

基于 Kirchhoff 方法的跨音速螺旋桨的气动声学计算*

北京航空航天大学 马亮**

德国宇航院 D. Lohmann M. Kuntz

【摘要】 本文采用 Kirchhoff 方法计算双桨叶 Hartzell 跨音速螺旋桨的远场气动噪声。Kirchhoff 面为包围整个螺旋桨的固定圆柱面, 首先采用 FLOW er 软件包直接求解 Euler 方程得到圆柱内和圆柱面上的近场气动流场解, 然后根据 Kirchhoff 方法求解远场声场。通过计算详细研究了圆柱的直径和高度对远场声场的影响, 以及圆柱各部分对远场声压的贡献, 文中同时给出了 Farassat 线性方法的计算结果。与实验值的比较表明, 通过选取适当的圆柱直径, Kirchhoff 方法比线性方法能够给出更准确的远场声压。

主题词: 气动噪声 螺旋桨 计算

分类号: V 211.44 O 422.8

1 引言

随着计算机技术的飞速发展出现了一门新兴的分支—计算气动声学(CAA)^[1]。事实上, 完全的时间相关的 Navier-Stokes 方程描述了气动声源及其传播, 因此计算流体力学(CFD) 与 CAA 有紧密的联系, 但还不能把 CFD 方法直接应用到 CAA 上, 因为 CAA 对计算格式的色散性和耗散性有很严格的要求^[2]。目前 CAA 中应用较多的方法是把计算域分为两部分, 一部分描述声源的非线性产生, 另一部分描述其线性传播, 而计算声音传播的方法主要有: 线性分析方法、近场非线性 CFD 方法+ 远场线性 Euler 方程解以及 Kirchhoff 方法。其中 Kirchhoff 方法可以利用现已较为成熟的 CFD 的计算结果作为声源, 而且形式简单, 因而倍受人们的关注^[3]。Kirchhoff 公式发表于 1882 年, 最早是用来解决光衍射和电磁场问题的, 而且是针对静止不动的控制面。1969 年 Ffowcs Williams 和 Hawkings 导出了著名的任意运动的控制面为声源的 Kirchhoff 公式—FW-H 方程^[4]。但公式中的偏导数和时间是针对观察坐标的, 不易数值计算。1988 年 Farassat 和 Meyers 推导了任意运动的、柔性的、分段光滑的 Kirchhoff 公式, 导数是针对声源的, 易于应用^[5]。之后, 许多学者利用这个公式计算了一些实际的噪声问题, 如旋翼、喷管产生的噪声等等^[6]。

本文应用 Kirchhoff 方法计算一种双桨叶跨音速螺旋桨的远场噪声。Kirchhoff 面为包围整个螺旋桨的固定圆柱面, 采用 FLOW er 软件包直接求解 Euler 方程得到圆柱内和圆柱面上

的近场气动流场解,然后根据 Kirchhoff 积分方法求解远场声场。讨论了 Kirchhoff 面的大小对远场声场计算的影响,并和线性方法及实验结果作了比较。

2 计算方法

2.1 气动计算方法

本文采用 FLOW er 软件直接求解欧拉方程得到 Hartzell 螺旋桨近场的气动流场解,该螺旋桨的详细外型数据请参阅文献[9]。FLOW er 软件以 Jameson 的有限体积法为基础,采用多重网格、残差平滑和当地时间步长等加速收敛技术。坐标系固定在桨叶上并随桨叶一起转动,因而整个流场可作为定常流动。计算只对单片桨叶进行,通过周期边界条件得到全流场解。计算域沿展向的外边界位于两倍桨叶外径处。计算采用的网格为单块网格,沿桨叶的弦长方向有 121 个网格点,桨叶的垂直方向有 33 个网格,展向为 41 个网格点,而在桨叶截面上分布有 81×21 个网格点。有关气动计算的详细内容,包括方法、计算结果及分析,请参阅文献[9]。

2.2 声学计算方法

线性分析方法:FW-H 方程是从 Navier-Stokes 方程出发得到的波传播方程,该方程右边包含有单极子、偶极子和四极子项,线性分析方法忽略四极子项,只计算单极子和偶极子项。根据 Farassat 的推导^[7],单极子和偶极子项可分别表示为:

$$\text{单极子项: } 4\pi p_M(\vec{X}, t) = \int \left[\frac{E_{M,1}}{r(1-Ma_r)} + \frac{E_{M,2}}{r^2(1-Ma_r)} \right]_{\tau^*} dS \quad (1)$$

$$\text{偶极子项: } 4\pi p_D(\vec{X}, t) = \int \left[\frac{E_{D,1}}{r(1-Ma_r)} + \frac{E_{D,2}}{r^2(1-Ma_r)} \right]_{\tau^*} dS \quad (2)$$

