



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114577235 A

(43) 申请公布日 2022.06.03

(21) 申请号 202210107640.7

(22) 申请日 2022.01.28

(71) 申请人 北京控制工程研究所  
地址 100080 北京市海淀区北京2729信箱

(72) 发明人 王立 武延鹏 袁利 孟小迪  
郑然 齐静雅 李玉明 程会艳  
王苗苗 赵琴 王晓燕 隋杰  
张承钰

(74) 专利代理机构 中国航天科技专利中心  
11009  
专利代理师 杨春颖

(51) Int. Cl.  
G01C 25/00 (2006.01)

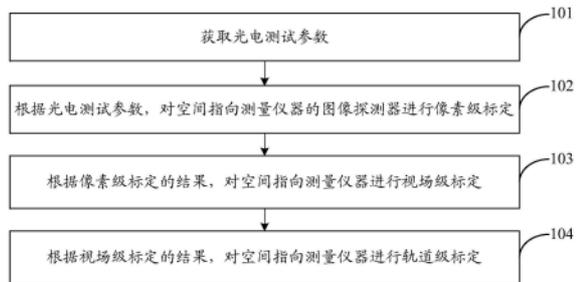
权利要求书3页 说明书9页 附图3页

## (54) 发明名称

一种空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定方法和系统

## (57) 摘要

本发明公开了一种空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定方法和系统,该方法包括:获取光电测试参数;根据光电测试参数,对空间指向测量仪器的图像探测器进行像素级标定;根据像素级标定的结果,对空间指向测量仪器进行视场级标定;根据视场级标定的结果,对空间指向测量仪器进行轨道级标定。本发明实现了像素级-视场级-轨道级的跨尺度、精细化的标定,可满足空间指向测量仪器的极高精度指向测量需求。



1. 一种空间指向测量仪器跨尺度标定方法,其特征在于,包括:

获取光电测试参数;

根据光电测试参数,对空间指向测量仪器的图像探测器进行像素级标定;

根据像素级标定的结果,对空间指向测量仪器进行视场级标定;

根据视场级标定的结果,对空间指向测量仪器进行轨道级标定。

2. 根据权利要求1所述的空间指向测量仪器跨尺度标定方法,其特征在于,获取光电测试参数,包括:通过积分球设备,对空间指向测量仪器的图像探测器进行光电测试,得到光电测试参数。

3. 根据权利要求1所述的空间指向测量仪器跨尺度标定方法,其特征在于,根据光电测试参数,对空间指向测量仪器的图像探测器进行像素级标定,包括:

根据光电测试参数,对图像探测器的响应不一致效应进行修正,得到暗场数据bkg和响应不一致结果prnu;

基于高精度外差干涉法,构建基于高精度外差干涉的图像探测器像素位置偏差测量装置;

根据图像探测器像素位置偏差测量装置,结合暗场数据bkg和响应不一致结果prnu,对空间指向测量仪器的图像探测器的像素位置偏差进行像素级标定。

4. 根据权利要求3所述的空间指向测量仪器跨尺度标定方法,其特征在于,图像探测器像素位置偏差测量装置,包括:稳频激光器(1)、光隔离器(2)、光纤耦合器(3)、单模保偏光纤(4)、光纤分束器(5)、电光调制器(6)、信号发生器(7)、光开关(8)、穿舱光纤(9)、光纤固定压块(10)、图像探测器(11)、光学平台(12)、真空罐A(13)、控制与数据处理计算机(14)和玻璃盒(15);

稳频激光器(1)、光隔离器(2)和光纤耦合器(3)依次设置,置于玻璃盒(15)内;光纤耦合器(3)通过单模保偏光纤(4)、光纤分束器(5)分别与电光调制器(6)和光开关(8)连接;光开关(8)通过穿舱光纤(9)与光纤固定压块(10)连接;光纤固定压块(10)和图像探测器(11)固定在光学平台(12)上,置于真空罐A(13)内;电光调制器(6)接信号发生器(7);控制与数据处理计算机(14)分别接信号发生器(7)和图像探测器(11)。

5. 根据权利要求4所述的空间指向测量仪器跨尺度标定方法,其特征在于,图像探测器像素位置偏差测量装置中光路传播路径如下:

稳频激光器(1)出射的单频稳频激光经光隔离器(2)、光纤耦合器(3)、单模保偏光纤(4)、光纤分束器(5)后分为两束,光束一直接进入光开关(8),光束二进入电光调制器(6);信号发生器(7)在接收到控制与数据处理计算机(14)发送的周期信号后,向电光调制器(6)发送相应的驱动信号,对进入电光调制器(6)的光束二进行调相,使光束二产生随时间变化的相位变化 $\varphi(t)$ ,调相后的光束二输出至光开关(8);选通光开关(8)中的任意两个通道,光束一和调相后的光束二分别通过通道一和通道二、经穿舱光纤(9)输出至光纤固定压块(10)中对应的光纤,最终出射光束在图像探测器(11)表面形成外差干涉条纹。

6. 根据权利要求5所述的空间指向测量仪器跨尺度标定方法,其特征在于,根据图像探测器像素位置偏差测量装置,结合暗场数据bkg和响应不一致结果prnu,对空间指向测量仪器的图像探测器的像素位置偏差进行像素级标定,包括:

步骤a1,将真空罐A(13)抽真空至 $10^{-3}$ Pa;

步骤a2,稳频激光器(1)工作,出射的单频稳频激光经光隔离器(2)、光纤耦合器(3)、单模保偏光纤(4)、光纤分束器(5)后分为两束,光束一直接进入光开关(8),光束二进入电光调制器(6);

步骤a3,数据处理计算机(14)向信号发生器(7)发送周期信号,信号发生器(7)在接收到周期信号后,向电光调制器(6)发送驱动信号V,对进入电光调制器(6)的光束二进行调相,将调相后的光束二输出至光开关(8);其中,光束一与调相后的光束二的相位差为 $\varphi(t)$ ;

步骤a4,选通光开关(8)中的两个通道,光束一和调相后的光束二分别通过通道一和通道二、经穿舱光纤(9)输出至光纤固定压块(10)中对应的光纤,最终出射光束在图像探测器(11)表面形成外差干涉条纹 $M_1$ ;

步骤a5,根据暗场数据bkg和响应不一致结果prnu,对外差干涉条纹 $M_1$ 进行修正,得到修正后的外差干涉条纹 $M'_1$ ;

