

大气紊流仿真算法的改进

童中翔, 王晓东

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:在有关飞行的数值仿真中,大气紊流是离散的随机信号,用普通仿真算法得到的结果与理论值存在着一定的偏差,针对这种情况进行了理论分析并提出了算法改进的方法。

关键词:大气紊流;数值仿真;白噪声;相关函数

中图分类号:V21 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)06-0010-03

在飞行器的运动轨迹和飞行特性的仿真计算以及飞行模拟器的实现过程中,一般都要考虑到大气中实际存在的紊流因素的影响。由于大气运动的复杂性,工程计算中只能抓住紊流的主要运动特征,而略去一些次要因素的影响,经常使用简化的大气扰动模型,并按照研究对象和研究目的的不同,选用各自相应的紊流模型。所谓大气紊流的数值仿真,是指在计算机上利用一定的算法随机生成大气紊流的速度和速度梯度序列的过程,为了使紊流序列与实际大气紊流的分布和运动规律最大程度地逼近,该过程必须要满足所选大气紊流模型的频谱特性或者相关特性的要求。通常采用的大气紊流模型有 Dryden 模型和 Von Karman 模型,由于 Dryden 模型的频谱形式是相对简单的有理式,可作因式分解,数值仿真容易实现,所以在大气紊流的数值仿真中多被采用。由计算机模拟生成符合 Dryden 分布的紊流序列,即随机风。

1 大气紊流数值仿真中存在的问题

模拟随机风不仅要具有随机性特征,而且要符合 Dryden 模型的频谱特性或相关特性,可通过把白噪声信号经成形滤波器过滤得到,见图 1。在控制过程中,将能够转换白噪声为有色噪声的环节称为成形滤波器。白噪声的频谱为常值,令它为 1,只要把给定的输出频谱按 $\Phi(\omega) = |G(j\omega)|^2 = G^*(j\omega)G(j\omega)$ 进行分解,就可以得到成形滤波器的传递函数 $G(s)$ ^[1]。



图 1 大气紊流的仿真原理

水平随机风的频谱函数为 $\phi_{w_x}(\omega) = \sigma_v^2 \frac{L_v}{\pi v} \times \frac{1}{1 + (L_v/\pi v)^2}$ 。则 $G_{w_x}(s) = \frac{K_v}{T_v s + 1}$ 。式中: $K_v = \sigma_v \sqrt{\frac{L_v}{\pi v}}$,

$T_v = \frac{L_v}{v}$ 。 σ_v 、 L_v 分别为水平风的紊流强度和紊流尺度。

因为白噪声是离散的随机信号,如果使用普通的仿真算法,就会出现随机风速度均值不为零,均方差和相关函数较理论值偏小等问题^[2]。考虑下面的一阶线性模型: $G(s) = 1/(as + 1)$, a 为给定的常数,假设输入为服从 Gauss 分布的白噪声信号 R_k , 其均值为零,方差为 σ^2 , 可以证明输出函数也同样服从 Gauss 分布,均值为零,方差为 $\sigma_y^2 = \sigma^2/2a$ 。但在数值仿真中,系统输出的方差并不是趋于一个定值,由理论分析可知 σ_y^2

$$\xrightarrow{\Delta h \rightarrow 0} \Delta h \sigma^2 / 2a。$$

输出函数的方差还取决于计算步长 Δh , 因为步长的取值一般较小,这使得 σ_y^2 较理论值偏小,而且大小

收稿日期:2002-02-04

作者简介:童中翔(1958-),男,河南洛阳人,副教授,硕士,主要从事飞行性能和飞行仿真研究。

也随步长的改变而变化,不能符合大气紊流模型的要求。因此,当输入函数为随机信号时,不能采用传统的方法进行仿真计算,必须对仿真算法进行改进。

2 仿真算法的改进

2.1 修正原白噪声伪随机数,使之更接近白噪声信号

在数字计算机上,只能按照一定的算法生成近似符合白噪声的伪随机数 $\text{Random}()$,再通过下式得到服从 Gauss 分布的伪随机数序列 R_k 。 $R_k = \sum_{i=1}^{12} \text{Random}()$ 。修正公式为 $R_k = \frac{R_k - 0.076\ 832}{\sqrt{3.936\ 309}}$ 。修正前均值 $\mu_k = 0.076\ 832$,方差 $\sigma_k^2 = 3.936\ 309$,修正后均值 $\mu_k = 0$,方差 $\sigma_k^2 = 1.000\ 01$ 。

