

头颈部防护装置对头颈部损伤的影响分析



刘荣, 姜南

航空工业航宇救生装备有限公司 航空防护救生技术航空科技重点实验室, 湖北省 襄阳 441000

摘要: 弹射救生技术是国内外现阶段飞机失事后挽救飞行员生命的唯一途径, 飞机失事后, 弹射座椅可迅速弹射离机, 保障飞行员的生命安全。在弹射座椅配备和不配备头颈部防护装置的基础上, 通过测试按照装机状态坐于弹射座椅上的仿真假人在 850km/h 高速气流吹袭下的受力情况, 来对比计算有无头颈部防护装置下仿真假人头颈部的损伤指数。对比发现, 有头颈部防护装置可以有效降低仿真假人受到气流吹袭时头颈部的力、力矩和损伤指数, 对飞行员头颈部起到一定的保护作用, 同时该结果对后续头颈部防护装置的改进设计有一定的参考意义。

关键词: 弹射救生; 高速吹袭; 颈部损伤; 颈部防护; 防护装置

中图分类号: V244

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.11.012

弹射座椅被誉为蓝天上的“生命之舟”, 可在危急时刻应急离机^[1], 依靠座椅下的动力装置将飞行员弹出机舱^[2], 挽救飞行员的生命。随着飞机性能的不不断提升, 受到现役弹射座椅工作原理和飞行员头颈部生理结构的制约, 应急弹射时飞行员头颈部损伤的现象时有发生。尤其是在高速弹射出舱时, 飞行员的头颈部不仅受到高达 16~20g 的弹射载荷^[3-5], 还受到弹射座椅转矩^[6]和高速气流的吹袭。因头颈部为骨链性结构^[7], 易造成飞行员头颈部剧烈前后摔打、左右旋转扭动, 甚至导致死亡^[8-9], 有关统计发现, 重伤死亡率可高达 69%^[3,10]。为解决头颈部损伤过大的问题, 美国 ACES 5 弹射座椅采用了新型的被动式头颈防护装置, 即在头靠系统增加展开式防护装置, 以降低飞行员颈部受伤的风险。头颈部损伤问题已成为各国从事弹射救生科研工作者的研究重点之一, 判断弹射过程中飞行员颈部是否损伤及如何评估防护效果的好坏问题显得尤为重要。

本文通过分析对比在 850km/h 高速气流吹袭下, 有无颈部防护装置情况下仿真假人头颈部的力、力矩和颈部损伤判据值, 结果证明, 头颈部防护装置可以降低力、力矩和损伤判据值, 对飞行员头颈部有一定的保护作用。

1 头颈部损伤合格判据

2000 年前后, 美国国家公路运输安全管理局提出了用于量化评估汽车约束系统的 N_{ij} 颈部损伤判据^[11]; 2006 年, 美国海军某个专门研究弹射时头颈部潜在损伤的课题组, 提出了一套颈部损伤判据; 2015 年, Parr^[12]提出了一种基于上颈部损伤的多轴横向冲击的损伤标准。我国空军特色医学中心于 2021 年决定暂用《飞行员防护救生装备生理卫生学要求》规定的颈部损伤判据 (N_{ij} 、 x 轴的颈部力矩指数 (NMI_x) 和 z 轴的颈部力矩指数 (NMI_z)) 作为我国弹射救生颈部损伤判据, 来研究飞行员在弹射过程中的颈部损伤问题。

该生理卫生学要求利用 Hybrid III 型仿真颈椎测试的力、力矩数值计算颈部损伤指数进行评价, 颈部损伤指数包括 N_{ij} 、 NMI_x 和 NMI_z 。各方向解剖坐标系如图 1 所示, “+”和“-”代表方向, 下文中出现的方向均与此图一致。通过测试每发试验假人上颈部的六分量数据 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 和 M_z , 计算 N_{ij} 、 NMI_x 和 NMI_z 判据值来判断仿真假人头颈部是否损伤及损伤概率。美国空军生命周期管理中心要求满足的弹射颈部损伤为二级损伤概率 $AIS2+\leq 5\%$, 对应的上颈部 N_{ij} 、 NMI_x 和 NMI_z 耐限值均为 0.5, 损伤判据值小于规定的耐限值, 并不

收稿日期: 2022-03-18; 退修日期: 2022-04-10; 录用日期: 2022-08-07

基金项目: 航空科学基金(20182910002)

引用格式: 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. 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.

