

三轴载人离心机加速度过载模拟算法开发与验证*

刘晨卉¹ 丁煜轩¹ 孙光鑫¹ 王鹏飞² 韩石磊^{1†} 王聪² 田强¹

(1. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

(2. 空军特色医学中心, 北京 100142)

摘要 在进行飞行员抗荷训练时,需要通过载人离心机实现复杂的加速度条件,因此开展三维变加速度过载模拟试验具有重要意义.本文针对上述需求,开展三轴载人离心机过载模拟算法开发与验证研究.首先,通过运动学分析建立三轴载人离心机的运动学模型;然后,应用移动平均平滑算法平滑输入过载,减少计算过程中俯仰角和滚转角的突变;在此基础上,提出三维变加速模拟的最优化算法,并进行验证.最优化算法以各离散时刻的位置、速度、加速度为优化决策变量,用运动学模型仿真加速度过载与预期加速度过载的误差建立优化目标函数,将过载模拟问题转化为最优化问题进行求解.计算结果表明:(1)移动平均平滑算法通过平滑输入过载,可显著减少俯仰角和滚转角的突变,(2)提出的最优化算法比传统算法能更准确地模拟预期加速度过载.

关键词 三轴载人离心机, 过载模拟, 移动平均平滑算法, 最优化算法

中图分类号:???

文献标志码:A

Development and Verification of Overload Simulation Algorithms for Three-Axis Human Centrifuge*

Liu Chenhui¹ Ding Yuxuan¹ Sun Guangxin¹ Wang Pengfei² Han Shilei^{1†} Wang Cong² Tian Qiang¹

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. Air Characteristic Medical Center, Beijing 100142, China)

Abstract High-G training for pilots has commonly performed in the centrifuge-based flight simulators. In this paper, algorithms for overload simulation in a three-axis human centrifuge are developed and validated. To this end, a kinematic model is established for kinematic analysis. A moving average algorithm is employed to smooth the inputs and to alleviate the abrupt changes in pitch and roll angles of the centrifuge. An optimization algorithm for overload simulation is proposed and verified. The algorithm minimizes the error between the simulated and expected overloads to find the optimized kinematic variables of each axis of the centrifuge. Numerical results show that: (1) the moving average algorithm substantially alleviate the abrupt changes in pitch and roll angles of the centrifuge. (2) the proposed optimization algorithm is more accurate compared to traditional algorithms.

Key words three-axis human centrifuge, G-load simulation, moving average method, optimization algorithm

引言

随着航空技术的发展,战机的机动性能日益提升^[1],优越的推进系统使得战机在飞行过程中加速度快速变化,增强了战机灵活性和机动性,但同时也对飞行员的抗荷能力提出了更高的要求.实际飞行中,战机加速度最高达 9g,加速度变化率高达 $9g/s$ ^[2].研究表明^[3,4],超重状态会导致人体产生一系列异常现象,包括肢体及内部器官的偏移、软组织的变形以及血液动力学的改变等,这些异常现象会对飞行员造成一系列的不良反应.例如,在超重状态下,人体的悬挂器官会压迫膈肌,导致呼吸困难和缺氧.此外,超重状态会对飞行员的操作能力产生负面影响:首先,超重会使肌肉和骨骼承受过大的压力,导致肢体不灵活,增加了飞行员犯错的风险;其次,飞行过程中的加速度会使血液向下半身集中,造成脑部和眼部供血不足,这种血液分配不均的情况会逐渐削弱飞行员的视觉能力,甚至可能造成周围视力丧失.当加速度进一步增大时,脑部供血不足会导致飞行员出现空间定向障碍,同时出现 G-LOC 现象^[5-7].在这种情况下,即使加速度迅速减小,但由于人的意识需要一定时间才能恢复,飞行员可能会在短短几秒内面临生命危险.因此,为了更好地确保飞行员的安全,必须加强抗荷训练^[8],持续性的高动态过载是关键要求^[9].



图1 ETC公司研发的ATFS-400-25载人离心机
Fig. 1 The ATFS-400-25 human centrifuge developed by ETC Corporation

三自由度载人式离心机是实现持续性高动态过载的关键设备^[10,11].图1为美国 Environmental Tectonics Corporation (ETC)公司研发的 ATFS-400-25型三自由度载人离心机,它由底座、中心主旋转臂、中框和飞行员座舱组成,是用于飞行员抗荷训练的重要工具.

