

高精度阶梯轴加工工艺改进及刀具反装技术应用

王运祥

(三一汽车制造有限公司,湖南长沙 410100)

摘要:针对高精度阶梯轴类零件传统加工的工艺复杂、加工效率低的问题,提出一种利用刀具反装技术来改进该类零件机械加工工艺的方法,并对刀具反装技术的基本原理进行了详细的阐述。设计出了详细的车削加工工序,编制了刀具反装工步的数控加工程序,完成了该类阶梯轴零件的精加工,实现了其加工精度和形位公差要求,打破了传统车磨结合的加工方法,有效提高了加工效率,可供后续该类阶梯轴零件的加工借鉴。

关键词:阶梯轴;刀具反装技术;数控加工;加工工艺

中图分类号:TH16 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)01-0065-05

Improvement of High Precision Stepped Shaft Machining Crafts and Application of Tool Reverse Loading Technology

WANG Yunxiang

(Sanyi Automobile Manufacturing Co., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: In view of the complexity of the traditional processing technology of high precision stepped shafts and the low processing efficiency, a method to improve the machining process of the parts by means of tool reverse loading technology is proposed, and the basic principle of tool reverse loading technology is expounded in detail. A high-precision CNC lathe is used to design a detailed turning process based on the principle of tool reverse loading technology, and to compile CNC machining program of tool reverse loading process. The fine finishing of the stepped shaft parts was completed with machining accuracy and in geometric tolerance standard as required. The proposed technology has broken through the traditional processing methods of turning and grinding combination, effectively improves the processing efficiency and provides reference for the subsequent processing of the kind of stepped shaft parts.

Keywords: stepped shaft; tool reverse loading technology; CNC machining; processing technology

0 引言

从数控技术出现以前到数控技术应用的初期,是车削过程中刀具正装方式的一统天下,基本上没有刀具反装方式。刀具反装技术是数控车床发展到一定阶段以后的产物,它是随着数控车床对刀具使用原则的不断变化而发展起来的。这种刀具装夹方式能够较好地解决切屑对刀具稳定性的影响,可有效避免切屑集聚和缠绕,以保证工件的加工精度,同时切削液直接冷却后刀面,有利于提高加工表面质量^[1]。

刀具反装方式为:前刀面向下安装,进给方向及主轴旋转方向均与刀具正装相反。在某些数控车削过程中,刀具反装和刀具正装的同时运用可有效减少工件的装夹次数,提高机械加工的效率,同时更有利于保障工件的形位公差精度^[2]。

1 零件图及加工难点分析

在生产加工过程中,经常会遇到如图1所示的阶梯轴类零件,其两端均有加工精度要求很高的外圆,而且3个高精度外圆的形位公差同轴度要求为 $\phi 0.01\text{ mm}$,加工过程较为复杂。既要保证外圆精度和形位公差要求,又要有效提高生产效率,这是生产过程中必须要解决的问题,也是工艺设计的基本需求。

该零件的材料为40Cr,调质硬度为229 HB~269 HB。从图1可以看出,其结构特点是同一轴线上有多个大小不同的外圆,中间部分外圆半径最大,两端有多个阶梯外圆,且部分外圆加工精度要求较高。其中, $\phi 40_{-0.009}^{0.009}$ 外圆和两处 $\phi 45_{-0.005}^{0.011}$ 外圆的公差均只有0.016 mm,3处外圆的同轴度要求为 $\phi 0.01\text{ mm}$,表面粗糙度要求为0.8,加工难度较大。

