

文章编号: 2095-2163(2019)05-0054-05

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

六自由度飞行模拟器洗出算法参数优化研究

李炜增, 贾慈力

(上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

摘要: 随着航空业的不断发展, 飞行员对飞行模拟器的需求也越来越高, 对模拟器逼真度的要求也越来越高, 即对洗出算法的选择也会不一样。经典洗出滤波器参数一般来说是固定不变的, 因此选择较合理的参数对模拟后的逼真度有很大的影响, 为了改善飞行模拟器对飞行员的模拟逼真程度, 在已知经典滤波算法的前提下, 通过利用遗传算法来搜索全局最优参数, 使飞行员在飞行模拟器产生的感觉上与真实飞行的感觉误差尽可能地小, 并且可以利用遗传算法最大限度地提高运动平台的空间利用情况, 最后在 Matlab 上对优化后的算法进行仿真验证。结果表明: 模拟器在模拟相对极限的运动的时候可以保证有足够的运动空间, 而且模拟逼真度也越来越好。

关键词: 飞行模拟器; 经典洗出算法; 模拟逼真度; 遗传算法

Research on parameter optimization of 6d of flight simulator washout algorithm

LI Weizeng, JIA Cili

(School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

【Abstract】 Flight simulator is becoming more and more important to the pilot's flight training, and the requirement of simulation fidelity is getting higher and higher. The classical washout filter algorithm parameters is usually fixed, so choosing reasonable parameters on the simulation fidelity has a great influence. In order to improve the simulation of flight simulator lifelike degree, on the premise of classic filtering algorithm, Genetic Algorithm is used to search the global optimal parameter, minimum error is made between the operation of flight simulator and real flight on the feeling, and Genetic Algorithm is used to improve movement platform space utilization. The optimized algorithm is simulated and verified on Matlab. The results show that enough motion space can be guaranteed and the fidelity of simulation is getting higher and higher.

【Key words】 flight simulators; classical washing out algorithm; simulation fidelity; Genetic Algorithms

0 引言

随着航空业的飞速发展,对飞行员的要求也越来越高,所以飞行员的培养也日渐显出其迫切性和重要性。在飞行员训练中,经常会用到的就是飞行模拟器。而运动系统所产生的动感模拟逼真度的好坏则会直接影响飞行员的训练情况,故而飞行模拟器的逼真度即已成为相关领域的研究热点与焦点。

为了使飞行员在相对有限的空间中最大可能地体验到飞行的感觉,学界陆续推出多种类型的模拟体感算法,用于模拟飞机的各种运动情况。研究可知,Conrad 和 Schmidt 早期提出了最优洗出算法,而在此基础上又相继研发了自适应洗出算法和近期较受欢迎的模糊控制洗出算法等等。其中,经典洗出算法在参数调整方面相对来说较为方便,结构透明度也较高,而且反馈速度和执行速度都赢得了飞行员和专家内外的一致好评。经典洗出算法^[1]的飞

行模拟研究可做剖析阐述如下。

(1)高通加速度通道:主要是为了飞行模拟器在突发过载加速度时,使飞行员能够感应到飞行模拟器所带来的瞬间加速效果,经过洗出后就可以得到平台的位移。

(2)低通加速度通道:主要用于实现飞行模拟器的持续加速度。

(3)高通角速度通道:主要用于实现飞行模拟器呈现的角度变化,经过洗出后可以得到角位移的一部分。

综上所述探讨分析后可知,在此前提下使用遗传算法替代传统参数的选择算法,对经典洗出算法参数进行选择,再对参数优化前后洗出算法进行仿真,得出结论后进行比较。

1 经典洗出算法

洗出算法就是在相对有限的空间内经历了一次

作者简介: 李炜增(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:飞行仿真技术;贾慈力(1966-),男,副教授,主要研究方向:机械制造、材料加工工程、飞行仿真等。

