

组合转子整体应力分析与通用程序设计

哈尔滨七〇三研究所 周传月** 盛惠渝 林向东 李 明

【摘要】 建立了考虑转子各部件的配合关系、旋转离心力、热膨胀等因素的转子整体应力分析的数学、力学模型。给出了通用计算方法,并设计了组合转子整体应力分析的通用软件(REC)。该软件不但适用于具有径、轴双向配合的复杂转子,还适用于任意轴对称结构。软件可自动判断各部件间的接触面是否松脱,确定合理的径向过盈、轴向预紧量。算例和工程实用表明:方法正确,软件设计合理、计算精度高、速度快,方法和软件在解决复杂组合转子整体应力分析方面具有通用性。

主题词: 转子 应力分析 程序设计

分类号: TH133

1 引言

组合转子整体应力分析^[1,2]从理论上建立了考虑转子各部件的配合关系,旋转离心力,热膨胀等因素的转子整体应力分析的数学、力学模型,分别采用有限元柔度法和有限元法整体求解转子结构的内力、变形和应力,组合转子整体应力分析从理论和计算方法上解决了转子应力分析中各部件配合界面相互影响的问题。以该方法为基础设计的组合转子整体应力分析通用程序(REC)是较通用的分析程序,它除用于双向配合复杂组合转子的应力分析外,也可用于简单的整锻转子(如汽轮机转子)的应力分析,也可推广应用于任意轴对称结构的应力分析。

该程序自动判断各部件间接触面是否松脱,确定合理的径向过盈和轴向预紧量。程序配有功能强大的前处理模块,它可构造实体模型并自动划分有限元网格,确定载荷和边界条件,输入材料性质等,自动地转换成有限元计算所需的全部数据。程序中的后处理模块可绘出变形图、彩色应力云图和应力等值线图。

组合转子整体应力分析技术已被盛惠渝等人用于“斯贝”舰改工程 410B 低压压气机转子施工设计中,得到不仅有径向过盈,同时又有轴向预紧的长寿命组合转子强度的整体有限元解^[3]。

2 考虑径、轴双向配合的接触内力计算方法

2.1 力学模型

(1) 弹性力学轴对称模型,轮缘、榫槽凸块模化成离心外载荷。

(2) 载荷为轴对称的、稳定的。载荷形式为:叶片、轮缘凸块的离心力 p_c ; 转子自身离心力;

1998 年 1 月收稿,1998 年 5 月收到修改稿。

* 本文系国防科工委“八五”重点预研项目并获得船舶总公司科技进步二等奖

** 男 29 岁 工程师 哈尔滨红旗大街 108 号第四研究室 150036

气体压力 p_g ; 径向过盈 Δ , 轴向预紧 δ 产生的附加应力; 温度场应力; 叶片承受的气动力 p_a 及对叶根轮缘的弯矩 M_a 也简化处理成轴对称形式。

(3) 各子结构边界满足双协调条件, 即接触界面位移连续, 接触力平衡。

(4) 用接触点对形式定义接触界面。

(5) 用有限元方法采用四节点或三节点轴对称单元计算位移和应力。

(6) 叶片和轮缘凸块离心力以节点力形式计入, 气体压力以面载荷形式计入, 温度场以节点温度形式计入, 叶片承受的气动力及对叶根轮缘的弯矩也以节点力和节点力矩形式计入。

