



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111257855 A

(43)申请公布日 2020.06.09

(21)申请号 202010092606.8

(22)申请日 2020.02.14

(71)申请人 北京工业大学

地址 100124 北京市朝阳区平乐园100号

(72)发明人 陈洪芳 汤亮 孙若水 石照耀  
张爽

(74)专利代理机构 北京思海天达知识产权代理  
有限公司 11203

代理人 沈波

(51) Int. Cl.

G01S 7/497(2006.01)

G01S 17/66(2006.01)

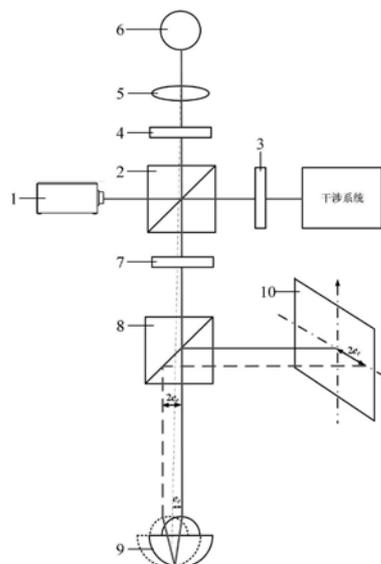
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能影响的分析方法

(57)摘要

本发明公开了位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能影响的分析方法,基于位置敏感探测器的性能分析,研究激光追踪测量系统的跟踪性能分析方法,根据激光追踪测量系统伺服控制的模型,进行位置敏感探测器的性能对激光追踪测量系统的跟踪性能影响规律的研究,建立激光追踪测量系统利用PSD进行跟踪控制的测量系统。建立激光追踪测量系统中PSD测量模型。在Matlab/Simulink仿真环境下搭建激光追踪测量的伺服控制系统模型。位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能的影响分析。在激光追踪测量系统中,位置敏感探测器检测由于猫眼的运动引起的被猫眼反射光束的偏移量,将偏移量信号给电机来控制激光追踪测量系统的方向节式回转轴系,实现跟踪测量。



1. 位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能影响的分析方法,其特征在于:根据激光追踪测量系统伺服控制的模型,进行位置敏感探测器的性能对激光追踪测量系统的跟踪性能影响规律的研究,包括以下步骤:

步骤一:建立激光追踪测量系统利用PSD进行跟踪控制的测量系统;由激光器发出的线偏振光经过偏振分光镜PBS后,p光经过第一四分之一波片QW<sub>1</sub>后得到圆偏振光,该光束为参考光束;而经过偏振分光镜PBS被反射的s光经过第二四分之一波片QW<sub>2</sub>后经过透镜,入射到标准球,反射后再次经过QW<sub>2</sub>,经过PBS透射后,经过第三四分之一波片QW<sub>3</sub>得到圆偏振光;经过分光镜BS透射后被猫眼反射,再次经过BS后被反射的光由PSD接收,PSD将接收到的光信号转换为电信号输出后反馈给激光追踪测量系统控制系统的电机,实现跟踪控制;

步骤二:建立激光追踪测量系统中PSD测量模型;在激光追踪测量系统中,猫眼对光后,经过猫眼反射的光束经BS反射到PSD的中心,PSD的光电处理电路输出模拟信号为零;当猫眼运动时,设猫眼的相对位移为e<sub>r</sub>,则此时被猫眼反射的光束经BS反射到PSD后偏离PSD中心距离为2e<sub>r</sub>;设定(x<sub>0</sub>,y<sub>0</sub>)为照射到PSD上的入射光斑能量中心点坐标,此时PSD的光电处理电路输出模拟信号的电流分别为:

$$I_x = (I_1 + I_4) - (I_2 + I_3) = 2x_0 DG \quad (1)$$

$$I_y = (I_1 + I_2) - (I_3 + I_4) = 2y_0 DG \quad (2)$$

其中,I<sub>x</sub>为x方向输出的电流,I<sub>y</sub>为y方向输出的电流,I<sub>1</sub>—I<sub>4</sub>分别为四个电极输出的电流值,D为光斑直径,G为光电转换系数(单位为A/m<sup>2</sup>), $G = \frac{4I_s}{\pi D^2}$ ;

