

文章编号: 1002-2082 (2021) 03-0510-06

光电校靶中捷联惯导轴线的表征校准方法

杨海金, 郝 芳, 郭 明, 张 平, 高雪军, 朱佳丽,
费程波, 卞臻臻, 梁 琦

(江苏北方湖光光电有限公司, 江苏 无锡 214035)

摘 要: 光电校靶采用捷联惯导系统, 需将惯导轴线用光电自准直系统表征捷联, 用于对设备轴线的测量。光电自准直系统所表征的轴线与惯导轴线的一致性是影响校靶精度的重要因素, 为提高光电校靶系统测量精度和效率, 提出了一种惯导轴线的光电表征和校准方法。该方法是在分析测量结果偏差与一致性关系的基础上, 采用实验数据拟合的方式得到自准直系统光轴与惯导轴之间的角度偏差值, 用于系统修正, 从而实现高精度校准。通过试验, 将传统光机校正法和光电校准法结合使用, 可大幅度提高系统校正效率, 同时得到惯导与光轴一致性精度在15"以内。试验结果表明, 与传统光学平晶引出的光机校正法相比, 该方法的表征准确度和校准精度更高, 适用于高精度惯性测量系统。

关键词: 光电校靶; 自准直; 惯导; 光轴一致性

中图分类号: TN206; V249.3

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0303003

Characterization calibration method of strapdown inertial navigation axis in photoelectric target calibration

YANG Haijin, HAO Fang, GUO Ming, ZHANG Ping, GAO Xuejun, ZHU Jiali,
FEI Chengbo, BIAN Zhenzhen, LIANG Qi

(Jiangsu North Huguang Opto-Electronics Co. Ltd., Wuxi 214035, China)

Abstract: The strapdown inertial navigation system is generally used for photoelectric target calibration. The inertial navigation axis should be characterized by the photoelectric auto-collimation system for the measurement of the equipment axis. The consistency between the axis characterized by the photoelectric auto-collimation system and the inertial navigation axis is an important factor affecting the target calibration accuracy. In order to improve the measurement accuracy and efficiency of the photoelectric target calibration system, a photoelectric characterization and calibration method of the inertial navigation axis was proposed. This method was based on the analysis of the relationship between the deviation and consistency of the measurement results, and the angle deviation value between the auto-collimation system optical axis and the inertial navigation axis was obtained by fitting the experimental data, which was used for the system correction, so as to realize the high-precision calibration. Through the test, by combining the traditional optical machine correction method with the photoelectric calibration method, the calibration efficiency of the system could be greatly improved, and the consistency accuracy between the inertial navigation axis and the optical axis was less than 15" at the same time. The experimental results show that compared with the traditional optical

收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2021-03-27

基金项目: 中国兵器工业集团开发项目

作者简介: 杨海金 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电产品研发及总体设计方面的工作。

E-mail: 121047059@qq.com

通信作者: 张平 (1979—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光电技术与系统研究方面的工作。E-mail: zhangping_wuxi@163.com

machine correction method by the traditional optical flat-crystal, the proposed method has higher characterization accuracy and calibration accuracy, which is suitable for high-precision inertial measurement system.

Key words: photoelectric target calibration; auto-collimation; inertial navigation; optical axis consistency

引言

随着惯导技术的发展,越来越多的设备利用惯导的惯性测姿优势进行一定的姿态测量,而这种测量过程中通常将光电测量设备与惯导相结合^[1-2],形成捷联式的安装形式,既保证了设备的精度要求,也提高了设备的综合可靠性。

在新型的光电校靶产品中,利用自准直仪与惯导的各自优势,发挥光电自准直仪的光学特性实现光学轴线对准,继而通过惯导获取出光学轴线的惯性姿态,实现对相应设备的空间轴线姿态测量。通过这种轴线姿态的测量方式^[3-5],可以实现对相应产品的惯性测量。在该类设备中,需要将自准直仪的光轴与惯导的轴线校准一致,使得两者的姿态关系差最小,关系差越小则可以获得越高的测姿精度。而对这类产品的校正往往受到各类不确定因素的影响,从而使得测姿精度下降^[6-7]。

