

文章编号: 1003-501X(2011)03-0019-06

光电经纬仪旋转靶标特性对目标跟踪的影响

顾营迎^{1,2}, 沈湘衡¹, 贺庚贤¹, 董智萍¹, 赵玉艳³

(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;

3. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

摘要: 旋转靶标是一种室内检测光电经纬仪跟踪性能的常用设备。本文介绍了旋转靶标的基本组成结构和影响靶标运动特性(方位俯仰角速度、角加速度)的基本参数,应用球面三角几何建立了旋转靶标的方位俯仰角坐标方程。依据方位俯仰角坐标方程分析靶标的特性参数对靶标运动特性的影响,说明旋转靶标存在运动特性与实际跟踪目标特性不一致的问题,得出应用旋转靶标评价光电经纬跟踪性能是不全面充分的结论。

关键词: 旋转靶标; 运动特性; 球面三角几何; 光电经纬仪

中图分类号: TP761.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.03.004

The Impact of Rotating Target Characteristics on Target Tracking Performance of Photoelectric Theodolite

GU Ying-ying^{1,2}, SHEN Xiang-heng¹, HE Geng-xian¹, DONG Zhi-ping¹, ZHAO Yu-yan³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, Jilin Province, China)

Abstract: Rotating target is the common equipment used to test tracking performance of photoelectric theodolite indoor. With the aim to study the impact of rotating target characteristics on target tracking performance of photoelectric theodolite, we introduced the basic structure of rotating target and the core parameters which can impact the motion features of rotating target. Using the method of spherical trigonometry, we established the coordinate equation for the angle of azimuth and elevation. According to the coordinate equation, we presented how the parameters of rotating target take responsible for the target motion features. Finally, we demonstrate the difference of motion features between rotating target and actual tracking target; suggesting that using rotating target to test the tracking performance of photoelectric theodolite is inaccurate.

Key words: rotating target; motion features; spherical trigonometry; photoelectric theodolite

0 引言

光电经纬仪是一种利用光学系统并配合电子技术对空中运动目标进行识别、跟踪及获取目标运动信息(如方位俯仰角度、飞行轨迹等)的大型高精度光测设备,在军事、科学研究等领域有广泛的应用^[1-2]。为了评价光电经纬仪跟踪目标的性能(包括跟踪角速度、跟踪角加速及跟踪精度等),一般用靶标模拟运动目标供光电经纬仪跟踪,通过光电经纬仪跟踪模拟目标的情况最终等效得出光电经纬仪跟踪目标的性能。运用靶标来模拟运动目标的优点在于目标运动轨迹可控,且可以计算出精确的轨迹坐标,便于经纬仪跟踪精度

收稿日期: 2010-11-06; 收到修改稿日期: 2010-11-29

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No.2008AA7034320B)

作者简介: 顾营迎(1984-),男(汉族),天津武清人。实习研究员,博士,主要研究工作是光电测量设备精密检测。E-mail: gu007623@163.com。

分析,同时减少了费时费力的外场校飞试验,使对经纬仪跟踪性能的评价可以方便的在室内完成^[3]。随着技术的进步,目前的旋转靶标不但可以提供模拟运动目标,而且由于安装了时统和轴角编码器部件也能够提供目标的位置、速度、加速度等信息。旋转靶标已逐步由提供模拟运动目标的装置发展为能够提供精确可控目标的测量检测装置。但是由于旋转靶标自身的结构特性限制,使得应用旋转靶标检测光电经纬仪时还存在一些局限或问题。例如,旋转靶标产生的目标运动轨迹单一,且目标的速度和加速度是关联量,不能独立控制;目标局限在较小的方位俯仰角范围内,不能够全面评价经纬仪在全方位俯仰角上的跟踪性能;目标运动轨迹特性与真实目标特性差异较大等。

本文将从旋转靶标的结构出发,提取影响靶标运动的特性参数(旋转靶标的旋转半锥角、旋转轴与水平面的夹角、旋转角度),应用球面三角几何建立旋转靶标的方位俯仰角坐标的方程,根据方程的数学关系分析旋转靶标的运动特性,说明旋转靶标特性对目标跟踪的影响特点,并分析说明了旋转靶标存在的问题和不足,引发对新型靶标结构形式的思考。

