



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109683473 B

(45) 授权公告日 2021.12.24

(21) 申请号 201811264955.2

CN 107505951 A, 2017.12.22

(22) 申请日 2018.10.26

CN 104443427 A, 2015.03.25

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109683473 A

贾重任. 空中最小操纵速度的人机闭环数学仿真计算.《北京航空航天大学学报》.2013,

hang zhou等. Online Learning and

Inference Based Flight Envelope

Estimation for.《13th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA)》.2017,

(43) 申请公布日 2019.04.26

(73) 专利权人 中国飞行试验研究院

地址 710089 陕西省西安市73信箱

谯裕青等. 人机闭环仿真方法研究及应用.

《科技创新导报》.2014,

(72) 发明人 王晓蓉 刘智汉 张文帅 雒东超

王文星

张喆等. 电传飞行控制系统飞机飞行员.《科技创新与应用》.2017, (第17期),

(74) 专利代理机构 中国航空专利中心 11008

代理人 杜永保

Ramin Norouzi等. Reconfiguring NASA

Generic Transport Model for Normal Flight Envelope Simulation and Analysis.《9th

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering》.2018,

(56) 对比文件

CN 104217623 A, 2014.12.17

CN 107748492 A, 2018.03.02

CN 106651090 A, 2017.05.10

CN 107748499 A, 2018.03.02

EP 3065016 A1, 2016.09.07

CN 103809453 A, 2014.05.21

曹启蒙等. 基于线性矩阵不等式的电传飞机人机闭环系统稳定阈.《航空学报》.2013,

审查员 刘航鹏

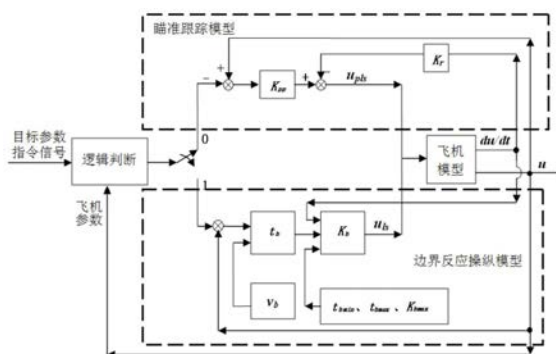
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种综合性人机闭环系统建模及验证方法

(57) 摘要

一种综合性人机闭环系统建模及验证方法属于飞行试验技术领域, 本发明根据驾驶员在临近边界飞行时的操纵特点, 建立临近边界飞行人机系统模型, 和以往通用的人机闭环瞄准模型综合在一起, 构成一种新型综合性人机系统模型, 解决了单一瞄准跟踪模型在临近边界操纵类事件中应用的不足, 可对人机系统中瞄准跟踪特性和边界操纵特性进行连续、完整的预测、分析, 填补了临近边界响应操纵事件人机系统建模和验模的空白。



1. 一种综合性人机闭环系统建模及验证方法, 基于平视信息显示系统而实现, 其特征在于, 所述方法包括以下步骤:

步骤1: 建立人机闭环系统综合模型架构: 人机闭环系统综合模型架构包含驾驶员操纵方式逻辑判断模型、驾驶员操纵模型、飞机模型、人机系统反馈模型四个部分, 其中驾驶员操纵模型包含边界反应操纵模型、瞄准跟踪模型; 所述边界反应操纵模型的边界反馈增益 K_b 由临近边界速度 V_b 、临近边界时间 t_b 、最大临近边界时间 t_{bmax} 、最小临近边界时间 t_{bmin} 、最大驾驶员增益 K_{bmax} 决定; 瞄准跟踪模型为由指令增益 K_{pp} 、速率反馈增益 K_r 构成的通用模型; 飞机模型为经过试飞数据校准后的模型; 人机系统反馈模型为单位反馈模型;

步骤2: 计算步骤1中的边界反应操纵模型: 完成平视显示器信息支持的瞄准机动和边界回避机动试飞试验, 通过获取的试飞数据, 计算边界反应操纵模型中的参数; 过程包括: 制定任务、确定试飞员、提取试飞关键参数、计算边界反应操纵模型中的参数; 试飞任务为无边界限制的瞄准跟踪任务和纵向带界限制的瞄准跟踪加边界回避机动任务、横向带界限制的瞄准跟踪加边界回避机动任务; 纵向带界限制的瞄准跟踪加边界回避机动任务、横向带界限制的瞄准跟踪加边界回避机动任务分别为各自的边界范围内完成瞄准跟踪任务, 不可碰界或越界; 在平视显示器信息画面中, 俯仰瞄准跟踪符设计为“+”, 并位于平视显示器信息画面的中部; 滚转跟踪符号设计为“|”号, 并位于平视显示器信息画面的上部; 俯仰瞄准跟踪符、滚转跟踪符号在平视显示器信息画面中的位置按照预定设置的数学模型变化; 俯仰边界符号设计为“=”, 俯仰边界符号的上下边界之间的距离按照预先设置的数学模型呈现周期递减; 滚转边界限制符号设计为“\”, 滚转边界限制符号的左右边界和平视显示器信息画面中心对称轴的夹角按照预先设置的数学模型逐渐减小; 选取专业、有经验的试飞员完成上述各项试飞任务, 以降低试飞数据的显著差异性; 从试飞数据中提取驾驶员操纵信号、飞机姿态角信号和角速率信号、俯仰边界信号、滚转边界信号、姿态角瞄准跟踪信号、姿态角瞄准跟踪信号变化率、最大最小边界时间的数值, 按照公式(1)、(2)、(3)即可求出边界反应操纵模型参数 K_b ; 构建由参数临近边界时间 t_b 、最大临近边界时间 t_{bmax} 、最小临近边界时间 t_{bmin} 、最大驾驶员增益 K_{bmax} 决定的操纵输出误差函数 err_{min} 的公式(4), 调整4个参数的数值, 使边界反应操纵模型输出信号的数值与试飞数据中的驾驶员操纵信号数值的误差函数 err_{min} 的数值最小, 并最终获得边界反应操纵模型参数 K_b :

$$v_b = \dot{u}_f - \dot{u}_b \quad \text{公式(1)}$$

其中: $\dot{u}_f$ 为飞机参数变化量, $\dot{u}_b$ 为边界参数变化量;

$$t_b = (u_b - u_f) / v_b \quad \text{公式(2)}$$

其中: u_f 为飞机参数即时量; u_b 为边界参数; t_{bmax} 为驾驶员以最小反馈增益临近边界所需时间; t_{bmin} 为驾驶员以最大反馈增益临近边界所需时间;

