

带冠叶片碰撞减振机理研究

李剑钊¹, 张文平¹, 李国宾²

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 海军驻哈尔滨七〇三研究所军事代表室, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要:通过对带冠叶片边界非线性条件的研究,建立了全新的带有碰撞阻尼的叶片三维实体单元有限元模型。对计算分析与试验结果进行了对比,验证了叶片的计算模型的计算精度,进而对两只平板叶片在不同间隙、激振力幅值和频率条件下的特性进行分析,结果表明:随着叶冠间隙、激振力幅值和激振力频率的增加,叶片出现明显的频谱分量;具有碰撞条件的叶片可以抑制外力做功,叶片动应力可以通过叶冠参数的调整进行控制。

关 键 词:带冠叶片;碰撞阻尼;减振;有限元

中图分类号:TK263.3 文献标识码:A

引 言

带冠叶片是利用叶片叶冠间的摩擦和碰撞对叶片进行限幅、调频和提供阻尼减振的阻尼叶片。从减振机理看,带冠叶片可以分为两类:一类是平行四边形冠,利用静态时叶片之间的间隙,工作时相互碰撞限幅控制叶片的动应力;另一类叶冠为“Z”型冠,这类叶冠一般采用预扭安装,利用叶片的弹性扭转工作时还可提供附加“紧度”保证叶片间接触面相互挤压,当叶片振动时,接触面相互滑动消耗能量达到减振目的。

对于“Z”型叶冠,分析叶片响应时不可避免地引入摩擦力,具有摩擦阻尼的系统是一个非线性系统。长期以来,学者们对摩擦力提出了很多的数学模型,对摩擦阻尼已经开展了比较深入的研究。而以四边形冠为代表的叶片,虽然在工程中有一定的应用,但缺乏深入的理论研究作为支撑,相应的研究就更少,关于带冠叶片碰撞边界阻尼特性的研究还很鲜见。

基于碰撞条件的平板叶片减振机理,通过对叶片离散建立叶片的运动微分方程,考虑碰撞阻尼情况,建立带有碰撞阻尼的叶片有限元模型。对单只叶片特性进行了有限元分析和试验研究,还对两只

叶片不同条件下的特性进行了有限元分析,得出了有益的结论。

1 非线性弹簧阻尼碰撞模型

图 1 为研究中使用的机理模型。 M_1 和 M_2 分别代表撞击和被撞物体的质量常数; K_e 和 C_e 分别代表系统刚度和阻尼, δ 为两物体间隙; F 表示作用于撞击物体上的外力。

本研究中系统刚度 K_e 由两个串联的弹簧模化构成。其中,一个是描述 Hertz 碰撞的线性化刚度 K_c ,另外一个为 K_b ,用来表示结构弹性。系统刚度可以表示为:

$$K_e = 1 / \left[\left(\frac{1}{K_b} \right) + \left(\frac{1}{K_c} \right) \right] \quad (1)$$

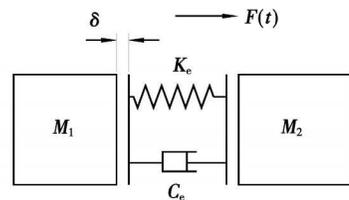


图 1 碰撞机理模型

尽管式(1)所表示的接触关系是非线性的,但还是比较接近线性。因而,系统刚度本质上具有分段线性的特性,可以利用这个特性来模拟复杂的非线性行为。

粘性阻尼可以方便地模拟叶片阻尼,其通常可以用依赖于速度和载荷的阻尼比来模拟,但正确地估计阻尼比十分困难。因此,可以选择一种模拟阻尼的途径,使得阻尼的一些参数可以通过试验和发表的试验数据估算出来,即通过阻尼函数而不是阻尼比得到阻尼,用阻尼因子和另一个函数的乘积来表示。

阻尼函数为:

$$C=D \cdot T(X_c) \tag{2}$$

式中: D —阻尼因子; $T(X_c)$ —过渡函数。

2 碰撞叶片有限元动力学方程的建立

经离散获得有限单元体的运动方程, 再将各单元集合后即可求得整个叶片的平衡方程。对碰撞部分采用碰撞阻尼单元, 考虑碰撞只在碰撞方向上产生阻尼和刚度, 碰撞单元刚度和阻尼矩阵可写为:

$$[K_{im}]^e = \begin{bmatrix} K_e & 0 & 0 & -K_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_e & 0 & 0 & K_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$[C_{im}]^e = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & -D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -D & 0 & 0 & D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

