

基于响应曲面法的深孔加工圆度误差分析

刘晋丽

西安航空职业技术学院

摘要: 圆度误差是衡量深孔加工质量的重要标准,为了提升加工质量,通过分析加工参数对圆度的影响进行试验研究,并根据响应曲面法,拟合圆度误差与各因素的关系方程,建立合理的预测模型,确定最优加工参数组合。在试验结论的基础上,借助液压机械无级变速器改进机床,使机床处于最佳工作状态,为枪钻加工圆度的研究和改进提供新思路。

关键词: 圆度误差;枪钻;响应曲面;液压机械无级变速

中图分类号: TG801;TH17

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.05.030

Roundness Error Analysis and Improvement Measures of Deep Hole Machining Based on Response Surface Method

Liu Jinli

Abstract: Roundness error is an important criterion to measure the quality of deep hole machining. In order to improve the processing quality and optimize the processing parameters, the influence of processing parameters on the roundness is studied experimentally, and the roundness error and various factors are fitted according to the response surface method. Relational equations, establishing a reasonable prediction model, and determine the optimal combination of processing parameters. Based on the conclusion of the test, the machine tool can be used to improve the machine tool with the hydraulic mechanical continuously variable transmission, which is the best working condition for the machine tool. Providing a new ideas for the research and improvement of the roundness of gun drilling.

Keywords: roundness error;gun-drill;response surface;hydro-mechanical variable transmission

1 引言

深孔加工技术是装配制造业中一项重要加工技术^[1],特指长径比大于5的孔类零件加工方法。由于深孔零件半封闭、大长径比的特点,容易导致钻杆在加工时不规则振动且极难检测,极大地限制了加工质量改善。在装配制造业飞速发展的今天,深孔加工技术逐渐成为加工瓶颈。圆度是衡量深孔加工零件质量的重要指标,表示加工孔轮廓与理想孔轮廓之间的误差,圆度质量影响轴类零件的配合,也影响后续加工效率。

现有抑制钻杆振动的方法主要有:①通过增加额外的减振装置达到抑制振动的目的,比如文献[2]使用磁流变液在钻杆振动时降低振动幅度;②探究加工参数,比如钻杆转速、进给速度等与圆度之间的关系,通过合理的参数组合优化圆度形貌。文献[3]对多种加工参数分别进行研究,得出了最佳参数选择。但是,深孔加工过程的复杂性导致各加工参数之间存在着联系,本文以响应曲面法为基础,对深孔加工圆度误差进行试验研究,在试验结果的

基础上对枪钻机床进行改进,设计无级变速器,提升圆度形貌。

2 基于响应曲面法的圆度误差试验

响应曲面法是一种优化随机试验过程的方法,主要通过收集试验数据,寻求各个试验因素间的关系,拟合出能反映实际情况的最佳回归方程,建立复杂的多维空间曲面^[4]。

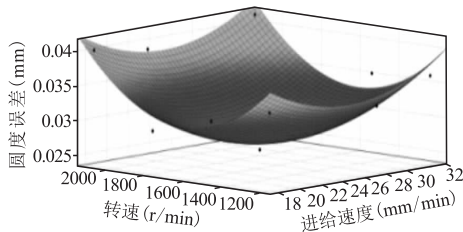
试验采用单因素法,分别测得不同加工参数条件下的圆度误差,再通过响应曲面法对试验数据进行分析。使用DH-1300枪钻深孔加工机床进行试验,机床主轴最高转速6000r/min,进给速度范围1-180mm/min,满足试验要求。枪钻 $\phi 11 \times 200\text{mm}$,试验材料45钢棒料;试验变量为钻杆转速和进给速度,分别测得转速为1500r/min、1800r/min、2100r/min和2400r/min,进给速度为20mm/min、25mm/min、30mm/min和35mm/min时的圆度误差。测量仪器为三坐标测量仪,对固定孔深进行测量。测量数据见表1。

表 1 试验数据

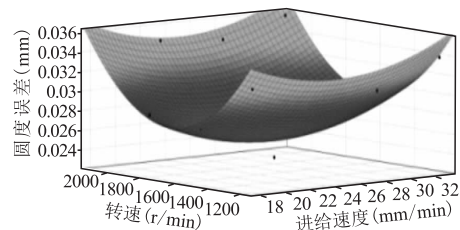
序号	进给速度 (mm/min)	转速 (r/min)	加工深度 (mm)	圆度误差 (mm)
1	20	1200	60	0.0327
2	20	1500	90	0.0268
3	20	1800	120	0.0229
4	20	2100	150	0.0301
5	25	1200	90	0.0315
6	25	1500	60	0.0265
7	25	1800	150	0.0207
8	25	2100	120	0.0317
9	30	1200	120	0.0287
10	30	1500	150	0.0203
11	30	1800	60	0.0227
12	30	2100	90	0.0317
13	35	1200	150	0.0319
14	35	1500	120	0.0279
15	35	1800	90	0.0274
16	35	2100	60	0.0357