步骤a6,重复步骤a4~a5,选通光开关(8)中不同的两个通道,产生若干个与外差干涉条纹 $M_1$ 空间频率不同但条纹方向相同的外差干涉条纹 $M_i$ ,并对外差干涉条纹 $M_i$ 进行修正,得到若干个修正后的外差干涉条纹 $M'_i$ ;根据修正后的外差干涉条纹 $M'_i$ 和若干个修正后的外差干涉条纹 $M'_i$ ,解算得到图像探测器垂直方向的像素位置偏差 $\Delta P_1(p,q)$ ;

步骤a7,重复步骤a4~a5,选通光开关(8)中不同的两个通道,产生若干个与外差干涉条纹 $M_1$ 空间频率相同但条纹方向垂直的外差干涉条纹 $M_j$ ,并对外差干涉条纹 $M_j$ 进行修正,得到若干个修正后的外差干涉条纹 $M'_j$ ;根据修正后的外差干涉条纹 $M'_j$ ,解算得到图像探测器水平方向的像素位置偏差 $\Delta P_2(p,q)$ 。

7.根据权利要求6所述的空间指向测量仪器跨尺度标定方法,其特征在于,根据像素级标定的结果,对空间指向测量仪器进行视场级标定,包括:

构建空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置;

根据空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置,结合像素级标定的标定结果,基于邻域平均标定法,对空间光学指向测量仪器的低频误差进行视场级标定。

8.根据权利要求7所述的空间指向测量仪器跨尺度标定方法,其特征在于,空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置,包括:真空罐B(16)、隔振平台(17)、单星模拟器(18)、二维转台(19)、空间指向测量仪器(20)、激光干涉测角仪(21)、二维转台控制设备(22)和控制计算机(23);

单星模拟器(18)、二维转台(19)和激光干涉测角仪(21)按顺序依次安装在隔振平台(17)上;空间指向测量仪器(20)安装在二维转台(19)上,位于二维转台(19)与单星模拟器(18)之间;二维转台控制设备(22)与二维转台(19)连接;控制计算机(23)分别与空间指向测量仪器(20)、激光干涉测角仪(21)和二维转台控制设备(22)连接;隔振平台(17)、单星模拟器(18)、二维转台(19)、空间指向测量仪器(20)和激光干涉测角仪(21)置于真空罐B(16)内。

9.根据权利要求8所述的空间指向测量仪器跨尺度标定方法,其特征在于,根据空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置,结合像素级标定的标定结果,基于邻域平均标定法,对空间光学指向测量仪器的低频误差进行视场级标定,包括:

步骤b1,根据邻域平均标定法,控制二维转台(19)转动到计划位置,通过空间指向测量

仪器(20)采集得到星点图S,通过激光干涉测角仪(21)测量得到二维转台(19)的角度进行测量,得到转台角度 $(\alpha_{\tau}, \beta_{\tau})$ ;其中, $\alpha_{\tau}$ 和 $\beta_{\tau}$ 分别表示二维转台的俯仰角和偏航角;

步骤b2,对采集得到的星点图S进行修正,得到修正后的星点图S';

步骤b3,根据修正后的星点图S',结合 $\Delta P_1(p, q)$ 和 $\Delta P_2(p, q)$ ,确定矩阵U;

步骤b4,根据 $(\alpha_{\tau}, \beta_{\tau})$ 和二维转台与星敏感器之间的安装矩阵F,确定矩阵G;

步骤b5,确定标定系数K的解算方程:

$$K = GU^T \text{inv}(UU^T)$$

步骤b6,根据步骤b1~b4测量和计算结果,采用最小二乘法,对步骤b5确定的标定系数K的解算方程进行求解,得到标定系数K的值,完成对空间光学指向测量仪器的低频误差进行视场级标定。

10. 根据权利要求1所述的空间指向测量仪器跨尺度标定方法,其特征在于,根据视场级标定的结果,对空间指向测量仪器进行轨道级标定,包括:根据视场级标定的标定结果,基于发射过程和在轨环境的影响,对空间光学指向测量仪器的低频误差进行轨道级标定,得到跨尺度标定结果并输出。

11. 一种空间指向测量仪器跨尺度标定系统,其特征在于,包括:

获取模块,用于获取光电测试参数;

像素级标定模块,用于根据光电测试参数,对空间指向测量仪器的图像探测器进行像素级标定;

视场级标定模块,用于根据像素级标定的结果,对空间指向测量仪器进行视场级标定;

轨道级标定模块,用于根据视场级标定的结果,对空间指向测量仪器进行轨道级标定。

## 一种空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定方法和系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于空间极高精度指向测量技术领域,尤其涉及一种空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定方法和系统。

### 背景技术

[0002] 标定方法是实现空间指向测量仪器极高精度指向测量的关键技术,地面标定和在轨标定都会直接影响姿态测量结果和姿态测量精度。随着空间指向测量仪器的测量精度需求的提升,现有标定方法的精度已不能满足需求,需要针对空间极高精度指向测量仪器,进行精细化的跨尺度标定,对探测器高频误差,视场空间低频误差和轨道级低频误差进行标定和校准,从而实现空间指向测量仪器的极高精度指向测量。

[0003] 在空间指向测量仪器进行成像和姿态解算过程中,由于探测器制造工艺的原因,存在像素间响应不一致和像素位置偏差等高频误差项对成像结果的影响,从而对通过图像进行恒星目标之心提取的方法精度产生影响;另一方面由于光学系统的畸变,导致星点在视场中不同位置成像的形貌产生畸变,使得在视场中不同位置的定心精度不同,同时造成的成像位置偏差,都会使得标定精度的下降,进而影响指向测量精度。

### 发明内容

[0004] 本发明的技术问题:克服现有技术的不足,提供一种空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定方法和系统,旨在实现像素级-视场级-轨道级的跨尺度、精细化的标定,以满足空间指向测量仪器的极高精度指向测量需求。

[0005] 为了解决上述技术问题,本发明公开了一种空间指向测量仪器跨尺度标定方法,包括:

[0006] 获取光电测试参数;

[0007] 根据光电测试参数,对空间指向测量仪器的图像探测器进行像素级标定;

[0008] 根据像素级标定的结果,对空间指向测量仪器进行视场级标定;

