

平台导引头隔离度寄生回路特性分析

宋 韬¹, 林德福¹, 祁载康¹, 孙宝彩²

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081;

2. 空军装备研究院 装备总体论证研究所, 北京 100085)

摘 要: 平台导引头隔离度的存在不仅降低了导引头跟踪精度, 其引起的隔离度寄生回路对导弹制导系统存在严重的影响。通过对平台导引头隔离度产生机理进行分析, 分别建立了弹簧力矩和阻尼力矩引起的隔离度模型, 在此模型的基础上利用劳斯判据分析了隔离度寄生回路稳定边界, 并研究了寄生回路对制导系统有效时间常数和有效比例导引系数的影响。结果表明: 为了保证隔离度寄生回路的稳定, 需要限制制导控制系统主要参数的取值范围; 在寄生回路的作用下制导系统有效时间常数和有效比例导引系数与原设计值发生偏差, 需要重点关注。所得结论可以为导弹制导控制系统初步设计以及导引头总体指标确定提供理论参考。

关键词: 导引头隔离度寄生回路; 干扰力矩; 稳定性; 制导时间常数; 比例导引系数

中图分类号: TJ765.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3309-06

Analysis on the characteristic of seeker disturbance rejection rate parasitical loop

Song Tao¹, Lin Defu¹, Qi Zaikang¹, Sun Baocai²

(1. Department of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. The Research Institute on General Development and Evaluation of Equipment, EAAF of PLA, Beijing 100085, China)

Abstract: The seeker disturbance rejection rate not only severely degrades seeker tracking accuracy, but also has greatly issues for the missile guidance performance. The generation mechanism of disturbance rejection rate was analyzed, and the models of disturbance rejection rate caused by spring torque and damping torque were established. Based on the Routh criterion, the stability zone of parasitical loop was obtained. The effect of the parasitical loop on effective guidance time constant and effective navigation ratio was studied. The result shows that the limits for important guidance parameters should be determined to insure the stability of parasitical loop; both the effective guidance time constant and effective navigation ratio are changed on the action of parasitical loop. The conclusion is helpful for engineers at the preliminary stage of guidance and control system design.

Key words: seeker disturbance rejection rate parasitical loop; disturbance torque; stability; guidance time constant; navigation ratio

收稿日期: 2013-03-04; 修订日期: 2013-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61172182)

作者简介: 宋韬(1988-), 男, 博士生, 主要从事导弹总体与制导控制方面的研究。Email: 10901034@bit.edu.cn

导师简介: 林德福(1971-), 男, 副研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事导弹总体与制导控制方面的研究。Email: lindf@bit.edu.cn

0 引言

导弹在飞行过程中，弹体与导引头稳定平台之间存在着导线拉扯、轴承之间的粘性摩擦等相互作用，这种相互作用使弹体扰动耦合到导引头跟踪过程中，从而降低了导引头测量和跟踪精度^[1]。隔离度表征了稳定平台隔离弹体扰动的能力。

在国内外关于导引头隔离度的研究中，大多将弹体扰动作为引起隔离度问题的直接原因，研究弹体运动对导引头空间指向的影响^[2-4]。而从隔离度产生机理来说，干扰力矩是引起隔离度问题的主要因素^[5]。隔离度存在的主要问题在于其在制导系统内部形成了隔离度寄生回路。目前，隔离度寄生回路并没有引起国内外研究人员的重视，仅 Nesline^[6]、Gernel^[7]对天线罩误差斜率寄生回路稳定性进行了一些研究，杜运理^[8]对隔离度寄生回路稳定性进行了研究，但其将隔离度模型简化为一个固定增益和相角滞后，所得结论与实际导引头存在一定的差距。

