

光学系统和元件的干涉检验评论

光学系统和元件公差往往很严，检验这些产品是制造中一个基本部分。本评论描述光学的干涉性质怎样应用到光学检验，并指出各种技术应用的主要范围。

光学系统和元件的检验已成长为很大的领域；本文意图评论它的一个分支、包括以光干涉性质为基础的检验。这种检验的主要优点是它们的高灵敏度和一般说它们比较易于解释的事实。测量单位一般用光波长或其倍数或分数。由于大半干涉检验有波长依存性，高精度往往要求用单色光源，在某种情况下这种光源是能够看见干涉条纹图样所必须的。合适的光源有钠灯，滤光的汞灯和激光。在很多干涉检验形式中光源有效尺寸必须用一个针孔或狭缝加以限制。干涉术一般理论和实践的更多细节可以从有关专题的各种好教科书中找到。

样 板

干涉术对光学检验最简单的应用是样板的使用。当两块标称平的玻璃板接触平放时，它们交界面处可以看到干涉条纹。这些条纹是上块玻璃的下表面反射的光和下块玻璃上表面反射的光相干涉造成的。每个条纹是恒定光程差的轨迹，因此是两表面间空气间隙恒定厚度的轨迹（如果观察者在离玻璃“无限”远处，这解释是严格地正确的）。如果一块玻璃（样板）已知是光学平直的，那么条纹的形式决定于另一块板的表面轮廓。除了因观察条纹图样是从有限距离并和表面垂线成一角度因而引进了误差而外，条纹图样的解释和斐索干涉仪的解释一样。

如果样板用白光，那么可以看见颜色条纹，并且只有几级干涉能看到。这缺点可以用亚单色光源如钠或汞灯来克服。光不必准直，实际上一般用散射光。

样板在光学工业里是广泛应用的，并扩展到曲面——制造时为检验透镜表面使用与样板匹配的办法。这技术的主要优点是简单、快速——解释是直接而易懂的，而且不需要装备调整。主要缺点在于由接触引起的表面损坏的高度冒险。在很高精度工作进行中需要好几小时的计算和重复检验时这危险变为更重要。不仅每次检验损坏的冒险增加，还有如果损坏发生，将使好几天的辛勤劳动的结果全部毁掉。另一不便处是拿样板及工件容易发生于操作者手上的热引起变形和假的条纹图样。由于这些理由，发展了无接触检验方法。其中有些将在下面描述。用更复杂的技术，也得到比用样板法在精度上的改进。可是样板法还是常规光学表面检验中很有价值的工具。这方法更多的细节可在标准玻璃加工教科书中找到。

斐索干涉仪

因为样板法的主要缺点是包含着表面损坏的危险，显然的解决办法是把两表面分开。这提出了两个主要问题，一个机械的，一个光学的。第一没有两表面的物理接触，意味着必须引进某种形式的机械支撑防止相对运动。第二增大的空气间隙引进了对所用光源的相干性和大小的限制。结果是对任何凡接触干涉检验需要一个合理工程系统。斐索第一个提出用一个准直透镜（现在用他的姓名因为他设计了这装置），这有两重效应，保证在空气间隙中光的垂直入射，并且当眼睛放到焦点上时视场全面照明，Laurent 修改了斐索的仪器，并应用到检验平面表面。它的基

本布置在今天的斐索干涉仪中没有改变，如图1所示。更详细的斐索干涉仪的实用各型可以看 Dew 的国家物理试验室（英国）报告。

在斐索干涉仪观察到的干涉条纹代表样板和参考板间空气间隙厚度的“等高线地图”。如果参考面是可以假定为理想平面，而两个比较平面是平行的，那么条纹将代表样板实际表面形貌学的等高线图。等高线的间隔是 $\lambda/2$ 。这里 λ 是所用光的波长。一个代替的途径是利用倾侧条纹，当误差小于一个波长时这个途径是重要的。斐索干涉仪必然备有调平样板或参考平面的装置。这调整可

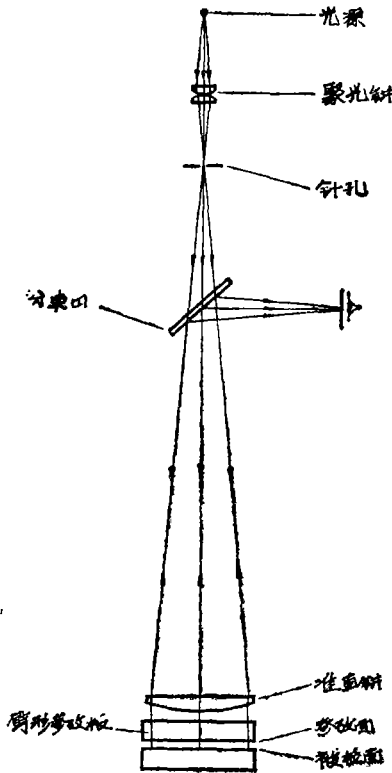


图1 斐索干涉仪原理

用作在空气间隙里引进已知方向的光劈。如果两个玻璃表面都是完全平直的，观察到的条纹将是直的、平行的、均匀间隔的。条纹的间隔和灵敏度可以用改变倾侧量来调整。任何条纹偏离直线性指示所检验的平面偏离平直性，如果光劈薄端安排在靠近观察者身旁，那么任何条纹的形状给出沿条纹的表面轮廓

的直接图形。以观察者移开（“向上”）一个条纹的间隔、相应于表面上高 $\lambda/2$ 的一个峰。

斐索干涉仪的几种发展近年已宣布，值得注意的是球面的应用，这在以后将描述。其它修改包括用液面而不是玻璃参考表面，例如Bünnagel 等用水银参考表面；又如Clapham 和 Dew 所描写的用已镀膜的参考平板，将斐索干涉仪改变为一个多光束装置，适用于检验高反射试样的平直度，还有 Langenbeck 采用轴外照明达到条纹锐化。

斐索干涉仪是检验高质量光学平面的基本工具，它和样板法比较主要优点是避免参考表面和被检表面的接触和用了准直透镜及很好工程化的机械提高了精度。这仪器的主要局限性是尺寸依费用而转移。检验直径150毫米平面的斐索干涉仪很容易造也很便宜，但是如果考虑更大的型号、制造参考平面和支撑系统的制造费用和困难便迅速增长。这些缺点必须从较大视场应用次数来衡量。大部分光学车间发觉150—200毫米口径的斐索干涉仪已对大半的活够用，而这往往是需要的第一个标准检验设备。

