周向非均匀流动引起的转子动力学载荷分析

胡 绚¹,张 强²,戴宏亮¹

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院,长沙 410082;2. 中国飞行试验研究院,西安 710089)

摘要:以轴流涡轮为分析对象,分析了流动沿周向分布不均匀的条件下涡轮转子受到的气动载荷。假设涡轮级内的流动沿周向呈1次谐波形式的余弦函数分布,考虑转子叶片叶顶间隙,利用双耦合激励盘模型描述叶片通道中的流动,采用谐波分析方法 求得涡轮转子受到的气动载荷。分析了不同轴向位置处、不同非均匀流动参数的影响,讨论了转子偏心所产生的非均匀流动,给出 了非稳态流动条件下的气动载荷。结果表明:1次谐波形式的非均匀流动会产生附加载荷作用于转子,从而影响转子的动力学性 能;非稳态不均匀流动会影响附加载荷的大小,但不改变其在动坐标系中的方向。

关键词:转子动力学;气动载荷;非均匀流动;1次谐波;轴流涡轮

中图分类号:V231.96 文献标识码:A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2015.03.005

Analysis of Rotordynamic Loadings from Circumferentially Non-uniform Flow HU Xuan¹, ZHANG Qiang², DAI Hong-liang¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: The dynamic loadings on axial turbine rotors were analyzed with circumferentially non-uniform flow conditions. Assuming the circumferential distribution of the flow could be expressed as a cosine function in the first harmonic form, the flow in the blade passage with blade tip clearances was described by two-coupled-actuator-disk model, and the dynamic loadings on the turbine rotor were obtained by the harmonic analysis method. The effects of several flow parameters in different axial positions were analyzed, and the non-uniform flow due to the eccentric rotor was discussed, and then the dynamic loadings were predicted under the condition of unsteady flow. The results show that non-uniform flow with the form of first harmonic can produce additional forces on the rotor, which may exert influences on the rotordynamic performance. The additional loadings can be affected by the unsteady non-uniform flow, which can't change their directions in the moving coordinate system.

Key words: rotordynamics; dynamic loadings; non-uniform flow; the first harmonic; axial turbine

0 引言

在叶轮机械的工作过程中,由于受转子偏心或者 上游工作级等的影响,叶轮中的流动沿周向的分布会 变得非均匀,可能使叶轮转子受到附加的气动载荷, 从而使其动力学性能变得不稳定,运行效率降低,甚 至可能发生故障^[1-3]。因此,有必要对由非均匀流动所 产生的气动载荷与动力学影响进行研究,以指导叶轮 机的设计与优化、提高其工作性能。

叶轮转子形心的偏移是引起周向非均匀流动的 原因之一,会产生影响转子系统运动稳定性的气动载 荷——Thomas/Alford 力。对于转子偏心引起的气动载 荷,Ehrich、Spakovszky、Martinez-Sanchez 和 Al-Nahwi 等学者提出了不同的解析方法^[2-5],Kang 等利用计算 流体力学软件进行了仿真计算^[6],Storace、 Martinez-Sanchez等进行了试验研究^[1,7]。目前, Thomas/Alford力的产生机理已研究得比较清楚,也得 到了较为统一、明确的结论。

对于由其他原因引起的非均匀流动,国内外学者 更多地研究了叶轮机内部气动特性或整体性能的影 响因素^[8-11];而有关叶轮结构动力学方面的研究,则主

收稿日期:2014-09-11 基金项目:国家自然科学基金(11102064)、中央高校基本科研业务费资助 作者简介:胡绚(1978),男,博士,研究方向为旋转机械强度振动;E-mail:hu_xuan163@163.com。

引用格式: 胡绚, 张强, 戴宏亮. 周向非均匀流动引起的转子动力学载荷分析 [J]. 航空发动机,2015,41 (3):24-29. HU Xuan,ZHANG Qiang,DAI Hongliang. Analysis of rotordynamic loadings from circumferentially non-uniform flow [J]. Aeroengine,2015,41(3):24-29

