

激光数字平面检测系统的误差分析与应用

莫卫东

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:根据对实际光学平面玻璃表面误差检测结果的分析,深入地研究了激光数字平面检测系统中的理论误差与系统误差,提供了如何根据拟合干涉波面的 Zernike 多项式的系数对被测表面误差类型的判别方法,并对干涉条纹数量和拟合 Zernike 多项式阶的大小对精度的影响进行了研究。

关键词:光学平面检测;数字化干涉波面;Zernike 多项式拟合;误差分析

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2003)02-0091-04

应用激光数字平面检测系统除了能很好地测量光学玻璃表面的平整度之外,还可以应用它对其平面误差的类型进行评判,以指导平面玻璃加工过程与工艺。可见,激光数字平面检测系统是传统经典精密光学检测方法与现代计算机数字化技术完美结合的一个成功范例^[1-2]。本文通过对实际玻璃表面检测结果的分析研究,对激光数字平面检测系统的理论误差和光学误差进行了深入的探讨,并研究了干涉条纹数量和拟合 Zernike 多项式阶对激光数字平面检测系统精度的影响。

1 Zernike 多项式拟合系数与被测表面误差类型的关系与应用

激光数字平面检测系统的核心技术就是用 Zernike 多项式拟合的光学干涉波面,该光学干涉波面为一个参考光学平面和一个被测光学表面的反射光形成的干涉波面,在此干涉波面中包含了被测光学表面的信息,拟合的目的是把被测表面的信息用一个波面函数表达出来,通过该波面函数来计算和分析被测表面的平整度以及表面形状等信息^[3-4]。在该干涉波面的波面函数中包含着以下三方面的信息:

一是人为调整的相对固定的相位贡献,即二相干波有一定的夹角形成的“平行”的干涉条纹,“异变”的干涉条纹则反映了被测表面的状况;

二是干涉系统的误差,包括系统内外各种噪声干扰和参考平面的误差等;

三是被测表面相对参考平面的误差,即平面误差。

若将上述三种信息分离,就能对被测表面误差进行分类,达到全面准确检测被测光学表面状况的目的。具体方法是通过对每一项 Zernike 多项式拟合系数的理论分析和实验研究,从而得到每一项 Zernike 多项式的拟合系数具有以下物理意义:

1) 常数项(对应拟合系数 Z_1):代表两个相干平面波有一定的“间距”,它是在把干涉波面数字化时干涉条纹零级选择的任意性引起的;

2) $\rho \cos \theta$ 和 $\rho \sin \theta$ 项(对应拟合系数 Z_2 和 Z_3):它们为倾斜项,其拟合系数的大小反映了两相干平面波存在着一定的夹角大小,具体反映为干涉条纹的疏密程度。

上述两种形式的干涉波面信息为整个干涉波面的相位大小,它们是测量系统人为造成的,并且是相对固定,其中没有被测表面加工质量方面的信息,所以可直接令其拟合系数为零便可去除它们对整个干涉波面的相位贡献,也就完成了将其从干涉波面的波面函数分离的任务,即,在表 1 中的表面总误差 $W_{2 \text{ max}}$ 并不包含上述两种形式的波差。

3) $2\rho^2 - 1$ 项(对应拟合系数 Z_4):其对应初级像差——像场弯曲。该项的拟合系数反映了被测表面整体上的凹凸状况,代表了被测表面大体上的非平整度部分。经实验证明,当被测玻璃表面加工后具有明显的球面形式的凹凸时(如表 1 中的样品 3),就可以看到该项拟合系数的明显增大。

4) $\rho^2 \cos \theta$ 和 $\rho^2 \sin \theta$ 项(对应拟合系数 Z_5 和 Z_6):共同对应初级像差——像散。当被测表面整体平整度具有特殊的非球面形式的凹凸时,这两项拟合系数(Z_5 和 Z_6)将明显增大。如当检测一个具有类似柱面形式凹凸的样品时(如表 1 中的样品 4),这两项的拟合系数对整个表面误差相位贡献就显得比较大。