(7) 径向过盈(或间隙)配合和轴向预紧(预留间隙)在变形协调方程中考虑。

2.2 变形基本方程和径向位移连续方程

径向对接节点总数为 p , 轴向对接节点总数为 s , 在小变形条件下, 满足迭加原理:

$$\{W\} = [\lambda^p]\{P\} + [\lambda^s]\{S\} + \{W^z\} \quad (1)$$

$$\{U\} = [\xi^p]\{P\} + [\xi^s]\{S\} + \{U^z\} \quad (2)$$

其中: W 为径向位移; U 为轴向位移; W^z 为径向自由变形位移, 即除对接点内力 P 和 S 引起的变形之外, 其它载荷(离心力, 气体压力, 温度等)引起的变形位移; U^z 为轴向自由变形位移; λ^p (λ^s) 为径向柔度, 在 i (或 j) 点作用单位径向(或轴向)力 P_i (或 S_j) 在 i 点引起的径向位移; ξ^p (ξ^s) 为轴向柔度, 在 i (或 j) 点作用单位径向(或轴向)力 P_i (或 S_j) 在 j 点引起的轴向位移; P 为径向内力; S 为轴向内力。

径向位移连续方程:
$$\{W^{\text{II}}\} - \{W^{\text{I}}\} = (1/2)\{\Delta\} \quad (3)$$

其中: Δ 为内直径上的过盈或间隙; II 表示孔; I 表示轴。

2.3 轴向位移连续方程

构成组合转子结构所有子结构的集合称为子结构群。当考虑轴向变形位移时, 须指明子结构群的固定点和各子结构的相对固定点, 各子结构之间存在着轴向变形位移传递问题。因此, 某一子结构上任一点 j 相对于该子结构相对固定点的轴向变形位移 U_j^i , 还须加上相对于固定点的相对位移 $(U_i)_z$, 才是 j 点在子结构群上真正的轴向变形位移, 称此为“位移真值”, 并记 $(U_j)_z$ 。因此 $(U_j)_z = U_i + (U_i)_z$ 。

我们在建立各子结构边界联接节点的轴向位移连续方程时, 必须注意到应该用轴向位移“真值”来建立方程。由于轴向位移“真值”在子结构群上的唯一性, 因而各子结构轴向相对固定点选择的任意性, 不会影响轴向连续方程的正确性和唯一性。

对于两相邻的子结构 $(i-1)$ 和 i , 轴向对接界面上任一对接节 j 之间的预紧量(即联接前的预留间隙)为 δ_j , 在 j 点保持轴向不松脱前提下, 应满足位移连续条件, 可写出: $(U_j^i)_{z_{i-1}} - (U_j^i)_{z_i} = \delta_j$ 。其中: l 表示左侧, r 表示右侧。

由 m 个子结构组成的子结构群, 对接点 d_i 为 $(m-1)$ 个, 因此可写出轴向位移连续方程:

$$\left(U_j^l + \sum_{i=1}^k U_{di} \right) - \left(U_j^r + \sum_{i=1}^{(m-1)-k} U_{di} \right) = \delta_j - \delta_{dj} \quad (4)$$

其中: k 为 U_j^l 涉及到的对点数; m 为子结构数; δ_j 和 δ_{dj} 已知的某节点处的轴向预紧量。

2.4 轴向力平衡方程

子结构群在稳定状态下, 承受的轴向外载荷应保持平衡, 即有:

$$\sum_{i=1}^{n_1} Q_i + \sum_{i=1}^{n_2} F_i + R_z = 0 \quad (5)$$

其中: Q_i 为轴向气体压力; n_1 为轴向气体压力个数; F_i 为轴向节点集中力; n_2 为轴向集中力个数; R_z 子结构轴向绝对固定点的约束反力。

子结构群处于稳定状态下, 其中每一个子结构受到的轴向外载与该子结构对接界面上的轴向内力也应保持平衡。对于每个子结构上的相对轴向固定点 K_i , 可以写:

$$\{S_i\} = \{C_i\} \quad (6)$$

其中: $C_i = - \sum_{i=1}^{k_1} Q_i + \sum_{i=1}^{k_2} F_i$; k_1 为子结构上 Q_i 的个数; k_2 为子结构上 F_i 的个数; S_i 为子结构界面上对接节点的轴向内力。

对于子结构数为 n 的子结构群, 方程 (5) 和 (6) 组成的 n 个轴向力平衡方程中独立的方程数为 $n-1$, 写出子结构群轴向平衡方程的目的是检查外力是否平衡。

