

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 40



曲轴非圆磨削轨迹控制 关键技术研究

- 作者：吴钢华
- 专业：机械制造及其自动化
- 导师：方明伦 何永义



6643/219

上海大学出版社

001289213

2006年上海大学博士学位论文 40



曲轴非圆磨削轨迹控制 关键技术研究

- 作者：吴钢华
- 专业：机械制造及其自动化
- 导师：劳明伦 何永义

2006年上海大学博士学位论文

贵阳学院图书馆



GYXY1289213

EL928S100

图书在版编目(CIP)数据

2006 年上海大学博士学位论文. 第 1 辑/博士学位论文
编辑部编. —上海: 上海大学出版社, 2009. 12

ISBN 978 - 7 - 81118 - 511 - 9

I. 2... II. 博... III. 博士—学位论文—汇编—上海市—
2006 IV. G643.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 162521 号

2006 年上海大学博士学位论文

——第 1 辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人: 姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890 × 1240 1/32 印张 264.75 字数 7 376 千

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—400

ISBN 978 - 7 - 81118 - 511 - 9/G · 513 定价: 1000.00 元(50 册)

Shanghai University Doctoral Dissertation (2006)

Research on the key technique on Noncircular Crankshaft Grinding

Candidate: Wu Ganghua

Major: Machinery Manufacture and Automation

Supervisor: Fang Minglun, He Yongyi

Shanghai University Press

• Shanghai •

答辩委员会 上海大学 的评语

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

- | | | |
|---------|--------------------|--------|
| 主任: 金 焯 | 教授, 上海交通大学 | 200030 |
| 委员: 杨建国 | 教授, 东华大学 | 200052 |
| 高敦嶽 | 教授, 华东理工大学 | 200237 |
| 顾长庚 | 教授级高工, 上海科技生产力促进中心 | 200092 |
| 林财兴 | 教授, 上海大学 | 200072 |
| 导师: 方明伦 | 教授, 上海大学 | 200072 |
| 何永义 | 研究员, 上海大学 | 200072 |

学大工上

合价人商,查审员委村全会员委粮答登文分本

评阅人名单:

- | | | |
|-----|------------|--------|
| 马登哲 | 教授, 上海交大电子 | 200030 |
| 高敦徽 | 教授, 华东理工大学 | 200237 |
| 李爱萍 | 教授, 同济大学 | 200092 |

评议人名单:

- | | | |
|-----|------------------|--------|
| 张浩 | 教授, 上海电力学院 | 200090 |
| 叶洪根 | 教授级高工, 上海电器科学研究所 | 200062 |
| 谈士力 | 教授, 上海大学 | 200072 |
| 王坚 | 教授, 同济大学 | 200090 |

答辩委员会对论文的评语

吴钢华同学博士论文对曲轴非圆磨削轨迹控制的关键技术进行了深入的研究,分析了曲轴非圆磨削过程的运动模型、误差的来源与补偿方法。

论文在前沿性、解决重大工程技术问题等方面有重要的学术意义与实用价值,主要创新成果如下:

1. 分析了曲轴非圆磨削过程的特点,研究并建立了恒线速度运动带恒磨除率补偿的运动控制模型,适应高速、高精度的非圆磨削运动控制。

2. 针对曲轴连杆颈非圆磨削受力变形量不同的特点,采用曲轴四点刚度计算法,为曲轴非圆磨削过程实施误差补偿提供了一种有效的方法。

3. 通过数学建模,得出曲轴非圆磨削加工误差补偿模型,并应用 RBF 神经网络对曲轴非圆磨削切入深度进行预测,为曲轴非圆磨削加工过程提供了一种补偿方法。

吴钢华同学论文结构合理,层次分明、论述清楚,表明作者具有宽广的知识面和扎实理论基础,具有独立从事科研工作能力。

吴钢华同学答辩过程用词准确,回答问题正确。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会无记名投票，一致同意通过对吴钢华同学博士学位论文答辩，建议授予工学博士学位。