将PSD光电处理电路在x和y方向输出的电流信号转化成电压信号,并通过低通滤波器后得到:

$$u_x = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} I_x = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} \frac{16 \cdot I_0}{\pi D} e_{rx} \quad (3)$$

$$u_y = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} I_y = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} \frac{16 \cdot I_0}{\pi D} e_{ry} \quad (4)$$

其中,k<sub>e</sub>为电流电压转换系数,τ<sub>op</sub>为低通滤波时间常数;e<sub>rx</sub>为猫眼反射镜运动的位移量e<sub>r</sub>在x方向的投影,e<sub>ry</sub>为猫眼反射镜运动的位移量e<sub>r</sub>在y方向的投影;I<sub>0</sub>为照射到PSD上的光斑强度;

位移电压转换系数表示为:

$$\alpha_p = \frac{16 \cdot I_0}{\pi D} \cdot k_e \quad (5)$$

PSD的传递函数P(s)表示为输出电压与位置偏差的比值,即:

$$P(s) = \frac{U(s)}{D(s)} = \frac{\alpha_p}{\tau_{op} \cdot s + 1} \quad (6)$$

其中,U(s)为PSD的光电转处理电路输出电压,D(s)为猫眼的入射光与反射光之间的偏移距离;

设猫眼与标准球的距离为L,且激光追踪测量光学系统的整体转速为ω,以标准球中心作为原点,入射到猫眼中心光束的线速度为:

$$v=2\omega L \quad (7)$$

此时,测量光束入射到猫眼的位置为:

$$P=vdt=2\omega Ldt \quad (8)$$

激光追踪测量光学系统的传递函数 $L(s)$ 表示测量光束入照射在猫眼的位置与电机的转速比,表示为:

$$L(s)=\frac{P(s)}{\omega(s)}=\frac{2L}{s} \quad (9)$$

步骤三:在Matlab/Simulink仿真环境下搭建激光追踪测量的伺服控制系统模型;

步骤四:位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能的影响分析;根据步骤二所建立的激光追踪测量系统中PSD测量模型,以及步骤三所建立的激光追踪测量的伺服控制系统模型,分析激光追踪测量系统对于输入的单位阶跃信号的动态响应,分析位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能的影响。

2.根据权利要求1所述的位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能影响的分析方法,其特征在于:分析追踪测量系统对于输入的单位阶跃信号的动态响应,研究位置敏感探测器性能对伺服控制控制系统的影响;在激光追踪测量系统中PSD测量模型中,其位移电压转换系数 $\alpha_p$ 反映了入射到PSD的光斑位置、入射光强、以及入射光斑的大小; $\alpha_p$ 决定了PSD光电处理电路输出电流的大小。

3.根据权利要求1所述的位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能影响的分析方法,其特征在于:

激光追踪测量系统的伺服控制系统采用电流-速度-位置三闭环控制;

电流环,用于减小转矩的波动,提高系统刚性加快系统响应;将PSD模块检测出的电机三相定子电流 $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ ,经过Clark和Park坐标变换模块,转换成旋转坐标系下的交轴电流 $I_r$ 和直轴电流 $I_m$ ;将其分别作为电流环磁链电流和转矩电流的反馈电流,与电流环磁链和转矩的参考输入电流进行比较后经过电流环PI调节器生成交轴电压 $U_r$ 和直轴电压 $U_m$ ,再经过Park反变换生成静止坐标系下的两相电压 $U_\alpha$ 和 $U_\beta$ ,最后经过SVPWM模块生成6路PWM控制逆变器生成三相电压驱动电机运行;

速度环,实现抑制系统的干扰、减小直流电动机的惯性、改善系统线性度;将检测出的位置信号经过微分处理生成电机的机械转速作为速度环的反馈转速,与速度环的参考输入转速进行比较后,经过速度环PID调节器生成电流环的转矩参考电流 $I_{ref}$ ;

