

导引头隔离度对寄生回路稳定性的影响

李富贵, 夏群利, 蔡春涛, 祁载康

(北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘要: 为研究隔离度对制导控制系统稳定性的影响, 提出了隔离度传递函数的概念, 建立了隔离度传递函数模型和隔离度寄生回路模型。基于此模型, 利用频域法分析了隔离度传递函数的特性, 利用劳斯判据研究了制导参数对寄生回路稳定域的影响以及制导系统阶数对寄生回路失稳频率的影响。结合某红外图像导引头实例, 对隔离度传递函数和寄生回路稳定性进行了深入分析, 最后提出了提高隔离度寄生回路稳定性的措施。研究表明: 隔离度寄生回路稳定性最严重的区域位于中频段, 而提高导引头稳定回路在该段的增益可有效提高导引头隔离度水平, 增加寄生回路的稳定性。

关键词: 导引头; 隔离度传递函数; 寄生回路; 稳定性

中图分类号: TJ765.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2341-07

Effect of seeker disturbance rejection rate on parasitical loop stability

Li Fugui, Xia Qunli, Cai Chuntao, Qi Zaikang

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

Abstract: In order to analyze effects of disturbance rejection rate on stability of guidance and control systems, a conception of seeker disturbance rejection rate transfer function was presented. Both models of disturbance rejection rate transfer function and parasitical loop of seeker disturbance rejection rate were established. Then the characteristic of disturbance rejection rate transfer function was analyzed using frequency domain methods, and with Routh criteria the effect of guidance parameter on the stability zone of the parasitical loop as well as the influence of guidance dynamics orders on crossover frequency were studied. With an infrared image seeker, the disturbance rejection rate transfer function and stability of parasitical loop were analyzed further. Finally, measures for improving the disturbance rejection rate were presented. The study shows that the parasitical loop may go unstable in the middle frequency region mostly. Improving the gain of the seeker's stability loop in this frequency region is crucial to the disturbance rejection rate level and the stability margins.

Key words: seeker; disturbance rejection rate transfer function; parasitical loop; stability

收稿日期: 2013-01-19; 修订日期: 2013-02-13

基金项目: 中国博士后科学基金(2011M500008)

作者简介: 李富贵(1986-), 男, 博士生, 主要从事飞行器总体设计、制导控制系统设计方面的研究。Email: lfg20041079@sina.com

导师简介: 夏群利(1971-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事飞行器总体方面的研究。Email: 1010@bit.edu.cn

0 引言

导引头隔离度是导引头的一项重要指标，显示了导引头隔离弹体扰动的能力^[1-2]，直接关系到导弹的制导精度。随着对导弹制导精度要求的提高，隔离度已成为影响制导系统稳定性、限制制导精度的重要因素。

美国学者 Nesline^[3]等和英国的 Garnell^[4]提出了天线罩误差斜率寄生回路的稳定性问题后，便有学者围绕天线罩误差斜率寄生回路的问题展开了研究。但对隔离度引起的制导寄生回路问题鲜有学者进行研究讨论。近年来，随着工程研制中出现的新试验现象，人们对隔离度的理解有了进一步的认识。崔莹莹^[5]等对隔离度模型进行了讨论，指出导引头隔离度模型建立应以电机输出绝对角速度为基础。李富贵^[6]等对全捷联导引头隔离度寄生回路进行了讨论，并提出了导引头和惯导刻度尺偏差的辨识校正方法。徐平^[7]等研究了隔离度对末制导炮弹制导精度的影响，指出隔离度会造成末制导炮弹制导精度的下降。杜运理^[8]等在隔离度寄生回路分析中引入了纯相滞后模型，指出相滞后角会对隔离度寄生回路稳定域造成影响。

但到目前为止，没有学者把隔离度模型扩展到隔离度传递函数的概念，更没有从隔离度传递函数的角度讨论隔离度对寄生回路稳定性的影响。为深入研究隔离度对寄生回路稳定性的影响，文中建立了隔离度传递函数模型和寄生回路模型，分析了隔