除了以上 6 项 4 种形式的波差外,Zernike 多项式其余的每一项也都代表了不同形式的波差,这些波差不但包含着被测表面的平面误差,也包含着系统的误差。通过对不同质量的样品检测,可以明确地发现, Z_4 、 Z_5 和 Z_6 对应的拟合系数反映的是被测平面的整体平整度情况,称之为平面度误差 $W_{p,ms}$ 。把除去上述 4 种形式误差后剩下的被测表面误差称为局部误差 $W_{l,ms}$,它反应了被测表面小范围内不规则的凹凸不平的状况,许多精密光学系统(如激光陀螺)对这部分误差更为敏感,因而在精密光学的应用中更关心这部分误差大小。因此,局部误差 $W_{l,ms}$ 是评价被测玻璃表面质量好坏的关键指标。

表 1 具体说明了不同质量样品的 Zernike 多项式拟合系数(经过归一化后)的变化情况,从中可以看到 Zernike 多项式拟合系数与被测表面形状类型之间的关系。

表 1 Zernike 多项式拟合系数与被测表面误差类型的关系研究

	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	
单位光瞳内干涉条纹数	5	5	5	5	
拟合 Zernike 多项式阶	4	4	4	4	
放大后采样点数量	294	266	276	269	
归一化拟合多项式系数的平方	$Z_1 = A_1^2$	35.044 33	25.946 47	12.678 06	37.788 28
	$Z_2 = A_2^2$	0.523 56	0.037 07	1.021 40	0.005 45
	$Z_3 = A_3^2$	5.951 58	5.453 39	5.912 04	5.623 23
	$Z_4 = A_4^2$	0.038 68	0.000 05	0.839 60	0.000 31
	$Z_5 = A_5^2$	0.002 11	0.000 20	0.032 79	0.019 77
	$Z_6 = A_6^2$	0.000 06	0.000 14	0.002 80	0.045 86
	$Z_7 = A_7^2$	0.000 01	0.000 50	0.002 91	0.002 35
	$Z_8 = A_8^2$	0.000 01	0.003 31	0.000 25	0.005 21
	$Z_9 = A_9^2$	0.000 13	0.000 25	0.000 60	0.000 07
	$Z_{10} = A_{10}^2$	0.000 01	0.001 82	0.002 82	0.001 98
	$Z_{11} = A_{11}^2$	0.000 00	0.000 08	0.004 46	0.000 28
	$Z_{12} = A_{12}^2$	0.000 02	0.001 68	0.000 13	0.000 01
	$Z_{13} = A_{13}^2$	0.000 07	0.000 00	0.000 43	0.000 11
	$Z_{14} = A_{14}^2$	0.000 06	0.001 18	0.003 33	0.000 26
	$Z_{15} = A_{15}^2$	0.000 05	0.000 01	0.000 01	0.000 13
拟合精度 $P_{ms}(\lambda)$	0.015 91	0.018 37	0.026 36	0.015 08	
被测表面总误差 $W_{z,ms}(\lambda)$	0.057 33	0.027 09	0.266 15	0.077 88	
被测表面平面度误差 $W_{p,ms}(\lambda)$	0.057 02	0.005 56	0.263 90	0.072 44	
被测表面局部误差 $W_{l,ms}(\lambda)$	0.006 06	0.026 52	0.034 49	0.028 59	
被测表面最大误差 $W_{pv}(\lambda)$	0.231 90	0.185 90	1.007 68	0.433 84	

注:表中 P_{ms} 为对干涉条纹位相的拟合精度; $W_{z,ms}$ 为把 Zernike 多项式代表两相干波中常数项 Z_1 和倾斜项 Z_2 、 Z_3 的贡献去除,即 Z_3 之后的所有归一化多项式系数的平方之和; $W_{p,ms}$ 为 Z_4 、 Z_5 、 Z_6 三项归一化多项式系数的平方之和; $W_{l,ms}$ 为 Z_6 之后的所有归一化多项式系数的平方之和; W_{pv} 为被测平面表面最高与最低处的峰峰值误差。

参考对干涉图条纹的分析,由 Zernike 多项式拟合系数的大小,可明确地对表 1 中 4 个光学平面玻璃样品的表面误差情况做出评价:

样品 1:仅 Z_4 一项对应的误差占总误差的 93.4%,说明该样品的平面误差主要是平面度误差,其他局部误差只占很小一部分。充分说明该样品平面度一般,局部误差小。

