

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.05.02

基于相移干涉仪的平面度测量软件设计

顾洋, 王青, 石慧

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: 以相移干涉法测出的点阵波面数据为基础, 设计了计量用平面度测试软件 FlatEx, 包括标准平晶的绝对检验、研磨面平尺的斜入射测量和子孔径拼接及三个功能算法模块。通过与等倾干涉仪检定过程的比较, 从理论上说明从密集点阵数据中提取稀疏点数据的合理方法, 以符合规程的要求或约定俗成的做法。程序已经用于处理 MatroPro 和 PhaseOne 等多种相移干涉仪数据, 提取出符合要求的平面度结果。在相移干涉仪与等倾干涉仪检定结果进行比对实验中, 表现出良好的一致性。

关键词: 平面度; 相移干涉; 标准平晶; 研磨面平尺

中图分类号: TB92

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2017)05-0007-05

Design of Flatness Measurement Software Based on the Phase-Shift Interferometer

GU Yang, WANG Qing, SHI Hui

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In this paper, a flatness measurement software was designed called FlatEx including three modules which named absolute testing, inclination measurement of milling straight edges and sub-aperture stitching basing on the wave data by using phase-shift interferometer. By comparison with the process in verification using the flatness interferometer with isoclinic circle fringe, this method proves theoretically feasible for extracting sparse points from dense points in accordance with regulations or unwritten ways. FlatEx can process data from kinds of software in phase-shifting interferometer and bring forward the reasonable requirement result of flatness. By comparison with the results between the phase-shift interferometer and the flatness interferometer with isoclinic circle fringe, it shows a good correlation.

Key words: flatness; phase-shifting interference; standard optical flat; milling straight edges

0 引言

在光学干涉计量领域中, 我国的平面度计量一直沿用方法是, 使用等倾干涉仪及等厚干涉仪对平晶面型进行测量和量值传递, 但是由于等倾干涉仪需要逐点测量、人工判读干涉条纹, 并需要严格标定与修正水平放置产生的平晶自重误差, 因此从准确度和测量效率上都无法满足日益严格的生产和科研要求。随着光学测量的发展, 移相干涉仪已广泛应用在光学零部件的生产与国防计量实践中, 成为了替代传统等倾干涉仪的首选, 因此针对移相干涉仪的平面度测量与数据处理规范亟待形成一定的标准。

绝大多数的相移干涉处理软件, 如 MatroPro 和

PhaseOne, 在对波面数据处理结果中没有计量的概念与相对应的数据处理方法, 因此本文意在这些软件的基础上做计量部分的后续开发, 包括对标准平晶进行绝对检验的组合测试波前运算、与等倾干涉仪测试数据一致的稀疏点平面度计算、对长平晶/研磨面平尺的分段测试数据拼接、对研磨面平尺倾斜测试数据的波前修正。

针对国家仪器专项的需求, 本文设计应用在计量领域的相移干涉专用软件, 软件兼容规程中的测试要求, 对于规程^[1]中提到的模糊概念如: “任意”两个截面、全口径(去除边缘)和 2/3 口径等清晰化, 为了避免不同口径下稀疏像素点及使用不同分辨力 CCD 间无法传递的问题, 这里人为规定按 1 mm 间隔在特征截面横纵两方向提取采样点, 从而也兼容了传统干涉仪的计量结果。本软件暂时没有考虑全面域的平面绝对检验方法, 原因: 一是目前国家标准未有要求, 二是基于旋转测试的绝对检验方法成熟度不够, 与计量行业的要求还有不小的差距。

收稿日期: 2017-07-24

基金项目: 国家重大仪器专项开发(2013YQ150829)

作者简介: 顾洋(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为平晶计量; 王青(1963-), 男, 副研究员, 主要从事光学测量、干涉计量领域研究工作。

1 计量测试系统软件结构

包括掠入射,子孔径拼接及三面互检测测试数据处理程序的主要功能为实现相关平晶平面度的数据计算。本文所要设计的平晶计量软件 FlatEx 需调用 MatroPro 或 PhaseOne 主程序的部分为干涉数据采集部分和绘图部分。FlatEx 的输入数据为相移干涉点阵数据,包括波面相位差、MASK、测试参数,输出相应待测件的平面度指标以及特定截面上横纵方向的平面度数据。

