文章编号 1004-924X(2019)03-0542-10

大尺寸反射式光栅拼接技术的研究进展

杨国军[1,2],齐向东[1*],于海利[1],李晓天[1],张善文[1],糜小涛[1],于宏柱[1]
(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:大尺寸反射式光栅是提高天文光谱仪分辨率和啁啾脉冲放大系统输出能量的核心元件。随着天文和激光核聚变技术的发展,大尺寸反射式光栅的研制已成为国内外学者研究的热点。相较于单块大尺寸反射式光栅的研制,拼接法以其难度系数低、制作成本低和待拼接的小光栅易制作、质量高等优点成为了制作大尺寸反射式光栅的主要方法。本文介绍了大尺寸反射式光栅拼接技术的基本原理,详细综述了光栅拼接技术的研究进展,包括光栅拼接误差检测理论、光栅拼接误差分离、拼接光栅波前相位校正、光栅拼接误差维数的削减和光栅拼接装置,最后总结了光栅拼接技术的优缺点并指出了其未来的发展方向。

关 键 词:光栅拼接;误差检测;误差分离;相位校正;拼接装置
中图分类号:TN256;O436.1 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20192703.0542

Development of mosaic technology for large-size reflective gratings

YANG Guo-jun[1,2], QI Xiang-dong[1*], YU Hai-li[1], LI Xiao-tian[1],
ZHANG Shan-wen[1], MI Xiao-tao[1], YU Hong-zhu[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: chinagrating@263.net*

Abstract: Large-size reflective grating is the core element for improving both the resolution of astronomical spectrometers and the output energy of chirp-pulse amplification systems. With the development of astronomy and laser fusion, the fabrication of large-size reflective gratings has become a hot topic for scholars both domestically and internationally. Compared to the fabrication of a single large-size reflective grating, the mosaic method has become the primary method of fabricating large-size reflective gratings, as it has the advantages of a low difficulty coefficient, low production cost, easy fabrication, and high quality of small gratings to be mosaicked. In this study, the basic principles of large-size reflective grating mosaic technology are introduced, and the research progress of grating mosaic technology is summarized in detail. More specifically, this study considers the theory of grat-

收稿日期:2018-09-13;**修订日期**:2018-11-09.
基金项目:国家重点基础研究计划资助项目(No. 2014CB049500);国家自然科学基金资助项目(No. 61505204, No. 61605204);吉林省青年人才基金资助项目(No. 20170520167JH);重大科学仪器设备开发专项(No. 2016YFF0103304);国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFF0102006)

ing mosaic error detection, the separation of grating mosaic error, the phase correction of the wavefront of mosaic grating, the reduction of the dimension of grating mosaic error, and the grating mosaic device. Finally, the advantages and disadvantages of grating mosaic technology and directions for future development are summarized.

Key words: grating mosaic; error detection; error separation; phase correction; mosaic device

1　引　言

在天文领域和激光核聚变领域，大尺寸衍射光栅是影响光谱仪分辨率和激光器拍瓦级能量输出的主要因素[1-6]。一般情况下，衍射光栅的刻线长度或刻线宽度达到 0.5 m 及以上时，称之为大尺寸衍射光栅。由于衍射光栅刻划存在诸多难题，衍射光栅的尺寸一直受到限制。1965 年光栅拼接技术被提出，并于 1980 年成功地应用于加拿大自治领天体物理观测台的 Canada-France-Hawaii 天文望远镜 Coudé 光谱仪中，此时衍射光栅的尺寸才得到了进一步的提高，高分辨率光谱仪和高能量激光器的研制也得以有了突破[7]。

最初的光栅拼接是指利用机械装置将两块或多块参数相同的小尺寸光栅拼接在一起，调整光栅的相对位置姿态，使各光栅引入的入射光束的相位变化相接近，在一定精度要求下可当作一整块光栅使用，即机械式拼接。但这种技术拼接的光栅在使用时需要实时检测并加以调整，才能保证拼接的波前精度。为了解决这一问题，美国理查森实验室（Richardson Grating Laboratory，RGL）提出了复制拼接[8-9]。复制拼接是指将满足波前精度要求的机械式拼接光栅同时复制到一块基底上，最后完成复制光栅的分离，获得复制拼接光栅。这种技术主要依赖于机械式拼接，且在复制时拼接光栅的波前未得到实时检测，拼接误差发生变化后无法及时校正，不易保证复制拼接光栅的波前。

借鉴机械式拼接，国内外学者又提出了曝光拼接。苏州大学基于参考光栅的曝光拼接法制作了拼缝处精度优于 0.05λ，尺寸为 80 mm × 110 mm的拼接光栅[10]。清华大学基于潜像光栅的曝光拼接法制作了 −1 级衍射波前差为 0.06λ，尺寸为（60 + 28）mm × （53 + 30）mm 的拼接光栅[18]。美国普利茅斯光栅实验室基于步进扫描曝光拼接制作了衍射波面质量达 0.17λ，尺寸为 910 mm × 420 mm 的拼接光栅[11]。曝光拼接通过多次移动基板对不同区域进行全息曝光，以实现光栅面积的扩大。目前，曝光拼接主要有基于参考光栅的曝光拼接[10,12-13]、基于潜像光栅的曝光拼接[14-15]和步进扫描曝光拼接[11,16-17]。曝光拼接方便快捷、产量高，且拼接的光栅使用难度低。但曝光拼接对曝光光束和基板的相对位置控制具有非常高的要求，曝光与检测中任何不稳定性因素都会引入拼接误差，影响光栅的波前质量。