能说明飞行员头颈部完全不受损伤,只能说明飞行员受二级损伤的概率低于5%,这个概率在规定的范围内是可接受的^[1]。

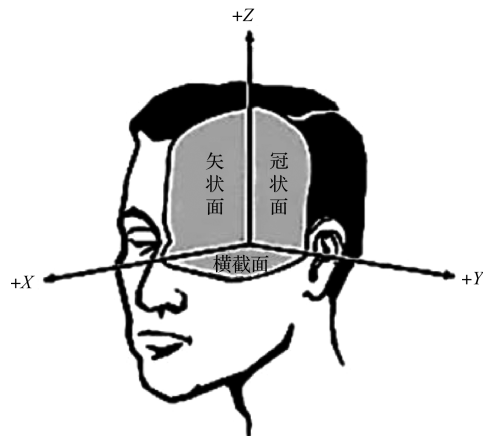


图1 解剖坐标系示意图

Fig.1 Anatomical coordinate system diagram

1.1 N_{ij} 判据

N_{ij} 采用力与力矩的耦合作用,颈部弯曲/延展力矩(M_y)的评估与颈部拉伸力/压缩力 F_z 相对应,计算公式如式(1)所示

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{z\text{crit}}} + \frac{M_y}{M_{y\text{crit}}} \quad (1)$$

式中: $F_{z\text{crit}}$ 和 $M_{y\text{crit}}$ 分别表示 F_z 和 M_y 的临界值,具体数值见表1。上颈部 N_{ij} 耐限值为0.5。

1.2 NMI_x 判据

颈部力矩指数 NMI_x 用于评估侧弯力矩 M_x ,计算公式如式(2)所示

$$NMI_x = \frac{M_x}{M_{x\text{LIM}}} \quad (2)$$

式中, $M_{x\text{LIM}}$ 为 M_x 的临界值,具体数值见表1。上颈部的 NMI_x 耐限值为0.5。

1.3 NMI_z 判据

颈部扭矩 M_z 用 NMI_z 来评估, NMI_z 计算公式如式(3)所示

$$NMI_z = \frac{M_z}{M_{z\text{LIM}}} \quad (3)$$

式中, $M_{z\text{LIM}}$ 为 M_z 的临界值,具体数值见表1。上颈部 NMI_z 耐限值为0.5。

表1 损伤判据计算所涉及的临界值

Table 1 The critical values involved in injury criteria calculations

判据	方向	临界值
NMI_x	侧弯力矩($\pm M_x$)	135N•m
N_{ij}	拉伸力($+F_z$)	6806N
	压缩力($-F_z$)	6160N
	弯曲力矩($+M_y$)	310N•m
	拉伸力矩($-M_y$)	135N•m
NMI_z	扭矩($\pm M_z$)	135N•m

2 试验数据处理及分析

本次高速气流吹袭试验的吹风速度为850km/h,使用Hybrid III仿真假人50%分位假人(简称假人),在有无防护装置条件下各两发进行试验。假人穿戴好防护服及头盔面罩,按装机状态坐在弹射座椅上,在假人的脖颈处安装传感器,得到假人脖颈处的受力情况。试验过程中850km/h维持约0.5s,根据试验测得的六分量数据及计算的损伤判据值判断损伤情况。下文中有无头颈部防护装置分别简称为有防护和无防护。

