

文章编号:1001-5078(2011)07-0758-05

· 激光应用技术 ·

动力陀螺式激光导引头的动力学建模与仿真

李 慧^{1,2}, 吴军辉², 胡 欣², 赵宏鹏², 殷瑞光²

(1. 63880 部队博士后科研工作站, 河南 洛阳 471003; 2. 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要:在动力陀螺式激光导引头中, 驱动装置和动力陀螺相联系的动力学特性对导引头光轴能否达到预期的运动影响很大。基于该型导引头位标器结构配置和工作原理, 采用光电稳定机构运动学理论及空间坐标变换的方法, 建立了以位标器光轴方位、俯仰框架角与角速度为状态变量的动力学模型, 经仿真计算得到了不同弹体扰动和电磁控制输入下导引头光轴的角速度变化和耦合力矩变化曲线, 分析结果符合导引头光轴的实际运动规律, 为导引头陀螺伺服系统的设计与导引头半实物仿真试验结果的分析提供了模型支持。

关键词:动力陀螺式; 激光导引头; 光轴运动; 动力学模型

中图分类号: TJ765 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.07.010

Dynamic modeling and simulation of dynamic-gyro laser homing head

LI Hui^{1,2}, WU Jun-hui², HU Xin², ZHAO Hong-peng², YIN Rui-guang²

(1. Postdoctoral Workstation of 63880 PLA, Luoyang 471003, China; 2. 63892 PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: In the dynamic-gyro laser seeker, dynamic characteristics of drive device and dynamic-gyro have an influence on the moving accuracy of the seeker. Based on the configuration and principle of the seeker, dynamics model, with the azimuth/pitching frame angle and angular velocity of optical axis as state variable, is built and simulated by means of kinematics theory of optoelectrical stabilization and coordinate transform. Analysis and simulation results conform to the actual movement rule of optical axis. That provides model support for designing the seeker controller and is also helpful to analyze the hardware-in-the-loop simulation results.

Key words: dynamic gyro; laser homing head; optical axis movement; dynamic model

1 引言

作为光电对抗的首要对象, 激光导引头在激光干扰装备的设计定型试验中通常都会作为重要的配试设备, 导引头的核心是一个可以补偿弹体运动对导引头光轴的扰动, 保持光轴指向稳定并能使光轴随动目标视线的精密机电伺服装置^[1]。根据实现空间稳定特性的物理方法的不同, 可分为动力陀螺式、速率陀螺稳定平台和捷联式导引头三类, 一些小型红外弹和激光末制导炮弹, 如美国的“响尾蛇”、“海尔法”, 法国的“西北风”, 以及俄罗斯的“萨姆-7”、“红土地”等光学导引头都采用了动力陀螺稳定方式, 在美国、俄罗斯等精确制导技术发展较早的国家, 都建立了完备的激光半主动制导武器对抗仿真系统, 可对激光导引头光轴跟踪目标的运

动过程进行仿真分析^[2-4]。

在激光半主动制导武器攻击目标过程中, 弹体的姿态角运动, 以及外部载荷如风、气流等引起的扰动力矩会通过多种方式耦合到导引头光轴上, 严重影响导引头光轴的稳定与跟踪, 因此, 有必要通过建模仿真方式, 研究导引头光轴的运动。本文详细分析了动力陀螺式激光导引头位标器的整体结构与光轴进动跟踪原理, 在此基础上建立了该型导引头位标器完整的动力学模型, 仿真分析了导引头光轴在不同的电磁控制力矩和干扰力矩作用下的运动规

基金项目: 博士后科学基金项目 (No. 20100471804) 资助。

作者简介: 李 慧 (1980 -), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为激光对抗技术。E-mail: limingj12@163.com