从成本、难度系数、技术成熟度等角度考虑，相较于复制拼接和曝光拼接，机械式拼接更有利于米级甚至更大尺寸光栅的研制，满足未来天文和核聚变领域对光栅尺寸的要求，如 30 米望远镜（TMT）[19-20]，OMEGA EP[21]、FIREX[22] 和神光[23]等项目，它们应用的米级大尺寸光栅皆是采用机械式拼接法获得的。

为给光栅拼接技术的进一步研究提供详细的参考，本文论述了光栅拼接技术的基本原理，详细综述了光栅拼接技术的研究进展，并总结了光栅拼接技术的特点及发展趋势。

2　光栅拼接技术的基本原理

如图 1 所示，两块光栅在拼接时存在着六维误差、绕光栅矢量方向的旋转误差 $\Delta\theta_x$、绕光栅栅线方向的旋转误差 $\Delta\theta_y$、绕光栅法线方向的旋转误差 $\Delta\theta_z$、沿光栅矢量方向的平移误差 Δx、沿光栅栅线方向的平移误差 Δy 和沿光栅法线方向的平移误差 Δz。其中，沿光栅栅线方向的平移误差 Δy 只影响拼接光栅的有效面积，不影响拼接光栅的性能，所以可忽略；误差 $\Delta\theta_x$ 和 $\Delta\theta_z$ 不仅会导致光栅表面返回光与参考光产生的干涉条纹发生宽窄变化，还会导致光栅的远场衍射光斑发生纵向

分离；误差 $\Delta\theta_y$ 不仅会使光栅表面返回光与参考光产生的干涉条纹发生倾斜，还会导致光栅的远场衍射光斑发生横向分离；误差 Δx 和 Δz 会不仅会光栅表面返回光与参考光产生的干涉条纹发生错位，还会导致光栅的远场衍射光斑产生缝隙。

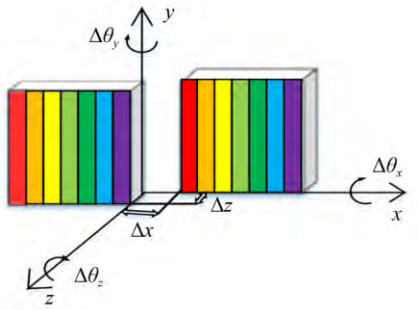


图 1　光栅拼接时存在的拼接误差

Fig. 1　Mosaic errors between gratings

影响光栅性能的五维误差中，$\Delta\theta_x$，$\Delta\theta_y$ 和 Δz 称为共面误差；$\Delta\theta_z$ 和 Δx 称为面内误差。共面误差的反馈信息主要依靠光栅的零级衍射光检测获得，共面误差中 Δz 波长整数倍误差的反馈信息主要依靠双波长或双入射角检测光检测获得。面内误差的反馈信息主要依靠光栅的衍射级光检测获得。光栅拼接技术的原理是根据五维拼接误差的反馈信息，利用机械拼接装置校正五维拼接误差，使拼接光栅的波前精度满足使用要求。

3　光栅拼接技术的研究进展

3.1　光栅拼接误差检测理论

光栅拼接误差检测理论有干涉原理[8]和远场衍射原理[25]。其中，远场衍射原理利用光栅的衍射光被聚焦在探测器上形成的衍射光斑的变化来判断光栅间的拼接误差；干涉原理利用拼接光栅面返回光与干涉仪参考光形成的干涉条纹的变化来判断光栅间的拼接误差。

二十世纪八十年代，美国 RGL 首先利用干涉原理进行光栅拼接。RGL 采用干涉仪检测光栅波前，利用光栅的零级光和衍射级光检测光栅间的拼接误差，从而完成了两块 214 mm × 415 mm的中阶梯光栅的复制拼接，拼接光栅的共面误差优于 4.848 μrad[8]。图 2 为 RGL 利用斐索干涉仪检测拼接光栅误差时获得的干涉条纹。

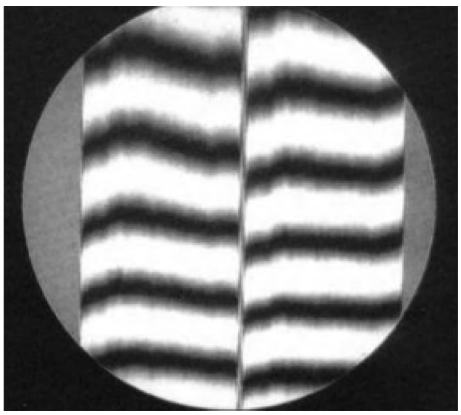


图 2　曝光拼接光栅的干涉条纹[8]

Fig. 2　Interference fringes of tiling grating[8]

2004 年，日本山梨大学的 Harimoto 等人针对基于远场衍射原理的拼接光栅检测进行理论分析[24]。他们利用夫琅禾费积分方法建立了拼接光栅误差与远场光斑能量的数学模型，并根据该模型计算出了 500 mm × 500 mm 的阵列光栅拼接时的共面误差为 0.25 μrad。图 3 为仿真得到的拼接光栅的远场衍射光斑。

