

特殊光学元件的新型子孔径拼接检测方法研究*

常军[†] 张正慧 王蕊瑞

(北京理工大学光电学院, 光电技术与信息系统实验室, 北京 100081)

(2010年6月6日收到; 2010年9月8日收到修改稿)

使用新型的特殊整流罩窗口可以明显地提升飞行器的空气动力学性能, 但由于这种共形窗口光学表面的复杂性, 传统的非球面检测技术已经较难满足要求. 本文提出了一种新型子孔径拼接检测技术, 在建立新的检测原理基础上, 还重点介绍了这种检测方法的设计. 同时基于补偿法的原理, 文中还针对一个口径 70 mm 的共形窗口, 设计了相应的特殊补偿器, 其最终剩余波像差 (RMS) 为 0.0515λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 可以满足实际使用要求.

关键词: 共形窗口, 共形检测, 子孔径拼接检测, 补偿器

PACS: 42.87.-d, 42.15.Eq

1. 引言

传统的飞行器整流罩光学中通常只会用到两种外形的元件——平板窗口和半球形头罩, 这两种光学元件易于设计、加工及检测, 但它们都不是符合理想空气动力学特性的窗口形状. 如果使用具有优越空气动力学性能的共形窗口取代这种传统的光学窗口^[1,2], 就可以全面提升其所在飞行载体的各方面性能, 如降低飞行器所受的空气阻力从而提升飞行载体的速度及射程; 减小飞行载体的雷达横截面; 减弱飞行载体的空气动力热能及其周围的空气扰动场; 并且可以增大飞行器上传感器的视场角, 扩大飞行器上安装传感器的范围.

共形窗口这些优越的特性来源于其光学表面的自由性, 它可以是圆柱面、圆锥面和尖顶形状等任意组合出的自由曲面. 但也正由于这种自由曲面的面形, 我们无法使用传统的非球面技术来检测共形窗口, 这就需要在传统检测技术的基础上寻找出新的、可行的检测方法, 同时还必须要简单易用, 足够精确, 可重复操作^[3].

可用于共形窗口的检测技术包括子孔径拼接检测法和零位检测法, 零位检测法虽然可以一次性检测全部孔径, 但是对于长径比大于 1.0 的高陡度

非球面, 存在干涉仪局部条纹密度超过干涉仪中 CCD 的空间分辨率的问题, 再加上环境因素的影响, 使测量数据缺失, 因此不易获得整个面形的完整数据^[4]; 如果考虑使用传统补偿检验方法一次性检验全孔径的面形, 补偿镜尺寸要求很大. 因此, 为了保证共形窗口具备理想设计的空气动力学性能, 满足系统针对共形窗口的单一内表面面形的精度要求, 需要设计一个可行的检测方案. 本文提出了一种新型子孔径拼接的方法来检测共形窗口特殊内表面.

2. 子孔径的划分

子孔径拼接检测中的首要问题就是如何划分子孔径, 根据所使用子孔径形状的不同, 子孔径拼接可分为圆形子孔径、环形子孔径和矩形子孔径拼接.

2.1. 圆形子孔径拼接

圆形子孔径拼接的基本原理^[5]如图 1 所示. 通过计算机精确控制、移动、旋转、摆动干涉仪或被测非球面, 使干涉仪出射波面法线与被测区域法线近似重合, 从而使干涉仪出射的参考波前的曲率中心与所测区域的顶点曲率中心重合, 这样入射到被测

* 教育部长江学者和创新团队发展计划项目 (批准号: IRT0606), 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2009AA01Z308) 资助的课题.

[†] E-mail: optics_chang@126.com

区域的光线就能够近似地沿原路返回. 用干涉方法分别测量整个大口径光学非球面元件的一部分圆形区域(称之为圆形子孔径), 并使得各个子孔径间稍有重叠. 从测量的相位数据中消除相邻子孔径之间的相对装校误差(平移、倾斜、离焦等误差), 把所有的子孔径测量数据统一到同样的参考面上, 然后再从有统一基准的子孔径中采集多个离散的位相数据, 并将其与全口径 Zernike 多项式进行最小二乘拟合, 从而可以得到全口径的面形信息.

