

弹射过程人椅系统动态质量特性的建模与分析



黄可义¹, 郁嘉¹, 黄守刚², 林贵平¹

1. 北京航空航天大学, 北京 100191

2. 航空工业航空救生装备有限公司, 湖北 襄阳 441000

摘要:人椅系统的质量特性是弹射座椅轨迹和姿态控制精度的重要影响因素。由于缺乏动态质量特性仿真模型,现阶段采用静态参数设计的弹射座椅控制规律可能在实际应用中出现偏差。本文在弹射座椅六自由度运动模型的基础上,考虑火箭包工作质量变化、人体脊柱压缩、座椅座垫压缩和人体头颈部转动等影响因素,建立了弹射过程人椅系统动态质量特性的计算模型。通过对三个典型工况计算结果的分析,说明了计算模型的合理性;最后分别采用动态、静态质量特性模型对弹射过程轨迹姿态进行仿真,并分析了两模型在救生效果上的差异性。本文建立的模型可以为后续弹射座椅控制规律的精细化设计提供借鉴。

关键词:弹射座椅; 弹射救生; 动态质量特性; 重心; 转动惯量

中图分类号: V244

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.03.011

作为战斗机、轰炸机和教练机的应急离机和应急救生装置,弹射座椅的运动轨迹姿态直接关系到飞行员的逃生成功率^[1],因此需要考虑诸多因素,以提高其性能指标。除弹射座椅的动力参数外,人椅系统的重心、转动惯量等质量特性也会影响火箭包和姿态火箭的工作效果,因此弹射座椅控制规律的设计必须以精确的人椅系统质量特性为依据。目前,国内外已经建立了人椅系统重心位置和惯性张量的测量与计算方法。吴铭等^[2-3]对弹射座椅与飞行员系统的重心分布规律进行了理论研究,建立了人椅系统组合重心的高效测量方法。邱义芬等^[4]提出了采用三维模型计算弹射座椅惯性矩和惯性积的简化方法,并成功应用于地面弹射试验。美国 Albery 等^[5]也开发了测量飞行员重心和转动惯量的设备,其收集的数据用于改进美国空军、海军弹射座椅的运动轨迹模型。此外,孙明照等^[6]还将人椅系统重心与飞行员的身高体重进行回归,给出了静态质量特性参数的回归方程。现有弹射座椅的多模态控制普遍采用静态质量特性参数进行设计^[7],这种方式虽然简单易行,但是其忽略了弹射过程中人椅系统质量特性的动态变化,可能导致实际弹射轨迹与计算结果出现明显

偏差。

为了提高轨迹姿态控制精度,近几年航空航天领域的许多研究开始关注动态质量特性^[8-9]。具体到弹射座椅,其工作瞬间存在很大的过载,可以引起人体脊柱压缩^[10]、座椅座垫压缩,以及人体的头颈部移动^[11-12]。此外,火箭包质量也在工作中不断减少,以上因素都会导致人椅系统的质量特性发生变化。然而,相关文献建立的人椅系统动力学模型主要用于评估座椅舒适性和不同弹射载荷下乘员的身体损伤^[13-14],尚没有完整的弹射过程动态质量特性计算模型^[15],因此有必要结合实际需求开展建模分析。

本文以 HTY-5 型弹射座椅的数学模型为基础建立弹射过程人椅系统动态质量特性的计算模型,并结合地面静止弹射工况、450km/h 和 850km/h 平飞弹射工况对模型的计算结果进行分析,最后对比动态、静态质量特性模型计算得到弹射轨迹和姿态差异。本文对人椅系统动态质量特性的建模分析将有助于提高弹射座椅控制规律的精度。

1 动态质量特性计算模型

在出舱和自由飞阶段,人椅系统质量特性的变化主要

收稿日期: 2023-09-07; 退修日期: 2024-01-03; 录用日期: 2024-02-05

基金项目: 航空科学基金(20182951013)

引用格式: Huang Keyi, Yu Jia, Huang Shougang, et al. Modeling and analysis of the dynamic mass characteristics of the pilot-seat system during ejection process[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(03): 94-102. 黄可义, 郁嘉, 黄守刚, 等. 弹射过程人椅系统动态质量特性的建模与分析[J]. 航空科学技术, 2024, 35(03): 94-102.

由火箭包工作质量变化、人体脊柱压缩、座椅座垫压缩以及人体头颈部转动等因素造成。本文对这些因素分别进行分析,给出其简化计算模型。之后将弹射座椅和飞行员的重心、惯性张量进行合成,得到动态变化的人椅系统质量特性计算模型。

人椅系统质量特性的测量坐标系如图1所示。其中, $OXYZ$ 为重心测量坐标系,原点 O 为滑轨上端点, Y 轴平行于弹射轴线指向下, X 轴垂直于 Y 轴指向前。 $O_b X_b Y_b Z_b$ 为体轴坐标系,用于计算转动惯量。其原点位于人椅系统重心, Y_b 轴平行于弹射轴线向上, X_b 轴垂直于 Y_b 轴指向座椅的前方。 Z 轴和 Z_b 轴根据右手定则确定。

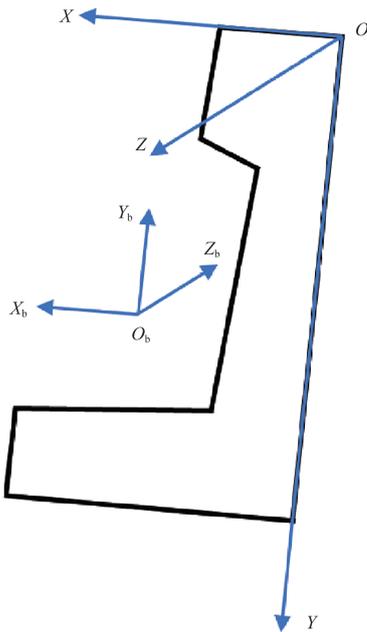


图1 人椅系统质量特性测量坐标系

Fig.1 Coordinate system for measuring the mass characteristics of pilot-seat system