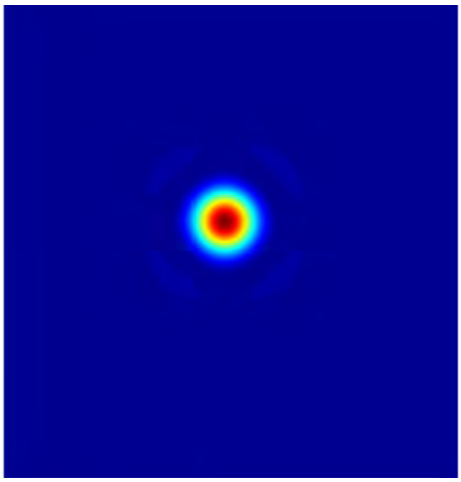


图 3　拼接光栅的远场衍射光斑[24]

Fig. 3　Far-field diffraction spot of tiling grating[24]

比较基于干涉原理（条纹法）和基于远场衍射原理（光斑法）拼接的光栅可知，后者的光栅波前优于前者，光斑法的误差测量精度比条纹法的误差测量精度高。不过，2007 年美国罗彻斯特大学 QIAO 等人对远场光斑和近场衍射波面的分析表明，大口径光束远场成像系统存在像差，而像差的存在会导致拼接的波前与测量的远场光斑所反映

的拼接误差不一致，最佳的远场光斑质量并非对应最佳的拼接状态，而近场的所有拼接子光栅波前均能够较好地反应拼接质量[21]。因此，基于干涉原理进行光栅拼接，基于远场衍射原理进行检测的思想由此形成，光栅拼接误差的检测理论得到了完善。

国内最早开展光栅拼接误差检测理论研究的是长春光机所[25]。2000 年，赵博等人提出位相拼接的概念，并建立了一维位相误差模型[26-27]。随后，四川大学的马延琴[28-29]和上海光机所的马雪梅[30-31]等人针对拼接误差对远场光能量分布的影响也进行了研究。

3.2　光栅拼接误差的分离

依据光栅拼接五维误差对拼接光栅波前相位的影响，在进行误差校正时 $\Delta\theta_x$ 和 $\Delta\theta_z$ 会出现相互补偿，Δx 和 Δz 也会出现补偿，光栅拼接误差无法得到完全校正。因此，需要实现五维误差的分离检测。

2007 年，中国工程物理研究院的杨学东等人利用单波长的零级和衍射级光实现了光栅间旋转偏差的分离检测，利用迈克耳逊干涉仪实现了前后平移误差的检测，但没有实现平移误差 Δx 的分离检测[32]。同年，清华大学的曾理江和李立峰等人提出严格拼接（$\Delta\theta_x=0$，$\Delta\theta_y=0$，$\Delta\theta_z=0$，$\Delta z=0$，$\Delta x=nd$，其中 d 为光栅常数，n 为任意整数），并根据五维拼接误差与相位差的关系，设计了三波长误差检测光路，利用单波长的零级和衍射级光完成旋转误差的分离检测，利用双波长的衍射级光完成平移误差的分离检测，最终实现了光栅拼接五维误差的分离检测，完成了光栅的严格拼接。如图 4 所示（彩图见期刊电子版），在该光路中，红色光束为零级误差检测光；蓝色光束和紫色光束为衍射级误差检测光；绿色光束为第三波长检测光，用于检测光栅的拼接质量[33-36]。

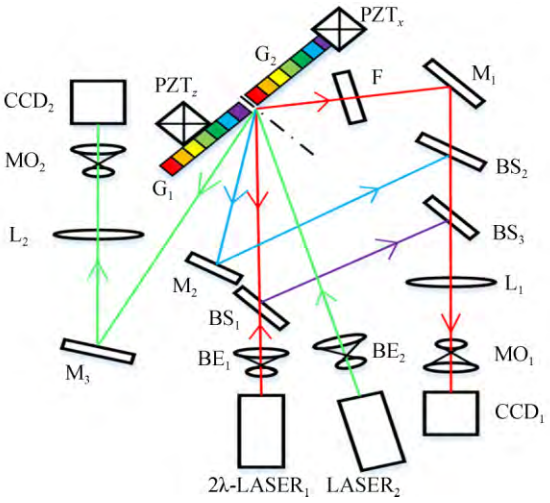


图 4　三波长光栅拼接误差检测光路

Fig. 4　Optical path of three-color wavelength mosaic error detection

杨学东和曾理江等人都是基于远场衍射原理拼接光栅。不同于此，2016 年卢禹先等人基于干涉原理设计了光栅拼接误差检测系统，分三步实现了五维拼接误差的分离与消除[37-38]。如图 5 所示，在该系统中，引入了一个楔形棱镜，进而引入了一个不同入射角的检测光，增大了沿光栅法线方向平移误差的初始调整范围，消除了因该误差整数倍无法确定的测量不确定性。

