

基于隐马尔可夫模型的切换飞行控制系统性能分析

王蕊^{*①} 李彦骁^① 孙辉^① 陈增强^②

^①(中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

^②(南开大学计算机与控制工程学院 天津 300071)

摘要: 该文研究了一种由电磁环境对电子设备产生的数字干扰来驱动的切换飞行控制系统性能分析模型。其中,从电磁干扰的产生原理角度,采用隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)描述数字电磁干扰特性并对其进行建模分析,同时针对 HMM 参数训练算法存在对初值选择敏感的问题,提出一种快速的初值选择策略,可以在经典 Baum-Welch 算法迭代下达到指定的收敛精度。最后将 HMM 电磁干扰注入分布式飞行控制系统性能观测平台,从理论与仿真的角度对比了不同电磁环境下分布式飞行控制系统的性能下降情况。仿真实验表明:与已有的数字电磁干扰建模分析方法相比, HMM 具有更高的准确度,并且仿真所得性能下降程度与理论分析一致。

关键词: 飞行控制系统; 隐马尔可夫模型; 稳定性; 数字干扰; 切换系统

中图分类号: V249; TP202+.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)04-0989-08

DOI: 10.11999/JEIT160492

Performance Analysis of Switched Flight Control Systems Based on Hidden Markov Model

WANG Rui^① LI Yanxiao^① SUN Hui^① CHEN Zengqiang^②

^①(College of Information Engineering and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

^②(Computer and Control Engineering College, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: This paper proposes the performance analysis model of switched flight control systems driven by the digital upsets when electronics devices are subject to electromagnetic environments. Hidden Markov Model (HMM) is used to describe the characteristics of digital upsets and construct the model based on the theory of the electromagnetic interferences. The parameter estimation algorithms of the traditional training method for HMM are sensitive to initial parameters, therefore, this paper proposes a fast initial parameter selection strategy which can also accelerate the training processes. At the end, HMM-based electromagnetic interferences are fed to the performance observation platform for the distributed flight control systems. This paper also compares multiple performance degradation results under different electromagnetic fields from theory and simulation perspectives. Simulation results demonstrate HMM model can characterize the digital electromagnetic upsets more accurately compared to the existed digital electromagnetic models, and simulation results of the corresponding performance degradation are consistent with the theoretic results.

Key words: Flight control systems; Hidden Markov Model (HMM); Stability; Digital upsets; Switched systems

1 引言

飞行控制系统是整架飞机的神经中枢,负责飞

机的稳定性和操纵性,一旦失效将会造成灾难性的后果。作为高度集成的电子系统,其不可避免地会受到包括自然闪电和人造高强辐射场在内的外部电磁环境的干扰。这些干扰通常以电磁耦合的方式进入飞行控制系统中的各个模块,造成处理器、传输线路、存储器和执行器等元件的数据错误,进而威胁飞行的稳定性。为提高飞行控制系统的可靠性,现代飞机上广泛采用以多通道冗余为基础的容错控制技术。然而,高强辐射场往往会造成冗余的多控制通道短时间内同时失效。近年来,世界各国民航法规已逐步将高强辐射场纳入飞机适航审定的范畴

收稿日期: 2016-05-16; 改回日期: 2016-10-25; 网络出版: 2016-12-20

*通信作者: 王蕊 wrhappyfuture@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(61403395, U1533201), 中国民航大学中央高校基本科研业务费(3122014D024), 中国教育部留学回国人员科研启动基金, 民航局科技创新引导基金(20150227)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61403395, U1533201), The Fundamental Research Funds for the Central Universities of CAUC (3122014D024), The Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry, Science and Technology Innovation Guidance Funds of CAAC (20150227)

中,而相关的符合性验证实验主要以物理实验为主,即将整机、系统、模块等分别放置于实际高强辐射场中,这类实验成本高昂且具有一定的危险性。因此,通过理论与仿真的方法评估飞行控制系统在强辐射场中的性能下降程度,可以为飞机适航审定提供新的依据,以达到保障飞行安全、提高适航审定效率等目的。此外,随着基于模型的设计思想在世界范围内的广泛开展,本文的研究工作可以为容错飞行控制系统的设计提供早期验证支持。

飞行控制系统和高强辐射场都是异常复杂的系统,采用物理定律和控制理论直接分析二者的因果关系十分困难。因此,目前的研究都首先建立高强辐射场产生的干扰信号的数学模型描述。这些电磁干扰可以用一个二值随机过程表示,文献[1,2]采用马尔可夫模型描述这一数字电磁干扰,但文献[3]中的物理实验表明高强辐射场产生的数字干扰信号不具有常规阶的马尔可夫性。因此,文献[4]提出了一种“突发模型”,通过按一定规律增加干扰,使得插值后的干扰信号近似为一阶马尔可夫过程。突发模型延长了干扰信号的持续时间,因此不能用于精确分析飞行控制系统的性能误差,只能提供输出性能误差的上界。