劳埃—莫尔干涉仪(LMI)

很大口径的斐索干涉仪的很高价格相对于全口径使用次数较少来说是不能认为合理的。如何用代替的方法检验大尺寸光学平面已经研究。一种这样的方法由 Langenbeck 描述，以经典的劳埃的反射镜实验为根据。这方法用近掠入射角和用莫尔干涉条纹技术测量所检表面平度偏离引起的条纹间隔变化。由于高入射角，甚至比较粗糙的表面也可用这方法检验。劳埃—莫尔干涉仪的主要局限性是它和垂直入射方法相比，灵敏度比较低。典型的LMI条纹图2举例说明。

球面斐索干涉仪

采用斐索干涉仪检验曲面是一个明显的

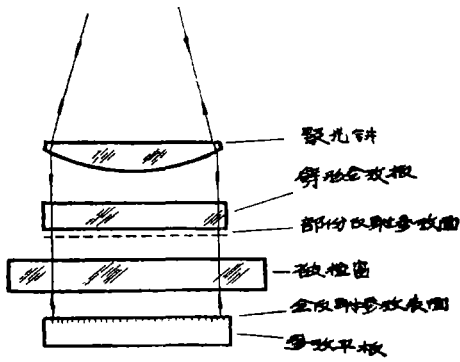


图5 斐索干涉仪，用于光学窗透过检验

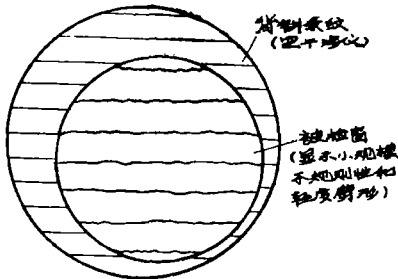


图6 多射束透射干涉仪中倾侧条纹的外貌，间隙，它所引起的透过的平面波阵面的任何变形可以观察到、表现为条纹的相应变形，而条纹图样将和图6所示相同。这变形指示表面平度误差和不匀度的联合效应，为了分开两种效应，Forman指出斐索和透射检验两者都需要。Saunders和Post描述了一个修改的斐索干涉仪以透射方式工作，而Ashton和Marchant描述了一个反射型的。Roberts和Langenbeck 近来报告一个大得多的型式（750毫米口径）。Langenbeck还描述一种技术，同样的干涉仪可用作斐索和透射检验，避免被检光学窗环境改变牵涉的复杂性。

透射检验也可以用作窗内劈形角的测定。如果窗子两面不完全平行，条纹间隔和/或取向将受到影响。劈形角可以从条纹图样变化计算出来。劈形角的另一干涉计量测定法已由 Leppelmeier 和 Mullenhoff 提出。

玻璃窗口误差的高精度测量可用 Tynes 和 Bisbee 提出的办法获得。他们用一个台曼—格林干涉仪（见下），它的输出构成双光束光学测量设备的一个臂，声称可测到厚度变

化达 $\frac{\lambda}{100}$ 数量级和折射率变化达 10^{-7} 级。还有用各种不同的其它方法评定窗的透射性质的建议，特别值得注意的是 Hariharan 和 Sen 的切剪法和 Saunders 的 Kosfer 棱镜干涉仪。

原则上棱镜也可用修改的斐索干涉仪检验，但因为光束大的偏移引起困难。这种检验通常用台曼—格林干涉仪（见下）进行。窗口实际也可以在台曼—格林干涉仪上检验，但这仪器和修改的斐索干涉仪比较有两个主要缺点——对于同一口径说这干涉仪比较贵，并且不能用多光束条纹。

台曼—格林干涉仪

如果光学车间获得的第一台标准检验设备通常是斐索干涉仪的话，那么第二台无疑是台曼—格林干涉仪。这仪器五十年前沿用经典的迈克耳孙干涉仪原理，设计了主要为检验透镜和棱镜的装置。干涉仪的工作原理由图7说明，详细设计和应用可参考台曼的书。和斐索透射干涉仪一样，这仪器可在垂直调整中使用，或采用倾侧。

台曼—格林干涉仪可用作检验光学平面、窗口、粗玻璃（用一个液体槽）、凸或凹反射镜、透镜、显微物镜、光学晶体和很多其它元件。图8表示某些应用需要的修改。这干涉仪的最大用途在透镜检验方面。基本上至少具有一个无限共轭的任何透镜或透镜系统可以很容易用台曼—格林干涉仪检验。它对折

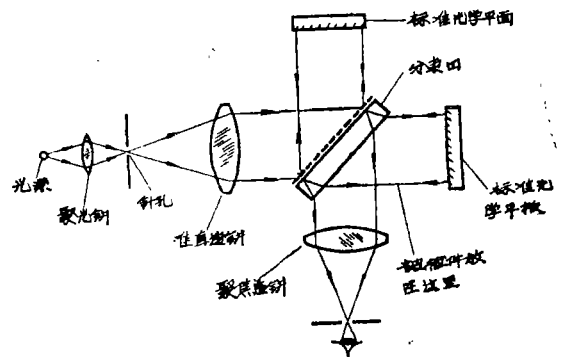


图7 台曼—格林干涉仪的基本布置

但技术上困难的步骤。问题是怎样避免为检验每种曲率半径需要分别的参考表面而还要维持高质量条纹。这种仪器在1967年独立地由英国的SIRA和美国的Perkin-Elmer公司宣称已经发展出来。SIRA型用一个经典的斐索布置，有一个常规光源，参考表面和被检表面间的间隙可以从零调整到5毫米。这可调间隙意味着可用比较少的样板（参考平面）来检验大量的不同曲率的表面。干涉仪的基本设计见图3，更多细节可看Biddles的文章。SIRA干涉仪的缺点是当被检表面是凸面时需用一个校正透镜。

