

文章编号: 1000-8055(2009)02-0371-07

机动飞行时发动机转子系统动力学统一模型

祝长生, 陈拥军

(浙江大学 电气工程, 浙江 310027)

摘 要: 利用 Lagrange 方程建立了飞机在任意空间机动飞行时发动机安装在飞机上任意位置条件下不平衡多盘、多质量和多轴承线性及非线性柔性转子系统动力学的统一模型, 讨论了飞机的空间机动飞行对发动机转子系统动力特性的影响. 结果表明飞机的空间机动飞行不仅在发动机的转子系统上产生了非周期性的附加外激励力, 而且还会产生附加的阻尼和刚度效应, 这些效应不仅会影响转子系统运动轨道的大小而且会使转子系统运动轨道的中心发生偏移, 从而可能使发动机转子与定子之间发生局部的碰磨. 因此, 在分析航空发动机转子系统的动力特性时, 必须考虑飞机机动飞行因素对转子系统动力特性的影响.

关 键 词: 建模; 转子动力学; 机动飞行; 转子; 基础运动

中图分类号: V231.9

文献标识码: A

General dynamic model of aeroengine's rotor system during maneuvering flight

ZHU Chang-sheng, CHEN Yong-jun

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Zhejiang 310027, China)

Abstract: A general motion model of a linear or nonlinear flexible aeroengine's rotor with unbalance multi-rigid-disk, multi-lumped-mass and multi-bearing was presented by using Lagrange's equation during any maneuvering flight and for any position of aeroengine installed in airplane. The influences of different maneuvering flights on the dynamic characteristics of an aeroengine's rotor system were discussed. It is shown that an additional damping effect, an additional stiffness effect and an additional un-periodic external exciting force acted on the aeroengine's rotor system may be introduced due to the maneuvering flight, which will great affect the dynamic characteristics of an aeroengine's rotor system, especially increasing the vibration amplitude of the aeroengine's rotor system and significantly shifting the center of motion orbit of the aeroengine's rotor system to the uncentralized position may result in the particle impact between the rotor and the stator. The influence of the maneuvering flight on the dynamic characteristics of the aeroengine's rotor system must be considered in studying the dynamic characteristics of the aeroengine's rotor system.

Key words: modeling; rotor dynamics; maneuvering flight; rotor; base motion

飞机在机动飞行时, 会在发动机的转子系统上产生附加载荷. 在这个随飞行状态变化的外载荷的作用下, 发动机转子系统将出现大的振动, 导致转子系统出现各种故障. 这正是许多作特技飞

行的飞机出现断轴坠机事故的根本原因. 然而目前航空发动机转子系统动力特性的研究一般是在基础固定的条件下进行的, 其结果仅仅适应飞机匀速运动的状态, 因而有必要研究航空发动机的

收稿日期: 2008-01-17; 修订日期: 2008-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(10472101)

作者简介: 祝长生(1963-), 男, 陕西乾县人, 教授, 博士, 主要从事旋转变换动力学、磁悬浮技术研究.

转子系统在飞机机动飞行条件下的动力特性。

飞机的机动飞行对航空发动机转子系统动力特性的影响可以看作是一种发动机转子系统的基础大范围运动所产生的激励问题,在转子系统动力学的研究中目前对这种影响所开展的工作并不多。Geradin 和 Kill^[1]是最早从事机动飞行对发动机转子系统动力特性影响的学者,他们基于有限元法提出了一种能够考虑飞机的机动飞行对发动机转子系统动力特性影响的分析方法,但并没有给出具体的建模过程和分析结果。White 等^[2]在飞行试验中观察到了飞机的机动飞行会对转子的轴承产生附加载荷,影响转子的正常工作。徐敏等人^[3]通过分析飞机在作定常水平盘旋和俯冲拉起两种特殊机动飞行条件下在转子上所产生的附加离心力和陀螺力矩,建立了这两种特殊机动飞行条件下双盘悬臂线性转子系统的运动微分方程,并讨论了飞机定常水平盘旋和俯冲拉起过程中转子系统的动力特性。后来他们^[4]用同样的方法建立了支撑在非线性挤压油膜阻尼器上的 Jeffcott 转子系统的运动微分方程,研究了几种组合机动飞行条件下转子系统的动力特性。林富生和孟光^[5-6]基于 Jeffcott 转子模型,研究了飞机在垂直或水平平面内以恒定角速度或恒定加速度的机动飞行对转子系统动力特性的影响。任兴民等^[7]研究了带有裂纹的 Jeffcott 转子系统在俯冲拉起机动飞行条件下的动力特性。

