

Dryden大气紊流模型的数字仿真技术

北京航空学院 赵震炎 肖业伦 施毅坚

摘要

本文为如何利用电子计算机产生符合 Dryden 模型的三维大气紊流信号(包括三个速度分量和三个角速度分量)提出了一个比较严格和完整的方法。所得结果的可靠性可以通过相关函数来检验。最后还对飞行模拟器中如何使用这一数学模型提出了一些看法。

一、引言

在飞行力学领域中研究飞行器对大气紊流的响应通常采用 Dryden 大气紊流模型^(1,2)。在飞行模拟器中往往需要利用计算机产生符合 Dryden 模型的随机风。过去已知可以将白色噪音(实际上用伪随机数)通过滤波器来达到上述目的,至于滤波器的参数则应满足一定要求⁽³⁾。但是,在所见到的文献中对所产生的随机风到底是否符合 Dryden 模型尚缺乏必要的检验;而且过去在飞行模拟中往往仅将三维随机风作用在飞行器的质心上,没有计及紊流梯度的影响。

本文的方法是利用计算机首先产生零均值 Gauss 分布的伪随机数信号,通过按给定频谱设计的成形滤波器,从而得到符合 Dryden 频谱和 Gauss 速度分布律的三维时间历程的大气紊流信号。紊流信号包括三个速度分量 w_x 、 w_y 、 w_z 和三个梯度(角速度)分量 $w_{yx} \left(= \frac{\partial w_y}{\partial x} \right)$ 、 $w_{yz} \left(= \frac{\partial w_y}{\partial z} \right)$ 、 $w_{zx} \left(= \frac{\partial w_z}{\partial x} \right)$ 。最后通过一个实例,用相关函数来检验是否吻合 Dryden 模型。

所依据的基本假设是:大气紊流是均匀的;各向同性的或至少在水平面内是各向同性的,紊流速度服从 Gauss 分布律。

所得结果适用于:在中、高空(高度约在 530m 以上)沿任意航迹的飞行;在低空沿水平航迹的飞行;对于低空非水平飞行,则可分段处理。

二、Dryden 紊流频谱、相关函数及方差

按照 Dryden 模型,大气紊流速度和梯度的空间频谱表达式是

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{w_x}(\Omega) &= \sigma_x^2 \frac{L_x}{\pi} \frac{1}{1 + (L_x \Omega)^2} \\ \Phi_{w_y}(\Omega) &= \sigma_y^2 \frac{L_y}{\pi} \frac{1 + 12(L_y \Omega)^2}{[1 + 4(L_y \Omega)^2]^2} \\ \Phi_{w_z}(\Omega) &= \sigma_z^2 \frac{L_z}{\pi} \frac{1 + 12(L_z \Omega)^2}{[1 + 4(L_z \Omega)^2]^2} \end{aligned} \right\}$$

1985年10月31日收到。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\omega_{yx}}(\Omega) &= \frac{\Omega^2}{1 + \left(\frac{4l}{\pi}\Omega\right)^2} \Phi_{\omega_y}(\Omega) \\ \Phi_{\omega_{yx}}(\Omega) &= \sigma_y^2 \frac{0.2\left(\frac{\pi L_y}{2l}\right)^{1/3}}{L_y} \frac{1}{1 + \left(\frac{4l}{\pi}\Omega\right)^2} \\ \Phi_{\omega_{zx}}(\Omega) &= \frac{\Omega^2}{1 + \left(\frac{3l}{\pi}\Omega\right)^2} \Phi_{\omega_z}(\Omega) \end{aligned} \right\} (1)$$

式中 Ω 是沿 x 轴方向的空间频率, 对于以速度 v 飞行的飞行器说, 它与时间频率 ω 的关系为 $\Omega = \omega/v$; σ_x 、 σ_y 和 σ_z 是三个方向的紊流强度; L_x 、 L_y 和 L_z 是三个方向的紊流尺度, 对于各向同性的紊流, 有 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$, $L_x = 2L_y = 2L_z$; l 为机翼展长。注意到 (1) 式给出的是双侧频谱, 即 Ω 是定义在 $(-\infty, +\infty)$ 区间内的。

