

基于 Zemax 仿真的激光追踪测量光学系统能量分析

陈洪芳¹, 汤亮¹, 孙衍强¹, 石照耀¹, 赵晓飞²

¹北京工业大学, 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124;

²工业和信息化部计算机与微电子发展研究中心(中国软件评测中心), 北京 100048

摘要 为满足精密测量领域精度高、可靠性强、实时性好的测量要求, 提出一种基于 Zemax 仿真的激光追踪测量光学系统能量分析方法。根据激光追踪测量光学系统原理, 建立激光追踪测量光学系统能量模型, 利用 Zemax 仿真分析非理想光学元件对光学系统能量的影响。仿真结果表明, 干涉分光镜的分光比为 5:5 且追踪分光镜的分光比为 7:3 时, 四路干涉信号能量接近, 条纹对比度达到 0.89, 干涉效果最好。偏振分光镜反射率在非理想条件下, 四路干涉信号的条纹对比度会下降。偏振分光镜透射率在非理想条件下不影响四路干涉信号的条纹对比度。该研究对激光追踪测量系统的精度提升、可靠性评估、光学系统设计和光学元件选择具有指导意义。

关键词 测量; 激光追踪测量; Zemax 仿真; 能量分析; 高精度测量

中图分类号 TH71

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0704009

Zemax Simulation Based Energy Analysis of Optical System for Laser Tracking Measurement

Chen Hongfang¹, Tang Liang¹, Sun Yanqiang¹, Shi Zhaoyao¹, Zhao Xiaofei²

¹Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Center of Computer and Microelectronics Industry Development, MIIT (China Software Testing Center),
Beijing 100048, China

Abstract In order to realize real-time measurement with high precision and high reliability, we propose a Zemax simulation based energy analysis method of optical system for laser tracking measurement. Based on the principle of optical system for laser tracking measurement, the energy model is established. The influence of non-ideal optical elements on the energy of optical system is analyzed by Zemax simulation. The simulation results show that the best interference pattern is obtained when the interference beam split ratio is 5:5 and the tracking beam split ratio is 7:3. In this situation, the interference signals from the four receivers have close energy, and the visibility of fringe pattern reaches 0.89. The visibility of fringe pattern of the four received interference signals will degrade when the reflectivity of polarization beam splitters is under non-ideal conditions. The non-ideal transmittance of the polarization beam splitters does not affect the visibility of fringe pattern. The research is useful for the laser tracking measurement system, mainly in terms of precision improvement, reliability evaluation, optical system design, and optical element selection.

Key words measurement; laser tracking measurement; Zemax simulation; energy analysis; high-precision measurement

OCIS codes 120.4820; 260.3160; 230.5440; 080.2720

收稿日期: 2018-03-01; 收到修改稿日期: 2018-03-15

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ17053904)、北京市自然科学基金(3182005)、国家自然科学基金(51635001)

作者简介: 陈洪芳(1980—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事精密测量技术与仪器、激光干涉测量与信号处理方面的研究。E-mail: hfchen@bjut.edu.cn

1 引 言

随着现代工业技术的发展,在大型工件检测、CAD对比测量、机器人校准等领域对测量的精度、范围以及实时性等性能提出了更高要求,激光精密跟踪测量技术以其测量范围大、精度高、实时性好等优点发挥了越来越重要的作用^[1-3]。激光跟踪仪解决了提高坐标测量机标定效率和精度的难题。这种便携式无框架坐标测量装置通过在球坐标系统中测量角度、测量长度并运用相应算法求解得到目标点的空间坐标。国内外许多学者都对激光跟踪系统的关键技术进行了深入研究。Nikulin等^[4]基于Lyapunov函数的自适应控制技术研究了强稳健性、高稳定性的跟踪控制器;Gaska等^[5-6]利用激光跟踪测量系统建立了三坐标测量机的运动残差模型,并确定了三坐标测量机的最优测量空间;殷建等^[7]利用激光跟踪仪证明了旋转轴误差辨识测量方法在误差补偿中的有效性,解决了坐标测量机标定效率和精度提高的难题;谢政委等^[8]利用跟踪仪干涉测距构建空间长度基准,提高了区域坐标控制场的精度;天津大学张国雄教授等研制了多路激光跟踪干涉柔性坐标测量系统^[9]。德国国家计量研究院(PTB)和英国国家物理实验室(NPL)联合研制了专门用于校准数控机床和坐标测量机的激光跟踪系统,干涉系统安装在万向节装置中围绕仅作为干涉系统参考镜的固定球体移动。激光跟踪系统的精度不受机械结构的影响,不涉及旋转角度的测量,摒除了测角误差对整体测量精度的影响,作为反射装置,标准球代替了传统的反射镜,使设备在工作过程中引入最少的误差源。