2.1 有无防护装置各方向力对比

第一发试验有无防护状态下各方向力对比如图2所示,第二发试验有无防护状态下各方向力对比如图3所示。

从图2和图3可以看出,两发无防护组的 F_x 均表现为先

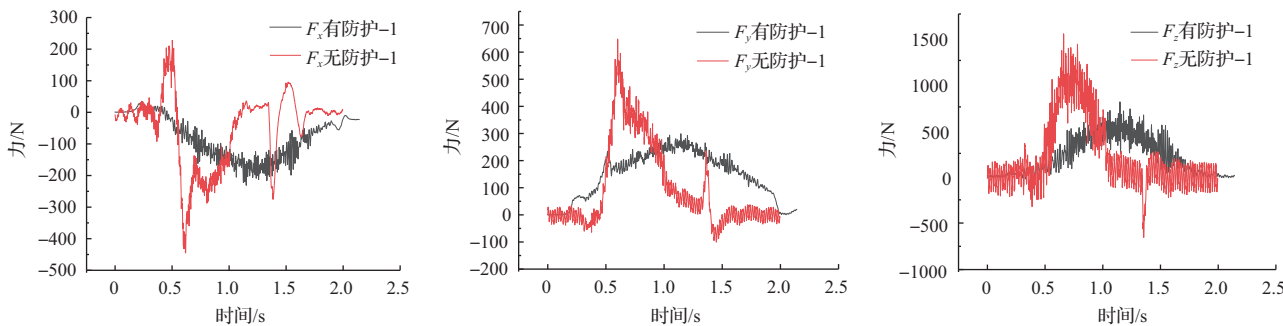


图2 第一发试验有无头颈部防护装置力的对比图

Fig.2 Comparison between force with and without head and neck protection device guard in first test

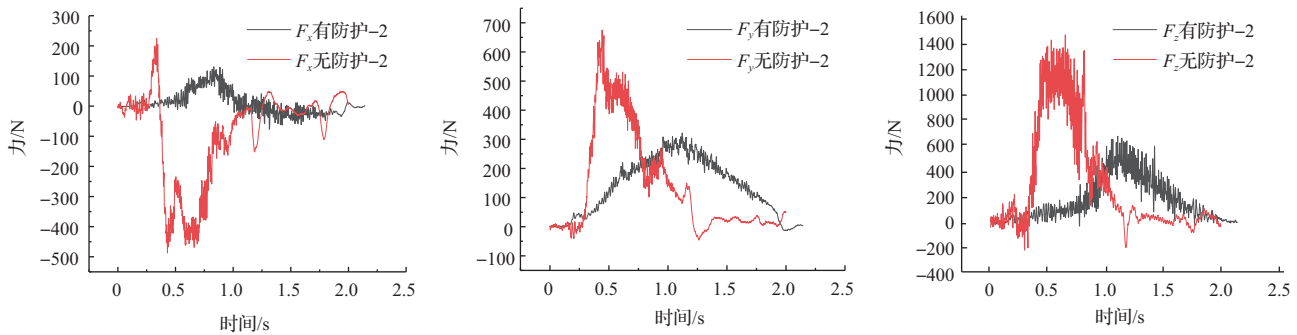


图3 第二发试验有无头颈部防护装置力的对比图

Fig.3 Comparison between force with and without head and neck protection device guard in second test

突然增大,后急剧减小,再缓慢增大到趋于稳定的过程,当头颈部的抵抗作用小于气动力,头颈部受到 $-F_x$ 的力,两发试验 x 方向所受力的最大值 $F_{x\max}$ 的均值为466N;而有防护组因为在头颈部提供辅助支撑,从而使得 F_x 方向受力减小,最大值出现时间延长,数据曲线整体降低,两发试验 $F_{x\max}$ 均值为181N,相比无防护组的值减小了285N。

无防护的 y 向受力 F_y 为先增大后减小再趋于稳定的过程,吹风刚开始,随着风速逐渐增大, F_y 也持续增大,两发试验 $F_{y\max}$ 的均值为661.5N;有防护组的 F_y 受到气动力后逐渐增大,数据增长较无防护组更加缓慢,且最大值出现时间延长,有防护组两发试验 $F_{y\max}$ 均值为310.5N,相比无防护组的值减小了351N。

