

文章编号: 1000-0887(2002) 09-0929-07

机械化数学在转子动力学研究中的应用

胡 超, 王 岩, 王立国, 黄文虎

(哈尔滨工业大学 航天工程与力学系, 哈尔滨 150001)

(赵兴华推荐)

摘要: 基于机械化数学_吴文俊消去法, 分别采用短轴承油膜力模型和 Muszynska 转子力学模型, 对转子轴承系统中的动力学行为与稳定性进行了分析研究。具体分析时, 采用吴文俊特征列概念和基于 Maple 软件的符号计算平台, 对短轴承涡动参数进行了解析分析, 以及试算构造出了 Liapunov 函数, 并给出了转子系统运动稳定性条件。

关键词: 吴文俊消去法; 特征列集; 运动稳定性; 转子_轴承系统; 涡动

中图分类号: TH133 1; O322 **文献标识码:** A

引 言

随着科学技术的发展, 在现代力学研究中出现了许多强非线性, 高维或高阶的复杂问题。为分析研究用复杂方程描述的力学问题, 仅仅依靠数值方法是难以满足需要的。同时采用解析方法进行人工推导和演算也是难以胜任的。用数值法求解问题难以弄清各参数间存在的本质关系。为研究复杂动力学系统的特性, 人们正在寻找有效的分析方法。解析方法可以克服数值法的不足, 在力学研究中具有重要的作用。目前, 迫切要求探索能分析求解高维非线性动力系统的途径^[1~ 8]。

吴文俊先生继承了中国古代数学中的机械化思想, 提出了求解用多项式组的新方法, 人们称为吴文俊消去法。用吴消去法求解用非线性方程组表现出强解析性。吴方法已在求解高维非线性力学问题的许多文献中出现^[2]。吴文俊利用拟除和特征列给出了分析问题的规范格式。机械化数学的主要特点是符号计算时的准确性和高效。

本文将采用吴文俊特征列概念和基于 Maple 软件的符号计算平台, 对短轴承涡动参数进行解析分析, 试算构造出 Muszynska 转子力学模型的 Liapunov 函数, 利用非线性振动理论分析给出转子运动的稳定性条件。

1 吴消去法简介

将吴消去法用于转子_轴承系统的分析求解, 可分为以下三步: 1 根据工程实际问题建立

收稿日期: 2001_07_30; 修订日期: 2002_05_28

基金项目: 国家重点基础研究规划项目(G1998020317); 国家自然科学基金资助重大项目(19990510); 哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金资助项目(HIT.MD2000.05)

作者简介: 胡 超(1961), 男, 博士, 力学专业教授(E-mail: huchao@hope.nit.edu.cn);

黄文虎(1926), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师。

适用于吴消去法求解的多项式组: 2 用吴文俊特征列概念进行分析求解; 3 排除无工程实际意义的解, 选出符合问题要求的解

1 1 多项式求余

多项式求余计算是吴消去法的基本运算^[2], 对于任意多项式 F, G , 其标准形为

$$F = c_0x^m + c_1x^{m-1} + \dots + c_m, \tag{1a}$$

$$G = d_0x^M + d_1x^{M-1} + \dots + d_M, \tag{1b}$$

若存在 $d_0 \neq 0, M \leq m$, 则 G 对于 F 是未约化的非零多项式, 令 G 对 F 求余可得

$$I(F)^s \cdot G = qF + r, \tag{2}$$

其中 s 为最小非负整数, $I(F)$ 是 F 的初式 多项式 r 是唯一确定的, 称为 G 对于 F 的余式, 记为 $\text{Rem}(G, F, x)$, 存在 $\deg_x r < \deg_x F$