经需求调研和分析论证,选用 Vs2010 开发平台对应用程序框架搭建,本软件总体功能划分为如下几个模块:①人机交互界面模块;②图像数据运算模块;③波面数字指标提取模块;④平面度量值传递模块。软件各子模块的关系如图1所示。

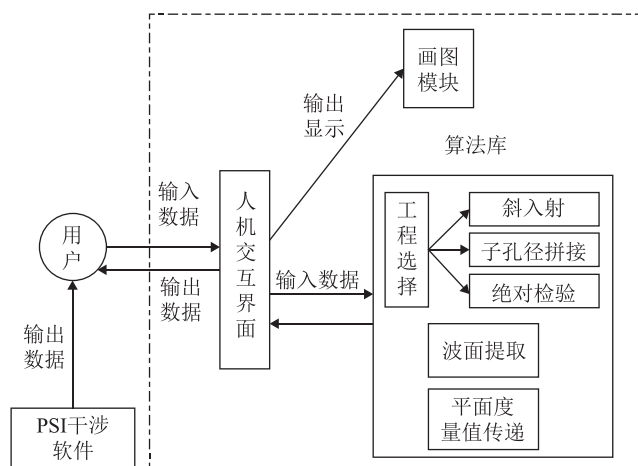


图1 居中软件各子模块关系

根据用户需求,系统软件主程序流程图如图2所示。

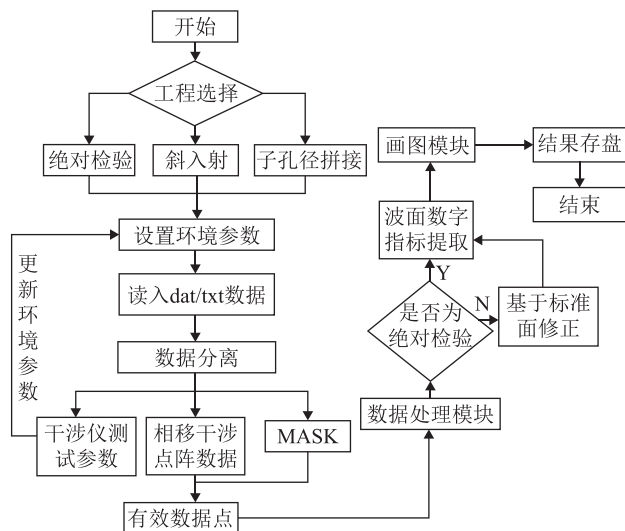


图2 主程序流程图

1.1 人机交互界面与运算模块

根据用户操作习惯,本系统界面划分为2个部分:工程选择菜单和主显示窗口。选择菜单包括功能选择、文件操作、参数配置、查询历史数据和帮助等。主窗口提供计算、复位、测试结果的二维及三维波面显示。使用时,用户根据需要,新建相应工程,按要求进行参数配置并提供合法的输入数据,然后点击计算即可得到相应计量器具的平面度,在显示波面图中,用户可根据需要通过鼠标对其进行旋转、平移、缩放、拉线查值等。软件界面如图3至图5所示。

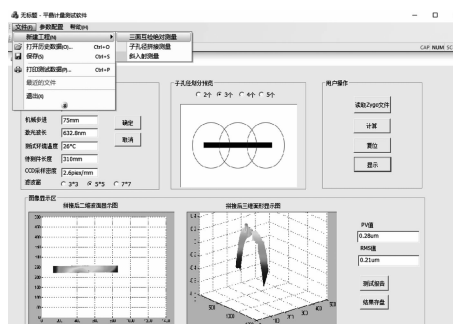


图3 软件界面1

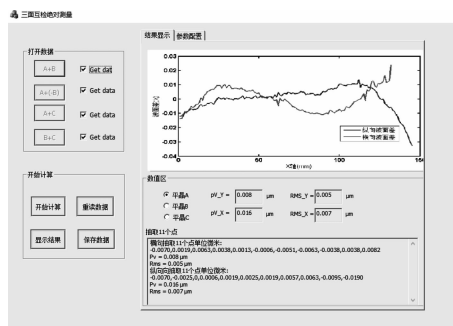


图4 软件界面2

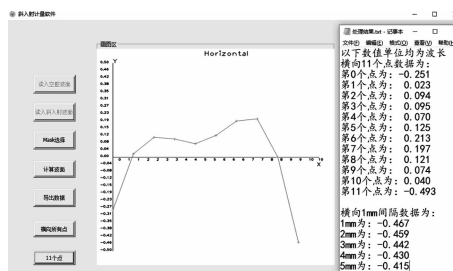


图5 软件界面3

在对输入数据处理中,最核心的三大算法为斜入射算法、子孔径拼接算法及绝对检验算法。斜入射算法^[2]具有扩大测试面的优势,它利用参考镜和反射镜使待检平晶面型的波面差放大,放大系数与倾角相关。子孔径拼接算法^[3]利用精密位移台对已划分的长平晶/