答辩委员会主任：金 烨

2006年6月6日

摘 要

曲轴是各种内燃机的关键零件,高效、高精度加工曲轴一直是内燃机生产厂家追求的目标。传统的曲轴磨削加工采用专用夹具调偏心方法加工连杆颈,生产准备时间长,生产设备柔性差。国外曲轴非圆磨削虽然有现成的产品,但价格昂贵,且其核心技术并不公开,有关曲轴非圆磨削的关键控制技术都是各生产企业的绝密技术,几乎没有实质性公开论文或资料发表。国内虽然华中理工、湖南大学等进行了一定的理论研究,但还没有产品推出。

由于磨削机理的复杂性、随机性、不确定性,以及曲轴结构复杂刚性差,变形量大,再加上数控系统本身对非圆磨削精度的影响,仅按理论运动轨迹进行数控磨削无法保证曲轴的最终质量要求。因此,分析并计算各种因素对曲轴非圆磨削过程的影响,建立准确补偿模型是实现曲轴非圆磨削控制的关键问题。

本文根据磨削机理,综合考虑磨削过程中的精度要求和表面质量,分析了曲轴非圆磨削过程的各种影响因素,在基于运动模型基础上建立了补偿模型,完成了以下创造性的工作:

为同时保证磨削加工尺寸精度和表面质量,提出了以恒线速度运动为基础的带恒磨除率补偿曲轴非圆加工的运动模型,恒线速度可保证曲轴连杆颈的表面质量,恒磨除率可保证工件的加工精度,实现了表面质量与加工精度的双重控制。

曲轴的结构复杂,不同角度下的刚度不同,受力变形也不

相同。针对曲轴连杆颈磨削过程受磨削力的变形量不同,提出了四点刚度受力变形计算方法,并根据曲轴磨削过程特点,给出了曲轴非圆磨削的磨削力计算公式,为曲轴非圆磨削过程中的力变形误差补偿奠定了基础。

研究了数控插补及伺服滞后对磨削质量的影响,证明伺服系统的响应滞后对非圆磨削的曲轴连杆颈造成较大圆度误差。如不对其做出补偿,数控系统将难以保证曲轴连杆的加工精度。根据伺服响应,给出了伺服响应滞后误差的计算公式,用于补偿控制。

针对曲轴非圆磨削的复杂变形及各种误差,曲轴连杆非圆磨削要实现恒磨除率磨削,其切入深度要随误差不同进行调整。本文提出了基于 RBF 神经网络的理论切入深度预测计算方法,解决了曲轴非圆磨削过程中的运动控制。

根据本文取得相关的研究成果,开发了基于 SIMENS 840D 数控系统的曲轴非圆磨削控制软件。

关键词 非圆磨削, 曲轴, 四点法刚度, 磨削力, 误差补偿, 神经网络

Abstract

The crank shaft is a key part of the internal-combustion engine so that machining it with high efficiency and precision is the goal pursued by the manufacturers. The crank pin is conventionally grinded by means of the eccentric fixture, the efficiency of which is low and the grinding machine of which is far from flexible. Although the non-circular grinders for the crank shaft are available from the foreign countries, their critical technologies are kept secret, especial the practical control techniques of the non-circular grinding, about which there is hardly any substantial open thesis and information. In China, only some theoretical researches have been made on the non-circular grinding by Huazhong University of Science and Technology and Hunan University without launching commercial grinders.

The quality requirement of crank shaft can not be satisfied by non-circular grinding just according to the theoretical movement trajectory because of complex grinding mechanism, the randomness and uncertainty of grinding process, and the influence of NC system as well as the characteristics of crank shaft such as complex structure, low rigidity and large deformation. Therefore, how to build the exact error compensation model on the basis of analyzing the

various influences on non-circular grinding is the crux of non-circular grinding control.

