

航空发动机锥体机匣在线测量技术的应用探析

Application of Online Measurement Technology in Cone Case of Aeroengine

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 胡晓群 杨润石 冯 湛
天津大学精密仪器与光电子工程学院 刘书桂



胡晓群

研究员级高级工程师, 现任公司首席技术专家。从事航空发动机零件数字化制造技术研究, 曾获中航工业集团公司科技进步一等奖、三等奖及国防科技进步三等奖。

在航空发动机制造业快速发展的今天, 新产品研制的种类越来越多, 企业不但追求研制进度和成本, 而且更加注重以产品质量来赢得竞争的主动权, 这一领域对加工精度和效率提出了越来越高的要求, 企业多在成品检验和中间工序结束环节配备了三坐标测量机进行质量控制, 即离线检测。而在机床上使用机载测

航空发动机部分机匣呈锥体结构, 形状复杂、薄壁、精度高、属于弱刚性零件, 加工中容易产生变形, 因此对零件加工时的装夹定位精度要求很高。零件在加工工位上装夹后, 机匣内腔或外壁表面的成型精加工应一次完成, 尽量避免产品超差引起的返修加工。

头进行在线测量, 既可方便工件的装夹找正, 又可减少工件的周转和因超差返修造成多次装夹的时间。同时增加中间环节的质量控制手段, 减少了某些特殊工装的设计和制造, 可以大大缩短辅助时间, 提高生产效率, 提高产品的一次合格率, 既降低了生产成本, 又加快了新产品研制的速度。根据测量结果自动生成误差补偿数据反馈到数控系统, 保证工件的尺寸精度及批量加工尺寸的一致性。在数控机床上进行在线检测是提高数控机床自动化加工水平和保证工件加工精度的有效方法之一。

航空发动机部分机匣呈锥体结构(如图1所示), 形状复杂、薄壁、精度高、属于弱刚性零件, 加工中容易产生变形, 因此对零件加工时的装夹定位精度要求很高。零件在加工工

位上装夹后, 机匣内腔或外壁表面的成型精加工应一次完成, 尽量避免产品超差引起的返修加工。由于锥体机匣外壁直径尺寸 ϕB (见图2) 和外壁安装座表面距回转中心距离尺寸 L (见图3) 的测量无法使用通用测具和专用测具实施手工测量, 通常需要在全部尺寸加工结束后, 从机床



图1 发动机的锥体机匣

上卸下,由三坐标测量机测量上述尺寸,即离线检测。当直径尺寸 ϕB 或中心 L 未进入尺寸公差带需要返工时,只好在机床上重新装夹、再次加工。当零件精度非常高时,二次装夹在定位精度上引起的误差,对零件返工合格率影响非常大。

为解决此类问题,在加工该机匣的五坐标加工中心上开展了在线测量技术应用研究,对机床配置的西门子控制系统 Sinumeric840D 的在线检测功能进行开发和应用,结合 Renishaw 测头,实现了锥体机匣外壁直径等尺寸的在线检测。在机床上可随时对工件的加工部位进行测量,并对加工尺寸给予补偿和修正,提高了锥体机匣一次加工合格率。

在线测量机床概况及检测功能分析

在线测量功能开发所使用的机床为卧式五坐标加工中心,是五轴五联动双工位机床。第四轴和第五轴分别为主轴摆动与工作台翻转。定位精度不大于 0.008mm,重复定位精度不大于 0.004mm。机床配备 Renishaw 公司 MP10 触发式测头。

MP10 触发式测头具有刚性大、重量轻、变形小的特点。测头的尾部为 ISO50 刀柄形式。测头的调用方式和刀具相同,可装载在刀库中自动换到主轴上。借助于机床的导轨运动,MP10 可对工件中的 5 个方向进行检测 ($\pm X$ 、 $\pm Y$ 、 $+Z$)。在测杆长度为 50mm,测头速度为 480mm/min 的条件下,测试出测头的单向重复精度 0.001mm。MP10 的触发力是可调的。在 XY 平面内所需的最低触发力为 0.75N,最高为 1.40N,允许测杆有 $\pm 17.5^\circ$ 的超程量,在 Z 向的触发力为 4.2N,在 Z 向允许有 8mm 的超程量^[1]。

