

用于飞行仿真的二维紊流场的 数字生成法*

DIGITAL GENERATION OF TWO-DIMENSIONAL FIELD OF TURBULENCE FOR FLIGHT SIMULATION

北京航空航天大学 肖业伦

Beijing University of Aeronautics and Astronautics Xiao Yelun

摘要 在飞行仿真的某些特殊情况(例如编队飞行、空中加油情况)下有必要生成二维紊流场,其中的紊流速度是两个坐标(例如沿飞行方向的 x 和沿翼展方向的 y)的随机函数。在已有的一维紊流场生成技术的基础上,本文提出了一种简易而有效的生成二维紊流场、即在矩形网络上生成紊流速度序列的方法。经抽样检验,这样生成的紊流场的相关函数基本上符合紊流模型的相关特性,因而证实了该方法的可行性。还讨论了在飞行仿真中二维紊流生成器的两种运行方式——在线式和离线式。

关键词 飞行仿真,大气紊流,数值仿真。

Abstract In some special cases of flight simulation(e.g. for formation flight, in-flight tanking) it is required to generate two-dimensional field of turbulence, in which the turbulent wind speeds are stochastic functions of two coordinates (e.g. x in the flight direction and y in the wing span direction). For this purpose a simple and efficient technique for digital generation of two-dimensional field of turbulence, i.e. for production of turbulent speed sequences on a rectangular network, is proposed in this paper. The correlation of so generated turbulent field is found to be in good agreement with the theoretical correlation of the Dryden model, thus the feasibility of the proposed method is verified. Two possible operation modes (off-line and on-line) of the turbulence generator in flight simulation are also discussed.

Key words flight simulation, atmospheric turbulence, numerical simulation.

一、引言

迄今在飞行仿真(模拟)中仅使用一维紊流场,即紊流速度的三个正交分量 u, v, w 都只是一个坐标(沿飞行方向的 x)的随机函数: $u(x), v(x), w(x)$ 。至于紊流速度沿翼展方向的变化则往往用紊流梯度来表示,而且紊流梯度也是作为 x 的函数来生成的。

在某些特殊的飞行情况下,例如多架飞机的编队飞行,空中加油时输油机与受油机的飞行,不仅要考虑紊流速度沿飞行方向的变化,也要考虑沿翼展方向的变化,因而这些特

* 国家自然科学基金资助项目
1989年4月4日收到

殊情况的飞行仿真需要生成二维紊流场, 即其中紊流速度是两个正交坐标的随机函数。例如要求生成法向紊流速度 $w(x, y)$ 。

本文研究的目的是, 在现有的生成一维紊流的数值方法的基础上提出一个简易有效的、适合于飞行仿真应用的生成二维紊流场的数字方法。

二、一维紊流场生成方法的回顾和改进

在一维紊流场中紊流速度(和梯度)是一个坐标——例如飞行路程 x 或时间 t ——的随机函数。生成一维紊流场的数字方法已在文献[1~3]中作了说明。为了便于了解以后的内容, 首先简述一下现有的方法^[1], 并作一点补充和修正。作为例子, 本文仅讲述法向风速度 w 的生成, 其它分量的生成与此类似。

Dryden大气紊流模型的法向风速度的双侧(即定义在频率范围 $(-\infty, +\infty)$ 内)功率密度频谱为

$$\Phi_w(\Omega) = \sigma_w^2 \frac{L_w}{2\pi} \frac{1+3(L_w\Omega)^2}{[1+(L_w\Omega)^2]^2} \quad (1)$$

式中 σ_w 是紊流强度; L_w 是紊流尺度; Ω 是沿 x 轴的空间频率。

与此相应的距离相关函数为

$$R_w(\xi) = \sigma_w^2 (1 - |\xi|/2L_w) \exp(-|\xi|/L_w) \quad (2)$$

式中 ξ 是沿 x 轴的距离。

为了简易起见, 将频谱函数和相应的相关函数近似表示成

$$\Phi_w(\Omega) = \sigma_w^2 \frac{L_w}{\sqrt{3}\pi} \frac{1}{1+(L_w\Omega/\sqrt{3})^2} \quad (3)$$

$$R_w(\xi) = \sigma_w^2 \exp(-\sqrt{3}|\xi|/L_w) \quad (4)$$

Dryden相关函数(2)式与简化相关函数(4)式的曲线在图1中作了比较, 可见两者的差别不大。由此可以推想Dryden频谱(1)式与近似频谱(3)式的接近程度。

