

〈制导与对抗〉

滚仰式红外导引头视线角速率提取方法研究

花文涛, 刘凯, 丁海山

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000)

摘要: 由于滚仰式导引头的结构特殊性, 制导控制系统需要的视线角速率信息是不能够直接测量得到的, 因此提出了一种基于跟踪微分器的视线角速率提取方法。根据滚仰式导引头的结构特点, 分析了滚仰式导引头的运动学原理, 并根据滚仰式导引头的结构推导出视线角与弹体姿态角、框架角和失调角的关系, 然后设计了有限时间收敛跟踪微分器求解视线角速率信息。经数字仿真, 对比了直接差分法和跟踪微分器法对视线角速率的提取效果, 证明了利用跟踪微分器提取视线角速率的有效性。

关键词: 滚仰式导引头; 视线角速率提取; 跟踪微分器; 框架运动学

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2015)01-0063-04

Research on Roll-pitch Infrared Seeker LOS Rate Extraction

HUA Wen-tao, LIU Kai, DING Hai-shan

(Airborne Missile Academy, Luoyang 471000, China)

Abstract: A new solution of LOS Rate Estimation based on tracking-differentiator was proposed in this paper because LOS Rate information couldn't be attained for the structure particularity of Roll-pitch Seeker. The kinematics was analyzed, also was the relationship between LOS angle and missile attitude angle, gimbal angle, misalignment angle according to the structure particularity of Roll-pitch Seeker. And then, a tracking differentiator was designed for LOS Rate Extraction. The simulation results show that the LOS Rate Extraction based on tracking-differentiator performs better than direct difference method, which proves that the LOS Rate Extraction based on tracking-differentiator is very effective.

Key words: roll-pitch seeker, LOS Rate Extraction, tracking-differentiator, gimbal kinematics

0 引言

导引头是自动寻的导弹的关键组成部分, 导引头的性能对导弹的作战性能具有重大的影响。为了适应现代战争的需要, 新一代近距格斗空空导弹应具有高机动性及大离轴角发射能力。滚转俯仰式导引头具有结构简单、重量轻、体积小、成本低等特点, 为导弹实现大离轴角发射提供了必要条件, 因此非常适用于红外成像型近距格斗空空导弹^[1]。

滚仰式导引头采用滚转-俯仰两轴极坐标式结构, 即外框架为滚转框架, 内框架为俯仰框架。通过采用这种“滚转+俯仰偏转”的结构形式, 可以实现大离轴角度条件下对目标的探测与跟踪。但是由于滚仰式导引头结构的特殊性, 使得系统失去了直接测定视线

角速率的能力, 需要研究视线角速率的提取算法。本文研究了滚仰式导引头的框架运动学, 推导了角速率的提取算法, 并利用一种有限时间收敛的跟踪微分器, 提取出了惯性系下的视线角速率, 并进行了仿真研究。

1 滚仰式红外导引头运动学

1.1 滚仰式红外导引头结构

滚-仰式导引头稳定平台采用滚转外框架、俯仰内框架式的万向支架, 其中外框架滚转轴与弹体纵轴一致, 内框架俯仰轴与外框架滚转轴正交。外框架可以实现360°连续滚转, 内框架可达到±90°的框架角, 使导引头视场可以覆盖整个前半球。这种导引头稳定平台具有结构简单、重量轻、体积小、成本低等特点。图1给出了这种导引头的结构^[2]。

收稿日期: 2014-07-08; 修订日期: 2014-09-03。

作者简介: 花文涛(1989-), 男, 河南孟州人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为飞行器设计。

基金项目: 航空科学基金项目, 编号: 2013ZC12004。

1.2 滚仰式红外导引头运动学

滚仰式导引头的运动学关系由弹体、滚转框、俯仰框之间的旋转关系组成。在此，需要考虑惯性坐标系、弹体坐标系、外框（滚转框）坐标系、内框（俯仰框）坐标系以及视线坐标系之间的角度约束关系。

