

测量不确定度在干涉面形检测领域的研究现状及进展

全海洋^{1,2} 侯溪¹ 伍凡¹

¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 评定测量不确定度是改进面形检测实验室质量的有效途径。为了促进测量不确定度在干涉面形检测领域的普及和应用,综述了近年来国内外在干涉面形检测领域中测量不确定度评估方法的研究现状和最新进展。介绍了量值溯源和测量不确定度的发展及研究现状,主要介绍了自下而上方法(即建模方法)评估测量不确定度和自上而下方法评估测量不确定度,重点阐述了干涉面形测量中的不确定度评估方法研究现状及进展。展望了现代干涉面形检测中不确定度评估的发展方向。

关键词 测量; 测量不确定度; 干涉测量; 表面面形测量; 溯源性

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.060004

Research Status and Progress of Measurement Uncertainty in Interferometric Testing of Surface Figure

Quan Haiyang^{1,2} Hou Xi¹ Wu Fan¹

¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Estimating uncertainty of measurement is an effective route to improve quality of surface figure testing in laboratories. To promote the popularization and application of measurement uncertainty in the field of interferometric surface figure testing, the latest progress of uncertainty evaluation in figure measurements is reviewed. The associated international standards of metrological traceability and uncertainty are introduced. Evaluating measurement uncertainty with the bottom-up approach (i.e. modelling approach) and top-down approach is mainly introduced. The progress and development of uncertainty evaluation are focused on in interferometric surface figure measurements. The development direction and further development of uncertainty evaluation method in interferometric surface figure measurements are prospected.

Key words measurement; measurement uncertainty; interferometry; surface figure measurement; traceability

OCIS codes 120.3940; 120.3180; 120.4800; 120.6650

1 引言

为了规范实验室测量结果的评定与表示,且要得到国际及其他行业的承认,测量结果必须带有测量不确定度。测量不确定度是测量结果明确而客观的标志,是实验室能力质量控制的指标。实验室明确所测量结果的质量,并改进以达到规定的质量,需要给出测量不确定度。

遵照 ISO/IEC 17025^[1],检测 and 校准实验室都需要估计测量不确定度;根据 ISO/TS 14253-1^[2],检验产品(如表面面形误差)时,为了判断一个产品是否满足规范指标要求,买卖双方都应具备评定产品性能特征测量不确定度的能力以更好地做出决策。不确定度作为一个有效的分析工具和经济杠杆,其评估指南“测量不确定度表示指南”(GUM)^[3]自发布后就迅速在各国校准和测试实验室得到了广泛的应用,在测量甚至科学研究的各个领域,采用不确定度理论、研究不确定度评定方法、寻找减小不确定度的途径等已成为一个热点。在获得计量特性结果的同时给出其相应的不确定度,这已成为一种规范。

收稿日期: 2014-11-13; 收到修改稿日期: 2015-01-26; 网络出版日期: 2015-05-07

作者简介: 全海洋(1989—),男,博士研究生,主要从事光学面形检测不确定度评估方面的研究。

E-mail: alsea111.1989@163.com

导师简介: 伍凡(1957—),男,研究员,博士生导师,主要从事先进光学制造与检测技术等方面的研究。

E-mail: wufan@ioe.com

然而,在表面测量领域尤其是使用光学仪器进行检测时,很难给出严格的不确定度分析^[2],能提供干涉面形检测溯源性服务的也只有极少数国家计量实验室,从而时常导致面形误差合格检验时难以达成共识,进而做出不适当的决策。在过去的数十年中,受空间光学、高功率激光、高端光刻机等项目的驱动^[4-5],高精度光学元件的需求日益增加。比如现代光刻曝光系统要求光学表面达到纳米级甚至亚纳米级的公差,而相应的面形检测技术却并不总能充分发挥指导加工的作用,光学元件的面形检测已经成为限制面形误差进一步减小的重要因素,是制约其加工技术和应用规模扩大的关键所在。因此合理评估面形测量结果的不确定度和寻求减小面形测量不确定度的途径已成为现行的研究热点和前沿技术。本文综述了测量不确定度在干涉面形检测领域的研究现状和最新进展,并指出对面形检测实验室不确定度的评定与表达进行系统性研究的必要性。

2 量值溯源与测量不确定度

2.1 ISO 17025 量值溯源要求

ISO 17025《检测和校准实验室能力的通用要求》^[1]的量值溯源要求为:实验室应当设计操作仪器的校准程序以保证实验室的校准和测量可溯源到“国际单位制”(SI)。如长度、表面面形等尺寸测量要求溯源到国际单位制—“米”标准。

为了便于国际计量学术语的统一和规范,国际标准化组织(ISO)编写了《国际计量学通用基本名词术语》^[6-7](VIM)。根据最新的第三版VIM3 2012(JCGM 200:2012)对量值溯源的定义,每个测量链都将贡献最后测量结果的不确定度,并且是逐级传递的,即用以计量的计量器具(如干涉仪)必须经过具有适当准确度的计量标准的校准,而该计量标准又受到上一等级计量标准的校准,逐级往上追溯直到国家计量标准(一般位于国家计量院),最后溯源到国际计量标准——国际计量局(BIPM)国际单位制(SI)的定义。干涉面形测量的直接结果是一个二维面形误差图,即由相位数据转换得到的高度数据。根据BIPM最新的基于激光波长的米定义,激光光源是通过碘稳定激光校准的,因此配备He-Ne(633 nm)激光光源的干涉仪测量表面面形误差时可以溯源到国际“米”标准(如图1所示)。

