

## 基于虚拟人机系统的衰减记忆去伪控制器设计

卫黎明, 傅山, 黄丹  
(上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 对于包含人为因素飞行员模型的人机系统,传统针对确定模型的控制器方法无法完全满足飞行轨迹精度。针对飞行员模型在环系统,提出了采用衰减记忆方法、线性代价递增切换算法的去伪PI控制器设计方法。去伪控制理论是一种仅利用模型输入输出数据的无模型数据驱动控制理论。在去伪控制理论中,监视器用于选择最优控制器,控制器切换算法负责在必要时进行控制器切换。衰减记忆法的引入可减弱历史数据对切换判断的影响。对特定飞行场景进行了蒙特卡罗仿真,仿真结果表明,设计的控制器可减小飞行任务中的高度轨迹偏差,提高飞行品质。

**关键词:** 飞行安全; 虚拟人机系统; 去伪控制; 衰减记忆

**中图分类号:** O213.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2016)11-0085-04

## Unfalsified Adaptive Controller Design with Fading Memory for Virtual Pilot-Aircraft System

WEI Li-ming, FU Shan, HUANG Dan  
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** For the pilot-aircraft system with pilot model concerning human factors, traditional control methods on specific models cannot totally satisfy flight trajectory precision. An unfalsified PI controller design method based on fading memory and linearly increasing cost level algorithm is introduced for such pilot-in-loop system. Unfalsified adaptive control theory is a non-model data-driven control theory, which only uses model input and output data. In the unfalsified control theory, the supervisor selects the best controller and the controller switching algorithm switches controllers when necessary. Fading memory method decreases the impact on switching algorithm which is caused by old data. Monte Carlo simulation is made in designed flight scenario. The result indicates that the designed controller improves the flight performance.

**Key words:** flight safety; virtual pilot-aircraft system; unfalsified adaptive control; fading memory

### 0 引言

航空行为的安全性受到多个潜在因素以及这些因素相互之间的影响。其中,人为因素占据重要地位,其可能导致差的飞行绩效,甚至诱发空难<sup>[1-2]</sup>,因此,研究人为因素对飞行品质及飞行安全的影响非常重要。

评估操作行为各方面影响的人为因素分析方法<sup>[3]</sup>,包括任务分析、认知分析和工作量评估等。近几十年,已发展有多种用于估计飞行员空间限制与认知约束等人为因素的计算模型<sup>[4-7]</sup>。

最近,国内提出了一种包含自适应能力、不确定性人为因素约束的飞行员模型<sup>[8]</sup>,该模型强调将任务中

各种人为因素简化,并融合到计算模型中。引入信息感知、决策制定和动作实施3个模块,并针对这3个模块选择了多个人为因素参数表征飞行员特性。通过对每个人为因素选取合适的概率密度函数,飞行员的特征得以表达。当飞行员模型加入到飞机动力学模型、外界环境、人机界面和自动驾驶设备中,通过经典的蒙特卡罗仿真,人为因素对飞行品质的影响就可以通过快速模拟进行分析。然而,虽然以上飞行员建模对飞行行为中的人为因素进行了设计描述,但系统中的控制器难以在参数不确定的人机系统中较好地满足轨迹精度要求。

传统的控制理论要对系统模型进行精确描述,然而,对于人机模型中的不确定部分其辨识难度较大,与此同时人机模型的参数是时变的。在这种实例中,引入依据系统输入输出数据就可进行控制的数据驱动控

制方法来控制系统。

基于多控制器切换的去伪自适应控制理论是一种重要的无模型数据驱动控制方法<sup>[9]</sup>。该理论不需对模型进行描述或其他假设,可根据历史数据筛选控制器,只有符合性能指标的候选控制器才能被引入闭环系统。去伪控制理论一经提出,已被应用于多个领域<sup>[10-11]</sup>。在人机系统中,引入去伪控制理论可降低对系统参数描述的要求,当系统参数变化时,去伪算法可在能满足要求的备选控制器中切换,以更好地适应变化后的系统,提高飞行轨迹精度。