要集中于讨论叶片在非均匀来流作用下的动态特性。 例如,黄典贵、陈佐一等研究了非均匀来流对叶片的 气动激振力以及动叶的激振特性影响[12-14]。

本文为了研究流动的周向不均匀性所引起的、作 用在轴流涡轮转子上的附加气动载荷,假设流动的周 向非均匀性可以用余弦函数表示,分别考虑了非均匀 来流和转子偏心的作用,也分析了偏心涡动与非稳态 来流条件下转子的受载情况。

1 计算模型

1.1 模型概述

采用 Song 与 Martinez-Sanchez 的双耦合激励盘 模型[2-3],分析压气机和涡轮中由转子偏心引起的不均 匀流动,以及其产生的气流激振力。该模型假设气流 是无黏性且不可压缩的,也不考虑通道中的径向流 动。该分析方法适用于大雷诺数的流动情况,此时流 体的黏性作用相对较小,而惯性作用相对较大。在麻 省理工学院所进行的偏心涡轮试验中,双耦合激励盘 模型较为准确地预测了包括流动不均匀程度以及 Thomas/Alford 力等试验结果¹³。

在计算模型中,假设流动的周向不均匀性可以用 1次谐波形式的余弦函数描述。非均匀流动的原因 为:(1)周向近似呈余弦的流动是存在的。例如,叶轮 转子存在偏心时,上下游的流动在忽略高次谐波小量 后就可用1次谐波形式的余弦(或正弦)函数近似描 述;(2) 余弦形式的不均匀流动便于采用谐波分析方 法得到解析结果:(3)1次谐波形式的非均匀流动是 轴不对称的,因此将会产生附加气动载荷(如 Thomas/Alford 力)作用于转子上,可能使转子系统运 动失稳。

整个分析均取叶片中径处的流动参数,任一流动 参数 A 可以表示为其均值 A 与非均匀小扰动 A'之 和[16]

$$\mathbf{A} = \overline{\mathbf{A}} + \mathbf{A}' \tag{1}$$

而其非均匀小扰动可近似地用余弦函数描述

A'=A'_{max}
$$\cos(\varphi - \varphi_A - \Omega t)$$

$$= \operatorname{Re}(\hat{A}e^{i(\varphi-\Omega t)})$$
 (2)

式中:A' 为流动参数 A 在周向位置 φ 处的非均匀小 扰动; A'_{max} 为扰动幅值; Ω 为转子的涡动角速度; φ_{A} 是 A'ma 相对于动坐标系 n 轴的相位角; Å 为复数形式的 扰动幅值,包含了扰动的幅值和相位信息;Re()表示 取复数的实部。

计算模型的坐标系 如图1所示。

1.2 流动的描述

由于叶顶间隙的存 在,气流流经动叶时,一 部分气体受到叶片引导 而通过叶片通道,另一部



分气体通过叶顶间隙流出。对于叶片通道主流,可以 用涡轮的速度三角形来描述其流动,如图2所示。图 中:c、w 分别为绝对速度和相对速度;U 为动叶中径 处的线速度; α 、 β 分别为绝对速度角和相对速度角; x、y表示轴向和周向。为了便于说明,图中也对各通 道截面进行了编号。





对于叶顶间隙流动, Song 认为穿过叶顶间隙后 的射流与通道主流混合形 成了涡流,其流动模型如图 3 所示。图中:β_m为动叶的 平均转角;Wp、Ws分别为叶 盆与叶背的气流相对速度; W_{iet}为叶顶间隙射流的相对 速度;w3、C*3分别为涡流中

心的相对速度和轴向绝对 速度;θ为涡流相对速度与 叶片之间的夹角。通过分 图3 叶顶间隙的流动模型



析动叶两侧的压差,可以给出涡流中心的相对速度 角¹⁵

$$\theta$$
=arctan ($\sqrt{c_1}/2$) (3)