航空发动机转子系统的动力特性决非 Jeffcott 转子模型所能描述。对于一个复杂的转子系统无论是利用特殊机动飞行条件给转子附加离心力和陀螺力矩^[3-4,7],还是在特殊机动飞行条件下利用 Lagrange 方程^[5-6]建立转子系统运动微分方程都会有许多困难,要更深入系统地研究飞机的空间机动飞行对航空发动机转子系统动力特性的影响,必须要建立一个具有普遍性的分析模型。作者在前文^[8]中利用 Lagrange 方程建立了飞机在作任意机动飞行发动机安装在飞机的重心位置条件下,不平衡线性柔性多盘、多轴承和多质量转子系统的动力学一般模型,并对几种典型的机动飞行对转子系统动力特性的影响进行了数值分析,但没有考虑发动机安装位置以及转子上非线性因素的影响。本文首先利用 Lagrange 方程,基于严格的理论建立了飞机在作任意空间机动飞行时发动机安装在飞机上任意位置条件下多盘、多质量和多轴承线性及非线性不平衡柔性转子系统动力学统一模型,然后简单地讨论了飞机的空间机动

飞行对发动机转子系统动力特性的影响。

1 空间机动飞行时发动机转子系统的运动方程

1.1 基本假设和坐标系

航空发动机在飞机上的安装位置有多种形式。对于装有单个发动机的飞机,发动机一般位于飞机的重心垂直平面上;对于装有多个发动机的飞机,发动机一般都对称地安装在机身或机翼上,图1为带有两个发动机的飞机常用坐标的名称和方向。为了得到发动机转子系统的一般模型,设发动机安装在飞机的任意位置上,只假设发动机的轴线与飞机的纵轴线平行。

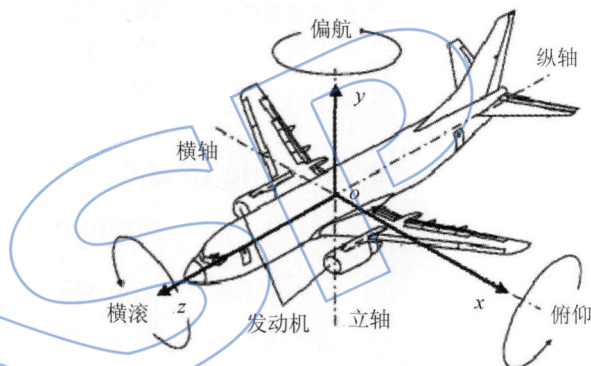


图1 发动机在飞机上的位置和坐标系

Fig. 1 Position of aeroengine in airplane and coordinate system

为了分析方便,采用了地面固定直角坐标系、机体相对直角坐标系和转子直角坐标系。位于地面上的固定直角坐标系 $OXYZ$ 用来描述飞机的空间飞行状态,主要为飞机的飞行速度和飞行加速度。机体相对坐标系 $oxyz$ 是以飞机对称面内的重心 o 为坐标原点并固连在飞机机体上的直角坐标系,用来描述飞机绕自身的转动特性。其中纵轴 oz 为机身对称轴并与飞行方向相同;立轴 oy 通过飞机的重心并与纵轴垂直,方向向上;横轴 ox 通过飞机重心与纵轴垂直,方向伸向机翼端部。固定在发动机上的转子静变形位置坐标系 $\delta x'y'z'$ 的各轴分别与机体相对坐标系 $oxyz$ 的对应轴平行。假设发动机的转轴 $\delta z'$ 与飞机上的纵轴 oz 间的距离为 h ,发动机的 $\delta y'$ 轴与飞机上的立轴 oy 间的距离为 a ,发动机的 $\delta x'$ 轴与飞机上的横轴 ox 间的距离为 b 。 $oxyz$, $\delta x'y'z'$ 与 $OXYZ$ 三个坐标系之间的相互关系如图2所示。

