

文章编号:1004-7220(2014)04-0346-05

基于飞行仿真的 Herbst 机动飞行员过载分析

王亚伟¹, 柳松杨^{1,2}, 都承斐¹, 樊瑜波¹

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191;

2. 空军航空医学研究所, 北京 100142)

摘要: **目的** 利用飞行仿真获取 Herbst 机动中飞行员生理坐标系下的各方向过载, 并对获得的典型数据进行分析。**方法** 依据典型 4 代机设计参数, 在 CAD 软件中建立飞机三维几何模型, 通过飞行仿真获取机体质心 6 个关键运动参数, 根据中国飞行员人体测量数据建立人体三维几何模型; 依据座舱和座椅在飞机中的位置建立飞机与人体装配模型; 通过人机系统运动学分析获取机动飞行时人体不同部位的各方向过载, 对 3 km 高度、90 m/s 速度下开展的 Herbst 机动进行过载分析。**结果** 人体胸部、足部和头部各方向过载基本一致, 但手部与胸部 G_y 曲线相差很大, 手部过载峰值约为 1.6 g; 在人体三向过载中 $+G_x$ 峰值最大, 约为 3.0 g。**结论** 使用机体质心过载曲线代替人体过载曲线会带来较大误差, 在研究多轴向载荷对操控行为的影响时手部 G_y 过载曲线不能使用其他部位过载代替。

关键词: 过失速机动; 多向过载; 飞行员; 飞行仿真

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Pilot load analysis under Herbst maneuver based on flight simulation

WANG Ya-wei¹, LIU Song-yang^{1,2}, DU Cheng-fei¹, FAN Yu-bo¹ (1. Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Institute of Aviation Medicine, Beijing 100142, China)

Abstract: Objective To obtain the multi-axis load histories on physiological coordinate of the pilot when performing Herbst maneuver by flight simulation, and make analysis on the obtained typical data. **Methods** The 3D geometrical model of the aircraft was established in CAD software based on design parameters of the fourth-generation aircraft, 6 key motion parameters of mass center were obtained by flight simulation, and 3D human body model was developed according to anthropometric measurement data of Chinese male pilot; based on the location of cabin and seat in the aircraft, the assembly model with both the aircraft and human body was established and the multi-axis load histories at different locations of human body under Herbst maneuver were obtained through kinematics analysis of the human-aircraft system. An analytic case of Herbst maneuver at altitude of 3 km and flight velocity of 90 m/s was carried out. **Results** The load histories at chest, foot and head of human body were basically coincided, but G_y histories between the chest and hand were different; the G_y peak value of hand was about 1.6 g; under the multi-axis loads, the $+G_x$ peak value was about 3.0 g, being the maximum. **Conclusions** The load histories of aircraft mass center cannot be used as those of human body because it may have some deviation, and the G_y histories for hand cannot be replaced by load histories of other locations on human body when they are used for analysis on effects of multi-axis load on operating behaviors of the aircraft.

Key words: Post-stall maneuver; Multi-axis load; Pilot; Flight simulation

收稿日期:2013-01-20; 修回日期:2013-06-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11120101001, 10925208)。

通信作者:樊瑜波, 教授, 博士研究生导师, Tel: (010)82339428; E-mail: yubofan@buaa.edu.cn。

采用推力矢量控制技术的 4 代战机具有实施过失速机动的能力。大量模拟空战的结果表明,具有过失速机动能力的战机空战性能大大提高。目前常见的过失速机动动作较多,典型的有尾冲、眼镜蛇机动和 Herbst 机动等,其中 Herbst 机动是检验飞机过失速机动能力的标准动作^[1]。飞机在做过失速机动动作时,其速度、迎角和姿态角的变化率和变化范围都很大,会在多个方向上对飞行员造成持续的过载^[2]。这种过载具有变化率大、峰值高、持续时间长的特点,并且可能反复出现。过失速机动对飞行员机体产生的机械性牵拉作用^[3]和血流动力学作用,会引起重力负荷应激,诱发一系列病理变化^[4-5],同时 y 向过载 G_y 会影响飞行员的操控行为。到目前为止,研究人员在多轴向过载对人体生理影响方面的认识还非常有限,国内外尚无公开发表的过失速机动过程人体生物力学响应方面的研究,仅有少量关于机动过程飞行试验^[6]的统计分析。