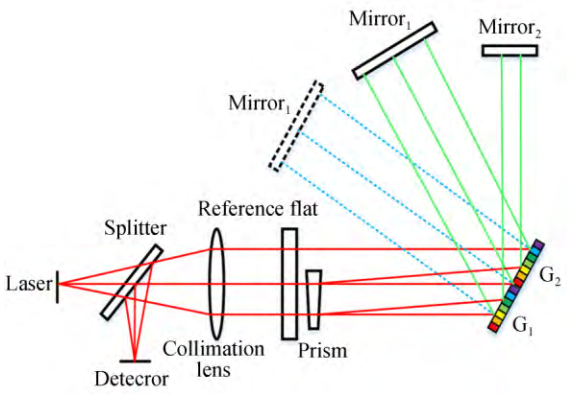


图 5　基于波前法的光栅拼接误差检测光路

Fig. 5　Optical path of mosaic error detection based on wave-front method

3.3　拼接光栅的波前相位校正

大尺寸拼接光栅的波前精度主要依赖于拼接装置，而拼接装置的精度和稳定性受环境影响很大。拼接光栅的波前精度发生变化后，拼接光栅的波前相位也会发生变化。因此，为了保证拼接光栅在使用时的波前相位，需要校正拼接光栅的波前相位。

拼接光栅的波前相位校正主要有两种方法：设计相位检测光路，直接调整光栅校正相位；从几何光学角度出发，基于同一光路中两反射镜对光束指向和相位的影响可以相互补偿的原则，在压缩器中引入平面镜，调整平面镜校正相位。

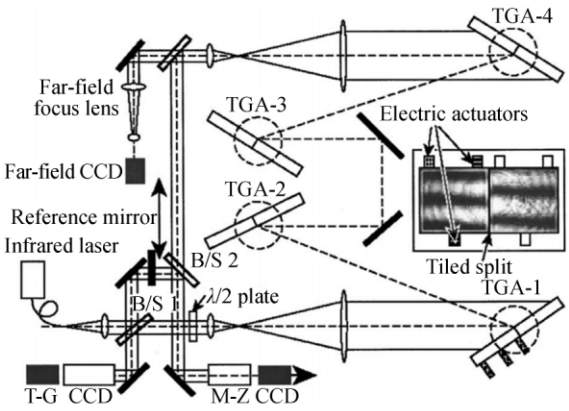


图 6　马赫-增德干涉仪相位检测光路

Fig. 6　Optical path of phase detection by Mach-Zehender interferometer

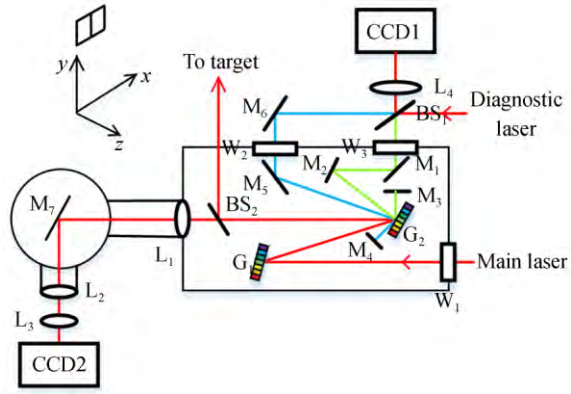


图 7　拼接光栅相位检测光路

Fig. 7　Optical path of phase detection for mosaic grating

美国罗彻斯特大学的激光力能学实验室[39]和中国工程物理研究院[40-41]分别利用马赫-增德干涉仪和与主光束具有不同的波长和入射角的检测光束检测压缩器中拼接光栅的波前相位，通过调整一组拼接光栅中单块光栅的位姿校正压缩器中拼接光栅的波前相位差。图 6 为利用马赫-增德干涉仪进行相位检测的光路。图 7 为 2008 年中国工程物理研究院设计的相位检测光路(彩图见期刊电子版)，图中，绿色光束为零级检测光束，蓝色光束为一级检测光束。

法国 CEA CEST 的 N. Blanchot[42]等和重庆大学的王胤[43]分别在脉冲压缩器结构中引入了一块可三维调整的平面镜(Segmented Mirror)和在压缩器检测光路中引入了一对小口径动静反射镜，通过调整平面镜和能动小口径反射镜来校正拼接光栅的波前相位。图 8 为 N. Blanchot 等设计的压缩器结构图。图 9 为王胤设计的相位校正光路图，图中，M_1 为小口径静反射镜，M_2 为小口径动反射镜，AMP 为放大器。

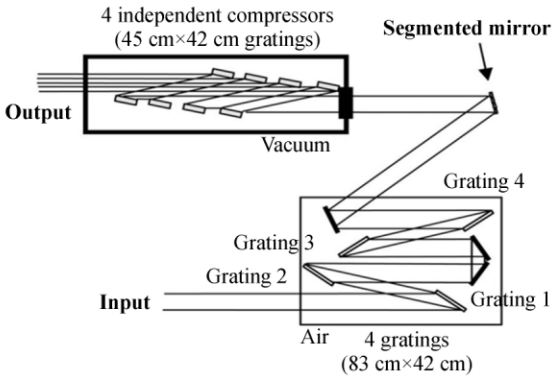


图 8　N. Blanchot 等设计的压缩器结构图

Fig. 8　Structure diagram of compressor designed by N. Blanchot *et al*.

