

高压压气机环形机匣改装中的组合车削工艺

Combination Turning During High Pressure Compressor Ring Case Modification

北京飞机维修工程有限公司 滕琳 刘晓明 李中原 郭丰

[摘要] 介绍了PW4000高压压气机环形机匣改装过程中高压压气机机匣的组合车削加工工艺,叙述了环形机匣的结构、组合加工的特点、工艺的制定以及加工测量等问题。

关键词: 高压压气机机匣改装 组合车削加工 数控编程

[ABSTRACT] The combination turning of high pressure compressor case during PW4000 high pressure compressor ring case modification is introduced. The structure of ring case configuration, characteristics of assembly machining, establishing of machining procedures and measuring of the assembly are explained.

Keywords: High pressure compressor case modification Combination turning NC programming

1 高压压气机环形机匣改装的背景

普惠发动机公司(PW)生产的94英寸(240cm)PW4000高推力发动机,是Boeing 747-400、767-300飞机所选装的发动机,多用于远程国际航线。自投入使用起,高功率起飞喘振一直是该型发动机的一个潜在设计缺陷,表现为起飞过程中发动机达到高功率时高压压气机(HPC)单元体会产生20~60s左右的喘振。

PW公司经过多年研究,发现造成这种喘振的原因是发动机在运行一段时间后,HPC单元体后几级转叶的叶尖间隙发生了异常变化,导致HPC的喘振裕度降低。转叶叶尖间隙变化的原因是HPC单元体结构设计有缺陷。

在HPC单元体原有结构中,第8~15级静子组件的每级由4个弧段组成,依靠后内机匣上的挂钩连接。发动机在高功率运转时,后内机匣上的挂钩由于振动而磨损,造成静子组件松动,导致叶尖间隙产生变化。在发动机减速过程中,分半静子组件的端口向内收缩,转叶与磨耗带的接触面积增加,磨损量增加,因而造成转叶和磨耗带之间的局部间隙增大,HPC单元体的喘振裕度下降,可能导致发动机喘振。

为防止PW4000发动机起飞时高功率喘振的发生,PW公司于2003年颁发了服务通告,要求把高压单元体从分半机匣构型(SCC构型,机匣、静子和磨耗带是一体的)改装成环状机匣构型(RCC构型,机匣、静子和磨耗带是3个分立的零件)。同年,美国适航管理局(FAA)颁发了强制性适航指令,中国适航管理局也颁发了相应的文件,要求受其管辖的航空公司的PW4000发动机在2009年6月30日前完成改装。HPC单元体从分半机匣构型改装成环状机匣构型(图1),成为了一个全新静子构型的单元体,使发动机性能得到了改善。

RCC改装的主要工作项目包括:高压压气机转子

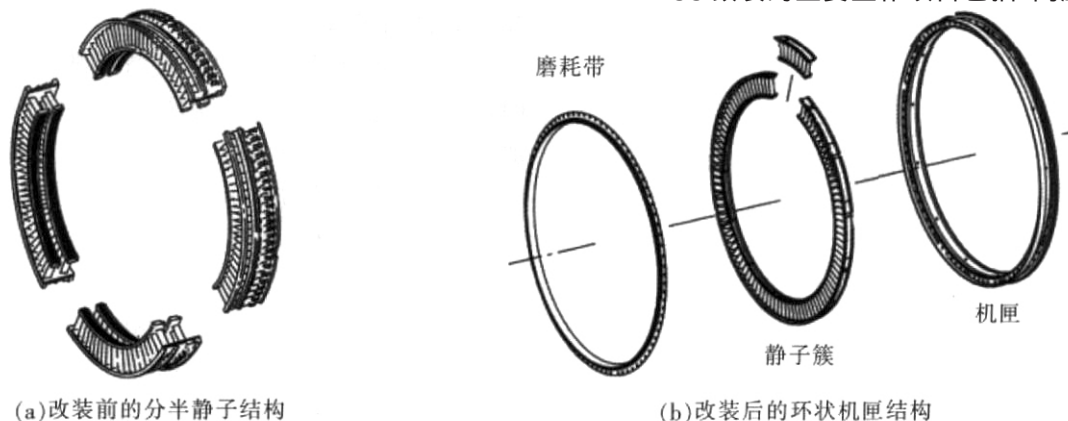


图1 改装前后的高压压气机单元体静子结构

Fig.1 High pressure compressor unit stator configuration before and after modification

叶尖的整体高速磨削; 高压压气机机匣的组合车削加工以及新结构的高压压气机单元体的装配。高压压气机机匣的组合加工是整个 RCC 改装过程中的一个重要环节, 机匣加工的精度直接影响装配后高压压气机单元体的叶尖间隙, 最终影响发动机的喘振裕度。

