

一种排除带凸肩风扇叶片榫头故障的新方法

李宏新 黄致建 张 力 喻双喜

(中国航空工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘要:探索了一种采取黏弹性橡胶阻尼器抑制带凸肩风扇工作叶片共振的新途径,通过应用于某型机风扇第1级叶片,在叶片结构不变的条件下排除了其榫头断裂故障。在发动机上的验证结果表明:根部橡胶阻尼器减振结构对叶片榫头出现最大振动应力的振型的抑制效果明显,从而拓展了黏弹性材料的应用领域。

关键词:风扇叶片 故障 共振 阻尼器 黏弹性材料

New Technique for Eliminating Fault of the Tenon of Fan Blade with Mid-Span Shroud

Li Hongxin Huang Zhijian Zhang Li Yu Shuangxi

(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015)

Abstract: A viscoelastic rubber damper is developed to damp resonance of the fan blade with mid-span shroud. The technique has been applied to the first stage fan blade in a turbofan engine, and therefore the fracture of blade tenon is avoided under existing structure conditions. The results of engine test indicate that the root rubber damper produces significant effects in damping the mode of maximum vibration stress of the tenon, thus the usage of the viscoelastic material is expanded.

Key words: fan blade; fault; resonance; damper; viscoelastic material

1 引言

在航空发动机工作叶片的叶身上采用阻尼凸肩解决叶片颤振或共振问题的方法已得到普遍应用。然而,某型机风扇第1级叶片虽然带凸肩,却在短期试车中两次发生榫头喉部高周疲劳断裂故障(如图1所示)。经断口、结构、强度和试验分析,找到了产生故障的直接原因:在风扇转速范围内,由于受进口导向器叶片尾流激振影响,激发工作叶片1800Hz振型的共振,导致榫头后端喉部动应力较大(113MPa),不能满足疲劳强度储备的要求。榫头喉部圆角小和加工刀痕是促使故障发生的间接原因。

在找出故障原因后,所面临的问题就是要提出切实可行的排故措施,从中筛选出排除故障的最佳方案。在排故中,先后采取了降低激振力幅度和改

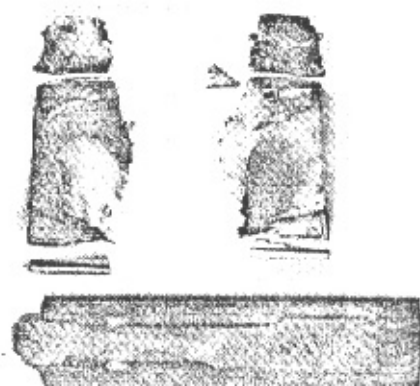


图1 风扇叶片断裂外观形貌和榫头宏观断口

收稿日期:2001-08-06

第一作者简介:李宏新,高级工程师,1969年出生,1992年毕业于南京航空航天大学,2000年北京航空航天大学硕士,从事航空发动机压气机设计。

变凸肩的结构参数等方法,但叶片动强度仍难以满足疲劳强度要求。在不改变叶片结构的前提下,采取最简单可行的方法解决该故障已成为关键问题。

对于共振问题,阻尼减振是比较简单有效的解决方法,因此在工程上广泛应用。

分析幅频响应特性(图2)可知,当阻尼较小的系统发生共振时,动力放大系数很大;而在频率比一定时,改变阻尼,则可以改变振幅。增加阻尼时,动力放大系数在整个频带上都被压低,起到抑制共振的作用。在发动机叶片设计中,常利用库仑摩擦阻尼减振,常见的结构形式有叶根减振和叶身减振,如涡轮前几级叶片缘板处的摩擦阻尼器、风扇工作叶片叶身上的凸肩、涡轮叶片的叶冠等。

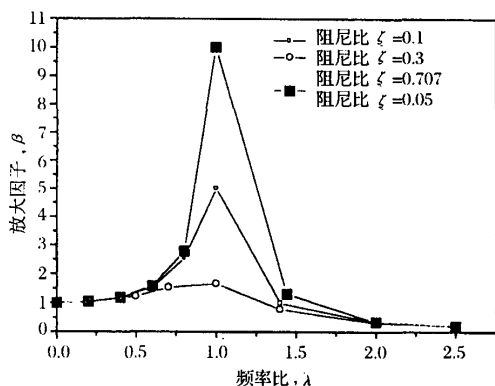


图2 幅频特性曲线

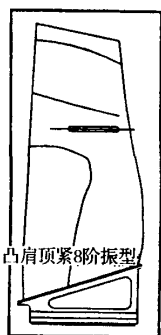


图3 危险阶振型

此风扇第1级叶片也采用了叶身带凸肩设计,利用摩擦阻尼减振。根据摩擦定律,控制合适的凸肩挤压应力是控制摩擦阻尼的关键,为此,将相邻凸

肩工作面间隙装配状态变为凸肩过盈装配状态,从而改变挤压应力。试验表明:凸肩紧度加大对摩擦阻尼减振有贡献,但还没能使叶片榫头脱离危险状态;凸肩减振对部分复合振型(如图3所示,振动节线在凸肩附近的振型)振动下叶根部位的抑制作用减弱;由于边界条件差异,部分叶片不能充分发挥凸肩对榫头部位应力大振型的控制作用。