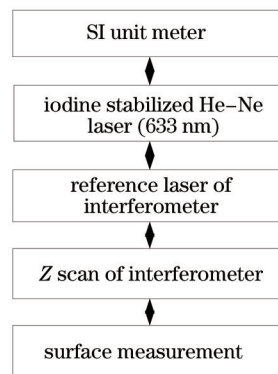


图1 干涉面形测量的量值溯源性

Fig.1 Traceability hierarchy of interferometric surface figure measurement

测量不确定度,简称不确定度,是指根据所用到的信息,表征赋予被测量量值分散性的非负参数^[7]。不确定度是报告测量结果时附加的一个参数,用以告诉测量结果的使用者测量不确定的范围。量值溯源性除了测量结果能追溯到国际单位制外,还要求给出的数据能提供完整的测量不确定度信息^[1],这也是实验室认可和不同实验室间结果互认的保证。所以在面形检测领域给出面形检测结果的同时,通过对面形数据进行测量不确定度评估可以提升面形检测结果的可信性和可接受性,这在高精度光学元件加工和检测中具有重大的现实意义。

2.2 不确定度评估方法的研究现状

不确定度的概念自1963年由美国标准局(NBS)提出后,就受到了各国学者的广泛重视,同时引起了对不确定度评定方法的探索。为了保持国际间测量不确定度表示的一致性,1980年BIPM在征求各国意见的基础上起草了一份建议书:《实验不确定度建议书INC-1》(INC-1 1980)^[3]。该建议书向各国推荐了不确定度的表述原则,建议将测量不确定度分为A类和B类,A类不确定度通过统计的方法获得,B类则通过其他方

法评定。自此,不确定度的表示方法得到了国际初步统一。为了进一步促进不确定度表示方法在国际上的广泛使用,1993年ISO、国防电工委员会(IEC)、BIPM、国际法定计量组织(OIML)、国际理论和应用化学联合会(IUPAC)、国际纯粹与应用物理联盟(IUPAP)和国家临床化学联合会(IFCC)七个国际组织在INC-1 1980建议书的基础上,由ISO出版发行了一份能广泛应用的指南性文件《测量不确定度表示指南》^[3,8](GUM 1993)。GUM颁布之后,迅速在各国校准和测试实验室得到了广泛的应用。1995年ISO对GUM 1993作了局部修改后重印,记为GUM 1995^[9]。2005年国际实验室认可合作组织ILAC正式加入由上述七个国际组织成立的计量学指南联合委员会(JCGM)后,最新的八个国际组织于2008年联合发布了ISO/IEC GUIDE 98-3:2008^[10](记为GUM 2008),在GUM 1995基础上做了最新的修改。加上同年发布的增补件—基于分布传播的蒙特卡洛方法(MCM)^[11],不确定度的理论已趋完善,不确定度的评估程序在国际上基本上达成了一致,即1)定义被测量(Measurand);2)识别不确定度源;3)量化不确定度分量;4)计算合成不确定度(方和根合成,RSS);5)报告不确定度。ISO GUM的不确定度评估方法的前提是需要一个关于整个测量过程的数学模型,因此又称为建模方法。

为正确执行ISO GUM方法,各国国家计量院(如我国隶属于国家质量监督检验检疫总局的中国国家计量科学研究院NIM、美国标准技术研究院NIST)、区域计量组织(如欧洲分析化学中心EURACHEM/CITAC、北欧测试合作组织NORDTEST)、认可权威组织(如国际实验室认可组织ILAC、欧盟认可合作组织EA、欧洲实验室认可组织EUROLAB)等制定了本单位的实施指南或标准^[12-20],都强调用ISO GUM方法来表示测量结果及测量不确定度。表1列举了目前世界上现行的不确定度评估指南和标准。

表1 现行的不确定度评估指南和标准

Table 1 Current guidelines and standards for the evaluation of uncertainty

Bodies	Document	Edition
ISO	ISO Guide 98-3, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)	1993,1995,2008
	ISO Guide 98-3, Supplement 1 Propagation of distributions using a Monte Carlo method (MCM)	2008
	ISO/TS 14253-2, Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration equipment and in product verification (PUMA)	1999
	ISO 5725 (Parts 1-6). Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results	1994
	ISO/TS 21748, Guide to the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation	2004,2010
NIM	JJF1059.1, Guide to the expression of uncertainty in measurement	1999,2012
	JJF1059.2, Monte Carlo method for evaluation of measurement uncertainty	2012
	GB-T 18779.2, Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration equipment and in product verification	2004
	GB/T 6379 (Parts 1- 6), Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results	2004/2006/2009/2012
	GB/Z 22553, Guide for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation	2010
NIST	GB/T 27411, Routine methods for evaluation and expression of uncertainty measurement in testing laboratory	2012
	NIST Technical Note 1297, Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results	1993,1994
ILAC	ILAC - P14:12, ILAC policy for uncertainty in calibration	2010,2013
EA	EA 4/16, Guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing	2003
	EA - 4/02, Expression of the uncertainty of measurement in calibration	1999,2013
EUROLAB	EUROLAB Technical Report 1, Measurement uncertainty in testing	2002
	EUROLAB Technical Report 1, Guide to the evaluation of measurement uncertainty for quantitative test results	2006
	EUROLAB Technical Report 1, Measurement uncertainty revisited: alternative approaches to uncertainty evaluation	2007
EURACHEM /CITAC	EURACHEM/CITAC Guide: quantifying uncertainty in analytical measurement (QUAM)	1995,2000,2012
NORDTEST	NORDTEST Technical Report 537, Handbook for calculation of measurement uncertainty in environmental laboratories	2003,2012

