

燃气轮机拉杆转子有限元模型研究及临界转速计算

高 锐, 袁 奇, 高 进

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 现代燃气轮机转子主要为拉杆转子, 其形式分为中心单根或周向多根拉杆。无论哪种形式, 拉杆转子已经不再是连续结构, 轮盘之间的接触面将对转子动力学特性产生影响。首先分析了拉杆转子的受力情况, 然后考虑接触面接触刚度对转子动力特性的影响, 对传统的有限元方法进行了改进, 并编写了相应的计算程序。最后计算了光轴、一对接触圆盘算例和某型真实燃气轮机拉杆转子的临界转速, 并分别与传统有限元方法、三维有限元方法和测量值进行比较, 验证了该改进有限元模型的正确性和有效性。

关 键 词: 燃气轮机; 拉杆转子; 临界转速; 法向接触刚度; 有限元方法

中图分类号: TK474 文献标识码: A

引 言

现代燃气轮机转子的结构形式以拉杆转子为主, 通过拉杆预紧力将各级轮盘组合成转子。具体包括两种形式: 中心单根拉杆和周向多根拉杆。无论采用哪种形式的拉杆, 这种转子都不再是一个连续的整体, 各圆盘之间的接触效应对拉杆转子的动力学特性产生一定影响。根据转子动力学基本理论, 拉杆转子的接触面会使转子局部刚度降低, 其临界转速将低于同形状连续转子。

转子动力学中用来计算转子临界转速的传递矩阵法和有限元方法都具有较高的精度, 并且在工程实践中已被广泛应用。然而, 传递矩阵法和有限元方法都是建立在转子连续的前提下, 这两种方法在计算拉杆转子时都无法考虑接触面的接触效应, 只能将其作为连续转子处理^[1], 从而一定程度上影响了计算精度。文献^[2]考虑了拉杆转子中接触效应对应力和裂纹的影响, 然而并没有涉及接触效应对刚度的影响。饶柱石等人建立了拉杆转子的动力学模型, 测量了实验转子的临界转速, 然而在他们的研究中, 拉杆的预紧力远小于真实拉杆转子, 且实验转子与真实燃气轮机转子也有一定差别^[3~4], 且未能

用真实转子验证。三维有限元方法虽然能够得到较精确的计算结果, 但是这需要消耗大量的时间和计算机资源, 特别对于燃气轮机拉杆转子这样一个复杂的多体接触结构。

根据文献^[3~4], 建立了拉杆转子的动力学模型, 并且在常规有限元方法的基础上进行了改进, 同时编写了计算程序。通过对光轴算例、一对接触圆盘算例和某型真实燃气轮机拉杆转子的计算, 验证了改进的有限元方法的正确性。

1 改进的有限元模型

1.1 接触面的力学模型

图 1 为拉杆转子受到弯矩作用时的力学模型。该力学模型中拉杆被等效为抗拉弹簧, 而接触面之间具有法向接触刚度, 被等效为抗压弹簧。实际情况中, 轮盘接触面之间的摩擦力足以保持轮盘具有相同的横向位移, 因此可以进一步将拉杆和接触面等效为一个铰链和一个抗弯弹簧。

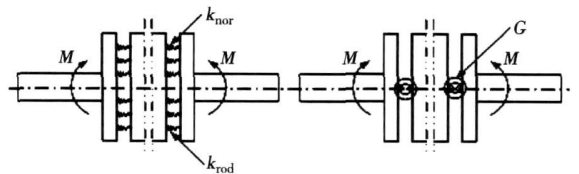


图 1 拉杆转子力学模型

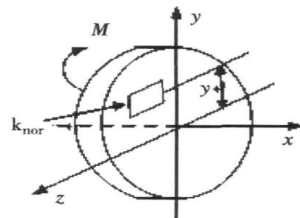


图 2 接触表面上的接触微元

收稿日期: 2008-06-26; 修订日期: 2009-03-13

基金项目: 国家 973 计划基金资助项目(2007CB210107)

