

文章编号 1004-924X(2015)05-1322-09

## 光电跟踪设备载车平台的重复定位精度

高云国<sup>1\*</sup>, 王超<sup>1,2</sup>, 江展洪<sup>1,2</sup>, 乔 健<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 为了满足光电跟踪设备车载后的使用精度要求, 提出了选用 3 条机械支腿来支撑载车的支撑方式。首先根据车载设备的位置布局和重量, 选用了两前一后的支腿安装方式, 然后分析了 3 种工况下副车架的受力情况。这 3 种工况为 3 条支腿全部位于平地、仅后腿位于斜坡和 3 条支腿全部位于斜坡。在三维仿真软件 MSC. PATRAN 中生成有限元模型, 在 3 点支撑状态下对模型进行变形仿真, 并综合分析了 3 种工况下的仿真结果, 以检验副车架的重复定位稳定精度。最后通过设计实验检验了副车架的重复定位稳定精度, 结果显示: 俯仰角的最大变化为  $0.2''$ , 方位角的最大变化为  $0.4''$ , 数据表明副车架的重复定位稳定精度满足使用要求, 证明选用 3 条机械支腿来支撑载车的方案合理可行。

**关键词:** 光电跟踪设备; 载车平台; 副车架; 三点支撑; 重复定位精度

**中图分类号:** TJ810 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1322

## Re-orientation accuracy of vehicle-born photoelectric tracking equipment

GAO Yun-guo<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>1,2</sup>, JIANG Zhan-hong<sup>1,2</sup>, QIAO Jian<sup>1</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)  
\* *Corresponding author, E-mail: gaoyunhuo@163.com*

**Abstract:** To meet the demands of vehicle-born photoelectric tracking equipment for performance precision, a new support approach using three mechanical legs to support a vehicle was proposed. In the approach, two legs were mounted in the front of vehicle while one leg was mounted on the back according to the layout and weight of vehicle-born equipment. Then the mechanical analysis for the vehicle frame were conducted under three conditions, which consist of that three legs were located on the float land, only the hind leg was located on the slope and three legs were located on the slope. A finite element model was established by using the commercial software MSC. PATRAN. Under the circumstance of three-point support, the deformation simulation was carried out and the simulation results for three conditions were analyzed respectively to testify the re-orientation accuracy of the vehicle frame. Finally, an experiment was designed to examine the re-orientation accuracy of the vehicle frame practically. The experimental results show that the maximum variation of pitch angle is  $0.2''$  while the maximum variation of azimuth angle is  $0.4''$ , which satisfies the requirements of re-orientation accuracy of the vehicle frame and explains the reasonability of the proposed approach.

收稿日期: 2014-07-20; 修订日期: 2014-08-27.

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目 (No. 061X20C060)

**Key words:** photoelectric tracking equipment; vehicle platform; vehicle frame; three-point supporting; re-orientation accuracy

## 1 引言

光电跟踪设备要求较高的工作精度和稳定性,以往多采用固定的安装基座,这样虽然可满足较高工作精度和稳定性的要求,但却限制了其机动性能。由于实际工作环境多要求光电跟踪设备有良好的机动性,因此,对车载光电跟踪设备的研究有着重要意义。美国的车载光电设备发展迅速,1982年即开始将光电设备放置在载车上,2009年,其研制的“激光复仇者”成为首台击落空间目标的单车车载光电设备。车载光电设备的发展历程具有以下特点:功能模块的集成度、机动性、智能化越来越高,载车上设备的体积越来越小,所需载车数量越来越少。上世纪90年代,我国研制了第一台车载光电设备,以后车载光电设备逐渐成为研究热门之一,但由于受各种客观因素制约,该项技术发展较为缓慢,车载平台技术尚不成熟,存在很多需要改善的地方<sup>[1-4]</sup>。