2 组合加工概述

RCC 机匣组件的组合加工是指在一次装夹过程中完成 HPC 机匣组件上第 5~15 级磨耗带的车削加工, 其目的是通过组合加工的方法保证机匣组件上各级磨耗带的同轴度, 确保装配后 HPC 转叶叶尖间隙的均匀性。

2.1 组件外形尺寸大, 精度要求高

机匣组件尺寸大, 高度近 1 000mm, 最大直径约 1 000mm。加工时面轮廓度误差不能超过 0.152mm。这样的大型薄壁构型组件, 因受装配精度的限制以及组件本身刚性的影响, 要达到这个精度是很困难的。

2.2 加工形状复杂

改装前只需在车床上调整好组件和成形刀具后, 用车刀直接进行车削加工, 就可以获得需要的形状。而改装后需要在组件的内表面上加工出两端带不同圆弧半径的锥形曲面, 使用常规的加工方法无法加工出需要的形状, 与改装前使用成形车刀加工的方法相比, 加工难点增加了, 只能使用单点车削刀具, 采用数控加工的方式获得需要的轮廓曲面。

以第 5 级磨耗带的加工为例, 在零件表面从点 1 开始先进行圆弧加工, 然后按照角度 A_1 加工至点 2; 从点 2 至点 3 可按这 2 个点的坐标进行直线加工; 从点 3 开始以角度 A_2 加工至点 4, 并加工出半径为 19.050mm 的圆弧(见图 2, 图中所说的基准 K 是零件安装边上的一个基准点)。

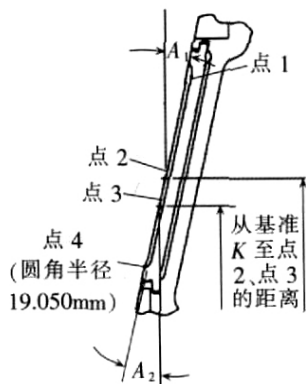


图 2 第 5 级机匣加工示意图

Fig.2 Stage 5 HPC case machining

机匣组件各级磨耗带的尺寸只是理论值, 每次加工时需根据 HPC 转子组件各级叶片叶尖的实际长度做出相应的修正补偿, 才能获得机匣各级磨耗带真正需要达到的加工尺寸。

此外, 还需要测量机匣组件指定高度上的直径尺寸, 受组件锥形轮廓的限制, 无论是加工过程中还是加工后的测量都比较困难。

2.3 组合加工尺寸的设定

组合加工的精加工尺寸需要根据转子叶片磨削后的平均叶尖长度确定, 用以保证装配后的叶尖间隙。

精加工尺寸的计算方法:

(1) 计算转子叶片叶尖长度的偏离值。偏离值 = 转子叶片叶尖实际平均长度 - 转子叶片叶尖理论长度。

(2) 计算机匣磨耗带的精加工内径尺寸 (D)。D = 内空气封严环理论精加工直径 + 偏离值。

3 组合加工工艺的制定

根据设备的特性和 RCC 机匣组合加工的技术性能指标, 制定与设备配套的工艺操作流程, 以保证加工精度的要求。实施的全过程应进行有效监控和记录。

3.1 机床的调试要求

HPC 机匣组件尺寸大, 加工后内径的轮廓度误差仅为 0.305mm, 对设备精度要求高。用于加工 HPC 机匣组件的数控车床不是专用设备, 加工其他零件时车床的横梁会根据被加工零件的尺寸调整到需要的高度, 所以在每次加工 HPC 机匣组件前必须先检查设备横梁的平行度(在 1 200mm 的宽度范围内, 横梁与工作台台面的平行度误差不能超过 0.012 7mm)。

3.2 刀片的选择

第 5~8 级和第 9~15 级内空气封严环被加工区域的材料是普惠的两种专利磨耗涂层, 涂层的硬度低, 加工过程中刀具的磨损量较小。但是, 由于涂层的粉末组元大多是熔点高而导热率很低的元素, 切削时热量集中在切削区域, 切削温度高, 会加剧刀具的氧化磨损。

根据磨耗涂层的特性, 选用刀尖圆角半径为 0.40mm 的车刀加工第 5~8 级内空气封严环, 对第 9~15 级内空气封严环则使用刀尖圆角半径为 0.80mm 的车刀。车刀的材料为钨钴硬质合金, 刀具的表面涂层为立方氮化硼。

加工过程中如果使用刃口不锋利的刀具,钝的刀刃会挤压涂层表面,使加工后的涂层表面呈现金属亮光。对于磨损涂层来说,这种状态是不可接受的,所以每次加工必须使用新的刀片。数控立车可以安装9把车刀,制定加工工艺时要安排好车刀的使用顺序,在粗车、半精车和精车各级内空气封严环时应合理选用刀具,保证精加工时刀具的状态良好。刀具使用的分配原则见表1。

