

动能拦截器姿控固体小火箭点火算法设计*

李广华,张洪波,汤国建

(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:使用固体姿控小火箭是实现动能拦截器快响应和高精度姿态控制的方案之一。针对一种新型动能拦截器姿控小火箭布局,提出了点火组合混合搜索算法。描述了动能拦截器姿控小火箭的配置方案,分析了弹体自旋需求。设计了一种结合目标排序法和区间搜索法的点火组合混合搜索算法;当可用小火箭个数较少时,采用目标排序法;当可用小火箭个数较多时,采用区间搜索法。指令力矩近似仿真结果及姿态控制数值仿真结果表明:该算法能够有效地近似指令力矩,实现快速高精度的姿态跟踪。

关键词:动能拦截器;固体小火箭;目标排序法;区间搜索法;混合搜索算法

中图分类号:V448.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)01-095-06

Ignition algorithm for attitude control solid-propellant nozzles in kinetic interceptor

LI Guanghua, ZHANG Hongbo, TANG Guojian

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Using solid-propellant nozzles is one of the best schemes for kinetic interceptor to realize the fast response and high precision of attitude control. A mixed searching algorithm for ignition combination was presented for a novel attitude control solid-propellant nozzle in kinetic interceptor. Firstly, the configuration of solid-propellant nozzles was described and spin requirements of the kinetic interceptor were analyzed. Then the mixed searching algorithm was designed by a combination of sorting method and interval searching method. Sorting method is selected when the number of available nozzles is small and interval searching method is chosen on the contrary. Results of instruction torque approximation simulation and attitude control numerical simulation suggest that the algorithm can track the instruction torque effectively and achieve attitude tracking quickly and with a high precision.

Key words: kinetic interceptor; solid-propellant nozzles; sorting method; interval searching method; mixed searching algorithm

动能拦截器是通过末段的精确导引,以零脱靶量直接碰撞杀伤目标的高技术武器^[1]。采用气动舵控制的拦截器响应速度慢,且不适用于大气层高层作战。为提高动能拦截器的响应速度和制导精度,扩大拦截作战空间,使用侧向阵列固体小火箭进行轨道和姿态控制是最佳方案之一。

姿控发动机或小火箭在工程上早已得到应用^[2],但是相应的点火算法却没有公布。点火算法对姿控发动机的设计以及拦截器的制导精度都是至关重要的,因此简单实用的算法是必要的。文献[3]对PAC-3姿控发动机的点火逻辑进行了研究和分析,但没有给出具体的优化方法。文献[4]采用贪心算法设计了动能拦截器的点火逻辑,相比较隐枚举法计算速度更快,但该方法的模

型复杂,计算量大,且没有点火个数的限制。文献[5-6]也以PAC-3为例,给出了姿控发动机组合点火算法,但认为每个发动机产生的力矩是相等的,算法比较简单。文献[7]采用隐枚举法设计了姿控发动机点火逻辑,但当可选发动机很多时,该方法计算量较大。文献[8]实际上是基于目标排序法和枚举法设计了点火规则,但是在表述上不明确,且同样不适用于发动机较多的情况。

基于一种拦截器姿控阵列小火箭新型空间布局,设计了结合目标排序法和区间搜索法的点火组合混合搜索算法。当可用小火箭个数较少时,采用目标排序法;当可用小火箭个数较多时,采用区间搜索方法。该算法结构简单,计算量小,能够快速跟踪指令力矩。

* 收稿日期:2014-05-27

作者简介:李广华(1987—),男,河南商丘人,博士研究生,E-mail: liguanghua@nudt.edu.cn;
汤国建(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: tangguojian@nudt.edu.cn