通过建立干扰力矩引起的平台导引头隔离度寄生回路模型，利用劳斯判据方法得到寄生回路的稳定域，并进一步分析了寄生回路对制导系统有效时间常数和有效比例导引系数的影响。

1 平台导引头隔离度模型

引起导引头隔离度的主要因素有两个：电机电枢中产生的反电动势以及由于导线拉扯和框架轴承间动静摩擦引起的干扰力矩^[9]。导引头隔离度模型如图 1 所示。

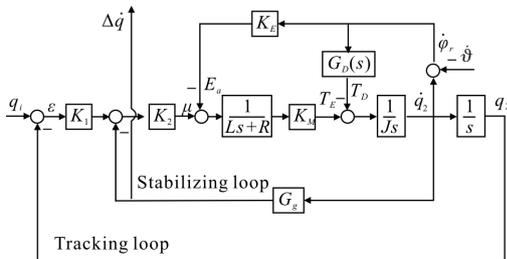


图 1 导引头隔离度模型

Fig.1 Seeker disturbance rejection rate model

图 1 中， K_1 为功放； K_2 为运放； L 为电枢绕组电感； R 为电枢绕组总电阻； J 为电机转动惯量； K_T 为

电机转矩系数； K_E 为反电动势系数； G_g 为角速率陀螺； $G_D(s)$ 为干扰力矩模型； $u_a(t)$ 为电枢电压； $i_a(t)$ 为电枢电流； E_a 为电枢反电动势； $T_M(t)$ 为电磁转矩； $\dot{q}_s(t)$ 为电机转子相对惯性空间的旋转角速度； $T_D(t)$ 为干扰力矩。

干扰力矩主要有弹簧力矩和阻尼力矩两种^[10]。弹簧力矩是由导引头稳定平台相对弹体转动时导线拉扯等引起的，与框架角 φ_r 成比例，比例系数为 K_N 。阻尼力矩是由导引头平台与基座之间连接部件的相互作用引起的，它与框架角速度 $\dot{\varphi}_r$ 成比例，比例系数为 K_ω 。干扰力矩模型如图 2 所示。

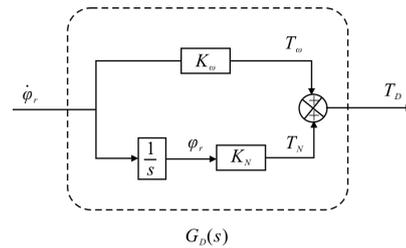


图 2 干扰力矩模型

Fig.2 Disturbing torque model

某典型导引头参数如表 1 所示。

表 1 典型导引头参数

Tab.1 Parameters of typical seeker

Parameter	Values
Operational amplifier K_1	15
Power amplifier K_2	15
Inductance L	0.002 8 H
Resistance R	12 Ω
Torque coefficient K_T	0.45 N·m/A
Motor rotational Inertia J	0.002 4 kg·m ²
Angular rate gyro G_g	1
Back-EMF coefficient K_e	0.18 V/rad·s ⁻¹

1.1 反电动势引起的隔离度模型

不考虑干扰力矩的影响，单独研究反电动势引起的隔离度模型，令图 1 中 $G_D(s)=0$ 。

由反电动势引起的隔离度传递函数为：

$$G_E(s) = \frac{\dot{q}}{\dot{\varphi}} = \frac{K_E K_T G_g s}{Js^2 (Ls+R) + K_E K_T s + G_g K_2 K_T s + K_1 K_2 K_T} \quad (1)$$

图 3 为反电动势引起的隔离度模型频域特性。

可以看出,隔离度幅值较小(小于 1.3%),反电动势不是引起隔离度的主要因素。在以下研究中,忽略反电动势对隔离度的影响。

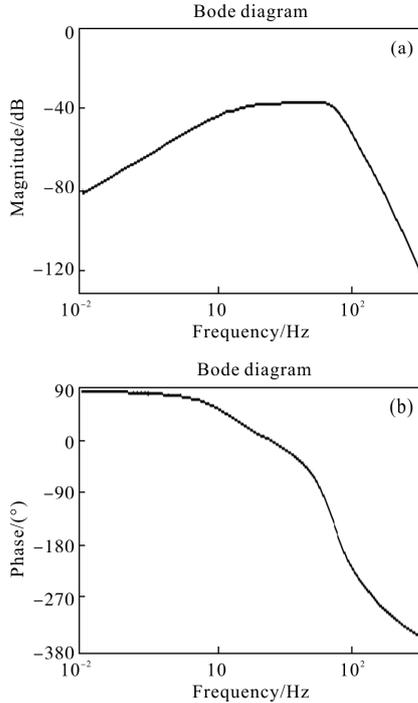


图 3 反电动势引起的隔离度模型频域特性
Fig.3 Frequency response of disturbance rejection rate model caused by back-EMF

1.2 弹簧力矩引起的隔离度模型

单独弹簧力矩作用下隔离度传递函数为:

$$G_N(s) = \frac{K_N(Ls+R)}{Js^2(Ls+R)+K_N(Ls+R)+G_g K_2 K_T s + K_1 K_2 K_T} \quad (2)$$

