

转子振动反旋流主动控制试验研究

株洲航空动力机械研究所 陈运西* 董德耀

【摘要】 介绍一个用于旋转机械振动“气体反旋流”主动控制试验研究的系统。它利用增加系统的有效阻尼来抑制由于不平衡因素等引起的转子横向振动。试验结果表明: 气体反旋流的最佳值, 为这一技术应用于发动机部件试验中提供了有用的数据和经验。

关键词: 转子 机械振动 气体流动 控制系统 试验

1 原理、方法与设备

在航空发动机研制过程中, 压气机、涡轮等几大部件的试验研究, 往往由于试验件前后连接的转接段设计不尽合理而引起过大振动, 延误研制周期。这就需要有一种减弱和控制这一过大振动的方法。因此, 我们开展转子振动反旋流主动控制的试验研究。众所周知, 在转子与轴承或密封件之间跟随转子作旋转运动的流体是使系统失稳的一个因素, 它能产生周期性力激励转子发生横向自激振动。流体力与和旋转轴相关的周向流动模式有关, 并以 $\lambda\omega$ 的角频率旋转。 ω 是转子旋转速度, λ 是流体的平均周向速度比。控制密封件间的周向流动模式可以增加转子的稳定性。为此在转子与静子之间引入一股与旋转方向相反的周向气流, 就可减少流体的平均流速比 λ 。它对流体径向阻尼系数之影响很小, 但可增加系统的有效阻尼, 减弱转子的振动。对转子因不平衡因素引起的共振大振幅具有同样的减振作用。我们设计加工了两个转子, 轴径分别为 $\Phi 18\text{mm}$ 、 $\Phi 22\text{mm}$ 。轴中央各装一个 $(\Phi 100 \sim \Phi 116) \times 80\text{mm}$ 的锥体盘。静子为一个具有 $(\Phi 99 \sim \Phi 117) \times 90\text{mm}$ 内圆锥孔和 $\Phi 140 \times \Phi 90\text{mm}$ 外圆柱面、可在轴向移动、固定在底座上的内圆锥衬套。其径向间隙在 $0 \sim 2\text{mm}$ 之间连续可调。内圆锥衬套上按周向开有4个喷嘴。通过它们可将周向反旋流引入到静子、转子间的径向间隙—气膜腔内。周向反旋流的流量由控制系统控制。经计算, $\Phi 18\text{mm}$ 与 $\Phi 22\text{mm}$ 轴的转子第一阶临界转速分别为 5818r/min 和 8456r/min 。锥体盘质量为 4.2165kg 。轴总长为 454mm , 有效长度 $L = 307\text{mm}$ 。

设转子横向是对称的, 受控系统振动方程为:

$$m\ddot{z} + D\dot{z} + D_0 - j\lambda(z|\dot{z}|)\omega + jVz/R + K + K_0 + \psi(|z|)z = m\epsilon\omega^2 \exp(j\omega t) \quad (1)$$

式中 $z = x + jy$, x 、 y 表示中央盘处的水平、垂直位移。 m 为圆锥盘质量, K 与 D_s 分别是转子对应于第一阶弯曲模态的刚度与外阻尼, K_0 为流体径向刚度, $\psi(|z|)$ 为流体非线性径向刚度系数, D 为流体径向阻尼系数, ϵ 为轴的偏心距, ω 为转子转速, $\lambda(|z|)$ 为流体平均周向速度比, R 为圆锥盘的平均半径。 V 为反旋流喷出时的平均周向速度, 这是一个最重要的控制参数。 v 是转子振幅、反馈控制系统传递函数 H 、设定点控制值 s 以及供气压力 P 的函数。它对有效阻尼的影响很大。由于反旋流装置的设计与文献[1]中相近, 故可借文献[1]中数据: $D_s \approx 0$, $\lambda(|z|) \approx \lambda =$

0.45, 并设 $K + K_o + \psi(|z|) \approx K$, 则系统振动方程为:

$$m\ddot{z} + D\dot{z} - j\lambda_o\omega z + jVz/R + Kz = m\epsilon\omega^2\exp(j\omega t) \quad (2)$$

式中 λ_o 为同心轴的流体平均周向速度比。设转子作同步振动时的解为 $z(t) = Z\exp[j(\omega t + \delta)]$, 代入(2)式可得 $Z\exp(j\delta) = m\epsilon\omega^2 / \{K - m\omega^2 + j\omega D[-\lambda_o + V/(R\omega)]\}$ 。令系统等效阻尼

$$D_{ef}(P, \Phi, C_r) = D[-\lambda_o + V/(R\omega)] \quad (3)$$

它是供气压力 P 、喷嘴口径 Φ 、径向间隙 C_r 及转速 ω 之未知函数, 可借助于试验数据来确定。于是振幅值 z 和振动相位 δ 为:

$$Z = m\epsilon\omega^2 / \sqrt{(K - m\omega^2)^2 + \omega^2 D_{ef}^2}, \quad \delta = \tan^{-1}(-\omega D_{ef} / (K - m\omega^2)) \quad (4)$$