Perkin-Elmer“球面干涉仪”(见图4)，

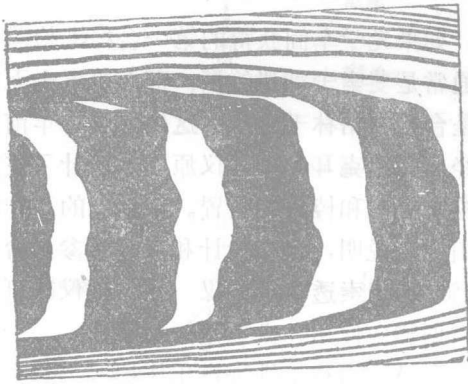


图2 典型劳埃-莫尔干涉条纹图

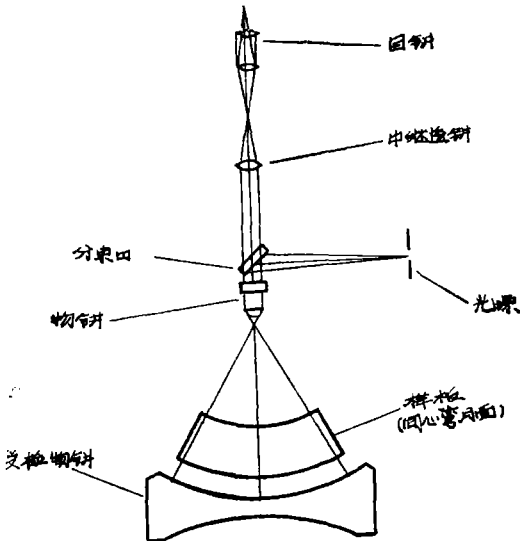


图3 SIRA球面波干涉仪多光束(SWIM)。由Heinze等描述，是以参

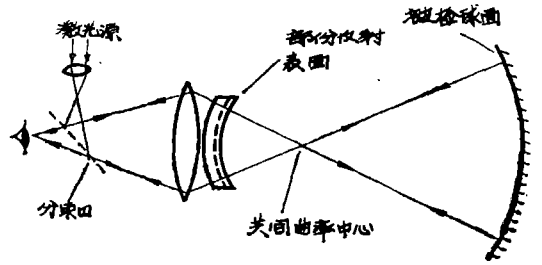


图4 Perkin-Elmer球面波干涉仪

考表面和被检表面形成一个同心空腔为基础的。形成的大间隙意味着必须用激光为光源。如果全反射面要检验，那么小的参考面必须加部分反射镀层使多光束条纹可以得到。光束的逃逸可以用放在参考面和被检面共同曲率中心的场镜来消除。这干涉仪的基本设计是为了检验大型球面凹镜，但它可以用于任何自聚焦系统。这样它可以用作检验光学平面和聚光透镜（借助于一个标准凹镜），无限共轭透镜（借助于一个好的光学平面）曲率半径小于参考表面的和凸表面。球面斐索干涉条纹图的解释和普通斐索条纹相仿（见前）。

透射检验

光学系统和元件的最后检验总是应该在准备使用的情况下进行的。这样制造一个平行平面光学窗时可用样板或斐索干涉仪帮助检验两表面的平度，但是因为窗口终究将透射波阵面而不是反射它，所以最终检验应该查透过窗口的波阵面。这是因为玻璃中任何不均匀性将影响波阵面的质量，但不能用样板或斐索干涉仪显示，因为它们只检验表面质量。可是斐索干涉仪只要用两个参考面而不是一个，就可以适用于透射率检验窗口（图5）。如果在两个高质量平面之间引进一个轻度光劈，可以看到直的、平行的、等间隔的条纹（倾侧条纹）横过视场。只要使第一参考面部分反射，第二个参考面完全反射，这些条纹可变为高精细度的多光束条纹。现在如果把要检验的窗口引进两平面间的

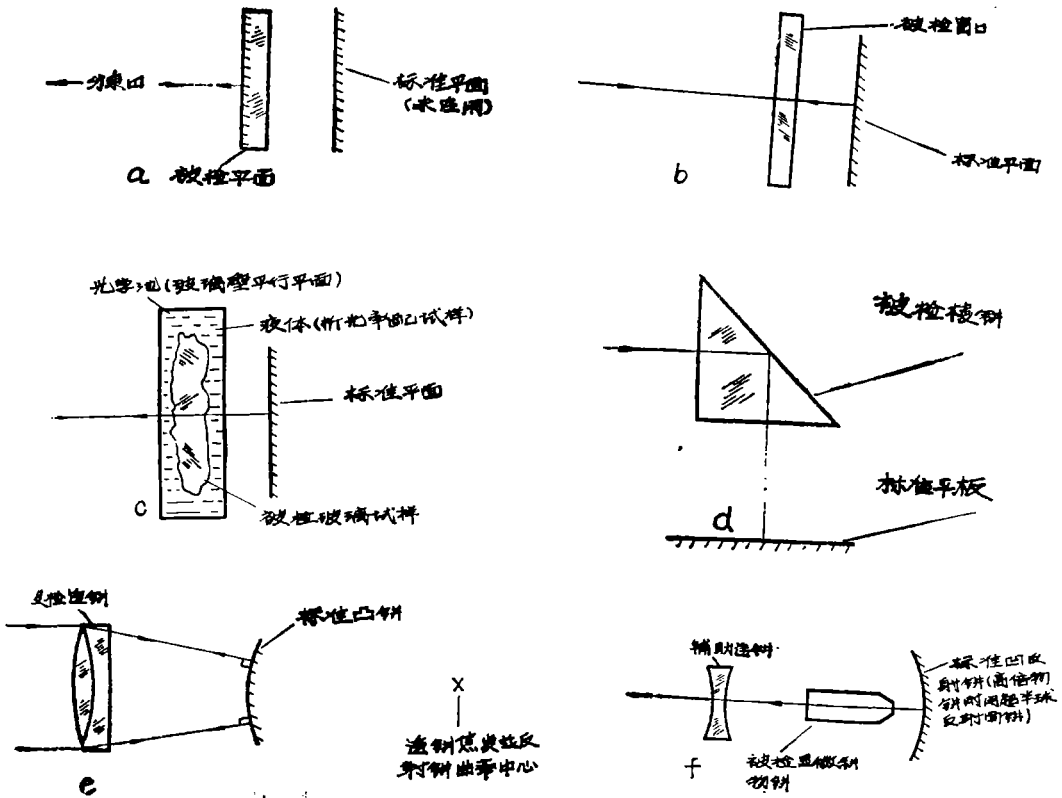


图8 台曼—格林干涉仪的应用：(a) 检验光学平面；(b) 检验光学窗口；(c) 检验粗玻璃的均匀性；(d) 检验90°棱镜；(e) 检验望远物镜；(f) 检验显微物镜。

射望远物镜是理想的。可是实际上加辅助透镜作帮助，任何透镜都可以检验，如图8检验显微物镜那样。当透镜用干涉仪检验时每类象差形成特别式样的条纹图样，操作人很容易识别。引进倾侧或离焦各自造成图样各别不同的修改。典型图样的显示可在图9中看到，更多细节和照片可在Kingslake文章里看到。Hariharan和Sen指出奇和偶的像差可以用台曼—格林干涉仪在双程布置中分开。这装置在某些情况下可以是很有用的。