2.5 方程求解

对于由 n 个子结构组成的子结构群, 径向对接节点数为 p , 轴向为 s , 由方程 (1) ~ (6) 组成的方程组独立的方程个数为 $p+s$, 与须求解的内力总数相等。

3 程序设计

组合转子结构整体应力分析通用程序 (REC) 以求解子结构间径向、轴向接触内力方程为核心, 通过求解接触内力进行转子整体应力分析。REC 设计成一个交互式用户界面, 通过界面可以实现对各功能模块的调用执行。REC 有四大功能模块:

(1) 前处理模块: 构造几何模型, 并自动划分有限元网格, 确定载荷与边界条件, 输入材料特性等, 自动地转换成有限元计算所需的全部数据。

(2) 接触内力计算模块: 此部分是 REC 程序的核心, 求解子结构接触界面上的内力, 程序自动判断接触力是拉力还是压力, 对强制性对接点 (如螺栓连接) 内力可以是拉力或压力, 对非强制性对接点若是拉力, 对该点位移连续条件释放, 程序继续迭代直到满足条件。

(3) 位移、应力计算模块: 此部分把内力作为子结构的边界条件求解应力和位移。此时求解的应力, 位移就是考虑到整个转子各子结构之间相互影响的整体有限元解。

(4) 后处理模块: 绘出子结构或整个转子的变形图, 彩色应力云图和应力等值线图。在构造有限元模型阶段还可以查看有限元模型和相应的参数。

4 算 例

4.1 410B 低压压气机转子应力分析

“斯贝”舰改 410B 低压压气机转子是既有径向过盈又有轴向预紧盘鼓混合式长寿命设计的典型转子结构。该结构由前轴、后轴、1~6 级轮盘、1~5 级隔圈和前档圈、后卡环共 15 个零件组成。外伸的第一级盘与 2~6 级组合件相互影响甚微, 分别计算。除第 2 级盘与第 3 级隔圈在径向是间隙配合外, 其余轮盘与隔圈在径向均为过盈配合。第 2 级盘与前轴, 第 3 级盘与第 4 级盘, 第 4 级盘与第 5 级盘, 以及第 5 级盘与后轴在轴向均为间隙配合, 而隔圈和盘在轴向是无间隙的。装配时用螺栓预紧, 使轴向间隙消除, 这样靠过盈、预紧以及离心力使转子呈现整体特性。该转子施工设计时, 各个盘、鼓和轴使用本文方法和程序进行了详细的应力分析, 甚

至盘、鼓和轴的某些尺寸、配合公差范围都是由该程序计算的。第 1 级盘为应力计算结果和实测数据的对比见表 1, 可见计算值与实测值吻合良好。2~6 级组件的整体变形图见图 1, 可

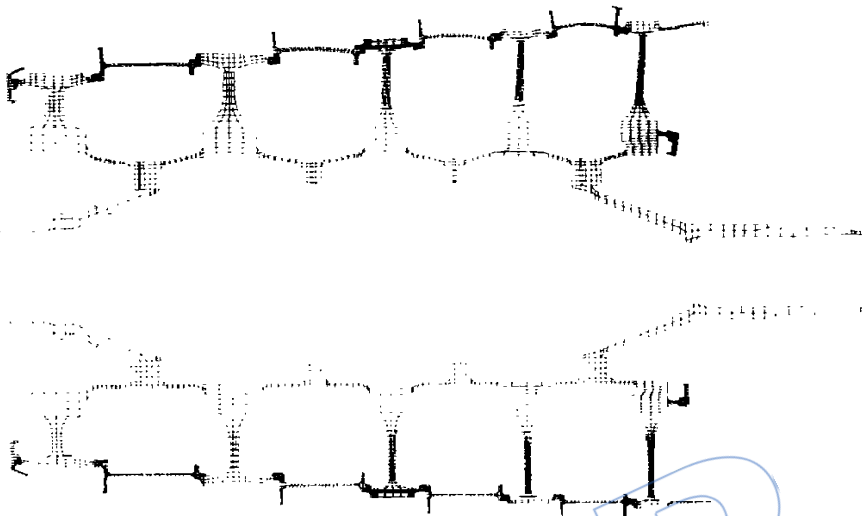


图 1 转子整体变图形(放大 10 倍)