本文基于激光跟踪测量系统,提出一种基于

Zemax仿真的激光追踪测量光学系统能量分析方法,根据激光追踪测量光学系统原理^[10],利用琼斯矩阵表征光学器件对偏振光的变换特性,建立了激光追踪测量光学系统能量模型,并利用Zemax软件分别对激光追踪测量光学系统中的各个光学元件仿真建模,分别分析了系统中各分光镜的分光比、各偏振分光镜的分光性能对激光追踪测量光学系统能量的影响。

2 激光追踪测量光学系统能量模型

2.1 激光追踪测量光学系统原理

激光追踪测量光学系统原理如图1所示,由激光器发射的激光束经过检偏器 P_1 后得到线偏光,经过偏振分光镜 PBS_1 后,被 PBS_1 透过的p光作为参考光束,经过四分之一波片 QW_1 后转换成圆偏振光,经 BS_1 透射后再经过半波片 HW ,被 PBS_3 透射的p光形成参考光束 O_{r1} ,被 PBS_3 反射的s光形成参考光束 O_{r2} ;经 BS_1 反射的光束,经过 PBS_2 后反射的s光形成参考光束 O_{r3} ,被 PBS_2 透射的p光形成参考光束 O_{r4} 。被 PBS_1 反射的s光作为测量光束,经过四分之一波片 QW_2 后转换成圆偏振光,经过标准球反射后再次经过 QW_2 转换成p光透过 PBS_1 ,此后经过四分之一波片 QW_3 转换成圆偏振光,经过分光镜 BS_2 后,透射的光经过猫眼后被反射,再次经过 BS_2 ,被 BS_2 反射的光照射到四象限探测器PSD,当目标靶镜随机移动时,经由目标靶镜反射的激光光斑位置会发生变化,同时引起激光干涉系统光程差的变化,激光光斑位置的变化由四象限探测器感知,光程差的变化由激光干涉测量系统感知,通过数据采集系统将测量得到的激光光斑位置变化数据和光程差变化数据传送至控制器进行运

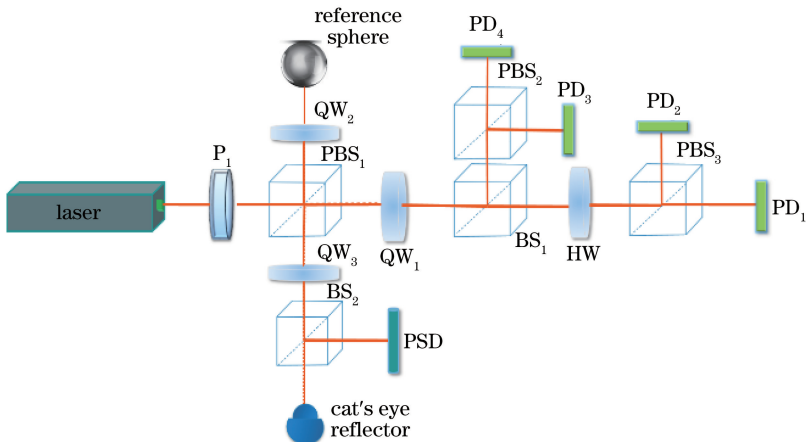


图1 激光追踪测量光学系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of optical system for laser tracking measurement

算和分析,得到运动目标靶镜的实时位置。被 BS₂ 透射的光再次经过 QW₃, 光束转换为 s 光经过 PBS₁ 被反射, 经过 QW₁ 后转换成圆偏振光, 经过 BS₁ 后, 被 BS₁ 透射的光经过 HW 和 PBS₃ 后 p 光透射, 形成测量光束 O₁₁, 与参考光束 O_{r1} 形成干涉光, 由光电探测器 PD₁ 接收, 被 PBS₃ 反射的 s 光形成测量光束 O₁₂, 与参考光束 O_{r2} 形成干涉光, 由光电探测器 PD₂ 接收; 而被 BS₁ 反射的光束经过 PBS₂ 后反射的 s 光形成测量光束 O₁₃, 与参考光束 O_{r3} 形成干涉光, 由光电探测器 PD₃ 接收, 被 PBS₂ 透射的 p 光形成测量光束 O₁₄, 与参考光束 O_{r4} 形成干涉光, 由光电探测器 PD₄ 接收^[11-12]。由 PD₁, PD₂, PD₃ 和 PD₄ 得到的干涉信号相位依次相差 90°。

2.2 激光追踪测量系统能量建模

2.2.1 基于琼斯矩阵表示的光学元件对偏振光的变换特性

琼斯矩阵可以表征光学器件对偏振光的变换特性, 琼斯矩阵中的元素受到某信息量的调制时, 该光学器件出射的偏振光的偏振态也相应受到调制。设由激光器出射的光波传播方向为 z 轴, 光矢量表达式为

$$\mathbf{E} = A_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_0), \quad (1)$$

式中: A_0 为振幅, φ_0 为初相位, ω 为角频率, t 为传播时间; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长。