为了得到所需的成形滤波器的结构, 把空间频谱(3)式转化成时间频谱

$$\Phi_w(\omega) = \sigma_w^2 \frac{L_w}{\sqrt{3}\pi V} \frac{1}{1+(L_w\omega/\sqrt{3}V)^2} \quad (5)$$

式中 V 为飞行速度; $\omega = \Omega V$ 为时间频率。

由频谱式(5)的分解, 得到由白色噪音 r 生成紊流信号 w 所需要的成形滤波器的传递函数:

$$\frac{w(s)}{r(s)} = G(s) = \frac{\sigma_w \sqrt{L_w/\sqrt{3}\pi V}}{1+(L_w/\sqrt{3}V)s} \quad (6)$$

以 Δt 为时间步长, 方程(6)可转化成差分方程:

$$w_{i+1} = Pw_i + Qr \quad (7)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} P &= \exp(-\Delta t \sqrt{3}V/L_w) \\ Q &= (\sigma_w/\sigma_r) [1 - \exp(-2\Delta t \sqrt{3}V/L_w)]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

这里 σ_r 为白色噪音强度, 通常取为1; σ_w 为所要求的紊流强度。

若要求以 Δl 为距离步长生成紊流速度序列, 则由于 $\Delta l = V\Delta t$, 故差分方程(7)中的

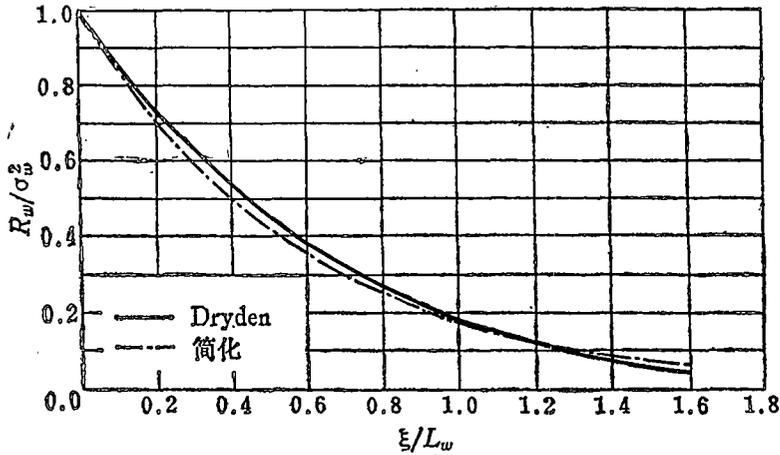


图 1 Dryden相关函数与简化相关函数的比较

系数P, Q为

$$\left. \begin{aligned} P &= \exp(-\sqrt{3} \Delta l / L_w) \\ Q &= (\sigma_w / \sigma_r) [1 - \exp(-2\sqrt{3} \Delta l / L_w)]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

用这样方式生成的一维紊流场的一个样本见图 2。

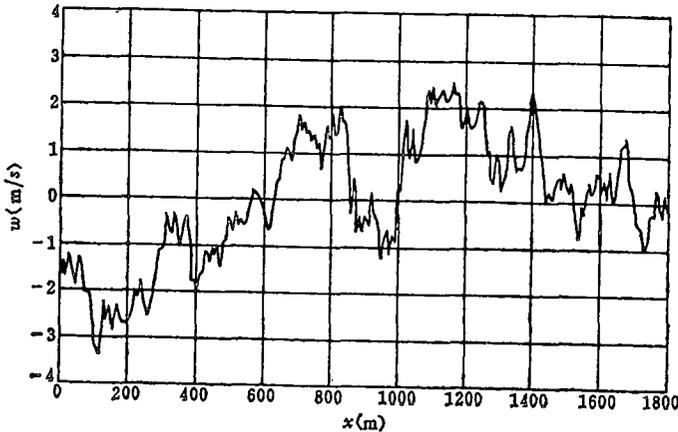


图 2 一维紊流场 w = w(x) 的一个样本

三、二维紊流场的生成方法

在二维紊流场中紊流速度 w 是两个坐标的随机函数: $w = w(x, y)$ 。

严格地说, 二维紊流场只有通过求解流体动力学偏微分方程才可能得到, 但这种做法非常费时, 对于飞行仿真来说是不现实的。因此, 为了满足飞行仿真的要求, 本文提出了一种相当简易的生成二维紊流场的方法。