1.1 火箭包工作质量变化引起的重心变化

当弹射座椅的火箭包工作时,火箭内的燃料不断减少,人椅系统的重心位置也会随之发生变化。假设工作时间内燃料均匀消耗,则火箭包质量 m_r 的计算公式为

$$m_r = \begin{cases} m_{r,\text{total}}, & t \leq t_1 \\ m_{r,\text{total}} - m_{r,\text{powder}}(t - t_1), & t_1 < t < t_2 \\ m_{r,\text{total}} - m_{r,\text{powder}}, & t \geq t_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $m_{r,\text{total}}$ 为两侧火箭包总质量; $m_{r,\text{powder}}$ 为火箭的总装药量;单根火箭含火药总重量(质量)为4.3kg,其中火药质量为1.49kg; t_1 为火箭包点火时间; t_2 为火箭包工作结束时间。将火箭包与座椅其他部分的重心合成,可得弹射座椅

重心计算公式

$$\begin{bmatrix} x_{es} \\ y_{es} \\ z_{es} \end{bmatrix} = \frac{1}{m_s + m_r} \left\{ m_s \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} + m_r \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} \right\} \quad (2)$$

式中, m_s 为弹射座椅除火箭包以外的质量。

1.2 人体脊柱压缩引起的重心变化

飞行员在弹射过程中受到向上的过载,会对脊柱产生压缩,从而使人体的重心位置下移。参考动态响应指数的定义^[15],将人体上半身看作具有弹性和阻尼的力学模型,可由式(3)计算人体的脊柱压缩量

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{d\delta}{dt} + \omega_n^2\delta = a(t) \quad (3)$$

式中, δ 为人体脊柱压缩量; $a(t)$ 为座椅椅盆加速度在 t 时刻的取值; ω_n 为人体脊柱模型的自然频率,取值为52.9rad/s; ζ 为人体脊柱模型的阻尼比,取值为0.225。当与座椅椅背平行方向的加速度已知时,即可按式(3)求出人体脊柱压缩量,又因为人体上半身重量约占体重的2/3,所以由脊柱压缩引起的人体重心变化量 $\Delta y_1 = 2\delta/3$ 。

1.3 座垫压缩引起的重心变化

在弹射过程中,弹射座椅的座垫受到飞行员重力和惯性的作用会出现变形,使得人重心位置整体下降。为了确定不同过载作用下由座垫压缩引起的重心变化量,本文参照GJB 964—1990整理了不同受力条件下座垫的变形比,见表1。

表1 不同受力条件下座垫变形特性

Table 1 Seat cushion deformation characteristics under different loads

受力/N	176	265	353	578	735	≥804
变形比/%	25	50	65	75	80	85

在此基础上,采用二次曲线对座垫变形比进行拟合并使其通过原点,可得座垫变形量的简化计算公式

$$\begin{cases} F = m_p(g + a) \\ \Delta y_2 = (-0.00011F^2 + 0.2F)d_c \end{cases} \quad (4)$$

式中, Δy_2 为座垫变形量; F 为飞行员受到的惯性力; d_c 为座垫厚度,按国军标取为15mm; m_p 为飞行员的质量。

1.4 人体头颈部转动引起的重心变化

受弹射过载影响,飞行员会不自主地低头弯腰。由于本文研究对象有强制肩带拉紧机构,因此主要考虑头颈部转动引起的重心变化。将弹射过载与飞行员头颈部活动角度相联系,可建立含阻尼项的低头运动方程

$$J_h \ddot{\phi}_h + c \dot{\phi}_h + k \phi_h = \sum_i M_{Fi}(t) \quad (5)$$

式中, J_h 为飞行员头部绕颈椎运动的转动惯量, 取值为 $0.1575\text{kg}\cdot\text{m}^2$; $c\dot{\varphi}_h$ 为转动过程的阻尼, c 取值为 $2.6\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s})/\text{rad}$; k 为头颈部转动的刚度, 取值为 $0.5\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$; φ_h 为头部转动角度, 低头为正; $M_{F_i}(t)$ 为某时刻人椅系统上的作用力 F_i 引起的低头力矩, 考虑的作用力包括气动力、弹射筒推力和火箭包推力等。

由于 HTY-5 型弹射座椅的地面试验采用刚性假人, 无法追踪低头运动姿态, 因此本文参照参考文献[12]给出的弹射出舱阶段头颈部转动过程对低头运动模型进行验证。如图2所示, 黑色曲线表示弹射加速度, 红色曲线表示低头角度。其中, 在 50ms、80ms、120ms、150ms 时刻本文模型计算结果均与参考文献给出的头颈部骨骼倾角相符。

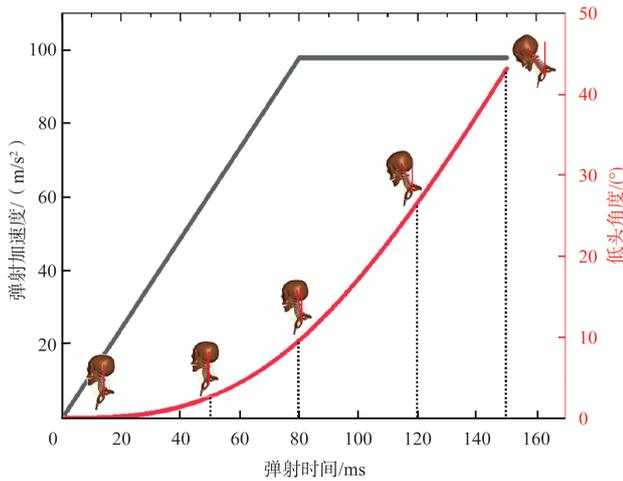


图2 头颈部转动模型的验证

Fig.2 Verification of head and neck rotation model

将飞行员头部转动角度代入式(6)中, 可求得由头颈部转动引起的人体重心变化

$$\begin{cases} \Delta x_3 = m_h \cdot l_h \cdot \sin(\varphi_h) / m_p \\ \Delta y_3 = m_h \cdot l_h \cdot [1 - \cos(\varphi_h)] / m_p \end{cases} \quad (6)$$