无防护组的 F_z 整体表现为先增大后减小,结合 F_x 发现,此时假人头部向后,受到斜向上方的力, F_z 不断增大,两发试验 $F_{z\max}$ 均值为1493.5N,后逐渐减小;有防护组的 F_z 最大值出现时间延长,均值 $F_{z\max}$ 为731.5N,相比无防护组的值减小了762N。

2.2 有无防护装置各方向力矩对比

第一发试验有无防护状态下各方向力矩对比如图4所示,第二发试验有无防护状态下各方向力矩对比如图5

所示。

图5和图6为两发试验有无防护装置在 x 、 y 和 z 三个方向上所受力矩对比图。 M_x 为侧弯力矩,无防护组 M_x 数据呈先增大后减小趋势,且基本为“+”值,说明此时假人的头向右弯曲,最大值 $M_{x\max}$ 均值为30N·m; M_x 有防护组数据最值出现时间延长,且基本为“-”值,说明此时假人的头向左侧弯曲,最大值 $M_{x\max}$ 均值为18.5N·m,相比无防护组的值减小了11.5N·m。

M_y 为前后弯矩,“+”为低头力矩,“-”为抬头力矩。 M_y 无防护组在吹风初始阶段,头颈部有前后的振荡,后吹风速逐渐增大,且基本为“+”值,说明此时假人的头向前弯曲,假人对吹风有一定的抵抗作用,后期气动力过大,头颈部向后甩出,两发试验 M_y 最大值均值 $M_{y\max}$ 为20.5N·m; M_y 有防护数据组最值出现时间延长,最大值 $M_{y\max}$ 均值为14N·m,相比无防护组的值减小了6.5N·m。

M_z 为扭矩,“+”为向左扭,“-”为向右扭。无防护组假人在吹风初始阶段,随着风速不断增大,假人头部向左扭动,最大值 $M_{z\max}$ 均值为37N·m,后逐渐减小趋于稳定;有防护组的 M_z 有两个峰值,说明有防护组假人有两次向左扭动,但两次峰值远小于无防护组数据,最大值 $M_{z\max}$ 均值为

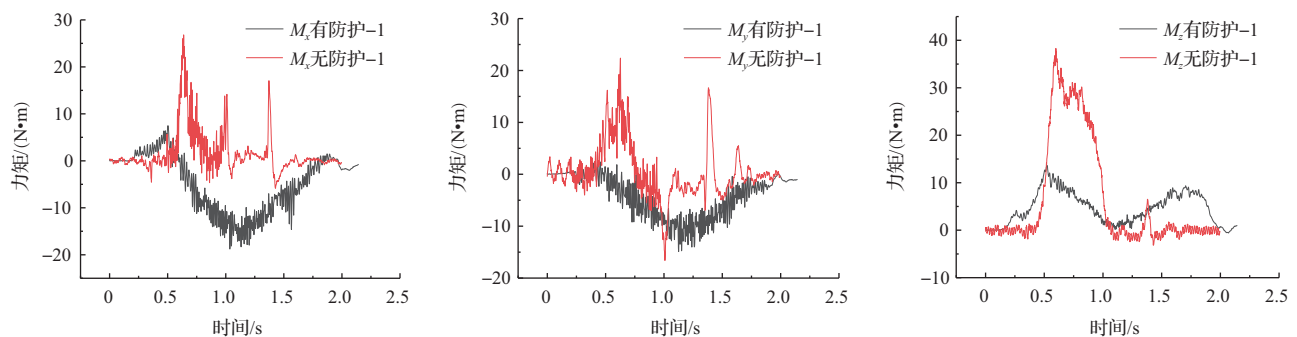


图4 第一发试验有无头颈部防护装置力矩的对比图

Fig.4 Comparison between moment with and without head and neck protection device guard in first test