HMM 是一种时间序列信号的统计分析模型,目前主要应用在模式识别领域^[5-7],如:手写识别、故障诊断、语言识别等方面,并取得了良好的效果。文献[8]采用 HMM 对网络控制系统的延时进行建模,并证明了该模型比马尔可夫模型更能反映实际的延时特性。本文从电磁干扰的产生机理出发,采用 HMM 对数字干扰信号进行建模,并且在模型参数训练中提出了一种快速的初值选择策略。

多通道冗余的容错飞行控制系统,可以抽象为一类复杂网络:系统中的模块可以看成复杂网络的节点,而不同通道模块之间的连接关系为复杂网络的连边。文献[9]提出一种通用的时变动态网络模型,并证明了相关的网络同步定理。这为容错飞行控制系统的建模分析与设计提供了良好的思路:基于网络同步定理设计容错结构,以保证系统在干扰下仍能达到多通道的同步。

为了描述电磁干扰对容错飞行控制系统的干扰作用,本文引入了分布式飞行控制系统性能观测平台,将电磁干扰注入该平台的不同通道和模块中,以平台输出信号作为切换律驱动波音 747 飞行控制系统,并从理论与仿真的角度研究飞行性能误差,对比了理论与仿真结果。

本文的结构安排如下:第 2 节建立了由电磁干扰信号驱动的切换线性飞行控制系统性能分析模

型。第 3 节将 HMM 应用于电磁干扰建模中。第 4 节采用经典的 Baum-Welch 算法进行参数训练,并提出了一种快速的模型参数初值选择策略。第 5 节对 HMM 的建模准确性进行了仿真验证。第 6 节研究了 HMM 电磁干扰分别对飞行控制系统的单通道和多通道的影响。最后一节进行总结与展望。

2 飞行控制系统在电磁干扰作用下的性能模型

数字飞行控制系统在外界电磁干扰作用下会出现性能下降,具体的性能下降程度需要建模分析。中国民用航空规章 25 部要求航空器在受到电磁干扰后,“系统及时地自动恢复其功能的正常运行,除非系统的这种功能恢复与该系统其他运行或功能要求相冲突”^[10]。因此本文的研究假设当干扰消失时,系统能够恢复正常工作状态。也就是说,飞行控制系统可以从失效状态切换回正常状态。切换过程由电磁干扰的发生决定,该过程是一个只有两种状态的随机过程,分别用 0, 1 表示,其中 0 表示没有干扰发生,1 表示有干扰发生。对于离散的飞行控制系统,整个飞行控制系统的切换线性系统模型为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_{z_v(k)} \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_{z_v(k)} \mathbf{w}(k) + \mathbf{r}_{\text{ref}}(k) \quad (1a)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}_{z_v(k)} \mathbf{x}(k) \quad (1b)$$

其中, $z_v(k)$ 为切换律,当系统受到电磁干扰作用时, $z_v(k)$ 取值为 1, 否则为 0。此时切换系统模型分别为 $(\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1, \mathbf{C}_1)$ 和 $(\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0)$, 分别表示飞行控制系统工作于闭环正常状态和开环失效状态。另外, $\mathbf{w}(k)$ 是高斯白噪声信号输入, $\mathbf{r}_{\text{ref}}(k)$ 是控制参考信号。关于获取离散的飞行控制系统模型的具体方法见文献[3]。

图 1 是切换控制系统在切换信号作用下性能分析的误差模型,用于分析随机干扰过程对飞行控制系统性能的影响。

如图 1 所示,该误差系统由两个相同的闭环飞行控制系统式(1)组成,其中,参照系统只工作在正常的子系统状态 $(\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0)$; 而失效系统由随机干扰 $z_v(k)$ 控制,其子系统模型在 $(\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0)$ 和 $(\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1, \mathbf{C}_1)$ 之间发生切换。两个系统在分析过程中注入相同的高斯白噪声 $\mathbf{w}(k)$ 信号。最终以失效系统

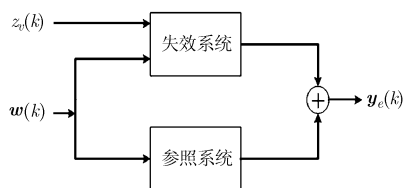


图 1 飞行控制系统性能误差模型

与参照系统输出响应的差值 $y_e(k)$ 作为整个误差系统的输出响应, 并以输出响应的均方值作为误差性能指标:

$$J_{w,e} = \lim_{k \rightarrow \infty} E \left\{ \|y_e(k)\|^2 \right\} \quad (2)$$