表1 内空气封严环加工刀具的使用顺序

| 内空气封严环 (5~15级) | 刀具编号 | | |
|-------------------|------|------|-----|
| | 粗加工 | 半精加工 | 精加工 |
| 5 | 1 | 1 | 2 |
| 6 | 2 | 2 | 3 |
| 7 | 2 | 2 | 3 |
| 8 | 3 | 3 | 4 |
| 9 | 5 | 5 | 6 |
| 10 | 5 | 5 | 6 |
| 11 | 6 | 6 | 7 |
| 12 | 6 | 6 | 7 |
| 13 | 7 | 7 | 8 |
| 14 | 7 | 7 | 8 |
| 15 | 8 | 8 | 9 |

各级封严环内径的总切削量约为1mm,可按粗、半精和精加工的顺序,分级加工第5~15级内空气封严。例如,用1号刀进行第5级内空气封严环的粗加工和半精加工;再用2号刀先精加工第5级内空气封严环,然后用于第6级内空气封严环的粗加工和半精加工。

3.3 切削过程和切削参数的制定

切削参数的制定需要综合考虑涂层的特性、加工过程中组件的整体刚性以及切削效率。制定切削深度参数时,由于坯料涂层厚度的差异性,仅考虑剩余涂层的厚度。由于涂层硬度低,导热性能差,且承受较大的切削力后易崩落,故选择较小的切削深度以降低切削力。粗车时,剩余涂层厚度为0.70mm;半精加工剩余涂层的厚度为0.30mm。选用较高的切削速度和较低的Z向进给速度,这样既可以保证加工后涂层的表面质量,又可以提高加工效率。加工第5~8级内空气封严时选用的切削参数为:切削速度137m/s;Z向进给速度0.127mm/转。对于涂层硬度相对高些的第9~15级机匣,选用的切削参数为:切削速度91.44 m/s;Z向进给速度0.127mm/转。

3.4 组件的安装定位和调整要求

HPC机匣组件置于车床的工作台后,必须将上、下工装的定位直径和端面跳动量调整到图纸要求的范围内。要求车削上部工装对刀凸台的内径,并测量该直径,然后使用车刀去触碰该直径,以确保车刀的X向刀补尺寸的正确性。加工定位直径的目的是消除组件跳动对测量值的影响。同时还要求使用车刀触碰工装上的一个已知高度的定位块端面,以确保Z向刀补尺寸的正确性。

3.5 数控程序编制

(1) 切入点 and 切出点及拐点坐标的计算。

HPC机匣组件加工图上标注的尺寸不足以编制数控程序,需要根据各种几何关系计算车削加工的切入点和切出点及中间的拐点坐标值。只有在得到这些点的坐标后,才能编制完整的数控加工程序。

(2) 曲面加工时保证加工精度。

内空气封严环的加工面是曲面,带有锥度。若编制数控程序时不将刀尖圆角半径对加工的影响考虑在内,势必造成加工误差,其原因是:数控程序使用刀尖编程的方法,刀尖编程方法的优势是直接使用假想刀尖点,按零件的实际轮廓尺寸进行编程,方便编程操作;但是数控程序是针对刀具上的某一点即刀位点进行编制的,车刀的刀位点为理想尖锐状态下的假想刀尖P点,而实际加工中的车刀由于工艺或其他要求,刀尖往往不是一理想尖锐点,而是一段圆弧,切削加工时刀具切削点在刀尖圆弧上变动,造成实际切削点与刀位点之间的位置有偏差,X方向上刀具的实际切削点A与理想切削点P之间存在X的误差,Z方向上的实际切削点B与理想切削点P之间存在Z的误差,故造成过切或少切,见图3。这种由于刀尖不

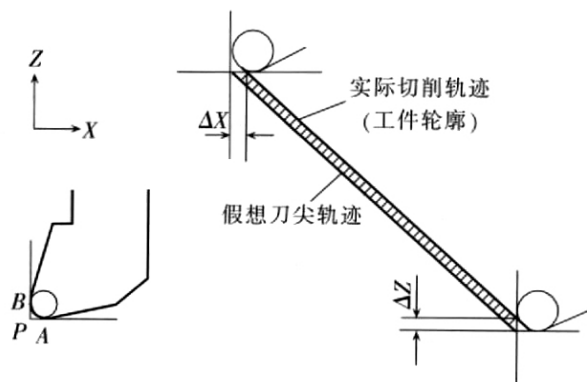


图3 刀尖圆角半径对加工尺寸的影响

Fig.3 Influence of tool fillet radius on machining dimension

是一理想尖锐点而是一段圆弧所造成的加工误差, 必须使用刀尖半径补偿功能 G41 或 G42 来消除。

4 组合加工尺寸检测

在项目实施过程中, 始终以保证 HPC 转子叶尖间隙为中心, 开发了新的测量方法, 对叶尖间隙尺寸进行有效控制。在机匣组件的加工过程中, 开发了在线测量技术, 对加工过程中的尺寸进行准确监控。还开发了三坐标自动测量技术, 用于机匣组件加工后进行全面的尺寸和形位公差测量。

