

# 整体叶盘自适应加工技术 及其工程化探索

## Adaptive Milling Technology of Blisk and Engineering Exploration

中航工业北京航空制造工程研究所 王文理



王文理

北京航空制造工程研究所高级工程师,长期从事航空航天产品数控工艺技术及数字化制造技术研究,完成了多项飞机复杂结构件及发动机整体叶盘数控加工工艺技术攻关及课题研究,发表论文 20 余篇,获得软件著作权 4 项。

### 自适应加工技术及其在整体叶盘加工领域的应用

自适应加工技术是为了满足某些特殊领域的需求而发展起来的一项新的系统集成应用技术,它在多种加工技术领域都有应用,有些是设备具有自适应功能,有些是工艺自适应。其主要意图是要能够自动适应

整体叶盘的加工在我国也是刚刚起步,由于航空发动机整体叶盘是高速旋转部件,质量要求极高,整体叶盘的高精度数控加工需要一个完整的技术体系及软硬件环境来保证。

目前的工况条件或零件形状进行加工。在北京航空制造工程研究所开展的线性摩擦焊空心叶片整体叶盘的研制中,由于焊前叶片的空心部位已经加工到位,焊后叶片根部必须要采用自适应加工的方式与已加工到位的空心部分光顺接平。实心叶片或精锻叶片也可采用焊接方式成为一个整体叶盘,在焊接前将叶型大部分加工到位,焊后采用自适应加工方式。资料显示,某焊接式整体叶盘的叶片在五坐标加工中心上的加工时间是 100h,加工费用:100h × 200 美元/h=20000 美元,而整体加工此叶盘需要 500h,加工费用:500h × 200 美元/h=100000 美元,焊接式叶盘的毛坯的重量 140kg (毛坯费用 12000 美元),整体加工叶盘的毛坯重量达 750kg (毛坯费用 63000 美元),显然

焊接式叶盘的毛坯材料费用和加工费用仅是整体加工的几分之一,其主要的优势在于极大地降低了整体叶盘的加工周期,突破了整体叶盘加工周期长的瓶颈,并且能够因为采用了不同的叶片材料而提高叶盘的性能。焊接叶盘加自适应加工的方式,改变了传统整体叶盘的生产方式,突破了传统叶盘加工周期长的瓶颈,而自适应加工在其中是承担着保证最终尺寸精度的重要作用。

罗·罗公司较早就与斯达拉格公司开展合作,采用自适应加工方式加工空心叶片整体叶盘,研发了一整套的自适应加工软件及工艺技术,由于其叶片成型及焊接技术等综合技术水平都很高,焊后精度较高,确保了自适应加工后能够满足质量要求,已经实现工程化应用,在世界上处于

领先地位。RCS 公司也在叶片、叶盘自适应加工方面有成熟的软件。国内西工大、香港科技大学及北京航空制造工程研究所都开展了叶盘自适应加工技术的探索研究。由于国内叶片成型、焊接相关技术及自适应加工技术都还不成熟,都处于研发阶段,对焊接叶盘生产过程缺乏一系列标准及规范,至今都还没有开发出一整套的工程化的工艺和软件用于整体叶盘自适应加工的工程化应用。

## 整体叶盘自适应加工的原理及关键技术

### 1 整体叶盘自适应加工的工作原理

焊接式整体叶盘加工面临的主要问题有:(1)线性摩擦焊接后,每个叶片的位置及扭转角度都不一样;(2)空心叶片或精锻叶片,每个叶片的已加工表面的实际形状也不一样;(3)轮毂及叶片根部焊接工艺台需要加工,且加工的叶片型面要与已有型面必须光滑过渡。

解决措施:(1)在线测量快速获得每个叶片的实际形状和位置;(2)根据测量数据,重新构造过渡区叶片型面数模;(3)设计专用的编程方式,为每个叶片生成唯一的个性化的 NC 程序,以自适应加工该叶片。

这个过程就称为整体叶盘的自适应加工,分别针对每个叶片的实际位置和形状,进行个性化的编程和加工。这个过程涉及到五坐标在线测量技术、测量数据读取处理技术、曲线曲面的建模技术、叶盘的五坐标加工编程技术、仿真技术、整个过程的集成技术和工程化技术。它不但要面对整体叶盘加工所要遇到的重重困难,还要对每个叶片进行测量和编程、仿真,尤其根据测量数据的建模技术,必须要精心设计方案,要有极好的策略和技巧,既要保证光滑接平,又要绝对保证刀具不能在已加工表面产生稍微的划痕及接差,还要不能偏离理论曲面及厚度要求。

