出合适的三个点,建立三个方程,即可解出 x_c, y_c, R 。该方法简单有效,在多种型号超高速摄影机的研制中得到了应用。

3)多点法(最小二乘法)。可得到较为理想的代替圆,是离焦设计理论中比较完备的一种方法。把Pascal蜗线上的多个点(N 个点)的坐标 (x_i, y_i) 代入到圆的普遍方程里,得到 N 个线性方程组

$$x_i^2 + y_i^2 + A_1 x_i + A_2 y_i + A_3 = \delta_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (14)$$

式中, $\delta_1, \dots, \delta_N$ 对应Pascal蜗线不同点的离焦。根据最小二乘法原理,系数 A_1, A_2, A_3 的最佳值是在 δ_i 的平方和为最小情形得到,即

$$\arg \min (f(A_1, A_2, A_3)) = \arg \min \left[\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + A_1 x_i + A_2 y_i + A_3)^2 \right] \quad (15)$$

求出 A_1, A_2, A_3 , 代替圆参数 $x_c = A_1/2, y_c = -A_2/2, r = (x_c^2 + y_c^2 - A_3)^{1/2}$ 。该算法实际是积分算法的离散值解法,具有普遍性。

研究表明,此类算法只是光学系统对底片的相对孔径足够大时(即孔径数足够小)才有实际价值(例如孔径数小于12),因为“在工作区内离焦量尽可能小”的原则与共轴设计、等速设计相矛盾。

3.1.2 等速设计理论

在转镜经典扫描理论的研究中,等速扫描不能实现,只能做到速度的不均匀性达到最小。在研究等速设计有关理论问题时,均假设转镜旋转速度在工作角范围内是恒速。拍摄频率的不均匀性是光学快门扫描半径长度变化引起的,再加上中继透镜代替圆所产生的中继透镜放大率的不均匀性,在大工作角的情况下(例如等待型、三面体转镜的情况,工作角是 $2 \times 120^\circ$),可造成判读误差达到3%~4%。显然是不允许的。

厚转镜扫描时在中继透镜代替圆上不能实现等速扫描,但可以做到使速度的不均匀性达到最小。中继透镜代替圆上的扫描速度(对于轴上点)可描述为

$$V = 2\omega \left[(x_0 + Q_r)^2 + y_0^2 + r^2 + 2r(x_0 + Q_r) \cos \varphi + 2ry_0 \sin \varphi \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

式中, $\omega = d\varphi/dt$ 转镜的角速度; Q_r 是中继透镜转镜镜象的横坐标。由于 $V = V(\varphi)$ 基本是单调函数,可以用工作角范围中点的角度 φ_m 所对应的速度 V_m 作为评价速度不均匀性的参考值(亦可用工作角范围内的平均

速度作为速度不均匀性的估计标准)。拍摄频率不均匀性 $e = (V - V_a) / V_a$ 。

$$V = 2R\omega \left[1 - \frac{(x_0 - x_c) \cos 2\varphi + (y_0 - y_c) \sin 2\varphi + r \cos \varphi}{\left[R^2 - \left[(x_0 - x_c) \sin 2\varphi + 2(y_0 - y_c) \sin^2 \varphi + 2r \sin \varphi + y_c \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (17)$$

式中, R, x_c, y_c 分别为代替圆半径和圆心坐标。

分析表明, 等速设计可使速度的不均匀性降低到 1% 以下, 但仪器共轴性却遭到了一定程度的破坏。

3.1.3 共轴设计理论

共轴设计是指中继透镜光轴(前主面代替圆的半径方向)与相应的反射光轴的夹角 ψ 在工作角范围内最小。实验表明, ψ 角大于 $60'$ 将对中继透镜的像质造成影响, 会使整机摄影分辨率下降 $2 \sim 3$ lp/mm。 ψ 角可表示为

$$\sin \psi = \frac{(\epsilon - x_c) \sin 2\varphi + y_c \cos 2\varphi}{R} \quad (18)$$

一般情况下, ψ 角不大于 $120'$, 可以用 ψ 角近似 $\sin \psi$ 。根据工作角内 ψ 角平方和最小原则, 可求出符合共轴性原则的中继透镜代替圆参数 x_c, y_c, R 。

计算表明, 从共轴角度出发所设计的中继透镜代替圆, 其最大 ψ 角约在 $8'$ 左右, 较离焦设计和等速设计时大大降低, 共轴性提高了一个量级; 共轴性设计保证了中继透镜、球罩的共轴性(真空室球罩的中心一般和中继透镜代替圆的中心重合), 但是拍摄频率的均匀性有较大的降低, 离焦量有一定的增加。

3.1.4 最佳设计理论

在经典设计理论中, 同一代替圆不能同时满足离焦最小原则、拍摄频率的不均匀性最小原则和共轴性最好原则, 只能根据实际光学性能参数, 折衷考虑三者要求, 以得到比较满意的结果^[12]。为此, 代替圆的中心 x_c, y_c 应满足

$$\begin{cases} x_c = \mu x_{cd} + \nu x_{ce} + \lambda x_{cc} \\ y_c = \mu y_{cd} + \nu y_{ce} + \lambda y_{cc} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $x_{cd}, y_{cd}, x_{ce}, y_{ce}, x_{cc}, y_{cc}$ 分别表示单独考虑离焦最小原则、拍摄频率不均匀性最小原则和共轴性最好原则所得到的中继透镜代替圆的参数; μ, ν, λ 为三者的权重系数, 其和为 1, 要根据使用要求和光学系统的性能参数选用。

转镜式超高速摄影机的经典设计理论虽有一定的优越性, 但存在原理误差, 同时在一个代替圆上, 离焦最小、拍摄频率不均匀性最小和共轴性最好三者不能兼得, 也不能两两兼得, 只能折衷。