位置环,采用位置自动控制方式,在指定时刻将被控对象的位置自动的控制在预先给定的目标位置,使控制后的位置与目标位置保持在偏差范围内;将检测出的位置信号经过位置转换生成电机的当前角度 $\theta$ ,与位置环参考输入角度进行比较后经过位置环PID调节器生成速度环的参考转速 $n_{ref}$ 。

## 位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能影响的分析方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种系统跟踪性能分析方法,特别是位置敏感探测器的性能对激光追踪测量系统的跟踪性能分析方法,属于精密测量领域。

### 背景技术

[0002] 激光追踪测量技术作为高精密度测量装备的关键技术,在高端制造业中发挥着越来越重要的作用。激光追踪测量系统利用位置敏感探测器(Position Sensitive Detection, PSD)检测由于猫眼的移动引起的光束偏移,进而通过电机控制万向节式回转轴系运动实现光束保持对猫眼的跟踪。

[0003] 位置敏感探测器是一种高精度的二维位移传感器,可以用于实现对空间目标的快速响应、高精度、平稳的跟踪测量。V.V.Nikulin等基于Lyapunov函数研制了自适应跟踪控制系统,结合位置敏感探测器实现了全局稳定、鲁棒性强的跟踪控制性能。周维虎等提出了一种基于PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)矢量控制原理及SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)算法的精密伺服系统建模的方法,实现了激光跟踪系统的高性能跟踪控制测量。目前,对于位置敏感探测器的性能对激光追踪测量系统的跟踪性能影响的研究比较少。

[0004] 为此,有必要发明一种位置敏感探测器的性能对激光追踪测量系统的跟踪性能的影响的分析方法。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于基于激光追踪测量系统伺服控制的模型,进行位置敏感探测器的性能对激光追踪测量系统跟踪性能的影响规律的研究。对提高激光追踪测量系统的跟踪性能具有重要意义。

[0006] 为达到以上目的,本发明是采取如下技术方案予以实现的:基于位置敏感探测器的性能分析,研究激光追踪测量系统的跟踪性能分析方法,根据激光追踪测量系统伺服控制的模型,进行位置敏感探测器的性能对激光追踪测量系统的跟踪性能影响规律的研究,包括以下步骤:

[0007] 步骤一:建立激光追踪测量系统利用PSD进行跟踪控制的测量系统。如图1所示,由激光器发出的线偏振光经过偏振分光镜PBS后,p光经过第一四分之一波片 $QW_1$ 后得到圆偏振光,该光束为参考光束。而经过偏振分光镜PBS被反射的s光经过第二四分之一波片 $QW_2$ 后经过透镜,入射到标准球,反射后再次经过 $QW_2$ ,经过PBS透射后,经过第三四分之一波片 $QW_3$ 得到圆偏振光。经过分光镜BS透射后被猫眼反射,再次经过BS后被反射的光由PSD接收,PSD将接收到的光信号转换为电信号输出后反馈给激光追踪测量系统控制系统的电机,实现跟踪控制。

[0008] 步骤二:建立激光追踪测量系统中PSD测量模型。在激光追踪测量系统中,猫眼对

光后,经过猫眼反射的光束经BS反射到PSD的中心,PSD的光电处理电路输出模拟信号为零。当猫眼运动时,设猫眼的相对位移为 $e_r$ ,则此时被猫眼反射的光束经BS反射到PSD后偏离PSD中心距离为 $2e_r$ 。设定 $(x_0, y_0)$ 为照射到PSD上的入射光斑能量中心点坐标,此时PSD的光电处理电路输出模拟信号的电流分别为:

$$[0009] \quad I_x = (I_1 + I_4) - (I_2 + I_3) = 2x_0 D G \quad (1)$$

$$[0010] \quad I_y = (I_1 + I_2) - (I_3 + I_4) = 2y_0 D G \quad (2)$$

[0011] 其中, $I_x$ 为x方向输出的电流, $I_y$ 为y方向输出的电流, $I_1$ — $I_4$ 分别为四个电极输出的电流值, $D$ 为光斑直径, $G$ 为光电转换系数(单位为 $A/m^2$ ), $G = \frac{4I_s}{\pi D^2}$ 。