平面电磁波在 $o\text{-}xyz$ 坐标系中沿 z 轴方向传播, 沿 x 轴和 y 轴两个方向振动。为表征该光波的偏振特性^[13], 将(1)式表示为沿 x 、 y 方向振动的两个独立分量的线性组合:

$$\mathbf{E} = i\mathbf{E}_x + j\mathbf{E}_y, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \mathbf{E}_x = A_{ox} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \\ \mathbf{E}_y = A_{oy} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: φ_x, φ_y 为光波的相位; i 和 j 为 x 轴方向和 y 轴方向; $\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y$ 分别表示 x 轴方向光矢量和 y 轴方向光矢量; A_{ox}, A_{oy} 分别为 x 轴和 y 轴方向振幅。

则由激光器出射的激光束用琼斯矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ox} \exp(i\varphi_x) \\ A_{oy} \exp(i\varphi_y) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

若偏振光 $\begin{bmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \end{bmatrix}$ 通过一个光学元件后, 其偏振态

变为 $\begin{bmatrix} \mathbf{E}'_x \\ \mathbf{E}'_y \end{bmatrix}$, 则有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}'_x \\ \mathbf{E}'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $J_{11}, J_{12}, J_{21}, J_{22}$ 为复常数, \mathbf{J} 为光学元件的琼斯矩阵。

偏振光 $\begin{bmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \end{bmatrix}$ 依次通过 n 个光学元件, 各光学元件的琼斯矩阵分别为 $\mathbf{J}_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 则激光束经过第 n 个光学元件后出射光束可以表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}'_x \\ \mathbf{E}'_y \end{bmatrix} = \mathbf{J}_n \mathbf{J}_{n-1} \cdots \mathbf{J}_2 \mathbf{J}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \end{bmatrix}. \quad (6)$$

2.2.2 激光追踪测量光学系统能量模型

激光追踪测量光学系统中的光学元件包括四分之一波片、半波片、分光镜和偏振分光镜, 利用琼斯矩阵表示光学系统中各个光学元件对偏振光的变换作用。波片的琼斯矩阵表示为^[14-15]

$$\mathbf{J}_{\delta, \theta} = \begin{bmatrix} t_p & \sin \theta \cos \theta [1 - \exp(-i\delta)] \\ \sin \theta \cos \theta [1 - \exp(-i\delta)] & \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \exp(-i\delta) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: θ 为波片快轴与光轴之间的夹角, δ 为波片延迟角。

偏振分光棱镜透射光的琼斯矩阵可以表示为^[16-17]

$$\mathbf{J}_{\text{PBT}} = \begin{bmatrix} t_p & 0 \\ 0 & t_s \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: t_p 表示 p 光的透射系数, t_s 表示 s 光的透射系数。

偏振分光棱镜反射光的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{J}_{\text{PBR}} = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: r_p 表示 p 光的反射系数, r_s 表示 s 光的反射系数。

根据激光追踪测量光学系统原理, 设激光器输出的理想单频激光的琼斯矢量为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} A_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 A_0 为单频激光琼斯矢量的振幅。

根据图 1 所示激光追踪测量光学系统原理, 由激光器发出的激光束到达四分之一波片 QW₁ 后出射的参考光束 \mathbf{E}_r 和测量光束 \mathbf{E}_1 分别为

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{J}_{\text{PBT}_1} \mathbf{J}_{\text{P}_1} \mathbf{E} \exp(i\varphi_r),$$

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{J}_{\text{PBR}_1} \mathbf{J}_{\text{-QW}_3} \mathbf{J}_{\text{NPBT}_2} \mathbf{J}_{\text{Mirror}} \mathbf{J}_{\text{NPBT}_2} \mathbf{J}_{\text{QW}_3} \cdot$$

$$\mathbf{J}_{\text{PBT}_1} \mathbf{J}_{\text{-QW}_2} \mathbf{J}_{\text{Mirror}} \mathbf{J}_{\text{QW}_2} \mathbf{J}_{\text{PBR}_1} \mathbf{J}_{\text{P}_1} \mathbf{E} \exp(i\varphi_1), \quad (11)$$

式中： φ_r, φ_1 分别为参考光和测量光的相位； \mathbf{J}_{P_1} 为检偏器 P_1 的琼斯矩阵； $\mathbf{J}_{PBT_1}, \mathbf{J}_{PBR_1}$ 分别为偏振分光镜 PBS_1 的透射矩阵和反射矩阵； $\mathbf{J}_{QW_2}, \mathbf{J}_{-QW_2}$ 分别为四分之一波片 QW_2 的琼斯矩阵； $\mathbf{J}_{QW_3}, \mathbf{J}_{-QW_3}$ 分别为四分之一波片 QW_3 的琼斯矩阵； \mathbf{J}_{NPBT_2} 为分光镜 BS_2 的透射矩阵； \mathbf{J}_{Mirror} 为标准球和猫眼反射镜的琼斯矩阵。

