降低大直径内孔铣削圆度误差的编程方法

金许涛，童勇智，王逢涛，张舒云，吕妮，兰忠杰
陕西柴油机重工有限公司　陕西兴平　713100

摘要：以加工某3.0MW风力发电机组轮毂主轴内孔止口ϕ1520H7$^{+0.125}_{0}$mm为例，介绍了一种铣削大直径内孔时降低圆度误差的一种新思路、新方法，利用双刀补结合微分思路，分段进行修正，完成整圆加工。

关键词：大直径内孔；圆度误差；铣削；编程

1　序言

为实施国家节能减排战略，近年来绿色能源产业发展迅速，风能作为可再生清洁能源，受到了越来越多的关注，风力发电设备的制造产能急剧放大。轮毂作为风力发电机组中的关键零件，运行时受力情况较为复杂，可靠性要求高，所以其加工精度要求严格[1]。其中，内孔止口是连接的重要部分，加工精度更是重中之重。由于在机械加工中经常采用数控机床圆弧插补功能进行内孔的铣削，而对于尺寸较大且精度及几何公差要求较高的大直径内孔，经常会出现因机床传动拟合误差过大而造成圆度超差的现象，因此如何降低内孔铣削的圆度误差显得尤为重要[2-4]。

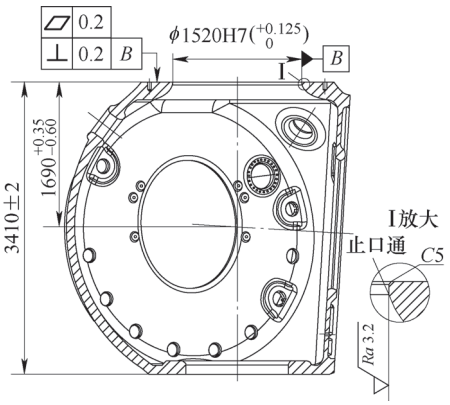
2　问题及原因分析

使用龙门镗铣床加工风力发电机组轮毂（见图1）的主轴孔ϕ1520H7$^{+0.125}_{0}$mm尺寸时，先以大直径立铣刀进行粗加工铣削整圆，再用整体硬质合金立铣刀进行半精铣削加工，如图2所示。工步内检测，发现X和Y方向直径超差，具体表现为Y轴方向直径尺寸比X轴方向直径尺寸超出0.18mm，已超出要求公差。由于精加工余量最少处仅剩0.20mm，因此为了防止精加工完成后零件尺寸超差，需要重新设计加工方案以保证产品质量。

任何机床都不可避免地存在制造和装配误差，数控机床也不例外。经过长时间的使用，机床机械传动装置出现磨损等原因都会导致传动误差增大。结合加工要素，经过分析得出：引起圆度尺寸超差的主要原因是加工的内孔直径为1520mm，尺寸较大，机床机械传动误差已超出公差要求。



a）模型

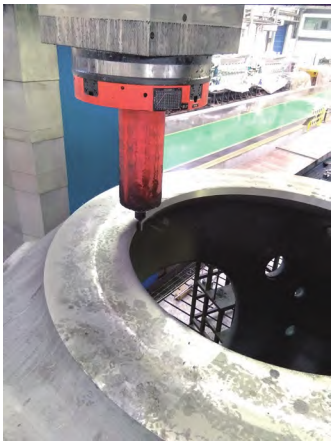


b）图样

图1　轮毂



a）粗加工



b）半精加工

图2　现场加工实况

3　方案提出及程序优化

由于铣削内孔圆度误差主要体现在X和Y方向上，为了消除2个方向上的圆度误差，采用微分思想，将整圆分为若干圆弧进行铣削，分段进行修正，降低圆度误差，具体措施如下。

1）给相同加工段或对角圆弧加工的刀具在运动过程中选择相同的刀具补偿号，在不同的加工段或对角圆弧变化的刀具选择不同刀具半径补偿号，在补偿编辑器里输入所需要的刀具半径补偿数值。

2）分析并掌握机床各轴误差规律，对坐标系进行旋转，减小单个轴对整个方向上超差的影响，使所有圆弧按照轨迹加工完成后拟合的整圆直径尺寸符合工艺要求。整圆加工轨迹如图3所示。

整合数控程序进行方案分解研究，图形分析如图4所示。改善X、Y轴方向上的直径误差，并采用顺时针圆弧切入和圆弧切出的方式，加工时把坐标

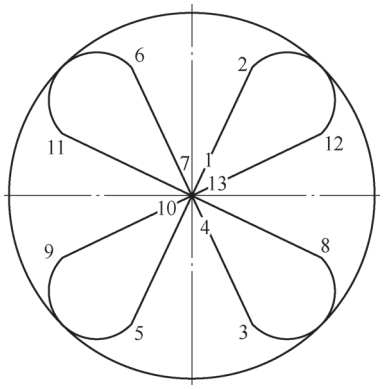


图3　整圆加工轨迹

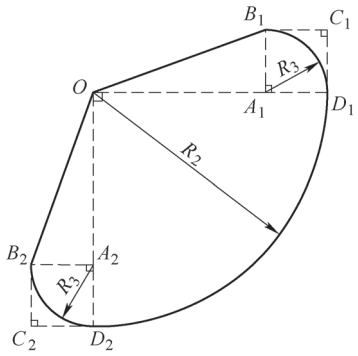


图4　图形分析

系根据实际绕垂直轴在平面内进行旋转。

O点作为工件圆心初始位置，大圆半径$OD_1=OD_2=R_2$，小圆半径$A_1B_1=A_1D_1=A_2B_2=A_2D_2=R_3$，$OA_1=OA_2=R_2-R_3$。

