

螺旋桨—减速器—发动机 耦合系统振动固有特性的计算

南京航空学院 顾仲权* * 王远达

【摘要】 本文研究考虑桨叶挥午和摆振弯曲、桨角变化以及扭转与纵向振动耦合的螺旋桨—减速器—发动机系统固有特性计算问题。通过算例验证，证明本文提出方法的合理性与可行性。

涡轮螺旋桨飞机主要部件之一，螺旋桨、减速器、发动机组成的耦合系统振动，是设计中必须考虑的一个动力学问题。防止在正常运行过程中因外激励而引起响应过大，提高整个系统的疲劳寿命。防共振是最基本的设计要求。为此，必须知道整个系统的固有频率与固有振型。过去的计算模型大都采用多自由度系统，文献[1]在计算模型上作了改进，考虑了桨叶旋转平面内的弯曲弹性影响。但实际上还存在桨距变化，以及整个系统扭转与纵向振动耦合的影响。本文对此进行了综合分析。

一、计算方法

计算图1所示系统的固有特性的方法主要有两种（广义坐标法与阻法）。本文采用广义坐标法与阻抗法。

将整个系统离散化为由“重块”与无质量的“梁段”或“轴段”组成的多自由度系统。不计桨叶本身及外加阻尼器的阻尼。各桨叶弹性弯曲的变形情况相同。不计桨叶剪切与回转惯量的影响。

图2为“当量化”后耦合系统计算模型。图中 $I_{E1} \dots I_{EN}$, $I_{T1} \dots I_{TM}$ 与 $K_{E1} \dots K_{E,N-1}$, $K_{T1} \dots K_{T,M-1}$ 分别为发动机与减速器的转动惯量及其连接轴段的扭转刚度。 m_H 与 I_H 分别为桨毂的质量与转动惯量， K_H 为桨毂止推轴承刚度。 N_B 与 l 分别为桨叶片数与桨叶长度。桨叶可在旋转平面 $x\alpha$ 与挥午平面 $y\alpha z$ 内弯曲。弯曲位移分别为 x 和 y 。 α 为桨距角， β_T 为桨叶的扭转角。除上述 $oxyz$ 坐标系外，还要建立不同展向位置的局部坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ ， o_1x_1 是截面最小主惯轴， o_1y_1 是截面最大主惯轴，其对应的抗弯刚度分别为 EJ_{x_1} 和 EJ_{y_1} 。

系统的动能 T 与位能 U 分别为

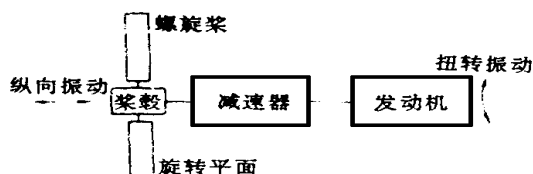


图1 耦合系统

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} I_{Ei} \dot{\theta}_{Ei}^2 + \sum_{i=1}^M \frac{1}{2} I_{Ti} \dot{\theta}_{Ti}^2 + \frac{1}{2} I_H \dot{\theta}_H^2 + \frac{1}{2} m_H \dot{y}_H^2 + \frac{N_B}{2} \int_0^l [(\dot{x} + \dot{\theta}_H z \cos \theta + \dot{y}_H \sin \theta)^2 + (\dot{y} + \dot{y}_H \cos \theta - \dot{\theta}_H z \sin \theta)^2] dm \quad (1)$$

$$U = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{2} K_{Ei} (\theta_{E, i+1} - \theta_{Ei})^2 + \sum_{i=1}^{M-1} \frac{1}{2} K_{Ti} (\theta_{T, i+1} - \theta_{Ti})^2 + \frac{1}{2} K_{Hy} y_H^2 + \frac{N_B}{2} \int_0^l [EJ_{x_1} (y_1'')^2 + EJ_{y_1} (x_1'')^2] dz + \frac{N_B}{2} \int_0^l \Omega^2 x_1^2 dm + \frac{N_B}{2} \int_0^l F [(x_1')^2 + (y_1')^2] dz \quad (2)$$

