

全捷联导引头隔离度指标工程计算方法

鄢琴涛, 夏群利, 祁载康, 鲁天宇

(北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘要: 为计算工程化的隔离度幅值指标, 建立了引入末制导回路的隔离度寄生回路模型, 得出了基于不同末制导剩余时间下的隔离度临界幅值。针对 6 种常用误差模型下隔离度正反馈幅值的影响, 提出了一种引入制导回路的末制导剩余时间值的计算方法。将目标常值机动、初始速度矢量角误差、目标随机机动、目标角闪烁噪声、褪色噪声以及接收机噪声分为 3 类, 得出了关于相对速度比、隔离度幅值与无量纲脱靶量的变化曲线, 利用脱靶量取值时间、裕度限制、脱靶量变化趋势以及实际脱靶量等方法综合判断隔离度幅值指标, 并根据该指标估算出在映射隔离度指标时, 需要引入制导回路的末制导剩余时间值, 为工程应用提供了参考。

关键词: 全捷联导引头; 隔离度; 正反馈; 幅值指标

中图分类号: TJ765.331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3788-06

Engineering calculation method of strap-down seeker disturbance rejection rate index

Yan Qintao, Xia Qunli, Qi Zaikang, Lu Tianyu

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to calculate the engineeized disturbance rejection rate (DRR) amplitude index accurately, the terminal guidance loop was introduced into the model of disturbance rejection rate parasitic loop. For the influence of the positive feedback disturbance rejection rate amplitude under the six common error models, a calculation method of terminal guidance time remaining used for working in the guidance loop was presented. These were classified to three types for the constant target maneuver and initial angle error, random target maneuver, glint noise and faded and receiver noise, the relationship of relative speed ratio, the disturbance rejection rate amplitude and dimensionless miss distance was obtained, and the disturbance rejection rate amplitude index was estimated by the overall judgment of the miss distance value time, margin limits, miss distance change trend and practical value, which provide references for engineering application.

Key words: strap-down seeker; disturbance rejection rate; positive feedback; amplitude index

收稿日期: 2015-04-19; 修订日期: 2015-05-07

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST201302)

作者简介: 鄢琴涛(1983-), 男, 博士生, 主要从事导弹制导与控制技术方面的研究。Email: bityqt2012@163.com

导师简介: 夏群利(1971-), 男, 副教授, 主要从事导弹总体技术方面的研究。Email: 1010@bit.edu.cn

0 引言

隔离度是对空导弹末制导过程中影响末端弹道稳定性和命中脱靶量的重要因素^[1]。区别于传统平台导引头只考虑隔离度负反馈的情况,全捷联导引头制导信号包含了两个随弹体摆动而变化的探测器量测值,其刻度尺和动力学的不一致以及刻度误差的非定向性,导致全捷联导引头隔离度正反馈出现的概率大大增加,而隔离度正反馈的影响不仅大大超过负反馈,且在隔离度幅值较小时,进一步的精度控制在工艺上需要付出的代价过大,因而需要对全捷联导引头正反馈的隔离度指标进行精确计算。崔莹莹^[2]等对隔离度的分析为其产生的因素,而未涉及幅值指标限制问题。美国学者Nesline^[3]和 Garnell^[4]等对隔离度幅值的指标限制仅考虑从视线提取到弹体响应的耦合影响,而忽略了有限时间的时变制导回路。宋韬^[5]、李富贵^[6]等对隔离度幅值指标从临界幅值的角度考虑。王嘉鑫^[7]等从制导系统动力学阶数和有效导航比角度考虑隔离度对制导系统的影响。杜运理^[8]等从相位滞后方面分析了隔离度对制导回路的影响,但仍然不能直观地判断不同误差源下隔离度对脱靶量发散情况的影响。

文中通过综合考虑制导回路、不同误差源、有限末制导时间、工程幅值裕度以及有量纲脱靶量限制等方面对隔离度影响最为严重的正反馈幅值限制进行精确计算及论证,为工程师在进行导引头隔离度总体指标设计时提供一种直观合理的计算参考方法。

1 隔离度模型

取攻角时间常数 T_α ,末制导时间常数 T_g ,末制导剩余时间 T_{go} ,相对速度 V_c ,有效导航比 N ,引入制导回路后的隔离度模型如图 1 所示。

