

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.02.008

围绕旋翼飞行器的三维结构化运动嵌套网格生成方法

尹江离 招启军 李 鹏

(南京航空航天大学直升机旋翼动力学国家级重点实验室,南京,210016)

摘要:考虑到旋翼飞行器的旋翼各种运动和机身复杂外形特点,建立了一种鲁棒性高的三维结构化嵌套网格生成方法。采用三维 Poisson 方程对初始网格进行迭代,获得了高质量的旋翼桨叶三维结构化网格。以此方法为基础,以复杂外形几何体表面网格为初始网格,建立了一种抛物型法向外推方法。推进过程中,使用经抛物化处理的新 Poisson 方程进行光滑迭代,源项由 Hilgenstock 法确定,有效克服了椭圆型方程生成网格时边界点较难调整的困难。通过网格最小正交度的检测,表明了该抛物型方法的先进性。进一步将高效的挖洞法("Top map"法)和贡献单元搜寻法("Inverse map"法)引入上述三维结构化网格生成中,建立了围绕旋翼飞行器的运动嵌套网格生成方法,采用 RANS 方程分别对 Caradonna-Tung 旋翼和 V-22 倾转旋翼机流场进行计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)计算,表明该网格生成方法能够满足 CFD 计算的需求。

关键词:旋翼飞行器;流场;三维结构化网格;运动嵌套网格;Poisson 方程;RANS 方程

中图分类号:V211.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)02-0228-07

Generation Method for Three-Dimensional Structured Moving-Embedded Grid Around Rotorcraft

Yin Jiangli, Zhao Qijun, Li Peng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Considering the characteristics of several kinds of rotor movements and complicated fuselage geometry shape of rotorcraft, a robust generation method for 3-D structured embedded grid is established. 3-D preliminary grids are generated by using the Poisson equations for iterations, then 3-D structured grid around the rotor blade with high quality is acquired. Based on this method, a parabolic marching method along the normal direction is established, which uses surface grid around complicated geometry shape as its preliminary grid. In the marching process, new Poisson equations modified by parabolic means, which source terms are determined by the Hilgenstock way, are used for smoothing iterations, and the difficulties of adjusting points on boundaries by using elliptic grid generation method are overcome effectively. The advantages of the parabolic method is proved by using examination of minimum orthogonality of grid. The efficient way of hole cutting ("Top map") and donor cells searching ("Inverse map") are introduced further to 3-D structured grid generation above, and the method for generating moving-embedded grid around rotorcraft is established. It is demonstrated by conducting computational fluid dynamics (CFD) calculations on the flowfields of Caradonna-Tung rotor and V-22 tilt-rotor aircraft respectively using the RANS equations that the grid generation method could meet the demands

基金项目:国家自然科学基金(11272150)资助项目。

收稿日期:2015-01-15; **修订日期:**2015-02-15

通信作者:招启军,男,教授,博士生导师, E-mail: zhaojun@nuaa.edu.cn。

本文已收编于2014年全国直升机年会内部交流论文集。

of CFD calculations.

Key words: rotorcraft; flowfield; three-dimensional structured grid; moving-embedded grid; Poisson equations; RANS equations

高质量的网格生成技术是使用 CFD 方法进行流场精确分析的基础和重要前提^[1]。结构网格具有良好的拓扑性,数据结构简单、方便索引且便于构造高精度格式,能够显著提高流场模拟的精度。然而研究如包含旋翼运动部件及机身静止部件等的旋翼飞行器时,生成一套结构化网格难度较大,通常采用运动嵌套网格技术来实现,允许各区网格重叠,降低了网格生成的难度。但在嵌套网格之间传递数据时会带来部分精度的损失,这对围绕旋翼飞行器的结构网格的贴体性、正交性和嵌套关系提出了更高的要求。因此,开展围绕旋翼飞行器三维结构化网格生成方法研究对进行该类飞行器气动特性的 CFD 分析具有重要意义和实际价值。

