

文章编号: 1003-501X(2008)11-0008-05

车载光电跟踪设备高精度控制方法及仿真

宁大勇^{1, 2}, 高云国¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 介绍了保证车载光电跟踪设备高精度工作的一种数学方法, 在光电跟踪设备基座上安放双轴倾角传感器, 实时检测基座的水平度, 通过传感器显示的数值, 把基座的水平度变化量解算到光电跟踪设备的水平轴和垂直轴上去。构建所需的数学模型, 分析工作原理, 求出了光电跟踪设备水平轴和垂直轴所需转动角度的公式。建立 CAD 模型, 并结合有虚拟样机技术对模型进行仿真分析。有限元分析表明: 这种数学方法可以保证车载光电跟踪设备的工作精度。

关键词: 车载; 光电跟踪设备; 水平轴; 垂直轴; 视轴

中图分类号: TH12

文献标志码: A

Method of High Accuracy Control for Motor-based Optoelectronic Tracking Equipment and Simulation

NING Da-yong^{1,2}, GAO Yun-guo¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A mathematic method for ensuring that motor-based optoelectronic tracking equipment works high accurately was introduced. The two-axis inclinometer was settled on the base, and the inclinometer examined the planeness of base in real time. According to the data of two-axis inclinometer, the optoelectronic tracking equipment should change the angle of horizontal axis and vertical axis. The mathematic model was established and the working principle was analyzed. Then, the formulas of horizontal axis' transfer and vertical axis' transfer were worked out. The CAD model was built and simulated with virtual prototype technology. Analysis and simulation prove that the mathematic method could keep tracking precision of motor-based optoelectronic tracking equipment.

Key words: motor-based; photoelectric tracking equipment; horizontal axis; vertical axis; collimation axis

1 引言

目前光电跟踪设备主要用于目标姿态实时观测、空中轨迹测量、跟踪瞄准、距离测量等。光电跟踪设备实现车载后可以增加机动性, 极大地增加光电跟踪设备的生存能力, 可大大提高设备使用率, 减少设备数量。由于车载光电跟踪设备的支撑基座稳定性差, 水平度保持不好, 微小的振动会使目标从视场中丢失, 这就需要实时检测光电跟踪设备支撑基座的水平度。在支撑基座底部安装双轴倾角传感器, 根据传感器显示数值的变化, 把光电跟踪设备基座的变化量解算到其的水平轴和垂直轴的运动上, 通过调整水平轴和垂直轴的转动来抵消基座不稳定带来的影响, 保证设备正常工作。

收稿日期: 2008-03-28; 收到修改稿日期: 2008-05-25

基金项目: 国家 863 资助项目

作者简介: 宁大勇(1981-), 男(汉族), 黑龙江七台河人, 博士研究生, 主要从事车载大型光电跟踪设备稳定性研究。

E-mail: ningdayongning@163.com

2 分析

2.1 影响光电跟踪设备跟踪范围因素分析

光电跟踪设备主要靠激光器发射激光进行跟踪, 因为激光有发散角, 所以当目标出现在激光发散角内时就能够捕获目标, 并进行跟踪。光电跟踪设备实现车载时, 支撑基座安放在载车上, 当载车由于外界因素影响而发生晃动时, 光电跟踪设备基座的位置也相应变化, 因而导致视轴的位置和指向发生变化。视轴变化情况可以分为两种: 视轴平动和视轴转动。下面分析一下光电跟踪设备视轴的这两种变化分别对跟踪范围的影响。

a) 视轴平动对跟踪范围的影响

如图 1 所示: 当激光发射点由 A 移至 A' 时目标物体仍然在观测范围之内(一般光电跟踪设备与目标物体距离都大于 1 000 m);