和斐索干涉仪一样，为了要得到高对比条纹所用光源的大小和相干是有限制的。过去常用光源是低压汞灯加绿滤色片分出546.1毫微米线。用一个针孔限制光源大小使第一Haidinger条纹刚好充满干涉仪的出射瞳。在1960年代早期激光的出现第一次提

供了一个高强度相干光源，这很快用到干涉计量。激光增大相干长度使Housfon等能够设计一个台曼—格林干涉仪型具有两臂光程长度不等，而Munnerlyn等在用这仪器检验球面时采用同一途径。

台曼—格林干涉仪的主要优点，特别作为一个透镜检验装置，是使用简便，易于解释，一般易于调整，透镜的残余象差一看就识别。象差的详细定量评定、如果需要，可以做。主要的缺点是口径的限制—超过150毫米便价格过高，一般大小是100毫米—和它不能产生多光束条纹。这些因素限制了对检验光学平面和窗口的用途，这方面还是斐索干涉仪比较好。

斐索和台曼—格林干涉仪一起可以满足光学车间大部分常规检验的要求。可是两者

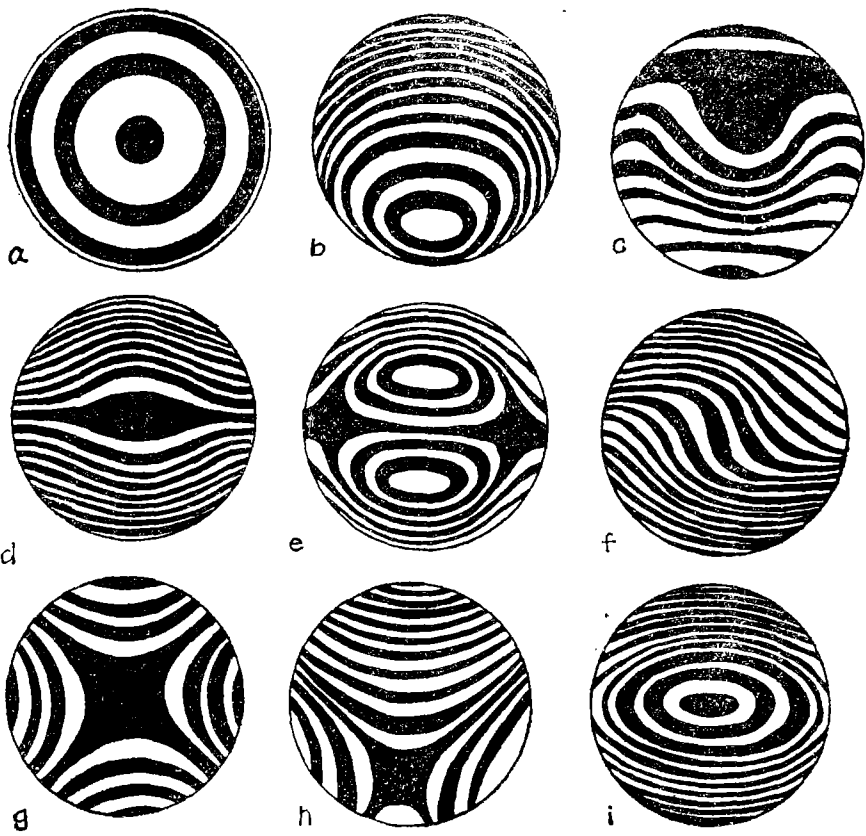


图9 典型台曼—格林干涉条纹图：球面象言：(a) 无倾斜，轴轴焦点；(b) 带倾斜，(c) 带倾斜并离焦；相差：(d) 无倾斜，轴轴焦点；(e)和(f)对轴倾斜；象散：(g)无倾斜，在子午焦点和弧矢焦点中间；(h) 带倾斜；(i) 无倾斜，轴轴焦点。

都限于检验总口径小于干涉仪的元件或系统（通常斐索150—200毫米，台曼—格林100毫米）。因此它们对车间偶而产生更大产品不能满意地处理，必须用别的检验方法。其中一个方法，斐索球面干涉仪可以用于球面的，已经描述。如果车间定期地生产大型球面反射镜或透镜，虽然一般只是透镜的个别表面检验而不是整个透镜检验）这仪器可以用作车间检验设备的有效补充。检验大口径光学的其它方法将在下面讨论。

波阵面剪切干涉术

大部分干涉检验需要一个标准考虑表面，除了球面斐索干涉仪和不等光程台曼—格林干涉仪检验球面情况外，参考面至少必须和被检物一样大。这对于能检验的元件尺

寸加上了限制，因为超过中等口径时干涉仪的费用便上升到过分地大，由于这样，很多想法是设计一检验装置不要参考表面。一个结果是发展波阵面剪切干涉仪（WSI），那里受检验的波阵面和自身剪切象重叠在一起，剪切可以是横向的、旋转的、倒置的或径向的。

在横向剪切中波阵面用一个分束器分成两个。一个横向地移过一数量，这数量和波阵面的直径比较起来是小的。当两个波阵面重结合起来时，干涉在重叠部分面积出现（见图10）。实际上剪切往往伴随着一个波阵面绕焦点（曲率中心）的旋转，这样一个完美的球面波阵面和剪切的本身全同，没有干涉条纹可以看到。往往搞好装备使波阵面围绕一个直径倾斜，这样引进倾斜条纹（对完美球面波阵面这些条纹将是直的、平直的、均匀间隔的）。关于波阵面剪切干涉计量学进一

步的细节可以从文献中找到。最早的波阵面剪切干涉计量学的例子是罗恩奇检验，在1920年代发展的、这将分别讨论（见下面）。

最早为波阵面剪切所用分束器之一是Lonouvel和Lonouvel采用的渥拉斯顿棱镜；这技术又受到Dyson和Bartholomeyczuk的注意。这些方法的主要缺点是引进的倾侧、属于所用分束器所固有的、是围绕与剪切轴垂直的一个轴（见图10）。这使所得干涉条纹图定量的解释很困难，于是留给贝兹去设计第一个WSI，利用更方便的围绕剪切轴的倾侧。对这点更详细的讨论请读者参阅作者的文章。贝兹的设计是根据Macn-Zehnder干涉仪，在图11中画出。这装置由Drew修改，要简化它的结构，后来又由Brown修改。他的原始型有固定的而不是可变

