

双盘转子系统优化算法与试验

黄晶晶¹, 郑龙席¹, 刘钢旗¹, 梅庆²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所

航空发动机振动技术航空科技重点实验室, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 为了讨论不同优化算法的效果差异,利用有限元分析技术,针对典型 1-0-1 支承方案的双盘转子系统进行建模仿真,在分析其动力学特性的基础上,联合多学科优化软件 ISIGHT,将两转盘位置作为优化变量,以 1 阶临界转速在 10% 内的变化为约束条件,采用不同的优化算法:进化算法(EVOL)、多岛遗传算法(MIGA)、邻域培植遗传算法(NCGA)、第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)以及 Pointer 方法,最小化过 1 阶临界转速时两转盘的最大振幅,得到两转盘的最优位置.在高速柔性模拟转子试验器上进行了瞬态试验,结果表明,NSGA-II 只需要计算 240 个点,就可以使两转盘振幅分别下降 76.94% 和 67.42%.因此,NSGA-II 是最适合该类转子系统的优化方法.

关 键 词: 双盘转子; 优化算法; 多目标优化; 第二代非支配排序遗传算法; ISIGHT 软件

中图分类号: V231; O347.6

文献标志码: A

Optimization algorithm and experiment of a two-disk rotor system

HUANG Jing-jing¹, ZHENG Long-xi¹, LIU Gang-qi¹, MEI Qing²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Aviation Key Laboratory of Aero-engine Vibration Technology,

China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: In order to analyze the performance difference of several optimization algorithms, a model of two-disk rotor system with typical 1-0-1 support scheme was established and the dynamic characteristics were analysed by finite element analysis technology. On this basis, the two-disk rotor system model was integrated to the multidisciplinary design optimization software ISIGHT. The positions of the two disks were selected as the optimization variables, the first order critical speed with the variation range of 10% was set as the constraint, and the optimization objective was to minimize the amplitudes of the two disks crossing the first order critical speed with several different algorithms including evolutionary optimization (EVOL), multi-island genetic algorithm (MIGA), neighborhood cultivation genetic algorithm (NCGA), non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) and Pointer. The transient experiment was carried out on a high-speed flexible rotor mockup. Experimental results indicated that NSGA-II made the two disks' amplitudes decreased 76.94% and 67.42% respectively with the calculation of 240 points. It can be concluded that NSGA-II was the best optimization algorithm for the rotor system of this type.

Key words: two-disk rotor; optimization algorithm; multi-objective optimization; non-dominated sorting genetic algorithm II; ISIGHT software

高速旋转机械由于质量不平衡等因素很容易产生较大振动现象,如不加以控制,则会因为振动过大造成机器损伤或严重破坏事故^[1]. 如何在设计阶段对转子系统动力学特性进行优化,保证投入生产之后能够具有较高的安全性和良好的经济性等,国内外研究人员在这方面进行了大量的研究^[2-13]. 国外 Lee 和 Choi 基于增益拉格朗日乘数法对柔性转子轴承系统进行优化设计,使其质量最小^[2]. Pugachev 使用基于梯度的优化方法对一个典型涡轮转子系统的几何尺寸进行了优化,减少了转子系统的质量^[3]. Choi 和 Yang 运用免疫遗传算法对转子-支承系统进行了多目标优化设计,最小化轴承总质量和支承外传力^[4]. 姚学诗等使用信赖域法对大型汽轮发电机组进行了转子动力学优化设计,使临界转速与设定值差距最小^[11]. 于瑾等使用 ANSYS 软件中的共轭梯度法对转子系统进行了优化设计研究,使前 3 阶振型变化最小^[13]. 以上国内外学者在优化设计中往往只采用一种优化算法,面对种类繁多的优化算法,怎样选择适合实际问题的优化算本身就是一个难点. 其次,上述文献中的优化设计参数(优化目标、设计参数和约束条件)多为预先给定,缺少优化变量和优化目标之间影响关系的分析. 最后,关于转子优化研究往往只要理论上收敛就认为得到优化结果,并没有讨论该优化结果是否为现实最优解,缺乏试验验证这一重要环节.