According to the grinding mechanism and based on the general consideration of the process precision and the surface quality, this dissertation analyses the various influences on crankshaft non-circular grinding, builds the error compensation model as well as the motion model, and makes creative researches on the following aspects:

1. To get high grinding precision and fine surface quality, the motion model based on constant linear velocity control with the error compensations is built up to approximate constant removal rate control for the crank shaft non-circular grinding. In the non-circular grinding, the constant linear velocity is used to guarantee the surface quality of crank pin and the constant removal rate guarantees the precision, which realize both the control of the surface quality and the machining precision.
2. Due to the complex structure of crank shaft, its stiffness varies in different angles, which results in the varying forced deformation error. Not only the calculation method of the forced deformation based on Four Points' Stiffness but also the calculation formulae of the grinding force are proposed, which lay a foundation for the compensation of the forced deformation error in crank shaft non-circular grinding.
3. The investigation in the influence of NC interpolation and servo lag on grinding quality is conducted in this thesis,

which comes to the conclusion that the response lag of servo brings about sharp increase in roundness error of crank pin. Consequently, the machining precision of crank pin is difficult to guarantee by NC system without the compensation for response lag of servo. In the light of the servo response, the calculation formula of this error is proposed to achieve the compensation control.

4. On account of the complex deformations and diversiform errors, the cutting depth ought to be modified along with the variation in error to achieve constant removal rate control in non-circular grinding for crank pin. The prediction method of theoretical cutting depth based on RBF neural network is put forward to solve the motion control problem in the crank shaft non-circular grinding.

5. The controlling software based on SIEMENS SINUMERIK 840D is developed for the crank shaft non-circular grinding on the basis of the achievements in this dissertation. Moreover, the results of practical grinding show that both the machining precision and surface roughness of the crank shaft come up to advanced world standards.

Key words Non-circular grinding, Crankshaft, Four Points' Stiffness, Grinding force, Error compensation, Neuralnetwork

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题来源	2
1.2 非圆磨削技术的研究背景和意义	2
1.3 国内外非圆磨削研究现状	6
1.4 论文主要研究内容及章节安排	8
第二章 曲轴非圆磨削的运动学分析与运动模型的建立	10
2.1 曲轴非圆磨削过程磨削点的运动方程与轨迹	11
2.2 曲轴磨削的运动模型建立	13
2.3 本章小结	26
第三章 影响非圆磨削精度的主要因素	28
3.1 磨削过程对外圆加工精度的影响	28
3.2 影响曲轴非圆磨削精度的主要因素	34
3.3 曲轴非圆磨削的静态工艺系统误差	35
3.4 砂轮半径变化引起的加工误差	39
3.5 本章小节	39
第四章 曲轴的刚度及力变形量的计算	40
4.1 曲轴磨削过程的磨削力	40
4.2 曲轴受力弹性变形	42
4.3 曲轴的刚度	43
4.4 四点刚度法力变形量计算	48
4.5 曲轴四点刚度法误差计算的实验验证	52

4.6 本章小结	53
第五章 曲轴非圆磨削过程中的磨削力模型及力学分析	54
5.1 磨削过程中的磨削力	54
5.2 曲轴磨削时的磨削力	59
5.3 曲轴非圆磨削的动力学分析	65
5.4 本章小节	72
第六章 曲轴非圆磨削数控系统误差分析	74
6.1 曲轴磨削运动的伺服跟踪滞后误差	75
6.2 曲轴连杆颈非圆磨削数控插补运动产生的误差	83
6.3 本章小节	92
第七章 曲轴非圆磨削误差补偿与控制策略	93
7.1 误差的补偿模型	94
7.2 曲轴非圆磨削的控制策略	95
7.3 基于样条曲线的曲轴非圆磨削插补控制	105
7.4 本章小节	111
第八章 曲轴非圆磨削原型系统及磨削结果	112
8.1 曲轴非圆磨削的控制系统	112
8.2 非圆磨削控制软件	116
第九章 结论与展望	129
9.1 本文研究成果	129
9.2 进一步研究方向	130
参考文献	131
致谢	143