离度传递函数特性和隔离度寄生回路稳定性，研究了提高隔离度水平及寄生回路稳定性的措施，所得结论将为导弹总体方案初步设计提供理论参考。

1 模型建立

导引头与基座的相对运动会引起相对干扰力矩，该力矩作用于导引头上后会造成导引头光轴产生的附加的指向角速度 $\Delta\dot{q}(t)$ ，设弹体姿态角速度为 $\dot{\vartheta}(t)$ ，定义隔离度 $R(t)=\Delta\dot{q}(t)/\dot{\vartheta}(t)$ ，做拉普拉斯变换，则隔离度传递函数可表示为 $R(s)=\Delta\dot{q}(s)/\dot{\vartheta}(s)$ 。由定义可知，隔离度越小，导引头隔离弹体扰动能力越强。

图 1 在典型导引头回路下给出了隔离度模型，图中 $G_1(s)$ 为导引头跟踪回路的前向传递函数，包括探测器传递函数、校正网络和运放， $G_2(s)$ 为稳定回路的前向传递函数，包括校正网络和运放， $G_D(s)$ 为干扰力矩传递函数， $H(s)$ 为速率陀螺传递函数，制导信号取自角速率陀螺的测量值。

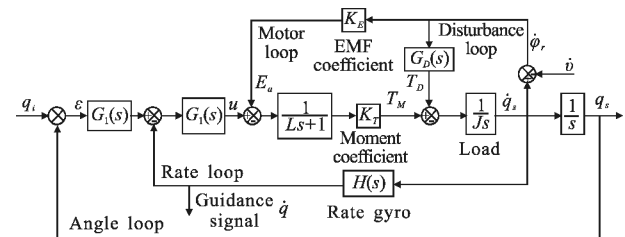


图 1 隔离度模型

Fig.1 Model of disturbance rejection rate

依据图 1，经过计算可得在弹体扰动输入下导引头隔离度传递函数应为：

$$\frac{\Delta\dot{q}(s)}{\dot{\vartheta}(s)} = \frac{s[K_E K_T H(s) + G_D(s)H(s)(Ls+R)]}{s[J_s(Ls+R) + G_D(s)(Ls+R) + K_E K_T G_2(s)K_T H(s)] + G_1(s)G_2(s)K_T} \tag{1}$$

影响隔离度的干扰力矩主要有弹簧力矩和粘滞阻尼力矩^[3-6]，它们分别描述了导引头和基座的相对角运动及相对角速度运动产生的干扰力矩，下面分别在

这两个干扰力矩下建立隔离度传递函数。取弹簧力矩系数为 K_s ，公式(1)中代入弹簧力矩模型，令 $G_D(s)=K_s/s$ ，则可得在弹簧力矩作用下隔离度传递函数为：

$$\frac{\Delta\dot{q}(s)}{\dot{\vartheta}(s)} \Big|_{\text{spring}} = \frac{sK_E K_T H(s) + K_s H(s)(Ls+R)}{s[J_s(Ls+R) + K_E K_T + G_2(s)K_T H(s)] + K_s(Ls+R) + G_1(s)G_2(s)K_T} \tag{2}$$

取粘滞阻尼力矩系数为 K_v ，在公式(1)中代入粘滞阻尼力矩模型，令 $G_D(s)=K_v$ ，则可得在粘滞阻

尼力矩作用下隔离度传递函数为：

$$\frac{\Delta\dot{q}(s)}{\dot{\vartheta}(s)} \Big|_{\text{vis}} = \frac{s[K_E K_T H(s) + K_v H(s)(Ls+R)]}{s[J_s(Ls+R) + K_v(Ls+R) + K_E K_T + G_2(s)K_T H(s)] + G_1(s)G_2(s)K_T} \tag{3}$$

导引头寄生回路如图 2 所示。该寄生回路产生的过程为：弹体与导引头的相对运动造成导引头输出附加的弹目视线角速度 $\Delta\dot{q}(t)$ ，控制系统使用错误的视线角速度信号进行制导控制，弹上控制机构进一步改变弹体姿态，造成附加的弹体扰动，该弹体扰动又会使导引头输出错误的弹目视线角速度信号，这样就形成了一个隔离度寄生回路，该回路会降低制导回路的稳定性^[6]。