本文以典型 1-0-1 支承结构下双盘转子系统为研究对象,通过有限元分析软件 ANSYS 对双盘转子进行了动力特性分析,借助多学科优化软件 ISIGHT 以两转盘过 1 阶临界转速时的振幅均最小为优化目标,1 阶临界转速控制在 10% 的范围内为约束条件,采用不同的优化算法得到了两转盘的最佳位置,并在该高速柔性模拟转子试验器上进行了瞬态试验,对比不同优化算法的优化效果,为优化研究中如何选取优化算法提供了参考.

1 双盘转子系统建模与动力特性分析

在解决一个优化设计问题时,首先要建立动力学模型,分析其动力学特性. 双盘转子系统的动力学模型如图 1 所示. 该双盘转子系统由一根转轴、两个转盘和两个轴承组成,支承刚度 $K_1 = K_2 = 5.0 \times 10^6 \text{ N/m}$; 支承处的等效阻尼 $C_{e1} =$

$C_{e2} = 200 \text{ N/(m/s)}$; 转盘 1 直径 $D_1 = 0.076 \text{ m}$, 厚度 $H_1 = 0.019 \text{ m}$, 质量 $m_1 = 0.607 \text{ kg}$; 转盘 2 直径 $D_2 = 0.075 \text{ m}$, 厚度 $H_2 = 0.018 \text{ m}$, 质量 $m_2 = 0.796 \text{ kg}$; 转轴的直径 $d_1 = 0.009 \text{ m}$; 转轴总长 $L = 0.4585 \text{ m}$, 其中 $L_2 = 0.0355 \text{ m}$, $L_3 = 0.114 \text{ m}$, $L_4 = 0.1485 \text{ m}$, $L_5 = 0.109 \text{ m}$, $L_6 = 0.0515 \text{ m}$. 转轴转接段的直径 $d_2 = 0.025 \text{ m}$, 转接段的长度 $L_1 = 0.034 \text{ m}$. 转盘 1 的极转动惯量为 $4.41 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 直径动惯量为 $2.39 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; 转盘 2 的极转动惯量为 $4.14 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 直径动惯量为 $2.22 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. 转轴及转接段的材料密度为 7900 kg/m^3 , 转盘的材料密度为 8200 kg/m^3 , 弹性模量为 $2.07 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 泊松比为 0.3.

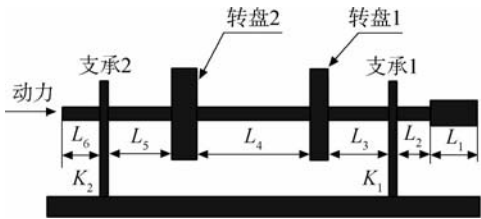


图 1 双盘转子系统的动力学模型
Fig. 1 Dynamic model of two-disk rotor system

利用有限元分析软件 ANSYS 建立模拟双盘转子系统的有限元模型,对双盘转子系统进行临界转速和模态分析,转子临界转速的 Campbell 图如图 2 所示,得到 1 阶临界转速 $n_1 = 2925.457 \text{ r/min}$.

瞬态动力学分析(亦称时间历程分析)是用于确定承受任意的随时间变化载荷结构的动力学响

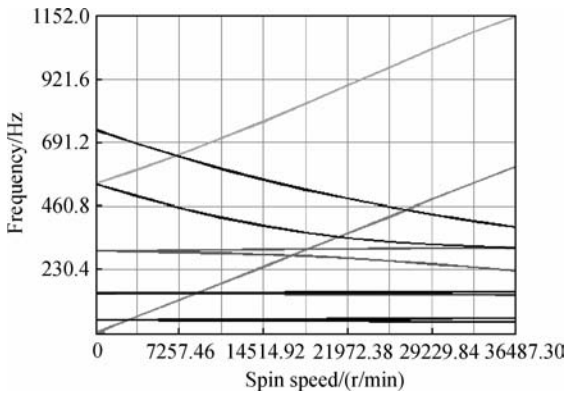


图 2 双盘转子系统 Campbell 图
Fig. 2 Campbell diagram of the two-disk rotor system

应的一种方法^[14]. 计算该模拟转子瞬态响应时, 采用完整的系统矩阵(完全法, full), 给转盘1添加不平衡量为 $25.5 \text{ g} \cdot \text{mm}$, 角度为 195° , 转盘2添加不平衡量为 $17 \text{ g} \cdot \text{mm}$, 角度为 57° , 设置加速度为 $380 \text{ r}/(\text{min} \cdot \text{s})$, 使用恒定的平均值加速度积分算法求解瞬态方程. 随着转速的上升, 采用变积分时间步长 Δt , 在 $0 \sim 4 \text{ s}$ 时间段内, Δt 为 0.01 s ; $4 \sim 6 \text{ s}$ 时间段内, Δt 为 0.005 s ; $5 \sim 6 \text{ s}$ 时间段内, Δt 为 0.003 s ; $6 \sim 9 \text{ s}$ 时间段内, Δt 为 0.0001 s , 进行瞬态响应分析, 结果如图3、图4所示.