第一章 绪 论

磨削是一种重要的精加工方法,同其他的加工方法相比,磨削具有加工精度高、获得的表面质量好、被加工材料硬度高等优点,所以磨削通常作为加工质量要求高的零件的最终精加工手段。文献[1]数据表明,25%的企业认为磨削是他们应用的最主要的加工技术,车削只占 23%,铣削占 22%,其他占 8%,而磨床在企业中占机床的比例高达 42%,车床占 23%,铣床占 22%,钻床占 14%^{[2][3]}。在我国,磨床的拥有量也已经占到了金属切削机床总拥有量的 13%左右^[3]。因此,磨削技术与磨削加工设备一直是备受人们研究的重要课题。

作为各种内燃机的关键零件,高效、高精度地加工曲轴一直是内燃机生产厂家追求的目标。长期以来,由于曲轴工件形状复杂、刚性差,磨削加工时的误差来源甚多,精度不易保证。因此,曲轴的磨削加工一直是汽车内燃机制造业的难点。如何提高曲轴磨削加工的精度、降低曲轴的磨削加工成本、提高加工的柔性,是人们关注的重要课题。传统的曲轴连杆颈磨削加工方法是采用调偏心的方法。即采用专用装夹装置,把曲轴连杆颈的中心调整到磨床头架的回转中心进行磨削。

采用调偏心法磨削,一般要用两台磨床进行曲轴的磨削,一台用于磨削主轴颈,另一台用于磨削连杆颈。采用这种磨削曲轴的方法存在着如下缺陷:

1. 需在两道工序上加工(主轴颈的磨削和连杆颈的磨削),工件需两次定位,因此辅助时间长,加工效率低;存在着两次定位的误差;
2. 工件的加工状态与应用状态并不相同,往往在线测量时精度不错,离线综合测量精度难以令人满意。
3. 加工的零件品种更换困难,品种更换时需更换夹具,并花费大

量调整时间,夹具制造费用较大,加工柔性不高。

4. 每根曲轴的主轴颈和连杆颈需在两台磨床上加工(即主轴颈磨床及连杆颈磨床),因此设备投资很大。同时每台磨床占地面积较大,多一台磨床,占地面积扩大一倍,故厂家对厂房的投入也增加一倍。

因此采用调偏心法的加工方法不仅工艺性不好,而且经济性也并不好,精度控制困难。

调偏心法加工经过多年的发展,其加工精度已经很难有进一步的发展,且设备的柔性较低。而新一代内燃机研究对曲轴加工的精度提出了更高的要求,而小批量生产对机床的柔性提出了更高的要求。非圆磨削技术可在同一机床上加工各种不同形状的工件,极大地提高了机床的加工柔性,可用于曲轴的高精、高效加工。近年来,非圆磨削技术已成为国外曲轴加工的主要研究方向。

1.1 课题来源

本课题来源于上海大学、上海机床厂、上海理工大共同申请的上海市科委重点项目“非圆磨削技术的研究开发及其应用”的子项目“曲轴非圆磨削控制系统”。

1.2 非圆磨削技术的研究背景和意义

1.2.1 研究背景

随着磨削技术及相关理论的发展,磨削在提高加工效率和精度、拓展其加工应用的范围等方面也取得了长足的进步。精密磨削、超精密磨削等技术使磨削加工的精度向亚微米、纳米级方向发展;各种高效磨削技术^[1,3,5],如:高速磨削(砂轮线速度 $45 \leq v < 150$ m/s,现在普遍认为应在 100 m/s 以上)、超高速磨削($v \geq 150$ m/s)、缓进给磨削、高效深切磨削(HEDG)、砂带磨削、快速短行程磨削、高速重负荷