

# 保形红外光学元件制造技术

Manufacturing Technology of Conformal Infrared Optical Component

国防科技大学机电工程与自动化学院 李圣怡



李圣怡

教授, 博士生导师。总装先进制造专业组专家, 973 项目首席专家。研究方向: 精密工程与微系统技术, 大型光学零件制造、超精密光学零件铣磨、离子束研抛、磁流变研抛、保形光学零件制造技术、MEMS 制造等。

美国 Raytheon 公司根据飞行器窗口的特殊需要, 定义保形光学 (Conformal Optics) 为: 以提高系统空气动力学性能为目的的适应系统平台外部形状的窗口形式的特定光学。保形光学窗口包括同轴和离轴两种形式。

## 保形红外光学元件的军事应用

(1) 同轴保形光学窗口主要用

于导弹可见光 (电视) 和红外导引头高陡度非球面头罩。保形光学制造技术是光学制造中的一个新技术分支, 由于它的高陡度、非球面特点, 给制造带来很大困难。实现高精度的制造还需开发一些新的技术, 这是对光学技术的新挑战。

于导弹可见光 (电视) 和红外导引头高陡度非球面头罩。

空气动力学的研究表明: 长径比 (Fineness Ratio) 为 1.5 的椭球形导引头罩的导弹, 其所受的空气阻力约为采用球形导引头罩 (长径比为 0.5) 的导弹所受阻力的 1/3, 即减小了 2/3。在相同的 8km 射程的条件下, 采用球形导引头罩的导弹需要 44s, 而采用这种长径比为 1.5 的椭球形导引头罩的导弹只需 23s, 减少了一半时间。

保形光学导引头罩由于空气阻力小, 因而减少了因空气阻力引发的热量, 缩短了敌方预警时间, 提高了导弹的生存能力; 由于其成像系统转架有更大的转动范围 (理论上其总视场 FOR (Field of Regard) 可超过  $90^\circ$ , 达到  $\pm 130^\circ$ , 而半球头罩的总视场小于  $\pm 90^\circ$ ), 因此有助于导弹提高机动性、增大视场角、减少反射面, 提升导弹的整体性能。对于诸如巡航导弹之类的亚音速导弹来讲, 使用保形光学元件可以减小其雷达反

射面积, 增大视场, 有利于控制导弹周围的流场。

保形光学导引头罩的主要缺点是像差增大, 并随离轴观测角 (弹轴线观测角为零) 的变化而变化。当转架离开弹轴线, 头罩的光学对称性被打破, 所产生的像差是波长的 10 ~ 100 倍, 必须进行像差补偿。

(2) 离轴保形光学窗口主要用于战斗机、武装直升机、无人机瞄准窗或观察窗, 例如, 美军“科曼奇”武装直升机夜视仪的分段光学表面和保形光学窗口、美军 F14 战斗机的保形光学窗口等。

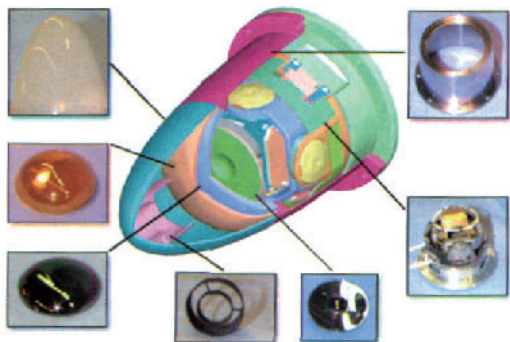
现有飞行器的前视窗、下视窗多为分段光学表面, 它们存在以下缺陷: 增大了雷达反射面积; 降低了系统的光学衍射效率, 从而使得系统的调制传递函数减小; 增大了分段面各平面接缝的热梯度; 接缝处引起了射频散射。

当采用保形光学窗口封装光电传感器后, 飞行器的雷达反射面积大幅降低; 当将保形窗口的内表面或

成像透镜作为优化设计参数时,可以获得很高的系统调制传递函数;同时,分段光学表面存在的最后2个固有缺陷也不复存在。同样,在飞行器上使用保形光学元件也会使飞行器的阻力减小,并且会减小周围的空气湍流,扩大传感器的视场,增加传感器安装位置选择的柔性。

(3)再以空基激光武器(ABL)来作说明。ABL是美国国防部导弹防御局“弹道导弹防御系统(BMDS)”的一个组成部分,用于对付上升段导弹。

因ABL系统能达到“光速”,因此它可比拦截导弹更快地击中目标。安装在ABL飞机头部的球形旋转炮塔里的像隐形眼镜的窗口就是保形的,这也是迄今研制的最复杂的光学装置之一,其直径达1.65m,既能经受住剧烈的空气阻力,又具有良好的透光性能。在起飞与着陆期间,这个窗口转到由密封垫和金属遮光板保护的收藏位置;在执行作战任务期