在导引头系统中,电感 L 和电机转动惯量 J 较小,一般可以忽略;而角速度陀螺带宽远大于导引头稳定回路带宽,可近似认为 $G_g=1$;对 $G_N(s)$ 进行简化,可得

$$G_N(s) \triangleq \frac{A_N}{T_N s + 1} \quad (3)$$

其中: $A_N = \frac{K_N R}{K_N R + K_1 K_2 K_T}, T_N = \frac{K_2 K_T}{K_N R + K_1 K_2 K_T}$

从公式(3)可以看出,随着弹簧力矩系数 K_N 的增大,隔离度幅值逐渐增加。图 4 为当 $K_N=0.2$ 时,原模型和简化模型频域特性对比。可以看出,原模型和简化模型在制导控制系统所关心的中频段和低频段一致性很好,说明简化有效。

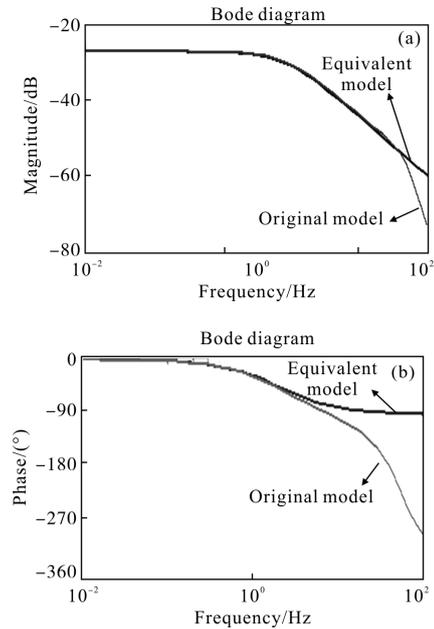


图 4 弹簧力矩引起的导引头隔离度模型频域特性
Fig.4 Frequency response of disturbance rejection rate model caused by spring torque

1.3 阻尼力矩引起的隔离度模型

单独阻尼力矩作用下隔离度传递函数为:

$$G_\omega = \frac{K_\omega s(Ls+R)}{Js^2(Ls+R)+K_\omega(Ls+R)+G_g K_2 K_T s + K_1 K_2 K_T} \quad (4)$$

同理,简化后的模型为

$$G_\omega \triangleq \frac{A_\omega s}{T_\omega s + 1} \quad (5)$$

其中, $A_\omega = \frac{K_\omega R}{K_1 K_2 K_T}, T_\omega = \frac{K_\omega R + K_2 K_T}{K_1 K_2 K_T}$

从公式(5)可以看出,随着阻尼力矩系数 K_ω 的增加,隔离度幅值增加。图 5、图 6 为当 $K_\omega=0.036$ 时,原

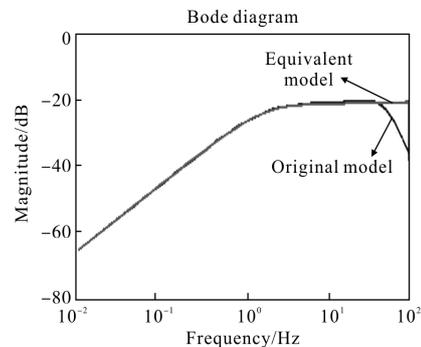


图 5 阻尼力矩引起的隔离度模型幅频特性
Fig.5 Amplitude response of disturbance rejection rate model caused by damping torque

模型和简化模型频域特性对比。可以看出,原模型和简化模型在制导控制系统所关心的中频段和低频段一致性很好,说明简化有效。

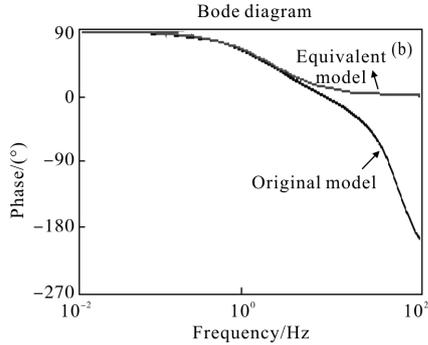


图 6 阻尼力矩引起的隔离度模型相频特性
Fig.6 Phase response of disturbance rejection rate model caused by damping torque