在叶身减振不能解决风扇叶片共振的情况下,提出了叶根减振的黏弹性阻尼器设计,降低故障部位应力,解决共振问题。

2 黏弹性阻尼减振特点

材料阻尼是指材料内部在经受振动变形过程中损耗振动能量的能力。阻尼材料兼有黏性液体在一定运动状态下损耗能量的特性和弹性固体材料贮存能量的特性。对于一种阻尼材料来说,在纯拉伸振动一周中单位体积内所损耗的能量 D 为

$$D = \pi \beta E' \epsilon_0^2 \quad (1)$$

式中: E' ——复弹性模量的实部;

ϵ_0 ——最大拉伸应变;

β ——材料阻尼损耗因子。

由式(1)可知,在一定振动幅值下,要使振动能量耗散最大,则需使阻尼材料的实模量和阻尼损耗因子的乘积达到最大值,因此可以把阻尼材料的实模量 E 和阻尼损耗因子 β 作为评价阻尼材料阻尼耗能特性的指标,同时要考虑温度和频率等环境条件对黏弹性阻尼材料阻尼特性的影响。

3 风扇叶片黏弹性阻尼器结构设计

黏弹性阻尼器设计主要考虑阻尼材料的选择、阻尼位置、阻尼器质量和结构等影响因素。

首先,根据风扇叶片的结构特点、工作条件、振型、频率选择合适的阻尼材料,因为第1级叶片工作温度较低;叶片危险振型下振动频率为1800Hz,振型为弯扭复合振型。同时考虑选取的阻尼材料要有足够的刚性、耐磨性和耐油性,采取橡胶阻尼器减振。表1列出了几种橡胶材料的阻尼特性,本文设计的阻尼器选用丁腈橡胶,工作温度为 $-50 \sim 180^\circ\text{C}$,在1500Hz附近具有最大阻尼损耗因子,且有一定的强度。

其次,安装阻尼器的部位选择很重要。从耗能的角度考虑,阻尼器应该放置在振动位移较大的部位。由试验测得,叶片以该阶振型振动时叶片缘板

表 1 几种橡胶材料的阻尼特性

材料	硬度 (HB)	巴考尔 回弹 (%)	损耗因子 (500Hz)	500Hz 下 模量(MPa)	最大损 耗因子	最大损耗因子 下频率(Hz)	最大损耗因子 下模量(MPa)
氯丁	54	43	0.250	8.437	>0.92	1600	5.765
	69	32	0.375	10.546	0.94	2000	7.945
丁基	49	6	1.200	4.570	1.90	4200	7.031
聚氨酯	67	21	0.450	17.577	0.75	3450	17.225
	91	36	0.130	65.034	0.17	3750	56.245
氯磺酰化	54	17	0.840	10.546	>1.70	1300	8.437
聚乙烯	60	18	0.420	17.577	>0.75	1100	17.577
丁腈	63	32	1.100	7.031	1.90	1500	4.218
聚丙烯酸	71	6	0.725	123.040	>1.00	1300	219.360
有机硅	58	59	0.550	0.700	>1.00	1100	0.280

和伸根后侧振幅较大,适合作阻尼位置。

最后,根据结构特点设计阻尼器。如图 4 所示,阻尼器安装在叶片伸根与缘板及盘缘组成的空腔中,安装时保证阻尼器表面和缘板接触,后端由挡环轴向限位,叶片缘板和阻尼器的自然斜面可以防止前窜。安装时利用轮盘上的连接螺栓定位,按周向均匀分布阻尼器质量。阻尼器设计质量为叶片质量的 6%(一般附加质量为叶片质量的 2%~10%,最佳质量应由试验确定)。