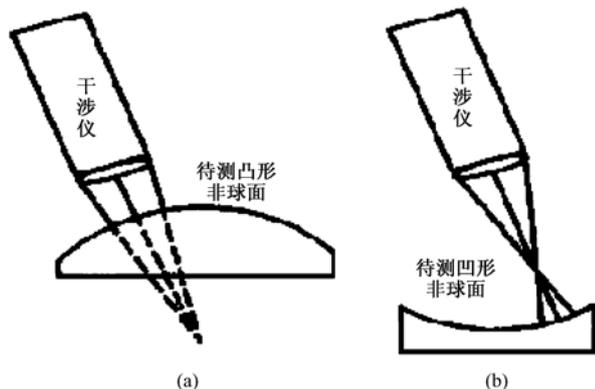


图1 圆形子孔径示意图 (a)检测凸形非球面的示意图;(b)检测凹形非球面的示意图

圆形子孔径拼接的应用最为广泛, 主要用于大口径平面、球面以及面形变化不大的非球面的检测.

2.2. 环形子孔径拼接

环形子孔径拼接的实验装置如图2所示. 其基本原理^[6,7]是通过沿光轴方向移动干涉仪或被测非球面, 改变它们之间的距离, 产生不同曲率半径的参考球面波前来匹配被测非球面不同的环带区域(称之为环形子孔径), 从而使被测元件相对于波前的斜率差减小到干涉仪允许的测量范围内, 用干涉方法分别测量各个环形子孔径区域, 并使得各个子孔径间有一定的重叠. 从测量的相位数据中消除相邻子孔径之间的相对装校误差(平移、倾斜和离焦等误差), 把所有的子孔径测量数据统一到相同的基准上, 然后再从有相同参考的子孔径中采集多个

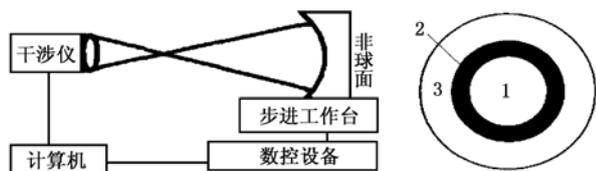


图2 环形子孔径示意图

离散的相位数据, 并将其与全口径 Zernike 多项式进行最小二乘拟合, 就能够得到整个口径的面形信息.

环形子孔径主要用于旋转对称的大口径非球面的检测, 尤其是可以检测偏离度较大的高陡度非球面, 是未来非球面检测的重要发展方向.

2.3. 矩形子孔径拼接

矩形子孔径主要用于矩形光学元件的拼接检测, 其测量原理^[8]与圆形子孔径类似. 由于矩形子孔径间有较大的重叠面积, 因此拼接效率最高, 同时矩形区域也方便图像及数据的处理; 缺点在于需要专门设计矩形元件以配合检测.

经过对子孔径划分分析, 我们得到对于共形光学窗口的子孔径拼接检测, 最为合适的应为环形子孔径拼接检测方法. 采用环形子孔径拼接检测, 首先需要划分好子孔径, 对应不同口径、不同相对口径的非球面会有不同数目子孔径的划分, 对此有以下公式^[9]:

$$M = \frac{D}{256F^3N\lambda} + 1, \quad (1)$$

式中, D 为待测非球面口径, F 为待测非球面相对口径的倒数, N 为 CCD 探测器像元数, λ 为干涉仪检测光束波长.

本文主要研究检测一椭球形共形光学窗口, 口径为 70 mm, F 数为 2, 根据(1)式计算可得 $M = 1.422$, 即可知检测此共形窗口时子孔径划分数目为 2 时最佳. 如图 2 右侧所示, 1, 2 组成中心区域, 检测半径为 0—27 mm, 可采用传统的法线像差补偿法检测, 2 和 3 为待测面的剩余环形区域, 检测半径为 26—35 mm, 这一区域需要采用环状光束检测. 下面分别讨论这两个子孔径的检测方法.