收稿日期: 2011-02-16; 修订日期: 2011-03-04

律,可为激光导引头的试验结果、试验现象综合分析提供理论指导。

2 位标器陀螺跟踪原理

动力陀螺式激光导引头,采用三自由度陀螺作为跟踪机构,位标器是导引头的重要组成部分,它接收目标漫反射的激光能量,经光学系统会聚于探测器焦

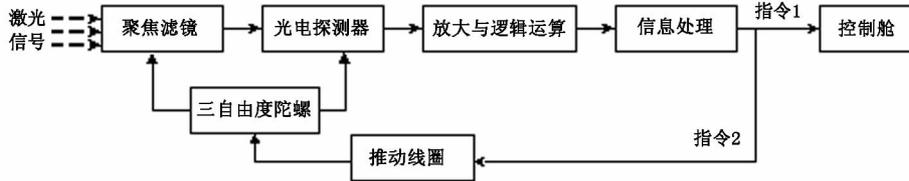


图1 动力陀螺稳定式激光导引头简化方框图

位标器部件整体结构如图2所示。光学系统和探测器装于陀螺转子上,其光轴与转子轴重合。万向支架是一种传统的支承装置,由外环和内环两个环构成,转子位于内、外环之外,转子通过一对轴承与内环相连,外环通过一对轴承与机座相连,机座是与弹体固连的球形壳体柱。外环为方位环,内环为俯仰环,角误差信号由位于内框上的探测器给出,弹体坐标系上的方位、俯仰框架角信号由弹体上绕制的线圈感应得到,产生与不同坐标系的信号,经放大变换送入信号处理电路进行处理计算,最终形成跟踪指令驱动导引头光轴,实现光轴的稳定跟踪。

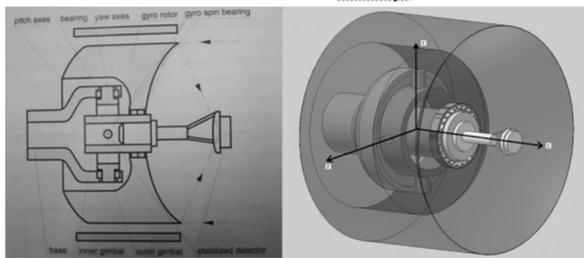


图2 位标器动力陀螺整体稳定结构图

由于这种具有内万向支架和外转子式陀螺结构的特殊性,在分析计算方法上用一般经典陀螺运动分析方法会显得过于烦琐,因此,采用光电稳定机构运动学理论及空间坐标变换的方法^[6-7],建立了位标器的动力学模型,对位标器光轴的运动作了深入的仿真分析。

3 位标器动力学模型的推导

位标器陀螺结构如图2所示,为便于讨论运动情况,建立各个坐标系及其转换关系如图3所示。其中,OX_iY_iZ_i为内环坐标系(即导引头测量坐标系),L₁₀,L₀₁,L₂₀,L₃₁等为各坐标系之间的坐标变换矩阵,导引头光轴的方位角、俯仰角分别用φ_y,φ_z表

平面,并由探测器转换为描述目标视线和位标器光轴之间角误差的电信号,输出给电子舱进行处理;同时处理后的误差跟踪指令信号加到陀螺系统的进动线圈,产生进动力矩驱动光学系统对目标进行跟踪,闭合导引头回路,使光轴指向目标,实现对目标视线角速度的测量。简化方框图如图1所示^[5]。

示,φ_y是外环相对于弹体的转角,φ_z是内环相对于外环的转角。

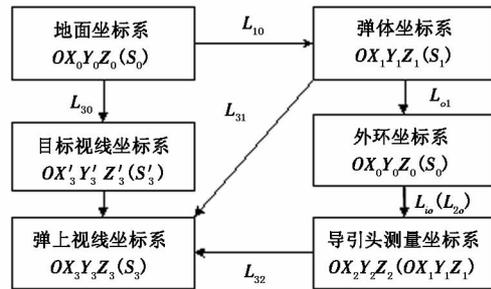


图3 各坐标系之间关系及坐标变换矩阵

设初始时刻弹体与导引头光轴均无偏转,弹体、外环与内环各轴对应平行,且均平行于地面坐标系,当弹体姿态、光轴姿态发生变化时,导引头测量系与弹体系之间的变换关系可由它们之间的坐标变换矩阵得到。

根据环架结构和复合运动原理,导引头光轴的指向运动由内环、外环和弹体的运动合成得到,弹体上两自由度耦合的导引头测量系角速度矢量ω₂为:

$$\omega_2 = \begin{bmatrix} \omega_{x2} \\ \omega_{y2} \\ \omega_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_y \sin\varphi_z \\ \dot{\varphi}_y \cos\varphi_z \\ \dot{\varphi}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{x1} \cos\varphi_y \cos\varphi_z + \omega_{y1} \sin\varphi_z - \omega_{z1} \sin\varphi_y \cos\varphi_z \\ -\omega_{x1} \cos\varphi_y \sin\varphi_z + \omega_{y1} \cos\varphi_z + \omega_{z1} \sin\varphi_y \sin\varphi_z \\ \omega_{x1} \sin\varphi_y + \omega_{z1} \cos\varphi_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,ω₁=[ω_{x1} ω_{y1} ω_{z1}]^T为弹体转动角速度在弹体系三个坐标轴上的投影分量;φ̇_y为外环跟踪角速度;φ̇_z为内环跟踪角速度。