由光电探测器 $PD_1 \sim PD_4$ 接收得到的四路参考光束的光矢量 $\mathbf{E}_{r_1} \sim \mathbf{E}_{r_4}$ 和四路测量光束的光矢量 $\mathbf{E}_{l_1} \sim \mathbf{E}_{l_4}$ 分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{r_1} &= \mathbf{J}_{PBT_3} \mathbf{J}_{HW} \mathbf{J}_{NPBT_1} \mathbf{J}_{QW_1} \mathbf{E}_r, \\ \mathbf{E}_{r_2} &= \mathbf{J}_{PBR_3} \mathbf{J}_{HW} \mathbf{J}_{NPBT_1} \mathbf{J}_{QW_1} \mathbf{E}_r, \\ \mathbf{E}_{r_3} &= \mathbf{J}_{PBR_2} \mathbf{J}_{NPBR_1} \mathbf{J}_{QW_1} \mathbf{E}_r, \\ \mathbf{E}_{r_4} &= \mathbf{J}_{PBT_2} \mathbf{J}_{NPBR_1} \mathbf{J}_{QW_1} \mathbf{E}_r, \\ \mathbf{E}_{l_1} &= \mathbf{J}_{PBT_3} \mathbf{J}_{HW} \mathbf{J}_{NPBT_1} \mathbf{J}_{QW_1} \mathbf{E}_l, \\ \mathbf{E}_{l_2} &= \mathbf{J}_{PBR_3} \mathbf{J}_{HW} \mathbf{J}_{NPBT_1} \mathbf{J}_{QW_1} \mathbf{E}_l, \\ \mathbf{E}_{l_3} &= \mathbf{J}_{PBR_2} \mathbf{J}_{NPBR_1} \mathbf{J}_{QW_1} \mathbf{E}_l, \\ \mathbf{E}_{l_4} &= \mathbf{J}_{PBT_2} \mathbf{J}_{NPBR_1} \mathbf{J}_{QW_1} \mathbf{E}_l, \end{aligned} \quad (12)$$

式中： \mathbf{J}_{QW_1} 为四分之一波片 QW_1 的琼斯矩阵； $\mathbf{J}_{NPBT_1}, \mathbf{J}_{NPBR_1}$ 为分光镜 BS_1 的透射矩阵和反射矩阵； \mathbf{J}_{HW} 为半波片 HW 的琼斯矩阵； $\mathbf{J}_{PBT_3}, \mathbf{J}_{PBR_3}$ 分别为偏振分光镜 PBS_3 的透射矩阵和反射矩阵； $\mathbf{J}_{PBT_2}, \mathbf{J}_{PBR_2}$ 分别为偏振分光镜 PBS_2 的透射矩阵和反射矩阵。

依据干涉条纹对比度的定义，激光追踪测量光学干涉系统得到的相位依次相差 90° 的四路干涉信号的条纹对比度分别为

$$K_{PD_1} = \frac{2(E_{r_1}/E_{l_1})}{1 + (E_{r_1}/E_{l_1})^2}, \quad (13)$$

$$K_{PD_2} = \frac{2(E_{r_2}/E_{l_2})}{1 + (E_{r_2}/E_{l_2})^2}, \quad (14)$$

$$K_{PD_3} = \frac{2(E_{r_3}/E_{l_3})}{1 + (E_{r_3}/E_{l_3})^2}, \quad (15)$$

$$K_{PD_4} = \frac{2(E_{r_4}/E_{l_4})}{1 + (E_{r_4}/E_{l_4})^2}. \quad (16)$$

由此得到激光追踪测量光学系统四路干涉信号的能量分别为

$$\begin{aligned} I_A &= |\mathbf{E}_{r_1} + \mathbf{E}_{l_1}|^2, \\ I_B &= |\mathbf{E}_{r_2} + \mathbf{E}_{l_2}|^2, \\ I_C &= |\mathbf{E}_{r_3} + \mathbf{E}_{l_3}|^2, \\ I_D &= |\mathbf{E}_{r_4} + \mathbf{E}_{l_4}|^2. \end{aligned} \quad (17)$$

3 基于 Zemax 仿真的激光追踪测量光学系统建模

根据激光追踪测量光学系统原理，利用 Zemax 软件分别对系统中每个光学元件进行仿真，再进行顺序调整及多重结构参数的设置，建立基于 Zemax 的激光追踪测量光学系统模型。在 Zemax 软件中通过琼斯矩阵来建立检偏器、四分之一波片、半波片等光学元件的模型。根据第 2 节中利用激光追踪测量光学系统原理建立的光学系统能量模型，建立基于 Zemax 的激光追踪测量光学系统仿真模型^[18-19]。具体建模流程如图 2 所示。