首先，惯性系通过弹体坐标系、外框坐标系、内框坐标系转到视线坐标系。惯性坐标系 $O\text{-}XYZ$ 依次绕 OY 、 OZ_m 轴转过 3 个欧拉角 φ 、 θ 、 γ 得到弹体坐标系 $O_m\text{-}X_mY_mZ_m$ ；弹体坐标系依次绕 OX_m 、 OZ_0 轴转过 γ_s 、 θ_s 得到内框坐标系 $O_i\text{-}X_iY_iZ_i$ ；内框坐标系依次绕 OY_i 、 OZ_s 轴转过两个欧拉角 ε_y 、 ε_z 得到视线坐标系 $O_s\text{-}X_sY_sZ_s$ 。由各坐标系之间的转换关系，如图 2 所示，可以得到惯性系到视线系的变换矩阵：

$$R = L(\varepsilon_z, \varepsilon_y, \theta_s, \gamma_s, \gamma, \theta, \varphi) \quad (1)$$

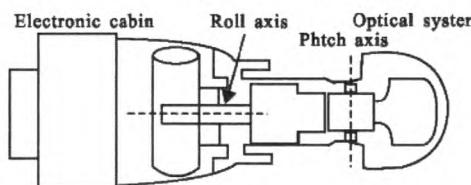


图 1 滚仰式红外导引头结构示意图

Fig.1 Roll-pitch infrared seeker structure diagram

$$R = L(\varepsilon_z, \varepsilon_y, \theta_s, \gamma_s, \gamma, \theta, \varphi)$$

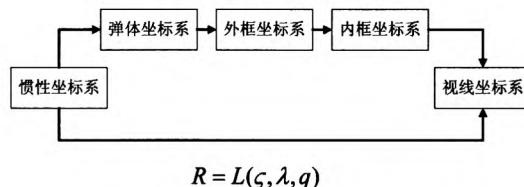


图 2 滚仰式导引头坐标系转换关系

Fig.2 Roll-pitch seeker coordinate transformation relations

其次，视线坐标系 $O_s\text{-}X_sY_sZ_s$ 可以通过惯性坐标系 $O\text{-}XYZ$ 依次绕 OY 轴、 OZ 轴、 OX_i 轴转过 3 个欧拉角 q 、 λ 、 ζ 得到惯性系到视线系的坐标转换关系，如图 2 所示。因此，惯性坐标系到视线坐标系的变换矩阵也可以写成以下形式：

$$R = L(\zeta, \lambda, q) \quad (2)$$

2 视线角速率提取原理

滚仰式导引头由于其惯性器件安装在弹体基座上，不能直接给出目标的视线角速率信息，但利用框架偏转角、目标相对稳定平台的方位角和高低角以及陀螺测量的弹体角速率信息可以解算提取出目标在惯性系下的视线角速率。图 3 给出了滚仰式导引头提取视线角速率的数学平台原理框图。

根据滚仰导引头框架运动学关系描述，式(1)和式(2)恒相等，因此可以通过微分运算来求解目标视线角

q 、 λ 和 ζ 。

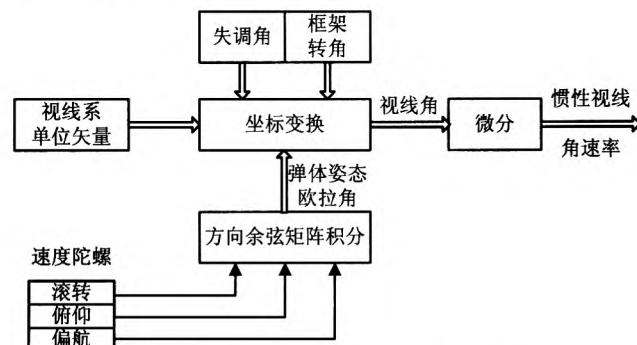


图 3 滚仰式导引头视线角速率提取原理

Fig.3 Sight angular rate extract principle

惯性器件安装在弹体基座上，测量弹体相对惯性的角速度在弹体系下的分量 $\omega_m = [\omega_{mx} \omega_{my} \omega_{mz}]^T$ 。弹体姿态的欧拉角速率偏航 $\dot{\phi}$ 、俯仰 $\dot{\theta}$ 、滚转 $\dot{\gamma}$ 可以通过式(3)求得，进而通过积分运算得到弹体姿态角 $[\varphi \theta \gamma]^T$ ：

