

多因素耦合飞行情形的复杂系统建模与仿真方法

刘东亮¹, 徐浩军¹, 刘莉², 葛志浩¹, 裴彬彬¹

(1.空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安,710038;2.94188部队,陕西西安,710077)

摘要 针对多因素耦合飞行情形动态复杂性强、易诱发“不可逆”灾难性事故等特点,首先分析了不利因素对飞行安全的影响,并对不利因素耦合类型进行归类,然后建立了以飞机六自由度全量仿真模型和驾驶员操纵模型为基础的人-机系统模型;重点研究了特殊情况下驾驶员的失误模型,建立了驾驶员滞后失误时间和反操纵失误的定量模型、自动驾驶仪可靠性模型、传感器故障通用模型和过载传感器故障模型。最后,以 GJB 626A—2006 中的“自动驾驶仪低限高度自动拉起”风险科目为例,对人-机不利因素双耦合和机-机不利因素双耦合 2 种情形进行了仿真分析,结果验证了该方法的可行性和有效性。

关键词 飞行安全;多因素耦合;“人-机-环”系统;复杂飞行情形;建模与仿真

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.06.001

中图分类号 V328 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2012)06-0001-05

飞行事故的发生具有强烈的动态复杂性^[1],通常是由偶然的、耦合作用的不安全基元事件累积导致。随着飞机设计的不断改进和人类防范意识的提高,多因素耦合诱发的飞行事故比重呈不断上升趋势。分析表明,全世界 92% 的事故是由多个因子导致的,平均每个事故有 4.39 个基元事件,多的可达 20 个^[2]。多因素耦合诱发飞行事故具有因素关联复杂、隐蔽性强等特点,易造成灾难性后果。且其涉及边界状态的飞行,随机性强、难于验证,是飞机安全性研究的难点问题。

Ivan Y. Burdun, Daniel A. DeLaurentist, Dimitri N. Mavris 等学者研究认为^[3-5]:在飞机设计中对安全性进行建模仿真目的在于避免这种强因果“连锁反应”的发生。近年来,国内逐步重视对多因素耦合复杂飞行情形的研究,文献[6]提出了一种基于 Petri 网的多因素耦合事件链模型。文献[7]以波音 747 飞机的重大空难为案例,提出截断事故链中关键链的概念与方法。然而,应用人机复杂系统建模与仿真方法研究多因素耦合机理尚未见相关报道。因此,本文对多因素耦合飞行事故的复杂飞行情形进行了建模与仿真研究。

1 不利因素对飞行安全的影响与耦合

1.1 不利因素对飞行安全的影响

影响飞行安全的主要有人为失误、装备故障和恶劣环境 3 类因素。人为失误^[8]主要包括:操纵不当、违反规章制度飞行、设备使用不当、数据输入错误、交通观察欠缺、目测高/低、反操纵、错误关车、迷航等。人为失误可直接造成严重飞行事故。根据装备故障对飞机动态特性影响过程,可将其分为直接产生力和力矩的故障、影响飞行员操纵的故障以及影响航空器空间位置信息的故障 3 类。恶劣环境方面,风切变、大气紊流、尾流可能直接产生意外的力或力矩作用于航空器;雷击、撞鸟或空中物体相撞,可能导致航空器结构发生破坏;结冰、暴风或暴雪可能导致气动特性发生变化;大雾、尘暴、雪暴和低云可能会对飞行员的操作造成困难。

收稿日期:2012-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60572172)

作者简介:刘东亮(1986—),男,山东滨州人,博士生,主要从事飞行仿真与飞行安全研究。

E-mail:oxygenldl09@163.com

1.2 不利因素耦合类型

不利因素耦合可根据因素类型、数量或形式等进行分类。根据因素耦合类型可分为同类因素耦合和异类因素耦合。根据因素耦合数量可分为双因素耦合和多因素耦合。按照因素耦合形式^[6]可分为串联型因素耦合、并联型因素耦合、串并联复合型因素耦合和环状型因素耦合。

2 “人-机-环”系统复杂飞行情形数学模型

因素耦合对飞行安全影响定量分析的关键是建立“人-机-环”系统在复杂飞行情形下的数学模型。本文将该模型分为人-机系统基本模型和不利因素模型 2 部分。不利因素模型又包括人因失误模型、装备故障模型和恶劣环境模型。