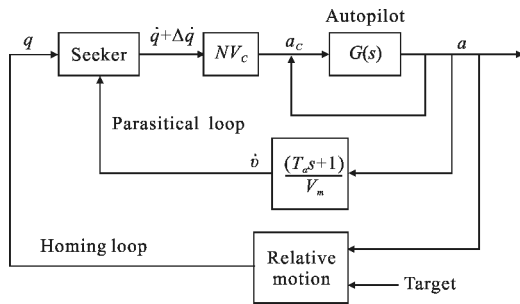


图 2 导引头寄生回路

Fig.2 Disturbance rejection rate parasitical loop

图 3 给出了导引头寄生回路模型，其中引入了隔离度传递函数模型，并假设滤波器和自动驾驶仪传递函数为 n 阶多项式。图中 T_g 为制导系统时间常数， T_a 为导弹攻角时间常数， N 为比例导引系数， V_c 为弹目相对运动速度， V_m 为导弹飞行速度。

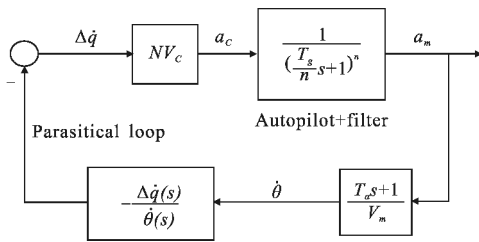


图 3 导引头寄生回路模型

Fig.3 Model of disturbance rejection rate parasitical loop

从图 3 反馈回路断开，则可得隔离度寄生路开环传递函数如公式(4)所示，依据公式(4)使用稳定性判据即可评估隔离度寄生回路的稳定性。

$$G(s) = -\frac{NV_c}{V_m} \frac{T_a s + 1}{\left(\frac{T_g}{n} s + 1\right)^n} \frac{\Delta\dot{q}(s)}{\dot{\theta}(s)} \quad (4)$$

2 隔离度传递函数特性分析

2.1 弹簧力矩隔离度传递函数

隔离度是由弹体运动而对导引头造成的扰动引

起的，弹体对导引头的扰动频率并不会很高，易知隔离度传递函数的主根不会是高频根。为了便于分析，初步分析中先略去高频动力学、校正环节，令 $G_1(s) = K_1$ 、 $G_2(s) = K_2$ 、 $H(s) = 1$ ，由于电感 L 很小，略去它的影响。于是公式(2)可简化为：

$$\frac{\Delta\dot{q}(s)}{\dot{\theta}(s)} \Big|_{\text{spring}} = \frac{K_E K_T s + K_S R}{J R s^2 + K_2 K_T s + K_3 R + K_1 K_2 K_T} \quad (5)$$

公式(5)即为弹簧力矩作用下隔离度简化传递函数，式中 K_S 的大小反应了弹簧力矩的大小。

在低频段，公式(5)可简化为：

$$\frac{\Delta\dot{q}(s)}{\dot{\theta}(s)} \Big|_{\text{spring}} = \frac{K_S R}{K_3 R + K_1 K_2 K_T} \quad (6)$$

由公式(6)可知，在低频段弹簧力矩系数 K_S 仅对隔离度传递函数幅有影响，而对隔离度传递函数几乎没有影响，随着 K_S 增加，隔离度水平降低。

在中频段，由公式(5)可知 K_S 既对隔离度传递函数的幅有影响，又对相有影响，当 K_S 比较小时，公式(5)可以简化为：

$$\frac{\Delta\dot{q}(s)}{\dot{\theta}(s)} \Big|_{\text{spring}} = \frac{K_E K_T s}{J R s^2 + K_2 K_T s + K_1 K_2 K_T} \quad (7)$$

由公式(7)可知，在 K_S 很小时，隔离度传递函数会在相位上超前约 90° ，结合公式(5)可知这种相位超前会随着 K_S 增大而减小，这也预示着 K_S 较小时寄生回路会有较好的稳定性， K_S 较大时寄生回路的稳定性会急剧降低。

在高频段，公式(5)可简化为：

$$\frac{\Delta\dot{q}(s)}{\dot{\theta}(s)} \Big|_{\text{spring}} = \frac{K_E K_T}{J R s + K_2 K_T} \quad (8)$$

