

导弹发射箱前盖爆炸分离分析*

张雷顺

(郑州工学院水环系)

摘 要: 本文抓住前盖爆炸分离的主要力学特征,运用近似处理方法,得到了较满意的结果。

关键词: 爆炸, 冲量, 运动

中国图书分类号: O38

导弹发射时,发射箱前盖必须及时地分离,以便让出箱前弹道。否则,一旦导弹与前盖发生磕碰,就会造成较大初始扰动,甚至引起事故发生。前盖爆炸分离计算涉及两个方面的问题,一是前盖起始速度的确定,再是在变化的舰速、风速、风向条件下前盖空中飞行弹道计算。本文对此进行了探讨,建立了计算公式,编制程序进行了计算,计算结果与实验结果吻合较好。

1 前盖初始质心速度

决定前盖初始质心速度的因素有三;一是切割索爆炸冲量,二是发射箱内压喷射冲量,三是箱外风压冲量。后者较前两个小得多,可以不计。

1.1 切割索爆炸冲量

切割索爆炸,一方面产生高速金属射流起切割作用,另一方面将对前盖作用冲量。冲量可分为三部分,一是切割索爆轰波直接作用冲量,二是冲击波冲量,三是切割索的运动外壳的作用冲量。考虑到外壳冲量是转换冲量,将用无壳冲击波冲量代替后二冲量。

1.1.1 爆炸波冲量

切割索引爆后,爆轰波将以波速向前传播,引起切割索外壳的飞散及药型罩的变形,复杂的稀疏波向爆轰产物内部传播,导致产物能量的多维耗散。根据裸露柱型装药一端引爆实验,比冲量可采用下式计算。

$$i = \frac{16}{81} r_0 \rho_0 D$$

* 收稿日期: 1990-12-22

** 本文是国家重点攻关项目子课题。

其中 r_0 为装药直径, ρ_0 为密度, D 为爆速。

当装药有外壳时, 径向稀疏波影响要比裸露的小, 从而冲量有所增大。参考不同外壳的实验, 引入系数 $\lambda = 1.5$, 于是

$$i = \frac{16}{81} \lambda r_0 \rho_0 D$$

由此可得切割索爆轰冲量

$$I_{P\xi} = I_{P\eta} = \frac{32}{81} \lambda r_0 \rho_0 D R r_m$$

ξ 、 η 的方向见图 1, R 为发射箱半径, r_m 为壳体达到最大速度时的半径

$$r_m = \beta r_0$$

β 值取决于外壳所选用的材料。

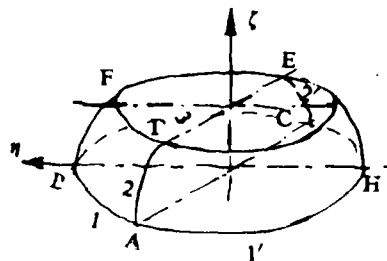


图 1

1.1.2 冲击波冲量

前盖是曲面, 但前方曲面 DCGEF 的曲率一般很小, 可近似为平面。前方曲面与箱体联接曲面为圆弧生成的旋转曲面。为叙述方便, 切割索 A-B-C 称为切割索 1, A-H-C 为 1', D-E 为 3, A-D 为 2, C-E 为 2'。

对柱型装药, 根据实验冲击波比冲量为

$$i = 2A \frac{\omega_2^{\frac{3}{2}}}{r}$$

其中 $A = 25$ 为实验值, $\omega_2 = 2 \frac{r}{L} \omega_1$, $\omega_1 = \frac{1}{2} \omega$, ω_2 为有效装药, ω 为实际装药, r 为计算点到柱的垂直距离, L 为药柱长度。由于

$$\omega_2 = 2 \frac{r}{L} \omega_1 = r \frac{\omega}{L} = r \rho$$

ρ 为切割索线密度, 故

$$i = 2A \rho^{\frac{2}{3}} r^{-\frac{1}{3}}$$

根据此式可求得各切割索作用于前盖内壁各部分的冲量。

切割索 1 及 1' 作用于 DFE 面的 ξ 向冲量

$$I_{1\xi} = AL(\rho h)^{\frac{2}{3}} \int_{\alpha_1}^{\alpha} \cos^{-\frac{2}{3}} \theta d\theta$$