1 动能拦截器姿控小火箭空间布局

如图 1(a) 所示,动能拦截器表面布置了多个一次性点火的微型固体小火箭,这些小火箭平均分成多圈,在质心两侧成对称两组。每组之中,圈与圈之间的间隔相同。每个固体燃料反作用喷管只能点火一次。每圈中的小火箭的轴线位于同一平面内,该平面与动能拦截器的体对称轴垂直,且小火箭的轴线与弹体对称轴相交。在本例中,拦截器的表面布置 10 圈均匀分布的固体小火箭,即质心的每一侧布置 5 圈固体小火箭,每一圈上布置 36 个,其上相邻小火箭角度所在轴线夹角为 10° ,为了分析方便,对 36 个小火箭进行编号,如图 1(b) 所示,总计 360 个固体小火箭。每个小火箭提供总冲量固定的脉冲推力。相比以 PAC-3 为典型代表的头部姿控发动机布局方案,该布局充分利用弹体表面空间,增多了固体小火箭个数,提供了更多阶的力矩选择,另外,该布局方案还可用于轨道控制,如同时点火关于 Oy_1z_1 平面对称的小火箭。

2 动能拦截器自旋需求分析

根据动能拦截器上姿控小火箭系统的安装方式,为提高使用效率,充分利用小火箭,避免出现每一列上小火箭点火不均匀的现象,动能拦截器需绕纵轴自旋。一方面,自旋角速度不能过小,否则不能充分利用小火箭;另一方面,若自旋角速度过大,姿控小火箭扇形扫描面积过大,有效冲量损失严重,同时高速旋转引起的陀螺效应、马格努斯效应将降低弹身姿态稳定,引起干扰振荡^[9]。

设动能拦截器自旋角速度为 ω_x ,姿控小火箭的平均推力为 F ,工作时间为 τ ,定义弹体慢旋时小火箭在工作时间内相对于弹体扫过的角度为点火占令角,用 ϕ 表示,同时定义小火箭工作过程中在 ϕ 角平分线上的等效冲量与自身具有的冲量之比为冲量效率,用 η 表示,则

$$\eta = \frac{\int_0^\tau F \cos\left(\frac{\phi}{2} - \omega_x t\right) dt}{F\tau} = \frac{2 \sin \frac{\phi}{2}}{\phi} \quad (1)$$

图 2 给出了冲量效率与自转角速度以及工作时间的关系,可以得到,自旋角速度不变时,工作时间越小,冲量效率越高;工作时间不变时,自转角速度越大,冲量效率越低,即小火箭工作时间越长,自转角速度越大,冲量效率越低。小火箭工作时间一般约为 20ms 左右,当 $\omega_x \leq 3\text{r/s}$ 时, $\eta \approx 1$,因此可取 ω_x 为 $2 \sim 3\text{r/s}$ 。

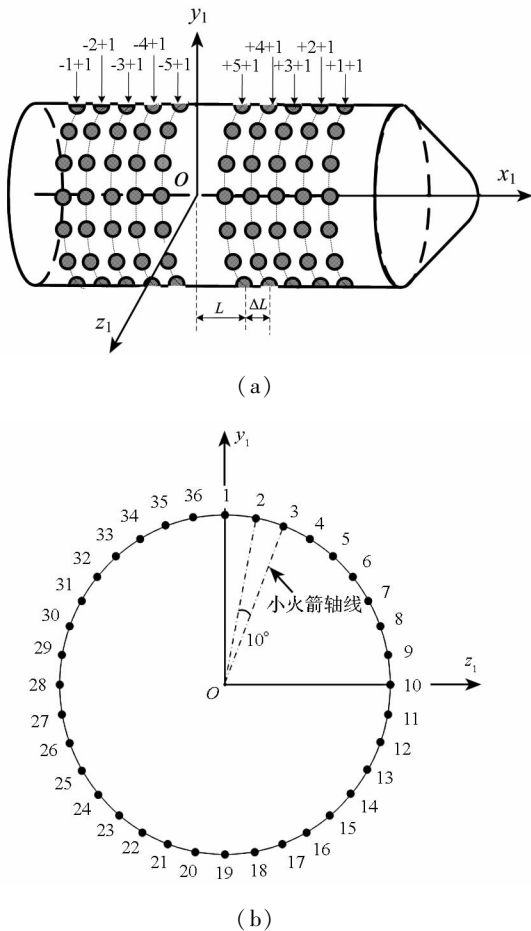


图 1 动能拦截器固体小火箭空间布局
Fig. 1 Configuration of solid-propellant nozzles on kinetic interceptor

