

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G01B 11/00 (2006.01)

G01B 11/24 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200910067545.3

[43] 公开日 2010 年 2 月 17 日

[11] 公开号 CN 101650157A

[22] 申请日 2009.9.18

[74] 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所

[21] 申请号 200910067545.3

代理人 赵炳仁

[71] 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路 3888 号

[72] 发明人 杨飞 明名 王建立 张景旭
胡宁生 陈宝刚

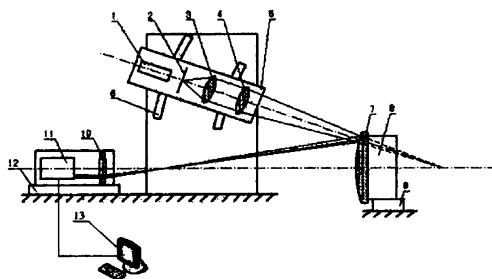
权利要求书 3 页 说明书 7 页 附图 1 页

[54] 发明名称

双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法及其装置

[57] 摘要

本发明涉及一种双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法及其装置，该方法以一束无像差的激光会聚光束作为对被测镜的凸面进行扫描的入射光束，以波前探测器作为测量工具，将入射光束焦点与被测双曲面反射镜虚焦点重合，入射光被测镜反射后，在被测双曲面反射镜的实焦点成像，成像光束经消像差准直透镜准直后进入波前探测器，由波前探测器测得该局部区域的面形误差，入射光束绕被测镜虚焦点进行径向扫描，扫描一步，被测镜绕光轴旋转一圈，如此循环，以检测出整个镜面内的各个局部面形误差，对测得的各个局部面形误差进行拼接和 Zernike 多项式拟合，得到整镜的面形误差。本发明为大口径双曲面凸面反射镜提供了一种低成本、高精度的检测手段。



1. 一种双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法，其特征在于，以一束无像差的激光会聚光束作为对被测镜的凸面进行扫描的入射光束，以连接于计算机上的 Shack-Hartmann 波前探测器作为测量工具，按以下步骤测得双曲面凸面反射镜的面形误差：

- a. 调整所述入射光束相对被测双曲面凸面反射镜的入射角度和距离，使该光束的焦点与被测双曲面凸面反射镜的虚焦点重合；在被测双曲面凸面反射镜光轴的实焦点之后设置一消像差准直透镜，所述的 Shack-Hartmann 波前探测器设置在被测双曲面凸面反射镜通过消像差准直透镜所成像的共轭位置上；入射光束经过被测双曲面凸面反射镜反射后，其被照射的局部区域在被测双曲面凸面反射镜的实焦点处成像，成像光束经过消像差准直透镜准直后，进入 Shack-Hartmann 波前探测器；
- b. 由 Shack-Hartmann 波前探测器测得上述双曲面凸面反射镜被照射的该点局部区域的面形误差 δ ；
- c. 将被测双曲面凸面反射镜以其光轴为轴心按设定角度依次旋转一周，则按步骤 b 作法测得此周径下逐点局部区域的面形误差；
- d. 将入射光束以被测双曲面凸面反射镜的虚焦点为轴心沿被测双曲面凸面反射镜的凸表面径向旋转一设定角度后，再按步骤 c 作法测得该周径下逐点局部区域的面形误差；按上述作法，入射光束从被测双曲面凸面反射镜的边缘扫描至中心为止，则测得覆盖双曲面凸面反射镜整镜面的一系列局部区域的面形误差；
- e. 将所测得的一系列局部区域的面形误差分离出相应的相位常数、倾斜、离焦、球差、彗差和像散，并将各个局部面形误差进行拼接，然后进行整镜的 Zernike 多项式拟合以去除拼接误差，计算得出整镜面形误差的 RMS 值和 PV 值。

2. 根据权利要求 1 所述的一种双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法，其特征在于，步骤 b 所述局部区域的面形误差是由 Shack-Hartmann 波前探测器测得入射局部区域的波像差 w ，而通过计算机按 $\delta = w/2$ 关系式计算程序软件得到该局部面形误差值。

