

涡轮盘榫齿载荷分配的一种计算方法

沈阳航空工业学院 盛元生

通常在有限元计算中，力和位移的边界条件要精确地给出。但是对于力和位移边界条件不能充分给出的一类问题，如接触问题，目前解题尚有一定的困难。对于涡轮盘和叶片的榫齿连接，求解这种含多面接触的工程计算，往往是假定一种边界条件，即首先预估榫齿上的载荷，然后进行轮盘或叶片的有限元分析。本文试图以完整的榫齿连接区域作为有限元模型，利用弹性位移叠加原理求载荷在榫齿上的分配，并根据这一分配进行了应力计算和断裂分析。

一、榫齿载荷分配的计算模型

某发动机涡轮盘的榫槽具有五对齿，如图1所示。每个齿面上取三个接触节点，五个齿面共有十五个节点。在节点*i*上作用的接触力*P_i*为法向；作用的摩擦力 μP_i 为切向，那么全部节点上的接触力可写成向量

$[P] = [P_1, P_2, \dots, P_{15}]^T$

以 $\delta Y_{ij}, \delta Z_{ij}, \delta N_{ij}$ 表示叶片榫头上节点*j*的作用力*P_j*为单位力时，节点*i*沿*Y*、*Z*、*N*方向的位移。 $\Delta Y_{ij}, \Delta Z_{ij}, \Delta N_{ij}$ 为同样定义下轮盘榫槽上的节点位移

按图1的几何关系，可写出位移矩阵为

$[\delta N] = [\delta Z] \cos \theta + [\delta Y] \sin \theta \tag{1}$

$[\Delta N] = [\Delta Z] \cos \theta + [\Delta Y] \sin \theta \tag{2}$

当 $P_1, P_2, \dots, P_{15}$ 同时作用于榫齿各节点时，以 dN_i, DN_i 分别表示叶片上 (i-1)' 和盘上第*i*节点处沿*N*向的总位移，则根据弹性变形的假设，按位移叠加原理有

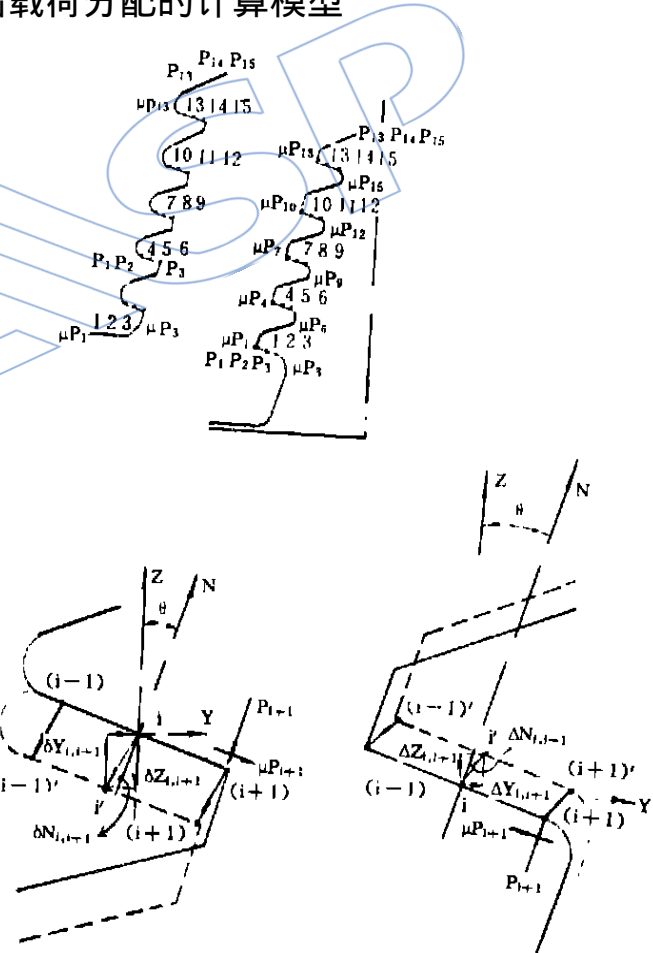


图1 榫齿载荷分配计算模型

本文于1989年4月收到。

$$\{U_N\} = \{\delta N\} \{P\} \quad (3)$$

$$\{\delta N\} = \{\Delta N\} \{P\} \quad (4)$$

以上 $\{\delta N\}$, $\{\Delta N\}$, $\{U_N\}$, $\{\delta N\}$ 等均为 15×15 阶矩阵。

设 T , t 及 T' , t' 分别为轮盘和叶片上榫齿变形前、后的齿距, 见图 2。

由于位移协调, 变形前后盘的

齿距和叶片的齿距对应相等, 即 T

$= t$, $T' = t'$ 。从变形分析得到

$$DN_{i+1} - dN_{i+1} = DN_i - dN_i$$

$$(i = 1 \sim 14)$$

(5)