样品 2: Z_4 、 Z_5 、 Z_6 三者之和对应的误差贡献仅占总误差的 4.2%,说明其平面度较好,但局部误差相对比较大。

样品 3:平面度也比较差,仅 Z_4 一项对应的误差就占了总误差的 94.3%,与样品 1 的平面误差形式相同,主要是球面形式误差。由于样品 3 中 Z_4 的大小比样品 1 大很多,说明样品 3 比样品 1 的误差更大,其表面质量比样品 1 差,不过,二者的局部误差都相对较小。

样品 4:其干涉条纹为“放射式”的,带有较强的柱面形式的面型分布特征,反映在 Z_5 、 Z_6 上,其对应误差占总误差的 85.8%,说明该样品的平面度一般,但与样品 1 和样品 3 的误差形式不同,且局部误差也相对较大。

2 被测光瞳内干涉条纹数量对系统精度的影响

激光平面检测系统的基本原理是靠被测表面与参考面形成的干涉条纹——若干根干涉条纹描述整个被测表面的,很显然,检测时在光干涉波面上的光瞳内采样的数据点区域是不均匀的。这种在干涉条纹的极值点采样数据的局部性(实际上是线化采样),加之干涉条纹本身的对称性与 Zernike 多项式函数之间的内在联系,最终导致了用 Zernike 多项式拟合干涉波面分析中出现异常^[5,7]。

表 2 列出了不同质量的样品在不同干涉条纹数的条件下的检测结果,从中可以看到,光瞳内干涉条纹数量对不同质量样品检测结果的影响。

表 2 干涉条纹数量对不同质量样品被测表面检测结果的影响

被测光瞳内干涉条纹数量		4	5	6	7
拟合 Zernike 多项式的阶		3	4	5	6
样品 1	样品表面平面误差特点	平整度一般,局部误差较小.			
	拟合精度 $P_{rms}(\lambda)$	0.011 3	0.015 9	0.017 9	0.019 4
	被测表面总误差 $W_{z,rms}(\lambda)$	0.054 0	0.057 3	0.060 6	0.055 0
	$W_{z,rms}(\lambda)$ 对不同条纹数的重复性分析	$(W_{z,rms})_{rms} = 0.003\ 01$, $(W_{z,rms})_{rms}/\overline{W}_{z,rms} = 5.3\%$			
	被测表面局部误差 $W_{j,rms}(\lambda)$	0.007 95	0.006 06	0.008 18	0.010 09
	$W_{j,rms}(\lambda)$ 对不同条纹数的重复性分析	$(W_{j,rms})_{rms} = 0.00162$, $(W_{j,rms})_{rms}/W_{j,rms} = 20.1\%$			
样品 2	样品表面平面误差特点	平整度较好,但局部误差较大.			
	拟合精度 $P_{rms}(\lambda)$	0.185 6	0.018 37	0.008 18	0.017 09
	被测表面总误差 $W_{z,rms}(\lambda)$	0.019 88	0.027 09	0.022 97	0.021 86
	$W_{z,rms}(\lambda)$ 对不同条纹数的重复性分析	$(W_{z,rms})_{rms} = 0.003\ 04$, $(W_{z,rms})_{rms}/\overline{W}_{z,rms} = 13.3\%$			
	被测表面局部误差 $W_{j,rms}(\lambda)$	0.018 32	0.026 52	0.022 30	0.021 32
	$W_{j,rms}(\lambda)$ 对不同条纹数的重复性分析	$(W_{j,rms})_{rms} = 0.003\ 39$, $(W_{j,rms})_{rms}/W_{j,rms} = 15.3\%$			

根据表 2 中的分析可以看出:样品 1 局部误差较小,不同条纹下测量结果的重复性比较好;而样品 2 局部误差比较大,不同条纹数下测量结果重复性就比较差。这其中的原因可以解释为:局部误差比较大时,表明被测表面的不规则小误差较严重,当被测光瞳内的条纹数改变时,条纹所在被测面的方位随之改变,采样点所表示的干涉波面的位相随之也必将有所变化,最终影响了对干涉波面的拟合和对被测面的检测结果。所以,在此情况下通过条纹计算和分析的被测表面误差的重复性就不会太好;而当局部误差较小时,且误差的形式也稍微“规则”,即使条纹数改变致使条纹的方位变化,对于选择不同条纹数下的检测结果的重复性将仍然比较好。