上述列举的某些指南或标准涉及到利用实验室内测量复现性和偏倚来评估测量不确定度。如标准 ISO/TS 21748(或 GB/Z 22553)利用重复性、再现性和正确度的估计值评估测量不确定度,EA 指南、EURACHEM/CITAC 指南、EUROLAB 技术报告和 NORDTEST 技术报告都涉及到通过评估实验室内测量复现性和偏倚来实现测量不确定度的评估。这种不确定度评估方法是上述 ISO GUM 建模方法的补充,称为经验方法,又称作自上而下的方法(于是建模方法可对应地称作自下而上方法)。自上而下的不确定度评估方法以实验室确认数据、实验室内质量控制(IQC)数据和实验室间质量评价(EQA)数据等作为评估对象,在化学、医学领域应用较为广泛^[21-22]。图2对不确定度的这两种评估方法进行了总结。

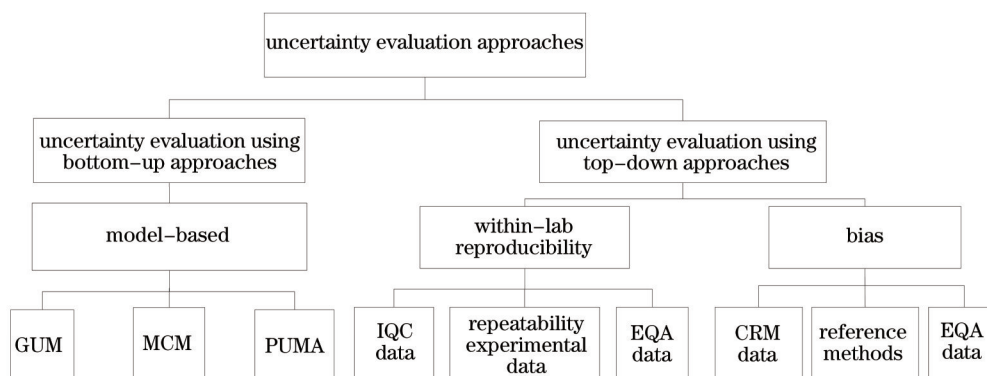


图2 自下而上方法和自上而下方法评估测量不确定度

Fig.2 Uncertainty evaluation using bottom - up approaches and top - down approach

自此,不确定度的评估走向有两个方向,即自下而上方法与自上而下方法评估不确定度。自下而上方法需要一个包含测量过程中影响待测量估计的所有不确定度源的完整数学模型(包括基于不确定度传播率的GUM法^[10]、基于分布传播的蒙特卡洛法MCM^[11]和迭代简化的GUM法,即PUMA^[23-26]);自上而下方法是基于整体方法性能数据(这些数据包括质量控制、实验室内确认研究、实验室间确认研究、或能力验证等的精密度和偏倚数据)。需要注意的是两种方法都是属于ISO GUM,二者相互补充并可结合使用,不同的是在量化不确定度时有区别。表2对这两种方法做了比较,并给出了对应于表1所示的评估指南。

表2 自下而上方法与自上而下方法评估不确定度比较

Table 2 Comparison between bottom - up approach and top - down approach

Content	Bottom-up approach	Top-down approach
Basic principle	Model - based	Accuracy=precision & trueness, or uncertainty=reproducibility & bias
Data used for evaluation	The current repeated measurements and scientific judgement based on all the available information	The whole method performance data, obtained from within - laboratory validation studies, quality control, interlaboratory method validation studies, or proficiency tests
Estimates of individual uncertainty contributions	Each individual source, then grouped by type A & type B	Combined contribution, frequently grouped by within - lab reproducibility & bias
Characteristics	More complicated, less applicable; the lowest uncertainty can be obtained by quantifying individual contributions	More straightforward, more applicable; some significant source may be overlooked
Guidelines or standards	ISO Guide 98 - 3, JJF1059.1 or NIST Technical Note 1297 ISO Guide 98 - 3, Suppl.1 or JJF1059.2 ISO/TS 14253 - 2 or GB - T 18779.2	ISO/TS 21748 or GB/Z 22553 EA 4/16 EUROLAB Technical Report 1 EURACHEM/CITAC Guide NORDTEST Technical Report 537

3 干涉面形测量不确定度评估方法的研究现状及进展

在干涉面形测量领域,国外在面形测量不确定度的评估方面处于领先地位,而国内正处于初步探索的

阶段。近年来,各国都陆续将测量不确定度的概念和评定应用到面形检测领域。ISO、各国国家计量单位(如我国国防科学技术工业委员会 COSTIND、美国 NIST、日本 NMIJ/AIST)、光学公司(如德国 Carl Zeiss、日本 Nikon、美国 Zygo)等都致力于研究面形检测领域测量不确定度的评定与表示。表3列举了目前世界上现行的测量不确定度在面形检测领域的研究现状,严格地说主要是从自下而上方法和自上而下方法进行评估的^[27-29]。

表3 面形检测领域典型的不确定度评估方法对比

Table 3 Representative comparison of uncertainty evaluation in surface figure testing