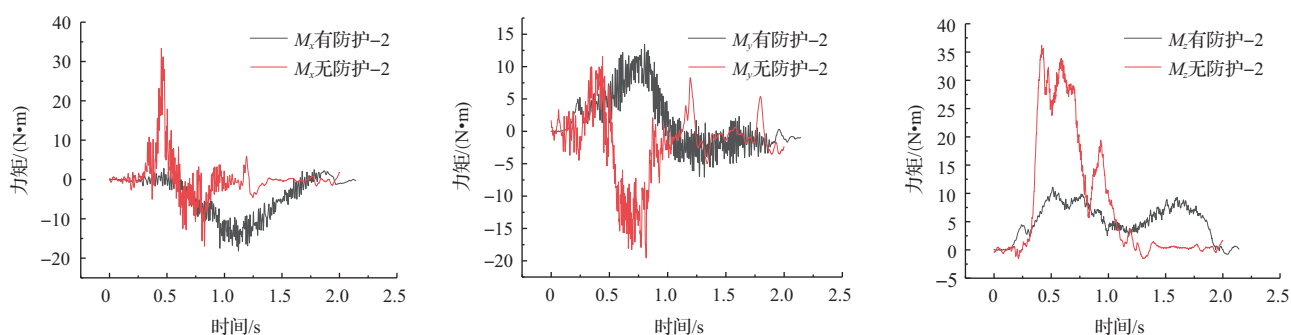


图5 第二发试验有无头颈部防护装置力矩的对比图

Fig.5 Comparison between moment with and without head and neck protection device guard in second test

12.5N·m,相比无防护组的值减小了24.5N·m。

2.3 有无防护装置各方向损伤判据对比

第一发试验有无防护状态下合格判据对比如图6所示,第二发试验有无防护状态下合格判据对比如图7所示。

从图6和图7两发试验中有无防护装置 N_y 的对比图可以发现,无防护组的 N_y 的最大值 $N_{y\max}$ 均值为0.225;有防护组最值出现时间延后,最大值均值为0.13,相比无防护组的值减小了0.095。因 NMI_x 的值与 M_x 成正相关,变化趋势一致,从 NMI_x 的对比图可以发现,两发无防护组的最大值 $NMI_{x\max}$ 均值为0.3; M_x 有防护组数据最值出现时间延后,最大值 $NMI_{x\max}$ 均值为0.17,相比无防护组的值减小了0.13。

NMI_z 的计算公式与 NMI_x 类似,仅与 M_z 成正相关,从 NMI_z 的对比图可以看出,无防护最大值 $NMI_{z\max}$ 均值为0.275; NMI_z 有防护组数据同 M_z 曲线一致,出现了两个峰值,最大值 $NMI_{z\max}$ 均值为0.09,相比无防护组的值减小了0.185。由以上数据对比可知,有防护组可以在很大程度上减小判据值,降低头颈部损伤的风险。

3 结束语

本次850km/h高速气流吹袭试验下的两发有无头颈部防护装置所受力、力矩和损伤判据值最大值的平均值对比见表2。

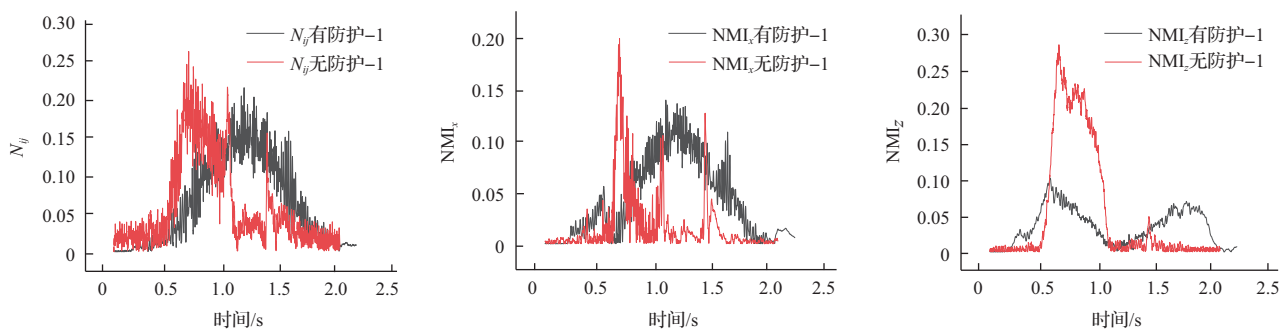


图6 第一发试验有无头颈部防护装置判据的对比图

Fig.6 Comparison between criterion with and without head and neck protection device guard in first test