式中, m_h 为飞行员头部(含头盔)的质量, 其中头部质量取为 4.7kg , 通用头盔质量为 1.2kg ; l_h 为飞行员头部重心到颈部的距离, 取 0.2m 。

1.5 动态质量特性的合成

以上述4个重心影响因素的计算模型为基础, 按质量加权计算人椅系统的整体重心, 并根据平行轴定理计算惯性张量。重心合成公式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{m_{es} + m_p} \left\{ m_{es} \begin{bmatrix} x_{es} \\ y_{es} \\ z_{es} \end{bmatrix} + m_p \begin{bmatrix} x_p + \Delta x_3 \\ y_p + \sum_{i=1}^3 \Delta y_i \\ z_p \end{bmatrix} \right\} \quad (7)$$

人椅系统质量惯性矩的合成公式为

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{x,es} + I_{x,p} \\ I_{y,es} + I_{y,p} \\ I_{z,es} + I_{z,p} \end{bmatrix} + m_{es} \cdot \begin{bmatrix} (y - y_{es})^2 + (z - z_{es})^2 \\ (z - z_{es})^2 + (x - x_{es})^2 \\ (x - x_{es})^2 + (y - y_{es})^2 \end{bmatrix} + m_p \cdot \begin{bmatrix} (y - y_p)^2 + (z - z_p)^2 \\ (z - z_p)^2 + (x - x_p)^2 \\ (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

人椅系统质量惯性积的合成公式为

$$\begin{bmatrix} I_{xy} \\ I_{yz} \\ I_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xy,es} + I_{xy,p} \\ I_{yz,es} + I_{yz,p} \\ I_{zx,es} + I_{zx,p} \end{bmatrix} + m_{ty} \cdot \begin{bmatrix} (x - x_{es}) \cdot (y - y_{es}) \\ (y - y_{es}) \cdot (z - z_{es}) \\ (z - z_{es}) \cdot (x - x_{es}) \end{bmatrix} + m_p \cdot \begin{bmatrix} (x - x_p) \cdot (y - y_p) \\ (y - y_p) \cdot (z - z_p) \\ (z - z_p) \cdot (x - x_p) \end{bmatrix} \quad (9)$$

将上述人椅系统动态质量特性计算模型与 HTY-5 型弹射座椅的六自由度运动模型^[16]相结合, 在 MATLAB 软件中编程开发了可用于不同工况下动态质量特性参数迭代计算的程序, 其主要计算流程如图3所示, 迭代步长取为 1ms 。

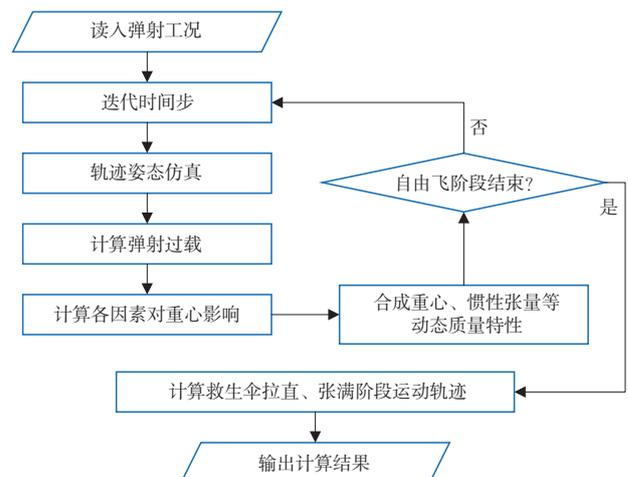


图3 动态质量特性计算流程

Fig.3 Calculation procedure of the dynamic mass characteristics

2 动态质量特性仿真结果与分析

以动态质量特性计算模型为基础, 本文选取三个典型工况开展仿真并对结果进行分析。这三个工况分别是地面静止弹射工况、 $450\text{km}/\text{h}$ 和 $850\text{km}/\text{h}$ 平飞弹射工况。

2.1 不同工况的动态质量特性变化

在三个不同仿真工况下, 首先采用 50% 人体数据计算人椅系统重心 x 、 y 坐标在弹射过程中的变化, 分别如图4、图5所示。其中, 重心 x 坐标自弹射启动后呈现明显增大的

趋势,变化幅度约0.007m。出舱阶段结束后,对于低速弹射工况,重心 x 坐标逐渐下降;对于高速弹射工况,重心 x 坐标仍有小幅增长。重心 y 坐标的变化范围较大,对于三个典型工况,重心 y 坐标波动范围均可达0.02m。座椅出舱前,不同工况对应的重心坐标基本一致;座椅出舱后,由于受到气动力的作用,不同工况下重心坐标的动态变化出现明显差异,其中高速工况波动更明显。由于弹射座椅近似为对称结构,因此重心 z 坐标变化较小,不作具体讨论。