K_b 是 t_b 的分段函数, 对应关系如下:

$$K_b = \begin{cases} 0, & t_b \geq t_{min} \\ (t_{min} - t_b) * \frac{K_{bmax}}{t_{min} - t_{max}}, & t_{min} < t_b \leq t_{max} \\ K_{bmax}, & t_b > t_{max} \end{cases} \quad \text{公式(3)}$$

$$\text{err}_{\min} = \min(u_{1s} - dx) \quad \text{公式 (4)}$$

其中： u_{1s} 为边界响应操纵模型输出信号； dx 为试飞中纵向、横向驾驶员输入信号；

步骤3：利用步骤2中得到的边界反应操纵模型，建立综合人机闭环模型，将综合人机闭环模型输出的飞机姿态数值结果与试飞数据进行对比，建立误差优化函数 $\text{err_out}_{\min}$ ；进一步微调边界反应操纵模型参数 K_b ，减小误差优化函数 $\text{err_out}_{\min}$ 的误差至可接受范围内，最终确定整边界反应操纵模型参数 K_b ；

$$\text{err_out}_{\min} = \min(u - u_t) \quad \text{公式 (5)}$$

其中： u 为人机闭环模型姿态角输出参数； u_t 为试飞中飞机姿态角参数

步骤4：计算步骤1中的驾驶员操纵方式逻辑判断模型，瞄准跟踪指令 u_p 、瞄准跟踪误差 u_{err} 、边界反应操纵限制上边界 u_{bup} 、边界反应操纵限制下边界 u_{bdown} 、人机闭环系统综合模型输出飞机即时参数 u_f 为计算输入参数；当人机闭环系统综合模型输出飞机即时参数 u_f 的数值小于等于瞄准跟踪指令 u_p 与瞄准跟踪误差 u_{err} 之和且大于等于瞄准跟踪指令 u_p 减去瞄准跟踪误差 u_{err} 的差时，驾驶员操纵模式为瞄准跟踪模式，驾驶员操纵模型类型代码为“0”；当人机闭环系统综合模型输出飞机即时参数 u_f 的数值小于边界反应操纵限制上边界 u_{bup} 且大于瞄准跟踪指令 u_p 与瞄准跟踪误差 u_{err} 之和，或当人机闭环系统综合模型输出飞机即时参数 u_f 的数值大于边界反应操纵限制下边界 u_{bdown} 且小于瞄准跟踪指令 u_p 减去瞄准跟踪误差 u_{err} 的值时，驾驶员操纵模式为边界反应操纵，驾驶员操纵模型类型代码为“1”；当人机闭环系统综合模型输出飞机即时参数 u_f 的数值大于等于边界反应操纵限制上边界 u_{bup} 或小于等于边界反应操纵限制上边界 u_{bdown} 时，飞机发生边界碰撞或超越边界，驾驶员操纵模型类型代码为“2”，人机闭环系统综合模型不工作，全部输出参数值为零。

2. 如权利要求1所述的一种综合性人机闭环系统建模及验证方法，其特征在于步骤2中的俯仰瞄准跟踪符、滚转跟踪符号在平视显示器信息画面中的位置按照预先设定的常值变化。

3. 如权利要求1所述的一种综合性人机闭环系统建模及验证方法，其特征在于步骤2中的任务也可在桌面模拟器、固定基模拟器、活动基模拟器上进行。

4. 如权利要求1所述的一种综合性人机闭环系统建模及验证方法，其特征在于步骤3的误差优化函数变换为 $\text{err_out}_{\min} = \min(\dot{u} - \dot{u}_t)$ ，其中， $\dot{u}$ 为人机闭环模型姿态角速率输出参数， $\dot{u}_t$ 为试飞中飞机姿态角速率参数，将会加快 err_out 减小的速度。

5. 如权利要求1所述的一种综合性人机闭环系统建模及验证方法，其特征在于步骤4的驾驶员操纵模型类型代码为“2”时，人机闭环系统综合模型全部输出参数值重新初始化，模型开始新周期的重复持续运行。

一种综合性人机闭环系统建模及验证方法

技术领域

[0001] 本发明一种综合性人机闭环系统建模及验证方法属于飞行试验技术领域。

背景技术

[0002] 人机系统模型通常由驾驶员操纵模型、飞机系统模型等组成,在飞机操纵品质设计与研究中起着重要的作用,人机系统模型的正确性和适用性直接影响对飞机操纵品质的预判。截止目前,典型的人机系统模型为瞄准跟踪模型,已在操纵品质研究、人机耦合振荡(PIO)趋势预测等方面获得广泛应用。然而,随着技术的发展和更深入的研究,瞄准跟踪模型的基本原理在解释PIO事件的全程和新型边界响应操纵振荡事件中,出现了与驾驶员感觉和经历不符现象;同时,已有的PIO趋势预测/设计准则又不能完全阻止PIO和类似振荡事件的发生。

发明内容

[0003] 本发明的目的:本发明建立能够代表瞄准跟踪和边界反应操纵中驾驶员操纵行为的模型和操纵模式转换逻辑模型,弥补现有瞄准跟踪模型在表达临近边界时驾驶员操纵行为的不足,建立可用于人机闭环操纵品质预测的综合性人机系统模型。