飞机作为一个刚体,其在空中的状态完全由在固定参考坐标系 $OXYZ$ 上的平动分量

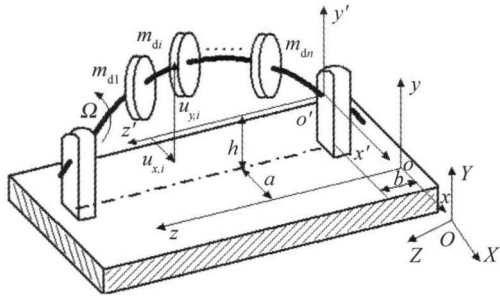


图2 转子和坐标系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rotor and coordinate systems

(X_B, Y_B, Z_B) 和绕飞机重心相对坐标系 $oxyz$ 上的三个转动分量 $(\theta_{B,x}, \theta_{B,y}, \theta_{B,z})$ 来描述。通常飞机绕纵轴 oz 、横轴 ox 和立轴 oy 的转动分别被称为横滚、俯仰和偏航。

1.2 转子系统的能量与广义力

为了分析方便,特作如下简化假设:①发动机转子被简化为图2所示的离散结构,它由若干个圆盘、集中质量和无质量的弹性轴段组成,只有在圆盘和集中质量上存在阻尼和广义力的作用;②转子只有弯曲振动,扭转和轴向振动的影响不予考虑;③盘为刚性,在转子的振动过程中不发生变形;盘的不平衡量始终位于一个平面内,只产生不平衡力,无不平衡力矩。如果不考虑盘转动惯量的影响,则盘变为一个集中质量。④转子的旋转转速为常数。⑤轴承的轴颈简化为集中质量。

下面我们先建立轴上某个盘的运动微分方程,然后再建立多盘转子系统的运动微分方程。

设盘 i 处在 $\delta x'y'z'$ 坐标系的 z'_i 位置,盘的动能 T_i 由平动动能 $T_{t,i}$ 和转动动能 $T_{r,i}$ 两部分组成

$$T = T_{t,i} + T_{r,i} = \frac{1}{2} m_i \mathbf{v}_a^T \cdot \mathbf{v}_a + \frac{1}{2} \sum_j \omega_j^2 I_j \quad (1)$$

式中 m_i 为盘的质量, I_j 和 ω_j 分别为盘在 $oxyz$ 坐标系中关于各自坐标轴的转动惯量和角速度, $\mathbf{v}_a$ 为盘中心的绝对速度矢量。

盘中心的绝对速度矢量 $\mathbf{v}_a$ 由盘中心相对与动坐标系 $oxyz$ 的相对速度矢量、飞机的牵连速度矢量以及由动坐标系 $oxyz$ 的转动引起的速度矢量三部分组成,其表达式为

$$\mathbf{v}_a = \mathbf{v}_B + \dot{\mathbf{r}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{v}_B$ 为飞机的牵连速度矢量, $\mathbf{r}$ 为盘中心相对与 $oxyz$ 坐标系的相对位移矢量, $\boldsymbol{\omega}$ 为盘在 $oxyz$ 坐标系中的角速度矢量。

设转子在旋转时盘的中心相对于转子坐标系 $\delta x'y'z'$ 的位移为 $(u_{x,i}, u_{y,i})$, 则盘动能的平动部分 $T_{t,i}$ 可表示为^[9]

$$T_{t,i} = \frac{1}{2} m_i [\mathbf{v}_B^T \cdot \mathbf{v}_B + \dot{\mathbf{r}}^T \cdot \dot{\mathbf{r}} - \mathbf{r}^T \cdot \tilde{\boldsymbol{\omega}}^2 \cdot \mathbf{r} + 2\dot{\mathbf{r}}^T \cdot \tilde{\boldsymbol{\omega}} \cdot \mathbf{r} + 2\mathbf{v}_B^T \cdot \dot{\mathbf{r}} + 2\mathbf{v}_B^T \cdot \tilde{\boldsymbol{\omega}} \cdot \mathbf{r}] \quad (3)$$

式中

$$\mathbf{v}_B = \begin{Bmatrix} \dot{X}_B \\ \dot{Y}_B \\ \dot{Z}_B \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{r} = \begin{Bmatrix} u_{x,i} + e_i \cos(\Omega + \phi_{i,0}) - a \\ u_{y,i} + e_i \sin(\Omega + \phi_{i,0}) + h \\ z_i + b \end{Bmatrix},$$

