

文章编号 1004-924X(2008)12-2524-07

泰曼-格林型静态便携式干涉仪的设计

马 军¹, 何 煦^{1,2}, 居 波¹, 韩 冰^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 1000393)

摘要:基于经典泰曼-格林干涉理论提出了一种改进的干涉仪光路设计方案。与经典干涉理论对比,该方案具有共光路、结构紧凑、对环境因素不敏感、系统使用效率高等特点。通过对光学系统及标准平面的优化设计,其理论精度极值(PV) $<1/12\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。对具体的光学系统、微调机构组件进行了三维设计,对干涉仪进行了实际装配调整,并与 Möller 像移式干涉仪做了比对测试实验,结果表明,该小型干涉仪的实际测量精度 PV 值 $<1/10\lambda$ 。

关键词:泰曼-格林干涉原理;波像差;离轴三反式光学系统;波前叠加

中图分类号:TH744.3 **文献标识码:**A

Design of portable static state Tyman-Green interferometer

MA Jun¹, HE Xu^{1,2}, JÜ Bo¹, HAN Bing^{1,2}(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Based on Tyman-Green's classic interference theory, a improved optical design was described. Compared with the classical theory of light interference, the new design scheme is not sensitive to environmental factors, and also has advantages in compact structure, high efficiency and a shared light path. After optimizing design of the standard plate and optical system, the extreme measuring precision of the system (PV) is better than $1/12\lambda$ ($\lambda = 632.8\text{ nm}$) in theory. A improved and portable interferometer was assembled and adjusted actually, and the comparison experiments with Möller phase shift interferometer was carried out. Experimental results show the measuring PV precision of assembled new interferometer is better than $1/10\lambda$.

Key words: principle of Tyman-Green interferometer; wave aberration; off-axis three-mirror optical system; wave front reconstruction

1 引 言

干涉测量技术已被广泛应用于波前探测,光学器件面型检测,光学系统波像差实时测量等光学测试领域。基于不同的干涉原理,干涉仪获取波像差信息的工作方式也不相同。根据不同的测试需求与条件,静态干涉仪与像移式干涉仪是较常见的两类基于干涉原理的波前信息获取仪器,其中静态干涉仪是基于最经典干涉理论的一种干涉仪器;像移式干涉仪则是经典干涉理论、现代微电子技术、控制理论相结合的新型波前获取仪器。本文是基于经典干涉理论,介绍了一种基于对泰曼-格林干涉原理进行创新性改进后得到的新方案,研制、设计了满足特定工程测试需求的小型静态干涉仪。

2 基本原理及改进方案

2.1 泰曼型干涉仪基本原理

泰曼型干涉仪的光学结构如图 1 所示。

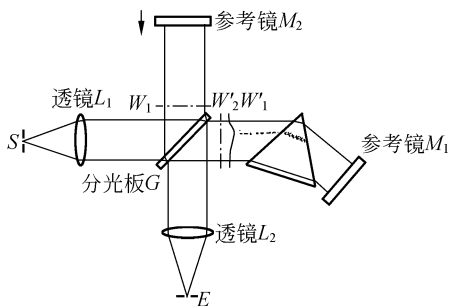


图 1 泰曼型干涉原理

Fig. 1 Taymans-interference principle

泰曼型干涉仪是以迈克尔逊干涉仪为基础发展而来的。这种形式的干涉仪应用非常广泛,可以应用于检测棱镜和平板玻璃的材料均匀性,确定缺陷部位;也可以对微小角量进行精密测量;还可以对光学零件或光学系统进行综合质量评定。

泰曼型干涉仪的特点是将迈克尔逊干涉仪的扩展光源改进为点光源,通过一组透镜将点光源发出的球面波变成平面波,即平行光束入射。其基本工作原理是点光源 S 发出的光束经准直物