3. 根据权利要求 1 所述的一种双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法，其特征在于，步骤 b 所述局部区域的面形误差是由 Shack-Hartmann 波前探测器测得由入射局部区域的面形误差导致的实焦点轴向离焦量 Δ ，而通过计算机按以下函数式建立的计算程序软件得到的该局部面形误差值 δ ：

$$\delta = \frac{\left(\frac{1}{R}\right)r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)\left(\frac{1}{R}\right)^2 r^2}} - \frac{\left(\frac{1}{R_0}\right)r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)\left(\frac{1}{R_0}\right)^2 r^2}}$$

其中 R 为实际的顶点曲率半径， R_0 为标称的顶点曲率半径，k 为被测镜的二次曲面系数，R 通过以下公式来得到：

$$R = \frac{2l'_0 f_1}{l'_0 - f_1}$$

其中 f_1 为被测镜 7 虚焦点的焦距， l'_0 通过以下公式得到：

$$l'_0 = \Delta + f_2$$

其中 f_2 为被测镜 7 实焦点的焦距。

4. 根据权利要求 1 所述的一种双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法，其特征在于，在开始测量前用一个标准球面透镜对 Shack-Hartmann 波前探测器（11）进行标定，即测量出由消像差准直透镜（10）和 Shack-Hartmann 波前探测器（11）自身产生的波像差 w_0 。将 w_0 作为标定值，在每次实际测量过程中都将其减掉，这样就能有效消除由消像差准直透镜（10）和 Shack-Hartmann 波前探测器（11）自身带来的系统误差。

5. 一种用于权利要求 1 所述双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法的检测装置，包括装卡被测双曲面凸面反射镜（7）的分度转台（8）、发射无像差的激光会聚光束的光源（5）、分别设置在一滑动平台（12）上的 Shack-Hartmann 波前探测器（11）和消像差准直透镜（10）、与 Shack-Hartmann 波前探测器（11）相连接的计算机（13），其特征在于：所述的分度转台（8）的旋转轴即为装卡在分度转台（8）上的被测双曲面凸面反射镜（7）的光轴；所述的光源（5）设置在圆弧形导轨（6）上，光源（5）出射的会聚光束的焦点与圆弧形导轨（6）的中心重合，可绕该中心在圆弧形导轨（6）上旋转；所述的光源（5）

的光轴和滑动平台（12）的中心线及分度转台（8）的旋转轴处在同一垂面上，且消像差准直透镜（10）和 Shack-Hartmann 波前探测器（11）的光轴与分度转台（8）旋转轴同轴；所述的计算机装有：根据 Shack-Hartmann 波前探测器（11）测得的入射局部区域的面形误差引起的波像差而获得其面形误差值、根据 Shack-Hartmann 波前探测器（11）测得的入射局部区域面形误差导致的实焦点轴向离焦量 Δ 而获得其面形误差值和进行整镜局部区域拼接及 Zernike 多项式拟合而获得整镜面形误差 RMS 值和 PV 值的数据处理软件。

6. 根据权利要求 5 所述的双曲面凸面反射镜面形误差检测装置，其特征在于：所述的光源（5）由设置在一镜筒中的激光器（1）、针孔（2）、准直透镜（3）和消像差透镜（4）组成，由激光器（1）发出的光束经过针孔（2）和准直透镜（3）后成一平行光束，该平行光束通过消像差透镜（4）后行成无像差的会聚光束发出。

7. 根据权利要求 6 所述的双曲面凸面反射镜面形误差检测装置，其特征在于：通过选取不同口径的所述消像差透镜（4）以获得所需设定孔径的出射会聚光束。

双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法及其装置

技术领域

本发明涉及一种特别适用于检测大口径双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法及其实现该检测方法的检测装置。