3. 新型检测系统的设计

3.1. 中心区域检测系统的设计

3.1.1. 法线像差^[10]

非球面法线像差定义如下: 非球面上各点处的法线与光轴的交点到非球面顶点曲率中心的距离. 图 3 为非球面法线像差的示意图, 其中 C_0 是非球面的顶点曲率中心, C 为非球面上一点 $P(x, y)$ 的法线与光轴的交点, R 为非球面的顶点曲率半径, φ 为非球面的法线角.

此非球面法线像差可通过下式计算:

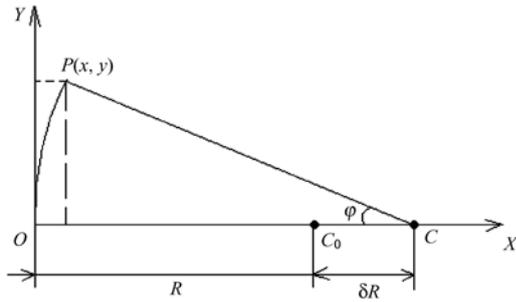


图3 非球面法线像差示意图

$$\delta R = x + (y/\tan\varphi) - R. \quad (2)$$

由(2)式可知,法线像差是与非球面口径大小相关的函数,不同口径对应不同的非球面法线像差.在用法线像差补偿法检验非球面时,需要光线沿着非球面法线方向传播,计算出非球面不同孔径高处的法线与光轴的交点位置和角度,由此即可推算出补偿器的相关结构参数.

如图3所示,若此非球面为二次曲面,根据解析几何方法分析,设 e 为该非球面的偏心率,即有法线像差

$$\delta R = x \cdot e^2. \quad (3)$$

同时有

$$\varphi = \arctan \frac{y}{R - (1 - e^2)x}. \quad (4)$$

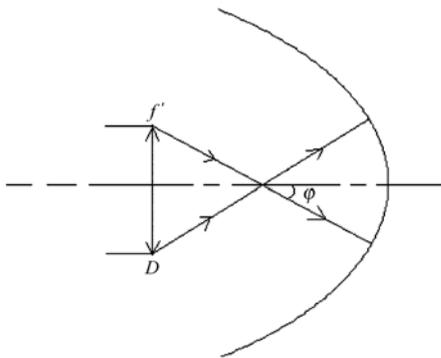


图4 中心区域补偿系统简图

如图4所示, f' , D 分别表示补偿系统的焦距和口径,即有

$$f' = \frac{D}{2\tan\varphi}. \quad (5)$$

3.1.2. 设计结果与分析

对于给定的共形窗口内表面,待检测中心区域半口径0—27mm,其他曲面参数均已知,根据上式可计算出补偿系统的焦距.在给定补偿镜与场镜以及场镜与待测非球面的间距的情况下,即可计算出

补偿镜和场镜的焦距,再根据消球差公式推算出补偿系统的初始结构,最后通过光学设计软件 ZEMAX 进行优化即可得到最终的检测系统,系统的结构参数如表1所示,系统光路图如图5所示.

表1 中心区域(0—27 mm)检测系统结构参数

面	半径/mm	间隔/mm	玻璃
1	-56.5	15.0	BK7
2	-41.3	9.9	
3	77.6	15.0	BK7
4	410.0	2.4	
5	47.6	12.0	BK7
6	-148.6	1.0	
7	23.2	10.0	BK7
8	35.0	37.6	

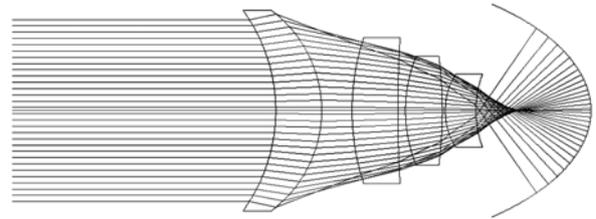


图5 共形光学窗口内表面中心区域(0—27 mm)补偿检测系统光路图

如图6所示为检测系统的最终波面图,图中给出了系统最终的残余波像差, PV 值为 0.1881λ , RMS 值为 0.0377λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$).按照最终设计结果制造补偿器,再经过精密装调后,即可根据补偿法的原理检测共形光学窗口内表面的中心区域.