如果式(2)极限存在, 说明飞行控制系统在电磁干扰作用下均方稳定, 并且极限值越小说明系统越稳定。

3 隐马尔可夫模型

高强辐射场是一类异常复杂的随机场, 其随机性由场强、频率和空间位置等众多随机因素构成。因此对电磁场的建模分析无法将每一个随机因素都包含进去, 但可以将众多随机因素综合成一个随机变量——“环境状态”。文献[11]讨论了 HMM 的最小实现问题, 本文将环境状态分为两个等级, 分别用“强”和“弱”来表示。电磁场是连续变化的物理场, 电磁场的当前状态会受到前一时刻状态的影响, 因此本文选择一阶马尔可夫链描述电磁环境状态的变化规律。而不同的环境状态会以不同的概率对飞行控制系统产生干扰, 环境状态与电磁干扰之间这样的关系则可以用 HMM 恰当描述, 下面是完整的 HMM 的介绍。

S_i 表示状态空间 \mathcal{S} 的状态, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$; q_t 是 t 时刻模型所处的状态, 即 $q_t \in \mathcal{S}$; V_j 表示观测值空间 \mathcal{V} 的观测值, $j \in \{1, 2, \dots, M\}$; o_t 表示 t 时刻模型表现出的观测值, 即 $o_t \in \mathcal{V}$ 。初始状态概率向量 $\pi = \{\pi_i\}$, 其中 $\pi_i = P\{q_0 = S_i\}$ 。状态转移概率矩阵 $A_h = \{a_{mn}\}$, 其中 $a_{mn} = P\{q_{t+1} = S_n | q_t = S_m\}$, $m, n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。矩阵 A_h 揭示出了电磁环境的随机特性。观测值概率矩阵 $B_h = \{b_{ij}\}$, 其中 $b_{ij} = P\{o_t = V_j | q_t = S_i\}$ 。切换干扰信号由观测值概率矩阵 B_h 产生。

环境状态表征了电磁场的总体状况, 其随机性也决定了电磁干扰的随机性。直观的解释就是: 电磁环境越恶劣就越容易使飞行控制器失效。电磁干扰对飞行控制系统稳定性的影响实际上就是电磁环境状态对系统稳定性影响的外在表现。HMM 包含电磁干扰产生的内在原因, 因此能够更加准确地描述飞行性能下降的程度。

HMM 是一种双重随机过程, 与一阶马尔可夫模型相比, 它的结构更加复杂, 因而也具有更强的随机过程描述能力。但 HMM 相对复杂的结构会影响其实际应用能力。首先, HMM 的结构不一定唯一, 其隐状态个数甚至可能是时变的, 本文建立的 HMM 隐状态数为两个, 其他结构的 HMM 仍需进一步考虑。其次, 训练数据越多需要的建模时间越

长, 可能会影响到系统的性能, 可以考虑在线实时更新的解决策略。

4 HMM 初值选择策略

使用 HMM 分析电磁干扰首先要建立其数学模型, 通过调整模型参数 A_h 和 B_h , 使该模型产生已有电磁干扰(训练数据)的概率最大。遗憾的是, 目前还没有方法可以得到这一极大似然准则下的解析解, 也无法通过有限长度的观测序列得到模型参数 A_h 和 B_h 的最优估计值^[12]。但我们可以通过诸如 Baum-Welch 等算法得到满足指定精度要求的局部最优估计值。Baum-Welch 算法需要指定初始状态转移概率矩阵 A_{h0} 和初始观测值概率矩阵 B_{h0} 。并且, 由于该算法本身对于非凸函数是局部收敛的, 所以最终结果对初值的选择非常敏感。如果初值选择不恰当的话, 算法可能无法收敛。本文使用经典的 Baum-Welch 算法, 通过选取恰当的模型参数初值, 建立指定精度要求的电磁干扰 HMM。

在 HMM 中, 如果观测值概率矩阵 B_h 为单位阵, 那么引入到控制器中的电磁干扰信号就与电磁环境的强弱状态完全一致, 即干扰信号具有一阶马尔可夫特性。可实际中 B_h 一般不是单位阵, 也正是 B_h 与单位阵之间的偏差导致了干扰信号并不严格符合一阶马尔可夫过程。并且不同的 B_h 会使电磁干扰信号以不同的程度偏离马尔可夫特性。