2.1 人-机系统基本模型

多因素耦合的复杂飞行情形涉及临界飞行状态,应考虑建立相应的飞机非线性动力学模型,飞机本体六自由度非线性动力学模型详见文献[9]。该模型的求解分为 2 部分:一是采用牛顿法求解初始条件;二是采用 4 阶 Runge-Kutta 法求解非线性微分方程组。操纵系统模型现多采用 MATLAB/SIMULINK 建立,该软件采用模块化建模方式,可对复杂的电传操纵系统进行准确的定量仿真计算。

根据不利因素影响下飞机运动参数迅速变化时的驾驶员操纵特性,可以建立特殊情况下控制仿真模型。考虑飞行员操纵滞后时间及其初始干预,建立驾驶员模型见图 1。

实验数据分析表明^[10],驾驶员操纵滞后时间服从对数正态分布。参与操纵的滞后时间可分为:飞行员发现时间 $\Delta\pi$ 、识别故障并做出决定如何操纵的时间 $\Delta\varpi$ 和神经肌肉滞后时间 $\Delta\varpi$,表示为:

$$t_p = \Delta\pi + \Delta\varpi + \Delta\varpi \quad (1)$$

滞后时间由加速度激励下的驾驶员特性决定。滞后时间 t_p 的数学期望 m_{t_p} 是激励参数时间变化率 \dot{x}_{cpi} 的函数,即 $m_{t_p} = f(\dot{x}_{cpi}) = a_i + \frac{b_i}{\dot{x}_{cpi}}$ 。其中, a_i 和 b_i 是由激励参数决定的,取值可由试验测得^[11]。具体 \dot{x}_{cpi} 由飞机的动态特性决定的,可由飞机运动方程确定,它是时间的函数,即 $\dot{x}_{cpi} = g(t)$ 。

2.2 不利因素模型

目前的人因失误模型多为定性分析模型,文献[11]提出了基于贝叶斯网络的飞行安全人因可靠性评估模型。在多因素耦合复杂飞行情形的仿真研究中,还应根据实际情况建立驾驶员操纵失误的定量数学模型。本文根据案例仿真需求,建立驾驶员滞后失误时间模型和反操纵失误模型。

首先建立滞后失误时间模型。令失误时间为 t_E ,当滞后时间大于 t_{per} 时界定为失误时间(图 2), t_{per} 又称“操纵时间裕度”,可由具体情形仿真求出。根据飞行员心理生理特性,参与操纵的滞后失误时间可在一定范围内变化。建立失误时间 t_E 的概率密度函数模型(图 2),其服从对数截尾正态分布:

$$f(t_E) = \frac{1}{t_E^* \sqrt{2\pi D}} \exp\left[-\frac{1}{2D}(\ln t_E^* - \ln t_{E0}^*)^2\right], 0.13 \leq t_E \leq t_{per} \quad (2)$$

式中: $t_E^* = t_E - 0.13$, $\ln t_{E0}^*$ 是 $\ln t_E^*$ 的数学期望; D 是 $\ln t_E^*$ 的方差。滞后时间 t_E 的数学期望 m_{t_E} 是激励参数时间变化率 \dot{x}_{cpi} 的函数。

令反操纵失误的操作量为 δ_E ,驾驶员的正常拉起操纵量为 δ_D 。为了反映驾驶员真实操纵的随机性,定义反操纵量 δ_E 服从期望为 $-\delta_D$ 的截尾正态分布,其概率密度函数为:

$$f(\delta_E) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\delta_E - (-\delta_D))^2}{2\sigma^2}}, -\delta_D - \Delta \leq \delta_E \leq -\delta_D + \Delta \quad (3)$$