根据关系式 $\Phi(\omega) = \frac{1}{v} \Phi(\Omega) = \frac{1}{v} \Phi\left(\frac{\omega}{v}\right)$ ⁽⁴⁾, 将空间频谱转化成时间频谱, 结果如下

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\omega_x}(\omega) &= \sigma_x^2 \frac{L_x}{\pi v} \frac{1}{1 + \left(\frac{L_x}{v}\omega\right)^2} \\ \Phi_{\omega_y}(\omega) &= \sigma_y^2 \frac{L_y}{\pi v} \frac{1 + 12\left(\frac{L_y}{v}\omega\right)^2}{\left[1 + 4\left(\frac{L_y}{v}\omega\right)^2\right]^2} \\ \Phi_{\omega_z}(\omega) &= \sigma_z^2 \frac{L_z}{\pi v} \frac{1 + 12\left(\frac{L_z}{v}\omega\right)^2}{\left[1 + 4\left(\frac{L_z}{v}\omega\right)^2\right]^2} \\ \Phi_{\omega_{yx}}(\omega) &= \sigma_y^2 \frac{L_y}{\pi v} \frac{1 + 12\left(\frac{L_y}{v}\omega\right)^2}{\left[1 + 4\left(\frac{L_y}{v}\omega\right)^2\right]^2} \frac{\left(\frac{\omega}{v}\right)^2}{1 + \left(\frac{4l}{\pi v}\omega\right)^2} \\ \Phi_{\omega_{yz}}(\omega) &= \sigma_y^2 \frac{0.2\left(\frac{\pi L_y}{2l}\right)^{1/3}}{L_y v} \frac{1}{1 + \left(\frac{4l}{\pi v}\omega\right)^2} \\ \Phi_{\omega_{zx}}(\omega) &= \sigma_z^2 \frac{L_z}{\pi v} \frac{1 + 12\left(\frac{L_z}{v}\omega\right)^2}{\left[1 + 4\left(\frac{L_z}{v}\omega\right)^2\right]^2} \frac{\left(\frac{\omega}{v}\right)^2}{1 + \left(\frac{3l}{\pi v}\omega\right)^2} \end{aligned} \right\} (2)$$

大家熟知随机过程 $x(t)$ 的频谱函数 $\Phi_x(\omega)$ 与相关函数 $R_x(\tau)$ 的对应关系是 Fourier 变换关系, 而且无论频谱函数还是相关函数均能代表随机过程的全部特性。将紊流频函数 (2) 式经 Fourier 反变换, 可导出相对应的六个相关函数的表达式如下

$$\left. \begin{aligned}
 R_{w_x}(\tau) &= \sigma_z^2 \exp\left(-\frac{v}{L_x}|\tau|\right) \\
 R_w(\tau) &= \sigma_y^2 \left(1 - \frac{v}{4L_y}|\tau|\right) \exp\left(-\frac{v}{2L_y}|\tau|\right) \\
 R_{w_z}(\tau) &= \sigma_z^2 \left(1 - \frac{v}{4L_x}|\tau|\right) \exp\left(-\frac{v}{2L_x}|\tau|\right) \\
 R_{w_{yz}}(\tau) &= \sigma_y^2 \left\{ \frac{L_y}{l_4} q_y \exp\left(-\frac{v}{l_4}|\tau|\right) + \left[-q_y \left(\frac{1}{4} + \frac{v}{8L_y}|\tau|\right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{1}{l_4^2} \left(\frac{3}{4} - L_y^2 q_y\right) \left(1 - \frac{v}{2L_y}|\tau|\right) \right] \exp\left(-\frac{v}{2L_y}|\tau|\right) \right\} \\
 R_{w_{yx}}(\tau) &= \sigma_y^2 \frac{0.2 \left(\frac{\pi L_y}{2l}\right)^{1/3}}{L_y} \frac{\pi^2}{4l} \exp\left(-\frac{\pi v}{4l}|\tau|\right) \\
 R_{w_{xz}}(\tau) &= \sigma_z^2 \left\{ \frac{L_x}{l_3} q_x \exp\left(-\frac{v}{l_3}|\tau|\right) + \left[-q_x \left(\frac{1}{4} + \frac{v}{8L_x}|\tau|\right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{1}{l_3^2} \left(\frac{3}{4} - L_x^2 q_x\right) \left(1 - \frac{v}{2L_x}|\tau|\right) \right] \exp\left(-\frac{v}{2L_x}|\tau|\right) \right\}
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $l_4 = \frac{4l}{\pi}$; $q_y = \frac{12L_y^3 - l_4^2}{(4L_y^2 - l_4^2)^2}$; $l_3 = \frac{3l}{\pi}$; $q_x = \frac{12L_x^3 - l_3^2}{(4L_x^2 - l_3^2)^2}$ 。

