

转子-支承耦合结构的模型修正研究

赵斌, 陈果

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘要:在转子-支承耦合结构的动力学分析过程中,结构模态参数计算结果与实验测试结果往往存在较大差异。针对此问题,应用优化算法对结构动力学模型进行修正,使计算模型能更准确地反映结构特性。建立由梁单元、盘单元、弹性支承单元组成的结构动力学有限元模型;选择优化目标函数、设计参数,并对各参数进行灵敏度分析。应用粒子群算法对选取的设计参数进行优化,得到最优模型。利用转子-滚动轴承实验器进行验证,结果表明,方法能够有效地实现转子-支承耦合结构的动力学模型修正,修正后模型更接近实际结构。

关键词:模型修正;有限元;转子动力学;粒子群算法;模态分析

中图分类号: O242.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-654X(2014)05-0086-06

Study on Model Updating of A Rotor-support Coupling Structure

ZHAO Bin, CHEN Guo

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: For rotor-support coupling system, the calculated structural modal parameters usually cannot be close to the modal test results very well. To solve this problem, the particle swarm optimization method is used to update the rotor-support coupling dynamic system model. Firstly, the dynamic finite element method (FEM) model is established including the beam element, disc element and support element. Secondly, the objective function is constructed, the design parameters are selected and the sensitivity of each parameter is analyzed. Finally, the particle swarm optimization method is used to calculate the objective function, and the best model is obtained. A rotor-bearing tester is used to verify the method proposed in this paper, and the results prove the validity of the method, the updated FEM simulation model can be more close to the practical structural characteristics.

Key words: model updating; finite element method; rotor dynamic; particle swarm optimization; modal analysis

引言

在旋转机械结构设计、性能评估及实验测试等工程应用中,运用有限元方法仿真计算能够有效地分析结构力学特性,缩短设计周期,节省工程成本。然而,计算中采用的仿真模型是通过测量并进行一定简化获得的,并且结构中的一些参数难以确定,如连接刚度、内部结构尺寸等。其中支承刚度等参数对结构的动力学特性有很大影响,这造成了仿真计算的结果与实验获得的结果存在较大误差,无法模拟出实际结构特性,仿真计算失去意义。

以提高仿真计算准确度为目的的有限元模型修正技术在近年来得到了深入发展,如何获得一个更接近

真实结构的有限元模型,越来越成为该领域的研究热点^[1-2],国内外学者在多个工程应用中对模型修正技术进行了研究^[3-6]。

有限元模型修正方法根据修正对象的不同,可以分为矩阵型方法和设计参数型方法,后者以建立有限元模型的设计参数为修正对象,物理意义清晰,工程实用性更强^[7-8]。Mohammad等利用遗传算法对典型球关节结构进行模型修正,使修正后的模型具有良好的预测精度^[9]。孙楠楠提出一种两步的结构模型修改方法,与利用遗传算法直接搜索最优模型修改结果相比,该方法不但可以减少模型分析次数,而且可以获得多种可能的修改结果供进一步参考^[10],但以上方法

较为复杂,不便于应用。

本文综合上述分析,提出一种较为简单的转子-支承结构模型修正方法,并结合 Jeffcott 转子实验器对方法进行验证。建立转子实验器结构动力学有限元模型,结合测试结果与计算结果构建优化目标函数,对设计参数进行灵敏度分析,选择需要优化的结构参数;采用较为简单的粒子群优化算法对目标函数进行最优化求解,得到参数最优结果,进而获得最优有限元模型。最后,进一步对比实验结果,频响函数及不平衡响应比较结果证明了该方法的正确性、有效性。

