

doi: 10.7690/bgzd.2025.03.015

滚转弹舵机延迟时间实时解算方法研究

李 庚^{1,2}, 王 鹏¹, 高晓波¹, 姜 江¹, 张 瑶¹, 赵 洁^{2,3}, 杜凤怀¹, 胡 车¹

(1. 西安现代控制技术研究所第一总体部, 西安 710065; 2. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081;

3. 北方导航控制技术股份有限公司技术中心, 北京 100176)

摘要: 为给舵机延迟相位补偿提供准确参数, 提出一种应用于滚转弹舵机延迟时间实时解算方法。在弹上计算机硬件增加 A/D 转换模块实现舵反馈信号采集, 根据滚转弹控制指令和舵偏角周期性过零的特性, 计算出控制指令和舵偏角过零时刻, 根据其过零时间差解算出舵机延迟时间。结果表明: 在弹上计算机软件中增加舵机延迟时间解算模块, 通过线性插值、滑动平均滤波等方法提高延迟时间解算精度, 以满足旋转弹制导控制使用要求。

关键词: 滚转弹; 延迟时间; 实时解算; 制导控制

中图分类号: TJ768.2 **文献标志码:** A

Research on Real Time Calculation Method of
Rudder Engine Delay Time of Rolling MissileLi Geng^{1,2}, Wang Peng¹, Gao Xiaobo¹, Lou Jiang¹, Zhang Yao¹, Zhao Jie^{2,3}, Du Fenghuai¹, Hu Che¹

(1. No. 1 General Department, Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. Technology Center, North Navigation Control Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: In order to provide accurate parameters for rudder delay phase compensation, a real-time calculation method for rudder delay time of rolling missile was proposed. A/D conversion module is added to the hardware of the computer on the missile to realize the acquisition of the rudder feedback signal, the zero-crossing time of the control command and the rudder deflection angle is calculated according to the periodic zero-crossing characteristics of the control command and the rudder deflection angle of the rolling missile, and the delay time of the rudder engine is calculated according to the zero-crossing time difference. The results show that the delay time calculation module is added in the missile computer software, and the delay time calculation accuracy is improved by linear interpolation, moving average filtering and other methods to meet the guidance and control requirements of the spinning missile.

Keywords: rolling missile; delay time; real time calculation; guidance and control

0 引言

滚转弹一般采取俯仰和偏航双通道控制方式, 弹上计算机根据制导控制律分别计算出俯仰和偏航控制指令^[1-2], 然后根据弹体滚转角, 分解为舵机可执行电压指令, 驱动舵机偏转, 从而产生俯仰控制力和偏航控制力。但由于舵机延迟时间的存在, 舵偏角相对舵指令会有相位滞后, 从而造成俯仰和偏航 2 通道的控制耦合, 影响制导控制精度, 因此对舵机延迟时间必须进行相位补偿^[3-4]。

针对舵机延迟的相位补偿必须知道其延迟时间大小, 一般舵机延迟时间的测量是通过地面静态试验或飞行试验统计获得, 并将其装在弹上计算机里进行补偿^[5-6]。当舵机延迟时间较稳定时, 通过地面静态试验或飞行试验统计是非常有效的, 但由于舵机延迟时间一般会随弹体速度、转速、动压等因

素变化, 从而造成导弹延迟补偿误差, 产生通道控制耦合, 从而影响制导控制精度^[3-4]。

针对滚转弹舵机延迟时间会随弹体速度、转速、动压等因素变化的问题, 笔者基于滚转弹控制指令和舵偏角周期性过零的特点, 根据指令和舵偏角过零时刻的信号特征, 提出一种实时解算控制指令和舵偏角的过零时刻, 并根据其时间差解算出舵机延迟时间的方法。在过零时间解算时采用线性插值、滑动平均滤波等方法提高舵机延迟时间解算精度, 为舵机延迟相位补偿提供准确参数, 提高旋转弹适应能力。

1 工作原理

一般情况下, 对于滚转弹, 其控制指令和舵偏角为方波或正弦信号形式, 弹体每旋转一周, 舵机会摆动一个正弦周期, 舵偏角 2 次过零。利用滚转

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-08-12

第一作者: 李 庚(1989—), 男, 河南人, 博士。

弹指令周期性过零这一特点, 根据指令过零时刻的信号特征, 同时在弹上计算机中增加舵反馈采集模块, 采集舵反馈信号, 然后通过对控制指令和舵反馈信号, 实时解算控制指令和舵反馈的过零时刻, 根据其差值解算出舵机延迟时间。

舵机延迟时间实时解算过程工作原理如图1所示: 相比于传统滚转弹舵机控制模块, A/D转换模块是需增加的硬件部分, 用于将执行机构舵机反馈的电信号转换为可与控制指令对比的数字信号; 舵机延迟时间解算模块是需增加的软件模型, 用于实时对比控制指令和舵反馈信号, 进而实时解算出舵机延迟时间。