式中: θ 为距桨毂中心 z 处桨叶截面最小主惯轴 o_1x_1 与旋转平面的夹角, Ω 为螺旋桨转速, F 为距桨毂中心 z 处桨叶截面上的离心力, 上标 “'” 与 “''” 分别为对 z 的一阶与二阶偏导数。

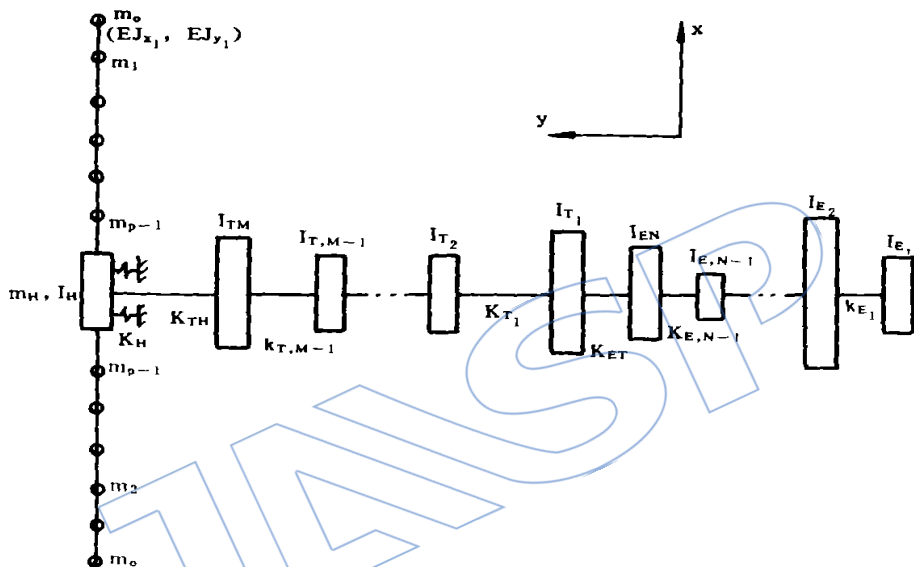


图 2 计算模型

对桨叶进行离散化, 且令

$$\begin{cases} x_1 = \sum_{i=1}^L \Phi_{xi}(z) q_i(t) \\ y_1 = \sum_{i=1}^L \Phi_{yi}(z) q_i(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中 L 为截取的振型数, $\Phi_{xi}(z)$ 和 $\Phi_{yi}(z)$ 分别为第 i 阶桨叶固有频率对应的振型 (对应 $o_1x_1y_1z_1$ 坐标系) 的 x_1 与 y_1 向分量。

式 (1) 中最后两项和 (2) 中最后三项—桨叶动能 T_B 和位能 U_B 分别为

$$T_B = \frac{N_B}{2} \sum_{K=0}^P m_K [G_1^2 + G_2^2 + \dot{y}_H^2 + z_K^2 \dot{\theta}_H^2 + 2G_1 \dot{y}_H \sin \theta_K + 2G_2 \dot{y}_H \cos \theta_K + 2G_1 \dot{\theta}_{HZK} \cos \theta_K - 2G_2 \dot{\theta}_{HZK} \sin \theta_K] \quad (4)$$

$$U_B = \frac{N_B}{2} \sum_{K=1}^P \left[EJ_{x_1K} \int_0^{\bar{z}_K} \left(\sum_{i=1}^L \Phi_{xi}' q_i \right)^2 dz + EJ_{y_1K} \int_0^{\bar{z}_K} \left(\sum_{i=1}^L \Phi_{yi}' q_i \right)^2 dz \right] + \frac{N_B}{2} \sum_{K=0}^{P-1} m_K \Omega^2 \left(\sum_{i=1}^L \Phi_{xi}^K q_i \right)^2 + \frac{N_B}{2} \sum_{K=0}^{P-1} \left(\sum_{KK=0}^K m_{KK} \Omega^2 z_{KK} \right) \cdot \bar{z}_K \cdot \left[\left(\sum_{i=1}^L \Phi_{xi}^K q_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^L \Phi_{yi}^K q_i \right)^2 \right] \quad (5)$$