但是,在结构网格生成中存在诸多难点。Thompson^[2]分析了不同拓扑结构对网格局部质量的影响,尤其在处理复杂外形几何体时,这种影响将更加显著。旋翼飞行器的机身外形复杂,包括明显的凹凸角,传统代数法已不再适用,使用椭圆型偏微分方程法生成三维结构网格是一种可行的方案。该方法最早由 Winslow 提出,但真正得以广泛运用是在 Thompson 等人提出 TTM^[3]法后。后根据 Poisson 方程源项如何确定的问题又提出了许多新的生成方法。其中,White^[4]分析了 Poisson 方程的源项对网格贴体性和正交性的影响,说明了 Hilgenstock^[5-7]方法的优势。由于边界点坐标被作为求解椭圆型方程的初值条件给出并对网格整体质量起重要作用,然而迭代过程中修改初值容易引起迭代不收敛。因此,如何合理分布网格边界点以获得较好的整体网格质量,一直是人们研究的热点问题和难点问题。为了克服这一难点,Steger 和 Chaussee 提出了将双曲型方程应用到二维网格生成中,随后 Steger 等人将该方法推广到三维情况^[8]。这种双曲型方程法具有不用人为定义外边界且可直接调整网格层数的优点,但却带来了新的问题:由于双曲型方程的传播奇异性,当边界不光滑时,可能会导致网格生成的质量较差。国内专家如张正科、朱自强^[9]等人也对三维结构化网格生成法进行了深入的探索,成功生成了围绕多种飞行器的分区结构化网格,但是没有涉及到旋翼飞行器的网格生成,并且他们采用分区法对网格生成质量也有一定影响,需要人工调配,自动化程度不够高。

鉴于此,本文使用 Poisson 方程对桨叶网格进行迭代,拟快速有效地提升桨叶三维网格的生成质量,在生成围绕机身等复杂外形几何体的三维结构网格过程中,本文借鉴 Nakamaru 提出的抛物型方程思想^[10],将 Poisson 方程中决定椭圆型特性的项作抛物化处理,并结合代数法向外推法简单、直观、计算量小等优点,建立了一种快速有效的抛物型网格生成方法。该方法生成的三维网格中的边界初始网格由容易调整网格质量的面网格给定,突破了椭圆型方程的边值条件限制和双曲型方程的传播奇异性特点,适用于围绕旋翼飞行器机身复杂外形的三维网格生成。最后,结合运动嵌套网格方法,建立了围绕倾转旋翼机的全机贴体嵌套网格系统,并分别进行了单独旋翼和倾转旋翼飞行器的三维流场特性模拟,验证了三维结构化网格生成的有效性。

1 三维结构化网格生成方法

1.1 Poisson 方程法

1.1.1 网格生成的控制方程

通过求解 Poisson 方程生成网格的方法属于椭圆型偏微分方程法。物理空间的三维 Poisson 方程^[11]为

$$\begin{cases} \xi_{xx} + \xi_{yy} + \xi_{zz} = P(x, y, z) \\ \eta_{xx} + \eta_{yy} + \eta_{zz} = Q(x, y, z) \\ \zeta_{xx} + \zeta_{yy} + \zeta_{zz} = R(x, y, z) \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x, y, z) 为物理空间直角坐标; (ξ, η, ζ) 为计算空间曲线坐标; $P(x, y, z), Q(x, y, z)$ 和 $R(x, y, z)$ 为 Poisson 方程源项。

计算空间的三维 Poisson 方程为

$$\alpha_1(\mathbf{r}_\xi + \varphi_P \mathbf{r}_\xi) + \alpha_2(\mathbf{r}_\eta + \varphi_Q \mathbf{r}_\eta) + \alpha_3(\mathbf{r}_\zeta + \varphi_R \mathbf{r}_\zeta) + 2(\beta_{12} \mathbf{r}_\eta + \beta_{23} \mathbf{r}_\zeta + \beta_{31} \mathbf{r}_\xi) = 0 \quad (2)$$

式中:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= |\mathbf{r}_\eta|^2 |\mathbf{r}_\zeta|^2 - (\mathbf{r}_\eta \cdot \mathbf{r}_\zeta)^2; \\ \alpha_2 &= |\mathbf{r}_\zeta|^2 |\mathbf{r}_\xi|^2 - (\mathbf{r}_\zeta \cdot \mathbf{r}_\xi)^2; \\ \alpha_3 &= |\mathbf{r}_\xi|^2 |\mathbf{r}_\eta|^2 - (\mathbf{r}_\xi \cdot \mathbf{r}_\eta)^2; \\ \beta_{12} &= (\mathbf{r}_\xi \cdot \mathbf{r}_\zeta)(\mathbf{r}_\zeta \cdot \mathbf{r}_\eta) - (\mathbf{r}_\xi \cdot \mathbf{r}_\eta) |\mathbf{r}_\zeta|^2; \\ \beta_{23} &= (\mathbf{r}_\eta \cdot \mathbf{r}_\xi)(\mathbf{r}_\xi \cdot \mathbf{r}_\zeta) - (\mathbf{r}_\eta \cdot \mathbf{r}_\zeta) |\mathbf{r}_\xi|^2; \\ \beta_{31} &= (\mathbf{r}_\zeta \cdot \mathbf{r}_\eta)(\mathbf{r}_\eta \cdot \mathbf{r}_\xi) - (\mathbf{r}_\zeta \cdot \mathbf{r}_\xi) |\mathbf{r}_\eta|^2; \\ J &= \partial(x, y, z) / \partial(\xi, \eta, \zeta); \\ \varphi_P &= P/J^2, \varphi_Q = Q/J^2, \varphi_R = R/J^2. \end{aligned}$$