见工作状态盘鼓配合得很好。计算结果表明各级盘上的应力较大, 其中第 6 级盘上的应力最大, 当量应力(Von Mises)为 644.8 MPa。因此各个部件的最大当量应力控制在 650 MPa 以下, 保证转子长寿命设计要求。在完成以上计算方案后, 也计算了轴向间隙为零和间隙增大一倍的情况。这两种情况和设计方案的结果见表 2。可见对此类转子结构, 轴向间隙的影响不可忽略。间隙增大, 应力增加, 间隙减小, 应力降低。间隙太小, 转子结构松散, 间隙太大, 应力又较大, 因此需要在计算的基础上给出合理的轴向间隙和径向过盈量(不排除可能是间隙)。机组运行证明, 转子运行平稳, 安全可靠。

表 1 第一级盘表面上几个典型位置应力计算和实测结果对比

位 置	1	2	3	4	5	6	7	8
计算应力值	222.6	213.6	264.2	315.5	323.2	391.2	215.0	184.5
实测应力值	228.8	206.5	254.8	328.6	342.0	378.9	217.8	176.5
误差(%)	- 2.7	3.3	3.6	- 4.0	- 5.5	3.1	- 1.3	4.3

表 2 三种方案应力计算结果

方 案	轴向间隙 情 况	最大当量应力(Von Mises) (单位: MPa)				
		第 2 级盘	第 3 级盘	第 4 级盘	第 5 级盘	第 6 级盘
1	设 计 状 态	463.8	490.8	482.2	454.8	644.8
2	间 隙 为 零	440.2	465.4	460.5	428.6	601.6
3	间隙增大 1 倍	492.6	528.8	510.5	485.3	702.5
(2- 1)/1 (单位: %)		- 5.1	- 5.2	- 4.5	- 5.8	- 6.7
(3- 1)/1 (单位: %)		6.2	7.7	5.9	6.7	8.9

4.2 某航空发动机高压压气机转子应力分析

某航空发动机高压压气机转子是 1 个三级转子、它有 3 个盘(第四、第五、第六)1 个轴组成,第四级盘与第五级盘,轴颈与第五、第六级盘在径向过盈配合,配合面轴向销钉固定,过盈量分别为 0.2, 0.3, 0.2 mm。荷载为:叶片和轮缘的径向离心力,整圈叶片承受的轴向气动力,轮盘承受的气体压力,温度场热膨胀。转子转速为 11425 r/min, 3 个盘上叶片承受的轴向气动力分别为 6867.0 N, 4905.0 N, 7406.55 N, 其它原始数据取自文献[4]。

转子整体变形应力计算结果见表 3。

表 3 Von Mises 当量应力 σ_e (单位: MPa)

程 序	第四级盘		第五级盘		第六级盘	
	辐板后侧	盘心	辐板后侧	盘心	辐板后侧	盘心
ALGOR 位移未协调	496.0	546.0	425.0	492.0	392.0	440.0
ALGOR 位移未协调	570.0	553.0	463.0	519.0	478.0	457.0
REC 位移协调并计及过盈量	616.5	555.0	521.0	537.5	589.5	457.7