本文基于捷联惯导系统轴线的表征和实际应用,通过分析光机校正和光电校准两种校准方法,对捷联轴线一致性校准产生的精度进行了详细分析,并总结了该类技术问题的校正方法及调校措施,为以后该类产品的校准提供了参考。

1 光机校正方法

惯导为捷联式,其数字轴系是在三轴转台上通过标定建立的^[8-10],对外表现为安装靠面,因此可利用该靠面对自准直光轴进行校准。图1为光机校正示意图。

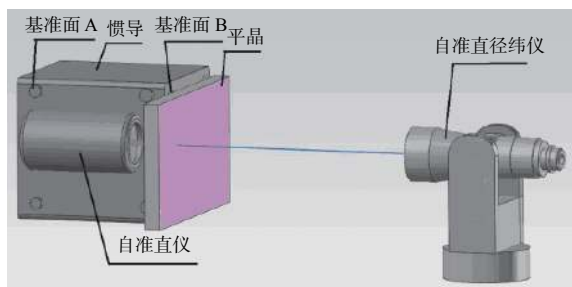


图1 光机校正示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical machine correction

自准直仪安装于惯导基准面A上,其光轴需和惯导横滚轴平行,而惯导横滚轴可用基准面

B的垂直线代表^[11]。校正时将一平晶紧靠基准面B上,前方放置一自准直经纬仪对平晶进行自准,此时自准直经纬仪光轴与平晶表面垂直,即是同惯导横滚轴平行;取下平晶,自准直经纬仪方位和俯仰保持不变;通过自准直经纬仪观察自准直仪出射的分划;调整自准直仪的安装方向,使其出射分划瞄准自准直经纬仪分划,即认为惯导光轴与自准直仪光轴一致。

光机校正的精度一般都不高,其主要误差来源于基准面B与惯导轴的垂直性,目前捷联惯导是通过基准面固定在三轴转台上进行标定和测试^[12-13],而台体上惯导的安装面与转台的旋转轴垂直性要求不高,这就直接影响惯导基准面与惯导轴之间的垂直性,影响了校准的精度。因此在高精度系统中必须采用更高精度的校正方法。

2 光电校准方法

捷联惯导轴为数字虚拟轴,如果知道自准直光轴与惯导轴的角度偏差,即可通过数学计算方法将惯导轴转换到一个与自准直光同轴的轴系中^[12-13],而自准光轴与惯导轴的偏差可由下列方法得到。

将2面平面反射镜成一定夹角水平放置,并利用自准直经纬仪将每面反射镜的法线调整至水平状态,再测量出2面反射镜在水平向的夹角 α ,如图2所示,则2面反射镜的姿态变化为:方位 α ,俯仰 0° 。

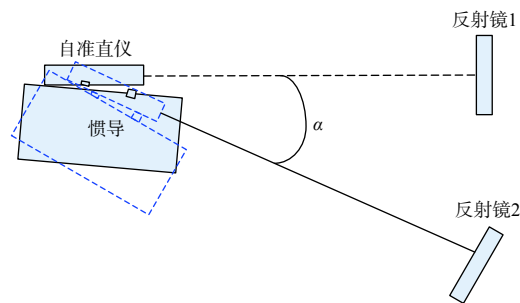


图2 光电校准示意图

Fig. 2 Schematic diagram of photoelectric correction

将惯导组件上电、自对准后,用惯导上的自准直仪对反射镜1进行光学自准,并记录此时惯导组件的姿态数据;再用自准直仪对反射镜2进行光学自准,并记录此时惯导组件的姿态数据。由于自

准直光轴与惯导轴之间存在着角度偏差,所以惯导姿态变化将不会是方位 α 、俯仰 0° ,将偏差分别设为方位 $\Delta\alpha$ 、俯仰 $\Delta\beta$ 。