车载光电跟踪设备的载车轮胎及悬架系统的弹性较大,容易受到外界干扰进而影响光电跟踪设备的工作精度。因此,为了保证载车平台的稳定性,需要用支撑腿来支撑载车。支腿动力方式可分为机械式和液压式两类,支腿数量主要为4腿支撑,但是,在载车由运输状态切换到工作状态时,4腿支撑存在着“虚腿”现象,很难保证载车平台的重复定位的稳定性,极易导致载车上的长距离光路对准结构出现光路对准偏移,需要重新调整对准光路。本文研究选用3点支撑方式的载车平台,该方式可以避免“虚腿”现象的发生,并能保证载车平台重复定位的稳定性和车载光电跟踪设备的工作效果<sup>[5-8]</sup>。光电跟踪设备的工作环境较为复杂,具有不确定性,因此,在对载车平台进行支撑调平时,需要考虑支撑地面不平的问题。本文着重研究了3腿全部位于平地、仅后支撑腿位于斜坡和3腿全部位于斜坡的这3种工况。分析了这3种工况下的支撑腿和副车架的受力状况,对比3种工况下副车架的变形情况,从而得到了载车平台的重复定位稳定精度。实验测定显示其俯仰角的最大变化为 $0.2''$ ,方位角的最大变化为 $0.4''$ ,表明副车架的重复定位稳定精度满足使用

要求。

## 2 3腿支撑系统

### 2.1 3点支撑基本理论

为了保证光电跟踪设备载车平台重复变形的一致性,需要保证载车平台主要部件副车架受力状况的一致性,即在3腿支撑下,需保证不同工况下副车架与每条支腿连接处的受力状况重复性较好,因此,这里研究副车架以及每条支腿在不同工况下的受力情况。

### 2.2 支腿类型选择和布局

现有的支腿主要是液压式和机械式,液压式支腿具有结构简单、单位体积支撑力大等优点,但存在着器件制造精度要求高、长时间使用后会导导致器件老化和漏油、液压油自身的可燃性问题及不能自锁等缺点。机械式支腿具有可以自锁、实现高精度运动及不存在老化问题等优点,可适应复杂的环境,但存在着结构复杂、元件制造精度要求高等问题<sup>[9-10]</sup>。鉴于车载光电设备需要在复杂的环境中工作,因此选用了机械式支腿。

光电跟踪设备主要由光束发生器、跟瞄设备、控制舱以及电源等组成,其中光束发生器和跟瞄设备对精度的要求较高,且质量较大<sup>[11-13]</sup>。综合考虑载车上各设备的安装位置、安装空间等,载车使用两前一后的安装方式,如图1所示。

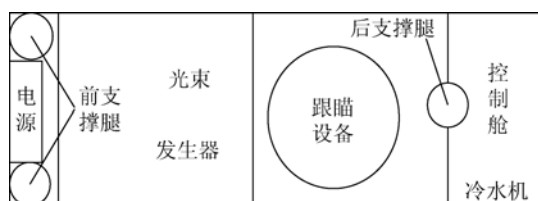


图1 光电跟踪设备主要仪器及支腿布局图

Fig. 1 Position of equipment and supportings

## 3 副车架和支腿的受力分析

光电跟踪设备载车平台对重复定位稳定精度要求较高,这就要求在不同工况下副车架和支腿的受力状态要保持一致性,因此,需要对不同支撑环境下的支腿和副车架进行力学分析。

### 3.1 3 条支腿位于平地上

3 条支腿都位于平地上是最为理想的工作环境,受力状况也较为简单,主要分析工作时副车架和支腿受力状况,如图 2 所示,其中,A、D 是支腿和地面接触的点,B、C 是副车架和支腿连接的点,因为 2 条前腿的受力状况一致,只需画出 1 支前腿的受力状况。

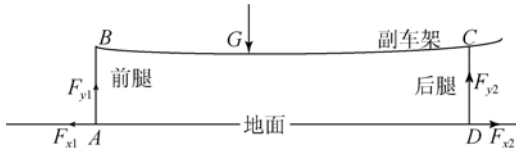


图 2 平面上的整体受力状况

Fig. 2 Overall stress state on float land

载车的整体受力状况较为简单,竖直方向上主要是光电跟踪设备和副车架的重力以及地面的支撑力,水平方向上主要是支腿和地面之间的作用力。在工作状态时,载车平台保持平衡。

$$\begin{aligned} 2F_{y2} + F_{y1} + G &= 0 \\ 2F_{x1} + F_{x2} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

在工作状态时,副车架与支撑腿的连接处不应有任何方向的移动或转动,因此,可以将副车架的力学问题简化成两端固定梁的弹性力学问题,如图 3 所示,这是一个超静定结构,存在 2 个多余约束。