背景技术

随着地基望远镜的发展，对分辨率要求越高，主反射镜通光口径要求就越大，下一代大型地基和空基望远镜的口径都有很大增加。在大型天文和空间光学的领域中，两镜光学系统尤其是以双曲面凸面反射镜为次镜的光学系统应用很广泛。近年来，光学加工制造和检测技术的不断发展克服了大口径主反射镜难于加工的问题，但是在这一类的大口径光学系统中作为次镜的双曲面凸面反射镜口径也越来越大。而大口径双曲面凸面反射镜的检测技术是目前限制其加工制造的主要问题，对大口径双曲面凸面反射镜进行面形误差的高精度检测仍然存在很大的挑战。

在当前大口径双曲面凸面反射镜的加工过程中，常用的检测系统中所涉及到的光学检测方法有无像差点法和补偿器零检验法。由于双曲面存在一对共轭的焦点，若表面具有理想形状，当点光源精确置于其中一个几何焦点上，由表面反射的光线形成球面波前，其球心与另一几何焦点重合。双曲面凸面反射镜的共轭点为一个实几何焦点和一个虚几何焦点，对其进行无像差点检测需要一块口径为被测双曲面反射镜口径两倍以上甚至更大的高精度 Hindle 球面反射镜，以将放置在被测双曲面凸面反射镜实几何焦点的点光源发出的光通过双曲面凸面反射镜而形成的发散球面波前原路反射回来，该 Hindle 球检测方法比较适合小口径双曲面凸面的检测。

Hindle 球检验法如图 3 所示。干涉仪发出的标准平行光经过标准无像差球面透镜后会聚于被测双曲面凸面反射镜的实焦点，其从被测镜反射的光束经过 Hindle 球面反射镜后原路返回，其中 Hindle 球面反射镜的球心与被测镜的虚焦点重合。反射回干涉仪的测量光束

与干涉仪自身参考光束相干涉，测量出被测镜的表面面形误差。这也是应用的最为广泛的一种双曲面凸面反射镜检测方法。

然而对于大口径双曲面凸面反射镜来说，用 Hindle 球检测不仅制造加工困难，而且价格很昂贵，难于实现。后来 Simpsom-Hindle 球检测方法将 Hindle 球反射镜靠近被测双曲面反射镜凸面，使得 Hindle 球反射镜变成一个口径略大于被测双曲面反射镜的 Hindle 球壳，由于检测光需要通过该球壳，因此对该球壳材料的均匀性提出了较高的要求。况且，大口径的 Hindle 球壳在实际制造中存在较大的困难，难于实现。

补偿器零检验法是广泛使用的另一种大口径双曲面次镜检测方法。近来国内外采用的 Offner 补偿器方法主要包括：背部工艺球面法、反射补偿器法、非球面样板法和计算全息板法。为了对被测双曲面凸面反射镜进行精确地测量，上面的这几种补偿器零检验法中的补偿器必须具有所要求的质量，并相对于被测双曲面反射镜正确地安装，即加工和装调精度要求都很高。

然而，随着被测双曲面凸面反射镜口径和相对孔径逐渐增大，背部工艺球面法对材料均匀性要求苛刻，难于实现。反射补偿器法则需要制造大口径的高精度球面或非球面反射镜，非球面样板法需要制造与被测双曲面反射镜口径相当的高精度非球面透镜，计算全息法需要大型激光直写设备刻蚀全息板，并且补偿器零检验法对补偿器装调精度也将提出更高的要求，这使得这些检测技术在检测大口径双曲面凸面反射镜时存在较大的困难。

目前国内大部分检测均采用补偿检验法来检测双曲面凸面反射镜，但补偿器的加工和装调精度都影响着最终的检测结果。无像差点检测法却一直受限于 Hindle 球检测法，加工难度和昂贵成本成为阻碍其广泛应用的重要问题。

因此，如果能在避开加工难度、降低成本的前提下，利用双曲面反射镜虚实两个共轭焦点的特性，借助高精度的波前测量设备和简单的数据处理软件，在现有的机械保证精度条件下，实现大口径双曲面凸面反射镜的精确定量检测，将在未来天文望远镜和大口径系列望远镜领域中得到广泛的应用。