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \\ 0 & \cos \gamma / \cos \theta & -\sin \gamma / \cos \theta \\ 1 & -\cos \gamma \tan \theta & \sin \gamma \tan \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{mx} \\ \omega_{my} \\ \omega_{mz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

设失调角为 ε_y 和 ε_z ，滚转和俯仰框架的偏转角为 γ_s 和 θ_s ，则根据坐标变换的关系，可以求得沿视线系 x 轴方向的单位矢量在惯性系下的投影：

$$\vec{r}_{gs} = \begin{bmatrix} r_{gx} & r_{gy} & r_{gz} \end{bmatrix}^T = L(\varepsilon_r, \varepsilon_y, \theta_s, \gamma_s, \gamma, \theta, \varphi)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$\vec{r}_{gs} = \begin{bmatrix} r_{gx} & r_{gy} & r_{gz} \end{bmatrix}^T = L(\zeta, \lambda, q)^{-1} \cdot [1 \ 0 \ 0]^T = \begin{bmatrix} \cos q \cos \lambda \\ \sin \lambda \\ -\sin q \cos \lambda \end{bmatrix} \quad (5)$$

从而可以得到偏航视线角 q 和俯仰视线角 λ ：

$$\begin{cases} q = \alpha \tan \left(\frac{-r_{gz}}{r_{gx}} \right) \\ \lambda = \alpha \tan \left(\frac{r_{gy}}{\sqrt{r_{gx}^2 + r_{gz}^2}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)微分，即可得到偏航和俯仰的视线角速度 $[\dot{q} \ \dot{\lambda}]$ ：

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = M_s \cdot \frac{d(\vec{r}_{gs})}{dt} \quad (7)$$

$$\text{式中: } M_s = \begin{bmatrix} \frac{r_{gx}}{v^2} & 0 & \frac{-r_{gx}}{v^2} \\ -\frac{r_{gx} \cdot r_{gy}}{v} & v & \frac{-r_{gy} \cdot r_{gz}}{v} \end{bmatrix},$$

$$v = \sqrt{r_{gx}^2 + r_{gy}^2} = \cos \lambda.$$

根据角速度合成原理, 可以求得惯性系下视线角速率^[3]:

$$q'_{gs} = \begin{bmatrix} -\cos q \sin \lambda \cos \lambda & \sin q \\ \cos^2 \lambda & 0 \\ \sin q \sin \lambda \cos \lambda & \cos q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3 视线角速率提取精度分析

假设系统中的差分运算、速率陀螺的漂移以及动态测量带宽不足等因素导致存在误差记 $\Delta \left(\frac{d(\vec{r}_{gs})}{dt} \right)$,

则根据式(7)、式(8)可以得到惯性系下的视线角速度提取误差:

$$\Delta \left(\hat{q}_{gs} \right) = M' \cdot \Delta \left(\frac{d(\vec{r}_{gs})}{dt} \right) \quad (9)$$

为分析误差 $\Delta \left(\frac{d(\vec{r}_{gs})}{dt} \right)$ 对视线角速率精度的影响,

采用 H_2 范数理论进行分析:

$$\left\| \Delta \left(\hat{q}_{gs} \right) \right\|_2 = \left\| M' \cdot \Delta \left(\frac{d(\vec{r}_{gs})}{dt} \right) \right\|_2 \leq \|M'\|_2 \cdot \left\| \Delta \left(\frac{d(\vec{r}_{gs})}{dt} \right) \right\|_2 \quad (10)$$

由于 $\|M'\|_2 = 1$, 所以算法对误差 $\Delta \left(\frac{d(\vec{r}_{gs})}{dt} \right)$ 没有放大作用。

4 跟踪微分器设计

跟踪微分器本身是一个滤波器, 可以用于参数估计、系统辨识、滤波以及非线性函数求根等。跟踪微分器属于无模型滤波器, 不需要已知系统模型和噪声等先验信息, 适用于导引头等对被动跟踪信息未知的场合。