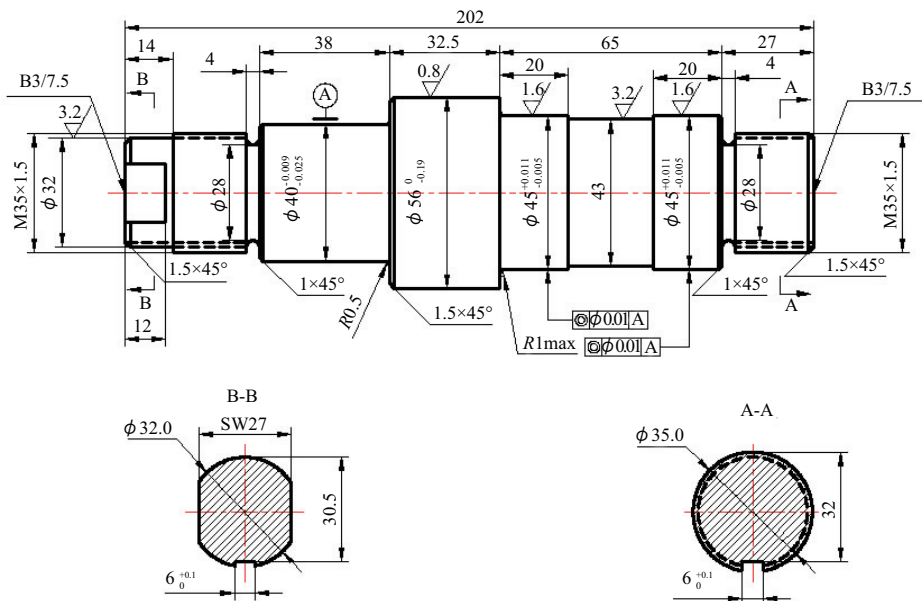


图 1 高精度阶梯轴零件图

2 加工工艺分析

2.1 工艺改进

根据上述零件图及加工难点分析,该零件的主要加工难点有两个:公差 0.016 mm 和同轴度 $\phi 0.01$ mm。按照传统的工艺和设备,通常选用车磨结合的加工方法,即先粗车成形,然后使用磨床进行磨削,以实现加工要求^[3-4]。然而,随着数控车床加工精度的不断提高,上述公差和同轴度要求已经完全可以实现,如德玛吉数控车床,可以实现公差 0.01 mm 以内的高精度加工,并且在一次夹装过程中可以实现同轴度 $\phi 0.01$ mm 的形位公差。

根据实际加工经验,现将该高精度阶梯轴类零件的加工工艺过程进行对比分析,如图 2 所示。

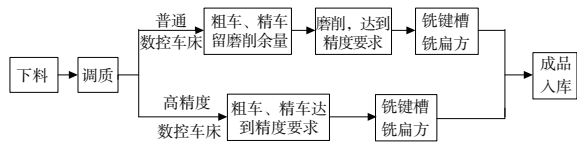


图 2 零件加工工艺过程对比图

由图 2 可以看出,高精度数控车床完全可以在车削工序实现上述零件的加工要求,取代原有的车削加磨削加工方法。对该类阶梯轴零件加工工艺的改进,可有效提高零件的加工效率。

2.2 车削加工方法的确定

根据上述工艺改进分析,选用高精度数控车床进行加工,其外圆精度易于保证,但在车削过程中,如何保证 $\phi 0.01$ mm 的同轴度呢?这是应用高精度车床改进加工工艺必须要解决的问题。

对于数控车床来说,保证同轴度的方法大致有以下

几种一次夹装完成法、同心工装法和车磨结合法。其中一次夹装完成法最为简单实用,但是并不是所有的零件都适用,因为在实际的加工过程中要考虑到刀具与零件表面之间的相互干涉等情况^[5];同心工装法,需要有一定的配合面,使工装和零件之间相互配合,且可能会产生配合误差,适用范围有限^[6];车磨结合法,可以实现较高同轴度的加工,但是其效率较低、耗时长,不利于实际生产^[7]。在实际的生产过程中,因考虑加工效率和成本问题,故选用一次夹装完成法。对于如图 1 所示的阶梯轴来说,要在一次装夹中完成精车工步,又不会使刀具和工件之间发生干涉,刀具反装技术能够很好地解决这一问题。

刀具反装方式仅适合于数控车削,这种方式的刀具装夹与普通车床上的刀具装夹方式相反,前刀面向下安装,其进给方向及主轴旋转方向均与普通车床相反,基本原理如图 3 所示。

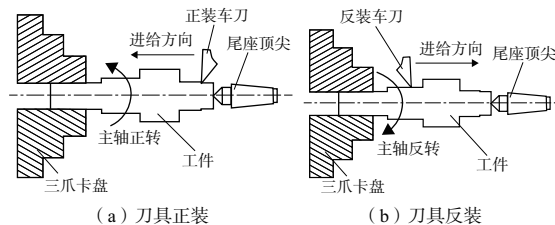


图 3 数控车床刀具装夹原理图

在高精度数控车床上应用刀具反装技术,设计该阶梯轴类零件的精车过程如图 4 所示。在一次夹装过程中,由正装刀具完成阶梯轴右侧部分阶梯外圆的加工,其精车路线如图 4 走刀路线二所示,由反装刀具完成阶梯轴左侧部分阶梯外圆的加工,其精车路线如图 4 走刀路线一所示。这种加工方法有效避免了工件的二次夹装,同时又不会使刀具与工件之间发生干涉,能够很好地保证轴类零件的加工精度及同轴度等形位公差。