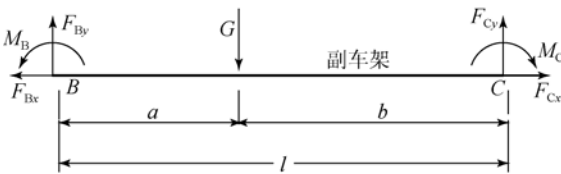


图 3 副车架的受力状况

Fig. 3 Stress state of vehicle frame

图 4 所示为前腿的受力状况,腿的长度为  $h$ , B 点为副车架和支撑腿的连接处,即副车架上的 B 点和前支腿上的 B 点受力状况是对称的,大小相等,方向相反。

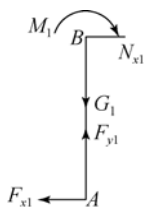


图 4 前支腿的受力状况

Fig. 4 Stress state of front legs

前腿受力状况:

$$\begin{aligned} F_{x1} \cdot h + M_1 &= 0 \\ F_{x1} + N_{x1} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

根据:

$$\begin{aligned} F_{Bx} + 2N_{x1} &= 0 \\ M_B + 2M_1 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

有:

$$\begin{aligned} 2F_{x1} &= F_{Bx} \\ 2F_{x1} \cdot h &= M_B. \end{aligned} \quad (4)$$

### 3.2 仅后腿位于斜坡

因为仅后腿位于斜坡上,为了能够保持副车架的水平状态,后腿和前腿有一个高度差  $\Delta h_2$ ,则后腿和前腿分别于地面接触的点就会不在同一个水平面上。如图 5 所示,A 点和 D 点并不在同一条水平面上,会在 D 点处产生一个弯矩来维持整体的平衡状态。

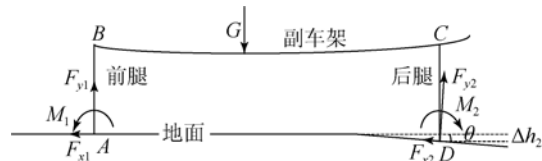


图 5 后腿位于斜坡上的受力状态

Fig. 5 Overall stress state when only the hind leg locates on the slopes

整体受力分析:

$$\begin{aligned} 2F_{y1} + F_{y2} \cdot \cos \theta + F_{x2} \cdot \sin \theta + G &= 0 \\ 2F_{x1} + F_{x2} \cdot \cos \theta + F_{y2} \cdot \sin \theta &= 0 \\ 2F_{x1} \cdot \Delta h_2 + M_D &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

因为后腿位于斜坡上,而前腿却位于平地上,支撑条件并不对称,因此,前腿和后腿的受力状况都需要分析,受力状况如图 6 所示。

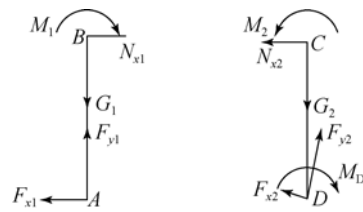


图 6 前腿和后腿的受力状况

Fig. 6 Stress states of the front legs and hind leg

前腿受力状况:

$$\begin{aligned} G_1 + F_{y1} &= 0 \\ N_{x1} + F_{x1} &= 0 \\ F_{x1} \cdot (h - \Delta h_2) + M_1 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

后腿受力状况:

$$\begin{aligned} F_{y2} \cdot \cos \theta + F_{x2} \cdot \sin \theta + G_2 &= 0 \\ F_{x2} \cdot \cos \theta + F_{y2} \cdot \sin \theta + N_{x2} &= 0 \\ (F_{x2} \cdot \cos \theta + F_{y2} \cdot \sin \theta) \cdot h + M_2 + M_D &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

根据:

$$\begin{aligned} F_{Bx} + 2N_{x1} &= 0 \\ M_B + 2M_1 &= 0 \\ F_{Cx} + N_{x2} &= 0 \\ M_C + M_2 &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

有:

$$\begin{aligned} 2F_{x1} &= F_{Bx} \\ 2F_{x1} \cdot (h - \Delta h_2) &= M_B \\ F_{x2} \cdot \cos \theta + F_{y2} \cdot \sin \theta &= F_{Cx} \\ (F_{x2} \cdot \cos \theta + F_{y2} \cdot \sin \theta) \cdot h + M_D &= M_C. \end{aligned} \quad (9)$$