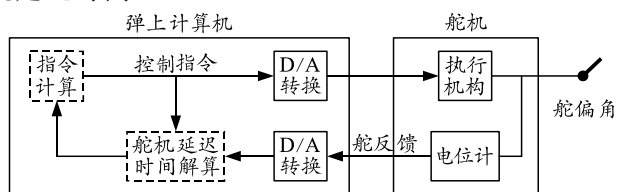


图1 舵机延迟时间实时解算工作原理

2 实现方法

为获取舵机延迟时间, 需要首先获取控制指令和舵反馈信号的过零时刻, 然后再对延迟时间进行滤波, 保证延迟时间具有较好的平滑性。

2.1 控制指令过零时刻

设控制指令计算周期为 T , s; k_T 时刻控制指令为 $V(k)$ ($k=0, 1, 2, \dots$), v ; 典型控制指令过零时刻如图2所示。图中 $t_{gl}(n)$ 为控制指令第 n 个过零时刻; 控制指令计算周期 T 一般为毫秒级, 这是为减小弹上计算机计算量, 但相对于解算舵机延迟时间的精度来说, 如果以 dT 或 $(d+1)T/2$ 时间作为过零时刻误差较大, 笔者采用线性插值法求解过零时刻, 以尽量减小误差。

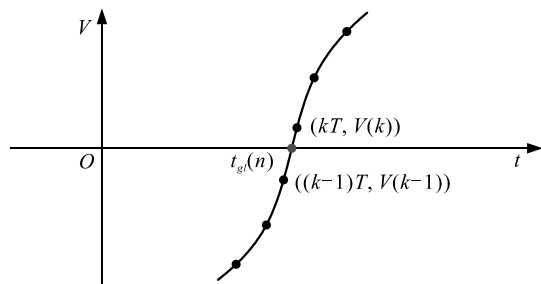


图2 控制指令过零时刻

控制指令过零时刻判断逻辑为: $V(k-1) \leq 0$ 且 $V(k) > 0$, 或 $V(k-1) \geq 0$ 且 $V(k) < 0$ ($k=0, 1, 2, \dots$), 可判断 k_T 时刻指令过零。

采用线性插值法进一步提高控制指令过零时刻

解算精度:

$$t_{gl}(n) = k_T - V(k)T / (V(k) - V(k-1));$$

$$n=0, 1, 2, \dots; k=0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中 $t_{gl}(n)$ 为控制指令第 n 个过零时刻, s。

2.2 舵反馈信号过零时刻

相对于控制指令信号来说, 舵反馈信号有较大噪声; 因此, 在计算舵反馈信号过零时刻时, 要对采样的舵反馈信号进行滤波处理。为不影响延迟时间测量的准确性, 笔者采用滑动平均滤波方法, 该方法可有效抑制随机噪声, 且滤波延迟固定, 便于补偿。

设舵反馈信号为 V' , v ; 采样同指令周期, 第 k_T 时刻反馈信号采样值 $V'(k)$ ($k=0, 1, 2, \dots$), v ; 另滑动平均滤波参数设为 5 (根据信号噪声情况确定), 则 k_T 时刻采样信号滤波值 $V'_{lb}(k)$ 为:

$$V'_{lb}(k) = (V'(k-4) + V'(k-3) + V'(k-2) + V'(k-1) + V'(k)) / 5; k=4, 5, 6, \dots \quad (2)$$

当 $V'_{lb}(k-1)$ 和 $V'_{lb}(k)$ 满足: $V'_{lb}(k-1) \leq 0$ 且 $V'_{lb}(k) > 0$, 或 $V'_{lb}(k-1) \geq 0$ 且 $V'_{lb}(k) < 0$ ($k=5, 6, 7, \dots$), 判断 k_T 时刻舵反馈过零。

为进一步提高舵反馈过零时刻解算精度, 对其进行线性差值:

$$t'_{gl}(n) = (k-2)T - \frac{V'_{lb}(k)T_1}{V'_{lb}(k) - V'_{lb}(k-1)} \quad (3)$$

式中: $k=5, 6, 7, \dots$; $t'_{gl}(n)$ 为舵反馈第 n 个过零时刻, s, 计算时考虑了滑动滤波器参数为 5 时产生的 $2T$ 周期延迟。

2.3 舵机延迟时间

对于滚转弹, 舵控制指令与舵反馈过零成对出现, 设 $T_{lat}(n)$ 为第 n 次舵机延迟时间计算结果, 则通过式(1)和(3)即可求解得到某一时刻舵机延迟时间:

$$T_{lat}(n) = t'_{gl}(n) - t_{gl}(n); n=1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