随机床配置西门子控制系

统 Sinumeric840D。该控制系统提供了测头的校准宏程序和一些几何要素的测量宏程序,可以针对航空发动机机匣槽宽度、凸台宽度、矩形凹槽、矩形凸台、凸台表面中心距、内圆直径、外圆直径等几何要素进行测量,并可以输出测量结果文件供工艺人员进行数据分析,根据分析的结果对零件进行修正加工。测量功能主要依靠在数控测量程序中引用 Sinumeric840D 提供的宏程序来实现,用户可以进行工件原点的设定,进行工件加工过程中的在线测量。但是这些宏程序仅支持单点位测量,而非连续扫描测量;并且要求测量时测头的运动方向与被测点的法向平行。即测头半径补偿只能沿着被测平面的法向量方向。如若测量时测头与被测工件不是垂直或平行,而成一定角度,则半径补偿就会产生误差。

锥体机匣测量应用实例

测量前必须将工件被测表面的油污、碎金属屑和冷却液擦拭干净,避免测量结果准确度受到影响。

1 锥体机匣测量尺寸分析

锥体机匣的铣加工尺寸共有几百个,其中一部分例如深度尺寸、圆柱面外径、岛屿的外形几何尺寸等,

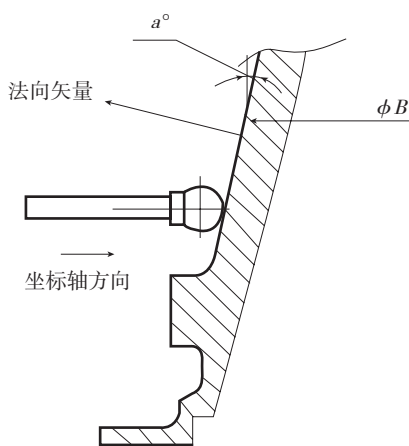


图2 锥体机匣直径 ϕB 测量示意图

可以用常规测具如游标卡尺、深度尺、外径千分尺直接测出。另一部分则通过设计和制造特殊测量工装来测量,例如圆柱段的厚度是由专门设计的厚度卡钳来测量的。对于某些空间尺寸,例如锥体机匣的外径 ϕB (见图 2)、机匣外型面的安装座表面至机匣回转中心的径向尺寸 L (见图 3),则需要三坐标测量机测量完成。在零件的制造工艺中,提倡尽可能地用前两种测量方法完成零件的测量,测量操作简单、不占用机床的加工时间。

2 在线检测前的测头校正

进行在线测量前,需要对测头球进行标定,从而使测量系统对测头的方向、测杆的长度以及测头的半径有精确的计算及半径补偿,测头校正是测量过程中的重要环节以保证测量精度。校正过程中,在测头加速接近校正标准件阶段,测头不取值,加延时之后,在匀速运行阶段进行校准取值,从而保证测量数据的准确性^[2]。

校正测头时,测量标准件的速度应与测量工件时的速度一致。并注意观察校正后测头的直径与以前的校正结果是否有较大出入。如果有很大变化,则要查找原因或清洁标准球和测头。重复进行 2 ~ 3 次校正,观察其结果的重复程度^[2]。

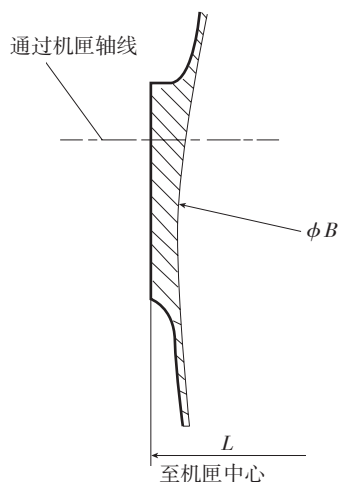


图3 安装座表面至机匣回转中心的径向尺寸 L

测头杆的长度由刀具测量仪测出,放置在工件原点坐标系存储单元G54中,为保证测头的校正结果准确无误,通常会测量其他标准件,来验证校正误差。

测头的校正程序和工件的测量程序均由 Sinumeric840D 控制系统的高级语言编写。以满足循环调用、赋值、变量计算、计数和记录实测结果等功能的需要。

测头校正程序如下:

```

%_N_CALIBRATE_XYZ_MPF
;$PATH=/_N_WKS_DIR/_N_ME_WPD
:(calibrating probe)
:(standard circle gauge diameter
:D=192.408)
:(thick=30.5753)
:(first,puting probe length,radius
into tool magazine
:(approximately hole center
x,y value in G57); 分号后
部分为程序需要信息的说明;-----
T="PROBE1";命名测头
TOOLCHANGE;将测头从刀具
库调入到主轴上
N10 G57 G17 D1 G90 G0 A0 B0
X0 Y0;测头初始运动
N40 G01 Z10 F1000
N50 G01 Z-10 F500;测头运动
到标准环规内孔
N 6 0 _ M V A R = 8 _
SETVAL=192.408_KNUM=0 _TSA=5
_PRNUM=1 _VMS=0 _NMSP=1 _
FA=_SETVAL/2_TZL=0.001;测量参
数设置
N70 CYCLE976;调用系统测量
宏程序,校正测头的 X、Y 值
N90 G0 Z100
;-----
N100 G0 Y110;测头运动初始
化
N50 G01 Z41 F1000
N60 _MVAR=0 _SETVAL=30.575
_KNUM=4 _TSA=5 _PRNUM=1 _