加速度过载模拟算法是三轴载人离心机的核

心算法,它以飞机的预期加速度过载为输入,计算离心机的各轴参数,能准确模拟飞行姿态下的加速度环境,使得飞行员能够在安全的模拟环境中进行抗荷训练,具有重要的意义.国内外学者对三轴载人离心机过载模拟算法进行了深入研究.刘正华等^[12]通过运动学方程反解出离心机三个转轴的角度,他们的方法仅考虑了匀速运动状态下的运动参数求解问题,限制了其在高动态飞行过载模拟中的应用.张东峰等^[13]通过反解运动学方程并进行线性化处理,获得各轴角速度和角度,该方法减小了初值的影响,提高解的唯一性和准确性.胡荣华^[14]等利用数值算法,在过载模拟加载阶段中进行求解,可以实现对主臂转速的精确计算;对卸载段主臂转速解存在性进行了分析,明确了转速解是否存在边界;在满足解存在性边界的条件下对转速进行求解,得到了高精度的数值解.关立文等^[15]提出基于二维插值算法的实时运动规划算法.此外,在卸载阶段,求解运动学微分方程有很大的难度^[16-18].Shih等^[19]利用后向差分法求解过载变化率为负时的各轴角度和角速度,该方法只能先对已知的过载曲线参数求解,无法实时地模拟动态的过载曲线.Liu等^[20]基于二维插值的模拟算法,以加载段运动参数建立数据库,然后对比加载段和卸载段运动参数相近点,通过相似数据插值计算出卸载段的参数,这种方法的计算精度与数据库的大小、数据间隔密切相关.

然而,在实际飞行中飞机的加速度过载变化极为复杂多变.Vidakovic等^[2]提出的求逆算法通过求解运动学逆问题计算离心机的滚转角和俯仰角,并通过雅可比椭圆函数求解离心机主旋转臂的角度,该方法在加载和卸载阶段同样有效,并且可以模拟复杂的加速度过载曲线,但该方法对各轴角度采用近似公式进行求解,会造成误差的积累.因此,这些方法并不适用于直接用于飞行员训练,需要开发更准确的三维变加速模拟算法.此外,当预期加速度过载变化剧烈时,例如加速度增长率高于 $9g/s$ 时,由于他们提出的过载模拟算法中采用了差分方法并进行了离散化,瞬时加速度增长率过高会导致离心机俯仰角和滚转角的突变,进而导致计算值与实际情况完全脱离.

针对以上问题,本文建立了三轴载人离心机的运动学模型,应用移动平均平滑算法来平滑输入过

载,在此基础上,提出了三维变加速度过载模拟的最优化算法.提出的平滑算法通过对加速度增长率取移动平均值,优化输入过载,减小俯仰角和滚转角的突变.最优化算法将过载模拟问题转化为最优化问题,求解得到各轴的角速度和角加速度.数值实验表明,最优化算法的过载仿真结果和预期结果一致,验证了最优化算法的可行性和正确性.与Vidakovic等提出的求逆算法相比,最优化算法的计算结果与预期过载曲线贴合度更高,能够更准确地模拟过载变化.

1 三轴载人离心机运动学模型

三轴载人离心机主要由底座、主旋转臂、中框和飞行员座舱组成,如图2所示.主旋转臂绕着底座转动,主旋臂的端部带有两个旋转框架,分别为中框和飞行员座舱,中框绕滚转轴作滚转运动,座舱绕俯仰轴作俯仰运动.

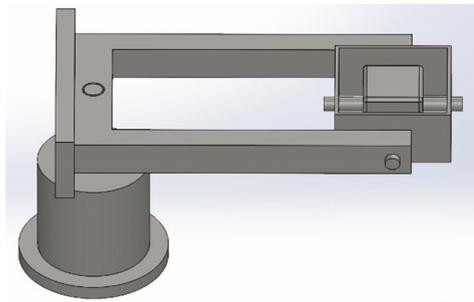


图2 三轴离心机三维模型

Fig. 2 The three-dimensional model of a three-axis centrifuge

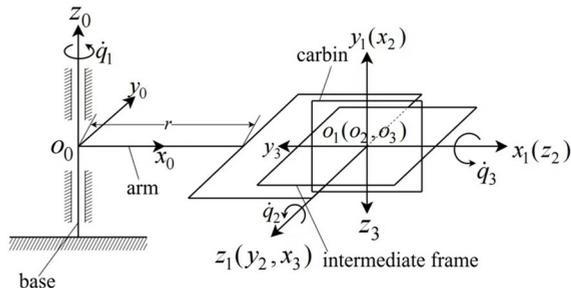


图3 三轴离心机简化模型

Fig. 3 The simplified model of a three-axis centrifuge

表1 离心机运动学模型的坐标系

Table 1 Coordinate frames of the kinematic model

| Coordinate frames | x axis | y axis | z axis |
|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| $O_0 - x_0 y_0 z_0$ Inertial frame | Initially along the arm | Initially perpendicular to the arm | Vertically upward |
| $O_1 - x_1 y_1 z_1$ Arm attached frame | Along the arm, pointing to the cabin | Vertically upward | Perpendicular to the arm |
| $O_2 - x_2 y_2 z_2$ Intermediate frame | Vertically upward | Perpendicular to the arm | Along the arm, pointing to the cabin |
| $O_3 - x_3 y_3 z_3$ Cabin attached frame | Perpendicular to the arm | Along the arm, pointing to the rotating center | Vertically downward |

离心机主旋转臂的臂长用 r 表示,飞行员座舱的偏航角、滚转角和俯仰角分别用 q_1 、 q_2 和 q_3 表示.研究离心机运动时,将基座视为惯性坐标系,将主旋转臂、中框和飞行员座舱简化为图3所示的刚体框架.