按照速度—阻尼正比假设, 并且由于哥氏力矩阵在量值上很小, 实际计算中可忽略哥氏力项的作用, 对单元进行组装可以得到叶片振动时的综合运动方程:

$$[M] \{\ddot{\delta}\} + [C_s] \{\dot{\delta}\} + [C_{im}] \{\dot{\delta}\} - [K_c] \{\delta\} + [K_0] \{\delta\} + [K_{im}] \{\delta\} = \{F\} + \{Q_c\} + \{Q_p\} \tag{5}$$

式中: $[M]$ —质量矩阵; $[C_s]$ —结构阻尼矩阵; $[C_{im}]$ —碰撞阻尼矩阵; $[K_c]$ —刚度矩阵; $[K_0]$ —初

始刚度矩阵; $[K_{im}]$ —碰撞刚度矩阵; $\{F\}$ —节点力; $\{Q_c\}$ —离心力; $\{Q_p\}$ —气动力。

3 数值仿真

为揭示带冠碰阻叶片的振动特性, 对单只和两只平板叶片的特性进行了详细的研究。

3.1 平板叶片减振机理试验

为验证有限元模型的计算精度, 设计了叶片减振机理试验件。平板叶片主要特征: 高度 170 mm, 宽度 25 mm, 厚度 3 mm, 叶片距顶部 12 mm 处打孔, 配 8 mm 螺栓、螺母和垫片。

叶片减振机理试验装置包括信号发生器、功率放大器、激振器、电涡流传感器、前置放大器和数据采集分析系统等, 如图 2 所示。

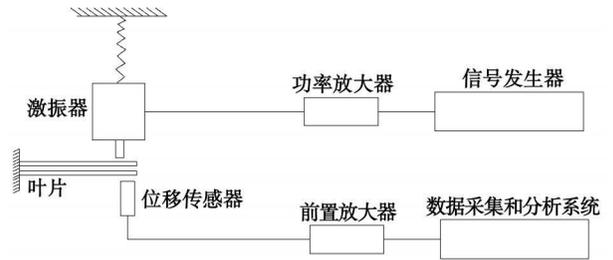


图 2 叶片减振机理试验装置

对图 3 中所示的数据进行包络分析, 得到波形的包络线, 拟合得到单只叶片的自由衰减曲线, 进而得到单只叶片自由振动的阻尼比为 0.001 7, 频谱分析得到单只叶片的一阶固有频率为 67.93 Hz。

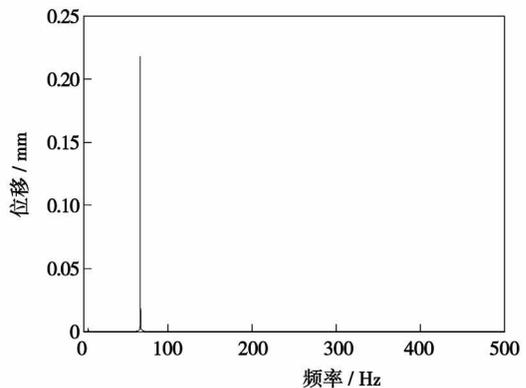
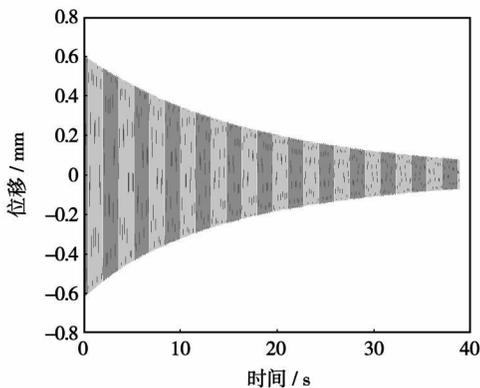


图 3 单只叶片自由衰减振动时域、频域波形

3.2 单只平板叶片的振动特性分析

按照平板叶片试验件的主要特征建立几何模型, 在有限元离散时, 为减少后续非线性分析的计算

量, 选择了 20 个单元和 120 个单元两种离散方案。计算结果与试验测试比较表明, 两种模型计算精度相当, 如表 1 所示。

表 1 两种模型的平板叶片固有频率计算

阶数	试验值	模型 1		模型 2	
		计算值	误差/%	计算值	误差/%
1	67.93	68.08	0.22	68.05	0.18
2	—	507.11	—	504.86	—
3	—	550.07	—	542.34	—