衰减记忆法是卡尔曼滤波改进方法的一种,其思想是系统较近的历史数据相比于较远的历史数据更能表达当前实际状态,应具有较大权重。历史数据是筛选去伪控制器的重要依据,引入衰减记忆法有助于提高对具

有时变或随机特性系统的去伪控制器的性能。

本文中,对于虚拟飞行员飞机系统,实现了含线性递增代价函数算法与衰减记忆法的衰减去伪 PI 控制器设计。

### 1 飞行员模型描述

基于任务分析飞行员模型包括 3 个主要部分:信息感知、决策制定和动作实施。用以表征一系列人为因素,具体说明一组飞行员的特征,形成认知回路,如图 1 所示。

模型将以下人为因素进行了简化以表达任务中人的特征:显示器驻留时间、观察误差、机械误差、感知临界值、显示器观察次序和反应时间。以上人为因素影响飞行员的行为,并可以在系统中得以表达。

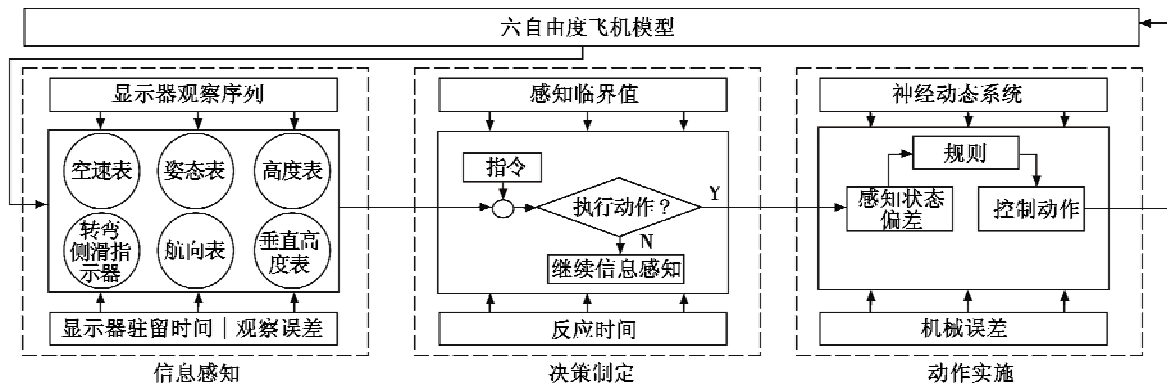


图 1 飞行员 - 飞机系统模型示意图

Fig. 1 Schematic representation of the pilot-aircraft model

#### 1.1 模型介绍

信息感知模块处理持续的位置感知保持,飞行员对姿态表、高度表、垂直速度表采样获取状态信息。在采样周期内,飞行员的注意力集中在飞机状态上,在显示器驻留时间的间隙,除关注仪表并不施加其他动作。完成采样后,飞行员可能继续观察或对当前飞行状态执行一次决策制定,决策制定模块用采样信息判断是否制定一个决策。若两者偏差高于感知临界值,则决定对状态进行干预;否则不实施动作,继续进行信息感知。

动作实施部分将获取到的信息和任务信息做对比,并量化输出控制量。

#### 1.2 飞行器模型

六自由度刚体飞机模型<sup>[12]</sup>包含 13 个一阶非线性方程,含有发动机动力学,执行器及其速度饱和约束,同时,该模型中包含自动油门和姿态保持控制系统。假设飞行状态得以在 6 个显示器上显示且没有时间延迟,由于在控制系统中包含自动油门和姿态保持控制模块,飞行仿真任务的设计可以主要着眼于高度保持。

更多关于模型的细节可以参考文献[8]。

#### 1.3 系统视角下的人机模型

为强调系统中的控制设计,人机系统可以用图 2 表达,飞行员模型如红框中所示。系统状态由信息感知模块获取,参考信号与感知到的状态之差为系统偏差,在决策制定和动作实施之后控制输入量进入控制器和系统中。