通过 MATLAB 软件对试验数据进行最小二乘法拟合,可以得到转速、进给速度对于圆度误差的拟合方程为^[5]

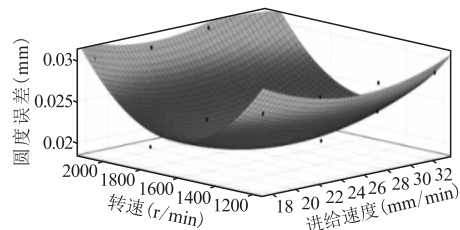
$$y = 0 + 0.0055x_{\text{进给}} - 2.1175 \times 10^{-5}x_{\text{转速}} + 0.0026x_{\text{孔深}} - 8.4196 \times 10^{-6}x_{\text{进给}}x_{\text{进给}} - 1.9693 \times 10^{-6}x_{\text{转速}}x_{\text{孔深}} - 1.27.2 \times 10^{-4}x_{\text{进给}}x_{\text{孔深}} + 7.9177 \times 10^{-8}x_{\text{进给}}x_{\text{转速}}x_{\text{孔深}} + 1.6089 \times 10^{-4}x_{\text{进给}}^2 + 7.0525 \times 10^{-8}x_{\text{转速}}^2 + 2.136 \times 10^{-6}x_{\text{孔深}}^2 \quad (1)$$



(a) 孔深 5mm 处



(b) 孔深 60mm 处



(c) 孔深 150mm 处

图 1 圆度误差响应曲面分析

计算得到回归方程的相关系数 R^2 为 0.94, $P = 0.0052$,说明回归方程拟合良好。因此可以得出在不同加工深度时,钻杆转速与进给速度产生圆度形貌的响应曲面分析见图 1^[6]。由图可知,圆度误差在转速 1800r/min、进给速度 30mm/min 处附近达到最小值,即深孔加工最优的转速和进给速度分别为 1800r/min 和 30mm/min。由于机床档位的原因,转速和进给速度无法到达最优组合,因此,将液压机械无级变速器应用于深孔加工机床,可以在进给速度和转速范围内到达任意一点,以获得最佳的圆度形貌。

3 深孔加工机床改进方法

如图 2 所示,对 DH-1300 深孔加工机床进行改进,该机床主要由工件装夹、排屑装置、支撑装置、钻杆、输油器和驱动装置组成^[7]。

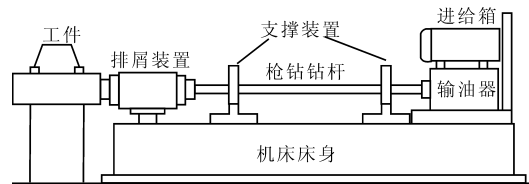


图 2 枪钻深孔加工机床结构

采用工件静止不动、钻杆进给并且转动的加工方式。从图 2 可以看出,位于钻杆末端的驱动装置为枪钻提供转动和进给,由于只能对钻杆转速进行固定档位的变换,限制了参数优化的可能性,所以文中在驱动装置与钻杆之间增加机械液压无级变速器,从而实现钻杆转速无级变速的目的。

本文采用液压机械无级变速器(见图 3)对枪钻深孔加工机床进行改进。变速调节由闭式容积调速器和机械变速箱组成,闭式容积调速器分为变量液压泵和定量液压泵两部分,机械变速箱由定轴轮系和行星排机构组成^[8]。

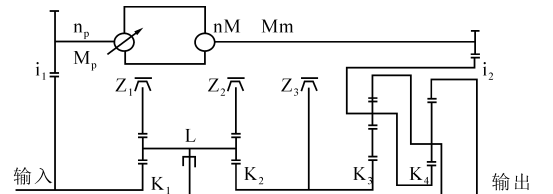


图 3 液压机械无级变速器

图 3 中, K_1 、 K_2 共同组成了系统换挡机构; K_3 、 K_4 是系统中液压力流和机械动力流的汇流部分; Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为制动器, L 为离合器, 将其以不同的组合、分离方式并配合液压变量泵系数 ϵ , 可无级变速。闭式容积调速系统的变量系数 ϵ 为

$$\varepsilon = \frac{q_{\text{变}}}{q_{\text{变max}}} \quad (2)$$

式中, $q_{\text{变}}$ 为泵的排量; $q_{\text{变max}}$ 为泵的最大排量。液压回路的调速范围 D 为 $0 - q_{\text{变max}}/q_{\text{变min}}$ 。

当变量泵和定量马达的调节参数达到最大值时, 其变量马达 $n_{\text{变}}$ 和定量泵 $n_{\text{定}}$ 之间的转速比为传动比 i 表示为

$$i = \frac{n_{\text{变}}}{n_{\text{定}}} = \frac{q_{\text{变}}}{q_{\text{定}}} \eta_{\text{变}} \eta_{\text{定}} \quad (3)$$