### 2 整体叶盘自适应加工模型的设计

整体叶盘自适应加工的方案设计的核心是设计一个自适应加工的数模,在该数模中能够进行叶片过渡区的曲面重建及重新生成加工程序。该数模集中体现自适应加工的方案,该数模没有固定的模式,最好是根据所使用的 CAD/CAM 软件的特点、叶片的实际情况和加工精度要求进行设计。通常要考虑如何在叶片上划分过渡区、保留区、测量截面、加工范围,如何能够方便读取测量数据并生成过渡曲面,采用何种编程方式。较可行的方案是首先要划定叶片自适应加工过渡区的范围,把叶片划分为三个区域:叶片的已加工区域、过渡区、根部保留区。主要涉及到几方面的问题:测量截面线的位置、数量、距离,根部保留区的范围,构成截面线的控制点的数量,进排气边  $R$  的测量点。这些因素需要根据实际情况综合考虑,不断实践。通常的原则是若叶片的变形不大,过渡区应尽量小,这样才能使加工后的叶片更接近于设计模型,测量截面也应尽量靠近过渡区,测量截面间的距离也不要过大,大约在 10~15mm 范围内较佳。每个截面的测量点数要适中,要根据叶片的大小大约在 20~30 个范围内。如图是某叶盘的自适应加工方案,首先在已加工的叶型上测量 2 个绿色的截面,然后在根部设置一个理论数模的保留区,在保留区的边缘提取一个红色的理论数模截面线,利用这 3 条截面线,构造一个过渡曲面,然后进行编程加工。此方案是整体叶盘自适应加工的最常用的、简洁的方案。但是此方案并不能达到最佳的效果,首先其 2 个测量截面不是采用扫描方式,没有进行最佳拟合,其次 2 个测量截面还不够多,

仅有 3 个截面线参与到过渡区曲面的构造过程中,过渡面的生成完全依靠此 3 个截面线,没有考虑到设计型面,所以过渡区曲面的构造还不是很精细,尤其是当测量截面的加工质量较差时,会对过渡曲面的生成有较大的影响,进排气边的形状和  $R$  也极易偏离设计模型,所以必须要求测量截面的加工误差要控制在一定范围内。如图 1 所示为某叶盘的自适应加工方案。

### 3 测量技术与自适应模型重构技术

用于自适应加工过渡区截面线的测量可以在三坐标测量机上进行,也可以在机床上在线测量,可以点位测量,也可以扫描测量。现阶段采用接触式测量技术较成熟,非接触式测量由于叶片的角度很大,还在探索中。所选用的测量方式要以整体叶盘自适应加工工程化为主要考量目标,目前我们认为采用测头在线测量点位的方式较为可行,因为测量时叶盘位于机床上,其装夹状态与加工状态相同,消除了装夹误差,且测头已是国外精密加工中心的必备项,其测量精度已能完全满足要求,通过五坐标测量编程,测量程序能够迅速较精确地测量叶片。测量数据通过网络传到 CAD/CAM 软件系统,用于进行建模和编程计算,如图 2 为五坐标测量编程示意图。