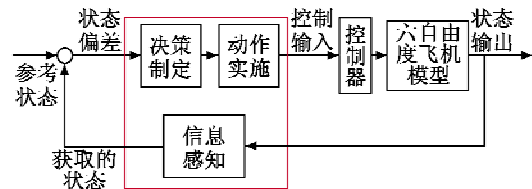


图 2 新的飞行员 - 飞机系统框图

Fig. 2 The new pilot-aircraft model

### 2 控制器设计

下文对去伪控制方法和 PI 控制器进行介绍。

#### 2.1 去伪控制理论

为更好理解去伪控制,给出如下定义<sup>[10]</sup>:通过系统输入输出对接入系统中的控制器  $K_f$  进行判断,如果

不能使系统表现满足性能指标,则称其为伪控制器,否则为去伪控制器。去伪控制框架如图 3 所示。其中,  $r(t), y(t), u(t)$  分别代表参考输入信号,系统输出信号和控制信号。

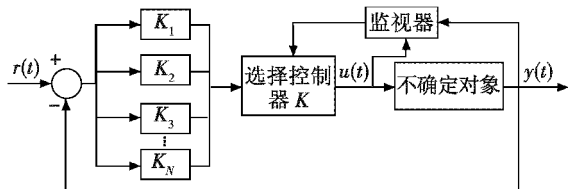


图 3 去伪控制系统

Fig. 3 The unfalsified control system

监视器通过采样数据对系统性能执行监视,在需要时切换,监视器的主要部分是代价函数  $J(K_i, d_i, t)$ 。

**定义 1** 虚拟参考信号:给定对象数据  $d(t) = (u(t) \ y(t))^T$  和一个备选控制器  $K_i$ ,假设在采集数据的整个过程中,此控制器在反馈回路中,则只要控制器  $K_i$  是可逆的,虚拟参考信号将产生完全一样的数据  $d(t)$ 。利用测量数据  $d(t)$  可以计算得到控制器  $K_i$  的虚拟参考信号  $\tilde{r}(t)$ 。

**定义 2** 代价可检测性:对于自适应控制系统,代价函数和控制器集合,没有任何系统模型假设且每个  $K$  通过有限次切换,以下命题是等价的:1) 系统的稳定性被数据对  $(r, d)$  证明是去伪的;2) 随着时间增长,  $J$  是有界的。那么代价函数和控制器集合对  $(J, K)$  就被称为是代价可检测的。

**定义 3** 自适应控制问题的可行性:如果控制器集合中至少存在一个满足系统稳定性和性能指标的控制器,则该控制问题可行。

### 2.2 PID 控制器

PID 控制器广泛应用于各类控制系统,其基本形式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

由于模型中升降舵控制器为 PI 控制器,其结构如图 4 所示,PI 控制器可表达为

$$u(t) = (K_p + K_i/s)(r - y) \quad (2)$$

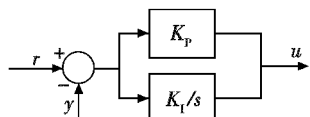


图 4 PI 控制器示意图

Fig. 4 The structure of PI controller

备选控制器集合为  $K_i = \{K_{pi}, K_{di}\}$ ,虚拟参考信号相应地为  $\tilde{r}_i = y + \frac{us}{sK_p + K_i}$ 。

当所有备选控制器中的 PI 参数均为正,则以上控制器可逆,且可保障虚拟参考信号有界且稳定。

### 2.3 性能指标与切换算法

传统的性能指标<sup>[9]</sup>为

$$T_{spec}(r(t), y(t), u(t)) = \frac{|\omega_1 * (r(t) - y(t))|^2 + |\omega_2 * u(t)|^2}{|r(t)|^2 + a} \quad (3)$$

式中: \* 代表卷积;  $\omega_1$  和  $\omega_2$  为权重传递函数的脉冲响应。传统控制器代价函数为

$$\tilde{J}_i(i, t) = \int_0^t T_{spec}(\tilde{r}_i(t), y(t), u(t)) dt \quad (4)$$

