

推力级数、推力比和推力作用时间 对弹道散布的影响*

陈 军 董师颜 张兆良 季宗德

(南京理工大学机械学院, 南京, 210094)

摘 要: 用详细的计算数据, 在保持计算条件和总冲不变的情况下, 分析了二级推力和三级推力方案时的方向密集度, 从而得出了二级推力方案的方向密集度优于三级的结论, 同时, 提出了使方向密集度最小的最佳转换时间。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 推力级数⁺, 推力比⁺, 弹道性能, 射弹弹道

分类号: E924. 93

THE EFFECT OF THRUST STAGE, THRUST RATIO AND THRUSTING TIME ON BALLISTIC DISPERSION

Chen Jun Dong Shiyan Zhang Zhaoliang Ji Zhongde

(School of Machinery, Nanjing Univ. of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: Under the same computational condition and total impulse, lateral dispersion from 2-stage-thrust rocket or 3-stage-thrust rocket is analysed with detailed data. It can be concluded that the lateral dispersion for 2-stage-thrust rocket is less than that for 3-stage-thrust rocket. Furthermore, the optimum switch time at which the dispersion approaches minimum can be obtained from calculation.

Subject terms: Solid propellant rocket engine, Thrust stage⁺, Thrust ratio⁺, Ballistic performance, Projectile trajectory

1 物理数学模型

最大射程处的方向密集度由下式确定^[1,2]:

$$E_z/X_m = \bar{\Psi}_k / \cos\theta_k \quad (1)$$

因此, 只要求出主动段末偏角的中间偏差 $\bar{\Psi}_k$, 就可以求出方向密集度。把外弹道表达式与密集度计算式联系起来, 就可算出变加速度时主动段末偏角的中间偏差 $\bar{\Psi}_k$ 。

在弹道某一点上, 推力瞬时变化, 即改变火箭加速度, 可降低弹道终点偏角的中间偏差^[3,4]。这是由于各种误差源, 如不正确发射(即起始扰动)和推力偏心所引起的主动段末的角偏差 Ψ 随飞行时间积分的结果, 由文献 [3]

$$\Psi = \int_{u_0}^u \frac{1}{K} \left(\frac{ap}{v^2} + by \right) \delta du \quad (2)$$

对由起始摆动角速度 $\dot{\varphi}_0$ 引起的攻角 $\delta_{\dot{\varphi}_0}$, 有:

* 收稿日期: 19961101, 修回日期: 19970104

$$\delta_{\varphi_0}^* = \frac{\dot{\varphi}_0}{kv} e^{-b(u-u_0)} \sin(u-u_0) = \dot{\varphi}_0 \cdot \delta_{\varphi_0}^* \quad (3)$$

上式是一个随 u 变化的振荡函数, 它的特征函数 $\delta_{\varphi_0}^*$ 及其积分 $\Psi_{\varphi_0}^*$ 与 u 的变化由图 1 所示。从图 1 可知, $\delta_{\varphi_0}^*$ 曲线在第一个半周期内的振幅 (此时 $\delta_{\varphi_0}^*$ 为正), 大于第二个半周期内的振幅 (此时 $\delta_{\varphi_0}^*$ 为负); 当在全周期内积分时, 所得结果由图中 $\Psi_{\varphi_0}^*$ 所示, 即为第一个半周期 $\delta_{\varphi_0}^*$ 曲线包含的面积与第二个半周期包含的面积之和。因此如果在第二个半周期开始前降低加速度, 则第二个半周期的作用可能增加 (即振幅加大), 从而更多地抵消第一个周期的作用。主要计算公式及符号意义见文献 [3] 和 [5], 凡无特殊说明者, 计算时采用的参数见“计算条件”部分。