式中:**c**1为叶片的升力系数。

1.3 上下游流动的耦合

双耦合激励盘模型利用叶片尺度内下游无穷远 处流动参数的偏导数来表示半径尺度内下游流动的 小扰动,将2个尺度上的参数联系在一起,也将上下 游的流动耦合在一起,其耦合关系为¹⁶

$$\begin{vmatrix} \hat{\mathbf{c}}_{\mathbf{x}}^{*} \\ \hat{\mathbf{c}}_{\mathbf{y}}^{*} \\ \hat{\mathbf{c}}_{\mathbf{x}}^{*} \\ \hat{\mathbf{c}}_{\mathbf{y}}^{*} \\ \hat{\mathbf{c}}_{\mathbf{y}}^{*} \\ \hat{\mathbf{A}} \\ \hat{\mathbf{n}} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\hat{\mathbf{c}}\mathbf{x}}{U} \frac{\partial}{\partial \phi} + \frac{\hat{\mathbf{t}}_{\mathbf{c}}}{H} \frac{\partial}{\partial \frac{\mathbf{t}_{\mathbf{c}}}{H}} \end{bmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{c}_{\mathbf{x}}^{*} \\ \mathbf{c}_{\mathbf{y}}^{*} \\ \mathbf{c}_{\mathbf{y}}^{*} \\ \mathbf{A} \\ \mathbf{p} \end{vmatrix}_{\mathbf{x}=+\infty}$$
(4)

式中:Δ为叶顶间隙流层的厚度;p为压力;φ为流动 系数;t_c为叶顶间隙;H为叶片通道高度;上标"+"表 示叶顶间隙流;"-"表示叶片通道流;x=0+、x=+∞分 别表示半径、叶片尺度上的下游无穷远。

1.4 气动载荷

计算中考虑转子上的气动载荷由推动叶片运动的 周向力和气体作用在转子轮毂上的压力2部分构成。

某个周向方位角 φ 处叶片受到的周向气动力 $q_v(\varphi)$ 可用动量定理计算为^[16]

$$\mathbf{q}_{y} = \lambda \dot{\mathbf{m}}_{2r} (\mathbf{c}_{y2r} - \mathbf{c}_{y3}^{*}) + (1 - \lambda) \dot{\mathbf{m}}_{2r} (\mathbf{c}_{y2r} - \mathbf{c}_{y3}^{*})$$
(5)

式中:λ 为叶顶间隙流量与叶片通道总流量之比; m₂ 为通过动叶的总流量。表达式的第1、2部分分别为叶 顶间隙流和叶片通道流所产生的周向力。

将周向力和轮毂上的压力向转子形心进行简化, 可以求得气动载荷的合力。如果通过涡轮盘的气流是 周向非均匀的,转子受到的周向力或压力也会是非均 匀的,那么转子形心上的合力就不为零,产生了本文 所讨论的附加气动载荷。

2 算例与分析

以 Martinez-Sanchez 的轴流试验涡轮作为分析 对象,该涡轮采用密度更大的 Freon-12 气体作为工 作介质以减小气体黏性的影响。其设计流动系数为 0.58,反力度为 0.2,效率为 0.79,转速为 3440 r/min, 叶顶间隙与叶片高度之比 t/H=0.02。

2.1 转子叶栅前流动非均匀的情况

由上述分析可知,通过转子叶栅的周向非均匀流 动是产生附加气动载荷的直接原因。假设转子叶栅进 口流动存在非均匀性,分析不同流动参数非均匀性的 影响。

假设转子叶栅前的轴向速度扰动 c¹xr 沿周向不 均匀,其无量纲为

$$C'_{x2r}=c'_{x2r}/U$$
 (6)

无量纲周向力扰动为

$$Q'_{y} = q'_{y} \phi / (\dot{m} U)$$
 (7)

无量纲的转子轮毂压力扰动为

$$\mathsf{P'}_{\mathsf{r}} = \mathsf{p'}_{\mathsf{r}} / (\rho \mathsf{U}^2 \phi) \tag{8}$$

式中: $\phi=c_x/U$,为流动系数。



若认为 c_{x3}≈c_{x2},那么气体流经转子叶片通道后的周向速度为

$$c_{v_3} \approx c_{x_2r} \tan \beta_3 - U$$
 (9)