表1中基座坐标系用 $O_0 - x_0 y_0 z_0$ 表示,主旋转臂坐标系为 $O_1 - x_1 y_1 z_1$ 、中框坐标系为 $O_2 - x_2 y_2 z_2$ 、飞行员座舱坐标系为 $O_3 - x_3 y_3 z_3$,各坐标系的初始坐标轴方向如表中所示.

用方向余弦矩阵 \mathbf{R}_n^m 表示坐标系 $O_m - x_m y_m z_m$ 相对于坐标系 $O_n - x_n y_n z_n$ 的转动,其具体表达式为

$$\mathbf{R}_0^1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1a)$$

$$\mathbf{R}_1^2 = \begin{bmatrix} -\sin q_2 & 0 & \cos q_2 \\ \cos q_2 & 0 & \sin q_2 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1b)$$

$$\mathbf{R}_2^3 = \begin{bmatrix} -\sin q_3 & 0 & -\cos q_3 \\ \cos q_3 & 0 & -\sin q_3 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1c)$$

后续为表示方便,将三角函数简写为 $s_i = \sin q_i$ 、 $c_i = \cos q_i$, $i=1,2,3$.飞行员座舱坐标系 $O_3 - x_3 y_3 z_3$ 相对于基座坐标系 $O_0 - x_0 y_0 z_0$ 的方向余弦矩阵为

$$\mathbf{R}_3^0 = \begin{bmatrix} c_1 s_2 s_3 + s_1 c_3 & -c_1 c_2 & c_1 s_2 c_3 - s_1 s_3 \\ s_1 s_2 s_3 - c_1 c_3 & -s_1 c_2 & s_1 s_2 c_3 + s_3 c_1 \\ -c_3 s_3 & -s_2 & -c_2 c_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

飞行员座舱坐标系原点 O_3 的位置向量在基

坐标系下的坐标阵为

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{R}_0^1 [r \ 0 \ 0]^T = [rc_1 \ rs_1 \ 0]^T \quad (3)$$

求导可得点 O_3 处的线速度

$$\mathbf{v}_0 = \dot{\mathbf{r}}_0 = [-rs_1\dot{q}_1 \ rc_1\dot{q}_1 \ 0]^T \quad (4)$$

对线速度求导得加速度

$$\dot{\mathbf{v}}_0 = \mathbf{a}_0 = r[-s_1\ddot{q}_1 - c_1\dot{q}_1^2 \ c_1\ddot{q}_1 - s_1\dot{q}_1^2 \ 0]^T \quad (5)$$

$q_1 = 0$ 时,由式(4)可得

$$\mathbf{a}_0 = [-r\dot{q}_1^2 \ r\ddot{q}_1 \ 0]^T \quad (6)$$

\mathbf{a}_0 是由离心机的旋转运动产生的向心加速度和切向加速度,除此之外,还要考虑重力加速度.因此,飞行员座舱坐标系原点的绝对加速度 \mathbf{a} 为

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{g} = [-r\dot{q}_1^2 \ r\ddot{q}_1 \ -g]^T \quad (7)$$

定义加速度过载为绝对加速度 \mathbf{a} 与重力加速度绝对值 g 的比值,由式(7)得

$$[G_{x_0} \ G_{y_0} \ G_{z_0}]^T = \begin{bmatrix} -\frac{r\dot{q}_1^2}{g} & \frac{r\ddot{q}_1}{g} & -1 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

其中, G_{x_0} 、 G_{y_0} 、 G_{z_0} 为飞行员座舱坐标系原点的加速度过载在基座坐标系下的分量.当 $q_1 = 0$ 时,飞行员座舱坐标系下的过载分量 G_x 、 G_y 、 G_z 为

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= [G_x \ G_y \ G_z]^T \\ &= (\mathbf{R}_0^3)^T [G_{x_0} \ G_{y_0} \ G_{z_0}]^T \end{aligned} \quad (9)$$

将式(2)带入到式(9)中,可得

$$\begin{cases} G_x = s_3(G_{x_0}s_2 + c_2) - G_{y_0}c_3 \\ G_y = -G_{x_0}c_2 + s_2 \\ G_z = c_3(G_{x_0}s_2 + c_2) + G_{y_0}s_3 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)是运动学逆问题求解的基础.规定预期三轴过载由 G_x 、 G_y 和 G_z 表示,Vidakovic 等^[2]提出的求逆算法计算的三轴过载由 \bar{G}_x 、 \bar{G}_y 和 \bar{G}_z 表示,本文提出的最优化算法计算的三轴过载由 \tilde{G}_x 、 \tilde{G}_y 和 \tilde{G}_z 表示.