设想: 要求在一个矩形网络 (见图 3) 的 $m \times n$ 个节点上用数字法生成紊流速度序列, 它应符合简化的频谱函数 (3) 或相关函数 (4)。

在节点 (i, j) 处的速度 w 用 $w(i, j)$ 表示, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

首先按照上一节叙述的方法沿 x 轴生成一维速度序列

$$w(1,1), w(2,1), \dots, w(m,1) \tag{10}$$

沿 y 轴生成

$$w(1,1), w(1,2), \dots, w(1,n) \tag{11}$$

它们分别称为 x 基准序列和 y 基准序列。

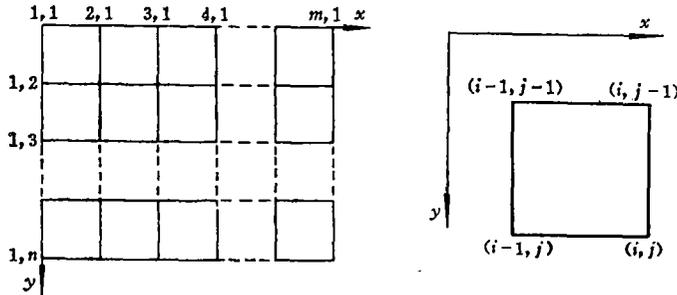


图 3 矩形网络和节点

然后从节点 $(1,2)$ 出发沿 x 方向进行节点 $(2,2)$ ，生成速度 w ，以 $w_x(2,2)$ 表示；从节点 $(2,1)$ 出发沿 y 方向进到节点 $(2,2)$ ，生成速度 w ，以 $w_y(2,2)$ 表示。由于随机性质，这两个速度当然不相等。取它们的算术平均值作为所需要的速度

$$w(2,2) = [w_x(2,2) + w_y(2,2)]/2$$

用同样的方法可以由已有的 $w(1,3)$ 和 $w(2,2)$ 得出 $w(2,3)$ ，依此类推。这样就形成一个 y 序列 $w(2,1), w(2,2), \dots, w(2,n)$ 。类似地可以形成下一个 y 序列。如此重复，一直到充满整个矩形网络为止。

在原理上，也可以在 x 基准序列和 y 基准序列的基础上，依次生成一个个 x 序列，直到充满整个网络。但这个做法不适用于在线运行方式（见本文第五节）。

因为两个随机数取平均值的运算改变了随机序列的相关特性，为了补偿这种改变，必须把系数 P, Q 予以修正。由于尚未能从理论上找到修正的方法，目前只得用数值优化法来解决。具体的做法是，定义一个性能指标 J ，用来表示非基准序列的相关函数曲线与理论相关函数曲线的偏离程度（例如规定为若干点的偏差平方之和）。显然， J 是修正系数 C_P 和 C_Q 的函数。使 J 达到极小值的 C_P 和 C_Q 就是合适的修正因子。作者已找到 $C_P = 1.05$ ， $C_Q = 1.15$ ，但尚不能肯定这两个数值是普遍适用的。

概括地说，生成二维紊流场的整个过程如下（参看图3）：

1. 给定紊流尺度 L_w 和强度 σ_w ，选择步长 Δl ；
2. 按公式（9）计算基本参数 P, Q ；
3. 形成 x 基准序列：

$$\text{取 } w(1,1) = 0, 0$$

对于 $i = 2$ 步长 1 直至 m 执行

$$w(i,1) = P * w(i-1,1) + Q * r$$

4. 形成 y 基准序列：

对于 $j = 2$ 步长 1 直至 n 执行

$$w(1, j) = P * w(1, j-1) + Q * r$$

5. 用数值优化法寻找修正因子 C_P, C_Q , 用来修正 P, Q :

$$P' = C_P * P \quad Q' = C_Q * Q$$

6. 形成所有非基准序列, 从而充满整个网络:

对于 $i = 2$ 步长 1 直至 m 执行

对于 $j = 2$ 步长 1 直至 n 执行

$$w_x(i, j) = P' * w(i-1, j) + Q' * r$$

$$w_y(i, j) = P' * w(i, j-1) + Q' * r$$

$$w(i, j) = [w_x(i, j) + w_y(i, j)]/2$$

图 4 是按上述方法用计算机生成并且用计算机绘制的二维紊流场的一个局部样本。由此图可以得到一个直观印象。

以上讲述的是法向速度 w 的二维场的生成, 至于纵向速度 u 和侧向速度 v 的生成也是类似的。

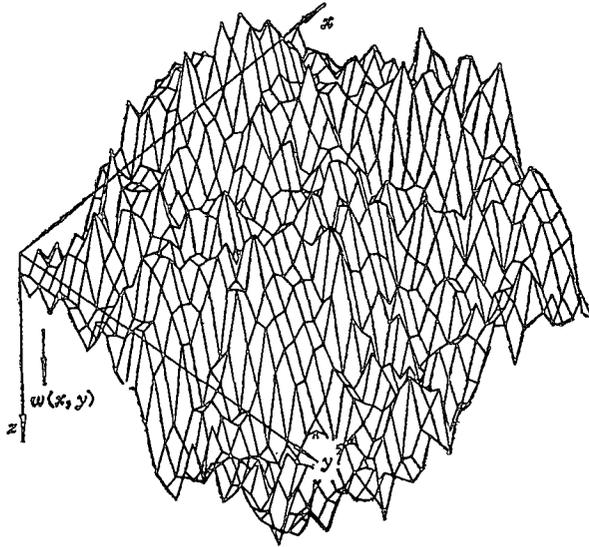


图 4 二维紊流场 $w = w(x, y)$ 的一个样本

四、方法的验证

由上述过程可知, x 和 y 基准序列基本上符合紊流模型的相关或频谱特性, 因为它们是用已经考验过的一维紊流生成方法形成的。现在的问题是, 沿 x 方向和沿 y 方向的非基准序列是否也符合该紊流模型的相关或频谱特性。

为了回答这个问题, 进行了一些试验。取

$$L_w = 760\text{m}, \quad \sigma_w = 1.766\text{m/s}, \quad \Delta l = 7.5\text{m}$$

首先在包含 $8192 * 33$ 个节点的矩形网络上生成二维紊流场。然后取一个序列

$$w(1, j_i), w(2, j_i), \dots, w(8192, j_i) \quad (1 < j_i \leq 33)$$

作为非基准序列的一个样本。

然后利用一个适用的子程序将基准序列和非基准序列样本进行处理，求出它们的相关函数。这两种相关函数与由（4）式给出的简化相关函数在图5中作了比较。

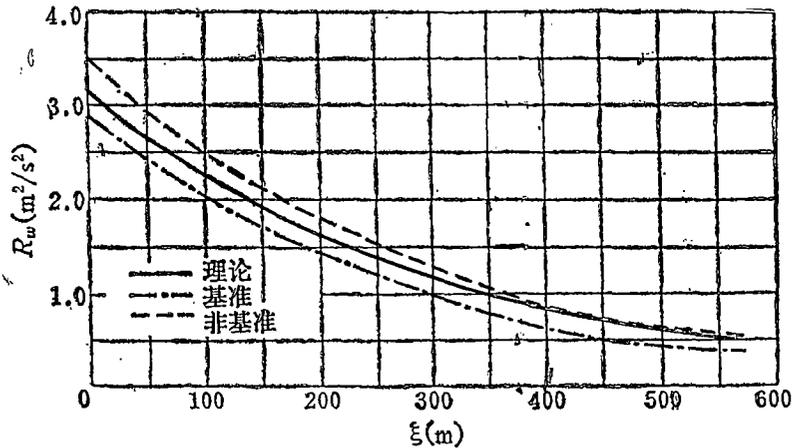


图5 相关函数的比较

由图5可见，不仅基准序列、而且非基准序列的相关函数都与理论相关函数吻合得相当好。这就验证了本文提出的方法从工程观点来看是可行的。

五、在飞行仿真中的运行方式

二维紊流场在飞行仿真中的应用可以有两种方式：离线式和在线式。

离线运行方式是，在一个足够大的矩形网络上预先生成二维紊流场，并将数据储存在适当的介质（例如磁带、磁盘）中，当进行飞行仿真时再将紊流场数据取出来应用。

在线运行方式是，在飞行仿真过程中在当时的飞行区域内临时生成所需的二维紊流信号。建议具体做法如下。在仿真开始时首先沿 y 轴方向生成 y 基准速度序列，其长度应略大于飞行区域的宽度。在飞行仿真的进程中沿 x 轴方向（即未扰飞行航迹方向）逐步生成 x 基准序列。以这两个基准序列为基础，可以生成二维的现行紊流场，它的面积应完全覆盖住当时涉及的飞行区域（例如编队飞行中的多架飞机当时占据的区域）。现行紊流场可经常地更新，因此所需要的储存容量不大。这种运行方式在实时和非实时仿真中都可以采用。