图 3 为自准直光轴与惯导轴在方位向偏差角 γ 为 0.02° 、 0.05° 、 0.1° 时(经过粗校后值较小),反射镜夹角 α 与偏差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 之间的关系。

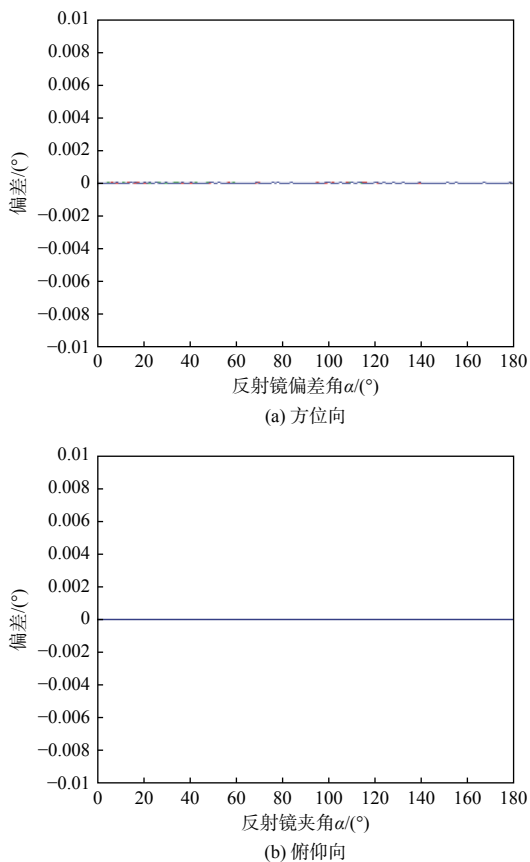


图 3 水平向偏差时反射镜水平夹角对惯导轴偏差的影响
Fig. 3 Influence of mirror horizontal angle on inertial navigation axis deviation at horizontal deviation

图 4 为自准直光轴与惯导轴在俯仰向偏差角 λ 为 0.02° 、 0.05° 、 0.1° 时(经过粗校后值较小),反

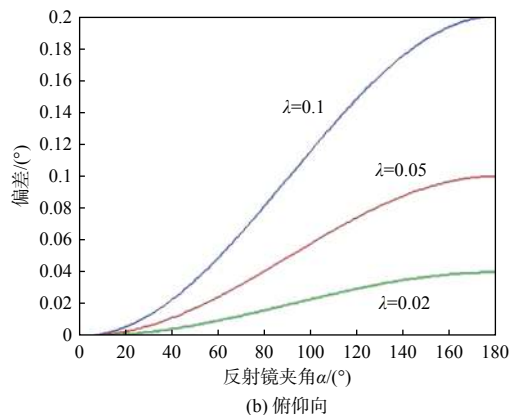
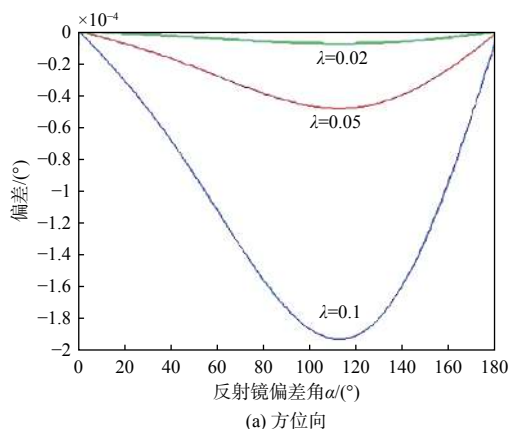


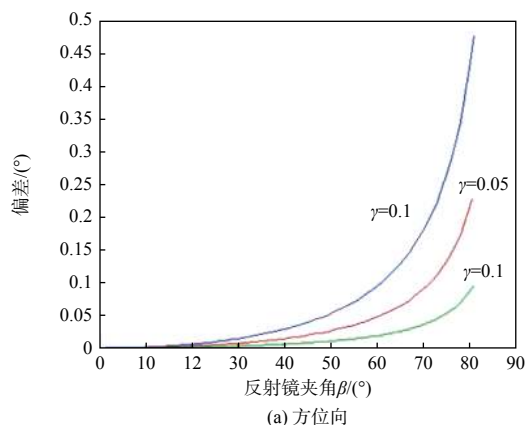
图 4 俯仰向偏差时反射镜水平夹角对惯导轴偏差的影响
Fig. 4 Influence of mirror horizontal angle on inertial navigation axis deviation at pitching deviation