[0004] 本发明的技术方案:一种综合性人机闭环系统建模及验证方法,基于平视信息显示系统而实现,所述方法包括以下步骤:

[0005] 步骤1:建立人机闭环系统综合模型架构:人机闭环系统综合模型架构包含驾驶员操纵方式逻辑判断模型、驾驶员操纵模型、飞机模型、人机系统反馈模型四个部分,其中驾驶员操纵模型包含边界反应操纵模型、瞄准跟踪模型;所述边界反应操纵模型的边界反馈增益 K_b 由临近边界速度 V_b 、临近边界时间 t_b 、最大临近边界时间 t_{bmax} 、最小临近边界时间 t_{bmin} 、最大驾驶员增益 K_{bmax} 决定;瞄准跟踪模型为由指令增益 K_{pp} 、速率反馈增益 K_r 构成的通用模型;飞机模型为经过试飞数据校准后的模型;人机系统反馈模型为单位反馈模型;

[0006] 步骤2:计算步骤1中的边界反应操纵模型:完成平视显示器信息支持的瞄准机动和边界回避机动试飞试验,通过获取的试飞数据,计算边界反应操纵模型中的参数;过程包括:制定任务、确定试飞员、提取试飞关键参数、计算边界反应操纵模型中的参数;试飞任务为无边界限制的瞄准跟踪任务和纵向带边界限制的瞄准跟踪加边界回避机动任务、横向带边界限制的瞄准跟踪加边界回避机动任务;纵向带边界限制的瞄准跟踪加边界回避机动任务、横向带边界限制的瞄准跟踪加边界回避机动任务分别为各自的边界范围内完成瞄准跟踪任务,不可碰界或越界;在平视显示器信息画面中,俯仰瞄准跟踪符设计为“+”,并位于平视显示器信息画面的中部;滚转跟踪符号设计为“|”号,并位于平视显示器信息画面的上部;俯仰瞄准跟踪符、滚转跟踪符号在平视显示器信息画面中的位置按照预定设定的数学模型变化;俯仰边界符号设计为“=”,俯仰边界符号的上下边界之间的距离按照预先设定的数学模型呈现周期递减;滚转边界限制符号设计为“\”,滚转边界限制符号的左右边界和平视显示器信息画面中心对称轴的夹角按照预先设定的数学模型逐渐减小;选取专业、

有经验的试飞员完成上述各项试飞任务,以降低试飞数据的显著差异性;从试飞数据中提取驾驶员操纵信号、飞机姿态角信号和角速率信号、俯仰边界信号、滚转边界信号、姿态角瞄准跟踪信号、姿态角瞄准跟踪信号变化率、最大最小边界时间的数值,按照公式(1)、(2)、(3)即可求出边界反应操纵模型参数 K_b ;构建由参数临近边界时间 t_b 、最大临近边界时间 t_{bmax} 、最小临近边界时间 t_{bmin} 、最大驾驶员增益 K_{bmax} 决定的操纵输出误差函数 err_{min} 的公式(4),调整4个参数的数值,使边界反应操纵模型输出信号的数值与试飞数据中的驾驶员操纵信号数值的误差函数 err_{min} 的数值最小,并最终获得边界反应操纵模型参数 K_b :

$$[0007] \quad v_b = \dot{u}_f - \dot{u}_b \quad \text{公式(1)}$$

[0008] 其中: $\dot{u}_f$ 为飞机参数变化量, $\dot{u}_b$ 为边界参数变化量;

$$[0009] \quad t_b = (u_b - u_f) / v_b \quad \text{公式(2)}$$

[0010] 其中: u_f 为飞机参数即时量; u_b 为边界参数; t_{bmax} 为驾驶员以最小反馈增益临近边界所需时间; t_{bmin} 为驾驶员以最大反馈增益临近边界所需时间;

[0011] K_b 是 t_b 的分段函数,对应关系如下:

$$[0012] \quad K_b = \begin{cases} 0, & t_b \geq t_{min} \\ (t_{min} - t_b) * \frac{K_{bmax}}{t_{min} - t_{max}}, & t_{min} < t_b \leq t_{max} \\ K_{bmax}, & t_b > t_{max} \end{cases} \quad \text{公式(3)}$$

$$[0013] \quad err_{min} = \min(u_{ls} - dx) \quad \text{公式(4)}$$

[0014] 其中: u_{ls} 为边界响应操纵模型输出信号; dx 为试飞中纵向、横向驾驶员输入信号;

[0015] 步骤3:利用步骤2中得到的边界反应操纵模型,建立综合人机闭环模型,将综合人机闭环模型输出的飞机姿态数值结果与试飞数据进行对比,建立误差优化函数 $err_{out_{min}}$;进一步微调整边界反应操纵模型参数 K_b ,减小误差优化函数 $err_{out_{min}}$ 的误差至可接受范围内,最终确定整边界反应操纵模型参数 K_b ;

