航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Dec. 15 2018 Vol. 29 No.12 01-07

# 两级弹射筒与三级弹射筒座椅性能的对比分析

冯星 *，谭率

航空工业航宇救生装备有限公司，湖北 襄阳 441003

**摘　要**：弹射筒作为火箭弹射座椅的一级动力，其作用是为人－椅系统弹射出舱提供一定初速。原三级弹射取消一段中筒后变为两级弹射筒，其弹射行程变短、出舱初速降低、出舱时间缩短，这些对座椅的弹射出舱性能以及弹射性能产生一定影响。本文对三级弹射筒和两级弹射筒从出舱受载、出舱姿态、总压信号采集、救生性能等方面特点进行了对比分析。通过试验数据和仿真结果的综合分析，认为采用两级弹射筒，座椅在出舱受载、出舱姿态等方面较三级弹射筒座椅得到了一定改善。

**关键词**：弹射筒；火箭弹射座椅；弹射出舱；救生性能；最低安全高度

**中图分类号**：V244.21+2　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.12.001

弹射座椅是乘员应急离机的保障装置，被誉为蓝天上的“生命之舟”。座椅的弹射动力发展到现在普遍采用弹射筒和火箭包组合方式，弹射筒为伸缩式套筒结构，套筒数量经历了单级、两级、三级、四级。目前国外主流弹射座椅有：英国 MK-16 系列座椅、美国 S4S 座椅以及俄罗斯的 K-36 系列座椅的弹射筒均为两级，而国内现役座椅弹射筒多采用三级。本文针对国内弹射座椅的三级弹射筒和两级弹射筒技术特点，就弹射出舱过程和弹射性能进行对比分析，为弹射座椅一级动力的参数设计提供经验数据和分析方法。

## 1 弹射筒主要性能对比

相比三级弹射筒，两级弹射筒脱离行程、弹射初速、工作时间均变小，两者主要技术性能对比见表 1。数据表明：两级弹射筒较三级弹射筒在行程缩短 580mm；弹射初速下降 2.5m/s；工作时间缩短约 0.06s。

在高温 85℃、弹射质量 225kg 和低温 -55℃、弹射质量 205kg 条件下，弹射筒的过载曲线如图 1、图 2[1] 所示，从曲线可以发现：两级弹射筒相比三级弹射筒，过载增长率、过载峰值基本保持一致，峰值维持时间上有所减小，因此作用在乘员身上的过载，两级弹射筒座椅会低于三级弹射筒座椅。

表 1　主要技术参数对比

Table 1　Comparison of main technical parameters

| 序号 | 对比项目 | 技术参数 | |
|---|---|---|---|
| | | 两级弹射筒 | 三级弹射筒 |
| 1 | 弹射筒脱离行程 /mm | 1080 | 1660 |
| 2 | 座椅弹射出舱速度 /（m/s） | 12.5 | 15 |
| 3 | 座椅弹射出舱时间 /s | 0.21 | 0.27 |

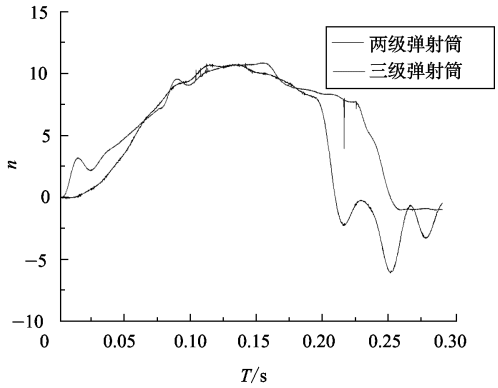


图 1　两级与三级弹射筒 85℃超载曲线

Fig.1　Overload curve of the two-stage ejection gun and three-stage at 85℃

收稿日期：2018-10-14；　退修日期：2018-11-10；　录用日期：2018-11-25

* 通信作者 . Tel.：0710-3102052　　E-mail：262882022@qq.com

*引用格式：Feng Xing, Tan Shuai. Comparative analyzing performance between the two-stage ejection gun and three-stage ejection seat[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (12)：01-07. 冯星，谭率 . 两级弹射筒与三级弹射筒座椅性能的对比分析 [J]. 航空科学技术，2018, 29 (12)：01-07.*

