

文章编号: 1001-3806(2016)06-0834-06

激光雷达坐标测量系统的测角误差分析

亢甲杰, 张福民, 曲兴华*

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了精确地设计激光雷达坐标测量系统仪器, 在研究激光雷达坐标测量系统测量原理和结构的基础上, 建立了引入两轴垂直度误差、反射镜倾斜误差和反射镜入射激光束倾斜误差这三项主要系统误差的测角误差模型。由理论分析可知, 在距离10m处, 这三项系统误差各自引入的单点坐标测量误差最大值分别为124.1 μm 、447.9 μm 和242.4 μm 。结果表明, 在激光雷达坐标测量系统设计中, 为保证在大空间测量中仍有很高测量精度, 必须严格控制两轴垂直度误差、反射镜倾斜误差和反射镜入射激光束倾斜误差, 并根据建立的误差模型进行参量标定和误差补偿。

关键词: 测试与计量; 激光雷达; 测角误差; 误差分析

中图分类号: TH721; TN958.98

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.013

Angle measuring error analysis of coordinate measuring system of laser radar

KANG Jiajie, ZHANG Fumin, QU Xinghua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to design coordinate measuring system of laser radar precisely, based on the measuring principle and structure of laser radar coordinate measuring system, an angle measuring error model was built with three main system errors of perpendicularity error of pitch axis and azimuth axis, tilt error of reflector and tilt error of incident laser beam. After theoretical analysis, the maximum error values of single point coordinate measurement from 10m, were 124.1 μm , 447.9 μm and 242.4 μm . The results show that, in the design of laser radar coordinate measuring system, it is necessary to strictly control system error parameters like perpendicularity error of pitch axis and azimuth axis, tilt error of reflector and tilt error of incident laser beam in order that the measuring system has high measurement accuracy when measuring in large space. Besides, parameter calibration and error compensation are required to improve the measurement accuracy.

Key words: measurement and metrology; laser radar; angle measuring error; error analysis

引言

激光雷达坐标测量系统是目前最新型的空间大尺寸坐标测量系统, 它集激光干涉测距技术、精密机械技术、光电检测技术、计算机控制技术于一体, 可以实现对空间目标的3维坐标测量和形貌扫描测量^[1]。激光雷达具有测量精度高、实时快速、且无需合作目标等特点, 广泛应用于汽车和飞机制造、机械制造、航空航天和设备装配等精密工业领域。由于激光雷达测量系统采用无接触测量技术, 无需合作目标定点安装, 更加有利于工业现场测量和大尺寸、无规则形状工件测量, 因此, 越来越多的领域开始引进激光雷达测量系统, 使得

其拥有广阔的发展前景^[2-4]。

激光雷达坐标测量系统采用球坐标测量技术, 主要由连续调频激光测距系统、目标表面测量特性与补偿系统、双轴精密位置转台三部分组成。其中双轴精密位置转台是整个系统的主要机械机构, 它不仅提供球坐标测量的角度测量值, 而且保证激光雷达实现空间精确定位和扫描测量, 其系统误差和动态性能直接影响激光雷达测量系统的性能和精度^[5-6]。为了更好地研究和设计激光雷达坐标测量系统, 本文中主要对双轴精密位置转台影响角度测量精度的系统误差进行建模分析, 寻找有效、快速提高系统角度测量精度的途径, 为更好地开发和设计激光雷达坐标测量系统提供技术支持。

1 激光雷达测量系统测量模型

激光雷达系统如图1所示, 其中在水平轴系和垂直轴系端部各安装有高精度圆光栅角度编码器; 俯仰轴上安装有高反射率的平面反射镜, 激光器与光纤光

基金项目: 国家自然科学基金专项基金资助项目 (51327006)

作者简介: 亢甲杰(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事测试计量技术及仪器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: quxinghua@tju.edu.cn