2 最优化算法

本节以各离散时刻的偏航角、滚转角和俯仰角的角度、角速度和角加速度作为优化决策变量,用运动学模型仿真加速度过载与预期加速度过载的误差建立优化目标函数,用无阻尼的 Newmark- β 法时间离散运动学方程,将过载模拟问题转化为最优化问题进行求解.

2.1 运动方程离散化

系统的状态变量 x 为离心机偏航角、滚转角和偏航角的角度、角速度和角加速度

$$\mathbf{x} = [\mathbf{q}^T \ \dot{\mathbf{q}}^T \ \ddot{\mathbf{q}}^T]^T \quad (11a)$$

$$\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T \quad (11b)$$

用无阻尼的 Newmark- β 对时间进行离散, h 为离散时间步长, $k+1$ 时刻运动学方程的离散格式表示为

$$q_{k+1} = q_k + h\dot{q}_k + \frac{1}{4}h^2\ddot{q}_k + \frac{1}{4}h^2\ddot{q}_{k+1} \quad (12a)$$

$$\dot{q}_{k+1} = \dot{q}_k + \frac{1}{2}h\ddot{q}_k + \frac{1}{2}h\ddot{q}_{k+1} \quad (12b)$$

已知系统的状态变量,可由式(10)计算 k 时刻飞行员座舱坐标系原点的加速度过载 $\tilde{\mathbf{G}}_k$ (由最优化算法计算的 k 时刻飞行员座舱坐标系原点的加速度过载用 $\tilde{\mathbf{G}}_k$ 表示, k 时刻预期加速度过载用 $\bar{\mathbf{G}}_k$ 表示)和三轴过载分量 \tilde{G}_{xk} 、 \tilde{G}_{yk} 和 \tilde{G}_{zk}

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{xk} &= \sin(q_{3k})[G_{x_0k}\sin(q_{2k}) + \cos(q_{2k})] - \\ &G_{y_0k}\cos(q_{3k}) \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\tilde{G}_{yk} = -G_{x_0k}\cos(q_{2k}) + \sin(q_{2k}) \quad (13b)$$

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{zk} &= \cos(q_{3k})[G_{x_0k}\sin(q_{2k}) + \cos(q_{2k})] + \\ &G_{y_0k}\sin(q_{3k}) \end{aligned} \quad (13c)$$

$$\mathbf{G} = [G_x \ G_y \ G_z]^T \quad (13d)$$

2.2 最优化问题

定义优化目标函数 J 为

$$J = \sum_{k=0}^n (\mathbf{e}_k^T \mathbf{e}_k) = \sum_{k=0}^n (\tilde{\mathbf{G}}_k - \mathbf{G}_k)^T (\tilde{\mathbf{G}}_k - \mathbf{G}_k) \quad (14)$$

其中 $\mathbf{e}_k = \tilde{\mathbf{G}}_k - \mathbf{G}_k$ 为 k 时刻计算加速度过载 $\tilde{\mathbf{G}}_k$ (如式 13 所示)与预期加速度过载 \mathbf{G}_k 的误差, n 表示时间步长总数.优化问题的决策变量 \mathbf{u} 为系统在各时刻的状态变量

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= [x_0 \ \cdots \ x_k \ \cdots \ x_n]^T \\ &= \begin{bmatrix} [q_0^T \ \dot{q}_0^T \ \ddot{q}_0^T]^T \\ \vdots \\ [q_k^T \ \dot{q}_k^T \ \ddot{q}_k^T]^T \\ \vdots \\ [q_n^T \ \dot{q}_n^T \ \ddot{q}_n^T]^T \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

需要注意的是,该优化问题涉及多个约束条件,包括离散运动学方程(12a)、(12b),以及系统的初始状态量等(如果有指定).由此,该最优化问题可表示为公式

$$\begin{aligned} \min_u J &= \sum_{k=0}^n (\tilde{\mathbf{G}}_k - \mathbf{G}_k)^T (\tilde{\mathbf{G}}_k - \mathbf{G}_k) \\ \text{s. t. } \dot{q}_{k+1} &= q_k + \frac{1}{2} h \ddot{q}_k + \frac{1}{2} h \ddot{q}_{k+1} \\ q_{k+1} &= q_k + h \dot{q}_k + \frac{1}{4} h^2 \ddot{q}_k + \frac{1}{4} h^2 \ddot{q}_{k+1} \\ k &= 0, 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (16)$$

本文应用 Ipopt (Interior Point Optimizer) 非线性优化求解器求解最优化问题(16).

3 移动平均平滑算法

当预期加速度过载变化剧烈时,例如加速度增长率高于 $9g/s$ 时,由于过载模拟算法中采用 Newmark- β 法进行离散化,瞬时加速度增长率过高会导致离心机俯仰角和滚转角突变,进而导致计算值偏离预期值.图 4 给出了一种典型机动状态下的预期加速度 G_x 、 G_y 和 G_z .