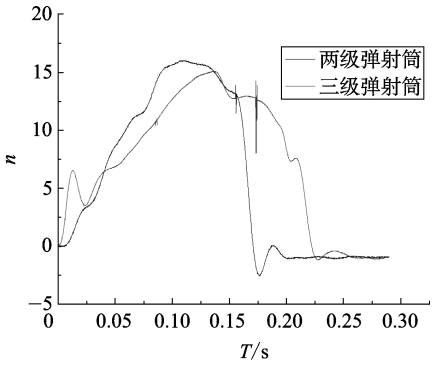


图 2 两级与三级弹射筒 -55℃超载曲线

Fig.2 Overload curve of the two-stage ejection gun and three-stage at -55℃

## 2 出舱性能影响分析

### 2.1 出舱载荷

座椅启动弹射后，在一级动力弹射筒的作用下，座椅会沿弹射轴线弹射出舱，弹射出舱过程受人－椅系统重力和气动力作用，内外套筒之间会产生一定的弯矩。以两级套筒结构为例，随着弹射行程增加，跟人－椅系统一起运动的内筒与固连座舱的外形成一个“悬臂”，如图 3 所示。高速弹射时，气动载荷（$F_a$）会使人－椅系统产生“抬头”力矩，即内筒与外筒之间产生一个逆时针的弯矩；同时内筒与外筒之间产生一个弯曲角度 $j$。假设整个人－椅系统处于静态状态下，弯曲角 $\phi$ 有以下关系：

$$\phi = \arctan\left(\frac{3\times\sqrt{l_2^{\,2}-f^2}+2\times l_1^{\,2}}{2\times\left(l_2^{\,2}-f^2+l_1\times\sqrt{l_2^{\,2}-f^2}\right)}\times f\right)$$

式中：$f$ 为弹射筒末端弯曲度；$l$ 为弹射筒总长；$l_1$ 为弹射筒下支点到脱离面长度；$l_2 = l - l_1$。

当表速大于 850km/h 时，在气动载荷作用下，弯曲角 $\phi \approx 20^\circ$ ~$25^\circ$。考虑到座椅的安装角 17° 或者 22°，因此内外筒脱离时座椅弹射轴线与铅垂线的角度可达 45°，而三级弹射筒由于弹射行程较大，弯曲角度 $\phi$ 也更大。这不仅对弹射筒的结构强度设计提出了更高的设计要求，同时对座椅的性能也产生重要影响，主要体现在：

