

大涵道比宽弦风扇叶片连接结构设计及分析研究

The Machinery Design and Analysis of the Wide Chord Fan Blade in Huge Bypass Ratio Aeroengine

李惠莲 纪福森 伊锋 杨帆 / 中航工业沈阳发动机设计研究所

摘要: 在分析民机大涵道比风扇叶片设计特点及发展趋势的基础上, 重点介绍了高负荷高切线速度宽弦风扇转子叶片连接形式的特点, 给出不同的风扇叶片连接结构设计方案, 并对其优缺点进行了对比分析。

关键词: 涵道比; 宽弦风扇叶片; 结构设计

Keywords: bypass ratio; wide chord fan blade; machinery design

0 引言

航空运输业的不断发展, 对民用航空发动机产品的需求日益增加。国外著名发动机公司如普惠、GE和罗-罗等公司凭借多年的经验, 研制了很多具有较强竞争力的产品, 如CFM56系列、PW系列、遑达系列和RB系列等。这些发动机无一例外均采用了大涵道比风扇设计, 可以满足民机高推力、低油耗等技术指标的要求。由此可见, 大涵道比风扇是民用发动机的重要技术特征之一。

早期的大涵道比风扇多采用窄弦叶片设计, 叶身带有减振凸肩, 以提高叶片的刚性和抗振能力, 防止外物打伤, 增强发动机的可靠性。但凸肩设计不可避免地影响了风扇的气动性能, 增加了叶片的加工难度, 而且还增加了叶片的离心负荷, 使叶片根部承受的应力加大, 且凸肩与叶身转接处存在附加弯矩, 应力状况较为复杂。

近十年来, 随着民机推力、总压比、耗油率、成本和可靠性等技术指标的逐步提升, 导致发动机的涵道比和风扇直

径越来越大(如图1和表1所示), 窄弦带凸肩叶片已不能满足民机设计的需要, 正逐渐被更大涵道比的宽弦无凸肩风扇叶片替代。宽弦叶片在取消凸肩提高风扇效率的同时, 改善了发动机在高空

低雷诺数条件下的气动性能, 增强了抗畸变能力。此外, 宽弦叶片在同等叶片稠度下可减少风扇叶片数量, 降低制造成本, 增强抗外物损伤能力。图2所示为CFM56发动机宽弦无凸肩风扇叶片的

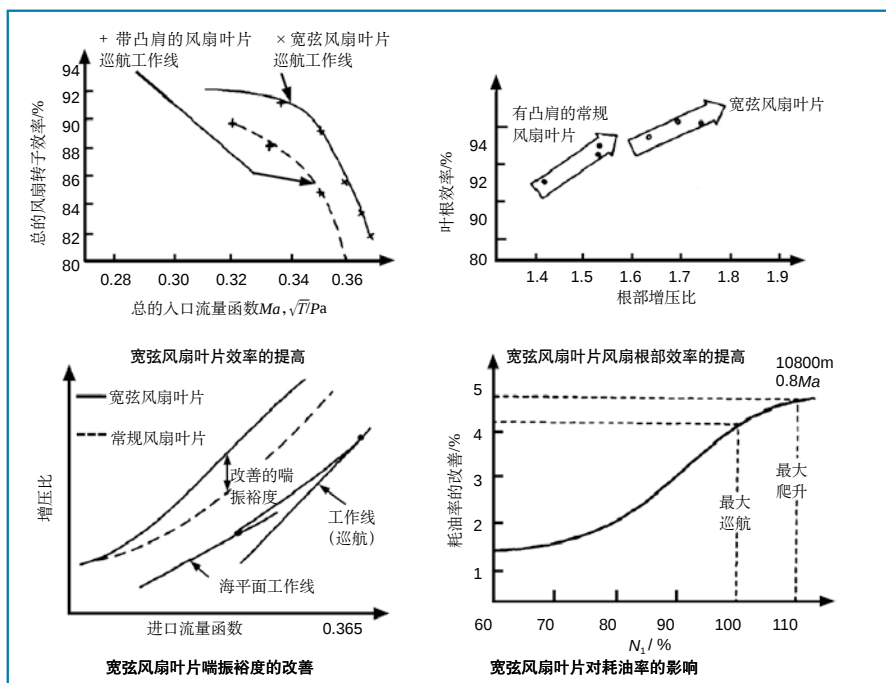


图1 宽弦风扇叶片对气动性能的影响^[1]