[0009] 根据视场级标定的结果,对空间指向测量仪器进行轨道级标定。

[0010] 在上述空间指向测量仪器跨尺度标定方法中,获取光电测试参数,包括:通过积分球设备,对空间指向测量仪器的图像探测器进行光电测试,得到光电测试参数。

[0011] 在上述空间指向测量仪器跨尺度标定方法中,根据光电测试参数,对空间指向测量仪器的图像探测器进行像素级标定,包括:

[0012] 根据光电测试参数,对图像探测器的响应不一致效应进行修正,得到暗场数据bkg和响应不一致结果prnu;

[0013] 基于高精度外差干涉法,构建基于高精度外差干涉的图像探测器像素位置偏差测量装置;

[0014] 根据图像探测器像素位置偏差测量装置,结合暗场数据bkg和响应不一致结果prnu,对空间指向测量仪器的图像探测器的像素位置偏差进行像素级标定。

[0015] 在上述空间指向测量仪器跨尺度标定方法中,图像探测器像素位置偏差测量装置,包括:稳频激光器、光隔离器、光纤耦合器、单模保偏光纤、光纤分束器、电光调制器、信号发生器、光开关、穿舱光纤、光纤固定压块、图像探测器、光学平台、真空罐A、控制与数据处理计算机和玻璃盒;

[0016] 稳频激光器、光隔离器和光纤耦合器依次设置,置于玻璃盒内;光纤耦合器通过单模保偏光纤、光纤分束器分别与电光调制器和光开关连接;光开关通过穿舱光纤与光纤固定压块连接;光纤固定压块和图像探测器固定在光学平台上,置于真空罐A内;电光调制器接信号发生器;控制与数据处理计算机分别接信号发生器和图像探测器。

[0017] 在上述空间指向测量仪器跨尺度标定方法中,图像探测器像素位置偏差测量装置中光路传播路径如下:

[0018] 稳频激光器出射的单频稳频激光经光隔离器、光纤耦合器、单模保偏光纤、光纤分束器后分为两束,光束一直接进入光开关,光束二进入电光调制器;信号发生器在接收到控制与数据处理计算机发送的周期信号后,向电光调制器发送相应的驱动信号,对进入电光调制器的光束二进行调相,使光束二产生随时间变化的相位变化 $\varphi(t)$ ,调相后的光束二输出至光开关;选通光开关中的任意两个通道,光束一和调相后的光束二分别通过通道一和通道二、经穿舱光纤输出至光纤固定压块中对应的光纤,最终出射光束在图像探测器表面形成外差干涉条纹。

[0019] 在上述空间指向测量仪器跨尺度标定方法中,根据图像探测器像素位置偏差测量装置,结合暗场数据bkg和响应不一致结果prnu,对空间指向测量仪器的图像探测器的像素位置偏差进行像素级标定,包括:

[0020] 步骤a1,将真空罐A抽真空至 $10^{-3}$ Pa;

[0021] 步骤a2,稳频激光器工作,出射的单频稳频激光经光隔离器、光纤耦合器单模保偏光纤、光纤分束器后分为两束,光束一直接进入光开关,光束二进入电光调制器;

[0022] 步骤a3,数据处理计算机向信号发生器发送周期信号,信号发生器在接收到周期信号后,向电光调制器发送驱动信号V,对进入电光调制器的光束二进行调相,将调相后的光束二输出至光开关;其中,光束一与调相后的光束二的相位差为 $\varphi(t)$ ;

[0023] 步骤a4,选通光开关中的两个通道,光束一和调相后的光束二分别通过通道一和通道二、经穿舱光纤输出至光纤固定压块中对应的光纤,最终出射光束在图像探测器表面形成外差干涉条纹 $M_1$ ;

[0024] 步骤a5,根据暗场数据bkg和响应不一致结果prnu,对外差干涉条纹 $M_1$ 进行修正,得到修正后的外差干涉条纹 $M'_1$ ;

[0025] 步骤a6,重复步骤a4~a5,选通光开关中不同的两个通道,产生若干个与外差干涉条纹 $M_1$ 空间频率不同但条纹方向相同的外差干涉条纹 $M_i$ ,并对外差干涉条纹 $M_1$ 进行修正,得到若干个修正后的外差干涉条纹 $M'_i$ ;根据修正后的外差干涉条纹 $M'_1$ 和若干个修正后的外差干涉条纹 $M'_i$ ,解算得到图像探测器垂直方向的像素位置偏差 $\Delta P_1(p, q)$ ;

[0026] 步骤a7,重复步骤a4~a5,选通光开关中不同的两个通道,产生若干个与外差干涉条纹 $M_1$ 空间频率相同但条纹方向垂直的外差干涉条纹 $M_j$ ,并对外差干涉条纹 $M_j$ 进行修正,得到若干个修正后的外差干涉条纹 $M'_j$ ;根据修正后的外差干涉条纹 $M'_j$ ,解算得到图像探测器水平方向的像素位置偏差 $\Delta P_2(p, q)$ 。

[0027] 在上述空间指向测量仪器跨尺度标定方法中,根据像素级标定的结果,对空间指向测量仪器进行视场级标定,包括:

[0028] 构建空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置;

[0029] 根据空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置,结合像素级标定的标定结果,基于邻域平均标定法,对空间光学指向测量仪器的低频误差进行视场级标定。

[0030] 在上述空间指向测量仪器跨尺度标定方法中,空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置,包括:真空罐B、隔振平台、单星模拟器、二维转台、空间指向测量仪器、激光干涉测角仪、二维转台控制设备和控制计算机;

[0031] 单星模拟器、二维转台和激光干涉测角仪按顺序依次安装在隔振平台上;空间指向测量仪器安装在二维转台上,位于二维转台与单星模拟器之间;二维转台控制设备与二维转台连接;控制计算机分别与空间指向测量仪器、激光干涉测角仪和二维转台控制设备连接;隔振平台、单星模拟器、二维转台、空间指向测量仪器和激光干涉测角仪置于真空罐B内。

[0032] 在上述空间指向测量仪器跨尺度标定方法中,根据空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置,结合像素级标定的标定结果,基于邻域平均标定法,对空间光学指向测量仪器的低频误差进行视场级标定,包括:

[0033] 步骤b1,根据邻域平均标定法,控制二维转台转动到计划位置,通过空间指向测量仪器采集得到星点图S,通过激光干涉测角仪测量得到二维转台的角度进行测量,得到转台角度 $(\alpha_t, \beta_t)$ ;其中, $\alpha_t$ 和 $\beta_t$ 分别表示二维转台的俯仰角和偏航角;

[0034] 步骤b2,对采集得到的星点图S进行修正,得到修正后的星点图S';