六、结束语

1. 当涉及多架飞机相对位置的保持时飞行仿真需要生成二维紊流场。

2. 本文提出的二维紊流场数字生成法从工程观点来看是可行的，因为这样得到的紊流场近似符合所采用的紊流模型的相关特性。可以预计此方法将在特殊条件的飞行仿真中得到实际应用。

3. 离线运行和在线运行都是可能的，但后者更为灵活机动，因而更适合于实时仿真。

4. 本文的方法是建立在经验和试验基础上的，还有待于在理论上作更深入的探讨，并使方法得到更进一步的改善。

参 考 文 献

- 1 赵毅炎, 肖业伦, 施毅坚, Dryden大气紊流模型的数字仿真技术, 航空学报, 1986, 7, (5) 433~443
- 2 赵毅炎, 现代飞行模拟器设计中阵风和大扰动的一种处理方法, 北京航空学院科研报告 BH-B491, (1979)
- 3 Wang S, Frost W. Atmospheric Turbulence Simulation Technique with Application to Flight Analysis, NASA CR-3309, 1980

.....
 国际会议
 报 道

第七届国际复合材料会议 (ICCM-VII) 在广州举行

第七届国际复合材料会议 (ICCM-VII) 于1989年11月22日~24日在广州东方宾馆召开。这次大会由中国航空学会、中国力学学会、中国宇航学会、中国科协国际科技会议中心联合发起, 由中国航空学会和国际科技会议中心共同主办。大会开幕式由大会执行主席吴人洁教授主持, 顾震隆教授代表大会主席吴云书教授致欢迎词, 蔡维伦先生代表国际复合材料执委会向大会致词。到会代表来自12个国家和地区共260人。会议共收到来自23个国家和地区的论文495篇, 经评审和组织委员会审定, 列入会议文集有314篇, 另有69篇列入墙报论文专册。这是ICCM历届会议论文最多的一届。大会安排有七篇大会报告: 中国吴人洁作题为“中国复合材料的发展”报告; 法国C. Petiau作题为“飞行器结构复合材料优化”报告; 美国S. Dastin作题为“80年代的复合材料”报告; 西德Dieter Schulz作题为“空中客车系列尾翼结构采用先进复合材料的经验”; 日本Kozo Kawata作题为“和金属相比复合材料和基体的高应变率拉伸性能”报告; 美国S. W. Tsai作题为“复合材料层板三维刚度和强度”报告; 苏联Vsevolod G. Lutsau作题为“振动与先进复合材料”报告。有81篇论文分别在三个分会场宣讲; 另有33篇论文参加墙报论文讨论会。这些论文从复合材料各专业研究的广度和深度上都全面反映了本学科前沿发展的动态和很高的学术水平。收入文集的314篇论文大都集中反映了当前复合材料研究的热点课题, 其中: 金属基复合材料有42篇; 微观界面研究有21篇; 损伤容限与冲击损伤有24篇; 损伤机理研究有25篇; 疲劳与断裂有35篇及热塑性树脂预浸料工艺等。

我国在会上发表的54篇文章是从212篇文章中精选出来的, 得到国外代表较高的评价, 他们对我国复合材料的发展感到震惊。会议同时还举办了一个小型复合材料展览会。在会议开幕前一天ICCM国际执委会主席S. W. Tsai先生举办了“复合材料设计”讲座, 有80多代表参加。会议期间法国A. Ganga先生举办了“热塑性树脂FIP预浸料工艺及其设备”的讲座, 听讲代表十分踊跃, 取得满意效果。会议期间, 我国有关飞机设计单位分别与西德MBB公司、法国达索公司、美国格鲁门公司等举行座谈, 交流了飞机复合材料结构设计和试验等技术问题。

(李 珊)