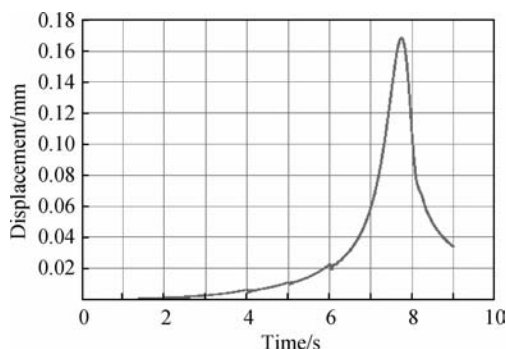


图3 转盘1的瞬态响应曲线

Fig.3 Transient response curve of disk 1

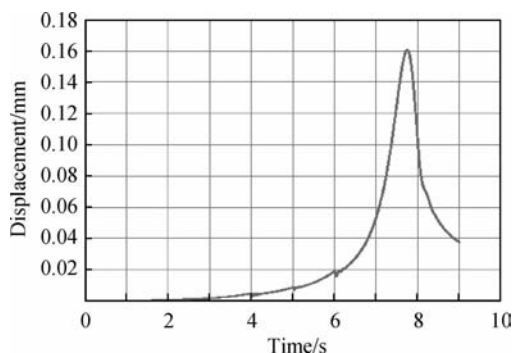


图4 转盘2的瞬态响应曲线

Fig.4 Transient response curve of disk 2

由图3、图4可见, 两转盘水平方向振动一直随着运行时间而增大, 即随着转速的升高而增加, 运行时间为 7.7 s 时, 升速达到 $2926 \text{ r}/\text{min}$ 时, 转盘1最大振幅为 0.1682 mm , 转盘2最大振幅为 0.1604 mm .

2 瞬态动力学优化设计

2.1 优化目标、优化变量以及约束条件的确定

优化目标: 减小双盘转子系统的整体振动, 不平衡响应和支承外力应该尽量小, 从而避免由于振动大带来的危害, 因此把两个转盘过1阶临界

转速时的振幅(a_1 和 a_2) 作为优化目标, 使其最小, 即 $\min: a_1$ 和 a_2 .

优化变量: 即双盘转子系统优化中可以调整的参数, 如支承刚度和阻尼、支承的位置、轴段的尺寸、转盘的位置以及转盘的几何尺寸等, 由于现有试验器的限制, 此次研究中, 只考虑转盘的位置(P_1 和 P_2) 对双盘转子系统振动的影响, 即 $\text{var}: P_1$ 和 P_2 .

约束条件: 在柔性转子转子动力学优化设计中, 临界转速可以作为约束条件, 使工作转速与临界转速存在一定的裕度. 基于这样的思路, 此次双盘转子系统优化将1阶临界转速控制在10%的变化范围内, 即 $2632 \text{ r}/\text{min} \leq n_1 \leq 3217 \text{ r}/\text{min}$.

对双盘转子系统进行优化的过程中, 20世纪90年代初一般采用计算-修改-再计算这一反复步骤, 浪费了大量的人力物力, 为避免设计过程的盲目性, 人们目前广泛采用灵敏度分析的方法, 即先找出动态特性对哪些参数的变化较为敏感, 然后针对这些参数进行优化. 可见, 在优化算法中灵敏度分析起着关键作用^[15]. 研究中借助试验设计的方法进行优化变量的灵敏度的分析.

主效应图表示的是单个因素对结果的影响^[16]. 转盘位置的主效应图如图5所示, 纵坐标为转盘的振幅 a_1 和 a_2 和1阶临界转速 n_1 , 主效应图的横坐标为转盘位置 P_1, P_2 . 可见, P_1, P_2 对 a_1 和 a_2 及 n_1 存在非线性关系.