2.4 滤波

由于舵反馈噪声、解算误差等原因, 解算延迟时间不可避免存在跳动, 在使用时对所得延迟时间 $T_{lat}(n)$ 进行加权平均滤波, 减小解算延迟时间跳动对制导控制系统的影响; 设当滑动平均滤波参数为 M 时, 延迟时间品质可满足使用需求, 则有:

$$\overline{T_{lat}}(n) = (T_{lat}(n-M+1) + T_{lat}(n-M+2) + \dots + T_{lat}(n)) / M; n=M, M+1, M+2, \dots \quad (5)$$

式中: $\overline{T_{lat}}(n)$ 为滤波后舵机延迟时间, s 当 $n < M$ 时, $\overline{T_{lat}}(n)$ 取默认初值(可取舵机延迟时间测试均值); M 为滑动平均滤波参数, 可取 2、3 或 4 等, M 的选取与解算所得舵机延迟时间 T_{lat} 跳动量(舵反馈噪声引起)及舵机延迟时间变化率等有关, M 取值越大, $\overline{T_{lat}}(n)$ 越平滑, 但滤波延迟也越大。在舵机延迟时间变化率较小时, M 取值可适当偏大, 保证 $\overline{T_{lat}}(n)$ 有较好平滑性, 具体选取可通过建模仿真方式确定最优值。

3 验证

在某旋转弹项目研制过程中, 经多发导弹飞行试验验证表明: 采用上述方法可在弹上准确解算出舵机延迟时间, 解决了舵机因导弹速度、转速、动压等因素延迟时间变化造成的控制通道耦合, 从而大大提高了导弹的适应能力。

4 结论

笔者提出一种应用于滚转弹舵机延迟时间实时解算方法, 根据滚转弹控制指令和舵偏角周期性过零的特性, 计算出控制指令和舵偏角过零时刻, 根

据其过零时间差解算出舵机延迟时间。

在弹上计算机硬件上增加 A/D 转换模块实现舵反馈信号采集, 软件中增加舵机延迟时间解算模块, 通过线性插值、滑动平均滤波等方法提高延迟时间解算精度, 以满足旋转弹制导控制使用要求。

该方法已成功应用于某旋转弹项目中。经多次飞行试验验证可知: 该方法具有可行性和有效性, 可大幅提高旋转弹的适应能力。

参考文献:

- [1] 陈圣, 王旭刚, 郭新民. 基于专家 PID 的滚转导弹控制系统[J]. 兵工自动化, 2014, 33(1): 89-90.
- [2] 王狂飙. 旋转导弹制导技术及应用[J]. 火箭与制导学报, 2002(3): 28-31.
- [3] 闫晓勇, 张成, 杨树兴. 一类滚转弹的补偿解耦方法[J]. 弹道学报, 2009, 21(4): 17-20.
- [4] 于剑桥, 林凡, 方正. 自激振荡线性化舵机延迟补偿时间处理方法研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(5): 652-656.
- [5] 郭庆伟, 宋卫东, 王毅, 等. 舵机控制延迟误差分析与补偿方法研究[J]. 中国测试, 2017, 43(5): 127-131.
- [6] 许建元. 舵机性能测试系统中的加载控制技术研究[M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2019: 29-32.
- [7] 郑思睿, 潘卫军, 江艳军, 等. 基于模糊集理论-贝叶斯网络的尾流事故机理分析[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(3): 135-141.
- [8] 刘浩, 王昊, 孟光磊, 等. 基于动态贝叶斯网络和模糊灰度理论的飞行训练评估[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 243-254.
- [9] 刘铭, 于子奇. 一种改进的期望最大化算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2022, 60(5): 1176-1182.
- [10] 查国云, 刘鹏飞. 基于灰色关联层次分析法的机场目标毁伤评估[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(8): 55-58.
- [11] 张雷, 陈兆倩, 谢宝蓉, 等. 遥感图像的变化检测算法综述[J]. 电脑与信术, 2022, 30(5): 13-15.
- [12] 宁磊, 郑宝忠, 张莹, 等. 一种基于高斯混合模型的改进 EM 算法研究[J]. 应用光学, 2017, 34(6): 985-989.
- [13] 胡思艺. Gamma 分布的区间数据参数估计的迭代算法[J]. 应用概率统计, 2022, 38(4): 505-520.
- [14] HONG J, TAMAKLOE R, PARK D. Application of association rules mining algorithm for hazardous materials transportation crashes on expressway[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 144: 242-252.
- [15] 冷月妍. 基于高斯混合模型的图像处理[J]. 现代信息科技, 2022, 6(19): 57-60.
- [16] MAO J C. An Advanced Apriori Algorithm Technology to Enhance Sports Data Mining[J]. Information Resources Management Journal (IRMJ), 2024, 37(1): 1-18.
- [17] 马晓明, 丁平, 晏卫东. 基于贝叶斯网络的舰船目标毁伤评估[J]. 兵工自动化, 2016, 35(6): 72-75.
- [18] 苏娟, 鲜勇, 刘代志. 基于图像变化检测的打击效自动评估[J]. 火力与指挥, 2008, 33(4): 134-137.

(上接第 65 页)

(上接第 69 页)