表1 罗-罗公司产品发展列表

型号	取证时间	涵道比	最大推力 (lbf)	总压比	风扇直径 (in)
遄达 XWB	*2011	≥ 11	75000~93000	51.0	118.0
遄达 1000	2007	10.4~11.0	53000~75000	50.0	112.0
遄达 900	2004	8.7~8.5	70000~76500	41.1	116.0
遄达 500	2000	7.6~7.5	53000~56000	36.3	97.4
遄达 800	1995	6.2~5.4	74600~95000+	45.0	110.0
遄达 700	1994	5.1~5.0	67500~71100	35.5	97.4

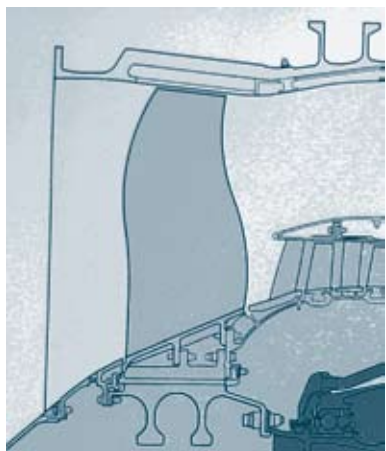


图2 CFM56发动机宽弦风扇转子叶片的结构形式

1 宽弦风扇叶片的发展趋势

早期的宽弦叶片采用常规的实心金属结构设计。由于宽弦叶片的叶型厚度、直径尺寸都较大,若采用常规的实心金属材料,叶片重量就很大,风扇轮盘的重量也相应增加。随着新材料、新工艺技术的发展,空心叶片及复合材料叶片的制造工艺越来越成熟。近年来,国外已将空心叶片及复合材料叶片成功地应用于发动机设计中。

第一代空心叶片为带蜂窝夹层结构的宽弦叶片,这种叶片由两片钛合金面板夹钛合金蜂窝板组成,在高温炉中经扩散焊连接成一体,然后在模具中扭转成最终型面,如图3所示。

第二代空心叶片采用扩散连接/超塑成型技术,钛合金面板中间的夹层采用重量较轻承力效果好的桁架式结构,

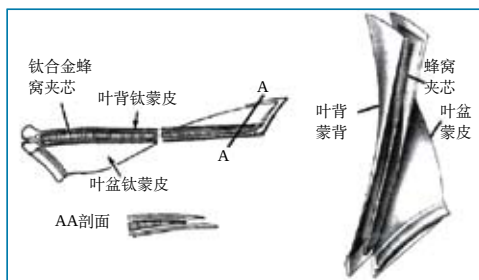


图3 蜂窝夹层结构的宽弦风扇叶片^[1]

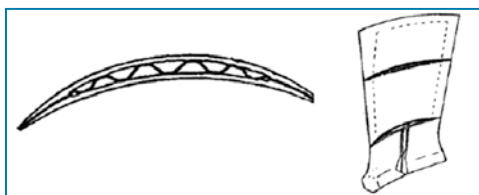


图4 扩散连接/超塑成型的宽弦风扇叶片^[1]