Bodies	Document or Reference	Evaluation approach
ISO	ISO/TR 14999-3:2005 Technical Report, Calibration and validation of interferometric test equipment	Bottom-up approach
COSTIND (China)	GJB/J 6221-2008, Calibration specification for digital laser plane interferometer	Bottom-up approach
NBS (USA)	NBSIR 75-975, The calibration of an optical flat by interferometric comparison to a master optical flat	Bottom-up approach
NIST (USA)	Memorandum to US Industrial Metrologists, Three flat method for calibration of optical flats and ISO 17025, 2007	Bottom-up approach
NMIJ/AIST (Japan)	Youichi Bitou, Toshiyuki Takatsuji, et al. 2008 Ikumatsu Fujimoto, Toshiyuki Takatsuji, et al. 2012	Bottom-up approach
Carl Zeiss (Germany)	B. Dörband, 1998 B. Dörband and Günther Seitzl, 2001 Günther Seitzl, et al. 2004	Top-down approach Bottom-up approach
Nikon (Japan)	K. Otaki, et al. 2002 T. Gemma, et al. 2002 Yuichi Takigawa, et al. 2005	Top-down approach Bottom-up approach
Zygo (USA)	Evans, C.J, et al. 2009 Evans, C.J, 2010 Evans, C.J. and Davies, A.D, 2013	Bottom-up approach

干涉面形测量的结果实质上是待测面面形误差相对参考面面形误差的相对测量结果,按照自上而下评估不确定度的方法分别对实验室内复现性和偏倚进行评估,则偏倚(即系统误差)主要由标准器——即标准镜头的参考面面形误差引入。所以在面形不确定度评估之初主要是评估复现性和参考面面形误差。严格的说系统误差还应包括重力变形、夹持变形等。从这个角度出发,采用自上而下方法评估面形测量不确定度是合理的,并且简单方便。然而要降低测量不确定度实现更高精度的测量,还需要对所有主要的不确定度源进行控制,这时采用建模的评估方法比较合适。

美国国家标准局 NBS 于 1975 年就发布了校准光学平板的标准文档^[27],用以校准光学平板,即双平板法采用 NBS 参考平板,而 NBS 参考平板的标定需要采用三平板法,并通过分析测量过程的随机误差和系统误差进行误差分析。然而由于当时不确定度的表示与评定还未达成共识,因此此文档给出的误差分析只是粗略的不确定度评估。

2005 年国家标准组织技术委员会 ISO/TC 172“光学与光子学”下属委员会 SC 1 编写了关于光学元件波前和面形的干涉测量相关的技术文档,即 ISO/TR 14999^[30-32],涉及到干涉测量相关术语、定义及其基本关系,测量和评定技术,干涉检测装置及其测量的标定与验证。标准中明确指出采用 ISO GUM 不确定度方法进行干涉面形测量不确定度评估,但同时指出可采用实验室间比对、测量审核和实验室内部不同方法交叉对比等方法发现未被识别的系统误差^[32]。但该标准并没有给出面形测量领域的不确定度评估指南性意见。

2008 年,美国国家标准局 NIST 声称使用三平板法标定参考平面并提供了详细的技术文档以满足 ISO 17025 量值溯源要求^[33]。2012 年 NIST 物理测量室的 Soons 等^[34]采用了蒙特卡洛的方法评估旋转平移法球面面形绝对测量的不确定度,同时与随机球法绝对测量进行对比,对比结果具有良好的一致性。然而,关于面形测量不确定度评估的具体方法及详细细节,NIST 并未公开报道。

2008 年,日本国家计量院 NMIJ、国家先进工业科技研究院 AIST 的 Bitou 等^[35]提出了一种测量标定样板

PV值就能简单评估平面面形的不确定度的方法,该方法是基于概率统计的方法。2012年,日本国家计量院的 Fujimoto 等^[36]采用旋转和平移被测件的双平板法建立数学模型实现平面的绝对测量,并可根据该数学模型计算相应的测量不确定度。然而该模型的验证及不确定度评估未见报道。

德国 Carl Zeiss 公司的 Dörband 等^[37-38]认为面形测量中的精度包括精密度和系统误差,精密度由重复性和复现性来表征,而标定过程的系统误差和重复性同时决定了测量设备的精度。他认为重复性和不同标定方法的交叉对比已经可以可靠地对干涉面形测量精度进行评估^[37]。同为 Zeiss 公司的 Seitz 等^[39]则分析了 Fizeau 型干涉仪测量非球面面形的测量过程的主要误差源(随机误差和系统误差),进而方和根合成得到面形测量的总误差,最后通过与另一实验室点衍射干涉仪的测量结果进行比对。

同 Carl Zeiss 公司类似,日本 Nikon 公司也是通过“精密度”和“精度”的概念来表征面形测量的质量。Otaki 等^[40-42]使用点衍射干涉仪测量球面面形和非球面面形,精密度通过连续两次测量的每个像素点的对应差值来表征,系统误差则通过旋转平移的绝对测量方法获得。同为 Nikon 公司的 Gemma 等^[43]分析了 Fizeau 型干涉仪零位测量非球面面形 1 nm 的精度,重复性仍然用连续两次测量的差值表征,精度是通过与三坐标测量机的测量结果进行比对来表征。Takigawa 等^[44]则分析了 Fizeau 型干涉仪测量非球面面形的精度,通过分析非球面测量过程中每一个组件引入的误差源进而合成得到面形测量的绝对精度,即重复性和复现性来表征精密度,其他系统误差则通过比对或仿真的方法来评估,并通过实验方法评估了测量过程中的某些误差源。