前三个紊流速度相关函数公式与文献[5]中的相同。事实上, Dryden 模型是先建立这三个相关函数, 然后再推导出频谱表达式的。以上六个相关函数作为理论表达式用来检验计算机产生的紊流信号的准确性。

按一般性质, 在表达式(3)中令 $\tau = 0$, 即可得到紊流速度和梯度方差的理论公式

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{w_x}^2 &= \sigma_z^2 \\
 \sigma_w^2 &= \sigma_y^2 \\
 \sigma_{w_z}^2 &= \sigma_z^2 \\
 \sigma_{w_{yz}}^2 &= \sigma_y^2 \frac{l_4 + 3L_y}{l_4(2L_y + l_4)^2} \\
 \sigma_{w_{yx}}^2 &= \sigma_y^2 \frac{\pi^2}{4l} \frac{0.2 \left(\frac{\pi L_y}{2l}\right)^{1/3}}{L_y} \\
 \sigma_{w_{xz}}^2 &= \sigma_z^2 \frac{l_3 + 3L_x}{l_3(2L_x + l_3)^2}
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

三、成形滤波器参数的确定

单位强度的白色噪音 $r(t)$ 通过一个传递函数为 $G(s)$ 的滤波器, 产生随机过程 $x(t)$, 则 $x(t)$ 的频谱函数为

$$\Phi_x(\omega) = G^*(i\omega)G(i\omega) = |G(i\omega)|^2 \quad (5)$$

式中 * 表示共轭。将紊流的各个频谱函数(2)按公式(5)进行分解, 则可得到为了产生给定频谱所需成形滤波器的传递函数。

对于三个紊流速度, 传递函数是

$$\left. \begin{aligned} G_{w_x}(s) &= \frac{K_x}{T_x s + 1} \\ K_x &= \sigma_x \sqrt{\frac{L_x}{\pi v}}, \quad T_x = \frac{L_x}{v} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$G_w(s) = \frac{K_y(T_{y1}s + 1)}{(T_{y2}s + 1)^2}$$

$$K_y = \sigma_y \sqrt{\frac{L_y}{\pi v}}, \quad T_{y1} = \frac{2\sqrt{3}L_y}{v}, \quad T_{y2} = \frac{2L_y}{v}$$

$$G_{w_z}(s) = \frac{K_z(T_{z1}s + 1)}{(T_{z2}s + 1)^2}$$

$$K_z = \sigma_z \sqrt{\frac{L_z}{\pi v}}, \quad T_{z1} = \frac{2\sqrt{3}L_z}{v}, \quad T_{z2} = \frac{2L_z}{v}$$

为了容易实现, 可将 $G_{w_y}(s)$ 和 $G_{w_z}(s)$ 简化成一阶环节^[3], 则

$$\left. \begin{aligned} G_{w_y}(s) &= \frac{K_y}{T_y s + 1} \\ T_y &= T_{y2}^2/T_{y1} = 2L_y/\sqrt{3}v \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} G_{w_z}(s) &= \frac{K_z}{T_z s + 1} \\ T_z &= T_{z2}^2/T_{z1} = 2L_z/\sqrt{3}v \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

对于三个紊流梯度, 可以求得

$$\left. \begin{aligned} G_{w_{yx}}(s) &= \frac{K_{yx}s}{(T_{yx}s + 1)(T_{yx}s + 1)} \\ K_{yx} &= K_y/v, \quad T_{yx} = 4l/\pi v \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