镜 L_1 后变为平行光,该平面波经分光板 G 后,波前被分为两个传播方向相互垂直的平面波。一个传向 M_1 ,另一个传向 M_2 。由于 G, M_1, M_2 均认为是理想平面,所以平面波经它们反射后仍认为是平面波,由于转向 M_1 的平面波要两次经过被测光学系统(图 1 中为棱镜光学系统),因此只有当光学系统是完善的,即平面波经过光学系统后不产生波面畸变,反射回来的波仍为平面波。反之,如果光学系统是带有加工、装调失调量的不完善系统,则可以通过对干涉条纹的处理得到被测光学系统的实际波面。对于单个光学面即为面型误差,对于光学系统则为系统的波像差。

基于经典泰曼型系统的干涉仪原理如图 2 所示。其光源为激光光源,具有较高的相干性和长相干长度。根据实际被测光学系统的 F 数,还设计了相应的透镜 L_2 。

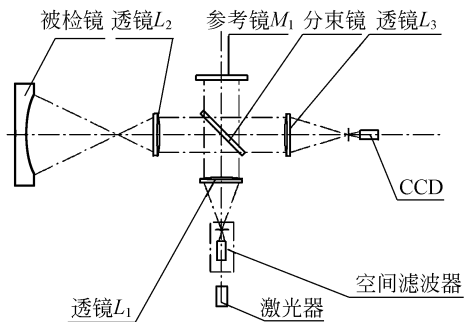


图 2 泰曼型干涉仪光学原理

Fig. 2 Optical principle of taymans-optical interferometer

2.2 改进型泰曼干涉仪基本光学原理

基于经典泰曼-格林干涉原理的干涉仪光学系统具有一定的局限性。如图 2 所示,激光器发出的球面波经透镜组 L_1 后通过分光镜,被分为两路平面波分别至标准参考面 M_1 与透镜 L_2 ,通过被测光学系统后反射重新与参考光束耦合后,被焦平面探测器 CCD 接收成像。

由于参考镜与透镜 L_2 处于不同的光路之中,测试过程中的震动等环境条件的变化会对这个干涉光路带来极大影响。此外,这种光路形式给干涉仪的装调也带来的极大难度,装调误差对光路的整体耦合性影响较大。

基于上述考虑,本文对基于经典泰曼-格林干涉原理的光路实际方案进行了改进,其基本原理

如图 3 所示。

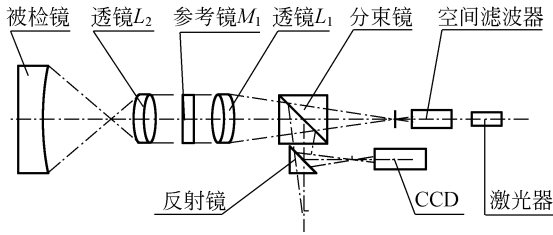


图 3 改进型泰曼干涉仪光学原理

Fig. 3 Optical principle of improved Taymans-optical interferometer

激光器发出的一束光经空间滤波器,通过分束镜,经透镜 L_1 变成平面波,由于参考镜 M_1 一面镀有次强反射膜,所以该平面波通过参考镜 M_1 ,一部分平面波原路返回,变成参考波面,经分束镜、反射镜进入 CCD,另一部分平面波穿过参考镜 M_1 ,经被检镜后变成被检波面再原路返回,最后进入 CCD,这两个波面干涉后形成干涉条纹由显示器显示,通过对干涉条纹的处理,得到相机系统的面形精度及光学系统的传递函数等像质评价参数。

3 面向工程实际的具体设计过程

3.1 工程测试需求分析

基于干涉测量处理结果的计算机辅助装调技术对于干涉测量的精度和测量重复性都有极高的要求。其基本原理是通过 ZEMAX 等光学设计软件的公差分析功能计算光学系统的灵敏度矩阵,再通过对干涉条纹的处理得到代表光学系统实际波像差的 36 项 Zernike 系数矩阵,通过与灵敏度矩阵的叠带算法计算出光学系统的失调量大小与方向。因此干涉仪获取的光学系统波像差即其处理结果的精度与可靠性对整个辅助装调的精度有很大影响。

