

先进的新型高压压气机转子结构设计

Advanced Machinery Design of High-Pressure Compressor Rotating Component

杨帆 印雪梅 李惠莲 / 中航工业沈阳发动机设计研究所

摘要:介绍了国外先进航空发动机压气机转子结构的发展历程和特点及其先进的制造技术,并对EJ200发动机压气机转子的结构变化进行了分析和总结。

关键词: 航空发动机; 高压压气机; 转子结构设计

Keywords: aeroengine; HPC; machinery design

0 引言

根据航空发动机对高推重比、低耗油率和高可靠性的日益追求,以及总体性能参数的匹配特点,发动机的总压比势必增高,高压压气机的负荷也越来越高,而且为了降低支点跨度和转子重量,压气机的级数也要求尽可能减少。这不仅给压气机气动设计设置了难题,也给压气机的结构设计带来了挑战。

与此同时,压气机转子部件的加工技术也发生了日新月异的变化,根据高负荷高压压气机转子部件的发展脉络,整体叶盘的应用已不能满足航空发动机对推重比的强烈追求,因此在下一代发动机中将会运用重量更轻的整体叶环技术和复合材料技术,如图1所示的EJ200发展型计划^[1],不但提高了转子负荷能力,而且为支点布局的设计给予了极大的便利性。

德国MTU公司针对压气机静子叶片开发出一种“金属粉末注射成形(MIM)”技术^[3],可以实现TiAl材料的稳定应用,降低压气机部件的重量。

国外在高推重比高负荷压气机上开展了大量的试验研究,这在提升压气机气动性能的同时,也逐步实现了新结构、新材料和新工艺等先进技术在压气

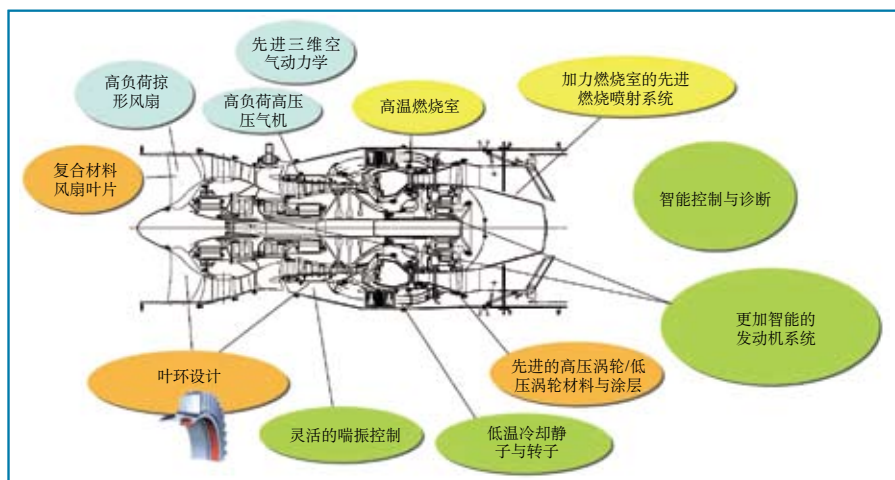


图1 EJ200发动机后续发展型应用整体叶环示意图

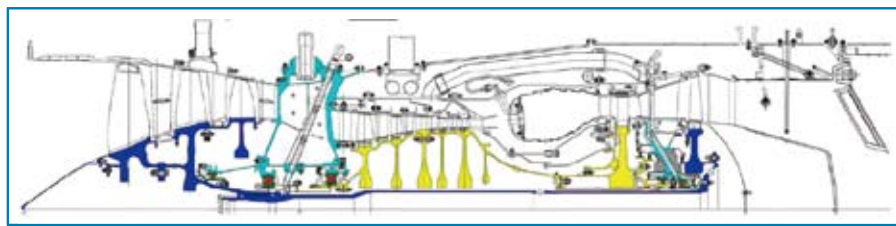


图2 EJ200发动机定型机阶段简图

机部件中的应用,从而衍生出了多种结构形式。本文将首先介绍国外高压压气机转子结构变化的详细情况,然后结合这种变化进行一些分析和总结。

1 国外压气机转子结构发展历程

目前,国外先进的航空发动机压气机转子一般采用多级盘鼓混合式连接,

既可以实现可靠的传力路径,也完成了简单方便的装配结构。如图2和图3所示,EJ200发动机5级高压压气机转子和GE90发动机的10级高压压气机转子均采用焊接和螺栓连接,焊接省去了大量的连接螺栓,允许使用薄型的盘腹板设计,使整体刚性得到加强,而且可满足低成本的需要和降低重量的目的;而利