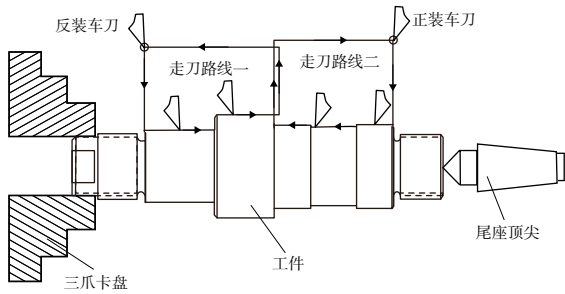


图 4 零件精车过程示意图

3 数控车床刀具反装技术的应用

3.1 车削工序设计

零件毛坯为直径 60 mm、长 220 mm 的棒料,材料 40Cr,调质硬度 229 HB~269 HB。根据图 1 所示的零件图,设计车削工序的加工步骤如表 1 所示。

表 1 车削工序表

工步	单步零件图
1) 夹毛坯外圆,车左端面,打左端顶尖孔	
2) 夹毛坯外圆,顶左端顶尖孔,粗车、精车 φ32 外圆及倒角,车 M35 螺纹,留量精车 φ40、φ56 外圆	
3) 掉头,夹 φ56 外圆,车总长,打右端顶尖孔	
4) 夹 φ32 外圆,顶右端顶尖孔,车右端螺纹 M35,粗车、精车 φ45、φ43 外圆及倒角,反刀精车左端 φ40、φ56 外圆及倒角	

3.2 加工程序编制

德玛吉数控车床 CTX400 Serie2 配置 HEIDENHAIN CNC PILOT 3190 数控系统,运行在 Windows 环境之下,采用“人机对话,图形支持”方式进行工作。编程时既可以通过输入加工材质、零件毛坯形状、零件精加工形状,选定

刀具、设定粗精加工参数等,自动生成刀具路径,也可以手动输入刀具加工路径,易于操作,加工效率高^[8]。本文所涉及的高精度阶梯轴零件,由于其加工过程需要采用刀具反装方法,所以部分加工程序需要手动输入并调试。CTX400 数控车床所配备的 CNC PILOT 3190 数控系统,常用的 G 代码和 M 代码功能如表 2 所示。

表 2 CTX400 常用指令代码表

常用 G 代码		常用 M 代码	
图形描述指令	加工循环指令	刀具模块	
G00 快速定位	G810 轴向粗加工	G54 工件坐标系	M003 主轴顺时针旋转
G01 直线插补	G820 径向粗加工	G59 工件坐标设置	M004 主轴逆时针旋转
G02 顺时针圆弧插补	G860 用切槽刀完成形状加工	G26 主轴最高转速设定	M005 主轴停止
G03 逆时针圆弧插补	G890 精加工	G95 每转进给率 mm/r	M030 程序结束并返回
G25 清根槽	G31 螺纹加工	G96 恒线速度	M108 冷却液接通
G34 标准公制螺纹	G14 退刀模式	G97 恒转速	M109 冷却液断开