2006年,美国戈达德航空飞行中心(GSFC)的 Blake 等^[45-49]完成了低温环境下对 150 mm 口径、600 mm 半径的球面镜的干涉面形测量,并按照 ISO GUM 不确定度评估指南对主要的不确定度源做了粗略评估,最后得到合成的面形测量不确定度。近年来,美国 Zygo 公司的研究人员 Evans 等^[50-53]致力于平面面形测量的量值溯源和不确定度评估研究,于 2009 年通过三平板算法对 450 mm 口径的光学平板进行了全口径标定(如图 3 所示),并依照 ISO GUM 不确定度评估方法分别对三平板绝对测量进行 A 类评定和 B 类评定,A 类评定通过统计方法评估随时间变化的不确定度分量(如环境因素引入的不确定度),B 类评定通过实验或解析方法评估随时间不变化(或缓慢变化)的不确定度分量(如轴向温度梯度、回程误差、旋转角度误差和旋转轴未对准等引入的不确定度)。Evans 采用的是“不确定度矩阵”,用于评估每个像素点的面形测量不确定度,最后得到合成不确定度矩阵和扩展不确定度矩阵,从而实现了平面面形本身的测量不确定度评估。

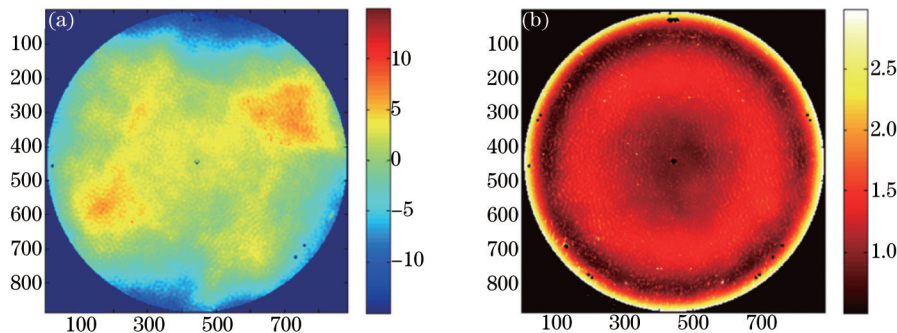


图3 450 mm 口径平板绝对测量结果。(a) 绝对面形图;(b)扩展不确定度矩阵图

Fig.3 Measurement of a 450 mm aperture flat. (a) Height map; (b) associated uncertainty map

近年来我国开展了光学元件的高精度测量研究工作,主要包括高精度半径测量技术和高精度面形测量技术的研究。关于高精度曲率半径测量的不确定度评估工作也相继展开^[54-55],然而在面形检测领域仍然集中在检测技术^[56]和工装复现性^[57]等方面的研究。在面形测量不确定度评估方面,我国的研究人员也开始采用基于 ISO GUM 不确定度评估的方法,使用不确定度矩阵的概念,评估每个像素点的面形测量不确定度^[56],但仍处于初步探索的阶段,给出的评估结果主要是 A 类不确定度(如重复性和复现性),B 类不确定度的评估较难给出。我国关于干涉面形测量的标准有数字式激光平面干涉仪的校准规范^[28],主要用于光学元件平面度和无焦光学系统波像差的测量。其三平板法绝对测量不确定度评估是在相对测量基础上使用三平板法绝对测量模型给出的,根据 ISO GUM 不确定度评估方法分别给出了平面面形相对测量和三平板法绝对测量的扩展不确定度;2008年,该平面干涉仪校准规范的起草人 Wang 等^[29]通过同样的不确定度评估方法对球面

光学元件面形测量结果进行了不确定度分析,分别给出了球面面形直接测量和双球面法绝对测量的扩展不确定度。针对相对测量的主要不确定度源参考面的不确定度并未给出其评估方法,而绝对测量(如三平板法和双球面法)结果的不确定度评估使用的是相对测量不确定度评估结果。

对于大多数光学表面测量(包括面形测量),因为单次测量中系统误差往往会大于目标不确定度,所以要达到的目标不确定度只有使用自标定技术或绝对检测方法分离出系统误差^[53]。如前所述,干涉面形测量是可以溯源到国际米标准的,从而最大的挑战就来自于系统误差的去除和评定。这实质上就是误差分离技术^[58],即通过设计一定的测量步骤,使用某种数据处理方法,将被测量(或被校正量)和参考标准的误差从原始测量数据中分离出来,可突破参考标准固有的精度限制、极大地提高测量精度,从而达到超精密测量及标定、校正的目的。误差分离技术能使测量精度达到“极限”。在光学面形测量领域,使用的标准镜头中的参考面面形误差则是干涉面形测量中最大的系统误差,将之从测量结果中分离出来以实现面形的绝对测量,这个过程就称作面形绝对测量。对于光学平面的绝对测量方法一般是三平板法及其延伸的方法^[59-60];对于光学球面的绝对测量方法有双球面法^[61-65]、旋转平移法^[66-68]及随机球法^[69-72]。而对于面形绝对测量方法的不确定度评估,这里可理解为自上而下评估不确定度的方法中偏倚的评估,而偏倚的评估可参照上述的评估指南。平面、球面是最基本的光学元件,其面形误差的检测是非球面乃至自由曲面面形误差检测的基础,因此这里将平面、球面面形误差测量不确定的评估作为主要研究对象。

综上所述,目前在干涉面形测量领域,面形测量不确定度的评估处于初步探索的阶段,评估方法不统一,且在一般实验室难以进行,只有极少数的国家计量机构和公司能提供完整的不确定度评估报告。各国研究人员大都采用建模方法或自上而下方法来评估面形测量中的不确定度,最后通过实验室内不同方法的交叉对比或实验室间的对比来验证不确定度评估的有效性。但是从调研的情况来看,目前还没有一个指南性或系统性的面形测量不确定度评估方法,因此需要对面形测量不确定度评估方法进行系统性的研究。