### 3.3 3 条腿全部位于斜坡

因为 3 条支腿全部位于斜坡上,为了保持副车架的水平状态,后腿和前腿存在高度差  $\Delta h_3$ ,那么后腿和前腿分别于地面接触的点就会不在同一个水平面上。如图 7 所示, A 点和 D 点并不在同一条水平面上,因此就会在 D 点处产生一个弯矩来维持整体的平衡状态。

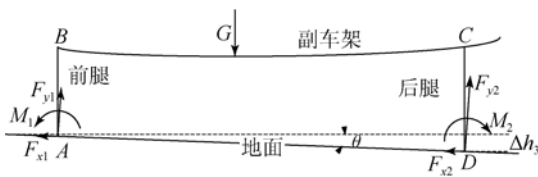


图 7 3 条支腿全部位于斜坡上

Fig. 7 Overall stress state when three legs all locate on the slopes

整体受力分析:

$$\begin{aligned} 2F_{y1} + F_{y2} + G \cdot \cos \theta &= 0 \\ 2F_{x1} + F_{x2} + G \cdot \sin \theta &= 0 \\ 2(F_{x1} \cdot \cos \theta + F_{y1} \cdot \sin \theta) \cdot \Delta h_3 + M_D &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

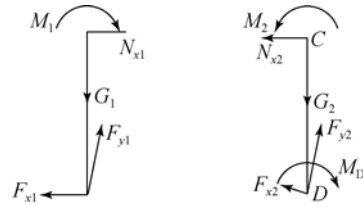


图 8 前腿和后腿的受力状况

Fig. 8 Stress states of the front legs and hind leg

前腿受力状况:

$$\begin{aligned} F_{y1} \cdot \cos \theta + F_{x1} \cdot \sin \theta + G_1 &= 0 \\ F_{x1} \cdot \cos \theta + F_{y1} \cdot \sin \theta + N_{x1} &= 0 \\ N_{x1} \cdot (h - \Delta h_3) + M_1 &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

后腿受力状况:

$$\begin{aligned} F_{y2} \cdot \cos \theta + F_{x2} \cdot \sin \theta + G_2 &= 0 \\ F_{x2} \cdot \cos \theta + F_{y2} \cdot \sin \theta + N_{x2} &= 0 \\ N_{x2} \cdot h + M_2 + M_D &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

根据式(8)有:

$$\begin{aligned} 2(F_{x1} \cdot \cos \theta + F_{y1} \cdot \sin \theta) &= F_{Bx} \\ 2(F_{x1} \cdot \cos \theta + F_{y1} \cdot \sin \theta) \cdot (h - \Delta h_3) &= M_B \\ F_{x2} \cdot \cos \theta + F_{y2} \cdot \sin \theta &= F_{Cx} \\ (F_{x2} \cdot \cos \theta + F_{y2} \cdot \sin \theta) \cdot h + M_D &= M_C. \end{aligned} \quad (13)$$

### 3.4 3 种工况下副车架的受力分析

光电跟踪设备进入到工作状态时,要保持副车架始终处于水平状态,因此,如图 3 所示,在这 3 种工况下,竖直方向上,副车架的受力情形是一致的。但在水平方向上,副车架的受力情况比较复杂,与副车架两端的弯矩和腿的高度有关,由副车架的力学模型可知,3 种工况下副车架两端弯矩相等,因此,水平方向所受力的大小仅与腿的高度有关。假设 3 种工况下,伸展最长的那条腿的高度都为  $h$ ,前腿和后腿之间存在着高度差  $\Delta h$ ,3 条腿都在平地上时  $\Delta h_1 = 0$ ,但在其他工况下,高度差并不为 0,如果斜坡的倾斜角相同,那么仅后腿在斜坡上的高度差  $\Delta h_2$  要小于 3 条腿全部位于斜坡上的高度差  $\Delta h_3$ ,根据各条支腿的受力公式所推出的公式(4)、(9)、(13),得知 3 条支腿都在平地时,副车架受到的水平力最小,3 条支腿都在