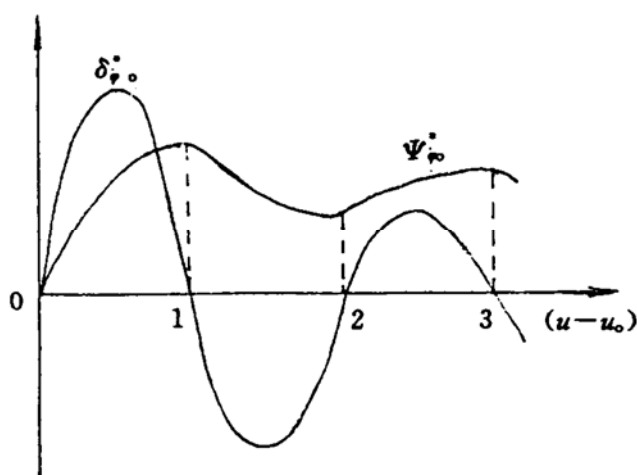


Fig. 1 Curves of $\delta_{\varphi_0}^*$ and $\Psi_{\varphi_0}^*$

2 计算的初始数据和计算条件

计算初始数据为: 弹径 $D_B=300\text{mm}$, 弹长 $L_B=5.5\text{m}$, 弹重 $M_0=650\text{kg}$;

药重 $M_P=233\text{kg}$, 药长 $L_P=2.4\text{m}$, 比冲 $I_{sp}=2352\text{N}\cdot\text{s}/\text{kg}$, 总冲 $I=547.8\text{kN}\cdot\text{s}$;

射程 $X_m=50\text{km}$, 射角 $\theta_0=55^\circ$, 定向器长 $S_0=5.7\text{m}$, 炮口转速 $r_0=250\text{rad}/\text{s}$, 炮口速度 $V_0=65\text{m}/\text{s}$; 弹形系数 $i=1.25$, 升力系数对攻角的偏导数 $C'_y=10.0$, 稳定力矩系数对攻角的偏导数 $m'_z=3.0$; 初始摆动角速度 $E_{\varphi_0}=0.05\text{rad}/\text{s}$, 线推力偏心 $E_L=3.6\text{mm}$, 阵风 $E_w=0.7\text{m}/\text{s}$, 动不平衡度 $E_{B_0}=3\times 10^{-4}\text{rad}/\text{s}$ 。

计算二级推力发动机时, 取 $F_1=382.2\text{kN}$, 保持总冲不变, 改变 t_1 和 t_2 , 分别计算推力比为 6:1, 5:1, 4:1, 3:1 和 2:1 的方向密集度。

计算三级推力发动机时, 取 $F_1:F_3=6:1, 5:1, 4:1$ 和 3:1 四个系列。为了排除炮口速度对密集度的影响, 各方案取相同的 $F_1=382.2\text{kN}$ 。为了寻找三级推力的推力比和各级推力作用时间对火箭弹方向密集度影响的规律, 取以下三种计算条件:

方案 I: $F_1=382.2\text{kN}$, $t_1=0.1\text{s}$ 不变, 改变 t_2 和 t_3 , 保持总冲 $547.8\text{kN}\cdot\text{s}$ 不变;

方案 II: $F_1=382.2\text{kN}$, $F_2\times t_2$ 不变, 改变 t_1 和 t_3 , 保持总冲 $547.8\text{kN}\cdot\text{s}$ 不变;

方案 III: $F_1=382.2\text{kN}$, $F_3\times t_3$ 不变, 改变 t_1 和 t_2 , 保持总冲 $547.8\text{kN}\cdot\text{s}$ 不变。

3 计算结果及分析

3.1 二级推力方案

计算结果表明, 二级推力存在一个使 $\bar{\Psi}_k$ 最小的最佳推力转换时间, 在本文计算条件下, 为 $t_b=0.28\text{s}$ 。表 1 列出了不同二级推力比在最佳转换时间下的 $\bar{\Psi}_k$ 及其相对变化量。

从表中可以看出: 二级推力比越大, 最佳转换时间对应下的 $\bar{\Psi}_k$ 越小, 即方向密集度越好; 随着二级推力比的增大, $\bar{\Psi}_k$ 减小的相对量越来越小, 可见二级推力比并不是越大越好。

3.2 三级推力方案

3.2.1 相同推力比、推力级数下的推力作用时间与方向密集度的关系

取三级推力比 6:2:1 ($F_1 = 382.2\text{kN}$, $F_2 = 127.4\text{kN}$, $F_3 = 63.7\text{kN}$) 为例, 当保持 $F_3 = 63.7\text{kN}$, $t_3 = 4.00\text{s}$ 不变, 变换第一级和第二级的推力作用时间, 可以得到如图 2 所示曲线。