射镜夹角 α 与偏差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 之间的关系。

可以看出,当惯导轴与自准直光轴在方位向存在偏差时,用 2 面水平成夹角的反射镜测量出的惯导姿态变化几乎和反射镜姿态变化一致。而当惯导轴与自准直光轴在俯仰向存在偏差时,惯导姿态变化与反射镜姿态变化差异明显,特别是俯仰向的差异。在 $\alpha=180^\circ$ 时,偏差 $\Delta\beta$ 几乎是偏差 λ 的两倍,因此可根据 2 次惯导的姿态变化数据近似拟合出惯导轴与自准直光轴在俯仰向的偏差角。

同样将 2 面平面反射镜成一定夹角垂直放置,并利用自准直经纬仪将每面反射镜的法线调整在垂直面内,再测量出 2 面反射镜在俯仰向的夹角 β ,如图 5 所示,则 2 面反射镜的姿态变化为:方位 0° ,俯仰 β 。

图 5 为自准直光轴与惯导轴在方位向偏差角 γ 为 0.02° 、 0.05° 、 0.1° 时(经过粗校后值较小),反射镜夹角 β 与偏差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 之间的关系。



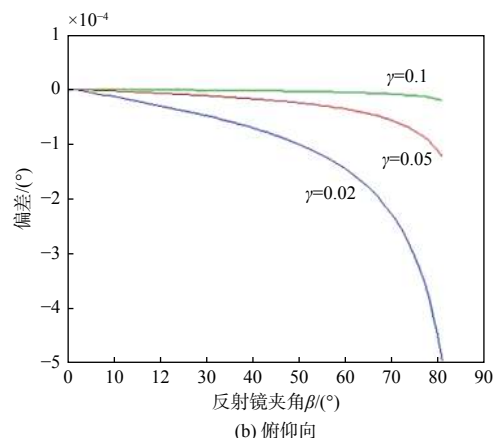


图5 方位向偏差时反射镜垂直夹角对惯导轴偏差的影响

Fig. 5 Influence of mirror vertical angle on inertial navigation axis deviation at azimuth deviation

图6为自准直光轴与惯导轴在方位向偏差角 λ 为 0.02° 、 0.05° 、 0.1° 时(经过粗校后值较小),反射镜夹角 β 与偏差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 之间的关系。

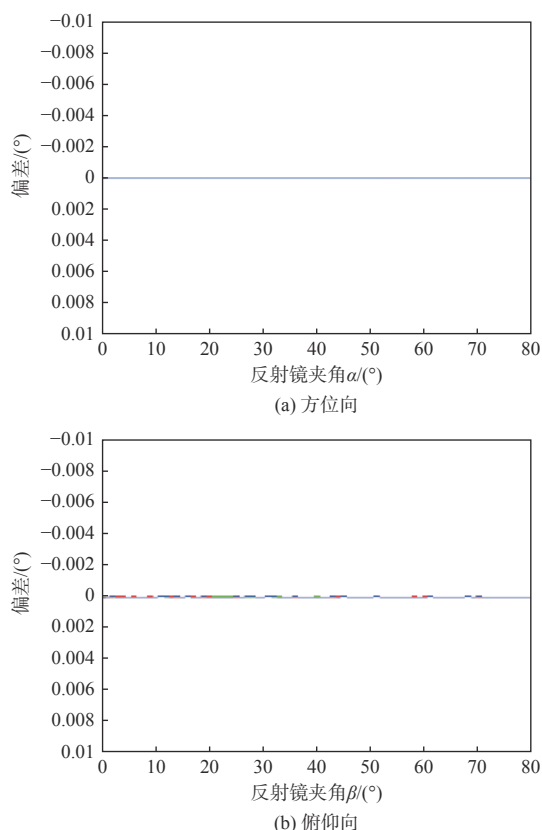


图6 俯仰向偏差时反射镜垂直夹角对惯导轴偏差的影响

Fig. 6 Influence of mirror vertical angle on inertial navigation axis deviation at pitching deviation