作者简介: 高 锐(1983-), 男, 辽宁抚顺人, 西安交通大学硕士研究生。

如图 2 所示, 模型中的 k_{nor} 是接触面上一个微小单元的法向接触刚度, 这一参数可根据接触力学理论求得或通过参数识别获得。而 k_{rod} 是单根拉杆的等效刚度, 则:

$$k_{rodi} = \frac{EA}{l} (\Delta l + y_i) y_i \approx \frac{EA}{l} \Delta l y_i = F y_i \quad (1)$$

式中: i —拉杆编号; F —拉杆预紧力; y —转子弯曲变形引起的拉杆伸长量; Δl —拉杆预紧力引起的伸长量。因为 y 远小于 Δl , 所以略去高阶小项 y_i^2 后等效抗弯刚度 G_{eq} , 可表示为:

$$G_{eq} = \int_{A/2} k_{nor} y^2 \eta dA + \sum_{i=1}^n k_{rodi} = k_{nor} I_z \eta / 2 + \sum_{i=1}^n F y_i \quad (2)$$

式中: I_z —图 2 中轮盘接触面沿 z 轴的惯性矩; n —拉杆总数; η —接触面的轮廓面积与名义面积之比。

1.2 拉杆转子的有限元模型

根据上述拉杆转子力学模型, 建立了拉杆转子有限元模型, 如图 3 所示。在改进的有限元模型中引入了接触单元, 把拉杆转子中的接触面处理为只具有等效抗弯刚度 G_{eq} 而没有质量的接触单元, 这样燃气轮机的转子—轴承系统就由接触单元、弹性轴段单元、刚性圆盘单元和轴承单元组成。

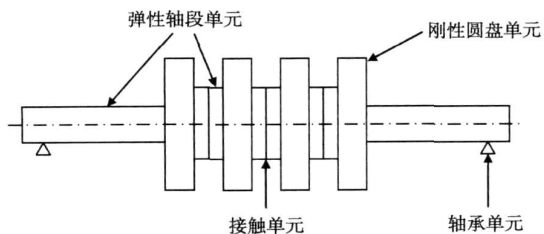


图 3 改进的有限元模型

1.2.1 弹性轴段单元

弹性轴段单元是考虑了弯曲和剪切变形、陀螺力矩和轴向力的铁木辛柯梁。任意界面的位移可以表示为 $\{q\} = [x, y, \theta_x, \theta_y]^T$, 因此弹性轴段单元的动能和弹性势能可表示为:

$$T^e = \frac{1}{2} \{\dot{q}^e\}^T ([M_T^e] + [M_R^e]) \{\dot{q}^e\} - \Omega \{q^e\}^T \times$$

$$[H^e] \{q^e\} + \frac{1}{2} I_p \Omega^2 l \quad (3)$$

$$V^e = \frac{1}{2} \{q^e\}^T ([K^e] - [K_p^e]) \{q^e\} \quad (4)$$

根据 Hamilton 原理, 运动方程为:

$$([M_T^e] + [M_R^e]) \{\ddot{q}^e\} - \Omega [G^e] \{q^e\} + ([K^e] - [K_p^e]) \{q^e\} = \{Q^e\} \quad (5)$$

式中: I_p —极转动惯量, 平动质量矩阵为:

$$[M_T^e] = [M_T^e]_0 + \Phi [M_T^e]_1 + \Phi^2 [M_T^e]_2 \quad (6)$$

转动质量矩阵为:

$$[M_R^e] = [M_R^e]_0 + \Phi [M_R^e]_1 + \Phi^2 [M_R^e]_2 \quad (7)$$

陀螺力矩矩阵为:

$$[G^e] = [H^e] - [H^e]^T = [G^e]_0 + \Phi [G^e]_1 + \Phi^2 [G^e]_2 \quad (8)$$

刚度矩阵为:

$$[K^e] = [K^e]_0 + \Phi [K^e]_1 \quad (9)$$

轴向力引起的刚度矩阵为:

$$[K_p^e] = [K_p^e]_0 + \Phi [K_p^e]_1 + \Phi^2 [K_p^e]_2 \quad (10)$$

不平衡力为:

$$\{Q^e\} = \{Q_c^e\} \cos \Omega t + \{Q_s^e\} \sin \Omega t \quad (11)$$

1.2.2 接触单元

接触单元的本质是一个抗弯弹簧和一个铰链的组合, 因此接触单元没有质量, 只有等效抗弯刚度 G_{eq} , 其动能为零, 弹性势能为:

$$V = \frac{1}{2} \{q^e\}^T G_{eq} \{q^e\} \quad (12)$$

运动方程表示为:

$$G_{eq} \{q^e\} = \{Q^e\} \quad (13)$$

式中: $\{Q^e\}$ —接触单元所受的不平衡力。等效抗弯刚度 G_{eq} 是法向抗弯刚度 k_{nor} 在接触面上的积分, 而可以通过接触面的粗糙度参数求得^{4~6}。在后面的计算中, 对于真实燃气轮机转子轮盘间的接触面的 k_{nor} , 根据制造方提供的接触表面粗糙度参数求出; 而光轴算例和一对接触圆盘算例都是假想模型, 因此其法向抗弯刚度使用参考真实燃气轮机转子参数和试算相结合的方法取得。

1.2.3 刚性圆盘单元

刚性圆盘单元的动能为:

$$T^d = \frac{1}{2} \{\dot{q}^d\}^T ([M_T^d] + [M_R^d]) \{\dot{q}^d\} - \Omega \{q^d\} \times$$

$$[G^d] \{q^d\} + \frac{1}{2} I_p \Omega^2 \quad (14)$$

根据 Hamilton 原理, 刚性圆盘单元的运动方程可以表示为:

$$([M_T^d] + [M_R^d]) \{\ddot{q}^d\} - \Omega [G^d] \{q^d\} = \{Q^d\} \quad (15)$$

式中: $[M_T^d]$ 、 $[M_R^d]$ —圆盘的质量矩阵; $[G^d]$ —陀螺力矩; $\{Q^d\}$ —圆盘所受不平衡力。

为了重点讨论转子轮盘之间的接触面, 轴承单元这里不作讨论。根据以上改进后的有限元方法, 用 FORTRAN 语言编写了相应的计算程序。

2 算例验证

2.1 光轴算例

这是一个假想模型, 分别假设光轴上具有一个

和两个接触面, 如图 4 所示。该模型实际中不可能存在, 也没有理论解, 传统有限元模型将其处理为一个整体, 即光轴, 而改进有限元模型将把接触面作为接触单元来考虑, 计算结果如表 1 所示。计算该模型的目的在于初步校验改进后的有限元模型以及其相应计算程序。

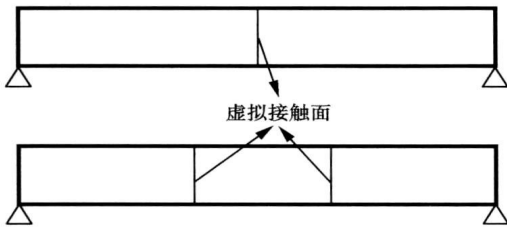


图 4 光轴算例模型

表 1 光轴算例模型计算结果 (r/min)

模态	光轴 1 接触面		光轴 2 接触面	
	传统的有限元模型	改进的有限元模型	传统的有限元模型	改进的有限元模型
1	762.181	663.864	762.181	707.278
2	764.912	700.787	764.912	710.097
3	3 042.92	3 041.65	3 042.92	2 662.38
4	3 053.76	3 052.96	3 053.76	2 671.14
5	6 831.06	6 000.43	6 831.06	6 428.64
6	6 855.18	6 273.9	6 855.18	6 460.14