首先设定激光追踪测量的光学系统参数，即波长、通光口径；然后利用琼斯矩阵对检偏器 P_1 进行模拟仿真，随后在 Zemax 的非顺序和顺序光线跟踪模式下进行建模，实现 PBS 的仿真，通过镀膜的方式使 p 光与 s 光分离，实现偏振分光镜的分光功能。利用琼斯矩阵对四分之一波片和半波片进行模拟仿真。设计标准球的仿真模型，使标准球作为平面反射镜折转光路。而后在 Zemax 的非顺序和顺序光线跟踪模式下进行建模，在分界面处设置涂层，通过镀膜的方式使两束光分离，实现分光镜 BS 的分光功能。将猫眼反射镜作为平面反射镜折转光路，根据激光追踪测量光学系统原理，调整光学元件顺序并设置多重结构参数，设计各个光学元件之间的结构，得到激光追踪测量光学系统的仿真结构图及激光干涉图，如图 3 所示。

4 光学元件性能对激光追踪测量光学系统能量的影响

4.1 分光镜分光比对激光追踪测量光学系统能量的影响

根据 Zemax 仿真模型，分析激光追踪测量系统中的分光镜在非理想情况下对光学系统能量的影响。如图 4 所示，干涉分光镜 BS_1 的分光比由 3:7 变为 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2，追踪分光镜 BS_2 分光比的不同导致四路参考光束和四路测量光束能量发生变化。可以看出，当干涉分光镜 BS_1 的分光比为 5:5 时，四路干涉信号能量接近，但改变 BS_1 分光比并不能改变任意两路干涉信号能量的比值关系。

如图 5 所示， BS_1 分光比固定时， BS_2 分光比由 3:7 变为 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2，激光追踪测量系统干涉信号对比度发生变化。可以看出，当 BS_1 分光比固定时，四路干涉信号的条纹对比度随着 BS_2 透

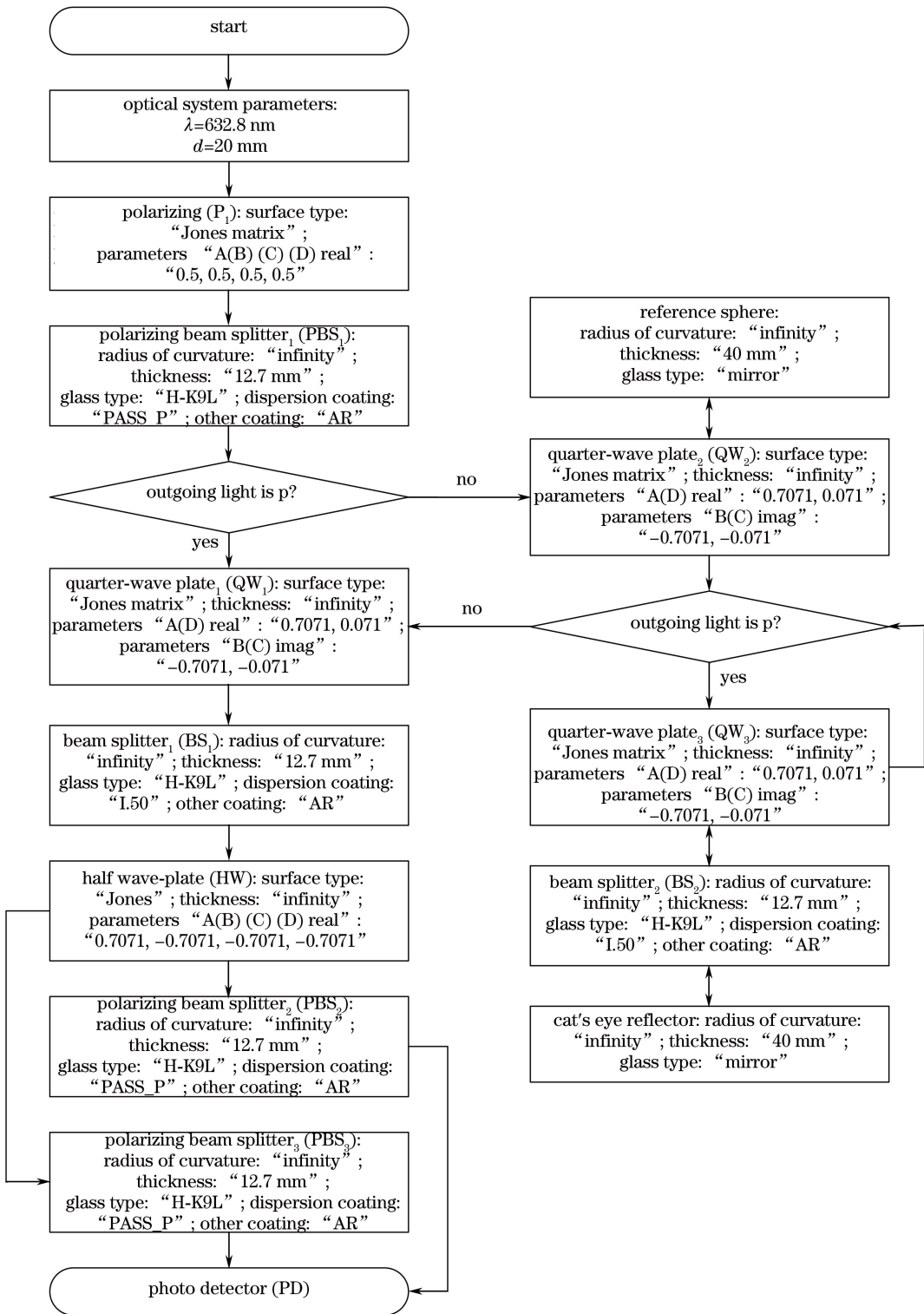


图 2 基于 Zemax 的激光追踪测量光学系统具体建模流程

Fig. 2 Flow chart of Zemax-based modeling for laser tracking measurement optical system