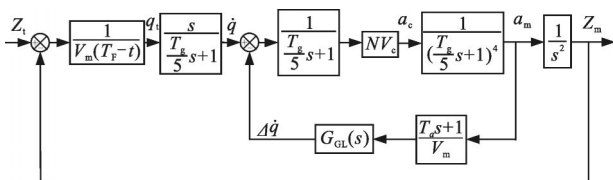


图 1 引入制导回路的隔离度寄生回路模型

Fig.1 Model of disturbance rejection rate parasitical loop on guidance loop

对应的引入制导回路影响的隔离度寄生回路位置输入 $Z_i(s)$ 与输出 $Z_m(s)$ 传递函数为:

$$\frac{z_m(s)}{z_i(s)} = \frac{NV_c}{[(\frac{T_g}{5}s+1)^5 - \frac{NRV_c}{V_m}(T_\alpha s+1)]V_c T_{go} s + NV_c} \quad (1)$$

2 隔离度寄生回路稳定性分析

对制导回路进行无量纲化处理,令 $\bar{s}=sT_g, \bar{t}=t/T_g, \bar{T}=T_\alpha/T_g, \bar{T}=T_{go}/T_g$,隔离度幅值为 R ,制导回路的传递函数及特征多项式为:

$$\frac{z_m(\bar{s})}{z_i(\bar{s})} = \frac{NV_c}{[(\frac{1}{5}\bar{s}+1)^5 - \frac{NRV_c}{V_m}(\bar{T}_\alpha \bar{s}+1)]\bar{T}_{go}\bar{s} + N} \quad (2)$$

$$[(\frac{1}{5}\bar{s}+1)^5 - \frac{NRV_c}{V_m}(\bar{T}_\alpha \bar{s}+1)]\bar{T}_{go}\bar{s} + N = 0 \quad (3)$$

令特征方程为:

$$a_1 \bar{s}^6 + a_2 \bar{s}^5 + a_3 \bar{s}^4 + a_4 \bar{s}^3 + a_5 \bar{s}^2 + a_6 \bar{s} + a_7 = 0 \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{\bar{T}}{3 \cdot 215}, a_2 = \frac{\bar{T}}{125}, a_3 = \frac{2\bar{T}}{25} \quad (5)$$

$$a_4 = \frac{2\bar{T}}{5}, a_5 = (1 - \frac{NRV_c \bar{T}_\alpha}{V_m})\bar{T} \quad (6)$$

$$a_6 = (1 - \frac{NRV_c}{V_m})\bar{T}, a_7 = N \quad (7)$$

利用劳斯判据计算稳定性区域。令 $K_R = V_c R / V_m$,取 $\bar{T} = \infty, \bar{T} = 20, \bar{T} = 10, \bar{T} = 5, \bar{T} = 3$,得到制导系统稳定性区域如图 2 所示。

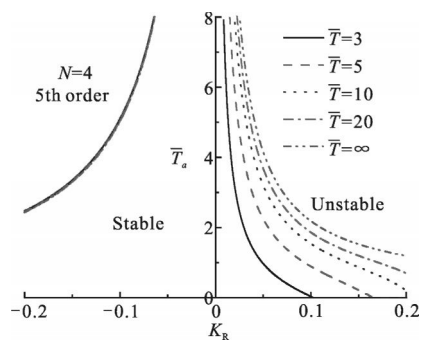


图 2 不同末制导时间下隔离度临界稳定边界

Fig.2 Stability boundary of disturbance rejection rate under different guidance time

将末制导时间和隔离度幅值边界进行映射,求出对应的隔离度临界幅值如图 3 所示。

若不将制导回路引入隔离度的稳定性分析,则等价于取 $\bar{T} = \infty$,对应的 $\bar{T}_\alpha = 3$ 时隔离度临界幅值为 $R = 0.0354$ 。为精确计算,分别取 $\bar{T} = 10, \bar{T} = 9, \bar{T} = 7$ 和 $\bar{T} = 5$ 得到其对应的隔离度幅值,计算结果如表 1 所示。