其中, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2$ 和 β_3 分别为坐标变换参数; J

为 Jacobi 转换行列式; φ_P , φ_Q 和 φ_R 分别是变换后的源项。

将上述偏微分方程转化为差分方程进行迭代求解至收敛,即完成了三维网格的生成过程。

1.1.2 源项的求解

源项对网格正交性及疏密度起决定性作用, Hilgenstock 提供了一种通过反复迭代逼近源项真实值的方法。以物面法向对应 ζ 正方向为例, 设 θ_{ε_r} 和 θ_{η_r} 为穿出物面任意一点的 ζ 网格线分别与 ξ 网格线和 η 网格线的夹角的期望值, 完全正交时为 $\pi/2$ 。 θ_{ε} 和 θ_{η} 分别为夹角的真实值。 设 d_r 为离开物面的第一层网格点与物面距离的期望值。 d 为相应的真实值。 通过比较期望值与真实值的差距, 得出自动化控制源项的公式为:

$$\begin{cases} \varphi_P^{(\lambda+1)} = \varphi_P^{(\lambda)} - \sigma \arctan(\theta_{\varepsilon_r} - \theta_{\varepsilon}) \\ \varphi_Q^{(\lambda+1)} = \varphi_Q^{(\lambda)} - \sigma \arctan(\theta_{\eta_r} - \theta_{\eta}) \\ \varphi_R^{(\lambda+1)} = \varphi_R^{(\lambda)} + \sigma \arctan(d_r - d) \end{cases} \quad (3)$$

式中: λ 为迭代次数; σ 为阻尼系数。 在外边界上源项公式仍然成立。

以上公式可以得到边界处的源项值, 内场源项通过指数插值方法^[12]获得。 通过内点坐标曲线插值重置 ξ 和 η 边界面上网格点坐标能够有效优化边界网格以提高整体网格质量。

1.1.3 桨叶的三维网格生成

使用本方法围绕具有负扭转、后掠特征的典型直升机桨叶生成 C-H 型网格。

首先, 使用代数方法生成桨叶初始网格, 如图 1 所示。 选取桨叶某一特征剖面生成二维网格, 再沿展向拉伸。 并在翼尖部位, 使用了捏合翼型物面第一层网格的方法, 完成了三维初始网格生成。

然后, 使用 Hilgenstock 源项控制法对三维 Poisson 方程迭代求解生成桨叶网格, 如图 2 所示。

对比图 1, 2 的初始网格和迭代后网格可以明显得出, 初始桨叶网格尖部尺寸跨度较大, 质量较差, 无法精确模拟此处附面层流动及桨叶三维效应。 迭代后网格正交性得到进一步提升, 在翼尖处网格间距得到大幅改善, 捏合的网格经过迭代后网格点分布更加合理。

1.2 基于 Poisson 方程的抛物型法向外推法

虽然, 用 Hilgenstock 方法对代数三维初始网格进行迭代求解的方法效率较高, 但是, 由于偏微分方程的解完全由边值确定, 并且通过人工干预方法得到外边界点的方法可靠性不高, 甚至导致网格生成失败。 因此, 有必要发展一种从物面网格点出