1 旋转靶标的结构及特性参数

旋转靶标的结构如图1所示,由控制箱,支撑架,旋转轴,轴角编码器,旋转臂,平行光管,反射镜等组成^[4]。控制箱负责靶标的旋转参数控制、电源开关及靶标位置信息的反馈等,有的还带有时统功能。支撑架是靶标的结构支撑体,一般刚性强度较大,稳定性能较好。轴角编码器作为旋转角度测量装置,可以精确测量靶标旋转的角度,通过结合时间信息可以计算出靶标的旋转角速度和角加速度。平行光管用来产生星点目标供经纬仪跟踪。

旋转靶标与光电经纬仪的位置关系如图1所示,应使旋转靶标旋转时形成的光锥点与光电经纬仪俯仰方位轴几何交点重合。从图1中可以看出靶标旋转轨迹的每个位置点都可以用唯一的方位俯仰角坐标来表示。进一步对旋转靶标进行数学抽象,可以看到有三个参量可以唯一的确定靶标的方位俯仰角坐标,他们分别为:靶标绕轴旋转在光路上形成的旋转半锥角 a ,旋转轴与水平面的夹角 b ,靶标绕轴旋转的角度 θ ^[5]。这三个参量即为旋转靶标的特性参数,由这三个参数可以确定靶标的方位俯仰角坐标。如果我们再引入对时间的微分,即可通过靶标旋转的角度得出靶标旋转的角速度,对应到方位俯仰角坐标上可进一步计算出方位俯仰角速度和角加速度。

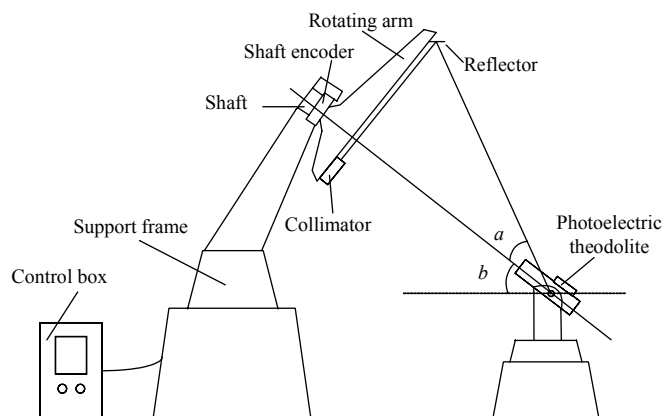


图1 旋转靶标示意图

Fig.1 Schematic diagram of rotating target

2 旋转靶标的方位俯仰角坐标方程

在图2中,定义旋转靶标在最高点 M 时旋转的角度为 0 ,所处的方位角为 0 ,旋转半锥角为 a ,旋转轴与水平面的夹角为 b ,当旋转靶标由 M 点逆时针转至 K 点时,靶标所处的方位角为 A ,俯仰角为 E ,旋转靶标绕旋转轴的旋转角度为 θ 。根据几何原理可知旋转靶标旋转时形成的运动轨迹是在同一个球面上的。当旋转靶标在球面上由 M 点转至 K 点时,在球面上形成了一个球面三角形 BKS ,由球面三角形原理我们有:

$$\begin{cases} \angle KBS = A, & \angle BSK = \theta \\ BK = \pi/2 - E, & BS = \pi/2 - b \\ KS = a \end{cases} \quad (1)$$

如图3所示,根据球面三角形边的余弦公式有

$$\cos(\pi/2 - E) = \cos a \cos(\pi/2 - b) + \sin a \sin(\pi/2 - b) \cos \theta \tag{2}$$

