

文章编号: 1006-9941(2006)03-0221-03

# 火箭弹射座椅弹射动力系统内弹道模型建立与计算

翟志强<sup>1</sup>, 蔡瑞娇<sup>1</sup>, 董海平<sup>1</sup>, 马金贵<sup>2</sup>, 吴 瑶<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中国航空救生研究所, 湖北 襄樊 441003)

**摘要:** 在分析火箭弹射座椅弹射动力系统的工作过程的基础上, 建立了其内弹道的物理模型和数学模型, 并对某型火箭弹射座椅弹射动力系统内弹道进行了试验验证与计算, 试验所测膛内气体压力随时间变化曲线与计算曲线基本吻合, 弹射过程最大压力  $p_m$ 、工作时间  $t_g$ 、出口压力  $p_g$  和出口速度  $v_g$  分别为 24.20(24.57) MPa, 157(155)  $\times 10^{-3}$  s, 22.27(21.83) MPa, 16.61(16.59)  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 各特征参数的计算值(实验值)最大误差小于 3%。

**关键词:** 爆炸力学; 火箭弹射座椅; 弹射动力系统; 内弹道

**中图分类号:** O389; V244.21+2

**文献标识码:** A

## 1 引言

在火箭弹射座椅中, 为了保证弹射的成功和受人的生理极限的限制, 对其弹射动力系统的内弹道性能要求非常严格<sup>[1]</sup>。长期以来, 在航空救生火箭弹射座椅的研制中, 使用的弹射动力系统机构和火工品的研制大多是参照国外产品进行设计, 一些参数的确定还是采用几十年一贯制的方法——“画、加、打”(即设计人员画图、工人加工、试验场试验), 很少进行理论计算, 造成设计过程的盲目性和效率低下, 更谈不上设计过程中参数选择的优化, 并且增加了研制成本。随着科学技术的发展, 大量过去无法计算的参数可以通过建立数学模型及简化, 利用计算机进行计算, 火箭弹射座椅弹射动力系统内弹道的设计与计算也是如此。本文在对火箭弹射座椅弹射动力系统的工作过程分析的基础上, 建立其内弹道数学模型, 编制程序进行计算, 以计算结果指导设计, 可以减少设计过程的盲目性。

## 2 弹射动力系统内弹道物理模型的建立

火箭弹射座椅在应急弹射时, 弹射弹被击发, 弹中的火药燃烧产生的燃气在弹射机构中建立一定的工作压力, 使弹射机构的外筒被迫向上移动, 最终使人-椅获得一定的弹射初速<sup>[1]</sup>。其弹射动力系统是依靠火药燃烧, 完全靠气体膨胀直接作功的系统, 其物理模型如图 1 所示。火药气体在截面积为  $S$  的界面上推动质

量为  $m$  的物体向前运动, 且当物体运动一定行程  $L_0$  后, 便从膛内通过一个面积为  $S_{kp}$  的排气孔, 为其它系统提供燃气能量, 最终运动行程  $L_g$  后, 火箭座椅以一定的初速  $v_0$  弹射出去。图 1 中  $W_0$  为初始容积。

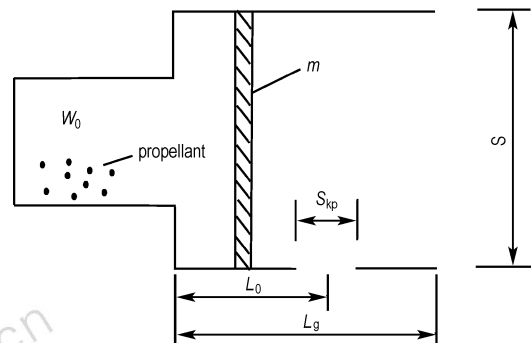


图 1 火箭弹射座椅弹射动力系统内弹道物理模型

Fig. 1 Physical model of ejection gun of rocket ejection seat

## 3 数学模型的建立

### 3.1 几种假设<sup>[2]</sup>

(1) 火药燃烧按几何燃烧规律; (2) 火药燃烧速度按指数规律; (3) 不计膛内火药气体压力梯度; (4) 在火药作用过程中, 燃烧生成成份不变; (5) 假设点火药瞬间燃完、主装药全面点着; (6) 热损失通过降低火药能量进行修正, 气体作用过程按绝热过程。

### 3.2 数学模型

根据前述的物理模型, 火箭弹射座椅弹射动力系统工作包括火药燃烧过程、气体膨胀和流出过程、推动物体运动作功过程。根据文献[3], 可将火箭弹射座椅弹射动力系统工作过程分为三个阶段(忽略气体后效作用): 前期、第一时期、第二时期。