射/反射比值的增加而增加。因此,当 BS₂ 的透射/反射比值为 10:0 时得到的干涉条纹最为清晰;但是,根据激光追踪测量原理,追踪分光镜 BS₂ 的反射光应照射到四象限探测器上实现对目标靶镜的追踪测量,BS₂ 透射/反射比值不能过高。经过实验

证^[3],BS₂ 的分光比为 7:3 时,满足追踪测量要求。

不考虑其他因素对光路的影响,BS₁ 分光比为 5:5、BS₂ 分光比为 7:3 时,在 PD₁、PD₂、PD₃、PD₄ 处接收的干涉信号能量接近,条纹对比度达到 0.89,条纹相对最为清晰,干涉效果最好。

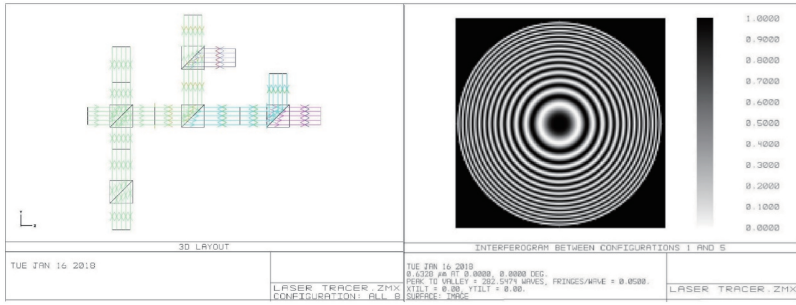


图 3 基于 Zemax 仿真的激光追踪测量光学系统模型仿真图

Fig. 3 Model simulation diagram of the optical system for laser tracking measurement based on Zemax

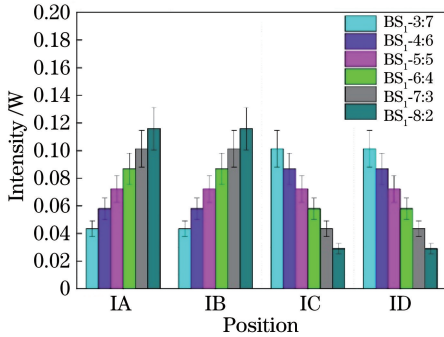


图 4 BS 分光比对激光追踪测量系统能量的影响

Fig. 4 Effect of beam splitting ratio on the energy of laser tracking measurement system

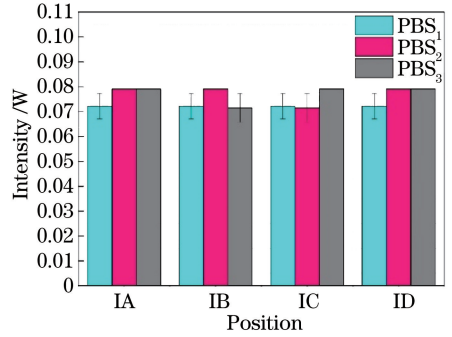


图 6 单个 PBS 的反射率变化对激光追踪测量系统能量的影响

Fig. 6 Effect of the reflectivity change of single polarizing beam splitter on the energy of laser tracking measurement system

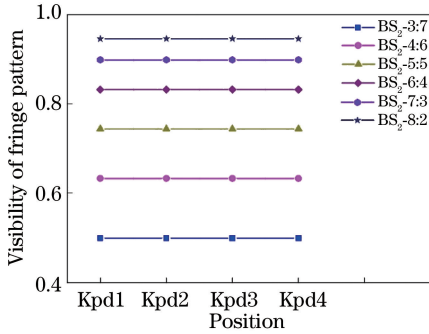


图 5 BS 分光比对激光追踪测量系统干涉信号对比度的影响

Fig. 5 Effect of beam splitting ratio on the visibility of fringe pattern of laser tracking measurement system

4.2 偏振分光镜分光性能对激光追踪测量光学系统能量的影响

4.2.1 PBS 反射率对激光追踪测量系统能量的影响

根据上述分析可知,激光追踪测量光学系统 BS_1 的分光比为 5:5、 BS_2 的分光比为 7:3 时,系统的干涉条纹对比度最好。在这种条件下分析 PBS 的反射率对系统能量的影响。图 6 和图 7 为 PBS 反射率对激光追踪测量系统能量的影响。在保证 PBS 透射率相同的前提下,改变不同位置的 PBS 反射率,导致激光追踪测量光学系统最后接收的能量发生变化。图 8 为 PBS 反射率对激光追踪测