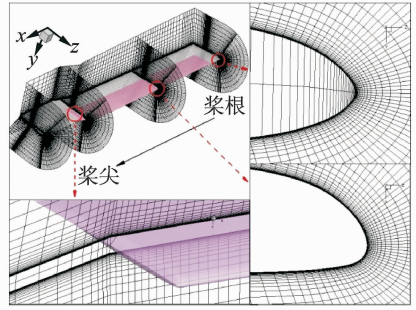


图 1 代数法生成的桨叶 C-H 型初始网格

Fig. 1 C-H preliminary grid of blade generated by algebraic method

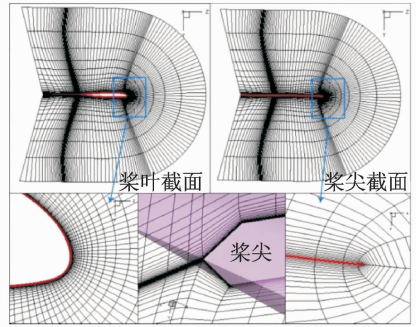


图 2 使用 Hilgenstock 方法生成的桨叶 C-H 型网格
Fig. 2 C-H grid of blade generated by Hilgenstock method

发的法向外推法, 降低由于人工布置外边界点导致网格生成失败的风险。 以旋翼飞行器机身为例, 机身上存在明显凹凸部位, 直接沿物面法向推进相同距离容易造成凸角处网格线发散和凹角处网格线的交叉。 本文在 Thompson^[13] 和李广宁^[14] 发展的基于椭圆型偏微分方程的抛物型法向外推法基础上, 使用 Hilgenstock 法控制源项, 取得良好效果。

1.2.1 法向外推法步骤

以推进方向为 ζ 轴正方向为例, 说明这种法向外推方法, 流程图如图 3 所示。

具体流程为: 由 $k=1$ 的表面网格作为已知条件, 使用代数法按照预设步长沿表面外法向推进得第 $k+1$ 和 $k+2$ 层网格, 对第 $k+1$ 层网格使用修正的 Poisson 方程进行优化, 并在每次优化后重新生成第 $k+2$ 层网格。 迭代收敛后保留第 $k+1$ 层网格舍弃第 $k+2$ 层网格, 并以第 $k+1$ 层网格做为新的已知条件, 重复以上步骤直至达到最大层数 k_{\max} , 完成对整个结构网格的生成。

1.2.2 推进步长的代数处理

推进时预设步长可根据需要选择。 本文根据边

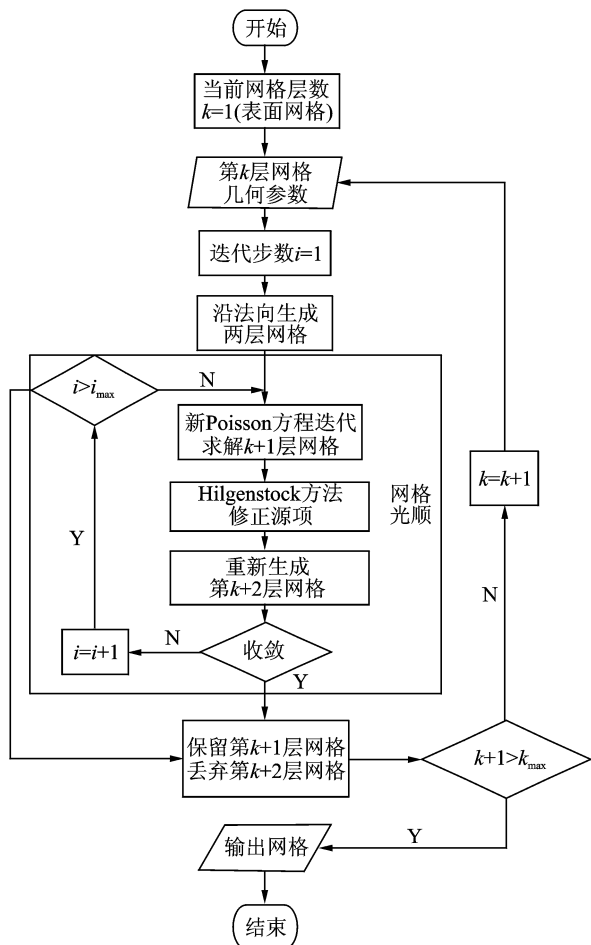


图 3 法向外推法三维网格生成流程图

Fig. 3 Flowchart of 3-D grid using marching method in normal direction

界层模拟的需要,预设第一层网格间距为特征长度的 10^{-5} 。网格间距随网格层数单调增长,设置最大网格间距防止网格间距过大导致新生成的两层网格出现交叉,导致网格生成失败,推进方向为物面外法向。其中,外法向近似取为 $(\mathbf{r}_{i+1,j,k} - \mathbf{r}_{i-1,j,k}) \times (\mathbf{r}_{i,j+1,k} - \mathbf{r}_{i,j-1,k})$ 。在凹凸角处的推进距离应根据角度大小调整预设推进步长,以避免凹角处推进出现网格线交叉和凸角处推进出现网格线发散的非理想状况,起到改善网格质量作用,调整后外推法对复杂外形几何体的网格生成有了较好的适应力。