（1）内外筒脱离时弹射轴线与铅垂线的角度增大，会使一级动力产生的速度向上分离减小，这将对人－椅系统越过飞机垂尾产生不利影响；

（2）弹射筒脱离时，由于产生的弯曲角 $\phi$，将使座椅进入气流时的俯仰角增大，此种情况下，气动载荷作用方向将不是作用在人体耐受能力较强的“胸－背”方向。

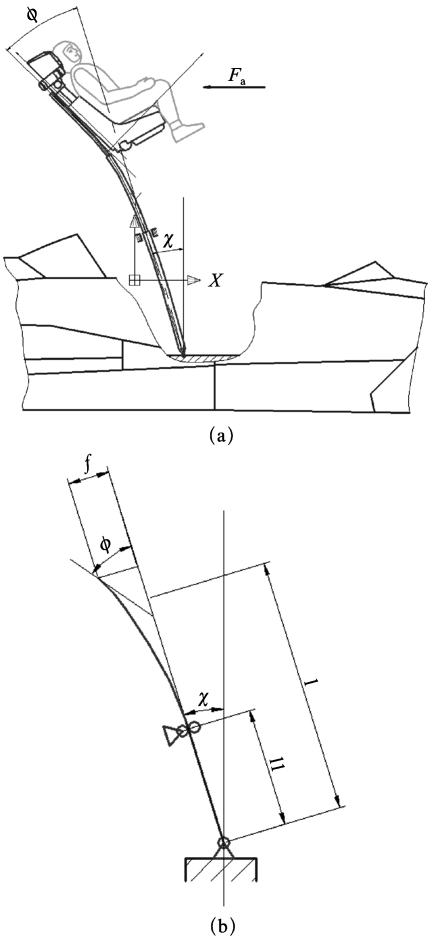


图 3 人－椅系统出舱受载（两级弹射筒）

Fig.3 Load calculation of the man-seat system escaped from the cockpit (two-stage ejection gun)

### 2.2 出舱姿态

为保证座椅沿弹射轴线顺利出舱，一般在弹射筒外筒安装了 4 对滑块或者滑轮，在座椅骨架内设计有滑槽进行导向，通过滑块与滑槽的配合约束，使座椅只能沿弹射轴方向有自由度，其他方向均无自由度。而座椅滑块与滑轨配合时最大行程为 1090mm，当座椅出舱行程超过 1090mm 后，滑块与滑槽脱离（图 4 所示位置），此时人－椅系统能够绕弹射轴线转动，这个转动可能带来不利影响。

由于人－椅系统在纵平面（$XOY$ 面）不是完全对称，在气动作用下产生一定侧向力。根据座椅高速风洞试验数据[2]，侧向力系数曲线与侧滑角关系如图 5 所示，曲线表明：0° ~60° 范围内侧向力系数随侧滑角增大而增大，即座椅出现偏航气动扰动时，在侧向力作用下座椅侧滑角会增大。因此三级弹射筒的行程在 1090~1660mm 时，人－椅系统会绕着弹射轴线转动，其作用效果是人－椅系统与座舱脱离后，产生较大偏航角和偏航角速率。

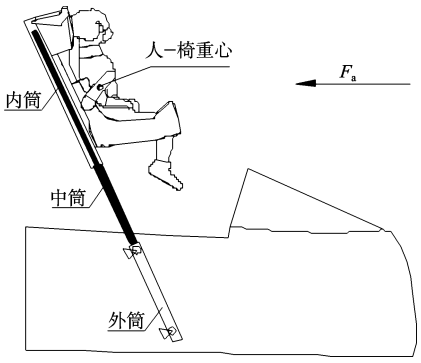


图 4 人 – 椅系统出舱过程示意（三级套筒）

Fig.4 Process of the man–seat system to be escaped from the cockpit（three–stage ejection gun）

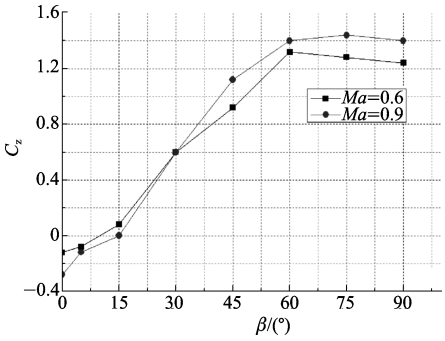


图 5 某型座椅侧向力系数与侧滑角曲线

Fig.5 Lateral force coefficient curve at the difference sideslip angle in typical seat

以某三级弹射筒座椅的 1 发地面 1100km/h 弹射试验为例，通过间隔 60ms 截取了座椅出舱时的三张高速录像图片，如图 6[3] 所示，从第一张照片至第三张照片，时间间隔 120ms，而座椅的偏航角超过 90°，平均偏航角速率达 681（°）/s。

两级弹射筒内外筒脱离行程 1080mm，此时座椅滑轨与弹射筒滑块未脱离，对偏航方向还有约束作用，因此在人 – 椅系统与座舱脱离时，不会产生较大偏航角速率。同样以某两级弹射筒座椅地面 1100km/s 弹射试验出舱过程为例，间隔 60ms 截取三张高速录像如图 7[4] 所示，结果显示座椅在偏航方向上的转动很小，高速录像判断座椅偏航角速率小于 110（°）/s，座椅出舱后“立姿”效果明显，符合 GJB4049—2000《飞机应急离机系统通用规范》[5] 中规定的生理耐限极限。