由公式(8)可知，在高频段，弹簧力矩系数 K_S 对传递函数特性几乎没有影响。

综上所述，弹簧力矩对隔离度传递函数的影响集中在中低频段，低频段弹簧力矩只影响传递函数的幅，而中频段对传递函数的幅、相均有影响。

2.2 粘滞阻尼力矩隔离度传递函数

略去次项和低频项后，公式(3)可简化为：

$$\frac{\Delta\dot{q}(s)}{\dot{\theta}(s)} \Big|_{\text{vis}} = \frac{s(K_E K_T + K_V R)}{J R s^2 + (K_V R + K_2 K_T) s + K_1 K_2 K_T} \quad (9)$$

公式(9)即为粘滞阻尼力矩作用下隔离度简化传递函数，式中 K_V 反应了粘滞阻尼力矩的大小。

对于平台导引头，一般有关系式 $K_E K_T + K_V R + K_2 K_T$ ，于是公式(9)可简化为

$$\frac{\Delta \dot{q}(s)}{\dot{\vartheta}(s)} \Big|_{vis} = \frac{s K_V R}{J R s^2 + K_2 K_T s + K_1 K_2 K_T} \quad (10)$$

由公式(10)可知，粘滞阻尼力矩系数 K_V 只影响隔离度传递函数的幅特性，对相特性几乎没有影响，粘滞阻尼力矩越大，隔离度水平越差。

3 寄生回路稳定性分析

由公式(4)可知，影响寄生回路稳定性的因素包括两部分：隔离度传递函数和制导参数。首先分析制导参数对寄生回路的影响。为了简化，假设隔离度传递函数为正负反馈的形式，即 $\Delta \dot{q}(s) = k \dot{\vartheta}(s)$ ， k 代表隔离度的大小， $k > 0$ 表示正反馈， $k < 0$ 表示负反馈。将该关系式代入公式(4)，当 $n=4$ 时，根据劳斯判据可以求得导引头寄生回路稳定域随制导参数的变化规律，如图 4 所示。

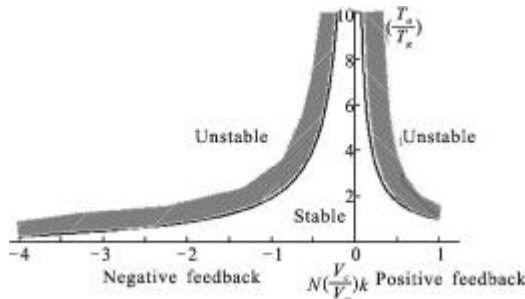


图 4 制导参数对寄生回路稳定性的影响

Fig.4 Effect of guidance parameter on stability parasitical loop

从图 4 可知，隔离度正反馈时寄生回路稳定域远小于负反馈时的稳定域。随着隔离度水平降低，寄生回路稳定域会逐渐减小。增大比例导引系数 N 会减小稳定域， V_c/V_m 的增大也会减小稳定域，对于空空导弹，迎头攻击时 V_c/V_m 比尾追时要大，因此迎头攻击时寄生回路稳定性问题要比尾追时严重。攻角时间常数 T_α 的增加或制导时间常数 T_g 的减小都会缩小稳定域，由于高空 T_α 会显著增大，意味着高空隔离度寄生回路的稳定性问题更严酷，为满足隔离度寄生回路稳定性要求，制导时间常数 T_g 不能太小。

工程中也很关心隔离度寄生回路的失稳频率，前文在 $n=4$ 的条件下进行了分析，为了使结果具有普

遍意义，图 5 给出了正反馈条件下不同阶数 n 时的失稳边界伯德图，其中取典型参数 $N=4, v_c/v_m=1, T_\alpha/T_g=3$ ，图中横轴为无量纲频率 ωT_g 。由图 5 可知，隔离度传递函数为正反馈时失稳发生在低频，制导动力学阶数对失稳频率影响不大，失稳频率约为制导系统频带的 1.6 倍。