Shack-Hartmann 波前探测器由于其能够进行光束质量动态诊断、光学镜面和系统像差

的检测以及光通过介质的动态波前误差测量等，同时具有对环境适应能力强、采样频率高、测量参数全面、功能齐全等特点，在国内外受到了广泛的研究和应用。

发明内容

本发明的目的是为克服目前对于大口径双曲面凸面反射镜面型质量检测方法存在的所需检测装置难于制造加工、成本高、难于装调、系统误差大、检测精度低的诸多缺陷，提出一种基于无像差法的双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法及其装置。

本发明双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法，以一束无像差的激光会聚光束作为对被测镜的凸面进行扫描的入射光束，以连接于计算机上的 Shack-Hartmann 波前探测器作为测量工具，按以下步骤测得双曲面凸面反射镜的面形误差：

a. 调整所述入射光束相对被测双曲面凸面反射镜的入射角度和距离，使该光束的焦点与被测双曲面凸面反射镜的虚焦点(凹面焦点)重合；在被测双曲面凸面反射镜光轴的实焦点(凸面焦点)之后设置一消像差准直透镜，所述的 Shack-Hartmann 波前探测器设置在被测双曲面凸面反射镜通过消像差准直透镜所成像的共轭位置上；入射光束经过被测双曲面凸面反射镜反射后，其被照射的局部区域在被测双曲面凸面反射镜的实焦点处成像，成像光束经过消像差准直透镜准直后，进入 Shack-Hartmann 波前探测器；

b. 由 Shack-Hartmann 波前探测器测得上述双曲面凸面反射镜被照射的该点局部区域的面形误差 δ ；

c. 将被测双曲面凸面反射镜以其光轴为轴心按设定角度依次旋转一周，则按步骤 b 作法测得此周径下逐点局部区域的面形误差；

d. 将入射光束以被测双曲面凸面反射镜的虚焦点为轴心沿被测双曲面凸面反射镜的凸表面径向旋转一设定角度后，再按步骤 c 作法测得该周径下逐点局部区域的面形误差；按上述作法，入射光束从被测双曲面凸面反射镜的边缘扫描至中心为止，则测得覆盖双曲面凸面反射镜整镜面的一系列局部区域的面形误差；

e. 将所测得的一系列局部区域的面形误差分离出相应的相位常数、倾斜、离焦、球差、彗差和像散，并将各个局部面形误差进行拼接，然后进行整镜的 Zernike 多项式拟合，计

算得出整镜面形误差的 RMS 值和 PV 值。

为实施上述本发明测试方法的一种双曲面凸面反射镜面形误差检测装置，包括设置在滑台上的装卡被测双曲面凸面反射镜的分度转台、发射无像差的激光会聚光束的光源、分别设置在一滑动平台上的 Shack-Hartmann 波前探测器和消像差准直透镜、与 Shack-Hartmann 波前探测器相连接的计算机；所述的分度转台的旋转轴即为装卡在分度转台上的被测双曲面凸面反射镜的光轴；所述的光源设置在圆弧形导轨上，光源出射的会聚光束的焦点与圆弧形导轨的中心重合，可绕该中心在圆弧形导轨上旋转；所述的光源的光轴和滑动平台的中心线及分度转台的旋转轴处在同一垂面上，且消像差准直透镜和 Shack-Hartmann 波前探测器的光轴与分度转台旋转轴同轴；所述的计算机装有：根据 Shack-Hartmann 波前探测器测得的入射局部区域的面形误差引起的波像差而获得其面形误差值、根据 Shack-Hartmann 波前探测器测得的入射局部区域的面形误差导致的实焦点轴向离焦量 Δ 而获得其面形误差值和进行整镜局部区域拼接及 Zernike 多项式拟合而获得整镜面形误差的 RMS 值和 PV 值的数据处理软件。