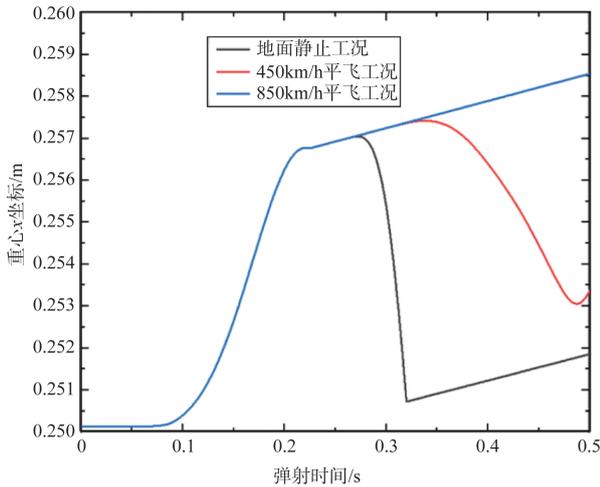


图4 重心 x 坐标的变化

Fig.4 Change of the x coordinate of center of gravity

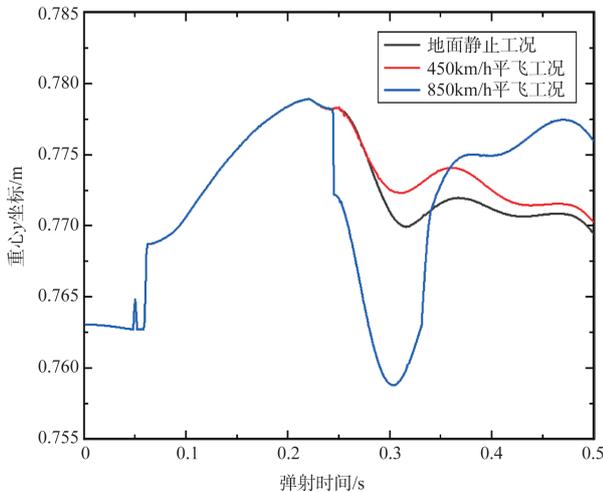


图5 重心 y 坐标的变化

Fig.5 Change of the y coordinate of center of gravity

为了分析采用不同人体百分位数据对人椅系统重心坐标仿真结果造成的差异,将不同工况、不同人体百分位对应的出舱和自由飞阶段人椅系统重心坐标计算结果进行整理,列于表2。

随着人体百分位的增加,在图1坐标系下的人椅系统

表2 不同百分位人椅系统重心坐标仿真结果

Table 2 Center of gravity simulation results of different percentiles

工况	重心坐标分量/m		人体百分位		
			5%	50%	95%
地面静止	重心 x 坐标	最大值	0.237	0.257	0.277
		最小值	0.230	0.250	0.271
		平均值	0.232	0.253	0.273
	重心 y 坐标	最大值	0.749	0.779	0.814
		最小值	0.734	0.763	0.796
		平均值	0.742	0.772	0.806
450km/h平飞	重心 x 坐标	最大值	0.237	0.257	0.278
		最小值	0.230	0.250	0.271
		平均值	0.234	0.254	0.275
	重心 y 坐标	最大值	0.749	0.779	0.814
		最小值	0.734	0.763	0.796
		平均值	0.743	0.772	0.807
850km/h平飞	重心 x 坐标	最大值	0.247	0.259	0.279
		最小值	0.230	0.250	0.271
		平均值	0.237	0.257	0.278
	重心 y 坐标	最大值	0.753	0.779	0.814
		最小值	0.731	0.759	0.792
		平均值	0.742	0.769	0.803

重心 x 和 y 坐标也逐渐增大。其中,95%人体对应的重心 x 坐标比5%人体大0.02m左右,重心 y 坐标大0.03m左右,其主要原因是人体重心比座椅重心更偏向图1的 X 、 Y 轴正方向。

此外,弹射启动时飞机速度越大,重心坐标的动态变化幅度也越明显。如重心 y 坐标在弹射速度450km/h以下时变化幅度为0.015~0.018m,而在850km/h的弹射速度下变化幅度达到0.020~0.022m。这说明高速弹射时的气动力对人椅系统重心坐标的影响更加显著。

采用50%人体数据,各工况对应的人椅系统质量惯性矩变化曲线如图6所示。由于质量惯性矩是根据平行轴定理合成的,因此其动态变化规律与重心变化存在一定关联。三个质量惯性矩中, I_x 和 I_y 的变化范围接近0.4kg·m²,而 I_z 的变化范围相对较大,接近0.6kg·m²。

为了分析不同人体百分位数据对人椅系统质量惯性矩仿真结果造成的差异,将不同工况、不同人体百分位对应的出舱和自由飞阶段人椅系统惯性矩进行整理,列于表3。

随着人体重量的增加,人椅系统的质量惯性矩也逐渐

表3 不同百分位人椅系统惯性矩仿真结果

Table 3 Mass moment of inertia simulation results of different percentiles

工况	惯性矩参数/(kg·m ²)	人体百分位		
		5%	50%	95%
地面静止	I_x 平均值	23.69	26.38	29.63
	I_y 平均值	7.14	8.13	9.22
	I_z 平均值	25.63	29.07	33.17
450km/h 平飞	I_x 平均值	23.70	26.39	29.64
	I_y 平均值	7.22	8.22	9.31
	I_z 平均值	25.71	29.17	33.28
850km/h 平飞	I_x 平均值	23.70	26.38	29.59
	I_y 平均值	7.32	8.30	9.38
	I_z 平均值	25.82	29.24	33.30

增大。在不同工况下,惯性矩 I_x 在弹射出舱和自由飞阶段的平均值变化不大,波动范围在 $0.05\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 以内。但惯性矩 I_y 和 I_z 随弹射初始速度的变化很明显。例如,采用95%人体数据,地面静止弹射工况下 I_y 和 I_z 的平均值分别为 $9.22\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 和 $33.17\text{kg}\cdot\text{m}^2$,而850km/h平飞工况下, I_y 和 I_z 平均值已经增加到 $9.22\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 和 $33.17\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。这主要是因为重心 x 坐标随弹射初始速度的增加而有规律地增大,使得人椅系统绕 y 轴和 z 轴的惯量增加。