由前面提出的最优化算法,可以直接计算出离心机各轴的角度、角速度和角加速度,如图 5 所示.由图 5 可以发现,计算得到的滚转角和俯仰角的角加速度出现了剧烈震荡.分析式(6)可知,由变加速度到恒加速度的转换会导致 \dot{q}_1 的突然增加,而从恒加速度到变加速度的转换会导致 \dot{q}_1 的突然减少.

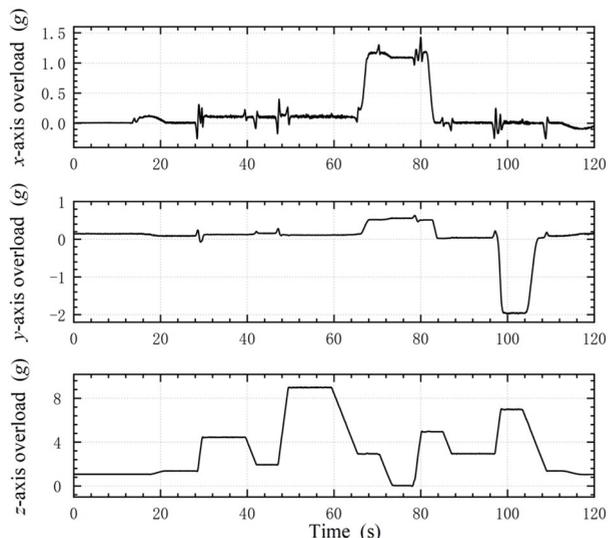


图 4 预期过载
Fig. 4 The expected overload

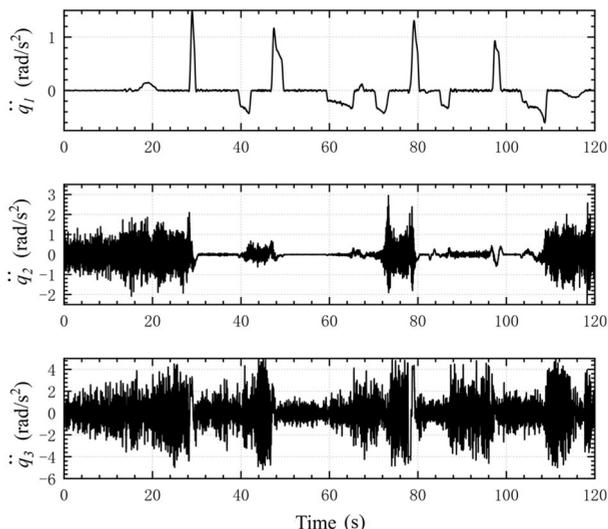


图 5 未平滑的最优化算法计算的三轴角加速度
Fig. 5 The angular acceleration of three axes without smoothing

由于算法在求解时使用了 Newmark- β 法进行离散化, \dot{q}_1 的突变会导致离心机各轴角加速度的突变.因此,对不平滑的预期加速度直接进行离散引起计算结果的剧烈震荡.为消除虚假震荡,需在离散前对过载数据进行平滑处理.本文用移动平均方法对预期的加速度过载进行平滑,以减少各轴角加速度的震荡.

设计 m 阶移动平均平滑方法如下

$$\hat{\mathbf{G}}_k = \frac{\mathbf{G}_{k-m} + \mathbf{G}_{k-(m-1)} + \dots + \mathbf{G}_k + \dots + \mathbf{G}_{k+m}}{2m} \quad (17)$$

其中 \mathbf{G}_k 为平滑前第 k 个时间步的过载, $\hat{\mathbf{G}}_k$ 为平滑后第 k 个时间步的过载.若平滑参数 m 值过小,会导致平滑效果不佳;而若平滑参数值 m 过大,会导致过度平滑,使得计算结果与预期值相差较大.因此,在实际计算中,应对平滑参数值 m 进行适度调节,以获得最优的平滑效果.在实际运算中,一般取 $100 \sim 200$ 个时间步的数据进行平滑,即平滑参数的取值范围为 $50 \sim 100$.

4 计算结果验证与分析

为验证上述算法的正确性,用移动平均平滑算法和最优化算法模拟如图 3 所示的预期三轴过载曲线 G_x 、 G_y 和 G_z .设离心机主旋臂长度 $r = 8m$,取移动平均平滑算法阶数为 $m = 100$,过载模拟时长 $120s$,离散的时间步长 $h = 0.005s$.

将求逆算法和最优化算法得到的各轴转角、角速度、角加速度带入到离心机运动学方程(10)中,计算得到的过载与预期过载曲线如图 6~图 8 所

示,其中,预期三轴过载由 G_x 、 G_v 和 G_z 表示, Vidakovic 等提出的求逆算法计算的三轴过载由 \bar{G}_x 、 \bar{G}_v 和 \bar{G}_z 表示,本文提出的最优化算法计算的三轴过载由 \tilde{G}_x 、 \tilde{G}_v 和 \tilde{G}_z 表示. 观察图 7~图 9 可以得出,与求逆算法相比,最优化算法得到的三轴过载曲线与预期过载曲线间的贴合度更高.