### 2.3 总静压信号采集

座椅出舱时的表速通常是根据程控器采集总压和静压计算得出。总压感受依靠伞箱两侧风速管，静压感受座椅椅背处程控器静压感受窗口，静压感受窗口处于座椅尾流区，因此感受的静压比实际值偏低，解决的方法是根据感受

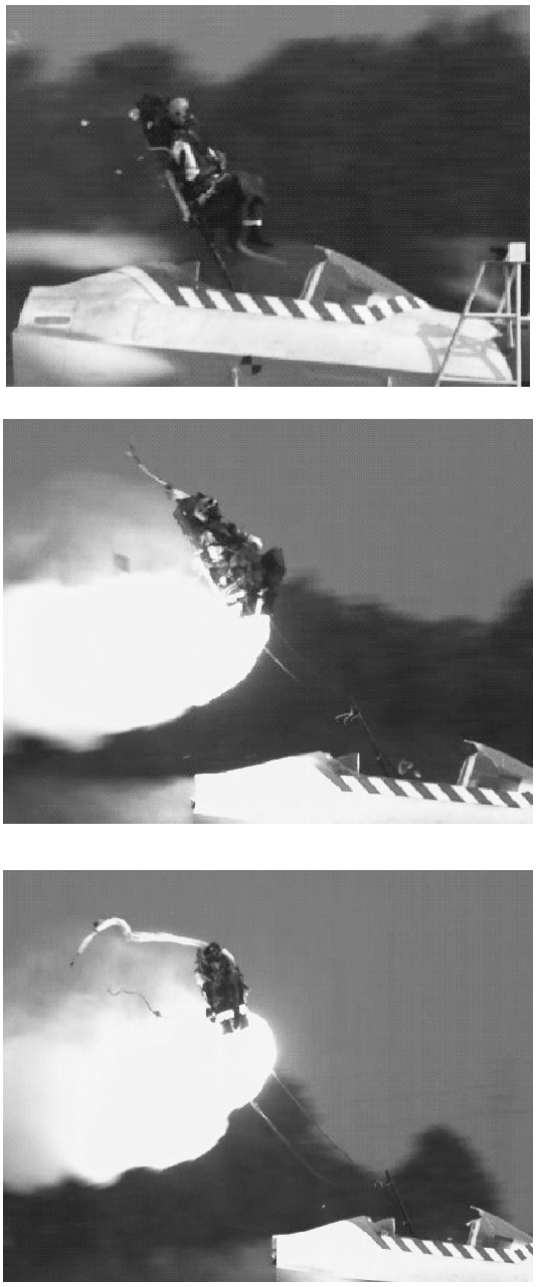

图 6 某三级弹射筒座椅出舱连续照片

Fig.6 Continuous photographs of the three–stage ejection gun seat escaped from the cockpit

的总压对静压进行修正。因此要求座椅在出舱时能采集较为准确的总压信号[6]。两级弹射筒缩短了弹射行程，对总压采集产生影响，通过 CFD 软件数值仿真计算了 1100km/h 速度时，两种弹射筒在不同行程时采集的总压和静压值，仿真结果数据见表 2[7]，结果表明：两种座椅出舱时的流场特性相似；风速管处的总压和程控器静压窗感受的静压差别很小。

图 7 某两级弹射筒座椅出舱连续照片

Fig.7 Continuous photographs of the two-stage ejection gun seat escaped from the cockpit

通过将仿真计算的人－椅系统流场矢量图和高速录像照片对比可以发现，座椅出舱时气流流经机身前风挡后会产生局部加速，该区域总压会比来流总压偏大，而程控器采集总压规则为记录出舱过程最大总压值。通过对试验后程控器所采集有效总压值的时间进行解算，记录的有效总压值的时间区间为 0.10~0.15s。根据弹射筒高、低温下的性能数据分析（见图 8、图 9），在该时间区间内，座椅对应弹射行程约为 300~800mm，该行程处于座椅越过前风挡后的气流加速区，与仿真结果相吻合，并且在两级弹射筒内外筒脱离行程内，因此两级弹射筒能够采集到所需的总静压信号。