[0012] 将PSD光电处理电路在x和y方向输出的电流信号转化成电压信号,并通过低通滤波器后得到:

$$[0013] \quad u_x = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} I_x = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} \frac{16 \cdot I_0}{\pi D} e_{rx} \quad (3)$$

$$[0014] \quad u_y = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} I_y = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} \frac{16 \cdot I_0}{\pi D} e_{ry} \quad (4)$$

[0015] 其中, $k_e$ 为电流电压转换系数, $\tau_{op}$ 为低通滤波时间常数。 $e_{rx}$ 为猫眼反射镜运动的位移量 $e_r$ 在x方向的投影, $e_{ry}$ 为猫眼反射镜运动的位移量 $e_r$ 在y方向的投影。 $I_0$ 为照射到PSD上的光斑强度。

[0016] 位移电压转换系数表示为:

$$[0017] \quad \alpha_p = \frac{16 \cdot I_0}{\pi D} \cdot k_e \quad (5)$$

[0018] PSD的传递函数 $P(s)$ 表示为输出电压与位置偏差的比值,即:

$$[0019] \quad P(s) = \frac{U(s)}{D(s)} = \frac{\alpha_p}{\tau_{op} \cdot s + 1} \quad (6)$$

[0020] 其中, $U(s)$ 为PSD的光电转处理电路输出电压, $D(s)$ 为猫眼的入射光与反射光之间的偏移距离。

[0021] 设猫眼与标准球的距离为 $L$ ,且激光追踪测量光学系统的整体转速为 $\omega$ ,以标准球中心作为原点,入射到猫眼中心光束的线速度为:

$$[0022] \quad v = 2 \omega L \quad (7)$$

[0023] 此时,测量光束入射到猫眼的位置为:

$$[0024] \quad P = v dt = 2 \omega L dt \quad (8)$$

[0025] 激光追踪测量光学系统的传递函数 $L(s)$ 表示测量光束入照射在猫眼的位置与电机的转速比,表示为:

$$[0026] \quad L(s) = \frac{P(s)}{\omega(s)} = \frac{2L}{s} \quad (9)$$

[0027] 步骤三:在Matlab/Simulink仿真环境下搭建激光追踪测量的伺服控制系统模型。

[0028] 步骤四:位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能的影响分析。根据步

骤二所建立的激光追踪测量系统中PSD测量模型,以及步骤三所建立的激光追踪测量的伺服控制系统模型,分析激光追踪测量系统对于输入的单位阶跃信号的动态响应,研究位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能的影响。

[0029] 本发明的有益效果为:在激光追踪测量系统中,位置敏感探测器检测由于猫眼的运动引起的被猫眼反射光束的偏移量,将偏移量信号给电机来控制激光追踪测量系统的万向节式回转轴系,实现跟踪测量。本发明提出了一种位置敏感探测器性能对激光追踪测量跟踪性能影响的分析方法。根据激光追踪系统中的PSD测量模型,在Matlab/Simulink仿真环境下搭建激光追踪测量系统的伺服控制系统模型,分析PSD的位移电压转换系数对激光追踪测量系统跟踪性能的影响。实验结果表明,位移电压转换系数 $\alpha_p$ 越大,PSD光电转换电路输出电压值的误差越大,对激光追踪测量系统跟踪性能影响越大。当 $\alpha_p=1000$ 时,PSD的响应时间短,PSD光电转换电路输出电压值的误差低,激光追踪测量系统动态响应曲线的超调量低,稳定时间短,系统响应的动态超调误差小。本专利的研究方法为有针对性提高激光追踪测量系统的跟踪性能奠定了理论基础。

## 附图说明

[0030] 图1激光追踪测量系统中利用PSD进行跟踪测量的原理示意图。

[0031] 图中:1激光器、2偏振分光镜即PBS、3第一四分之一波片即QW<sub>1</sub>、4第二四分之一波片即QW<sub>2</sub>、5透镜、6标准球、7第三四分之一波片即QW<sub>3</sub>、8分光镜即BS、9猫眼反射镜、10位置敏感探测器PSD。