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix} 0 & -\theta_{B,z} & \theta_{B,y} \\ \theta_{B,z} & 0 & -\theta_{B,x} \\ -\theta_{B,y} & \theta_{B,x} & 0 \end{bmatrix}, \quad \theta_{B,x}, \theta_{B,y} \text{ 和 } \theta_{B,z}$$

分别为盘在 $oxyz$ 坐标系中关于 ox , oy 和 oz 轴的角速度, z_i 为盘的相对位置坐标, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$ 为叉乘矩阵, e_i 为盘的不平衡偏心距, $\phi_{i,0}$ 为盘不平衡量的初始位置角。

如果盘在 $oxyz$ 坐标系中关于各自坐标轴的角速度 $\boldsymbol{\omega}_i$ 用欧拉角 (ϕ, β, γ) 来表示,则有

$$\begin{Bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\cos\beta \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ \sin\beta & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi \\ \beta \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中 ϕ, β 和 γ 分别为转子绕 ox , oy 及 oz 轴的转角。

则盘动能的转动部分 $T_{r,i}$ 为

$$T_{r,i} = \frac{1}{2} \sum_j \omega_j^2 I_j = \frac{1}{2} I_{d,i} (\cos^2\beta \cdot \phi^2 + \beta^2) + \frac{1}{2} I_{p,i} (\sin^2\beta \cdot \phi^2 + \gamma^2 + 2\sin\beta \cdot \phi \cdot \gamma) \quad (5)$$

式中 $I_{d,i}$ 和 $I_{p,i}$ 分别为盘的直径和极转动惯量。

在假定欧拉角是小量的情况下,有 $\cos\beta \approx 1$, $\sin\beta \approx \beta$, 忽略其它高阶小量的影响。另外盘的欧拉角可以用飞机的角位移 $(\theta_{B,x}, \theta_{B,y})$ 和柔性轴相对于 $oxyz$ 坐标系的转动角 (θ_x, θ_y) 来表示,故有

$$\phi = \theta_x + \theta_{B,x}; \quad \beta = \theta_y + \theta_{B,y}; \quad \gamma = \Omega \quad (6)$$

式中 Ω 为转子的旋转转速。

最后得到盘的总动能为

$$T = \frac{1}{2} m_i [\mathbf{v}_B^T \cdot \mathbf{v}_B + \dot{\mathbf{r}}^T \cdot \dot{\mathbf{r}} - \mathbf{r}^T \cdot \tilde{\boldsymbol{\omega}}^2 \cdot \mathbf{r} + 2\dot{\mathbf{r}}^T \cdot \tilde{\boldsymbol{\omega}} \cdot \mathbf{r} + 2\mathbf{v}_B^T \cdot \dot{\mathbf{r}} + 2\mathbf{v}_B^T \cdot \tilde{\boldsymbol{\omega}} \cdot \mathbf{r}] + \frac{1}{2} I_{d,i} [(\theta_x + \theta_{B,x})^2 + (\theta_y + \theta_{B,y})^2] + \frac{1}{2} I_{p,i} [\Omega^2 + 2\Omega(\theta_y + \theta_{B,y})(\theta_x + \theta_{B,x})] \quad (7)$$

由于固定在转子上的坐标系 $\delta x'y'z'$ 以转子的

静变形为原点,所以转子的重力与轴的初始弹性恢复力相平衡,则盘处柔性轴的弹性势能为

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{q} = \begin{Bmatrix} u_{x,i} & u_{y,i} & \theta_{x,i} & \theta_{y,i} \end{Bmatrix}^T$ 为盘的广义坐标, $\mathbf{K}$ 为盘处轴的广义刚度系数矩阵,其一般形式为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11,i} & k_{12,i} & k_{13,i} & k_{14,i} \\ k_{21,i} & k_{22,i} & k_{23,i} & k_{24,i} \\ k_{31,i} & k_{32,i} & k_{33,i} & k_{34,i} \\ k_{41,i} & k_{42,i} & k_{43,i} & k_{44,i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 k_{lm} (l, m 分别为 1, 2, 3, 4) 分别为盘处轴在 $u_{x,i}$, $u_{y,i}$, $\theta_{x,i}$ 及 $\theta_{y,i}$ 方向的刚度系数。