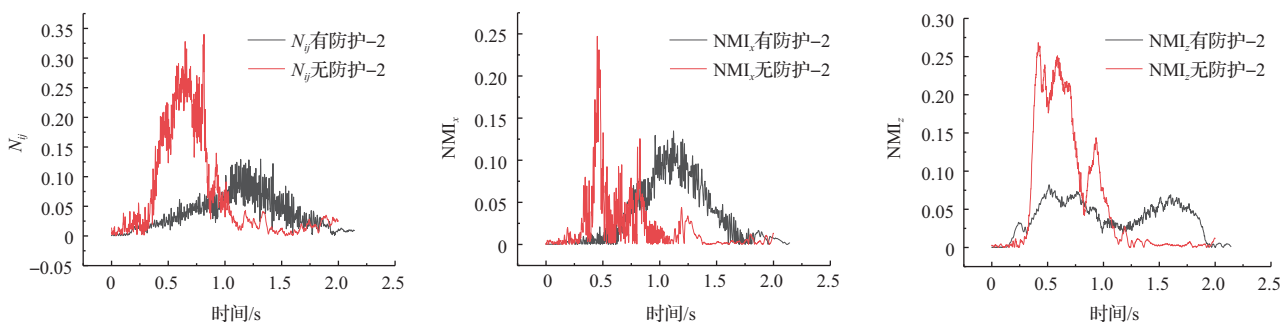


图7 第二发试验有无头颈部防护装置判据的对比图

Fig.7 Comparison between criterion with and without head and neck protection device guard in second test

表2 有无头颈部防护装置力、力矩和判据对比表

Table 2 Comparison table of force/moment and criterion with or without head and neck protection device

最值均值	无防护组	有防护组	降低值	降低率/%
$F_{x\max}$	466/N	181/N	285/N	61.16
$F_{y\max}$	661.5/N	310.5/N	351/N	53.06
$F_{z\max}$	1493.5/N	731.5/N	762/N	51.02
$M_{x\max}$	30/N·m	18.5/N·m	11.5/N·m	38.33
$M_{y\max}$	20.5/N·m	14/N·m	6.5/N·m	31.71
$M_{z\max}$	37/N·m	12.5/N·m	24.5/N·m	66.22
$N_{j\max}$	0.3	0.17	0.13	43.33
$NMI_{x\max}$	0.225	0.13	0.095	42.22
$NMI_{z\max}$	0.275	0.09	0.185	67.27

通过对比结果可以发现:(1) $F_{x\max}$ 相比无防护组的值减小了 285N,减小率为 61.16%; $F_{y\max}$ 相比无防护组的值减小了 351N,减小率为 53.06%; $F_{z\max}$ 相比无防护组的值减小了 762N,减小率为 51.02%。(2) $M_{x\max}$ 相比无防护组的值减小了 11.5N·m,减小率为 38.33%; $M_{y\max}$ 相比无防护组的值减小了 6.5N·m,减小率为 31.71%; $M_{z\max}$ 相比无防护组的值减小了 24.5N·m,减小率为 66.22%。(3) $N_{j\max}$ 相比无防护组的值减小了 0.13,减小率为 43.33%; $NMI_{x\max}$ 相比无防护组的值减小了 0.095,减小率为 42.22%; $NMI_{z\max}$ 相比无防护组的值减小了 0.185,减小率为 67.27%。