1.2.3 Poisson 方程抛物化及求解

由于使用代数方法保证了 ζ 网格线与 $\zeta = \text{const}$ 面的正交性,可简化 Poisson 方程中坐标变换参数。对 Poisson 方程进行抛物化处理

$$\alpha_1 [(1 + \lambda_\xi) \mathbf{r}_{\xi\xi} + \varphi_P \mathbf{r}_\xi] + \alpha_2 (1 + \lambda_\eta \mathbf{r}_{\eta\eta} + \varphi_Q \mathbf{r}_\eta) + \alpha_3 (\mathbf{r}_{\zeta\zeta} + \varphi_R \mathbf{r}_\zeta) + 2\beta_{12} \mathbf{r}_{\xi\eta} = 0 \quad (4)$$

式中:

$$\alpha_1 = |\mathbf{r}_\eta|^2 |\mathbf{r}_\zeta|^2, \alpha_2 = |\mathbf{r}_\zeta|^2 |\mathbf{r}_\xi|^2, \alpha_3 = |\mathbf{r}_\xi|^2 |\mathbf{r}_\eta|^2 - (\mathbf{r}_\xi \cdot \mathbf{r}_\eta)^2, \beta_{12} = (\mathbf{r}_\xi \cdot \mathbf{r}_\zeta)(\mathbf{r}_\zeta \cdot \mathbf{r}_\eta), \beta_{23} = 0, \beta_{31} = 0,$$

λ_ξ 和 λ_η 为修正因子。以 λ_ξ 为例, λ_ξ 定义为

$$\lambda_\xi = \sqrt{\frac{\max(|\mathbf{r}_\xi|^2, |\mathbf{r}_\zeta|^2)}{|\mathbf{r}_\zeta|^2}} \times f(\psi_\xi) \quad (5)$$

式中: $f(\psi_\xi)$ 表示为

$$f(\psi_\xi) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \psi_\xi < \pi/2 \\ \sin(\psi_\xi)^T & \pi/2 \leq \psi_\xi < \pi \\ 0 & \pi \leq \psi_\xi < 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

式中: T 为正常数,取值在 $0 \sim 1$; ψ_ξ 为第 k 层网格面上 ξ 网格线在凹角处形成的夹角。 λ_η 有相同的形式。

新 Poisson 方程中,源项控制方法采用 Hilgenstock 方法,分别设置代数网格距离和角度参数为期望值。迭代收敛结果表明:新方程应用 Hilgenstock 法能在近似满足期望值的情况下对网格质量起到了光滑作用。该法向外推方法能够较为准确地控制每层间距和正交性,收敛速度快。

1.2.4 倾转旋翼机机身三维网格生成

本文选取半模倾转旋翼机机身作为网格生成的对象。倾转旋翼机机身有明显的凹角,是容易出现网格交叉的地方。先对倾转旋翼机机身划分表面网格,然后基于表面网格使用基于 Poisson 方程的抛物型法向外推法,倾转旋翼机机身网格生成结果如图 4 所示。观察图中网格细节,该方法能有效地避免凸角处网格线的发散和凹角处网格线的交叉,而且能够较为准确地满足第一层网格间距和正交性条件。物面外形较为复杂时,本方法也能够生成外边界与物面形状相似且贴体性良好的三维结构网格。图 5 所示为倾转旋翼机机身网格单元最小正交度,即单元内各角点正交度最低值,完全正交为 1。从云图中可得,最小正交度值基本在 0.6

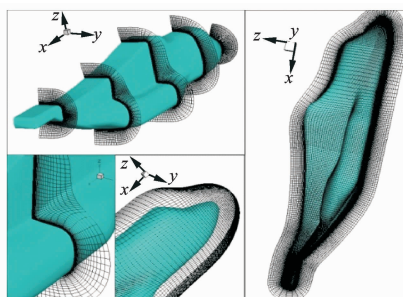


图 4 法向外推法生成的倾转旋翼机机身网格

Fig. 4 Tilt rotor fuselage grids generated by marching method in normal direction