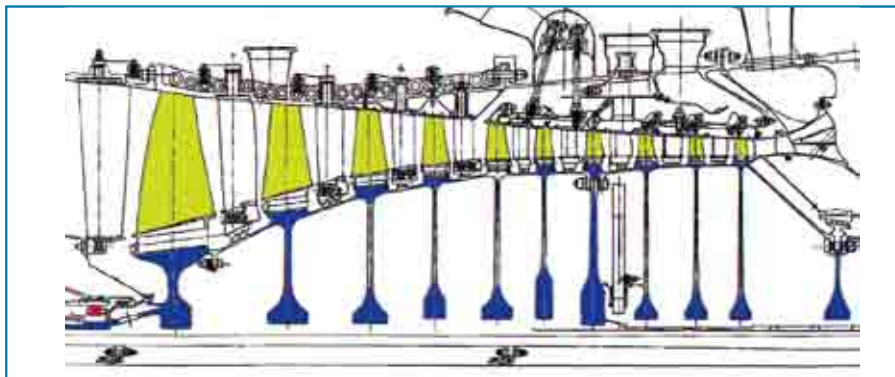


图3 GE90发动机高压压气机简图

用螺栓连接则可以实现核心机装配的简便性。其二者分别适用于级数较少的和级数较多的高压压气机。

然而在EJ200的验证机设计阶段,如图4所示高压压气机前轴颈是从第二级轮盘引出的,而非图2中所示的从第一级轮盘引出。前轴颈从第二级轮盘引出,减少了高压压气机的轴向跨度,使整体结构更加紧凑,结构形式比较简单,能很好地利用第一级轮盘周围的空间,这种结构常见于CFM56发动机系

列,适用在级数较多的高压压气机中。而前轴颈从第一级轮盘引出,则能够降低第一级轮盘的盘心,第一级轮盘非悬臂式旋转部件,方便强度优化第一级轮盘,而且会使整个压气机转子的传力路线更加合理,适用于级数较少的高压压气机中。因此对于级数较少的高压压气机来说,两种轴颈引出方式均有各自的优缺点。

随着整体叶盘和叶环加工工艺的成熟,在EJ200高压压气机的后续发展

型中,将采用此两项工艺降低转子重量(如图5所示),可以看出前三级采用整体叶环的结构形式,而后两级则采用整体叶盘的结构形式,实现了提高部件载荷和循环寿命的双重目标,给高负荷高压压气机转子结构设计指明了方向。

2 EJ200压气机转子结构变化分析

根据上述国外高压压气机转子部件的结构变化,这里仅对EJ200发动机验证机和定型机两个阶段的高压压气机前支点的变化情况进行分析,得到如图6所示的两种四级高压压气机的结构方案简图。

图6中两种方案各有利弊,方案一明显采用的是从第二级轮盘引出前轴颈的方式,这样可以缩短整个转子轴向跨距,盘间连接方式则参照CFM56系列发动机压气机结构,具有很好的继承性,前三级采用整体叶盘,第四级采用装配式结构,转子后端封严采用刷式密

