

基于回归分析的卷制轴套圆度精度模拟结果评价^{*}

焦明华 于军涛 俞建卫 解挺 刘 ■

【摘要】 针对卷制轴套圆度精度分析问题,提出了采用回归分析方法解决轴套卷制后的形状精度评价,得出了粉末层厚度和模具间隙是影响轴套形状精度的主要因素,并通过具体实例做了对比试验,理论模拟结果与实际结果相差为0.025~0.057 mm,基本保持一致。

关键词: 卷制轴套 圆度 误差分析 回归分析 模拟

中图分类号: TH161⁺.5 **文献标识码:** A

Analysis on Regression Simulated Roundness of Wrapped Bearing

Jiao Minghua Yu Juntao Yu Jianwei Xie Ting Liu Kun
(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

Aimed at the roundness evaluation, a regression analysis method evaluating the shape accuracy of the wrapped bearings was proposed. The analysis shows that the main influence parameters on the shape accuracy are thickness of powder and model clearance. Finally, the comparison test was carried out by a concrete example. The simulated results of the roundness are about consistent with the actual measurements and their discrepancy is only 0.025~0.057 mm.

Key words Wrapped bearing, Roundness, Error analysis, Regression analysis, Simulation

引言

双金属轴套由于生产成本低、含油自润滑性能良好、承载能力高和使用温度宽等突出特点,特别是近几年来无铅环保型自润滑双金属材料的研发,使其应用越来越广泛^[1]。

我国双金属轴套生产普遍存在的问题是轴套产品精度得不到有效控制和提高^[2]。近年来开始运用有限元模拟方法对卷制轴套成形过程及其影响因素进行分析,为解决卷制轴套制造精度问题提供了便捷有效的研究途径^[3]。但目前这方面的研究主要针对卷制轴套的开口间隙与回弹问题^[4~5],对于数值模拟状态下如何有效分析轴套的成形精度,尤其是对轴套的形状误差分析并没有提出合适的评价

标准。关于板材成形的数值模拟研究中,主要工作集中在尺寸精度控制的研究方面^[6],加之产品形状的复杂性、多样性,因此对于形状精度控制方面的研究较少。考虑卷制轴套形状易于表征的特点,本文采用统计理论中的回归分析方法^[7],进行模拟卷制轴套圆度精度分析和加工工艺的评价,探讨各种加工工艺方法和加工参量对轴套精度的影响程度。

1 圆度表征的模型建立

轴套作为支承零件,通常采用外圈固定方式,据此在 MSC. Marc 高级非线性有限元分析软件^[8]中建立双金属轴套工作的模拟模型。双层轴套的外径固定时,表征内径形状误差的数值模型,可在笛卡儿坐标系中建模求解,如图 1 所示。

收稿日期: 2007-06-08

^{*} 合肥工业大学创新群体(摩擦学及摩擦学设计)资助项目(项目编号:102-037023)

焦明华 合肥工业大学机械与汽车工程学院 副教授, 230009 合肥市

于军涛 合肥工业大学机械与汽车工程学院 硕士生

俞建卫 合肥工业大学机械与汽车工程学院 副教授

解挺 合肥工业大学机械与汽车工程学院 教授 博士

刘 ■ 合肥工业大学机械与汽车工程学院 教授 博士生导师

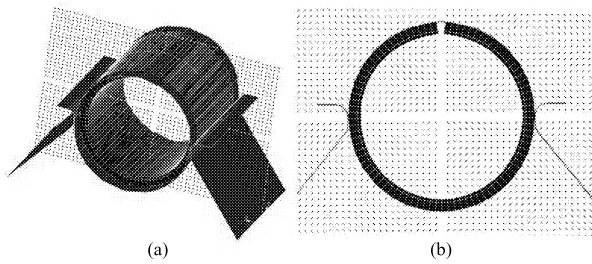


图1 工作状态模拟模型

Fig.1 Simulation model under working

(a) 工作状态模拟的三维描述 (b) 工作状态模拟的二维描述

按照双金属材料模拟模型建立理论^[9], 给定轴套的理论尺寸为内圆半径 $r_1 = 13$ mm, 外圆半径 $r_2 = 15$ mm, 板材厚度为 2 mm, 外径固定, 内径自由; 其中各层的材料参数为: 钢背弹性模量 $E = 200$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.28$; 铜合金层弹性模量 $E = 60$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.3$, 板厚 $0.3 \sim 0.7$ mm。钢背材料采用 R. von Mises 屈服准则, 铜合金粉末烧结材料选择 Shima 屈服模型。