其中 $E_{M,1}$, $E_{M,2}$, $E_{D,1}$ 和 $E_{D,2}$ 的表达式参见文献[7]。这里, r 是观察点到声源的距离, Ma_r 和 Ma_n 为沿声传播方向和积分面法向方向的马赫数,对线性方法来说,积分面 S 为桨叶面。声发出时间和延迟时间的关系为: $\tau = t - (r/a_\infty)$, a_∞ 为自由来流音速。

Kirchhoff 方法利用格林函数理论将远场声压表示为气动值及其导数在 Kirchhoff 面上的积分。根据文献[5],远场观察点 $\vec{X}$ 在时间 t 观察到的声压可用一般公式表示为:

$$4\pi p(\vec{X}, t) = \int \left[\frac{E_1}{r(1-Ma_r)} + \frac{E_2 p}{r^2(1-Ma_r)} \right]_{\tau^*} dS \quad (3)$$

这里 E_1 和 E_2 的表达式为:

$$\begin{aligned} E_1 &= Ma_n \vec{M} \cdot \vec{\nabla} p - \vec{n} \cdot \vec{\nabla} p - \frac{Ma_n}{a_\infty} p \\ &+ \frac{(n_r - \frac{Ma_n}{a_\infty} - \frac{n_M}{a_\infty}) + (n_r - Ma_n)p}{a_\infty(1-Ma_r)} + \frac{Ma_r(n_r - Ma_n)p}{a_\infty(1-Ma_r)^2} \\ E_2 &= \frac{(1-Ma^2)(n_r - Ma_n)}{(1-Ma_r)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

本文中, Kirchhoff 面为包围桨叶的非转动圆柱面,移动马赫数 Ma 为零,因而 Kirchhoff 公式相对简单,延迟时间通过此式确定: $\tau^* = t - (1/a_\infty) |\vec{X} - \vec{Y}(\tau^*)|$, 其中 $\vec{Y}$ 为声源位置。

3 计算结果与分析

本文采用的 Kirchhoff 面为围绕桨叶的圆柱面,该柱面不随桨叶转动,如图 1 所示。圆柱环面分为 301×61 个网格,其中 301 为沿周向的分割。圆柱顶部和底部面分为 301×31 个网