仪成为一个坚固的玻璃棱镜，包括两个或更多胶合组件。这类型的干涉仪由Saunders、作者和Murty描述过。作者的棱镜剪切干涉仪（PSI）在图12中画出。一个简化型的PSI也已由Saunders描绘，用简单的平面平行玻璃板作为剪切干涉仪的可能性由Murty，Murfy和Malacaya和Kelley和Hargreaves研究过。带可变剪切的PST由Donath和Cattlough、和van Rooyen和Houten提出建议。Ashton和Marchant描述过一个新型横向剪切干涉仪，其中象差直接从测量在一个组分波阵面中心的相位差变化来求得（当它被扫描经过另一个组分波阵面时）。Lomann和Bryngdahl建议一个新剪切方法他们用两个衍射光栅作为分束器；可变剪切用相反方向旋转两光栅求得。Hariharan和Sen设计了一个“周期”性的剪切干涉仪，它的优点是避

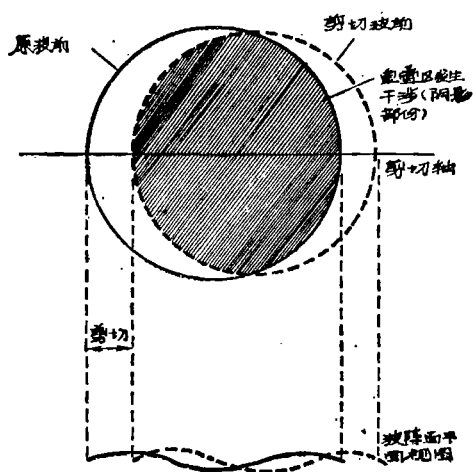


图10 横向波阵面剪切原理

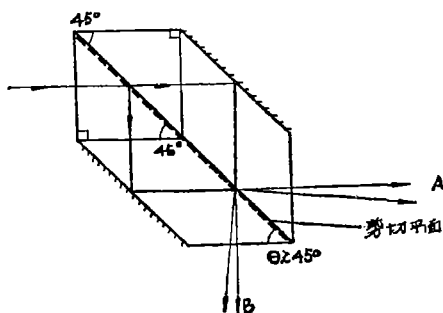


图12 棱镜剪切干涉仪

免了光程匹配的必要性，而这光程匹配是贝兹设计中所固有的。

横向剪切干涉条纹图的解释不是近乎台曼—格林条纹图那样简单，因为干涉出现在两个不完整的波阵面之间，而不是一个不完整的波阵面（从被检系统来）和一个完整波阵面（从参考表面来）之间。用围绕剪切轴倾侧首先由贝兹引进，使问题大为简化，但还要相当多的计算量。横向剪切干涉条纹图的分析由Drew、Brown, Saunders, Malacara和Mendez及其他作者讨论过，而Dutton等描述了一个自动处理数据的方法给出波阵面多项式。典型的横向剪切干涉条纹图在图13和14中给出

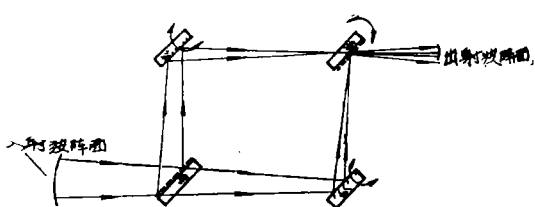


图11 贝兹剪切干涉仪

的剪切和倾侧。后一装置现在商业上可以买到，剪切是固定的（选择插入单元）而倾侧是可变的。取消了剪切和倾侧的调节，造成更大的坚实性，这优点后来又提高了，设计干涉

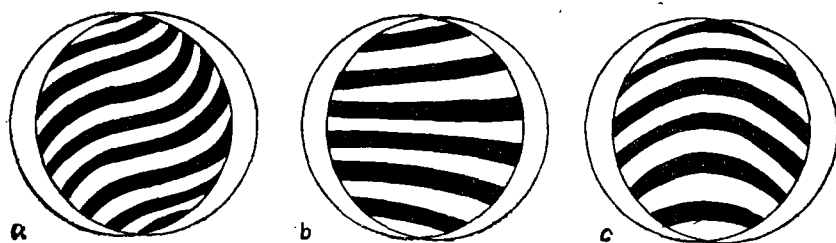


图13 典型横向剪切干涉条纹图，绕剪切轴倾侧：(a)球差；(b)彗差，垂直于剪切轴；(c)彗差，平行于剪切轴。(注：象散可以在干涉仪旋转过 90° 时从条纹间隔和/或倾侧检测出来)

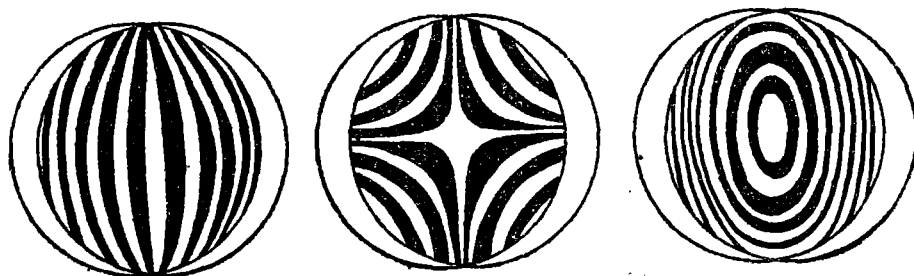


图14 典型横向剪切干涉条纹图围绕与剪切轴垂直的一个轴倾侧：(a)球差；(b)彗差垂直于剪切轴；(c)彗差平行于剪切轴(注：象散可以在干涉仪沿光学轴移动时从条纹旋转检测到)。

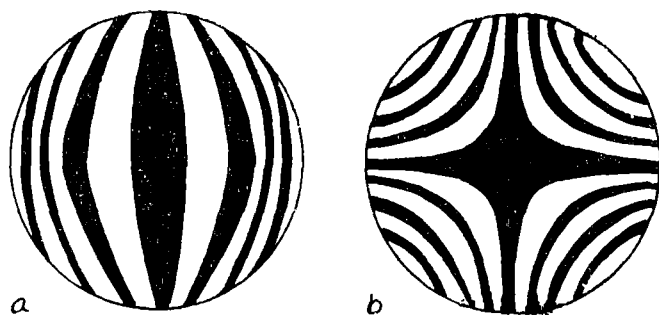


图15 典型旋转剪切干涉条纹图：(a)彗差，旋转剪切 $=180^\circ$ ；(b)象散，旋转剪切 $=90^\circ$ (注：旋转对称的象散如球差，不能从旋转剪切检测出来)