b) 视轴转动对跟踪范围的影响

如图 2 所示: 当光电跟踪设备视轴有角度变化时, 即使角度变化很小, 光电跟踪设备的观测范围却发生了显著变化(观测距离大于 1 000 m)。

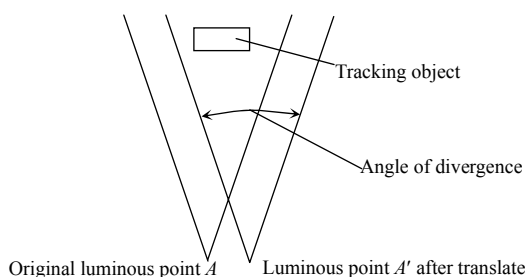


图 1 激光发射点平动对跟踪范围的影响

Fig.1 Impact of luminous point in translation on tracking range

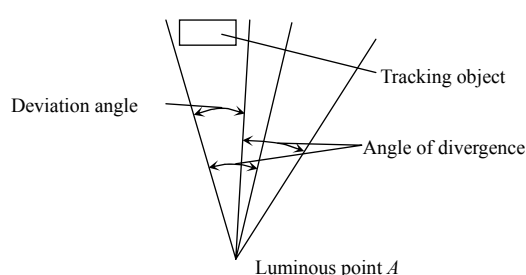


图 2 激光发射方向角度变化对跟踪范围的影响

Fig.2 Impact of luminous point in rotation on tracking range

通过上述分析得出:

- 1) 光电跟踪设备视轴平动引起跟踪范围的变化可以忽略;
- 2) 光电跟踪设备视轴角度变化引起的跟踪范围的变化必须考虑。

2.2 构建数学模型

模型如图 3 所示, 载车由于外界因素的干扰造成晃动, 导致光电跟踪设备基座的位置也发生变化。通过上述的分析可知在一段时间内 (1/8 s), 仅考虑基座绕某一轴线转动而不考虑其平动。

本文所涉及到的符号:

$OXYZ$ 为基座变化后的坐标系; $PQNM$ 变化后的基座底面; $PQN'M'$ 为原基座底面; PQ 表示转轴; AB 表示视轴, 只能在视轴与垂直轴所在的平面内绕 B 点转动; BS 表示垂直轴, 只能绕自身轴线转到(即绕 BS 转动); l 表示 AB 长度(即视轴长度)(已知); b 表示 BS 长度(即垂直轴的长度)(已知); a 表示 OS 的长度(即垂直轴与 $x-y$ 平面交点到 x 轴的距离)(未知); α 表示视轴与 $x-y$ 平面的交角(已知); β 表示基座变化的角度量(未知); δ 表示视轴正方向在 $x-y$ 平面上的投影与 y 轴正方向的交角(未知); θ 表示垂直轴所需调整的角度量(设 θ 逆时针为正)(未知); φ 表示水平轴所需调整的角度量(未知);

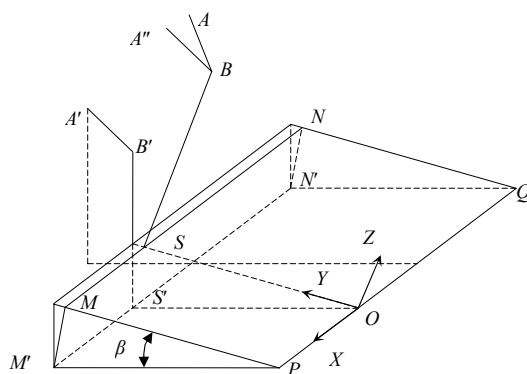


图 3 光电跟踪设备数学简化模型

Fig.3 Mathematical simplified model of optoelectronic tracking equipment

λ 表示视轴在 x - y 平面内的投影与双轴倾角传感器 x' 轴的交角(已知)。

2.3 计算过程

如图 3 所示, 为了克服外界干扰不把目标丢失, 在数学模型中其最终目的是把视轴 AB 转到 $A''B$ 的位置, 计算出 AB 与 $A''B$ 之间的夹角。使 $A''B$ 与 $A'B'$ 平行, 光电跟踪设备在实际运动过程中水平轴和垂直轴是同时转动的, 但是为了计算方便我们假设光电跟踪设备运动是垂直轴先转动, 然后水平轴转动。下面我们求 θ 和 φ 。

1) 先假设水平轴不转动(即俯仰角不变化), 调整垂直轴, 使视轴平行于原视轴和垂直轴所在的平面, 求出垂直轴的转角。

2) 垂直轴固定不动, 调整水平轴来改变俯仰角, 使视轴与原视轴轴线平行, 求出水平轴的转角。

B 、 A 点为支撑基座变化后 B 点与 A 点的坐标; B' 、 A' 点为支撑基座变化前 B 点与 A 点的坐标; A'' 点为水平轴和垂直轴调整后 A 点的坐标; A^3 点为值调整垂直轴而没有调整水平轴时 A 点的坐标, 各坐标值如表 1 所示。