本文中采用了有限时间收敛微分器, 这种微分器结构简单、全程收敛迅速并且能够避免抖振现象的发生^[5]。该微分器的设计原理为:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{z}}_1 &= \tilde{z}_2 \\ &\vdots \\ \dot{\tilde{z}}_{n-1} &= \tilde{z}_n \\ \dot{\tilde{z}}_n &= f(\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \dots, \tilde{z}_n) \end{aligned} \quad (11)$$

如果摄动系统的平衡点是有限时间稳定的, 那么系统:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ &\vdots \\ \frac{dx_{n-1}}{dt} &= x_n \\ \frac{dx_n}{dt} &= f(x_1 - v(t), \varepsilon x_2, \dots, \varepsilon^{n-1} x_n) \end{aligned} \quad (12)$$

就构成了有限时间收敛微分器, 并且在一个非常段的有效时间后, 满足:

$$x_i - v^{(i-1)}(t) = O(\varepsilon^{\rho\gamma-i+1}), \quad i=1, \dots, n \quad (13)$$

式中: $\varepsilon > 0$ 是摄动参数; $O(\varepsilon^{\rho\gamma-i+1})$ 表示状态 x_i 与 $v^{(i-1)}(t)$ 的误差近似程度是 ε 的 $\rho\gamma-i+1$ 阶的, 并且 $\rho\gamma-i+1 > 1$ 。

本文设计采用一种简单形式的有限时间跟踪微分器^[6], 其整体由线性和非线性两部分组成, 不需要切换函数, 其形式如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \varepsilon^2 \dot{x}_2 = -a_0(x_1 - v(t)) - \\ \quad a_1 |x_1 - v(t)|^\alpha \operatorname{sgn}(x_1 - v(t)) - \\ \quad b_0 \varepsilon x_2 - b_1 |\varepsilon x_2|^\alpha \operatorname{sgn}(\varepsilon x_2) \\ y = x_2(t) \end{cases} \quad (14)$$

对于式(14), 如果 $\varepsilon, a_0, a_1, b_0, b_1 > 0, 0 < \alpha < 1$, 那么对于任意输入信号 $|v(t)| < B$, ($0 < B < +\infty$), 满足 $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} x_1(t) = v(t)$ 。

5 仿真验证

在纯稳定方式下, 假定目标不动且视线与惯性系 X 轴重合, 弹体的初始姿态角 $\varphi_0 = \theta_0 = \gamma_0 = 0$, 初始框架角 $\gamma_{s0} = \theta_{s0} = 0$, 取弹体扰动形式为 $\varphi = 0.05 \sin(6.28t)$ 、 $\theta = 0.02 \sin(10t)$ 、 $\gamma = 0.01 \sin(5t)$, 微分器参数取 $\varepsilon = 1/45$, $a_0 = 2$, $a_1 = 0.136$, $b_0 = 2.12$, $b_1 = 0.035$, $\alpha = 0.8$ 。根据上述推导求, 可以得到稳定方式下的目标视线角速度估计, 如图 4~图 6。