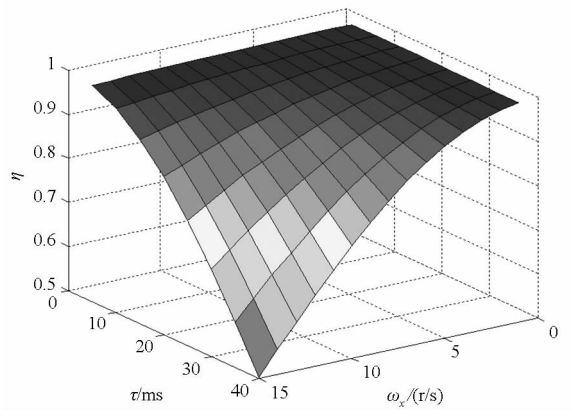


图 2 冲量效率与自旋角速度以及工作时间的关系
Fig. 2 Pulse effectiveness varying with spin angular velocity and time

3 点火算法设计

姿控小火箭的点火算法本质上是确定如何在给定的方向上产生所需大小的作用力,问题可以转化为哪些列中的哪几个小火箭进行点火。点火算法需要遵循以下几个原则:

- 1) 小火箭点火个数要尽可能少;

2) 点火组合所得力矩与所需力矩之间的误差最小;

3) 由于喷流干扰的影响,点火个数限幅在10个,且只能点质心同一侧同一列的小火箭及其质心对称的小火箭。

3.1 点火中心

定义点火列的编号为点火中心。先考虑质心前侧的小火箭(如图3所示),根据控制律得到所需力矩矢量 $M_d = [0, M_{y_d}, M_{z_d}]^T$, 则 M_d 与 O_{y_1} 轴之间的角度为 θ_m , 则

$$\theta_m = \begin{cases} \arctan(M_{z_1}/M_{y_1}) & M_{y_1} > 0, M_{z_1} \geq 0 \\ \pi/2 & M_{y_1} = 0, M_{z_1} > 0 \\ \arctan(M_{z_1}/M_{y_1}) + \pi & M_{y_1} < 0 \\ 3\pi/2 & M_{y_1} = 0, M_{z_1} < 0 \\ \arctan(M_{z_1}/M_{y_1}) + 2\pi & M_{y_1} > 0, M_{z_1} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

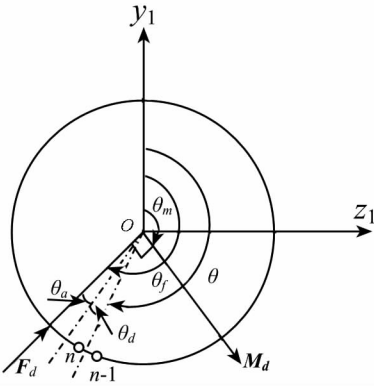


图3 点火中心示意图

Fig. 3 Concept of ignition center

因此,所施加力的方向与 O_{y_1} 轴之间的角度 θ_f 为

$$\theta_f = \theta_m + \pi/2 \quad (3)$$

设点火指令延迟时间为 t_d , 点火指令延迟补偿角为 θ_d , 转动补偿角为 θ_a , 则

$$\begin{cases} \theta_a = \omega_{x1} \tau/2 \\ \theta_d = \omega_{x1} t_d \end{cases} \quad (4)$$

因此,实际点火线与 O_{y_1} 轴的夹角 θ 为

$$\theta = \theta_f - \theta_a - \theta_d \quad (5)$$

点火中心 K 为

$$K = \left[\frac{\theta}{\pi/18} \right] + 1 \quad (6)$$

式中, $[\]$ 表示四舍五入取整。

由于小火箭布局为质心前后对称布置,因此在质心后侧存在另外一个点火中心 K_1 , 它与 K 关于质心对称,可利用式(7)进行求解。

$$K_1 = \begin{cases} K + 18 & K < 19 \\ K - 18 & K \geq 19 \end{cases} \quad (7)$$

3.2 点火组合混合搜索算法

3.2.1 目标排序法

目标排序法是把所有的目标值(包括可行解和非可行解)按照大小排序,然后顺序对每个目标值进行检验,若求最大值则从按大到小开始检验,若求最小值则从小到开始检验^[10]。与隐式枚举法相比,它不仅避免了通过试算寻求可行解的麻烦,还可使用计算机进行求解。