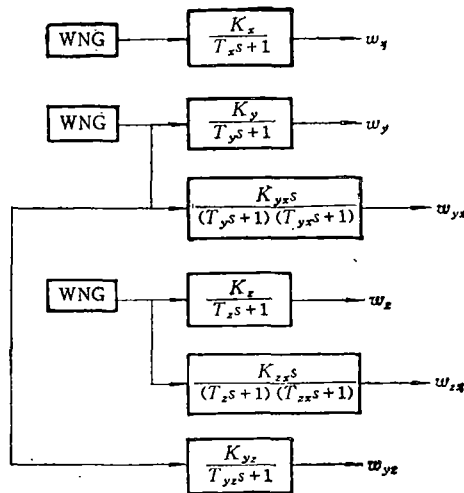


图1 大气紊流发生器结构图

$$\left. \begin{aligned} G_{w_{yz}}(s) &= \frac{K_{yz}}{T_{yz}s + 1} \\ K_{yz} &= \sigma_y \sqrt{\frac{0.2}{L_y v} (\pi L_y / 2l)^{1/3}}, \quad T_{yz} = 4l / \pi v = T_{yx} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} G_{w_{zx}}(s) &= \frac{K_{zx}s}{(T_x s + 1)(T_{zx}s + 1)} \\ K_{zx} &= K_z / v, \quad T_{zx} = 3l / \pi v \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

根据以上结果, 设计出大气紊流发生器的结构方块图(图 1)。图中的 WNG 代表接近白色噪音的伪随机数发生器。

四、大气紊流信号的产生

由图 1 可知, 要获得大气紊流随机信号, 首先要产生 Gauss 分布的白色噪音伪随机数。产生这种伪随机数的数学方法有多种。例如可采用文献〔6〕所提出的方法, 从而得到均值为零, 标准偏差为 1 的近似 Gauss 分布的伪随机数。

其次, 从成形滤波器的传递函数(6)~(11)式看出其形式可归纳成 $\frac{K}{T_s + 1}$ 和 $\frac{Ks}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$ 两类, 现分别处理如下

1. 第一类传递函数

这类传递函数可改写为

$$\frac{x(s)}{r(s)} = \frac{c}{s + a} \quad (12)$$

式中 $r(s)$ 为输入, 即伪随机数的 Laplace 变换形式。 $x(s)$ 为输出, 即所要求的随机过程的 Laplace 变换形式。 $a = 1/T$, $c = K/T$ 。

采用 Euler 前差分格式

$$x_{i+1} = Px_i + Qr_{i+1} \quad (13)$$

式中 x_i 表示离散序列 x 第 i 点的值, 即当 $t = ih$ 时的 x 值。这里 h 是步长, 或称采样周期。 P 和 Q 与 h 的大小有关, 为待定系数。取初值 $x_0 = 0$ 。由(13)式递推求出

$$x_k = \sum_{i=0}^{k-1} P^{k-i-1} Q r_{i+1}$$

由于 x 的均值 $\mu_x = 0$, 故 x 的方差为

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \lim_{k \rightarrow \infty} \langle x_k^2 \rangle = \lim_{k \rightarrow \infty} \left\langle \sum_{i=0}^{k-1} (P^{k-i-1} Q r_{i+1})^2 \right\rangle \\ &= Q^2 \lim_{k \rightarrow \infty} \left\langle \sum_{i=0}^{k-1} P^{2(k-i-1)} r_{i+1}^2 + \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^{k-1} P^{2k-i-j-2} r_{i+1} r_{j+1} \right\rangle \end{aligned}$$

式中符号 $\langle \rangle$ 表示集合平均值。考虑到白色噪音的特性, 第二项为零, 并且 $\sigma_r = 1$, 于是

$$\sigma_x^2 = Q^2 \sigma_r^2 \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^k P^{2(k-i)} = Q^2 \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^k P^{2(k-i)}$$

以后将会得知 $P < 1$, 故上面的等比级数之和收敛, 并且

$$\sigma_x^2 = \frac{Q^2}{1 - P^2} \quad (14)$$

对于间隔 $\tau = mh$, x 的相关函数为

$$R_x(mh) = \lim_{k \rightarrow \infty} \langle x_k x_{k+m} \rangle = \lim_{k \rightarrow \infty} \left\langle \left(\sum_{i=0}^k P^{k-i} Q r_i \right) \left(\sum_{i=0}^k P^{k+m-i} Q r_i \right) \right\rangle$$

同样地展开后得到

$$R_x(mh) = Q^2 P^m \sigma_r^2 \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^k P^{2(k-i)} = \frac{Q^2}{1 - P^2} P^m = \sigma_x^2 P^m \quad (15)$$