可见,在 c_{x2} 越大的位置 c_{y3}也较大,根据式(5), 该位置的周向力 q_y 随之增大。从图 4 中可见,Q'ymax 与 C'x2max 的相位角相同。且在 c_{x2} 较大的位置,气体作功 更多,根据伯努利方程可知,该位置的压降更多,P'max 与 C'x2max 的相位角相差 180°。

c'_{x2}、**c'**_{y2} 和 **p'**₂ 所引起的转子动力学载荷如图 5 所示。从图 5 中可见,因周向力与压力的不均匀分布,转子受到的附加载荷 f_x、f_y 分别为附加载荷在 X、Y 方

向的分量。分析非均匀周向速度 c_{y2} 的作用和引起的 转子动力学载荷,根据式(6)设幅值为 0.01,最大值位 于 0°。图 4(b)给出了非均匀 c_{y2} 产生的 Q'_y 和 P'_r,结 果显示 Q'_y, P'_r 和 C'_{y2} 在相同位置取得最大值。

转子叶栅前非均匀压力 p_r 产生的 Q'_v 和 P'_i 如图

涡轮盘

 $Y\uparrow_{90^{\circ}}$

270

(a) C'_x 所引起的转子

动力学载荷

 $f_{\rm F}$

4(c)所示。无量纲压力扰 动 P'₂ 幅值为 0.01,最大 值位于 0°,表明 p₂ 的不均 匀性对周向力没有影响,¹⁸⁰ 只改变转子轮毂上压力的 分布,且轮毂压力和 p₂ 的 最大值所在方位相同。非 均匀 p₂ 引起的转子动力 学载荷如图 5(c)所示。



图 5 C'_{x2r}、C'_{y2r}和P'_{2r}所引起的转子动力学载荷

2.2 静子叶栅前流动非均匀的情况

静子叶栅前流动即涡轮级的进口来流,非均匀性 会导致转子叶栅的流动不均匀,从而产生附加载荷作 用在转子上。

设轴向速度扰动 C'xi 的幅值为 0.01,最大值位于 0°。结合速度三角形以及连续方程、动量方程可以得 到截面 1 与 2r 之间的流动关系^[16],能够解得 Q'y 和 P'r 的周向分布,如图 6 所示。从图中可见,Q'y 和 P'r 的分 布规律与图 4(a)相似,所以,C'xi 和 C'xi 的作用是相 似的,所引起的转子动力学载荷都如图 5(a)所示。

不均匀来流压力 p_1 对流动的影响也与 p_2 相似, 产生的附加载荷如图 5(b)所示。

至于来流周向速度 c_{y1},由于计算模型假设叶片 能够完美地引导气流,因此,静叶出口的周向速度为

$$c_{y2s} = c_{x2s} \tan \alpha_2 \tag{10}$$

按照伯努利方程,静叶出口的压力为

$$\mathbf{p}_{2s} = \mathbf{p}_{1} + \frac{1}{2} \rho \mathbf{c}_{y_{1}}^{2} - \frac{1}{2} \rho \mathbf{c}_{x_{2s}}^{2} \tan^{2} \alpha_{2}$$
(11)

将(8)写成扰动形式,并忽略高阶小量

 $p'_{2s}=p'1+\rho \bar{c}_{y1}-\rho \bar{c}_{x2s}c'_{x2s} \tan^2 \alpha^2$ (12)

由式(10)、(12)可知,如果涡轮级来流的平均周 向速度c_{y1}=0,来流周向速度扰动c_{y1}是不会影响c_{y2}和 p'₂的,也即在双耦合激励盘模型的假设条件下,来流 周向速度的非均匀性并不会引起不均匀的下游流动, 当然也不会引发附加载荷,这是由计算模型的局限性 所决定的。



2.3 转子静态偏心的影响

机匣变形或者转子涡动时转子形心会偏离机匣 形心,使得转子叶片的叶顶间隙沿周向分布不均匀, 从而产生附加载荷作用于转子。实际上,转子偏心导 致气流通道发生了变化,使流动不均匀才产生了附加 载荷,是由转子偏心所引起的非均匀流动。

如果转子未发生涡动,仅发生静态偏心,那么流动将是稳态的。该流动以及气动载荷已经被多位学者分析得比较清楚^[15-16],下文描述会涉及到文献[16]中的部分计算过程,以保证分析过程的连续性和完整性。

