

doi: 10.7690/bgzdh.2020.10.004

不同能量分配下的双脉冲发动机外弹道特性研究

刘万励, 李映坤, 陈 雄

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为研究双脉冲发动机无控火箭弹的外弹道特性和不同能量分配对其特性的影响, 以双脉冲发动机的无控火箭弹为背景, 在常规固体火箭发动机外弹道特性的基础上, 编制采用双脉冲发动机的无控火箭弹的外弹道计算程序, 根据相关参数计算其射程、高度等, 对其外弹道特性进行分析; 从脉冲间隔时间、装药比、推力比等方面分析不同能量分配条件下的外弹道特性。结果表明: 双脉冲发动机的无控火箭弹在射程上能得到提高, 应选择合理的脉冲间隔时间, 装药比大、推力比小的能量分配方案。

关键词: 双脉冲发动机; 外弹道; 固体火箭发动机

中图分类号: TJ714 **文献标志码:** A

Calculation of External Ballistic Characteristics of Dual Pulse Motor with Different Energy Distribution

Liu Wanli, Li Yingkun, Chen Xiong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to study the external ballistic characteristics of the uncontrolled rockets with dual pulse motors and the influence of different energy distribution on its characteristics, taking the uncontrolled rockets with dual pulse motors as the background, on the basis of the external ballistic characteristics of the routine solid rocket motor, compile the external ballistic calculation program for the uncontrolled rockets with double pulse motors, according to the parameters, the flight performance parameters such as its range and altitude are calculated through the program, and analyze the characteristics of its external ballistics; the external ballistic characteristics of uncontrolled rockets with double-pulse engines under different energy distribution conditions were analyzed from the aspects of pulse interval time, propellant quality ratio, and thrust ratio. The results show that the energy distribution scheme with reasonable pulse interval time, large propellant quality ratio and small thrust ratio should be selected to improve the range of the uncontrolled rocket with dual pulse motors.

Keywords: dual pulse motor; external ballistic; solid rocket motor

0 引言

为了实现使火箭弹达到更远的射程并获得更高作战能力的目标, 国内外提出了多脉冲固体火箭发动机的概念。在多脉冲固体火箭发动机中最常见、结构最简单的是双脉冲固体火箭发动机。这种发动机将药柱以及燃烧室隔离成 2 个单元, 但仍采用同一个喷管, 利用延时装置使两段推进剂依次点火, 从而产生两级推力, 达到作战目标与效果^[1-2]。

国外针对具体型号双脉冲发动机的设计、制造及飞行实验均进行了广泛研究, 并采用数值模拟方法对双脉冲发动机的内流场特性进行研究^[3-7]。国内针对双脉冲发动机的研究虽然起步较晚, 但仍然取得了较大的进展。王长辉等^[8]、王伟等^[9]、王春光等^[10]、刘雨等^[11]对双脉冲发动机陶瓷隔舱式、金属膜片式以及软隔层式双脉冲发动机分别进行了有限

元结构强度分析、理论和实验验证; 孙娜等^[12]、朱卫兵等^[13]、杨春庆等^[14]、李映坤等^[15]针对双脉冲发动机内流场特征、级间隔离装置结构对流场参数的影响、II 脉冲点火延迟以及燃气对双脉冲发动机绝热层烧蚀规律等进行了数值模拟研究。

采用双脉冲发动机的无控火箭弹可以更好地打击目标、实现战术目的。作为研究双脉冲固体火箭发动机的基础之一, 需要研究采用双脉冲发动机无控火箭弹的外弹道特性, 以及不同能量分配对其外弹道特性的影响。笔者以此为目的, 从常规火箭发动机外弹道为入手点, 了解双脉冲固体火箭发动机的基本概念, 编制其外弹道计算程序, 通过程序计算分析不同能量分配对外弹道特性的影响, 从而为双脉冲固体火箭发动机的进一步研究提供参考。