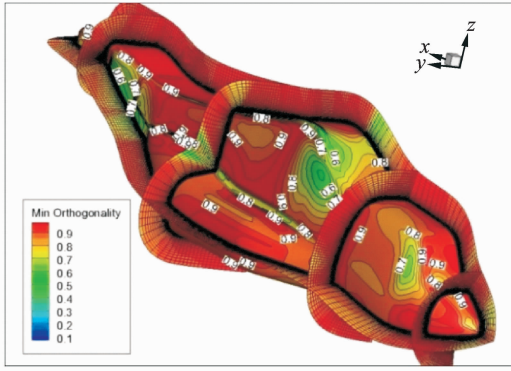


图5 倾转旋翼机机身网格最小正交度检测云图

Fig. 5 Contour of minimum orthogonality examination for fuselage of tilt rotor aircraft

至1之间,代表使用此方法生成的三维结构网格的正交性较好。

2 嵌套网格方法及算例验证

2.1 嵌套网格方法

由于旋翼处于不断的运动中,因此使用运动嵌套网格方法对旋翼飞行器进行模拟是一种行之有效的方法。

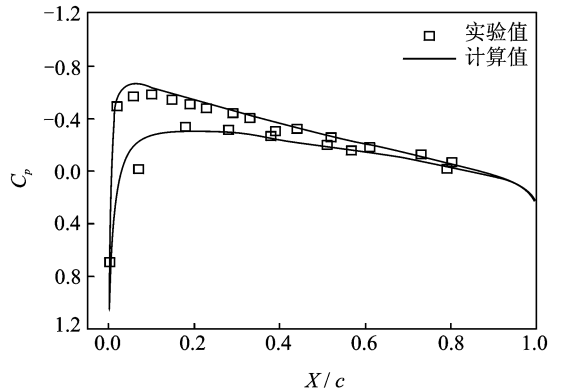
嵌套网格的关键技术为洞单元的确定和贡献单元搜索。本文通过高效可靠自动化的“Top map”法^[15]确定洞单元,使用了“Inverse map”法完成贡献单元搜寻工作,通过“三线性插值”法完成了背景网格与贴体网格间的信息传递。

合理控制旋翼桨叶网格和机身网格外边界大小,能够有效避免网格交叉到物面内部,大幅降低挖洞的复杂程度。抛物型法向外推方法生成的三维结构化网格具有良好的贴体性,且外边界大小容易控制,因此在应用嵌套网格方法上具有一定的优势。对孤立旋翼悬停算例,本文使用圆柱形结构网格为背景网格;对旋翼飞行器整机进行数值模拟时,为方便在未来提高计算精度时使用自适应技术,背景网格选为笛卡尔网格。

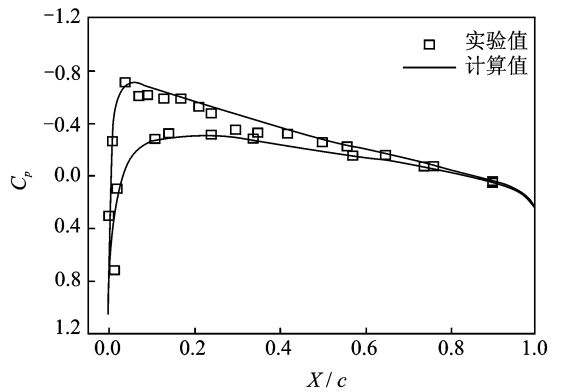
2.2 旋翼流场的验证算例

使用本文介绍的网格方法生成 Caradonna-Tung 旋翼桨叶网格,背景网格为圆柱形结构网格。计算状态为 Caradonna-Tung 旋翼悬停时,桨尖马赫数为 $Ma = 0.607$,总距为 $\theta = 5^\circ$,雷诺数为 $Re = 2.68 \times 10^6$ 。图6为 Caradonna-Tung 旋翼桨叶展向截面翼型压强系数计算值与试验值对比情况。其中, X 为翼型截面距其前缘点的弦向距离, c

为该翼型截面弦长。从图中可以明显看出:计算值与试验值吻合较好,说明以本文方法生成的旋翼网格能够满足 RANS 方程计算的需要。



(a) $r/R = 0.68$



(b) $r/R = 0.80$

图6 Caradonna-Tung 旋翼展向剖面翼型压强系数曲线

Fig. 6 Pressure coefficient distributions on spanwise sections of Caradonna-Tung blade