对于一个升列 $FS = \{F_1, F_2, \dots, F_r\}$, 考虑任一多项式 G 对 FS 求余 设 $R_{i-1} (i = r - 2, \dots, 2, 1)$ 是多项式组 R_i 对 F_r 求余所得的余式, 重复进行求余过程 该过程可描述为

$$I_1^{s_1} \cdot I_2^{s_2} \cdot \dots \cdot I_r^{s_r} G = Q_r \cdot F_r + Q_{r-1} \cdot F_{r-1} + \dots + Q_1 \cdot F_1 + R_0, \tag{3}$$

式中 I_i 为多项式 F_i 的初式, s_i 为非负整数, Q_i 为多项式 ($i = 1, 2, \dots, r$) 式(3)中 R_0 为多项式 G 对升列 FS 的余式, 记为 $\text{Rem}(G/FS)$

1 2 多项式组特征列的计算

特征列的定义: 对于给定多项式组 $PS = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 和升列 $FS = \{F_1, F_2, \dots, F_r\}$, 若满足式子(1)、(2), 则称升列 FS 为多项式组 PS 的特征列

1) PS 中的每一多项式 P_i 为升列 FS 的余式为零, 即

$$\text{Rem}(P_i/FS) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m), \tag{4}$$

2) 多项式组 PS 和升列 FS 的零点集满足 $\text{Zero}(PS) = \text{Zero}(FS)$

对给定的多项式组 PS , 其特征列的计算可分为以下三步进行:

第一步, 令 $PS_1 = PS$, 从多项式组 PS_1 中选一基列 BS_1 , 然后令 PS_1 中每一多项式对 BS_1 求余, 将所得非零余式全体记为 RS_1 ; 第二步, 令多项式组 $PS_2 = \{PS_1, RS_1\}$, 从 PS_2 中选基列 BS_2 , 然后令 PS_2 中每一多项式对 BS_2 求余, 将所得非零余式全体记为 RS_2 ; 第三步, 重复上述过程, 经过有限步计算后, 可得多项式组 PS_k 中每一多项式对 BS_k 的余式

若最后所得基列 BS_k 是非矛盾升列(任一多项式不为非零常数), 则基列 $BS_k = CS$ 即为多项式组 PS 的特征列 求解 $CS = 0$, 即得多项式组 PS 的解

2 吴消去法在转子涡动分析中的应用

分析研究转子涡动频率和振幅以及运行参数对转轴运动的影响 转子系统由单盘转子和圆柱轴承等组成 设 F_e, F 分别为油膜力的径向分量和切向分量; ω 为转子的角速度; O 为轴瓦的几何中心; O_1 为转子几何中心; O_c 为转子质心; e 为偏心 ($e = OO_1$); r_0 为半径 ($r_0 = OO_c$); β 为偏位角

对于短轴承模型, 转子涡动时其各力学参数应满足如下方程^[4]

$$\omega^2 = \frac{2}{[1 - (\omega/n)^2]^2 + D_e^2 (\omega/n)^2}, \tag{5}$$

$$\frac{\sqrt{1 - \omega^2/n^2}}{\omega} = \frac{4D_e}{(\omega/n)[1 - D_e^2 - (\omega/n)^2]}, \tag{6}$$

$$\frac{6KG_3(\cdot)}{m_n} \frac{D_e / n}{[1 - (\cdot / n)^2]^2 + (D_e / n)^2} = \frac{\cdot}{2n} - \frac{\cdot}{n}, \quad (7)$$

其中 $K = \frac{4L}{m_n} \left(\frac{R}{C} \right)^3$; $\frac{\cdot}{n} = k/m$; $\cdot = r\omega/C$; $G_3(\cdot) = \frac{\cdot}{(1 - \cdot^2)^{3/2}}$; $D_e = c_e/m_n$,
 式中, L 为轴承长度; \cdot 为润滑油粘度; R 为转子轴颈半径; m 为转子质量; k 为转子的刚度系数; C 为轴承径向间隙; \cdot 为偏心率 ($\cdot = e/C$); c_e 为外部阻尼系数; \cdot 为转动角速度; K 为轴承相似性系数; D_e 为阻尼