为研究单只叶片在不同激振条件下的受迫振动特性, 对多种激振条件进行了计算分析。结果表明, 单只叶片的响应取决于激振频率, 相同激振条件下, 叶片响应幅值依赖于激振力幅值。

3.3 两只平板叶片的振动特性分析

为研究两只叶片在不同激振条件下的振动特性, 取上节相同的叶片两只, 将被激振的叶片称为受

迫叶片, 将被碰撞的叶片称为单侧自由叶片。对多种激振条件进行了计算分析。激振条件为: 叶冠间隙 0、0.05、0.1、0.2 和 0.5 mm; 激振力分别为 2、5、8 和 10 N; 激振频率分别为 30、50 和 140 Hz。计算的部分结果如图 4~图 7 所示。

对叶片振动特性计算分析表明: 受迫叶片(叶片 1)振动响应随激振力的增加而增加, 两者呈线性关系, 但较单只叶片振动幅值有较大的下降; 单侧自由叶片(叶片 2)响应也随激振力增加而增加, 但二者不再是线性关系, 其响应明显小于受迫叶片, 如图 8 所示。计算结果还表明, 随着叶冠间隙、激振力幅值和激振力频率的增加, 叶片出现明显的频谱分量。这表明, 随着上述条件的增大, 能量分散也表现明显。

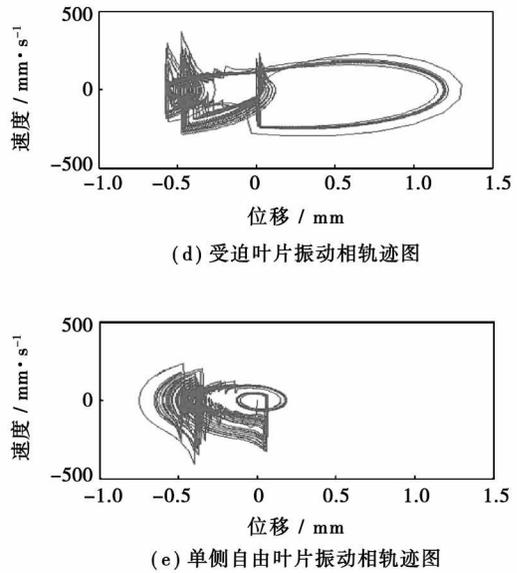
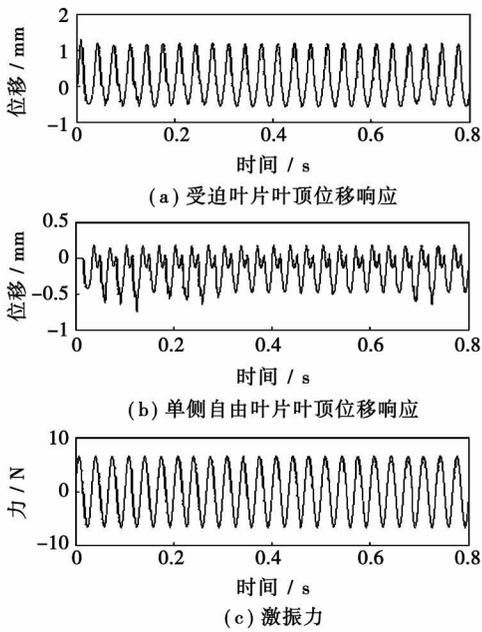


图 4 叶片振动响应及相轨迹图 ($\delta=0.05 \text{ mm}$, $f=8 \text{ N}$, $\omega=30 \text{ Hz}$)