[0032] 图2激光追踪测量系统伺服控制系统原理框图。

[0033] 图3在Matlab/Simulink仿真环境下搭建的激光追踪伺服控制系统仿真模型。

## 具体实施方式

[0034] 下面结合附图对本发明做进一步地详细说明,以令本领域技术人员参照说明书文字能够据以实施。

[0035] 步骤一:建立激光追踪测量系统利用PSD进行跟踪控制的测量系统,如图1所示。系统包括激光器、偏振分光镜、四分之一波片、分光镜、标准球以及PSD及其光电处理电路。

[0036] 步骤二:建立激光追踪测量系统中PSD测量模型。在激光追踪测量系统中,设猫眼运动时,猫眼的相对位移为 $e_r$ 。得到PSD光电处理电路输出的模拟信号的电流分别为:

$$[0037] \quad I_x = (I_1 + I_4) - (I_2 + I_3) = 2x_0 D G \quad (10)$$

$$[0038] \quad I_y = (I_1 + I_2) - (I_3 + I_4) = 2y_0 D G \quad (11)$$

[0039] 将PSD光电处理电路在x和y方向输出的电流信号转化成电压信号,并通过低通滤波器后得到:

$$[0040] \quad u_x = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} I_x = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} \frac{16 \cdot I_0}{\pi D} e_{rx} \quad (12)$$

$$[0041] \quad u_y = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} I_y = \frac{k_e}{\tau_{op} \cdot s + 1} \frac{16 \cdot I_0}{\pi D} e_{ry} \quad (13)$$

[0042] 位移电压转换系数表示为:

$$[0043] \quad \alpha_p = \frac{16 \cdot I_0 \cdot k_e}{\pi D} \quad (14)$$

[0044] PSD的传递函数P(s)表示为输出电压与位置偏差的比值,即:

$$[0045] \quad P(s) = \frac{U(s)}{D(s)} = \frac{\alpha_p}{\tau_{op} \cdot s + 1} \quad (15)$$

[0046] 设定猫眼反射镜与标准球的距离为L,且激光追踪测量光学系统的整体转速为 $\omega$ ,以标准球中心作为原点,照射到猫眼反射镜中心的激光束线速度为:

$$[0047] \quad v = 2 \omega L \quad (16)$$

[0048] 此时,测量光束照射到猫眼反射镜的位置为:

$$[0049] \quad P = v dt = 2 \omega L dt$$

$$[0050] \quad (17)$$

[0051] 因此,激光追踪测量光学系统的传递函数L(s)表示为测量光束照射在猫眼反射镜的位置与电机的转速比,表示为:

$$[0052] \quad L(s) = \frac{P(s)}{\omega(s)} = \frac{2L}{s} \quad (18)$$

[0053] 步骤三:在Matlab/Simulink仿真环境下搭建激光追踪测量的伺服控制系统模型,如图2所示,激光追踪测量系统的伺服控制系统采用电流-速度-位置三闭环控制。

[0054] 电流环,用于减小转矩的波动,提高系统刚性加快系统响应。将PSD模块检测出的电机三相定子电流 $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ ,经过Clark和Park坐标变换模块,转换成旋转坐标系下的交轴电流 $I_r$ 和直轴电流 $I_m$ 。将其分别作为电流环磁链电流和转矩电流的反馈电流,与电流环磁链和转矩的参考输入电流进行比较后经过电流环PI调节器生成交轴电压 $U_r$ 和直轴电压 $U_m$ ,再经过Park反变换生成静止坐标系下的两相电压 $U_\alpha$ 和 $U_\beta$ ,最后经过SVPWM模块生成6路PWM控制逆变器生成三相电压驱动电机运行。

[0055] 速度环,实现抑制系统的干扰、减小直流电动机的惯性、改善系统线性度。将检测出的位置信号经过微分处理生成电机的机械转速作为速度环的反馈转速,与速度环的参考输入转速进行比较后,经过速度环PID调节器生成电流环的转矩参考电流 $I_{ref}$ 。