系统的有效阻尼比可按 $\zeta \approx D_{ef} / (2m\omega)$ 计算, 临界转速的最大振幅值

$$Z_{cmax} \approx \epsilon m\omega / D_{ef} = \epsilon / (2\zeta) \quad (5)$$

偏心距 ϵ 和 Z_{cmax} 、 ω 均可由试验数据中求得, 于是由上述诸式可得 ζD_{ef} 及反旋流喷出时的平均周向速度 V 值。

试验在 B727 高速转子循环与超转试验器上进行。从稳压罐出来的气体一路接到一个常开电磁阀到大气中, 另一路接到一个常闭电磁阀再到静子上的进气道口, 中间并联有一压力表。当控制器有信号传来时, 常闭电磁阀打开, 同时常开电磁阀关闭, 高压气流进入喷嘴通道。安排两个互为开闭的电磁阀是为了使减压调压阀后边气压能保持需要的恒定值。按照拟定的试验大纲, 径向间隙先取 1.5mm, 然后依次选用 1.35、1.1、1.0、0.9……。每个间隙下, 先做不通气的未控试验, 再从 0.1MPa 以下的几级低压到 0.1MPa 以上的几级高压依次进行试验。喷嘴口径已定为 $\Phi 4\text{mm}$ 。

2 试验结果与分析

测试项目有: 测量供气压力 P 值、监测增速器与前后轴承支座的振动、测量轴中段水平垂直方向的振动信号, 同时用 $x-y$ 记录仪记录垂直方向振幅值随转速变化的曲线。这些曲线反映了转子在未控与受控、不同径向间隙、不同供气压力下的特性, 包括第一阶弯曲临界转速值 n_c 和一个双振幅峰值 A_{p-p} 。 $A_{p-p} = 2Z_{cmax}$ 。测得转子在共振转速前后双振幅值仅有 0.05mm, 它的一半可作为转子偏心距值。通过这些特性曲线上的数据可以推算出各种工作状态下的有效阻尼 D_{ef} 值和阻尼比 ζ 值等。转子垂直方向振动信号的一个更重要用途是送入 VAC-1 型振动主动控制仪的输入端。VAC-1 将这一振动信号的幅值与预先设定的幅值进行比较。根据比较结果和振幅变化率来决定 VAC-1 需要输出打开、关闭供气阀门的信号。主要测试记录与计算结果列于表 1。

表 1 表明, 径向间隙为 1.50~1.10mm, 供气压力为 0.12~0.14MPa 时效果皆好; 径向间隙为 1.00~0.90mm, 供气压力为 0.09~0.17MPa 时, 效果更好。

据表 1 数据可给出在供气压力为 0~0.21MPa 范围内, 径向间隙为 1.50~1.00mm 的 4 条特性曲线, 且各有一个最大有效阻尼值和一个最大喷气平均周向速度。而 $C_r = 0.90\text{mm}$ 的特性曲线, 随着供气压力的增加, 直到 $P = 0.214\text{MPa}$, 其有效阻尼值 D_{ef} 值也一直增加, 到 485kg/s 其喷气平均速度也一直增加, 直到 $V = 51.78\text{m/s}$ 仍呈上升趋势。由于担心出现转子、静子碰磨而未做更小 C_r 值的试验。

表 1 数据表明, 对具有一定不平衡量的转子系统加以反旋流控制, 可使系统的有效阻尼增加, 同步振动响应振幅减小。从大到小 5 种径向间隙值下振幅减小程度分别为未受控时的

55.7%、57.5%、48.6%、36.1%、31.1%；有效阻尼增加的程度分别为未受控时的 1.80、1.74、2.06、2.77、3.22 倍。

表 1 主要测试记录与计算结果

C_r (mm)	P (MPa)	n (r/min)	ω (rad/s)	A_{P-P} (mm)	ξ	D_{ef} (kg/s)	D	V (m/s)
1.50	0	7900	827.3	1.225	0.0204	142.3	258.7	18.65
	0.138	7775	814.2	0.682	0.0367	252.0		
1.37	0	7895	826.8	1.204	0.0208	145.0	263.6	17.33
	0.143	7797	816.5	0.692	0.0361	248.6		
1.10	0	7889	826.1	1.162	0.0215	149.8	272.4	24.75
	0.120	7769	813.6	0.565	0.0442	303.3		
1.00	0	7884	825.6	1.146	0.0218	151.8	276.0	40.90
	0.161	7704	806.8	0.414	0.0604	410.9		
0.90	0	7878	825.0	1.130	0.0221	153.8	279.6	51.78
	0.214	7720	808.4	0.351	0.0712	485.4		

3 结束语

当转子接近临界转速、振幅过大时, 气体反旋流能将其不平衡响应振幅减小到不加控制时振幅的三分之一左右甚至更小。因此, 反旋流主动控制技术可以帮助转子在运转过程中安全地通过低阶共振转速。与被动控制相比, 反旋流主动控制的优点是: 它以少量的反旋流就能控制转子的振动; 只在转子振幅超过某一限定值后才加以控制, 而不是在整个运转过程中都使用反旋流控制。在试验转子结构中, 选喷嘴口径为 $\Phi 4\text{mm}$, 径向间隙 $C_r = 0.90\text{mm}$, $P = 0.18 \sim 0.21\text{MPa}$ 时, $\zeta = 0.063 \sim 0.068$, $D_{ef} = 430 \sim 460\text{kg/s}$, $V = 43 \sim 48\text{m/s}$, 是抑制转子不平衡响应的最佳值。

本文所反映的研究由株洲航空动力机械研究所与西北工业大学振动研究所完成。陈运西、董德耀执笔写成此文。

参 考 文 献

[1] Muszynska A etal. Rotor Active ‘Anti- Swirl ’ Control. J. of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, 1988, 110: 143

(责任编辑 魏星禄)