如文献[3]中物理实验分析所述, 电磁干扰信号可以在假设检验中以较低的置信水平近似描述为一阶马尔可夫过程。可见, 该文献中的电磁干扰信号在某种程度上蕴含了内部状态转移的马尔可夫特性。因此, 可以统计该干扰信号的转移特性并将其用于 HMM 的初始状态转移矩阵中, 公式为

$$a_{mn} = \frac{P\{S_n(k) | S_m(k-1)\}}{P\{S_m(k)\}} \quad (3)$$

其中, k 为采样时刻。

观测值概率矩阵初值 B_{h0} 可采用均匀随机选择的方法, 本文取:

$$B_{h0} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

这样确定初始参数矩阵 A_{h0} 和 B_{h0} 后, 就可以采用 Baum-Welch 算法迭代得到最终的模型参数 A_h 和 B_h 。其中, 设置 Baum-Welch 算法收敛的条件为: 归一化似然概率值、状态转移矩阵 A_h 的 2-范数、观测值矩阵 B_h 的 2-范数在前后两次迭代后的差值均小于 1×10^{-6} 。

需要注意的是, 由于 HMM 参数训练固有的难点, 本节初值选择策略无法保证结果是全局最优的,

但可以快速收敛到指定精度下的局部最优值, 该精度可以满足实际应用要求。

5 HMM 仿真验证

本节仿真高强辐射场对处理器产生的数字干扰信号, 以此作为文献[3]实验中的数字电磁干扰信号, 然后分别采用突发模型、一阶马尔可夫模型和 HMM 对其建模。利用所得模型重新仿真生成新的干扰信号, 通过与数字电磁干扰信号比较来分析模型的准确度。

5.1 模型建立

参照文献[3]中实验条件, 软件模拟出 100 MHz、不同场强的电磁环境对处理器的数字干扰, 其中场强从 100 V/m 按 10 V/m 间隔递增到 180 V/m, 在每种电磁环境下进行 1000 次实验。

参照文献[4]对干扰信号进行插值, 得到具有马尔可夫性的突发模型信号, 而一阶马尔可夫模型通过统计不同状态之间的转移概率得到。应用本文所提的快速初值选择策略, 可以得到不同场强下 HMM 的参数矩阵初值。经过 Baum-Welch 算法迭代后, 隐状态转移矩阵和观测值矩阵均以 1×10^{-6} 的精度收敛, 二者矩阵元素随场强变化情况如图 2、图 3 所示, 其余矩阵元素与之满足归一化条件。

图 2(a)和图 2(b)显示随着电场强度的增强, 环境状态“由弱向强”转换的概率逐渐增强, 而由“由强向弱”转换的概率逐渐减弱, 这与电场强度的增加使得电磁环境变得更加恶劣的事实相符。图 3(b)中元素 b_{11} 的物理意义为: 在环境状态处于“强”的条件下, 飞行控制系统受到电磁干扰的概率。例如当电场强度为 100 V/m 时, b_{11} 元素的值为 0.2091, 表示“强”的电磁环境状态以 0.2091 的概率对飞行控制系统产生干扰。

值得注意的一点是: 图 2 中 a_{01} 元素、图 3 中 b_{01} 元素的值都较小, 为 1×10^{-4} 数量级, 这是因为实际电磁干扰发生的情况相对于正常工作状态要少很

多。观察这些元素随电场强度的变化, 其相对变化率都较大, 并保持单调递增的趋势, 不同场强条件下的模型具有良好的区分度。

5.2 不同模型比较

前述部分采用了突发模型、一阶马尔可夫模型和 HMM 对输入的数字电磁干扰信号进行分析, 并得到了不同场强下这些模型的相应参数。接下来采用蒙特卡罗方法, 根据所得模型重新仿真生成电磁干扰信号, 与原输入的电磁干扰信号比较以评价各模型的建模效果。与输入的干扰信号相对应, 对这些模型在 100 V/m 到 180 V/m 的电场强度下各进行 1000 次仿真实验, 每次实验按照 174 Hz 的频率采样 20880 个点。

首先考虑一阶矩意义下的平均失效次数, 对不同场强下各模型 1000 次实验中的失效次数取均值, 其随场强的变化如图 4 所示。除突发模型外, 其余两种模型与原输入的干扰信号都有较高吻合度。突发模型由于引入了多余的失效信号, 因此其失效曲线大大高于其他模型。

进一步分析干扰信号的时域分布图。以频率 100 MHz、场强 180 V/m 的电磁环境为例, 图 5 为一次实验中各模型的干扰信号过程。

其中一阶马尔可夫模型和 HMM 模型的参数矩阵分别为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.9946127 & 0.0053873 \\ 0.2332893 & 0.7667107 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_h = \begin{bmatrix} 0.9990625 & 0.0009375 \\ 0.0343953 & 0.9656047 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_h = \begin{bmatrix} 0.9992432 & 0.0007568 \\ 0.1779599 & 0.8220401 \end{bmatrix}$$