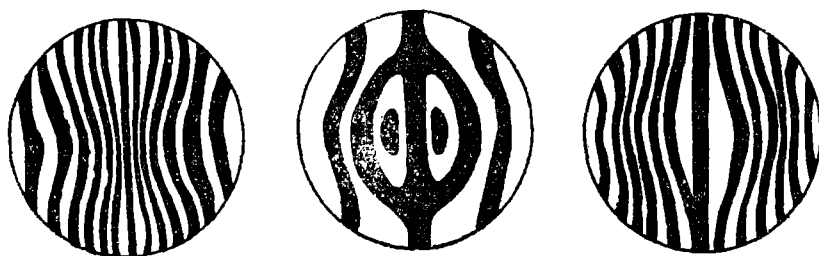


图16 典型波阵面倒置干涉条纹图，彗差(从左到右倾侧逐渐增加)。

旋转或角的剪切是由分裂波阵面成两个组分，将一个组分对于另一个旋转，再将两个重新结合使它们互相干涉。Murty 和Hagerott描写过一个根据雅明干涉仪搞出的系统而迈克耳逊和Sagnac干涉仪被Armitage和Lohmann用作出发点。这两篇文章中都指出旋转剪切的优点在于分开不同象差效应，典型的彗差和象散的条纹同样在图15中举例说明（旋转对称的象差如球差检测不出来）

在波阵面倒置干涉仪 (WRI) 中将半个波阵面摺叠回来重叠在另一半上，使它们干涉。叠叠可以是恰好的，或是有一些剩余的横向剪切。用Koster棱镜方法已由 Gates和Saunders描述而Sen和Puntambekar用一个根据雅明干涉仪搞的波阵面倒置系统和一个根据斐索干涉仪搞的波阵面反摺系统。旋转对称波阵面给出的条纹图样和普通横向剪切干涉仪在剪切量相同的时候给出的条纹图一样（例如看图13(a)）。离轴象差在另一方面效果不同，甚至在零剪切量时还给一个剩余的条纹图样。这对分离出离轴效应很有用由畸变的波阵面所得条纹图在在图16中给出。

一个不同类型的波阵面倒置，将波阵面中心和边缘干涉，和反过来可以用一个旋转三棱镜透镜或一个圆光栅来达到，把波阵面一个组分来一个“里翻外”地旋转。这技术Bryngdahl用了，研究旋转对称的波阵面的径向对称。

当分裂的波阵面的一个组分在重叠前扩张了的时候，径向剪切出现，于是总的波阵面和中心部分干涉（见图17）。一个径向剪切干涉仪是根据雅明干涉仪搞的由Brown证明的。这装置的细节和它的“爆炸剪切”系统（根据Kostev棱镜）同一作者后来一篇文章里都给了。Haraharan和Sen设计了一个周期型的径向剪切干涉仪，而Murty的型是以五角棱镜器为基础的，其中半个内有半球面凹孔。Stee把双折射透镜用在他的径向剪切干涉仪中，以检验显微物镜。Stee和Som

近来将激光用在径向剪切干涉仪了。径向剪切的主要优点是条纹图近似地和台曼一格林条纹相同（见图9）。加大剪切近似愈好。

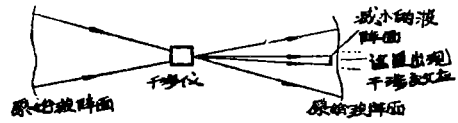


图17 径向剪切干涉仪原理

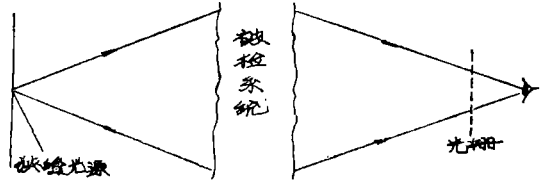


图18 罗恩奇检验的基本布置

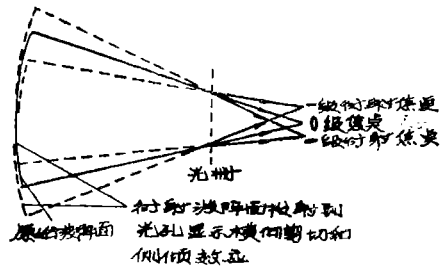


图19 罗恩奇光栅作为横向剪切干涉仪

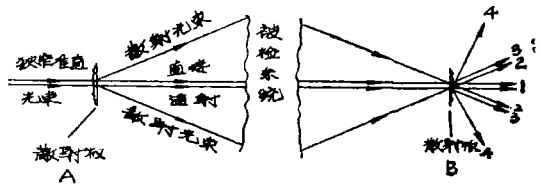


图20 散身条纹干涉计量原理。光束1为两散射板直接透射；光束2为A透射；B透射；光束3为A散射。B散射。光束2和3恰好重叠并有同强度，相互产生干涉。

上节中提到的径向剪切装置都应用放大率的差别以产生剪切。由此径向剪切并不是常数而是从在孔径中心的零变化到在边上的极大。Brungdahl近来用旋转三棱镜透镜和圆光栅引进一个常量径向剪切，这样得出（对小剪切）被检波面的一个径向导数。

总起来讲MSI的主要优点和“经典”干涉仪如台曼一格林型比较，好在取消参考面的需要。这意味着可以检验较大的元件。这

些方法对天文望远反射镜这类东西是无价之宝。另一优点是一个共光程装置（干涉的光束基本经过同一光程）。剪切干涉仪是比较经典干涉仪付本不易受到振动。这些优点是其它共光程技术所分享的，例如罗恩奇检验和散射条纹检验，这些下面将描述。波阵面剪切干涉仪的主要缺点是有名的定量解释条纹图样的困难。如果倾侧安排到围绕剪切轴，这问题的严重性可以减轻。在径向剪切中如果用了剪切量，这问题几乎可以完全消除。近来Langenbeck提出了一个解决解释问题的新方案。在剪切干涉仪所产生的两个空间分离的点光源象中的一个，引进一个很小的针孔光阑，他转变这个干涉仪成为一个绝对干涉仪（有一个理想的参数光束）、而保存了波阵面剪切的优点。

罗恩奇检验

现在罗恩奇光栅看作是一个波阵面横向剪切干涉仪。可是它原来发展（1920年代）是作为一个几何检验装置，除非用了十分精细的光栅否则几何解释还是有效。为此原因，又因为这检验这样广泛地应用，罗恩奇检验各方面都分别有所论述。这检验的历史创造者本人写了一本包罗万象的评论。