带有衰减记忆因子的代价函数<sup>[10]</sup>形式为

$$\tilde{J}(K_i, d_i, t) = \frac{F_\lambda(\tilde{r}_i(t) - y(t), t, \omega_1) + F_\lambda(u(t), t, \omega_2)}{F_\lambda(\tilde{r}_i(t), t, \omega_3) + C} \quad (5)$$

在时刻  $t$  根据代价函数阈值  $\gamma$  和历史测量信息  $d$  进行判断,若  $\tilde{J}(K_i, d_i, t) > \gamma$  则控制器为伪控制器,反之是去伪的。以上性能指标考察加权的飞行轨迹偏差和控制器输入量,当偏差值超过代价函数阈值,执行切换算法。

去伪控制器的切换算法分为自去伪方法和互去伪方法,其区别主要体现在,自去伪方法通过与特定性能函数阈值对比判断是否去伪,互去伪方法在候选控制器集合的性能函数值中选择最小值为去伪。LICLA 算法 (Linearly Increasing Cost Level Algorithm) 是一种自去伪切换算法,其过程如下:

- 1) 初始化,令  $\eta_0 > 0, \Delta\eta > 0, \gamma = \eta_0, \hat{K}(t) = K_1, K_i, i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;
- 2) 测量数据  $(r, u, y)$  更新  $\tilde{r}_i$ , 计算  $\tilde{J}_i$ ;
- 3) 判断,如果  $\tilde{J}(\hat{K}(t - dt), d_i, t) = \gamma$ , 那么剔除  $\hat{K}$ , 若所有控制器均被剔除,初始化所有控制器;
- 4) 更新控制器  $\hat{K}(t) = \operatorname{argmin}_{K_i} \tilde{J}_i$ ;
- 5) 返回 2)。

图 5 为加入衰减小去伪自适应 PI 控制器的系统框图。

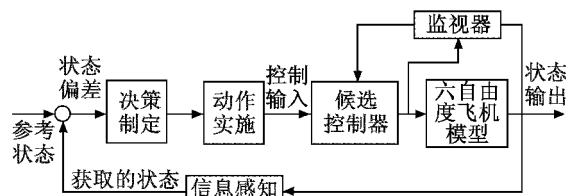


图 5 飞行员-飞机系统总体框图

Fig. 5 Configuration diagram of the pilot-aircraft system

### 3 蒙特卡罗仿真

针对文献[8]中的人机系统模型,加入含衰减记忆函数的去伪控制器,进行蒙特卡罗仿真。

#### 3.1 飞行场景

图 6 所示是仿真飞行场景,要求飞行员驾驶飞机首先以 263 m/s 速度在 3000 m 高度保持平飞,到达

50000 ft距离后拉起飞机,并在90000 ft距离后再次回到平飞状态。在这个过程中,自动驾驶确保横向姿态稳定和速度稳定。

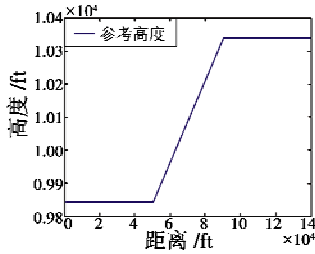


图6 飞行场景  
Fig. 6 Flight scenario

### 3.2 飞行员模型参数

飞行员模型参数如表1所示。

表1 飞行员模型的人为因素参数表

Table 1 Human factors parameters of the pilot model

参数	分布类型	均值	方差
显示器驻留时间 $t_d/s$	均匀瑞利分布	0.05	0.2
俯仰角误差 $e_\theta/rad$	正态分布	0	0.02
高度误差 $e_h/m$	正态分布	0	2
高度感知临界值 $P_{PCTR}/m$	瑞利分布	0	55
反应时间 $T_{RT}/s$	均匀瑞利分布	0.05	0.1369
操作误差 $e_{oe}/(^\circ)$	正态分布	0	2