$$[0016] \quad err_{out_{min}} = \min(u - u_t) \quad \text{公式(5)}$$

[0017] 其中: u 为人机闭环模型姿态角输出参数; u_t 为试飞中飞机姿态角参数。

[0018] 步骤4:计算步骤1中的驾驶员操纵方式逻辑判断模型,瞄准跟踪指令 u_p 、瞄准跟踪误差 u_{err} 、边界反应操纵限制上边界 u_{bup} 、边界反应操纵限制下边界 u_{bdown} 、人机闭环系统综合模型输出飞机即时参数 u_f 为计算输入参数;当人机闭环系统综合模型输出飞机即时参数 u_f 的数值小于等于瞄准跟踪指令 u_p 与瞄准跟踪误差 u_{err} 之和且大于等于瞄准跟踪指令 u_p 减去瞄准跟踪误差 u_{err} 的差时,驾驶员操纵模式为瞄准跟踪模式,驾驶员操纵模型类型代码为“0”;当人机闭环系统综合模型输出飞机即时参数 u_f 的数值小于边界反应操纵限制上边界 u_{bup} 且大于瞄准跟踪指令 u_p 与瞄准跟踪误差 u_{err} 之和,或当人机闭环系统综合模型输出飞机即时参数 u_f 的数值大于边界反应操纵限制下边界 u_{bdown} 且小于瞄准跟踪指令 u_p 减去瞄准跟踪误差 u_{err} 的值时,驾驶员操纵模式为边界反应操纵,驾驶员操纵模型类型代码为“1”;当人机闭环系统综合模型输出飞机即时参数 u_f 的数值大于等于边界反应操纵限制上边界 u_{bup} 或小于等于边界反应操纵限制上边界 u_{bdown} 时,飞机发生边界碰撞或超越边界,驾驶员操纵模型类型代码为“2”,人机闭环系统综合模型不工作,全部输出参数值为零;

[0019] 另外,一种综合性人机闭环系统建模及验证方法步骤2中的俯仰瞄准跟踪符、滚转

跟踪符号在平视显示器信息画面中的位置按照预先设定的常值变化,将使瞄准跟踪任务更容易完成,驾驶员的操纵行为模式区分明显;如权利要求1所述的一种综合性人机闭环系统建模及验证方法,其特征在于步骤2中的任务也可在桌面模拟器、固定基模拟器、活动基模拟器上进行;为试飞任务提供先期任务研究、预演和培训;一种综合性人机闭环系统建模及验证方法步骤3的误差优化函数变换为 $\text{err_out}_{\min} = \min(\dot{u} - \dot{u}_t)$,其中, $\dot{u}$ 为人机闭环模型姿态角速率输出参数, $\dot{u}_t$ 试飞中飞机姿态角速率参数,将会加快err_out减小的速度;一种综合性人机闭环系统建模及验证方法步骤4的驾驶员操纵模型类型代码为“2”时,人机闭环系统综合模型全部输出参数值重新初始化,模型开始新周期的重复持续运行。

[0020] 本发明的优点:首次建立边界响应驾驶员操纵模型,可用于飞机临近边界操纵特性预测;通过逻辑转换模型,自动完成瞄准跟踪操纵方式和边界响应操纵方式的转换,从而对人机闭环机动整个过程进行连续描述与特性预测;首次提出基于平视显示器信息显示、边界回避机动任务,避免了基于驾驶员真实视觉系统的目标捕获类型任务中,视觉坐标系海量数据获取的系列问题,方便试验的实施和事后数据分析,通过严格选择任务驾驶员,即可产生用于模型验证的试验样本数据。

附图说明

[0021] 图1为新型综合性人机闭环系统模型框图。

[0022] 其中 K_{pp} 为瞄准跟踪模型中驾驶员增益; K_r 是瞄准跟踪模型中角速率反馈增益; K_b 是边界反应操纵模型中角速率反馈增益; $K_{b\max}$ 是边界反应操纵模型中最大驾驶员增益; V_b 是临近边界速率; $t_{b\max}$ 是最大临近边界时间; $t_{b\min}$ 是最小临近边界时间; t_b 是临近边界时间; u_f 是飞机参数即时量; $\dot{u}_f$ 是飞机参数变化量; u_b 是边界参数; $\dot{u}_b$ 是边界参数变化量。

[0023] 图2为驾驶员操纵模型逻辑判断图。

[0024] 其中 u_p 是瞄准跟踪任务中的目标信号; u_{err} 是瞄准跟踪任务中的跟踪误差信号; $u_{b\text{up}}$ 是边界反应操纵任务的上边界值; $u_{b\text{down}}$ 是边界反应操纵任务的下边界值。

[0025] 图3为瞄准跟踪与边界反应操纵任务平视显示器画面。

[0026] 其中1是法向过载即时值;2是速度刻度带;3是指示空速即时值;4是迎角即时值;5是地平线;6是俯仰梯;7是飞机符号;8是瞄准误差带;9是高度即时值;10是俯仰跟踪指令符号;11是高度刻度带;12是目标距离;13是俯仰角跟踪边界;14是滚转角跟踪边界;15是滚转角跟踪指令符;16是滚转角指示刻度带。

[0027] 图4为实施例中的滚转跟踪目标角曲线。

[0028] 图5为实施例中的逐渐递减的左右滚转角限制边界曲线、滚转目标跟踪角与飞机滚转角差值曲线。

[0029] 图6为实施例中的计算结果:边界反馈增益与临近边界时间的关系曲线。

具体实施方式

[0030] 下面结合附图对本发明进行进一步详细的说明。

[0031] 一种综合性人机闭环系统建模及验证方法,基于平视信息显示系统而实现,所述方法包括以下步骤:

[0032] 步骤1:建立人机闭环系统综合模型架构,如附图1所示,人机闭环系统综合模型架

构包含驾驶员操纵方式逻辑判断模型、驾驶员操纵模型、飞机模型、人机系统反馈模型四个部分,其中驾驶员操纵模型包含边界反应操纵模型、瞄准跟踪模型;边界反应操纵模型中的各参数值由带边界限制的姿态角瞄准跟踪加边界回避机动任务的试飞数据计算得到,在步骤2中详细论述;瞄准跟踪模型为通用模型,采用常规方法从姿态角瞄准跟踪试飞数据计算得到;逻辑判断模型是按照飞机当时姿态与瞄准误差、边界限制值的关系进行计算选择,详细过程见步骤4;飞机模型为经过试飞数据校准后的执行瞄准跟踪和边界回避机动任务的飞机飞行仿真模型;人机系统反馈模型是反馈系数为1的模型;

[0033] 步骤2:计算步骤1中的边界反应操纵模型:利用特定试飞任务数据,计算该模型参数;关键工作为制定试飞任务和利用试飞关键参数计算该模型中的各参数值;