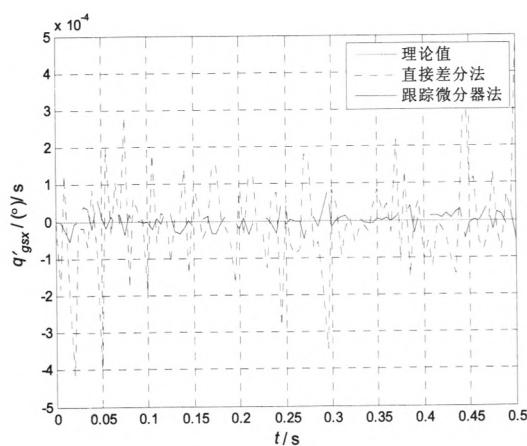


图4 纯稳定方式下的视线角速度的x分量估计

Fig.4 X component of the LOS angular rate estimation under steady state

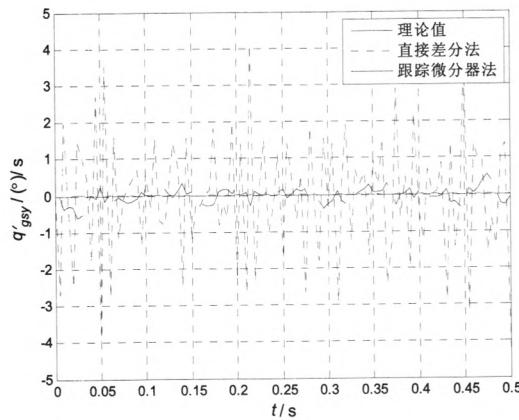


图5 纯稳定方式下的视线角速度的y分量估计

Fig.5 Y component of the LOS angular rate estimation under steady state

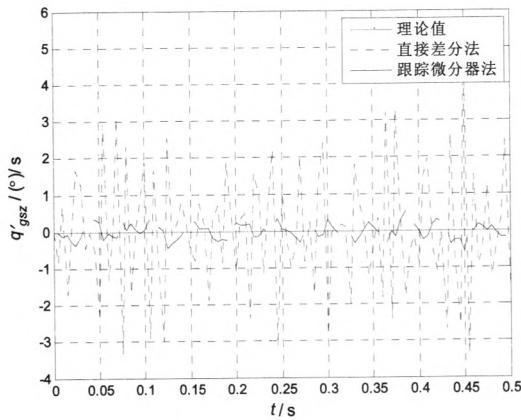


图6 纯稳定方式下的视线角速度的z分量估计

Fig.6 Z component of the LOS angular rate estimation under steady state

在跟踪方式下, 假定目标相对于惯性空间的偏航角 q 和俯仰角 λ 的运动方式为:

$$q=0.01\cos(5t)-0.01$$

$$\lambda=0.02\sin(0.9t)+0.02$$

取弹体扰动形式为 $\varphi=-0.02t$ 、 $\theta=-0.53t$ 、 $\gamma=5.25t$, 框架的运动形式为 $\gamma_s=-5.25t$ 、 $\theta_s=0.53t$ 时, 令微分器的参数保持不变, 可得跟踪方式下的目标视线角速度估计, 如图7~图9。