表 2 两级弹射筒与三级弹射筒不同行程总／静压数据

Table 2 Total and static pressure data in different ejection stroke of the two-stage ejection gun and three-stage ejection seat

| 弹射筒类别 | 出舱行程 /mm | 风速管总压 /kPa | 程控器静压 /kPa |
|---|---|---|---|
| 两级弹射筒 | 830 | 173.3 | 70.2 |
| | 1090 | 170.0 | 70.7 |
| 三级弹射筒 | 830 | 173.6 | 70.4 |
| | 1090 | 170.8 | 70.6. |
| | 1660 | 170.1 | 67.8 |

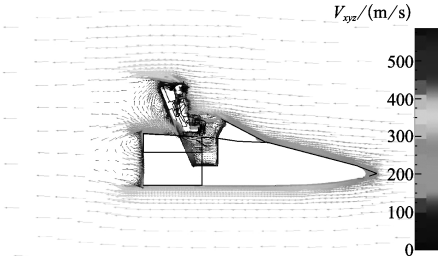


图 8 流场矢量图（1100km/h）

Fig.8 Vector field of flow at the rate of 1100km/h

图 9 弹射试验高速摄影照片（1100km/h）

Fig.9 High-speed photography in ejection test at the rate of 1100km/h

## 3 弹射性能对比分析

### 3.1 越垂尾性能

座椅弹射出舱后，为保证人－椅系统弹射出舱，GJB1800A—2007《弹射座椅型乘员应急离机救生系统通用规范》[8] 中规定座椅越垂尾性能为："在最大动压条件下，人－椅系统重心的弹射轨迹与飞机垂尾之间的最小距离不得小于 1.2m"。根据两级弹射筒和三级弹射筒的弹道特性，对越垂尾的性能进行了仿真计算，结果见表 3 [9]。仿真数据表明两级弹射筒较三级弹射筒，越垂尾性能稍差，但也能符

合设计规范的要求；在仅一级动力工作越垂尾相比，两级弹射筒差于三级弹射筒。

表 3 两级弹射筒与三级弹射筒越垂尾性能

Table 3 Performance of flew over vertical tail total between two-stage ejection gun and three-stage ejection seat

| 弹射筒类别 | 弹射质量 /kg | 重心与垂尾最小距离 /m | 仅弹射筒工作能越过垂尾的最大飞行表速 /（km/h） |
|---|---|---|---|
| 两级弹射筒 | 205 | 4.081 | 700 |
| | 221 | 4.083 | 730 |
| 三级弹射筒 | 205 | 4.602 | 800 |
| | 221 | 4.603 | 840 |

### 3.2 最低安全高度对比

美军标 MIL-S-18471F（AS）为了评估弹射座椅的救生性能，给出了座椅在 22 种状态下的最低安全高度（座椅从启动弹射至完成救生所需的最小安全高度）。通过性能仿真计算将两级弹射筒座椅与三级弹射筒座椅进行对比，结果见表 4[10]。仿真结果表明：两级弹射筒与三级弹射筒座椅救生性能相当，均能满足 22 种状态中的 16 种。滚转角 45° 内（向上弹射时），三级弹射筒座椅性能略优；滚转角超过 90° 后，两级弹射筒座椅性能占优。