图中 $\bar{\Psi}_{\varphi_0}$ 是由初始摆动角度 φ_0 引起的偏角的中间偏差; $\bar{\Psi}_L$ 是由推力线偏心引起的偏差; $\bar{\Psi}_w$ 是由横风引起的偏差; $\bar{\Psi}_{\beta_D}$ 是由动不平衡角 β_D 引起的偏差。从图中及计算数据可以看出:

(1) 在本文计算条件下, 火箭弹出炮口的时间为 $t_0 = 0.15\text{s}$, 第一级推力 F_1 的最佳转换时间 (此时偏角 $\bar{\Psi}_k$ 最小, 即方向密集度可以达到最小) 为 $t_b = 0.28\text{s}$;

(2) $\bar{\Psi}_{\varphi_0}$ 和 $\bar{\Psi}_L$ 曲线存在一个极小值点, 且随转换时间的延长, 到一定值后便与时间无关;

(3) 在上述四项因素引起的偏差中, $\bar{\Psi}_{\varphi_0}$ 的影响即初始摆动角速度占主导地位, 而 $\bar{\Psi}_w$ 和 $\bar{\Psi}_{\beta_D}$ 影响较小。综合结果的 $\bar{\Psi}_k$ 也存在一极小值点, 即最佳转换时间下 $\bar{\Psi}_k$ 的最小值; 且刚出炮口 (即 t_0 处) 时 $\bar{\Psi}_k$ 处于较大的位置。

对于推力比为 5:1, 4:1 和 3:1 系列进行计算, 同样可以得出以上类似的结论。

3.2.2 不同推力比、推力作用时间与方向密集度的关系

由上面的分析可知, 对四个推力比系列的各种方案, 在三个计算条件下, 均有中间偏差 $\bar{\Psi}_k$ 最小的方案。对 $F_1:F_3$ 为 6:1 系列时的最佳推力方案汇总见表 2, 从表中可以看出:

(1) 对于方案 I ($t_1 = 0.1\text{s}$), 推力比为 6:5:1 时最佳偏差可达到 5.95×10^{-3} , 而对于方案 II 和 III ($t_1 = 0.28\text{s}$), 达到最佳偏差 (都为 6.27×10^{-3}) 时的推力比为 6:2:1;

(2) 当维持第一级 $F_1 = 382.2\text{kN}$, $t_1 = 0.1\text{s}$ 不变时 (即方案 I), 因为火箭弹在定向器内的运动时间为 0.15s , 因此, 此时第一级推力在定向器内已消失, 接着便是第二级、第三级推力起主导作用, 可知这时推力比 $F_2:F_3$ 比值越大, 方向密集度越好。因此当推力比由 6:2:1 变化到 6:5:1 时, 其 $\bar{\Psi}_k$ 值呈下降趋势;

(3) 当 t_1 达到最佳转换值 t_b 时 ($t_b = 0.28\text{s}$), 这时因为已出炮口, 起始扰动角速度引起的摆动其特征函数 $\delta_{\varphi_0}^*$ 变化呈周期振荡, 如图 1 所示。当 $t_1 = t_b$ 时, 振荡衰减到最佳位置 (如图 1 中正、负抵消得最多即点 2 处), 这时应使第二级推力迅速下降, 才能获得较好的密集度。如果第二级推力还很高, 其积分值就会重新上升很快, 使密集度变坏。因此, 对于方案 II 和 III, 当推力比由 6:2:1 变化到 6:5:1 时, 其 $\bar{\Psi}_k$ 呈上升趋势;

Table 1 $\bar{\Psi}_k$ of 2-stage-thrust rocket at the best-converting time

Thrust ratio	$\bar{\Psi}_k/10^{-3}$	Variation/%
1:1	8.84	—
2:1	6.93	21.6
3:1	6.27	9.5
4:1	5.91	5.7
5:1	5.68	3.9
6:1	5.51	3.0