1 结构动力学建模及实验分析

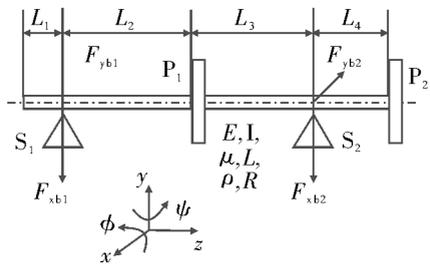
1.1 结构动力学建模

Jeffcott 转子实验器为沈阳航空发动机设计研究所设计制造的转子-支承实验器,该实验装置能有效地模拟航空发动机转子不平衡以及滚轴承常见故障。

实验器实物图及结构动力学简化模型见图 1。



(a) 转子实验器实物图



(b) 结构动力学简化模型

图 1 Jeffcott 转子实验器

在转子-支承结构动力学简化模型中,有两个转盘 P_1 与 P_2 ,其中 P_1 为转子圆盘, P_2 为法兰盘,法兰盘与齿轮箱输出轴相连;两个支承 S_1 与 S_2 ,支承刚度分别为 K_1, K_2 ; L_1, L_2, L_3, L_4 为转轴被盘及支承分隔的各部分尺寸。根据结构动力学模型尺寸,采用刚性圆盘单元、弹性轴段单元和弹性支承单元构建转子实验器动力学有限元模型^[11]。

1.1.1 刚性圆盘单元

设刚性圆盘的质量、过轴心的直径转动惯量和极

转动惯量分别为 m_d, J_{dd} 和 J_{pp} 。圆盘的广义坐标就是其轴心结合的位移向量 $u_d = [x, \theta_y, y, -\theta_x]^T$ 。利用拉格朗日方程可得刚性盘相对固定坐标系的运动方程为:

$$M_d \ddot{u}_d + \Omega J_d \dot{u}_d = Q_d \quad (1)$$

式中, Q_d 为广义外力向量, Ω 为转子旋转速度, M_d 为圆盘的质量矩阵, ΩJ_d 为回转矩阵,其中:

$$M_d = \begin{bmatrix} m_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{dd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{dd} \end{bmatrix}, J_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{pp} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -J_{pp} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

1.1.2 弹性轴段单元

设单元弹性模量为 E , 截面直径为 d , 长度为 l , 密度为 μ , 则截面惯性矩 $I = \frac{\pi}{64} d^4$, 横截面面积 $A = \frac{\pi}{4} d^2$, 单元的广义坐标是两段节点的位移及转角,即:

$$u_s = [x_a, \theta_{ya}, x_b, \theta_{yb}, y_a, -\theta_{xa}, y_b, -\theta_{xb}]^T \quad (2)$$

由拉格朗日方程,可得梁单元相对于固定坐标的运动方程:

$$M_s \ddot{u}_s + \Omega J_s \dot{u}_s + K_s u_s = Q_s \quad (3)$$

式中:

$$M_s = \begin{bmatrix} M_T + M_R & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & M_T + M_R \end{bmatrix}$$

$$J_s = \begin{bmatrix} 0 & J \\ -J & 0 \end{bmatrix}, K_s = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix}$$

Q_s 为广义外力向量, Ω 为转子旋转速度, M_T, M_R 分别为单元的移动惯性矩阵和转动惯性矩阵, J_s 为单元陀螺矩阵, K_s 为单元刚度矩阵,其中:

$$M_T = \frac{\mu l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ \text{对称} & & 156 & -22l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix}$$

$$M_R = \frac{\mu d^2}{480l} \begin{bmatrix} 36 & 3l & -36 & 3l \\ & 4l^2 & -3l & -l^2 \\ \text{对称} & & 36 & -3l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix}$$

$$J = \frac{\mu d^2}{240l} \begin{bmatrix} 36 & 3l & -36 & 3l \\ & 4l^2 & -3l & -l^2 \\ \text{对称} & & 36 & -3l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix} = 2M_R$$

$$K = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ & 4l^2 & -6l & -2l^2 \\ \text{对称} & & 12 & -6l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix}$$

1.1.3 弹性支承单元

设支承中心坐标 x_b, y_b 为轴颈中心节点, 支撑结构分别约束节点两个方向的位移及转角自由度, 则轴颈中心的广义位移向量为 $\mathbf{u}_b = [x_b, \theta_{y_b}, y_b, -\theta_{x_b}]^T$ 。如不计阻尼, 且支承可简化为刚性系数分别为 $k_x, k_y, k_{\theta_x}, k_{\theta_y}$ 的等刚度弹性支承时, 则支承的运动方程为:

$$-\mathbf{K}_b \mathbf{u}_b = \mathbf{Q}_b \tag{4}$$

式中, \mathbf{Q}_b 为广义外力向量, \mathbf{K}_b 为支承单元刚度矩阵:

$$\mathbf{K}_b = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{\theta_y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{\theta_x} \end{bmatrix}$$