切割索 3 作用于 DFE 面的 ξ 向冲量

$$I_{3\xi} = 2A \rho^{\frac{2}{3}} \int_0^{R_1} r^{-\frac{1}{3}} \sqrt{R_1^2 - r^2} dr$$

切割索 1' 作用于 ABC 圆弧曲面的 ξ 向冲量

$$I_{1'\xi} = 2A \pi r_1 \rho^{\frac{2}{3}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(R_1 + r_1 \cos \beta) \sin \beta d\beta}{[2R_1 + r_1 + r_1 \cos \beta]^2 + (r_1 \sin \beta)^2]^{\frac{1}{6}}}$$

切割索 1 作用于 ABC 圆弧曲面的 ξ 向冲量

$$I'_{1\xi} = A\pi(2\rho r_1)^{\frac{2}{3}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin\theta}{(\sin\frac{\theta}{2})^{\frac{1}{3}}} (R_1 + r_1 \cos\theta) d\theta$$

切割索 2 及 2' 作用于 ABC 圆弧曲面的 ξ 向冲量

$$I_{2\xi} = \frac{12}{5} (2\rho)^{\frac{2}{3}} [(R_1 + r_1)^{\frac{5}{3}} - R_1^{\frac{5}{3}}] A \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^{\frac{2}{3}} \beta d\beta$$

切割索 3 作用于 ABC 圆弧曲面的 ξ 向冲量

$$I'_{3\xi} = 2A\rho^{\frac{2}{3}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\pi} r^{-\frac{1}{3}} R_1 r_1 \sin\alpha d\alpha d\varphi$$

切割索 1 作用于 ABC 圆弧曲面的 η 向冲量

$$I_{1\eta} = 2AR_1(2\rho r_1)^{\frac{2}{3}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin\frac{\theta}{2})^{-\frac{1}{3}} \cos\theta d\theta$$

切割索 1' 作用于 ABC 圆弧曲面的 η 向冲量

$$I_{1'\eta} = 2\pi r_1 R_1 \rho^{\frac{2}{3}} A \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos\beta}{[(2R_1 + r_1 + r_1 \cos\beta)^2 + (r_1 \sin\beta)^2]^{\frac{1}{6}}} d\beta$$

切割索 2 及 2' 作用于 ABC 圆弧曲面的 η 向冲量

$$I_{2\eta} = 4A(2\rho)^{\frac{2}{3}} r_1 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} [(R_1 + r_1 \cos\theta) \cos\beta]^{\frac{2}{3}} \cos\theta \sin\beta d\theta d\beta$$

将以上各量沿 ξ 、 η 向叠加, 可得切割

索冲击波冲量

$$I_{q\xi} = I_{1\xi} + I_{3\xi} + I_{1'\xi} + I'_{1\xi} + I_{2\xi} + I'_{3\xi}$$

$$I_{q\eta} = I_{1\eta} + I_{1'\eta} + I_{2\eta}$$

式中各量的意义见图 2。

将切割索爆炸波冲量与冲击波冲量叠

加, 得切割索爆炸冲量

$$I_{R\xi} = I_{p\xi} + I_{q\xi}$$

$$I_{R\eta} = I_{p\eta} + I_{q\eta}$$

1.2 内压喷射冲量

假定喷射过程为一维等熵流, 则其气体动力学基本方程为

$$\frac{\partial \ln \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \ln \rho}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

其中 u 为气体运动速度, ρ 为气体密度, p 为压力。

对于先前静止气体的单向飞散问题, 满足基本方程的特殊解为

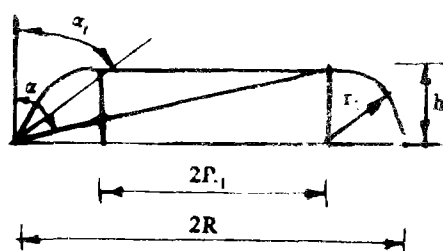


图 2

$$x = (u - C)t + F(u)$$

$$u + \frac{2}{K-1}C = \text{const}$$

由 $u=0$ 时, C 应等于静止气体的声速 C_H , 得 $u = \frac{2}{K-1}(C_H - C)$ 该式指出, 若认为箱口声速为定值时, 在 $0 \leq t \leq \frac{L}{C_H}$ 内, 箱口气流喷射速度不变. L 为箱长.