同样可看出,当惯导轴与自准直光轴在俯仰向存在偏差时,用2面垂直成夹角的反射镜测量

出的惯导姿态变化几乎和反射镜姿态变化一致。而当惯导轴与自准直光轴在水平向存在偏差时,惯导姿态变化与反射镜姿态变化差异明显,特别是方位向的差异。在 $\beta=60^\circ$ 时,偏差 $\Delta\beta$ 几乎与偏差 γ 相等,因此可根据两次惯导的姿态变化数据近似拟合出惯导轴与自准直光轴在水平向的偏差角。

3 实验与结果

3.1 实验装置

测量装置如图7所示,方位向有7个反射镜,将其中1个反射镜作为基准反射镜,其余6个反射镜的方位向与基准反射镜成一定夹角,角度值根据测试需要设定,用经纬仪进行标定,俯仰向夹角小于 $15''$,表征惯导的方位。俯仰向7个反射镜同方位的7个反射镜安装方式和标定方法一样,表征惯导的俯仰。该装置右侧安装一块基准镜,其法线方位与中间基准镜夹角为 $90^\circ \pm 15''$,俯仰向夹角小于 $15''$,表征惯导的横滚。本装置采用T3经纬仪标定,精度为 $2''$ 。



图7 实验场景

Fig. 7 Experimental scene

3.2 实验结果

按照上述方法,将惯导组件上电,利用惯导上自准直仪对该装置中间和右侧两基准镜光学自准,获取基准轴,然后分别对方位和俯仰向的10个反射镜光学自准,测量得到10组数据。根据这些数据,采用最小二乘法对偏差角度进行迭代计

算。为了确保计算结果正确,可以再次测量 1 组数据,将迭代结果代入计算,检查误差是否满足要求。经过计算与验证,得到惯导轴与自准直光轴

之间的偏差为:方位 -0.01° ,俯仰 -0.70° 。再利用该偏差对惯导数据进行修正,得到修正后的数据偏差^[14-15],如表 1 所示。

表 1 试验数据表
Table 1 Experimental data

序号		经纬仪测量/(°)	惯导测量值/(°)	修正后惯导值/(°)	偏差/(″)
1	方位	7.8408	7.8514	7.8396	-4
	俯仰	0.0319	0.1325	0.0306	-5
2	方位	15.7928	15.8124	15.7900	-10
	俯仰	-0.0267	0.1862	-0.0303	-13
3	方位	25.3992	25.3886	25.3972	-7
	俯仰	-0.1342	0.2367	-0.1313	10
4	方位	36.2103	36.1982	36.2124	8
	俯仰	-0.2169	0.3317	-0.2171	-1
5	方位	44.5711	44.5848	44.5734	8
	俯仰	-0.2992	0.3891	-0.3030	-14
6	方位	-0.2144	-0.2713	-0.2130	5
	俯仰	4.0083	4.0049	4.0075	-3
7	方位	-0.1194	-0.2045	-0.1183	4
	俯仰	6.4436	6.4441	6.4458	8
8	方位	-0.1906	-0.3063	-0.1883	8
	俯仰	9.1478	9.1431	9.1459	-7
9	方位	-0.1739	-0.3513	-0.1719	7
	俯仰	13.2350	13.2320	13.2347	-1
10	方位	-0.1289	-0.3557	-0.1287	1
	俯仰	17.7942	17.7895	17.7923	-7