3.2 现代设计理论-斜入射无原理误差设计理论

为了使设计理论具有普遍性, 设计维度从二维提到三维, 用斜入射代替正入射, 可以实现无离焦成像、等速扫描和所有中继透镜都能同轴成像^[49-52]。斜(光束)入射易于实现等待型成像系统, 可缩小转镜时间方向尺寸, 如果采用斜入射三面体转镜的双入口光学等待原理, 转镜时间方向尺寸可以缩小 48%, 为大幅度提高超高速成像光学信息量奠定基础。

3.2.1 斜入射镜面变换方程

斜入射见图 6, 三面体转镜绕 z 轴旋转, 斜入射光轴在 XOZ 坐标平面上且与 x 轴成 θ 角。

若反射点 T 和物点 A 的坐标是

$$\begin{cases} x_A = -a, y_A = 0, z_A = (x_i + a) \tan \theta \\ x_T = r / \cos \varphi, y_T = 0, z_T = -(r / \cos \varphi - x_i) \tan \theta \end{cases} \quad (20)$$

经转镜反射后的轴上像点 A' 轨迹方程为

$$\begin{cases} x'_A = a \cos 2\varphi + 2r \cos \varphi \\ y'_A = a \sin 2\varphi + 2r \sin \varphi \\ z'_A = (a + x_i) \tan \theta \end{cases} \quad (21)$$

式中, x_i 是常数, $-a$ 是 A 点的 x 坐标。式(21)表征了像点 A' 的成像轨迹, 是一条 Pascal 蜗线, 记录介质的支

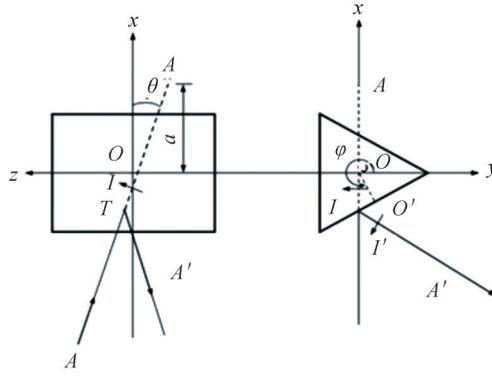


图6 斜入射示意图

Fig. 6 Schematic diagram of oblique incidence

承柱面以此 Pascal 蜗线为准线,即能实现无像面离焦记录。该方程称为斜入射无离焦记录曲线方程。

3.2.2 斜入射的同轴成像方程

经转镜反射后每个中继透镜前主点的位置坐标方程(即支撑中继透镜的柱面方程)为

$$\begin{cases} x'_H = a_H \cos 2\varphi + 2r \cos \varphi \\ y'_H = a_H \sin 2\varphi + 2r \sin \varphi \\ z'_H = (a_H + x_i) \tan \theta \end{cases} \quad (22)$$

式中, a_H 是中继透镜前主点的转镜镜像的 x 坐标。实际上是根据像点 A' 轨迹布置记录介质(胶片或者 CCD)的位置和中继透镜前主点的位置坐标方程布置每个中继透镜的空间位置,在二次像的位置确定后精细调试每个中继透镜,即可同时实现无离焦记录和每个中继透镜的同轴成像。

3.2.3 斜入射的等速扫描方程

出瞳光阑中心所在柱面的等速扫描方程为

$$\begin{cases} x'_p = a_p \cos 2\varphi + 2r \cos \varphi \\ y'_p = a_p \sin 2\varphi + 2r \sin \varphi \\ z'_p = (a_p + x_i) \tan \theta \end{cases} \quad (23)$$

式中, $a_p = (c + r^2 \cos^2 \varphi)^{1/2} - r \cos \varphi$, 是实现等速扫描的出瞳光阑中心的转镜镜像的 x 坐标,与 φ 角有关。 $c = a^2 + 2ar \cos \varphi_0$, 为一设计常数,其值取决于 φ_0 。设计时应选择使 a_p 变化最小的 φ_0 。SSF 成像记录仪的 φ_0 是 17.26° , 对应扫描速度的平均值,也就是恒速扫描的速度

3.2.4 像面倾斜补偿方程

由于斜入射(光轴)所带来的垂直于光轴的像面倾斜,必须采用中间像面的预倾斜来补偿,使最终像面平行于转镜的转轴,满足记录像面只能布置在柱面上的基本要求。理论研究表明,像面处特殊设计的消色差光楔对起偏转光轴和倾斜像面的作用,但是必须精细设计和选择玻璃材料。

建立像面斜角方程。假设光楔的截面是直角三角形,像面 I 和直角边重合,楔角为 α , 折射率为 n , 像面相对入射光轴垂直像面的斜角为 γ , 像面相对出射光轴垂直像面的斜角为 θ , 出射光轴相对入射光轴的偏转角为 δ , 则可推导出表征各参数内部联系的像面斜角方程组,即

$$\begin{cases} \delta = \arcsin(n \sin \alpha) - \alpha \\ \gamma = \pm \frac{\pi}{2} - \arctan(\tan \alpha + \cot \alpha + \cot \delta) \\ \theta = \gamma + \delta \end{cases} \quad (24)$$

消色差要满足两个光楔的材料、光楔角的匹配条件,即

$$\begin{cases} \sum_i [(n_{iF} - n_{iC}) \alpha_i + K_i \alpha_i^3] = 0 & i = 1, 2 \\ K_i = \frac{1}{24} [(n_{iF}^3 - n_{iC}^3) - (n_{iF} - n_{iC})] & i = 1, 2 \end{cases} \quad (25)$$

入射光轴经过消色差光楔对后,像面相对出射光轴垂直像面的斜角为 θ 为

$$\theta = \sum_i \theta_i \quad i=1, 2 \quad (26)$$

可以从式(24)~(26)中解出光楔对的2个结构参数和4个性能参数 $\alpha_1, \alpha_2, \delta_1, \delta_2, \theta_1, \theta_2$ 。