收稿日期: 2015-10-11; 收到修改稿日期: 2015-12-23

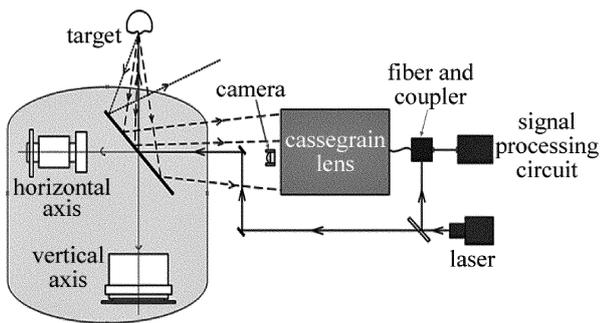


Fig. 1 Diagram of laser radar system

路系统位于转台结构下方,经调制的激光束沿方位轴的轴线入射到反射镜反射基点,经反射后进入到测量空间,控制方位轴和俯仰轴旋转实现坐标测量以及扫描测量的功能。

图2所示为激光雷达坐标测量系统的测量模型。利用该系统测量空间某点 P 时,其实际坐标值为 (x, y, z) ,由于存在测距和测角误差,其坐标测量值为 $P'(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$,其中 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为各个坐标分量误差值^[7]。

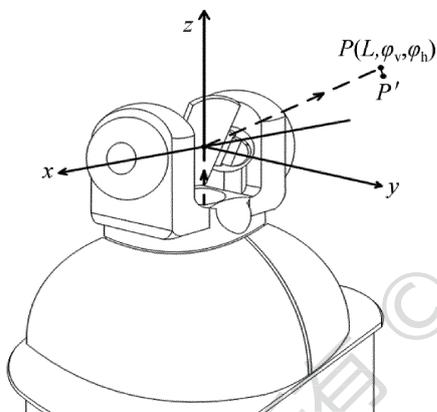


Fig. 2 Measuring model of laser radar system

可以用 PP' 的空间长度值来表示单点测量精度,即:

$$e^2 = |PP'|^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 \quad (1)$$

激光雷达坐标测量系统采用球坐标测量方法,经转化为直角坐标系下的坐标为:

$$\begin{cases} x = L \cos \varphi_v \cos \varphi_h \\ y = L \cos \varphi_v \sin \varphi_h \\ z = L \sin \varphi_v \end{cases} \quad (2)$$

式中, φ_v 为测得的垂直角, φ_h 为测得的水平角, L 为基准点到被测点的距离。分析单点测量精度,利用误差理论对左边转换各式求偏导得:

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial L} & \frac{\partial x}{\partial \varphi_h} & \frac{\partial x}{\partial \varphi_v} \\ \frac{\partial y}{\partial L} & \frac{\partial y}{\partial \varphi_h} & \frac{\partial y}{\partial \varphi_v} \\ \frac{\partial z}{\partial L} & \frac{\partial z}{\partial \varphi_h} & \frac{\partial z}{\partial \varphi_v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_L \\ \delta_h \\ \delta_v \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, δ_L 表示测距误差, δ_h 和 δ_v 分别表示水平和垂直测角误差。由(2)式可求出(3)式,代入(1)式可以得到激光雷达坐标测量系统的单点测量精度与测距误差和测角误差的明确关系为:

$$e^2 = |PP'|^2 = [1 \quad L^2 \cos^2 \varphi_v \quad L^2] \begin{bmatrix} \delta_L^2 \\ \delta_h^2 \\ \delta_v^2 \end{bmatrix} = \delta_L^2 + \delta_h^2 \cdot L^2 \cos^2 \varphi_v + \delta_v^2 \cdot L^2 \quad (4)$$

由上式可以看出,测距误差是1:1的传递到单点测量误差的,相比较而言,测角误差对单点精度影响较大,其造成的单点误差值随被测目标距离增加而增大,水平测角误差对单点测量精度影响因垂直角的不同而不同。从设计角度来看,严格控制测角精度、尽量减小测角误差是保证激光雷达坐标测量系统实现高精度测量极其重要的方面。