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-07-09

作者简介: 刘万励(1996—), 男, 辽宁人, 硕士, 从事航空宇航推进理论与工程研究。E-mail: Liuwanli203@163.com。

1 质心运动方程及计算

1.1 质心运动方程

相比于常规火箭发动机，双脉冲固体火箭发动机装药分成了 2 段，中间存在工作间隔，可以产生 2 级推力，推力示意图如图 1 所示。其中， t_1 为第 1 段装药工作的时间， Δt 为脉冲间隔时间， t_2 为第 2 段装药工作的时间。在第 1 段装药工作结束后，经过一段时间间隔后，第 2 段装药工作，其外弹道可以近似看成存在 2 段主动段和被动段，在第 1 段装药工作后进入被动段，之后第 2 段装药工作再次进入一个主动段。

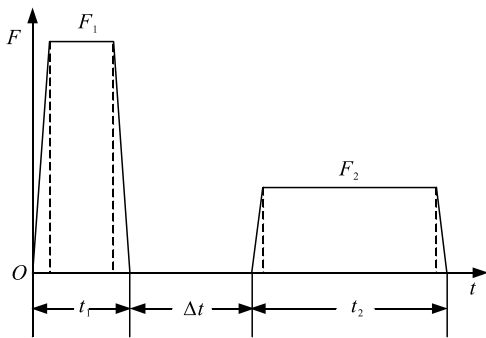


图 1 双脉冲固体火箭发动机推力

采用双脉冲发动机的无控火箭弹质心运动的方程组，可以参考常规无控火箭弹质心运动方程组，质心运动微分方程组为：

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= a_p - cH(y)F(v, c_s) - g \sin \theta \\ \frac{d\theta}{dt} &= -\frac{g \cos \theta}{v} \\ \frac{dy}{dt} &= v \sin \theta \\ \frac{dx}{dt} &= v \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中：推力加速度 a_p 在第 1 脉冲和第 2 脉冲工作时，根据推力取不同值，被动段推力加速度为零； c 为弹道系数； $H(y)$ 为密度函数； $F(v, c_s)$ 为阻力函数。

当火箭弹未脱离定向器(发射架)时，不考虑二者的摩擦，由于 $\theta = \theta_0$ 是一个常数，而且 $H(y) = 1$ ，此时的质心运动微分方程组为：

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= a_p - cF(v, C) - g \sin q \\ \frac{ds}{dt} &= v \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

1.2 数值计算方法

对弹道方程在近似的假设条件下求得其分析

解，但是为了精确求解弹道方程，则必须用到数值积分的方法。一般常采用的数值积分法有欧拉法、差分法、阿达姆-斯密斯法以及龙格-库塔法等。文中外弹道计算采用 4 阶龙格-库塔法，计算公式如下：

$$\left. \begin{aligned} y_{k+1} &= y_k + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\ K_1 &= f(x_k, y_k) \\ K_2 &= f(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}K_1) \\ K_3 &= f(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}K_2) \\ K_4 &= f(x_k + h, y_k + hK_3) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中： h 为步长； K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为斜率。

2 外弹道特性分析

2.1 计算参数设置

采用口径为 122 mm 的某型号双脉冲固体火箭发动机火箭弹为例，对其进行条件设置。弹丸总质量为 65 kg，总装药量为 27.5 kg，发动机总冲为 58 590 N·s，在 I 脉冲和 II 脉冲采用不同装药比时，其各自推力 F_1 、 F_2 大小如表 1，此处 I、II 脉冲的工作时间设置成相等。

表 1 不同装药比下 I、II 脉冲推力大小 kN

装药比	I 脉冲推力 F_1	II 脉冲推力 F_2
2:1	41.33	20.67
1:1	31.00	31.00
1:2	20.67	41.33

2.2 外弹道特性对比

由于双脉冲固体火箭发动机为 2 段装药，在飞行过程中会产生 2 次推力，相比于常规固体火箭发动机，采用双脉冲发动机的无控火箭弹的射程会有所提高。选择装药比为 2:1 来分析射程，具体情况如图 2。