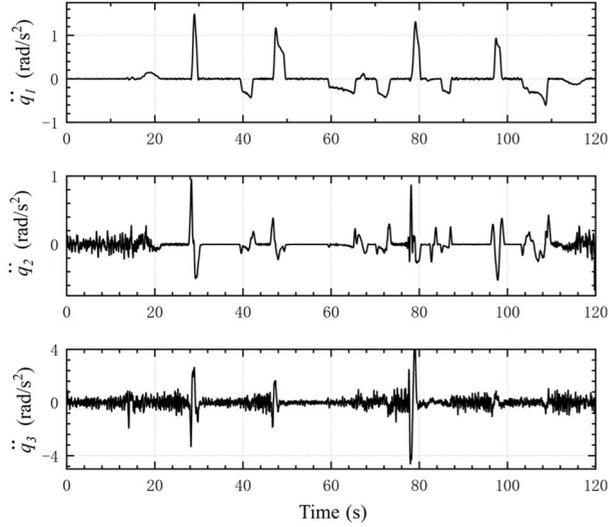


图 6 平滑后最优化算法计算的三轴角加速度

Fig. 6 The angular acceleration of three axes with smoothing

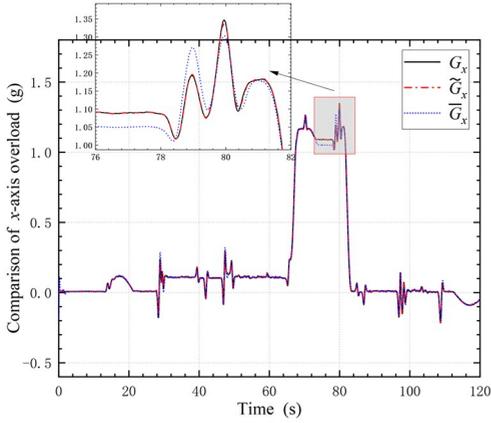


图 7 加速度过载 \tilde{G}_x 、 \bar{G}_x 和 G_x 的对比

Fig. 7 Comparison between \tilde{G}_x 、 \bar{G}_x and G_x

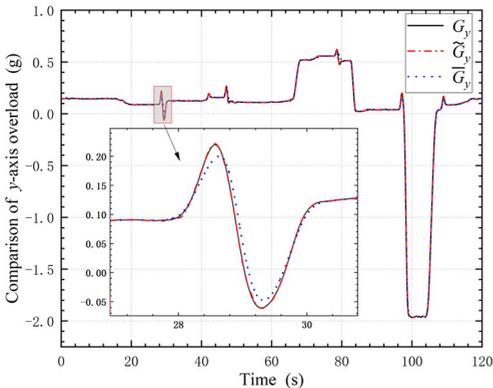


图 8 加速度过载 \tilde{G}_v 、 \bar{G}_v 和 G_v 的对比

Fig. 8 Comparison between \tilde{G}_v 、 \bar{G}_v and G_v

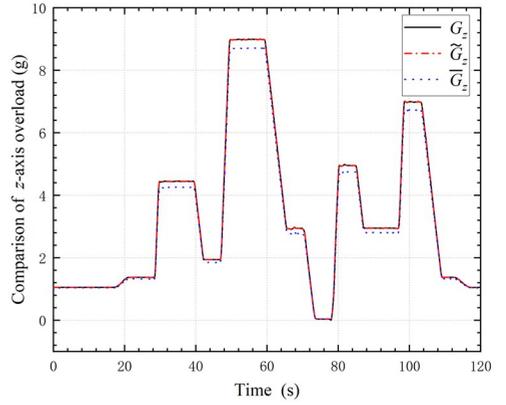


图 9 加速度过载 \tilde{G}_z 、 \bar{G}_z 和 G_z 的对比

Fig. 9 Comparison between \tilde{G}_z 、 \bar{G}_z and G_z

表 2 展示了两种算法的效率对比,结果表明:当仿真时间小于 30s 时,最优化算法的计算耗时更小;当仿真时间大于 30s 时,最优化算法的计算耗时明显增加.

表 2 两种算法的效率对比

Table 2 Comparison of the running time for the two algorithms

| Simulation time | Running time of the optimization algorithm | Running time of the inversion algorithm |
|-----------------|--|---|
| 1s | 2.9s | 15.57s |
| 10s | 4.49s | 16.11s |
| 20s | 6.94s | 18.21s |
| 30s | 10.53s | 20.43s |
| 60s | 35.85s | 21.79s |
| 120s | 86.22s | 23.5s |

5 结论

本文针对三轴载人离心机加速度过载模拟算法进行研究,主要工作包括:设计了移动平均平滑算法,有效地减小了俯仰角和滚转角的角加速度震荡,使得运动模拟结果更加精确.提出了三维加速度过载模拟的最优化算法,并进行了验证.与 Vidakovic 等提出的求逆算法相比,最优化算法计算得到的过载曲线与预期过载曲线之间的贴合度比求逆算法更高.本文提出的过载模拟最优化算法不仅适用于三轴载人离心机,还可以应用于四、五、六自由度载人离心机上.