由于总采样时刻过多, 电磁干扰的细节未能在图中显示, 仅在直观上通过图线的位置及粗细反应电磁干扰的发生时刻与持续时间。图 5 左侧的各子图中失效状态发生的次数分别为: 238, 289, 244,

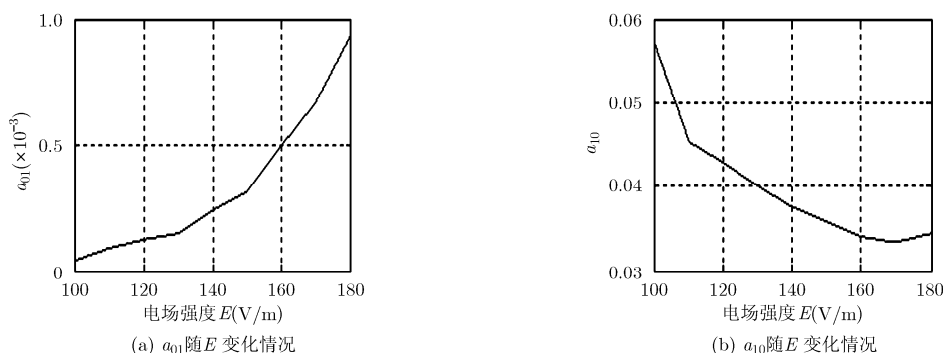


图 2 隐状态转移矩阵元素随场强变化情况

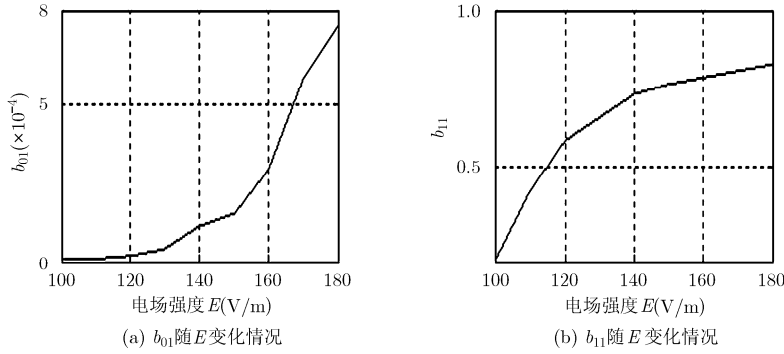


图 3 观测值概率矩阵元素随场强变化情况

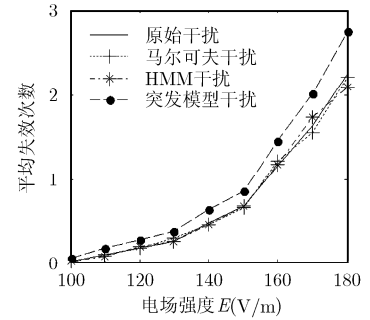


图 4 不同模型的干扰信号的平均失效次数变化图

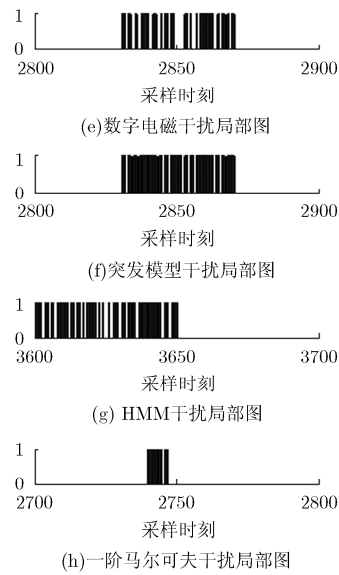
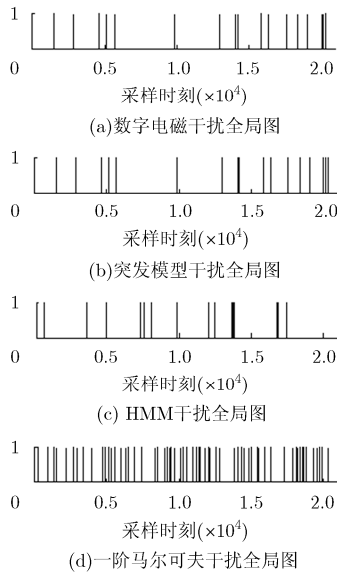