对可用小火箭的所有点火组合产生的力矩从小到大进行排序,所有产生相等力矩的点火组合只保留小火箭最少的一组。设最小力矩为 M_{min} , 最大力矩为 M_{max} , 共有 m 阶力矩,若 $M_d \leq (M_{min} + M_{max})/2$, 则从小到大进行搜索,当 $|M_d - M_i| \leq |M_d - M_{i+1}| (i = 1, 2, \dots, m)$, 停止搜索, M_i 即为最优力矩 M_{opt} , 则 M_i 对应的点火组合即为最佳点火组合;若 $M_d > (M_{min} + M_{max})/2$, 则从大到小进行搜索,当 $|M_d - M_i| \leq |M_d - M_{i-1}| (i = m, \dots, 2, 1)$, 停止搜索, M_i 即为最优力矩 M_{opt} , 则 M_i 对应的点火组合即为最佳点火组合。

3.2.2 区间搜索法

区间搜索法是把整个搜索区间按照某种规律划分成多个子搜索空间,根据所需力矩进行判断,舍去不满足条件的区间,然后求解出满足条件区间内的极值,最后从这些极值中选取最佳值。

假设可用小火箭个数为 k , 计算 $i (i = 1, 2, \dots, k - 1)$ 个小火箭同时点火的最小力矩 M_{min_i} 和最大力矩 M_{max_i} , 得到 $k - 1$ 个最小最大力矩区间 $[M_{min_i}, M_{max_i}]$, 判断 M_d 是否属于 $[M_{min_i}, M_{max_i}]$, 舍去不满足条件的区间。对于所有满足条件的每个区间,从小火箭点火个数最少的区间开始,按照目标排序法求解该区间内的最佳力矩 M_{opt_i} 。在求解过程中,直接排除已经出现过相等力矩的组合。对于求解出的 M_{opt_i} , 再利用目标排序法求解 M_{opt} , 其对应的点火组合即为最佳点火组合。

若 M_d 不属于任何 $[M_{min_i}, M_{max_i}]$, 则 M_d 符合以下三种情况之一:

1) $M_d \geq (M_{max} - M_{min})/2$, 此时最佳点火组合为 M_{max} 对应的点火组合;

2) $M_d \leq M_{min}$, 若 $M_d < M_{min}/2$, 则不点火, 否则,最佳点火组合为 M_{min} 对应的点火组合;

3) 必然存在某个 $i (i = 1, 2, \dots, k - 1)$, 使得 M_d 属于开区间 $(M_{max_i}, M_{min_{i+1}})$, 其中 $M_{min_k} = M_{max}$ 。若 $M_d > (M_{max_i} + M_{min_{i+1}})/2$, 最佳点火组合为 $M_{min_{i+1}}$ 对应的点火组合, 否则,最佳组合为 M_{max_i} 对应的点火组合。

对于前两种情况,可以放在点火组合搜索的

最前面进行判断。

3.2.3 混合搜索算法

当可用小火箭组合较多时(如可用小火箭个数为 10,则可用点火组合为 1024 组),直接采用目标排序法计算量较大,而采用区间搜索法会大大减少计算量。当可用小火箭个数较少时,这个数值可通过经验获得,本文中 $k < 5$,采用目标排序法,而可用小火箭个数较多时,采用区间搜索法。点火组合混合搜索算法如图 4 所示,具体步骤如下。