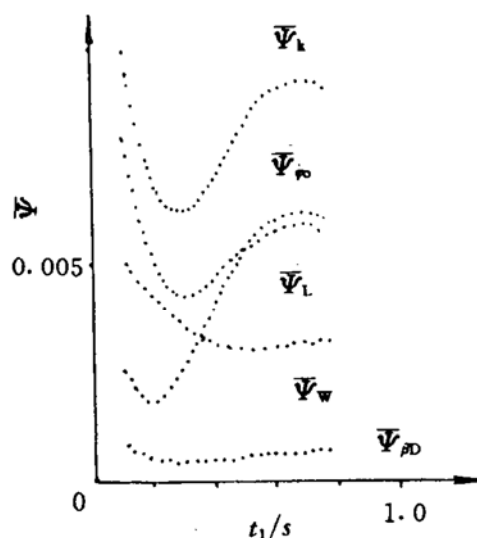


Fig. 2 $\bar{\Psi}$ at different thrust-acting time

Table 2 The best-thrust-ratio design when $F_1 : F_3$ equal to 6 : 1

Thrust ratio	Design I, $t_1=0.1s$			Design II, $t_1=0.28s$			Design III, $t_1=0.28s$		
	t_2/s	t_3/s	$\Psi_k/10^{-3}$	t_2/s	t_3/s	$\Psi_k/10^{-3}$	t_2/s	t_3/s	$\Psi_k/10^{-3}$
6 : 2 : 1	0.31	7.38	8.62	2.00	2.92	6.27	1.46	4.00	6.27
6 : 3 : 1	0.26	7.22	7.34	1.33	2.92	6.92	0.97	4.00	6.90
6 : 4 : 1	0.22	7.12	6.53	1.00	2.92	7.58	0.73	4.00	7.50
6 : 5 : 1	0.20	7.00	5.95	0.80	2.92	8.16	0.58	4.00	8.16
6 : 1	8.00	—	11.00	6.92	—	5.51	—	—	—

(4) 当第一级推力达到最佳转换时间时 (即 $t_1=t_b$), 采用总冲不变的二级推力时, Ψ_k 值最好可达到 5.51×10^{-3} , 可见比三级推力的散布要小。

对于推力比 $F_1 : F_3$ 为 5 : 1, 4 : 1 及 3 : 1 系列的计算, 同样可以得出类似的结论。各系列三级推力在最佳转换时间 t_b 时的最佳方案汇总于表 3, 可知三级推力在最佳转换时间下, $F_1 : F_3$ 比值愈大, 密集度愈好, 但其密集度的相对变化率会随之减小。而且, 当推力比增大时, 还应考虑发动机结构、燃烧、膨胀效率等的影响。

Table 3 The best-thrust-ratio design at different ratio of $F_1 : F_3$ ($t_1=0.28s$)

Thrust Ratio	t_2/s	t_3/s	$\Psi_k/10^{-3}$	Variation of Ψ_k
6 : 2 : 1	2.00	2.92	6.27	4.27%
5 : 2 : 1	1.67	2.43	6.55	5.35%
4 : 2 : 1	0.97	2.67	6.92	8.22%
3 : 2 : 1	0.73	2.00	7.54	—

4 结 论

(1) 对于不同的火箭弹通过计算可得相应的推力最佳转换时间, 且最佳转换时间 t_b 常常大于火箭弹出炮口时间 t_0 ;

(2) 三级推力在最佳转换时间下 $F_1 : F_3$ 比值愈大, 以及二级推力的推力比愈大, 方向密集度会愈好, 但变好的程度会随之趋缓, 这时选取推力方案时要综合考虑结构等其它因素;

(3) 在炮口速度相同以及达到最佳转换时间的条件下, 三级推力的推力比 $F_1 : F_3$ 等于二级推力的推力比时, 二级推力的密集度优于三级推力。

参 考 文 献

- 1 徐明友. 火箭外弹道学. 北京: 兵器工业出版社, 1989
- 2 (美) 陆军器材部编, 顾余铨译. 气动稳定无控火箭设计. 北京: 国防工业出版社, 1985
- 3 杨绍卿. 火箭弹散布和稳定性理论. 北京: 国防工业出版社, 1979
- 4 季宗德, 董师颜, 丘光申. 双推力发动机对无控火箭密集度的影响. 弹箭与制导技术, 1993(1)
- 5 刘树华, 丘光申. 火箭弹设计. 北京: 国防工业出版社, 1984