3.3 诸心布局

诸心布局是超高速转镜摄影机设计理论的主要内容之一,诸心布局的保证还要靠加工和装调^[53]。

正入射经典设计理论,需根据像面各图像的像质优良来计算确定转镜旋转中心、中间像中心、球罩中心、底片代替圆中心和中继透镜代替圆中心位置坐标。转镜旋转中心和中间像中心根据摄影机工作角范围内由转镜厚度产生的像移和离焦最小原则确定;其它中心遵循离焦设计原则,中心的选择以限制离焦量为出发点。但是,确定中心的原则在某些型号摄影机设计上不完善,例如西安光机所研制某种超高速分幅摄影机的设计结果是:中继透镜代替圆中心是用解析法计算得到了较为满意的结果;但是中继透镜轴线和主光线形成较大的夹角 ϕ (约 2°),球罩和主光线形成的夹角 γ 更大(6° 以上)。在夹角 ϕ 较大的区域场曲和象散均有所增加;大的角 γ 的存在破坏了球罩的共轴性,在工作角较大的区域子午场曲、象散有较大增长。 ϕ 和 γ 会使工作角边缘部份画幅像质略有下降。

斜入射等待型分幅扫描同时成像记录仪(SSF)的转镜旋转中心定义为坐标系原点,中间像中心由“转镜厚度引起的转镜像移、转镜离焦分别在工作扇形内的积分值最小”原则确定,球罩中心的确定原则是在工作扇形内球罩中心到反射点 T 的距离积分值最小。这种设计理念是把转镜厚度和球罩对成像质量的影响降到最小。由于像面、出瞳环面和中继透镜前主面环面的都是超越曲线,没有中心的概念,不必考虑。斜入射系统诸心布局要比正入射经典设计理论简明。

4 超高速转镜摄影机

“转镜摄影机在微秒级成像领域一直是主战设备”。中国超高速转镜摄影机起于原子弹爆炸试验的需要,源于等待型转镜摄影机的研制,在核试验、强爆轰试验和前沿军事科学的研究试验中发展、壮大。中国有80%的转镜超高速摄影机都源于中国科学院西安光学精密机械研究所,她是中国转镜式超高速摄影机的研制故乡。

4.1 核试验用超高速等待型转镜摄影机

核试验引爆初期的演变过程要用超高速转镜摄影机记录,必须是等待型。“等待”的含义是触发核爆炸信号脉冲不是摄影机本身发出的,是控制中心发出,所以必须等待:爆炸过程无论何时发生,都能记录上,系统始终处于记录等待状态。西安光机所研制了两个型号的摄影机。

4.1.1 ZDF-20型高速摄影机

它是我国第一台自行研制的高速摄影机,为我国第一次原子弹试验提供了瞬变过程的重要图像资料。

图7是其光路示意图。系统的设计特色是采用菱形棱镜分光元件和错开 45° 的双层正方形棱镜实现等

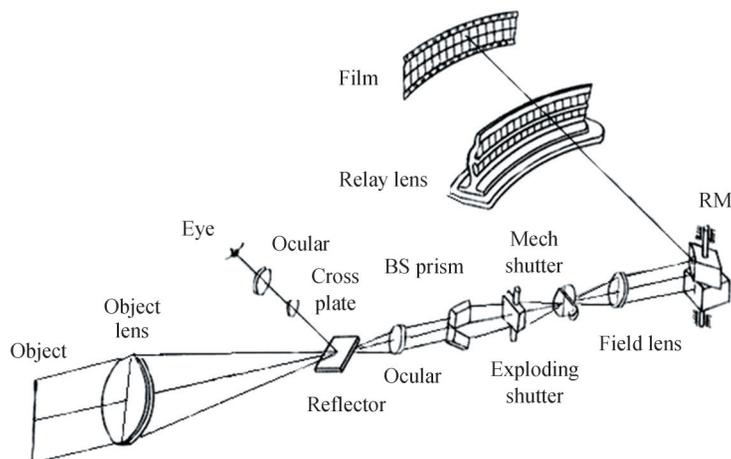


图7 参加第一次原子弹试验的ZFD-20超高速摄影机光路

Fig.7 Light path diagram of the ZFD-20 ultra-high speed camera participated in the first atomic bomb test

待型摄影,等待工作扇形 $2\times 90^\circ$,主物镜焦距940 mm,摄影频率 $(20\sim 40)\times 10^4$ fps^[53]。

4.1.2 ZDF-250型高速摄影机

ZDF-250型高速摄影机是等待型,摄影频率一次提高到 250×10^4 fps,第一次采用双入口、双工作扇形(工作角 $2\times 120^\circ$)三棱镜等待方案,1966年11月组研制成功,主要用于氢弹试验的研究,一直服役到1976年最大当量氢弹空投试验为止,如图8。