由式(1)可知,导引头光轴角速度是由环架自身角速度和弹体角速度两部分的投影的合成,这也说明,导引头光轴的运动除了受陀螺伺服系统转动

指令控制外,还受到弹体运动的影响。

设陀螺转子相对弹体的自转角速度为 Ω ,则:

$$\begin{cases} H_{x2} = J_{x2}(\Omega + \omega_{x2}) \\ H_{y2} = J_{y2}\omega_{y2} \\ H_{z2} = J_{z2}\omega_{z2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, H_{x2}, H_{y2}, H_{z2} 为位标器陀螺角动量在导引头测量系各轴上的投影; J_{x2}, J_{y2}, J_{z2} 为陀螺转子相对导引头测量系各轴的转动惯量。

对于实际位标器陀螺部件,转子角动量 H :

$$H = J\Omega, J_{y2} = J_{z2} = J_r, \Omega \gg \omega_{y2}, \Omega \gg \omega_{z2} \quad (3)$$

由欧拉动力学方程,可得:

$$\begin{cases} J(\dot{\Omega} + \dot{\omega}_{x2}) = M_{x2} \\ J_r \dot{\omega}_{y2} + (J - J_r)\omega_{x2}\omega_{z2} + J\Omega\omega_{z2} = M_{y2} \\ J_r \dot{\omega}_{z2} + (J - J_r)\omega_{x2}\omega_{y2} + J\Omega\omega_{y2} = M_{z2} \end{cases} \quad (4)$$

俯仰环的惯性矩 M_{z2} 可表示为:

$$M_{z2} = M_{fz} - k_{v1}\dot{\varphi}_z - K_{r1}\varphi_z - M_{u1} \quad (5)$$

同理,方位环受到的惯性矩 M_{y2} 可表示为:

$$M_{y2} = M_{py} - k_{v2}\dot{\varphi}_y - K_{r2}\varphi_y - M_{u2} \quad (6)$$

其中, k_{v1}, k_{v2} 为内、外环粘性摩擦系数; K_{r1}, K_{r2} 为内、外环弹性系数; M_{u1}, M_{u2} 为质量不平衡等干扰力矩; M_{fz}, M_{py} 为两轴电磁控制力矩。

将各式代入式(4)中,可得到位标器部件的完整的非线性动力学模型。

$$\begin{cases} J_r \ddot{\varphi}_z + k_{v1}\dot{\varphi}_z + K_{r1}\varphi_z = M_{fz} - M_{ko1} - M_{do1} - M_{u1} \\ J_r \cos\varphi_z \ddot{\varphi}_y + [K_{v2} + J(\omega_{x1}\sin\varphi_y \sin\varphi_z + \omega_{z1}\cos\varphi_y \sin\varphi_z)] \dot{\varphi}_y + K_{r2}\varphi_y \\ = M_{py} + M_{ko2} + M_{do2} - M_{u2} \end{cases} \quad (7)$$

式中, M_{ko2} 为内环对外环的耦合项; M_{do2} 为弹体与外环的交叉耦合力矩项; M_{ko1} 为外环对内环的交叉耦合力矩; M_{do1} 为弹体对内环的交叉耦合力矩。它们的表达式分别如下:

$$M_{ko1} = \frac{J_r - J}{2} \dot{\varphi}_y^2 \sin(2\varphi_z) - H \dot{\varphi}_y \cos\varphi_z \quad (8)$$

$$\begin{aligned} M_{do1} = & H(\omega_{x1}\cos\varphi_y \sin\varphi_z - \omega_{y1}\cos\varphi_z - \omega_{z1}\sin\varphi_y \sin\varphi_z) + J_r[\dot{\omega}_{x1}\sin\varphi_y + \dot{\omega}_{z1}\cos\varphi_y + \\ & \dot{\varphi}_y(\omega_{x1}\cos\varphi_y - \omega_{z1}\sin\varphi_y)] + \dot{\varphi}_y(J_r - J) \\ & [\omega_{y1}\sin(2\varphi_z) + (\omega_{x1}\cos\varphi_y - \omega_{z1}\sin\varphi_y)\cos(2\varphi_z)] + \\ & \omega_{y1}(J_r - J)(\omega_{x1}\cos\varphi_y - \omega_{z1}\sin\varphi_y)\cos(2\varphi_z) + \\ & 1/2(J_r - J)[\omega_{y1}^2 - (\omega_{x1}\cos\varphi_y - \omega_{z1}\sin\varphi_y)^2]\sin(2\varphi_z) \end{aligned} \quad (9)$$