面向某离轴三反式光学系统的计算机辅助装调的工程实际需求,本文对基于上述改进型泰曼-格林干涉光路的干涉仪进行了具体设计。整个计算机辅助装调的原理图如图 4 所示。

采用计算机辅助装调的两套光学系统都为离轴三反式光学系统。其基本光学参数为焦距

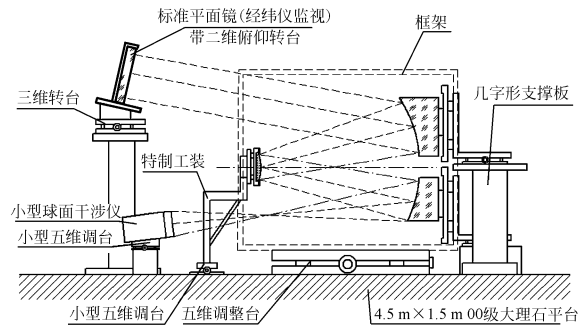


图 4 计算机辅助装调光学原理

Fig. 4 Principle of computer-aided alignment

2 200 mm,口径 550 mm, $450 \sim 750 \mu\text{m}$ 与焦距 650 mm,口径 110 mm, $400 \sim 1\,400 \mu\text{m}$ 的两套系统。根据上述检测需求,对干涉仪的基本参数进行了计算:

- 相对口径 1 : 4 的标准镜头一套;
- 相对口径 1 : 8 的标准镜头一套;
- 有效通光口径 $\Phi = 30 \text{ mm}$;
- 光源采用 632.8 nm 的半导体激光器;
- 干涉仪测量精度 $1/10 \lambda$ (PV 值, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$);
- 重量约 5 kg (不含调整架);
- 干涉仪出射光路具有水平、前后、高低微调功能。

(h) 干涉仪可完成相机系统的面形检测、相机系统的光学传递函数检测。

3.2 干涉仪设计实例

通过上节的工程需求分析以及图 3 所示的改进型泰曼-格林干涉光路图,本文对具体的小型静态干涉仪进行了设计,其结构原理图如图 5 所示。

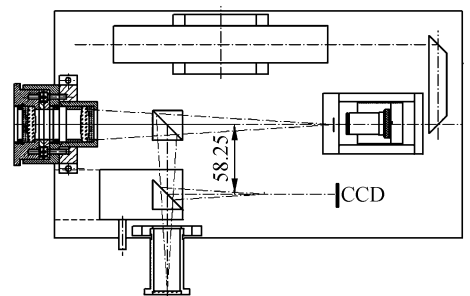


图 5 干涉仪结构原理图

Fig. 5 Schematic structure of portable interferometer

为方便检测过程中两套标准镜头间的快速更换,在连接法兰处设计了带有紧密吸附功能的快速更换机构。其三维建模如图 6 所示。

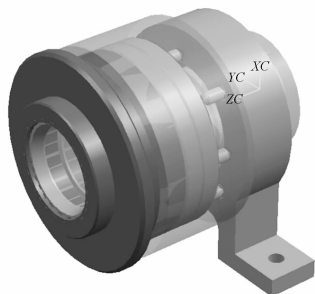


图 6 标准镜头及快速换装机构

Fig. 6 Standard lens and rapid replacement body

在实际设计过程中,通过一块三棱柱半反射/半透射棱镜实现了干涉仪概略瞄准窗口与 CCD 相机间的快速切换。概略瞄准窗口为位于 CCD 焦平面共轭位置的一组毛玻璃透镜组。由于其视场相对较大,可以供干涉仪与整个测试系统的粗调与找正,判断空间干涉点的大概位置以便进一步精密调整干涉位置。其三维建模实例如图 7 所示。