设箱内压力为 P_0 , 密度为 ρ_0 , 温度为 T_0 , 外界压力为 P_a , 密度任 ρ_a , 温度为 T_a , 射流马赫数为 M , 射流速度为 u , 则它们之间有如下关系

$$P_a = \frac{P_0}{(1 + \frac{K-1}{2}M^2)^{\frac{K}{K-1}}}$$

$$\rho_a = \frac{\rho_0}{(1 + \frac{K-1}{2}M^2)^{\frac{K}{K-1}}}$$

$$T_a = \frac{T_0}{1 + \frac{K-1}{2}M^2}$$

$$M = \sqrt{\frac{2}{K-1}[(\frac{P_0}{P_a})^{\frac{K-1}{K}} - 1]}$$

$$u = MC = M\sqrt{KgRT_a}$$

其中 k 为空气的比热比, 可取 $k=1.4$. 运用上述公式可得箱口气流喷射速度 u .

内压喷射冲量

$$I_{n\zeta} = \frac{1}{4C_H} C_1 \rho_a (u - u_d)^2 S_\zeta L$$

$$I_{n\eta} = \frac{1}{4C_H} C_1 \rho_a (u - u_d)^2 S_\eta L$$

其中 u_d 为切割索冲量 $I_{g\zeta}$ 引起的初速, C_1 为前半盖内面阻力系数, 参考风洞实验取 $C_1=1.6$, $S_\zeta = \pi R^2$, $S_\eta = 2Rh$, C_H 为声速.

由切割索爆炸冲量和内压喷射冲量可得总冲量. 在图3所示 xyz 坐标系中, 冲量的坐标分量为

$$I_x = (I_{g\zeta} + I_{n\zeta})\cos\theta + I_{n\eta}\sin\varphi\sin\theta$$

$$I_y = (I_{g\zeta} + I_{n\zeta})\sin\theta - I_{n\eta}\sin\varphi\cos\theta$$

$$I_z = -(I_{g\eta} + I_{n\eta})\cos\varphi$$

其中 θ 为箱轴仰角, φ 为切割索偏角.

设半盖质量为 m , 则根据动量定理, 半盖质心初速为

$$V_{x0} = \frac{1}{m} I_x, \quad V_{y0} = \frac{1}{m} I_y, \quad V_{z0} = \frac{1}{m} I_z$$

半盖质心坐标, 从便于安全取 $x_0=0$, $y_0=y_0$, $z_0=0$.