另一方面,对干涉面形测量而言,每次面形测量结果、绝对面形标定结果以及面形的最终估计都是二维面形图,因此面形测量结果的不确定度也应该是与面形测量结果对应的一个二维矩阵。从而,干涉面形测量中不确定度评估时可以对每个像素点的面形不确定度进行评估。另外,和评估面形单值指标峰谷(PV)值、均方根(RMS)不确定度一样,可以对面形数据展开的每项 Zernike 系数进行不确定度评估,最后再合成一个不确定度面形矩阵^[73-74]。

4 结束语

随着相关科技的不断发展和高精度光学元件的不断采用,在生产实践中对光学元件的面形质量提出了越来越高的要求。研究不确定度评估方法和寻找减小不确定度的途径已成为光学面形测量领域甚至整个计量领域的关键。其中,测量不确定度的评估方法的研究将是干涉面形测量中的研究热点和难点,是寻求减小不确定度途径中必须经历且必不可少的一步。国际公布的 GUM 和 QUAM 等指南性文件直接用于面形检测实验室尚缺乏实用性,因此,有必要对面形检测实验室不确定度的评定与表达进行系统研究,最终给出适用于面形检测实验室的测量不确定度评定指南。

为了促进测量不确定度在干涉面形检测领域的应用,建议开展以下研究工作:

- 1) 加强面形测量不确定度理论的完善和补充,开展除自下而上和自上而下评估方法外其他不确定度评估方法的研究;
- 2) 完整、准确定义被测量,如指明实验室受控环境条件下在特定工装夹持下面形误差的测量;
- 3) 单个不确定度源的准确评估是最终评估可靠性的保证,针对单个不确定度源采用多种评估方法综合评估,单个不确定度源的定量评估和控制也是降低测量不确定度的有效途径;
- 4) 合成不确定度时需要考虑不确定度分量的相关性,可以采用适当的分析方法去除相关性;
- 5) 对于已定系统误差(如参考面面形误差),若已采用误差分离技术(如面形绝对测量技术)定量评定,则当该系统误差从测量结果修正后,还应考虑修正引入的不确定度(如面形绝对测量的不确定度);
- 6) 针对不同目标不确定度要求选择合适的评估方法以提高评估的适应性;
- 7) 开展不确定度在高精度面形检测领域的应用研究;

8) 形成的一套适用于面形检测的不确定度评估方法,用以指导面形检测结果准确的表达及面形检测精度的保证;

9) 寻找面形二维表征参数,以更全面地表征面形误差信息。

参 考 文 献

- 1 ENISO/IEC 17025: 2005. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories[S]. International Organization for Standardization, 2005.
- 2 ISO/TC 14253- 1: 1998. Geometrical Product Specification (GPS)- Inspection By measurement of Workpieces and Measuring Equipment-Part 1: Decision Rules for Proving Conformance or Non-Conformance with Specifications[S]. International Organization for Standardization, 1998.
- 3 BIPM, IEC, IFCC, *et al.*. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)[S]. International Organization for Standardization, 1st edition, 1993.
- 4 J H Bruning. Optical lithography: 40 years and holding[C]. SPIE, 2007: 6520: 652004.
- 5 M Weiser. Ion beam figuring for lithography optics[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2009, 267(8-9): 1390-1393.
- 6 BIPM, IEC, IFCC, *et al.*. International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM)[S]. International Organization for Standardization, 2nd edition, 1993.
- 7 JCGM 200:2012. International Vocabulary of Metrology-Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), 3rd Edition[S]. Joint Committee for Guides in Metrology, 2012.
- 8 Taylor B N, Kuyatt C E. NIST Technical Note 1297: Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results[S]. National Institute of Standards and Technology, 1994.
- 9 BIPM, IEC, IFCC, *et al.*. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)[S]. International Organization for Standardization, 2nd edition, 1995.
- 10 JCGM 100:2008. Evaluation of Measurement Data-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement[S]. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- 11 JCGM 101:2008. Evaluation of Measurement Data-Supplement 1 to the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" - Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method[S]. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- 12 JJF 1059-1999. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement[S]. Administration for Quality Supervision and Inspection and Quarantine, 1999.
JJF 1059-1999. 测量不确定度评定与表示[S]. 国家质量监督检验检疫总局, 1999.
- 13 JJF1059.1-2012. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement[S]. Administration for Quality Supervision and Inspection and Quarantine, 2012.
JJF1059.1-2012. 测量不确定度评定与表示[S]. 国家质量监督检验检疫总局, 2012.
- 14 JJF1059.2-2012. Monte Carlo Method for Evaluation of Measurement Uncertainty[S]. Administration for Quality Supervision and Inspection and Quarantine, 2012.
JJF1059.2-2012. 用蒙特卡洛法评定测量不确定度[S]. 国家质量监督检验检疫总局, 2012.
- 15 Eurolab Technical Report 1/2006. Guide to the Evaluation of Measurement Uncertainty for Quantitative Test Results[S]. Eurolab, 2006.
- 16 Eurolab Technical Report 1/2007. Measurement Uncertainty Revisited: Alternative Approaches to Uncertainty Evaluation [S]. Eurolab, 2007.
- 17 S L R Ellison, A Williams. Eurachem/CITAC Guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement[S]. Eutachem, 3rd edition, 2012.
- 18 Nordic Innovation Center. Handbook for Calculation of Measurement Uncertainty in Environmental Laboratories[S]. Nordtest, 2012.
- 19 ISO 5725- 1- 6:1994. Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results[S]. International Organization for Standardization, 1994.
- 20 ISO 21748:2010. Guide to the Use of Repeatability, Reproducibility and Trueness Estimates in Measurement Uncertainty Estimation[S]. International Organization for Standardization, 2010.