因此建议,当样品的局部误差比较大时,应调整光瞳内的干涉条纹数多一些,以便能更充分地反应被测表面的特征,把条纹数对测量结果的影响降到最小。其实,在实际的应用中会发现,一般样品的局部误差均较小,检测时整光瞳内的干涉条纹数在 6 根左右均可得到满意的结果。

此外,当改变检测时所采样的干涉条纹数量,从表 2 可以发现这样一个现象:样品 1 的局部误差较小,其不同条纹数下的重复性相对误差却比局部误差较大的样品 2 的大。但是应注意到,样品 1 局部误差比样品 2 要小一个数量级,样品 1 为局部误差千分之一波长,而样品 2 的局部误差为百分之一波长。而二者的不同

条纹数下的重复性绝对误差都在千分之一波长。这充分说明本研究所使用的平面检测系统的灵敏度在千分之一波长,系统的精度可以保证为百分之一波长。

3 拟合干涉波面的 Zernike 多项式阶的选择对系统精度的影响

研究之初是企图找到当干涉条纹数一定时,拟合干涉波面的 Zernike 多项式的阶选择高到何值时,测量的精度最高,或者说,测量的结果对更高阶的选择关系已经不大。拟合干涉波面时,在选择某一阶的 Zernike 多项式之后,该阶以后的 Zernike 多项式拟合系数趋于一个小量,并且这个小量在总的误差分析结果中所占的比例很小。经过系统地研究发现以下事实:当在被测干涉波光瞳内的条纹数量一定时,拟合时选择的多项式阶越高,其拟合精度越高。但是,并不是说可以无条件地增加多项式的阶,以提高检测的精度。对于平面误差的检测,要求阶必须遵守 Zernike 多项式阶选择法则^[5,7],即:Zernike 多项式拟合干涉波面的阶应小于被测光瞳内干涉条纹的数量。否则,测量的结果和分析都将是不可靠的。

4 结束语

通过对拟合干涉波面的 Zernike 多项式拟合系数大小以及拟合系数与光学系统像差之间关系的研究,除了可依据 Zernike 多项式拟合系数的大小和分布,判断被测表面误差(表面形状)的类型,以便指导平面玻璃表面加工过程和工艺之外,可更加深入地研究与分析激光数字平面检测系统中的系统的理论和光学误差,并还可在“Zernike 像差空间”对系统的精度进行客观地评价。

参考文献:

- [1] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, et al. Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses [J]. Appl Opt, 1974, 13(11): 2693 - 2703.
- [2] Schwider J, Burow R, Elssner K, Rzanna J G, et al. Digital Wavefront Measuring Interferometer; Some Systematic Error Sources [J]. Appl Opt, 1983, 22(21): 3421 - 3431.
- [3] 余景池. 由干涉图计算波差和传递函数[J]. 光学学报, 1984, 4(9): 814 - 820.
- [4] 莫卫东, 冯金富. 数字化玻璃表面检测系统的研究[J]. 光子学报, 2001, 29(9): 123 - 12.
- [5] 莫卫东. Zernike 多项式拟合干涉面方法研究[J]. 高速摄影与光子学, 1991, 20(4): 296 - 304.
- [6] 莫卫东, 高伯龙. 数字化技术在玻璃表面检测系统中的应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2000, 1(5): 1 - 4.
- [7] 莫卫东. Zernike 多项式拟合干涉波面的基本原则[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2002. 3(3): 35 - 38.

(编辑: 姚树峰)

Research on Application of the System to Inspect Surface of Optical Plane with Laser Quantizing Technique

MO Wei - dong

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Through the analysis of the error inspection results of actual optical plane glass surface, this paper makes a thorough study of the theoretical and systematic errors in the laser quantizing plane inspecting system, offers the methods of judging the error type of the inspected surface according to the coefficients of Zernike polynomials, and simultaneously the paper also discusses the effect of the number of interference stripe and the order of Zernike polynomials on precision of the system.

Key words: optical plane inspecting; quatizing interference wave surface; Zernike polynomials fitting; error analysis