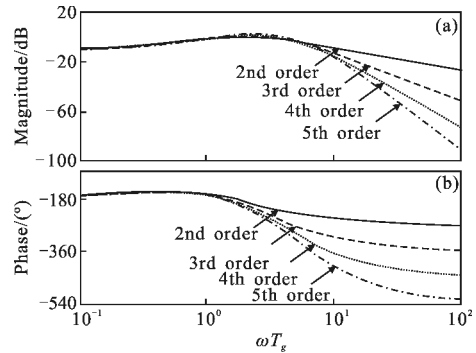


图 5 不同制导动力学阶数下寄生回路失稳边界伯德图

Fig.5 Parasitical loop stability boundary bode plot with various n

4 实例分析

为了使分析更深入，选用某红外成像导引头实例进行分析。选取导引头在 2 Hz 处隔离度分别为 1%、3%、5%、7% 条件下的隔离度传递函数进行分析，并取 $N=4, v_c/v_m=1, T_\alpha=1s, T_g=0.3s, n=4$ 。图 6 给出了弹簧力矩隔离度传递函数伯德图，图 7 给出了弹簧力矩作用下隔离度寄生回路开环伯德图，图 8 给出了粘滞阻尼力矩作用下隔离度传递函数伯德图，图 9 给出了粘滞阻尼力矩隔离度寄生回路开环伯德图。

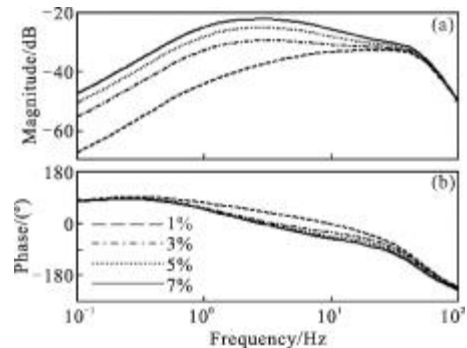


图 6 某导引头弹簧力矩隔离度传递函数伯德图

Fig.6 Disturbance rejection rate transfer function bode plot with spring moment affection

由图 6 可知，弹簧力矩系数在低频段只影响隔

离度传递函数的幅特性,在中频段对幅相均有影响,在高频段对隔离度传递函数几乎没有影响,这与前文通过简化公式分析得到的结果一致。隔离度问题严重的区域位于中频段,在该段隔离度传递函数幅值取得了极大值,相特性接近于正反馈。由图 7 可知,在弹簧力矩作用下,隔离度寄生回路的稳定性随着隔离度增加而降低,隔离度为 3% 时寄生回路幅值裕度为 7 dB,5% 时为 2 dB,7% 时寄生回路处于失稳状态;隔离度寄生回路稳定性最严酷的区域位于 0.5~5 Hz,在该区域内寄生回路的传递函数的幅值会达到极大值,而相正好也穿越了 -180° ,相穿越频率约为 1.3 Hz,意味着寄生回路很可能在 1.3 Hz 处失稳。

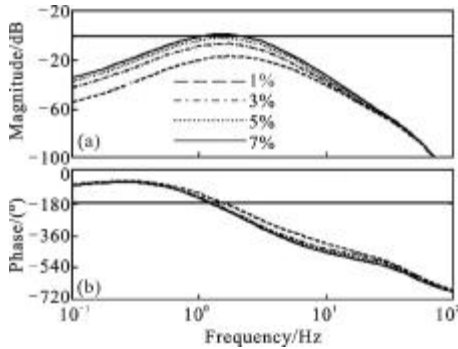


图 7 某导引头弹簧力矩隔离度寄生回路开环伯德图

Fig.7 Parasitical open loop bode plot with spring moment affection

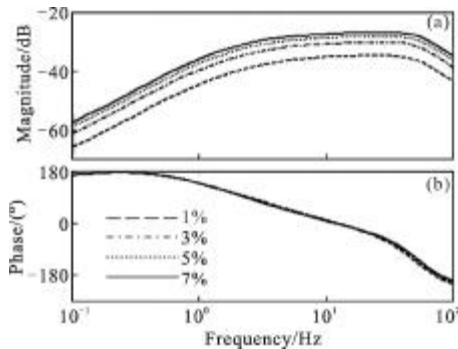


图 8 某导引头粘滞阻尼力矩隔离度传递函数伯德图

Fig.8 Disturbance rejection rate transfer function bode plot with viscous moment affection

由图 8 可知,在阻尼力矩作用下,粘滞阻尼力矩系数对隔离度传递函数的幅特性有很大影响,而对相特性几乎没有影响,这也与前文的分析一致。与弹簧力矩隔离度传递函数类似,粘滞阻尼力矩隔离度严重处也位于中频段,在中频段隔离度传递函数的

