

大型离心压缩机转子系统结构参数优化设计

戴继双^{1,2}, 马 辉¹, 孟 磊², 闻邦椿¹

(1. 东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 沈阳鼓风机集团有限公司, 辽宁 沈阳 110142)

Optimization Design of Structural Parameters of Rotor System in a Large Centrifugal Compressor

DAI Ji - shuang^{1,2}, MA Hui¹, MENG Lei², WEN Bang - chun¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Shenyang Blower Works Group Co., Ltd., Shenyang 110142, China)

摘要:以某压缩机中压缸转子系统为研究对象, 研究其结构参数优化设计问题. 以转子系统弯曲振动的前二阶临界转速为目标函数, 转轴的部分长度和直径作为设计变量, 建立转子系统的有限元优化模型. 以 ANSYS 作为设计平台, 对其转子结构进行参数优化设计. 研究结果可为压缩机转子系统的设计和改进行提供理论依据.

关键词:大型离心压缩机; 转子系统; ANSYS

中图分类号: TH122

文献标识码: A

文章编号: 1001 - 2257(2009)08 - 0024 - 03

Abstract: By taking a middle pressure cylinder of a certain large centrifugal compressor as the research object, optimized design of the rotor structure parameter is performed. FEM optimal model based on vibration performance is built by taking the first two critical speeds as object functions, part lengths and diameters of shaft as design variables. Parameter optimization design is carried out by ANSYS. All this research results will present a theoretical basis for design and improvement of compressor rotor systems.

Key words: large centrifugal compressor; rotor system; ANSYS

0 引言

对超大型离心压缩机转子系统进行动态优化设计

计, 预测和判别转子系统的动力可靠性, 从而确保离心压缩机转子系统能够安全可靠、长周期稳定运转, 具有十分重要的理论和实际意义. 通过参数优化设计, 可以为压缩机组提供技术条件和安全保障, 并可以进一步提升大型离心压缩机的产品质量和设计水平. 国内外许多学者采用多种方法对转子系统进行了优化设计^[1-7].

1 转子系统的优化尺寸及有限元建模

1.1 转子系统的优化尺寸

为了达到优化设计目的, 一般可以改变转子系统的设计参数, 如直径、跨度、质量分布、选材、支承刚度以及阻尼器等. 然而, 在许多情况下, 转子的结构参数并不是单纯由转子动力学要求决定的. 例如, 压缩机、压气机与叶轮等转子的直径尺寸、质量分布和跨度等受到产品总体性能、气动设计要求的制约, 不能随意改变.

某中压缸转子系统如图 1 所示, 由于气动设计的要求, 其中各级叶轮及其轴套部分, 不允许调整, 和轴承配合处轴段, 由于轴承制约也不可调整. 其中可调轴段如图 1 所示, 轴段长度从 $l_1 \sim l_5$, 直径从 $d_1 \sim d_5$. 考虑到联轴器作用, 分别在两端添加集中质量.

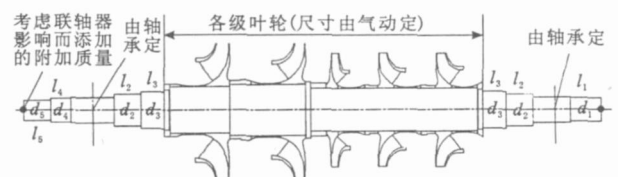


图 1 优化中压缸转子系统

收稿日期: 2009 - 03 - 17
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50805019); 教育部新教师基金资助项目 (200801451009)

1.2 转子系统有限元建模

采用了梁单元来模拟转轴,如图2所示.考虑到实际转子系统中,轴向变形相对于弯曲变形和扭转变形很小,可以忽略不计,因此,把两端节点的位移看作梁单元的广义坐标 u_s .

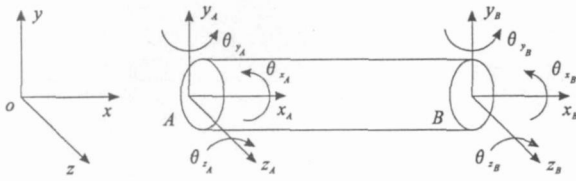


图2 梁单元有限元模型

$$u_s = [y_A \quad z_A \quad y_A \quad z_A \quad x_B \quad y_B \quad y_B \quad z_B] \quad (1)$$

设 M 为轴和叶轮的质量矩阵; D 为转子轴承阻尼和陀螺力矩的阻尼矩阵; K 为整体刚度矩阵; Q 为合外力向量; U 为位移向量,整个转子系统的动力学模型为:

$$M\dot{U} + D\dot{U} + KU = Q \quad (2)$$

2 转子系统结构参数优化设计

2.1 选择优化方法

ANSYS 软件采用了一系列的优化工具,以提高优化过程的效率和计算的精度.这里采用子问题逼近法,来对中压缸转子系统进行动态优化设计.