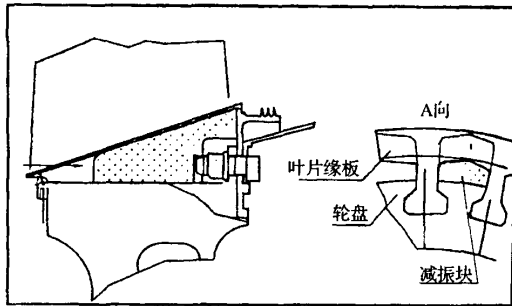


图 4 叶片橡胶阻尼器结构和安装形式

阻尼器从两个方面对叶片减振:一方面是阻尼器夹在两叶片伸根处,在叶片振动过程中,特别是相邻叶片振动相位相反时,两叶片伸根对阻尼器侧面产生挤压作用;缘板做径向和周向振动时对阻尼器产生挤压和剪切作用,在阻尼器产生变形中不断吸收叶片的振动能量,从而抑制振动;另一方面,在阻尼器离心力作用下,附加阻尼器质量起到调谐阻尼器的作用,吸收主要振型的振动。在叶片振动过程中,阻尼器附加在叶片上的质量和刚度也随着叶片

振动发生变化,从而使叶片振动响应发生变化,抑制叶片振动幅值,降低叶片振动峰值应力。

4 黏弹性阻尼器试验验证

由于叶片黏弹性阻尼器的结构参数与减振指标间的关系目前还难以准确描述和计算,所以是以试验为基础验证设计参数的有效性。本文用相同的阻尼器对叶片在不同凸肩状态下叶根的减振效果进行了验证和分析。

4.1 凸肩小间隙装配状态黏弹性阻尼器试验验证

在凸肩小间隙装配状态下,在发动机上对叶片有无阻尼器结构进行了试验,从表 2 所列结果可以看到,由于附加阻尼器使叶片榫头处应力明显下降,最大峰值应力只有 15.2MPa,相对原结构振动应力下降 70.4%~86%。由转速应力谱(图 5)可以看

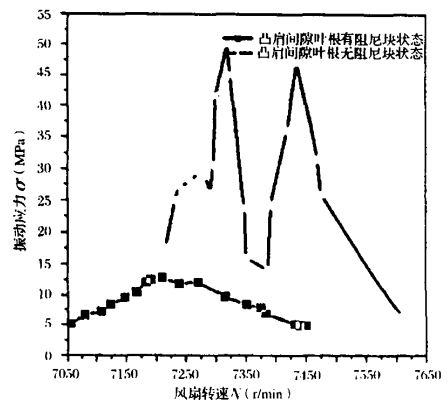


图 5 凸肩间隙状态有无根部阻尼叶片故障点振动应力比较

表2 凸肩间隙装配状态、叶根有无阻尼器情况故障点附近动应力对比

叶片号	凸肩间隙装配结构、叶根无阻尼器		凸肩间隙装配结构、叶根加阻尼器	
	共振频率 $f(\text{Hz})$	峰值应力 $\sigma(\text{MPa})$	共振频率 $f(\text{Hz})$	峰值应力 $\sigma(\text{MPa})$
1	1808	60.00	1813	14.18
2	1809	44.30	1799	11.40
3	1803	50.40	1802	15.27
4	1807	50.15	1803	7.00
5	1809	51.09	1816	15.14
6	1803	59.50	1803	13.00

到,阻尼块对共振特性有影响,共振峰由2个变为1个,共振转速范围变宽,这些也正是阻尼作用的特征表现。试验证明:根部阻尼器的设计和安装位置选择是合理的,达到了耗散和吸收能量,降低振幅的目的。

在疲劳极限图(图6)上,考虑附加质量对叶片静应力的影响,叶片故障位置振动应力换算值(图中标*点)也明显低于许用疲劳应力值。因此,叶片根部加橡胶阻尼器可以解决该叶片共振问题。

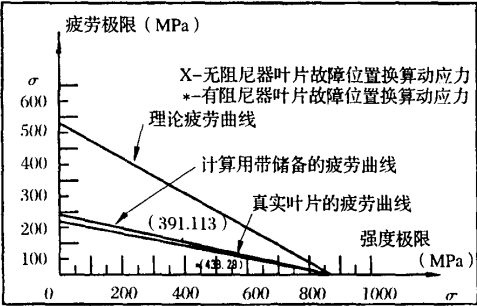


图6 叶片故障点处的疲劳极限

4.2 凸肩过盈装配状态黏弹性阻尼器试验验证

为研究根部橡胶阻尼器与凸肩状态的相互影响,在凸肩紧度装配状态下,在发动机上对叶根有无阻尼器结构进行试验,验证结果见表3,阻尼器对叶片共振特性的影响(图7)与上面结果相似。同样可以看到:伸根处应力明显下降,峰值应力为13.26MPa,相对无阻尼器结构应力又下降45%~81%。