又根据传递函数 (12) 式, x 的相关函数应为

$$R_x(\tau) = \sigma_x^2 e^{-a\tau}$$

取 $\tau = mh$, 则

$$R_x(mh) = \sigma_x^2 e^{-amh} \quad (16)$$

比较 (15) 式与 (16) 式, 可见系数 P 应取为

$$P = e^{-ah} \quad (17)$$

按 (14) 式, 可求得

$$Q = \sigma_x \sqrt{1 - e^{-2ah}} \quad (18)$$

式中输出量的强度可以预先按 (4) 式算出。

有了 P 和 Q 就可按差分方程 (13) 不断地产生大气紊流随机信号 x 了。

2. 第二类传递函数

这类传递函数可改写为一般形式

$$\frac{x(s)}{r(s)} = \frac{cs}{(s+a)(s+b)} \quad (19)$$

式中 $a = 1/T_1$, $b = 1/T_2$, $c = K/T_1 T_2$ 。进一步可分解成

$$\frac{x(s)}{r(s)} = \frac{c}{b-a} \left(\frac{b}{s+b} - \frac{a}{s+a} \right) \quad (20)$$

从而原系统可等价地化为 (参看图 2)

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_b(s)}{r(s)} &= \frac{bc/(b-a)}{s+b} \\ \frac{x_a(s)}{r(s)} &= \frac{ac/(b-a)}{s+a} \\ x(s) &= x_b(s) - x_a(s) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

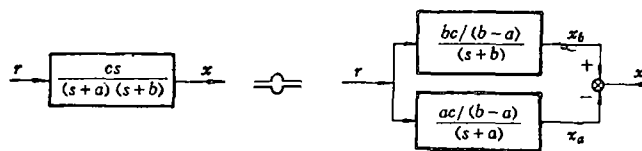


图2 等价传递函数

利用第一类传递函数已得结果, 可写出

$$\left. \begin{aligned} x_{b_{i+1}} &= P_b x_{b_i} + Q_b r_{i+1} \\ x_{a_{i+1}} &= P_a x_{a_i} + Q_a r_{i+1} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中

$$P_b = e^{-bh}, \quad P_a = e^{-ah} \quad (23)$$

于是,

$$x_k = x_{b_k} - x_{a_k} = \sum_{i=0}^k [P_b^{k-i} Q_b - P_a^{k-i} Q_a] r_i$$

由此求出 $x(t)$ 的方差为

$$\sigma_x^2 = \lim_{k \rightarrow \infty} \langle x_k^2 \rangle = \sigma_r^2 \left(\frac{Q_b^2}{1-P_b^2} + \frac{Q_a^2}{1-P_a^2} - \frac{2Q_b Q_a}{1-P_b P_a} \right)$$

考虑到 $\sigma_r = 1$, 故

$$\sigma_x^2 = \frac{Q_b^2}{1-P_b^2} + \frac{Q_a^2}{1-P_a^2} - \frac{2Q_b Q_a}{1-P_b P_a} \quad (24)$$

$x(t)$ 的相关函数为

$$\begin{aligned} R_x(mh) &= \lim_{k \rightarrow \infty} \langle x_k x_{k+m} \rangle \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} \sigma_r^2 \sum_{i=0}^k (P_b^{k-i} Q_b - P_a^{k-i} Q_a) (P_b^{k+m-i} Q_b - P_a^{k+m-i} Q_a) \\ &= \left(\frac{Q_b^2}{1-P_b^2} - \frac{Q_b Q_a}{1-P_b P_a} \right) P_b^m + \left(\frac{Q_a^2}{1-P_a^2} - \frac{Q_b Q_a}{1-P_b P_a} \right) P_a^m \end{aligned} \quad (25)$$

另一方面, 根据传递函数 (20) 式可推出相关函数 $R_x(\tau)$ 为

$$R_x(\tau) = \sigma_x^2 \frac{1}{b-a} (be^{-b\tau} - ae^{-a\tau})$$

取时间间隔 $\tau = mh$, 则

$$R_x(mh) = \frac{\sigma_x^2}{b-a} (be^{-bmh} - ae^{-amh}) = \frac{\sigma_x^2}{b-a} (bP_b^m - aP_a^m) \quad (26)$$