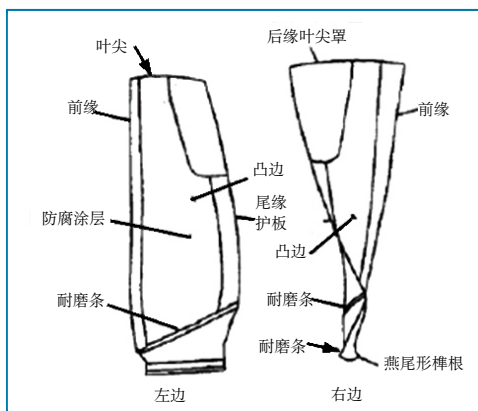


图5 某型发动机复合材料宽弦风扇叶片^[1]

这种结构的制造过程为:将两个面板和中间组成桁架的薄板,装在扩散连接的夹具中,使中间薄板分别在不同的位置与两个面板连接起来,然后置于加热的模具中,使三层板处于超塑性状态,在面板间通入高压惰性气体,于是两个面板在气体压力作用下压向模具槽中,形成叶型,而中间薄板被拉成桁架形式,如图4所示。第二代空心叶片较第一

代的重量减轻了近1/3。

随着涵道比的增加,风扇叶片即使设计为空心叶片仍然很重,榫头的强度设计依然面临问题。因此发展了重量更轻的复合材料风扇叶片,同时为了提高抗鸟撞能力,在叶片前缘包有钛合金薄片,如图5所示。

2 宽弦风扇叶片连接结构

由于大涵道比发动机的设计特点,风扇转子叶片的叶尖尺寸较大,且宽弦无凸肩风扇转子叶片单片重量较窄弦叶片增加较多,因此风扇转子叶片的离心负荷大大增加,且在相同级压比条件下,单片叶片所承受的轴向负荷加重,因此常规的结构连接形式已经无法满足宽弦风扇叶片结构设计的要求。基于以上原因,宽弦风扇叶片的连接形式需采取非常规设计措施,以满足发动机的设计要求。本文给出了几种成熟的宽弦风扇叶片连接结构方案,并对这几种方案进行了对比分析,以期找出最优的结构形式。

2.1 径向连接形式

宽弦风扇叶片一般采用轴向圆弧榫连结构设计,轴向圆弧榫的两个定位面为两个同心圆形成的轨迹,榫头的剖面形式分两种,一种为直的燕尾形榫头,另一种为圆弧形的燕尾形榫头。据相关研究资料表明,截面为圆弧形燕尾榫的结构形式对降低接触面的峰值挤压应力、改善接触面的应力分布有显著的效果。但目前发动机上成熟应用的还是直燕尾剖面形式的榫头,剖面为圆弧形燕尾榫的结构形式还在设计研究阶段。