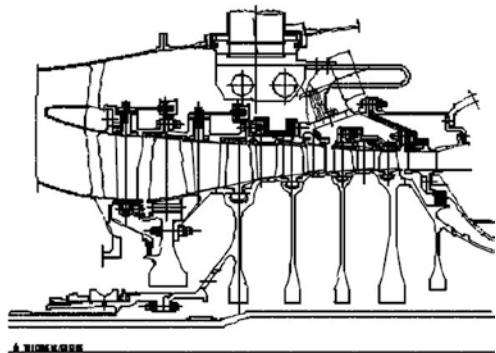


图4 EJ200发动机验证机阶段高压压气机简图

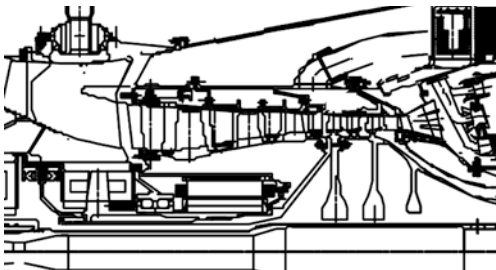


图5 EJ200发动机后续发展型高压压气机简图

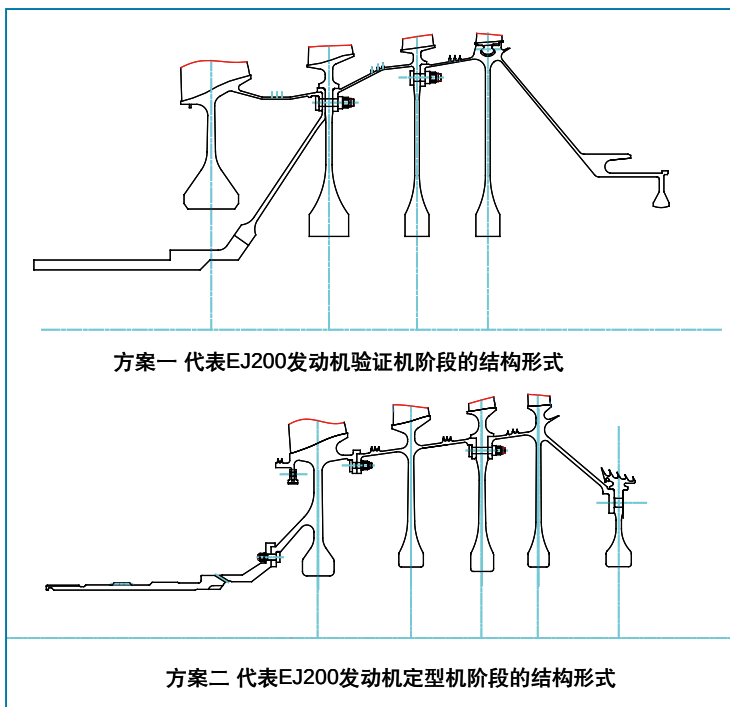


图6 EJ200高压压气机转子结构方案变化简图

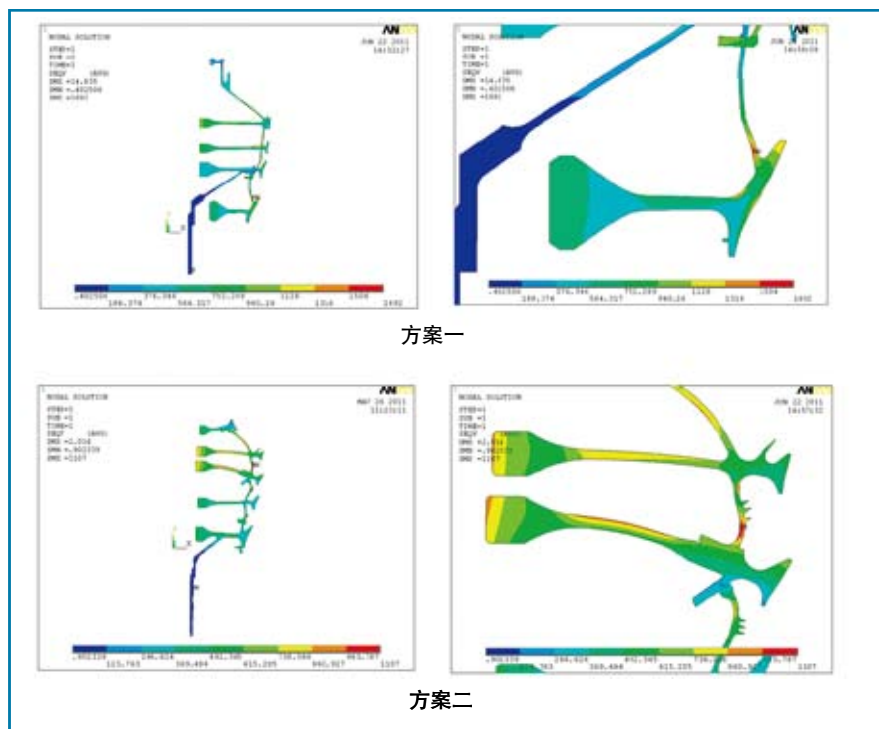


图7 两种转子方案的静强度分析对比

封结构,具有重量轻,封严效果好的优点。而缺点也较明显,第一级轮盘不可避免的成为悬臂式旋转部件,并且由于前支点轴承的安装空间问题,给第一级轮盘的盘心设计带来了很大的限制,后端刷式密封技术目前工艺还不成熟,存在一定的技术风险。

方案二则解决了这些难题,前轴颈从第一级轮盘引出,四级轮盘均采用整体叶盘结构,后端封严继承了CFM56系列发动机的篦齿盘形式,既达到了封严需要,也提高了产品可靠性。但方案二有转子轴向跨度长的弊端,而且虽然传力路线得到了优化,但第一级轮盘盘心锥壁部位有一定的生产加工难度。

此外,利用ANSYS分析软件分别对上述两种转子方案进行了简单的静强度估算,得到等效应力结果如图7所示,方案一由于一级盘悬臂,因此在伸出的鼓筒位置存在应力集中区域,应力极限数值较大;方案二则是在三级盘和

四级盘之间存在应力集中区,应力极限数值较小。从重量角度来看,方案一的一级盘心较厚,方案二的一级盘更适合强度优化,可以继续将盘心减薄。

虽然在EJ200发动机的研发过程中,从方案一最终走到了方案二,但其实影响高压压气机转子结构选择的因素很多,不仅局限在高压转子结构本身,最终方案的确定也要看总体支撑布局、高压压气机前支点的传动润滑装置、引气方案以及强度和空气系统计算的结果等环节,因此这是一个各种结构要素矛盾取得综合平衡点的过程,并不能简单地判断上述方案一和方案二的优劣。

3 结束语