格,其中沿径向方向分为 31 份。整个圆柱位于气动计算域内。计算包括两个步骤:(1)求解欧

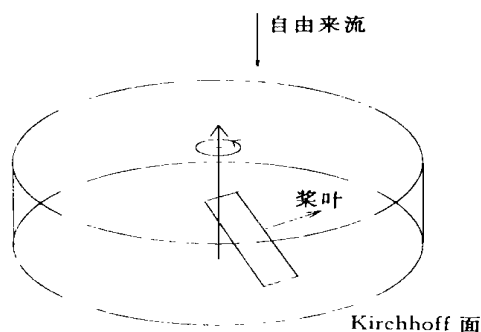


图 1 Kirchhoff 面示意图

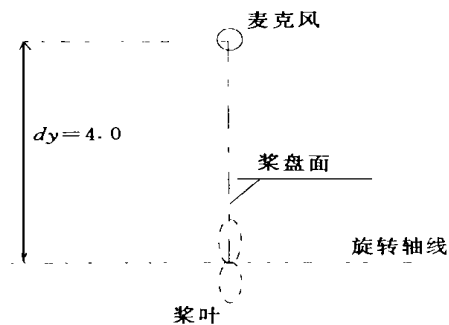


图 2 观察点和螺旋桨的相对位置

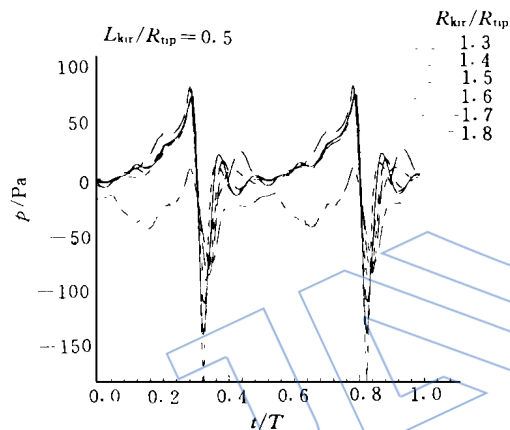


图 3 取不同圆柱直径时远场声压比较

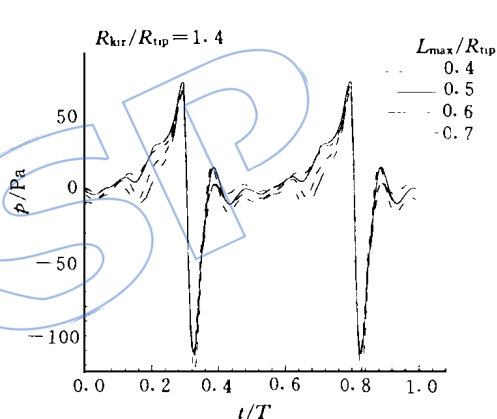


图 4 取不同圆柱高度时远场声压比较

拉方程得到近场的气动流场解^[8]。(2)插值获得 Kirchhoff 面上的气动值及其导数,如马赫数和压力等,然后通过数值积分计算远场观察点的声压。为与实验比较,观察点的位置与实验中麦克风位置相同^[9],如图 2 所示。

计算所取的翼尖马赫数为 0.8758,推进比为 0.2687,攻角 0.186°。图 3 给出取不同的圆柱直径时,麦克风 4 计算的声压比较。图中 R_{kir} 和 R_{tip} 分别表示圆柱面的直径及桨叶的高度。从图看出,随着圆柱直径的变化,时间周期内的声压峰值略有变化,但当 $R_{kir}/R_{tip} = 1.7$ 和 1.8 时的声压曲线明显不同于其它值时的声压,这是因为此时 Kirchhoff 面已很接近于气动流场计算的外边界 $R_{kir}/R_{tip} = 2.0$,而在外边界附近网格很粗,不能满足声学计算的精度要求。因

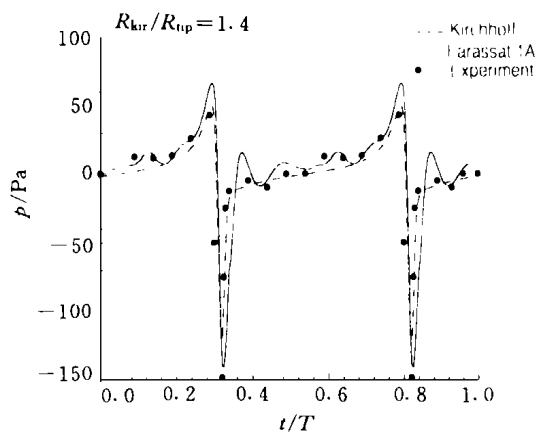


图 5 Kirchhoff 方法、线性方法与实验的比较

此, Kirchhoff 面的选取不能靠近气动计算的外边界。图 4 给出当改变圆柱的高度时, 远场声压曲线的比较。可以看出其变化是很少的, 说明圆柱直径是影响远场声压的主要因素。

图 5 给出了 Kirchhoff 方法和线性方法的计算结果比较, 图中给出了相应的实验值^[9]。显然 Kirchhoff 方法更接近于实验结果, 而线性方法计算的峰值明显比实验值和 Kirchhoff 方法的结果小, 这正是因为它无法将桨叶附近的非线性因素考虑进去的缘故。

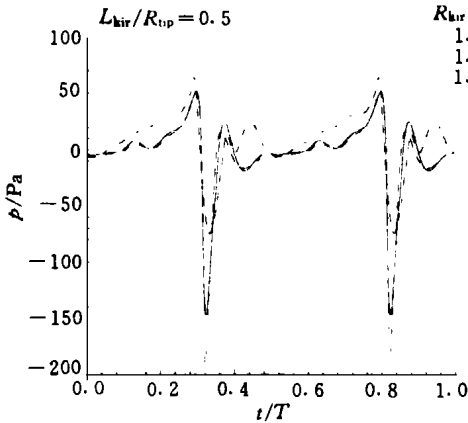


图 6 取不同圆柱直径对远场声压比较

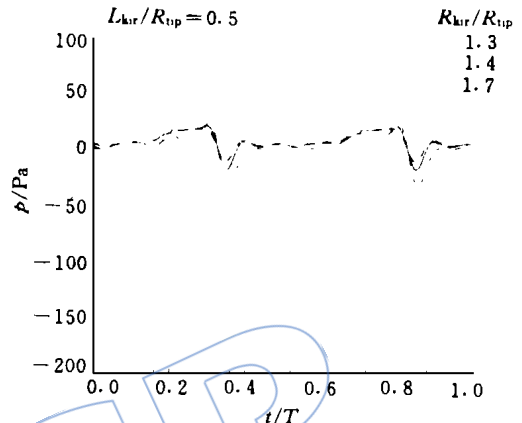


图 7 取不同圆柱高度对远场声压比较

图 6 和图 7 是单独取圆柱侧环面或顶面+底面为 Kirchhoff 积分面时的计算结果, 可以看出, 远场声音信号主要来自于圆柱周面, 这和图 4 的结果是一致的。