对于盘上的阻尼,我们按照两种方法来处理。如果盘上的阻尼仅是速度的线性函数,则按照耗散能的方式来处理。如果盘上的阻尼力不是速度的线性函数,或者阻尼力还与位移、加速度等变量有关,则把这些阻尼力作为作用在盘上的广义力来处理。

如果盘上的阻尼是速度的线性函数,盘上的耗散能可由瑞利耗散函数表示为

$$D = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} \quad (10)$$

式中 $\dot{\mathbf{q}} = \begin{Bmatrix} \dot{u}_{x,i} & \dot{u}_{y,i} & \dot{\theta}_{x,i} & \dot{\theta}_{y,i} \end{Bmatrix}^T$ 为盘的广义速度, $\mathbf{C}$ 为盘的广义阻尼系数矩阵,其一般形式为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{t,i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{t,i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{r,i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{r,i} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 $c_{t,i}$ 和 $c_{r,i}$ 分别为盘的横向平动和转动阻尼系数。

作用在盘上的广义力是由轴承、阻尼器、密封等引起,通常为盘的广义位移、广义速度和广义加速度的函数。为了使所建立的柔性转子系统的动力学模型具有通用性,假设盘上的广义力为 $\mathbf{F}_{G,i} = \begin{Bmatrix} f_{G,x} & f_{G,y} & f_{G,\theta} & f_{G,\theta} \end{Bmatrix}^T$, 则系统的广义力 $\mathbf{Q}$ 为

$$\mathbf{Q} = \begin{Bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_{\theta} \\ Q_{\theta} \end{Bmatrix} = \mathbf{F}_{G,i} = \begin{Bmatrix} f_{G,x} \\ f_{G,y} \\ f_{G,\theta} \\ f_{G,\theta} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

式中 $f_{G,l}$ (l 分别为 1, 2, 3, 4) 分别为在 $u_{x,i}$, $u_{y,i}$, $\theta_{x,i}$ 及 $\theta_{y,i}$ 方向上的非线性广义力。

1.3 转子系统的运动方程

对于非保守系统, Lagrange 方程为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_j} = Q_j, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

式中 $L = T - V$ 为系统的 Lagrange 函数, T 和 V 分别为系统的动能和势能, q_j 为第 j 个广义坐标, D 为系统的耗散能, Q_j 为系统在 q_j 自由度方向上所受的广义力。

将系统的动能 T 、势能 V 、耗散能 D 以及广义力 $\mathbf{Q}$ 代入方程(13)后,就可以得到飞机在任意空间机动飞行条件下某圆盘的运动微分方程为

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{q}}_i + \left(\mathbf{C}_i + \mathbf{G}_i + \mathbf{C}_{B,i} \right) \dot{\mathbf{q}}_i + \left(\mathbf{K}_i + \mathbf{K}_{B,i} \right) \mathbf{q}_i = \mathbf{F}_{u,i}(t) + \mathbf{F}_{G,i}(t) + \mathbf{F}_{B,i}(t) \quad (14)$$

$$\text{式中 } \mathbf{q}_i = \begin{bmatrix} u_{x,i} \\ u_{y,i} \\ \theta_{x,i} \\ \theta_{y,i} \end{bmatrix}, \mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} m_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{d,i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{d,i} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} c_{t,i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{t,i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{r,i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{r,i} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{B,i} = \begin{bmatrix} 0 & -2m_i\theta_{B,z} & 0 & 0 \\ 2m_i\theta_{B,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{p,i}\Omega \\ 0 & 0 & -I_{p,i}\Omega & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} k_{11,i} & k_{12,i} & k_{13,i} & k_{14,i} \\ k_{21,i} & k_{22,i} & k_{23,i} & k_{24,i} \\ k_{31,i} & k_{32,i} & k_{33,i} & k_{34,i} \\ k_{41,i} & k_{42,i} & k_{43,i} & k_{44,i} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_{B,i} =$$

$$\begin{bmatrix} -m_i(\theta_{B,y} + \theta_{B,z}) & m_i(\theta_{B,x}\theta_{B,y} - \theta_{B,z}) & 0 & 0 \\ m_i(\theta_{B,x}\theta_{B,y} + \theta_{B,z}) & -m_i(\theta_{B,x} + \theta_{B,z}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_{u,i}(t) = \begin{Bmatrix} m_i e_i \Omega^2 \cos(\Omega t + \phi_{i,0}) \\ m_i e_i \Omega^2 \sin(\Omega t + \phi_{i,0}) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad F_{G,i}(t) = \begin{Bmatrix} f_{G,x} \\ f_{G,y} \\ f_{G,\theta} \\ f_{G,\theta_j} \end{Bmatrix},$$