根据转子动力学理论, 可以得出组合转子的刚度不大于同几何形状的整体转子, 即临界转速低于整体转子。该模型的计算结果很好地满足了这样的

表 2 一对接触圆盘算例模型计算结果

模态	临界转速阶数	ANSYS 三维有限元	传统的有限元模型	相对误差 / %	改进的有限元模型	相对误差 / %
		元模型 / r·min ⁻¹	元模型 / r·min ⁻¹		元模型 / r·min ⁻¹	
1	第一阶	3 214.80	3 341.26	3.93	3 213.26	0.05
2		3 214.80	3 341.26	3.93	3 213.28	0.05
3	第二阶	12 453.6	12 843.1	3.13	12 830.0	3.02
4		12 453.6	12 843.1	3.13	12 831.1	3.03
5	第三阶	25 405.8	26 354.4	3.73	25 374.7	0.12
6		25 405.8	26 354.4	3.73	25 377.9	0.11

由计算结果可以得出, 用改进的有限元方法计算得到的各阶临界转速都更接近于 ANSYS 三维接触有限元的计算结果。

2.3 某型真实燃气轮机转子算例

如图 6 所示, 该燃气轮机转子由 3 个主要部分组成, 压气机转子, 扭矩筒和透平转子。压气机转子

变化趋势, 定性证明了改进有限元模型及其程序的正确性。

2.2 一对接触圆盘算例

由于拉杆转子结构过于庞大复杂, 建立一个与真实结构完全相同的三维实体模型并进行计算是难以实现的。这里使用一个简化了的拉杆转子模型来定量地验证改进有限元方法及程序的正确性。转子模型如图 5 所示, 轮盘之间具有一对接触面。由于该模型没有理论解, 但只要三维有限元模型的边界条件选取得当, 即可保证计算精度, 故可用此三维模型的计算结果来验证本文的改进有限元方法及程序。

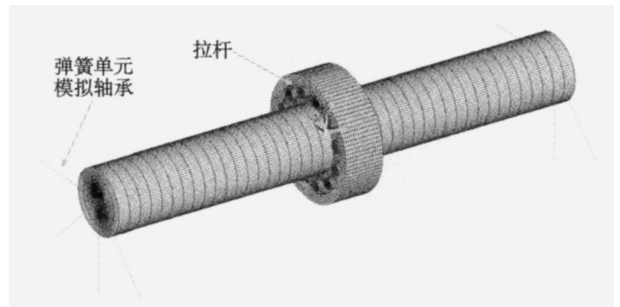


图 5 一对接触圆盘算例模型

在 ANSYS 中使用实体单元对该模型进行了三维有限元模态计算, 其中轮盘接触面使用了面接触单元(CONTA174 和 TARGE170)而拉杆预紧力的施加则使用了预紧力单元(PREIS179), 预紧力大小参考实际燃气轮机转子选取 3.43×10^6 N。支撑处使用了弹簧单元(SPRING-DAMPER14)来模拟轴承, 其它所有部分使用三维实体单元(SOLID45)。

计算结果比较如表 2 所示。

和透平转子都是通过 12 根拉杆拉紧轮盘构成的; 扭矩筒起连接两个转子以及传递扭矩的作用。

轮盘接触面之间的法向接触刚度和接触单元的等效抗弯刚度根据生产厂提供的粗糙度参数以及拉杆伸长量, 应用接触力学理论计算求得。部分接触面粗糙度参数如表 3 所示; 压气机转子中的拉杆伸长量为