图 5 不同模型仿真信号时域分布图

248, 图 5(b)由于是对图 5(a)中信号插值得到, 因此失效状态数大大增加, 其余 3 幅子图出现的失效状态处于同一水平。图 5(a)显示出电磁干扰的突发特性: 大部分采样时刻系统处于正常状态, 电磁干扰仅发生在某一小段时间区间。图 5(b)干扰的分布看起来似乎与图 5(a)一致, 这是由于新增加的干扰信号将其输入信号的干扰区间的一些“空白”补齐, 因此未放大看时 2 幅子图十分相似。图 5(d)中干扰信号由于分布过于分散, 因此看似干扰更加密集, 而实际上干扰总体数量与原输入信号相当。只有图 5(c)HMM 模型, 干扰信号的分布与失效次数都与输入的干扰信号相近。

为了比较各模型干扰信号的时域分布细节, 取左侧图中 1000 个采样时刻区间放大如右侧图所示。图 5(e)显示, 电磁干扰会在某时刻突然发生, 并持续一定时间, 但在该时间段内不全为干扰状态。图 5(f)通过将图 5(e)中的干扰信号补齐, 以使新的信号为一阶马尔可夫过程。图 5(h)信号由一阶马尔可夫

模型产生, 其持续时间短, 且相对干扰密集度更高, 与原输入的电磁干扰的突发特性部分不符。图 5(g)与图 5(e)较为相似, 较好地表达出电磁干扰的分布特性。综合图 4, 图 5, 与现有的突发模型和一阶马尔可夫模型相比, HMM 对电磁干扰具有更准确的建模效果。

6 基于 HMM 电磁干扰的飞行控制系统性能分析

6.1 单通道系统性能分析

建立电磁干扰信号数学模型的最终要求是准确反应飞行性能的变化, 因此本节从飞行性能层次比较各模型的建模效果, 其中飞行控制系统采用波音 747 线性模型。根据上节各模型参数生成数字干扰信号 z_v , 再将 z_v 注入到图 1 误差系统中进行 1×10^5 次的独立重复的蒙特卡罗实验。计算稳定状态时输出误差的平均值, 即误差性能指标式(2)。图 6 为误差性能指标随场强的变化曲线。

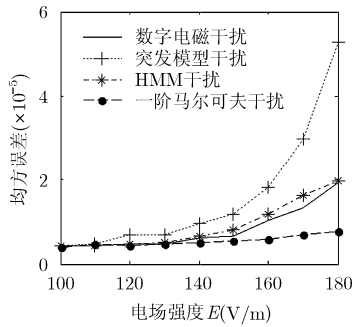


图 6 不同模型干扰下系统性能误差的稳态值

如图 6 所示, 随着电磁环境状态变得越来越恶劣, 平均误差指数也随之增大。突发模型的均方误差明显高于其输入的干扰数据, 且随着电场强度的增加, 这种差异越来越显著。一阶马尔可夫模型将同样数量的电磁干扰均匀化, 因此对飞行控制系统性能的影响较为缓和, 性能误差曲线随场强变化不大, 不能反应电磁干扰的突发特性。与以上两种模型相比, HMM 能更加准确地描述飞行性能下降的程度, 尤其是在复杂电磁环境下, 能够表现出良好的建模效果。

6.2 分布式系统性能分析

为研究分布式飞行控制系统在电磁环境中的稳定性, 首先引入图 7 所示的系统性能观测平台。飞行控制律由 N 个相互独立的控制处理器分别生成, 并经过 M 个冗余管理单元进行容错管理, 最终由输入/输出接口处理器输出最终的飞行控制逻辑 z_v , 并将其注入到飞行切换控制系统中。控制处理器及冗余管理单元的每个通道所受的干扰过程分别用 $\theta_i(k)$ 和 $v_{ij}(k)$ 表示; 而 z_v 表示整个分布式飞行控制系统受到的电磁干扰过程, 它有 0, 1 两种状态, 分别使飞

行控制系统在正常状态与失效状态之间进行切换。关于该分布式系统观测平台更详细的描述见文献 [3]。

本文用 HMM 分析不同场强下的电磁干扰过程 $\theta_i(k)$ 及 $v_{ij}(k)$, 并将这些干扰注入不同结构的分布式系统观测平台, 从理论与仿真两方面分析飞机冗余度分布式结构的性能下降。理论方面, 考虑观测矩阵 B_{1i} 为单位阵的特殊 HMM 电磁干扰, 其观测过程具有隐含过程的一阶马尔可夫性。因此, 可以采用文献 [4] 中的定理 2 判断分布式飞行控制系统在电磁干扰下的稳定性, 并通过定理 3 计算系统性能误差的稳态值, 从而解决这种特殊情况下的理论问题。仿真方面, 在 MATLAB 中搭建分布式飞行控制系统模型, 并将 HMM 生成的数字电磁干扰注入系统模型中, 进行大量独立重复实验以统计性能误差。利用参考文献 [3] 中式 (9), 式 (10) 和表 IX 的数据计算得到相应的状态转移矩阵如式 (5) 所示, 由此仿真产生干扰信号过程并作为隐马尔可夫模型的输入进行相关的仿真验证分析。