深入研究过失速机动中产生的多向过载对飞行员造成的生理影响及其机理,需要明确作用在人体不同部位的各向过载变化历程。获取这些数据的最佳途径是飞行试验测量,但该方法成本高、风险大,且国内尚无可以完成 Herbst 机动的飞机。Herbst 机动是规范性动作,可通过仿真方法获得飞机质心运动速度和飞机姿态角的变化规律^[2,7-8]。但由于作用在飞行员上的各向过载与飞机质心过载存在差别^[2],能否将飞机质心过载数据直接用于飞行员的生理响应分析,是本文将要研究的问题。

1 方法

通过建立机体和人体三维几何模型,对人机系统开展运动学分析,获得 Herbst 机动中人体各部位的各向过载曲线。

1.1 飞行模型建立

参照世界唯一服役的 4 代机主要几何参数,建立飞机 3D 简化模型(见图 1),同时以机体质心为原点 O 建立机体坐标系。机体坐标系的 x 轴在飞机对称面上,指向机头方向; z 轴也在对称面上,垂直于 x 轴指向飞机上方; y 轴可按右手螺旋规则确定。

Herbst 机动又称“J 转弯”,该动作可以使飞机快速地完成 180° 转弯,然后按照原路径返回;由大迎角机动动作和翻滚动作组合而成,是目前用于检验飞

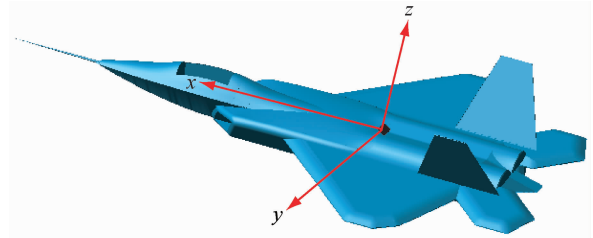


图 1 飞机三维模型

Fig.1 The 3D aircraft model of the aircraft

机多轴向机动能力的标准动作。为获得 Herbst 机动中人体各部位的过载,需要确定飞机质心的运动规律和飞机质心与人体各部位参考点之间的位置关系。飞机质心的运动规律可通过 $\dot{x}_o, \dot{y}_o, \dot{z}_o, \psi, \theta, \phi$ 6 项参数随时间的变化关系进行描述。其中, $\dot{x}_o, \dot{y}_o, \dot{z}_o$ 为飞机质心在地面坐标系下的运动速度,可利用飞行仿真结果经求解飞机质心运动方程^[1]获得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_o &= v \cos \gamma \cos \chi \\ \dot{y}_o &= v \cos \gamma \sin \chi \\ \dot{z}_o &= -v \sin \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ψ, θ, ϕ 分别为飞机的偏航角、俯仰角和翻滚角。本文采用文献[9]中由仿真实验获得的 Herbst 机动参数作为人机系统运动学仿真的输入参数,使用上述人机系统运动学分析方法获得人体各向过载。文献[9]中以初始飞行条件 $h = 3 \text{ km}, v = 90 \text{ m/s}$ 获得的 Herbst 机动过程中质心速度和姿态角的变化曲线如图 2 所示。

1.2 人体模型建立

由于人体尺寸数据具有突出的时效性^[10],本文以国内最近一次的大样本飞行员人体测量数据^[10-12]作为依据。选取文献[12]中歼(强)击机飞行员基础数据项目中坐姿的主要建模参数(见表 1)。利用表 1 中的数据对三维建模软件 Pro/E 中提供的坐姿模型进行修改以获取本文所需人体模型,同时建立人体生理坐标系(见图 3)。在机体坐标系中,人体模型上第 i 个参考点相对于飞机质心的位置可用参数 $\Delta x_{i0}, \Delta y_{i0}, \Delta z_{i0}$ 进行描述。

飞机质心与人体各部位参考点的位置关系可通过飞机模型、人体模型以及两者之间的位置关系确定。在实际中飞机可能携带不同的装备,相应的质心位置也会有所不同,这会对 Herbst 机动中人体过