[0035] 步骤b3,根据修正后的星点图S',结合 $\Delta P_1(p, q)$ 和 $\Delta P_2(p, q)$ ,确定矩阵U;

[0036] 步骤b4,根据 $(\alpha_t, \beta_t)$ 和二维转台与星敏感器之间的安装矩阵F,确定矩阵G;

[0037] 步骤b5,确定标定系数K的解算方程:

[0038]  $K = GU^T \text{inv}(UU^T)$

[0039] 步骤b6,根据步骤b1~b4测量和计算结果,采用最小二乘法,对步骤b5确定的标定系数K的解算方程进行求解,得到标定系数K的值,完成对空间光学指向测量仪器的低频误差进行视场级标定。

[0040] 在上述空间指向测量仪器跨尺度标定方法中,根据视场级标定的结果,对空间指向测量仪器进行轨道级标定,包括:根据视场级标定的标定结果,基于发射过程和在轨环境的影响,对空间光学指向测量仪器的低频误差进行轨道级标定,得到跨尺度标定结果并输出。

[0041] 相应的,本发明还公开了一种空间指向测量仪器跨尺度标定系统,包括:

[0042] 获取模块,用于获取光电测试参数;

[0043] 像素级标定模块,用于根据光电测试参数,对空间指向测量仪器的图像探测器进行像素级标定;

[0044] 视场级标定模块,用于根据像素级标定的结果,对空间指向测量仪器进行视场级标定;

[0045] 轨道级标定模块,用于根据视场级标定的结果,对空间指向测量仪器进行轨道级标定。

[0046] 本发明具有以下优点：

[0047] 本发明公开了一种空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定方法和系统，在现有方法基础上进行改进，提出像素级-视场级-轨道级标定体系，通过像素级标定可实现极高精度的像素位置偏差标定精度，达到优于1/1000像素的标定精度；视场级标定在现有网格法标定的基础上进行改进，容易实施；轨道级标定在原有在轨标定方法基础上，以地面的高精度标定结果为基础，并以在轨应用为目的。

### 附图说明

[0048] 图1是本发明实施例中一种空间指向测量仪器跨尺度标定方法的步骤流程图；

[0049] 图2是本发明实施例中一种视场级标定中标定网格点的分布示意图；

[0050] 图3是图2中所示的每个标定网格点的邻域采样点的分布位置示意图；

[0051] 图4是本发明实施例中一种图像探测器像素位置偏差测量装置的结构框图；

[0052] 图5是本发明实施例中一种空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置的结构框图；

[0053] 图6是本发明实施例中一种空间指向测量仪器跨尺度标定系统的结构框图。

### 具体实施方式

[0054] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合附图对本发明公开的实施方式作进一步详细描述。

[0055] 实施例1

[0056] 如图1，在本实施例中，该空间指向测量仪器跨尺度标定方法，包括：

[0057] 步骤101，获取光电测试参数。

[0058] 在本实施例中，可以采用任意一种适当的方式获取得到光电测试参数，例如，可以通过积分球设备，对空间指向测量仪器的图像探测器进行光电测试，得到光电测试参数。

[0059] 步骤102，根据光电测试参数，对空间指向测量仪器的图像探测器进行像素级标定。

[0060] 在本实施例中，像素级标定在具体实现时，可根据光电测试参数，对图像探测器的响应不一致效应进行修正，得到暗场数据和响应不一致结果；然后，基于激光外差干涉方法进行图像探测器像素位置偏差标定，例如，可以通过在真空环境中搭建多光纤通道干涉光路，通过选择不同位置光纤通道，生成多组不同空间频率的杨氏干涉条纹，通过条纹图像的解算获得高精度的像素位置偏差标定结果，实现1/1000的像素位置偏差标定精度。

[0061] 步骤103，根据像素级标定的结果，对空间指向测量仪器进行视场级标定。

[0062] 在本实施例中，可在传统的网格标定方法基础上，基于邻域平均标定方法，对空间指向测量仪器进行视场级标定，以提升标定精度。例如，如图2和图3，可通过在标定点附近小范围采集多个位置的星点图，通过平均处理降低空间高频误差项的影响；在传统的网格标定方法基础上，分别以网格标定点 $O_n$ （表示第 $n$ 个以网格标定点）为中心， $r$ 为半径， $\gamma$ 为步长进行邻域采样，获得共 $360/\gamma$ 个平均分布在以点 $O_n$ 为圆心、 $r$ 为半径的圆周上的采样点，通过对采样点的平均处理，作为点 $O_n$ 处的结果，按照网格标定方法进行标定数据处理，得到标定结果，实现1/100的视场级标定精度。

[0063] 步骤104,根据视场级标定的结果,对空间指向测量仪器进行轨道级标定。

[0064] 在本实施例中,可通过星敏感器-陀螺数据融合进行在轨标定,对轨道级低频误差进行标定和校准:建立星敏感器-陀螺的安装误差和标定因子误差模型,然后通过基于卡尔曼滤波器的算法对各种误差进行实时补偿,以尽可能降低其对姿态测量的影响,达到提高姿态测量精度的目的,可在轨实时补偿星敏感器的安装误差,实现对空间指向测量仪器1/100的轨道级标定精度。

[0065] 综上所述,本发明通过将像素级标定、视场级标定和轨道级标定的结合,实现了不同尺度标定结果的互相结合,对像素空间高频误差、视场空间高频误差进行校正,能够有效提升标定精度和星敏感器姿态测量精度。

[0066] 实施例2

[0067] 在本实施例中,该空间指向测量仪器跨尺度标定方法,包括:

[0068] 步骤201,获取光电测试参数。

[0069] 在本实施例中,可基于积分球设备,对空间指向测量仪器的图像探测器进行光电测试,得到光电测试参数。

[0070] 步骤202,根据光电测试参数,对空间指向测量仪器的图像探测器进行像素级标定。

[0071] 在本实施例中,像素级标定的具体流程如下:

[0072] 子步骤2021,根据光电测试参数,对图像探测器的响应不一致效应进行修正,得到暗场数据bkg和响应不一致结果prnu。

[0073] 子步骤2022,基于高精度外差干涉法,构建基于高精度外差干涉的图像探测器像素位置偏差测量装置。

[0074] 如图4,图像探测器像素位置偏差测量装置具体可以包括:稳频激光器1、光隔离器2、光纤耦合器3、单模保偏光纤4、光纤分束器5、电光调制器6、信号发生器7、光开关8、穿舱光纤9、光纤固定压块10、图像探测器11、光学平台12、真空罐A13、控制与数据处理计算机14和玻璃盒15。其中,稳频激光器1、光隔离器2和光纤耦合器3依次设置,置于玻璃盒15内,防止空气扰动;光纤耦合器3通过单模保偏光纤4、光纤分束器5分别与电光调制器6和光开关8连接;光开关8通过穿舱光纤9与光纤固定压块10连接;光纤固定压块10和图像探测器11固定在光学平台12上,置于真空罐A13内;电光调制器6接信号发生器7;控制与数据处理计算机14分别接信号发生器7和图像探测器11。其中,稳频激光器1可选用处于频率稳定模式的氦氖稳频激光器,稳频激光器1出射激光的振动方向与光隔离器2的起偏器透光方向保持一致,以使通过光隔离器2的光束强度达到最大值。

[0075] 进一步的,图像探测器像素位置偏差测量装置中光路传播路径如下:稳频激光器1出射的单频稳频激光经光隔离器2、光纤耦合器3、单模保偏光纤4、光纤分束器5后分为两束,光束一直接进入光开关8,光束二进入电光调制器6;信号发生器7在接收到控制与数据处理计算机14发送的周期信号后,向电光调制器6发送相应的驱动信号,对进入电光调制器6的光束二进行调相,使光束二产生随时间变化的相位变化 $\varphi(t)$ ,调相后的光束二输出至光开关8;选通光开关8中的任意两个通道,光束一和调相后的光束二分别通过通道一和通道二、经穿舱光纤9输出至光纤固定压块10中对应的光纤,最终出射光束在图像探测器11表面形成外差干涉条纹。

[0076] 子步骤2023,根据图像探测器像素位置偏差测量装置,结合暗场数据bkg和响应不一致结果prnu,对空间指向测量仪器的图像探测器的像素位置偏差进行像素级标定。具体实现过程如下:

[0077] 步骤a1,将真空罐A13抽真空至 $10^{-3}$ Pa。

[0078] 步骤a2,稳频激光器1工作,出射的单频稳频激光经光隔离器2、光纤耦合器3、单模保偏光纤4、光纤分束器5后分为两束,光束一直接进入光开关8,光束二进入电光调制器6。

[0079] 步骤a3,数据处理计算机14向信号发生器7发送周期信号,信号发生器7在接收到周期信号后,向电光调制器6发送驱动信号V,对进入电光调制器6的光束二进行调相,将调相后的光束二输出至光开关8;其中,光束一与调相后的光束二的相位差为 $\varphi(t)$ 。

[0080] 在本实施例中,驱动信号V可表示为: $V=C*t^2+D*t$ ;其中,t表示时间,C和D表示两个可调节参数。驱动信号V的调节策略如下:图像探测器11记录一个周期内的外差干涉条纹,根据空域条纹图像的拟合目标函数 $I(p,q)=B*b+A*a*\sin(k_x*p+k_y*q+\Psi)$ ,对图像探测器11记录的每一幅干涉条纹进行非线性空域拟合,计算得到对应条纹亮度偏置系数B、条纹亮度峰峰值系数A、x和y方向的空间频率 $k_x$ 和 $k_y$ 、时域相位 $\Psi$ 。其中,a和b分别表示理想条纹的峰峰值和偏置,(p,q)表示像素的位置坐标;进一步的,判断时域相位 $\Psi$ 是否满足如下条件: $\Psi$ 在0至 $360^\circ$ 内均匀分布,若 $\Psi$ 在0至 $360^\circ$ 内均匀分布,则当前驱动信号满足要求;若不满足 $\Psi$ 在0至 $360^\circ$ 内均匀分布,则调节C和D的值,直至时域相位 $\Psi$ 满足在0至 $360^\circ$ 内均匀分布。

[0081] 步骤a4,选通光开关8中的两个通道,光束一和调相后的光束二分别通过通道一和通道二、经穿舱光纤9输出至光纤固定压块10中对应的光纤,最终出射光束在图像探测器11表面形成外差干涉条纹 $M_1$ 。

[0082] 步骤a5,根据暗场数据bkg和响应不一致结果prnu,对外差干涉条纹 $M_1$ 进行修正,得到修正后的外差干涉条纹 $M'_1$ 。其中, $M'_1=prnu*(M_1-bkg)$ 。

[0083] 步骤a6,重复步骤a4~a5,选通光开关8中不同的两个通道,产生若干个与外差干涉条纹 $M_1$ 空间频率不同但条纹方向相同的外差干涉条纹 $M_i$ ,并对外差干涉条纹 $M_i$ 进行修正,得到若干个修正后的外差干涉条纹 $M'_i$ ;根据修正后的外差干涉条纹 $M'_i$ 和若干个修正后的外差干涉条纹 $M'_i$ ,解算得到图像探测器垂直方向的像素位置偏差 $\Delta P_1(p,q)$ 。

[0084] 在本实施例中,图像探测器垂直方向的像素位置偏差的解算过程如下:首先,采用如步骤a3中的方法,计算得到修正后的外差干涉条纹 $M'_i$ 对应的条纹亮度偏置系数 $B'_i$ 、条纹亮度峰峰值系数 $A'_i$ 、x和y方向的空间频率 $k'_x$ 和 $k'_y$ 、时域相位 $\Psi'_i$ ;然后,采用最小二乘拟合,计算得到每个像素在空间条纹中对应的实际相位值 $\varphi(p,q)$ ,并确定每个像素在理想条纹中对应的理想相位值 $\varphi_0(p,q)=k'_x*p+k'_y*q$ ;进一步的,确定每个像素对应的相位偏移值 $\Delta\varphi(p,q): \Delta\varphi(p,q)=\varphi(p,q)-\varphi_0(p,q)$ ;最后,解算得到图像探测器垂直方向的像素位置偏差 $\Delta P_1(p,q): \Delta P_1(p,q)=\Delta\varphi(p,q)/\sqrt{k_x'^2+k_y'^2}$ 。

[0085] 需要说明的是,外差干涉条纹 $M_i$ 的形成过程与外差干涉条纹 $M_1$ 相同,其区别在于光开关8的选通通道不同,外差干涉条纹 $M_i$ 的修正与外差干涉条纹 $M_1$ 的修正所采用的方式相同,可参照上述步骤a5中描述的外差干涉条纹 $M_1$ 的修正公式,对外差干涉条纹 $M_i$ 进行修正。