与常规直榫的榫连结构相比,圆弧榫连结构形式的优势在于,可以在

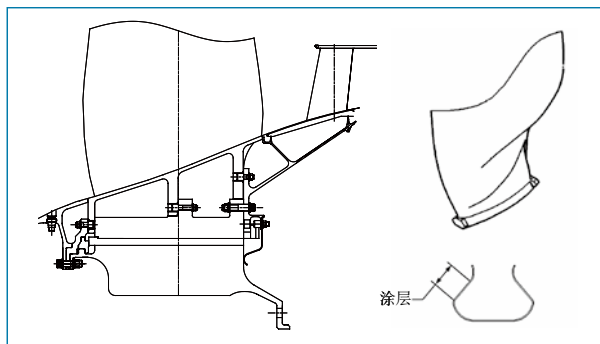


图6 圆弧楔风扇转子叶片示意图

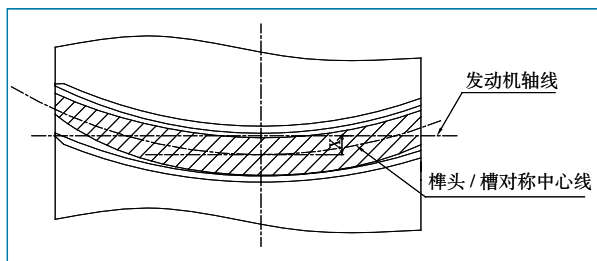


图7 圆弧榫头/槽示意图

相同的发动机轴向长度上增加榫头的定位接触面面积,同时,圆弧型榫头可以更好地包容叶片,使叶片的离心负荷向盘传递的路径更合理,从而大大降低榫头



图8 圆弧榫槽及流路板示意图

部位的接触应力。

考虑榫头压力面所受的接触应力较大,且在工作中存在微动磨损,因此在风扇转子叶片榫头压力面位置与轮盘贴合处需喷涂耐磨涂层,为保护风扇转子叶片也可在榫头外缘增加一层金属保护套,并在保护套压力面与轮盘贴合处喷涂涂层,如图6所示。

与风扇转子叶片的轴向圆弧榫结构相呼应,风扇轮盘也必须设计为圆弧榫槽的结构形式。

为保证沿轴向的每个位置轮盘的受力均匀,一般在对应风扇转子叶片轴向积叠位置处,榫头对称中心线与发动机轴线之间均设计一定的偏移量 X ,其取值可根据强度优化计算结果给定,如图7所示。

采用圆弧榫头/榫槽结构宽弦风扇叶片的发动机,在两个风扇叶片之间需设计流路板,形成发动机的内流路,如图8所示。

2.2 轴向定位形式

宽弦风扇叶片在减少叶片数、相同级压比的情况下,单片叶片所承受的气

动及轴向负荷较大,且每两个风扇叶片之间设计有流路板,因此进行轴向止动设计时,要同时考虑风扇转子叶片及流路板的轴向定位。图9和图10给出了两种轴向定位方式。

图9中的设计方案为,在风扇盘前采用风扇前挡环对风扇转子叶片、流路板及风扇下方垫块进行轴向定位,在风扇盘后设计有风扇后篦齿环进行风扇转子叶片及风扇下方垫块的辅助轴向定位。由于采用一个轴向定位零件对三个零件进行轴向定位,因此结构简单,零件数少,但同时也存在各零件定位不是很可靠的问题。

图10中的设计方案为,在风扇转子叶片榫头部位设计有止动凹槽,风扇垫块对应设计止动凸台,在风扇盘前设计有风扇叶片止动环及风扇前止动环,分别进行风扇叶片下方垫块及流道板的止动,在风扇转子叶片榫头后方设计有后延部位,后延部位卡在增压级鼓筒安装边处的止动槽内,保证风扇转子叶片轴向定位的可靠。

由以上对比可知,图9的结构形式简单,零件数量少,对于轴向负荷较轻的宽弦叶片,可以考虑采用该结构;图10的结构形式较为复杂,零件数量较多,各零件配合尺寸对加工的精度要求较高,叶片的制造成本相应增加,但与图9的定位方式相比,对零件轴向定位