本发明双曲面凸面反射镜面形误差的检测方法，基于 Shack-Hartmann 波前探测器和制作小口径的准直透镜和消像差透镜建立的检测系统，即可对双曲面凸面反射镜的面形误差实现不受测试环境影响的精确测量，检测装置结构简单、易于制作、成本低，尤其有效的解决了目前对于大口径双曲面凸面反射镜面型质量检测方法存在的所需检测装置难于制造加工、成本高、难于装调、系统误差大、检测精度低的诸多缺陷；由于采用本发明方法还可通过 Shack-Hartmann 波前探测器测得双曲面凸面反射镜局部区域的面形误差导致的实焦点轴向离焦量，即可用于加工过程中的在线检测；实时方便的测出大口径双曲面凸面局部的高低点，这样能够有效迅速地指导加工。

附图说明

图 1 是本发明双曲面凸面反射镜面形误差检测装置的结构示意图；

图 2 为图 1 的俯视图；

图 3 是利用 Hindle 球方法检测双曲面凸面反射镜面形误差的系统结构示意图。

具体实施方式

以下结合附图给出的实施例对本发明双曲面凸面反射镜面形误差检测装置及检测方法作进一步详细描述。

参照图 1、2，一种双曲面凸面反射镜面形误差检测装置，包括设置在滑台 9 上的装卡被测双曲面凸面反射镜 7 的分度转台 8、发射无像差的激光会聚光束的光源 5、分别设置在一滑动平台 12 上的 Shack-Hartmann 波前探测器 11 和消像差准直透镜 10、与 Shack-Hartmann 波前探测器 11 相连接的计算机 13；所述的分度转台 8 的旋转轴即为装卡在分度转台 8 上的被测双曲面凸面反射镜 7 的光轴；所述的光源 5 设置在圆弧形导轨 6 上，光源 5 出射的会聚光束的焦点与圆弧形导轨 6 的中心重合，可绕该中心在圆弧形导轨 6 上旋转；所述的光源 5 的光轴和滑动平台 12 的中心线及分度转台 8 的旋转轴处在同一垂面上，且消像差准直透镜 10 和 Shack-Hartmann 波前探测器 11 的光轴与分度转台 8 旋转轴同轴；所述的计算机装有：根据 Shack-Hartmann 波前探测器 11 测得的入射局部区域的面形误差引起的波像差而获得其面形误差值、根据 Shack-Hartmann 波前探测器 11 测得的入射局部区域的面形误差导致的实焦点轴向离焦量 Δ 而获得其面形误差值和进行整镜局部区域拼接及 Zernike 多项式拟合而获得整镜面形误差的 RMS 值和 PV 值的数据处理软件。

所述的光源 5 由设置在一镜筒中的激光器 1、针孔 2、准直透镜 3 和消像差透镜 4 组成，由激光器 1 发出的光束经过针孔 2 和准直透镜 3 后成一平行光束，该平行光束通过消像差透镜 4 后行成无像差的会聚光束发出。通过选取不同口径的消像差透镜 4 可获得所需设定孔径的出射会聚光束。

采用本检测装置检测双曲面凸面反射镜面形误差，按以下步骤实现：

- a. 将被测双曲面凸面反射镜 7 装卡在分度转台 8 上，使被测双曲面凸面反射镜的光轴与分度转台 8 的转轴同轴，调整分度转台 8 与光源 5 的距离，使光源 5 出射光束的焦点与被测双曲面凸面反射镜的虚焦点(凹面焦点)重合；旋转光源 5 使出射光束照射在被测双曲面凸面反射镜 7 边缘处；移动消像差准直透镜 10 使其处在被测双曲面凸面反射镜 7 实焦点(凸面焦点)后并使得从被测双曲面凸面反射镜 7 最边缘反射出的光线能够到达消像差准

直透镜 10 表面后固定；此时测量出在被测双曲面凸面反射镜 7 与消像差准直透镜 10 的间距，根据测得的间距值与消像差准直透镜 10 的焦距，可用高斯公式计算出被测双曲面凸面反射镜 7 通过消像差准直透镜 10 所成像的共轭位置，移动 Shack-Hartmann 波前探测器 11 使其微透镜阵列处在该共轭位置后固定。