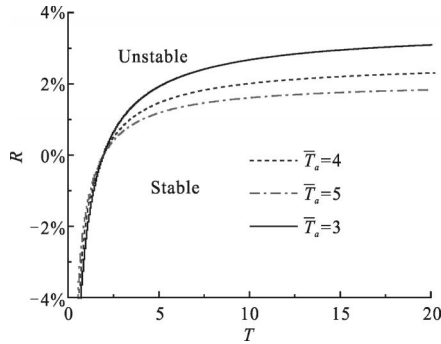


图 3 不同引入末制导时间对应临界隔离度

Fig.3 Amplitude of disturbance rejection rate on different guidance time remaining

表 1 不同末制导时间对应的临界隔离度幅值

Tab.1 Amplitude of disturbance rejection rate on different terminal guidance time remaining

\bar{T}	10	9	7	5
$\bar{T}_a=3$	0.026 8	0.025 9	0.023 4	0.019 3
$\bar{T}_a=4$	0.02	0.019 5	0.017 7	0.014 7
$\bar{T}_a=5$	0.161	0.015 6	0.014 2	0.011 9

可以看出：引入不同末制导剩余时间映射出的隔离度幅值是不同的，因而需要进一步引入误差源及典型制导系统参数进行分析。

3 仿真条件

3.1 影响脱靶量典型误差源

取典型雷达导引头作为研究对象，引入影响终端脱靶量的误差源，其模型如表 2 所示。

其中， a_t^i 和 a_r^i 分别为目标常值和随机机动加速度， $u(t-t_0)$ 为分布函数， t 为当前时刻， t_0 为阶跃响应时刻。 V_m 为导弹飞行速度， ε 初始速度矢量角误差， s

表 2 误差源

Tab.2 Error sources

Error source	Model
Target maneuver	$x(t)=a_t^i \frac{1}{s^2}$
Angular deviation of initial velocity	$x(t)=V_m \varepsilon \frac{1}{s}$
Target random maneuver	$x(t)=a_r^i u(t-t_0)$
Glint noise	$\Phi_{GN}=2T_{GN}\sigma_{GN}^2$
Receiver noise	$\Phi_{RN}=2T_{RN}\sigma_{RNO}^2 \frac{\Delta R^2}{R_0^2}$
Fading noise	$\Phi_{FN}=2T_{FN}\sigma_{FN}^2$

为微分符号。 T_{RN} 、 T_{FN} 分别为接收机和褪色噪声时间常数， ΔR 为弹目距离， R_0 为参考距离， σ_{RNO} 、 σ_{FN} 和 σ_{GN} 分别为接收机、褪色和目标角闪烁噪声标准差。

3.2 典型参数选取

建立仿真条件的步骤如下：

(1) 制导回路动力学取 5 阶。导引头动力学 1 阶，制导信号滤波 1 阶，控制系统 3 阶。

(2) 取 $T_a=0.9s$ ， $T_g=0.3s$ ，导航比取 $N=4$ 。

(3) 引入表 1 中 $\bar{T}=10, 9, 8, 7$ ，采用对应的组合参数 $K_R=V_c R/V_m$ ，脱靶量取值时间为 10 倍末制导时间常数并予以说明。

4 隔离度幅值限幅计算方法

4.1 隔离度临界幅值初步计算

将误差源引入隔离度制导系统模型，得到全捷联导引头不同误差下隔离度作用时制导系统伴随框图，为便于参数分析，进行无量纲处理后，如图 4 所示。

分析不引入制导回路和引入 10 倍末制导剩余时间两种情况时临界隔离度幅值对脱靶量的影响。

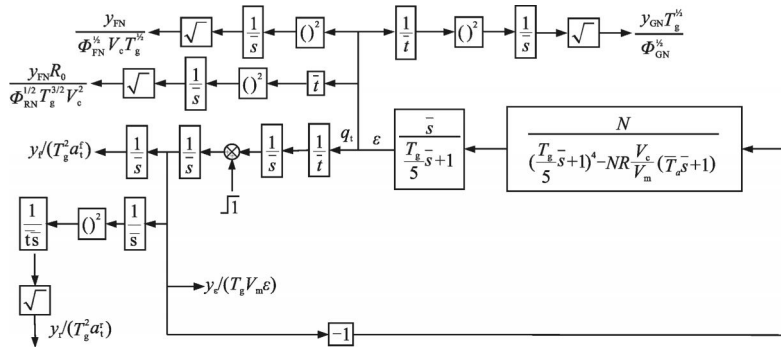


图 4 不同误差源下的制导系统无量纲伴随框图

Fig.4 Dimensionless adjoint system of guidance loop under different error sources