比较 (25) 与 (26) 式, 为了使两式所表示的衰减规律一致, 必须满足

$$b \left(\frac{Q_b^2}{1-P_b^2} - \frac{Q_b Q_a}{1-P_b P_a} \right) + a \left(\frac{Q_a^2}{1-P_a^2} - \frac{Q_b Q_a}{1-P_b P_a} \right) = 0 \quad (27)$$

令

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{Q_a}{Q_b} \\ R_a &= 1 - P_a^2, \quad R_b = 1 - P_b^2, \quad R_{ab} = 1 - P_a P_b \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

则 (27) 式成为 η 的二次代数方程式, 由此可解出

$$\eta = \frac{a+b}{R_{ab}} \pm \sqrt{\left(\frac{a+b}{R_{ab}} \right)^2 - \frac{4ab}{R_a R_b}} \quad (29)$$

根号前的 \pm 号可以任意选取, 我们取十号。

由 (24) 式得到 Q_b 的表达式为

$$Q_b = \frac{\sigma_x}{\sqrt{\frac{1}{R_b} + \frac{\eta^2}{R_a} - \frac{2\eta}{R_{ab}}}} \quad (30)$$

式中输出量的强度 σ_x 可以按公式(4)算出, η 由(29)式算出, R_a 、 R_b 和 R_{ab} 均由(28)式确定。按(30)式算出 Q_b 后, 可以求出

$$Q_a = Q_b \eta \quad (31)$$

有了 P_a 、 P_b 、 Q_a 和 Q_b 后, 就可按(22)式不断递推而产生 x_a 和 x_b , 它们之差 $x_b - x_a$ 就是所要求的大气紊流随机信号 $x(t)$ 了。

五、检验方法和算例

检验工作所依据的原始数据是由前述“大气紊流发生器”程序得到的随机序列 $x(t)$ 的 N 个离散值 $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 。为了得到较真实的统计特性, N 必须取得足够大。在我们的算例中取 $N = 8192$ 。

由于频谱函数 $\Phi(\omega)$ 和相关函数 $R(\tau)$ 是一一对应的, 不同的只是前者表示在频域中, 后者表示在时域中。所以得到的大气紊流随机信号是否符合 Dryden 模型, 按频谱特性进行检验与按相关特性进行检验是同样有效的。在我们的情况下, 求相关函数比较直接、方便, 所以采用的检验方法是: 由产生的大气紊流随机信号求出相关函数, 将它与 Dryden 模型的理论相关函数(即公式(3)所表示的)进行比较, 检验其吻合程度。

按定义, 随机过程 $x(t)$ 的相关函数 $R_x(\tau)$ 为

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad (32)$$

将此式离散化, 即由步长为 Δt 的 N 个相继的大气紊流信号序列 $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 求出间隔为 τ 的 L 个点的相关函数值。为了方便起见, 取 $\tau = k\Delta t$, 式中 k 为正整数。于是

$$R_{x,k} = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x_i x_{i+k}, \quad k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (33)$$

随着 k 的增大, 采样点数目 $(N-k)$ 减小, 因而可靠程度降低。所以相关函数的点数 L 不可太大, 应使 $L \ll N$ 。

采用上述方法, 我们编好程序后, 在电子计算机上作了一个算例。所用的原始数据为: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 1.5 \text{ m/s}$, $L_x = 2L_y = 2L_z = 530 \text{ m}$, $v = 150 \text{ m/s}$, $l = 30 \text{ m}$ 。检验结果均打印成图线(图3)。由图可以看出由上述仿真技术得出的大气紊流的相关函数与理论值基本吻合。两者略有差别估计是由于所取伪随机数不是真正的白色噪音所造成的。