4.1 在线测量

利用数控立车上的 RENISHAW 在线测量系统, 使用直径为 8mm 的红宝石测量头, 对各级内空气封严进行尺寸测量。

由于被加工表面有锥度, 所以测量过程中同样存在测量误差的问题。测量程序中使用的是测量头的中心点 O 的坐标。当测量头的中心点 O 移动到指定的高度 H 时, 测量头的 E 点与零件接触, 此时测量的内径并不是指定高度 H 处的尺寸。所以在 X 方向上会产生 ΔX 的测量误差, 见图 4。

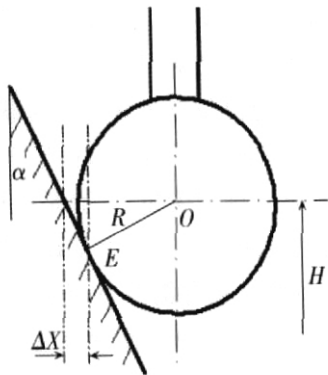


图 4 锥面测量的误差

Fig.4 Error of taper shape measurement

我们在测量程序中加入了直径方向的补偿值, 在每次测量前先输入零件的锥度值, 这样, 测量程序会自动在直径上补偿 ΔX ($\Delta X=R \times \sin \alpha \tan \alpha$) 的数值。

4.2 加工后测量

虽然数控车床上已配备了在线测量系统, 但该系统的缺点是测量速度慢, 耗费时间长。按照编制的测量工艺要求, RCC 机匣组件共需要测量 648 个点。在车床上每完成一个点的测量需要约 5-10min, 完成机匣组件的测量至少需要 54h。而且, 在数控车床上无法完成对形位公差的测量。

为了提高生产率, 同时确保测量的准确性和完整

性, 采用了下述的尺寸验证方式: 加工过程中, 在数控车床上利用在线测量系统对机匣上的每级磨损带测量 2 个点, 确保加工尺寸的正确性。加工完成后, 再用测量级的三坐标设备 (Reference 900 型, Leitz 公司生产) 全面测量机匣组件的尺寸。

5 结束语

按上述工艺完成组合车削加工的 PW4000 环形机匣已装上发动机, 并顺利地通过了试车台的验收试车, 该发动机的各项性能指标均达到预期要求。实践证明, 上述组合车削加工工艺达到了 OEM 零件图纸的设计要求。HPC 机匣组合加工能力的建立, 提高了 Ameco 加工大型复杂构件的技术水平, 带动了整体加工能力的提升。 (责编 文洵)

(上接第 75 页)

$p_9 > p_4 > p_3$, 其中, 产品 p_7 与顾客需求的产品相似度最高, 其值为 $s_{max} = 0.91569$ 。

通常, 相似度接近的产品与顾客需要的理想产品的综合效用值都比较接近, 加上顾客需求本身的模糊性和不确定性, 因此在实际配置中, 可以将几个相似度高的产品同时输出给顾客供其选择, 以便最大程度地满足顾客需求。

4 结束语

快速、有效的产品配置方法是实现 MC 哲理、满足顾客定制需求、扩大市场份额的保证。顾客需求驱动的产品配置首先是在已有产品基础上的产品级配置, 然后才是部件或零件级的配置。本课题针对顾客对产品的不确定性、模糊性需求, 提出了一种解决顾客模糊需求的产品级配置方法。该方法可以应用于 PDM 软件的配置系统或在线网上购物系统。

参 考 文 献

[1] Anderson D M, Fine B J. Agile product development for mass customization. New York: McGraw2Hill, 1997: 1-4.
 [2] 刘晓冰, 董建华. 产品配置中相似实例模糊优选法的研究. 高技术通讯, 2003(12): 65-69.
 [3] Van Laarhoven P J M, Pedrycz W. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. Fuzzy Sets and Systems, 1983 (11): 229-241.
 [4] 徐泽水. 对方案有偏好的三角模糊数型多属性决策方法研究. 系统工程与电子技术, 2002, 24(8): 9-12.

(责编 钟元)