O点的坐标设定为（0，0），则B_1点坐标$X_{B1}=OA_1=R_2-R_3$、$Y_{B1}=A_1B_1=R_3$，即B_1点坐标为（R_2-R_3，R_3）；D_1点坐标$X_{D1}=OD_1=R_2$、$Y_{D1}=0$，即D_1点坐标为（R_2，0）；D_2点坐标$X_{D2}=0$、$Y_{D2}=-OD_2=-R_2$，即D_2点坐标为（0，$-R_2$）；B_2点坐标$X_{B2}=-A_2B_2=-R_3$、$Y_{B2}=-OA_2=-（R_2-R_3）$，即B_2点坐标为（$-R_3$，R_3-R_2）。

铣削圆弧数控程序如下。

```
%_N_L500_SPF; 子程序
;$PATH=/_N_SPF_DIR
G00 G90 X0 Y0; O点起始坐标点
G42 X= R2-R3 Y=R3; 刀具加补偿运行到B1点
G02 X=R2 Y0 CR=R3; 顺时针圆弧切入D1点
X0 Y=-R2 CR=R2; 顺时针运动铣削到D2点
X=-R3 Y=R3-R2 CR=R3; 顺时针圆弧切出B2点
G00 G90 G40 X0 Y0; 取消刀补返回到O点
```

M17

以上可作为子程序调用进行旋转加工，提高结合处的加工质量。进行仿真模拟优化后的结果如图5、图6所示。

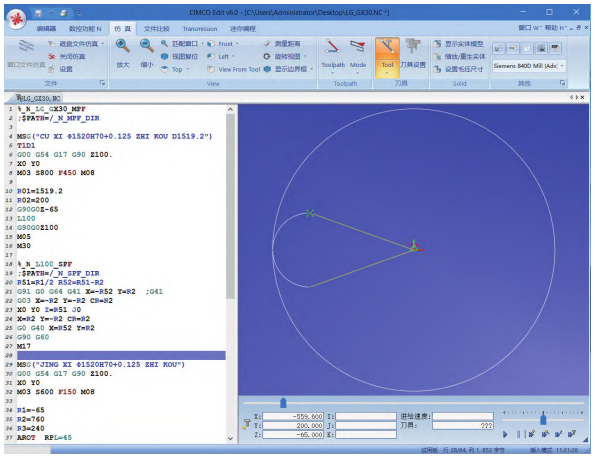


图5　粗铣仿真

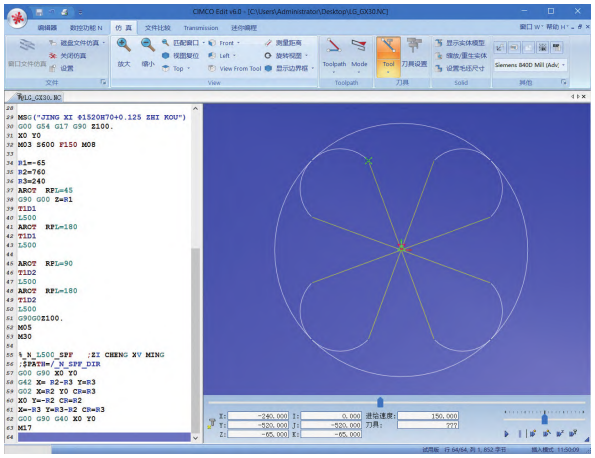


图6　精铣仿真

SIEMENS数控系统中，粗铣程序如下。

%_N_LG_GX30_MPF

;$PATH=/_N_MPF_DIR

MSG(“CU XI Φ1520H70+0.125 ZHI KOU D1519.2”)

T1D1

G00 G54 G17 G90 Z100.

X0 Y0

M03 S800 F450 M08

;圆弧切入切出铣整圆

R01=1519.2; 大圆的直径

R02=200; 切入切出圆弧半径，取值要比刀具半径大，比大圆半径小

G90G0Z-65

L100; 调用子程序

G90G0Z100.

M05

M30

L100子程序如下。

%_N_L100_SPF; 子程序

;$PATH=/_N_SPF_DIR

R51=R1/2 R52=R51-R2

G91 G0 G64 G41 X=-R52 Y=R2; G41直线加入刀具补偿

G03 X=-R2 Y=-R2 CR=R2; 圆弧切入

X0 Y0 I=R51 J0; 铣整圆

X=R2 Y=-R2 CR=R2; 圆弧切出

G0 G40 X=R52 Y=R2; 直线取消刀具补偿

G90 G60

M17

精铣程序如下。

MSG(“JING XI Φ1520H70+0.125 ZHI KOU”)

G00 G54 G17 G90 Z100.