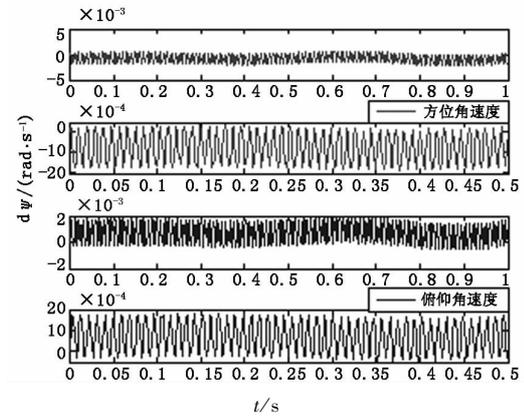
$$M_{ko2} = (2J_r - J) \dot{\varphi}_y \dot{\varphi}_z \sin\varphi_z - H \dot{\varphi}_z \quad (10)$$

$$\begin{aligned} M_{do2} = & J_r(\dot{\omega}_{x1}\cos\varphi_y \sin\varphi_z - \dot{\omega}_{y1}\cos\varphi_z - \dot{\omega}_{z1}\sin\varphi_y \sin\varphi_z) + (\omega_{x1}\sin\varphi_y + \omega_{z1}\cos\varphi_y)[(J_r - J) \\ & \omega_{y1}\sin\varphi_z - H] + (J_r - J)[\omega_{x1}\omega_{z1}\cos\varphi_z \cos(2\varphi_y) + \\ & 1/2(\omega_{x1}^2 - \omega_{z1}^2)\cos\varphi_z \sin(2\varphi_y)] + \dot{\varphi}_z(2J_r - J) \\ & (\omega_{x1}\cos\varphi_y \cos\varphi_z + \omega_{y1}\sin\varphi_z - \omega_{z1}\sin\varphi_y \cos\varphi_z) \end{aligned} \quad (11)$$

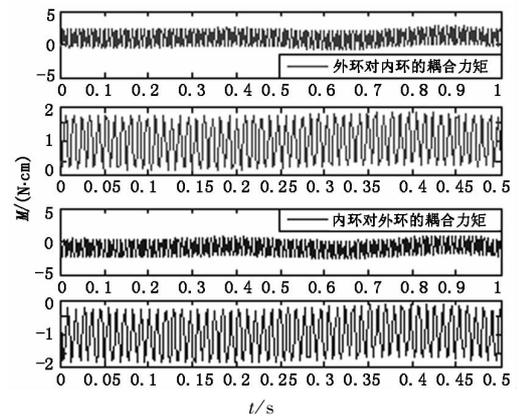
4 位标器动力学模型仿真分析

对式(7)表示的以位标器光轴方位、俯仰框架角与角速度为状态变量的动力学模型进行仿真分析。设位标器部件的参数为:位标器部件绕赤道轴转动惯量 $J_r = 2 \text{ N} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$,绕转子轴转动惯量 $J_r = 3.08 \text{ N} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$,粘性摩擦系数 $k_{v1} = k_{v2} = 0.1 \text{ N} \cdot \text{cm}/\text{rad}/\text{s}$,内外环弹性系数 $k_{r1} = k_{r2} = 0.05 \text{ N} \cdot \text{cm}/\text{rad}$,将各种情况下的仿真结果分析如下:

(1)无弹体扰动,两轴的控制力矩输入为 $[1, 1]$ 时,内外环角速度如图4(a)所示,最大角速度为 $0.1^\circ/\text{s}$,两环之间的交叉耦合力矩项如图4(b)所示,平均耦合力矩为 $0.99 \text{ N} \cdot \text{cm}$ 。



(a)



(b)