从计算结果可知,位移协调和计及零件间的过盈量,对盘心处应力影响较小,但对轮盘辐板两侧圆弧处的应力影响较大。从单个结构的变形可得到解释:五级盘鼓筒前端,轴颈前后端的径向位移均大于与之配合的四级盘、五级盘和六级盘相应位置的径向位移。位移协调引起四级、五级和六级盘辐板圆弧处应力分别增加 13%, 9% 和 22%, 同样,紧度配合与位移协调相比也引起同样部位应力分别增加 8.2%, 12.5% 和 23.3%。因此,对此高压压气机转子以及类似组合式转子,在进行应力计算时,不考虑各零件配合关系,单独计算各个零件的变形和应力误差比较大,径向位移协调后得到的结果基本上能反映整个结构的变形趋势和应力状态,但与实际情况还有一些误差。装配状态(转速为零)的计算结果也表明,紧度配合引起的附加应力不容忽视,因此 REC 程序计及紧度配合的计算能给出符合实际情况,更合理的结果。

5 结束语

本文对组合转子整体应力分析的计算方法及 REC 软件的设计作了说明。该软件是在对径、轴双向配合组合转子的整体应力分析研究基础上完成的,大量算例结果和工程实用表明,计算方法正确、精度高、速度快,在解决转子应力分析方面具有通用性。在目前较多使用的微机上,就可以进行各类转子的整体应力分析。

参 考 文 献

1 盛惠渝等. 组合转子结构整体应力分析通用方法与程序(REC). 中国船舶科技报告, 1996

2 盛惠渝. 组合转子结构整体应力分析通用方法的轴向位移方程. 热能动力工程, 1996 年增刊

3 盛惠渝, 孙伯涛. 转子强度整体求解的有限元柔度法. 航空动力学报, 1987, 2(3): 215- 218

4 周建鸥等. WP7 高压压气机盘、轴颈强度计算及分析(离心力场). 航空工业总公司第六〇六研究所科研报告, 1995

(责任编辑 杨再荣)

clude two rise and fall profiles, a maneuver profile and a high cycle fatigue test spectrum.

Key Words Trainer Aircraft engines Accelerated test

REGULATION BEHAVIOR ANALYSIS OF AUTO- EVEN- LOAD CONNECTING COMPONENT

Du yanliang, Zhao Weigang, Liu Xiandong, Zhu Xinqun

Ma Liming, Hao Huazen, Zhang Zuping

(*Dept. of Mechanical Eng. Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043*)

ABSTRACT According to the deformation or fracture caused by uneven loads on the structural connection, the smart structure with sensible and regulative functions has been proposed to be used in bolt groups. The smart structure is constituted with the auto- even- load connecting component made of the shape memory alloy material. The mechanical behavior of the auto- even- load component in the bolt groups is analyzed. Its auto- even- load and the regulative principle to prevent the fracture are also studied.

Key Words Automatic equalization Shape memory alloy Bolts

INTEGRAL STRESS ANALYSIS TECHNIQUES AND SOFTWARE DESIGN FOR A COMPOSITE ROTOR

Zhou Chuanyue, Sheng Huiyu, Lin Xiangdong, Li Ming

(*Harbin 703 Research Institute, Harbin 150036*)

ABSTRACT A mathematical and mechanical model for analyzing the integral stress of a composite rotor is presented, which takes into account such factors as mating relations of the various components of the rotor, rotating centrifugal forces and thermal expansion, etc. A general- purpose software (REC) for the analysis of the rotor integral stress has been designed, which can be employed not only for a complicated rotor incorporating both radial and axial pretightening, but also for a rotor with any arbitrary axisymmetrical structures. With the help of the software it is possible to ascertain automatically whether the mating surface among the various components loosens, and to determine a rational radial interference and axial pretightening. The analysis of numerical examples and practical engineering applications indicates that the provided method is correct, the software design rational and the calculation precision and the speed quite high.

Key Words Rotors Stress analysis Programming

RESEARCH ON COUPLED LATERAL TORSIONAL VIBRATION OF ROTOR- GEAR COUPLING SYSTEM

Li Ming, Zhang Yong, Jiang Peilin, Yu Lie

(*Institute of Lubrication Theory & Bearing, Xi'an JiaoTong University, Xi'an 710049*)

ABSTRACT Based on the meshing condition of the gears, the constraint equa-