桨桨叶固有特性计算。这里, 我们对传递矩阵法作了推广, 能适用于上述情况。采用两个坐标系: 整体坐标系 $oxyz$ 与局部坐标系 $o_1x_1y_1z_1$, 后者固结在不同的桨叶段上, 两坐标系的关系见图 3。

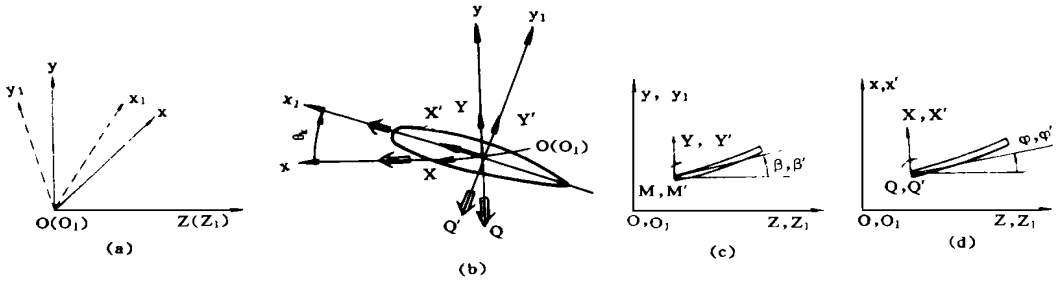


图 3 两坐标系的关系图

沿用传统传递矩阵法关于状态向量的组成与排列顺序^[2], 记 $oxyz$ 坐标系内的状态向量 $q_K = [y \ \beta \ M \ Y \ x \ \phi \ Q \ X]^T$, $o_1x_1y_1z_1$ 坐标系内的状态向量 $q_K = [y \ \beta \ M \ Y \ x \ \theta \ X]^T$, $q'_K = [y' \ \beta' \ M' \ Y' \ x' \ \phi' \ Q' \ X']^T$, 由图 3 可知两者关系是

$$q'_K = A_K q_K \quad (8)$$

在 $oxyz$ 坐标系中点矩阵 P_K 是联系第 K 站重块左、右侧状态向量 q_K^L 、 q_K^R 之间关系的矩阵, 可表示为

$$q_K^L = P_K q_K^R \quad (9)$$

在 $o_1x_1y_1z_1$ 坐标系中场矩阵 F'_K 是联系第 K 梁段左、右端状态向量 q_K^R 、 q_{K-1}^L 之间关系的矩阵, 可表示为

$$q_K^R = F'_K q_{K-1}^L \quad (10)$$

(8) 式中 A_K (称为第 K 梁段的转换矩阵), (9) 式中 P_K , (10) 中的 F'_K 可分别写成

$$A_K = \begin{bmatrix} I_c & -I_s \\ I_s & I_c \end{bmatrix}_K, \quad P_K = \begin{bmatrix} I_a & 0 \\ 0 & I_b \end{bmatrix}_K, \quad F'_K = \begin{bmatrix} F'_y & 0 \\ 0 & F'_x \end{bmatrix}_K$$

式中 $I_c = \cos \theta \cdot I \in R^{4 \times 4}$, $I_s = \sin \theta \cdot I \in R^{4 \times 4}$, I 为单位矩阵。 I_a 为 4×4 单位矩阵中左下角元素 $-m\omega^2$, I_b 为 4×4 单位矩阵中加一左下角元素 $-m(\omega^2 + \Omega^2)$ 。 F'_x 和 F'_y 具有相同形式的表达式 (同文献 [2]), 仅截面抗弯刚度项不同 (前者为 EJ_{y1} , 后者为 EJ_{x1})。

对离散化桨叶, 其第 P 站重块左侧状态向量 q_P^L 与第 0 站重块右侧状态向量 q_0^R 的关系是

$$q_P^L = P_P A_P^{-1} F'_P A_P P_{P-1} A_{P-1}^{-1} F'_{P-1} A_{P-1} P_{P-2} A_{P-2}^{-1} F'_{P-2} A_{P-2} P_0 q_0^R = D(\omega, \Omega) q_0^R$$