参考文献

[1] 柴世杰,童中翔,高彦玺. 未来空战与推力矢量技

- 术 [J]. 航空计算技术, 2002, 32(3): 45—48.
- CHAI S J, TONG Z X, GAO Y X. Future air combat and thrust vectoring technology [J]. *Aeronautical Computer Technique*, 2002, 32(3): 45—48. (in Chinese)
- [2] KVRGIC V M, VIDA KOVIC J Z, LUTOVAC M M, et al. A control algorithm for a centrifuge motion simulator [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014, 30(4): 399—412.
- [3] 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—196.
- [4] 马志刚. 飞行人员提高持续性正加速度耐力锻炼方案的研究 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2008.
- [5] KIM S, NAM W, KIL H, et al. Formal verification of a gravity-induced loss-of-consciousness monitoring system for aircraft [J]. *Computing in Science & Engineering*, 2014, 16(5): 96—103.
- [6] BURTON R R. G-induced loss of consciousness: definition, history, current status [J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 1988, 59(1): 2—5.
- [7] LYONS T J, HARDING R, FREEMAN J, et al. G-induced loss of consciousness accidents: USAF experience 1982—1990 [J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 1992, 63(1): 60—66.
- [8] 蓝小华, 曹艳杰, 任启涛, 等. 飞行员心肺储备功能与抗荷耐力关系的研究进展 [J]. *心脏杂志*, 2023, 35(2): 196—199.
- LAN X H, CAO Y J, REN Q T, et al. Research progress in relationship between cardiopulmonary reserve and G-tolerance in pilots [J]. *Chinese Heart Journal*, 2023, 35(2): 196—199. (in Chinese)
- [9] 杨景慧, 金朝, 徐艳, 等. 飞行员载人离心机训练结果横断面分析 [J]. *空军军医大学学报*, 2023, 44(1): 58—61.
- YANG J H, JIN Z, XU Y, et al. Cross-sectional analysis of the results from manned centrifuge training for pilots [J]. *Journal of Air Force Medical University*, 2023, 44(1): 58—61. (in Chinese)
- [10] 陆惠良. 载人离心机及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- LU H L. Human centrifuge and its application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [11] VAN LOON J J W A. The human centrifuge [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2009, 21(1): 203—207.
- [12] 常乐, 刘正华, 温暖, 等. 新型三轴离心机系统构型及数学建模 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(2): 283—288.
- CHANG L, LIU Z H, WEN N, et al. Configuration and mathematical modeling for advanced three-axis centrifuge system [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(2): 283—288. (in Chinese)
- [13] 张东锋, 欧峰. 一类飞行器动态变化加速度模拟试验原理探索 [J]. *装备环境工程*, 2015, 12(5): 56—60+110.
- ZHANG D F, OU F. Simulation test principle for a type of aircrafts with variable accelerations [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2015, 12(5): 56—60+110. (in Chinese)
- [14] 罗鹏, 胡荣华, 白俊林, 等. 动态飞行模拟器高精度过载模拟算法研究 [J]. *机械强度*, 2022, 44(5): 1156—1161.
- LUO P, HU R H, BAI J L, et al. Research on high precision g-load simulation algorithm of dynamic flight simulator [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2022, 44(5): 1156—1161. (in Chinese)
- [15] 关立文, 刘慧, 付萌. 动态飞行模拟器实时运动规划算法 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015, 55(7): 709—715.
- GUAN L W, LIU H, FU M. Real-time motion planning algorithm for dynamic flight simulators [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, 55(7): 709—715. (in Chinese)
- [16] VIDA KOVIC J, LAZAREVIC M, KVRGIC V, et al. Comparison of numerical simulation models for open loop flight simulations in the human centrifuge [J]. *PAMM*, 2013, 13(1): 485—486.
- [17] VIDA KOVIC J, FERENC G, LUTOVAC M, et al. Development and implementation of an algorithm for calculating angular velocity of main arm of human centrifuge [C]//2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC). Novi Sad, Serbia. IEEE, 2012: DS2a. 17—1—DS2a. 17—6.
- [18] CROSBIE R, KIEFER D. Controlling the human centrifuge as a force and motion platform for the dynamic flight simulator [C]//Flight Simulation Technologies Conference. Reston, Virginia: AIAA, 1985: 1742.
- [19] TSAI M H, SHIH M C. G-load tracking control of a centrifuge driven by servo hydraulic systems [J].

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2009, 223(6): 669–682.

- [20] LIU H, GUAN L W. Dynamic modeling of a high-dynamic flight simulator [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 687–691: 610–615.