Pareto图按照因素对响应的贡献排列^[16]. 振幅以及1阶临界转速的Pareto图如图6所示. 纵坐标表示单个影响因素(优化变量)及其交叉项, 横坐标表示因素改变对结果影响的百分比大小(贡献率). 在Pareto图中, 蓝色的条形表示该项对相应的影响是正效应, 反之, 红色则表示反效应. 可见, P_1 对 a_1 的影响因子为 -8% , 对 a_2 的影响因子为 36% , 对 n_1 的影响因子为 2% ; P_2 对 a_1 的影响因子为 -4% , 对 a_2 的影响因子为 35% , 对 n_1 的影响因子为 2% . 因此, 将两转盘位置 P_1, P_2 作为优化变量是合适的. 此外, 考虑到两转盘的安装位置, 设计转盘2位置大于转盘1位置且两转盘位置中心相差 0.05 m 以上, 即 $(P_2 - P_1) \geq 0.05 \text{ m}$.

2.2 优化流程

在多目标优化问题中各个目标间是相互冲突的, 优化解不可能是单一的解, 而是一个解集, 称为Pareto最优解集. 多目标优化问题的最终解是从所有Pareto最优解中挑一个最优折衷解^[17-18]. 优化流程图如图7所示.

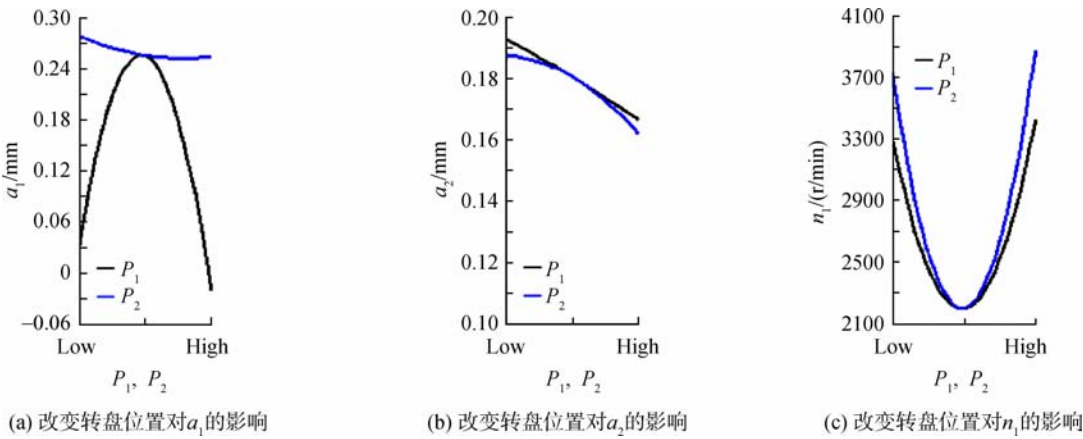


图 5 主效应图

Fig. 5 Main effect plots

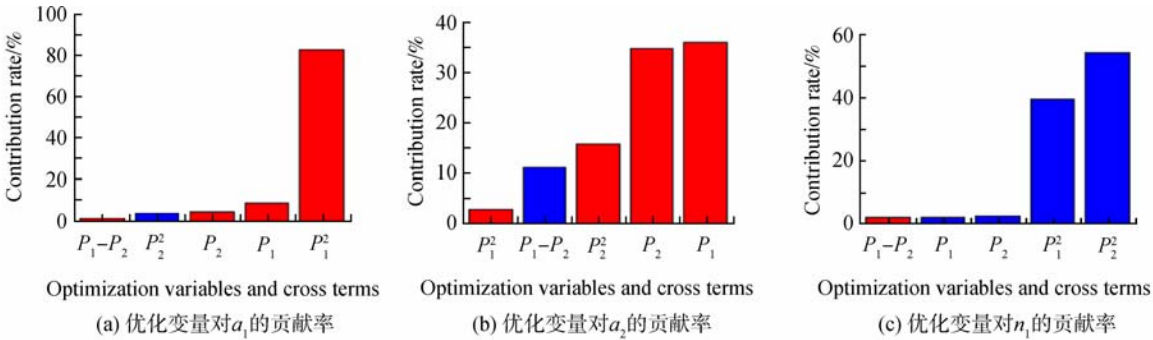


图 6 Pareto 图

Fig. 6 Pareto plots

2.3 优化结果

采用不同的优化算法,移动转盘 1 和转盘 2 的位置,转盘 1 和转盘 2 之间的距离大于等于 0.05 m,且转盘 1 始终置于转盘 2 之前,同时满足 $2632 \text{ r/min} \leq n_1 \leq 3217 \text{ r/min}$ 约束条件,则优化结果见表 1。