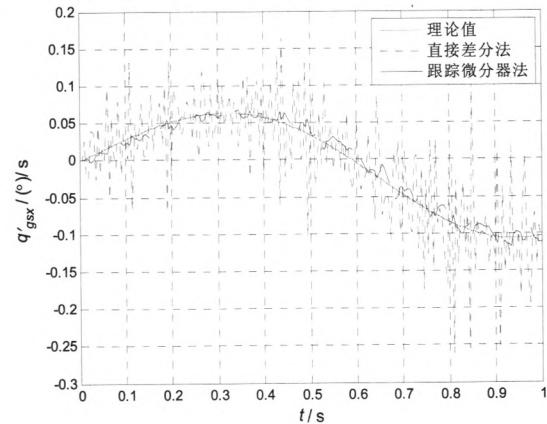


图7 跟踪方式下的视线角速度的x分量估计

Fig.7 X component of the LOS angular rate estimation under tracking state

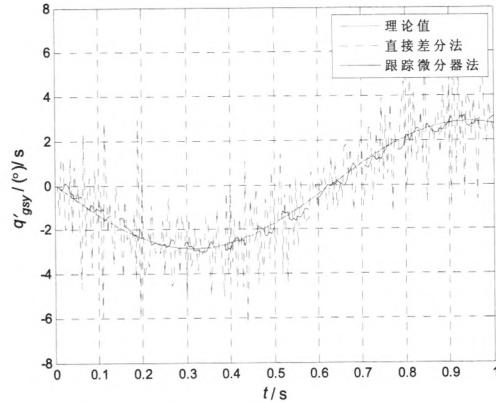


图8 跟踪方式下的视线角速度的y分量估计

Fig.8 Y component of the LOS angular rate estimation under tracking state

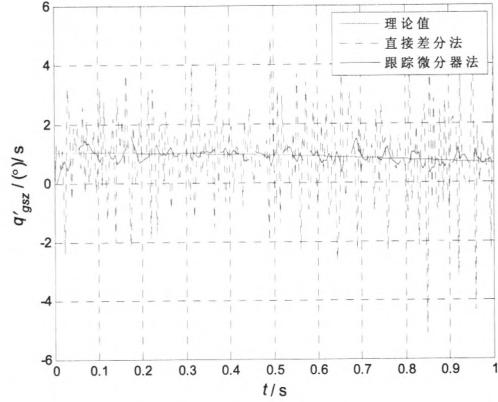


图9 跟踪方式下的视线角速度的z分量估计

Fig.9 Z component of the LOS angular rate estimation under tracking state

(下转第72页)

参考文献:

- [1] 李晓颜, 黄加才, 王建月, 等. 一类抗冲击载荷的新型橡胶减振器[J]. 宇航材料工艺, 2003(1): 42-45.
- [2] 方同, 薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
- [3] 马大猷. 噪声与振动控制手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 莫平, 程晓果, 余盛强, 等. 冲击响应谱在惯导减振防冲设计中的应用[J]. 战术导弹控制技术, 2008(1): 60-63.
- [5] 张思. 橡胶减振器的减振机理与设计[J]. 东南大学学报, 1991(11): 39-40.
- [6] 王贵一. 橡胶减振器的设计原理和性能测试[J]. 特种橡胶制品, 1998, 19(6): 42-47.
- [7] 杨俊凤, 周相荣, 丁炜. 橡胶减振器的动静比影响因素[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(6): 201-206.
- [8] 赵云峰. 高性能黏弹性阻尼材料及其应用[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(5): 1-5.
- [9] 赵云峰. ZN 系列粘弹性阻尼材料的性能及应用[J]. 宇航材料工艺, 2001(2): 19-23.
- [10] 吴斌, 张驰, 隋永博. 某弹载结构橡胶隔振器动态特性研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(9): 1114-1116.
- [11] 黄金威, 杨朋军, 于云峰, 等. 惯性平台橡胶减振器弹性特性的有限元分析[J]. 机械设计, 2006, 23(11): 51-54.
- [12] 袁名松. 某红外成像导引头设计工作报告[R]. 昆明: 昆明物理研究所, 2014.
- [13] 袁名松, 冯建伟, 黄云, 等. 巡飞攻击导弹红外成像导引头瞬态冲击响应分析[J]. 红外技术, 2014, 36(12): 953-957.

(上接第 66 页)

图 4~图 6 表达了在纯稳定方式下的视线角速度估计, 图 7~图 9 表达了跟踪方式下的视线角速率估计, 由结果可得跟踪微分器所提取的目标视线角速率与真是的目标视线角速率一致, 证明了算法的有效性; 同时, 为了对比结果, 将直接差分得到的视线角速率与跟踪微分器的结果相对比可得, 可以看出利用跟踪微分器能够获得较好的视线角速度估计曲线, 具备工程应用的可行性。

6 结论

本文提出了一种基于跟踪微分器的滚仰式导引头视线角速率提取算法。在对稳定平台各坐标系间转换关系进行分析的基础上, 推导了滚转-俯仰式红外导引头的惯性视线角速率的提取算法, 并针对该算法中存在的微分运算, 引入了跟踪微分器对信号进行求

导, 经数字仿真, 对比了直接差分法和跟踪微分器法对视线角速率的提取效果, 证明了利用跟踪微分器提取视线角速率的有效性。

参考文献:

- [1] 祁载康. 制导弹药技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [2] United States Patent. 6969025 B1[P]. 2005-11-29, 22-25.
- [3] 林喆, 姚郁, 章国江. 捷联成像导引头视线角速率的提取问题研究[C]//全国光学技术学术交流会, 2004, 10.
- [4] 花文涛, 丁海山, 贾晓洪, 等. 成像导引头光轴与视线之间相对运动的研究[J]. 红外技术, 2014, 36(1): 31-36.
- [5] 王新华, 刘金琨. 微分器设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [6] 王新华, 陈增强, 袁著址. 全程快速非线性跟踪-微分器[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 875-878.