[0056] 位置环,采用位置自动控制方式,在指定时刻将被控对象的位置自动的控制预先给定的目标位置,使控制后的位置与目标位置保持在偏差范围内。将检测出的位置信号经过位置转换生成电机的当前角度 $\theta$ ,与位置环参考输入角度进行比较后经过位置环PID调节器生成速度环的参考转速 $n_{ref}$ 。

[0057] 步骤四:位置敏感探测器性能对激光追踪测量系统跟踪性能的影响分析。根据步骤二所建立的激光追踪测量系统中PSD测量模型,以及步骤三在Matlab/Simulink仿真环境下搭建的激光追踪测量精密伺服控制系统仿真模型,如图3所示。分析追踪测量系统对于输入的单位阶跃信号的动态响应,研究位置敏感探测器性能对伺服控制系统的影响。在步骤二的激光追踪测量系统中PSD测量模型中,其位移电压转换系数 $\alpha_p$ 反映了入射到PSD的光斑位置、入射光强、以及入射光斑的大小。 $\alpha_p$ 决定了PSD光电处理电路输出电流的大小。

[0058] 设定PSD在不同的 $\alpha_p$ 条件下,利用步骤三所建立的仿真模型,针对输入的单位阶跃响应曲线,得到PSD的性能对激光追踪测量系统跟踪性能的影响规律。当 $\alpha_p$ 从1800变化到

1000时,系统响应曲线的超调量 $\sigma$ 从57%下降到16%,响应时间从0.300s下降到0.125s。当 $\alpha_p$ 从1000变化到200时,系统响应曲线的超调量 $\sigma$ 从16%上升到61%,响应时间从0.125s上升到1.300s。因此,当位移电压转换系数 $\alpha_p$ 为1000时,系统响应曲线的超调量低,响应时间短。当位移电压转换系数 $\alpha_p=1000$ 时,系统的动态超调误差为16%,系统动态响应曲线的超调量最低,稳定时间最短,响应的系统动态超调误差最小,可以实现精准地跟踪测量。当 $\alpha_p=1000$ 时,猫眼的运动速度从0.2m/s增加到1.3m/s时,系统响应曲线的超调量 $\sigma$ 从40%下降到10%,响应时间从0.200s下降到0.100s。猫眼的运动速度从1.3m/s增加到2.5m/s时,系统响应曲线的超调量 $\sigma$ 从10%增加到50%,响应时间从0.100s增加到0.625s。可以得到,当位移电压转换系数 $\alpha_p$ 为1000时,且猫眼的运动速度在0.3m/s—2.4m/s的范围内时,系统响应曲线的超调量低,响应时间短,激光追踪测量系统具有良好的跟踪性能。

[0059] 为了进一步证明本专利提出方法的正确性,进行了实验验证,实验结果表明,PSD的位移电压转换系数对光电转换电路输出电压值有显著影响。位移电压转换系数 $\alpha_p$ 越大,PSD光电转换电路输出电压值的误差越大,对激光追踪测量系统跟踪性能影响越大。PSD的位移电压转换系数对光电转换电路的响应时间也有显著影响。位移电压转换系数 $\alpha_p$ 为1000时,PSD光电转换电路的响应时间相对最快。综合分析仿真和实验结果表明,当 $\alpha_p=1000$ 时,PSD的响应时间短,PSD光电转换电路输出电压值的误差低,激光追踪测量系统动态响应曲线的超调量低,稳定时间短,系统响应的动态超调误差小。