Raytheon 研制的世界上第一个保形光学(椭圆形头罩)导引头

间,4个ABL激光器中的3个——包括杀伤激光器通过这个窗口发射并传播到飞机外部。

高陡度保形光学导引头罩、保形光学窗口不仅能够通过提高空气动力学性能和降低雷达反射面积来增加武器的作战效能,还将为光学设计者提供更灵活的设计自由度,进一步提高成像系统、瞄准系统、火力控制系统的性能,并降低光学系统重

量。

### 国外技术发展现状

(1)美国首先开展了保形光学研究。

1996年,美国国防先进技术研究计划局(DARPA)开始支持相关大学和公司研究保形光学的特点、应用前景和可行性。1998年,DARPA成立了保形光学研究小组(PCOT),小组的总体目标是降低50%的空气阻力、减少60%的飞行时间、以及降低武器反射信号。其中,Raytheon公司领衔研究保形光学在导弹领域的应用前景,Boeing公司领衔研究保形光学在飞行器领域的应用前景。

PCOT于1999年研制成功了世界上第一个保形光学导引头。其中的导引头罩材料为 $MgF_2$ ,补偿器材料选用ZnS和TI-1173。采用单点金刚石车削加工头罩内外表面(选用Rank Pneumo MSG 325机床)及TI-1173非球面补偿镜(选用Precitech 2400 SPDT机床),采用Form Talysurf机械式轮廓仪进行表面测量。加工后头罩厚度误差小于 $50\mu m$ ,前后表面离心误差小于 $13\mu m$ 。Raytheon公司计划将保形光学导引头罩应用于其“响尾蛇”导弹导引头上,以替代传统的球形导引头罩。

(2)CVD Rohm和Haas公司对用化学气相沉积方法制造保形光学导引头罩进行了研究。

化学气相沉积方法可以产生理论上致密、无空隙、高纯度(99.9995%)的具有优异的光学、机械、热及物理性能的多晶体材料,由于进行的是原子级加工,所以可以达到很高的精度。同时,通过采用不同的芯模,可以加工出各种不同的高精度内外表面。在实际应用中,通常采用化学气相沉积法加工内表面,用单点金刚石车削加工外表面,用这种方

法已经加工出SiC、Si、ZnSe、ZnS等材质的工件。由于芯模可以重复使用,故适用于头罩的批量生产。

(3)美国罗彻斯特大学光学制造中心(COM)在确定性微磨(DMG)和磁流变抛光(MRF)技术研究领域处于世界领先水平。

COM于2004年采用确定性微磨方法加工出一个保形(拱形)光学导引头罩。该头罩长径比1.37,选用氧化铝(ALON)陶瓷材料,内表面为离轴球面,外表面为非球面,内外表面在头罩顶点呈球面过渡。

2004年美国海军“超音速红外导弹导引头罩制造”项目拟采用确定性微磨、磁流变抛光以及新颖的磁射流抛光(MJP)加工方法加工保形光学导引头罩。

另外,Corning Rochester Photonics使用激光直写设备来加工保形光学导引头罩。

### 保形光学制造技术的挑战

以空空格斗弹为例,保形头罩光学系统加工关键技术有:保形光学导引头光学系统设计;红外材料高陡度保形头罩的加工技术;高陡度保形光学头罩的检测技术。

#### 1 面向制造的红外导引头保形光学系统设计方法

基于空气动力学理论和像差补偿理论,考虑制造要求和能力,利用多参数优化方法进行气动外形设计和光学设计,实现满足成像质量要求的最优公差分配。

面向制造误差的建模需要建立光学成像质量与光学零件制造公差要求之间的关系模型,以满足成像要求的制造公差最优分配的要求。模型包括:基本的3阶像差(如球差、彗差、像散)与头罩的偏移、倾斜、不对中、非球度,头罩的内外不对中、倾斜造成的剪切的关系;误差敏感度和制造敏感度的关系等。

#### 2 高陡度非球面导引头罩和补偿镜

的加工方法和工艺路线

基于材料的可制造性,分别应用单点金刚石车削、确定性微磨和磁流变抛光以及磁射流抛光等技术,探索合理的工艺路线,利用高精度工装夹具和数据处理软件技术,实现导引头罩和补偿镜的超精密加工。

单点金刚石车削用于高陡度的凸、凹非球面加工是主要技术难题,机床、刀具等工艺条件准备和加工工艺路线要进行大量试验研究。

确定性微磨利用超精密磨床和特殊砂轮进行超薄磨削,使原有的脆性磨削过程进入塑性区,使微磨加工能够实现可重复、精密研磨表面并精确控制研磨表面,达到加工时间最优。因此对加工原理的深入理解以及新的机床和工具设计方法都提出了新的挑战。