相特性也接近于正反馈。由图 9 可知,在粘滞阻尼力矩作用下,隔离度寄生回路的稳定性严重的区域也位于 0.5~5 Hz,在该频段寄生回路的幅值会达到极大值,而相正好也穿越 -180° ,相穿越频率约为 2.1 Hz,意味着在粘滞阻尼力矩作用下寄生回路很可能在 2.1 Hz 处失稳。随着隔离度水平降低,寄生回路稳定性也降低,隔离度水平为 3% 时寄生回路幅值裕度为 6.2 dB,5% 时寄生回路幅值裕度为 2.2 dB,7% 时寄生回路处于失稳状态。

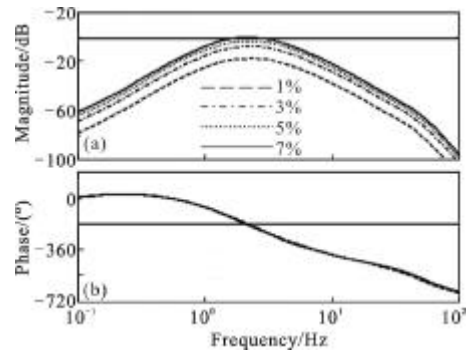


图 9 某导引头粘滞阻尼隔离度寄生回路开环伯德图

Fig.9 Parasitical open loop bode plot with viscous moment affection

利用两种隔离度传递函数可得到同一结论:寄生回路稳定性最严重的区域位于 0.5~5 Hz,在该频段隔离度传递函数的相特性接近于正反馈,当隔离度水平大于 7%(2 Hz)时隔离度寄生回路会失稳。

5 提高隔离度寄生回路稳定性的办法

由前文可知,为降低隔离度寄生回路的稳定性对制导回路的影响,需提高隔离度水平,如减小导线的拉扯力矩、减小摩擦力矩等。但由公式(1)可知,隔离度水平与导引头回路的传递函数有重要关系,由此可通过改进导引头回路设计达到提高隔离度水平的目标。

由公式(1)可知,提高导引头跟踪回路的前向传递函数 $G_1(s)$ 和稳定回路的前向传递函数 $G_2(s)$ 的增益即可提高隔离度水平。但在寄生回路稳定性最严重的频段(0.5~5 Hz)的隔离度水平才是起决定作用的,如何提高在这个频段的隔离度水平才是真正重要的。由经典控制理论可知,在 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 中加入合理的滞后校正网络可提高该频段的开环增益,同时对原系统的影响也不大。

在跟踪回路和稳定回路中都引入合适的滞后校正网络,同样以某图像导引头为例,图 10~13 在有、无滞后校正时对比了弹簧力矩隔离度传递函数伯德图、弹簧力矩隔离度寄生回路开环伯德图、粘滞阻尼力矩隔离度传递函数伯德图、粘滞阻尼力矩隔离度

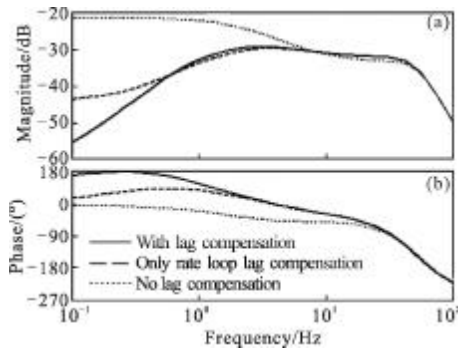


图 10 弹簧力矩作用时滞后校正对隔离度的影响
Fig.10 Effect of lag compensation on disturbance rejection rate with spring moment affection

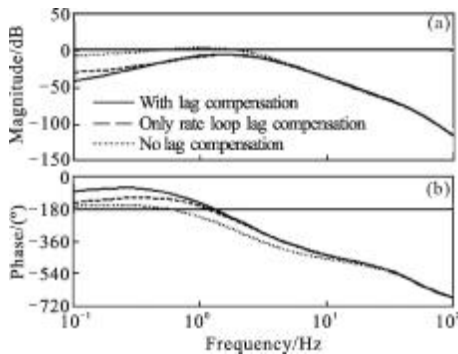


图 11 弹簧力矩作用时滞后校正对寄生回路稳定性的影响
Fig.11 Effect of lag compensation on parasitical loop stability with spring moment affection