### 3.3 仿真参数及结果

候选控制器集合包括3个 $K_p$ 和3个 $K_i$ 共9个控制器,包含能使飞行器稳定的控制器和非稳定控制器,其中,至少一组稳定控制器。选取衰减记忆因子为0.95,时间窗口为10步,权值矩阵分别为 $W_1=2.5$ 和 $W_2=1$ 。

对以上含有衰减记忆函数去伪控制器的人机系统(算例1)与原系统(算例2)分别进行500次蒙特卡罗仿真。由于系统中的随机和不确定性,每次仿真时其运动轨迹都互不相同。

图7显示任意一次飞行仿真的高度飞行轨迹。仿真开始后,系统接入自动驾驶操控高度,操作过程没有延时和噪声,在这个阶段,两个算例的轨迹基本重合。飞行员操控飞机后,飞行员模型的时变与不确定性引入系统中,飞行轨迹逐步发生偏差,算例1轨迹比算例2更贴合一条倾斜的直线,拉平后,轨迹有一定幅度的震荡。

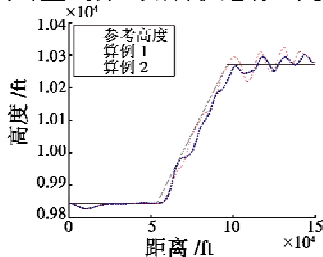


图7 飞行仿真轨迹示意图  
Fig. 7 Flight simulation trajectory

定义轨迹的均方根误差为飞行品质的量化标准(FPI),即

$$F_{FPI} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (h_{pilot,i} - h_{command,i})^2} \quad (6)$$

式中 $h_{pilot,i}$ 和 $h_{command,i}$ 分别代表第*i*次仿真的飞行员高度和任务要求高度数据; $N$ 为仿真次数。

两算例轨迹的均方根误差如表2所示。统计结果显示,算例1的轨迹偏差比算例2减小了约13.1%,表明所设计的去伪算法能从统计角度有效缩小飞行轨迹偏差。

表2 飞行品质的量化标准

Table 2 Flight performance criteria

算例1/ft	算例2/ft
24.0540	27.6803

## 4 结束语

本文以基于任务的飞行员飞机系统为研究对象,针对飞行员模型中的时延和不确定问题,采用衰减记忆函数的去伪控制算法,进行了高度控制器参数设计,并对控制器进行了仿真实验。仿真结果表明,所提出的去伪控制算法有效减小了飞行轨迹误差,提高了飞行品质。

## 参考文献

- [1] EDUARDO S, DAN M, MICHAEL C. Human factors in aviation: an overview[M]. 2nd ed. Oxford: Elsevier Press, 2010.
- [2] SHAPPELL S, DETWILER C, HOLCOMB K, et al. Human error and commercial aviation accidents: an analysis using the human factors analysis and classification system[J]. Hum Factors, 2007, 49(2): 227-242.
- [3] STANTON N A, SALMON P M, RAFFERTY L A, et al. Human factors methods: a practical guide for engineering and design[M]. 2nd ed. Aldershot: Ashgate Publishing, 2013.
- [4] MCRUER D T, JEX H R. A review of quasi-linear pilot models[J]. Transactions on Human Factors in Electronics, 1967, 8(3): 231-249.
- [5] KLEINMAN D L, BARON S, LEVISON W H. An optimal control model of human response Part I: theory and validation[J]. Automatica, 1970, 6(3): 357-369.
- [6] HESS R A, MARCHESI F. Analytical assessment of flight simulator fidelity using pilot models[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2009, 32(3): 760-770.
- [7] HESS R A. Modeling the pilot detection of time varying aircraft dynamics[J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(6): 2100-2104.
- [8] YANG C P, YIN T W, ZHAO W N, et al. Human factors