研磨面平尺进行检测,通过对重叠区域波面拟合推导出坐标变换公式,将所有子孔径整合到同一坐标系下,并通过加权平滑拼接提升对随机误差的抗干扰性。绝对检验算法^[4]是规程中提到的对圆平晶测试的算法,通过三个平面两两相对,进行三次斐索干涉检验,由于在两个面干涉测量时,要将其中一个面的坐标系相对于 y/x 轴翻转,这样三个方程就能得到三个面沿 y/x 轴上的面形误差分布。

1.2 波面数字指标提取与量值传递模块

1.2.1 以点控线的量值传递

在计量干涉的过程中,对研磨面平尺及圆平晶使用的是不同的测试方法,因此为了能将移相干涉与等厚、等倾干涉结果进行精确对照,在测试中需要制定指标并在指定位置提取波面数字。平面等倾干涉仪测量过程较为繁琐,因此一般只测量有限的几个点。国标定义了长平晶的测量点包括一个中心点,及两边若干间隔为 30 mm 待测点;而圆平晶则较为模糊,只提了“任意”两个截面、全口径(去除边缘)和 2/3 口径等。业内约定成俗的测量选择是两个确定的截面上,各测量 5 个点。图 6 为平晶检定时的测量点分布。

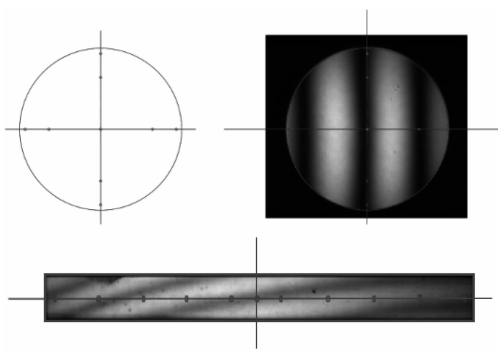


图 6 圆平晶及研磨面平尺特征截面的获取

在国标中,平面度的定义都是基于测量点实现的,并且假设测量点之间的空白区域上“局部平面度”,不会超出测量点的结果,也就是说待测平晶的面形是“规则”的,但无规则的局部变化是无法通过稀疏点表征的。正因如此,平晶口径大小不一致的情况下,上级平晶与下级平晶的量值传递过程中,测量点完全对准基本不可能实现,因此利用等厚干涉仪平面度传递,准确度损失严重。

本实验室所采用的是 ZYGO 激光相移干涉仪,其采样 CCD 分辨力为 640×480 ,即测出的点阵数据约为 30 万,可以认为做到了全口径平面度覆盖,填补了传统干涉仪测量方法的空白区域。但由于 CCD 分辨力或待测平晶口径不同,在实际空间中的测量分辨力会有

极大的不同:在口径 100 mm、CCD 分辨力 1 k 的情况下,干涉仪的测量分辨力为 0.1 ~ 0.2 mm;而口径 600 mm 时,干涉仪的测量分辨力则在 1 mm 左右。考虑到等倾干涉仪的测量分辨力(5 mm 左右)以及量值传递不依赖于干涉仪类型,在 FlatEx 设计中,暂定的平面度选取分辨力为 1 mm。这样即使在平晶口径大小不一致的情况下,下级平晶仍然可以通过上级平晶修正。为了使相移干涉仪测量方法可以兼容传统的平晶计量手段,在抽出按国标规定的平面度特征点的时候,再按等倾干涉仪的测量分辨力进行平滑处理。