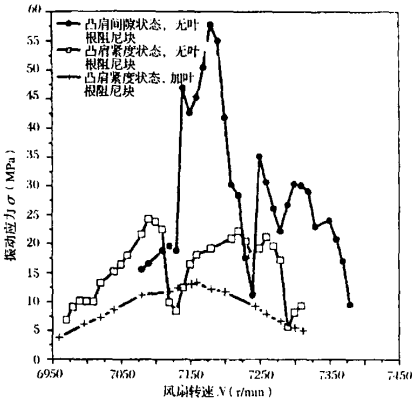


图7 凸肩不同状态及有无根部阻尼叶片故障点振动应力比较

表3 凸肩紧装配度状态、叶根有无阻尼器情况故障点附近动应力对比

叶片号	凸肩间隙装配结构、叶根无阻尼器		凸肩间隙装配结构、叶根加阻尼器	
	共振频率 $f(\text{Hz})$	峰值应力 $\sigma(\text{MPa})$	共振频率 $f(\text{Hz})$	峰值应力 $\sigma(\text{MPa})$
1	1786	23.87	1803	7.70
2	1810	45.30	1802	10.26
3	1810	28.90	1805	9.80
4	1810	41.90	1799	9.10*
5	1786	53.07	1805	12.40
6	1766	24.30	1799	13.26

表4 凸肩不同装配状态、叶根有无阻尼器情况下结构阻尼特性比较

装配状态	共振频率(Hz)	峰值应力(MPa)	结构阻尼比 η
凸肩间隙、无阻尼器	1803	42~60	0.00847
凸肩间隙、有阻尼器	1803	15.27	0.02806
凸肩过盈、无阻尼器	1810	17.17~53.07	0.0087
凸肩过盈、有阻尼器	1805	13.26~7.7	0.026

4.3 凸肩不同装配状态和附加叶根阻尼器的叶片阻尼分析

对于黏弹性阻尼振动,由半功率点法(即 $\beta = \frac{Q}{\sqrt{2}}$ 处)求结构阻尼因子:

$$\eta = \Delta \sqrt{1 - (\Delta/2)^2} \quad (2)$$

式中: $\Delta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0}$, 即峰值应力的 $1/\sqrt{2}$ 处的频率差与共振频率之比。

在叶片凸肩装配状态不同、叶根有无阻尼器情况下,1800Hz 振型结构阻尼比估算结果见表4,可见橡胶阻尼器使叶片的结构阻尼增加较多,振动应力大幅度降低,而对系统的固有特性没有明显影响。

4.4 黏弹性阻尼器试验分析

综上所述,通过凸肩间隙或过盈装配状态下附加根部橡胶阻尼器的试验可知:橡胶阻尼器减振结构对叶片榫头出现最大振动应力的振型的抑制效果明显,对叶身上的振动应力影响不大。并且橡胶阻尼器对凸肩的状态不敏感,从全转速范围内出现的共振频率及峰值应力看两者无明显区别。

同时说明,凸肩的减振作用并不是对叶片的所有阶次振型起作用,它对叶身部分的振动抑制效果好于对叶根的效果;而根部阻尼器刚好弥补了凸肩的不足,起到了凸肩达不到的减振效果。并且从试验结果看,叶身凸肩减振与叶根阻尼器减振的相互

干扰不明显,可以互相补偿,这一点在部分发动机上已体现出来,如 CFM56-3-B1 发动机风扇叶片虽然带凸肩,但在根部仍采用了阻尼器解决振动问题;RB211-535E4、RB211-524G/H 发动机高压涡轮工作叶片虽然带叶冠,但叶根也采用了摩擦阻尼器。

5 结论

对现有风扇叶片根部增加黏弹性阻尼器的试验表明,橡胶阻尼器减振结构设计合理,对榫头出现大振动应力的振型的抑制效果明显,对叶身上的振动应力影响不大,且不受凸肩状态影响,收到了凸肩达不到的减振效果,满足了动强度储备要求,是在不改变叶片结构条件下最简单易行的方法之一。

在整机试车中,附加橡胶阻尼器的风扇叶片已累计工作 600h 未出现故障。但由于发动机叶片工作环境恶劣,不同状态其工作温度变化大,选择合适的黏弹性阻尼材料很困难,因此开展高温或不受环境影响的阻尼材料研究工作显得非常必要。

如何有效地采取阻尼控制措施,从定量分析角度进行阻尼结构设计,阻尼位置、质量和硬度优化,建立一套叶片阻尼设计工程软件,为叶片设计提供有利工具,是今后工作中值得研究的课题。

参考文献(略)

(上接第16页)

尽管高压引射器方案运行费用较高,但仍然适用于全尺寸加力试验器。因为从表6和7中可知,抽气方案比高压引射器方案需多投资7800万元,这些资金足够高压引射器方案所用高压气源运行两万多小时。

有资料表明,国内外也有在高空模拟试车台上使用超声速气体引射器方案的。

通过上述详细分析可以得出结论:虽然引射器引气方案和压气机抽气方案都能满足全尺寸加力燃烧室部件高空模拟试验,但应该优先选用引射器引气方案。