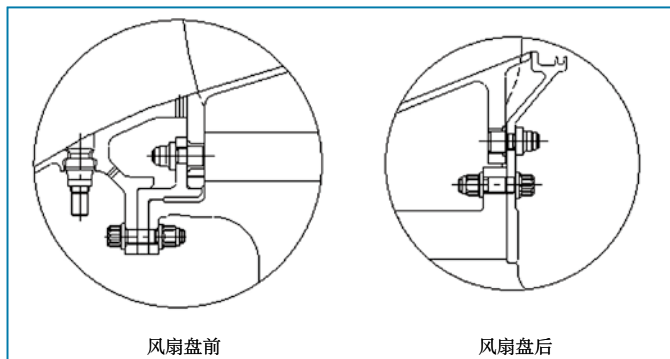


图9 风扇转子叶片及流路板的轴向定位方式一

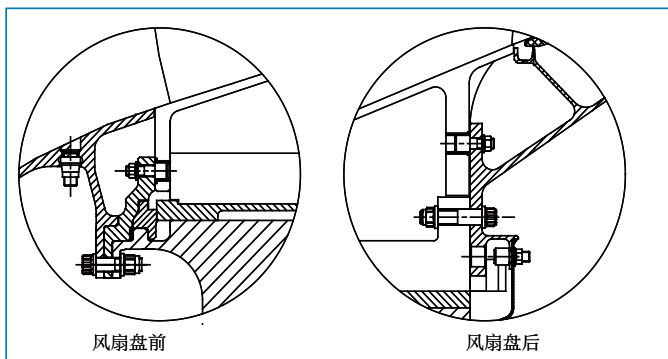


图10 风扇转子叶片及流路板的轴向定位方式二

自主拦截无人机机动过载指标影响因素分析

Analysis of Motor Overload Index Influence Factor about Unmanned Independently Intercepting Air Vehicle

袁冲 / 上海飞机设计研究院 周洲 / 西北工业大学

摘要: 自主拦截无人机是一种新型的自杀型自主攻击无人机, 具有损小、用大、效高的特点。在巡航阶段它相当于一个具有一定侦察、识别能力的无人机, 而在攻击阶段类似于一个远程空空导弹。在分析某自主拦截无人机拦截预警机作战轨迹的基础上, 利用比例导引法对其建立了拦截轨迹模型。根据计算结果分析了拦截距离、离轴角对机动过载指标的影响, 为自主拦截无人机机动过载设计指标分配提供参考。

关键词: 自主拦截无人机; 作战过程; 机动过载

Keywords: unmanned independently intercepting air vehicle; operational process; motor overload

0 引言

自主拦截无人机是一种远距离、高空的自杀式拦截无人飞行器, 具有损小、用大、效高的特点, 具备自查、自决、自打的多种功能, 主要对敌方预警机、空中加油机、战斗机等高价值目标自主进行自杀式拦截。

攻击型无人机攻击活动目标, 特别是空中目标, 必须具备良好的机动性能。在自主拦截无人机初始设计阶段, 为避免某些总体性能指标要求过高, 进

而导致成本过高, 需要对其作战性能进行评估。因此, 基于自主拦截无人机作战过程, 对自主拦截无人机的拦截轨迹进行分析, 进而确定合理的机动过载指标, 对其初始系统设计具有重要意义。

1 拦截过程分析

自主拦截无人机要成功完成自主拦截任务, 首先要发现并识别目标, 然后是对敌方防御系统进行突防, 进而攻击目标、命中和杀伤目标。自主拦截无

人机既不同于有人机, 也不同于以往的无人机, 没有“人在回路中”这个环节, 避免了数据传输的延迟和误差, 形成了一个自查、自决、自打的武器系统, 大大提高无人机作战效能; 当然在其巡航到作战区域、实施突防、拦截目标的过程中, 需要较强的自主攻击能力, 即搜索、识别、决策、突防、攻击的能力, 对系统有更高的可用性和可靠性的要求。

该自主拦截无人机在巡航和突防飞行中, 由于其飞行高度在20km左右,

的可靠性更高, 因此对于轴向负荷较重的更大涵道比的宽弦叶片, 采用图10的定位结构形式更为合理。

3 结束语

本文对大涵道比风扇叶片的几种结构设计方案进行了对比分析, 总结了各结构形式的优缺点, 并对大涵道比风扇的发展趋势进行了总结。随着大涵道比宽弦风扇设计技术的日趋成熟, 可靠

性高、重量轻的空心叶片和复合材料叶片将在民用飞机发动机上大量使用。

AST

参考文献

[1] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.

[2] 刘廷毅, 伊峰, 张峻峰. 航空发动机圆弧榫头型面优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2008(3).

作者简介

李惠莲, 工程师, 主要从事航空发动机结构设计工作。

纪福森, 工程师, 主要从事航空发动机结构设计工作。

伊峰, 高级工程师, 主要从事航空发动机结构设计工作。

杨帆, 工程师, 主要从事航空发动机结构设计工作。