11.97 mm, 而透平转子中的拉杆伸长量为 5.06 mm。

作为比较, 同时应用传统有限元方法计算了该转子的临界转速, 这时将转子作为一个连续的整体来处

理, 而不考虑接触面的影响。两个模型都真实地考虑了轴承油膜刚度和阻尼的影响以及转子剪切效应和回转力矩的影响。计算结果的比较如表 4 所示。

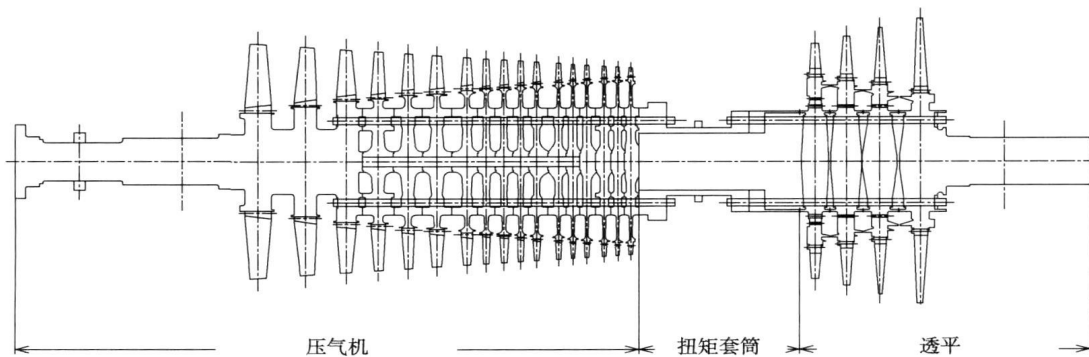


图 6 某型燃气轮机转子结构图

表 3 接触面部分粗糙度参数

表面粗糙度参数	1号接触面	2号接触面	3号接触面	4号接触面
微凸体最大半径 $R_{max}/\mu m$	5.11	4.34	6.40	5.88
微凸体平均半径 $R_a/\mu m$	1.357	1.095	1.329	1.046

表 4 某型真实燃气轮机转子临界转速计算结果

临界转速 / $r \cdot \min^{-1}$	测量值	传统的有限元模型 / $r \cdot \min^{-1}$	相对误差 / %	改进的有限元模型 / $r \cdot \min^{-1}$	相对误差 / %
一阶	1 050	1 220	16.19	1 010	3.81
二阶	2 100	2 610	24.28	2 000	4.76
三阶	3 250	3 450	6.15	3 230	0.62

由计算结果可以看出, 改进的有限元方法有效地提高了拉杆转子临界转速的计算精度。

3 结 论

根据以上计算和讨论, 可以得到以下结论:

(1) 通过以上算例, 验证了改进的有限元模型及相应计算程序的正确性。由此可见通过考虑轮盘间法向接触刚度, 能够有效地提高拉杆转子临界转速的计算精度。对某型真实燃气轮机转子, 其中一阶临界转速计算精度提高 12.38%, 二阶临界转速提高 19.52%;

(2) 接触单元的等效抗弯刚度是轮盘接触面法向接触刚度的面积分, 而接触面的法向接触刚度是由接触面粗糙度参数和拉杆预紧力共同决定的;

(3) 使用三维有限元法计算实际转子需要耗费大量的时间和人力, 工程上较少使用。故常用传统的有

限元法来计算转子临界转速, 能得到较满意的结果, 然而对于燃气轮机拉杆转子, 该方法无法考虑接触效应对临界转速的影响。本文改进的有限元模型, 不仅提高了计算精度, 而且计算时间短, 适合工程应用。

参 考 文 献:

- [1] 钟一诤, 何衍宗, 王 正, 等. 转子动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [2] ABDUL AZIZ A, BAAKLINI G Y, TRUDELL. An integrated NDE and FEM characterization of composite rotors[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4336: 43-54.
- [3] 汪光明, 饶柱石, 夏松波. 拉杆转子力学模型的研究[J]. 航空学报, 1993, 14(8): 419-423.
- [4] 饶柱石. 拉杆组合式特种转子力学特性及其接触刚度的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1992.
- [5] JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. London: Cambridge University Press, 1985.
- [6] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J P B. Contact of nominally flat surfaces[J]. Proc R Soc London, 1966, 295: 300-319.
- [7] SONG Y, HARWIGSEN C, BERGMAN J L A, et al. Simulation of dynamics of beam structures with bolted joints using adjusted iwan beam elements[J]. J Sound Vib, 2004, 273(1-2): 249-276.
- [8] SHI X, POLYCARPOU A A. Measurement and modeling of normal contact stiffness and contact damping at the meso scale[J]. ASME J Vib Acoust, 2005, 127(1): 52-60.
- [9] ANTONY S J, MORENO ATANASIO R, HASSANPOUR A. Influence of contact stiffnesses on the micromechanical characteristics of dense particulate systems subjected to shearing[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89, 214103: 1-3.
- [10] HARIRI A, ZU J W, MRAD R B. Modeling of elastic/plastic contact between nominally flat rough surfaces using an n-point asperity model[J]. ASME J Tribol, 2006, 128: 873-878.