斜坡时副车架受到的水平力最大。

如图 3 所示,副车架的力学模型为两端固定

$$\Delta = \frac{Gb^2}{6EI^2} \left[ - \left( 1 + \frac{2a}{l} \right) x^3 + 3ax^2 \right], 0 \leq x \leq a$$

$$\Delta = \frac{Ga^2}{6EI} \left[ \left( 1 + \frac{2b}{l} \right) \frac{x^3}{l^2} - 3 \left( 1 + \frac{b}{l} \right) \frac{x^2}{l} + 3x - a \right], a \leq x \leq l, \tag{14}$$

其中:EI 为副车架的抗弯刚度。

由式(14)可知,副车架的变形只与竖直方向的受力有关系,与水平方向的受力无关。3 种工况下的副车架在竖直方向上的受力一致,仅在水平方向上有所差异,因此,副车架的变形应该保持一致,即副车架的重复定位稳定精度较高。

### 4 有限元分析

有限元法以弹性力学平面问题为基本理论,在实际应用中必须经过弹性体离散化、单元特性分析、总刚体方程的建立、等效结点的计算、解答收敛性以及实施步骤等过程<sup>[16]</sup>。

#### 4.1 有限元建模

MSC. PATRAN 本身自带了三维几何建模工具,但是由于副车架的结构较为复杂,利用 MSC. PATRAN 建模并不方便,因此,先在 UG 中建立副车架的模型然后抽取副车架的片体模型导入 MSC. PATRAN 中。在建模时,将所有的圆角和倒角都转化为直角,并忽略了对副车架强度影响较小的覆盖件和小构件。

#### 4.2 仿真结果

影响载车平台重复定位稳定精度的主要因素是支腿的数量和位置分布,选用两前一后的布局方式,前后支撑跨距为 6 620 mm,两前腿支撑跨距为 2 280 mm。在进行变形仿真时,需要约束支腿与副车架连接处的全部自由度,副车架其余部位的自由度不做任何约束。则 3 种工况下的副车架仅仅在水平方向上的受力有所差异,其他的条件一致,图 9~11 为不同工况下的副车架变形图。

梁,其变形是弹性的,根据材料力学,给出副车架弹性阶段的挠度公式<sup>[14-15]</sup>:

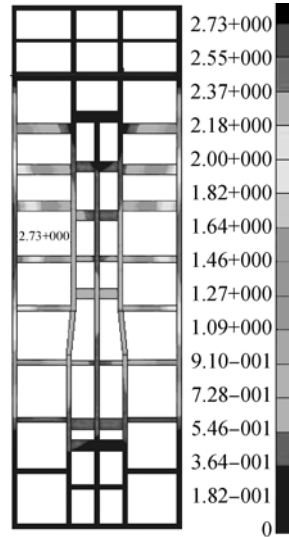


图 9 3 条支腿全部位于平地上的仿真结果

Fig. 9 Simulation result of the frame when three legs all locate on the flat land

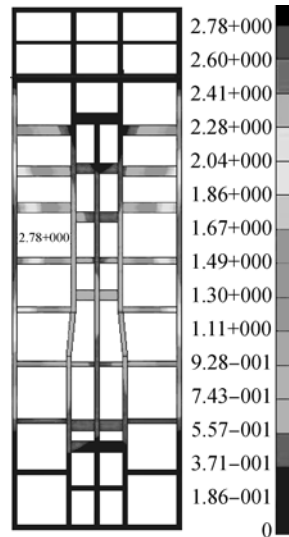


图 10 后腿位于斜坡上的仿真结果

Fig. 10 Simulation result of frame when only hind leg locates on slopes

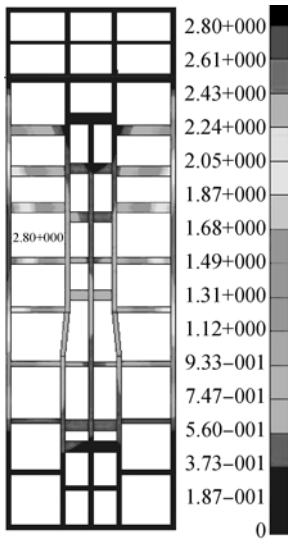


图 11 3 条腿全部位于斜坡上的仿真结果

Fig. 11 Simulation result of frame when three legs all locate on slopes

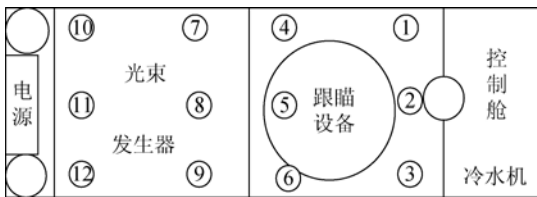


图 12 12 点的位置图

Fig. 12 Positions of 12 points

表 1 3 种工况下各点的变形值

Tab. 1 Displacement of 12 points (mm)