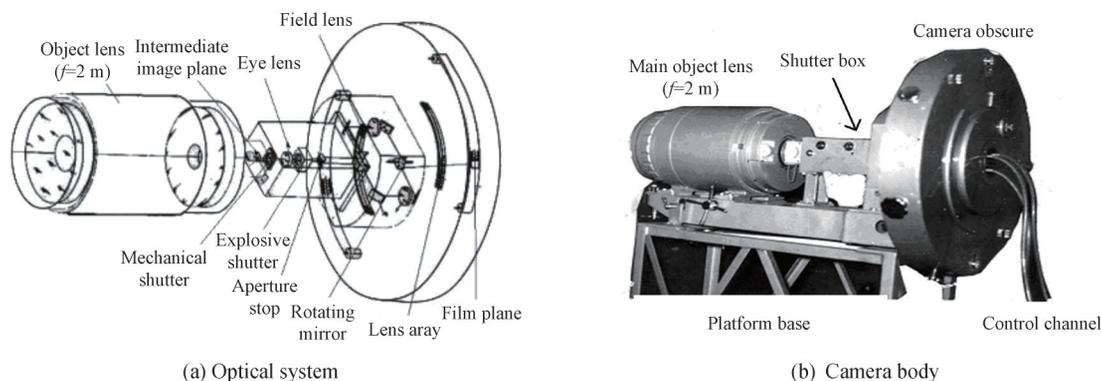


图8 ZDF-250型高速摄影机
Fig. 8 ZDF-250 high-speed camera

1970年西安光机所对ZDF-250型高速摄影机进行性能提升工作,进一步满足试验要求:2 m焦距的折反射主物镜取代美国专利的折射物镜,新设计的机械快门和爆炸快门取代苏联设计的快门,超高速转镜支撑驱动系统由三棱珠精密轴承结构取代油膜轴承,包含两套电控系统(一套电子管系统,一套半导体晶体管系统),在1970年10月14日爆炸当量340万吨氢弹空投核试验中拿到宝贵的试验数据。

4.2 受控聚变用超高速转镜摄影机

4.2.1 ZFK-500型和ZFK-2000型高速摄影机

ZFK-500型高速摄影机为分幅摄影、同步式控制,采用菱形光学扫描快门的新构思,建立了设计的解析理论和计算方法,取代了传统的以作图为基础的计算设计方法,大大提高了此类摄影机的性能;摄影频率从 2.5×10^6 fps(指令性计划任务书指标)跃升到 5×10^6 fps,动态空间分辨率从18 lp/mm跃升到28 lp/mm,时为西安光机所的标志性成果,如图9。

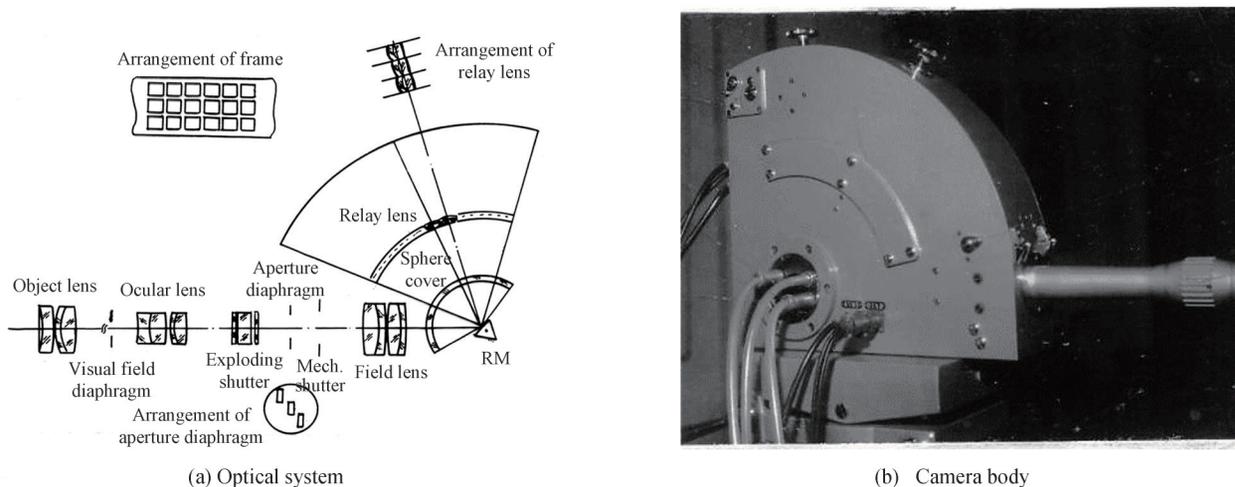


图9 ZFK-500型和ZFK-2000型高速摄影机
Fig. 9 ZFK-500 and ZFK-2000 high-speed cameras

ZFK-2000型超高速同步分幅摄影机是在ZFK-500型的基础上研制成功的我国第一台摄影频率超过每秒千万幅超高速同步摄影机,摄影频率达到 2×10^7 fps,该项目“成功地核试验中子弹引信提供了时间数

据,这一应用实例不仅在国内属于首次,在国际上至今也没见报导”。

4.2.2 ZSK-29型铍转镜扫描摄影机

我国第一台同步型铍转镜扫描摄影机由西安光机所研制,如图10。该相机取代用附加柱透镜补偿转镜变形产生像散的传统设计理论,建立了无像散超高速铍转镜扫描摄影机的设计理论,在国际上首次采用纳秒光源零点标记以解决多台联机的判读,扫描速度达 $27\sim 34\text{ mm}/\mu\text{s}$,画幅尺寸为 $22\times 400\text{ mm}^2$,使我国超高速扫描技术一跃跨入国际前列^[55-57]。

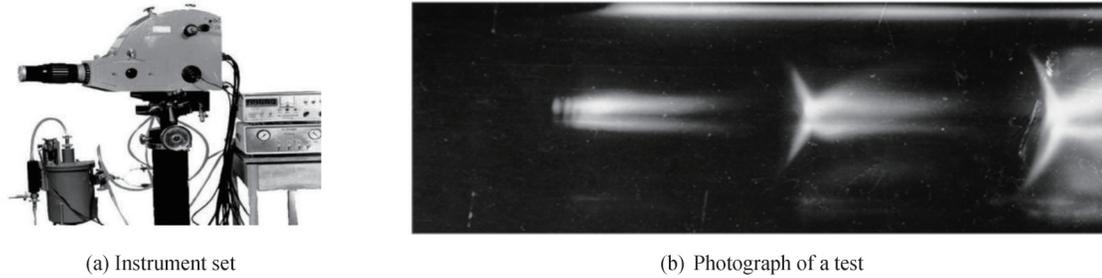


图10 ZSK-29型超高速铍转镜扫描摄影机
Fig.10 ZSK-29 ultrafast beryllium rotating mirror streak cameras