六、对飞行模拟器大气紊流数学模型的一些建议

将求得的随机风代入计及风速及风速梯度影响在内的飞机运动方程式中, 就可以得出飞机对大气紊流的响应, 最后不难得到各个不同参数的均方根值。

对于某中型运输机在1000 m高度上, 以速度130 m/s作水平直线飞行, 受到晴空大

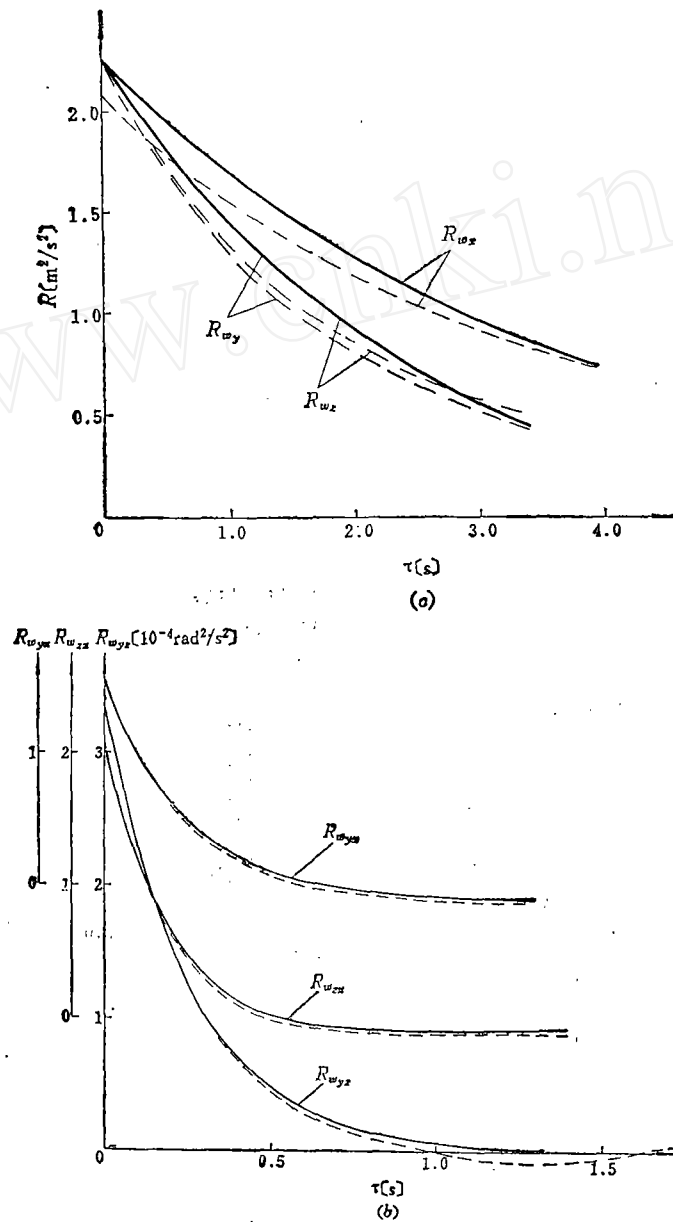


图 3 相关函数理论值与仿真值的比较
(——理论值, - - - - 仿真值)

气紊流时, 用频率响应法算得的纵向扰动运动均方根值, 如表 1 所示^[4]。

表 1 飞机纵向扰动运动均方根值

响应均方根值	$\sigma_{\Delta v}(\text{m/s})$	$\sigma_{\Delta \alpha}(\text{rad})$	$\sigma_{\Delta \omega_2}(\text{rad/s})$	$\sigma_{\Delta \beta}(\text{rad})$	$\sigma_{\Delta n_y}$
考虑梯度 w_{yz} 时	2.4645	0.01318	0.00665	0.02442	0.09229
不考虑梯度 w_{yz} 时	2.4508	0.01327	0.00692	0.02416	0.09142

算得的横侧向扰动运动均方根值如表 2 所示。

由上列两表看出在飞机纵向扰动运动中可不考虑梯度 w_{yz} 的效应；在飞机横侧向扰动运动中可不考虑梯度 w_{zx} 的效应，但是必须考虑梯度 w_{yz} 的效应。从图 4 所示滚转角 γ 的频谱密度曲线也可以明显地得出上述结论。

表 2 飞机横侧向扰动运动均方根值

响应均方根值	$\sigma_\beta(\text{rad})$	$\sigma_{\omega_x}(\text{rad/s})$	$\sigma_{\omega_y}(\text{rad/s})$	$\sigma_r(\text{rad})$	σ_{n_x}
考虑梯度 w_{yz} , w_{zx} 时	0.01718	0.01790	0.01325	0.03837	0.3674
考虑梯度 w_{yz} 时	0.01590	0.01635	0.01131	0.03797	0.3135
不考虑所有梯度时	0.01584	0.01118	0.01095	0.00962	0.3102