|    | 平地        | 后腿斜坡      | 斜坡        |
|----|-----------|-----------|-----------|
| 1  | 1.292 356 | 1.312 971 | 1.320 944 |
| 2  | 0.220 439 | 0.230 011 | 0.230 948 |
| 3  | 1.196 924 | 1.199 336 | 1.199 745 |
| 4  | 2.418 344 | 2.445 065 | 2.459 480 |
| 5  | 0.464 714 | 0.481 361 | 0.481 794 |
| 6  | 2.200 136 | 2.206 214 | 2.190 946 |
| 7  | 2.132 721 | 2.193 447 | 2.207 126 |
| 8  | 0.556 377 | 0.575 277 | 0.575 601 |
| 9  | 1.981 210 | 1.989 879 | 1.975 873 |
| 10 | 0.517 881 | 0.561 796 | 0.565 218 |
| 11 | 0.398 922 | 0.414 220 | 0.414 360 |
| 12 | 0.501 640 | 0.507 764 | 0.504 299 |

### 4.3 仿真分析

不同工况下的变形对比如图 13 所示,在光束发生器和跟瞄设备安装处选取 12 个点,在不同工况下,通过有限元仿真,得到这些点处的变形值,运用 MATLAB 进行数据分析。

表 1 所示为 3 种工况下各点的变形值,将这 12 点的变形值按照大小顺序排列,能够形象地看出不同工况下同一点变形的差异,如图 13 所示。

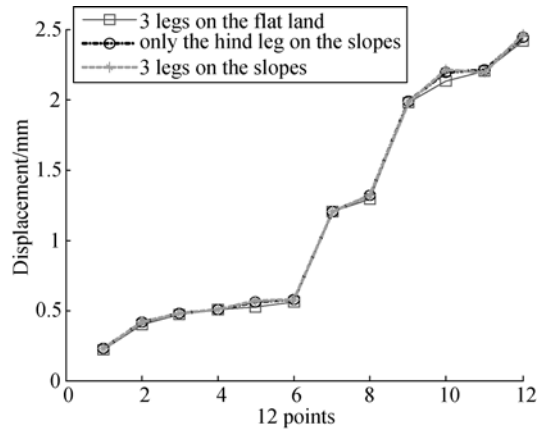


图 13 不同工况下的变形对比

Fig. 13 Comparison of displacement in three conditions

从图 13 可知,3 种工况下的变形曲线相差非常小,说明副车架的重复变形精度较高,图 12 中第 2、5、8、11 点处的变形值都没有超过 0.6 mm,不同工况下的变化值也很小,说明副车架中部的刚度和重复定位精度较高。因为副车架两侧载荷不同,所以两侧的变形值并不一致,其中不同工况下第 7 点的变化最大,3 腿在平地上这一点处的变形值为 2.131 721 mm,3 条腿都处在小角度斜坡上的这点变形值为 2.207 126 mm,二者差距为 0.075 405 mm。因为副车架自身比较复杂,所以在不同的工况下,副车架的变形值并非保持不变,但这些变化都是在微米级别,对精度影响不大,满足工作要求。

## 5 实验与分析

实验需要检测副车架变形的重复性,因为激光设备和跟瞄设备的使用精度要求较高,因此,测量时不需要检测整个副车架,只需检测激光设备

和跟瞄设备安装处的相对变形倾角,自准直仪的安装位置如图 14 所示。

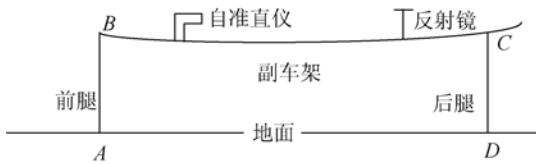


图 14 自准直仪安装示意图

Fig. 14 Position of collimator

### 5.1 实验仪器

采用九江精达检测技术有限公司生产的 CSZ-1ACCD 双轴自准直仪,该仪器的技术指标如表 2 所示:

表 2 自准直仪的技术指标

Tab. 2 Technical indexes of collimator

| 型号             | 测角范围 | 分辨率  | 视场          |
|----------------|------|------|-------------|
| CCD 双轴<br>自准直仪 | 10'  | 0.1" | 亮视场暗<br>十字丝 |

### 5.2 实验及结果

在水泥地基上,将 3 条支腿全部放下来支撑载车,随后对载车进行粗调平,待载车稳定后,安装实验器材和进行试验。实验现场如图 15 所示,首先在副车架上固定自准直仪和反射镜,调节自准直仪下的 3 个可调节支点,使分划板上的十字丝与反射的光线十字丝重合,清零自准直仪的数码显示。然后,用千斤顶将载车顶起,使支腿离开地面,再降低千斤顶,使支腿触地,支撑并调平载车平台,待载车稳定后,记录自准直仪上的数码管显示的倾角值。重复升降千斤顶,记录实验数据,经过多次测试,调平所需时间大约 120 s 左右。



图 15 实验现场图

Fig. 15 Experimental field plots

表 3 副车架变形重复性实验数据

Tab. 3 Results of repeated experiment of the frame

| 次数 | 俯仰角/(") | 方位角/(") |
|----|---------|---------|
| 1  | 0       | 0       |
| 2  | 0       | 0.2     |
| 3  | 0       | 0.4     |
| 4  | 0.1     | 0.1     |
| 5  | 0.2     | 0.1     |
| 6  | 0.1     | 0.2     |
| 7  | 0.2     | 0.1     |
| 8  | 0       | 0.2     |

### 5.3 实验数据分析

将角度值  $\beta$  转换为线性值  $y$ :

$$y = l \cdot \tan \beta, \quad (15)$$

其中:  $l$  为反射镜到自准直仪的距离,大小为 5 000 mm。

实验数据如表 3 所示,俯仰角的变化为  $0'' \sim 0.2''$ ,根据式(15)计算的线性值变化为  $0 \sim 0.0048$  mm,同时,方位角的变化为  $0'' \sim 0.4''$ ,计算的线性值变化为  $0 \sim 0.0096$  mm,这说明 3 腿支撑下的副车架受力重复性和变形重复性较好,即副车架的重复定位稳定精度较高。同时,表 3 中数据也说明 3 点支撑下的副车架变形属于弹性变形,变形值在一定范围内波动,因此,3 点支撑方式可以保证载车平台拥有较高的重复定位稳定精度。

## 6 结 论

本文根据载车设备的安装位置和工作环境的复杂性,描述了支腿的位置分布和类型;然后建立副车架的数学模型,分析了 3 种工况下的副车架和支腿的受力情况,从理论上证明副车架的变形仅和竖直方向上的受力有关;最后通过有限元仿真,直接地证明采用三点支撑方式的副车架,在不同工况下,变形能够保持一致,重复定位稳定性较好。

实验结果表明俯仰角的最大变化为  $0.2''$ ,方位角的最大变化为  $0.4''$ ,优于设计指标  $3''$ ,调平的时间为 120 s 左右,优于以往调平系统,证明 3