Step 1: 根据控制律求解得到的所需力矩 M_d , 计算点火中心。统计点火中心上可用小火箭数,若 $k = 0$,不选择点火组合,转入 Step 5。

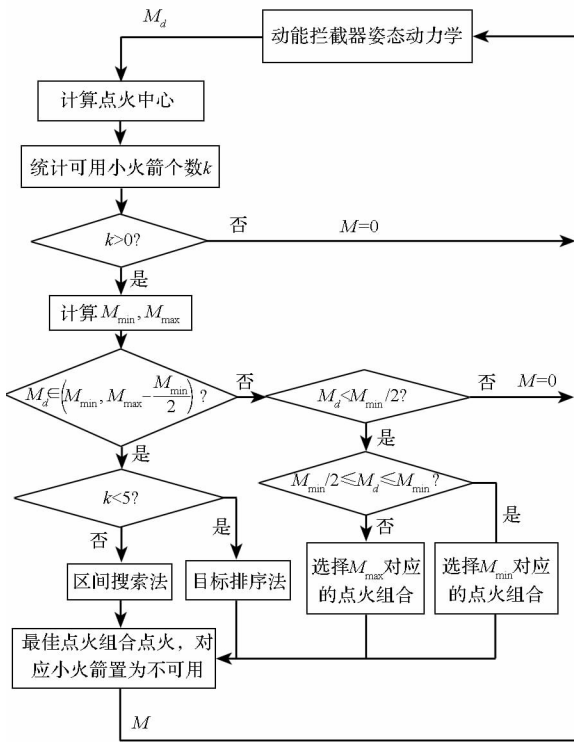


图 4 混合搜索算法流程图

Fig. 4 Flow-process diagram of mixed searching algorithm

Step 2: 计算可用小火箭产生的 M_{max} 和 M_{min} , 判断 M_d 是否属于 $(M_{min}, M_{max} - M_{min}/2)$, 若属于, 转入 Step 3, 否则转入 Step 4。

Step 3: 若 $k < 5$, 采用目标排序法搜索最佳点火组合, 否则采用区间搜索法搜索最佳点火组合, 转入 Step 5。

Step 4: 若 $M_d \geq (M_{max} - M_{min}/2)$, 最佳点火组合为 M_{max} 对应的点火组合; 若 $M_{min}/2 \leq M_d \leq M_{min}$, 最佳点火组合为 M_{min} 对应的点火组合; 否则不选择点火组合。

Step 5: 若存在最佳点火组合, 对应小火箭点火, 输出力矩, 小火箭置为不可用, 若无点火组合, 则输出力矩为 0, 点火周期结束。

4 仿真分析

设动能拦截器初始自旋角速度为 3r/s , 转动惯量为 $[0.45; 6.0; 6.0]\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 离质心最近的小火箭距离为 0.4m , 列间距为 0.075m , 小火箭平均推力为 100N , 则同一列从质心向外的小火箭力矩分别为 $40\text{N} \cdot \text{m}, 47.5\text{N} \cdot \text{m}, 55\text{N} \cdot \text{m}, 62.5\text{N} \cdot \text{m}, 70\text{N} \cdot \text{m}$ 。小火箭工作时间为 0.02s , 仿真步长为 0.02s 。不考虑喷流干扰、相邻两次点火间隔及安装误差等因素的影响。

4.1 力矩近似仿真

假设每次点火时, 两个点火中心上 10 个小火箭均可点火, 从头到尾依次编号为 $1 \sim 10$, 小火箭产生的力矩区间为 $[40, 550]\text{N} \cdot \text{m}$ 。表 1 中列出了选择不同大小的指令力矩时, 采用混合搜索算法求解得到的最佳力矩、点火编号以及点火个数。可以看出, 当指令力矩处于力矩区间内, 可以得到较好地近似力矩, 受可用力矩大小的限制, 不能较好地近似超出力矩区间过多的指令力矩。由于无论指令力矩为何值时, 枚举法都需要把所有组合进行计算一遍, 因此不同指令力矩下枚举法耗时基本上相等。而采用混合搜索算法耗时相对于枚举法较短, 因此用混合搜索算法更具有实时性。同时对数据进行分析可得, 当指令力矩越靠近力矩区间中心时, 占用的最小最大力矩区间越多, 所以耗时也越长。

表 1 不同指令力矩对应的混合搜索结果

Tab. 1 Results of mixed searching for reference torques

指令力矩(N·m)	最佳力矩(N·m)	点火编号	点火个数	混合搜索算法耗时(s)	枚举法耗时(s)
10	0	无	0	3.688×10^{-8}	2.828×10^{-5}
50	47.5	4	1	4.312×10^{-7}	2.844×10^{-5}
100	102.5	2,5	2	1.016×10^{-6}	2.828×10^{-5}
200	202.5	1,2,10	3	6.211×10^{-6}	2.828×10^{-5}
300	297.5	1,2,3,4,9	5	8.594×10^{-6}	2.828×10^{-5}
500	502.5	1,2,3,4,5,7,8,9,10	9	4.031×10^{-7}	2.844×10^{-5}
600	550	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	10	3.109×10^{-8}	2.828×10^{-5}