如图 3 所示,分别为测量机测量

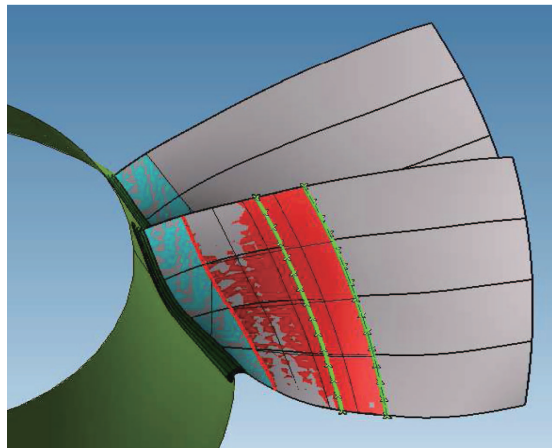


图1 某叶盘的自适应加工方案

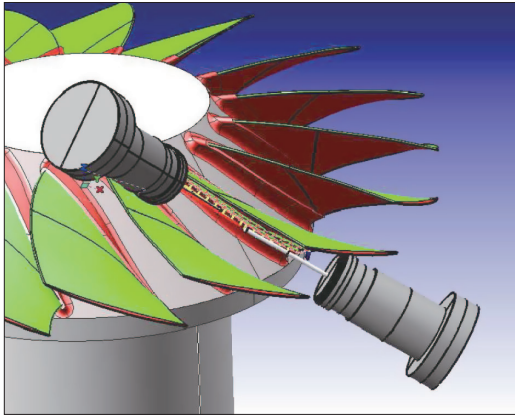


图2 五坐标测量编程示意图

与在线测量。在线测量的程序编制首先要理论数模上定义测量截面线,然后在截面线上生成测量点及其法矢,然后生成无干涉的测量路径,在加工中心上沿曲面的法向去测量点位,获得其偏差值,将偏差值传给CAD/CAM系统。测量的难点在于需要五坐标编程,严格控制侧杆的方向,使之不与叶片干涉。此外,进排气边 $R$ 的测量是有极大难度的,因为 $R$ 很小,仅有几分之一 $\text{mm}$ ,且由于叶片焊后位置有误差,测头极易接触不到正确的位置。因此,最佳的解决方案是能够扫描测量,但扫描测量对设备要求太高了,且数据量庞大,处理也困难。斯达拉格公司采用雷尼绍测头,利用测杆对进排气边进行测量,避免了测头触碰困难的问题,如图4。

对测量点位进行读取后,要进行处理,是否处理好这些测量点位是自适应加工的关键,这其中有很多的策略和技巧,要考虑到这些点位直接影响曲面的生成及刀轨。处理完成后的测量点位就可以构造截面线了,此时要用到CAD的曲线构造技术。

由于叶片表面本身质量就有可能不好,所以某些测量点位的偏差就较大(如图5),曲线既要尽量通过测量点,又要光滑,所以需要在这两个之间找到平衡,通常3次曲线可以兼顾光滑和距离控制点较近。测量截面线构造好之后,就可以构造过渡区

域的曲面了,此时也是利用CAD的曲面构造功能,最好能够将叶型曲面分为4部分分别构造:叶盆曲面、叶背曲面、进气边曲面、排气边曲面,需要注意的是曲面之间的连接。曲面构造的方式很多,选取适合的功能很重要。

#### 4 自适应加工程序的编制技术与再计算技术

众所周知,整体叶盘的数控加工难度是极大的,主要原因就是叶片薄而扭曲大,叶片间通道狭窄,其数控程序的编制极为复杂,要严格控制刀轴方向,控制刀具轨迹,只能在十分有限的空间内运行。整体叶盘的自适应加工除了上述难度外,还要额外考虑到型面的不确定性会造成刀轴的不稳定,增加了主轴与工件或夹具干涉的可能性。其次就是要考虑到过渡面与相邻曲

面之间的光滑连接问题。自适应加工的数控程序必须要经过加工仿真软件的干涉检查后方能使用。

#### 5 整体叶盘加工的振颤抑制和变形控制

焊接式整体叶盘的自适应加工同样要面临着如何抑制加工振颤的问题,否则叶片的表面质量将无法保证。振颤主要分为受迫振颤和再生振颤,第一种类型是有切削过程本身引起,如刀具和工件之间的摩擦,或形成切屑的热变形效应,第二种类型是工件表面的再生振颤,即加工中的共振,这是最主要的振纹来源。当前最有效的方式是在叶片间进行填充,增强叶片的刚性。采用变齿距或变螺旋角刀具,可以有效改变振颤频率,抑制共振。此外,采用新型密齿刀具,可以比球头刀具有更小的接触面积,从而明显降低切削力,减小叶片的变形计振颤。此外,采用带锥度



图3 测量机测量(左)与在线测量(右)



图4 利用测杆对进排气边进行测量

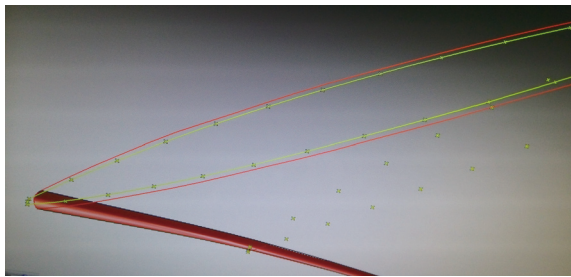


图5 利用测量点位构造的截面线与理论截面不重合

的球头刀,可以明显增强刀具的刚性。此外,采用 CutPro 软件计算刀具稳定域,可以用来确定最佳的切削条件,避免振颤。

## 6 整体叶盘加工的质量控制技术

整体叶盘自适应加工的加工质量主要分为表面质量、尺寸精度和形位公差,形位公差主要涉及到扭转度、位置度和轮廓度。叶片的表面粗糙度通常最终要求  $R_a 0.4$ , 数控加工至少要保证  $R_a 1.6$ 。由于叶片的轮廓度要求很高,尤其是进排气边的  $R$ , 手工抛光是无法保证的,必须实现全叶片无余量加工,全部精度由数控加工保证,抛光仅仅是降级表面粗糙度。这就需要加工过程中设置合理的切削参数,极高的夹具精度,刀具精度,极高找正精度,最主要的还是设备的精度要高,尤其是五轴联动的精度要高,程序的插补精度高,这样才能保证整体叶盘的加工质量。此外,西门子等高档数控系统能够直接处理带矢量的五轴程序,内部进行轨迹的优化,加工出的曲面质量更高。