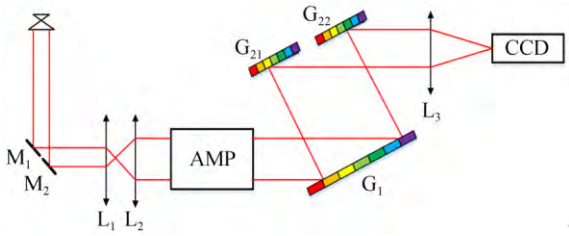


图 9　光栅拼接误差补偿光路

Fig. 9　Compensating optical path of grating mosaic error

3.4　光栅拼接误差维数的削减

利用拼接技术制作大尺寸衍射光栅，需要完成五维误差的分离检测与消除，且拼接光栅的尺寸越大，拼接误差对光栅波前的影响越明显，对误差检测系统和拼接装置的精度要求越高，拼接光栅的难度也越大。因此，国内外学者开始考虑降低光栅拼接误差的维数，以降低拼接技术制作大尺寸光栅的难度。

2004 年，美国罗彻斯特大学的特伦斯等人提出补偿拼接，即对于特定的波长和入射角，光栅拼接误差 $\Delta\theta_x$ 和 $\Delta\theta_z$ 产生的竖直倾斜相位差可以相互补偿，Δx 和 Δz 产生的水平倾斜相位差也可以

相互补偿。因此，把五维拼接误差简化为三维拼接误差，减少了光栅拼接的调整误差，降低了光栅拼接装置的研制难度，但该种拼接方法制作的光栅只适用于特定的波长和入射角[44]。

考虑补偿拼接光栅使用的局限性，国内上海激光与等离子体研究所的李朝阳等人基于衍射原理提出了物像光栅自拼接的光栅拼接方法。其中像光栅依靠平面镜进行调整，因此该方法仅存在三个维度的拼接误差，绕栅线方向的旋转误差、绕光栅法线方向的旋转误差和沿光栅矢量方向的平移误差。该方法虽然减少了光栅的调整误差，但对拼接精度和系统稳定性的要求比双光栅拼接更高。物像光栅自拼接示意图如图 10 所示[45-46]。

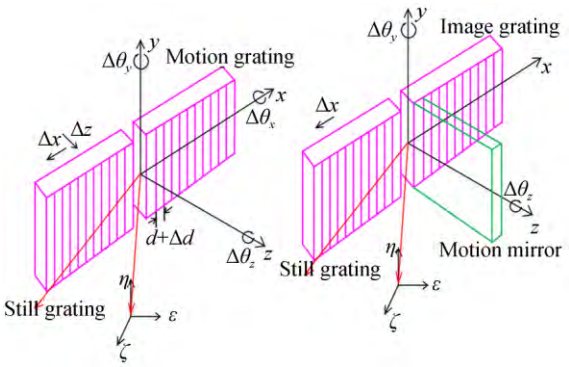


图 10　物像光栅自拼接

Fig. 10　Object-image-grating self-tiling

美国罗彻斯特大学和上海激光与等离子体研究所在实现光栅拼接误差降维的同时，增大了光栅拼接的难度和拼接光栅的使用局限性。因此，他们的研究不适用于实际工程，光栅拼接误差的降维还应做进一步的研究。

3.5　光栅拼接装置

光栅可以使光谱仪获得高分辨率，激光器获得高能量输出，但光栅波前误差会影响其性能。因此，光栅间的平移误差需要达到纳米量级，旋转误差需要达到亚微弧度量级。而拼接光栅的波前精度主要依赖于拼接装置，所以拼接装置的调节精度和稳定性是影响拼接光栅性能的主要因素。

国内外机构研制的典型光栅拼接装置如表 1 所示[47-63]。由此可知，国外装置最高可实现 40 nm的平移精度和 0.4 μrad 的旋转精度，稳定性最高可保持 16 h；国内装置最高可实现 20 nm 的平移精度和 0.3 μrad 的旋转精度，稳定性最高可保持 2 h。

在实际工程中，由于拼接光栅的波前稳定时间有限，所以需要不断地对光栅波前进行相位校正。这既增加了拼接光栅的使用难度，也影响了工程的质量。目前，光栅波前的稳定时间最高为 16 h，虽然可以满足工程实验要求，但相较于单块大尺寸光栅，拼接光栅的波前稳定时间还应进一步提高，即拼接装置的稳定性还应做进一步提升。

表 1　光栅拼接装置的研究情况

Tab. 1　Research status of grating tiling devices

机构	应用	时间	拼接精度(平移；旋转)	稳定时间/h	拼接光栅尺寸
德国 Jena 大学	POLARIS	2006	40 nm；0.4 μrad	—	700 mm×190 mm
美国罗彻斯特大学	OMEGA EP	2007	0.13 μm；0.2 μrad	12	1410 mm×430 mm
日本大阪大学	FIREX	2008	50 nm；	1.05	1 840 mm×410 mm
法国 CEA CEST	PETAL	2008	50 nm；1 μrad	16	900 mm×420 mm
哈尔滨工业大学	神光	2011	20 nm；0.3 μrad	2	1 220 mm×350 mm

4　结　论

除了研制单块大尺寸反射式光栅，拼接法是制作大尺寸反射式光栅最有效的方法。该方法拼接的大尺寸反射式光栅已被应用于 OMEGA EP、PETAL、SUBRAR 和 VLT 等项目中。根据光栅的生产情况、光栅拼接装置的研制情况和拼接光栅的应用情况，拼接法制作大尺寸光栅具有以下特点：制作成本低；待拼接的小光栅易制作，质量高；可根据光栅的尺寸需求进行拼接；拼接的大尺寸光栅使用时需要携带拼接架且需要实时检测和调整；具备五个维度调整的高精度和高稳定性拼接装置的研制难度高。

经过国内外学者的大量研究，光栅拼接误差检测理论、光栅拼接误差分离和拼接光栅波前相位校正虽已趋于完善，但光栅拼接技术还应从以下几个方面进行改进：

(1)削减光栅拼接误差的维数；

(2)提高装置的稳定性；

(3)探索低难度拼接方法，能够使拼接的光栅不仅使用方便且容易存储。

参考文献：

[1] SAKANOI T, KASABA Y, KAGITANI M, *et al*.. Development of infrared echelle spectrograph and mid-infrared heterodyne spectrometer on a small telescope at Haleakala, Hawaii for planetary observation[J]. *SPIE*, 2014, 9147:91478D.