$$F_{B,i}(t) =$$

$$\begin{Bmatrix} -m_i(\ddot{X}_B - \theta_{B,z}\dot{Y}_B + \theta_{B,y}\dot{Z}_B) - m_i a(\theta_{B,y} + \theta_{B,z}) & -m_i h(\theta_{B,x}\theta_{B,y} - \theta_{B,z}) - m_i(z_i + b)(\theta_{B,x}\theta_{B,z} + \theta_{B,y}) \\ -m_i(\ddot{Y}_B + \theta_{B,z}\dot{X}_B - \theta_{B,x}\dot{Z}_B) + m_i a(\theta_{B,x}\theta_{B,y} + \theta_{B,z}) & +m_i h(\theta_{B,x} + \theta_{B,z}) - m_i(z_i + b)(\theta_{B,y}\theta_{B,z} - \theta_{B,x}) \\ -I\ddot{\theta}_{B,x} - \Omega_p \theta_{B,y} & 0 \\ \Omega_p \theta_{B,x} - I\ddot{\theta}_{B,y} & 0 \end{Bmatrix}.$$

M_i , G_i , C_i 和 K_i 分别为不考虑机动飞行影响时转子系统的质量、陀螺、阻尼和刚度矩阵, $F_{u,i}(t)$ 和 $F_{G,i}(t)$ 分别为转子系统的不平衡力矢量和广义力矢量; $C_{B,i}$, $K_{B,i}$ 和 $F_{B,i}(t)$ 分别为由飞机的空间机动飞行引起的附加阻尼效应矩阵、附加刚度效应矩阵和附加外激励力矢量; $\ddot{X}_B$ 和 $\ddot{Y}_B$ 分别为飞机沿 X 和 Y 方向飞行的加速度, $\dot{X}_B$, $\dot{Y}_B$ 和 $\dot{Z}_B$ 分别为飞机沿 X , Y 和 Z 方向的飞行速度。

对于轴上的集中质量来讲,设质量中心相对于转子坐标系 $oxyz$ 的广义坐标 $q = \{u_{x,i}, u_{y,i}\}^T$, 对式(14)进行必要的简化就可以得到飞机在任意空间机动飞行条件下轴上某集中质量的运动微分方程。

从上面的结果容易得到飞机在任意空间机动飞行时发动机安装在飞机的任意位置条件下多盘、多集中质量和多轴承线性及非线性柔性转子系统运动微分方程的一般形式为

$$MU'' + (C + G + C_B)\dot{U} + (K + K_B)U = F_u(t) + F_G(t) + F_B(t) \quad (15)$$

$$\text{式中 } U = \begin{Bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{Bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & M_n \end{bmatrix}, \quad C =$$

$$\begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & C_n \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} G_1 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & G_n \end{bmatrix}, \quad C_B =$$

$$\begin{bmatrix} C_{B,1} & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & C_{B,n} \end{bmatrix}, \quad K_B = \begin{bmatrix} K_{B,1} & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & K_{B,n} \end{bmatrix},$$

$$F_u(t) = \begin{Bmatrix} F_{u,1}(t) \\ \vdots \\ F_{u,n}(t) \end{Bmatrix}, \quad F_G(t) = \begin{Bmatrix} F_{G,1}(t) \\ \vdots \\ F_{G,n}(t) \end{Bmatrix},$$

$$F_B(t) = \begin{Bmatrix} F_{B,1}(t) \\ \vdots \\ F_{B,n}(t) \end{Bmatrix}. \quad M, G, C \text{ 和 } K \text{ 分别为柔性转}$$

子系统的质量、陀螺、阻尼和刚度矩阵; $F_u(t)$ 和 $F_G(t)$ 分别为转子系统的不平衡力矢量和广义力矢量; M_i , C_i 和 G_i 分别为第 i 个盘或集中质量的质量、阻尼和陀螺矩阵; $F_{u,i}(t)$ 和 $F_{G,i}(t)$ 分别为第 i 个盘或集中质量上的不平衡力矢量及广义力矢量. 转子系统的 M, G, C, K 以及转子系统的不平衡力矢量 $F_u(t)$ 与基础固定时转子系统对应的矩阵完全相同. C_B, K_B 和 $F_B(t)$ 分别为由飞机的空间机动飞行引起的转子系统的附加阻尼效应矩阵、附加刚度效应矩阵以及附加外激励力矢量; $C_{B,i}$, $K_{B,i}$ 和 $F_{B,i}(t)$ 分别为由飞机的空间机动飞行在第 i 个盘或集中质量上产生的附加阻尼效应矩阵、附加刚度效应矩阵和附加外激励力矢量。