根据球面三角形正弦公式有

$$\sin A / \sin a = \sin \theta / \sin(\pi/2 - E) \tag{3}$$

对式(2)和(3)化简整理, 得到旋转靶标绕轴旋转的角度 θ 与方位角 A 和俯仰角 E 之间的数学关系式^[6]

$$E = \arcsin(\cos a \sin b + \sin a \cos b \cos \theta) \tag{4}$$

$$A = \arcsin(\sin a \sin \theta / \cos E) \tag{5}$$

在实际应用中我们往往关心的是旋转靶标绕旋转轴转动的角速度 ω 与方位角速度 ω_A 、角加速度 a_A 、俯仰角速度 ω_E 、角加速度 a_E 的关系, 因而需要对式(4)、(5)进行微分, 分别求取 ω_E 、 ω_A 、 a_E 、 a_A

$$\omega_E = dE/dt = \frac{-\omega \sin a \cos b \sin(\omega t)}{(1 - p^2)^{1/2}} \tag{6}$$

$$\omega_A = dA/dt = \frac{\omega \sin a \cos(\omega t)}{q} \tag{7}$$

$$a_E = d\omega_E/dt = \frac{-\omega^2 \sin a \cos b \cos(\omega t)}{(1 - p^2)^{1/2}} + \frac{\omega^2 \sin^2 a \cos^2 b \sin^2(\omega t)}{(1 - p^2)^{3/2} p} \tag{8}$$

$$a_A = d\omega_A/dt = \frac{-\omega^2 \sin a \sin(\omega t)}{q} + \frac{\omega^2 \sin^3 a \cos^2(\omega t)}{q^3 \sin(\omega t)} \tag{9}$$

其中: $p = \cos a \sin b + \sin a \cos b \cos(\omega t)$; $q = \cos(E)(1 - \frac{\sin^2(a) \sin^2(\omega t)}{\cos^2(E)})^{1/2}$ 。

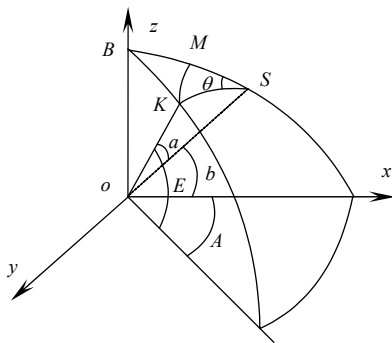


图 2 旋转靶标坐标关系图
Fig.2 The coordinates of rotating target

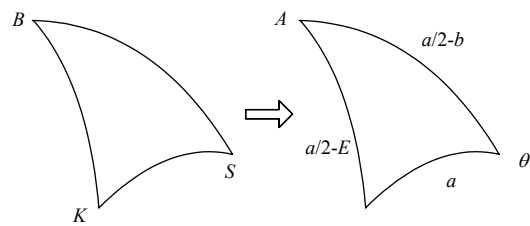


图 3 球面三角形
Fig.3 Spherical triangle

3 旋转靶标特性参数对跟踪性能的影响分析

3.1 靶标旋转角度 θ

根据式(4)、(5)可知一旦确定了参数 a 、 b , 则旋转靶标方位俯仰角坐标由旋转角度 θ 唯一确定。由于方位角 A 和俯仰角 E 均由参数 a 、 b 、 θ 唯一决定, 这就导致方位角 A 和俯仰角 E 是具有关联性的, 即我们通过调整参数 a 、 b 、 θ 来改变方位俯仰角坐标是有局限性的, 说明旋转靶标只能产生特定坐标轨迹的跟踪目标, 这是旋转靶标特性上的一个不足。图 4 所示为 $a=10^\circ$, $b=15^\circ$, $\omega=40^\circ/s$ 时旋转靶标旋转角度值 θ 与方位俯仰角的关系。