对于真实情况而言, 一对接触点在变形后可能不再是原始对应的接触点对, 但是在用有限元求解时是将接触边界凝聚在接触节点上的, 以接触点协调来代替接触边界协调。因此, 此处假设变形前后接触边界不变, 相当于忽略了接触点间的相对滑动。这一假设使榫齿接触问题的工程计算大大地简化了, 其结果已为本文中的光弹实验所证实。

将方程 (3) (4) (5) 合并, 其矩阵形式为

$$\{A\} \{P\} = 0 \quad (6)$$

式中

$$\{A\} = \begin{bmatrix} \{\Delta N_1\} - \{\Delta N_2\} + \{\delta N_2\} - \{\delta N_1\} \\ \vdots \\ \{\Delta N_{14}\} - \{\Delta N_{15}\} + \{\delta N_{15}\} - \{\delta N_{14}\} \end{bmatrix}_{14 \times 15}$$

$\{A\}$ 阵中各项系数的物理意义是各接触点的柔度, 可以通过有限元求出。

$\{A\}$ 为 14×15 的长方阵, (6) 式不能直接求解, 须补充一个力的平衡方程 (图 2)。

$$\sum P_i \cos \theta + \sum \mu P_i \sin \theta = P_z \quad (7)$$

通过 (6) 和 (7) 式可以求解 $P_1, \dots, P_{15}$ 。

二、计算结果和实验结果

将上述公式编程后并运用 SAP4 通用程序对给定涡轮盘进行了计算, 已知盘的弹性模量 $E = 1.63 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.32$, 离心力折合的单位长度上线载荷 $P_z = 852.6 \text{ MPa}$, $\theta = 15^\circ$; 不考虑相邻榫槽中心线角度的影响。所得榫齿间载荷分配及齿根圆角顶部最大应力值见表 1。

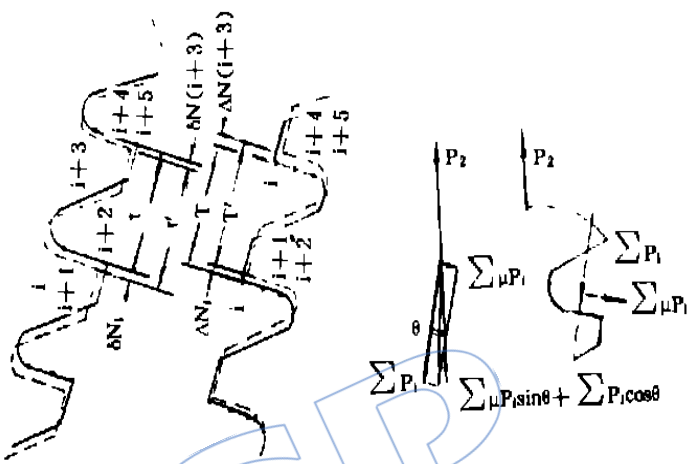


图 2 榫齿位移协调关系

表 1 槽齿载荷分配及齿根最大应力和光弹实验平均最大应力

m	摩擦系数 $\mu=0.0$		$\mu=0.2$		光弹实验值
齿号	P (KN)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	P (KN)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\max}$ 平均值 (MPa)
1	201.98	354.76	201.49	407.09	490.3
2	175.52	356.52	175.03	369.36	518.9
3	159.83	373.38	158.76	383.96	524.1
4	159.05	392.00	158.76	404.64	531.1
5	157.39	503.82	158.76	527.43	561.3

对图 3 所示 2 槽齿根部的三种裂纹 (a: 0.45mm 水平, b: 0.75mm 水平, c: 0.75mm) 倾斜进行了线弹性断裂力学分析, 采用应力法计算公式

$\sigma_{ij}(\theta) = 1/\sqrt{2\pi r} [K f_{ij}(\theta) + K F_{ij}(\theta)]$
三种裂纹计算结果的 K (MPam^{1/2}) 分别为 a: 10.72, b: 11.37, c: 10.30; K (MPam^{1/2}) 分别为 a: -0.50, b: -0.16, c: 0.76。

由上可看出 K 值很小, 槽底裂纹以张开型为主。

本文还对计算结果进行了实验验证。二维光弹模型采用 Homalite 板料制成, 厚度 $h_m=6.35\text{mm}$, 几何放大比 $\lambda=5.9513$, 采用钠光源材料条纹级数 $f=30.24\text{KN/m}$, 无裂纹时齿根圆角处最大应力值列于表 1。