罗恩奇检验基本形式在图18中画出。从狭缝来源的光用被检组件聚光，用一个粗光栅（每毫米20线）放在焦点附近。观察人的眼睛可以放在光栅后面，如图所画或是受检组件的孔径光阑象可以在适当位置的投影屏上观察。任一情况下所见组件带有线状花样或条纹重叠在上面。几何地讲光栅起到多重傅科刀口的作用。缺乏直线性是由于在象差波阵面不同组的光线有不同焦点，这样引导到畸变过的遮拦。这些畸变在光栅愈近主焦时愈大。这种几何途径对粗光栅有效，是罗恩奇当初应用的，虽然后来采用了干涉计量途径。这就把罗恩奇光栅看作一个剪切干涉仪，衍射各级相重叠、相互干涉（图19）。剪

切量由光栅线间隔所固定，而倾侧（因而灵敏度）可以沿着光束移动光栅来达到改变。有趣的是条纹间隔不因波长改变，因而可用白光。干涉途径当然对所有光栅间隔都有效的，但在大间隔时几个衍射级都相重叠便复杂了。罗恩奇检验落在横向剪切干涉仪这类里，这里倾侧轴垂直于剪切轴，因而条纹图样的定量解释是困难的（见前）。某些工作者可是已费事地计算对某些非球面镜应观察到的图样，而Devang指出罗恩奇图和带倾侧的台曼一格林图的相似。Malacara和Cornego把罗恩奇检验应用到轴向色差上。不管详细解释多么困难，检验本身简单是普及化的主要原因，有经验的人能够很好地应用它输出的定性信息，特别是如果结合傅科刀口检验一起用。罗恩奇图和同类型横向剪切条纹图是全同的（图14）。

散射条纹干涉术

另一个共光程干涉仪是在理论上提供重要优点的、由Burch提出。一个“散射板”或漫射屏放在一狭窄准光直束里，如图20所示。这板允许光的某百分数不变地透过，其余的散射，象图里画出的那样。受检组件放的位置使直接光束射着它的中心，而散射光束则在它整个口径上。经过被检组件后光束指向和第一块相同并同样取向的又一散射板。又是某些光直接透过而某些散射，干涉将发生于第一板直接透过而第二板散射的光束和第一板散射而第二板直接透过的光束之间（图20）。如果被检组件是理想的，给出波阵面没有象差，那么看不到干涉条纹。因为整个元件的波阵面要同元件中心环带实际上的理想波阵面进行比较，如果波阵面不是完美的球面，干涉条纹将相应于台曼一格林干涉仪中的那样。在其自身平面内移动一块散射板可以引进倾侧条纹而沿光轴移动一块散射板如台曼一格林干涉仪那样又引进离焦条纹。主要困难是做出全同的散射板，但这

问题已大半克服了，而方法用得很成功。散射条纹检验和径向剪切干涉计量之间的相似是明显的，前者可以看作后者一个特殊情况。

非光学表面的干涉检验

所有描述的检验到现在为止，除了劳埃莫尔干涉仪外都要求被检元件或系统的表面(S)是光学抛光的，因为必须或是透射或是从被检物镜反射。和研究的过程比较，从表面抛光去掉玻璃是很慢的工作，而指出一个粗磨的玻璃表面接近所需圆形到什么程度、将对什么时候才值得开始抛光是很有用的指南。

使一个粗磨玻璃表面像镜子那样反射的一个明显的方法是用适当物质涂上一层。几年前 Walland 描述了一个斯密特板在研磨的阶段用石蜡涂上，为了要做罗恩奇检验，更近 Moreau 和 Hopkins 用蜡涂在被检粗磨平板上在斐索干涉仪中检验。这技术的主要缺点是必须谨慎保证物质涂层的均匀性。选择材料也很重要—Moreau 和 Hopkins 发现最成功的是他们试用透明的鞋油！

用较长的波长亦可使较粗的表面用干涉计量检验，而 Munnerlyn 等描述一个修改的台曼—格林干涉仪用二氧化硫激光的红外光检验。某种换能器必须使用、使条纹可见，而为此所需设备、包括激光、使这方法困难和昂贵。

Rowe 和 Welford 建议一种投射条纹技术，将被检表面用两个相互倾斜的相干光束斜向照明，条纹的间隔可以连续改变直到 0.7λ 。这对表面形貌研究是一个很有力的工具，因对可应用的表面类型没有限制。除了灵敏度因素可以任意调节外，条纹图样的解释和斐索条纹一样。这技术的更多细节已由 Welford 写出。

另一个非光学表面，特别是平表面，上做干涉检验的方法是用掠射角。在很高的人

射角，甚至很粗的表面也变为镜样反射，而使像劳埃莫尔干涉仪技术能用到这种表面上。用棱镜在掠入射角下引光到平表面上已由 Abramson 描述，他用降低灵敏度的斐索条纹，并由作者描述用 Haidinger 型条纹。两种技术都可以用九光泽面如粗磨玻璃和金属。Abramson 的方法更易于定量解释，但需要用光学系统来产生必要的准直光，并重新使它指向观察者的眼睛，作者描述的技术只用棱镜，如果只需对误差做出估值、是非常快速易用的。两方法都限于检验面积不超过棱镜基面。

全息术

全息术过程由加柏所发现，在1960年代被利思和 Upatnieks 及别人随着激光的引入而很快发展。全部全息术的现在工艺水平可在论这专题的标准教科书里看到，但基本过程由图21指示。

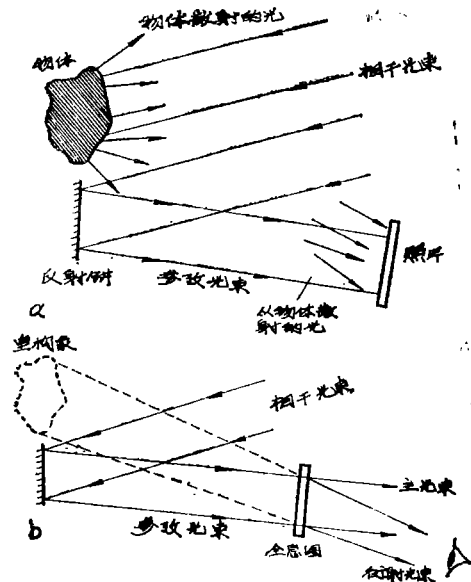


图21 全息术原理：(a)记录；(b)重构

第一次全息术应用到光学组体的检验由 Hildebrand 等提出。从被检组件来的波阵面做成一个全息图。这个全息图用来代替组件放到傅科力口检验。和放到 Murty 设计的