从表 1 可以看出,修正后的惯导测量数据与自准直经纬仪测量值非常接近,可以近似认为惯导轴与自准直仪光轴一致。

4 结论

本文采用光电自准直仪表征惯导轴线,并针对捷联安装的轴线一致性校正问题,分别采用光机校正和光电校准 2 种方法,进行了惯导轴与自准直仪光轴的一致性校准。实验证明,光机校正属于粗略校正,由于各种原因,校正的精度很难达到系统要求;而光电校准属于精确调校,可达到秒级精度。从理论上来说,光电校准可以适用于任何角度的偏差校正,即无需进行光机粗校正也可以进行。实际上,由于机械、光路等系统原因,一般首先进行光机粗略校正,保证光轴与机械结构偏差

不大,再进行光电精确校准,确保系统精度。二者结合使用可提高校正效率,同时惯导和光轴一致性精度在 15″以内,轴线表征准确度高。

参考文献:

[1] CHENG Shoucheng. Optical instrument calibration[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1992: 164-185.
程守澄. 光学仪器检校[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 164-185.
[2] DENG Lilong. Inertial technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006: 64-88.
邓立隆. 惯性技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 64-88.
[3] ZHAO Rui. Study on initial alignment of strapdown inertial system[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.

- 赵睿. 捷联惯性系统初始对准研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [4] ZHU Qiang. Research on test and calibration method for strapdown inertial measurement unit under the condition of battle[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- 朱强. 作战应用条件下惯性测量装置测试标定方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [5] ZHAO Guiling. Calibration and offshore alignment of marine strapdown inertial navigation system based on fiber optic gyro[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- 赵桂玲. 船用光纤捷联惯导系统标定与海上对准技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [6] CHENG Yuan. Research on the calibration method of laser gyro strapdown inertial measurement unit[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- 程源. 激光陀螺捷联惯性组合的标定方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [7] ZHAO Wei, CHANG Ming, LIU Hu, et al. Spatial rotation multi-axis parallelism adjustment and calibration technology[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(5): 627-632.
- 赵玮, 昌明, 刘虎, 等. 空间旋转多光轴平行性校准技术[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 627-632.
- [8] The Editorial Group of Optical Measurement and Instruments. Optical measurement and instruments[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1978.
- 《光学测量与仪器》编辑组. 光学测量与仪器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [9] GONG Jingkuan. Airborne inertial navigation system[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.
- 宫经宽. 航空机载惯性导航系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
- [10] WANG Hu. Three-axis strapdown inertial navigation test bench[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1991(5): 32-35.
- 王瑚. 三轴捷联惯导测试台[J]. 航空精密制造技术, 1991(5): 32-35.
- [11] CHANG Lubin, LI An, QIN Fangjun. The installation error analysis of the dual-axis indexing strapdown guiding system[J]. Computer Simulation, 2011, 28(3): 1-4.
- 常路宾, 李安, 覃方君. 双轴转位式捷联惯导系统安装误差分析[J]. 计算机仿真, 2011, 28(3): 1-4.
- [12] SUN Feng, CAO Tong. A three-position alignment method for single-axis rotation strapdown inertial navigation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 837-842.
- 孙枫, 曹通. 一种单轴旋转捷联惯导的三位置对准方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 837-842.
- [13] LIU Sheng, LU Guangshan, ZHANG Xiaohong, et al. Design of transfer alignment scheme for opto-electronic platform[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(5): 47-50.
- 刘昇, 卢广山, 张晓鸿, 等. 一种用于光电平台的传递对准方案设计[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(5): 47-50.
- [14] YANG Xiaoxia, HUANG Yi. The objective analysis of strapdown inertial navigation system error state under external field calibration conditions[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(6): 657-664.
- 杨晓霞, 黄一. 外场标定条件下捷联惯导系统误差状态可观测性分析[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(6): 657-664.
- [15] KONG Xingwei, GUO Meifeng, DONG Jingxin. Observability and maneuvering scheme of strapdown inertial navigation rapid transfer alignment[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(2): 232-236.
- 孔星炜, 郭美凤, 董景新. 捷联惯导快速传递对准的可观测性与机动方案[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(2): 232-236.