2 1 多项式方程组的转化

研究的对象是转子的涡动频率、轴颈中心的振幅 C 及圆盘中心的振幅 C 等。用数值法可从式(5)~(7)中求出 \cdot 和 \cdot 值。现在我们试图用吴消去法转子系统的各涡动参数之间的关系。首先进行如下变换,将 $G_3(\cdot)$ 在 $0 < \cdot < 1$ 区间展开成台劳级数,略去高阶项得

$$G_3(\cdot) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{3}{2} \cdot^3 + \frac{15}{8} \cdot^5 + \dots \right], \quad (8)$$

$$\text{同时设 } [1 - (\cdot / n)^2]^2 + D_e^2 (\cdot / n)^2 = x_4^2, \quad (9)$$

$$(\cdot / n)[1 - D_e^2 - (\cdot / n)^2]/4D_e = x_5 \quad (10)$$

将式(8)~(10)代入(5)~(7),再令变量 $\cdot / n = x_1$, $\cdot = x_2$, $\cdot = x_3$, $\cdot / n = x_6$, 参数 $a = D_e^2 - 2$, $b = D_e/(3K)$, $c = 4D_e\omega$, $d = 1 - D_e^2$, 可得能利用吴消去法求解的多项式组

$$h_1 = -x_2x_4 + x_3, \quad (11)$$

$$h_2 = -x_4^2 + x_1^4 + ax_1^2 + 1, \quad (12)$$

$$h_3 = (1 + 15x_3^2)(x_6 - x_1)x_4 - bx_1, \quad (13)$$

$$h_4 = -cx_5 - x_1^3 + dx_1, \quad (14)$$

$$h_5 = (x_3^2 - 1)x_5^2 + x_3^2 \quad (15)$$

根据多项式组 $HS = \{h_1, h_2, \dots, h_5\}$, 采用吴消去法可求出 x_1, x_2 及 x_3 等变量的关系

2 2 用吴消去法确定涡动参数

我们利用多项式组 $HS = \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5\}$ 可研究短轴承模型中转子的涡动。利用 Maple 软件和吴消去法,成功地求出了转子涡动多项式组的特征列 HS 的特征列 $CS = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$ 的具体形式如下

$$C_1 = c^{-2}(-x_1^6 + 2dx_1^4 - d^2x_1^2 + c^2x_1^2x_2^2 + ac^2x_1^2x_2^2 + c^2x_2^2 + x_1^{10}x_2^2 + ax_1^8x_2^2 + x_1^6x_2^2 - 2dx_1^8x_2^2 - 2adx_1^6x_2^2 - 2dx_1^4x_2^2 + d^2x_1^6x_2^2 + ad^2x_1^4x_2^2 + d^2x_1^2x_2^2), \quad (16)$$

$$C_2 = c^{-2}(x_1^6x_3^2 - x_1^6 - 2dx_1^4x_3^2 + 2dx_1^4 + d^2x_1^2x_3^2 - d^2x_1^2 + c^2x_3^2), \quad (17)$$

$$C_3 = x_1^4 + ax_1^2 - x_2^4 + 1, \quad (18)$$

$$C_4 = -cx_5 - x_1^3 + dx_1, \quad (19)$$

$$C_5 = A/B, \quad (20)$$

其中 $A = 50dx_1^5 - c^2x_1 - 25d^2x_1^3 - 50adx_1^6x_6 + ac^2x_1^2x_6 + 25ad^2x_1^4x_6 - 25x_1^{11} + 25x_1^{10}x_6 - 25ax_1^9 + 50dx_1^9 - c^2x_1^5 - 25d^2x_1^7 + 25d^2x_1^2x_6 - 50dx_1^4x_6 + 20bdx_1^5 - bc^2x_1 - bd^2x_1^3 - bx_1^7 + 25x_1^6x_6 + c^2x_6 - 25x_1^7 + 25ax_1^8x_6 - 50dx_1^8x_6 + c^2x_1^4x_6 + 25d^2x_1^6x_6 + 50adx_1^7 - ac^2x_1^3 - 25ad^2x_1^5,$ (21)