腿支撑下的副车架的重复定位稳定精度较高,调平速度快,达到了短时间展开工作的要求。本文

工作可为光电跟踪设备载车平台的搭建提供参考。

### 参考文献:

- [1] 姜伟伟,高云国.大型光电设备基准平面自动调平系统[J].光学精密工程,2009,17(5):1039-1045.  
JIANG W W, GAO Y G. Automatic-leveling system for base-plane of large-size photoelectric equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1039-1045. (in Chinese)
- [2] 高云国.大型光电设备载车三点液压调平支撑的研究[J].光学精密工程,1996,4(3):106-110.  
GAO Y G. Research of three hydraulic leveling bearing points for carrying vehicle of large-size optical and electrical instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(3): 106-110. (in Chinese)
- [3] 耿记波,高云国,吴延巽.大型光电设备动基座自动支撑调平方法及结构[J].工程设计学报,2007,14(5):383-387.  
GENG J B, GAO Y G, WU Y X. Study on method and configuration for automatic supporting and leveling of big-scale photoelectric equipment's moved-ground work [J]. *Journal of Engineering Design*, 2007, 14(5): 383-387. (in Chinese)
- [4] 陈兆兵,郭劲,王兵,等.车载高架式光电探测系统的作战效能评估[J].光学精密工程,2013,21(1):77-86  
CHEN ZH B, GUO J, WANG B, *et al.*. Operational efficiency evaluation of vehicle carrying and high supporting optic-electronic detecting system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 77-86. (in Chinese)
- [5] 刘廷霞,王伟国,陈长青.车载动平台位置干扰的传递解算[J].光学精密工程,2013,21(9):2287-2293  
LIU Y X, WANG W G, CHEN CH Q. Transferrable arithmetic of position-disturbing value for vehicular dynamic platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2287-2293. (in Chinese)
- [6] 孙辉.机载光电平台目标定位与误差分析[J].中国光学,2013,6(6):912-918.  
SUN H. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 912-918. (in Chinese)
- [7] 刘廷霞,王伟国,陈健.车载惯性平台稳定位置解算算法[J].中国光学,2012,5(5):537-543.  
LIU Y X, WANG W G, CHEN J. Position arithmetic for a vehicular inertial stabilized platform [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5): 537-543. (in Chinese)
- [8] 李磊,严洁,阮友田.车载激光测绘系统的标定[J].中国光学,2013,6(3):353-358.  
LI L, YAN J, RUAN Y T. Calibration of vehicle-borne laser mapping system [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 353-358. (in Chinese)
- [9] 姜伟伟.大型光电设备载车平台承载及支撑技术研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2011.  
JIANG W W. *Research of bearing and supporting for large-size vehicle-born photoelectric instrument* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
- [10] 张尧禹.车载平台变形测量和误差校正技术的研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2011.  
ZHANG Y Y. *The Research of Vehicle Plane Distortion Measuring and Error Emendation Technology* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
- [11] 邵明振,邵春雷,卢启鹏,等.高功率TEA CO<sub>2</sub>激光器主机结构优化设计[J].发光学报,2013,34(3):388-393.  
SHAO M ZH, SHAO CH L, LU Q P, *et al.*. Design on mainframe of high power TEA CO<sub>2</sub> Laser and Optimization [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(3): 388-393. (in Chinese)
- [12] 阮鹏,谢冀江,张来明,等.紫外预电离放电引发的非链式脉冲DF激光器[J].发光学报,2013,34(4):450-455.  
RUAN P, XIE J J, ZHANG L M, *et al.*. UV-preionized Electric-discharge Non-chain Pulsed DF Laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(4): 450-455. (in Chinese)
- [13] 王恒坤,张国玉,郭立红,等.高精度动载体激光发射系统光束控制反射镜[J].光学精密工程,2013,21(2):336-341.  
WANG H K, ZHANG G Y, GUO L H, *et al.*.

High performance fast-steering mirror for beam control of vehicular high energy laser system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 336-341. (in Chinese)

- [14] 樊有景, 李乐, 李会知. 集中载荷作用下固支梁的弹性力学分析[J]. 郑州大学学报:理学版, 2008, 40(1): 116-119.  
FAN Y J, LI L, LI H ZH. The elastic mechanics analysis of fixed beams under the concentrated load [J]. *J. of Zhengzhou Univ. : Nat. Sci. Ed.*, 2008, 40(1): 116-119. (in Chinese)

- [15] 李会知, 杨建中, 李昊. 集中载荷作用下两端固支梁的弹塑性力学解[J]. 郑州大学学报:理学版, 2007, 39(1): 107-109.

LI H ZH, YANG J ZH, LI H. The elastic-plastic solution of the beam fixed at two ends under a concentrated load [J]. *J. of Zhengzhou Univ. : Nat. Sci. Ed.*, 2007, 39(1): 107-109. (in Chinese)

- [16] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.

WANG X CH. *The Finite Element Method* [M]. Beijing: Tsinghua Press, 2003. (in Chinese)

#### 作者简介:



高云国(1955—),男,山东乳山人,研究员,博士生导师,1991年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事光电仪器总体设计方面的研究。E-mail:gaoyunhua@163.com



王超(1990—),男,山东枣庄人,硕士研究生,2012年于山东大学获得学士学位,主要从事光电跟踪设备车载稳定性方面的研究。E-mail:wangchao 4478389@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)