对于深沟球轴承支承结构, 角刚度系数 $k_{\theta_x} = k_{\theta_y} = 0$ 。

1.1.4 整体动力学方程

本文将结构轴段分为 41 个节点, 由 40 个单元连接而成, 每个节点有位移 x_i, y_i 及转角 $\theta_{x_i}, \theta_{y_i}$ 四个自由度, 结构全部节点自由度向量可表示为:

$$\mathbf{U} = [x_1, \theta_{y_1}, x_2, \theta_{y_2}, \dots, x_{43}, \theta_{y_{43}}, y_1, -\theta_{x_1}, y_2, -\theta_{x_2}, \dots, y_{43}, -\theta_{x_{43}}]^T \tag{5}$$

通过单元矩阵的链接构成结构整体矩阵, 则转子结构的运动方程为:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{\Omega J U} + \mathbf{K U} = \mathbf{Q} \tag{6}$$

式中, \mathbf{Q} 为广义外力向量, $\mathbf{\Omega}$ 为转子自转速度, \mathbf{M} 为整体质量矩阵, $\mathbf{\Omega J}$ 为整体回转矩阵, \mathbf{K} 为整体刚度矩阵。当无外激励作用下, 求解特征方程, 即可解得结构有限元模型特征值及特征向量, 其物理意义分别为结构固有频率及模态振型向量。

1.2 结构模态测试

为了获得模型修正过程需要的结构动力学特征参数, 对转子实验器进行支承状态下的模态测试, 采用力锤激励测试方法。主要仪器设备包括: 美国 NI (National Instrument) 公司的 NI9234 动态信号采集模块、美国 ENDEVCO 公司的 30927 型力锤及丹麦 B & K 公司的 4508 型 ICP (Intergrated Circuit Piezoelectric) 加速度传感器。

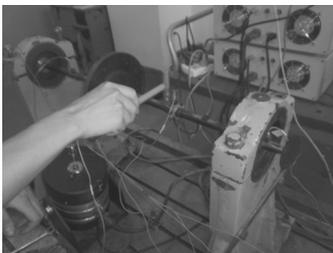


图2 结构模态参数测试

采取单点响应多点激励的测试方法 (MISO)。根

据结构位置关系, 为了较为准确地获得结构振型, 将轴段均分为 20 个测点。同时, 在有限元建模过程中, 使有限元模型节点与测点依次对应, 以方便计算结果与实验结果的比较分析。

使用力锤敲击各测点, 将加速度传感器布置在转盘旁边的测点上, 通过模态分析软件 (MAS) 分析实验结果, 获得结构各阶模态参数, 力锤敲击过程见图 2。

2 模型修正过程

2.1 设计参数选择及灵敏度分析

设计参数的选择与工程实际需要以及参数灵敏度有关。考虑可能影响结构动力学特性的 8 个相关参数: 弹性模量 E , 密度 ρ , 两个支承刚度 K_1, K_2 , 盘及支承位置 L_1, L_2, L_3, L_4 。

但是, 各个参数对结构动力学特性的影响程度不同, 因此, 需靠进一步选择实际需要优化的参数, 即参数灵敏度分析。根据结构材料特性、支承刚度经验区间以及测量误差变化范围等因素确定各参数优化范围。

参数灵敏度是选择设计参数的一个重要指标, 表示各参数对结构动力学特性的影响程度, 灵敏度定义为:

$$\Delta f_i = \sum_{j=1}^n |f_j^{i+\Delta x_i} - f_j^i| \tag{7}$$

式中 f 表示计算固有频率, Δx_i 为设计参数增量, f_j^i 为第 i 个设计参数计算所得第 j 个固有频率, 取 $n = 4$ 。各设计参数、优化范围及灵敏度计算结果见表 1。