仿真发现,目标随机机动、各种噪声与常值机动、初始速度矢量角偏差的影响机理不同,以常值机动和目标闪烁为例,如图 5(a)、(b)所示。

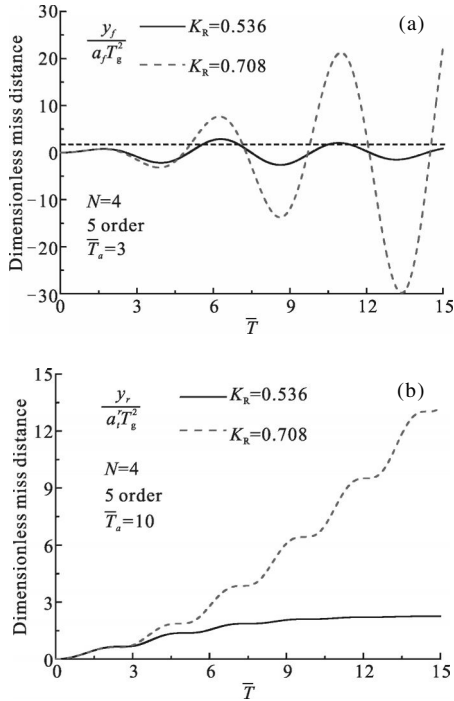


图 5 常值机动和目标随机机动下无量纲脱靶量对比

Fig.5 Contrast of dimensionless miss distance due to target uniform maneuver and target random maneuver

从图 5(a)和图 5(b)可以看出,不考虑末制导回路脱靶量发散严重,工程上将不可接受。对于常值机动,其无量纲脱靶量呈周期性变化,直接在 $\bar{T}=10$ 时刻取当前脱靶量是不正确的。从图 5(b)可以看出,目标随机机动的脱靶量影响则呈单调增加最后趋于稳定,可直接在 $\bar{T}=10$ 时刻进行脱靶量取值。而接收机和褪色噪声对应的脱靶量发散严重,但工程实际影响较小,可不考虑。综上所述,将误差分为 3 类,如表 3 所示。

表 3 不同误差下隔离度影响分类

Tab.3 Types of disturbance rejection rate influence on different errors

Error type	Name	Value of miss distance
1	Target uniform maneuver Angular deviation of initial velocity	Oscillating
2	Target random maneuver Glint noise	Monotonically
3	Receiver noise Fading noise	No consideration

4.2 幅值限制方法设计

为精确计算隔离度幅值指标,需考虑末制导时间 \bar{T} 选择、隔离度幅值裕度、发散速度以及最小可接受阈值。其中, $\bar{T}=10$ 是目前工程上较为常用的脱靶量取值剩余时间;隔离度幅值由加工工艺决定,其随长时仓储和飞行烧蚀等因素发生波动,不妨假设隔离度幅值在 $\pm 10\%(3\sigma)$ 内正态分布作为其考核裕度;隔离度幅值增加时其引起的无量纲脱靶量增幅不能出现大幅增长;最小可接受阈值应通过总体方案容许该误差在典型飞行环境下造成的有量纲脱靶量幅值确定。

4.3 常值机动和速度矢量偏差影响计算

对于常值机动,取脱靶量曲线振荡包络线上的值,得出在 $\bar{T}=10$ 时对应的无量纲脱靶量值。

从图 6(a)可以看出,取隔离度幅值裕度 10%,考虑脱靶量幅值发散速度,得出引入制导回路的末制导剩余时间为 $\bar{T}=8$ 。从图 6 (b) 可以看出,Nesline 和 Zarchan 等学者不考虑制导回路^[3](等价于 $\bar{T}=\infty$),脱靶量将严重发散,得出的隔离度幅值限制是有明显偏大的^[3]。