表 1 基座变化前后各点在 $OXYZ$ 坐标系内坐标值

Table 1 Coordinated value of points in $OXYZ$ coordinate system

	X	Y	Z
B	0	a	b
A	$l \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta$	$a + l \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta$	$b + l \cdot \sin \alpha$
B'	0	$a \cdot \cos \beta + b \cdot \sin \beta$	$b \cdot \cos \beta - a \cdot \sin \beta$
A'	$l \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta$	$(a + l \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta) \cdot \cos \beta + (b + l \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \beta$	$(b + l \cdot \sin \alpha) \cdot \cos \beta - (a + l \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta) \cdot \sin \beta$
A''	$l \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta$	$a + l \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta \cdot \cos \beta + l \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$	$b + l \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta - l \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta \cdot \sin \beta$
A^3	$l \cdot \cos \alpha \cdot \sin(\delta - \theta)$	$a + l \cdot \cos \alpha \cdot \cos(\delta - \theta)$	$b + l \cdot \sin \alpha$

a) 求垂直轴所需调整的角度 θ

$$\theta = \arctan \frac{\cos \alpha \cos \delta \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta}{\cos \alpha \sin \delta} - \arctan \frac{\cos \delta}{\sin \delta} \quad (1)$$

b) 求水平轴所需调整的角度 φ

$$\varphi = \arctan \frac{\sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \cos \delta \sin \beta}{\sqrt{\cos^2 \alpha \sin^2 \delta + \cos^2 \alpha \cos^2 \delta \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + 2 \cos \alpha \cos \delta \cos \beta \sin \alpha \sin \beta}} - \alpha \quad (2)$$

其中: $\beta = \arcsin \sqrt{\sin^2 \omega_1 + \sin^2 \omega_2}$, $\delta = \pi - \angle OAE = \pi - \lambda + \arccos \frac{\sin \omega_1}{\sqrt{\sin^2 \omega_1 + \sin^2 \omega_2}}$ 。

式中: ω_1 与 ω_2 表示双轴倾角传感器前后两次读数差。把 β 和 δ 值带入到式(1)和式(2)中就可以求出 θ 和 φ 的值。

3 仪器选择及安放

为了保证测量的精度与测量的实时性, 我们采用芬兰 VTI 公司的 SCA100T 双轴倾角传感器, 其主要优点是: 低噪音、高分辨率、高精度、高负荷、高抗震性、广泛的温度范围、在温度和时间方面可靠性和稳定性极高。具体参数如表 2。图 4 为仪器安放位置示意图。

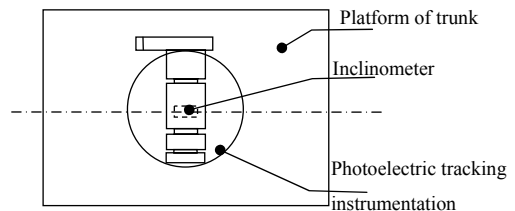


图 4 光电跟踪设备中各仪器位置

Fig.4 Position of instrumentations

表 2 SCA100T 双轴倾角传感器参数表

Table 2 Parameter list of SCA100T two-axis inclinometer

Offset temperature drift	Size	Highest resolution ratio	Range	Output
<0.1mg/°C	11.3 mm × 15.6 mm × 5.1 mm	0.000 8°	30°	SPI digital or 0.5~4.5 V

4 工作原理

当光电跟踪设备车载时，在载车上都有计算机，编写比较程序和计算 θ 和 φ 的程序，当把倾角传感器读取的数据实时传给主控计算机，通过计算机内的程序计算出 θ 和 φ 的数值，调整垂直轴和水平轴的角度。图 5 为系统工作原理示意图。

5 仿真与分析

在 CATIA 中建立三维模型，如图 6(a)所示，光电跟踪设备有两个自由度，垂直轴的转动和视轴的俯仰转动。在动力学仿真软件 ADAMS 中，建立图 6(b)所示的简化模型。把 θ 和 φ 的公式分别带入 ADAMS 中的水平约束和垂直约束中。同时在仿真软件中设置如下参数。