2.3 倾转旋翼机流场的验证算例

图7所示为本文生成的倾转旋翼机全机贴体嵌套结构网格系统。传统的多块对接网格方法,将倾转旋翼机流场空间划分为多个简单的拓扑块单独生成三维结构化网格,但是既不允许网格未填充某处流场空间,也不允许网格之间出现重叠。拓扑块的划分因网格生成对象而异,也因人而异,费时费力,可重复性差。因此,拓扑块划分成为多块对接网格方法中限制围绕复杂外形几何体网格自动化生成的主要因素。本文将倾转旋翼机机体分解为机身、机翼、短舱、平尾和垂尾,分别使用抛物型法向外推方法生成三维结构化网格,再结合实际情况和计算要求对网格进行组合,避开了拓扑块的划分,网格之间允许重叠。其中,为使得网格满足 CFD 模拟过渡状态倾转旋翼机流场的需求,在短

舱与机翼之间预留空间,借助运动嵌套网格方法,实现短舱绕机翼四分之一弦线倾转。在该倾转旋翼机全机贴体嵌套结构网格系统中,各部件网格之间存在相互切割嵌套,除机身等静部件与背景网格嵌套外,还需要通过一种多层组合嵌套方法完成机身各部件的装配。改变倾转旋翼机构型,仅仅需要重新生成相应部件的三维结构化网格及改变其相对位置,并重新进行嵌套组合,可重复性强,适用于倾转旋翼机气动外形的优化设计。使用动量源模型添加旋翼对流场的作用,能够在大幅减少计算量的同时保证较合理的精度,对倾转旋翼机全机气动性能进行模拟分析。

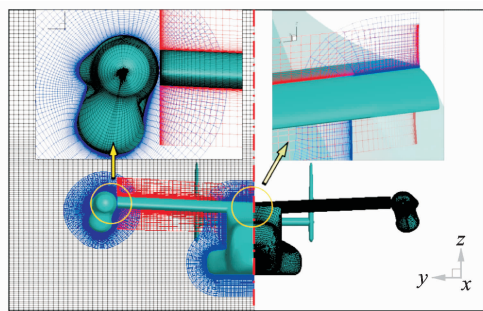


图 7 倾转旋翼机全机网格组合图

Fig. 7 Combination chart of tilt-rotor aircraft grids

图 8 为倾转旋翼机 4° 迎角前飞状态的涡量等值-压强分布云图,图中压强为量纲为一的量,其值为当地静压除以一特征量 $(\rho_\infty \cdot V_{tip}^2)$, ρ_∞ 为无穷远处空气密度, V_{tip} 为桨尖相对速度。图 9 为该状态过机翼的一簇流线图。图中速度也为量纲为一的量,其标准为旋翼桨尖速度。从结果可以看出,固定翼模式下倾转旋翼机机翼上方存在明显的低压区,机鼻和短舱迎风面均有明显的高压区出现,同时机翼前缘和垂尾前缘也存在高压区,经过机翼、平尾的流线有明显的绕流及速度变化,与实际飞行状态相符。通过该贴体网格模拟的倾转旋翼机表面

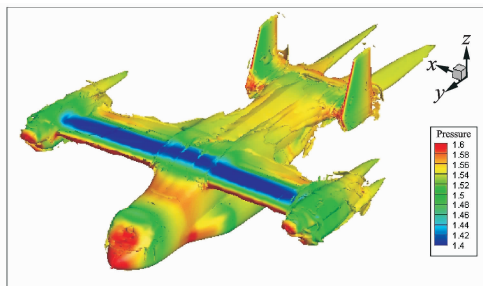


图 8 前飞状态倾转旋翼机的涡量等值-压强分布云图

Fig. 8 Contour of vorticity and pressure distributions of tilt-rotor aircraft in forward flight

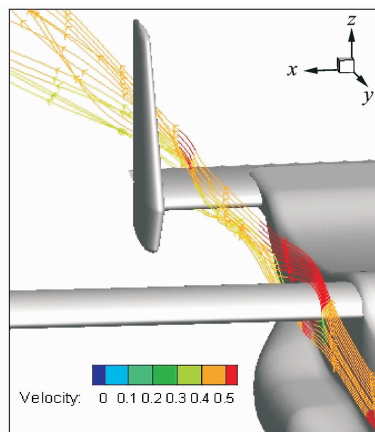


图 9 倾转旋翼机流线图

Fig. 9 Streamlines of tilt-rotor aircraft

的涡量流动,能够细致地显现出流经机翼与机身之间的结合面的气流会对平尾的气动性能有明显的影响。流经短舱的气流会对机翼尖部的气动性能有明显的影响,这些现象表明通过合理优化不同部件之间的构型以及相对位置会对倾转旋翼机的飞行性能有明显的改善。上述这些模拟结果表明,本文生成的网格能够有效适用于倾转旋翼机全机流场的 CFD 分析。