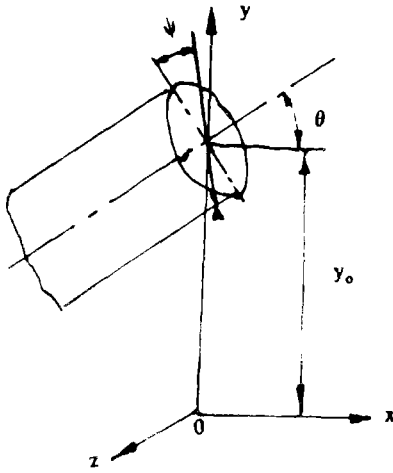


图 3

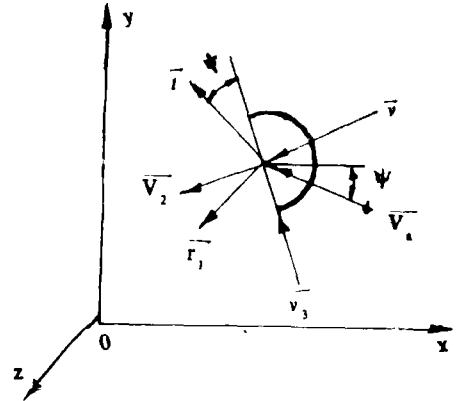


图 4

2 前半盖质心运动方程组

2.1 空气阻力表达式

设空气静止时, 其相对前盖的运动速度 (由于前盖运动产生的) 为

$$\vec{V} = \{-V_x \quad -V_y \quad -V_z\}$$

又设来流绝对速度为

$$\vec{V}_a = \{-V_a \cos \varphi \quad 0 \quad -V_a \sin \varphi\}$$

其中 φ 为来流偏角, 则此时来流相对盖面的法向速度为

$$V_1 = V + V_a \left(\frac{V_x}{V} \cos \varphi + \frac{V_z}{V} \sin \varphi \right)$$

记盖面法向迎风面积为 S_1 , 阻力系数为 C_1 , 则由 V_1 产生的空气阻力为

$$R_1 = \frac{1}{2} \rho C_1 S_1 V_1^2$$

ρ 为空气密度. 若 $V_1 > 0$, \vec{R}_1 与 \vec{V} 同向; 若 $V_1 < 0$, \vec{R}_1 与 \vec{V} 反向. \vec{R}_1 在坐标向的投影为

$$\vec{R}_1 = R_1 \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} \text{Sign} V_1 = -\frac{1}{2} \rho C_1 S_1 V_1^2 \text{Sign} V_1 \left\{ \frac{V_x}{V} \quad \frac{V_y}{V} \quad \frac{V_z}{V} \right\}$$

取过盖面形心且含 \vec{V} 的铅垂面与盖面的交线为 \vec{i} 轴, \vec{n} 轴垂直于 $V-t$ 平面, 方向由 $\vec{i} \times \vec{V}$ 定, 则 $t-V-n$ 构成一直角坐标系.

$$\vec{n} = \vec{i} \times \vec{V} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 1 & 0 \\ -V_x & -V_y & -V_z \end{vmatrix} = \{-V_2 \quad 0 \quad V_x\}$$

\vec{i} 、 \vec{j} 、 \vec{k} 为xyz坐标系单位向量, \vec{n} 的单位向量

$$\vec{n}_0 = \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} = \left\{ -\frac{V_x}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \quad 0 \quad \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \right\}$$

\vec{t} 向量为

$$\vec{t} = \vec{V} \times \vec{n} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ -V_x & -V_y & -V_z \\ -V_x & 0 & V_z \end{vmatrix} = \{-V_x V_y, V_x^2 + V_z^2, -V_y V_z\}$$

\vec{t} 的单位向量

$$\vec{t}_0 = \frac{\vec{t}}{|\vec{t}|} = \left\{ -\frac{V_x V_y}{|\vec{t}|} \quad \frac{V_x^2 + V_z^2}{|\vec{t}|} \quad -\frac{V_y V_z}{|\vec{t}|} \right\}$$

$$|\vec{t}| = \sqrt{V_y^2 (V_x^2 + V_z^2) + (V_x^2 + V_z^2)^2}$$

\vec{V}_a 在 \vec{n} 向设影

$$V_{an} = V_a \cos(\widehat{\vec{V}_a}, \vec{n}) = V_a \left(\frac{V_x \cos \varphi}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} - \frac{V_x \sin \varphi}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} \right)$$

\vec{V}_a 在 \vec{t} 向设影

$$V_{at} = V_a \cos(\widehat{\vec{V}_a}, \vec{t}) = V_a \frac{V_x V_y \cos \varphi + V_y V_z \sin \varphi}{\sqrt{V_y^2 (V_x^2 + V_z^2) + (V_x^2 + V_z^2)^2}}$$

由此可求得与盖面法线垂直的侧向速度 V_2 为

$$V_2 = -(V_{at} \cos \varphi + V_{an} \sin \varphi)$$

记 V_2 对应的空气阻力为 R_2 , 迎风面积为 S_2 , 阻力系数为 C_2 , 则

$$R_2 = \frac{1}{2} \rho C_2 S_2 V_2^2$$

由于 $V_2 > 0$ 时, \vec{R}_2 与 \vec{V}_2 同向, $V < 0$ 时, \vec{R}_2 与 \vec{V}_2 反向, 故

$$\vec{R}_2 = (R_2 \cos \varphi \vec{n}_0 + R_2 \sin \varphi \vec{t}_0) \text{sign} V_2$$