表 1 优化结果

Table 1 Results of optimization

优化算法	P_1/m	P_2/m	$n_1/(\text{r/min})$	计算点数/个
初始	0.1835	0.3320	2925	
EVOL	0.1150	0.3070	3201	100
NSGA-II	0.1205	0.3106	3199	240
NCGA	0.1177	0.3065	3187	200
Pointer	0.1668	0.3368	3088	7
MIGA	0.1220	0.3107	3179	1000

从表 1 可以看出,5 种优化算法中 MIGA 需要计算 1000 个点,计算量很大,耗费时间最长;Pointer 方法只需要计算 7 个点就得到了最优结

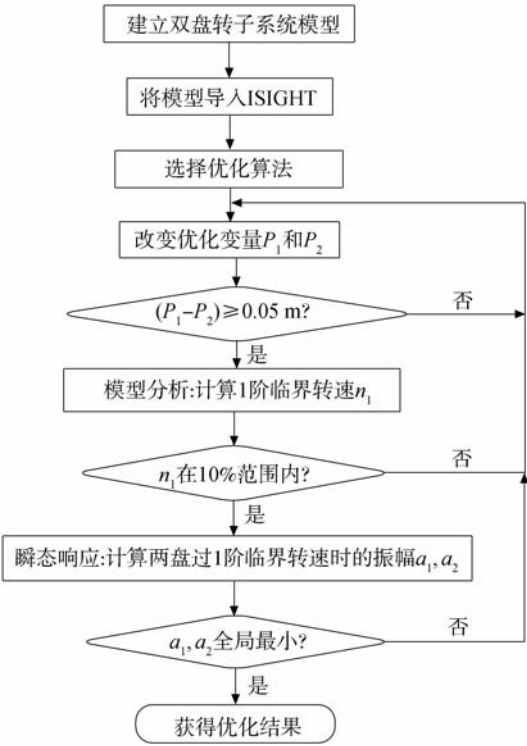


图 7 优化流程图

Fig. 7 Flow chart of optimization process

果,用时最少。为了验证各种优化算法优化效果的差异,将在该高速柔性模拟转子试验器上按照不同的优化结果移动两转盘的位置进行瞬态试验验证。

3 试验验证

国内外关于转子优化的文献大多以介绍理论模型和优化结果为主,而忽略了试验测试部分,而试验验证是检验优化效果最重要、直接的方法。试验装置采用高速柔性模拟转子试验器如图 8 所示。

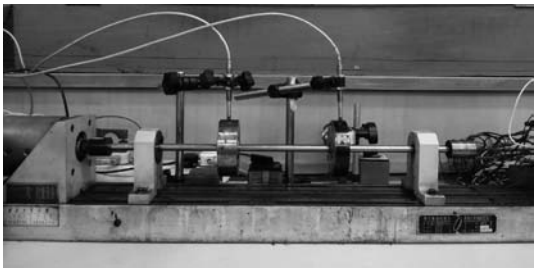


图 8 高速柔性模拟转子试验器

Fig. 8 Picture of high-speed flexible rotor mockup

高速柔性模拟转子试验器支承为滑动轴承,转子通过联轴器直接与变频电动机连接,动力从左端输入,变频电动机设计最高转速为 10 000 r/min。测试系统示意图如图 9 所示。

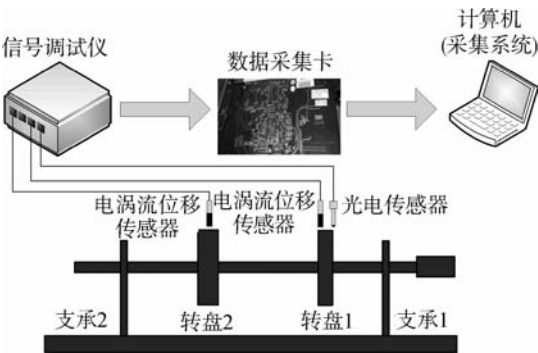


图 9 测试系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of experimental system