附录 A: 求逆算法

A1 离心机滚转角和俯仰角的相关计算

根据公式(8)中第二个方程可知,若给定侧向加速度分量 G_y ,则可计算滚转角 q_2 ,计算公式如下

$$q_2 = \text{atan2}(G_{x_0} + G_y \sqrt{1 - G_y^2 + G_{x_0}^2}, 1 - G_y^2) \quad (\text{A1})$$

值得注意的是,只有满足 $G_{x_0}^2 + 1 > G_y^2$ 时,才能计算出滚转角,否则不能达到预期的侧向加速度.得到 q_2 以后,可以通过公式(8)中第一个方程或第三个方程计算俯仰角 q_3 ,若通过第一个方程计算 q_3 ,计算公式为

$$q_3 = \text{atan2}(G_{y_0} b + G_x \sqrt{b^2 + G_{y_0}^2 - G_{x_0}^2}, b^2 - G_{x_0}^2) \quad (\text{A2})$$

其中 $b = G_{x_0} s_2 + c_2$.同理,只有满足 $b^2 + G_{y_0}^2 > G_{x_0}^2$ 时,才能计算出俯仰角,否则不能达到预期的横向加速度.若通过第三个方程计算 q_3 ,计算公式为

$$q_3 = \text{atan2}(G_{y_0} b + G_z \sqrt{b^2 + G_{y_0}^2 - G_{z_0}^2}, G_z^2 - G_{y_0}^2) \quad (\text{A3})$$

A2 离心机主旋转臂角速度的相关计算

由公式(10)可以计算离心机的过载函数

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= \sqrt{G_{x_0}^2 + G_{y_0}^2 + G_{z_0}^2} \\ &= \frac{1}{g} \sqrt{a_n^2 + a_t^2 + g^2} \\ &= \frac{1}{g} \sqrt{r^2 (\dot{q}_1^4 + \ddot{q}_1^2) + g^2} \end{aligned} \quad (\text{A4})$$

在很小的时间段内,过载变化率可以近似为恒量,用 λ 表示.对式(A4)求导得到

$$d(\sqrt{r^2 (\dot{q}_1^4 + \ddot{q}_1^2) + g^2}) = \lambda g \, dt \quad (\text{A5})$$

上述微分方程求解困难,且在过载变化率 λ 为负数的情况下无解.本文利用雅可比椭圆函数对方程进行求解.取 Δt 为一个时间步长,在该步长中有

$$a = a_{\text{prev}} + \lambda g \Delta t \quad (\text{A6})$$

其中 a_{prev} 为上一个时间步的加速度,由式(A5)可得

$$(a^2 - g^2)/r^2 = \dot{q}_1^4 + \ddot{q}_1^2 = k \quad (\text{A7})$$

k 的表达式为

$$k = \frac{(a_{\text{prev}} + \lambda g \Delta t)^2 - g^2}{r^2} \quad (\text{A8})$$

对公式(A7)进行整理,可得到关于 \dot{q}_1 的微分方程(A9)

$$\ddot{q}_1 = \frac{d\dot{q}_1}{dt} = \sqrt{k - \dot{q}_1^4} \quad (\text{A9})$$

对该微分方程进行求解即可得到离心机主旋转臂角速度 \dot{q}_1

$$\dot{q}_1 = \sqrt[4]{k} \, \text{sn}(\sqrt[4]{k} t + \sqrt[4]{k} C_1) \quad (\text{A10})$$

公式(A10)中为雅可比椭圆函数, $C_1 = -2\sqrt[4]{k}$.将得到的 \dot{q}_1 函数进行泰勒级数展开,得到如下公式

$$\dot{q}_1 = \sqrt[4]{k} \left(t_1 - \frac{t_1^5}{10} + \frac{t_1^9}{120} - \frac{11t_1^{13}}{15600} - \frac{211t_1^{17}}{3536000} \right) + \Delta t t_1^{18} \quad (\text{A11})$$

式中 $t_1 = \sqrt[4]{k} (t + C_1)$,上述公式定义了每个时间步内离心机主旋转臂角速度 \dot{q}_1 的值.

A3 离心机其它运动参数的计算

利用差分方法可以确定离心机其它转轴在每个时间步的角度、角加速度

$$\ddot{q}_1 = \frac{(\dot{q}_1 - \dot{q}_{1\text{prev}})}{\Delta t}, \quad q_1 = q_{1\text{prev}} + \Delta t \dot{q}_1 \quad (\text{A12})$$

$$\ddot{q}_2 = \frac{(q_2 - q_{2\text{prev}})}{\Delta t}, \quad \ddot{q}_2 = \frac{(\dot{q}_2 - \dot{q}_{2\text{prev}})}{\Delta t} \quad (\text{A13})$$

$$\ddot{q}_3 = \frac{(q_3 - q_{3\text{prev}})}{\Delta t}, \quad \ddot{q}_3 = \frac{(\dot{q}_3 - \dot{q}_{3\text{prev}})}{\Delta t} \quad (\text{A14})$$