X0 Y0

M03 S600 F150 M08

R1=-65; 内孔圆止口深度

R2=760; 内孔圆半径

R3=240; 圆弧切入半径（根据实际选择切入圆弧半径大小，要保证安全范围，即大于刀具半径，小于内孔圆半径）

AROT　RPL=45; 绕垂直轴在平面内旋转45°（0°～360°）

G90 G00 Z=R1

T1D1; 1号刀位1号刀具补偿

L500; 调用子程序

AROT　RPL=180; 可附加编程零位旋转，即在前一个坐标系基础上进行旋转180°

T1D1; 1号刀位1号刀具补偿

L500; 调用子程序

AROT　RPL=90; 可附加编程零位旋转，即在前一个坐标系基础上进行旋转90°

T1D2; 1号刀位2号刀具补偿

L500; 调用子程序

AROT　RPL=180; 可附加编程零位旋转，即在前一个坐标系基础上进行旋转90°

T1D2; 1号刀位2号刀具补偿

L500; 调用子程序

（下转第68页）

前规避错误及风险，然后再上机完成实物试切验证。

4 应用成果固化

提取粘胶密封堵头类油路孔特征（见图5）编入制造特征库，固化加工方法：①用铣刀划窝1.5倍径深度，作为钻头引导孔。②用短钻头预钻，钻孔深度为总深度的1/3。③用长钻头钻至总深度。④用铣刀铣沉头孔，留余量0.2mm。⑤用铰刀铰沉头孔。⑥用倒角刀铣倒角。

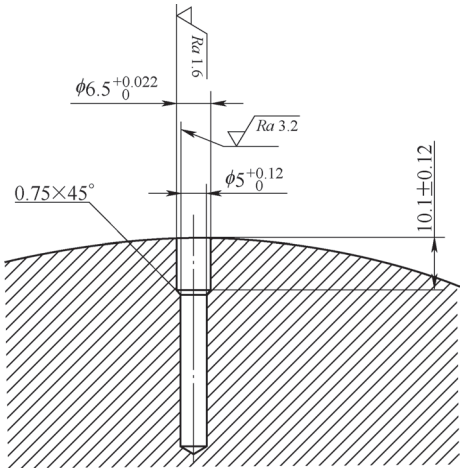


图5 制造特征

提取特征加工方法形成编程模版。基于生产现场设备刀库实物在UG中建立DMU 60FD、DMC 64V和C42U共3台设备刀具库；经过实物试切验证，修改完善了DMU 60FD、DMC 64V和C42U共3台设备的后处理程序；完成一本结构化工艺规程，10道工序的数字化编程及仿真，4套夹具设计。

5 结束语

通过集智型的工艺流程设计-流程评审-流程合理化改进，确定壳体整体工艺流程。改善设计模型工艺性，分段建立机械加工工艺模型，多模块协同进行数字化工艺设计，实现了多人协作多模块并行处理，可推广至壳体高效加工工艺技术应用。

参考文献：

[1] 惠巍，王彦，陶剑，等. 航空制造领域中三维工艺技术的应用[J]. 航空制造技术，2013（13）：43-46.
[2] 曾芬芳，郑志镇. 基于特征的三维工序模型自动生成技术的研究与应用[J]. 制造技术与机床，2022（10）：152-156.
[3] 马伟，孙彦锋. 基于三维模型的数字化工艺建设与实践考虑[J]. 黑龙江科技信息，2016（16）：96-98.

MW 20241027

（上接第63页）

G90G0Z100.

M05

M30

4 加工结果说明

经过不断优化加工数控程序，轮毂主轴孔ϕ1520H7$^{+0.125}_{0}$mm加工完成，经过测量，该轮毂内孔止口*X*、*Y*方向直径公差为0.10mm，未超出公差要求0.125mm，零件加工合格。

5 结束语

本文以某3.0MW风力发电机组轮毂主轴孔ϕ1520H7$^{+0.125}_{0}$mm内孔止口铣削加工为例，介绍了一种降低铣削大直径内孔圆度误差的一种新思路、新方法。并基于*R*参数程序、双刀补，对内孔止口采用多段式铣削方式，进行修正，降低圆度误差，从而保证产品加工质量。同时对解决类似的铣削内、外圆误差问题有很好的借鉴意义。

参考文献：

[1] 李行雨. 5MW风力发电机组变桨轴承性能分析及轮毂结构优化设计[D]. 郑州：河南工业大学，2024.
[2] 沈建峰，虞俊. 数控铣工/加工中心操作工（高级）[M]. 北京：机械工业出版社，2007.
[3] 王佳伟，聂申成，赵素荣. 偏心等距螺旋曲线在大直径内孔铣削加工中的应用[J]. 金属加工（冷加工），2016（S1）：127-130.
[4] 弋博. 加工中心圆度误差的原因分析及调整方法[J]. 金属加工（冷加工），2020（8）：75-77.

MW 20241009