根据边界条件:

$$q_P^L = [0 \ 0 \ M_P^L \ Y_P^L \ 0 \ 0 \ Q_P^L \ X_P^L]^T, \quad q_0^R = [y_0 \ \beta_0 \ 0 \ 0 \ x_0 \ \phi_0 \ 0 \ 0]^T$$

可得频率方程

$$\Delta(\omega, \Omega) = 0 \quad (11)$$

$\Delta(\omega, \Omega)$ 为 4 阶行列式, 满足式 (1) 的 ω_i 即螺旋桨桨叶在旋转情况下的固有频率。

对应每个固有频率 ω_i , 令 $y_0 = 1$, 可求得 β_0 、 x_0 、 ϕ_0 。根据各站间的传递关系一式 (12), 可求出离散化桨叶的状态向量 q_K , 其中分量 y_K 、 β_K 、 x_K 、 ϕ_K 即构成固有振型。

$$q_{K+1}^R = A_{K+1}^{-1} F'_{K+1} A_{K+1} P_K q_K^R \quad (12)$$

以上求得的固有振型是对应 $oxyz$ 坐标系的, 如果要知道其在 $o_1x_1y_1z_1$ 坐标系中的对应量, 代入式 (8) 即可求得。

三、算 例

某螺旋桨—减速器—发动机系统如图 4 (a) 所示, 图 4 (b) 为按螺旋桨转速为基准的

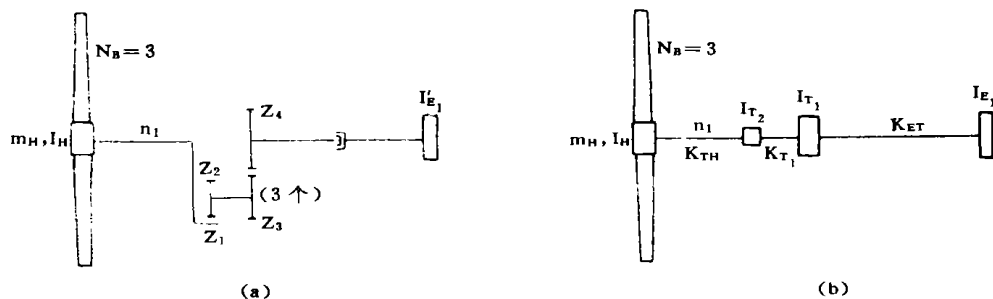


图 4 算例系统图与计算模型

当量化计算模型。计算时, 桨叶取前五阶模态, 离散化为 15 段。

图 5 为桨距角为零时的耦合系统固有频率随转速的变化曲线, 图中还画出不计及桨叶弹性弯曲时系统的固有频率 (它们不随转速而变化)。在式 (7) 的特征向量确定后, 代入式 (3) 可得固有振型中桨叶部分对应的各分量。由图 5 可见, 整个耦合系统有一个刚体转动模态 (对应零频); 有些频率不随转速变化 (或仅有很小变化), 表明桨叶弹性弯曲对它们没有影响 (或影响很小); 有不少频率异于桨叶绝对刚硬时的系统固有频率, 表明桨叶弹性弯曲对它们影响大。由于桨距增加, 桨叶在挥午平面的弯曲刚度增加, 在旋转平面的弯曲刚度减小, 因而与其相联系的固有频率也要作相应的变化。对应于图 4 系统, 结果表明桨距的影响是不大的。