式中, $q_{\text{定}}$ 为定量马达的排量; $\eta_{\text{变}}$ 、 $\eta_{\text{定}}$ 分别表示变量泵和定量马达的实际容量与理想容量之间的比值。

液压机械无级变速器一般以纯液压模式开始运行。在此阶段, 图3中 Z_3 制动, K_1 、 K_2 停止工作, K_3 作为机构的液压功率流输入, K_4 的齿圈作为功率的输出流。当液压泵变量系数 ε 从 -1 增加到 1 时, 系统输出的转速逐渐上升, 其表达式为

$$n_{\text{out}} = \frac{k_3 k_4 - k_4 - 1}{k_3 k_4 i_1 i_2} n_i \eta_{\text{变}} \eta_{\text{定}} \varepsilon \quad (4)$$

随后系统进入液压机械 F_{hm2} 阶段。此时, Z_1 制动, 离合器接合, 行星轮系 K_1 中的太阳轮是系统机械流的输入部分, K_4 为机械流和液压流的汇流部分。当液压泵变量系数 ε 从 -1 增加到 1 时, 系统输出的转速逐渐上升, 其表达式为

$$n_{\text{out}} = \frac{1 + k_4}{(1 + k_1) k_4} n_i - \frac{1}{k_4 i_1 i_2} n_i \eta_{\text{定}} \eta_{\text{变}} \varepsilon \quad (5)$$

最后系统进入液压机械 F_{hm3} 阶段。此时, Z_1 、 Z_2 制动, 所有齿轮结构均处于工作状态。当液压泵变量系数 ε 从 -1 增加到 1 时, 系统的输出转速为

$$n_{\text{out}} = \frac{(1 + k_2)(1 + k_4)}{k_3 k_4 (1 + k_1)} n_i + \frac{(k_3 k_4 - k_4 - 1)}{k_3 k_4 i_1 i_2} n_i \eta_{\text{变}} \eta_{\text{定}} \varepsilon \quad (6)$$

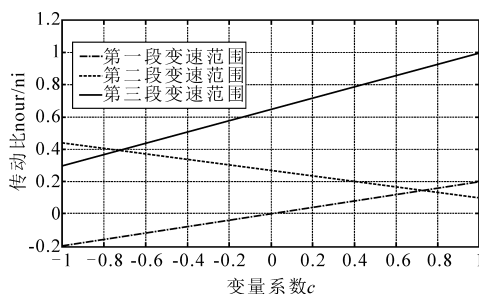


图4 液压机械无级变速器的速度特性

根据以上分析可以得到液压机械无级变速器的速度变化特性见图4。可见, 在整个变速过程中, 传动比范围为 $-0.2 \sim 1.2$, 且在每段内均为连续线性变化, 说明变速器可以在各档位间线性变化, 变速机构在每一个变速段的末尾都会与下一变速段的起点相交, 速度在各段之间逐渐攀升。因此, 液压机械无

级变速器不同段之间的平稳变换的条件是在变换前后有相同的速度。

4 结语

(1) 钻杆转速和孔深一定时, 圆度误差随进给速度的增加先增大后减小, 在 $28\text{mm}/\text{min}$ 时达到最小值; 进给速度一定时, 圆度误差随着转速的增加先增大后减小, 在 $1800\text{mm}/\text{r}$ 达到最小。

(2) 通过响应曲面法对试验数据进行分析, 获得圆度误差与进给速度和转速的关系公式, 并验证了可行性。使用关系公式拟合出响应曲面, 确定最佳的加工参数范围。

(3) 由于最优的转速与进给速度无法与枪钻机床已有的转速和进给速度相对应, 因此使用液压机械无级变速器对枪钻机床进行改进, 经过计算验证, 液压机械无级变速器可以在速度范围内进行无级变速, 达到最优的参数要求。

参考文献

- [1] 王峻. 现代深孔加工技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [2] 段晓奎. 深孔加工颤振分析及抑振方法的研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [3] 梁浩文. 枪钻加工工艺对加工质量影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [4] 刘牧, 杨茂奎. 基于响应曲面法的表面粗糙度预测模型研究[J]. 精密制造与自动化, 2006(7): 87-90.
- [5] 王燕芹, 徐莉, 曹福亮, 等. 响应曲面法优化匀浆提取银杏叶原花青素工艺[J]. 食品科学, 2012(22): 12-16.
- [6] 陈淑琴. 精密枪钻深孔加工质量的数值解析及试验研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [7] Deng C S, Chin J H. Roundness errors in BTA drilling and a model of waviness and lobing caused by resonant forced vibrations of its long drill shaft[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2004, 126(3): 524-534.
- [8] 郑宏宇. 工程车辆液压机械无级变速系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.

作者: 刘晋丽, 硕士, 助教, 西安航空职业技术学院汽车工程学院, 710089 西安市

Author: Liu Jinli, Master, Assistant, Automobile Engineering Institute, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China