2.2 当采用定步长的计算方法时,要对伪随机数进行比例化处理

针对输入离散的随机信号时输出均方差偏小的问题,可用一个能近似保持原噪声信号强度的比例化的伪随机信号取代原输入信号,比例因子一般取计算步长的倒数的平方根比较合适。 $K = \sqrt{1/\Delta h}$ 。

按照这种方法,在步长不是很大时计算得到的结果是可信的。但解微分方程组通常采用龙格-库塔法,在每个计算步长中要对输入函数进行多次求值,显然,这使得在一个计算步长之内输入信号多次发生变化,给引入的比例化系数带来麻烦。解决的办法是在比例化的伪随机信号后面加入一个零阶保持器,以保证在每一个计算步长内输入量始终保持为一常量。

为了得到符合 Dryden 模型分布的大气紊流,对生成的随机风系列进行统计特性分析,求出由数字仿真程序生成的随机风序列的相关函数,与模型的理论相关函数进行比较,检验其吻合程度。以 W_x 和 W_y 为例, Dryden 模型的理论相关函数的表达式如下: $R_{W_x}(\tau) = \sigma_x^2 \exp(-\frac{V}{L_x}|\tau|)$; $R_{W_y}(\tau) = \sigma_y^2 \exp(-\frac{\sqrt{3}V}{2L_y}|\tau|)$ 。对于一个各态历经的平稳随机过程,它的相关函数可通过对其一个样本函数 $X(t)$ 按照下式计算得到: $R_X(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t)X(t+\tau) dt$ 。将此式离散化,取 $\tau = kh$ (h 为步长, k 为正整数),于是 $R_X(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} X_i X_{i+k}$, ($k = 1, 2, 3, \dots, L-1$)。随着 k 的增大,采样点的数目 $N-k$ 会减小,因而可靠程度降低。所以,相关函数的点数 L 取值不可太大,应使 $L \ll N^{[3]}$ 。

图 2、图 3 和图 4 是在 $h = 5.0\ \text{km}$ 高度上使用上述方法生成的紊流序列 W_x 、 W_y 、和 W_z 的片断样本,其中紊流尺度 $L_x = 560.0\ \text{m}$, $L_y = 256.0\ \text{m}$ 紊流强度 $\sigma_x = \sigma_y = 1.5\ \text{m/s}$ 。图 5 和图 6 是大气紊流序列 W_x 、 W_y 的相关函数与理论相关函数的比较^[4]。