2 系统误差分析

从结构上来看,水平轴系、垂直轴系、圆光栅编码器、反射镜组成了激光雷达测量头,在理想状态下,各个部件要满足如下关系^[8]:(1)水平轴线与垂直轴线正交于空间一点;(2)激光束与垂直轴线重合;(3)反射镜镜面与水平轴轴线重合。

在实际情况下,由于机械加工误差,机械装调误差的影响,各个零部件之间的关系不可能达到理想状态,各部件位置关系的偏差会导致系统误差存在,这些系统误差会极大地影响测角精度,最终影响激光雷达坐标测量系统测量精度^[9-10]。

激光雷达转台机械结构的系统误差项繁多,共同影响其测角精度,不过各项系统误差均有规律可循,接下来分析主要系统误差对测角精度的影响规律。

2.1 两轴垂直度误差

当测量头在初始位置时,理想情况下激光雷达测量系统的坐标系 x 轴与水平轴线重合, z 轴与垂直轴线重合, y 轴方向位于水平面内并且与 x 轴垂直,初始位置时,出射光线与 y 轴重合。但由于零部件的加工误差,轴、轴承以及轴孔的配合公差等因素,实际情况中,水平轴和垂直轴无法保证垂直关系,存在垂直度误差 Δi , Δi 主要对水平测角精度有影响,对垂直测角精度的影响可以忽略不计^[11]。

图3是两轴垂直度误差几何模型示意图,假设空间任意一点 P ,其测量角分别为水平角 φ_h 、垂直角 φ_v 。由于存在垂直度误差 Δi ,会引入水平测角误差 $\Delta \varphi_h$,并且存在两个坐标系 $O-xyz$ 和 $O-x'yz'$,两个坐标系存在着纯粹的旋转关系,可以利用矢量分析法来分析其

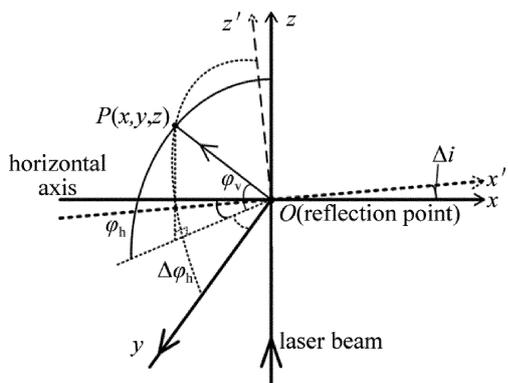


Fig. 3 Perpendicularity error of two axes

造成的测角误差规律。

假设初始位置是反射镜法线单位矢量为 $\vec{n}_0 = (0, \sqrt{2}/2, -\sqrt{2}/2)^T$, 即出射光线方向沿坐标系 y 轴方向。测量空间点 P 的垂直测角为 φ_v , 水平测角为 φ_h , 结合实际测量情况容易知道, 在坐标系 $O-x'y'z'$ 下, x' 轴转动 $\varphi_v/2$ 角, 在坐标系 $O-xyz$ 下, z 轴转动 $(\varphi_h - 90^\circ)$ 角 (右手定则), 那么当测量头稳定后, 在 $O-xyz$ 坐标系下的反射镜法线矢量为:

$$\vec{n} = \mathbf{R}_z(z, \varphi_h - 90^\circ) \cdot \mathbf{R}_y(-\Delta i) \cdot \mathbf{R}_{x'}(x', \frac{\varphi_v}{2}) \cdot \vec{n}_0 \quad (5)$$