1.2.2 波面平滑算法

为了使不同口径平晶及使用不同分辨力 CCD 可以相互传递,本文采用按 1 mm 间隔的抽样数据,这就会导致测量结果产生大量不连续的跳变数据,称为毛刺,这里采用均值平滑滤波^[5]算法。传统均值滤波算法是设定以像素为单位的正方形滤波窗,对包含在滤波掩膜邻域内像素求得平均值,以代替滤波窗中心像素值,而本设计软件为了保证量值传递不依赖于干涉类型及 CCD 分辨力,则以 1 mm 为滑动窗,当然也可根据实际情况选取 1, 2 mm 或 3 mm 滑动窗,通过求平均的方法使得毛刺部分变小,如图 7 所示。

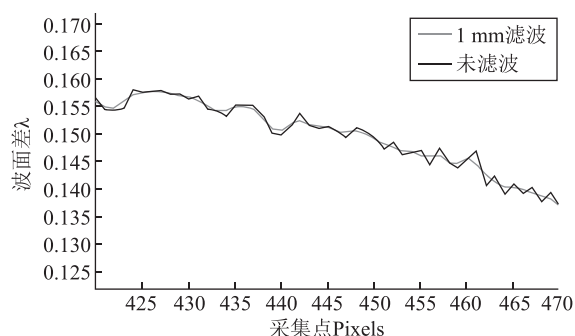


图 7 滤波后与原数据对比

2 实验

2.1 绝对检验结果

该实验选取了三个平面作为被测件。被测平面 A 和 B 均为 ZYGO 公司 $\phi 150$ mm 原装石英镜片,编号 zygo00027 和 zygo00026; C 为英特飞公司的石英标准平晶,尺寸为 $\phi 160$ mm $\times$ 30 mm,暂编号 YTF-1。平晶所设定的 x, y 方向, A, B 是其外框装夹所确定,而平晶 C 则是由广东省计量院按国标要求“任意”选取的截面。

在本实验中,选 A 对应 1 号平面镜、B 对应 2 号平面镜、C 对应 3 号平面镜,在使用移相干涉对其进

行实际测量,夹取待测平面镜的夹具使用的是带有旋转刻度的五维调整架,从而保证该待测平面的转动角度为精确的 180° ,通过zygo相移干涉仪测得 $A+B$, $A+C$, $A+(-B)$, $B+(C)$ 四组dat格式文件,输入到FlatEx软件得到测试1mm间隔采样结果与MatroPro自带绝对检验算法处理的像素点结果比较如图8所示。

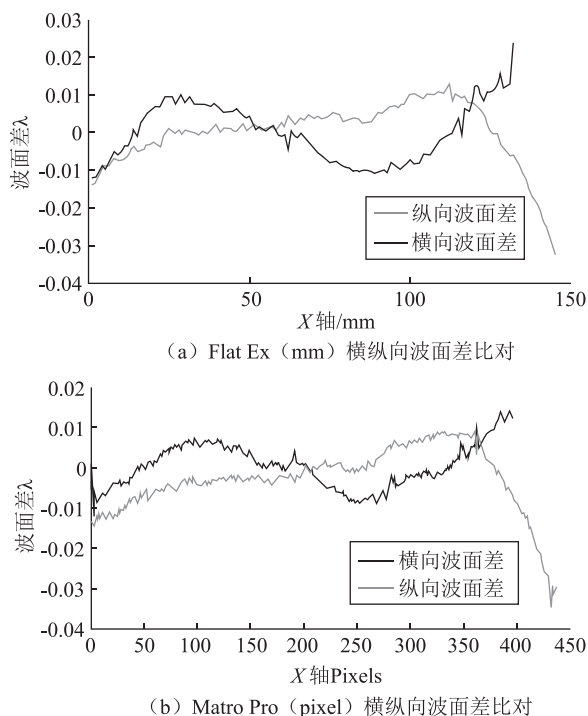


图8 FlatEx(mm)与MatroPro(pixel)横纵向波面差对比

2.2 子孔径拼接结果

针对研磨面平尺的图像测量分为三步,分别通过干涉仪测量研磨面平尺的左侧、中间、右侧三个部分的面型数据,记录三个部分测量时待测元器件的移动距离,从而计算其与图像分辨率的对应关系。由于研磨面平尺表面的反射率非常高,在测量过程中易使图像对比度降低,因此在标准透镜和待测标准研磨面平尺中间放置纱网,起到散射光线的作用,从而使干涉条纹更加清晰的同时提高了测量准确度。在测量 $L=300\text{ mm}$ 的研磨面平尺时,干涉仪口径为 $\phi 150\text{ mm}$,所以三个子孔径之间的距离定为 75 mm ,得到的干涉图像如图9所示。