式中方差 σ 和 Δ 体现飞行员个体的差异性和复杂情形操纵的随机性,见图 3。

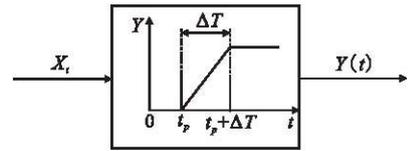


图1 特殊情况下的驾驶员操纵模型

Fig.1 Pilot manipulation model in extreme conditions

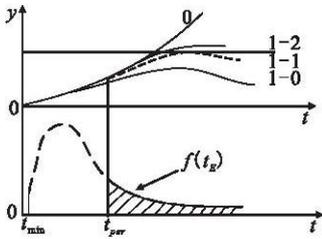


图 2 滞后失误时间模型

Fig. 2 Delay failure time model

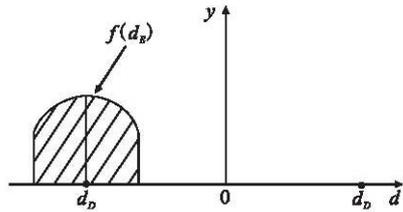


图 3 反操纵失误模型

Fig. 3 Reverse manipulation model

装备故障建模主要关注故障模式、故障概率以及故障对飞行器运动的影响。本文重点对自动驾驶仪故障模型和传感器故障模型进行建模。自动驾驶仪故障后停止向操纵系统发送指令或发送错误指令,本文取停止发送指令情形,关注的主要参数为自动驾驶仪的可靠度。常用的产品寿命分布有:指数分布、整体分布、对数正态分布和威布尔分布。设某型自动驾驶仪的概率密度函数服从威布尔分布,则其可靠性函数为:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\gamma}\right)^\beta}, t \geq \gamma \quad (4)$$

某型飞机电传操纵系统的纵向过载传感器故障后可引起飞机平尾的非指令性偏转,其故障模式为随机地错误指示在某一固定值上,经统计分析,故障指示值服从截尾正态分布。仿真中可通过 Monte Carlo 法产生截尾正态分布的故障随机数。传感器的通用故障模型^[11]描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Qf_s(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Q \in R^{m \times g}$ 为传感器故障分配矩阵; $f_s(t) \in R^g$ 为故障对系统输出的影响函数。

恶劣环境模型可分为风切变模型、结冰模型等,详见文献[10],此处不进行详细分析。

3 案例分析

针对“GJB 626A—2006 军用固定翼飞机和旋翼机科研试飞风险科目”中的自动驾驶仪低限高度自动拉起(NO.42)科目,应用所建模型对不利因素耦合影响下的复杂飞行情形进行建模仿真。设飞机在 2 000 m 高度由平飞俯冲到 1 700 m 时,自动驾驶仪自动操纵全动平尾拉起飞机。试飞区域为某高海拔山区,飞行低限高度为 1 300 m。该科目的不利因素有:自动驾驶仪存在一定的故障率;该型飞机的电传操纵系统中故障率最高的为过载传感器;自动驾驶仪故障后,驾驶员要在较短时间内拉起飞机,主要失误为反应滞后时间过长。本案例进行 2 种可能的双因素耦合:①“自动驾驶仪故障”+“驾驶员操纵失误”,为人-机因素耦合;②“自动驾驶仪故障”+“纵向传感器故障”,为机-机因素耦合。

建立飞机六自由度全量微分方程,调入飞机气动参数数据库,仿真步长取 0.01 s。驾驶员基本操纵策略模型选用图 1 中的特殊情况下驾驶员模型,驾驶员操纵失误模型选取滞后失误时间模型,自动驾驶仪故障和过载传感器故障模型均选用 2.2 中建立的模型。仿真初始条件: $H=2\,000\text{ m}$, $Ma=0.8$,从飞机由平飞转向俯冲开始计时 $t=0$ 。

1)人-机不利因素耦合,见图 4。自动驾驶仪正常工作时, $H_{\min}=1\,496\text{ m}$,还具有 196 m 的高度裕度。若自动驾驶仪出现单故障,驾驶员无失误地迅速操纵飞机,当滞后时间为 $t_p \leq 1.05\text{ s}$ 时,飞机可以正常拉起,且具有一定的高度裕度。当滞后时间为 1.05 s 时,试飞员刚好把飞机拉起(失误临界点),因此试飞员的“操纵时间裕度”为 $t_{per}=1.05\text{ s}$ 。当自动驾驶仪故障和驾驶员操纵失误同时出现,即人-机不利因素双耦合时,发生飞行事故。

2)机-机不利因素耦合,见图 5。若自动驾驶仪出现单故障,驾驶员无失误地迅速操纵飞机,则不会出现飞行风险。当纵向过载传感器出现故障,故障偏角符合截尾正态分布,引起全动平尾的故障偏转值区间为 $(-12^\circ, 12^\circ)$,此处计算最危险情况,取 $\delta_c=12^\circ$ 。应用式(2)进行理论估算,熟练驾驶员在该情况下最快反应速度约为 0.8 s。由图 5 仿真结果可得,当机-机耦合出现时,即使飞行员用最快的反应速度操纵飞机,飞机依然超过最低高度限制而发生事故。