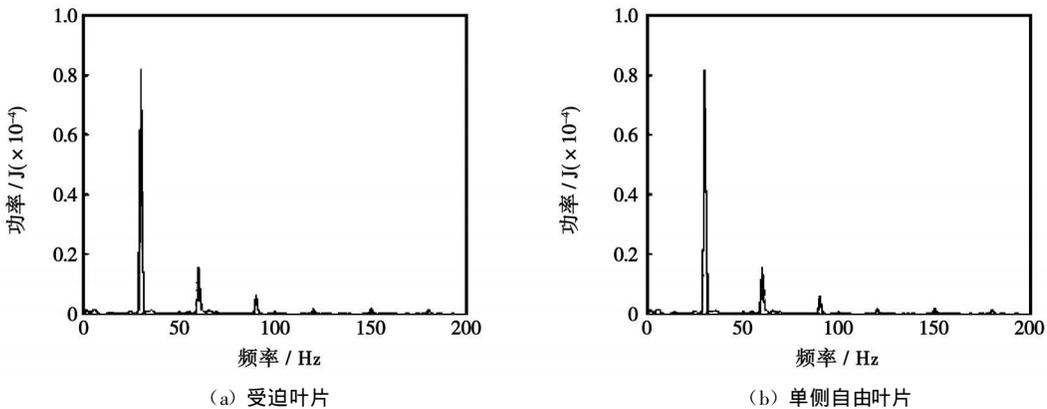


图 5 叶片振动频谱图 ($\delta=0.05 \text{ mm}$, $f=8 \text{ N}$, $\omega=30 \text{ Hz}$)

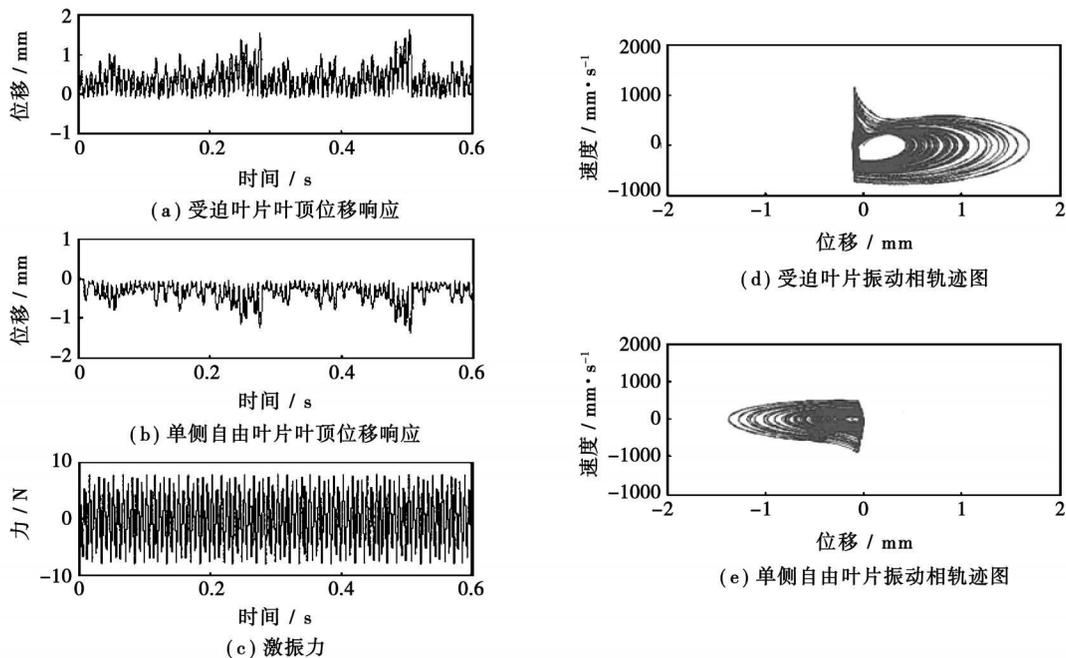


图 6 叶片振动响应及相轨迹图 ($\delta=0.05 \text{ mm}$, $f=8 \text{ N}$, $\omega=140 \text{ Hz}$)