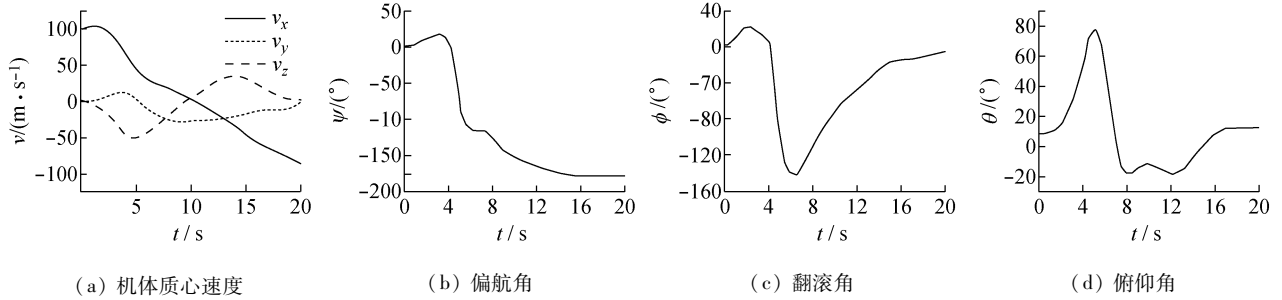

 图2 Herbst 机动机体质心速度和姿态角随时间的变化曲线^[9]

Fig.2 Mass center velocities and orientation of the aircraft in Herbst maneuver (a) Mass center velocity, (b) Yaw angle, (c) Roll angle, (d) Pitch angle

表1 人体模型关键参数

Tab.1 Critical parameters of human body model

测量项目编号	测量项目名称	平均值/mm
3.1	坐高	924.3
3.3	坐姿眼高II	810.0
3.6	坐姿颈椎点高	675.7
3.12	坐姿膝高	501.5
3.13	小腿加足高	416.3
3.16	前臂加手功能前伸长	352.3
3.19	上肢功能前伸长	729.3
3.28	两肘间宽	434.6

表2 人体参考点在飞机质心的相对位置

Tab.2 Displacement of point on human body relative to aircraft mass center

编号	名称	$\Delta x_{i0}/m$	$\Delta y_{i0}/m$	$\Delta z_{i0}/m$
1	胸部	6.38	0.00	1.21
2	足部	7.02	0.00	0.45
3	头部	6.48	0.00	1.64
4	手部	6.69	0.21	1.01

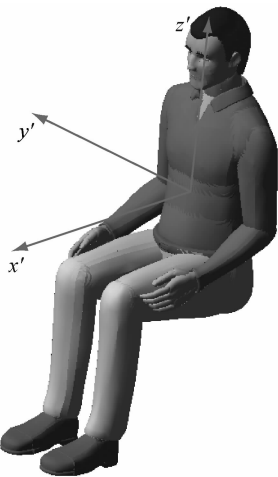


图3 人体三维模型

Fig.3 The 3D model of human body

1.3 人机系统运动学分析模型

人体系统运动学分析旨在利用已获得的飞机运动参数和人体参考点相对于飞机的几何位置来获得人体不同部位参考点的三向过载。因此,人体上第*i*个参考点在地面坐标系下的三向过载可用式(2)进行描述:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_i &= f_1(\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0, \psi, \theta, \phi, \Delta x_{i0}, \Delta y_{i0}, \Delta z_{i0}) \\ \ddot{y}_i &= f_2(\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0, \psi, \theta, \phi, \Delta x_{i0}, \Delta y_{i0}, \Delta z_{i0}) \\ \ddot{z}_i &= f_3(\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0, \psi, \theta, \phi, \Delta x_{i0}, \Delta y_{i0}, \Delta z_{i0}) \end{aligned} \right\} (2)$$

函数 f_1, f_2, f_3 可通过刚体运动理论获取具体形式。

获得地面坐标系下人体参考点的三向过载后,可通过坐标转换的方法获得人体生理坐标系下的三向过载。本文采用多体动力学软件 Adams 开展运动学分析,不仅可以方便地调整人机相对位置和姿态,获取人体不同部位的各向过载,还可以实现运动学分析过程的可视化,有利于及时发现仿真过程中存在的问题。