在模型上切割一条平直裂纹, 测得等效于实际叶片 0.65mm 水平裂纹之 $K=11.90\text{MPam}^{1/2}$ 。

对比计算的和实验的结果表明, 最大齿根应力均在第五齿, 数值比较吻合; 误差约为 6%。但是第三和第四齿两组数值有较大差异, 这和计算条件及实验条件的差异也有关系。

将断裂分析的计算结果, 按 $\sqrt{a}$ 关系插值求得水平裂纹 $a=0.65\text{mm}$ 下之 K 值为 $11.17\text{MPam}^{1/2}$ 。与实验值对比, 具误差也约为 6%。

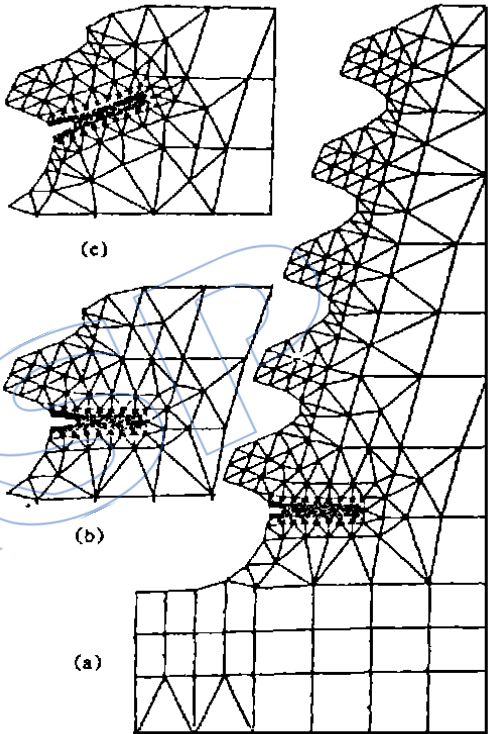


图 3 槽底齿根带有裂纹

三、结 论

- 1. 计算表明 1 号齿上分配的载荷最大, 其它齿上的载荷依次呈递减趋势。
- 2. 最大齿根应力发生在第 5 号齿的齿根, 这和涡轮盘槽常出现裂纹的实际情况相符合。
- 3. 齿面的摩擦系数对载荷分配没有太大影响, 但对最大应力值有较大影响。
- 4. 槽底裂纹无论是水平还是倾斜, 都是以张开型裂纹为主导。
- 5. 此方法的计算结果与实验比较吻合。
- 6. 此法可以用于槽齿优化设计中对齿型修改时载荷与应力的计算。还可发展来对接触不均匀槽齿载荷进行预估。

evaporation rate of fuel in the evaporating installation is presented, and the effect of some primary factors is analysed. The calculated results are compared with test data.

A COMPUTATIONAL APPROACH TO THE LOADS SHARED BETWEEN THE TEETH OF TURBINE LUGS

Sheng Yuansheng (*Shenyang Institute of Aeronautical Engineering*)

ABSTRACT A displacement superposition method based on the principle of compatibility of deformation is approached for solving multi-contact problems. The formulas derived in this paper has been programmed to solve the load distribution between the teeth of a turbine disk lugs in association with FEM program, and then the maximum stress at each fillet of tooth is calculated. A study on fracture mechanics of the disk lug with different cracks in the tooth fillet is also presented. The results are in satisfactory agreement with data of the photoelastic experiments.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE RESPONSE OF AN AXIAL COMPRESSOR TO INLET PERIODIC DYNAMIC DISTORTION

Feng Qi, Zhuang Huimin (*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT A pitot pressure pulsation generator and a data acquisition and processing system have been built up for this research. The response of a low pressure compressor to two kinds of inlet dynamic flow modes (axisymmetric or distorted) are investigated under the conditions of the compressor with or without a plenum. The results show that there is a sensitive frequency at which the perturbation is amplified through the compressor. The sensitive frequency is influenced not by inlet distortion, but by the plenum in the present research.

A DESIGN OF A TWIN VARIABLE CONTROL SYSTEM FOR AERO-TURBOJET ENGINE

Zhang Jiazheng, Hua Kai, Guo Yingqing, Liu Fang
(*Northwestern Polytechnical University*)

ABSTRACT Under twin variable control with the equal low compressor speed and equal low turbine exit temperature, the twin spool turbojet can obtain higher power performance. In this paper, firstly, the engine dynamic model with two inputs and two outputs is deduced. Then with the aid of LQR theory, the optimal regulator of twin variable control system is designed, and the approaches for processing some problems existed in the design process are recommended. Finally, the control system designed in terms of optimal method is simulated numerically. The results show that, in the condition of a state perturbation on the system, the transient performance of the system recovered to original state is more satisfactory, and the variation of control mediators is in allowable limits of the controllers.