在本例中, 考虑到模拟后模型曲线的大致走势, 采用椭圆进行回归拟合, 并按照以下步骤进行精度分析:

(1) 根据工作状态的要求, 在 MSC. Marc 中建立模型进行数值模拟。然后在模拟状态下提取轴套工作状态下的各节点坐标值 (x, y) 。

(2) 对该处提取的坐标进行回归分析, 采用椭圆方程进行曲线拟合, 得出拟合曲线 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$; 数据处理过程在 Excel 中建立。

如图 2 所示, 回归分析的计算在 Excel 中大致分为 3 个分析过程: ① 在数据采样区, 根据节点变形后的坐标, 提取圆度误差分析状态下的 x, y 值。

② 在数据分析区, 基于采样后的坐标值, 利用回归

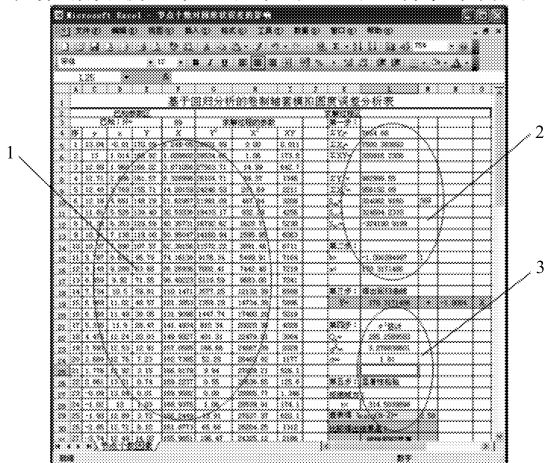


图2 基于 Excel 的回归分析过程

Fig.2 Process of regression based on Excel

1. 数据采样区 2. 数据分析区 3. 数值评价区

分析的理论, 得出合适的拟合曲线。③ 在数值评价区, 将回归分析得出的曲线方程, 进行显著性检验, 从而确定回归曲线的合理性、准确性。

(3) 根据拟合后的曲线方程, 进一步分析圆度误差。采用半径的平均值 $r = \frac{a+b}{2}$ 与理论值 $r_1 = 13$ mm 做比较, 从而确定各个影响因素下的圆度误差 $\Delta = |r - r_1|$ 。

(4) 将所得到的不同加工条件下的圆度误差值进行比较分析, 得出加工因素对轴套精度的影响情况, 并通过加工次数的修正优化, 最后得出最优的加工方法, 从而改进轴套的加工工艺, 最终达到提高轴套精度的目的。

2 参数选择对圆形状误差的影响

2.1 粉末冶金层厚度对圈圆精度的影响

在工业生产中, 双金属轴套粉末冶金层厚度一般为 $0.3 \sim 0.7$ mm^[10]。研究表明粉末冶金层厚度对于板材圈圆性能的影响比较大。在不同的厚度下, 双金属轴套卷制后的精度也不相同。在粉末冶金层厚度为 $0.3 \sim 0.7$ mm, 处于相同模具间隙时的圆度误差分析结果如表 1 所示。

表1 粉末冶金层厚度对圆度误差的影响

Tab.1 Influence of the powder layer thickness on the roundness

mm				
粉末冶金层厚度	a	b	(a+b)/2	Δ
0.3	13.082 4	13.066 6	13.074 5	0.074 5
0.4	13.376 6	13.027 0	13.201 8	0.201 8
0.5	13.079 9	13.032 3	13.056 1	0.056 1
0.6	13.178 2	13.048 2	13.113 2	0.113 2
0.7	13.108 8	13.054 3	13.081 6	0.081 6

从表 1 中可以看出, 0.5 mm 的粉末层厚度和参考值比较接近, 这个结果对于优化板材制造工艺参数, 继而提高轴套卷制加工精度具有重要的参考作用。因此在实际工业生产中, 考虑到采用的铜合金层原料成本经济性和综合性能因素, 粉末冶金层厚度应取为 0.5 mm。