- b. 由 Shack-Hartmann 波前探测器测得上述双曲面凸面反射镜被照射的该点局部区域的面形误差 δ ；
- c. 将被测双曲面凸面反射镜以其光轴为轴心按设定角度依次旋转一周，则按步骤 b 作法测得此周径下逐点局部区域的面形误差；
- d. 将入射光束以被测双曲面凸面反射镜的虚焦点为轴心沿被测双曲面凸面反射镜的凸表面径向旋转一设定角度后，再按步骤 c 作法测得该周径下逐点局部区域的面形误差；按上述作法，入射光束从被测双曲面凸面反射镜的边缘扫描至中心为止，则测得覆盖双曲面凸面反射镜整镜面的一系列局部区域的面形误差；
- e. 将所测得的一系列局部区域的面形误差分离出相应的相位常数、倾斜、离焦、球差、彗差和像散，并将各个局部面形误差进行拼接，然后进行整镜的 Zernike 多项式拟合，计算得出整镜面形误差的 RMS 值和 PV 值。

上述步骤 b 所述局部区域的面形误差的测量，可以下面所述两种方式获得：

- 一. 是由 Shack-Hartmann 波前探测器测得入射局部区域的面形误差引起的波像差 w ，而通过计算机的按 $\delta = w/2$ 关系式计算程序软件得到的该局部面形误差值。
- 二. 是由 Shack-Hartmann 波前探测器测得入射局部区域的面形误差导致的实焦点轴向离焦量 Δ ，而通过计算机按以下函数式建立的计算程序软件得到的该局部面形误差值 δ ：

$$\delta = \frac{\left(\frac{1}{R}\right)r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)\left(\frac{1}{R}\right)^2 r^2}} - \frac{\left(\frac{1}{R_0}\right)r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)\left(\frac{1}{R_0}\right)^2 r^2}}$$

其中 R 为实际的顶点曲率半径， R_0 为标称的顶点曲率半径， k 为被测镜的二次曲面系

数, R 通过以下公式来得到:

$$R = \frac{2l_0'f_1}{l_0' - f_1}$$

其中 f_1 为被测镜 7 虚焦点的焦距, l_0' 通过以下公式得到:

$$l_0' = \Delta + f_2$$

其中 f_2 为被测镜 7 实焦点的焦距。

通过第二种方式测得局部区域面形误差的好处在于, 可同时消除了测试装置本身带来的系统误差, 并能实现在线检测, 实时的测出大口径双曲面凸面局部的高低点, 这样能够有效迅速地指导加工。

如在上述的步骤 b 开始测量前用一个标准球面透镜(无像差)对 Shack-Hartmann 波前探测器 11 进行标定, 即测量出由消像差准直透镜 10 和 Shack-Hartmann 波前探测器 11 自身(元件加工误差、装调误差)产生的波像差 w_0 。将 w_0 作为标定值, 在每次实际测量过程中都将其减掉, 这样就能有效消除由消像差准直透镜 10 和 Shack-Hartmann 波前探测器 11 自身带来的系统误差。