4.3 爆炸力学和爆轰物理研究用超高速转镜摄影机

ZDF-50型转镜等待分幅摄影机^[58]和ZDF-180型转镜等待分幅摄影^[46]主要用于常规靶场爆炸力学的测试。采用双入口、双工作扇形、工作角 240° 的三面体转镜等待系统,主要设计特色是画幅大, $10\times 18\text{ mm}^2$ (ZDF-50型)和 $12\times 18\text{ mm}^2$ (ZDF-180),有利于常规靶场爆炸、弹道诸参数的测量;最高摄影频率分别为 $50\times 10^4\text{ fps}$ 、 $180\times 10^4\text{ fps}$,电机驱动同轴加速。

ZKF-250型高速摄影机、S-150型超高速等待分幅摄影机(图11)^[59]和WPG-30型铍转镜扫描摄影机用于外场爆轰和爆轰塔中爆轰的研究。ZKF-250型画幅大, $\varphi 16\text{ mm}$,用70 mm胶卷,同步型,最高摄影频率 $250\times 10^4\text{ fps}$,气动涡轮驱动。WPG-30型是我国第一台等待型铍转镜扫描摄影机,扫描速度为 $15\text{ mm}/\mu\text{s}$,画幅尺寸为 $24\times 255\text{ mm}^2$ 。S-150型^[59]画幅大, $14\times 24\text{ mm}^2$,空间分辨率高,像质优良,双入口三面体等待型,最高摄影频率为 $224\times 10^4\text{ fps}$,高强度铝合金转镜,超高速电机-同轴加速驱动。

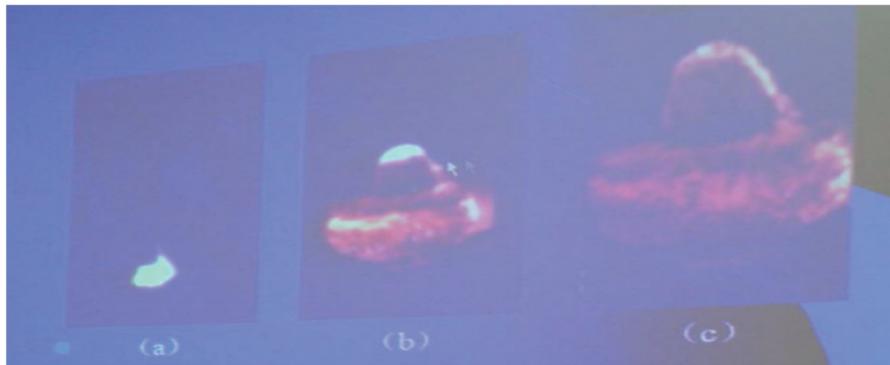


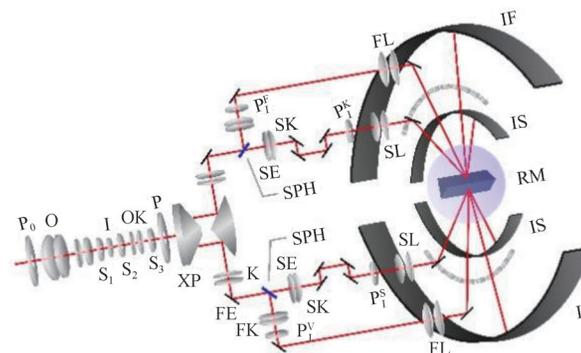
图11 S-150在某次强爆轰的某次部分实验结果
Fig. 11 Partial experimental results of S-150 in a strong detonation

4.4 强爆轰用无原理性信息丢失和无原理性结构误差的超高速转镜摄影机

SSF超快过程分幅扫描同时记录仪被称为“皇冠上的珍珠”(图12)。该项成果由光、机、电、算、测五个领域的10位两院院士金国藩、周炳琨、薛永祺、姚建铨、林尊琪、刘颂豪、吴培亨、李同保、沈绪榜、魏子卿和5位专家组成的鉴定委员会进行鉴定,鉴定指出,SSF是“一台具有原创思想和技术的先进设备,其整体性能指标与国外同类仪器相比,居国际领先地位”。国际爆轰物理测量学术界认为^[14-16],能一次试验同时得到无视差、时间关联的时序多幅二维图像和连续扫描一维图像的SSF系统,具有特殊的优越性,能解决以往单功



(a) Instrument host at Appraisal meeting



(b) Diagram of optical system

图 12 SSF 超快过程分幅扫描同时记录仪

Fig.12 SSF ultrafast process framing and streak simultaneous recorder

能成像系统一直存在的误判和严重的信息丢失(即单功能多幅图像系统的相邻两幅之间的时间-空间信息全部丢失,单功能扫描图像系统的扫描狭缝以外的空间信息全部丢失),得到完整试验信息,并避免误判、精准判读,做到了精密测量,对于强爆轰试验具有一定的实用价值。

该记录仪能在等待模式下同时得到同一时间基准(时间关联)、同一空间基准(无视差)的分幅图像和扫描图像;分幅系统的摄影频率 $(3\sim 200)\times 10^4$ fps,画幅尺寸为 $16\times 24\text{ mm}^2$,时间方向本征空间分辨率 $>40\text{ lp/mm}$;扫描系统的扫描速度 $0.244\sim 16.3\text{ mm}/\mu\text{s}$,像面尺寸为 $24\times 660\text{ mm}^2$,最高实用时间分辨率为 8 ns 。解决了国际上一直未能解决的制约其摄影测量性能的空间光路(成像质量不能保证)、有原理误差的圆柱记录像面(像面有固有离焦、各个排镜成像不共轴,影响整体成像质量)和扫描速度不均匀(摄影频率不均匀,影响测量精度)等三大难题。记录仪采用在等待模式下分幅-扫描同时记录的平面成像系统、无原理误差的转镜相机暗箱结构、有横向蜂窝结构的类铍小变形高强度铝转镜和每分钟50万转的超高速转镜电机驱动系统,使SSF超快过程分幅-扫描同时成像记录仪的整体性能大幅度超过国际现有水平:分幅成像系统时空信息总量高出400%以上,相邻分幅时间最大原理误差为零(国际水平为0.5%),扫描成像系统最大扫描速度高出国际水平50%以上,扫描速度不均匀性比国际水平小一个量级。SSF的成功研制有力推动了某种强爆轰原理试验、防御机理试验等研究的发展^[42,52]。