假设转子形心向 0°方向发生静态偏移,偏移量 e/H=0.011,所引起的非均匀叶顶间隙扰动 t'。以及 Q'y 和 P'₂ 的分布如图 7 所示。从图中可见,t'。采用无量



纲形式 *τ*'=t'_c/H。可以发现,在叶顶间隙最大位置 (180°方位角)附近,周向力和压力都是最小的,其最 小值并不是恰好在 180°位置,而是会有所偏移。计算 与试验结果基本吻合,表明本文的公式推导与程序编 写的正确性。

转子静态偏心产生的 附加载荷如图 8 所示。 f_x 是径向回复力, f_y 会加速 转子正向涡动,是与转子 180⁻ 运动稳定性相关的切向 力。气动载荷系数为 $\alpha_x=f_x/(\pi R \bar{q}, \bar{t}/H)$ 和 $\alpha_y=f_y/(\pi R \bar{q}, \bar{t}/H)$ 。

气动载荷与偏心距之



间的线性关系如图 9 所示。本文的计算结果与试验值 基本吻合。





理论分析和试验表明,转子的偏心除了会使下游 产生非均匀来流,还会影响上游流动,使其变得不均 匀,而且离转子叶栅越远,转子偏心的影响就越小。偏 心转子的附加载荷 f。由均匀流动通过偏心转子通道 时产生的附加载荷 f。和偏心引起的上游非均匀流动 通过无偏心转子通道时产生的附加载荷 fmu 构成。由 于双耦合激励盘模型是线性的,所以 2 部分载荷的叠 加就等于转子偏心所产生的总载荷

$$f_e = f_u + f_{nonu}$$
 (13)

2.4 非稳态流动的影响

上述分析都假设流动是稳态的,下面分析转子的 涡动和非稳态的来流对转子动力学载荷的影响。

对于转子发生偏心涡动时受到的附加载荷,Song 已经进行了分析阐述,本文给出了与Song一致的计 算结果^[16],如图 10 所示。图中 α_n 和 α_t 的定义与 α_x 和 $\alpha_{\rm Y}$ 相同,只是对应的是动坐标系 nO't。从图中可见,无 论是正向涡动还是反向涡动,2个气动载荷系数的符 号都没有变化,表明附加载荷在动坐标系中方向不 变。另外, $\alpha_{\rm n}$ 对涡动角速度并不敏感,而 $\alpha_{\rm t}$ 随 Ω 的增 大而减小。



对于多级涡轮,当上游的涡轮级发生偏心涡动 时,其出口的流动是旋转变化的,则下1级涡轮的进 口流动会变为非稳态。假设涡轮级的来流轴向速度 是与时间相关的变量,令其扰动的表达式为

$$c'_{x1} = c'_{x1max} \cos(\varphi - \Omega t)$$
(14)

式中: Ω 为 c'_{x1}旋转变化的角速度,也即 c_{x1}发生周期 变化,同时假设动坐标系 nO't 与 c'_{x1}同步旋转。

非均匀来流所产生的附加载荷与旋转角速度之 间的关系曲线如图 11 所示。首先,在动坐标系 nO't 中, α_n 和 α_t 的符号不会变化,说明载荷的方向不变, f_n 指向 c_{x1} 最大值所在方位(即 n 轴正方向),而由 f_n 向 自转角速度 ω 方向转动 90°就是 f_t 的指向(也即 t 轴 正方向), f_n 和 f_t 之间的方向关系与图 5(a)一致。其 次, α_n 和 α_t 都随着涡动角速度的增大而增大,且成线 性关系。



3 结论

本文运用双耦合激励盘模型,分析了轴流涡轮中 1次谐波形式的非均匀流动对转子所受载荷的影响, 研究了转子所受附加气动载荷的产生机理,得到的主要结论如下:

(1)1次谐波形式的非均匀流动使得涡轮转子所 受气动载荷不再平衡,从而出现附加载荷,而且不同 的流动参数所产生的附加载荷有所不同;

(2)发生在转、静子叶栅前的非均匀流动对附加 载荷的影响是相似的;

(3)转子偏心会引起非均匀流动,计算模型能够 比较准确地预测转子静态偏心时的气动载荷分布和 附加载荷大小;