CNC PILOT 3190 数控系统的 G 代码和 M 代码种类还有很多,此处由于篇幅限制仅列出了编程所需的部分代码。根据 3.1 车削工序设计,工步 1)~工步 3) 的加工程序加工程序相对简单,且未涉及刀具反装的加工程序,此处不再赘述,本文仅给出了工步 4) 的加工程序。在编制工步 4) 程序时,需要对其零件毛坯形状、零件精加工形状进行描述,其中工步 4) 的零件毛坯形状即为工步 3) 完成后的单步零件图,零件精加工形状即为工步 4) 完成后的单步零件图,如表 1 所示。工步 4) 具体加工程序如下:

```
ROHTEIL [ BLANK ]
(零件毛坯形状描述)
N1 G0 X0 Z0
N2 G1 X60
N3 G1 Z-26
N4 G1 X56.5
N5 G1 Z-124.5
N6 G1 X40.5
N7 G1 Z-162.5
N8 G1 X35
N9 G1 Z-193
FERTIGTEIL [ FINISHED PART ] (零件精加工形状描述)
N10 G0 X0 Z0
N11 G1 X35 B-2
N12 G1 Z-27
N13 G25 H7 I-3.5 K4
R1.5 P0 W90 A0
N14 G34 F1.5
N15 G1 X45 B-1
N16 G1 Z-47
N17 G1 X43 Z-48
N18 G1 Z-71
N19 G1 X45 Z-72
N20 G1 X45 Z-92 B1
N21 G1 X55.9 B1
N22 G1 Z-124.5 B-1.5
N23 G1 X40
N24 G1 Z-162.5 B-1
N25 G1 X35
N26 G1 Z-193
N27 G1 X0
BEARBEITUNG [ MACHINING ] (加工程序)
N28 G54
N29 G26 S2800
N30 G14 Q0
N31 T4(选用粗车刀、粗车右侧外圆)
N32 G96 S180 G95
F0.22 M4
N33 G0 X60 Z3
N34 M108
N35 G1 X56.5
N36 G1 Z-28
N37 G1 X58
N38 G0 Z3
N39 G810 NS12 NE21
P3 I0.4 K0.06
(调用零件精加工描述程序)
```

```
N40 G14 Q0
N41 T6(选用切槽刀,清根槽)
N42 G97 S750 G95 F0.06 M4
N43 G0 X50 Z-28
N44 G860 NS13 NE13 I0 K0
(调用零件精加工描述程序)
N45 G14 Q0
N46 T8(选用精车刀,精车右侧外圆及倒角)
N47 G96 S278 G95 F0.11 M4
N48 G0 X35 Z3
N49 G890 NS12 NE21
(调用零件精加工描述程序)
N50 G14 Q0 M5
N51 T12(选用反装精车刀,反刀精车左侧外圆及倒角)
N52 G96 S280 G95 F0.09 M3
N53 G0 X58 Z-124.51
N54 G1 X40.5
N55 G0 X50 Z-130
N56 G0 Z-164
N57 G0 X42
N58 G1 X38 Z-162.5
N59 G1 X40 Z-161.5
N60 G1 Z-124.5
N61 G1 X53
N62 G1 X55.8 Z-123
N63 G1 Z-91
N64 G14 Q1 M5
N65 T10(选用螺纹刀,车右侧 M35 螺纹)
N66 G97 S1400 M3
N67 G0 X40 Z3
N68 G31 NS12 I0.35
B5 P3 D0
N69 G14 Q0
N70 M109
N71 M30
```

3.3 首件检测

利用上述加工方法,在德玛吉数控车床 CTX400 Serie2 上完成首件试制并进行检测,检测结果完全符合图样要求。由于此零件在首件检测过程中需要检测的尺寸较多,此处仅列举几处关键尺寸的检测结果,如表 3 所示。

表 3 检测结果

检测位置	检测项目	图样要求	测量工具	检测结果	备注
φ40 外圆	外径	$\phi 40_{-0.025}^{-0.009}$	外径千分尺	φ39.982	
中部 φ45 外圆	外径	$\phi 45_{-0.005}^{+0.011}$	外径千分尺	φ45.006	
端部 φ45 外圆	外径	$\phi 45_{-0.005}^{+0.011}$	外径千分尺	φ45.002	
中部 φ45 外圆	同轴度	φ0.01	三坐标测量仪	φ0.007 2	三坐 标法
端部 φ45 外圆	同轴度	φ0.01	三坐标测量仪	φ0.009 0	三坐 标法
φ56 外圆	表面 粗糙度	Ra0.8	电动轮廓仪	Ra0.72	针描法

根据上述首件检测结果,在高精度数控车床上利用刀

具反装技术完成了高精度阶梯轴零件的加工,且该零件各尺寸、形位公差及表面粗糙度要求均满足图样要求。

4 结语

本文对一种高精度阶梯轴零件的加工难点进行了分析,并利用刀具反装技术及高精度数控车床对其加工工艺进行了改进,省略了传统的磨削工序,有效提高了加工效率。同时,对刀具反装技术的基本原理进行了详细的阐述,并根据该原理针对如图1所示的零件图设计出了详细的车削加工工序,编制了刀具反装工步的数控加工程序,完成了该类阶梯轴零件的精加工,可为该类阶梯轴零件的加工工艺改进提供参考。

参考文献:

[1] 冯小东,王新明,康凯,等. 反装刀具车削工艺在镗孔技术中的应用[J]. 产业与科技论坛,2017,16(7):71-72.