整个测试系统由传感器、数据采集卡、计算机和测试软件组成。传感器分转速传感器和振动传感器。本次使用的转速传感器为光电传感器,配合感光纸拾取转速信号;振动传感器为电涡流位移传感器,拾取转子振动信号;信号调试仪将转速信号和振动信号进行放大、滤波等处理,使信号的电压处于数据采集卡可识别的范围之内;数据采集卡对信号进行采样、量化、编码,完成模数转换;计

算机和测试软件对信号进行存储和分析。其中,采集系统频率为 100 kHz。优化前后模拟转子的振动对比如图 10~图 11 所示。试验结果见表 2。

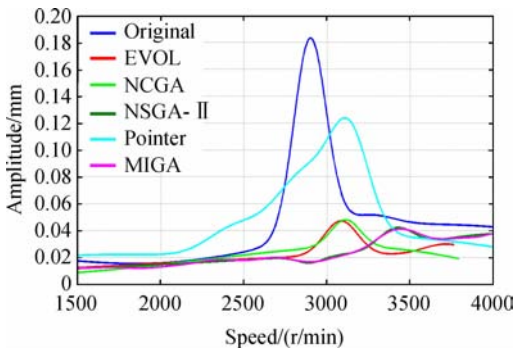


图 10 转盘 1 优化前后的瞬态响应

Fig. 10 Transient response of disk 1 before and after optimization

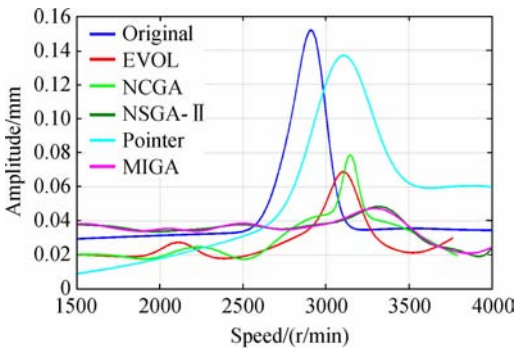


图 11 转盘 2 优化前后的瞬态响应

Fig. 11 Transient response of disk 2 before and after optimization

从表 2 可以看出,5 种优化算法都降低了两盘的最大振幅,其中 MIGA 优化效果最好,转盘 1 减振效果达到 77.61%,转盘 2 减振效果达到 68.81%,但 MIGA 计算量很大;NSGA-II 使转盘 1 减振效果达到 76.94%,转盘 2 减振效果达到 67.92%,优化效果接近 MIGA,但只需计算 240 个点,相比其他算法,优化效果好;EVOL 使转盘 1 减振效果达到 74.28%,转盘 2 减振效果达到 54.67%,两转盘振幅都下降 50% 以上;NCGA 计算 200 个点,转盘 1 减振效果达到 73.84%,转盘 2 减振效果达到 48.28%,转盘 1 振幅下降明显,但转盘 2 振幅下降不到 50%;Pointer 虽然耗时最少,但优化效果不理想,可见,对于此类转子的优化,该优化方法效果并不出众。对比不同优化算法的优化效果和计算成本,在此类转子优化设计中,NSGA-II 在优化效果和优化效率方面,是 5 个优化算法中最适用的。

表 2 试验结果
Table 2 Experimental results

优化算法	P_1/m	P_2/m	a_1/mm	a_2/mm	$n_1/(\text{r}/\text{min})$	优化效果
初始	0.1835	0.332	0.183	0.1515	2925	
EVOL	0.115	0.307	0.04706	0.06867	3104	a_1 降低 74.28% a_2 降低 54.67%
NSGA-II	0.1205	0.3106	0.0422	0.0486	3324	a_1 降低 76.94% a_2 降低 67.92%
NCGA	0.1177	0.3065	0.04787	0.07835	3187	a_1 降低 73.84% a_2 降低 48.28%
Pointer	0.1668	0.3368	0.01237	0.01368	3111	a_1 降低 32.40% a_2 降低 9.70%
MIGA	0.1220	0.3107	0.04097	0.04725	3320	a_1 降低 77.61% a_2 降低 68.81%

4 结 论

1) 采用不同的优化算法对双盘转子系统进行了优化设计,并利用高速柔性模拟转子试验器进行了优化效果试验验证.试验结果表明,在综合考虑优化效率和优化效果的前提下,NSGA-II 是适合该类转子系统的优化方法.