$$B = x_1^6 - 20dx_1^4 + d^2x_1^2 \quad (22)$$

上述多项式组 $CS = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$ 即为所求特征列 设 $C_i = 0 (i = 1, 2, 3, 4, 5)$, 可确定 x_2, x_3, x_4, x_5 及 x_6 等各变量相对于 x_1 的关系 其中涡动参数 x_2, x_3 及转速 x_6 是我们最关心的 由多项式组特征列, 可得各参数的表达式

$$x_{21} = -x_1(-d + x_1^2) / \sqrt{C}, \tag{23}$$

$$x_{22} = x_1(-d + x_1^2) / \sqrt{C}, \tag{24}$$

$$x_{31} = x_1(x_1^2 - d) / \sqrt{x_1^6 - 2dx_1^4 + d^2x_1^2 + c^2}, \tag{25}$$

$$x_{32} = x_1(x_1^2 - d) / \sqrt{x_1^6 - 2dx_1^4 + d^2x_1^2 + c^2}, \tag{26}$$

$$x_6 = D/E, \tag{27}$$

其中 $C = x_1^{10} + ax_1^8 - 2dx_1^8 - 2adx_1^6 + d^2x_1^6 + x_1^6 - 2dx_1^4 + ad^2x_1^4 + c^2x_1^4 + ac^2x_1^2 + d^2x_1^2 + c^2,$ (28)

$$D = x_1(5 \ 0x_1^{10} + 5 \ 0ax_1^8 - 10 \ 0dx_1^8 + 5 \ 0d^2x_1^6 + 2 \ 0bx_1^6 + 5 \ 0x_1^6 - 10 \ 00adx_1^6 + 2 \ 0c^2x_1^4 - 4 \ 0bdx_1^4 - 10 \ 00dx_1^4 + 5 \ 0ad^2x_1^4 + 5 \ 0d^2x_1^2 + 2 \ 0bd^2x_1^2 + 2 \ 0ac^2x_1^2 + 2 \ 0c^2 + 2 \ 0bc^2),$$
 (29)

$$E = (5 \ 0x_1^{10} + 5 \ 0ax_1^8 - 10 \ 0dx_1^8 - 10 \ 00adx_1^6 + 5 \ 0d^2x_1^6 + 5 \ 0x_1^6 + 5 \ 0ad^2x_1^4 + 2 \ 0c^2x_1^4 + 2 \ 0ac^2x_1^2 + 5 \ 0d^2x_1^2 - 10 \ 00dx_1^4 + 2 \ 0c^2)$$
 (30)

由前面分析可知, 存在关系 $x_1 = \dots / n < 1, d = 1 - D_e^2$ 由于 $x_2 = \dots > 0, x_3 = \dots > 0$, 故应将 x_2 的负解 x_{22} 及 x_3 的负解 x_{32} 舍去 剩余解 x_{21}, x_{31} (满足 $x_1^2 - d < 0$) 及 x_6 即是所求解 它们体现了涡动参数, 及转速 和涡动频率 间存在的关系, 这是数值方法难以得到的 对任一给定的短轴承系统来说, 依式(23)、(25) 及(27) 即可确定轴颈中心及圆盘中心的涡动振幅 C, C 及转速 相对于任一涡动频率 的值

2 3 实例分析

分析涡动参数, 及转速 相对于涡动频率 的关系 电机转子质量 $m = 29\ 400\ \text{kg}$, 间隙比 $C/R = 0\ 0012$, 润滑油粘度系数 $\eta = 2\ 207\ 744 \times 10^{-2}\ \text{kg/ms}$ 阻尼系数 D_e 和相似系数 K 已知 采用短轴承假设 $L/D = 0\ 25$ 采用吴方法分析各力学参数之间的变化规律如图1、2、3、4所示