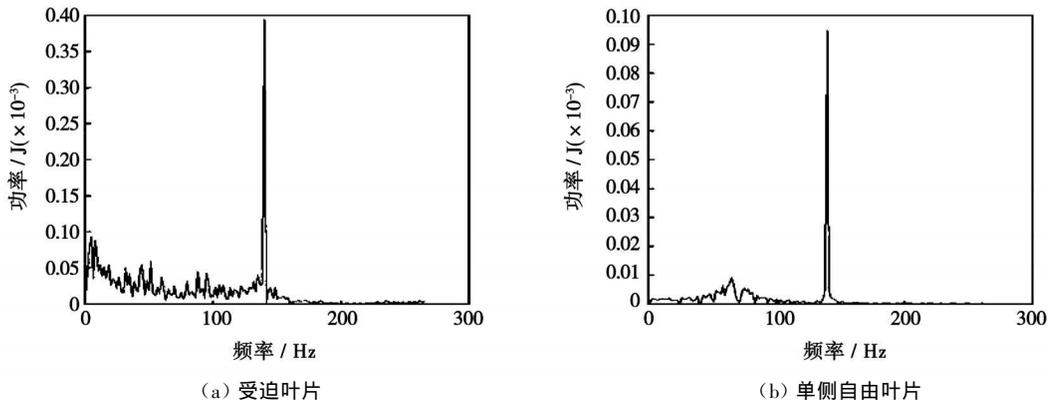


图 7 叶片振动频谱图 ($\delta=0.05 \text{ mm}$, $f=8 \text{ N}$, $\omega=140 \text{ Hz}$)

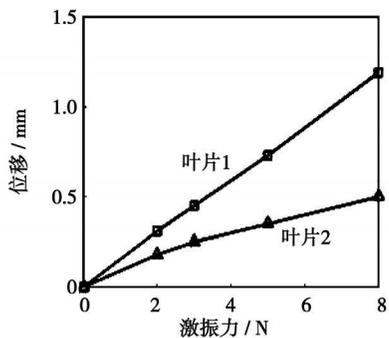


图 8 叶片位移响应与激振力关系曲线 ($\delta=0.05 \text{ mm}$, $\omega=30 \text{ Hz}$)

发现两者外力做功能力随激振力幅值的增大而增大; 相同激振力条件下, 外力对两只叶片做功小于对单只叶片做功, 如表 2 所示。

表 2 外力做功情况表

激振力幅值 / N	激振力频率 / Hz	外力做功/J		
		单只叶片	两只叶片间隙/mm	
			0.05	0.20
5	30	0.086	0.081	0.085
	70	0.105	0.10	0.104
	140	0.11	0.102	0.108
10	30	0.345	0.31	0.33
	70	0.43	0.39	0.413
	140	0.44	0.32	0.41

3.4 碰撞减振能量分析

对单只叶片和两只叶片在相同时间内、不同外力幅值和激振频率条件下外力的做功进行了计算。

由上述定量分析可以看出, 碰撞条件可以抑制

外力做功。分析其原因,是由于叶片发生碰撞,导致叶片的振动相位不断地发生变化,不断地发生叶片振动与外力反向的情况,从而通过阻止外力功的输入达到减振的目的。

4 结 论

本文通过对带冠叶片边界非线性条件的研究,建立了全新的带有碰撞阻尼的三维实体单元的叶片有限元模型,并对碰撞叶片减振机理进行了有限元计算分析,主要结论如下:

(1) 对单只叶片的固有频率计算分析与试验结果对比表明,叶片的计算模型具有较好的计算精度。

(2) 对两只平板叶片在不同间隙、激振力幅值和频率条件下的特性分析,结果表明:单侧自由叶片响应随激振力增加而增加,但二者不再是线性关系;

随着叶冠间隙、激振力幅值和激振力频率的增加,叶片出现明显的频谱分量。

(3) 通过对单只、两只不同数量叶片在不同条件下的分析可以得出结论:具有碰撞条件的叶片可以抑制外力做功,外力做功能力随着叶片间隙的减少而减少,叶片动应力可以通过叶冠参数的调整进行控制。

参考文献:

- [1] 陈予恕. 非线性振动[M]. 天津:天津科学技术出版社, 1983.
- [2] 胡海岩. 分段光滑机械系统动力学的进展[J]. 振动工程学报, 1995, 8(4): 331—341.
- [3] LEE T W, WANG A C. On the dynamics of in term it tent-motion mechanisms. Part I: Dynamic model and response[J]. Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design, 1983, 105: 534—540.