有防护的数据明显小于无防护组。在本试验状态下,有颈部防护装置的力、力矩和损伤判据数据值明显降低,说明颈部防护装置对飞行员头颈部有一定的防护作用,可有效降低损伤风险。后续还应继续进行对比试验,使结论更具科学性和准确性。

AST

参考文献

- [1] 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):1-7.
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): 1-7. (in Chinese)
- [2] 冯志杰,宋亚丽,王海云,等.飞机弹射座椅椅载设备载荷谱获取方法研究[J].航空科学技术,2019,30(11):62-68.
Feng Zhijie, Song Yali, Wang Haiyun, et al. Research on the acquisition method of load spectrum of equipment for aircraft ejection seat[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11): 62-68. (in Chinese)
- [3] 宋润滋,索双富,刘跃,等.飞行员头颈部防护装置展开性能实验研究[J].机械科学与技术,2020,39(6):960-965.
Song Runzi, Suo Shuangfu, Liu Yue, et al. Pilot head and neck protection device performance test[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(6): 960-965. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 吴明磊,马春生,刘威,等.弹射时装显示器头盔对人体的生物力学效应[J].中华航空航天医学杂志,2005,16(4):267-271.
Wu Minglei, Ma Chunsheng, Liu Wei, et al. Biodynamic effect of helmet with mounted display system on human during ejection [J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2005, 16(4): 267-271. (in Chinese)
- [6] Chen Dehua, Wang Jinjun, Wu Wenhua, et al. Ejection seat test techniques in a high-speed wind tunnel[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(5): 1593-1596.
- [7] 柳松杨.高G载荷下飞行员颈部的损伤及防护[J].航天医学与医学工程,1998,11(4):310-312.
Liu Songyang. Neck injury and protection of pilot under high G load[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 1998, 11(4): 310-312. (in Chinese)
- [8] 刘润田.脊柱外科学[M].天津:天津科学技术出版社,1981.
Liu Runtian. Spinal surgery[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1981. (in Chinese)
- [9] 滕育英.应急弹射中的头、颈损伤[J].国外医学:军事医学分册,1990(2):59-63.
Teng Yuying. Head and neck injuries in emergency ejection[J]. Foreign Medicine: Military Medical Branch, 1990(2): 59-63. (in Chinese)
- [10] 苏炳君.现代火箭弹射救生技术概论[M].北京:航空工业出版社,2014.
Su Bingjun. Introduction to modern rocket ejection escape technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [11] 刘姿芝,李辉.弹射颈部损伤判据[J].中国个体防护装备,2019(2):23-33.

- Liu Zizhi, Li Hui. Criteria for neck injury after ejection[J]. Chinese Personal Protective Equipment, 2019(2): 23-33. (in Chinese)
- [12] Parr J. A method to develop neck injury criteria to aid design and test of escape systems incorporating helmet mounted displays[D]. Dayton: Air Force Institute of Technology, 2014.

Analysis on the Effect of Head and Neck Protection Device on Head and Neck Injury

Liu Rong, Jiang Nan

Key laboratory of Aeronautical Science and Technology for Aeronautical Protection and Life-Saving Technology, AVIC Aerospace Life-Support Industries, Ltd., Xiangyang 441000, China

Abstract: Ejection lifesaving technology is the only way to save the pilot's life after the aircraft crash at home and abroad. After the aircraft crash, the ejection seat can be ejected from the aircraft to ensure the pilot's life safety. Based on the ejection seat equipped with or without a certain type of head and neck protection device, this paper calculates and compares the damage index of the head and neck of the dummy with or without a certain head and neck protection device by testing the force of the dummy sitting on the ejection seat under the high-speed airflow of 850km/h. It is found that the head and neck protection device can effectively reduce the force, torque and damage index of the head and neck when the dummy is blown by the air, and protect the pilot's head and neck. At the same time, the results have a certain reference significance for the improvement and design of the head and neck protection device in the future.

Key Words: ejection lifesaving; high speed blow; neck injury; neck protection; protective device

Received: 2022-03-18; **Revised:** 2022-04-10; **Accepted:** 2022-05-07

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20182910002)