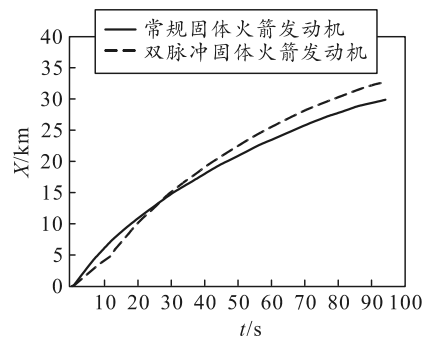


图 2 常规和双脉冲发动机射程对比

从图中可以看出：采用常规固体火箭发动机的

无控火箭弹的射程为 30.06 km；采用双脉冲发动机的无控火箭弹的射程为 33.2 km，射程提高了 10.4%，所达的范围更广，作战性能及生存性能会更好。

为了更好地展示出采用双脉冲发动机的无控火箭弹在飞行过程中的速度和加速度，将其图像与采用常规固体火箭发动机的无控火箭弹的速度和加速度图像进行对比，结果如图 3 所示。

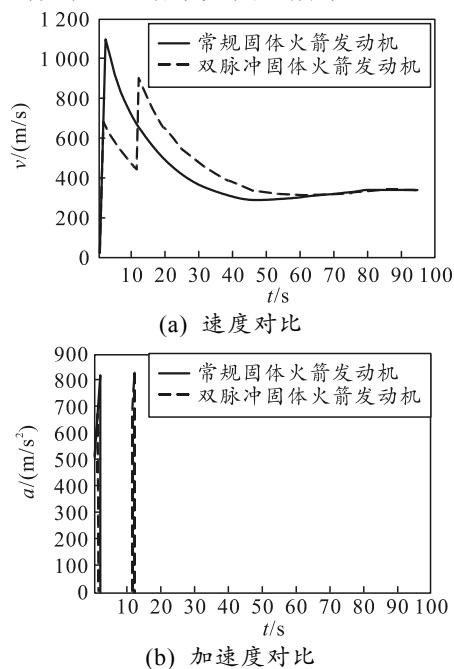


图 3 速度和加速度对比

从图中可以明显看出二者速度的不同之处，造成双脉冲固体火箭发动机飞行过程中速度图示的原因，是由于 2 段装药产生的 2 段推力。正是由于存在 2 段推力，所以双脉冲固体火箭发动机在飞行过程中会存在 2 个加速度，从而导致其速度区别于常规固体火箭发动机。

3 能量分配对外弹道特性的影响

对于采用双脉冲发动机的无控火箭弹外弹道特性的研究，重点在于研究能量的合理分配，根据不同的作战情况、打击目标以及战术安排等，来合理分配双脉冲固体火箭发动机的能量。

3.1 计算模型

在研究能量分配中要保证发动机的总冲 I 不变，总装药量 M 不变。为方便研究，设 I 脉冲装药量为 M_1 ，II 脉冲装药量为 M_2 ，2 个脉冲的装药量之比为 φ ，可以得到下式装药量的关系：

$$M_1 = M \cdot \varphi / (1 + \varphi), \quad M_2 = M / (1 + \varphi). \quad (4)$$

如果 2 个脉冲的推进剂选择种类相同，那么 I 脉冲的总冲 I_1 和 II 脉冲的总冲 I_2 的关系为：

$$I_1 = I \cdot \varphi / (1 + \varphi), \quad I_2 = I / (1 + \varphi). \quad (5)$$

有了以上发动机模型，再设置适当的数值条件，从不同的脉冲间隔时间、装药比以及推力比 3 个方面来研究采用双脉冲发动机的无控火箭弹在不同能量分配时对外弹道特性的影响。

3.2 脉冲间隔时间的影响

脉冲间隔时间即 I、II 脉冲之间的间隔时间，设置的条件为：装药比为 2:1，推力比为 1:1，脉冲间隔时间分别选择 10, 20, 30 s，由此来分析脉冲间隔时间对采用双脉冲发动机的火箭弹外弹道特性的影响，所得的数据如表 2，对比结果如图 4。