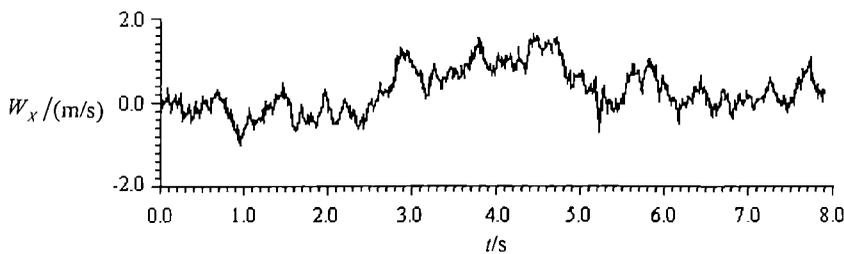


图 2 数值法生成的 W_x 序列样本

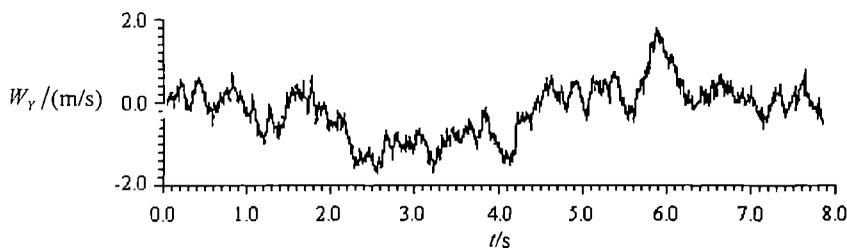
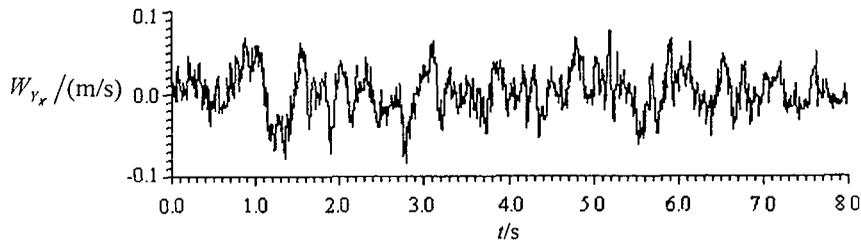
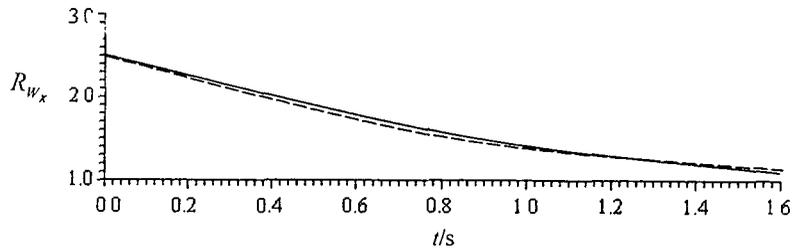
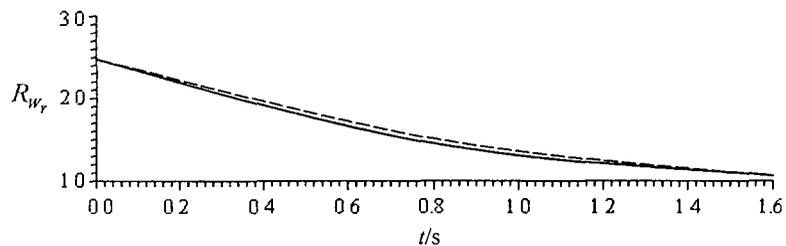


图 3 数值法生成的 W_y 序列样本

图4 数值法生成的 W_{y_x} 序列样本图5 W_x 序列相关函数与理论相关函数的比较(实线表示理论值)图6 W_y 序列相关函数与理论相关函数的比较(实线表示理论值)

3 结论

从图5和图6来看,用改进后的算法生成的大气紊流序列,其相关函数与理论相关函数的数值很接近。由此可见,对于数值仿真中存在的大气紊流均值不为零,均方差和相关函数较理论值偏小等问题,通过算法的改进后基本上得到了解决,生成的大气紊流序列符合 Dryden 模型的分布规律,能够满足一般飞行仿真计算的需要。但在仿真运算过程中也发现,数值法生成的紊流序列及其相关函数与计算步长、计算次数都有很大的关系,这需要反复调试程序中的有关参数,以得到比较接近实际情况的大气紊流序列。

参考文献:

- [1] 陈廷楠. 飞机对大气紊流的响应[M]. 西安:空军工程大学工程学院,1989.
- [2] 马车力. 大气紊流数字仿真的改进方法[J]. 北京:航空航天大学学报,1990,(3):57-61.
- [3] 肖业伦,金长江. 大气扰动中的飞行原理[M]. 北京:科学教育出版社,1993.
- [4] 王晓东. 某型飞机纵向驾驶员诱发振荡的研究[D]. 西安:空军工程大学工程学院,1998.

(编辑:姚树峰)

Improvement in the Calculation Methods of Emulation of Atmospheric Turbulence

TONG Zhong-xiang, WANG Xiao-dong

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: The atmospheric turbulence is a kind of discrete random signal in numeric emulation concerning flight, the results obtained disagree with their theoretic values when common calculation methods are used, this paper discusses the reason and presents some improved methods in calculation.

Key Words: atmospheric turbulence; numeric emulation; white noise; correlative function