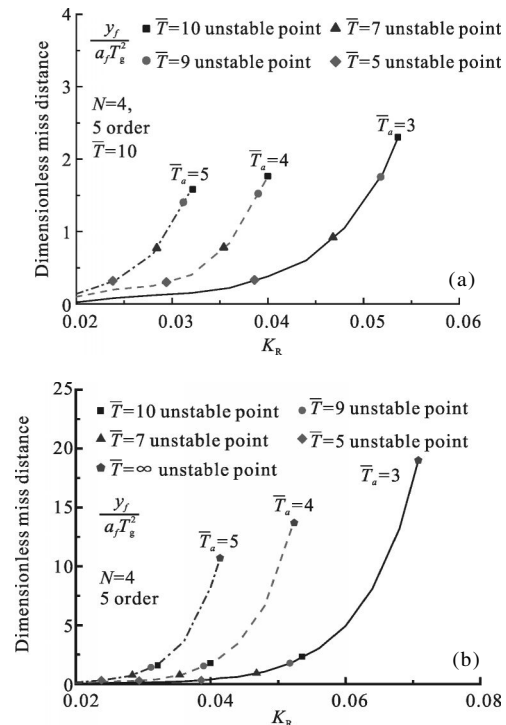


图 6 常值机动和随机机动下无量纲脱靶量

Fig.6 Dimensionless miss distance due to target maneuver and target random maneuver

4.4 目标角闪烁和随机机动计算

对于目标角闪烁误差，直接取 $\bar{T}=10$ 时对应的无量纲脱靶量值，得到曲线如图 7 所示。

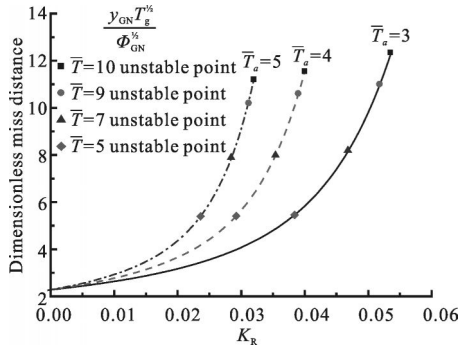


图 7 目标角闪烁引起的无量纲脱靶量

Fig.7 Dimensionless miss distance due to glint noise

同理，由角闪烁噪声引起的无量纲脱靶量可以得出，隔离度幅值限制下取 $\bar{T}=6$ ，具体对应的隔离度幅值限制的工程需求由实际角闪烁噪声大小决定；随机机动计算结果为 $\bar{T}=8$ 。

4.5 工程应用计算方法

脱靶量的影响符合正态分布的散布规律，故有

量纲脱靶量计算公式为：

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_y|_{\text{cons}}^2 + \sigma_y|_{\text{rand}}^2 + \sigma_y|_{\text{velo}}^2 + \sigma_y|_{\text{glint}}^2 + \sigma_y|_{\text{active}}^2 + \sigma_y|_{\text{fade}}^2}$$

式中： $\sigma_y|_{\text{cons}}$ ， $\sigma_y|_{\text{rand}}$ ， $\sigma_y|_{\text{velo}}$ ， $\sigma_y|_{\text{glint}}$ ， $\sigma_y|_{\text{active}}$ ， $\sigma_y|_{\text{fade}}$ 分别为常值机动、随机机动、速度矢量偏差、目标闪烁、接收机噪声以及褪色噪声引起的有量纲脱靶量。取比例系数 $N=4$ ， $V_c/V_m=2$ 得出在不同的 \bar{T}_α 下对应的引入末制导回路计算隔离度幅值工程上采用的末制导剩余时间。计算隔离度幅值对应的末制导剩余时间为 $\bar{T}=8$ 左右。

从表 4 可以看出：目标角闪烁影响最为严重，常值机动、随机机动以及速度矢量偏差其次，接收机和褪色噪声影响较小，脱靶量累积的计算为正态分布规律，取最严苛情况下目标角闪烁影响对应的末制导时间为 6 倍的末制导时间常数，计算得出的脱靶量为 11.4 m，该脱靶量为正反馈隔离度幅值 2.16%时造成，可见全捷联正反馈的情况下对隔离度幅值的要求非常严格。若总体对该脱靶量无法容忍，则需要对影响最严重的误差所对应的隔离度幅值进行限制。