- 21 Clinical and Laboratory Standards Institute. Expression of Measurement Uncertainty in Laboratory Medicine[S]. CLSI Document EP29-A. Wayne, PA: Clinical and Laboratory Standards Institute, 2012.
- 22 CNAS. Expression of Measurement Uncertainty in Laboratory Medicine[S]. CNAS, 2012.
中国合格评定国家认可委员会. 医学实验室-测量不确定度的评定与表达[S]. CNAS, 2012.
- 23 ISO/TS 14253-2. Geometrical Product Specification (GPS)-Inspection by Measurement of Workpieces and Measuring Equipment- Part 2: Guide to the Estimation of Uncertainty in GPS Measurement, in Calibration of Measuring Equipment and in Product Verification[S]. International Organization for Standardization, 1999.
- 24 ISO/TS 14253-3. Geometrical Product Specification (GPS)-Inspection by Measurement of Workpieces and Measuring Equipment- Part 3: Guidelines for Achieving Agreements on Measurement Uncertainty Statements[S]. International Organization for Standardization, 2002.
- 25 Jiang Xiangqian. Theory and Applications of New-Generation Geometrical Product Specifications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
蒋向前. 新一代 GPS 标准理论与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- 26 GB/T 18779.2-2004. Geometrical Product Specification (GPS)-Inspection by Measurement of Workpieces and Measuring Equipment-Part 2: Guide to the Estimation of Uncertainty in GPS Measurement, in Calibration of Measuring Equipment and in Product Verification[S]. China National Standardization Management Committee, 2004.
GB/T 18779.2-2004. 产品几何量技术规范(GPS)工件与测量设备的测量检验-第2部分: 测量设备校准和产品检验中 GPS 测量的不确定度评定指南[S]. 中国国家标准化管理委员会, 2004.
- 27 NBSIR 75-975. The Calibration of an Optical Flat by Interferometric Comparison to a Master Optical Flat[S]. NBS, 1975.
- 28 GJB/J 6221-2008. Calibration Specification for Digital Laser Plane Interferometer[S]. State Commission of Science and Technology for National Defense Industry, 2008.
GJB/J 6221-2008. 数字式激光平面干涉仪校准规范[S]. 国防科学技术工业委员会, 2008.
- 29 Wang Shengyun, Yang Hong, Zhang Mei, *et al.*. Figure measurement results uncertainty analysis for spherical optics[C]. 2008
- 30 ISO/TR 14999-1:2005. Optics and Photonics-Interferometric Measurement of Optical Elements and Optical Systems- Part 1: Terms, Definitions and Fundamental Relationships[S]. International Organization for Standardization, 2005.
- 31 ISO/TR 14999-2: 2005. Optics and Photonics-Interferometric Measurement of Optical Elements and Optical Systems- Part 2: Measurement and Evaluation Techniques[S]. International Organization for Standardization, 2005.
- 32 ISO/TR 14999-3: 2005. Optics and Photonics-Interferometric Measurement of Optical Elements and Optical Systems- Part 3: Calibration and Validation of Interferometric Test Equipment and Measurements[S]. International Organization for Standardization, 2005.
- 33 Memorandum to US Industrial Metrologists. Three Flat Method for Calibration of Optical Flats and ISO 17025[S]. NIST, 2007.
- 34 Johannes A Soons, Ulf Griesmann. Absolute interferometric tests of spherical surfaces based on rotational and translational shears[C]. SPIE, 2012, 8493: 84930G.
- 35 Youichi Bitou, Toshiyuki Takatsuji. Kensei Ehara. Simple uncertainty evaluation method for an interferometric flatness measurement machine using a calibrated test flat[J]. Metrologia, 2008, 45(1): 21-26.
- 36 Ikumatsu Fujimoto, Toshiyuki Takatsuji, Kunitoshi Nishimura, *et al.*. Autonomous calibration method of the reference flat surface of an interferometer without using a standard flat surface [J]. Appl Opt, 2012, 51(20): 4754-4767.
- 37 B Dörband. High - precision testing of optical components[C]. SPIE, 1998, 3482: 484-489.
- 38 Dörband B, G Seitz. Interferometric testing of optical surfaces at its current limit[J]. Optik, 2001, 112(9): 392-398.
- 39 Günther Seitz, Stefan Schulte, Udo Dinger, *et al.*. EUV microlithography-a challenge for optical metrology[C]. SPIE, 2004, 5533: 20-26.
- 40 K Otaki, K Ota, I Nishiyama, *et al.*. Development of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography-design, fabrication, and evaluation[J]. J Vac Sci Technol B, 2002, 20(6): 2449-2458.
- 41 K Otaki, T Yamamoto, Y Fukuda, *et al.*. Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror[J]. J Vac Sci Technol B, 2002, 20(1): 295-300.
- 42 K Otaki, Zhu Y, M Ishij, *et al.*. Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL [C]. SPIE, 2004, 5193: 182-190.
- 43 T Gemma, S Nakayama, Y Takigawa, *et al.*. Null testing at 1nm accuracy for sub-mm asphericity[C]. Optical Fabrication and Testing, 2002: OWD4.