[0086] 步骤a7,重复步骤a4~a5,选通光开关8中不同的两个通道,产生若干个与外差干涉条纹 $M_1$ 空间频率相同但条纹方向垂直的外差干涉条纹 $M_j$ ,并对外差干涉条纹 $M_j$ 进行修正,得到若干个修正后的外差干涉条纹 $M'_j$ ;根据修正后的外差干涉条纹 $M'_j$ ,解算得到图像探测器水平方向的像素位置偏差 $\Delta P_2(p,q)$ 。

[0087] 在本实施例中,外差干涉条纹 $M_j$ 的形成过程与外差干涉条纹 $M_1$ 相同,其区别在于光开关8的选通通道不同;外差干涉条纹 $M_j$ 的修正与外差干涉条纹 $M_1$ 的修正所采用的方式相同,可参照上述步骤a5中描述的外差干涉条纹 $M_1$ 的修正公式,对外差干涉条纹 $M_j$ 进行修正;图像探测器水平方向的像素位置偏差的解算过程与图像探测器垂直方向的像素位置偏差的解算过程相同,可参照步骤a6中的方法,根据修正后的外差干涉条纹 $M'_j$ ,解算得到图像探测器水平方向的像素位置偏差 $\Delta P_2(p,q)$ 。

[0088] 步骤203,根据像素级标定的结果,对空间指向测量仪器进行视场级标定。

[0089] 在本实施例中,该视场级标定的具体流程如下:

[0090] 子步骤2031,构建空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置。

[0091] 如图5,该空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置具体可以包括:真空罐B16、隔振平台17、单星模拟器18、二维转台19、空间指向测量仪器20、激光干涉测角仪21、二维转台控制设备22和控制计算机23。其中,单星模拟器18、二维转台19和激光干涉测角仪21按顺序依次安装在隔振平台17上;空间指向测量仪器20安装在二维转台19上,位于二维转台19与单星模拟器18之间;二维转台控制设备22与二维转台19连接;控制计算机23分别与空间指向测量仪器20、激光干涉测角仪21和二维转台控制设备22连接;隔振平台17、单星模拟器18、二维转台19、空间指向测量仪器20和激光干涉测角仪21置于真空罐B16内。

[0092] 子步骤2032,根据空间极高精度指向测量仪器跨尺度标定装置,结合像素级标定的标定结果,基于邻域平均标定法,对空间光学指向测量仪器的低频误差进行视场级标定。具体实现过程如下:

[0093] 步骤b1,根据邻域平均标定法,控制二维转台19转动到计划位置,通过空间指向测量仪器20采集得到星点图,通过激光干涉测角仪21测量得到二维转台19的角度进行测量,得到转台角度。

[0094] 二维转台19的转动位置满足如下规律:在星敏感器视场内平均分布 $N*N$ 个网格点,在每个网格点邻域内,以当前网格点为中心,以 $r$ 为半径,以 $\gamma$ 为步长控制二维转台19转动,并在每一个位置采集,通过激光干涉测角仪21测量得到转台角度 $(\alpha_r, \beta_r)$ ,通过空间指向测量仪器20采集得到星点图 $S$ 。其中, $\alpha_r$ 和 $\beta_r$ 分别表示二维转台的俯仰角和偏航角。

[0095] 步骤b2,对采集得到的星点图 $S$ 进行修正,得到修正后的星点图 $S'$ 。

[0096]  $S' = prnu * (S - bkg)$

[0097] 步骤b3,根据修正后的星点图 $S'$ ,结合 $\Delta P_1(p,q)$ 和 $\Delta P_2(p,q)$ ,确定矩阵 $U$ 。

[0098] 首先,根据修正后的星点图 $S'$ ,结合 $\Delta P_1(p,q)$ 和 $\Delta P_2(p,q)$ ,计算得到当前邻域采样点的星点成像质心位置:

$$[0099] \quad U_k = \frac{\sum (x_{pq} + \Delta P_1(p,q)) * S'(p,q)}{\sum S'(p,q)}$$

$$[0100] \quad V_k = \frac{\sum (y_{pq} + \Delta P_2(p, q)) * S'(p, q)}{\sum S'(p, q)}$$

[0101] 其中,  $U_k$  和  $V_k$  分别表示当前邻域采样点的星点成像质心的横坐标和纵坐标,  $x_{pq}$  和  $y_{pq}$  分别表示探测器坐标系下的像素的横坐标和纵坐标,  $S'(p, q)$  表示修正后的星点图  $S'$  中的像素点。

[0102] 然后, 对于每个以网格点为中心的邻域采样点, 计算得到所有邻域采样点位置对应的星点成像质心位置的均值, 并确定矩阵  $U$ :

$$[0103] \quad u_\tau = \frac{1}{H} \sum_{k=0}^{H-1} U_k$$

$$[0104] \quad v_\tau = \frac{1}{H} \sum_{k=0}^{H-1} V_k$$

$$[0105] \quad U = (u_\tau, v_\tau)$$

[0106] 其中,  $u_\tau$  和  $v_\tau$  分别表示邻域采样点平均后的星点成像质心的横坐标和纵坐标,  $H$  表示邻域采样点个数,  $\tau = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

[0107] 步骤b4, 根据  $(\alpha_\tau, \beta_\tau)$  和二维转台与星敏感器之间的安装矩阵  $F$ , 确定矩阵  $G$ 。

[0108] 首先, 根据  $(\alpha_\tau, \beta_\tau)$ , 确定单星矢量在转台坐标系下的矢量  $vec_\tau$ :

$$[0109] \quad vec_\tau = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_\tau \\ \sin \beta_\tau \cos \alpha_\tau \\ \cos \beta_\tau \cos \alpha_\tau \end{bmatrix} [0 \ 0 \ 1]^T$$

[0110] 然后, 根据  $vec_\tau$ , 得到单星矢量在空间指向测量仪器本体坐标系下的矢量  $Vec_\tau$ :

$$[0111] \quad Vec_\tau = F \cdot vec_\tau = \begin{bmatrix} x_\tau \\ y_\tau \\ z_\tau \end{bmatrix}$$

[0112] 其中,  $F$  表示二维转台与星敏感器之间的安装矩;  $x_\tau$ 、 $y_\tau$  和  $z_\tau$  为矢量  $Vec_\tau$  的三轴分量。