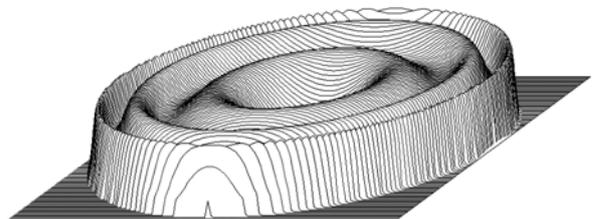


图6 中心区域补偿检测系统最终波面图

整个检测系统的标准设计剩余波像差(RMS)为 0.0377λ ,在给定的公差容限内,系统剩余波像差(RMS)90% 概率下小于 0.093λ ,50% 概率下小于 0.075λ ,10% 概率下小于 0.0418λ ,均小于 $1/10\lambda$,基本符合课题要求的检测精度.

3.2. 环形区域检测系统的设计

对于待测共形窗口内表面的中心区域采用补偿检验方法即可检测,但对于剩余的环形区域,由于共形窗口长径比大于1.0,其内表面是典型的高陡度非球面,法线角一般均大于 60° ,甚至于可能大于 80° ,根据法线像差补偿原理设计传统结构的检测系统将很难或无法检验这一环形区域.因此,这就需要在环形拼接检测的前提下,寻找一个合适可行的系统结构产生环形光束对剩余区域进行检测.

3.2.1. 环形区域检测系统结构的计算

McLeod 提出了锥镜^[11](axicon)这一新型光学元件,并研究了锥镜在光学领域中的使用^[12].图7所示分别为一束平行光通过锥形透镜(a)和锥面反射镜(b)后形成了一个环形光束.

基于锥镜的这一特性,课题中采取了补偿系统加两个锥面反射镜的结构来产生环形检测光束,补偿系统用于平衡待测共形窗口的内表面球差,如图8所示.设 f_F, f_C, D_F, D_C (D_C 等于干涉仪检测光束口径)分别表示场镜及补偿镜的焦距和口径, D_T, R_1, K_1 分别表示待测非球面元件内表面的口径、顶点曲率半径、二次曲面常数, φ 表示待测非球面元件内表

面上点 (x,y) 的法线角, f' 表示补偿系统的焦距, α, β 分别表示锥面反射镜1和2的锥侧顶角(预先给定), μ, ν 分别表示光线经过锥面反射镜反射时光线偏转角的一半, w 表示补偿系统的像方孔径角.