2 结果

采用上述数据和模型,对图2所示飞行状态下

载产生一些影响,但本文对质心位置变化带来的影响暂不考虑。在下文分析中采用的人体各参考点相对于飞机质心的位置参数如表2所示。

飞行员各部位参考点在机动飞行中的过载曲线开展运动学分析。图4所示为Herbst机动中人体胸部参考点和飞机参考点沿人体生理坐标系的过载对比。

图5所示为飞行员胸部、足部和头部的各向过载曲线对比。

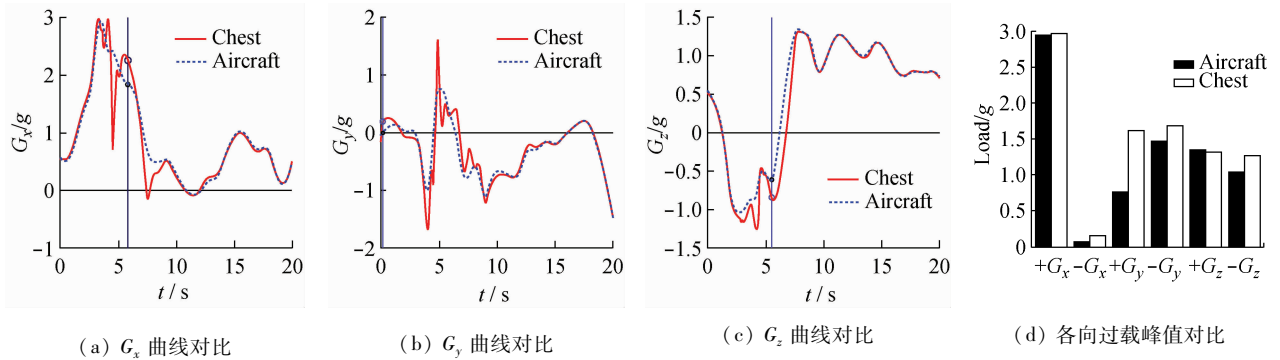


图4 飞行员胸部参考点与飞机质心过载对比

Fig. 4 Load histories comparison between chest and aircraft mass center (a) G_x comparison, (b) G_y comparison, (c) G_z comparison, (d) Peak value comparison

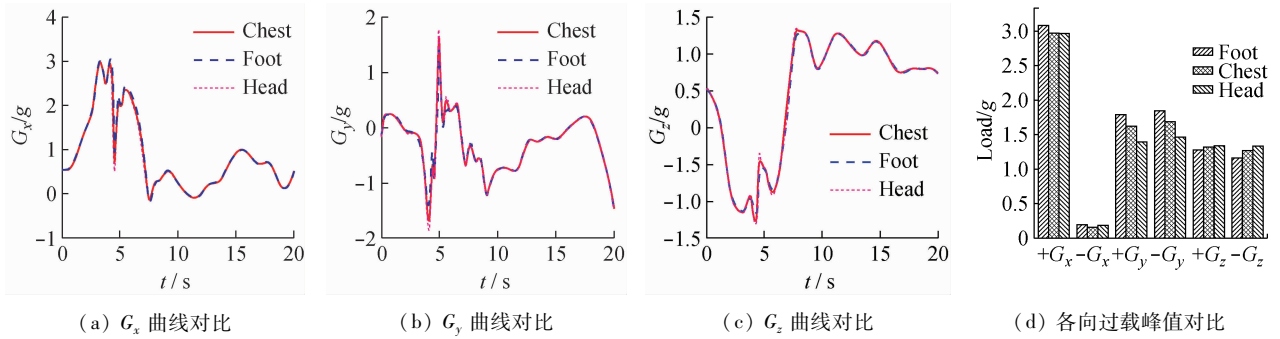


图5 人体不同部位过载曲线对比

Fig. 5 Load histories comparison among different locations of human body (a) G_x comparison, (b) G_y comparison, (c) G_z comparison, (d) Peak value comparison

飞机复杂姿态运动时 G_y 对飞行员的操控行为有很大的影响,故有必要对人体坐姿条件下手部的过载曲线进行分析。图6所示为飞行员左手 G_y 过载曲线与胸部过载曲线的对比。

3 讨论

从图4可以看出,受飞机姿态快速变化的影响,人体胸部的过载比飞机质心的运动更复杂,10 s前人体胸部过载波动明显,10 s后由于机体姿态变化相对缓慢,机体质心与人体胸部过载曲线基本一致;人体胸部 $+G_x$ 峰值为 $2.97 g$,是3个轴向峰值的最大值, $-G_x$ 为 $0.16 g$,胸部与机体质心峰值相差不大;胸部 $+G_y$ 峰值为 $1.62 g$, $-G_y$ 峰值为 $1.68 g$,胸