4.2 姿态控制仿真

采用文献[1]中所述的反馈线性化 + Terminal 滑模变结构姿态控制方法及其相关参数进行仿真,假设姿态角期望指令为:

$$\varphi^* = \frac{\pi}{8} \cos(3\pi t/2),$$

$$\psi^* = \frac{\pi}{8} \sin(3\pi t/2)$$

$$\dot{\gamma}^* = \omega_x^* - \dot{\psi}^* \cdot \sin\varphi^*$$

初始姿态角[0; 30; -30]°。仿真结果如图5~8所示。图5和图6表示了姿态角的跟踪结果,在0.5s 时后,实际姿态角与期望的姿态角之间误差保持在一个较小的范围,不仅说明了姿态控制方法的有效性,同时也实现了高精度的姿态跟踪。图7表明了小火箭产生的力矩能够有效逼近期望的力矩,图8给出了小火箭的点火个数,从图可看出,每次点火的小火箭个数很少,参照4.1节仿真结果可以得到,在整个仿真过程中,采用混合搜索法会大大节省点火组合搜索时间。

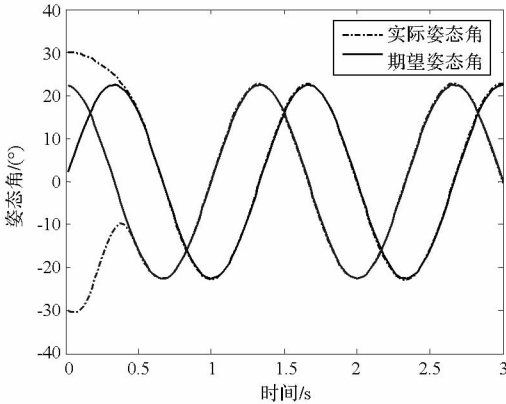


图5 俯仰角和偏航角跟踪曲线

Fig.5 Tracking curves of pitch and yaw angles

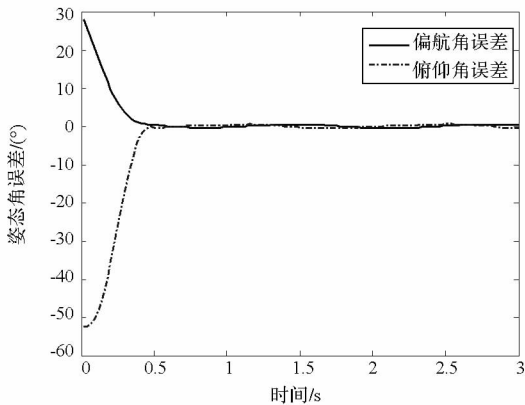


图6 俯仰角和偏航角跟踪误差曲线

Fig.6 Tracking error curves of pitch and yaw angles

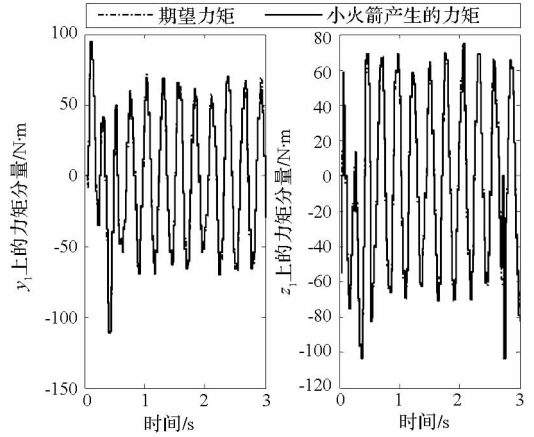


图7 期望力矩和实际力矩

Fig.7 Expected torques and actual torques

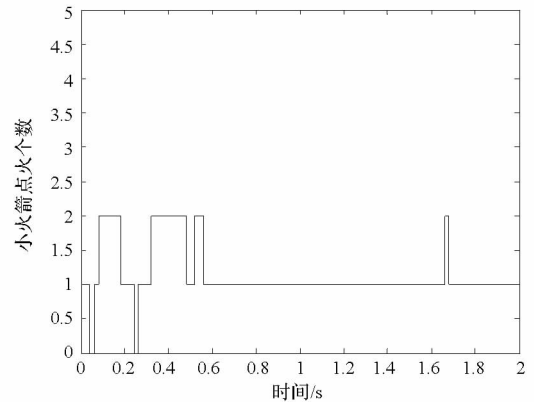


图8 小火箭使用个数

Fig.8 Number of ignited solid-propellant nozzles

5 结论

针对具有新型空间布局的动能拦截器姿控小火箭的组合点火问题,设计了一种结合目标排序法和区间搜索法的点火组合混合搜索算法。通过对指令力矩和姿态跟踪控制仿真,验证了该算法的可行性和有效性。该算法对其他空间布局的姿控小火箭或发动机的点火逻辑同样具有指导意义。

参考文献 (References)

[1] Li G H, Zhang H B, Tang G J. Design of attitude tracking with ladder variable thrust for kinetic interceptor[C]//Proceeding of 32th Chinese Control Conference, Xi'an, China, 2013, 6: 471-476.

[2] Herman R, Butler J. Subsystems for the extended range interceptor (ERINT-1) missile[C]//Proceeding of AIAA SDIO Annual Interceptor Technology Conference, Huntsville, AL, 1992, 5: 19-21.

[3] 朱京. 姿控发动机点火逻辑研究[J]. 现代防御技术, 2007, 35(2): 42-45.

ZHU Jing. Research on ignition logic of attitude control engine[J]. Modern Defence Technology, 2007, 35(2):

- 42-45. (in Chinese)
- [4] 杨锐, 徐敏, 陈士橹. 动能拦截弹姿控发动机组合点火算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(1): 15-18.
YANG Rui, XU Min, CHEN Shilu. An approximate but fast combined ignition algorithm for attitude control thrusters system (ACTS) of kinetic interceptor [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(1): 15-18. (in Chinese)