飞机在作空间机动飞行时,发动机转子系统实际上是在转子自身不平衡力和飞机空间机动飞行引起的附加激励力联合作用下的强迫振动. 如果知道了飞机空间机动飞行过程中各项参数的变化规律,即飞行速度 $(\dot{X}_B, \dot{Y}_B, \dot{Z}_B)$ 、飞行加速度 $(\ddot{X}_B, \ddot{Y}_B)$ 、飞机自身的转动速度 $(\theta_{B,x}, \theta_{B,y}, \theta_{B,z})$ 和转动加速度 $(\dot{\theta}_{B,x}, \dot{\theta}_{B,y}, \dot{\theta}_{B,z})$ 等随时间的变化关系,就可以利用数值积分法对转子系统的运动微分方程(15)进行求解,得到不同飞行条件下转子系统的运动时间历程及响应,以分析飞机的空间机动飞行对转子系统动力特性的影响。

2 空间机动飞行对转子系统特性的影响

比较飞机在任意空间机动飞行条件下发动机转子系统的运动方程与固定基础上发动机转子系

统的运动方程,可以得到下列几点基本特性:

1) 飞机的空间机动飞行不仅对发动机转子系统产生附近的外激励力,而且还会影响转子系统的阻尼矩阵和刚度矩阵.因此采用给转子上直接施加附加离心力和陀螺力矩的方法仅仅适用于一些特殊机动飞行的情况.

2) 飞机的空间机动飞行只对发动机转子系统的平动运动产生附加阻尼效应,对转子系统转动运动的阻尼没有影响.飞机空间机动飞行对转子系统平动运动附加阻尼的影响与陀螺效应对转子的转动运动特性的影响效果相反,并只与飞机绕其自身纵轴的横滚角速度 $\theta_{x,z}$ 有关.飞机的飞行速度和加速度对转子不产生任何附加阻尼效应.

3) 飞机的空间机动飞行只对发动机转子系统的平动运动产生附加刚度效应,对转子系统转动运动的刚度没有影响.飞机空间机动飞行对转子系统平动运动所产生的附加刚度始终使转子系统的主刚度减小,其影响不仅与飞机绕其自身纵轴的横滚角速度 $\theta_{x,z}$ 有关,而且还与飞机绕其自身纵轴的横滚角加速度 $\dot{\theta}_{x,z}$ 以及飞机绕其它轴的角速度有关.飞机的飞行速度和飞行加速度对转子不产生任何附加刚度效应.

4) 飞机的空间机动飞行对发动机转子系统的平动运动和转动运动都产生了附加外激励力.平动运动方向上的附加外激励力不仅与飞机的飞行速度、加速度、飞机绕其自身轴的角速度、角加速度有关,而且还与盘或集中质量在转子上的相对位置以及发动机在飞机上的安装位置参数有关.转动运动方向上的附加外激励力只与绕横轴和立轴的转动角速度和角加速度有关,与飞机的水平飞行速度和加速度无关.在定常空间机动飞行条件下,无论是平动还是转动方向上的附加外激励力是确定不变的常量.这种不变的附加外激励力会引起转子系统轴心运动轨迹向某个特定的方向发生偏移.由于飞机在作定常空间机动飞行时,转子系统的刚度和阻尼矩阵也发生了变化,所以一般的定常空间机动飞行不仅会使轨道的中心位置发生偏移,而且也会引起转子系统运动轨道大小发生变化.

5) 飞机的水平飞行加速度 $\ddot{z}_B$ 对发动机转子系统的弯曲振动没有影响,在横滚机动飞行条件下飞机的水平飞行速度 $\dot{z}_B$ 对转子系统的弯曲振动无影响,在其它机动飞行条件下飞机的水平飞行速度 $\dot{z}_B$ 对转子系统的弯曲振动有一定的影响.