表 4 两级弹射筒座椅与三级弹射筒座椅最低安全高度

Table 4 Lowest life-saving height between two-stage ejection gun and three-stage ejection seat

| 序号 | 救生系统启动时飞机状态 | | | | 最低安全高度 /m | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 速度 /（km/h） | 俯冲角 /（°） | 下沉率 /（m/s） | 横滚角 /（°） | 军标规定值 | 两级弹射筒座椅所需高度 | 三级弹射筒座椅所需高度 |
| 1 | 185.2 | 0 | 12.20 | 0 | 6.1 | 1.4 | 1.4 |
| 2 | 185.2 | 0 | 25.40 | 0 | 12.2 | 9.5 | 5.2 |
| 3 | 92.6 | 0 | 6.10 | 30 | 6.1 | 0.4 | 0 |
| 4 | 92.6 | 0 | 10.16 | 30 | 7.6 | 1.2 | 1.1 |
| 5 | 185.2 | 0 | 15.24 | 30 | 9.1 | 2.4 | 2.4 |
| 6 | 185.2 | 0 | 22.86 | 30 | 13.7 | 10.8 | 4.8 |
| 7 | 185.2 | 0 | 10.16 | 45 | 6.1 | 1.4 | 1.4 |
| 8 | 185.2 | 0 | 25.40 | 45 | 18.3 | 19.2 | 16.7 |
| 9 | 185.2 | 0 | 10.16 | 90 | 21.3 | 21.1 | 30.9 |
| 10 | 185.2 | 0 | 25.40 | 90 | 36.6 | 40 ★ | 54.4 ★ |
| 11 | 240.8 | 0 | 0 | 120 | 24.4 | 30.2 ★ | 39.1 ★ |
| 12 | 240.8 | 0 | 0 | 150 | 41.1 | 45.7 ★ | 57.8 ★ |
| 13 | 240.8 | 0 | 0 | 180 | 44.2 | 57.3 ★ | 64.6 ★ |
| 14 | 240.8 | 5 | 6.10 | 0 | 4.6 | 1.4 | 1.4 |
| 15 | 240.8 | 10 | 10.16 | 0 | 6.1 | 3.9 | 4.1 |
| 16 | 240.8 | 15 | 15.24 | 0 | 9.1 | 17.6 ★ | 13.5 ★ |
| 17 | 240.8 | 20 | 22.86 | 0 | 13.7 | 34.2 ★ | 35.9 ★ |
| 18 | 648.2 | 0 | 12.20 | 0 | 6.1 | 1.4 | 1.4 |
| 19 | 1111.2 | 0 | 12.20 | 0 | 6.1 | 1.4 | 1.4 |
| 20 | 833.4 | 30 | 0 | 0 | 152.4 | 126.1 | 138.4 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 92.6 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0.7 | 0.9 |

注：“★”表示为不满足 MIL-S-18471F（AS）要求的状态

## 4 结论

两级弹射筒与三级弹射筒相比，弹射行程缩短、出舱初速降低、出舱时间缩减。通过对比座椅出舱过程和弹射轨迹可以得出：

（1）两级弹射筒座椅的出舱过程受载和出舱姿态较三级弹射筒有一定改善。

（2）两级弹射筒对座椅的空速信号采集和救生性能未产生明显影响。

（3）两级弹射筒越垂尾性能低于三级弹射筒。

## 参考文献


[1] 田莹 .TST8-SY-20 某型弹射筒试验报告 [R]. 襄阳：中国航空救生研究所，2017.
Tian Ying.TST8-SY-20 Test report of some type ejection gun [R]. Xiangyang：China Aviation Life-Support Research Institute，2017.（in Chinese）

[2] 陈德华 .CN-960 某弹射座椅大迎角大侧滑角高速测力试验研究报告 [R]. 绵阳：中国人民解放军第二十九试验训练基地，1996.
Chen Dehua. CN-960 Force test research report of some type ejection seat in large angle-of-attack and large sideslip-angle at high speed [R].Mianyang：The 29th Experimental Training Base of the Chinese People’s Liberation Army，1996.（in Chinese）

[3] 张春雷 .TY5G-SY-34 某火箭弹射座椅弹射试验报告 [R]. 襄阳：中国航空救生研究所，2014.
Zhang Chunlei. TY5G-SY-34 Ejection test report of some type ejection seat [R]. Xiangyang：China Aviation Life-Support Research Institutee，2014.（in Chinese）