图 13 为多级柔爆索网络同步起爆大面积异形炸药的无时间基准误差和空间基准误差的分幅、扫描图像。

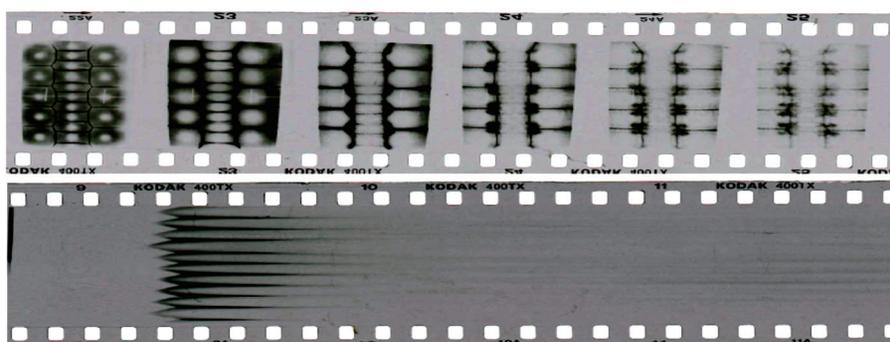


图 13 柔爆索网络同步起爆的分幅、扫描图像

Fig.13 Framing and streak pictures of ten-point initiation of flake explosive with soft detonating cord

图 14 是射流引爆炸药的同一时间基准、空间基准的分幅、扫描图像,摄影频率为 40×10^4 fps,扫描速度 $3.26\text{ mm}/\mu\text{s}$ 。该实验“第一次同时得到了无视差和时间相关的高质量分幅图像序列和时空相对应的扫描图像;由于分幅和扫描的同时性对应照片,可以清楚地判定射流的速度、几何参数和引爆过程的发展”。

德国著名高速摄影专家HELD N指出^[15-16]:同一时基、同一空基的分幅扫描同时记录所得到的相关组合信息对于记录完整信息(不丢失信息)、准确判读和精确计算爆轰和激波过程极其重要。由于瞬变现象时空

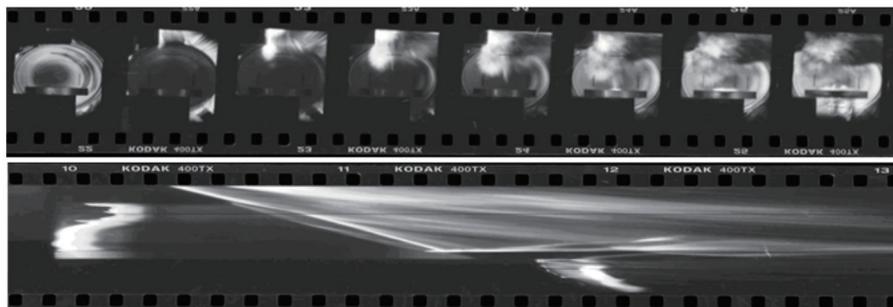


图14 射流引爆炸药的分幅、扫描图像

Fig.14 Framing and streak pictures of the jet detonated explosives

信息的非对称性及起爆时刻的随机性,不仅要求一次实验就能同时得到同一时间基准、同一空间基准的分幅记录和扫描记录,而且要求等待型记录,从而提高爆轰测量的准确性、可靠性和有效性。

5 结论

我国一直重视转镜式超高速摄影技术的研究,取得了系列创造性成就,为支撑我国以两弹为中心的国防建设作出了重大贡献。从1963年开始,在长期的研究过程中,我国形成了以西安光机所为中心的研发高地,成功研制出分幅成像摄影机ZDF-20型、ZDF-250型、ZDF-50型、ZDF-180型、ZKF-250型、ZKF-500型、ZKF-2000型、S-150型,扫描成像摄影机ZSK-29型、WPG-30型,斜入射等待型分幅扫描同时成像记录仪SSF分幅扫描同时成像摄影机等设备。ZDF-24型半周等待转镜摄影机在我国第一次原子弹爆炸试验中立下赫赫战功,是超高速转镜摄影机发展的奠基石;SSF等待型分幅扫描同时成像记录仪是一种成像功能完善的时空信息精密测试系统,在超高速转镜式成像领域素有“皇冠上的珍珠”之称。该文写在西安光机所六十岁生日之际,论述了转镜式超高速摄影技术在诸方面的研究进展,期望能诠释中国何以能成为转镜式超高速摄影技术的强国。