[0034] 试飞任务为基于平视信息显示的无边界限制的瞄准跟踪任务、纵向带边界限制的瞄准跟踪加边界回避机动任务、横向带边界限制的瞄准跟踪加边界回避机动任务;平视显示器显示的信息布局见附图3和相关符号说明,俯仰瞄准跟踪符、滚转跟踪符号在平视显示器信息画面中的位置按照预定设定的数学模型连续变化;俯仰边界符号的上下边界之间的距离按照预先设定的数学模型呈现周期递减;滚转边界限制值按照预先设定的数学模型逐渐递减;瞄准跟踪任务就是驾驶员按照俯仰瞄准跟踪符或滚转跟踪符号的提示操纵飞机,使得平视显示器上的飞机符号和俯仰指令符号重叠,滚转角指示和滚转角跟踪指令符重叠,跟踪目标信号值与飞机姿态角值的差值应当按规定在给定的瞄准误差带内;执行带边界限制的跟踪任务时,飞机符号不能超越或停留在上下俯仰跟踪限制边界,滚转角指示符号不能超越或停留在滚转跟踪限制边界,此时驾驶员随着边界的不断临近,逐步直至彻底放弃瞄准跟踪任务,全力完成边界回避机动任务上;从试飞数据中提取纵向、横向驾驶员操纵信号、飞机俯仰角信号、滚转角信号、俯仰角速率信号、滚转角速率信号、俯仰跟踪限制边界信号、滚转跟踪限制边界信号、姿态角瞄准跟踪信号、姿态角瞄准跟踪信号变化率、最大最小临近边界时间的数值,按照公式(1)、(2)、(3)即可求出边界反应操纵模型参数 K_b ;构建由参数临近边界时间 t_b 、最大临近边界时间 t_{bmax} 、最小临近边界时间 t_{bmin} 、最大驾驶员增益 K_{bmax} 决定的操纵输出误差函数 err_{min} 的公式(4), t_{bmax} 、 t_{bmin} 、 K_{bmax} 初值可以从试飞数据分析中获得;在初值的基础上分别增加或减小上述4个参数的数值,使误差函数 err_{min} 的数值最小,并最终获得边界反应操纵模型参数 K_b ;

[0035] 步骤3:利用步骤2中得到的边界反应操纵模型,建立综合人机闭环模型,将综合人机闭环模型输出的飞机姿态数值结果与试飞数据进行对比,建立误差优化函数 $err_{out_{min}}$;进一步微调整边界反应操纵模型参数 K_b ,减小误差优化函数 $err_{out_{min}}$ 的误差至可接受范围内,最终确定整边界反应操纵模型参数 K_b ;

[0036] 步骤4:计算步骤1中的驾驶员操纵方式逻辑判断模型,按照图2所示, u_p 、 u_{err} 、 u_{bup} 、 u_{bdown} 、 u_f ;为输入参数,当驾驶员操纵模型类型代码为“0”的条件满足,驾驶员操纵模式为瞄准跟踪模式;当驾驶员操纵模型类型代码为“1”的条件满足,驾驶员操纵模式为边界反应操纵;当驾驶员操纵模型类型代码为“2”的条件满足时,飞机发生边界碰撞或超越边界,人机闭环系统综合模型不工作,延迟一段时间后,全部输出参数值清零;

[0037] 另外,一种综合性人机闭环系统建模及验证方法步骤2中的俯仰瞄准跟踪符、滚转跟踪符号在平视显示器信息画面中的位置按照预先设定的常值变化,驾驶员可以预先估计目标位置,提前采取对策,使瞄准跟踪任务更容易完成,驾驶员的操纵行为模式区分明显;

如权利要求1所述的一种综合性人机闭环系统建模及验证方法,其特征在于步骤2中的任务也可在桌面模拟器、固定基模拟器、活动基模拟器上进行,为试飞任务提供先期研究、演示和培训;一种综合性人机闭环系统建模及验证方法步骤3的误差优化函数变换为 $err_out_{min} = \min(\dot{u} - \dot{u}_t)$, 其中, $\dot{u}$ 为人机闭环模型姿态角速率输出参数, $\dot{u}_t$ 为试飞中飞机姿态角速率参数,将会加快err_out减小的速度;一种综合性人机闭环系统建模及验证方法步骤4的驾驶员操纵模型类型代码为“2”时,人机闭环系统综合模型全部输出参数值重新初始化,模型开始新周期的重复持续运行。

[0038] 实施例

[0039] 滚转角跟踪人机闭环系统模型建立和验证,步骤如下:

[0040] 步骤1:建立模型架构:建立滚转角跟踪人机闭环系统综合模型,模型包含驾驶员操纵方式逻辑判断、驾驶员操纵模型、飞机状态方程、人机系统单位反馈模型四个部分组成,其中驾驶员操纵模型包含滚转角边界响应操纵模型、滚转角瞄准跟踪模型;

[0041] 步骤2:模型参数计算:

[0042] a) 飞机模型为小扰动状态方程,矩阵A、B、C、D分别为:

$$\begin{aligned}
 [0043] \quad A &= \begin{vmatrix} -0.024 & -1.00 & 0.0402 & -0.5616 \\ -0.015 & -1.38 & 0.96 & 0 \\ -0.16363 & -14.02 & -5.0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \\
 [0044] \quad B &= \begin{vmatrix} 0.1397 \\ -0.1345 \\ -13.7545 \\ 0 \end{vmatrix} \quad C = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad D = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

[0045] b) 跟踪任务为带边界的滚转姿态角跟踪,其中:

[0046] 跟踪目标的数学公式如下,

$$[0047] \quad y_{target} = 4 * (\sin(t) - \sin(0.42t + \frac{\pi}{3}) + \sin(0.84t + \frac{3\pi}{2})) \quad \text{公式 (6)}$$