单点金刚石车削和确定性微磨对加工设备的要求都很高,需要精密级的机床。

磁流变抛光和磁射流抛光技术都是新技术,国外也刚开始对高陡度保形光学器件进行工艺试验研究,很多问题及工程适用性还没有最终结论。

高陡度保形头罩必须两面加工非球面,加工难度很大。以金刚石车削加工为例,两个面的光轴误差主要依靠精密夹具来保证。由于导引头本身很薄,虽然在其回转对称方向不易变形,但在垂直方向上却容易发生变形,此外,工件的夹持还需解决薄导引头的无应力固定技术问题。

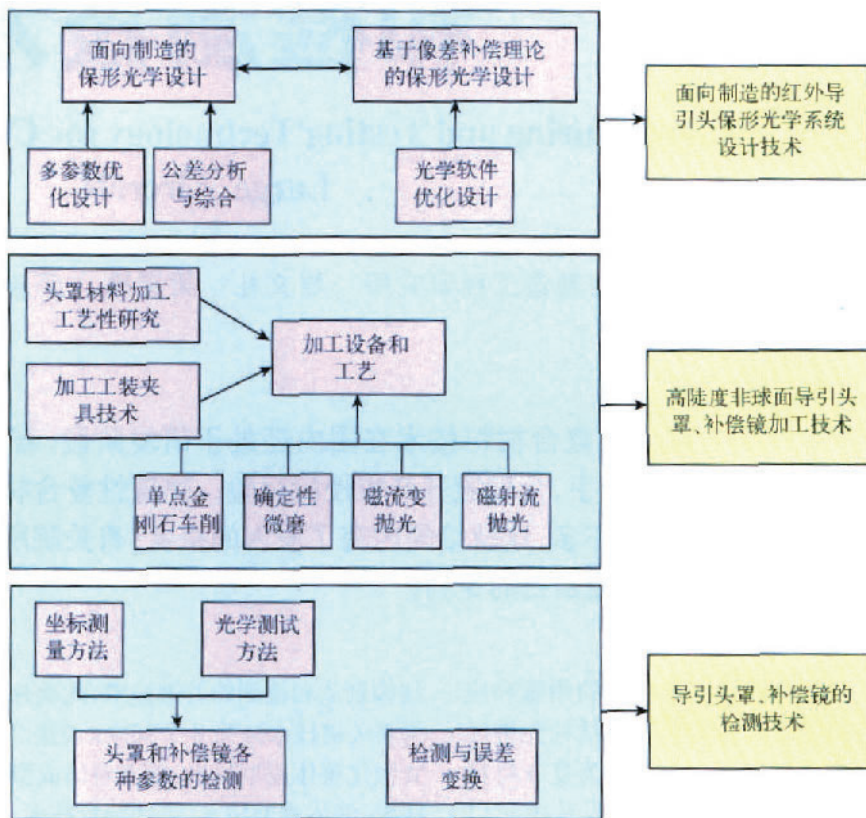
### 3 高陡度非球面导引头罩和补偿镜的检测方法

高陡度非球面导引头罩检测的基本技术途径有:三坐标测量方法(轮廓仪法);红外干涉子孔径测量;红外零镜(Null optics)全口径测量;Shack-Hartmann波前测量法等。Raytheon公司用Offner反射零镜放在被测保形镜的共轭面上对波前修正,通过波前信息处理来得到

头罩面的制造误差。Arizona大学用准直光和Mach-Zehner欠采样(Sub-Nyquist)干涉仪分别做 $0^\circ$ 、 $19^\circ$ 、 $30^\circ$ 的3个子孔径测量。子孔径方法通用性好,不需要补偿镜,但测量的精度有待提高。

无论是光学测试方法还是坐标

对磁射流抛光技术、软脆材料抛光技术的基础研究,研制开发了六轴KDMS-1小型光学磁流变加工机床和一些专用的测量仪器,并在保形光学红外导引头设计、保形光学加工的基本加工方法等方面积累了一定的经验。



国防科技大学保形光学制造技术研究内容

测量方法,都不能直接获得所需的各种参数值,需要进行误差处理与变换。而红外导引头罩内外表面还有相互位置要求,例如厚度、对中性等,检测获得的数据是单一表面的误差信息,因而更需要融合处理,获得相应参数的准确测量值。为了将测量的面形信息变换为加工需要的信息以便于加工反馈,必须对一些算法和变换加以研究。

### 国防科技大学的研究概况

国防科技大学是较早开展保形光学加工技术研制的单位之一。在国家自然科学基金的资助下,开展了

上图为国防科技大学精密工程实验研究室的保形光学制造技术的研究内容。

### 结束语

保形光学制造技术是光学制造中的一个新技术分支,由于它的高陡度、非球面特点,给制造带来很大困难。实现高精度的制造还需开发一些新的技术,这是对光学技术的新挑战。这项技术的研究在国内刚刚起步,我们希望能有更多的研究人员一起努力,尽快提高我国的保形光学制造技术水平。

(责编 悠然)