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \begin{bmatrix} 0.9988 & 0.0012 \\ 0.0287 & 0.9713 \end{bmatrix}, & \Pi_2 &= \begin{bmatrix} 0.9979 & 0.0021 \\ 0.0265 & 0.9735 \end{bmatrix} \\ \Pi_3 &= \begin{bmatrix} 0.9974 & 0.0026 \\ 0.0376 & 0.9624 \end{bmatrix}, & \Pi_4 &= \begin{bmatrix} 0.9993 & 0.0007 \\ 0.0295 & 0.9705 \end{bmatrix} \\ \Pi_5 &= \begin{bmatrix} 0.9990 & 0.0010 \\ 0.0360 & 0.9640 \end{bmatrix}, & \Pi_6 &= \begin{bmatrix} 0.9990 & 0.0010 \\ 0.0420 & 0.9580 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

表 1 所示是波音 747 飞行控制系统在不同电磁环境下系统性能误差的理论仿真结论, 其中采用 2 控制器 \times 1 冗余管理单元的分布式结构, 并考虑全部电子设备受电磁干扰的情况。由表 1 中结果可

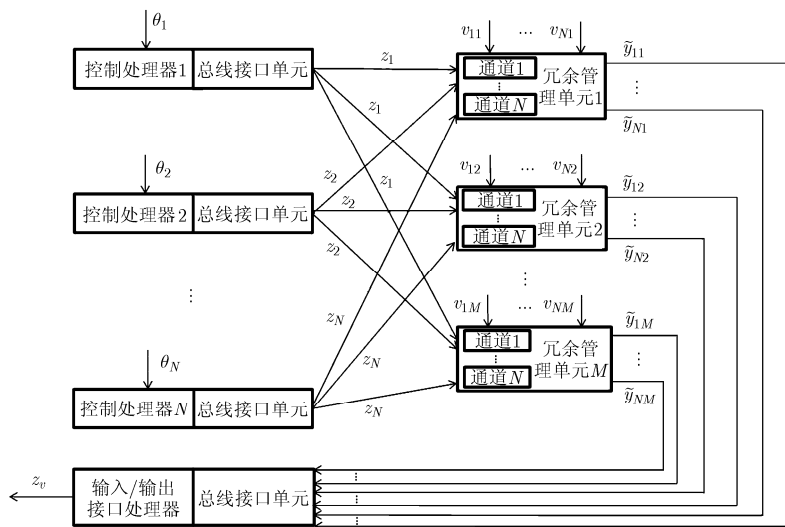


图 7 分布式系统观测平台结构图

表1 稳态性能误差的理论值与仿真值

电磁环境	频率(MHz)	100.00	121.50	133.35	100.00	121.50	133.35
	场强(V/m)	200	140	210	180	120	190
	仿真验证	1.5763e-6	6.1286e-6	3.0617e-6	5.0019e-7	5.4067e-7	3.4090e-7
	理论估算	1.5840e-6	6.1383e-6	3.0579e-6	5.0240e-7	5.3879e-7	3.4002e-7

知: 理论结果与仿真结果比较接近, 验证了理论结果的准确性; 其次, 在相同电磁频率下, 随着场强的减弱, 系统性能误差也随之减小。

以上给出了飞行性能的稳态误差数值, 图8则是误差系统的时域响应曲线。为分析不同分布式控制结构在各种电磁环境中的容错能力, 设置如下两组对照实验: (1)不同电磁环境下同种分布式结构; (2)相同电磁环境下不同分布式结构。电磁环境选取表1中第2组(121.50 MHz, 140 V/m)和第5组(121.50 MHz, 120 V/m)电磁实验, 分布式控制结构分别设置为: 2 控制器×1 冗余管理单元和 3 控制器×1 冗余管理单元。对这两种控制结构分别在以上两种电磁环境中进行 1×10^5 次的蒙特卡罗仿真实验, 统计得到性能误差 $J_{w,e}$ 的时域响应曲线如图8所示。