2.2 动态质量特性的主要影响因素分析

为了分析火箭包工作质量变化、人体脊柱压缩、座椅座垫压缩和人体头颈部转动等因素对动态质量特性的影响大小,将人椅系统重心坐标的总变化量拆分为各个影响因素的单独作用效果。应说明的是,本节均采用50%的计算数据以体现平均结果。

各因素造成的人椅系统重心 x 坐标变化曲线如图7所示。影响重心 x 坐标的主要因素是火箭包工作质量变化和人体头颈部转动,二者都会使人椅系统重心向 X 轴正方向移动。其中,火箭包中火药的燃烧速率假设为定值,因此其造成的重心变化表现为一条直线;而人体头颈部转动造成的重心变化为曲线。弹射启动后,人椅系统在弹射筒推力的作用下沿滑轨加速运动,飞行员在惯性作用下低头,重心 x 坐标显著增大。但出舱阶段结束后,火箭包工作产生的推力在人体头部形成抬头力矩,因此重心 x 坐标有减小的趋势。不过随着弹射速度的增加,出舱后的人椅系统在气动力作用下明显减速,由于惯性的影响,人体会出现明显的低头趋势,所以高速弹射工况下人体头颈部转动造成的重心 x 坐标增加量维持在高位。人椅系统重心 y