3.2 旋转角速度 ω

靶标的旋转角速度 ω 是靶标旋转角度值 θ 对时间 t 的微分。根据式(6)(7)(8)(9)可知, 该参数可以影响旋

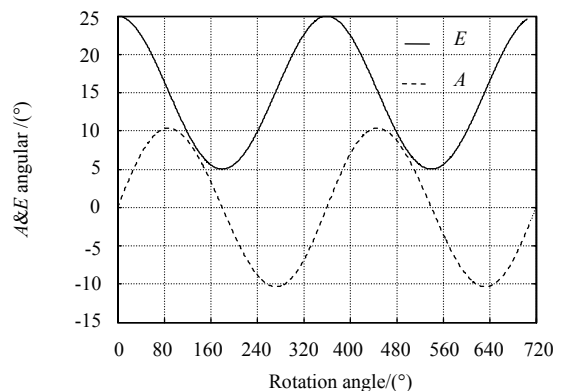


图 4 角度值 θ 与方位俯仰角的关系
Fig.4 The relationship between θ and $A-E$

转靶标的方位俯仰角速度、角加速度。图5~图6为旋转靶标旋转半锥角 $a=10^\circ$ ，旋转轴与水平面夹角 $b=15^\circ$ ，分别取旋转角速度为 $40^\circ/\text{s}$ ， $60^\circ/\text{s}$ ， $120^\circ/\text{s}$ 时旋转靶标的俯仰方位角速度、角加速度与旋转角速度的关系曲线。从图中可以看出通过调整旋转角速度 θ 可以有效的改变旋转靶标的方位俯仰角速度、角加速度，这就为通过调整旋转角速度控制靶标的方位俯仰角速度、角加速度提供了依据。另外从图中还可以看出不论旋转角速度怎样控制，生成的靶标方位俯仰角速度、角加速度是具有变化率的，即不能产生恒定的角速度或角加速度。因此旋转靶标的另一个不足就是生成的目标运动特性有限，与实际运动目标特性差异较大。

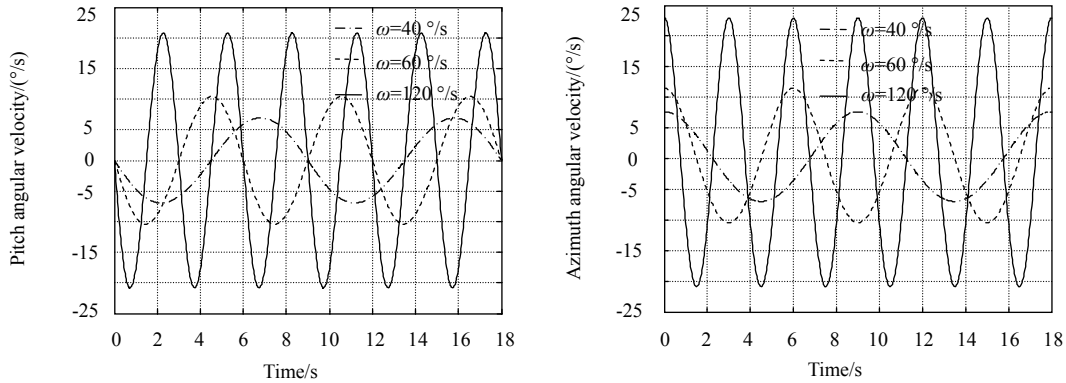


图5 旋转角速度 ω 与俯仰方位角速度 ω_E 、 ω_A 的关系($a=10^\circ, b=15^\circ$)

Fig.5 The relationship between ω and ω_E 、 ω_A ($a=10^\circ, b=15^\circ$)

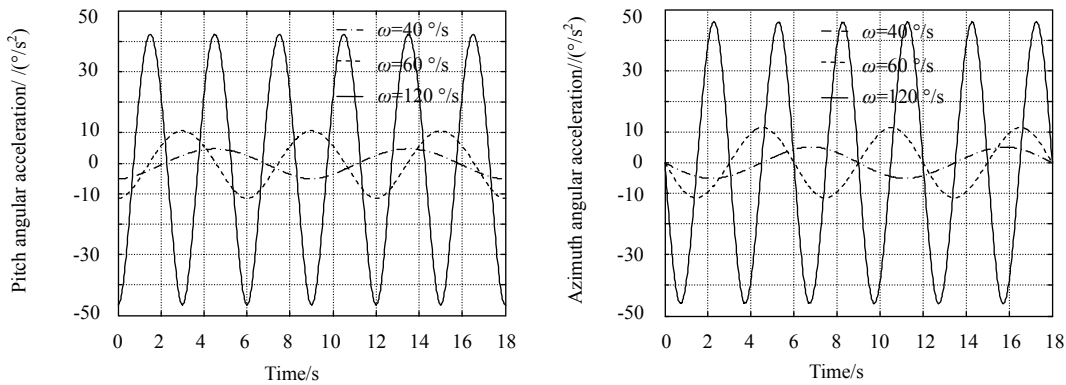


图6 旋转角速度 ω 与俯仰方位角加速度 a_E 、 a_A 的关系($a=10^\circ, b=15^\circ$)