- infrared camera using curve matching framework[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012(1): 99-106.
- [7] LIU R M, LU Y H. Infrared target tracking in multiple feature pseudo-color image with kernel density estimation[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(6): 505-512.
- [8] YAN J B, LI X J, XIN Y, et al. Compressive sensing by learning a Gaussian mixture model from measurements [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 24(1): 106-119.
- [9] PEKKA P, JONI K K, JARMO I. Feature representation and discrimination based on Gaussian mixture model probability densities—practices and algorithms[J]. Pattern Recognition, 2006, 39(7): 1346-1358.
- [10] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), San Diego, 2005: 886-893.
- [11] WU B F, KAO C C, JEN C L, et al. A relative-discriminative-histogram-of-oriented-gradients-based particle filter approach to vehicle occlusion handling and tracking [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 4228-4237.
- [12] MASATAKA O, KEI K, MASAFUMI H. Laser-based pedestrian tracking in outdoor environments by multiple mobile robots[J]. Sensors, 2012, 12(11): 14489-14507.
- [13] MOSHOU D, PANTAZI X E, KATERIS D, et al. Water stress detection based on optical multisensor fusion with a least squares support vector machine classifier [J]. Biosystems Engineering, 2014, 117(2): 15-22.

(上接第 26 页)

- ear systems with a periodic event-triggering communication scheme[J]. IET Signal Processing, 2013, 7(8): 754-765.
- [10] JIANG Z P, WANG Y. Input-to-state stability for discrete-time nonlinear systems [J]. Automatica, 2001, 37(1): 857-869.
- [11] 吴晨, 许哲, 何婧, 等. 网络控制系统建模与控制[J]. 电光与控制, 2009, 16(9): 37-39, 43. (WU C, XU Z, HE J, et al. Modeling and control of the networked control systems[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(9): 37-39, 43.)
- [12] 吴晨, 方国华, 许化龙. 弹载 1553B 总线网络控制系统 Petri 网建模与性能分析[J]. 电光与控制, 2010, 17(2): 48-51, 62. (WU C, FANG G H, XU H L. Petri net based modeling and performance analysis of missile networked control system base on MIL-STD-1553B[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(2): 48-51, 62.)

(上接第 88 页)

- quantification via boundary identification of flight performance margin[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(4): 977-985.
- [9] SAFONOV M G, TSAO T C. The unfalsified control concept and learning[J]. Transactions on Automatic Control, 1997, 42(6): 843-847.
- [10] CHEN K X, LI S Y. Unfalsified adaptive PID control with a fading memory cost function[C]//The 33rd Chinese Control Conference, Nanjing, 2014: 28-30.
- [11] 任涛, 高振华, 祖国旗, 等. 去伪控制方法的研究与应用[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(12): 1678-1681. (REN T, GAO Z H, ZU G Q, et al. Research and application of unfalsified control [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(12): 1678-1681.)
- [12] ZIPFEL P H. Modeling and simulation of aerospace vehicle dynamics[M]. Reston: AIAA, 2000: 367-481.

(上接第 92 页)

- tronics Optics & Control, 2011, 18(11): 27-30.)
- [7] ZARCHAN P. Complete statistical analysis of nonlinear missile guidance systems-slam [J]. Journal of Guidance and Control, 1979, 2(1): 71-78.
- [8] 付海峰, 刘华伟, 张宗麟. 中距主动制导空空导弹目标截获概率仿真计算 [J]. 电光与控制, 2007, 14(3): 55-58. (FU H F, LIU H W, ZHANG Z L. Simulated computation of target-acquisition probability of medium-range active-guided AAM[J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(3): 55-58.)
- [9] 付昭旺, 于雷, 寇英信, 等. 导弹协同制导中未交接班目标截获概率研究[J]. 弹道学报, 2012, 24(4): 31-36. (FU Z W, YU L, KOU Y X, et al. Target acquisition probability in midcourse and terminal guidance handing-off for cooperative guidance of missile [J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(4): 31-36.)
- [10] 谢希权, 易华. 多目标攻击空空导弹的目标截获概率分析 [J]. 电光与控制, 2001, 8(2): 33-36. (XIE X Q, YI H. Analysis of AAM acquisition probability in multi-target attacking[J]. Electronics Optics & Control, 2001, 8(2): 33-36.)