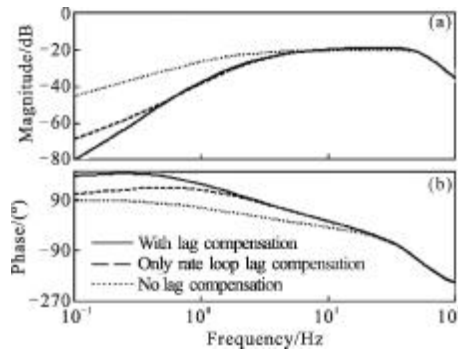


图 12 阻尼力矩作用时滞后校正对隔离度的影响
Fig.12 Effect of lag compensation on disturbance rejection rate with viscous moment affection

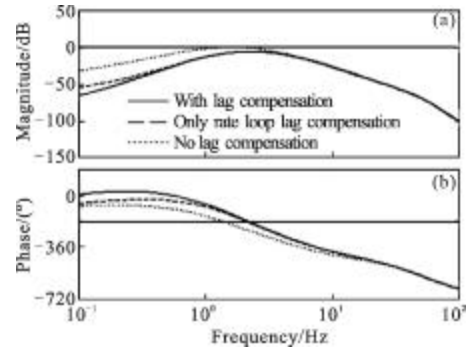


图 13 阻尼力矩作用时滞后校正对寄生回路稳定性的影响
Fig.13 Effect of lag compensation on parasitical loop stability with viscous moment affection

寄生回路开环伯德图。由图 10 和图 12 可知,稳定回路的滞后校正网络在 0.5~5 Hz 的范围内能显著提高隔离度水平,同时使隔离度传递函数的相有了较大的超前,这都有助于提高隔离度寄生回路的稳定性。由图 11 和图 13 可知,回路中无滞后校正网络时隔离度寄生回路处于失稳状态,而引入稳定回路的滞后校正后使隔离度寄生回路恢复稳定。纵观图 10~13 可知,跟踪回路的滞后校正网络只在很低频时才对提高隔离度水平起作用,在所关注的频段(0.5~5 Hz)内几乎没有作用。

由前述可知,导引头稳定回路的滞后校正网络对提高隔离度寄生回路的稳定性具有非常重要的作用,在导引头稳定回路中引入合适的滞后校正可显著提高隔离度水平,增加隔离度寄生回路稳定性。

6 结论

文中详细分析了隔离度传递函数特性以及隔离度对寄生回路稳定性的影响,得到以下结论:导引头隔离度最差的频段位于中频段,在该段隔离度传递函数的幅特性将达到极大值,相特性接近于正反馈;当隔离度传递函数相特性为正反馈时,隔离度寄生回路的稳定区域会被严重缩小,迎头攻击、高空飞行以及比较快的制导动力学都会恶化隔离度寄生回路的稳定性;隔离度传递函数相接近于正反馈时寄生回路的失稳频率在低频,约为 1.6 倍的制导动力学频带,制导动力学阶数对失稳频率影响很小;隔离度寄生回路稳定性最严重的区域位于 0.5~5 Hz,在该频段内寄生回路会造成制导系统提前失稳,为保证寄生回路稳定性,隔离度水平至少

要小于 7%(2 Hz),而在导引头稳定回路中引入合适的滞后校正网络可显著提高隔离度水平,增加隔离度寄生回路的稳定性。

参考文献:

- [1] Zhou Shuping, Zhang Guangjun. Vibrating noise suppression of multi-sensor IR seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 31-34. (in Chinese)
周树平, 张广军. 多元探测红外导引头振动噪声抑制[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(1): 31-34.
- [2] 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.
- [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] 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]. *火箭与制导学报*, 2006, (1): 22-25.
- [6] Li Fugui, Xia Qunli, Qi Zaikang. Effect of parasitic loop on strap-down seeker and compensated with identification method [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(8): 73-78. (in Chinese)
李富贵, 夏群利, 祁载康. 全捷联导引头寄生回路影响与辨识校正[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(8): 73-78.
- [7] Xu Ping, Wang Wei, Lin Defu. Effect of seeker isolation on guidance and control of terminal guided projectile [J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(1): 17-22. (in Chinese)
徐平, 王伟, 林德福. 导引头隔离度对末制导炮弹制导控制的影响[J]. *弹道学报*, 2012, 24(1): 17-22.
- [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.