[0048] 滚转边界值递减规律:左右滚转角边界分别从 $\pm 30^\circ$ 滚转角开始,每隔30秒递

[0049] 减20%,详细表格如下:

[0050] 表1滚转边界值变化表

时 间	滚转角边界值 (°)
0	± 30.00
30	± 24.00
60	± 19.20
90	± 15.36

[0052]

120	± 12.88
150	± 9.83
180	± 7.86
210	± 6.29
240	± 5.03
270	± 4.03
300	± 3.22

[0053] 任务描述:在气压高度为6000米,指示空速650km/h,空空构型配平飞机,驾驶员横向操纵飞机,使平视显示器上的飞机滚转角指示符跟踪滚转角目标符,最好覆盖;同时注意飞机滚转角不要超越左右滚转当时的限制边界值,一旦接触或超越边界,延时5秒后,本轮任务结束。

[0054] c) 从试飞数据中选择参数见表2;

[0055] 表2试飞数据选择参数表

[0056]

序号	名称	符号	单位
1	数据时间段	Time	Sec
2	气压高度	HP	M
3	马赫数	Ma	
4	指示空速	Vi	km/h
5	跟踪目标角	Roll_target	°
6	滚转左边界限制角	Roll_LB	°
7	滚转右边界限制角	Roll_RB	°
8	飞机滚转角	Roll	°
9	飞机滚转角速率	P	°/s
10	飞机偏航角	PSI	°
11	飞机偏航角速率	R	°/s
12	驾驶员纵向操纵指令	Fz	mm
13	驾驶员横向操纵指令	Fx	mm
14	驾驶员航向操纵指令	Fy	mm
15	平视显示器滚转角指示符对应数值	ROLL_HUD	°
16	飞机迎角	ALPHA	°
17	飞机法向过载	Nz	°
18	飞机侧滑角	BETA	°
19	飞机侧向过载	Ny	°
20	数据采样时间间隔	dt	sec

[0057] d) 将滚转角速率、滚转角、滚转角限制值代入公式(1)~(3)有:

[0058] $V_b = P - (Roll_LB - Roll_LBlast) / dt$ 公式(7)

[0059] 其中:Roll_LBlast为滚转角左边界限制上拍值。

[0060] $t_b = (Roll_LB - Roll) / V_b$ 公式(8)

- [0061] e) 按照公式 (3) 建立 K_b 与 t_b 的关系式;
- [0062] f) 按照公式 (5) 建立误差函数
- [0063] $err_{min} = \min(u_{ls} - Fx)$ 公式 (9)
- [0064] 调整 t_{min} 、 t_{max} 、 K_{bmax} 值, 计算 K_b 、 err_{min} , 直到 err_{min} 满足误差要求, 最后求得
- [0065] 结果如下:
- [0066] $t_{min} = 10, t_{max} = 0.8, K_{bmax} = 20$
- [0067] g) 滚转角瞄准跟踪驾驶模型:
- [0068] 由图1和瞄准跟踪任务可得:
- [0069] $u_{pls} = K_{pp} * (ROLL - ROLL_target) - K_r * p$ 公式 (10)
- [0070] 建立误差函数:
- [0071] $errp_{min} = \min(u_{pls} - Fx)$ 公式 (11)
- [0072] $errp_{out_{min}} = \min(Roll_{p_mod} - Roll)$ 公式 (12)
- [0073] 调整 K_{pp} 、 K_r 使误差函数 $errp_{min}$ 最小, $errp_{out_{min}}$ 满足要求, 最后得 $K_{pp} = 0.4, K_d = 0.5$ 。
- [0074] 步骤3: 按照公式 (5) 构建 $err_{out_{min}}$ 如下式所示:
- [0075] $err_{out_{min}} = \min(Roll_{mod} - Roll)$ 公式 (13)
- [0076] 其中, $Roll_{mod}$ 为人机闭环系统输出的滚转角。
- [0077] 微调 t_{min} 、 t_{max} 、 K_{bmax} 、 K_b 使 $err_{out_{min}}$ 满足要求。最终确认 $t_{min} = 9.7, t_{max} = 0.81, K_{bmax} = 19, K_b$ 按分段表达式计算。
- [0078] 步骤4: 逻辑判断模型
- [0079] 根据试飞数据中横向驾驶杆位移值、滚转角值、跟踪目标值、滚转左右边界限制角值, 确认当飞机滚转角与跟踪目标值之差小于边界限制80%幅值时, 驾驶员操纵模式进入瞄准跟踪操纵模式, 逻辑模型输出为“0”; 当飞机滚转角与跟踪目标值之差大于边界限制80%幅值时, 驾驶员操纵模式进入边界反应操纵模式, 逻辑模型输出为“1”; 当飞机滚转角与跟踪目标值之差大于等于边界限制时, 发生边界碰撞或超越, 任务结束, 逻辑模型输出为“2”;
- [0080] 步骤5: 最后试验例的综合人机闭环模型最终结果如下:
- [0081] 表3综合人机闭环模型参数表

逻辑判断门限	瞄准跟踪操纵方式		边界反应操纵模式			
	K_{pp}	K_r	t_{min}	t_{max}	K_{bmax}	K_b
80% Roll_LB	0.5	0.5	9.7	0.81	19	见图6

[0082]