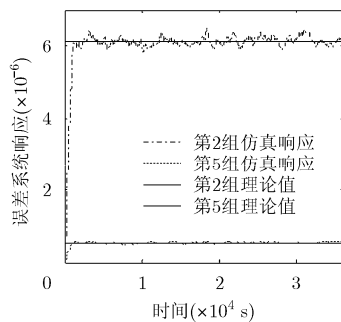


图8 不同电磁环境下性能误差的响应变化曲线

所有实验中, 误差系统响应曲线稳定部分与理论分析一致, 响应曲线很快进入稳定状态, 系统性能误差绝对值都处于可接受的范围。相应的理论稳定值以直线形式给出, 受电磁干扰影响仿真响应曲线围绕理论稳定值上下小幅度波动, 但系统整体是稳定的。对 2 控制器×1 冗余管理单元这种结构来说, 相同频率的情况下随着场强变弱, 误差系统的误差值也随之减小, 两组响应曲线误差数值差一个数量级, 说明电场强度对飞行控制系统性能影响十分显著。而在同样的电磁环境下, 3 控制器×1 冗余管理单元结构比 2 控制器×1 冗余管理单元结构具有更好的容错效果。

7 结束语

本文研究了电磁环境对分布式平台中数字电子

设备的干扰, 将该平台的输出过程作为切换控制系统的切换律, 进而驱动分布式飞行控制系统的性能模型。研究过程首先从电磁干扰的发生机理出发, 将 HMM 引入到电磁干扰的数学模型构建中。在该模型的训练过程中, 提出了一种快速参数初值选择策略, 可以达到理想的收敛精度。仿真实验考虑了 HMM、突发模型、一阶马尔可夫模型, 基于以上模型分别对输入的电磁干扰信号进行比较分析, 证实了 HMM 能够更加准确地描述数字电磁干扰。最后在 6 组不同的电磁环境下, 从理论与仿真的角度分析飞行控制系统的性能下降情况, 并给出了系统的响应曲线。

在后续研究中, 将会采用 HMM 研究干扰的耦合情况, 并进一步改进模型的训练算法, 同时重点研究 HMM 对切换线性系统响应的一般理论分析方法。

参考文献

- [1] BELCASTRO C M. Closed-loop HIRF experiments performed on a fault tolerant flight control computer[C]. 16th Digital Avionics Systems Conference, Irvine, USA, 1997: 4.1-40-54.
- [2] SHOUMAN M L. A study of occurrence rates of electromagnetic interference (EMI) to aircraft with a focus on HIRF (external) high intensity radiated fields[R]. NASA Technical Report CR-194895, 1994.
- [3] Wang R, GRAY W S, GONZALEZ O R, *et al.* Tracking performance of distributed recoverable flight control systems subject to high intensity radiated fields[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(1): 521-542. doi: 10.1109/TAES.2013.6404118.
- [4] Wang R, Sun H, and Ma Z Y. Stability and performance analysis of a jump linear control system subject to digital upsets[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(4): 6-15. doi: 10.1088/1674-1056/24/4/040201.
- [5] GAYATHRI P and AYYAPPAN S. Off-line handwritten character recognition using hidden Markov model[C]. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), New Delhi, India, 2014: 518-523.
- [6] SOUALHI A, CLERC G, RAZIK H, *et al.* Hidden Markov models for the prediction of impending faults[J]. *IEEE*

- Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(5): 3271–3281. doi: 10.1109/TIE.2016.2535111.
- [7] HE Q and BAO C C. A gain-adaptive parallel HMM for speech enhancement[C]. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference, Hong Kong, China, 2015: 35–42.
- [8] Ge Y, CHEN Q, and JIANG M. Stability of networked control systems based on hidden Markov models[C]. 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, 2008: 5453–5456.
- [9] LU Jinhua and CHEN Guanrong. A time-varying complex dynamical network model and its controlled synchronization criteria[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(6): 841–846. doi: 10.1109/TAC.2005.849233.
- [10] China Civil Aviation Regulations-25-R4[R]. Airworthiness Standards for Transport Aircraft, 2011.
- [11] HUANG Qingqing, G E Rong, KAKADE Sham, *et al.* Minimal realization problems for hidden Markov models[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(7): 1896–1904. doi: 10.1109/TSP.2015.2510969.
- [12] RABINER L R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77(2): 257–286.
- 王蕊: 女, 1980年生, 副教授, 研究方向为切换控制系统的研究与应用、无线传感网络等.
- 李彦骁: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为随机控制系统、基于模型的设计.
- 孙辉: 男, 1979年生, 讲师, 研究方向为随机控制系统、无线传感网络、无线感知网络等.
- 陈增强: 男, 1964年生, 教授, 研究方向为智能预测控制、混沌系统与复杂动态网络、多智能体系统控制.