式中, $\mathbf{R}_{x'}(x', \varphi_v/2)$ 表示绕 x' 轴旋转 $\varphi_v/2$ 角度的坐标转换矩阵; $\mathbf{R}_y(-\Delta i)$ 表示坐标系 $O-x'y'z'$ 绕 y 轴旋转 $-\Delta i$ 角度 (右手定则) 后转化为坐标系 $O-xyz$ 的旋转矩阵; $\mathbf{R}_z(z, \varphi_h - 90^\circ)$ 表示绕 z 轴旋转 $(\varphi_h - 90^\circ)$ 角的坐标转换矩阵^[12]。具体表达式如下:

$$\mathbf{R}_{x'}(x', \frac{\varphi_v}{2}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \frac{\varphi_v}{2} & -\sin \frac{\varphi_v}{2} \\ 0 & \sin \frac{\varphi_v}{2} & \cos \frac{\varphi_v}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_y(-\Delta i) = \begin{bmatrix} \cos \Delta i & 0 & \sin \Delta i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Delta i & 0 & \cos \Delta i \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_z(z, \varphi_h - 90^\circ) = \begin{bmatrix} \sin \varphi_h & \cos \varphi_h & 0 \\ -\cos \varphi_h & \sin \varphi_h & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

带入到(5)式中, 经计算得到 $O-xyz$ 坐标系下的反射镜法线向量:

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} -\cos V_m \sin \varphi_h \sin \Delta i + \sin V_m \cos \varphi_h \\ \cos V_m \cos \varphi_h \sin \Delta i + \sin V_m \sin \varphi_h \\ -\cos V_m \cos \Delta i \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $V_m = (\varphi_v + 90^\circ)/2$ 。设反射镜入射光矢量 $\vec{l}_i = (0, 0, 1)^T$, 反射镜法线矢量 $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$, 反射镜出

射光矢量为 \vec{l}_o , 根据光线反射定律矢量形式 $\vec{l}_o = \vec{N} \cdot \vec{l}_i$ 可求出射光矢量为^[13]:

$$\vec{l}_o = (-2n_x n_z, -2n_y n_z, 1 - 2n_z^2)^T \quad (10)$$

进一步求出水平角和垂直角的真实值:

$$\varphi_{h,r} = \arccos \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} = \arccos \frac{-2n_x n_z}{\sqrt{(-2n_x n_z)^2 + (-2n_y n_z)^2}} = \arccos \frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} \quad (11)$$

$$\varphi_{v,r} = \arctan \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \quad (12)$$

水平测角误差 $\Delta h = \varphi_h - \varphi_{h,r}$, 因为 Δh 角很小, 做如下近似计算:

$$\Delta h \approx \sin \Delta h = \sin(\varphi_h - \varphi_{h,r}) \quad (13)$$

将(9)式、(11)式带入(13)式中计算, 化简可以得到水平测角误差规律的表达式为:

$$\Delta h \approx -\frac{\Delta i}{\tan \frac{\varphi_v + 90^\circ}{2}} \quad (14)$$

同理, 垂直角测角误差规律可以近似求出其表达式为:

$$\Delta v \approx \frac{1}{2} \Delta i^2 \tan \varphi_v \quad (15)$$

可以看出, 垂直角测角误差是垂直度误差 Δi 的 2 阶量, 因为 Δi 非常小, 所以垂直角误差可以忽略不计。

2.2 反射镜倾斜误差

反射镜倾斜误差是指反射镜面与水平轴线不重合, 存在水平夹角 α , 图 4 为俯视图。实际反射镜位置为图中虚线所示, 与理想反射镜位置有水平方向夹角 α , 即反射镜倾斜误差。由图可知, 实际反射镜与理想反射镜的法线夹角也为 α , 受该误差影响, 出射激光方向由理想方向 OP 变为实际出射方向 OP' ^[14-15]。