6) 发动机在飞机上的位置参数 a, b 及 h 对发动机转子系统的影响只是在平动方向上产生附加外激励力,而对转子在转动方向上并不产生附加的外激励力.发动机的安装位置参数的这种影响只有当飞机有转动运动时才存在,当飞机只是平动运动时,没有这种影响.

上述的部分分析结果已被仿真结果所证实^[8],由于篇幅的限制,其它结果将另文发表

3 结 论

1) 利用 Lagrange 方程所建立的飞机在任意空间机动飞行时,发动机安装在飞机上任意位置条件下,多盘、多集中质量、多轴承的线性或非线性柔性转子系统运动方程的一般形式,为深入研究飞机空间机动飞行对转子系统动力特性的影响提供了基础.这个模型不仅可以用来研究飞机的空间机动飞行对发动机转子系统动力特性的影响,也可以用来研究舰用燃气轮机在舰艇作机动航线时转子系统的动力特性.

2) 一般的空间机动飞行对发动机转子系统不仅产生了非周期性附加外激励力,而且还会产生附加的阻尼和刚度效应,从而使转子系统运动轨道的大小以及转子运动轨道的中心发生变化.虽然在一些特殊的平面机动飞行中,转子系统运动轨道的大小可能并没有发生变化,但由于附加外激励力使转子系统运动轨道的中心发生了偏移,从而使转子与定子发生局部碰撞的可能性增大,这样的碰磨可能会导致轴系失稳,出现灾难性的故障.因此,必须考虑机动飞行因素对航空发动机转子系统动力特性的影响.

3) 飞机在垂直平面内或在水平平面内作稳定的机动飞行,转子运动轨迹的中心会在垂直或水平方向发生明显的偏移,偏移的方向和大小主要由机动飞行加速度和角速度的方向决定,不同位置上转子轴心运动轨迹中心偏移的大小不仅与机动飞行加速度和角速度的大小有关,而且还与其位置有关

参考文献:

- [1] Geradin M, Kill N. Dynamic analysis of aircraft engines subjected to maneuvers[C]// Proc. of International Conference on Rotordynamics. Lyon: IFToMM, 1992, 397-402.
- [2] White J L, Heidari M A, Yantis T F. Study of engine excited non-linear vibro-acoustics in commercial airplanes [C]// Proc. of the International Modal Analysis Confer-

- ence. Florida: SEM, 1997:1503-1508.
- [3] 徐敏, 廖明夫, 刘启洲. 机动飞行条件下双盘悬臂转子的振动特性[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1):105-109.
XU Min, LIAO Mingfu, LIU Qizhou. The vibration performance of the double-disk cantilever rotor in flight mission[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(1):105-109. (in Chinese)
- [4] 徐敏, 廖明夫. 机动飞行条件下带挤压油膜阻尼器的Jeffcott 转子的振动特性[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3):394-401.
XU Min, LIAO Mingfu. The vibration performance of the Jeffcott rotor system with SFD in maneuver flight [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(3):394-401. (in Chinese)
- [5] 林富生, 孟光. 飞行器机动飞行时发动机转子等速运动的动力学特性研究[J]. 航空学报, 2002, 23(4):356-359.
LIN Fusheng, MENG Guang. Dynamics of a maneuvering rotor in constant acceleration and deceleration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(4):356-359. (in Chinese)
- [6] LIN Fusheng, MENG Guang. Study on the dynamics of a rotor in a maneuvering aircraft[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2003, 125(2):324-327.
- [7] 杨永锋, 任兴民, 秦卫阳. 水平盘旋下裂纹转子的非线性响应[J]. 航空动力学报, 2007, 22(6):1007-1012.
YANG Yongfeng, REN Xinming, QIN Weiyang. Study of nonlinear response of cracked Jeffcott rotor in hovering state[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(6):1007-1012. (in Chinese)
- [8] 祝长生, 陈拥军. 机动飞行时航空发动机转子系统的振动特性[J]. 航空学报, 2006, 25(5):835-841.
ZHU Changsheng, CHEN Yongjun. Vibration characteristics of aeroengine's rotor system during maneuvering flight[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 25(5):835-841. (in Chinese)
- [9] 高洁, 朱培申, 高正红. 高等飞行动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
GAO Jie, ZHU Peishen, GAO Zhenghong. The advanced flight dynamics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)