Fig.6 The relationship between ω and a_E 、 a_A ($a=10^\circ, b=15^\circ$)

3.3 旋转半锥角 a

图7~图8为旋转靶标旋转轴与水平面的夹角 $b=45^\circ$ ，旋转角速度 $\omega=40^\circ/\text{s}$ ，分别取旋转靶标旋转半锥

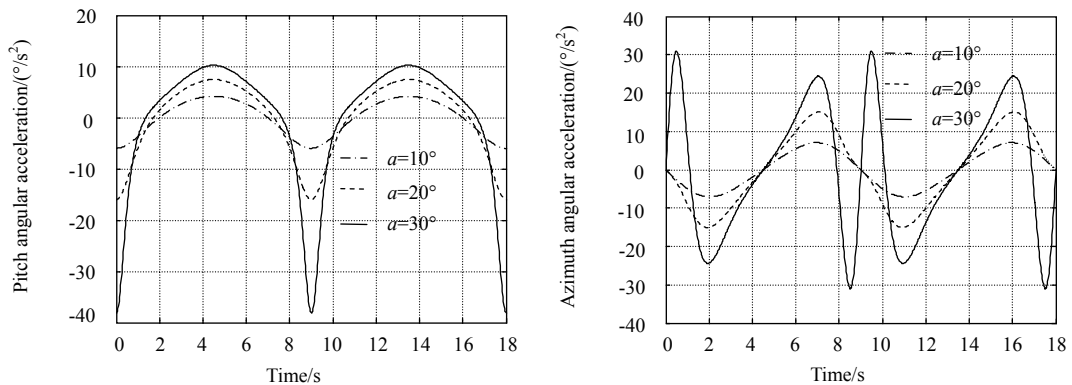


图7 旋转半锥角 a 与俯仰方位角加速度 a_E 、 a_A 的关系($b=45^\circ, \omega=40^\circ/\text{s}$)

Fig.7 The relationship between a and a_E 、 a_A ($b=45^\circ, \omega=40^\circ/\text{s}$)

角 $\alpha=10^\circ$, $\alpha=20^\circ$, $\alpha=30^\circ$ 时旋转靶标的方位俯仰角速度、角加速度与旋转半锥角的关系曲线。从图中可以看出虽然改变旋转半锥角 α 可以改变方位俯仰角速度、角加速度, 但旋转半锥角 α 的增大会引起较大的角速度、角加速度变化率, 不利于作为光电经纬仪跟踪目标使用, 同时在突变点附近会引起较大的计算误差。另外这样复杂的角速度、角加速度特性曲线与实际跟踪目标特性相差较远。实际应用中旋转半锥角一般不大于 30° 。

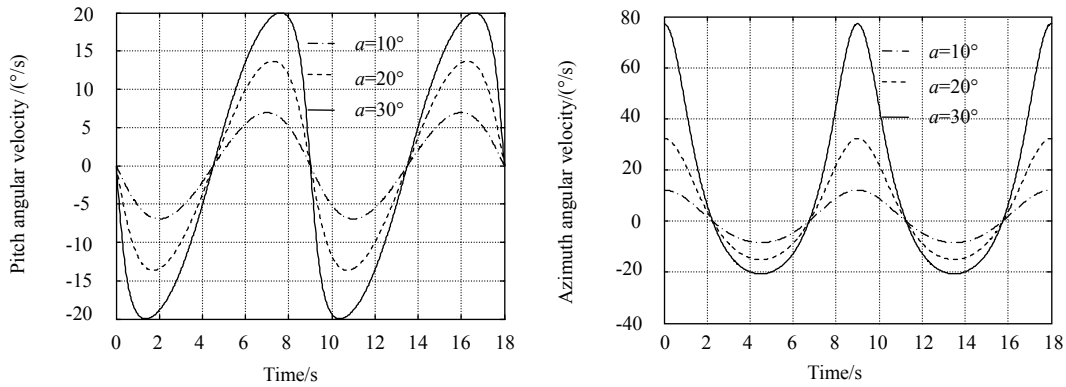


图 8 旋转半锥角 α 与俯仰方位角速度 ω_E 、 ω_A 的关系 ($b=45^\circ, \omega=40^\circ/s$)