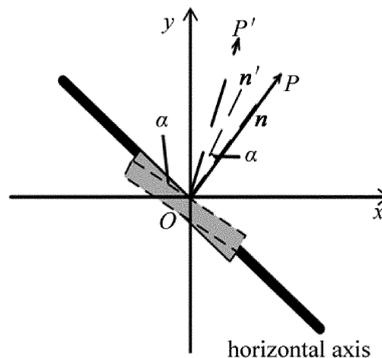


Fig. 4 Tilt error of reflector

假设某空间任一目标 P , 其水平角测量值 φ_h , 垂直角测量值 φ_v 。建立反射镜倾斜误差矢量模型, 理想

初始位置光线沿 y 轴出射,此时反射镜法线单位矢量为 $\vec{n}_0 = (0, \frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2})^T$, 由于存在反射镜倾斜误差 α , 实际反射镜法线相对于理想法线绕 z 轴旋转了 α 角, 测量空间目标 P 时, 反射镜实际法线首先绕 x 轴旋转了 $\varphi_v/2$, 再绕 z 轴旋转了 $(\varphi_h - 90^\circ)$ (均为右手定则), 那么此时反射镜实际法线为:

$$\vec{n} = R_z(z, \varphi_h - 90^\circ) \cdot R_x(x, \frac{\varphi_v}{2}) \cdot \vec{n}_0 \quad (16)$$

经计算化简得:

$$\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)^T = \begin{bmatrix} -\sin\varphi_h \sin\alpha + \cos\varphi_h \cos\alpha \cos V_m \\ \cos\varphi_h \sin\alpha + \sin\varphi_h \cos\alpha \cos V_m \\ \sin V_m \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中, $V_m = (\varphi_v + 90^\circ)/2$, 将入射光矢量 $\vec{l}_i = (0, 0, 1)^T$ 和(17)式带入到(10)式, 求得出射光矢量为:

$$\vec{l}_o = \begin{bmatrix} -2\cos\alpha \sin V_m (-\sin\varphi_h \sin\alpha + \cos\varphi_h \cos\alpha \cos V_m) \\ -2\cos\alpha \sin V_m (\cos\varphi_h \sin\alpha + \sin\varphi_h \cos\alpha \cos V_m) \\ 1 - 2\cos^2\alpha \sin^2 V_m \end{bmatrix} \quad (18)$$

因为 α 是微小量, 做如下近似计算:

$$\Delta\varphi_h = \varphi_h - \varphi_{h,r} \approx \sin(\varphi_h - \varphi_{h,r}) \quad (19)$$

将(11)式和(17)式代入上式中, 经计算化简可以得到反射镜倾斜误差引起的水平测角误差规律为:

$$\Delta\varphi_h \approx \frac{\tan\alpha}{\cos \frac{\varphi_v - 90^\circ}{2}} \quad (20)$$

2.3 激光入射倾斜误差

激光倾斜误差是指激光器发射出的激光束与转台的垂直轴线不重合存在空间交角, 如图5所示。假设实际激光束与垂直轴有夹角 β , 作者对 β 分解, 可以沿平面 $x-O-z$ 和平面 $y-O-z$ 分解为 i_x 和 i_y 两个角, 可以由图中明显看出, i_y 只会对最终垂直角测量结果有影响,

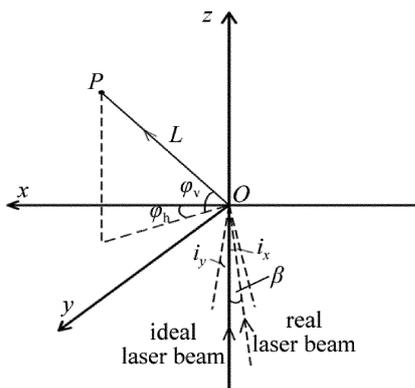


Fig. 5 Tilt error of incident laser beam

而 i_x 会对水平角和垂直角测量结果均有影响。

假设激光束与垂直轴夹角为 β , 方向位于水平角为 φ_0 的方位, 此时的入射光矢量可以表示为:

$$\vec{l}_i = (\sin\beta \cos\varphi_0, \sin\beta \sin\varphi_0, \cos\beta) \quad (21)$$