于是 \vec{R}_2 的坐标设影

$$\vec{R}_2 = R_2 \left\{ -\frac{V_x \cos \varphi}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} - \frac{V_x V_y \sin \varphi}{|\vec{t}|} - \frac{(V_x^2 + V_z^2) \sin \varphi}{|\vec{t}|} \right. \\ \left. - \frac{V_x \cos \varphi}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} - \frac{V_y V_z \sin \varphi}{|\vec{t}|} \right\} \times \text{sign} V_2$$

与切割索平行的速度 V_3 为

$$V_3 = -V_{an} \sin \varphi + V_{at} \cos \varphi$$

记 V_3 对应的空气阻力为 R_3 , 迎风面积为 S_3 , 阻力系数为 C_3 , 则

$$R_3 = \frac{1}{2} \rho C_3 S_3 V_3^2$$

它在坐标轴向设影为

$$\begin{aligned} \vec{R}_1 = R_3 \left\{ \frac{V_z \sin \varphi}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} - \frac{V_x V_y \cos \varphi}{|\vec{t}|} - \frac{(V_x^2 + V_z^2) \cos \varphi}{|\vec{t}|} - \frac{V_x \sin \varphi}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} \right. \\ \left. - \frac{V_x V_z \cos \varphi}{|\vec{t}|} \right\} \text{sign} V_3 \end{aligned}$$

综合上面分析, 总空气阻力为 $\vec{R} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2 + \vec{R}_3$

其坐标分量

$$\begin{aligned} R_x = & -\frac{1}{2} \rho C_1 S_1 V_1^2 \frac{V_x}{V} \text{sign} V_1 - \frac{1}{2} \rho C_2 S_2 V_2^2 \left(\frac{V_x \cos \varphi}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} \right. \\ & \left. + \frac{V_x V_z \text{sign} \varphi}{|\vec{t}|} \right) \text{sign} V_2 - \frac{1}{2} \rho C_3 S_3 V_3^2 \left(\frac{V_x V_y \cos \varphi}{|\vec{t}|} - \frac{V_z \sin \varphi}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} \right) \text{sign} V_3 \\ R_y = & -\frac{1}{2} \rho C_1 S_1 V_1^2 \frac{V_y}{V} \text{sign} V_1 + \frac{1}{2} \rho C_2 S_2 V_2^2 \frac{(V_x^2 + V_z^2) \sin \varphi}{|\vec{t}|} \text{sign} V_2 \\ & + \frac{1}{2} \rho C_3 S_3 V_3^2 \frac{(V_x^2 + V_z^2) \cos \varphi}{|\vec{t}|} \text{sign} V_3 \\ R_z = & -\frac{1}{2} \rho C_1 S_1 V_1^2 \frac{V_z}{V} \text{sign} V_1 + \frac{1}{2} \rho C_2 S_2 V_2^2 \left(\frac{V_x \cos \varphi}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} \right. \\ & \left. - \frac{V_x V_z \text{sign} \varphi}{|\vec{t}|} \right) \text{sign} V_2 - \frac{1}{2} \rho C_3 S_3 V_3^2 \left(\frac{V_x \sin \varphi}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} - \frac{V_y V_z \cos \varphi}{|\vec{t}|} \right) \text{sign} V_3 \end{aligned}$$

半盖在静止坐标系的质心运动方程组

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = \frac{1}{m} R_x \\ \frac{dV_y}{dt} = \frac{1}{m} R_y - g \\ \frac{dV_z}{dt} = \frac{1}{m} R_z \\ \frac{dx}{dt} = V_x \\ \frac{dy}{dt} = V_y \\ \frac{dz}{dt} = V_z \end{cases}$$