2.2 模具间隙对圈圆精度的影响

模拟分析表明, 模具间隙对圈圆精度有明显的影响。实际上, 模具间隙不仅会影响到回弹, 还会直接影响到轴套的成形质量, 造成精度的变化。模具间隙过小会出现板料拉裂、表面划痕等现象, 间隙过大则会产生起皱、翘曲, 所以选择合适的模具间隙很关键。在传统的经验公式中, 模具间隙选取是根据板材厚度变化的, 一般情况下凹凸模之间的间隙在

t 到 $1.3t$ 之间(t 为板材厚度)^[11]。表 2 为板材分别在间隙取值每隔 $0.05t$ 的情况下,铜合金层厚度为 0.5 mm 时,轴套在模拟状态下的圆度误差分析情况。

表 2 模具间隙对圆度误差的影响

模具间隙	a	b	$(a+b)/2$	Δ
2.0	13.126 7	13.084 2	13.105 5	0.105 5
2.1	13.079 9	13.032 3	13.056 1	0.056 1
2.2	13.403 1	13.126 7	13.264 9	0.264 9
2.3	13.238 7	13.237 9	13.238 3	0.238 3
2.4	13.249 6	13.241 4	13.245 5	0.245 5
2.5	13.281 1	13.242 4	13.261 8	0.261 8
2.6	13.318 3	13.273 4	13.295 9	0.295 9

从表 2 中可以看到,模具间隙对轴套的圆度误差有重要影响,对于轴套的加工质量起着很重要的作用。从模拟的结果可以看出,模具间隙为 $1.05t$ 时,圆度误差值比较小,能够近似地反映轴套成形过程。

3 对比试验

在数值模拟的基础上,采用优化后的加工参数,进行了轴套卷制试验。试验条件:加工轴套的尺寸参数 $r_1 = 13\text{ mm}$, $r_2 = 15\text{ mm}$,板材厚度为 2 mm ,粉末冶金层厚度为 0.5 mm ,加工间隙为 $1.00t \sim 1.30t$ 。将卷制后的轴套在外圆定位,内径自由状

态下进行尺寸检测,测出内径最大和最小值,算出 Δ ,并与数值模拟结果进行对比,如图 3 所示。由图 3 可以看出,实际加工过程中,模具间隙对轴套的加工精度和数值模拟计算中的影响情况相符合,并且在 $1.05t$ 时加工精度最好。

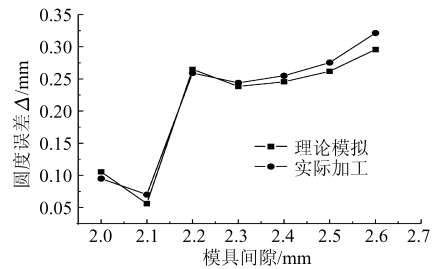


图 3 理论模拟与实际加工结果比较曲线

Fig. 3 Comparison of the simulated results and the measurements of the actual products

4 结论

(1) 采用数理统计中的回归分析方法可有效地对轴套的数值模拟结果做出评价。

(2) 粉末冶金层厚度和模具间隙对于精度的影响最显著。在实际的生产过程中应当综合这两方面的因素来选择合适的参数。在本文的研究条件下,模具间隙取 $1.05t$ 最为合适。至于铜合金粉末层,考虑到生产的经济性,可取 0.5 mm 以内的厚度。