激光视线稳定后, 垂直角和水平角的测量值分别为 φ_v 和 φ_h , 即可得到反射镜法向矢量为:

$$\vec{n} = (\sin V_m \cos\varphi_h, \sin V_m \sin\varphi_h, \cos V_m) \quad (22)$$

式中, $V_m = (\varphi_v + 90^\circ)/2$, V_m 为反射镜法线与 z 轴的夹角。根据光线反射定律, 将(21)式和(22)式带入到(10)式中, 可以得到出射激光的矢量为:

$$\vec{l}_o = N \cdot \vec{l}_i = (\sin\beta \cos\varphi_0 - 2k \sin V_m \cos\varphi_h, \sin\beta \sin\varphi_0 - 2k \sin V_m \sin\varphi_h, \cos\beta - 2k \cos V_m) \quad (23)$$

$$k = \sin V_m \sin\varphi_h \sin\beta \sin\varphi_0 + \sin V_m \cos\varphi_h \sin\beta \cos\varphi_0 + \cos V_m \cos\beta \quad (24)$$

将上述两式带入(11)式和(12)式中可以得到实际激光视线的水平角和垂直角, β 是微小角度, 可以做近似计算, 那么水平测角误差近似为:

$$\Delta\varphi_h = \varphi_h - \varphi_{h,r} \approx \sin(\varphi_h - \varphi_{h,r}) \quad (25)$$

将(22)式、(23)式、(24)式带入到(25)式中, 经过计算后可以得到激光倾斜误差引入的水平测角误差规律为:

$$\Delta\varphi_h \approx \beta \cdot \frac{\sin(\varphi_h - \varphi_0)}{\cos\varphi_v} \quad (26)$$

同理对于垂直角测角误差可近似认为是:

$$\Delta\varphi_v = \varphi_v - \varphi_{v,r} \approx \sin(\varphi_v - \varphi_{v,r}) \quad (27)$$

将(22)式、(23)式、(24)式带入到(27)式中, 经过计算后可以得到激光倾斜误差引入的垂直测角误差规律为:

$$\Delta\varphi_v = \beta \cdot \cos(\varphi_h - \varphi_0) \quad (28)$$

综上所述, 激光入射倾斜误差 α 引起的水平角和垂直角测量误差为:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_h = \beta \cdot \frac{\sin(\varphi_h - \varphi_0)}{\cos\varphi_v} \\ \Delta\varphi_v = \beta \cdot \cos(\varphi_h - \varphi_0) \end{cases} \quad (29)$$

3 仿真结果与分析

为了直观地表示各项系统误差引入的水平角和垂直角测角误差, 设计仿真方案如下: (1) 考虑设定两轴垂直度误差参量为 $1.5''$, $\varphi_v = -45^\circ \sim 45^\circ$, $L = 10\text{m}$, 基于上述误差模型进行测角误差以及单点坐标测量误差仿真, 仿真结果如图6a、图6b所示; (2) 考虑设定反射镜倾斜误差参量为 $5''$, $\varphi_v = -45^\circ \sim 45^\circ$, $L = 10\text{m}$, 基于上述误差模型进行测角误差以及单点坐标测量误差仿真, 仿真结果如图6a、图6b所示; (3) 考虑设定激光入射倾斜误差参量为 $5''$, $\varphi_0 = 60^\circ$, $\varphi_v = -45^\circ \sim 45^\circ$, $\varphi_h =$