[0113] 最后, 确定矩阵  $G$ :  $G = (x_\tau, y_\tau)$ 。

[0114] 步骤b5, 确定标定系数  $K$  的解算方程:

$$[0115] \quad K = GU^T \text{inv}(UU^T)$$

[0116] 步骤b6, 根据步骤b1~b4测量和计算结果, 采用最小二乘法, 对步骤b5确定的标定系数  $K$  的解算方程进行求解, 得到标定系数  $K$  的值, 完成对空间光学指向测量仪器的低频误差进行视场级标定。

[0117] 步骤204, 根据视场级标定的结果, 对空间指向测量仪器进行轨道级标定。

[0118] 在本实施例中, 根据视场级标定的标定结果, 基于发射过程和在轨环境的影响, 对空间光学指向测量仪器的低频误差进行轨道级标定, 得到跨尺度标定结果并输出。具体的: 星敏感器入轨后, 根据步骤202和步骤203的计算和标定结果, 进行姿态测量与确定; 随着在

轨工作时间的增加,通过观测恒星角距,以恒星角距为真值对标定系数K进行在轨实时修正,完成对空间光学指向测量仪器的低频误差进行轨道级标定。

[0119] 综上所述,本发明公开了一种空间指向测量仪器跨尺度标定方法,提出了一种像素级-视场级-轨道级的跨尺度标定体系,通过地面实验室进行的激光干涉标定和圆圈标定方法等,对空间指向测量以及进行像素级和视场级的标定,对图像探测器的响应不一致性和像素位置偏差等误差进行标定和校准,对光学系统畸变等导致的视场空间低频误差进行标定;通过在轨的实时修正和标定,对轨道级低频误差特性进行标定和校准,实现极高精度空间指向测量仪器的标定。其中,像素级标定的标定精度为:1/1000,视场级标定的标定精度为:1/100,轨道级标定的标定精度为:1/100。

[0120] 实施例3

[0121] 如图6,本发明还公开了一种空间指向测量仪器跨尺度标定系统,包括:获取模块601,用于获取光电测试参数;像素级标定模块602,用于根据光电测试参数,对空间指向测量仪器的图像探测器进行像素级标定;视场级标定模块603,用于根据像素级标定的结果,对空间指向测量仪器进行视场级标定;轨道级标定模块604,用于根据视场级标定的结果,对空间指向测量仪器进行轨道级标定。

[0122] 对于系统实施例而言,由于其与方法实施例相对应,所以描述的比较简单,相关之处参见方法实施例部分的说明即可。

[0123] 本发明虽然已以较佳实施例公开如上,但其并不是用来限定本发明,任何本领域技术人员在不脱离本发明的精神和范围内,都可以利用上述揭示的方法和技术内容对本发明技术方案做出可能的变动和修改,因此,凡是未脱离本发明技术方案的内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化及修饰,均属于本发明技术方案的保护范围。