通讯作者: 贾慈力 Email: jiacili@sues.edu.cn

收稿日期: 2019-06-30

突变的运动模拟后,模拟器能够迅速回到平衡位置,以便有足够的空间继续进行下一次的运动,并且在返回的过程中必须低于人体的感知门限。经典洗出算法的设计结构如图1所示。对该结构中涉及到的各主要部分的功能设计可阐释分述如下。

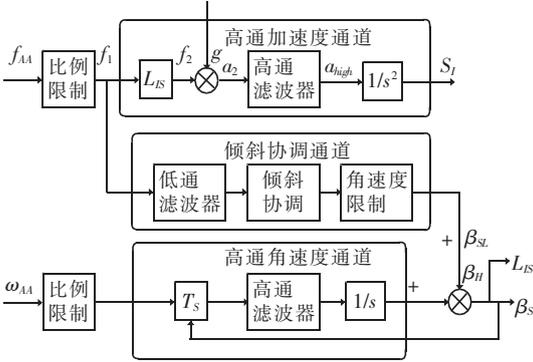


图1 经典洗出算法结构图

Fig. 1 Classical washing out algorithm structure diagram

1.1 高通加速度通道

在经典洗出算法中,高通滤波器可以用来模拟六自由度运动平台的瞬时加速度感觉,但是由于液压缸行程是相对有限的,不可能给使用者提供无限的空间可能,当液压缸伸缩量达到最大时,随之而来的加速度就会迅速降低。此时高通滤波器的作用就是能够消除这种突变的运动感觉,也就是在防止运动平台超越极限位置的前提下允许运动平台在附近有更大的运动范围。一般情况下,高通滤波器^[2]数学形式可表示为:

$$H = \frac{S^3}{(S^2 + 2\xi_{hps}\omega_{hps}S + \omega_{hps}^2)(S + \omega_m)} \quad (1)$$

其中, ω_m 表示一阶环节的自然截止频率,单位是 rad/s; ω_{hps} 表示二阶环节的自然截止频率,单位是 rad/s; ξ_{hps} 表示阻尼比(无量纲)。

1.2 高通角速度通道

高通角速度^[3]主要是对飞行模拟器的俯仰、偏航、滚转三个方向上的运动进行滤波处理。输入信号的角速度将经过比例限幅和旋转变换矩阵后转换成欧拉角速度,再经由高通滤波器的滤波作用得到高频部分,接着将通过一次积分就可以得到相应的模拟器欧拉角输出,而且与高通加速度滤波类似,研究后可知高通角速度通道滤波器也为二阶。

通常来说,飞机的俯仰角和滚转角变化的范围相对来说不大,对应的角速度也比较小,如此一来采用一阶高通滤波器会更加合适。例如,俯仰自由度的滤波器传递函数为:

$$H = \frac{S}{(S + \omega_{hp\theta})} \quad (2)$$

其中, $\omega_{hp\theta}$ 表示俯仰自由度一阶高通滤波器的自然截止频率,单位是 rad/s。

横滚自由度传递函数具有相同的形式,在理论上飞机的偏航角变化范围能达到 360°,故而一般情况下将采用二阶高通滤波器,具体公式如下:

$$H_{oh} = \frac{S^2}{S^2 + 2\xi_{hpl}\omega_{hpl}S + \omega_{hpl}^2} \quad (3)$$

其中, ω_{hpl} 表示二阶高通滤波器的自然截止频率,单位为 rad/s, ξ_{hpl} 表示阻尼比(无量纲)。

1.3 倾斜协调通道

倾斜协调通道^[4]主要是体现飞机的持续动感,通常由低通滤波器、倾斜协调环节和角速度限幅模块三部分来组成。

所谓的低通滤波器,即是用力信号的低频分量通过倾斜协调的对应环节来控制运动平台倾斜一定的角度,用来模拟飞机所带来的持续动感,倾斜一定角度的模拟器在前进的方向上就会给驾驶员提供持续不断的加速感觉。在模拟加速过程中,该倾斜角所产生的重力加速度分量会给驾驶员的背部带来一定的压力感觉,这个过程与之前向前加速的视觉效果进行了有效结合,使得驾驶员产生持续向前加速的飞行运动感觉。