2.2 确定优化目标函数

目标函数是一项设计所追求指标的数学反映,因此对它最基本的要求是能够评价设计的优劣,同时必须是设计变量的可计算函数.

根据转子系统的性能要求,确定优化的目标函数.大型离心压缩机动态优化设计有如下目的:

- 调整转子系统的临界转速,使机组的工作转速在一定范围内避开转子系统的临界转速.
- 选择最佳阻尼器参数,保证转子系统平稳地通过各低阶的临界转速,在给定工况下可靠运行.
- 通过对转子结构的修改,使得转子系统在其工作转速下振动位移最小.

转子系统的动力特性要求:转子动力学性能有合理的临界转速分布,因为激励频率落在转子的临界转速附近(频率禁区)会造成共振问题.只有转子系统的额定转速能避开临界转速,其额定转速有较好的不平衡响应特性,能使响应量满足预定的要求.

优化目标函数为转子系统的前二阶临界转速,
《机械与电子》2009(8)

约束变量考虑到节省材料,设 m_i 为转子重量, $m_{il} < m_i < m_{iu}$ ($i = 1, 2, \dots, s$), m_{il} 和 m_{iu} 分别为约束变量的下限和上限; d_i, l_i 为转子系统各段转轴直径和长度, $d_{il} < d_i < d_{iu}$, $l_{il} < l_i < l_{iu}$ ($i = 1, 2, \dots, s$), d_{il}, l_{il} 及 d_{iu}, l_{iu} 分别为设计变量的下限和上限; j 为优化设计目标函数值;带约束的多目标函数优化设计问题可表示为:

$$j = f_j(d_i, l_i, m_i) \quad (i = 1, 2, 3 \dots)$$

$$m_{il} < m_i < m_{iu}$$

$$s.t. \quad d_{il} < d_i < d_{iu}$$

$$l_{il} < l_i < l_{iu}$$

(3)

2.3 确定设计变量

设计变量是能影响设计质量或结果的可变参数,一个优化设计方案是用一组设计参数的最优组合来表示的.设计变量的个数就是优化问题的维数.选图1的7个轴段长度和直径为设计变量,考虑到实际情况,转轴的结构尽量对称,因此在这里选择2个轴段尺寸相同.故设计参数一共10个, $l_1 \sim l_5$ 和 $d_1 \sim d_5$.考虑到结构的工艺性,选取设计参数的初值和变化范围,如表1所示.

表1 设计变量初值及取值范围

设计变量	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
初值	0.25	0.23	0.2	0.18	0.23
取值范围	0.25~0.33	0.23~0.28	0.20~0.24	0.18~0.2	0.23~0.28
设计变量	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
初值	0.21	0.28	0.35	0.24	0.18
取值范围	0.21~0.23	0.28~0.30	0.35~0.37	0.24~0.26	0.18~0.195

2.4 确定约束条件

约束条件也称为约束函数或设计约束,它是设计变量间或设计变量本身,应该遵循的限制条件的数学表达式.使用转子重量作为约束变量, $m_{il} < m_i < m_{iu}$ ($i = 1, 2, \dots, s$),在这里取 $m_{il} = 7600 \text{ kg}$, $m_{iu} = 8000 \text{ kg}$.

2.5 根据优化结果确定优化参数

在前面模型简化基础上,编制参数化命令流程,求解临界转速,以 ANSYS 作为优化平台,使用子问题逼近法(零阶法)进行计算,具体步骤如下:

a. 生成分析文件.内容包括参数化建立模型、求解、参数化提取结果及建立优化进程中的参数,准备分析文件.

b. 建立优化过程中的参数.将表1中设计变量输入,取目标函数为二阶临界转速差异,预期的临界转速一阶为 $f_{10} = 34 \text{ Hz}$,二阶为 $f_{20} = 117 \text{ Hz}$,优化

时模型的前二阶固有频率为 f_1, f_2 , 目标函数为 $TVOL = |f_1 - f_{10}| + |f_2 - f_{20}|$, 将此表达式输入。

c. 进入优化设计模块, 指定分析文件。

d. 声明优化变量, 5 个轴段长度和 5 个轴段直径 $l_1 \sim l_5, d_1 \sim d_5$ 为设计变量。第 i 次优化时转子的质量 m_i , 设为状态变量。

e. 选择优化工具或方法, 选取子问题逼近法。

f. 指定优化循环控制方式。

g. 进行优化分析。

经过 47 次寻优, 求得最优解如表 2 所示, 各变量在优化过程中的变化情况, 如图 3 所示。

表 2 优化的结果

变量名称 (m)	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
数值	0.280 9	0.277 9	0.214 4	0.181 9	0.278 7
变量名称 (m)	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
数值	0.229 8	0.296 0	0.350 8	0.257 6	0.182 9
变量名称	一阶临界转速 ($r \cdot \min^{-1}$)	二阶临界转速 ($r \cdot \min^{-1}$)	转子质量 (kg)	目标函数	
数值	37.74	116.23	7 868	4.515	