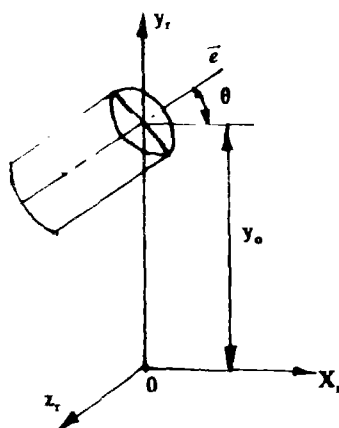


图 5

$$\text{联系方程} \quad V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

$$\text{初始条件} \quad t=0 \text{时:} \quad x=0, y=y[0], z=0$$

$$V_x = V_x^0, V_y = V_y^0, V_z = V_z^0$$

运用上述方程组求得的量是相对静止坐标系的, 实际上要求知道的是半盖相对箱前端坐标系的相对量。相对量可由下式求得

$$\begin{cases} x_r = x - V_j t \\ y_r = y \\ z_r = z \end{cases}$$

式中 V_j 为舰的航速。

在计算半盖运用时, 我们十分关心半盖质心在飞行过程中它与箱轴线之距 d , 根据 d 可以判断前盖是否及时地让出了导弹箱前弹道。

$$\text{发射箱轴线单位矢为} \quad \vec{e} = \{\cos\theta \quad \sin\theta \quad 0\}$$

又 \vec{e} 过 $(0, y_0, 0)$ 点, 故参数方程为

$$\begin{cases} x_r = t \cos\theta \\ y_r = y_0 + t \sin\theta \\ z_r = 0 \end{cases}$$

过半盖质心 (x_{rc}, y_{rc}, z_{rc}) 且与 \vec{e} 垂直的平面为

$$(x_r - x_{rc}) \cos\theta + (y_r - y_{rc}) \sin\theta = 0$$

将参数方程代入, 可解出参数 t , 再将其代入参数方程, 得平面与 \vec{e} 之交点

$$\begin{cases} x_j = x_{rc} \cos^2\theta + \frac{1}{2}(y_{rc} - y_0) \sin 2\theta \\ y_j = y_0 + \frac{1}{2} x_{rc} \sin 2\theta + (y_{rc} - y_0) \sin^2\theta \\ z_j = 0 \end{cases}$$

于是, 半盖质心到箱轴线之距为

$$d = \sqrt{(x_{rc} - x_j)^2 + (y_{rc} - y_j)^2 + z_{rc}^2}$$

3 计算与验证

根据前面推导的一系列公式, 我们编制了计算程序, 求解微分方程组采用的是四阶龙格—库塔法。以发射箱内压、舰速、风速、来流偏角、箱轴仰角为参变量进行了 57 种组合计算。通过计算给出了: 前盖运动位置与时间的变化曲线; 前盖质心与箱轴线之距随时间的变化规律; 在一定的舰速和风速下, 为保证导弹箱前正确飞行所取的箱内最低压力。

由于实验费用极高, 全面实验对计算验证是不可能的, 为此只进行了部分状态下的实

验验证, 见下表:

实验序号		1		2		3	
		实验值	计算值	实验值	计算值	实验值	计算值
x(m)	左半盖	5.17	5.17	10.28	10.59	4.86	6.52
	右半盖	5.06	5.31	11.65	11.65	1.81 *	2.46
z(m)	左半盖	-2.24	-1.97	-2.48	-2.48	-5.49	-5.25
	右半盖	1.81	2.29	4.94 *	2.92	5.74	5.5
飞行时间 (秒)	左半盖	1.31	1.04	1.33	1.15	2.08	2.34
	右半盖	1.42	1.23	1.65	1.38	2.65	2.44

表中带有 * 号的两个半盖在落地时与发射架发生了碰撞, 数据不可信。飞行时间是通过高速摄影处理得到的。

从计算与实验值比较知, 本文所建立的计算方法基本上反映了爆炸分离过程的主要特征, 为进一步深入研究打下了基础。

Analysis to Cut Off Front Lid of Guided Missile Launching Trunk by Explosion

Zhang Leishun

(Zheng zhou Institute of Technology)

Abstract: In this paper, rather satisfying results have been obtained by approximate methods based on main characteristics to cut off front lid of guided missile launching trunk by explosion.

Keywords: explosion, impulse, motion