(编辑 辉)

新技术、新工艺

电站管子附件密封性评定的方法

据《Тяжелое Ма шиност роение》2008年6月号报道,强度和密封性被列为对管子附件最重要的要求,因为强度和密封性决定了管件的可靠性和寿命。

在运行的附件技术检查时,利用3种基本方法评定管道附件对于外部介质和关闭构件的密封性:

(1) 目视检查,有没有汽和水气漏泄情况,这种检查达不到安全性要求,只能查到大的漏泄。

(2) 根据工艺检测仪表指示的检查。仪表的指示只能给出有关整个工艺系统密封性的情况,通常不能发现局部的漏泄处,在存在许多旁通管线、法兰连接时更是如此。

(3) 根据仪表方法—探漏法评定密封性。质谱仪分析法、荧光法、卤化法和起泡法应用的较为广泛,但所有这些都属于压缩法,并且首先要求设备停止运行来进行检查,然后使用特定材料以便确定漏泄。

作为一种可供选用的方法——AKT(音响接触探漏)法。该方法的实质在于记录并评定被检查对象壁内传播应力波的参数。波由漏泄产生,被探漏器记录的信号由音响辐射的信号模拟。

研究表明,基于超声波噪声分析的音响接触探漏法不仅可完成对不密封性定性的评定,而且还可确定漏泄量,这是一种实用而可靠的评定管件密封性的方法。

(吉桂明 供稿)

压缩机中间抽气结构优化设计=Optimized design of an Intermediate Bleeding Structure for a Compressor[刊, 汉]/JI Chun-jun, LIU Feng-qing (College of Energy Source and Power, Dalian University of Science and Technology, Dalian, China, Post Code: 116023), YU Dao-gang (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 591 ~ 594

Various methods for the optimization design of an intermediate bleeding structure for a centrifugal compressor were studied by utilizing numerical calculation techniques. A volute type was adopted for the intermediate bleeding structure to guarantee the circumferential uniformity of flow before and after the bleeding. A great deal of optimization design work has been done with respect to the volute and bleeding diaphragm type as well as its height to meet the need for a proper bleeding flow rate, and also to minimize the flow losses in the whole flow field. The numerical calculation results show that the bleeding structure thus designed can simultaneously meet the requirements for performance and bleeding of the compressor unit. **Key words:** intermediate bleeding, numerical simulation, bleeding volute, optimization

轴流压气机氦气和空气工质相似问题研究=A Study of Similarity Problems Concerning the Working Media Helium and Air in an Axial-flow Compressor[刊, 汉]/ZHU Rong-kai, ZHANG Jian, ZHENG Qun (College of Material Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), ZOU Ji-guo (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 595 ~ 600

With the axial speed of a helium axial compressor being less than or equals to 200 m/s, under the condition of identical geometric dimensions being guaranteed and with the first stage in the HP section serving as a simulator, the parameters of the stage can be given as follows: helium flow rate 4.72 kg/s, inlet pressure 1.0253×10^6 Pa and inlet temperature 35.5 °C. When air instead of the helium was used to simulate the first stage of HP section in the helium compressor, research was performed on a variety of problems, such as the movement and kinetic incomplete similarity caused by the difference of the two working media helium and air in such physical parameters as density, viscosity and adiabatic index. In addition, a contrast analysis was also conducted of the establishment of similarity criteria by adopting respectively a definite physical quantity method and a differential equation approach, comparing the difference between the working media helium and air as well as its influence on the choice of similarity criteria. Pertinent reasons for the onset of deviations were analyzed and the similarity criteria for simulating a helium compressor with the use of air were identified as Sr , Re and Eu . The air simulation parameters corresponding to the design operating condition of the helium compressor were calculated. A contrast analysis of CFD (computational fluid dynamics) calculation results show that the simulation effectiveness is satisfactory. The foregoing research can provide a theoretical basis for conducting helium compressor tests. **Key words:** similarity criterion, helium, axial-flow compressor, aerodynamic performance

带冠叶片碰撞减振机理研究=A Study of Collisional Vibration-abatement Mechanism of Shrouded Blades[刊, 汉]/LI Jian-zhao, ZHANG Wen-ping (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), LI Guo-bin (Naval Representative Office Resident at CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 601 ~ 605

Through a study of non-linear boundary conditions of shrouded blades, established was a completely new three-dimensional entity-unit finite element model for the blades featuring collision damping. Through a calculation analysis and a comparison of test results, the computation accuracy of the model in question has been verified, and the characteristics of two flat blades analyzed under the condition of different clearances, exciting force amplitudes and frequencies. The ensuing results show that with an increase of the shroud clearance, exciting force amplitude and frequency, the blades exhibit a conspicuous spectral component. The blades displaying collision conditions can suppress external forces to do work, making it possible to control the dynamic stress of the blades by adjusting the shroud parameters. **Key words:** shrouded blade, collision damping, vibration abatement, finite element