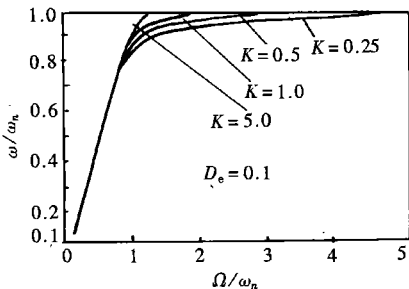


图1 涡动角速度 与转速 的关系

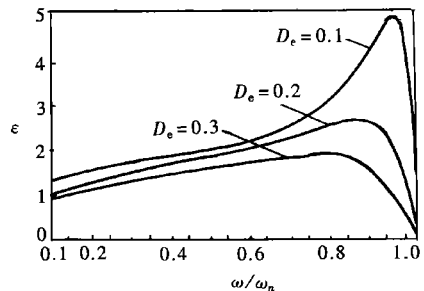


图2 参数 与涡动角速度 之间的关系

根据解析表达式(23)、(25) 及(27) 可做出相应的曲线, 该曲线与文献[4] 中用数值方法得到的计算曲线是一致的 可见, 采用吴消去法进行转子动力学分析是有效的

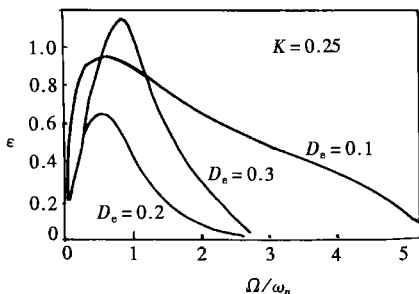


图3 参数 与转速 之间的关系

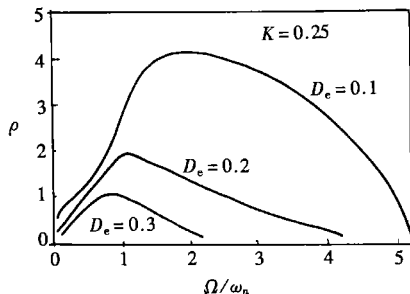


图4 参数 与转速 之间的关系

3 机械化数学在 Muszynska 转子模型中的应用

现在,我们研究 Muszynska 单盘转子模型的动力学^[5-6], 它的运动控制方程如下

$$(M + m)x + (D_0 + \dots)x + 2my + (K_0 + \dots - 2^2 m)x + (D_0 + \dots)y = 0, \quad (31a)$$

$$(M + m)y + (D_0 + \dots)y - 2mx + (K_0 + \dots - 2^2 m)y - (D_0 + \dots)x = 0, \quad (31b)$$

式中, M 和 m 分别为转子附加质量和附加流体质量; D_0 和 K_0 分别为流体的当量阻尼系数和弹性系数; ω_n 为转子涡动频率与转速的比($\omega_n = 1/2$); Ω 为转子的转速; F 和 R 分别为非线性弹簧力和阻尼力: $F = a(x^2 + y^2)$, $a > 0$; $R = b(x^2 + y^2)$, $b > 0$

3.1 转子涡动方程的平衡点及其稳定性分析

设 $x = x_1, y = x_3$, 在状态空间 (x_1, x_2, x_3, x_4) 中, 转子运动的微分方程(31) 可描述为

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (32a)$$

$$(M + m)\dot{x}_2 = -(K_0 + \dots - 2^2 m)x_1 - (D_0 + \dots)x_2 - (D_0 + \dots)x_3 - 2mx_4, \quad (32b)$$

$$\dot{x}_3 = x_4, \quad (32c)$$

$$(M + m)\dot{x}_4 = (D_0 + \dots)x_1 + 2mx_2 - (K_0 + \dots - 2^2 m)x_3 - (D_0 + \dots)x_4, \quad (32d)$$