4 结 论

(1) Kirchhoff 方法由于考虑了桨叶附近的非线性影响, 因而可以给出比传统的线性方法更接近于实际的结果; (2) 采用 Kirchhoff 方法时, Kirchhoff 面的选取必须在包含非线性影响的同时, 要求有足够的计算精度, 因而不能靠近气动计算域的外边界; (3) 当选用圆柱面为螺旋桨的 Kirchhoff 面时, 远场声音信号主要来自于圆柱周面, 而顶面+底面的贡献很小, 可以忽略。

参 考 文 献

- Hardin J C, Hussaini M Y. Computational Aeroacoustics Springer-Verlag, New York, 1993
- Wells V L, Renaut R A. Computing Aerodynamically Generated Noise Annu. Rev. Fluid Mech., 1997, 29: 161- 199
- Lyrantzis A S. The Use of Kirchhoff Method in Computational Aeroacoustics A S M E Journal of Fluids Engineering, 1994
- Ffowcs J E, Hawkings D L. Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. Philosophical Transactions of Royal Society, A 264, pp. 321- 342, 1969
- Farassat F, Myers M K. Extension of Kirchhoffs Formula to Radiation From Moving Surfaces. Journal of Sound and Vibration, 1988, 123(3): 451- 460
- Kuntz M. Rotor Noise Predictions in Hover and Forward Flight Using Different Aeroacoustic Methods A I A A Paper 96-1695, 1996
- Farassat F. Linear Acoustic Formulae for Calculation of Rotating Blade Noise A I A A Journal, 1981, 19(9): 1122- 1130
- Ma L iang, Lohmann D, Kuntz M. Numerical Simulation of High-Speed Propeller Flow field Based on Euler Equations Chinese Journal of Aeronautics (Accepted), 1999, 12(2):
- Dobrzynski W M, Heller H H, Powers J O, et al DFVLR/FAA Propeller Noise Tests in The German-Dutch Wind Tunnel DNW. FAA Report No. AEE 86- 3, 1986

NUMERICAL SIMULATION OF PLUG NOZZLE FLOW FIELDS AT DIFFERENT AMBIENT PRESSURES

Zhuge Weilin, Zhang Yangjun, Zhang Baoning

(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University 100084)

Chen Ronghui

(Gas Turbine Academy of China)

ABSTRACT A type of circular multi-thruster plug nozzle has been designed, and its flow fields at different ambient pressures were simulated numerically by solving axisymmetric Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with a finite-volume formulation. The simulations based on single equation and two equations turbulent models were compared. The results of the both models at proper mixing length were consistent in general. This type of plug nozzle embodies the main advantages of plug nozzles.

Key Words Jet nozzle Flow field Numerical simulation

AEROACOUSTIC CALCULATION OF A TRANSONIC PROPELLER BY USING KIRCHHOFF METHOD

Ma Ling

(5th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

D. Lohmann and M. Kuntz (Institute of Design Aerodynamics, DLR Germany)

ABSTRACT The aeroacoustic field generated by a transonic two-blade Hartzell propeller was calculated by using Kirchhoff method. The Kirchhoff surface was defined as a nonrotating cylinder surrounding the whole propeller blade. The aerodynamic flow field was firstly computed by using the Flower code running in the Euler mode, then the farfield acoustic pressure was calculated with the Kirchhoff method. A detailed numerical study revealed the influence of the radius and height of the cylinder on the acoustic pressure in the farfield. The results obtained by the Farassat's linear method were also presented and compared with the presented results. The comparison of the results obtained by both the methods with experimental data demonstrated that the Kirchhoff method considering most of the nonlinear effects gave a better results than the linear method.

Key Words Kirchhoff method Aerodynamic noise Propeller Calculation

A CONSIDERATION OF TWO EQUATION TURBULENCE MODEL

Liang Dewang and Lu Bing

(2nd Dept Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT A concept of "two-layer" turbulence model is proposed which employs an algebraic turbulence model in near wall area and a two-equation turbulence model in outer area or far wall area. The flows over a flat plate with $M = 0.3$ uniform inflow and in a 90° rectangular bent duct with non-uniform velocity and high turbulence inflow are calculated respectively by use of the "two layer" turbulence model and two equation turbulence model with low Reynolds number modification. The obtained results show that the "two layer" turbulence model can predict the distribution of velocity and wall stress for external flow.