本文提出的方法同样适用于直升机旋翼—减速器—发动机耦合系统振动固有特性的计算。

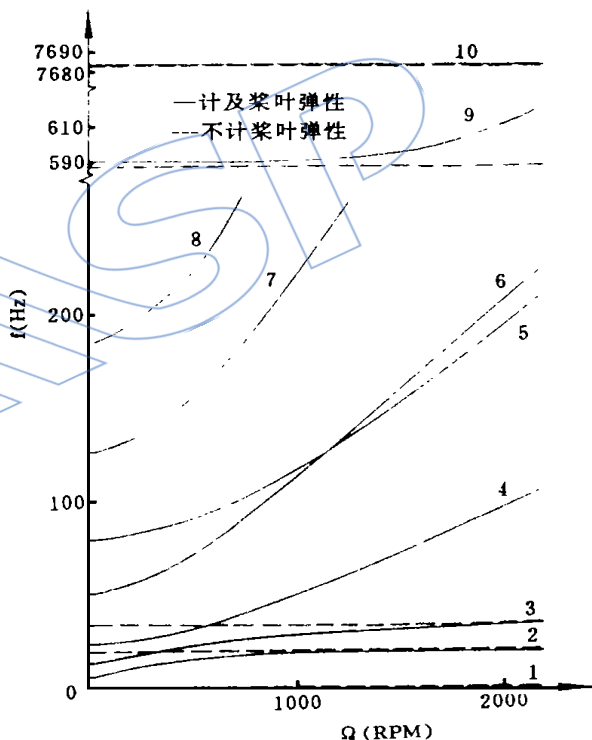


图 5 系统固有频率随转速的变化关系 ($\alpha = 0^\circ$)

参 考 文 献

- [1] Guo Zehong, Gu Zhongquan et al., "The Development and Tests of Yan 'An 2 Light Helicopter", 8th European Rotorcraft Forum, Pap. 7 6, 1982.
- [2] Thomson W. T., "Theory of Vibration with Applications", 2nd ed., George Allen & Unwin Ltd, 1981, P. 239.

of load point displacement data of sintered nitride silicon beam specimens crept at 900 °C and 1200 °C from three point bend tests. The results show that the conventional method overestimates or underestimates the creep rates in compression or tension, and the more accurate analysis presented here is needed.

CALCULATION OF MODAL CHARACTERISTICS FOR A PROPELLER- GEAR BOX- ENGINE COUPLE SYSTEM

Gu Zhongquan and Wang Yuanda (*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT In this paper the calculation problems of modal characteristics are studied for a propeller-gear box-engine system considering the flapwise and lagwise flexibilities, the pitch angle of the blade and the coupling of torsional vibration with longitudinal vibration. The expressions suitable for computer are deduced for calculation of the modal characteristics. An numerical example for a propeller-gear box-engine system demonstrates that the method is reasonable and feasible.

DESIGN AND EXPERIMENTAL STUDY OF A COMBINED PILOT FLAMEHOLDER

Cheng Qiufang (*Shenyang Aeroengine Research Institute*)

ABSTRACT The design and experimental study of a combined pilot flameholder is presented for a turbofan engine afterburner with an annular mixer. The combined pilot flameholder is composed of a main ingestion gutter ring with corrugated slots and radial finger gutters with ingestion holes. The two dimensional and double stream flow visualization tests of its reduced scale model demonstrate the flow pattern behind the flameholder, and also reveal the reason, why the annular pilot burner can ignite and support the bypass flow flame. Its sector rig tests and engine bed tests show that the afterburners with this kind of flameholder possess enhanced combustion efficiency, improved combustion stability and reduced pressure loss at both normal and low pressures.

EMPIRIC FORMULAE COMBUSTOR FLOW LOSSES

Gu Mingqi (*Shenyang Aeroengine Research Institute*)

ABSTRACT Approaches to calculation of the flow losses in components of the combustor, such as diffuser, swirler and flame tube, and the flow losses in combustor under combustion conditions are investigated. The empiric formulae are derived from tests. They feature simplicity and sufficient accuracy and are applicable to design and redesign of combustor. The tests were conducted on the models of 4 types of diffusers, 10 kinds of swirlers 7 types of flame tubes and, 7 simulators of inlet flow field distortion. In comparison with the existing methods, the presented method considerably improves the calculation of the flow losses in the diffuser. For the swirler the correlation between flow resistance and the discharge coefficient and the formula for heating losses are also found out.