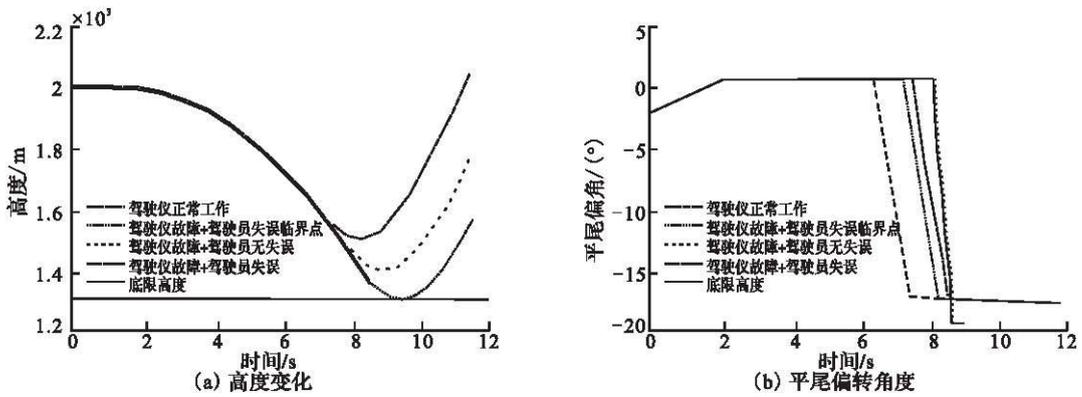


图4 人-机不利因素耦合下的高度变化和平尾偏转角度

Fig. 4 Height and elevator with time in "human-machine" factors coupling situation

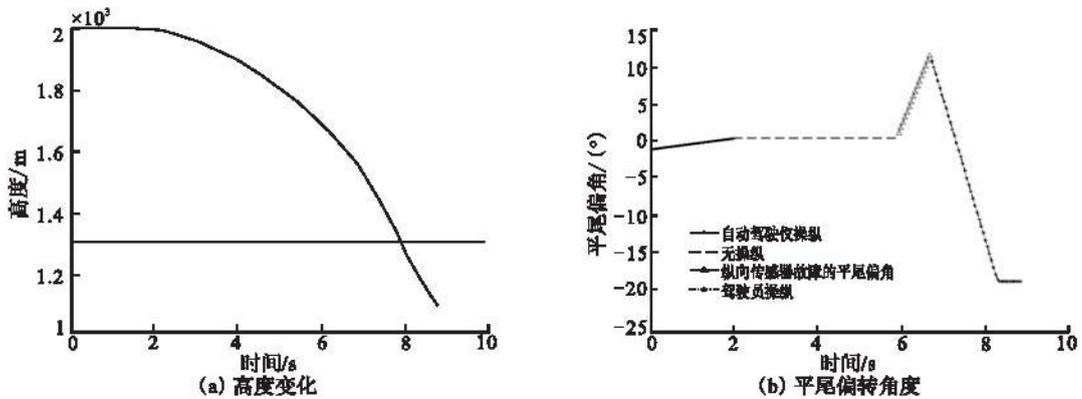


图5 机-机不利因素耦合下的高度变化和平尾偏转角度

Fig. 5 Height and elevator with time in "machine-machine" factors coupling situation

4 结语

相比传统方法,本文提出的基于建模仿真的多因素复杂情形研究方法具有深入系统物理层面、可重复性强、安全性好、节约时间和经费、覆盖全飞行包线等优势。仿真结果说明,2个对飞行安全影响较小的单一因素发生耦合,可能会导致严重的飞行事故,事故深层次的原因与多因素影响下的“人-机-环”系统总体行为特性有关。通过对复杂系统行为特性的研究,可以找到危险事故链,从而消除设计缺陷,提高飞机的固有安全性。后续工作中应加强对不利因素影响模型,因素耦合模型等的研究,并进行建模与仿真的校核、验证与确认(VVA),以为复杂飞行情形的飞行安全保障提供客观有效的理论支撑。

参考文献(References):