为求平衡点, 令式(32a), (32d) 为零

$$x_1 = x_2 = 0, x_3 = x_4 = 0 \quad (33a,b)$$

则由(32b), (32d) 可得

$$(K_0 + \dots - 2^2 m)x_1 + (D_0 + \dots)x_3 = 0, \quad (33c)$$

$$(D_0 + \dots)x_1 - (K_0 + \dots - 2^2 m)x_3 = 0 \quad (33d)$$

由式(33c), (33d) 应用吴消去法, 可得其关于变量 x_1, x_3 的特征列集 $\{C_1, C_2\}$

$$C_1 = (K_0^2 + 2K_0 - 2mK_0 - 2^2 m^2 + 2^2 - 2^2 m^2 + m^2 - 4^4 + 2^2 D_0^2 + 2D_0 - 2^2 + 2^2)x_1 / [(D_0 + \dots)], \quad (34a)$$

$$C_2 = (K_0^2 + 2K_0 - 2mK_0 - 2^2 m^2 + 2^2 - 2^2 m^2 + m^2 - 4^4 + 2^2 D_0^2 + 2D_0 - 2^2 + 2^2)x_3 / [K_0 + \dots - m^2] \quad (34b)$$

令式(34a), (34b) 为零, 可得动力系统的平衡点, 也就是 $x_1 = x_3 = 0$ 为判定平衡点的稳定性, 构造如下 Liapunov 函数^[6]

$$V = (M + m)(r_1^2 + r_2^2)/2 + r_1^2(K_0 - m^2 + D_0^2/2m) + D_0(1 + M/m)r_1r_2/2 + ar_1^4/4 \quad (35)$$

为确保 Liapunov 函数正定, 必须满足下列条件

$$K_0 - m^2 + D_0^2/2m > 0, \quad (36a)$$

$$K_0 - m^2 + D_0^2/2m - D_0^2(1 + M/m)/4m > 0, \quad (36b)$$

$$K_0 - m^2 - D_0^2(M/m - 1)/4m > 0 \quad (36c)$$

应用吴消去法,由式(36a), (36b)和(36c)可得关于参数 D_0, K_0 的特征列集

$$C_3 = D_0^2(m + M)/4m^2, \quad (37a)$$

$$C_4 = -(K_0M + K_0m - mM^2 - m^2)/m - M \quad (37b)$$

为保证 Liapunov 函数正定,由式(37a)、(37b)可得如下关系

$$D_0 > 0, K_0 > m^2 \quad (38a,b)$$

此时 Liapunov 函数对时间的导数为

$$V = D_0(M/m - 1)(r_1^2 + r_2^2)/2 + D_0r_1^2(M^2 - K_0)/2M - D_0ar_1^4/2M \quad (39)$$

依 Liapunov 运动稳定性判断定理,当 $V > 0, \dot{V} < 0$ 时,方程(32)的平衡点是不稳定的

3.2 转子涡动方程的极限环及其稳定性分析

设 $r = r_1$,由方程(31)可得在极坐标 (r, θ) 下的状态方程为

$$\dot{r}_1 = r_2 \quad (40a)$$

$$(M + m)r_2 = -(D_0 + W)r_2 - (ar_1^2 + K_0 - mK^2s^2)r_1, \quad (40b)$$

$$H = K\delta \quad (40c)$$

为求极限环,令式(40)为零,则由式(40b)可得

$$ar_1^2 + K_0 + mK^2s^2 = 0 \quad (41)$$

在 Maple 软件平台上求解方程(41),可得极限环坐标

$$r = r_0 = \sqrt{(mK^2s^2 - K_0)/a} \quad (42)$$

为研究极限环的稳定性,设 $r = r_0 + u = r_0 + u_1$,由式(42)可得

$$\dot{u}_1 = u_2, \quad (43a)$$

$$(M + m)u_2 = -D_0u_2 - a(u_1^3 + 3r_0u_1^2 + 2r_0^2u_1) \quad (43b)$$

将式(43)进行局部线性化得

$$\dot{u}_1 = u_2, (M + m)u_2 = -D_0u_2 - 2ar_0^2u_1 \quad (44a,b)$$

在 Maple 软件平台上可给出状态方程(44)的特征方程,及其特征根如下

$$(M + m)K^2 + D_0K + 2(MK^2s^2 - K_0) = 0, \quad (45a)$$

$$K_{1,2} = [-D_0 \pm \sqrt{D_0^2 - 8(M + m)(MK^2s^2 - K_0)}]/2(M + m) \quad (45b)$$