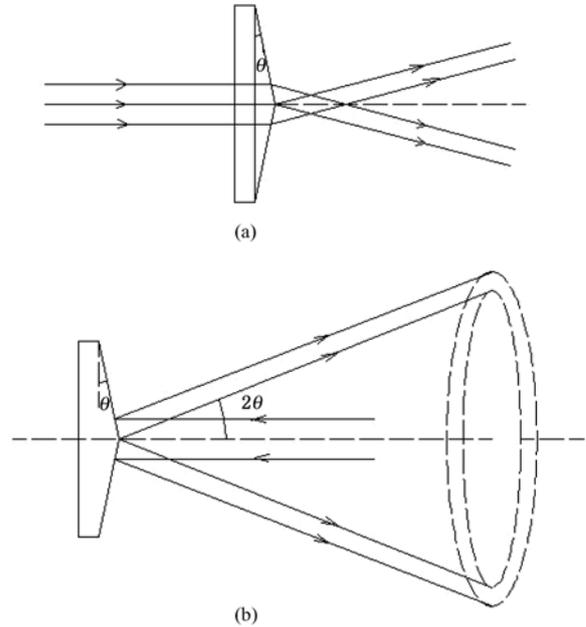


图7 锥镜光路示意图 (a) 锥形透镜, (b) 锥面反射镜

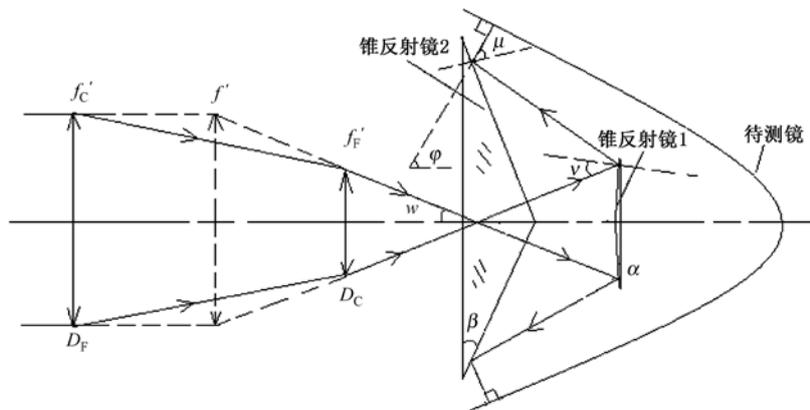


图8 环形光束检测系统光路示意图

首先根据(3)式可以计算出法线像差 δR 和法线角 φ ,进而有

$$\mu = \varphi - \beta, \quad (6)$$

$$v = \varphi - \alpha - 2\beta; \quad (7)$$

$$w = \varphi - 2(\alpha + \beta), \quad (8)$$

$$f' = D_F/2\tan w. \quad (9)$$

(6)式说明,两个锥面反射镜的锥侧顶角之和必须小于待测非球面上点 (x,y) 的法线角,补偿系统光轴偏转角为 $2(\alpha + \beta)$.

假定补偿系统光束会聚于锥面反射镜2中心处,则在给定锥面反射镜间间距 d 以及锥面反射镜2与待测非球面间间距 d_0 的情况下,我们可以根据所得的 μ, ν 和 w 这三个角度对锥面反射镜的半口径(h_1, h_2)以及可测的非球面环面半径(h_{\max}, h_{\min})进行推算

$$h_1 = d\tan w,$$

$$h_2 = h_1 + d\tan(\varphi - 2\beta); \quad (9)$$

$$h_{\max} = h_2 + (d_0 - x)\tan(w + 2\alpha + 2\beta). \quad (10)$$

当 w 为零时,可认为此时为所能检测最小环面半径,可根据此时所对应的 φ , α 及 β 值以及相应的非球面方程式即可推算出对应的待测非球面孔径高度 h_{\min} .

3.2.2. 设计结果与分析

根据前文推导的公式计算出补偿系统的焦距 f' 后,预先给定补偿镜与场镜以及场镜与锥面反射镜 2 的间距,则即可推算出补偿镜和场镜的焦距,再根据补偿法平衡系统球差的原理,可推算出补偿镜及场镜的各初始结构参数,将其输入到 ZEMAX 软件中,按照系统设计要求进行优化即可得到最终的补偿系统结构,系统的结构参数如表 2 所示,其光路图如图 9 所示.

表 2 环形区域检测系统结构参数

面	半径/mm	间隔/mm	玻璃
1	-4350.6	15.0	BK7
2	-62.0	60.6	
3	14.1	6.0	BK7
4	12.0	53.8	
5	∞	-21.5	锥面反射镜
6	∞		锥面反射镜

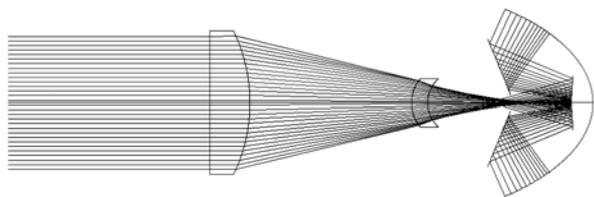


图 9 环形区域检测系统光路图(半径 26—35 mm)

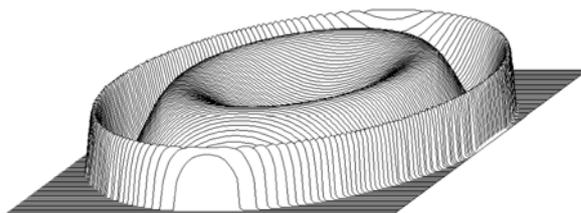


图 10 环形区域检测系统最终波面图

如图 10 所示为环形区域检测系统的最终波面图,图中也给出了系统最终的残余波像差,PV 值为 0.1855λ ,RMS 值为 0.0367λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$).按照最终的设计结果制造补偿器,搭设检测光路,并经过精确的共轴装调后,即可对所给共形光学窗口内表面的剩余区域(半口径 26—35 mm)进行检测.