坐标在各因素作用下的变化如图8所示。

重心 y 坐标的主要影响因素为人体脊柱压缩量和座

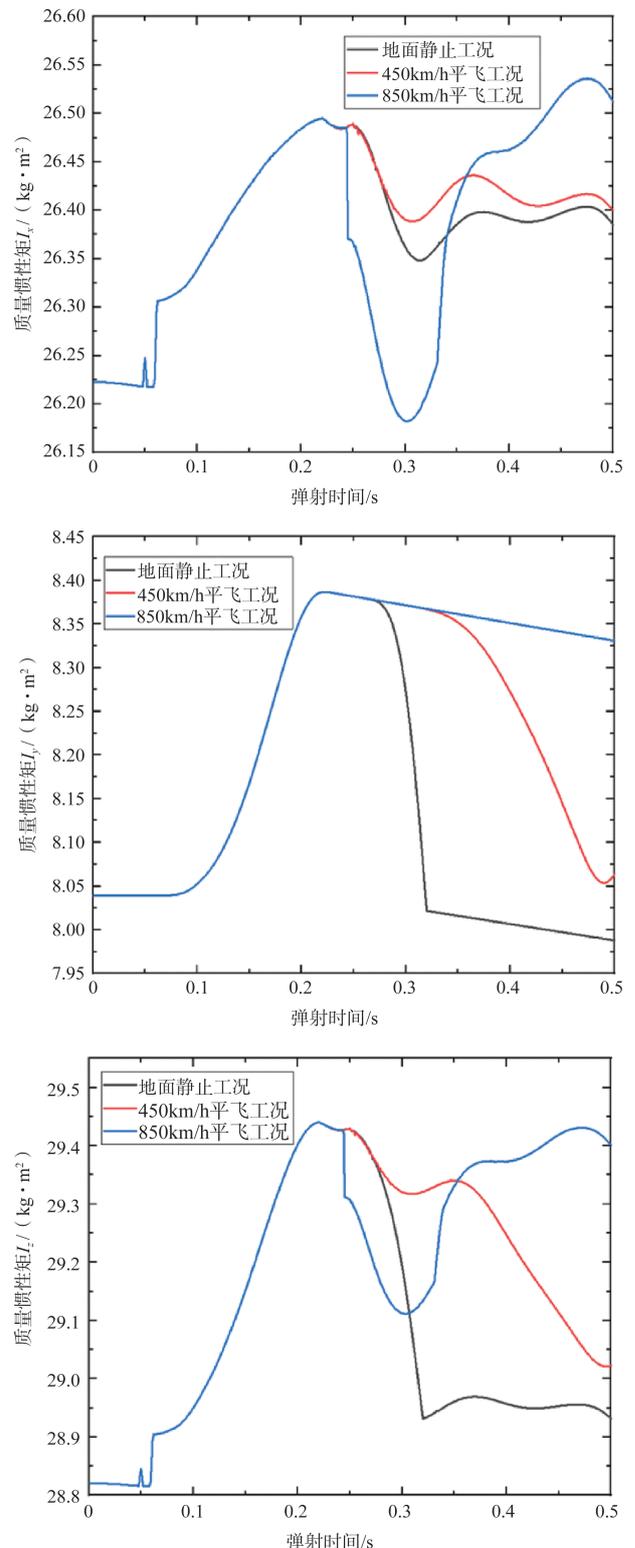


图6 质量惯性矩在弹射过程中的变化

Fig.6 Change of the mass moment of inertia during ejection

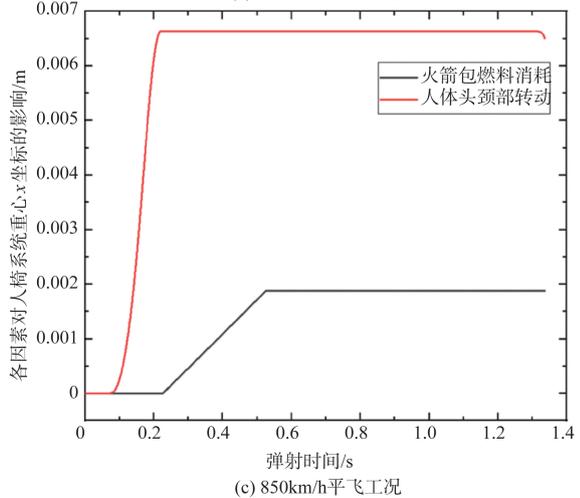
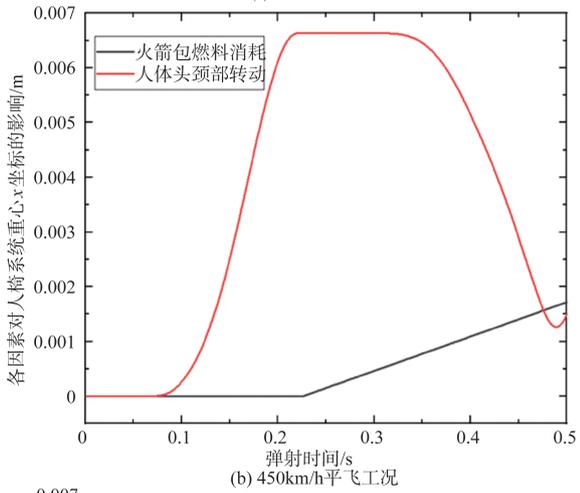
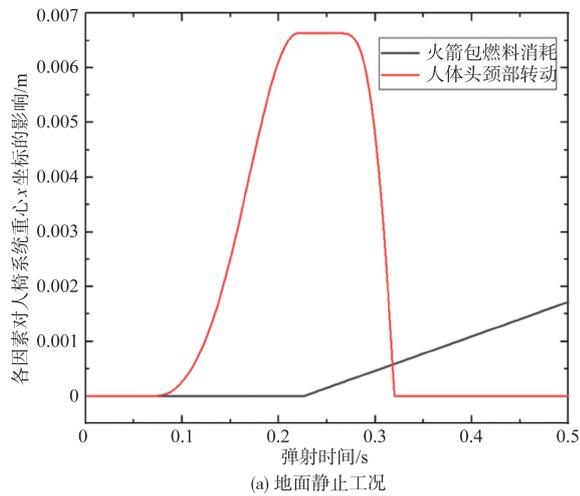


图7 各因素对重心x坐标的影响

Fig.7 The influence of various factors on the x coordinate of the center of gravity

椅座垫压缩量。人体脊柱压缩和座椅座垫压缩都与弹射过载密切相关。火箭包点火工作会产生沿人体脊柱方向的推力,造成明显的脊柱压缩,同时人体在惯性力作用下

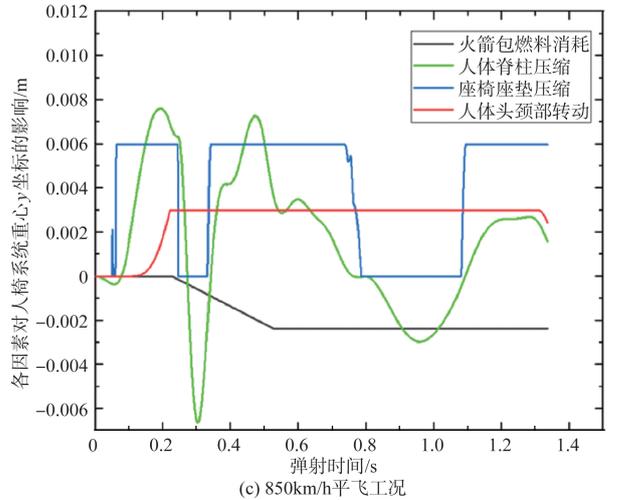
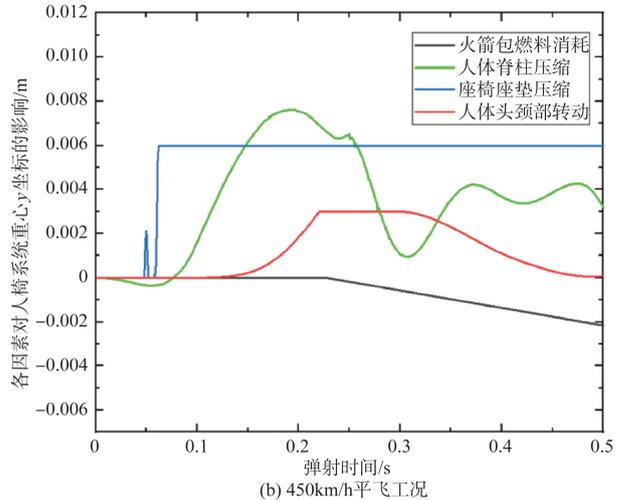
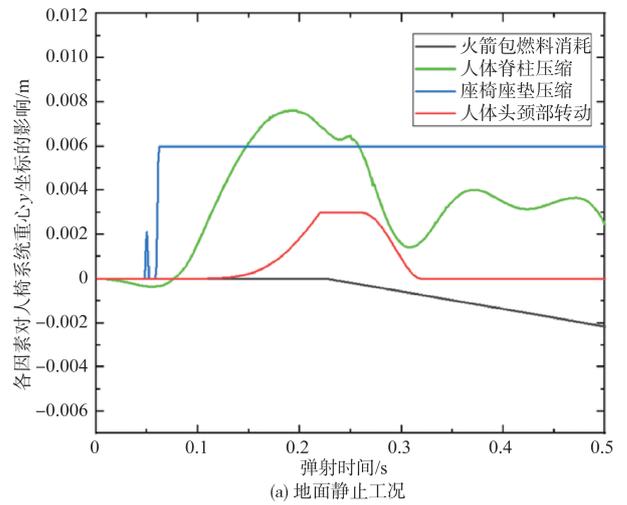


图8 各因素对重心y坐标的影响

Fig.8 The influence of various factors on the y coordinate of the center of gravity

挤压座垫,二者的综合作用使重心向下移动,即y坐标增大。当火箭包推力减小时,人体脊柱复位,座垫回弹,y坐

标波动减小。

通过三个典型工况的仿真,分析了动态质量特性计算模型的作用效果,发现其基本符合实际情况,可以应用该模型开展弹射过程轨迹姿态仿真,并与采用静态质量特性参数得到的仿真结果进行对比。