图4 无弹体扰动时仿真曲线图

(2)当存在弹体纵轴方向幅值 $0.5 \text{ rad}/\text{s}$,频率

为 2 Hz 的正弦扰动时,内外环角速度如图 5(a) 所示,两环之间的交叉耦合力矩项如图 5(b) 所示。

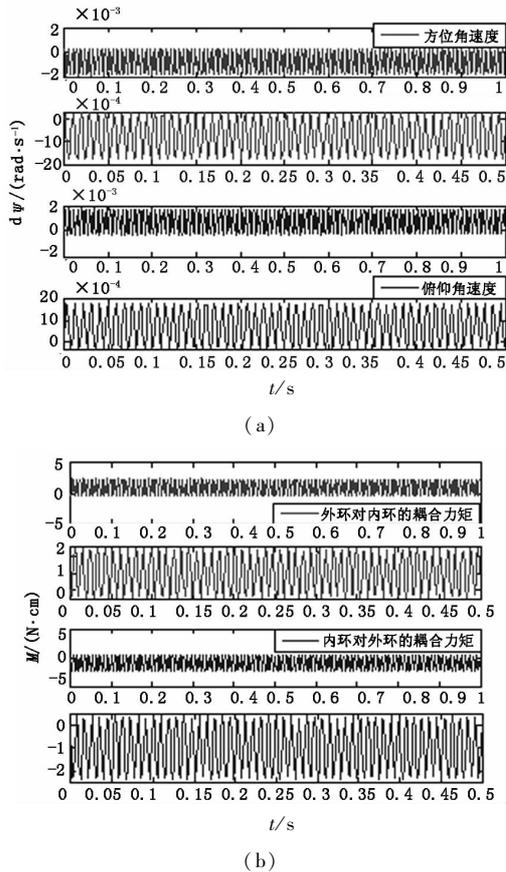


图 5 弹体扰动为 $\omega_{x1} = 0.5 \sin 4 \pi t$ 时仿真曲线图

由图 5 可知,最大角速度为 $0.11^\circ/\text{s}$,平均耦合力矩约为 $1 \text{ N} \cdot \text{cm}$,与图 5 相比变化很小,说明由于位标器陀螺绕转子轴存在大惯量回转时,只有弹体纵轴方向的扰动对位标器的输出和耦合力矩的影响可以忽略。

(3)弹体扰动 $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}$ 均为幅值 0.5 rad/s ,频率为 2 Hz 的正弦扰动时,两轴的控制输入为 $[10, 10]$ 时,导引头光轴角速度变化与耦合力矩变化关系如图 6 所示。

最大跟踪角速度约为 $32^\circ/\text{s}$,平均角速度为 $0.6^\circ/\text{s}$,角速度振荡变化较大,在设计两回路控制器时需要根据光轴跟踪角速度指标要求,采用合适的控制算法控制角速度的振荡增大趋势。

如图 6(b) 所示,弹体对外环的耦合力矩与内环对外环的交叉耦合力矩项近似大小相等,相位相反,但力矩矢量和随着时间会逐渐变大,说明外环的运动受弹体扰动的影响在振荡变化,且有增大趋势,为保持稳定跟踪状态,需要根据光轴跟踪角速度指标要求适当选取驱动力矩。

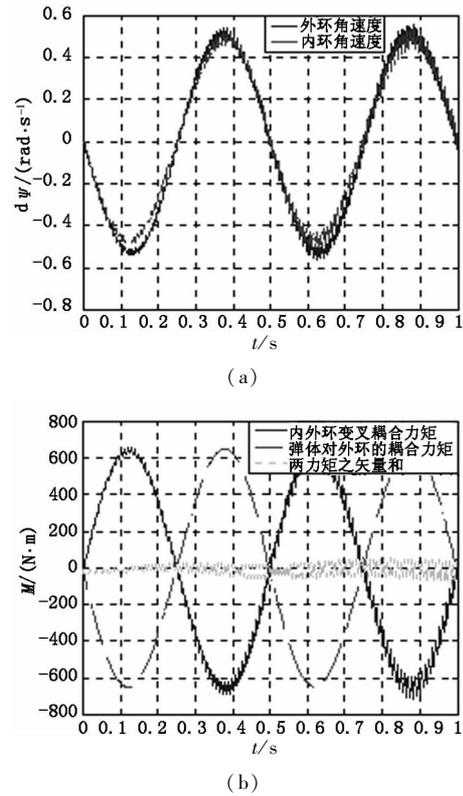


图 6 弹体扰动 $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1} = 0.5 \sin 4 \pi t$ 时仿真结果曲线

(4)弹体扰动 w_{x1}, w_{y1}, w_{z1} 均为幅值 0.5 rad/s ,频率为 2 Hz 的正弦扰动时,两轴的控制输入为 $[400, 400]$ 时,导引头光轴跟踪角速度曲线如图 7 所示。