Fig.8 The relationship between α and ω_E 、 ω_A ($b=45^\circ, \omega=40^\circ/s$)

3.4 旋转轴与水平面的夹角 b

图 9 ~ 图 10 为旋转靶标旋转半锥角 $\alpha=15^\circ$, 旋转角速度 $\omega=40^\circ/s$, 分别取旋转靶标旋转轴与水平面的

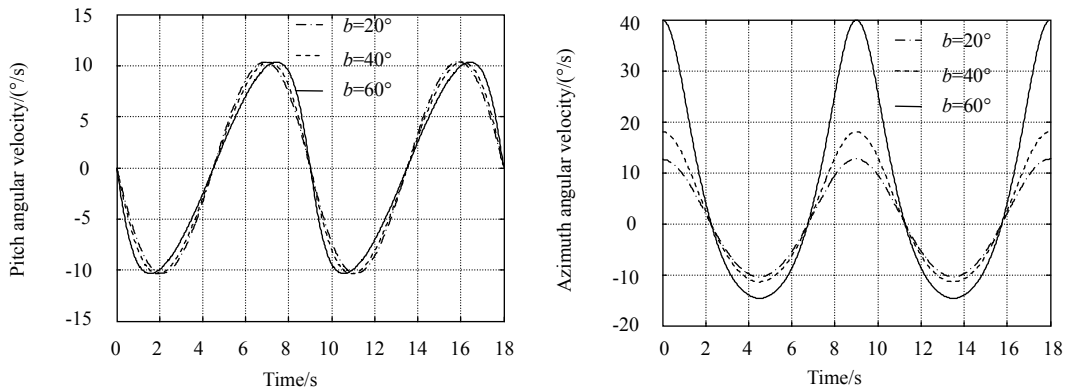


图 9 旋转轴同水平面的夹角 b 与俯仰方位角速度 ω_E 、 ω_A 的关系 ($\alpha=15^\circ, \omega=40^\circ/s$)

Fig.9 The relationship between b and ω_E 、 ω_A ($\alpha=15^\circ, \omega=40^\circ/s$)

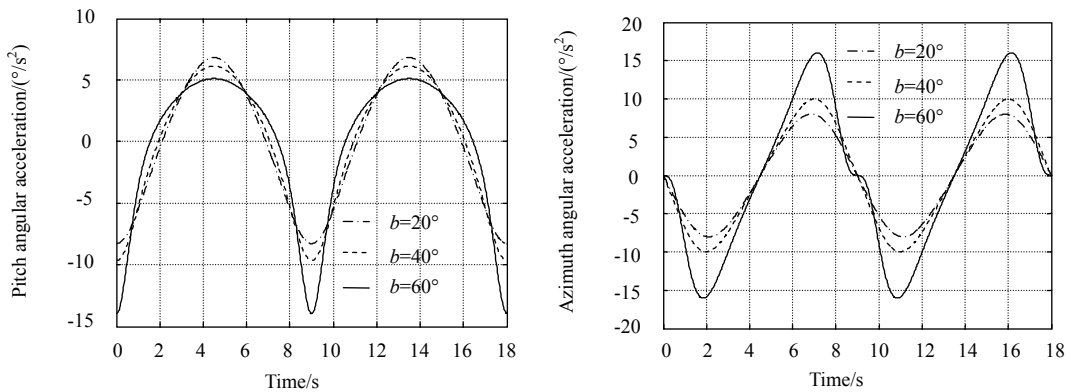


图 10 旋转轴同水平面的夹角 b 与俯仰方位角加速度 a_E 、 a_A 的关系 ($\alpha=15^\circ, \omega=40^\circ/s$)

Fig.10 The relationship between b and a_E 、 a_A ($\alpha=15^\circ, \omega=40^\circ/s$)