(3) 模具间隙对轴套的精度影响情况和数值模拟分析的结果基本符合,在加工间隙为 $1.05t$ 的情况下,轴套的加工精度最好。

参 考 文 献

- 刘如铁,李溪滨,程时刚.金属基固体自润滑材料的研究概况[J].粉末冶金工业,2001,11(3):51~56.
Liu Rutie, Li Xibin, Cheng Shigang. General situation of some metal-matrix solid self-lubricating material[J]. Powder Metallurgy Industry, 2001, 11(3): 51~56. (in Chinese)
- 赵叶锋,陈靖芯,陆国民. U形件弯曲成形中回弹的数值模拟研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2005(2): 42~45.
Zhao Yefeng, Chen Jingxin, Lu Guomin. Numerical simulation of spring back in bend forming U-shaped parts[J]. Tractor & Farm Transporter, 2005(2): 42~45. (in Chinese)
- 解挺,陈雪辉,焦明华,等.基于 DYNAFORM 的自润滑轴套的卷制成形的数值模拟[J]. 轴承, 2005(12): 8~12.
Xie Ting, Chen Xuehui, Jiao Minghua, et al. Numerical simulation on wrapping of self-lubrication bearing bush based on DYNAFORM [J]. Bearing, 2005(12): 8~12. (in Chinese)
- 焦明华,陈雪辉,俞建卫,等.基于有限元法卷制轴套成形模拟中材料模型分析[J]. 锻压技术, 2006, 31(4): 86~90.
Jiao Minghua, Chen Xuehui, Yu Jianwei, et al. Analysis of material models used for the wrapped forming simulation of bearing bushes based on finite element method[J]. Forging & Stamping Technology, 2006, 31(4): 86~90. (in Chinese)
- Li K P, Carden W P, Wagoner R H. Simulation of springback [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(1): 103~122.
- Lan Fengchong, Chen Jiqing, Yu Xue. Springback simulation and analysis in U-type Sheet metal forming processes[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11(5): 78~83.
- 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1986.
- 陈火红,于军泉,席源山. MSC. Marc/Mentat2003 基础与应用实例[M]. 北京:科学出版社, 2004.

同时仿真结果也验证了PSCVT设计参数优化的合理性,功率分流式无级变速器无级变速挡速比调节范围的增加以及速比的连续变化,改善了发动机的运行工况,使得发动机平均工作效率得到提高,整车燃油消耗率得以降低。

5 结论

(1) 提出了以发动机前置前驱经济型轿车为应用对象,并适用于其他需要以无级变速方式传递动力场合的功率分流式无级变速器方案,采用虚拟样机技术对其进行了三维建模、分析和优化。

(2) 建立了设计参数与变速器性能的定量关

系,并对主要设计参数进行了优化计算。结果表明,分段式无级调速提高了变速器无级调速的速比范围;通过设计参数的优化保证了流经无级变速单元的最大功率不超过变速器传递总功率的50%,相应提高了变速器无级变速的效率和无级变速单元的使用寿命。

(3) 建立了变速器的数学模型并开发了相应模块,将其嵌入到了整车基本性能仿真软件ADVISOR中,通过仿真计算,验证了变速器设计参数的合理性,同时仿真结果表明,装备PSCVT后,整车的燃油经济性得到了较大的提高。

参 考 文 献

- 1 常思勤,张兰春. 功率分流式无级变速器: 中国,20070033743.4[P]. 2007-10-20.
- 2 常思勤. 汽车动力装置[M]. 北京: 机械工业出版社,2006.
- 3 魏英俊,常思勤,王蜀. 新型车用功率分流式自动变速器的研究[J]. 中国机械工程,2004,15(22): 2 055~2 058.
- 4 徐立友,周志立,张明柱,等. 拖拉机液力机械无级变速器设计[J]. 农业机械学报,2006,37(7): 5~8.
- 5 Fox A J. Design and analysis of a modified power-split continuously variable transmission[D]. West Virginia University, West Virginia, 2003.
- 6 Gomez M M. A continuously variable power-split transmission in a hybrid-electric sport utility vehicle[D]. West Virginia University, West Virginia,2003.

(上接第 203 页)

- 9 焦明华,马峰,马少波,等. 双金属复合材料弯曲成形有限元模拟的材料模型研究[J]. 粉末冶金工业,2007,17(1): 38~42.
Jiao Minghua, Ma Feng, Ma Shaobo, et al. Research of material model for finite element simulation of bimetal wrap-forming[J]. Powder Metallurgy Industry,2007,17(1):38~42. (in Chinese)
- 10 陈雪辉. 轴套卷制成形有限元仿真技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学,2006.
Chen Xuehui. Research on the forming simulation for wrapping the bearing bushes by finite element method [D]. Hefei: Hefei Univ. of Technology,2006. (in Chinese)
- 11 马峰. 双金属轴套圈圆成形影响因素的有限元模拟研究[D]. 合肥: 合肥工业大学,2007.
Ma Feng. Research on the influence factors of the forming of wrapping bimetal bushes by finite element simulation [D]. Hefei: Hefei Univ. of Technology,2007. (in Chinese)