表 2 不同脉冲间隔时间的输出参数 km

脉冲间隔时间/s	最高高度	最远射程
10	10.4	33.2
20	8.1	32.6
30	6.1	29.3

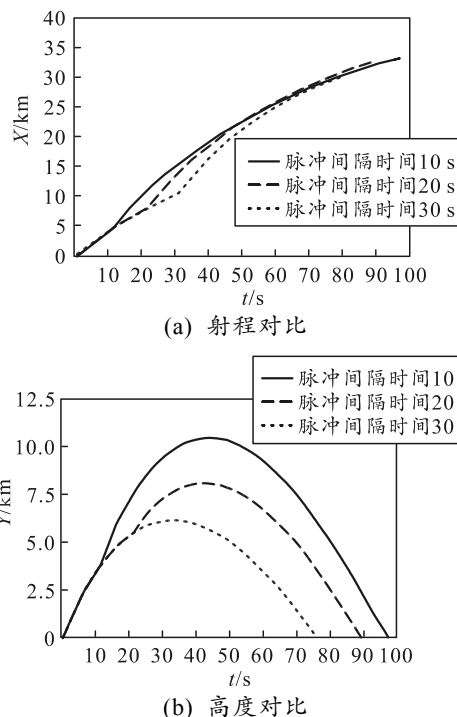


图 4 不同脉冲间隔时间下外弹道特性

由计算结果可以看出：在脉冲间隔时间为 10 s 时，弹丸最高高度为 10.4 km，最远射程为 33.2 km；而在脉冲间隔时间为 30 s 时，弹丸可达的最高高度为 6.1 km，最远射程为 29.3 km。造成这种结果的原因是因为脉冲间隔时间越小时，弹丸的飞行高度越高，大气越稀薄，弹丸所受的阻力越小，消耗的能量越小，提高了弹丸的射程。脉冲间隔时间对于

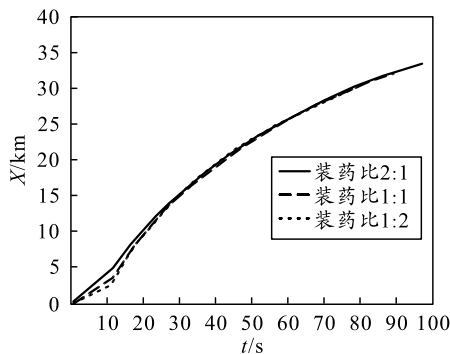
采用双脉冲发动机的火箭弹外弹道特性的影响很大, 根据实际情况合理选择脉冲间隔时间, 对于提高双脉冲发动机火箭弹性能有很大作用。

3.3 装药比的影响

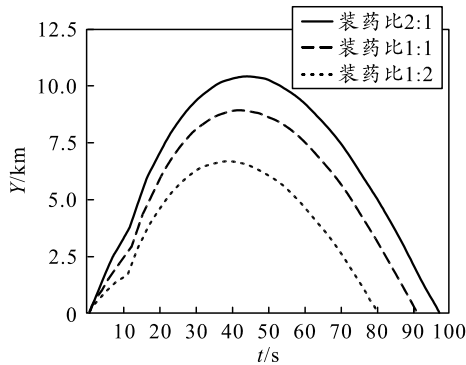
前文提到了装药比的概念并给出了不同装药比的推力大小, 设置的条件为: 推力比为 1:1, 脉冲间隔时间选择 10 s, 装药比分别为 2:1、1:1、1:2, 由此来分析不同装药比对采用双脉冲发动机的火箭弹外弹道特性的影响, 所得数据如表 3, 对比结果如图 5 所示。