表1 设计参数及参数灵敏度

设计参数	优化范围	灵敏度/Hz
$E/e^{11} \text{ Pa}$	2.0 ~ 2.2	38.85
$\rho/\text{kg/m}^3$	7 600 ~ 8 000	14.91
$K_1/\text{N/m}$	$1e^6 \sim 1e^9$	256.2
$K_2/\text{N/m}$	$1e^6 \sim 1e^9$	225.6
L_1/mm	97.9 ~ 102.1	6.74
L_2/mm	338.8 ~ 345.2	4.09
L_3/mm	367.1 ~ 372.9	5.74
L_4/mm	130.0 ~ 139.0	11.42

通过表 1 可以发现, 两轴承支承刚度 K_1, K_2 的灵敏度较大, 说明刚度参数在给定的优化范围内可使结构固有频率发生较大变化, 应作为主要优化参数; 转子试验器尺寸参数 L_1, L_2, L_3, L_4 及密度 ρ 的灵敏度都很小, 表明这些参数对结构动力学特性几乎没有影响, 可以不进行优化; 弹性模量 E 虽然变化范围达到 $2e^{10} \text{ Pa}$, 但是其灵敏度远低于支承刚度的灵敏度, 对结构动力学特性影响小于支承刚度, 但考虑弹性模量对计算结

果仍有一定影响,也作为设计优化参数。

2.2 设计参数优化过程

2.2.1 模型修正方法流程

模型修正整体流程图见图 3,方法的基本目标是减小计算模型与实际模型的差异程度,使计算结果更接近于实验测试结果。因此,首先需要构造目标函数,建立实验测试与仿真计算之间的数学联系。然后选择优化参数,利用优化算法,通过多次迭代,反复更新结构计算模型,计算、筛选目标函数值,获得设计参数最优解。

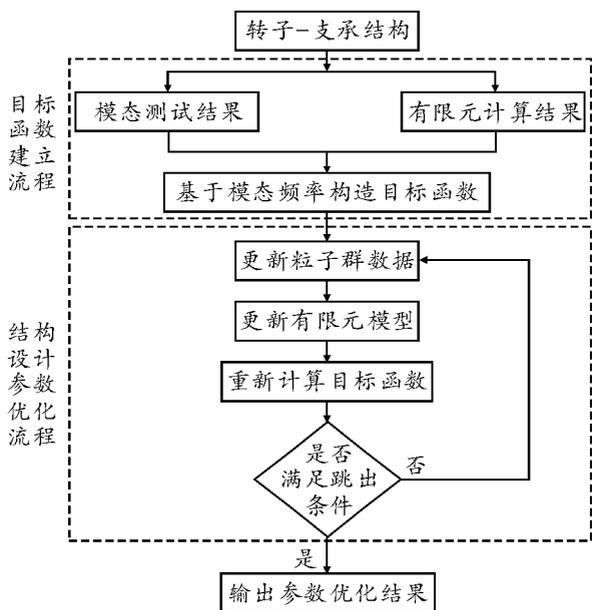


图 3 结构动力学模型修正流程

2.2.2 粒子群算法

本文模型修正方法为设计参数型方法,选择粒子群优化算法计算设计参数的最优解。粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法是一种于 1995 年提出的随机搜索全局优化新方法。相比较遗传算法,粒子群算法无需编码,无需“交叉”和“变异”操作,可直接运用设计参数进行计算。粒子群优化算法相较于其他算法,具有实现容易、精度高、收敛快等特点。

粒子根据下面公式更新自己的速度和新的位置^[12]。

$$\begin{cases} V_{id}^{k+1} = wV_{id}^k + c_1r_1(P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2r_2(P_{kd}^k - X_{id}^k) \\ X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (8)$$

式中, w 是惯性权重; $d = 1, 2, \dots, n$; k 为当前迭代次数; V_{id} 为粒子的速度; c_1, c_2 为非负的常数,称为加速度因子; r_1 和 r_2 为分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数; X_{id} 是当前粒子的位置; P_{id} 和 P_{kd} 分别是个体极值和全局极值。