表 4 不同误差源隔离度对脱靶量的影响

Tab.4 Effect of disturbance rejection rate on miss distance under different error sources

Features error type	$\bar{T}_\alpha=3$ multiple of guidance time constant	$\bar{T}_\alpha=4$ multiple of guidance time constant	$\bar{T}_\alpha=5$ multiple of guidance time constant	$\bar{T}_\alpha=3$ dimensionless miss distance	Error value	$\bar{T}_\alpha=3$ dimension miss distance/m	$\bar{T}_\alpha=3$ value of DRR/%
Uniform maneuver	8.5	8	7.5	1.5	$a_j=29.4 \text{ m/s}^2(3g)$	4.0	2.53
Random maneuver	8	7	6	1.6	$a_r=29.4 \text{ m/s}^2(3g)$	4.2	2.48
Angular deviation of initial velocity	8.5	8	7	2.2	$\varepsilon=1^\circ, V_m=600 \text{ m/s}$	3.14	2.53
Glint noise	7.5	6.5	6	6	$\Phi_{Gz}=0.929 \text{ m}^2/\text{Hz}$	10.5	2.16
Receiver noise	10	10	10	350	$\Phi_{RN}=2 \times 10^{-16} \text{ rad}^2/\text{Hz}$	1.8	2.67
Fading noise	10	10	10	53	$\Phi_{FN}=2 \times 10^{-9} \text{ rad}^2/\text{Hz}$	1.2	2.67

5 结论

考虑工程实际误差及参量波动，得出计算全捷联隔离度幅值指标的方法，总结如下：

计算隔离度幅值时，不引入制导回路导致隔离度幅值限制偏大，引入制导回路的末制导剩余时间取 10 倍末制导时间常数以内为宜；主要影响脱靶量的因素为目标角闪烁、速度矢量偏差、常值机动以及随机机动等，实际脱靶量需利用无量纲脱靶量对应

计算。引入制导回路的末制导剩余时间为 8 倍的估计值用于工程快速估算，进行隔离度幅值指标计算时，需从脱靶量幅值上升趋势、隔离度幅值裕度以及有量纲脱靶量 3 个方面综合考虑。随攻角时间常数增加，隔离度引起的脱靶量发散更为严重，工程应用时需重点考虑。

参考文献：

[1] Li Fugui, Xia Qunli. Effect of seeker disturbance rejection

- rate on parasitical loop stability [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 34(7): 1–6. (in Chinese)
- 李富贵, 夏群利. 导引头隔离度对寄生回路稳定性的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 34(7): 1–6.
- [2] Cui Yingying, Xia Qunli, Qi Zaikang. Seeker platform disturbance rejection mathematical model [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 22–25. (in Chinese)
- 崔莹莹, 夏群力, 祁载康. 导引头稳定平台隔离度模型研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2006, 26(1): 22–25.
- [3] Nesline F W, Zarchan P. Radome induced miss distance in aerodynamically controlled homing missiles [J]. *AIAA*, 1984, 1845: 99–115.
- [4] Qi Zaikang, Xia Qunli. *Guided Weapon Control System* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [5] Song Tao, Lin Defu, Wang Jiang. Influence of seeker disturbance rejection rate on missile guidance system [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(10): 1234–1241. (in Chinese)
- 宋韬, 林德福, 王江. 平台导引头隔离度导弹制导系统影响 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2013, 34(10): 1234–1241.
- [6] Li Fugui, Xia Qunli, Cai Chuntao, et al. Stability and measurement of seeker disturbance rejection rate parasitic loop [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(8): 801–805, 819. (in Chinese)
- 李富贵, 夏群利, 蔡春涛, 等. 导引头隔离度寄生回路稳定性及测试方法 [J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33(8): 801–805, 819.
- [7] Wang Jiabin, Lin Defu. Study on disturbance rejection rate parasitic loop strapdown phased array radar seeker [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(11): 1124–1128. (in Chinese)
- 王嘉鑫, 林德福. 全捷联相控阵雷达导引头隔离度寄生回路研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33(11): 1124–1128.
- [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): 28–33. (in Chinese)
- 杜运理, 夏群力, 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): 28–33.