[0124] 本发明说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员的公知技术。

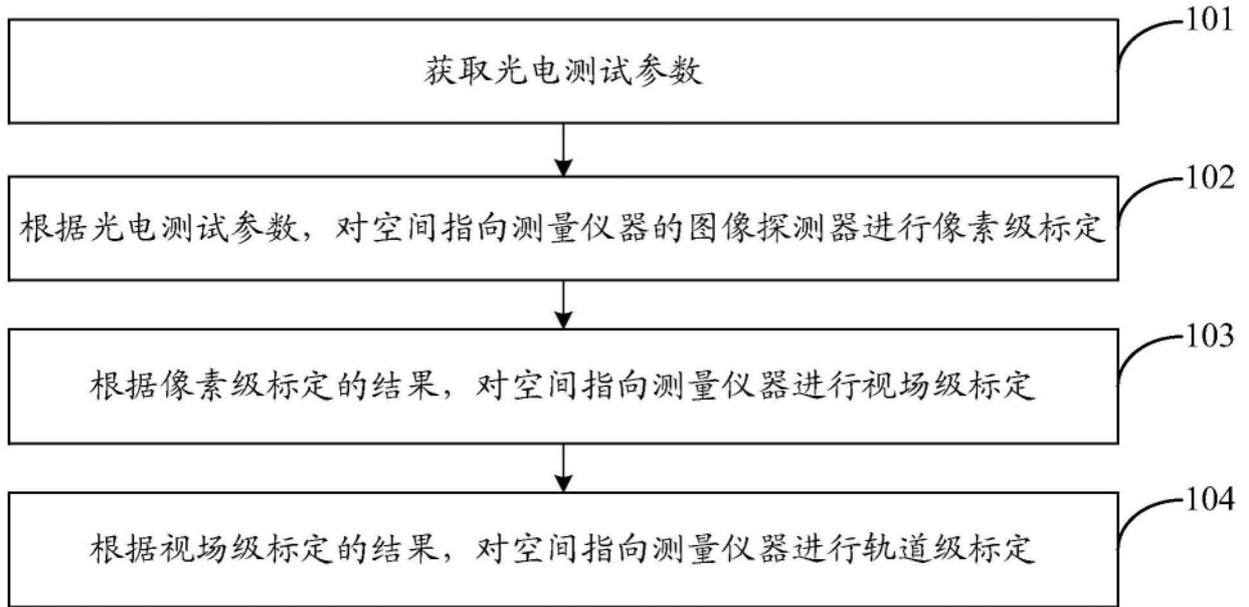


图1

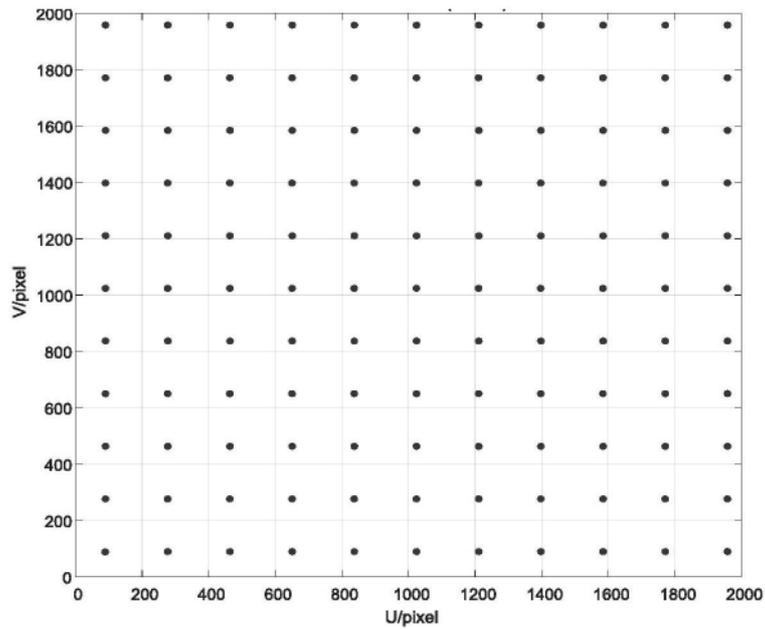


图2



图3

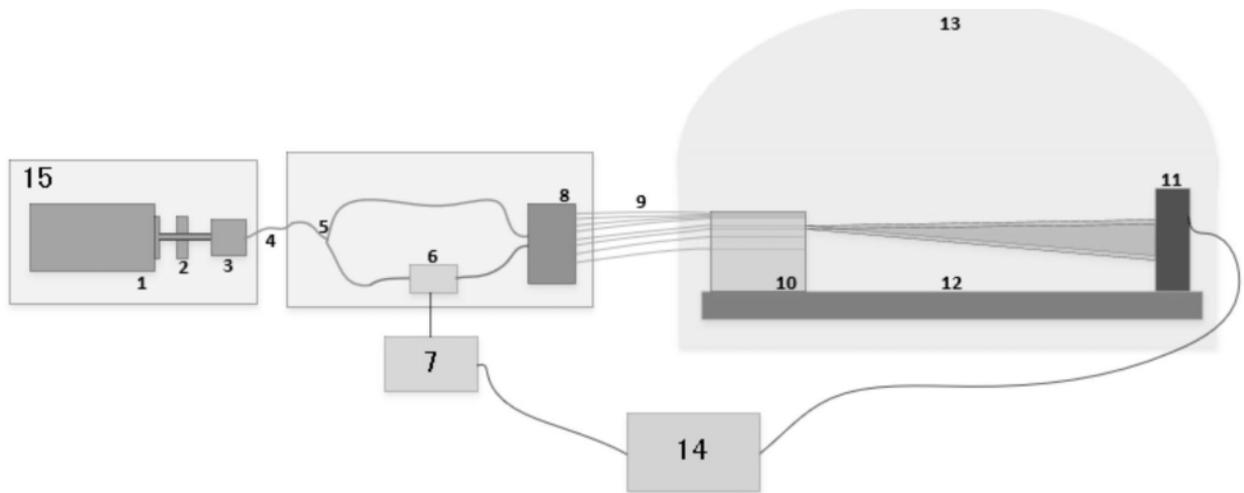


图4

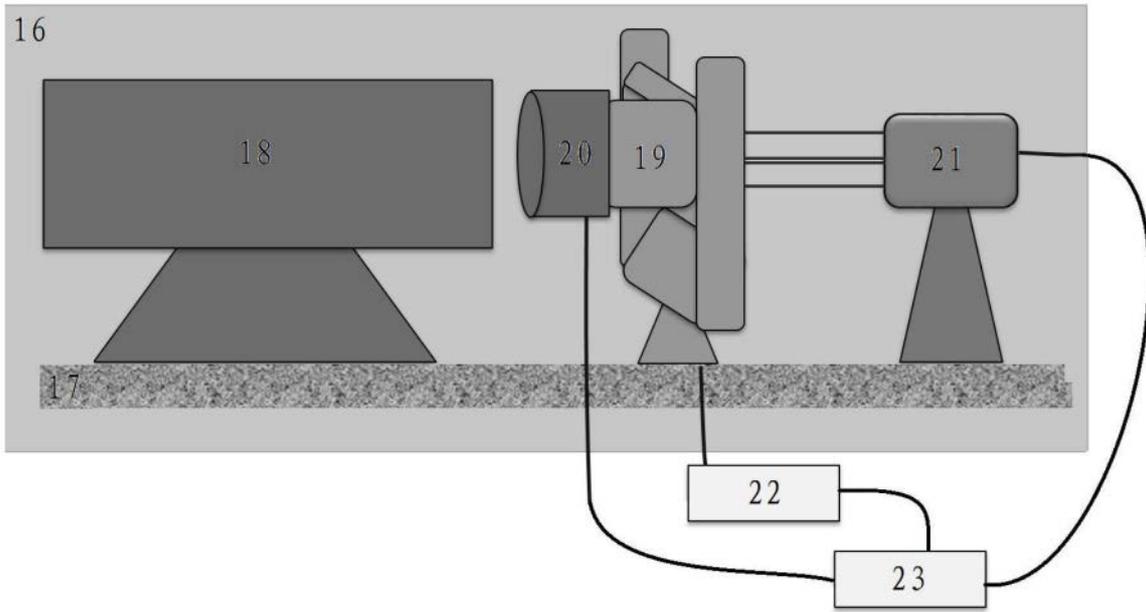


图5

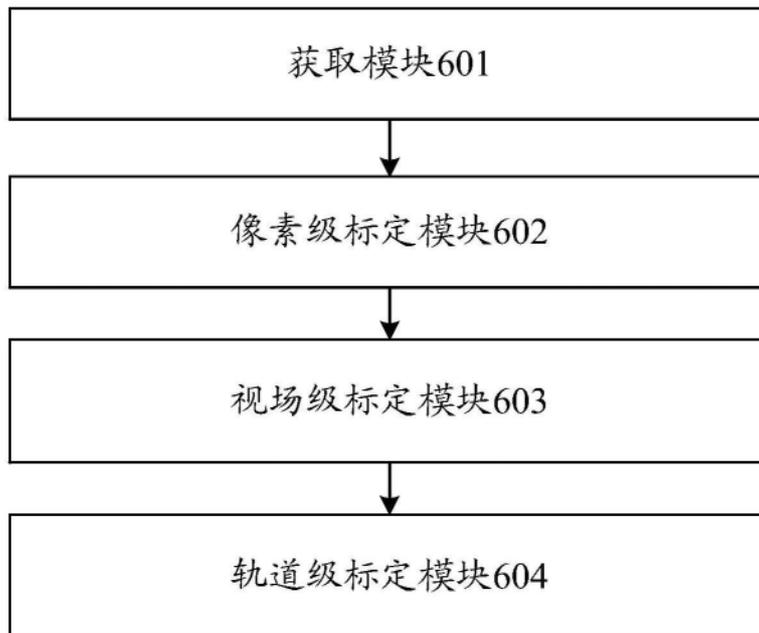


图6