参考文献

- [1] LI Jingzhen. Time amplifying techniques towards atomic time resolution[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(12): 3425-3446.
李景镇. 迈向原子时间分辨的时间放大技术[J]. 中国科学 E辑: 技术科学, 2009, 39(12): 1887-1904.
- [2] DUBOVIK A S. The photographic recording of high-speed processes[M]. New York; John Wiley & Sons Press, 1981.
- [3] EGEL E A, KRISTIANSEN M. Rotating mirror streak and framing cameras[M]. Bellingham, USA: SPIE Optical Engineering Press, 1997.
- [4] RAY S F. High speed photography and photonics[M]. Bellingham, USA: SPIE Press, 2002.
- [5] FRANK A M, BARTOLICK J M. Solid state replacement of rotating mirror cameras[C]. SPIE, 2007, 6279: 62791U.
- [6] LAI C C, GOOSMAN D R, WADE J T, et al. Design and field test of a galvanometer deflected streak camera[C]. SPIE, 2003, 4948: 330-335.
- [7] LAWRENCE J L, KOSONOCKY W F. Million frames per second CCD camera system[C]. SPIE, 1997, 2869: 405-408.
- [8] STASICKI B, MEIER G E A. A computer controlled ultra-high speed video camera system[C]. SPIE, 1995, 2513: 196-208.
- [9] RACCA R G, CLEMENTS R M. High speed video recording system using multiple CCD imagers and digital storage[C]. SPIE, 1995, 2513: 209-220.
- [10] 李景镇. 转镜原理和转镜相机的发展[J]. 光子学报, 1980, 9(3): 16-31.
- [11] 李景镇. 高速摄影和光子学[J]. 应用光学, 1982, 1: 13-17.
- [12] LI J. Developments and achievements of optomechanical high-speed photography in China[C]. SPIE, 2007, 6279: 62792B.
- [13] LI J. Extreme high speed imaging based on the tubeless technology[C]. SPIE, 2009, 7126: 71261Q.
- [14] SULTANOFF M. Some philosophical aspects of high-speed photography instrumentation[J]. SMPTE Motion Imaging Journal, 1961, 70(1): 1-6.
- [15] HELD M. The advantage of simultaneous streak and framing records in the field of detonics[C]. SPIE, 1990, 1358: 904-913.
- [16] HELD M. Simultaneously gained streak and framing records offer a great advantage in the field of detonics [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2001, 26: 148-155.
- [17] LAUVE M V. Die Freiheitsgrade von Strahlenbündeln[J]. Annalen Der Physik, 2010, 349(16): 1197-1212.

- [18] LUKOSZ W. Optical systems with resolving powers exceeding the classical limit. II[J]. Journal of the Optical Society of America (1917-1983), 1966, 57(11):1463-1471.
- [19] LI Jingzhen, JIN Shirong. Relation of degrees of freedom of an image with modulation transfer function[J]. Acta Photonica Sinica, 1997, 26(4):379-383.
李景镇, 金世荣. 成像空间自由度与调制传递函数成像空间自由度与调制传递函数[J]. 光子学报, 1997, 26(4):79-383.
- [20] LI J Z, TAN X X, GONG X D, et al. Studies on degree of freedom for high-speed photography[C]. SPIE, 2004, 5580: 805-810.
- [21] SCHARDIN H. Uber die Grenzen der Hochfrequenz Kinematographik[C]. Proceeding of the 6th ICHSP, 1963: 1-29.
- [22] GAO L, LIANG J, LI C, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second [J]. Nature, 2014, 516(7529):74-77.
- [23] LIANG J, ZHU L, WANG L V. Single-shot real-time femtosecond imaging of temporal focusing[J]. Light: Science and Application, 2018, 7(1):10.
- [24] WANG P, LIANG J, WANG L V. Single-shot ultrafast imaging attaining 70 trillion frames per second [J]. Nature Communications, 2020, 11(1):2091.
- [25] SHARDIN H. Relationship between maximum frame frequency and resolution in rotating-mirror framing camera [C]. Proceeding of the 3rd ICHSP, 1956: 316.
- [26] LI J, TAN X, SUN F. Research on some problems for rotating mirror camera[C]. SPIE, 2009, 7126:71261E.
- [27] MILLER C D. Half-million stationary images per second with refocused resolving beam[C]. SMPE, 1949, 43:479.
- [28] LAI C C. A new tubeless nanosecond streak camera based on optical deflection and direct CCD imaging[C]. SPIE, 1993, 180: 454-469.
- [29] HARTFIELD E. D. A new ultra-high speed camera[C]. Proceeding of the 8th ICHSP, Stockholm, 1968.
- [30] LI J. Optical-deflection accelerating techniques[C]. Proceedings of 29th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, 2010, A06.
- [31] BRIXNER B. Rotating steel mirror-failure and success[J]. Review of Scientific Instruments, 1965, 36(9):1297-1300.
- [32] EREZ A, PARTOM Y. Calculation of surface distortions of rotating mirrors and their effect on streak camera resolution [J]. Applied Optics, 1966, 5(5):727.
- [33] ТРАЧУК В С. Расчет предельной скорости вращения зеркальных, роторов в зависимости от геометрических факторов и материала, ротора[J]. Журн Наудн И Приклад Фотогр И Кинематор, 1982, 27(3): 184-187.
- [34] 孙凤山. 对等腰三角形截面转镜的初步分析[C]. 全国第三届高速摄影和光子学会议论文集, 1982.
- [35] LI Jingzhen, SUN Fengshan. Dynamic property of rotating mirrors of high intensity aluminium alloy for ultra high speed photography[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(5):636-640.
李景镇, 孙凤山. 超高速摄影用高强度铝合金转镜动态特性的研究[J]. 光子学报, 2001, 30(5): 636-639.
- [36] LI J, SUN F, GONG X, et al. Studies on dynamic behavior of rotating mirrors[C]. SPIE, 2005, 5638:117-123.
- [37] HUANG Hongbin, LI Jingzhen, SUN Fengshan, et al. Numeric analysis of structural strength of aluminous alloy rotating mirror for ultra-high speed photography[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(8): 1277-1281.
黄虹宾, 李景镇, 孙凤山, 等. 超高速摄影中三面体铝合金转镜的空间结构强度数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(8): 1277-1281.
- [38] HUANG Hongbin, LI Jingzhen, SUN Fengshan, et al. Numerical simulation on static property for rotating three-faced mirror of ultra-high speed photography[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(7):1364-1368.
黄虹宾, 李景镇, 孙凤山, 等. 超高速摄影中三面体转镜力学特性的计算机仿真[J]. 光子学报, 2007, 36(7):1364-1368.
- [39] HUANG H B, LI J Z, GONG X D, et al. Numerical prediction on static and dynamic properties for rotating mirror of ultra-high speed photography[C]. SPIE, 2007, 6279: 62797L.
- [40] HUANG Hongbin, CHAI Jinlong, LI Jingzhen, et al. Mechanical analysis on beryllium rotating mirror of ultra-high speed camera[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2007, 24(2): 122-126.
黄虹宾, 柴金龙, 李景镇, 等. 超高速摄影中铍转镜静力学与动力学性能分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2007, 24(2): 122-126.
- [41] LI C, YI C, CH J, et al. Rotating mirror design of ultra-high speed camera based on eigenvalue sensitivity analysis[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(2):265-270.
- [42] LI J, FENGSHAN S, NINGWEN L, et al. A novel simultaneous streak and framing camera without principle errors[J]. Journal of Instrumentation, 2018, 13(2): P02024.
- [43] 李景镇. 转镜式超高速分幅相机结构参数的分析[C]. (第一届)全国高速摄影会议论文集, 北京: 科学出版社, 1978, 26-36.
- [44] 毛信强. 转镜式超高速分幅相机的光学传递函数及分辨率[C]. 第二届全国高速摄影与光子学会议论文集, 北京: 科学出版社, 1982, (1):86-95.
- [45] LI J, TAN X, SUN F. Research on some problems for rotating mirror camera[C]. SPIE, 2009, 7126:71261E.
- [46] 朗见林. 转镜分幅相机代替圆参数的综合设计[C]. 第四届全国高速摄影和光子学学术会议论文集, 1985.
- [47] 赵跃进, 邱松发, 罗文碧. 转镜分幅相机中代替圆计算方法的新进展[C]. 第四届全国高速摄影和光子学学术会议论文集