当式(45b)存在虚部,即

$$MK^2s^2 - K_0 - D_0^2/8(M + m) > 0, \quad (46)$$

此时特征根为实部小于零的复数,故自激振动的极限环是稳定的

当式(45b)为存在虚部,即

$$MK^2s^2 - K_0 - D_0^2/8(M + m) > 0 \quad (47)$$

此时特征根为两个小于零的实数,自激振动的极限环同样是稳定的

4 结 论

本文对短轴承模型及 Muszynska 单盘转子模型的运动方程进行了分析。具体分析时,采用吴文俊特征列概念和基于 Maple 软件的符号计算平台,对短轴承涡动参数进行了解析分析,以及分析试算构造出了 Liapunov 函数,并给出了转子系统运动稳定性条件。所采用的模型相对

比较简单,但我们可以看到,将吴方去用于高维转子轴承系统是完全可能的#

理论分析计算表明,采用吴文俊特征列集的概念,解析求解用多项式组描述的动力系统是成功的# 本方法可望能在分析求解高维、非线性动力系统中应用# 实际上,力学中许多问题都可采用特征列集约化降维后分析求解# 对此作者已做了部分工作,进一步的研究正在进行,其研究结果将另文发表#

[参 考 文 献]

- [1] 石赫. 机械化数学引论[M]. 湖南:湖南教育出版社,1998.
- [2] 吴文俊. 吴文俊论数学机械化[M]. 山东:山东科学技术出版社,1996.
- [3] 刘来福,何青,彭芳麟,等. 用 Maple 和 MATLAB 解决科学计算问题[M]. 北京:高等教育出版社,施普林格出版社,1999.
- [4] 钟一谔,何衍宗,王正. 转子动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1987.
- [5] Muszynska A. Stability of whirl and whip in rotor/bearing systems[J]. J Sound and Vibration, 1988, 127(1): 49-64.
- [6] 胡超,黄文虎,夏松波,等. Jeffcott 转子稳定性的分析[A]. 见:黄文虎,闻邦春编. 第七届全国振动理论及其应用学术会议论文集[C]. 广东,佛山,1999.
- [7] YU Wang. Prediction of periodic response of rotor dynamic system with nonlinear supports[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1997, 119(7): 346-353.
- [8] Clarkson P A. Nonclassical symmetry reductions of nonlinear partial differential equations[J]. Math Comput Modeling, 1993, 18(10): 45-68.

A p p l i c a t i o n o f M e c h a n i z e d M a t h e m a t i c s t o R o t o r D y n a m i c s

HU Chao, WANG Yan, WANG Li_guo, HUANG Wen_hu
(Department of Aerospace Engineering and Mechanics, Harbin Institute
of Technology, Harbin 150001, P R China)

Abstract: Based on the mechanized mathematics and WU Wen_tsun elimination method, using oil film forces of short bearing model and Muszynska's dynamic model, the dynamical behavior of rotor-bearing system and its stability of motion are investigated. As example, the concept of Wu characteristic set and Maple software, whirl parameters of short_bearing model, which is usually solved by the numerical method, are analyzed. At the same time, stability of zero solution of Jeffcott rotor whirl equation and stability of self-excited vibration are studied. The conditions of stable motion are obtained by using theory of nonlinear vibration.

Key words: Wentsun elimination method; characteristic set; stability of motion; rotor_bearing system; whirl