[4] 齐晓 .TY5J-SY-21 某火箭弹射座椅弹射试验光测报告 [R]. 襄阳：中国航空救生研究所，2017.
Qi Xiao. TY5J-SY-21 Ejection photography test report of some type ejection seat [R]. Xiangyang：China Aviation Life-Support Research Institutee，2017.（in Chinese）

[5] 中国航空救生研究所 . GJB 4049—2000 飞机应急离机系统通用规范 [S]. 北京：国防科工委军标出版发行部，2000.
China Aviation Life-Support Research Institutee. GJB 4049—2000 General Specification for aircraft emergency escape system [S].Beijing：Military Standard Press of Commission of Science Technology and Industry for National Defense，2000.（in Chinese）

[6] 李辉 .TY5C-JB-5 某火箭弹射座椅空速感受系统修正报告 [R]. 襄阳：中国航空救生研究所，2012.
Li Hui. TY5C-JB-5 Pitot tube modified test report of some type ejection seat [R]. Xiangyang：China Aviation Life-Support Research Institutee，2012.（in Chinese）

[7] 李磊子 .TY5BE-JS-10 某火箭弹射座椅总静压仿真计算报告 [R]. 襄阳：中国航空救生研究所，2016.
Li Leizi. TYBE-JS-10 Simulated calculation report of Total and Static Pressure for some type ejection seat [R]. Xiangyang：China Aviation Life-Support Research Institutee，2016.（in Chinese）

[8] 刘中昊 .TY5J-SY-15 某火箭弹射座椅弹射试验报告 [R]. 襄阳：中国航空救生研究所，2017.
Liu Zhonghao. TY5J-SY-15 Ejection test report of some type ejection seat [R]. Xiangyang：China Aviation Life-Support Research Institutee，2017.（in Chinese）

[9] 航宇救生装备有限公司 . GJB 1800A—2007 弹射座椅型乘员应急离机救生系统通用规范 [S]. 北京：总装备部军标发行部，2007.
AVIC Aerospace Life-support industries.，Ltd. GJB 1800A—2007 General specification for aircrew emergency escape ejection seat type [S]. Beijing：General Armament Department Military Standard Publishing Department，2007.（in Chinese）

[10] 吴亮 .TY5BE-JS-7 某火箭弹射座椅性能仿真计算报告 [R]. 襄阳：中国航空救生研究所，2016.
Wu Liang. TY5BE-JS-7 Simulated calculation report of escape performance for some type ejection seat [R]. Xiangyang：China Aviation Life-Support Research Institutee，2016.（in Chinese）


## 作者简介


冯星（1986- ）男，硕士，高级工程师。主要研究方向：弹射救生技术研究。

Tel：0710-3102052

E-mail：262882022@qq.com

谭率（1974- ）男，硕士，研究员。主要研究方向：弹射救生技术研究。

Tel：0710-3101138

E-mail：13986384308@139.com

# Comparative Analyzing Performance Between the Two-stage Ejection Gun and Three-stage Ejection Seat

Feng Xing*, Tan Shuai

*AVIC Aerospace Life-support Industries, Ltd., Xiangyang 441003, China*

**Abstract:** As the first-stage ejection power of the rocket ejection-seat, the ejection gun provides a certain initial speed for the man-seat system to be escaped from the cockpit. The two-stage ejection gun that cancelled the medium ejection gun has been used to replace the three-stage ejection. It shortens the stroke of the ejection gun, decelerates the initial speed, and shortens seat tipping-off time, which has effected on the seat tipping-off process and safe escape performance. This paper contrastive analyzes the three-stage and two-stage ejection guns on the characteristics of load, attitude, total pressure data collection and seat safe escape performance during tipping-off. Comprehensive analyzing the test data and simulation results, we found that the two-stage ejection gun is better on the load, attitude tipping-off compared to the three-stage ejection.

**Key Words:** ejection gun; rocket ejection-seat; tipping-off; escape performance; minimum safe escape altitude

**Received:** 2018-10-14; **Revised:** 2018-11-10; **Accepted:** 2018-11-25

***Corresponding author.Tel.:** 0710-3102052 **E-mail:** 262882022@qq.com