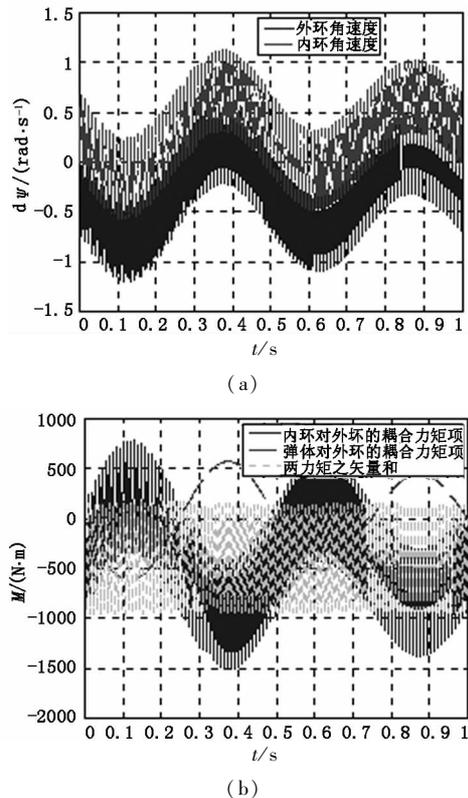


图 7 导引头光轴跟踪角速度变化曲线和耦合力矩曲线

与图6(a)中比较,导引头光轴角速度总体变化较大,最大跟踪角速度约为 $64^\circ/\text{s}$,随着控制力矩的增大,光轴跟踪角速度提高一倍,在整个过程中变化频率很快,但平均角速度约为 $15^\circ/\text{s}$;随着两轴的电磁力矩增大时,内外环之间的交叉耦合力矩会增大,但弹体对外环的耦合力矩与图6(b)所示,基本保持一致,这样两力矩之矢量和与电磁驱动力矩,将使位标器光轴沿外环方向产生跟踪目标的进动。

分析了电磁驱动力矩较小和较大时、弹体有无干扰输入时,导引头位标器输出框架角速度及弹体与内外环的耦合力矩变化曲线,仿真结果可解释该型导引头位标器光轴的实际运动规律,并可为导引头伺服控制系统的设计提供定量参考。

5 结论

根据动力陀螺式激光导引头位标器的结构配置及工作原理,应用光电稳定机构运动学理论及空间坐标变换的方法,分别建立了六个坐标系及其变换矩阵,在此基础上推导出了该类导引头位标器完整的动力学模型。该模型全面考虑了导引头位标器光轴运动过程中受到的干扰力矩,得到了不同弹体扰动和电磁控制输入下的导引头输出框架角速度关系和耦合力矩关系,计算结果可指导该型导引头伺服控制系统的设计与导引头半实物仿真试验结果、试验现象的分析。

参考文献:

- [1] Fan Dapeng, Zhang Zhiyong, Fan Shixun, et al. Research of basic principles of E_o stabilization and tracking device [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 673 - 680. (in Chinese)
- [2] Li Hui, Wu Junhui, Zhu Zheng, et al. Stabilization, tracking principle and simulation of rate gyroscope stabilized laser seeker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 4. (in Chinese)
李慧, 吴军辉, 朱震, 等. 速率陀螺稳定式激光导引头稳定跟踪原理分析与仿真 [J]. 红外与激光工程, 2011, 4.
- [3] Xu Nanrong. Infrared radiation and homing [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995. (in Chinese)
徐南荣. 红外辐射与制导 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [4] Zhang Hexin, Sun Peng, Meng Fei. Apply laser to high precise guided weapon system [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(1): 6 - 8. (in Chinese)
张合新, 孙鹏, 孟飞. 激光在高精度制导武器中的应用 [J]. 激光与红外, 2004, 34(1): 6 - 8.
- [5] Wang Bo, Peng Xingquan, Yu Zenghui. Target seeker gyro for guided shell [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 1997, 2(5): 20 - 23. (in Chinese)
汪渤, 彭兴泉, 于增慧. 末制导炮弹用位标器陀螺 [J]. 中国惯性技术学报, 1997, 2(5): 20 - 23.
- [6] Kennedy P J, Kennedy R L. Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(1): 3 - 15.
- [7] Zhao Shanyou. Design of homing guidance and control system on antiaircraft missile [M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 1992. (in Chinese)
赵善友. 防空导弹武器寻的制导控制系统设计 [M]. 北京: 宇航出版社, 1992.