- [1] Xiaolei LI, Tingdi ZHAO. An accident analysis model oriented to complex tasks process [C]//Reliability and maintainability symposium (RAMS). San Jose, CA: RANS press, 2010: 1-6.
- [2] 霍志勤. 对多因子诱发航空事故的思考[J]. 中国民航飞行学院学报, 2004, 22(2): 29-33.
HUO Zhiqin. Thinking on phenomenon that several factors bring out aviation accident [J]. Journal of civil aviation university of China, 2004, 22(2): 29-33. (in Chinese)
- [3] Burdun Ivan Y, De Laurentis Daniel A, Mavris Dimitri N. Modeling and simulation of airworthiness requirements for an HSCT prototype in early design[R]. AIAA 1998-4936.
- [4] De Laurentis Daniel A. Understanding transportation as system-of-systems design problem [R]. AIAA 2005-123.
- [5] Mavris Dimitri N, Biltgen Patrick T, Weston Neil R. Advanced design of complex systems using the collaborative visualization environment (CoVE) [R]. AIAA 2005-126.
- [6] Xiaolei LI, Tingdi ZHAO, Mei RONG. A multi-factor coupling event chain model based on Petri nets //Proceeding of reliability, maintainability and safety. Chengdu: [s.n.], 2009: 466-469.

- [7] 冯蕴雯, 宣建林, 国志刚, 等. 飞行器多因素突发性灾难事故的预防及其算法[J]. 航空学报, 2007, 28(1):146-150.
FENG Yunwen, XUAN Jianlin, GUO Zhigang, et al. The algorithm of the disastrous accident caused by a series of accidental factors[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2007, 28(1):146-150. (in Chinese)
- [8] 罗晓利. 人因(HF)事故与事故征候分类标准及近十二年中国民航 HF 事故与事故征候的分类统计报告[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(5):55-62.
LUO Xiaoli. A classification on human factor accident/incident of China civil aviation in recent twelve years[J]. China safety science journal, 2002, 12(5):55-62. (in Chinese)
- [9] 徐浩军, 刘东亮, 孟捷, 等. 基于系统仿真的飞行安全评估方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
XU Haojun, LIU Dongliang, MENG Jie, et al. Flight safety evaluation theories and methods based on system simulation [M]. Beijing: National defense industry press, 2011. (in Chinese)
- [10] Бюшгенс Г С. Аэродинамика устойчивости иуправ ляемость сверхзвуковых самолетов [M]. Москва: НАУКА ФИЗМАТЛИТ, 1998. (in Russian)
- [11] 刘莉, 徐浩军, 井凤玲, 等. 基于贝叶斯网络的飞行安全人因可靠性评估模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(3):5-9.
LIU Li, XU Haojun, JING Fengling, et al. Flight safety human reliability evaluation model based on bayesian networks [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2009, 10(3):5-9. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

Modeling and Simulation Method of Complex System in Multi-factor Coupling Flight Situations

LIU Dong-liang¹, XU Hao-jun¹, LIU Li², GE Zhi-hao¹, PEI Bin-bin¹

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 94188, Xi'an 710077, China)

Abstract: Multi-factor coupling flight situations have the characteristics of strong dynamic complexity and always leading to "irreversible" chain reaction disasters. To research the modeling and simulation method of pilot-aircraft complex system in coupling flight situations, the impact of disadvantageous factors on flight safety is analyzed, and the factor coupling types are classified. Pilot-aircraft basic model is set up based on non-linear six-degree-of-freedom mathematical model and pilot manipulation model. Special researches are conducted on the modeling of pilot failure model. The delay time failure is defined and modeled, and reverse manipulation model is established. The robot pilot reliability model, sensor general malfunction model and overload sensor malfunction model are established. The subject of "automatic pull-up using robot pilot in the lowest permitted height" in GJB 626A-2006 is used for example, in which the "human-machine" and "machine-machine" disadvantageous factor double coupling situations are simulated and analyzed to verify the feasibility and practicability of the method.

Key words: flight safety; multi-factor coupling; human-machine-environment; complex flight situations; modeling and simulation

本刊相关链接文献:

- [1] 张天, 潘天峰, 张蓉. 极值理论在飞机操纵系统安全性评估中的应用[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(3):11-14.
- [2] 宗蜀宁, 端木京顺, 王青, 赵瑞贤, 汪建华. 飞机整机级系统安全性指标分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(1):10-14.
- [3] 石荣, 刘澜, 杨家忠, 李明捷. 基于 CBR 的飞行事故及事故征候辅助调查方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(5):21-25.
- [4] 何宇廷. 飞机安全服役包线的建立[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(2):1-5.