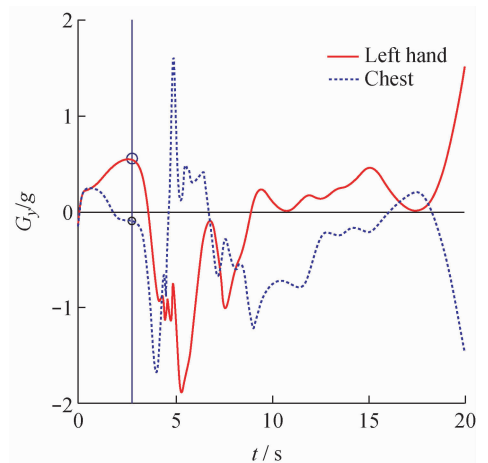


图6 人体坐姿左手与胸部的 G_y 曲线对比

Fig. 6 G_y comparison between left hand and chest

部 G_y 峰值与机体质心相差接近 1 倍,这主要是由于飞机偏航和翻滚运动引起的,会对飞行员的操控行为产生不利影响;胸部 $+G_x$ 峰值为 $1.32 g$, $-G_x$ 峰值为 $1.27 g$,胸部与机体质心过载曲线峰值相差不大。由图 5 可知,飞行员胸、足和头部的过载曲线基本重合,峰值差别最大为 G_y ,约为 2%。因此,胸部过载曲线可以用于描述头和足部等位于人体对称面上的器官在机动飞行中所处的过载环境。由图 6 可知,左手与胸部过载曲线相差较大,在分析侧向过载对飞行员操控能力的影响时,必须单独提取手部在机动飞行中的过载曲线。

本文研究方法可以推广应用于其他典型过失速机动飞行中的飞行员过载分析。已获取的飞行员不同部位过载曲线可作为边界条件直接应用于更复杂的人体生物力学模型,以开展过失速机动下的飞行员损伤与防护研究。通过本文研究所获得的数据已被作者应用于飞行员头颈部在典型航空复杂载荷下的生理响应分析。

4 结论

本文在建立飞机和人体模型的基础上,开展了人机系统运动学建模工作,并以此为基础对飞行员不同部位参考点在 Herbst 机动中沿生理坐标系中的各向过载进行分析。从研究结果可知,在飞行高度 3 km、飞行速度 90 m/s 的条件下:(1)人体不同部位各向过载中 $+G_x$ 峰值最大,约为 $3.0 g$; G_y 正负向峰值相当,约为 $1.6 g$;(2)人体胸、足和头部过载差别不大,可使用胸部代替;(3)手部与胸部 G_y 差别大,在进行操控行为分析时需要单独获取。由于实际飞行试验数据很难获取,本文提出的方法可为过

失速机动中飞行员生物力学响应的深入研究提供数据支持。

参考文献:

- [1] 方振平,陈万春,张曙光. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005:131-134.
- [2] 潘文俊,王立新,谭详升. 持续载荷飞行模拟器过失速过载模拟[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(6):635-638.
- [3] 柳松杨,丛红,王鹤,等. 军机飞行员的颈部损伤研究[J]. 医用生物力学,2010,25(4):262-265.
Liu SY, Cong H, Wang H, et al. Study on neck injuries in military pilots [J]. J Med Biomech, 2010, 25(4): 262-265.
- [4] 樊瑜波,柳松杨. 航空生物力学[J]. 医用生物力学,2010,25(4):235-238.
Fan YB, Liu SY. Biomechanics in aviation [J]. J Med Biomech, 2010, 25(4): 235-238.
- [5] 耿喜臣,颜桂定,金朝. 航空加速度生理学的研究与应用[J]. 航空军医,2004,32(5):189-195.
- [6] Tripathy NK, Tyagi PK. Analysis of multi-axis acceleration profile in a supermanoeuvrable aircraft [J]. Indian J Aero-sp Med, 2006, 50(2): 7-12.
- [7] 高彦玺,王衍祥,金长江. 推力矢量控制与飞机过失速机动仿真研究[J]. 飞行力学,1997,15(1):23-29.
- [8] 史景升,白杨. 苏-27 飞机“眼镜蛇”机动的机理和操纵[J]. 飞机设计,2007,27(5):12-14.
- [9] 洪剑锋. 推力矢量飞机过失速机动仿真研究及大迎角非线性控制律设计[D]. 西安:西北工业大学硕士学位论文,2003:73-81.
- [10] 刘宝善,郭小朝,马雪松. 中国男性飞行员人体尺寸测量实用性特征[J]. 人类工效学,2002,8(4):1-3.
- [11] 郭小朝,刘宝善,肖惠,等. 中国男性飞行员立姿人体测量线性项目尺寸[J]. 航天医学与医学工程,2003,16(1):48-54.
- [12] GJB4856-2003. 中国男性飞行员人体尺寸[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2003.