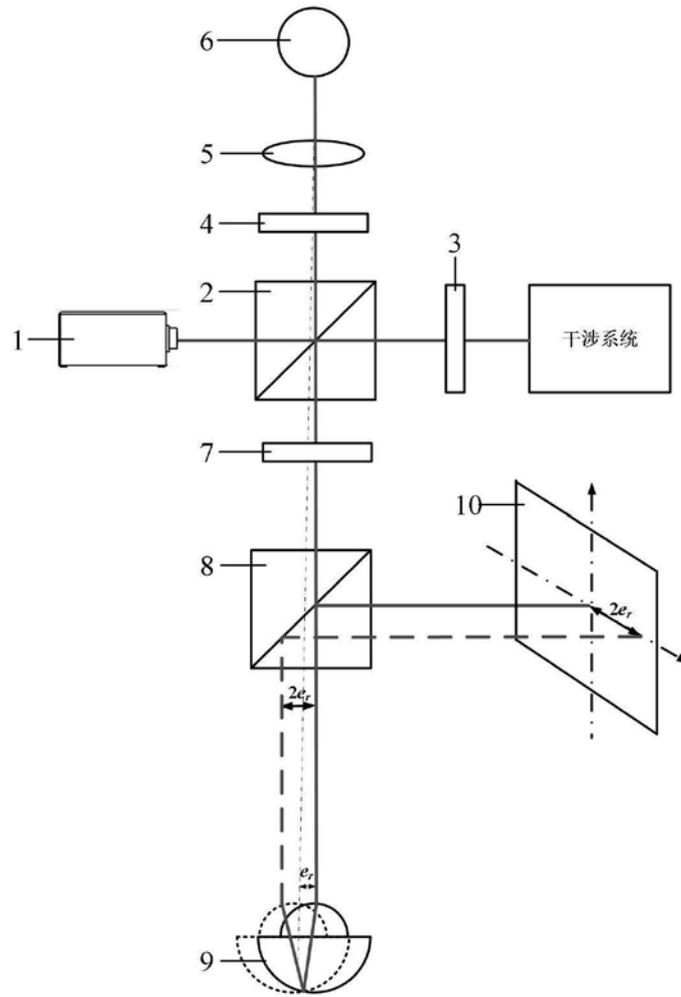


图1

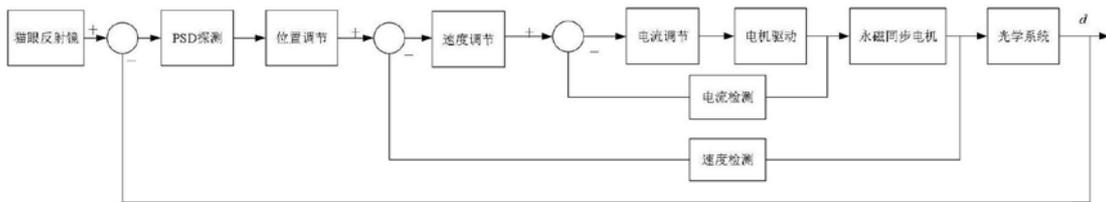


图2

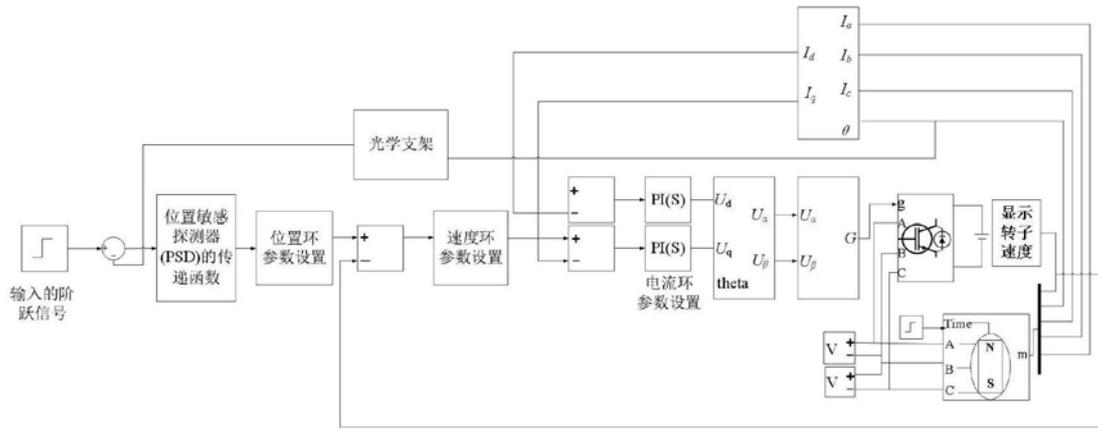


图3