## 整体叶盘自适应加工工程化需要解决的几项重大问题

### 1 自适应加工工程化工艺技术及集成系统设计

我国现在还没有一套完整的整体叶盘自适应加工工程化解决方案及软件系统。为了实现整体叶盘自适应加工的批量生产问题,必须要求自适应加工技术工程化。现在面临的问题是应该针对所要加工的叶盘,设计出合理的高效的适合自适应

加工的工艺路线和自适应测量,然后开发一套集成系统,将测量编程、在线测量、测量数据传输、叶盘专用 CAD/CAM 系统、曲面自动生成和数控程序自动再计算、加工仿真、程序传输、数控系统、网络

集成为一套专用的系统,能够实现叶盘的高效自适应加工全流程。国外有类似的系统,但不完全适合我们的产品特点。

### 2 空心叶片成型与焊接工艺对自适应加工的影响

整体叶盘空心部位的叶型误差及焊接造成的位置误差直接影响着过渡区曲面的建模与自适应加工的质量,但现阶段它们都还缺乏验收标准。必须要尽快提高成型及焊接技术,摸索制定出一套标准,规范空心叶片的叶型误差及焊接误差,否则将严重影响叶盘的气动性能和静平衡,并且容易造成自适应加工过程中的刀轴不稳定,影响加工质量甚至造成主轴与叶盘的干涉。

### 3 自适应模型与设计模型比较与评估

自适应加工最大的问题就是自

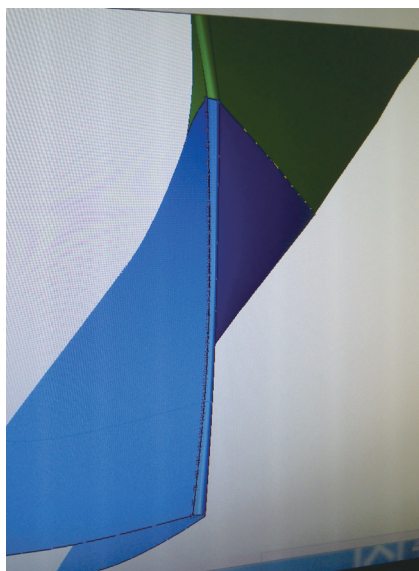


图6 过渡面构造质量不好

适应的加工模型与设计模型有一定的出入(如图5),是否符合设计要求暂时还没评估标准。若测量部位有缺陷,会严重影响过渡面的质量,过渡面在构造过程中,如何尽量符合设计要求还暂时难以顾及到。如图6所示的过渡面构造,进排气边的  $R$  和叶片的厚度就明显与设计数模有差距。要解决这个问题,首先就是要求测量截面的加工精度要高,再者就是要持续研究如何在过渡面的构造过程中如何参照设计模型,尽量贴近设计模型。

### 4 自适应加工叶盘的验收与应用评估缺乏标准

对焊接式整体叶盘的自适应加工,面临的最大的问题是叶片与设计模型有出入,静平衡难度大,气动性能有偏离,是否能够达到装机标准,甚至缺乏专门的检验验收标准,这给此类叶盘的装机带来了较大困难。

## 结束语

整体叶盘的加工在我国也是刚刚起步,由于航空发动机整体叶盘是高速旋转部件,质量要求极高,整体叶盘的高精度数控加工需要一个完整的技术体系及软硬件环境来保证。焊接式整体叶盘自适应加工的方式,是整体叶盘的一个新的、高效的加工方式,空心叶片整体叶盘在国外先进的军用发动机上已得到应用,显然我国的新型发动机也急需此项技术。它不但要面临整体叶盘加工所要遇到的各类技术问题,还要对所有叶片个性化建模和编程,各项技术都还处于摸索阶段,距离工程化应用还有一段距离,且现阶段还缺乏一系列的加工过程的标准。

如何设计焊接叶盘自适应的工艺过程及建模编程策略,实现测量、建模、程序再生成的工程化,达到高效率和高质量的自适应加工还需要我们进一步努力。

(责编 亿霖)