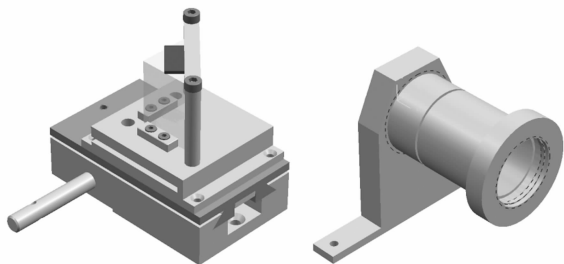


图 7 瞄准切换与概略瞄准组件

Fig. 7 General assembly for switching and aim

标准镜头是决定干涉仪测量精度关键部件,

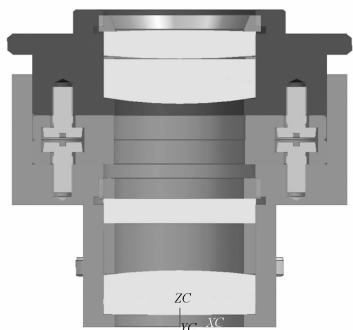


图 8 标准镜头设计简图

Fig. 8 Standard lens design sketch

整个干涉仪完成光学及结构设计后,最终的三维设计结果如图 9 所示。

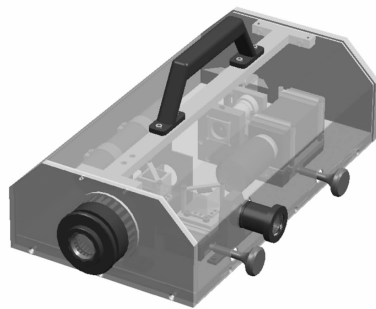


图 9 静态干涉仪三维建模实例

Fig. 9 Three-dimensional modeling of static interferometer

4 条纹的处理方法

$W_i(x, y)$ 是所测得一点数据;

A_n 为 Zernike 系数;

$U_n(x, y)$ 为 Zernike 多项式的形式;

$$W(x, y) = \sum_{n=1}^k A_n \cdot U_n(x, y)$$

$W_i(x, y) = m\lambda, (i=1, 2, \dots, n), (m=1, 2, \dots, L),$

其中, n 是测量点个数,通常取 100~300; L 为干涉条纹数,通常取 7~10。

根据数据列出 n 个方程,其中 k 为 36。

$$\sum_{n=1}^k A_n \cdot U_n(x_1, y_1) = W_1$$

$$\sum_{n=2}^k A_n \cdot U_n(x_2, y_2) = W_2$$

⋮

$$\sum_{n=n}^k A_n \cdot U_n(x_n, y_n) = W_n$$

由于 $n > k$, 所以为超定方程组,可解,展开可得 A_n 和 $U_n(X_n, Y_n)$ 。

具体的图像处理方法为:

首先对采集图像有效区域内的图像进行模糊处理,模糊窗口大小,默认值为 11,常用作消除颗粒噪声。对有效区域内的图像进行中值滤波,滤波窗口大小默认值为 3。对一种非线性滤波算子,滤波窗口的像素值排序后,取出中间序号的像素值作为输出。

对有效区域内的图像进行垂直 Prewitt 算子

卷积运算,模板为:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

对有效区域内的图像进行水平 Prewitt 算子卷积运算,模板为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

对有效区域内的图像进行垂直 Sobel 算子卷积运算,一般用作边缘增强,相当于水平一阶微分操作,模板为:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

对有效区域内的图像进行水平 Sobel 算子卷积运算,一般用作边缘增强,相当于垂直一阶微分操作,模板为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}.$$

对有效区域内的图像进行 Laplacian 3×3 算子卷积运算,一般用作边缘增强,相当于二阶微分操作,模板为:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

对有效区域内的图像进行 Laplacian 5×5 算子卷积运算,为大窗口的二阶微分,模板为:

$$\begin{bmatrix} -1 & -3 & -4 & -3 & -1 \\ -3 & 0 & 6 & 0 & -3 \\ -4 & 6 & 20 & 6 & -4 \\ -3 & 0 & 6 & 0 & -3 \\ -1 & -3 & -4 & -3 & -1 \end{bmatrix}.$$