3 动态-静态质量特性仿真结果对比

目前,弹射座椅的救生性能评估主要采用轨迹姿态仿真,其中设置的人椅系统重心和惯性张量均为定值。本文将动态质量特性模型嵌入弹射过程轨迹姿态仿真程序,对比分析采用动态参数计算的救生高度与静态参数仿真结果之间的差异。

3.1 动态-静态模型救生高度与姿态差异

以450km/h平飞弹射工况为例,分别采用静态和动态质量特性计算弹射过程中的轨迹姿态变化,得到弹射高度曲线如图9所示,人椅系统在自由飞阶段的俯仰角和天向速度曲线如图10所示。由图9可知,该工况下采用动态质量特性仿真得到的弹射轨迹高度略低于静态结果,救生伞张满高度相差约0.8m。

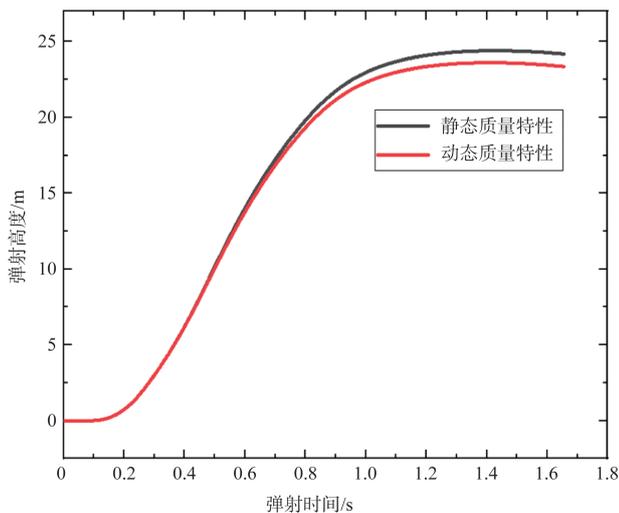


图9 动态/静态质量特性对应弹射高度

Fig.9 The ejection height corresponding to the dynamic/static mass characteristic

由图10可知,采用动态质量特性计算的座椅俯仰角在自由飞阶段(0.244s后)明显小于静态质量特性对应的俯仰角。分析其原因,弹射初始阶段动力装置产生的过载主要使人椅系统的重心向X、Y轴正方向移动,可能使自由飞阶段火箭包推力线偏离重心产生低头力矩,引起俯仰角的减小。俯仰角的变化使得火箭包推力偏离天空方向,因此采用动态质量特性计算得到的天向速度略小于静态质

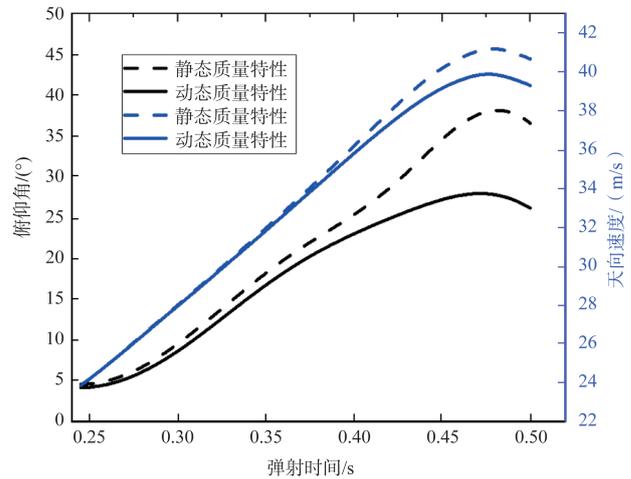


图10 动态/静态质量特性对应俯仰角和天向速度

Fig.10 Pitch angle and vertical velocity corresponding to the dynamic/static mass characteristic

量特性计算结果,进而导致弹射轨迹高度的下降。

3.2 可能的姿态修正方式

为抵消弹射过程中人椅系统重心变化可能造成的不利影响,可以考虑优化弹射座椅的火箭包推力线偏心距。

定义人椅系统自由飞阶段由重心变化引起的火箭包推力线偏心距为附加偏心距。当附加偏心距的作用为产生抬头力矩时取值为正,反之为负。本文计算了三个典型工况下由重心变化引起的附加偏心距,见表4。

表4 重心变化引起的附加偏心距

Table 4 Additional eccentricity caused by changes in center of gravity

工况	附加偏心距/mm		
	5%	50%	95%
地面静止弹射工况	-7.5	-8.6	-8.1
450km/h平飞	-10.7	-11.6	-11.4
850km/h平飞	-12.0	-11.5	-10.3

从表4数据可以看出,对于三个仿真工况,重心变化引起的附加偏心距在-7.5~-10mm范围内。可以考虑调整火箭包推力线偏心距的预留值,对由重心变化引起的附加偏心距进行修正。

后续还可以采用动态质量特性计算模型对更多工况开展轨迹姿态仿真,提出火箭包推力线偏心距的提前预留原则,以提高弹射座椅的轨迹姿态控制精度。

4 结束语

本文建立了弹射过程人椅系统动态质量特性的计算模

型,并结合三个工况的仿真结果分析了重心、质量惯性矩的动态变化规律及其主要影响因素。通过对比动态、静态质量特性在弹射轨迹姿态仿真中的差异,发现弹射过载可能使人椅系统的重心位置偏离火箭包推力线,可以考虑优化火箭包推力线偏心距预留值加以纠正。后续研究可以结合弹射试验数据对本文模型做适当修正,提出更加准确的弹射座椅动态质量特性提取模型,为精细化的弹射座椅控制规律设计奠定基础。