2 隔离度寄生回路稳定性分析

隔离度使导引头输出的视线角速度产生误差,该错误的视线角速度经过制导滤波器,根据制导律生成控制指令,驾驶员控制执行机构改变弹体姿态,使弹体产生姿态角运动,弹体运动经过隔离度模型使导引头再次输出错误的弹目视线角速度,这样就形成了隔离度寄生回路。导引头寄生回路模型如图 7 所示。

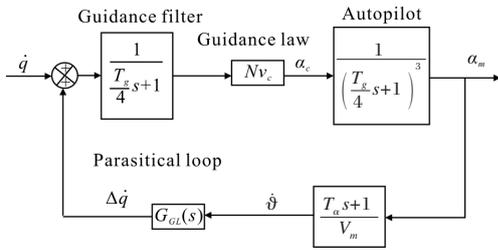


图 7 隔离度寄生回路模型
Fig.7 Disturbance rejection rate parasitical loop model

图 7 中,制导控制系统用四次一阶模型来表示,其中制导滤波器一阶,驾驶员三阶; T_g 为制导系统时间常数; T_α 为攻角时间常数; N 为比例导引系数; V_c 为弹目相对速度; V_m 为导弹飞行速度; $G_\omega(s)$ 为干扰力矩引起的隔离度传递函数,包括弹簧力矩引起的隔离度传函 $G_M(s)$ 和阻尼力矩引起的隔离度传函 $G_\omega(s)$ 。

2.1 弹簧力矩引起的隔离度寄生回路

弹簧力矩引起的寄生回路闭环传递函数为:

$$G_p^N = \frac{a_m}{\dot{q}} = \frac{NV_c(T_N s+1)}{(T_N s+1) \left(\frac{T_g}{4}s+1\right)^4 - A_N N \frac{V_c}{V_m} (T_\alpha s+1)} \quad (6)$$

寄生回路闭环传函包含 $A_N, T_N, T_\alpha, T_g, N, V_c, V_m$ 7 个变量,为了分析方便,采用无量纲化方法进行简化。令 $\bar{t} = t/T_g, \bar{s} = dt/dt = \bar{s}/T_g, \bar{A}_N = A_N NV_c / V_m, \bar{T}_\alpha = T_\alpha / T_g, \bar{T}_N = T_N / T_g$ 。隔离度寄生回路无量纲化等效模型如图 8 所示。可以看出,经过无量纲化和合并后,系统只剩下 3 个参数,为分析寄生回路稳定性提供方便。

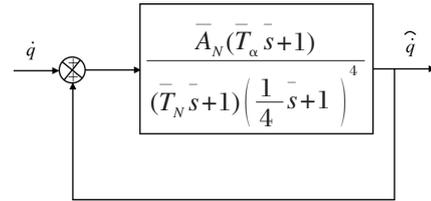


图 8 弹簧力矩引起寄生回路无量纲化框图
Fig.8 Normalized model of parasitical loop caused by spring torque

则无量纲化后的寄生回路闭环传递函数为

$$\bar{G}_p^N = \frac{\bar{A}_N(\bar{T}_\alpha \bar{s}+1)}{(\bar{T}_N \bar{s}+1) \left(\frac{1}{4}\bar{s}+1\right)^4 - \bar{A}_N(\bar{T}_\alpha \bar{s}+1)} \quad (7)$$

根据劳斯判据,利用数值解法,得到弹簧力矩引起的寄生回路稳定边界,如图 9 所示。

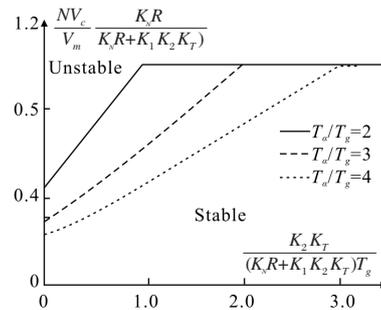


图 9 弹簧力矩引起的寄生回路稳定边界
Fig.9 Stable boundary of parasitical loop caused by spring torque

由图 9 中可以看出, $T_\alpha/T_g, N, V_c/V_m$ 以及 K_N 越大,寄生回路的稳定域越小。

2.2 阻尼力矩引起的隔离度寄生回路

阻尼力矩引起的寄生回路闭环传递函数为:

$$G_p^\omega = \frac{a_m}{\dot{q}} = \frac{NV_c(T_\omega s+1)}{(T_\omega s+1) \left(\frac{T_g}{4}s+1\right)^4 - A_\omega s V \frac{V_c}{V_m} (T_\alpha s+1)} \quad (8)$$