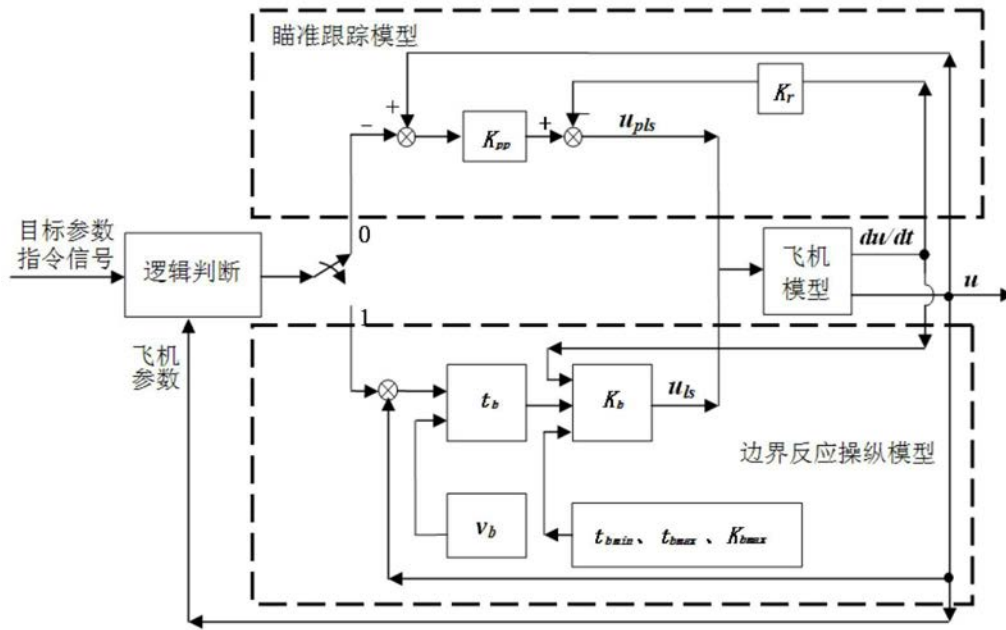


图1

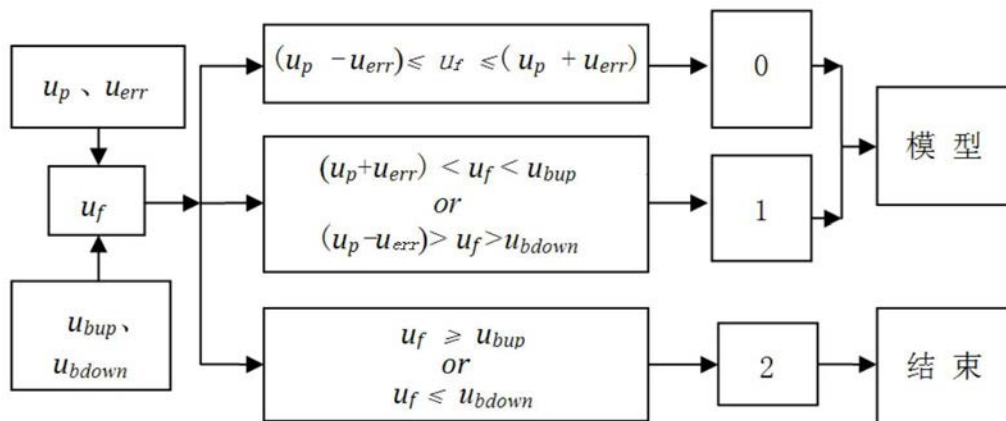


图2

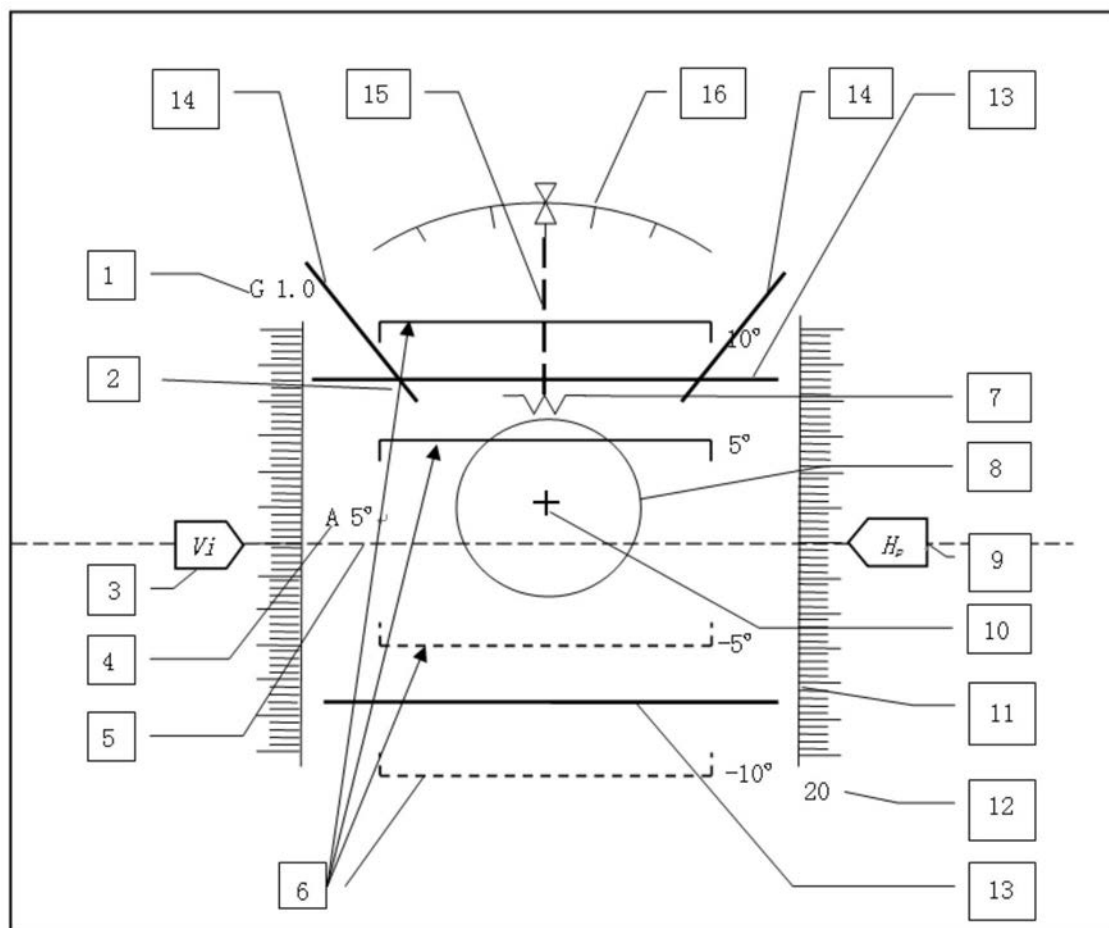


图3