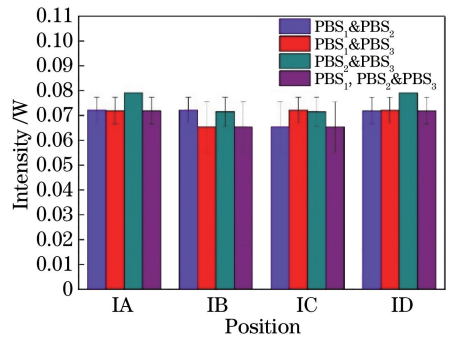


图 7 多个 PBS 的反射率变化对激光追踪测量系统能量的影响

Fig. 7 Effect of the reflectivity change of multiple polarizing beam splitters on the energy of laser tracking measurement system

量系统干涉信号对比度的影响, PBS_1 的反射率相对于 PBS_2 和 PBS_3 而言,对整个激光追踪测量系统的能量影响最大。 PBS_1 的反射率变化过程导致得到的四路干涉信号的条纹对比度从 0.99992 减小到 0.98073。在接收器的容限范围内, PBS_2 和 PBS_3 的反射率在非理想情况下,接收的干涉信号的条纹对比度仍为 0.99992,并无降低,对干涉信号影响不大。

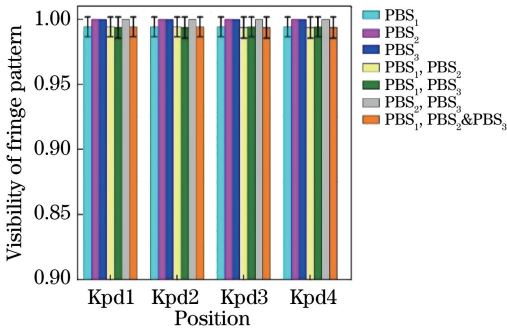


图 8 PBS 的反射率变化对激光追踪测量系统干涉信号对比度的影响

Fig. 8 Effect of the reflectivity change of polarizing beam splitter on the visibility of fringe pattern of laser tracking measurement system

4.2.2 PBS 透射率对激光追踪测量系统能量的影响

在激光追踪测量光学系统中,不同位置的 PBS 透射率不同,对激光追踪测量光学系统能量的影响也不同。图 9 和图 10 为 PBS 透射率对激光追踪测量系统能量的影响。从图中可以看出,PBS₁、PBS₂ 和 PBS₃ 的透射率对整个光路的影响均不大,在其变化过程中,PD₁、PD₂、PD₃、PD₄ 四个接收器得到的干涉信号的条纹对比度仍均为 0.99992,没有发生变化。在 PD₁、PD₂、PD₃、PD₄ 所在位置的接收器的接收能力范围内,PBS₁、PBS₂ 和 PBS₃ 的透射率在非理想条件下不会影响激光追踪测量光学系统的能量。

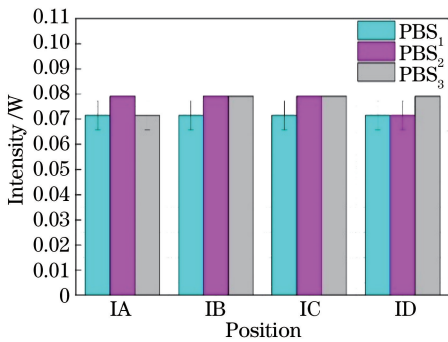


图 9 单个 PBS 的透射率变化对激光追踪测量系统能量的影响

Fig. 9 Effect of transmittance change of single polarizing beam splitters on the energy of laser tracking measurement system

5 结 论

提出了一种基于 Zemax 仿真的激光追踪测量光学系统能量分析方法。根据激光追踪测量的光学系统原理,建立 Zemax 仿真模型,利用条纹对比度反映能量的变化,分析分光棱镜的分光比和非理想

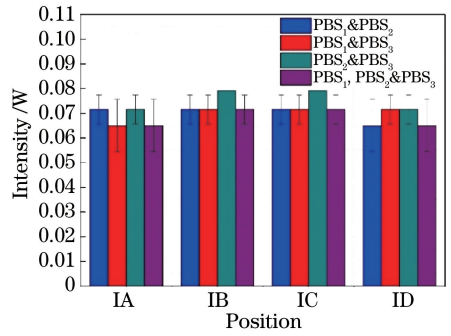


图 10 多个 PBS 的透射率变化对激光追踪测量系统能量的影响

Fig. 10 Effect of transmittance change of multiple polarizing beam splitters on the energy of laser tracking measurement system