- 44 Yuichi Takigawa, Shigeru Nakayama, Takahiro Yamamoto, *et al.*. Absolute accuracy evaluation of aspherical null testing for EUVL mirrors[C]. SPIE, 2005, 5869: 58690Q.
- 45 Peter Blake, Ronald G. Mink, David Content, *et al.*. Techniques and uncertainty analysis for interferometric surface figure error measurement of spherical mirrors at 20 K[C]. SPIE, 2003, 5180: 188-198.
- 46 Peter Blake, Ronald G Mink, John Chambers, *et al.*. Surface figure measurement at 80 K: alignment and uncertainty analysis[C] SPIE, 2004, 5180: 188-198.
- 47 Peter Blake, Ronald G Mink, John Chambers, *et al.*. High-accuracy surface figure measurement of silicon mirrors at 80 K[C]. SPIE, 2004, 5494: 122-131.
- 48 P Blake, J Chambers, R G Mink, *et al.*. Cryogenic system for interferometry of high-precision optics at 20 K: design and performance[C]. SPIE, 2005, 5904: 59040S.
- 49 NASA Technical Reports Server. Surface Figure Measurement of Silicon Carbide Mirrors at Cryogenic Temperatures [R]. 2013.
- 50 C J Evans, Uncertainty evaluation for measurements of peak to valley surface form errors[C]. CIRP Annals, 2008, 57: 509-512.
- 51 C J Evans, C Smith, J Soobitsky, *et al.*. Full area calibration of large optical flats[C]. ASPE, 2009.
- 52 C J Evans. Certification, self - calibration and uncertainty in testing optical flats[C]. SPIE, 2010, 7656: 76560S.
- 53 Evans C J, Davies A D. Certification, self- calibration and uncertainty in optical surface testing[J]. Int J Precision Technology, 2013, 3(4): 388-402.
- 54 Peng Shijun, Miao Erlong, Shi Zhenguang, *et al.*. Research on high-precision measurement of radius of curvature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011201.
彭石军, 苗二龙, 史振广, 等. 高精度曲率半径测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 50(1): 011201.
- 55 Peng Shijun, Miao Erlong. Sub-micron precision measurement of radius of curvature and uncertainties analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512001.
彭石军, 苗二龙. 亚微米高精度曲率半径测量及其不确定度分析[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512001.
- 56 Dongqi Su, Erlong Miao, Yongxin Sui, *et al.*. Absolute surface figure testing by shift - rotation method using Zernike polynomials[J]. Opt Lett, 2012, 37(15): 3198-3200.
- 57 Wang Hui, Zhou Feng, Wang Liping, *et al.*. Analysis and metrology of reproducibility of high-precision optic mount[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1208001.
王 辉, 周 烽, 王丽萍, 等. 高精度光学元件支撑装置面形复现性分析与测量[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208001.
- 58 R J Hocken, W T Estler, C J Evans. Self-calibration-reversal, redundancy, error separation, and 'absolute testing [J]. Cirp Annals-manufacturign Technology, 1996, 45(2): 617-634.
- 59 Schulz G, J Schwider. Interferometric testing of smooth surfaces[J]. Amsterdam: Progress in Optics, 1976, 13(8): 93-167.
- 60 Flemming Tinker, Michael Bray, Douglas Smith, *et al.*. Full surface mapping and calibration of large interferometer flats [C]. SPIE, 2007, 6671: 712.
- 61 Jensen A. Absolute calibration method for laser Twyman - Green wave - front testing interferometers[J]. J Opt Soc Am, 1973, 63: 1313A.
- 62 Bruce E Truax. Absolute interferometric testing of spherical surface[C]. SPIE, 1990, 1440: 61-68.
- 63 R Schreiner, J Schwider, N Lindlein, *et al.*. Absolute testing of the reference surface of a Fizeau interferometer through even/odd decompositions[J]. Appl Opt, 2008, 47(32): 6134-6141.
- 64 J Burke. Rapid and reliable reference sphere calibration for Fizeau interferometry[J]. Opt Lett, 2008, 33(21): 2536-2538.
- 65 Jan Burke, David S Wu. Calibration of spherical reference surfaces for Fizeau interferometry: a comparative study of methods[J]. Appl Opt, 2010, 49(31): 6014-6023.
- 66 Klaus R Freisehlad. Absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear[J]. Appl Opt, 2001, 40 (10): 1637-1648.
- 67 E E Bloemhof. Absolute surface metrology by differencing spatially shifted maps from a phase - shifting interferometer [J]. Opt Lett, 2010, 35(14): 2346-2348.
- 68 Song Weihong. Absolute Testing of Spherical Surface with Shift-Rotation Method[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
宋伟红. 基于平移旋转的球面绝对检测技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.

- 69 Parks R E, Evans C J, L Shao. Calibration of interferometer transmission spheres[J]. Optical Fabrication and Testing Workshop OSA Technical Digest Series, 1998, 12: 80-83.
- 70 Griesmann U, Wang Q, Soons J, *et al.*. A simple ball averager for reference sphere calibrations[C]. SPIE, 2005, 5869: 58690S.
- 71 Zhou P, J H Burge. Limits for interferometer calibration using the random ball test[C]. SPIE, 2009, 7426: 74260U.
- 72 Yue Zhou, Young-Sik Ghim, Angela Davies. Self calibration for slope-dependent errors in optical profilometry by using the random ball test[C]. SPIE, 2012, 8493: 84930H.
- 73 Chris J Evans, Angela Davies, Tony Schmitz, *et al.*. Interferometric figure metrology: enabling in-house traceability [C]. SPIE, 2001, 4450: 81-93.
- 74 Bergner B C, A Davies. Self-calibration for transmitted wavefront measurements[J]. Appl Opt, 2007, 46(1): 18-24.

栏目编辑: 何卓铭