[2] SZENTGYORGYI A H, CHEIMETS P, ENG R, *et al*.. Hectochelle: a multi-object echelle spectrograph for the converted MMT[J]. *SPIE*, 1998, 3355:242-252.

[3] DEKKER H, D'ODORICO S. UVES, the UV-visual echelle spectrograph for the VLT[J]. *The Messenger*, 1992, 70: 13-17.

[4] WAXER L J, MAYWAR D N, KELLY J H, *et al*.. High-energy petawatt capability for the Omega Laser[J]. *Optics and Photonics News*, 2005, 16(7):30-36.

[5] ZUEGEL J D, BORNEIS S, BARTY C, *et al*.. Laser challenges for fast ignition[J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49(3):453-482.

[6] BLANCHOT N, BIGNON E, COÏC H, *et al*.. Multi-petawatt high energy laser project on the LIL facility in Aquitaine[J]. *SPIE*, 2006, 5975: 59750C.

[7] BREALEY G A, FLETCHER J M, GRUNDMANN W A, *et al*.. Adjustable mosaic grating mounts [J]. *SPIE*, 1980, 240:225-228.

[8] BLASIAK T, ZHELEZNYAK S. History and construction of large mosaic diffraction gratings[J]. *SPIE*, 2002, 4485:370-377.

[9] **朱永田**. 8-10 m **级光学/红外望远镜的高分辨率光谱仪**[J]. **天文学进展**, 2001, 19(3):336-345.
ZHU Y T. High resolution spectrographs for 8-10 m class optical/IR telescopes[J]. *Progress in Astronomy*, 2001, 19(3):336-345. (in Chinese)

[10] **李朝明，吴建宏，陈新荣，等. 脉冲压缩光栅光学拼接方法研究**[J]. **光学学报**, 2009, 29(7): 1943-1946.
LI CH M, WU J H, CHEN X R, *et al*.. Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression mosaic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7):1943-1946. (in Chinese)

[11] MA D H, ZHAO Y X, ZENG L J. Achieving unlimited recording length in interference lithography via broad-beam scanning exposure with self-referencing alignment[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):926.

[12] **钱国林，吴建宏，李朝明. 单基片多次曝光实现光栅拼接的理论分析**[J]. **光学仪器**, 2008, 30(6):81-85.
QIAN G L, WU J H, LI CH M. Theoretical analysis of tiled grating by multiple-exposure hologram on single substrate[J]. *Optical Instruments*, 2008, 30(6):81-85. (in Chinese)

[13] TURUKHANO B G, GORELIK V P, KOVALENKO S N, *et al*.. Phase synthesis of a holographic metrological diffraction grating of unlimited length[J]. *Optics & Laser Technology*, 1996, 28(4):263-268.

[14] ZENG L J, LI L F. Optical mosaic gratings made by consecutive, phase-interlocked, holographic exposures using diffraction from latent fringes. [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(9):1081-1083.

[15] **赵劲松，李立峰，吴振华. 全息光栅制作中的实时潜像自监测技术**[J]. **光学学报**, 2004, 24(6): 851-858.
ZHAO J S, LI L F, WU ZH H. In-situ self-monitoring of latent image in fabrication of holographic gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 851-858. (in Chinese)

[16] CHEN C G, KONKOLA P T, HEILMANN R K, *et al*.. Nanometer-accurate grating fabrication with scanning beam interference lithography[J]. *Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering*, 2002, 4936:126-134.

[17] SMITH D J, MCCULLOUGH M, XU B, *et al*.. Large area pulse compression gratings fabricated onto fused silica substrates using scanning beam interference lithography[C]. *Proceedings of International Conference on Ultrahigh Intensity Lasers Development*. Shanghai Jiao Tong University, 2008:78-79.

[18] SHI L, ZENG L J. Fabrication of optical mosaic

gratings by consecutive holographic exposures employing a latent-fringe based alignment technique [J]. *Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering*, 2010, 7848: 78480S.

[19] STEPP L. Thirty Meter Telescope project update [J]. *SPIE*, 2012, 8444: 84441G.

[20] **张弛，朱永田，张凯. 高分辨率光谱仪与极大望远镜耦合问题分析**[J]. **应用光学**, 2014, 35(5): 868-872.
ZHANG CH, ZHU Y T, ZHANG K. Technique challenges in coupling of high resolution spectrograph with extremely large telescope[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(5): 868-872. (in Chinese)

[21] QIAO J, KELLY J H, CANNING D, *et al*.. Interferometric tiling of large-aperture gratings for petawatt laser systems[C]. *Proceedings of* 2007 *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, *IEEE*, 2007:1-2.