AST

参考文献

- [1] 周昊,宋亚丽,冯志杰,等.基于ADAMS的弹射座椅弹出舱姿态研究[J].航空科学技术,2021,32(2):66-73.
Zhou Hao, Song Yali, Feng Zhijie, et al. Research on ejection attitude of ejection seat based on ADAMS[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(2):66-73. (in Chinese)
- [2] 吴铭,王兴伟,张行,等.弹射座椅与飞行员组合重心分布的研究[J].航空学报,2004(5):460-464.
Wu Ming, Wang Xingwei, Zhang Xing, et al. Study on the distribution of combination cg of ejection seat and pilot[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2004(5):460-464. (in Chinese)
- [3] 王兴伟,吴铭,张行,等.弹射座椅与飞行员系统重心测量技术[J].北京航空航天大学学报,2005(1):17-20.
Wang Xingwei, Wu Ming, Zhang Xing, et al. Measure technology of the center of gravity of ejection seat-pilot system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(1): 17-20. (in Chinese)
- [4] 邱义芬,袁修干,楼正林,等.军用飞机弹射座椅惯量计算[J].工程图学学报,2003(2):74-77.
Qiu Yifen, Yuan Xiugan, Lou Zhenglin, et al. Inertia calculation of warplane ejection seat[J]. Journal of Engineering Graphics, 2003(2): 74-77. (in Chinese)
- [5] Albery C B, Schultz R B, Bjorn V S. Measurement of whole-body human centers of gravity and moments of inertia[J]. Safe Journal. 1998, 28(2): 78-88.
- [6] 孙明照,吴铭,苏迅,等.飞行员人体参数与人椅组合重心的回归分析研究[J].人类工效学,2005(2):23-25.
Sun Mingzhao, Wu Ming, Su Xun, et al. The regression analysis of pilot dimensions and combined gravity center of pilot-seat system[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2005(2): 23-25. (in Chinese)
- [7] 毛晓东,林贵平,郁嘉.弹射座椅不利姿态控制规律设计[J].北京航空航天大学学报,2016,42(3):426-434.
Mao Xiaodong, Lin Guiping, Yu Jia. Design of control law for ejection seat under adverse attitudes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(3): 426-434. (in Chinese)
- [8] 戴浩,李海泉,潘若刚.飞机动态质量特性分析方法研究与集成化软件工具开发[J].飞机设计,2019,39(3):23-26.
Dai Hao, Li Haiquan, Pan Ruogang. Study on the analysis methods of aircraft dynamical mass properties and integrated software development[J]. Aircraft Design, 2019, 39(3): 23-26. (in Chinese)
- [9] 李春华.航天器动态质量特性分析[J].航天器工程,2005,14(3):15-20.
Li Chunhua. Analysis of dynamic mass characteristics of spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2005, 14(3): 15-20. (in Chinese)
- [10] 王文军,余隋怀,初建杰,等.不同倾角弹射座椅对人体过载冲击力学分析[J].机械设计,2014,31(10):65-68.
Wang Wenjun, Yu Suihuai, Chu Jianjie, et al. Mechanics analysis of overload impact on human under different angle ejection seat[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(10): 65-68. (in Chinese)
- [11] 刘荣,姜南.头颈部防护装置对头颈部损伤的影响分析[J].航空科学技术,2022,33(11):84-89.
Liu Rong, Jiang Nan. Analysis on the effect of head and neck protection device on head and neck injury[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(11): 84-89. (in Chinese)
- [12] 刘春杰.高G载荷下飞行员紧急弹射时颈部动力学响应与损伤研究[D].天津:天津理工大学,2022.
Liu Chunjie. The study of dynamic response and injuries of pilot's neck during emergency ejection under high G loading [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [13] 王春洁,曾福明.弹射座椅动态舒适性与人椅动力学特性研究[J].北京航空航天大学学报,2004(4):375-378.
Wang Chunjie, Zeng Fuming. Research of human-seat dynamics model and ejection seat dynamic comfort[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004 (4): 375-378. (in Chinese)

- [14] Xiao Huiting, Wang Kejie, Liu Yongshou, et al. Nonlinear dynamic modeling and body injuries analysis of human/seat system under vertical impact[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2023, 44(1): 17-25.
- [15] 封文春. 航空应急救生系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2014. Feng Wenchun. Aviation emergency escape system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014.(in Chinese)
- [16] 郁嘉, 林贵平, 毛晓东. 弹射救生数值仿真及不利姿态下救生性能分析[J]. *航空学报*, 2010, 31(10): 1927-1932. Yu Jia, Lin Guiping, Mao Xiaodong. Numerical simulation of ejection seat and analysis of performance under adverse attitudes[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(10): 1927-1932. (in Chinese)

Modeling and Analysis of the Dynamic Mass Characteristics of the Pilot-seat System during Ejection Process

Huang Keyi¹, Yu Jia¹, Huang Shougang², Lin Guiping¹

1. *Beihang University, Beijing 100191, China*

2. *AVIC Aerospace Life-Support Industries, Co., Ltd., Xiangyang 441000, China*

Abstract: The mass characteristics of pilot-seat system is an important factor affecting the trajectory and attitude control accuracy of the ejection seat. Due to the lack of dynamic mass characteristic models, the control law of ejection seat designed with static parameters may cause trajectory and attitude deviation in practical applications. Based on the six degrees of freedom motion model of ejection seat, this paper integrated the effect of weight change of rocket package, compression of the human spine, compression of seat cushion and the head and neck rotation, and further established a calculation model of the dynamic mass characteristics of the pilot-seat system during the ejection process. By analyzing the calculation results of three typical conditions, the rationality of the calculation model was demonstrated. Finally, this paper compared the differences in lifesaving results caused by applying dynamic or static mass characteristics. The model established in this paper can provide reference for the refined design of ejection seat control laws in the future.

Key Words: ejection seats; ejection lifesaving; dynamic mass characteristics; center of gravity; moment of inertia

Received: 2023-09-07; **Revised:** 2024-01-03; **Accepted:** 2024-02-05

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20182951013)