型偏振分光镜的分光性能对激光追踪测量光学系统能量的影响。结果表明,干涉分光镜的分光比为 5:5 且追踪分光镜的分光比为 7:3 时,四路接收的干涉信号能量接近,干涉效果最好。在此基础上,不同位置的偏振分光镜的反射率对整个激光追踪测量系统的能量影响不同。偏振分光镜反射率在非理想条件下会导致得到的四路干涉信号的条纹对比度下降。偏振分光镜的透射率对整个光路的能量影响均不大,在透射率变化过程中,四个接收器得到的干涉信号的条纹对比度几乎不变。提出的基于 Zemax 仿真的激光追踪测量光学系统能量分析方法实时性好、精度高,适用于精密追踪测量系统的研究,可有针对性地调整激光追踪测量系统中的光学元件,为光学系统精度提升、可靠性评估提供了理论支持。

参 考 文 献

- [1] Dong D F, Zhou W H, Ji R Y, *et al.* Design of precise tracking system of laser tracker[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 309-318. 董登峰,周维虎,纪荣祚,等.激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J].光学精密工程,2016,24(2):309-318.
- [2] Zhou G F, Li X X, Li D S, *et al.* Large-scale compact range on-site alignment based on laser tracker measurement network[J]. Measurement, 2015, 68: 143-154.
- [3] Chen H F, Sun Y Q, Wang Y W, *et al.* High-precision laser tracking measurement method and experimental study[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0104003. 陈洪芳,孙衍强,王亚韦,等.高精度激光追踪测量方法及实验研究[J].中国激光,2018,45(1):0104003.

- [4] Nikulin V V, Bouzoubaa M, Skormin V A, *et al.* Lyapunov-based decentralized adaptive control for laser beam tracking systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4): 1191-1200.
- [5] Gańska A, Krawczyk M, Kupiec R, *et al.* Modeling of the residual kinematic errors of coordinate measuring machines using LaserTracer system[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73: 497-507.
- [6] Śladek J, Gańska A, Olszewska M, *et al.* Virtual coordinate measuring machine built using LaserTracer system and spherical standard[J]. Metrology and Measurement Systems, 2013, 20: 77-86.
- [7] Yin J, Li M. Errors measurement for rotation axis of five-axis machine tool based on laser tracker[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0408005.
殷建, 李明. 基于激光跟踪仪的五轴机床旋转轴误差测量[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408005.
- [8] Xie Z W, Lin J R, Zhu J G, *et al.* Accuracy enhancement method for coordinate control field based on space length constraint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0108005.
谢政委, 林嘉睿, 郑继贵, 等. 基于空间长度约束的坐标控制场精度增强方法[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0108005.
- [9] Li X H. Design of laser tracking system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.
李杏华. 激光跟踪系统的设计[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [10] Chen H F, Ding X M, Zhong Z, *et al.* Effect of nonlinearity by the rotation of the polarizer in laser heterodyne interferometric[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(9): 1281-1285.
陈洪芳, 丁雪梅, 钟志, 等. 激光外差干涉检偏器旋转误差对非线性误差的影响[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1281-1285.
- [11] Liu Z J, Cui L S, Xie D L. Theory analysis and measurement for interference fringes of laser Doppler velocimeter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0804001.
刘子君, 崔骊水, 谢代梁. 激光多普勒流速仪的干涉条纹理论分析及测量[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0804001.
- [12] Lu S, Yang K M, Zhu Y, *et al.* Analysis and controller design of fringe phase locking system for interference lithography[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(1): 0123001.
鲁森, 杨开明, 朱煜, 等. 干涉条纹相位锁定系统分析及其控制[J]. 光子学报, 2017, 46(1): 0123001.
- [13] Shi S X. Physical optics and applied optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000: 23-24.
石顺祥. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000: 23-24.
- [14] Liao Y B. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 57.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 57.
- [15] Zhao K H, Zhong X H. Optics [M]. Beijing: Peking University Press, 2001: 257.
赵凯华, 钟锡华. 光学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 257.
- [16] Zhang S, Huang D X, Yin D L, *et al.* Design of a novel polarization beam splitting prism and its applications[J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(1): 46-49.
张晟, 黄德修, 殷东亮, 等. 一种新型偏振分光棱镜的设计和应用[J]. 光电工程, 2003, 30(1): 46-49.
- [17] Deng Y L, Li X J, Geng Y F, *et al.* Influence of nonpolarizing beam splitters on nonlinear error in heterodyne interferometers[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112008.
邓元龙, 李学金, 耿优福, 等. 非偏振分光镜对外差干涉仪非线性误差的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112008.
- [18] ZEMAX Development Corporation. ZEMAX Optical Design Program User's Guide [EB/OL]. [2018-02-03]. <http://www.zemax.com>.
- [19] Ma C, Cheng D W, Wang Q W, *et al.* Design on optical system for liquid lens focusing fundamental camera based on Gaussian brackets method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1122001.
马晨, 程德文, 王其为, 等. 基于高斯括号法的液体透镜调焦眼底相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1122001.