- [2] 谭建华. 轴类零件数控车削加工工艺研究[J]. 现代制造技术与装备,2017(1):148,151.
- [3] 黄兴焯,韩佳颖,王延广. 超声磨削加工机理与装置的研究进展[J]. 机械设计,2019,36(增刊1):81-83.
- [4] 王洋,孟庆国,杨喆,等. 提高轴类零件表面粗糙度的方法探讨[J]. 内燃机与配件,2020(8):116-117.
- [5] 邹军. 空心车轴加工工艺研究[J]. 机车车辆工艺,2020(2):19-20.
- [6] 窦武阳,赵则祥,曹秀成,等. 基于径向圆跳动检测的转子弹性管组件同轴度误差分析[J]. 机械设计与研究,2020,36(2):199-203.
- [7] 尉渊,丁大伟,赵正彩,等. 阶梯轴类零件激光在机测量误差补偿研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(1):23-25,51.
- [8] 姚明钊. 数控车圆弧螺纹车削加工方法研究[J]. 机械研究与应用,2019,32(4):178-180.

收稿日期:2020-07-10

(上接第44页)

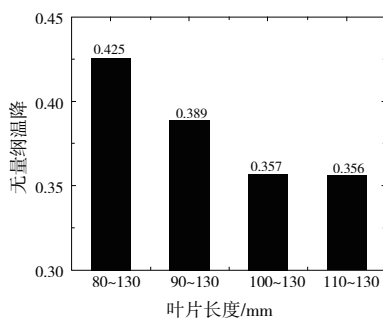


图10 不同叶片长度无量纲温降变化

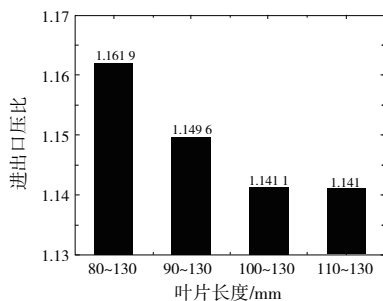


图11 不同叶片长度压比变化

3 结语

本文通过对空气预旋系统涡轮盘腔进行数值模拟,对其内部结构采用添加叶片的方式进行优化设计,并进一步研究了叶型设计、叶片长度、叶片数对冷却气流的温降增压效果的影响,得出了以下结论:

1) 涡轮盘腔的作用机理是通过导流叶片的导流增压效果使得盘腔内部气流的周向速度升高,从而使得盘腔旋转系下气流的相对速度下降,达到降低相对总温的效果,同时可提高气流的压比。优化效果的主要影响因素是气流旋

流比,全局流场旋流比均接近1时,优化效果最为明显。

2) 叶型设计对涡轮盘腔优化效果有着显著影响。在不同工况下,布置叶片均能对温降增压效果产生收益,其中弯扭叶型带来的收益最高。

3) 叶片长度对温降增压效果影响较大,加长叶片长度能有效增强对冷气流的导流增压效果,但随叶片加长而带来的收益会逐渐降低。

参考文献:

- [1] KILIÇ M. Computation of flow and heat transfer in rotating cavities with peripheral flow of cooling air[J]. Annals of the New York Academy of Sciences,2001,934:513-520.
- [2] SNOWSILL G D, YOUNG C. The application of CFD to underpin the design of gas turbine pre-swirl systems[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air, Barcelona, Spain; 2006:1393-1401.
- [3] 肖英雄,张品. 径向进气装置内孔板流动规律研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(4):57-60,77.
- [4] 张凯,王锁芳,侯晓亭,等. 盘腔进气位置对径向预旋系统的影响[J]. 航空动力学报,2020,35(3):502-509.
- [5] 胡伟学,王锁芳,毛莎莎. 预旋喷嘴径向角度对预旋特性影响的数值研究[J]. 航空动力学报,2019,34(1):84-91.
- [6] 张建超,王锁芳. 带导流片的径向预旋系统流动结构数值研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2014,28(1):43-48.
- [7] EL - OUN Z B, OWEN J M. Pre - swirl blade - cooling effectiveness in an adiabatic rotor - stator system [C]// Proceedings of ASME 1988 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Amsterdam, The Netherlands. 2015.
- [8] 吴衡,刘高文,冯青,等. 叶轮对预旋系统影响的数值研究[J]. 推进技术,2016,37(1):57-64.
- [9] 张建超. 冷气预旋结构的温降与流阻特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.

收稿日期:2020-11-05