相对来说,倾斜协调通道就是附加产生的运动,使飞行员产生的感觉不能太明显,否则可能会给飞行员发送错误暗示,甚至可能会出现与预期相反的结果。角速度限幅模块的定义描述就是限制倾斜协调运动的最大的角速度,使得该种运动可控制在一定的范围内,并且低于飞行员所能承受的极限角速度值。这样一来,最终结果就是:飞行员只能感受到由运动平台倾斜所模拟出的角速度,而不会感觉到由于倾斜协调的作用而产生的旋转运动感觉,由此带来的持续动态感觉会更加逼真。一般情况下,其传递函数的数学形式可表示为:

$$H = \frac{\omega_{lp}^2}{S^2 + 2\xi_{lp}\omega_{lp}S + \omega_{lp}^2} \quad (4)$$

其中, ω_{lp} 表示二阶低通滤波器的自然截止频率,单位为 rad/s; ξ_{lp} 表示二阶低通滤波器的阻尼比(无量纲)。

2 基于算法的滤波器参数优化

通常情况下,滤波器参数都是固定不变的。使用并联平台模拟飞行时,选择合理的滤波器参数对逼真度将有着很大的影响,但是通过遗传算法来搜索全局最优参数,并将其作为滤波器参数基准,再进

行 Matlab 仿真实验,与传统算法得出的滤波器参数^[5]进行对比,期望得到更高的模拟逼真度。对此将给出研究详情如下。

2.1 遗传算法(GA)

“物竞天择,适者生存”的优化思想,同时再结合生物体内遗传学表述的自然进化法则,在开展优化问题研究时不需要建立功能模型,能够更加简便、快捷地对复杂系统进行优化^[3]。利用遗传算法^[6]求解最优化问题的设计步骤如图2所示,其流程内容解析可简述如下。

(1)将所有搜索到的参数编码为所需要的固定长度的二进制字符串,再转化成遗传空间中的染色体。

(2)得到随机产生的初始群体后,将其作为遗传进化的首代。

(3)在约束条件下设置适应度函数。

(4)高适应度函数值的个体将会送入交配池,通过遗传操作进化出下一代种群。

(5)得到了新一代种群,返回到适应度判断评价环节,再经遗传操作处理,循环迭代,直到迭代过程收敛,适应度值达到了某个极限值后不再提高,算法结束。

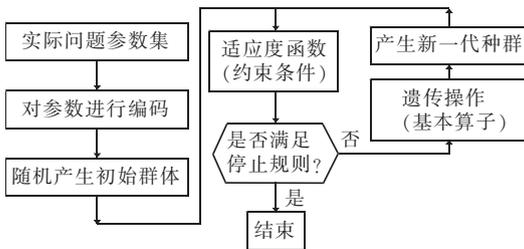


图2 遗传算法流程图

Fig. 2 Flow chart of Genetic Algorithm

2.2 建立目标函数

研究中,从飞机纵向角度和俯仰角度入手,可将目标函数定义为飞行员最终感知的加速度与之前经典算法洗出后飞行员感知加速度之间的差值,而经分析后可知,误差值越小,对应的逼真度越高。目标函数^[6]的数学定义公式为:

$$\begin{cases} \text{mine}_s = \min |a_A^X - a_{v_s}^X|, \\ \text{mine}_c = \min |a_A^X - a_{v_c}^X|. \end{cases} \quad (5)$$

其中, e_s 表示线加速度误差; e_c 表示角加速度误差; a_A^X 表示飞行员实际感觉到的输入加速度; $a_{v_s}^X$ 表示飞行员在模拟器上感受到的纵向持续加速度; $a_{v_c}^X$ 表示飞行员在模拟器上感受到的纵向持续角速度。

2.3 确定约束条件

在此基础上,还需要进一步确定各函数中每个参数的约束条件。主要包括:

(1)平台的最大运动空间:纵向空间 ± 0.1 m,俯仰角 ± 0.6981 rad。

(2)模拟器在迅速回到中立位置的过程中,飞行员不能明显地感受到平台的运动速度,因此洗出优化后的运动线加速度 a 和角加速度 θ 必须低于人体相应的阈值^[7],具体如下:

$$\begin{cases} a_{\min} = 0.15 \text{ m/s}^2; \\ a_{\max} = 0.17 \text{ m/s}^2. \end{cases} \begin{cases} \theta_{\min} = 0.045 \text{ rad/s}; \\ \theta_{\max} = 0.06283 \text{ rad/s}. \end{cases} \quad (6)$$

同时,平台在完成一次操作指令后要尽可能回到中立位置,为下一次运动做好及时的准备,因此,洗出运动线加速度和角加速度应该分别大于模拟平台最小值,即:

$$\begin{cases} a_{\min} \leq a \leq a_{\max}, \\ \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

(3)最大位移处回到中立位置需要的时间 t 应小于最大回位时间 t_{\max} , 即: $0 \leq t \leq t_{\max} = 5$ s。

2.4 参数优化

设置种群数目^[8]时,如果初始数量太大,求得最优解需要的时间过长,就容易陷于结果的不收敛;如果种群数量太小,不具备足够的多样性,就容易错失最优解,从而无法取得最优化。

因此,基本选择初始的种群数目为200,依据经验将变量取值范围规定为 $0 \leq a_1, a_2 \leq 2.6$ 、 $0 \leq a_3, a_4, a_5, a_6 \leq 4.0$,停止算法的最大迭代次数为200,交叉概率为0.8,变异概率为0.02,仿真频率为50 Hz。

利用 Matlab 的 Optimization Tool 的遗传算法的编辑器编写目标函数的文件,输入相应的约束条件以及设定的其它基本参数值,经过150次左右优化得到目标函数的最小值,以及此时对应的 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 的最优值,至此就运算求得了利用遗传算法优化后的滤波器参数。

3 仿真实验

通过 Matlab 仿真实验结果,就可以对经过遗传算法优化前后平台的纵向位移、俯仰角位移和输出的线加速度进行比较分析。对文中实验结果,可推得研究阐述如下。

(1)平台纵向位移对比。本次研究得到的平台纵向位移如图3所示。由图3可以清晰地看出,相

对来说,经典与遗传算法处理后的结果对比是较为明显的。初始条件是相同的,也就是输入了相同的信号。但是实验结果显示:很显然,通过遗传算法优化后的平台位移比之前经典算法的位移要减少了50%以上,这一结果也充分表明了优化后的参数能够保证洗出算法在相对极限的情况下也可以获得足够的运动空间,同时也有效地避免了空间不足。只是研究发现:当运行时间接近一半时,经典洗出算法在与遗传算法的仿真比较中,将会做出更加快速的积极响应。同时也要看到,其缺点就是输出位移相对来说比较大,故而回到中立位置的时间也会较长,如此一来遗传算法的优势就尤显重要了。在间隔时间更短的前提下,遗传算法的效果将会更加突出。