整个检测系统的标准设计剩余波像差(RMS)为 0.055λ ;在以上给定的公差容限内,系统剩余波像差(RMS)90% 概率下小于 0.43λ ,50% 概率下小于 0.37λ ,10% 概率下小于 0.35λ ,均大于 $1/10\lambda$.

4. 结 论

本文阐述了如何扩展传统非球面检测工艺以对共形窗口进行光学检测,通过分析可能的几种方案,得出可行的具体技术方案——新型子孔径拼接检验法,并对其该方案作了较深入的研究,得到了共形窗口检测的设计结果,且质量满足课题研究的精度要求.

- [1] Mills J P 2001 *Proc. SPIE* **4442** 101
- [2] Marushin P H, Sasian J M, Lin T Y, Greivenkamp J E, Lerner S A 2001 *Proc. SPIE* **4375** 154
- [3] Huang C C 2009 *Proc. SPIE* **7383** 73831H
- [4] Wang X K, Wang L H, Zheng L G, Xue D L, Deng W J, Zhang X J 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1144 (in Chinese) [王孝坤、王丽辉、郑立功、薛栋林、邓伟杰、张学军 2007 强激光与粒子束 **19** 1144]
- [5] Yang Y Y, Liu D, Shen Y B, Weng J M, Zhou Y M 2007 *Proc. SPIE* **6834** 68340T
- [6] Hou X, Wu F, Wu S B, Chen Q 2005 *Proc. SPIE* **5638** 992
- [7] Wang X K, Wang L H, Zheng L G, Deng W J, Zhang X J 2008 *Proc. SPIE* **6624** 66240A
- [8] Hou X, Wu F, Yang L, Wu S B, Chen Q 2005 *Optics and Optoelectronic Technology* **3** 50 (in Chinese) [侯溪、伍凡、杨力、吴时彬、陈 2005 光学与光电技术 **3** 50]
- [9] Liu Y M, Lawrence G N, Koliopoulos C L 1988 *Appl. Opt.* **27** 4504
- [10] Pan J Y 1994 *The Optic Aspheric Design Machining and Verify* (1st ed) (Beijing: Science Press) p5 (in Chinese) [潘君骅 1994 光学非球面的设计、加工与检验(北京:科学出版社)第 5 页]
- [11] McLeod J H 1954 *J. Opt. Soc. Am.* **44** 592
- [12] McLeod J H 1960 *J. Opt. Soc. Am.* **50** 166

A new sub-aperture stitching method of measuring special optical element*

Chang Jun[†] Zhang Zheng-Hui Wang Rui-Rui

(Laboratory of Optoelectronics Technology and Information System, School of Optoelectronics,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 6 June 2010; revised manuscript received 8 September 2010)

Abstract

Novel conformal window can enhance the aerodynamic performance of aircraft obviously. Due to the surface complexity of these conformal windows, the measuring of conformal windows is infeasible by using the conventional optical measurement technique. In this paper, we describe a new sub-aperture stitching method for conformal measurement, and introduce the design of this technology. Based on the theory of compensation method, a compensator is designed for a 70mm aperture conformal window, of which the final residual wavefront error(RMS) is 0.0515λ ($\lambda = 632.8\text{nm}$).

Keywords: conformal window, conformal measurement, sub-aperture stitching method, compensator

PACS: 42.87.-d, 42.15.Eq

* Project supported by the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. IRT0606), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA01Z308).

[†] E-mail: optics_chang@126.com