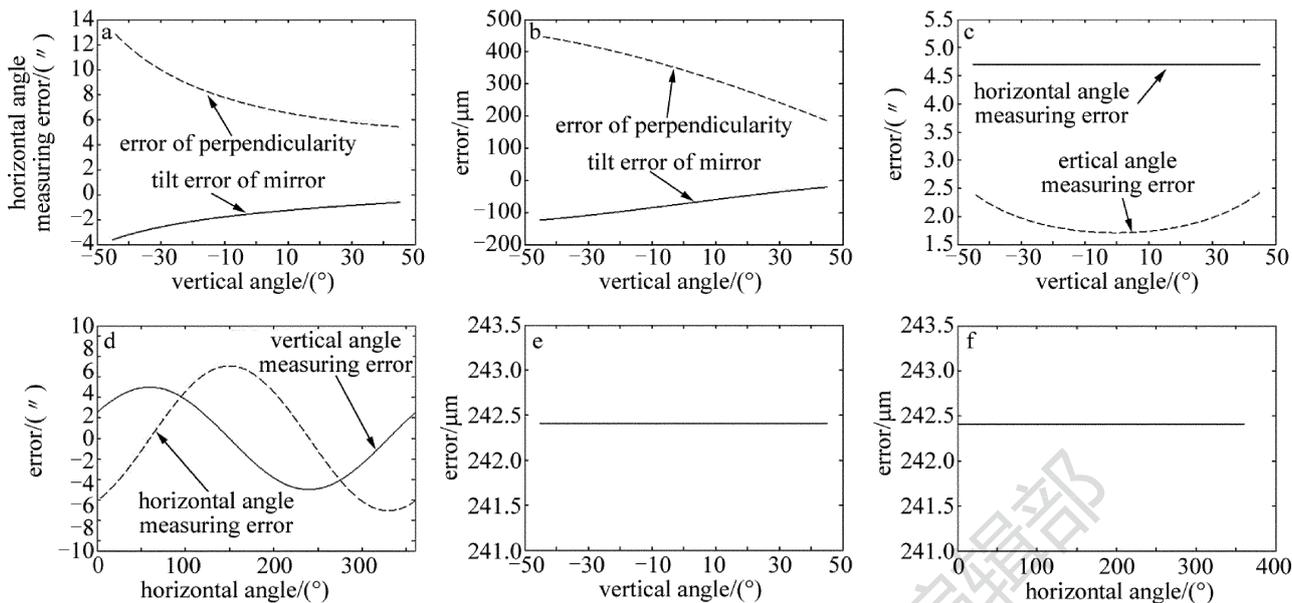


Fig. 6 Simulation result of angle measuring error and coordinate error

a—angle measuring error of perpendicularity of two axes and tilt of mirror b—point error by perpendicularity of two axes and tilt of mirror c—angle error by tilt of laser when $\varphi_h = 80^\circ$ d—angle error by tilt of laser when $\varphi_v = 45^\circ$ e—point error by tilt of laser when $\varphi_h = 80^\circ$ f—point error by tilt of laser when $\varphi_v = 45^\circ$

0° ~ 360°, $L = 10\text{m}$, 基于上述误差模型进行测角误差和单点坐标测量误差仿真, 仿真结果如图 6c、图 6d、图 6e 和图 6f。

由分析得到的各项系统误差引起的测角误差规律以及仿真结果可以看出: (1) 两轴垂直度误差和反射镜倾斜误差对测角精度的影响规律类似, 引入的垂直角测角误差 $\Delta\varphi_v$ 为零, 水平测角误差 $\Delta\varphi_h$ 仅与垂直角有关, 其误差值随着垂直角增大而减小; 这两项误差引入的单点坐标测量误差与水平角无关, 随着垂直角的增大而减小。针对设定的误差参量, 两轴垂直度误差引入的单点坐标测量误差最大值为 $124.1\mu\text{m}$, 反射镜倾斜误差引入的单点坐标测量误差最大值 $447.9\mu\text{m}$; (2) 激光倾斜误差引入的水平角测角误差同时受 φ_h 和 φ_v 影响, 垂直角测角误差仅与方位有关, 而且 $\Delta\varphi_h$ 和 $\Delta\varphi_v$ 都随着水平角呈现正弦变化。由图 6e、图 6f 可知, 激光倾斜误差引入的单点坐标测量误差与 φ_h 和 φ_v 均无关, 针对设定的误差参量, 激光倾斜误差引入的单点坐标测量误差值恒为 $242.4\mu\text{m}$ 。