同理,采用无量纲化方法进行简化。令 $\bar{A}_\omega = \frac{A_\omega NV_c}{V_m T_g}$, $\bar{T}_\omega = T_\omega / T_g$ 。无量纲化后的阻尼力矩作用时寄生回路闭环传递函数为:

$$\bar{G}_p = \frac{\bar{A}_\omega \bar{s} (\bar{T}_\alpha \bar{s} + 1)}{(\bar{T}_\omega \bar{s} + 1) \left(\frac{1}{4} \bar{s} + 1 \right)^4 - \bar{A}_\omega \bar{s} (\bar{T}_\alpha \bar{s} + 1)} \quad (9)$$

阻尼力矩引起的寄生回路稳定边界如图 10 所示。

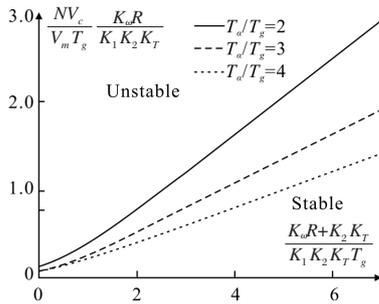


图 10 阻尼力矩引起的寄生回路稳定边界

Fig.10 Stable boundary of parasitical loop caused by spring torque

由图 10 中可以看出, T_α / T_g 、 N 、 V_c / V_m 越大, 阻尼力矩引起的隔离度寄生回路稳定域就越小。

空空导弹一般 N 取 4, 在迎击目标时, $V_c / V_m = 2$, 此时, 隔离度寄生回路稳定域较小。在高空时, 由于空气稀薄, T_α 增加, 寄生回路稳定性问题更为严重。因此, 国外部分空空导弹在高空时采用将驾驶员速度放慢, 提高 T_g 的措施, 以保证寄生回路稳定。

在导弹总体设计中, 一般不会将导引头隔离度设计到稳定边界, 但是即便没有稳定性问题, 寄生回路仍然会对制导系统产生一定的影响, 下面分别分析寄生回路对有效时间常数和有效比例导引系数这两个制导系统重要参数的影响。

3 制导系统有效时间常数分析

3.1 弹簧力矩作用下有效时间常数

取公式(6)的分母一次项为制导系统有效时间常数 T_{GEFF} 。

$$T_{GEFF} = T_g + T_N - \bar{A}_N T_\alpha = T_g + \frac{1}{K_N R + K_1 K_2 K_T} \left(K_2 K_T - K_N R \frac{T_\alpha NV_c}{V_m} \right) \quad (10)$$

由公式(10)可以看出, T_α 越大, 有效时间常数越

小; N 、 V_c / V_m 、 K_N 越大, 有效时间常数越小。

3.2 阻尼力矩作用下的有效时间常数

取公式(8)的分母一次项为制导系统有效时间常数 T_{GEFF} 。

$$T_{GEFF} = T_g + T_\omega - A_\omega N \frac{V_c}{V_m} = T_g + \frac{1}{K_1 K_2 K_T} \left[K_2 K_T - K_\omega R \left(N \frac{V_c}{V_m} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

从公式(11)可以看出, T_α 与制导系统有效时间常数无关; N 、 V_c / V_m 、 K_ω 越大, 制导系统时间常数越小。

为了保证制导系统的稳定性和可操作性, 制导时间常数不能过小。

4 有效比例导引系数分析

4.1 弹簧力矩对有效导航比的影响

弹簧力矩引起的隔离度寄生回路闭环传函如公式(6)所示, 当时系统处于稳态, 则有

$$G_p^N = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{NV_c}{1 - \frac{K_N R}{K_N R + K_1 K_2 K_T} \frac{NV_c}{V_m}} \quad (12)$$

此时, 有效比例导引系数为:

$$N_{EFF} = \frac{N}{1 - \frac{K_N R}{K_N R + K_1 K_2 K_T} \frac{NV_c}{V_m}} \quad (13)$$