- [5] 沈明辉, 陈磊, 吴瑞林, 等. 大气层内动能拦截弹脉冲矢量发动机点火控制算法研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 278-281.
SHEN Minghui, CHEN Lei, WU Ruilin, et al. Investigation of ignition control algorithm of the pulse vector motors of the endo-atmospheric kinetic interceptor [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(2): 278-281. (in Chinese)
- [6] 刘鹏云, 孙瑞胜, 李伟明. 复合控制火箭弹脉冲点火算法研究[J]. 弹道学报, 2012, 24(4): 27-30.
LIU Pengyun, SUN Ruisheng, LI Weiming. Algorithm study on impulse ignition for rocket with compound control [J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(4): 27-30. (in Chinese)
- [7] 王进, 陈万春, 殷兴良. 具有脉冲姿控发动机的自旋导弹动态分析与控制设计[J]. 宇航学报, 2008, 29(4): 1329-1335.
WANG Jin, CHEN Wanchun, YIN Xingliang. Dynamic analysis and control design for a spinning missile with impulsive attitude control motors [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(4): 1329-1335. (in Chinese)
- [8] 王晓东, 李芸, 谢晓瑛. 具有侧向脉冲推力的动能拦截弹姿控发动机组合点火研究[J]. 现代防御技术, 2007, 35(6): 41-44.
WANG Xiaodong, LI Yun, XIE Xiaoying. Research on the attitude motors' combination fire of the kinetic interceptor with lateral impulse thrust [J]. Modern Defence Technology, 2007, 35(6): 41-44. (in Chinese)
- [9] 朱隆魁. 防空导弹直接力与气动力复合控制技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 53-55.
ZHU Longkui. Research on compound control technique with direct thrust and aerodynamic force for air defence missile [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 53-55. (in Chinese)
- [10] 杨林峰, 李捷, 陈燕. 基于改进 PSRS 的并行 0-1 规划算法[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(17): 4491-4493.
YANG Linfeng, LI Jie, CHEN Yan. Parallel 0-1 programming algorithm based on improved PSRS [J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(17): 4491-4493. (in Chinese)