收稿日期: 2005-09-02; 修回日期: 2006-01-23

作者简介: 翟志强(1973-), 男, 博士, 从事火箭弹射座椅系统可靠性研究。

前期是指将主装药着火到弹射座椅开始运动为止这一过程。在此期间内,火药在固定容积内燃烧并经排气孔  $S_{kp}$  排出部分气体(可根据结构参数  $L_0$  确定是否排气),容腔内气体压力  $p$  由点火压力  $p_B$  上升到起动力  $p_0$ ,这个过程可用压力  $p$  作为变量建立其数学模型。

第一时期是指前期末到火药燃烧结束这一阶段。在此期间内,火药一边燃烧,一边对外作功,火药燃烧掉的百分数由  $\Psi_0$  上升到 100%,这个阶段可用  $\Psi$  作自变量建立其数学模型。

第二时期是指火药燃烧结束到弹射座椅外筒与内筒分离这个阶段。在此时期内,无气体生成,只有气体膨胀作功,弹射座椅的行程  $L$  由  $L_k$  到允许的最大行程  $L_g$ ,这个阶段可以行程  $L$  作自变量建立其数学模型。

参照文献[2]中的基本理论,在上述假设下,火箭弹射座椅弹射动力系统工作过程的三个阶段可以用以下数学等式来描述,对应不同阶段其自变量不同,可推导出不同的形式。

火药燃烧方程:

$$\psi = \chi Z(1 + \lambda Z)$$

火药燃速方程:

$$e_1 \frac{dZ}{dt} = \mu p^\gamma$$

自由容积方程:

$$W_\psi = W_0 + SL + \left(\frac{1}{\delta} - \alpha\right)\omega\psi + \alpha m_{kp}$$

排气孔流量方程:

$$\frac{dm_{kp}}{dt} = K_0 S_{kp} p / \sqrt{RT}$$

质量守恒方程:

$$m_L = \omega\psi - m_{kp}$$

平衡状态方程:

$$pW_\psi = m_L RT$$

能量守恒方程:

$$\frac{pW_\psi}{\theta} = \frac{\omega f \psi}{\theta} - \frac{\varphi}{2} m v^2 - \int \frac{k}{\theta} RT dm_{kp}$$

牛顿力学方程:

$$\varphi m \frac{dv}{dt} = Sp - \varphi mg \sin \beta$$

运动学方程:

$$v = \frac{dL}{dt}$$

其中,  $\psi$  为火药燃烧掉的百分数;  $\chi, \lambda$  为主装药药型参数;  $Z$  为火药燃烧掉的相对厚度;  $e_1$  为主装药弧厚的

一半,  $\mu, \gamma$  为主装药燃速系数、燃速指数;  $p_1$  为膛内气体压力, Pa;  $W_\psi, W_0$  为膛内自由容积及初始容积,  $m^3$ ;  $S$  为气体作用面积,  $m^2$ ;  $L$  为火箭座椅运动行程,  $m$ ;  $\delta$  为主装药密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\alpha$  为气体余容,  $m^3 \cdot kg^{-1}$ ;  $\omega$  为主装药量,  $kg$ ;  $m_{kp}$  为排出气体质量,  $kg$ ;  $t$  为火药作用时间,  $s$ ;  $K$  为比热比,  $K_0 = \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K+1}{2(K-1)}} \sqrt{K}, \theta = K - 1$ ;  $s_{kp}$  为排气孔最小截面积,  $m^2$ ;  $RT$  为气体常数与膛内温度之积,  $J \cdot kg^{-1}$ ;  $m_L$  为膛内气体质量,  $kg$ ;  $f$  为主装药修正后火药力,  $J \cdot kg^{-1}$ ;  $v$  为座椅运动速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $m$  为火箭弹射座椅质量,  $kg$ ;  $g = 9.80665 m \cdot s^{-2}$ ;  $\beta$  为弹射方向与水平方向夹角;  $\varphi$  为质量虚拟系数。

将以上内弹道数学模型编成了程序利用计算机进行内弹道的设计与计算。对于内弹道有关方程,均以微分形式编入程序中,用龙格-库塔法求解,初始数据为系统直接参数,均采用国际单位。

#### 4 某型火箭弹射座椅内弹道试验与计算比较

在某试验场对某型火箭弹射座椅进行了内弹道试验,试验在向上弹射试验架上进行(见图2)。试验是在环境温度(18℃)下进行,其状态为:弹射质量为197.5 kg;初始自由容积为  $1.427 \times 10^{-3} m^3$ ;气体作用面积为  $1.257 \times 10^{-3} m^2$ ;排气孔面积为  $9.621 \times 10^{-6} m^2$ ;向上发射角度为  $63^\circ$ ;座椅运动最大行程为 1.045 m。采用某型发射药,其主装药量为 0.145 kg,该药的密度为  $1668 kg \cdot m^{-3}$ ,比热比为 1.23,火药力为  $1.11 \times 10^6 J \cdot kg^{-1}$  等。试验所测得的膛内气体压力随时间变化的曲线如图3所示,其弹射过程中的最大压力  $p_m$ 、工作时间  $t_g$ 、出口压力  $p_g$ 、出口速度  $v_g$  等特征参数试验值见表1。