(4)在同步旋转的动坐标系中,涡动角速度或者 来流旋转角速度并不影响附加载荷的方向,而只改变 附加载荷的大小。

参考文献:

- [1] Storace A F, Wisler D C, Shin H W, et al. Unsteady flow and whirl-inducing forces in axial-flow compressors (Part I-experiment)[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(3):433-445.
- [2] Song S J, Wisler D C, Ehrich F F, et al. Unsteady flow and whirl-inducing forces in axial-flow compressors (Part II-analysis)[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(3):446-452.
- [3] Song S J. An investigation of tip clearance flow excitation forces in a single-stage unshrouded turbine [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [4] AI-Nahwi A A, Paduano J D, Nayfeh S A. Aerodynamic-rotordynamic interaction in axial compression systems (Part I-modeling and analysis of fluid-induced forces)[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(3): 405-415.
- [5] AI-Nahwi A A, Paduano J D, Nayfeh S A. Aerodynamic-rotordynamic interaction in axial compression systems (Part II-impact of interaction on overall system stability) [J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125 (3):416-424.
- [6] Kang Y S, Kang S H. Prediction of the fluid induced instability force of an axial compressor [C]//ASME FEDSM, Miami: ASME, 2006: 337-344.
- [7] Martinez-Sanchez M, Jaroux B Song S J, et al. Measurement of turbine blade-tip rotordynamic excitation forces[J]. Journal of Turbomachinery,

1995, 117(3): 384-392.

- [8] Hynes T P, Greitzer E M. A method for assessing effects of circumferential flow distortion on compressor stability [J]. Journal of Turbomachinery, 1987, 109:371-379.
- [9] 陶立权,孙鹏,杨坤.风扇/压气机进口畸变问题数值研究进展[J]. 中国民航大学学报,2010,28(2):6-10.

TAO Liquan, SUN Peng, YANG Kun. Development of numerical simulation methods used for fan/compressor with inlet distortion [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28(2):6-10. (in Chinese)

[10] 胡骏. 均匀与非均匀进气条件下多级轴流压气机性能计算 -- 周 向畸变的影响[J]. 航空动力学报,2000,15(3):229-232.

HU Jun. Calculation of off-design performance of multistage compressor with circumferential distorted inlet flow [J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(3): 229-232. (in Chinese)

- [11] Hermanson K S, Thole K A. Effect of inlet conditions on endwall secondary flows [J]. Journal of Propulsion and Power, 2000, 16 (2): 286-296.
- [12] 黄典贵. 不均匀来流作用下汽轮机动叶片的动态特性分析——非 定常欧拉解法[J]. 机械工程学报,1999,35(5):47-49.
 HUANG Diangui. Analysis on dynamic characteristics of the turbine rotor blade under uneven inflow - unsteady Euler method [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999,35(5):47-49. (in Chinese)
- [13] 陈佐一, 吴晓峰. 用振荡流体力学方法确定非均匀来流对动叶的 气动激振力[J]. 动力工程,1999,19(2): 8-13.
 CHEN Zuoyi,WU Xiaofeng. Oscillating fluid mechanics method to determine unsteady aerodynamic force of rotating blades due to non-uniform inlet flow[J]. Power Engineering, 1999,19(2): 8-13. (in Chinese)
- [14] 陈佐一, 霍福鹏. 转子叶片在非均匀来流条件下的流体激振特性 [J]. 发电设备, 2002(2):1-4.

CHEN Zuoyi, HUO Fupeng. The fluid exited vibration properties of rotor blades under non-uniform intake flow conditions [J]. Power E-quipment ,2002(2):1-4. (in Chinese)

- [15] Song S J, Martinez-Sanchez M. Rotordynamic forces due to turbine tip leakage (Part I-blade scale effects)[J]. Journal of Turbomachinery, 1997, 119(4): 695-703.
- [16] Song S J, Martinez-Sanchez M. Rotordynamic forces due to turbine tip leakage (Part II-radius scale effects and experimental verification)[J]. Journal of Turbomachinery, 1997,119(4):704-713.

(编辑:肖磊)