光电跟踪设备的反应时间为 0.05 s；倾角传感器测量数据为 0.01 s/次；目标的速度 $v_{\text{target}} \leq 2\,000\text{ m/s}$ ；目标到光电跟踪设备的距离 $s_{\text{target}} \geq 7\,000\text{ m}$ ；光电跟踪设备视场角度 $\theta \leq 2^\circ$ 。同时给垂直轴底部一个随机扰动量。

通过表 3 可以计算如下：光电跟踪设备在跟踪目标的过程中发生晃动时，从传感器测量数据到计算出 θ 和 φ (在实际工作中 $\theta \leq 3^\circ$ ， $\varphi \leq 3^\circ$)，再到调整光电跟踪设备的垂直轴和水平轴角度所需的时间 $t \approx 0.1\text{ s}$ 。

当光电跟踪设备调整角度后目标已经偏离的距离为 $s_{\text{偏离}} \leq 200\text{ m}$ ，光电跟踪设备在 7 000 m 以外的视场半径 $r_{\text{视场}} \geq 245\text{ m}$ 。图 7 为其示意图。

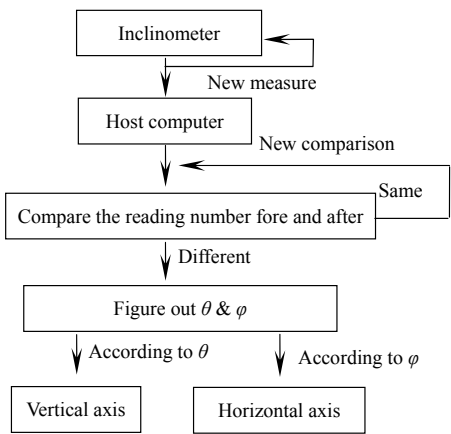


图 5 伺服系统工作原理图

Fig.5 Operational principle chart of servo system

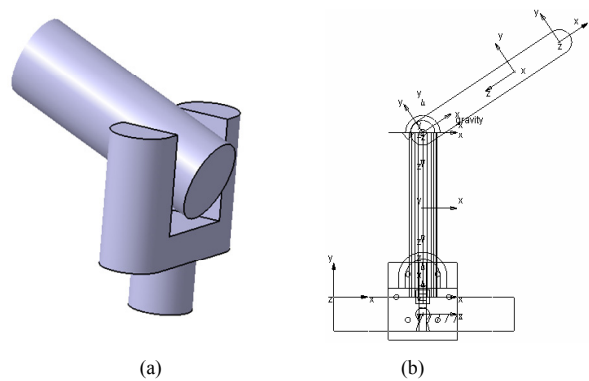


图 6 光电跟踪设备 CAD 模型 (a) 和动力学简化模型 (b)

Fig.6 CAD model (a) and dynamic simplified model (b)

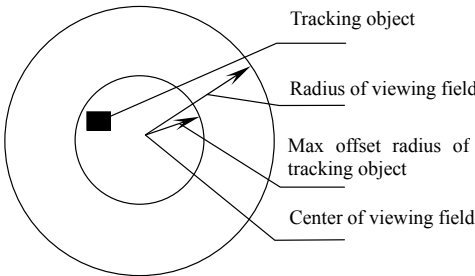


图 7 视场范围及目标偏离视场范围示意图

Fig.7 View field range and target deviation

通过计算机仿真和数据分析可以看出，光电跟踪设备在实际工作中，当工作基础由于外界干扰发生晃动时，实时调整工作基础使光电跟踪设备的垂直轴和水平轴的角度 θ 和 φ ，能够保证目标物体不脱离视场。

表 3 光电跟踪设备跟踪目标能力参数

Table 3 Parameter list of optoelectronic tracking equipment

Max angular velocity	Max angular acceleration	Working angular velocity	Working angular acceleration	Tracking error
$\geq 35^\circ/\text{s}$	$\geq 45^\circ/\text{s}^2$	$\geq 20^\circ/\text{s}$	$\geq 7^\circ/\text{s}^2$	$\leq 5'$

结束语

经上述分析可以发现，在光电跟踪设备基座上安装双轴倾角传感器，实时检测基座的水平度，通过传感器显示的数值，把基座的水平度变化量解算到光电跟踪设备的水平轴和垂直轴上去，这种方法简单可行，可以保证光电跟踪设备稳定的工作。

参考文献:

- [1] Meir Iecovich. Line of Sight Stabilization Requirements for Target Tracking System [J]. **SPIE**, 1990, **1304**: 100-111.
- [2] 邹东明, 刘栖山, 陈长青, 等. 舰载光电跟踪设备视轴稳定分析 [J]. 兵工自动化, 2003, **22**(1): 15-19.
ZOU Dong-Min, LIU Xi-sha, CHEN Chang-qing, *et al.* Stabilization Analysis of LOS for Carrier-Based Electro-Optical Tracking Equipment [J]. **Armament Automation**, 2003, **22**(1): 15-19.
- [3] 李冰, 陈洪斌. 车载平台刚体动力学模型分析 [J]. 光电工程, 1999, **26**(增刊): 12-15.
LI Bing, CHEN Hong-bin. An Analysis for Dynamic Model of a Rigid Body on Vehicle-Borne Platform [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 1999, **26**(Sup.): 12-15.
- [4] 高策, 乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正 [J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(6): 846-851.
GAO Ce, QIAO Yan-feng. Real-time error-correction method for photoelectric theodolite [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15**(6): 846-851.
- [5] 车双良, 朱麦花. 光电经纬仪结构动态特性研究 [J]. 光电工程, 2004, **31**(7): 15-17.
CHE SHuang-liang, ZHU Mai-hua. Study on dynamic structural property of electro-optical theodolite [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2004, **31**(7): 15-17.
- [6] 王宗友, 徐智勇. 单台光电经纬仪对目标稳定跟踪的研究 [J]. 光电工程, 2003, **30**(2): 11-14.
WANG Zhong-you, XU Zhi-yong. Study on stable tracking target with single photoelectric theodolite [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2003, **30**(2): 11-14.
- [7] MSC Software. **MSC.ADAMS FSP** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [8] MSC Software. **MSC.ADAMS/View** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

~~~~~  
(上接第 7 页)

- [3] 王镇, 申功勋. 摆式陀螺寻北仪的积分测量方法 [J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(5): 746-752.  
WANG Zhen, SHEN Gong-xun. Investigation on integral method of pendulous gyroscope [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15**(5): 746-752.
- [4] 徐建华, 刘星桥, 陈家斌. 捷联寻北仪方位角误差分析 [J]. 兵工学报, 2006, **27**(2): 284-287.  
XU Jian-hua, LIU Xing-qiao, CHEN Jia-bin. Strap-down North Finder Azimuth Error Analysis [J]. **ACTA ARMAMENTARII**, 2006, **27**(2): 284-287.
- [5] QI Yu-tong, CHEN Fen-gu, SU Hai-bin. Error Analysis of a Dynamically Tuned Gyro Strapdown Northfinder [J]. **Journal of Beijing institute of Technology**, 1999, **8**(3): 331-336.
- [6] 李岩, 张智永, 范大鹏. 陀螺安装误差影响视轴稳定平台精度的机理研究 [J]. 光电工程, 2007, **34**(9): 10-15, 29.  
LI Yan, ZHANG Zhi-yong, FAN Da-peng. Principle of the effect of gyro misalignment on the stabilization platforms accuracy [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2007, **34**(9): 10-15, 29.
- [7] 梁志国, 张大治. 四参数正弦波曲线拟合的快速算法 [J]. 计测技术, 2006, **26**(1): 4-7.  
LIANG Zhi-guo, ZHANG Da-zhi. A Fast Arithmetic Method of Four-parameter Sine Wave Curve-fit [J]. **Aviation Metrology & Measurement Technology**, 2006, **26**(1): 4-7.
- [8] REN Shun-qing, ZHAO Zhen-hao, CHEN Yan. Error Analysis for the Gyro North Seeking System [C]// **ISSCAA**. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 783-786.
- [9] ZHANG Zhi-jun, WU Ke-yong, SUN Ji-yu. Fiber Optic Gyroscope Automatic North-finder and Prototype Design [J]. **3rd International Symposium on Instrumentation Science and Technology**, 2004, **2**: 783-787.
- [10] 冯永利, 杨文淑. 陀螺稳定控制系统设计与仿真 [J]. 光电工程, 2003, **30**(1): 32-34.  
FENG Yong-li, YANG Wen-shu. Design and Simulation of a Stabilizing and Control System with Gyroscope [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2003, **30**(1): 32-34.