图2 模拟某型火箭座椅向上弹射试验

Fig. 2 Simulation test of up-ejection of a rocket ejection seat

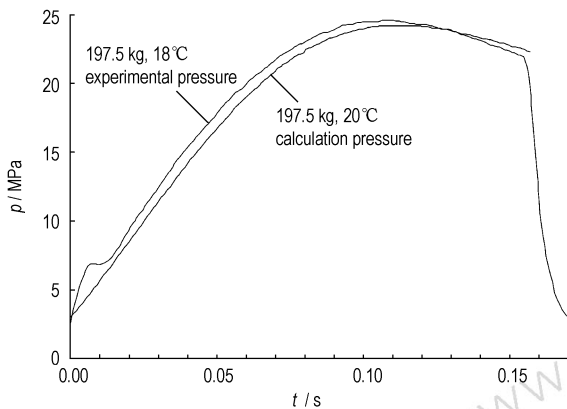


图3 膛内气体压力实测曲线与计算曲线对比  
Fig.3 Comparison between measurement curve and calculation curve of gas pressure in chamber

表1 某型火箭弹射座椅弹射动力系统内弹道试验与计算结果比较

Table 1 Comparison between calculation value and measurement value by test of interior ballistics of ejection gun of XX rocket ejection seat

	$p_m/\text{MPa}$	$t_g/10^{-3}\text{s}$	$p_g/\text{MPa}$	$v_g/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
calculation result	24.20	157	22.27	16.61
experimental result	24.57	155	21.83	16.59
deviation/%	1.51	1.29	2.02	0.12

把以上试验参数代到根据上述数学模型编制的软件中进行计算,得到膛内气体压力随时间变化的计算曲线(见图3),其弹射过程中的最大压力 $p_m$ 、工作时间 $t_g$ 、出口压力 $p_g$ 、出口速度 $v_g$ 等特征参数计算值见表1。

从图3曲线的对比情况看,膛内气体压力随时间

变化的实测曲线与计算曲线基本吻合,变化趋势一致。同时,从表1可以看出,弹射过程中最大压力,工作时间,以及出口压力、出口速度等特征参数,根据本文建立的数学模型得到的计算值与实际试验值误差较小,最大误差小于3%。以上结果充分说明了理论计算的准确性和实用性。两者之间存在微小差异,这是由于在火箭弹射座椅弹射动力系统中,根据实际测量所得热损失约占总能量40%,其为时间、温度、压力、气体接触面积的函数,热损失量是有一定的波动的,但在计算中,是将其作为一常数处理的,此为造成差异的主要原因。

## 5 结论

从本文分析和讨论可以看出,以上内弹道模型的建立和计算是可行的,在实际工程设计中,可先进行理论计算,优化设计参数,代替研制过程中的大量实际试验(如选择火药类型、药型和确定装药量等试验),减少试验件,提高设计效率,节省大量的人力、物力和财力,降低研制成本,并能减少设计的盲目性,使设计更科学。

### 参考文献:

- [1] 张天飞,马金贵,李吉田. 某弹射弹推进剂装药设计[J]. 火炸药学报, 2003,26(3): 2.  
ZHANG Tian-fei, MA Jin-gui, LI Ji-tian. The design and investigation of a ejection cartridge[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2003, 26(3): 2.
- [2] 华东工程学院编. 内弹道学[M]. 1983.  
Technology Institute of East China. Interior Ballistics[M]. 1983.
- [3] 张喜发,卢兴华. 火炮烧蚀内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.  
ZHANG Xi-fa, LU Xing-hua. Interior Ballistics of Erosion Guns[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.

## Calculation and Establishment of Interior Ballistics Model for Ejection Gun of Rocket Ejection Seat

ZHAI Zhi-qiang<sup>1</sup>, CAI Rui-jiao<sup>1</sup>, DONG Hai-ping<sup>1</sup>, MA Jin-gui<sup>2</sup>, WU Yao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. China Aviation Life-Support Research Institute, Xiangfan 441003, China)

**Abstract:** Based on the analysis of working process of ejection gun of rocket ejection seat, the physical and mathematical models of interior ballistics of ejection gun were established and the interior ballistics parameters of a rocket eject seat were validated by test and calculation. The measured chamber pressure curve is consistent with the calculation curve. The calculation value and measurement value of the maximum pressure  $p_m$ , working time  $t_g$ , muzzle pressure  $p_g$  and muzzle velocity  $v_g$  are 24.20 (24.57) MPa,  $157(155) \times 10^{-3}$  s, 22.27 (21.83) MPa, 16.61 (16.59)  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectively. And the largest error of their characteristic parameters is less than 3%.

**Key words:** explosion mechanics; rocket ejection seat; ejection gun; interior ballistics