(编辑 滨)

电容法测量蒸汽湿度的可行性研究= **Feasibility Study of the Capacitance Method for Measuring Steam Wetness**[刊, 汉]/NING De-liang, LIU Xin-quan, GAO Lei (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)LIANG Yi (Equipment Tools Subsidiary, Harbin Measuring and Cutting Tools Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150040)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. —2009, 24(3). —300~304

By combining dielectric theory with water and water steam properties, the variation tendency of the static relative permittivity of water and water steam with the change of pressure and temperature was studied and the causes of the change of water and water steam permittivity were analyzed. The research results show that the influence of temperature on water permittivity is far greater than that of the pressure while the influence of pressure on steam permittivity is stronger than that of the temperature. As the permittivity of water differs very greatly from that of steam, on the basis of the capacitance-method measurement theory, a wetness measurement experiment was performed by using a self-designed cylindrical capacitance transducer. The test results indicate that the capacitance method for measuring saturated wet steam wetness is feasible. **Key words:** permittivity, water, water steam, capacitance method

燃气轮机拉杆转子有限元模型研究及临界转速计算= **A Study of a Finite Element Model for a Gas Turbine Tie-rod Rotor and its Critical Speed Calculation**[刊, 汉]/GAO Rui, YUAN Qi, GAO Jin (College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. —2009, 24(3). —305~308

Modern gas turbine rotors mainly consist of tie-rod ones, and their forms can be classified as either central single tie rod type or circumferential multiple tie rod ones. No matter what form they assume, the tie-rod rotors are no longer of a continuous structure and the contacting surface between the wheel disks will influence the kinetic characteristics of rotors. The authors first analyzed the force bearing condition of the tie rod rotor, and then considered the influence of the contact surface rigidity on rotor kinetic characteristics. The traditional finite element method has been improved, and a corresponding calculation program, prepared. Finally, a bare shaft, a pair of contacting disk sample and the critical speed of the tie rod rotor of a certain type gas turbine were calculated. The calculation results were compared respectively with those obtained from the traditional and three-dimensional finite element method as well as the measured results, thus verifying the correctness and validity of the improved finite-element model. **Key words:** gas turbine tie-rod rotor, tie-rod rotor, critical speed, normal contact stiffness, finite element method

膜片式气动逻辑元件特性试验研究= **Experimental Study of the Characteristics of Membrane Type Pneumatic Logic Elements**[刊, 汉]/QI Hong-wei (Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), HE Ru, CHEN Lin, WEI Wei (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. —2009, 24(3). —309~312

The membrane-type pneumatic logic element under discussion is a key item in a turbocharged unit for compressor surge control and steam turbine overspeed protection. The authors have described the structure and working principle of the surge protection device. Regarding various test items, such as the response characteristics, working characteristics and pressure difference flow characteristics of the surge protection device, a detailed description was given of the test principles, methods and processes. The test results show that the response time of the surge protection device is 250 ms, the working characteristic curves agree well with the standard ones, and the actual pressure-difference flow characteristic curves at the outlet of the valve assume a variation tendency identical with that of the theoretical ones. All the characteristic tests display a good stability and repeatability. **Key words:** membrane type pneumatic logic element, surge protection device, characteristic test

燃气轮机变工况对 IGCC 系统性能的影响= **Influence of Gas Turbine Off-design Operating Conditions on the Performance of an IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) System**[刊, 汉]/CHEN Lei, ZHANG Zhong-xiao, XIE Hao (College of Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), LI Zhen-zhong (National Research Center of Power Plant Combustion Engineering Technology, Shenyang,