```

VMS=0 _NMSP=1 _FA=_SETVAL/2
_TZL=0.001 _MA=3 _MD=1
;设置校正测头的 Z 值所用的参数。

N70 CYCLE976;调用系统测量
宏程序,校正测头的 X、Y 值

```

N90 G01 Z60 F1000;
;-----
N130 G0 Z500
N140 M2

```

3 测量坐标系的建立

遵循设计基准、工艺基准和测量基准重合的原理,测量坐标系通常选定与零件的工艺基准重合。当测量结果需要用 CAD 模型进行分析比较时,要按照 CAD 模型的要求建立零件坐标系,使零件的坐标系与 CAD 模型的坐标系一致,才能编程测量。待测机匣为回转体,一些部位需要五轴联动加工才能达到最佳效果,此时工件的回转中心需要与机床工作台同心。故在零件的装夹找正中没有采用测头系统的工件原点测量功能。而是采用百分表接触零件圆周找正带,测零件的跳动方法。这里设置测量坐标系与零件的加工坐标系重合。

4 锥体机匣典型几何特征的测量

通常,测头在进行测量时,都是沿着机床坐标系或者确定的工件坐标系的轴线方向运动,但当测量如图 2 所示的锥体机匣外壁锥面时,由于测头运动方向与锥面的实际接触点的法线方向存在一定角度,从而不能得到精确补偿,使测量数据产生误差。对于这种情况,就必须获得精确的法向矢量角度,使测头沿法线方向运动,以得到正确的补偿,产生精确的测量数据。

为了能够实现机匣在线测量,我们利用五坐标加工中心的工作台翻转功能,将零件翻转一定角度,令锥

体表面与机床主轴即测头垂直(见图 4),满足了测量的前提条件。假设原实际测量点 P 在工作台翻转后的对应点为 P',可以通过数学旋转公式计算得出。

```

锥体机匣外壁直径测量程序:
%_N_ME_NO6_POCKET_MPF
;$PATH=/_N_WKS_DIR/_N_

```

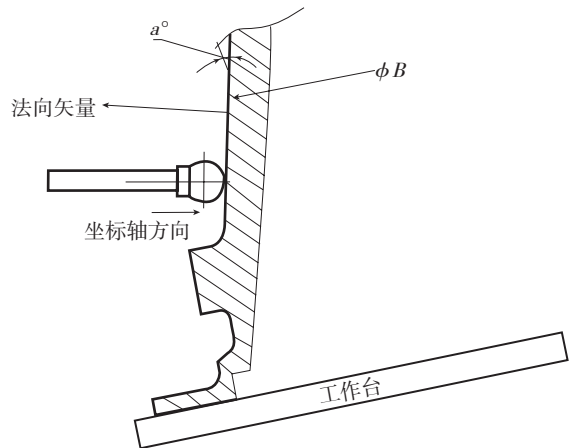


图4 机匣外壁与机床主轴垂直

```

ME_WPD
;(mesuring NO.6 cone)
;程序信息说明
;(first,puting probe length,radius
into tool magazine
;(workpiece center x,y,z value in
G54)
; R 2 0 = U P P O I N T
;R 参数寄存器存放测量结果
;R21=DOWNPOINT
;R22=(UPPOINT+DOWNPOINT)/2
;R23=DIFERENCE
-----
DEF REAL DZ,DZ1,DZ2,ANGLE
;程序用实型变量声明
DEF INT NUM,NUM1;程序用整
型变量声明
T="PROBE1";从刀库调入测头
至主轴
TOOLCHANGE
N10 G54;设置测量坐标系原点
N15 G17 G90 G0 Z100 D1 ;指