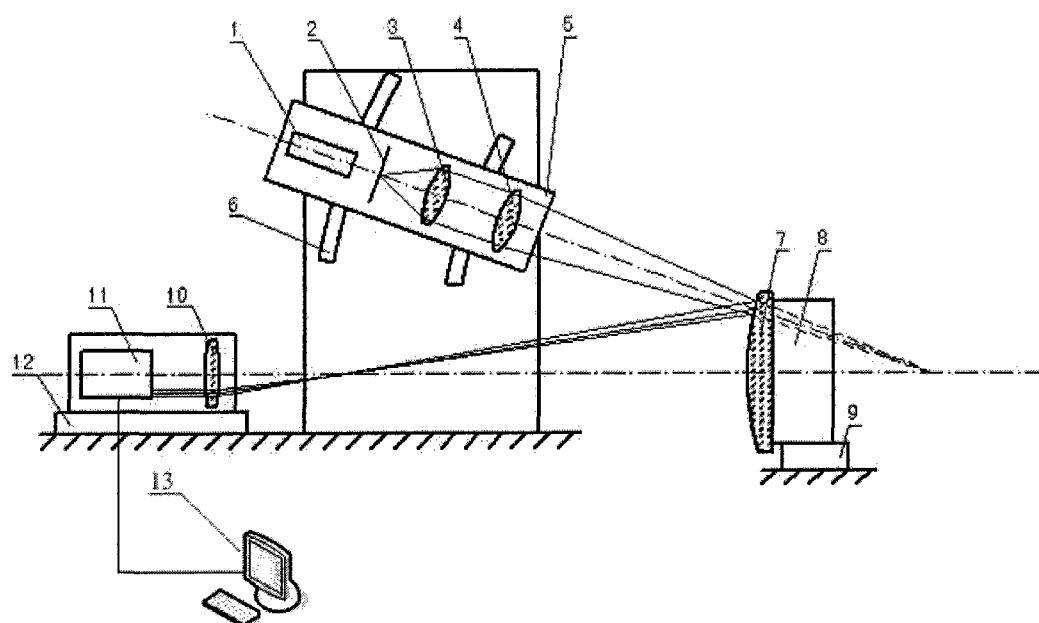


图 1

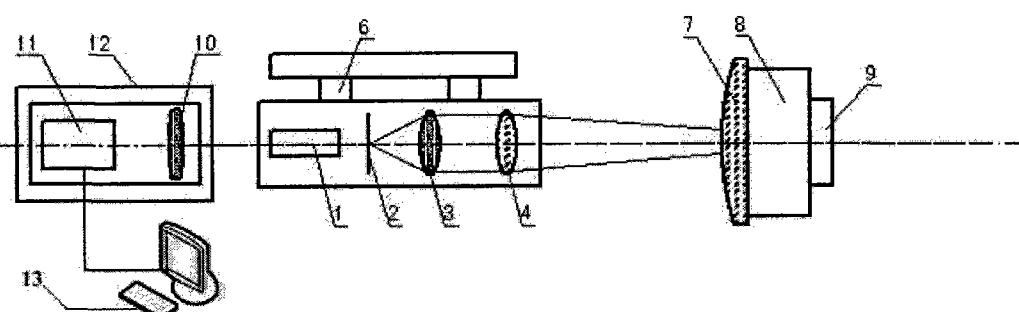


图 2

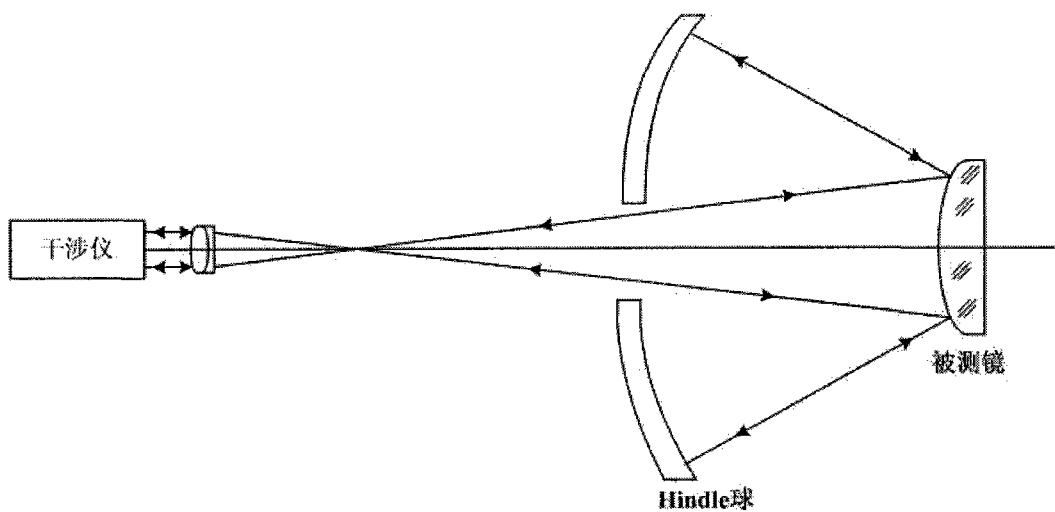


图 3