3 结 论

本文使用了三维 Poisson 方程迭代求解的方法和基于 Poisson 方程的抛物型法向外推法,分别生成了旋翼和复杂外形机体的三维结构化网格,结合运动嵌套网格理论,构建了一种适用于旋翼飞行器流场分析的网格系统。获得结论如下:

(1)使用 Poisson 方程对旋翼桨叶三维网格迭代求解,生成速度快、效率高、质量良好,能够重新分布附面层第一层网格间距,以满足不同流场求解器需求。

(2)基于 Poisson 方程的抛物型法向外推法从几何体表面网格出发,推进过程中进行光滑,能够有效避免凹角网格线交叉和凸角网格线发散问题,生成的三维结构化网格保持外边界与物面形状的相似性,贴体性良好,适用于机体等复杂外形的网格生成。

(3)建立了围绕旋翼飞行器的结构化运动嵌套网格系统,算例计算表明本文建立的网格方法能有效地用于旋翼飞行器粘性流场的模拟。

参考文献:

[1] Blazek J. Computational fluid dynamics: Principles

- and applications[M]. UK: Elsevier, 2005.
- [2] Thompson J F. A survey of grid generation techniques in computational fluid dynamics[R]. AIAA-83-0447, 1983;1-36.
- [3] Thompson J F, Thames F C, Mastin C W. Automatic numerical generation of body-fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two-dimensional bodies [J]. Journal of Computational Physics, 1974,15(3):299-319.
- [4] White J A. Elliptic grid generation with orthogonality and spacing control on an arbitrary number of boundaries[R]. AIAA-90-1568,1990:1-12.
- [5] Hilgenstock A. A fast method for the elliptic generation of three-dimensional grids with full boundary control[C]//Numerical Grid Generation in Computational Fluid Mechanics '88. Swansea, UK: Pineridge Press Ltd. , 1988:137-146,6.
- [6] 张正科,朱自强,庄逢甘,等. 三维椭圆型方程网格生成中的新源项修正法[J]. 北京航空航天大学学报, 1997,23(4):452-455.
Zhang Zhengke, Zhu Ziqiang, Zhuang Fenggan, et al. New source-term correction method in 3-D elliptic grid generation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1997, 23(4): 452-455.
- [7] 张正科,李凤蔚,罗时钧. 用椭圆型方程生成三维贴体与边界正交网格[J]. 西北工业大学学报,1995,13(1):143-147.
Zhang Zhengke, Li Fengwei, Luo Shijun. Body-conforming grids orthogonal to boundaries generated by elliptic system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1995,13(1):143-147.
- [8] Steger J L, Chaussee D S. Generation of body-fitted coordinates using hyperbolic partial differential equations[J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1980,1(4):431-437.
- [9] 张正科,朱自强,庄逢甘. 复杂外形网格生成技术及应用[J]. 北京航空航天大学学报,1998,24(6):642-645.
Zhang Zhenke, Zhu Ziqiang, Zhuang Fenggan. Grid generation technique of complex configurations and its applications[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998,24(6):642-645.
- [10] Nakamura S. Marching grid generation using parabolic partial differential equations[J]. Applied Mathematics and Computation, 1982,10:775-786.
- [11] 阎超. 计算流体力学方法及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006.
- [12] Sorenson R L. A computer program to generate two-dimensional grids about airfoils and other shapes by the use of Poisson's equation [R]. NASA-TM-81198,1980:1-58.
- [13] Thompson D S, Soni B K. Semistructured grid generation in three dimensions using a parabolic marching scheme[R]. AIAA 2000-1004, 2000:1-11.
- [14] 李广宁,李凤蔚,周志宏,等. 基于椭圆光滑的推进格式结构化网格生成技术[J]. 西北工业大学学报, 2008,26(5):545-549.
Li Guangning, Li Fengwei, Zhou Zhihong, et al. Improving structured grid generated for configuration with acute convex and/or concave corners[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2008, 26(5):545-549.
- [15] 王博. 基于 CFD 方法的先进旋翼气动特性数值模拟及优化研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
Wang Bo. Numerical simulations and optimizations on aerodynamic characteristics of advanced rotor by CFD method [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