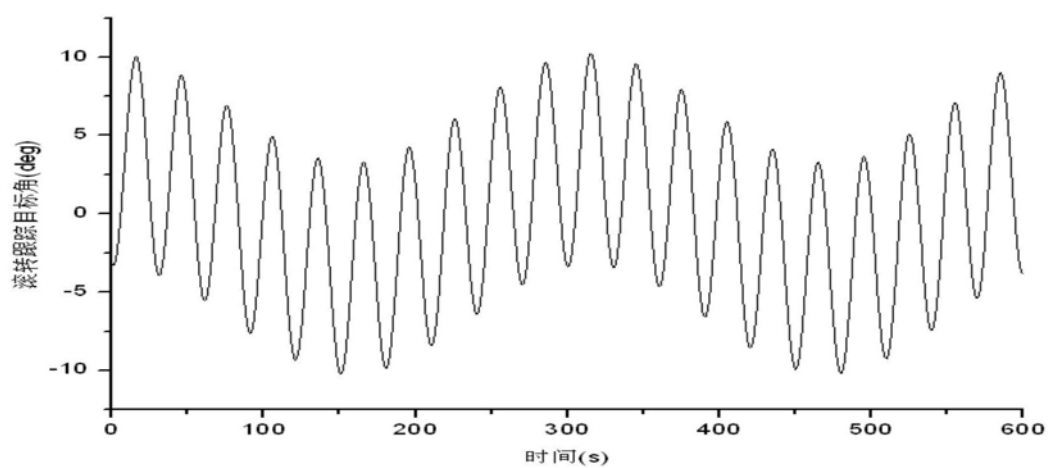


图4

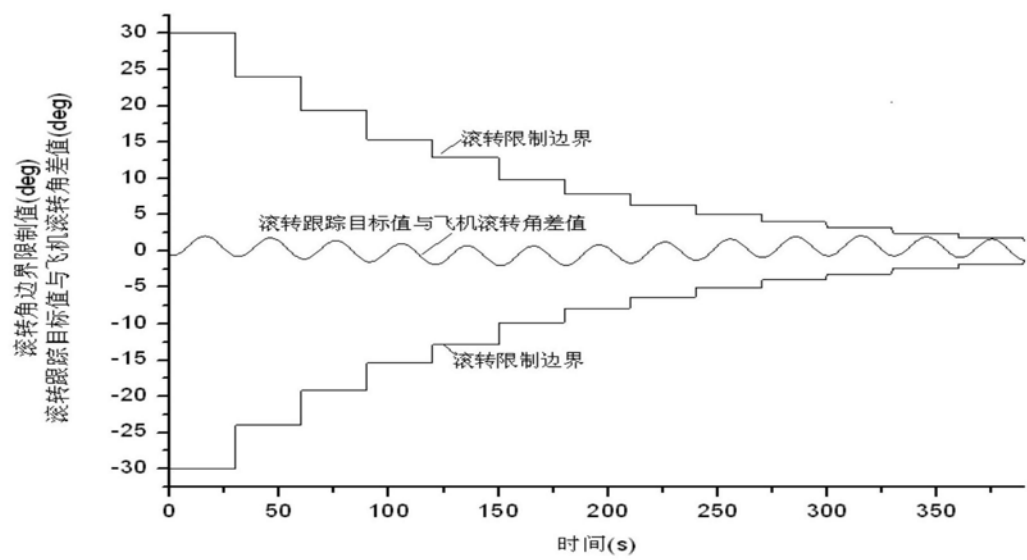


图5

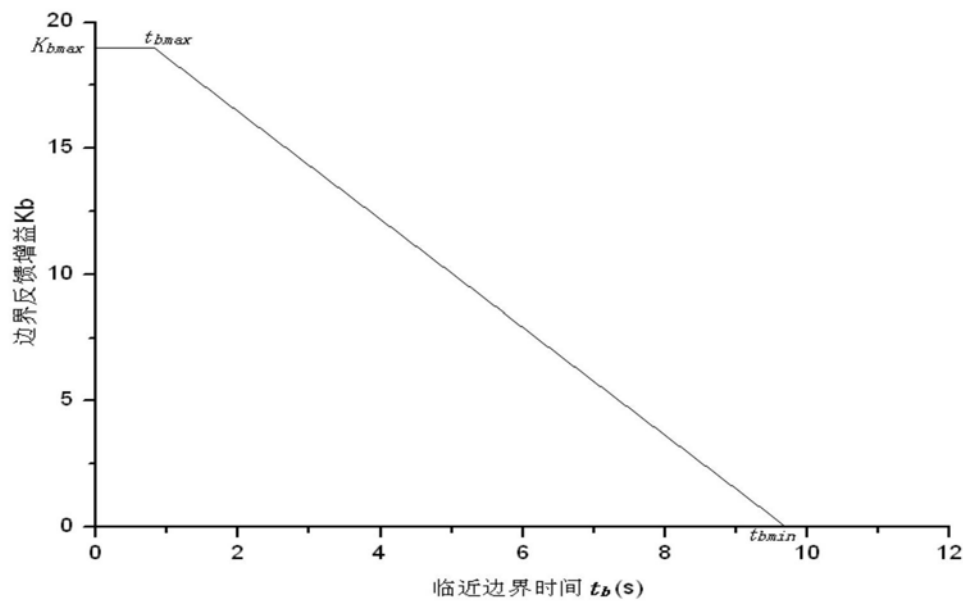


图6