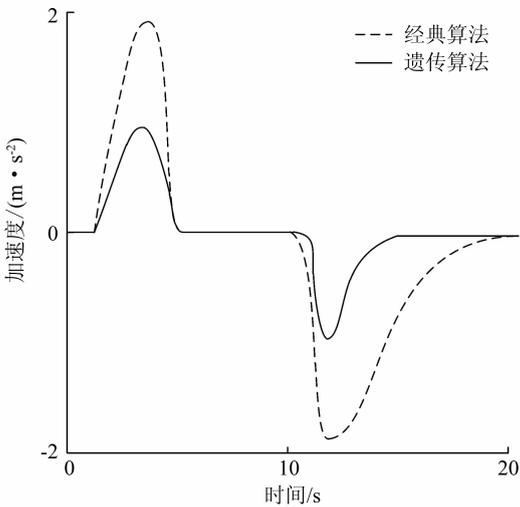


图3 纵向位移对比图

Fig. 3 Comparison chart of longitudinal displacement

(2)角位移对比。经典和遗传算法的角位移的对比结果如图4所示。由图4可以看出,遗传算法中角位移的变化在倾斜协调通道里面可以充分体现持续的加速度模拟,而且在模拟过程中甚至输入的角度速度信号都可以接近平台所允许的最大角速度信号。但是从图4中也可以看到,所用的经典洗出算法模拟后的平台倾斜角度已经超过了目标所规定的极限范围值,而经过洗出算法优化后的角位移却在极限所允许的范围内。由此可见,当输入信号较大时,经典洗出算法容易超出平台的设计范围,有可能会损坏平台的结构。两相比较之下可以得知,遗传算法仿真处理后的信号比较平缓,飞行员对所经历的倾斜运动后的感觉就不会那么明显,也就不会有更多的错误暗示,并且在完成一次运动后也可以更快速地回到中立的位置,不仅节约了时间,也提升了效率。

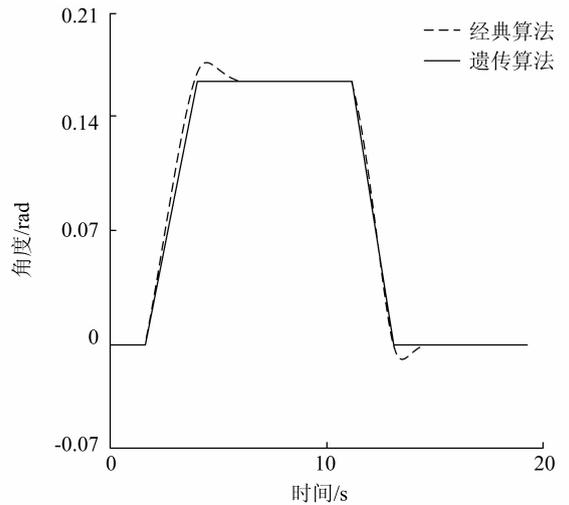


图4 俯仰角位移对比图

Fig. 4 Comparison diagram of pitch angle displacement

(3)纵向加速度对比。本次研究得到的纵向加速对比结果如图5所示。由图5可知,两者之间的结果有着较大差别。不论是经过经典洗出算法优化,还是经过遗传算法的改进后的参数显示,两者所得出的结果都没有产生明显的错误暗示,但是遗传算法所得到的加速度要明显优于经典洗出算法。通过此次对比还可以看出,遗传算法优化后给飞行员提供的真实感觉也是要胜过经典算法的。

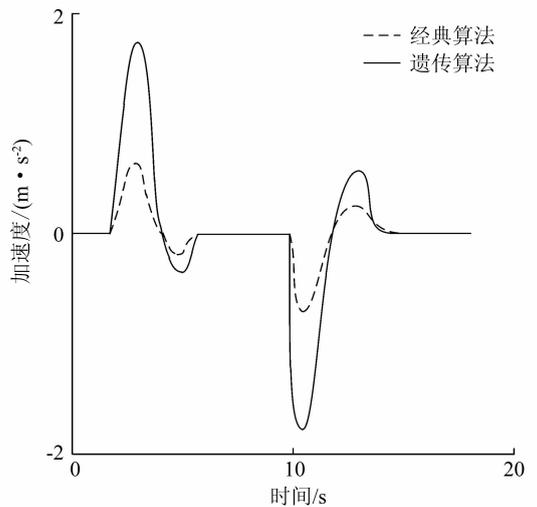


图5 纵向加速度对比图

Fig. 5 Longitudinal acceleration contrast diagram

4 结束语

一般情况下,飞行模拟器可以利用经典洗出算法在相对有限的空间内模拟较为真实的运动感觉,洗出算法的优劣直接决定着飞行模拟的逼真感觉。本文在深入探索经典洗出算法的基础上,使用遗传

(下转第62页)