- 汇编, 1985.
- [48] LI Jingzhen, GONG Xiangdong, LI Shanxiang, et al. Study on classical designing theory of miller type ultra high speed photographic system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(6):739-742.
李景镇, 龚向东, 李善祥, 等. Miller型超高速摄影系统经典设计理论的研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(6): 739-742.
- [49] LI Jingzhen, HUANG Jinghao, TIAN Jie, et al. Advanced designing theory of recording surface of rotating mirror streak camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(8): 1033-1035.
李景镇, 黄景灏, 田洁, 等. 转镜扫描相机记录象面的新设计理论[J]. *光子学报*, 2001, 30(8):1033-1035.
- [50] LI J Z, HUANG J H, TIAN J, et al. Study on advanced recording surface of rotating mirror camera[C]. SPIE, 2001, 4183: 461-465.
- [51] LI J, GONG X, TIAN J. New advanced designing theory on ultra high speed rotating mirror framing camera[C]. SPIE, 2002, 4948: 725-729.
- [52] LI J, SUN F, HUANG H, et al. Upgrading optical information of rotating mirror cameras [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11):330-335.
- [53] 李景镇. 转镜分幅相机的五心[J]. *光机技术*, 1978: 38-45.
- [54] 李育林. 一种中等画幅频率的等待型转镜高速相机[C]. (第一届)全国高速摄影会议论文选集, 北京: 科学出版社, 1978: 18-25.
- [55] LI J Z, ZHAO B C, ZHANG B H, et al. ZSK-30 ultra-high speed streak camera with beryllium rotation mirror[C]. *Proceeding of the 14th ICHSP*. Moscow: Moscow Press, 1980: 233-236.
- [56] 中国科学院西安光机所29号任务组. ZSK-29型铍转镜高速扫描摄影机[C]. 第二届全国高速摄影与光子学会议论文选集, 北京: 科学出版社, 1982: 6-9.
- [57] DUBOVIK A S. Opto-mechanical photography[C]. SPIE, 1999, 3516: 2-3.
- [58] 许家隆. ZFD-50型高速摄影机[C]. 全国第三届高速摄影和光子学会议论文集, 1985.
- [59] LI J Z, TAN X X, LIU N W, et al. Model S-150 ultra-speed framing camera with continuous access[C]. SPIE, 2003, 4948: 336-341.

Progress in Rotating Mirror Ultra-high Speed Imaging Technology (Invited)

LI Jingzhen

(Shenzhen Key Laboratory of Micro/Nano Photonic Information Technology, Institute of Photonic Engineering, School of Physics and Opto-electronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: The ZDF-24 half-circle waiting rotary camera, making outstanding achievements in the first atomic bomb explosion test in China, is the ground breaking work of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences to enter the world field of vision, and the cornerstone of the development of ultra-high speed rotary camera. As you know, 80% of the rotating mirror ultra-high speed cameras in China are originated from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, which is the hometown of developing the rotating mirror ultra-high speed cameras in China. The rotating mirror ultra-high speed imaging technology has the advantages of large picture, large number of pictures, high spatial resolution, wide spectral band, wide frequency and convenient operation, so rotating mirror cameras have been the mainstay of mega-frame per second imaging for decades. There is still no electronic camera that can match a film based rotary mirror camera for the combination of frame count, speed, resolution and dynamic range. This paper discusses the research progress of the topology of its information theory, an exploration of rotary mirror dynamics, the modern design theory of rotary camera and the waiting type simultaneous framing and streak imaging system, so called "the pearl in the crown". It is expected to explain why China can become a powerful country in rotary mirror ultra-high speed photography.

Key words: Spatial and temporal information of high-speed photography; Temporal information; Framing photography; Streak photography; Continuous access; Synchronization; Principle of rotating mirror imaging
OCIS Codes: 320.7080; 320.7100; 320.7130; 320.7150