对有效区域内的图像进行 Gaussian 3×3 算子卷积运算,为一种低通滤波器,模板为:

$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

对有效区域内的图像进行 Gaussian 5×5 算子卷积运算,为一种低通滤波器,模板为:

$$\frac{1}{571} \begin{bmatrix} 2 & 7 & 12 & 7 & 2 \\ 7 & 31 & 52 & 31 & 7 \\ 12 & 52 & 127 & 52 & 12 \\ 7 & 31 & 52 & 31 & 7 \\ 2 & 7 & 12 & 7 & 2 \end{bmatrix}.$$

对有效区域内的图像进行 Hipass 3×3 算子卷积运算,为一种高通滤波器,模板为:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

对有效区域内的图像进行 Hipass 5×5 算子卷积运算,为一种高通滤波器,模板为:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 24 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix},$$

对有效区域内的图像进行 Sharpen 3×3 算子卷积运算,用于图像锐化,模板为:

$$\frac{1}{8} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 16 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

再对有效区域内的图像进行背景光强均匀化运算;对有效区域内的图像进行直方图均衡化。用 Hilditch 算法对有效区域的二值图像进行细化处理,细化完成条纹仅呈单像素宽度,参数为需细化的图像灰度级,一般为 0 或 255,是另一种细化算法。

5 装调及实验过程

对干涉仪的具体装调过程即是调整光路中单个组件在光轴中位置。使用准直法调整干涉仪的光路,在卸掉标准镜头后使用面型精度 PV 优于 $1/20 \lambda$ 的平面反射镜,调整激光器,折转棱镜,以及空间滤波器之间的横向位置关系,使反射回空间滤波器入瞳处的光斑明亮,光斑图形对称分布。接着,调整标准镜头与球面波之间的位置关系。然后,调整概略瞄准窗口与焦平面 CCD 探测器之间的耦合关系。最后,调整焦平面 CCD 前的

成像系统,使 CCD 成像光学系统的物面与空间干涉位置重合,装调测试实验装置如图 10 所示。



图 10 装调/测试实验

Fig. 10 Alignment/testing experiment

调整后,对面型精度 PV 优于 $1/20 \lambda$ 的球面标准镜与 Móllev 像移式干涉仪的测量结果进行比对。最终由静态干涉仪获取的干涉图及其处理结果如图 11、图 12 所示。

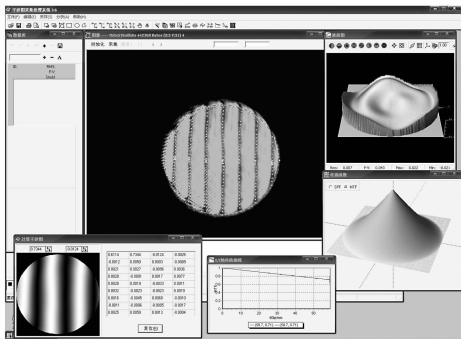


图 11 干涉图软件处理结果

Fig. 11 Processed result 1 by interferogram software

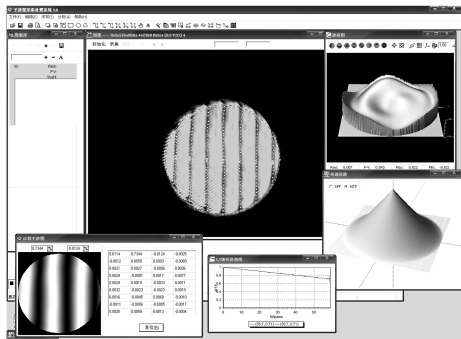


图 12 干涉软件处理结果

Fig. 12 Processed result 2 interferogram software

6 误差及精度分析

为了检验干涉仪的测量精度,采用一块已知面形误差(ZEGO 公司生产)的标准反射镜作为被检镜,其指标为 $1/20 \lambda$ (PV 值, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$),经干涉仪测量,计算得到 $1/10 \lambda$ (PV 值, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$),因此,可以判定该干涉仪测量精度不劣于 $1/10 \lambda$ (PV 值, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。