2.2.3 构建目标函数

优化目标函数有多种构建方法,但模态测试及数

值计算所得结果中,固有频率作为最突出的结构模态特征参数,通常作为模型修正构造目标函数的对象^[13]。本文以模态测试所得结构固有频率与有限元模型计算所得固有频率的残差平方和为目标函数,其表达式为:

$$\min F(X) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{f_j^{\text{Exp}} - f_j^{\text{Fem}}}{f_j^{\text{Exp}}} \right)^2$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_m]$$

$$x_i^a \leq x_i \leq x_i^b \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

式中, f_j^{Exp} 为实验测试第 j 阶固有频率, f_j^{Fem} 有限元计算第 j 阶固有频率, x_i 为第 i 个修正参数, x_i^a 和 x_i^b 分别为修正参数取值上下极限, m 为修正参数个数。本文选择前 4 阶模态频率计算目标函数,即 $n = 4$ 。

3 模型修正结果分析

3.1 粒子群优化结果

粒子群优化算法计算中,种群通过不断更新,使设计参数逐渐趋近最优解,目标函数趋近极值,在迭代到达到一定次数后,目标函数值保持稳定,迭代收敛过程见图 4。

从图 4 中可以看出,迭代开始时目标函数值较大,随着迭代的进行,函数值逐渐减小,当迭代到达 80 次左右,目标函数值趋于稳定,表明算法收敛速度较快。

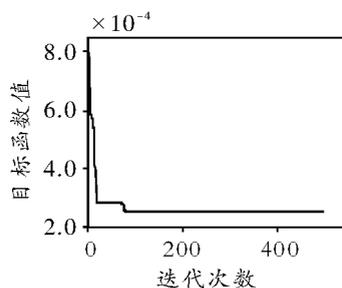


图 4 目标函数收敛过程

经过有限元计算及粒子群优化计算,修正后的设计参数见表 2。

表 2 参数优化结果

设计参数	修正前	修正后
E/Pa	2.1×10^{11}	2.03×10^{11}
$K_1/\text{N/m}$	1×10^7	4.22×10^8
$K_2/\text{N/m}$	1×10^7	4.73×10^8

设计参数优化结果表明,支承刚度优化值比经验值要高出一个数量级,这是由于转子实验器支承的体积、质量和设计刚度较大,高于普通轴承支承的刚度;弹性模量比理论值小,是由于轴段结构一些部位的直

径发生变化;经优化的两个支撑刚度为同一数量级,表明优化结果合理。

根据优化结果,更新结构有限元模型,重新计算结构模态参数,进一步与实验测试结果比较。模态测试及修正前后结构固有频率见表3。

表3 结构固有频率对比

阶数	实验值 /Hz	修正前 /Hz	修正后 /Hz	修正前 误差/%	修正后 误差/%
1	35.75	33.62	36.07	5.95	0.89
2	146.38	186.51	146.58	27.41	0.14
3	260.20	368.42	256.91	42.86	1.26
4	485.79	508.52	487.62	4.68	0.38

从表3数据可以发现,修正前仿真计算结果只有第一阶固有频率能够较好地对应实验结果,其他结果误差较大,说明修正前模型无法仿真得到结构真实动力学特性;修正后有限元模型的结构固有频率计算结果与实验测试结果基本相同,证明了优化方法及设计参数优化结果的正确性,表明经过模型修正后的结构动力学模型可进一步作其他仿真分析,其计算结果能真实反应结构动力学特性。

3.2 频响函数比较

频响函数曲线从整体上反映了结构固有频率、阻尼比、振型等多个结构固有特性参数。计算频响与测试频响一致程度是判定模型修正结果可靠性的重要指标,本文采用 Newmark-β 数值积分方法模拟实验中的力锤敲击过程,计算得到修正前后结构原点频响函数曲线,分别将两条曲线与实验测试原点频响函数曲线比较,结果见图5。

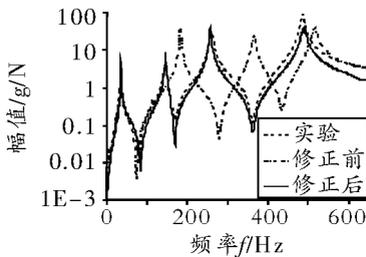


图5 原点频响函数比较图

从图5中可以发现,修正前模型计算的频响函数曲线只有100 Hz以内能够对应实验结果,其他频率下与实验获得的曲线完全错开,误差较大,与表3得到的结论一致;而经过本文方法修正后的结构有限元模型计算结果在各个频率下与实验获得的频响曲线基本重合,表明修正后的有限元模型能够准确地反应结构真实的动力学特性,证明了本文方法的正确性。