2) 在进行优化设计时,考虑不同优化算法的优化效率和优化效果,选择最适合优化问题的优化方法,不但能够提高优化的效果而其可以节省大量的时间和精力.

参考文献:

[1] 顾家柳,丁奎元,刘启洲,等.转子动力学[M].北京:国防工业出版社,1985.

[2] Lee D S,Choi D H. Reduced weight design of a flexible rotor with ball bearing stiffness characteristics varying with rotational speed and load[J]. Journal of Vibration and Acoustics,2000,122(3):203-208.

[3] Pugachev A O. Application of gradient-based optimization methods for a rotor system with static stress,natural frequency,and harmonic response constraints[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2013,47(6):951-962.

[4] Choi B K,Yang B S. Multiobjective optimum design of rotor-bearing systems with dynamic constraints using immune-genetic algorithm[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2001,123(1):78-81.

[5] Hirani H,Suh N P. Journal bearing design using multiobjective genetic algorithm and axiomatic design approaches [J]. Tribology International,2005,38(5):481-491.

[6] Strauß F,Inagaki M,Starke J. Reduction of vibration level

in rotordynamics by design optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2007,34(2):139-149.

[7] 黄太平,罗贵火.转子动力学优化设计[J].航空动力学报,1994,9(2):113-116.

HUANG Taiping,LUO Guihuo. Optimal design of rotor dynamics[J]. Journal of Aerospace Power,1994,9(2): 113-116. (in Chinese)

[8] 朱芸.复杂转子系统支承阻尼优化设计[J].海军工程大学学报,2000(2):53-57.

ZHU Yun. Optimal design of dampers of complex rotor-support systems[J]. Journal of Naval University of Engineering,2000(2):53-57. (in Chinese)

[9] 王东华,刘占生,窦唯.一种改进的转子系统临界转速调整方法[J].航空动力学报,2008,23(8):1449-1454.

WANG Donghua,LIU Zhansheng,DOU Wei. Improved method for adjusting critical speed of rotor systems[J]. Journal of Aerospace Power,2008,23(8):1449-1454. (in Chinese)

[10] 马枚,李强华,王荣桥.航空发动机转子动力优化设计软件工具研究[J].北京航空航天大学学报,2002,28(2):217-220.

MA Mei,LI Qianghua,WANG Rongqiao. Aeroengine multi-rotors dynamics optimum desing-model and tool[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2002,28(2):217-220. (in Chinese)

[11] 姚学诗,周传荣.转子系统动力学优化设计研究[J].发电设备,2003,17(5):18-21.

YAO Xueshi,ZHOU Chuanrong. Study on dynamically optimized design of rotor strings[J]. Power Equipment, 2003,17(5):18-21. (in Chinese)

[12] 何柳,单鹏.气动变量参数化的压气机转子三维数值优化[J].航空动力学报,2010,25(4):884-890.

HE Liu,SHAN Peng. Numerical aero-optimization method

for three-dimensional compressor rotor with parameterized aerodynamic variables[J]. Journal of Aerospace Power, 2010,25(4):884-890. (in Chinese)

[13] 于瑾,高建,任朝辉. 转子系统的动态优化设计研究[J]. 机械设计与制造,2012(4):241-243.
YU Jin,GAO Jian,REN Chaohui. Study on dynamic optimization design of the rotor system[J]. Machinery Design and Manufacture,2012(4):241-243. (in Chinese)

[14] 薛风先,胡仁喜,康士廷. ANSYS 12.0 机械与结构有限元分析从入门到精髓[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

[15] 刘保国,吴永,殷学纲. 转子动力学系统的灵敏度分析与动力学修改[J]. 机械强度,2001,23(1):95-97.
LIU Baoguo,WU Yong,YIN Xuegang. Sensitivity analysis and dynamic modification of rotor dynamic system[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(1): 95-97. (in Chinese)

[16] 赖宇阳,姜欣,方立桥. ISIGHT 参数优化理论与实例详解[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012.

[17] Zitzler E, Laumanns M, Thiele L. SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm[R]. Swiss Federal Institute of Technology TIK-Report 103,2001.

[18] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation,1995,2(3):221-248.

(编辑:陈 越)