4 结论

本文中建立了激光雷达坐标测量系统数学模型。详细分析了系统测量中引入两轴垂直度误差、反射镜倾斜误差和激光入射倾斜误差这 3 项主要系统误差后的测角误差规律, 分别对每项系统误差建立测角误差模型分析并进行误差仿真。结果表明, 上述 3 项系统误差在距离为 10m 时, 分别引入的单点坐标测量误差的最大值为 $124.1\mu\text{m}$, $447.9\mu\text{m}$, $242.4\mu\text{m}$, 会极大地影响激光雷达坐标测量系统的坐标测量精度。所以在

激光雷达测量系统设计中, 为保证在大空间测量中维持很高的测量精度, 必须尽可能保证转台垂直轴系和水平轴系垂直、反射镜面与水平轴轴线重合以及反射镜入射激光束与垂直轴轴线重合, 同时, 对这几项系统误差参量进行标定和补偿, 尽可能消除其引入的测角误差, 提高系统坐标测量精度。本研究为更好地设计研究激光雷达坐标测量系统提供理论支持, 为实现该系统高精度测量打下基础。

参考文献

- [1] ZHOU N, AN Zh Y, LI Y H. Large-sized three-dimensional profile measurement technology based on laser radar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12):2465-2468(in Chinese).
- [2] HU Y Q, QIN L G, HUANG X. Mounted position calibration for airborne equipment with laser radar[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010,42(1):112-116(in Chinese).
- [3] JHONSON S E, NICHOLS T L, GATT P, et al. Range precision of direct-detection laser radar system [J]. Proceedings of the SPIE, 2004, 5412:72-86.
- [4] ZHENG Y Ch, ZHAO M J, ZHANG W P. Trend of laser radar technology development[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(s1): 240-246(in Chinese).
- [5] MA L Q, WANG J H, CAO T Y, et al. Calibration for angular error of laser tracker by small displacement[J]. Acta Metrologica Sinica, 2009, 3(s1):76-78(in Chinese).
- [6] SHI K. The structure analysis and thermal analysis of laser radar [D]. Beijing: The Institute of Optics and Electronics the Chinese Academy, 2013:2-19(in Chinese).
- [7] ZHOU W H. Research on the precision theory of large-scale coordinate measuring system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2000:30-41(in Chinese).
- [8] ZHOU W H, FEI Y T, LI B Y. The correction of geometric error for laser tracker[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(1):56-63(in Chinese).

- [9] ZHANG L. Structure design of antenna pedestal and shaft system precision analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2012:15-21 (in Chinese).
- [10] AGUADO S, SAMPER D, SANTOLARIA J, *et al.* Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 53(1):160-169.
- [11] QU H T, REN W J, LU D. Modelling errors of precised two shafts swivelling stand and its analysis[J]. Computer Application and Software, 2010, 27(9):160-162 (in Chinese).
- [12] GUO Y K, LI Y H, LI Q X. Measurement uncertainty of perpendicularity of two axes of servo turntable[C]//Department of Precision Instrument and Mechanology of Tsinghua University, 3rd International Symposium on Instrumentation Science and Technology. Beijing: Department of Precision Instrument and Mechanology of Tsinghua University, 2004:441-444 (in Chinese).
- [13] OU J M, WANG R L, SHANG H C, *et al.* Three forms of expression about reflection law[J]. Journal of Yunnan Normal University, 2000, 20(1):57-61 (in Chinese).
- [14] LIU W L, WANG Zh K, QU X H. Error analysis of tracking mirror for laser tracker system[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4):585-590 (in Chinese).
- [15] DOUGLAS P, NAGARAJAH C R, IOVENITTI P. Design and error analysis of a surface reflector for a laser tracking measurement system[J]. Journal of the International Measurement Confederation, 1999, 6(8):167-178.

版权所有 © 《激光技术》编辑部

版权所有 ©