3.3 不平衡响应比较

为进一步验证本文方法及应用修正后的结构动力学模型,在转子实验器上进行模型不平衡量响应比较。调节电机转速从1 600 r/min变化到2 100 r/min,通过位于转子圆盘处水平和垂直方向的电涡流位移传感器来拾取其振动位移信号,由此可以得到转子响应的转速-振幅关系图。由于转速接近临界转速时,转子涡动幅值超过了电涡流传感器的测量范围,因此未能测得其实验值。运用本文修正后的模型,通过数值积分方法得转子结构响应,进行仿真计算。

参照文献[14]计算数据,结合实验测试数据,修正前后模型仿真和实验得到的转子不平衡响应转速-振幅关系见图6。

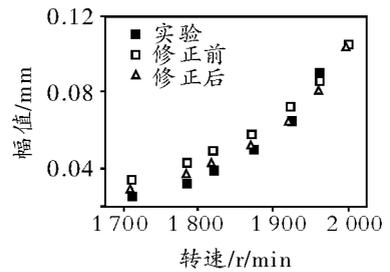


图6 不平衡响应比较图

从图6中可以看出,相同转速下,仿真模型能够比较准确模拟实际转子实验器的动力学行为,实验结果和模型仿真结果达到很好的一致性。并且,修正后模型较修正前模型计算结果更接近实验测试数据,进一步验证了修正过程及优化结果的正确性。

4 总结

1) 建立转子-支撑结构耦合动力学模型,并对结构进行模态测试。识别结构模态参数,进而建立基于模态频率的优化目标函数。

2) 选择设计参数并进行参数灵敏度分析,应用粒子群优化算法对目标函数进行优化计算。根据设计参数优化结果对结构动力学模型进行修正,并一定程度上识别了某些难以测量的结构参数。对比优化前后计算结果与测试结果的一致程度,结果表明本文模型修正方法在转子-支撑结构动力学建模分析领域的可用性,以及优化结果的正确性、可靠性。

3) 应用数值积分方法模拟测试过程,计算结构频响函数,对比修正前后原点频响与测试数据的一致程度。结果证明应用数值积分方法求解结构频响函数是可行并精确的,修正后频响曲线优于修正前结果。对比实验和模型修正前后不平衡量响应结果,修正后模型计算值更接近实验测试值,再次证明了本文方法及修正结果的正确性,为进一步利用有限元模型仿真计

算提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 李辉,丁桦. 结构动力学模型修正方法研究进展[J]. 力学进展,2005,35(2):170-180.
- [2] 郭勤涛,张令弥,费庆国. 结构动力学有限元模型修正的发展-模型修正[J]. 力学进展,2006,36(1):36-42.
- [3] 张启伟. 基于环境振动测试值的悬索桥结构动力学模型修正[J]. 振动工程学报,2002,15(1):74-78.
- [4] 曹宏瑞,何正嘉. 机床-主轴耦合结构动力学建模与模型修正[J]. 机械工程学报,2012,48(3):88-94.
- [5] 丁继锋,韩增尧,马兴瑞. 大型复杂航天器结构有限元模型的验证策略研究[J]. 宇航学报,2010,3(2):547-555.
- [6] 臧朝平,刘银超. 轴对称结构的模态振型描述和模型确认[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(2):725-733.
- [7] Zhang L M. A Unified Approach & Assessment of Analytical Model Updating using Dynamic Test Data [C]//USA: Proceedings of 13th IMAC,1995:532-537.
- [8] 张安平,陈国平. 基于混合人工鱼群算法的结构有限元模型修正[J]. 航空学报,2010,31(5):940-945.
- [9] Mohammad R D, Javad V A, Sirous G, et al. Determination of Nonlinear Behavior of A Ball Joint System by Model Updating [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 71: 52-62.
- [10] 孙木楠. 基于神经网络的结构模型修改[J]. 振动与冲击,2006,25(1):54-164.
- [11] 钟一谔. 转子动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1987:176-195.
- [12] Eberhat R, Kennedy J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory [C]//Japan: Proc. Int. Symposium Micro Machine and Human Science, 1995:39-43.
- [13] Ahmadian H, Gladwell G M L, Ismail F. Parameter Selection Strategies in Finite Element Updating [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1997, 119(1):37-45.
- [14] 陈果. 航空发动机整机振动耦合动力学模型及其验证[J]. 航空动力学报,2012,2(27):241-255.