总的来说,高压压气机转子的结构设计还涉及很多方面,如封严篦齿涂层和叶尖间隙主动控制等技术,但在前期方案设计阶段,最重要的还是转子的布局和传力路径的选取,因此本文旨在简

要介绍国外的压气机转子结构布局 and 后续发展情况,并且结合EJ200发动机压气机转子结构两种方案进行了简要分析,后续还需进行大量的计算和研究工作。从另一方面来说,压气机转子结构设计工作需要协调解决的问题比较零散、复杂,因此更需要在前期的转子方案设计阶段尽量打好充足的基础,避免后期详细设计时出现难题。

AST

参考文献

[1] Klaus Rud, Peter Geiger, Uwe Vogel, Propulsion Systems and Technologies for Future Manned and Unmanned Aerial Vehicles, MTU Aero Engines. 2005.

[2] O.E.Kosing, R.Scharl, H.J.Schmuhl, Design Improvements of The EJ200 HP Compressor from Design Verification engine to a Future all blisk Version, MTU Aero Engines. 2001.

[3] C. Müller, S. Sikorski, H. Passrucker, P. Wackers, New Design and Manufacturing Concepts for Aero Engine Compressor Components, MTU Aero Engines. 2005.

[4] 马琨,中推预研核心机压气机转子的结构设计[M]. 成都:燃气涡轮研究院,1993.

[5] 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.

作者简介

杨帆,工程师,主要从事风扇和压气机结构设计研究。

印雪梅,高级工程师,主要从事风扇和压气机结构设计研究。

李惠莲,工程师,主要从事风扇和压气机结构设计研究。