表 3 不同装药比的输出参数 km

装药比	最高高度	最远射程
2:1	10.4	33.2
1:1	8.9	32.0
1:2	6.7	30.0



(a) 射程对比



(b) 高度对比

图 5 不同装药比下的外弹道特性

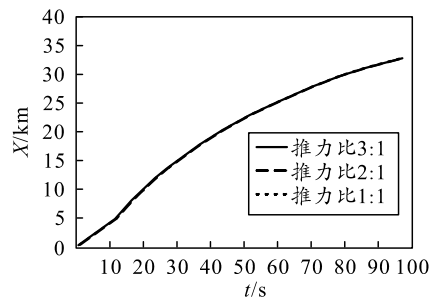
由计算结果可以看出: 在装药比为 2:1 时, 弹丸可达最高高度为 10.4 km, 最远射程为 33.2 km; 而在装药比为 1:2 时, 弹丸可达的最高高度为 6.7 km, 最远射程为 30.0 km。造成这种结果的原因是在装药比越大的情况下, I 脉冲的推力越大, 弹丸可以越早到达更高的高度, 此时大气稀薄, 阻力小, 消耗的能量少, 弹丸可以获得更好的性能并达到更远的射程。由此可知, 装药比对于采用双脉冲发动机的火箭弹外弹道也有着重要的影响。

3.4 推力比的影响

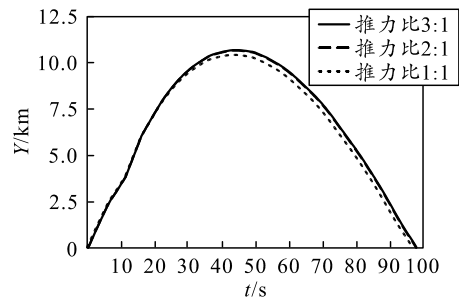
采用不同的推力比对于能量分配的研究也很重要, 设置条件: 装药比为 2:1, 脉冲间隔时间为 10 s, 推力比分别选择 3:1、2:1、1:1, 由此来分析不同推力比对采用双脉冲发动机的火箭弹外弹道特性的影响, 所得数据如表 4, 对比如图 6 所示。

表 4 不同推力比的输出参数 km

推力比	最大高度	最大射程
3:1	10.67	33.0
2:1	10.61	33.1
1:1	10.41	33.2



(a) 射程对比



(b) 高度对比

图 6 不同推力比下的外弹道特性

由计算结果可以看出: 在推力比为 3:1 时, 弹丸最高高度为 10.67 km, 最远射程为 33.0 km; 在推力比为 1:1 时, 弹丸的最高高度为 10.41 km, 最远射程为 33.2 km。造成这种结果是因为在推力比越小的情况下, II 脉冲的推力越大, 二次推力可以使弹丸到达更高的高度, 此时大气稀薄, 阻力小, 消耗的能量少, 弹丸的射程得到了提高。由此可知, 推力比对于采用双脉冲发动机的火箭弹外弹道的影响也是存在的。

采用双脉冲发动机的无控火箭弹作为武器使用时, 需根据实际情况选择合理的能量分配方案, 笔者从脉冲间隔时间、装药比以及推力比 3 个方面对其外弹道特性进行了分析, 选择符合实际需求的脉冲间隔时间, 药比大、推力比小的能量分配方案能获得更好的作战性能, 对采用双脉冲发动机的无控

火箭弹的设计提供了参考。

4 结束语

基于采用双脉冲发动机的无控火箭弹的外弹道计算程序, 分析计算了不同能量分配对采用双脉冲发动机的无控火箭弹外弹道特性的影响。得到的主要结论如下:

1) 采用双脉冲发动机的无控火箭弹外弹道特性双脉冲固体火箭发动机的 I、II 脉冲可以依次产生 1 段推力, 从而产生 2 段加速度, 相对于口径、质量、药重以及总冲一样的, 采用常规固体火箭发动机的无控火箭弹, 采用双脉冲发动机的无控火箭弹在射程上得到了提高, 获得了更好的性能。

2) 脉冲间隔时间对于采用双脉冲发动机外弹道特性的影响很大, 所以脉冲间隔时间的选择仍需根据实际情况来选择和决定。

3) 装药比越大, 弹丸的飞行性能越好, 因为 I 脉冲装药所占比重大, 推力就大, 可以在短时间达到阻力小、空气稀薄的大气高度。

4) 推力比越小, 此时 II 脉冲的推力大, 二次推力可以使弹丸达到空气稀薄、阻力小的高空。

在考虑采用双脉冲发动机的无控火箭弹作为作战武器时, 选择合理的脉冲间隔时间, 装药比大、推力比小的能量分配方案, 能更好地达到作战目的。

参考文献:

- [1] 龚士杰, 戴耀松. 多脉冲固体火箭发动机述评[J]. 飞航导弹, 1993(1): 32-39.
- [2] 叶定友, 王敬超. 固体发动机多次启动技术及应用[J]. 推进技术, 1989, 10(4): 71-74.
- [3] NAUMANN K W, STADLER L. Double-Pulse Solid Rocket Motor Technology-Applications and Technical

(上接第 9 页)

8 结论

仿真结果表明: 采用双余度旋变无刷电机控制系统设计, 可以有效提高无人直升机整机系统恶劣环境工作的可靠性和安全性。目前, 该设计已在某型无人直升机上得到实际验证和使用。

参考文献:

- [1] 张探. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 5-10.
- [2] 王慧娟, 王道波. 一种无人机用小型双余度电动伺服舵机的设计[J]. 微电机, 2010(3): 24-25.

Solutions [R]. AIAA 2010-6754.

- [4] STADLER L J, HOFFMANN S, NIEDERMAIER H, et al. Testing and Verification of the LFK-NG Dual Pulse Motor[R]. AIAA 2006-4765.
- [5] SCHILLING S, TROUILLOT P, WEIGAND A. On the development and testing of a 120 mm caliber double pulse motor[R]. AIAA 2004-3387.
- [6] HAROLD D, BARRY J. Demonstration of solid propellant pulse motor technologies [R]. AIAA 1996-3157.
- [7] JAVED A, MANNA P, CHAKRABORTY D. Numerical Simulation of a Dual Pulse Solid Rocket Motor Flow Field[J]. Defence Science Journal, 2012, 62(6): 369-374.
- [8] 王长辉, 刘亚冰, 林震, 等. 脉冲发动机陶瓷隔板的设计和试验研究[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(3): 327-331.
- [9] 王伟, 李江, 王春光, 等. 隔层式双脉冲发动机金属膜片设计与实验研究[J]. 推进技术, 2013, 34(8): 1115-1120.
- [10] 王春光, 田维平, 任全彬, 等. 脉冲发动机中隔层工作过程的数值分析及试验[J]. 推进技术, 2012, 33(5): 790-794.
- [11] 刘雨, 利凤祥, 李越森, 等. 多脉冲固体火箭发动机陶瓷舱盖结构分析[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(2): 179-183.
- [12] 孙娜, 姜永春, 孙长宏, 等. 某双脉冲发动机燃烧室两相流场数值分析[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(3): 335-338.
- [13] 朱卫兵, 张永飞, 陈宏, 等. 双脉冲发动机内流场研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(1): 114-118.
- [14] 杨春庆, 魏志军, 张雷, 等. 隔层式多脉冲发动机点火延迟数值仿真研究[J]. 推进技术, 2014, 35(4): 514-522.
- [15] 李映坤, 韩珺礼, 陈雄, 等. 级间通道构型对双脉冲发动机燃烧室局部受热的影响[J]. 推进技术, 2014, 35(11): 1503-1510.
- [3] 邵清, 苍松. 双余度数字舵机系统研究与设计[J]. 微电机, 2008(6): 37-38.
- [4] 万宏舸, 任少盟. 永磁同步电机无差拍电流预测控制[J]. 兵工自动化, 2019, 38(1): 20-24.
- [5] 罗德容, 周成, 黄科元, 等. 基于 AD2S1210 的旋变接口电路设计及信号处理[J]. 电力电子技术, 2008, 42(8): 68-69.
- [6] AD2S1210_datasheet_pdf. REV. A[Page29-30][Z].
- [7] 吴战武, 马可, 袁潇, 等. 基于速度和转矩的电机混合驱动控制方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 92-97.
- [9] 和佳鑫, 成守宇, 方茂瑶. 多堆核电机组控制策略仿真[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 56-60.