(上接第81页)

- [2] Gilbo E P. Airport Capacity: Representation, Estimation and Optimization [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1993, 1(3):144-154.
- [3] Gilbo E P. Optimizing Airport Capacity Utilization in Air Traffic Flow Management Subject to Constraints at Arrival and Departure Fixes [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1997, 5:490-503.
- [4] Gilbo E P, Howard K W. Collaborative Optimization of Airport Arrival and Departure Traffic Flow Management Strategies for CDM [C]//3rd USA Europe/Air Traffic Management R&D Seminar, 2000:1-11.
- [5] Gilbo E P, West M D. Enhanced Model for Joint Optimization of Arrival and Departure Strategies and Arrival/Departure Capacity Utilization at Congested Airports [C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies (MST) Conference, 2013.
- [6] Dell'Olmo P, Lulli G. A Dynamic Programming Approach for the Airport Capacity Allocation Problem [J]. IMA Journal of Management Mathematics, 2003, 14(3):235-249.
- [7] Bertsimas D, Frankovich M, Odoni A. Optimal Selection of Airport Runway Configurations [J]. Operations Research, 2011, 59(6):1407-1419.

(上接第85页)

- [4] 吴鸥,潘薇. 基于数据挖掘的四维飞行轨迹预测模型[J]. 计算机应用,2007,27(11):2637-2639.
- [5] Eurocontrol Experimental Center. User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA), Revision 3.9 [R]. EEC Technical / Scientific Report No. 11/03, 2011.
- [6] 武晓光,张军峰,蒋海行. GRIB 数据及其在航迹预测中的应用[J]. 航空计算技术,2013,43(6):59-62.
- [7] Hu J, Prandini M, Sastry S. Aircraft Conflict Prediction in the Presence of a Spatially Correlated wind Field [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2005, 6(3):326-340.
- [8] Maggie Q, Zheng Y J Z. Modeling Wind Uncertainties for Stochastic Trajectory Synthesis [C]//11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Virginia: AIAA, 2011:1-22.
- [9] 马兰,程一琳. 基于 AIDL 的气象模型 4D 航迹推测[J]. 航空计算技术,2012,42(6):1-5.
- [10] 张荣,祁伟,许坚,等. 高空风 GRIB 报文解析及精度分析[J]. 空中交通管理,2010(4):17-20.
- [11] 张焕. 空中领航学[M]. 成都:西南交通大学出版社,2003:68-73.
- [12] 卢亦羽,汤新民,徐琴. 基于动态气象预报数据的 4D 航迹预测[J]. 航空计算技术,2013,43(4):34-38.
- [13] 胡明华. 空中交通流量管理理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010:87-94.
- [14] Kim Yong-Kyun, Jo Yun-Hyun, Yun Jin-Won. En-Route Trajectory Calculation using Flight Plan Information for Effective Air Traffic Management [J]. Journal of Information Processing Systems, 2010, 6(3):375-383.
- [15] 刘星,司海青,蔡中长. 飞行原理[M]. 北京:科学出版社,2011:10-15.

转子-支承耦合结构的模型修正研究

作者: [赵斌](#), [陈果](#), [ZHAO Bin](#), [CHEN Guo](#)
作者单位: [南京航空航天大学民航学院, 江苏南京, 210016](#)
刊名: [航空计算技术](#) 
英文刊名: [Aeronautical Computing Technique](#)
年, 卷(期): 2014(5)

引用本文格式: [赵斌](#), [陈果](#). [ZHAO Bin](#). [CHEN Guo](#) 转子-支承耦合结构的模型修正研究[期刊论文]-[航空计算技术](#) 2014(5)