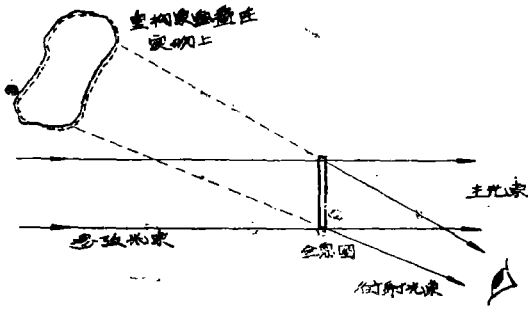


图22 实时全息干涉技术

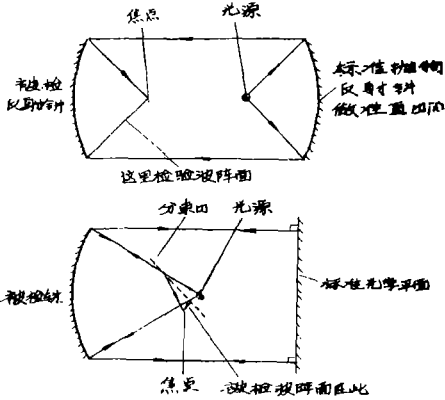


图23 一个抛物镜的零检验(X)用一个准直器;
(下) 用一个光学平面。

共程干涉仪布置里。可是更直接的全息术应用、由Haines和Hildebrand引进了全息干涉术成为可能。一个方法是‘实时’途径，从一物体全息图来的重构象重叠在第二物体上（或同一物体改变环境）作比较。图22说明这技术。两物体的任何微差由重叠在物体上出现的干涉条纹显示出来。另一方法是双曝光法，两物体的全息图重叠在同一照相板上；又是由干涉条纹揭露两物体的任何微差。任何一种技术都可用于不透明的三维物体，因此即使是粗磨状态，可以用光学表面和参考全息图作比较。再则因为全息图可以用计算机产生，参数面只需要作为一个数学方程存在就行！

全息干涉术已由几个工作者成功地应用于检验玻璃表面。这技术的优点是可以应用到非抛光的表面，物体不必移到试验室安装（特别是如果用双曝光法），如果需要的话，参考全息图可以由计算机产生，这样避免用

真实的参考表面。缺点是解释干涉图样的困难，它代表三维差，全息术包括含着费用大比较困难的技术。一个主要的考虑是要维持物体和重构体点对点的相应。这技术本身的维持主要是在检验大口径反射镜领域。

检验的选择

在特殊情况下检验的选择往往根据个人的爱好。例如，一个熟练的操作人有多半使用和解释傅科刀口检验的经验，很可能愿意用那检验法，不愿引进一个剪切干涉仪的新设计，即使后者可能给出检验的波阵面的精确的定量评定。可是总的来说，有某些广泛原则应当遵守。

如果可能的话第一个是采用一个零检验法。检验应设计得使完美系统给出零结果，它可以表现为一个均匀照明的视场，直线平行干涉条纹，一个光的对称分布，或某些其它易于认识的状态。实际上，当检验一个完美的球面（或平面）时往往出现零结果。因此设计一个零检验意味着布置一个系统使它在理论上给出这样一个完美波阵面。一个球面反射镜可以用在曲率中心的点光源进行零检验，成象透镜可在设计中的共轭点进行检验。一个抛物反射镜需要一个准直入射光或引进一个高质量光学平面产生一个自聚焦检验（见图23），一个椭球反射镜可由在一个焦点放点光源在另一焦点检向它会聚的波阵面来进行零检验。往往设计一个零检验不可能，但即使如此，工作人员往往愿意甚至设计和制造一个专用修正透镜系统使零检验实际上完成。这和在检验中观察人想办法与一个计算出来的作为完整系统所产生的某种复杂图样匹配的办法比较，往往更为可取，虽然这种匹配法往往是被采用的。

第二个考虑是系统或组件应放在设计要求的条件（光学的或环境的）下进行检验，第三特别是如果不能进行零检验，选用的检验应为易于解释的，如可能，要定量地解

释。最后所选检验的灵敏度，是已知和了解的一很多光学检验是极端敏感的，有时用小锤敲核桃都有危险。其它因素如费用，时间和可用设备也必须考虑，必须是操作人所愿

意选用的，前面已讲过。表1指出那些检验方法一般适宜于不同类型的组件和系统。这不要要求应有尽有或包罗万象，但只作为在不同的环境下常常采用的检验类型的指导。

表 1 检 验 的 选 择

	样板	斐索	劳埃—莫矢	球面斐索	透射	台曼—格林	波阵面剪切	罗恩奇	散射条纹	掠入射	全息术
粗玻璃的均匀性						X _a					
光滑的平面			X							X	
光学平面 (抛光的)	X	X				X					
光学平面 (大型)			X				X	X			
窗口			X _a		X	X	X	X			
棱镜						X					
曲表面 (未抛光)											X
凹球面反射镜				X		X _a	X	X	X		
凸球面反射镜	X			X		X _a					
凹非球面反射镜							X	X	X		
凸非球面反射镜 (d)								X	X		
透镜表面	X		X			X					
透镜元件						X	X	X	X		
望远物镜						X	X	X			
显微物镜						X	X				
照相透镜						X	X	X	X		
投影透镜											
复制透镜							X	X	X		
完工元件的均匀性					X	X					

- (a) 用液体槽
- (b) 表面平度检验
- (c) 修改的台曼—格林
- (d) 用辅助光学

结 论

光学元件和系统的检验对光学工业是有根本重要性的。是检验设备最后决定操作人员能得到的精度。所以不幸的是看到国内外很多光学公司缺乏检验设备和技术，只依靠一二种往往不适合的检验方法。另一方面，光学检验方法已有大量出版，但它们限于设计的一种情形下使用。需要有某种折衷办

法。本评论希望成功地达到目的，描述可用的主要干涉检验方法，指出它们特别适宜于某类型的元件或系统，并提供读者各种技术更详细的出版文章。没有赏试把干涉检验方法和光线光程技术，如傅科刀口检验或哈特曼检验，或是和象评定技术，如分辨率检验光学传递函数作比较。这种工作是远超过单独一篇文章的范围的。

(译自“Optics and Technology, Vol.4, No.1 P.28)