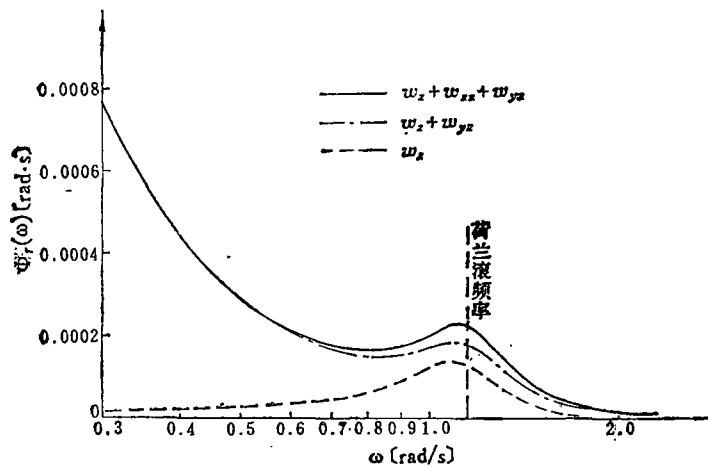


图 4 三种不同情况下滚转角响应频谱密度曲线

研制我国第一台数控飞行模拟器时，我们仅输入了三个速度分量 w_x 、 w_y 和 w_z 。这台模拟器虽然是针对某歼击机设计的，展弦比要较运输机的小得多，但飞行员在调试中普遍认为飞机在受到大气扰动时，滚转的响应太弱，这正是由于未输入速度梯度 w_{yz} 的缘故。后来通过理论计算也充分说明了这一现象，只是在滚转响应的程度上不如运输机这样强烈。因此，建议今后考虑飞行模拟器的大气紊流数学模型时，应加上风的速度梯度 w_{yz} ，但可忽略 w_{yx} 和 w_{zx} 。

其次，在选择大气紊流仿真所用步长时应考虑到：如步长过短，采样点相互太接近，就会出现相关的、过多的不必要数据，从而无谓地增大计算工作量和费用；但如步长过长，采样点过于分散，又会导致低频和高频分量间的混淆。由于大气紊流能量谱显示出大部分动能能在 1 Hz 范围以下，通常飞机本身的短周期模态和荷兰滚模态的频率一般不超过 2 Hz，再加上本文所提供的仿真方法具有对步长大小不敏感的优点，所以建议飞行模拟器的大气紊流数学模型可采用步长 0.1 s。

参 考 文 献

- [1] 军用规范——有人驾驶飞机的飞行品质[MIL-F-8785 B (ASG)]的背景材料和使用指南, AFFDL-TR-69-72, 国外航空编辑部, (1977), 第312~338页。
- [2] 军用规范——有人驾驶飞机的飞行品质[MIL-F-8785 C], 飞行力学编辑部, (1982), 第43~54页。
- [3] 赵震炎, 现代飞行模拟器设计中对风和大气扰动的一种处理方法, 北京航空学院 科 研 报 告 BH-B491, (1979)。
- [4] 肖业伦, 飞机大气紊流响应, 北京航空学院讲义, (1984), 第55~91页。
- [5] Wang, S., and Frost, W., Atmospheric Turbulence Simulation Technique with Application to Flight Analysis, NASA CR-3309, (1980)。
- [6] Forsythe, G. E. et al., Computer Methods for Mathematical Computation, Prentice-Hall inc., (1977), pp. 241~247.

A DIGITAL SIMULATION TECHNIQUE FOR DRYDEN
ATMOSPHERIC TURBULENCE MODEL

Zhao Zhenyan, Xiao Yelun, Shi Yijian
(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

Abstract

Dryden model is usually used in studying the response of flight vehicle to atmospheric turbulence. For a modern flight simulator, it is necessary to generate random winds(in Dryden model or sometimes others) with a digital computer. In this paper, a theoretically stricted new method to meet this purpose is proposed. By this method, we can acquire a three-dimensional atmospheric turbulence which contains three components of wind velocity and three components of wind velocity gradient. The reliability of this method is checked by comparing with the autocorrelation value obtained from the theoretical autocorrelation value. A numerical example has shown a satisfactory result. Finally, some proposals about how to use this mathematical model in flight simulator are given.