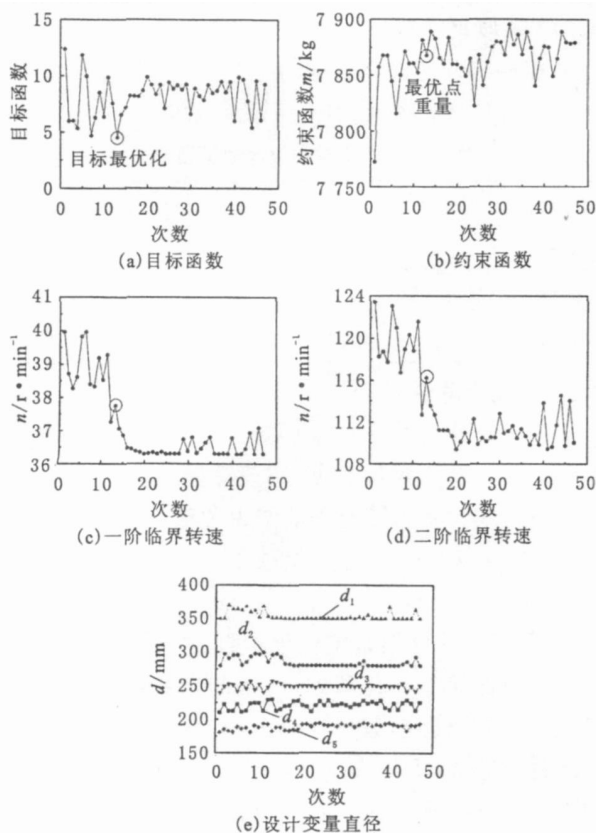


图 3 优化过程

由图 3 的曲线图, 可以看到在优化迭代的过程中, 目标函数在 4 ~ 13 之间波动, 取目标最小值 4.515 作为最优设计; 约束函数的变化波动较大, 二阶临界转速都是逐渐减小, 最终在某个值附近做微小波动; 而设计变量直径, 在前 15 次优化时波动较大, 在后面则趋于平缓, 最终也是在某个值附近做微小波动。根据表 2 的尺寸, 考虑到工艺以及密封等一些其它方面的限制, 对转子系统各优化轴段进行细微调整, 最终确定的各轴段如图 4 所示。

小波动; 而设计变量直径, 在前 15 次优化时波动较大, 在后面则趋于平缓, 最终也是在某个值附近做微小波动。根据表 2 的尺寸, 考虑到工艺以及密封等一些其它方面的限制, 对转子系统各优化轴段进行细微调整, 最终确定的各轴段如图 4 所示。

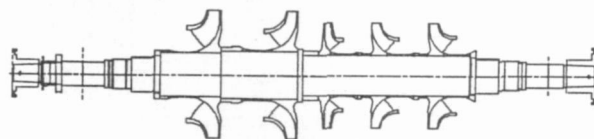


图 4 优化的转轴结构

3 结束语

通过对压缩机转子系统进行参数优化设计, 可以在满足系统功能的条件下, 确定部分轴段的长度和直径, 从而使得转子结构配置得到最优; 通过优化设计编制参数化程序, 提高了转子系统设计效率和设计质量。

参考文献:

- [1] Chen T Y, Wang B P. Optimal design of rotor - bearing systems with eigenvalue constraints[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115: 256 - 260.
- [2] Shiau Ting Nung, Hwang Jon Li. Minimum weight design of a rotor bearing system with multiple frequency constraints[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1988, 110: 592 - 599.
- [3] Shiau Ting Nung, Hwang Jon Li. Optimum weight design of a rotor bearing system with dynamic behavior constraints[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1990, 112: 454 - 462.
- [4] Hwang Lin Yih, Lin A, Cheng Sheng. Optimal weight design of rotor systems with oil - film bearings subjected to frequency constraints[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001, 37(10): 777 - 798.
- [5] 姚学诗. 大型汽轮发电机组转子——支承系统动态优化设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.
- [6] 姚学诗, 周传荣. 转子系统动力学优化设计[J]. 发电设备, 2003, (5): 18 - 21.
- [7] 黄太平, 罗贵火. 转子系统动力学优化设计[J]. 航空动力学报, 1994, 9(2): 113 - 116.

作者简介: 戴继双 (1962 -) 男, 安徽蚌埠人, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为大型压缩机、核泵系统化设计; 马辉 (1978 -) 男, 河北安平人, 讲师, 研究方向为转子动力学及故障诊断。