图 11 给出了无量纲化的有效比例导引系数变化曲线。

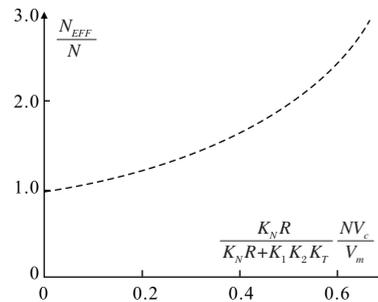


图 11 弹簧力矩作用下有效比例导引系数

Fig.11 Effective navigation ratio on the action of spring torque

由图 11 可以看出, 随着 N 、 V_c / V_m 、 K_N 的增大, 有效比例导引系数相应增大。

在一般设计过程中, N 一般取常值, 对于比例导引律 $N=2 \sim 6$ 为最佳。则由上式可得:

$$2 < \frac{N}{1 - \frac{K_N R}{K_N R + K_1 K_2 K_T} \frac{N V_c}{V_m}} < 6 \quad (14)$$

经变换,可得

$$0 < K_N \frac{(6-N)K_1 K_2 K_T}{\left(6 \frac{N V_c}{V_m} - 6 + N\right) R} \quad (15)$$

可以看出,为保证有效比例导引系数, N 和 V_c/V_m 越大,对 K_N 取值范围的要求越严格。

4.2 阻尼力矩对有效比例导引系数的影响

同理,公式(8)为阻尼力矩引起的隔离度寄生回路闭环传函,当 $s \rightarrow 0$ 时,可以得到:

$$G_p \Big|_{s \rightarrow 0} = N V_c \quad (16)$$

其中有效比例导引系数 $N_{EFF} = N$,说明阻尼力矩引起的隔离度寄生回路不会影响有效比例导引系数。

5 总结

分别建立了弹簧力矩和阻尼力矩引起的导引头隔离度寄生回路模型,分析了寄生回路稳定边界,并研究了寄生回路对制导系统有效时间常数和有效比例导引系数的影响,得出结论:隔离度寄生回路稳定域大小与制导系统主要参数密切相关,为了保证寄生回路稳定,应限制相关参数的取值范围;在寄生回路的影响下,制导系统有效时间常数和有效比例导引系数发生改变,设计时需要重点关注寄生回路对制导系统性能的影响。

参考文献:

- [1] Mao Xia, Zhang Junwei. Light axis stabilization of half-strapdown seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 9-12. (in Chinese)
毛峡, 张俊伟. 半捷联导引头光轴稳定的研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 9-12.
- [2] Mu Hong. The Design of Radar Guider in Aerial Defence Missile [M]. Beijing: China Astronautics Press, 1996. (in

Chinese)

穆虹. 防空导弹雷达导引头设计 [M]. 北京: 宇航出版社, 1996.

- [3] Miao Shaoshuai. Analysis on harmonic frequency and decoupling of seeker servo mechanism [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
苗少帅. 导引头伺服机构谐振频率与去耦精度分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [4] Zhu Huazheng, Fan Dapeng, Ma Dongxi, et al. Disturbance isolation index of seeker servo system and its test [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(8): 1993-1998. (in Chinese)
朱华征, 范大鹏, 马东玺, 等. 导引头伺服系统隔离度与测试[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1993-1998.
- [5] Lin Chunlian, Hsiao Yihsing. Adaptive feedforward control for disturbance torque rejection in seeker stabilizing loop[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, 9(1): 108-121.
- [6] William Nesline F, Paul Zarchan. Radome induced miss distance in aerodynamically controlled homing missiles [D]. AIAA 84-1845.
- [7] Garnell P, East D J. Guidance Weapon Control Systems: chapter 8[M]. Oxford: Pergamon Press, 1977.
- [8] Du Yunli, Xia Qunli, Qi Zaikang. Research on effect of seeker disturbance rejection rate with phase lag on stability of parasitical loop[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(1): 28-32. (in Chinese)
杜运理, 夏群利, 祁载康. 导引头隔离度相位滞后对寄生回路稳定性影响研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(1): 28-32.
- [9] Yin Shengli, Jia Hongguang, Zhang Yue, et al. Semi-strapdown Stabilization of optical imaging seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 129-132. (in Chinese)
- [10] Zhang Yinghua, Wan Zhongnan. Error analysis of servo system for IR staring imaging seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 25-30. (in Chinese)
张盈华, 万中南. 红外凝视成像导引头随动系统误差分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 25-30.