图9 左测干涉图,中间部分干涉图,右侧干涉图

由FlatEx软件直接拼接,得到拼接后的完整面形如图10所示。

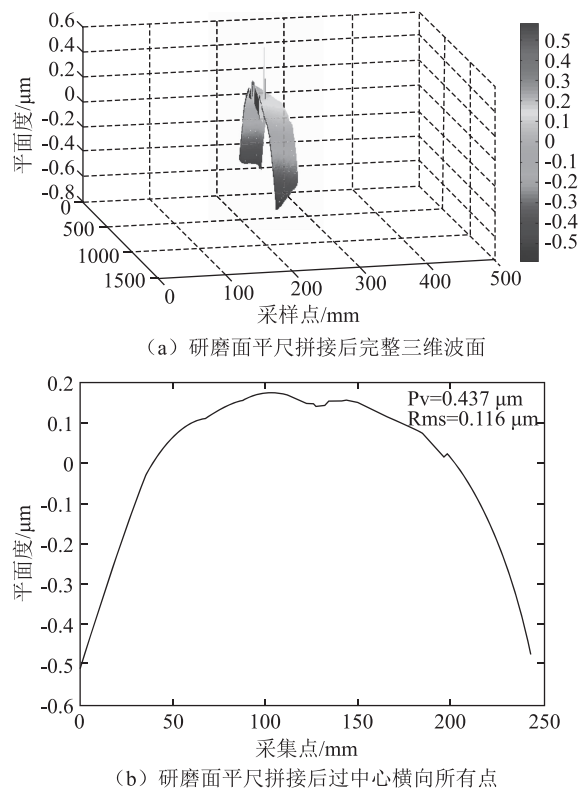


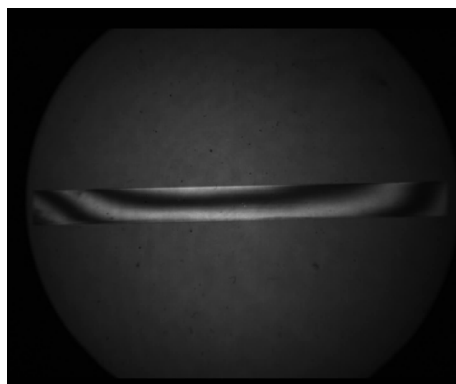
图10 研磨面平尺拼接后完整三维波面及过中心横向所有点

2.3 斜入射结果

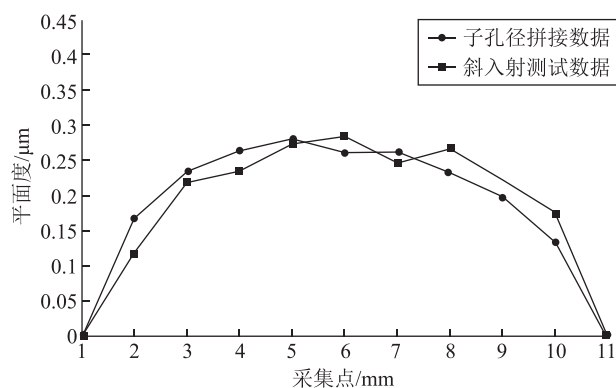
斜入射测试需要使用两块标准平晶,且由于研磨面平尺表面反射率高,因此两块标准平晶均不需要镀膜(如果测量长平晶,则需要一块度高反射膜的反射镜),使用的研磨面平尺同前。倾斜放置保证了研磨面平尺 $300\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的表面能被斐索型干涉仪的 150 mm 镜头完整捕捉,测得干涉图如图11所示。将像素格值 p/d ,波面mask和研磨面平尺长度 L 输入到软件中,得到斜入射测试数据,并于之前FlatEx拼接结果对比如图11所示。

3 结论

本文设计了针对计量用测试平面度软件,软件功能包含对使用干涉仪的三面互检法测试圆平晶,使用掠入射测量和图像拼接法测试研磨面平尺,在三面互检的四次测量法对圆平晶进行了绝对检验,得到的数据与干涉仪内置的三面互检法程序计算所得数据重合率高,证明该计算方法可以通过软件进行复现。对于测量研磨面平尺/长平晶平面度算法中,提出了一种再承接传统计量手段的基础上新的量值传递方法,本文