```

定测头长度补偿地址
 N20 ANGLE=35 ; 设定测量第一点的初始圆周角度
 N25 G0 A20 ; 翻转工作台,使锥面与机床 Z 轴平行

 N30 _MVAR=0 _SETVAL=45.371 _KNUM=0
 _MA=3 _MD=1 _TSA=10 _PRNUM=1 _VMS=0 _NMSP=2 _FA=10 ; 设置测量参数
 N35 CYCLE100

 _PROTNAME="MEASURE_6_POCKET" ; 指定测量文件记录名
 _PROTVAl="No.6_POCKET" ; 指定表头
 _PROTVAl="DEGREE,SETVAL UE,ACTUAL_VALUE,DIFERENCE,U PPOINT,DOWNPOIN;T" ; 指定表格中各数据项名称
 FOR NUM=1 TO 4 ; 循环体开始 ;-----
 B=ANGLE ; 旋转到第 N 个测量点的角度
 NUM1=(NUM-1)*5
 N40 D1 G0 Z85
 N45 X0 Y329.118
 N50 G01 Z45.371 F1000
 N55 CYCLE978 ; 调用测量宏程序测第 N 点
 N 6 0 D Z 1 = _ O V R [4] ; 读取测量结果
 N65 R[NUM1]=DZ1
 N70 G01 Z45.38 F1000
 N75 X0 Y311.354 ; 移动到锥体第 N+1 个测量点
 N80 CYCLE978 ; 调用测量宏程序测第 N+1 点
 N85 DZ2=_OVR[4]
 N90 R[NUM1+1]=DZ2
 N95 R[NUM1+2]=(DZ1+DZ2)/2
 N100 DZ=_SETVAL-R[NUM1+2] ; 求被测点 (N 与 N+1) 的平均值
 N105 R[NUM1+3]=DZ

N110 G0 Z1000
 STOPRE
 _ P R O T V A L = A N G L E , _ S E T V A L , R 2 2 , D Z , D Z 1 , D Z 2 ; 测量结果写入输出文件
 A N G L E = 9 0 + A N G L E ; 设置下一个被测区域角度
 ENDFOR ; 循环体结束
 ;-----
 N115 CYCLE101 ; 输出文件关闭,并保存。
 N120 M02
 在上例中,每一次循环测锥体机匣外壁直径的纵向 2 个点,在 360° 圆周内共均匀选定 4 个区域,求出平均值。
 凸台表面至中心尺寸 L 的测量比较简单,原理同上,测量程序略。

5 测量结果分析

工艺人员根据测量结果与图纸要求尺寸进行分析、比较并计算出刀具的补偿修正量,输入到机床刀具管理中,进行后续加工。这一过程可以反复几次,直至加工出合格的零件为止。
 锥体外壁直径的测量结果,既可以通过数学公式计算出,也可以采用 CAD/CAM 软件辅助测量结果的分析。在机床工作台旋转后的坐标系下,做出转化后的公差带。直接将测量结果代入软件中,直观的得出是否合格的结论,不必再导入公式进行计算,避免人工计算出错的风险。

在线测量精确度保证方法

不可否认,机床的在线测量受机床精度的影响。测头的运动实际上是机床各个坐标轴的运动。因此,要求机床按相关规章制度对各个运动轴定期用激光干涉仪进行精度检测,根据误差情况适度进行补偿。另外,测量前必须进行测头的校正,此步骤是保证精确测量结果的有效手段。

除此之外,当批量较大、精度

较高时,还可采取抽样对比检测的方法。即每批首件机床在线测量后,交由离线三坐标测量机检测,分析、比较将误差控制在一定范围内,则在质量上会得到较为可靠的保证。

结束语

仅依靠随机配备的测量模块还无法完成自由曲面类零件,例如发动机叶片几何尺寸检测。这主要是受到来自软件方面的制约,若想实现自由曲面的在线检测,必须拥有更先进的机床在线检测软件,支持扫描检测方式,高速数据流传递,输出直观的分析检测报告。

对于复杂的、具有自由曲面特征的航空发动机零件,应该在检测前建立零件的 CAD 模型,进行检测路径的自动编程。并进行检测路径的仿真与优化,规避测头与零件干涉、碰撞风险。随后把检测程序传输给机床,进行自动检测。同时对检测后数据与理论的 CAD 零件模型进行对比,给出清晰的图形与表格兼具的检测报告。

机床在线检测技术有着广阔的应用前景,在线测量技术将促使数控机床成为加工和检测一体化的数控加工单元体。在线检测改变现有的某些典型特征工件的单一离线检测方式,改变了目前行业内一个设计特征配备一套测量工装的传统制造模式,节约工装制造成本,节省返修工时、提高产品加工一次合格率,从而降低新产品研制的周期和生产成本,是加快新产品研制切实可行的手段,可以向航空发动机其他结构零件推广。

参考文献

[1] 吴长忠,孙选,李国平等.基于 FANUC 数控系统的加工中心在线测量研究.科技创新导报,2009,26:74.

[2] 咎华,薛凤举.数控加工中在线测量的应用探析.制造技术与机床,2007(5):96-98.

(责编 侧卫)