[22] EZAKI Y, TABATA M, KIHARA M, *et al*.. Development of a segmented grating mount system for firex-1[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 12(3): 032027.

[23] **张文辉**. 5-DOF **光栅拼接并联装置的优化设计与实验验证**[D]. **哈尔滨：哈尔滨工业大学**. 2016.
ZHANG W H. *Optimization Design and Experimental Verification of 5-DOF Grating Tiling Parallel Device*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)

[24] HARIMOTO T. Far-field pattern analysis for an array grating compressor[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(4A): 1362-1365.

[25] **王聪，张军伟，杜丽，等. 光栅拼接技术研究进展**[J]. **激光与光电子学进展**, 2011, 48(8):080501.
WANG C, ZHANG J W, DU L, *et al*.. Technology progress of grating tiling [J]. *Laser &Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8):080501. (in Chinese)

[26] **赵博. 衍射光栅的相位拼接**[D]. **长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所**, 2000.
ZHAO B. *Phase Matching of the Diffraction Gratings*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000. (in Chinese)

[27] **赵博，郝德阜. 用拼接法获取大面积衍射光栅**[J]. **光学 精密工程**, 2000, 8(5):503-507.
ZHAO B, HAO D F. Manufacturing large-size grating by mosaic way[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(5):503-507. (in Chinese)

[28] **马延琴，杜惊雷，陈铭勇. 大面积拼接光栅的远场衍射分析**[J]. **光子学报**, 2007, 36(4):742-745.
MA Y Q, DU J L, CHEN M Y. Far-field diffraction pattern analysis of tiled gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(4):742-745. (in Chinese)

[29] **马延琴. 大面积光栅的拼接理论研究**[D]. **成都：四川大学**, 2007.
MA Y Q. *Study on Tiling Theory of Large-area Rating*[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007. (in Chinese)

[30] **马雪梅，张卫平. 矩阵法研究拼接光栅的远场特性**[J]. **广西大学学报：自然科学版**, 2009, 34(6): 858-862.
MA X M, ZHANG W P. An analysis of focal spot characteristic of tiling-gratings with matrix method [J]. *Journal of Guangxi University: Natural Science Edition*, 2009, 34(6):858-862. (in Chinese)

[31] **马雪梅，戴亚平，朱健强. 拼接光栅的偏差对光束空间特性的影响**[J]. **光学学报**, 2006, 26(2): 161-165.
MA X M, DAI Y P, ZHU J Q. Effect of tiling gratings errors on laser beam spatial distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2):161-165. (in Chinese)

[32] **杨学东. 光栅拼接技术的研究**[D]. **北京：中国工程物理研究院研究生部**, 2007.
YANG X D. *The Study of Grating Mosaic*[D]. Beijing: Graduate School of China Academy of Engineering Physics, 2007. (in Chinese)

[33] ZENG L J, LI L F. Method of making mosaic gratings by using a two-color heterodyne interferometer containing a reference grating[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(2): 152-154.

[34] HU Y, ZENG L J, LI L F. Method to mosaic gratings that relies on analysis of far-field intensity patterns in two wavelengths[J]. *Optics Communications*, 2007, 269(2): 285-290.

[35] HU Y, ZENG L J. Grating mosaic based on image processing of far-field diffraction intensity patterns in two wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(28):7018-7025.

[36] **胡摇. 拼接光栅脉冲压缩器理论分析及光栅严格拼接实验方法**[D]. **北京：清华大学**, 2008.
HU Y. *Theoretical Analysis of Pulse Compres-*

sors Containing Grating Mosaics and Experimental Methods for Achieving a Perfect Grating Mosaic[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)

[37] LU Y X, QI X D, LI X T, *et al*.. Removal of all mosaic grating errors in a single-interferometer system by a phase-difference reference window[J]. *Applied Optics*, 2016,55(28):7997-8002.

[38] **卢禹先，齐向东，糜小涛，等. 基于波前法的光栅拼接误差检测及计算方法**[J]. **光学学报**, 2016, 36(5):0505001.
LU Y X, QI X D, MI X T, *et al*.. Detection and calculation of mosaic grating error based on wavefront method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5):0505001. (in Chinese)

[39] BUNKENBURG J, KESSLER T J, SKULSKI W, *et al*.. Phase-locked control of tiled-grating assemblies for chirped-pulse-amplified lasers using a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10):1561-1563.

[40] WANG X, ZHU Q H, ZUO Y L, *et al*.. Matched wavelength and incident angle for the diagnostic beam to achieve coherent grating tiling [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(4): 241-243.

[41] **左言磊，魏晓峰，朱启华，等. 1700 线/mm 镀金光栅的拼接理论和实验研究**[J]. **物理学报**, 2007, 56(9):5233-5236.
ZUO Y L, WEI X F, ZHU Q H, *et al*.. Theoretical and experimental study of grating tiling[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(9):5233-5236. (in Chinese)

[42] BLANCHOT N, MARRE G, NÉAUPORT, *et al*.. Synthetic aperture compression scheme for a multipetawatt high-energy laser[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(23):6013-6021.

[43] **周胤. 光栅拼接误差补偿技术研究**[D]. **重庆：重庆大学**, 2017.
ZHOU Y. *Research on Error Compensation Technology of Grating Tiled* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)

[44] KESSLER T J, BUNKENBURG J, HUANG H, *et al*.. Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high-energy chirped-pulse-amplified lasers[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(6):635-637.