(a) 斜入射干涉图



(b) FlatEx拼接与斜入射数据对比

图 11 斜入射干涉图及 FlatEx 拼接与斜入射数据对比

(上接第 6 页)

实际上, 计量性设计并不仅仅是一个设计准则和理念要求, 它的发展与完善将使得所设计制造的产品, 在全寿命周期中的各种状态特性参量数据变得透明、可用, 并极易实现数据信息的采集、收集和留存, 供后续发展及改进产品自身使用。从这个意义上说, 计量性设计与评估是复杂工业产品技术状态控制及质量管理的基础。

另外, 当今世界正在推崇的智能制造, 其核心有两个, 一为模型化制造, 二为过程量值的精确测量与控制。这也是未来高端制造业的主流发展方向, 从中不难看出, 如果智能加工设备没有进行计量性设计, 高精密智能加工将寸步难行。

参 考 文 献

- [1] 刘春艳, 王卫华, 陈慧宇. 舰艇计量保障初探[J]. 计测技术, 2010, 30(5): 59-60.
- [2] 纪明霞, 陈世夏. 机载 ATS 闭环计量保障模式探讨[J]. 计测技术, 2011, 31(4): 49-51.
- [3] 张玉莲, 宋双杰. 试飞测试校准技术及其发展趋势[J]. 计

从理论上予以说明, “以点控线”的合理性, 对于平面度的表示既给出按 1 mm 间隔测试横向纵向的所有点, 也按国标规定抽取相应的特征点。

研磨面平尺测量实验表明, 拼接测量数据的多次测量的数据差值较小, 标准差在 0.05 ~ 0.10 μm 之间, 分析 FlatEx 软件研磨面平尺拼接后的 PV 值为 0.283 μm, rms 值为 0.212 μm, 斜入射方法的 PV 值为 0.285 μm, rms 值为 0.210 μm, 二者均符合研磨面平尺检测的测量要求, FlatEx 作为计量专用软件可以使用。

参 考 文 献

- [1] 徐德衍, 王青, 高志山, 等. 现行光学元件检测与国际标准[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 刘兆栋, 陈磊, 韩志刚, 等. 斜入射干涉检测大口径碳化硅平面反射镜[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1437-1443.
- [3] 徐新华, 王青, 宋波, 等. 基于子孔径拼接技术的大尺寸光学材料均匀性检测系统[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 118-124.
- [4] 徐晨, 陈磊. 光学平面绝对检验方法的研究[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 775-778.
- [5] Rakshit S, Ghosh A, Shankar B U. Fast mean filtering technique (FMFT)[M]. Elsevier Science Inc, 2007.

测技术, 2008, 28(4): 1-3.

- [4] 范静, 王光发, 荆卓寅, 等. 涡扇发动机试车台推力测量与校准技术概述[J]. 计测技术, 2012, 32(5): 1-4.
- [5] 柴振海, 周伟超, 陈云梅. 导弹武器系统计量保障[J]. 宇航计测技术, 2004, 24(5): 60-64.
- [6] 郑媛月, 郑保, 王静波, 等. 飞机研制的计量保障探讨[J]. 计测技术, 2010, 30(3): 49-50.
- [7] 董锁利, 唐武忠, 高万忠. 航空装备计量保障关键技术分析[J]. 计测技术, 2011, 31(5): 45-48.
- [8] 李志强, 朱霞辉, 陈怀艳, 等. 航天测控工程计量保障需求和管理对策研究[J]. 宇航计测技术, 2004, 24(5): 55-59.
- [9] 董锁利, 丁颖, 张建兰, 等. 机载设备计量性分析与设计讨论[J]. 计测技术, 2011, 31(3): 46-48.
- [10] 段双菊. 浅谈军工产品生产阶段的计量保障[J]. 计测技术, 2010, 30(2): 54-55.
- [11] 梁志国, 吕华溢, 张大治. 专用测试系统计量校准问题讨论[J]. 计测技术, 2017, 37(2): 1-5.
- [12] 梁志国, 吕华溢, 张大治. 计量性是复杂工业产品技术状态控制及大数据管理的基石[J]. 计测技术 2017, 37(3): 7-12.