参考平面反射镜 M_1 加工的面形精度已经达到了 $1/20 \lambda$ (PV 值, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。按照理论推算,该干涉仪应能够达到 $1/20 \lambda$,但实际上只有 $1/10 \lambda$,其误差来源主要由光学系统(即将平面波转换成球面波)加工、装调残余误差,干涉仪整体装调误差产生,影响了干涉仪的测量精度。

采用的干涉仪处理软件,在处理条纹时,有人工描点的过程,需要测试人员对干涉条纹的主观判断。虽然可以通过反复多次测量,以及由经验丰富的实验人员对干涉条纹进行判断,但其对干涉测量精度的影响仍然无法完全避免。

7 结 论

基于 FFT 法的小型静态干涉仪由于其对环境影响的敏感度较之大型像移式干涉仪低,同时造价及设计加工难度较低,静态干涉仪仍广泛应用于光学像质评价等领域。

本文从计算机辅助装调中对干涉测量稳定性的实际需求出发,对经典泰曼-格林型干涉光路进行了改进,重新设计了新的干涉光路,提高了干涉测量的精度与可靠性,同时降低了装调的难度。此外,还通过实际的比对实验验证了干涉仪的实际测量精度与重复度。

本文介绍的干涉光路设计及具体的结构工程实现也为类似结构的全共光路干涉仪的设计与研制提供了思路。

参考文献:

- [1] 杨志文. 光学测量[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995.
YANG ZH W. *Optical Measurement* [M]. Beijing:Publishing House of Beijing Institute of Technology,1995. (in Chinese)
- [2] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
YU D Y, TAN H Y. *Optical Engineering* [M]. Beijing:Publishing House of Machinery Industry, 1998. (in Chinese)
- [3] 常山,曹益平,何卫国. 五角棱镜在大口径望远镜检测中的应用[J]. 工具技术, 2004, 38(12):23-26.
CHANG SH, CAO Y P, HE W G. Application of pentagonal prism in large aperture telescope testing[J]. *Tool Engineering*, 2004, 38(12):23-26. (in Chinese)
- [4] YANG ZH W. Measurement of polygon by laser point source interferometry[C]. *SPIE, Measurement technology and intelligent instruments*,1993, 2101:804-807.
- [5] 吴正毅. 测试技术与测试信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 1989.
WU ZH Y. *Test Technology and Signal Processing* [M]. Beijing:Publishing House of Tsinghua University, 1989.
- [6] 巩岩. 极紫外太阳望远镜成像检测系统设计[J]. 光学 精密工程,2006,14(6):969-973.
GONG Y. Testing system for performance of EUV solar telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6):969-973. (in Chinese)

作者简介:马 军(1960—),男,吉林长春人,研究员,主要从事精密光学检测技术研究,光学干涉测量设备的研制等。E-mail:mj-4856@163.com

何 煦(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,主要研究方向为超光谱成像系统的装调与检测技术。E-mail:911max@sina.com

●下期预告

多模式融合的目标跟踪算法

陈爱华^{1,2},孟 勃^{1,2},朱 明¹,王艳华^{1,2}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为了解决目标跟踪中目标运动模型复杂,运动场景复杂多变的情况,提出了一种多模式融合的目标跟踪算法。该算法首先选取目前广泛应用的 mean-shift 和粒子滤波算法分别跟踪目标,得到当前目标位置的候选值;采用加权合成参考函数建立参考模板。然后,以候选目标位置差异和参考模板为标准,确定目标的正确位置。最后根据当前帧目标模板和参考模板的距离来决定是否更新模板。实验仿真结果表明,与单一的目标跟踪算法相比,平均跟踪误差减小了一倍以上。假如参考模板更新错误,下一帧中仍有 67% 的概率正确跟踪目标,连续 3 次模板更新之后,误更新的模板对目标跟踪的影响可以降低到 10% 以下,有效地降低了模板更新引起的跟踪错误和跟踪不稳定。