夹角 $b=20^\circ$, $b=40^\circ$, $b=60^\circ$ 时旋转靶标的方位俯仰角速度、角加速度与旋转靶标旋转轴与水平面的夹角 b 的关系曲线。通过图 9 可以看到俯仰角速度、角加速度对参量 b 的变化不敏感, 而方位角速度、角加速度对参量 b 的变化较敏感。一般参量 b 设置同样不能过大, 需要与参量 a 综合设置, 设置的基本原则应满足式(10)。

$$a+b < 90^\circ, a < b \quad (10)$$

3.5 旋转靶标特性对跟踪性能的综合影响

通过靶标旋转速度参数 ω 控制靶标运动特性是最简单有效的方法, 而参数 a 、 b 一般是固定不变的, 而且为了保证靶标运动特性轨迹具有较好的轴对称性应选取较小的 a 、 b 值。另外旋转靶标的特性参数及方位俯仰角坐标方程决定了旋转靶标有如下的固有特性:

- a) 旋转靶标提供的目标在方位角坐标和俯仰角坐标上是相互关联的, 不能独立控制靶标方位运动特性或俯仰运动特性;
- b) 旋转靶标的方位俯仰运动特性都是变速率的, 不能提供具有恒定速度或加速度的目标特性;
- c) 旋转靶标仅能在有限的经纬仪方位俯仰角范围内运动, 不能充分考核光电经纬仪在全方位俯仰角度上的跟踪性能。

因此旋转靶标目标运动特性与实际目标运动特性差异较大, 用旋转靶标目标来评价光电经纬仪的跟踪性能还不够全面充分。

4 结 论

影响旋转靶标运动特性的参数主要有旋转角速度、旋转半锥角、旋转轴与水平面的夹角三个参量, 其中旋转角速度参数控制靶标运动特性最为简便有效。旋转靶标的方位俯仰角坐标方程在数学关系上揭示了旋转靶标的运动特性与实际跟踪目标的运动特性差异较大, 应用旋转靶标评价光电经纬跟踪性能不够全面充分。

参考文献:

- [1] 王习文, 陈娟, 王秋平. 光电经纬仪跟踪飞行目标的一种仿真方法 [J]. 计算机仿真, 2009, 26(4): 38-42.
WANG Xi-wen, CHEN Juan, WANG Qiu-ping. A simulative method of photoelectrical theodolite for tracking flying target [J]. **COMPUTER SIMULATION**, 2009, 26(4): 38-42.
- [2] 王芳, 贾涛, 张春林. 应用坐标变换动态修正光电经纬仪脱靶量 [J]. 光学 精密工程, 2009, 17(12): 2940-2945.
WANG Fang, JIA Tao, ZHANG Chun-lin. Dynamic correction of target deviations for photoelectric theodolites by coordinate transform [J]. **Opt.Precision Eng.**, 2009, 17(12): 2940-2945.
- [3] 何照才, 胡保安. 光学测量系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
HE Zhao-cai, HU Bao-an. **Optical measurement system** [M]. Beijing: National Defence Industries Press, 2002.
- [4] 贺庚贤, 沈湘衡, 周兴义. 光电经纬仪动态测角精度仿真测量 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(12): 3127-3129.
HE Geng-xian, SHEN Xiang-heng, ZHOU Xing-yi. Simulation measurement of dynamic angle precision of photoelectric theodolite [J]. **Journal of System Simulation**, 2008, 20(12): 3127-3129.
- [5] 吴瑾, 张波, 沈湘衡. 可编程动态靶标参数设计 [J]. 光电工程, 2008, 35(9): 91-94.
WU Jin, ZHANG Bo, SHEN Xiang-heng. Parameter design of dynamic target for test tracking performance of photoelectric theodolite [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2008, 35(9): 91-94.
- [6] 张宁, 沈湘衡, 胡剑虹. 用 BP 网的跟踪误差辨识建模及跟踪性能评价 [J]. 光电工程, 2009, 36(9): 35-40.
ZHANG Ning, SHEN Xiang-heng, HU Jian-hong. Identification and modeling of tracking error using bp neural network and evaluation of tracking performance [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, 36(9): 35-40.