[45] LI ZH Y, WANG T, XU G, *et al*.. Research on potential problems of object image grating self-tiling for applications in large aperture optical systems[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 718-725.

[46] LI ZH Y, XU G, WANG T, *et al*.. Object-image-grating self-tiling to achieve and maintain stable, near-ideal tiled grating conditions[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2206-2208.

[47] HEIN J, KALUZA M C, BÖDEFELD R, *et al*.. POLARIS: An all diode-pumped ultrahigh peak power laser for high repetition rates [M]// SCHWOERER H, BELEITES B, MAGILL J. *Lasers and Nuclei*. *Berlin Heidelberg*: *Springer*, 2006: 47-66.

[48] HEIN J, HORNUNG M, BÖDEFELD R, *et al*.. Multiterawatt peak power generated by the all diode pumped laser -POLARIS[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1228(1):159-174.

[49] **姜涛. 大口径光栅机械拼接机构的关键特性分析**[D]. **哈尔滨：哈尔滨工业大学**. 2008.
JIANG T. *Research on the Key Characteristics of Large Mosaic Grating's Mechanism*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)

[50] **孙岩岩. 光栅拼接装置微位移机构的研究**[D]. **哈尔滨：哈尔滨工业大学**, 2008.
SUN Y Y. *Research on Micro-Motion Mechanism in Grating Tiling Device*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)

[51] **周维江. 大口径光栅拼接并联机构运动性能研究及控制系统开发**[D]. **哈尔滨：哈尔滨工业大学**, 2013.
ZHOU W J. *Research on the Moving Performance of the Parallel Mechanism Used in the Large Aperture Grating Splicing and Development of the Control System*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

[52] **龙飞. 大口径光栅拼接装置的结构分析及运动精度研究**[D]. **哈尔滨：哈尔滨工业大学**. 2011.
LONG F. *Analysis for Structure and Moving Precision of Large-Caliber Grating Tiling Device* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)

[53] **罗跃飞. 大口径光栅拼接装置稳定性分析研究**[D]. **重庆：重庆大学**, 2012.
LUO Y F. *Research & Analysis of the Stability of Large Aperture Tited-grating* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)

[54] **周忆，申超，张军伟，等. 高精度 2×2 阵列拼接光栅结构设计[J]. 强激光与粒子束**，2011，23(7)：1741-1745.
ZHOU Y，SHEN CH，ZHANG J W，*et al*.. Structure design of high accuracy 2×2 array grating[J]. *High Power Laser and Particle Beams*，2011，23(7)：1741-1745.（in Chinese）

[55] **周忆，谭波，廖云飞，等. 大口径拼接光栅闭环控制算法设计[J]. 重庆大学学报**，2013，36(12)：51-56.
ZHOU Y，TAN B，LIAO Y F，*et al*.. Design of PID control algorithm on large diameter tiled grating[J]. *Journal of Chongqing University*，2013，36(12)：51-56.（in Chinese）

[56] **周忆，廖云飞，刘有海，等. 大口径光栅拼接装置的微振动响应分析[J]. 重庆大学学报**，2012，35(7)：49-53.
ZHOU Y，LIAO Y F，LIU Y H，*et al*.. The micro-vibration analysis for the large aperture grating tiling device[J]. *Journal of Chongqing University*，2012，35(7)：49-53.（in Chinese）

[57] **张军伟，陈伟，周忆，等. 高稳定性阵列光栅拼接架设计与验证[J]. 中国激光**，2012，39(2)：0216001.
ZHANG J W，CHEN W，ZHOU Y，*et al*.. Design and demonstration of high stability array tiled grating frame[J]. *Chinese Journal of Lasers*，2012，39(2)：0216001.（in Chinese）

[58] EZAKI Y，TABATA M，KIHARA M，*et al*.. Development of a segmented grating mount system for firex-1[J]. *Journal of Physics*：*Conference Series*，2008，112(3)：032027.

[59] QIAO J，KALB A，GUARDALBEN M J，*et al*.. Large-aperture grating tiling by interferometry for petawatt chirped-pulse-amplification systems[J]. *Optics Express*，2007，15 (15)：9562-9574.

[60] MAYWAR D N，KELLY J H，WAXER L J，*et al*.. OMEGA EP high-energy petawatt laser：Progress and prospects[J]. *Journal of Physics*：*Conference Series*，2008，112(3)：32007.

[61] BLANCHOT N，BEHAR G，BERTHIER T，*et al*.. Overview of PETAL，the multi-Petawatt project in the LMJ facility[J]. *EDP Sciences*，2013，59：07001.

[62] BLANCHOT N，BAR E，BEHAR G，*et al*.. Experimental demonstration of a synthetic aperture compression scheme for multi-petawatt high-energy lasers[J]. *Optics Express*. 2010，18(10)：10088-10097.

[63] NEAUPORT J，BONOD N. Pulse compression gratings for the PETAL project-a review of various technologies[J]. *SPIE*，2009，7132：71320D.

作者简介：



杨国军(1992－)，**男，吉林松原人，硕士研究生，主要从事光栅拼接方面的研究**。E-mail：18366188661@163.com

导师简介：



齐向东(1965－)，**男，吉林辽源人，研究员，博士生导师，主要从事光栅刻划机及衍射光栅的研制**。E-mail：chinagrating@263.net