

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.01.014

齿轮重复加工中的相位误差补偿技术研究^{*}

何英武^{1,2}, 梅江平¹, 陈光锋²

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300354; 2. 广州数控设备有限公司, 广东 广州 510535)

摘要:针对齿轮重复加工中由于误差引起齿轮轮廓精度难以保证的问题,对影响齿轮重复加工的跟踪误差、耦合误差等因素进行了研究。结合齿轮重复加工的应用需求,对耦合误差的构成和耦合误差对轮廓精度的决定性影响,及相关误差补偿方法进行了分析,提出了通过实时相位误差反馈来对耦合误差进行实时补偿的齿轮加工控制系统模型;开发了一种新的相位误差动态闭环补偿技术;利用齿轮加工系统试验平台,对相位误差动态补偿技术的有效性进行了测试;通过 MATLAB 数据仿真和实际工件切削,对采用相位误差补偿技术前后的相位误差变化进行了比较与分析。研究表明:该相位误差动态闭环补偿技术能有效地减少耦合联动轴的相位误差,相位误差下降达 99%,明显提高了齿轮重复加工的精度;同时,该技术满足实时性要求,适合实际工程的应用。

关键词:齿轮重复加工;相位误差补偿;齿轮轮廓精度;MATLAB

中图分类号:TH132.41;TG61;TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)01-0093-05

Phase error compensation technology in gear repeated machining

HE Ying-wu^{1,2}, MEI Jiang-ping¹, CHEN Guang-feng²

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China;

2. Guangzhou CNC Equipment Co., Ltd., Guangzhou 510535, China)

Abstract: Aiming at the problem that the precision of gear outline is difficult to guarantee due to error in repeated gear processing, the influence factors of tracking error and coupling error on gear repeated machining were researched. Combining with the application requirements of gear repeated machining, the composition of coupling error, the decisive influence of coupling error on contour accuracy and the compensation method of correlation error were summarized. A model of gear machining control system was proposed to compensate coupling error by real-time phase error feedback, and a new dynamic closed-loop compensation technology of phase error was developed. The validity of the dynamic compensation technology of phase error was tested by using the test platform of gear processing system, MATLAB was used for data simulation, experiments were carried out, the phase error changes before and after phase error compensation were compared. The results indicate that the dynamic closed-loop compensation technology of the phase error can effectively reduce the phase error of the coupling linkage shaft, the phase error is reduced by 99%, the accuracy of repeated machining of gears is obviously improved. At the same time, the technology meets the real-time requirements, and it is suitable for engineering application.

Key words: gear repeated machining; phase error compensation; precision of gear outline; MATLAB

0 引言

齿轮作为机械工业重要的基础件,广泛应用于汽车、轮船、发电设备、风电装置、轨道交通、机器人、航空航天、军事工业等领域。如何提高齿轮的加工精度,并

且满足齿轮不同应用场景的重复加工一直以来都是齿轮加工领域的难点问题。

国内众多学者对如何控制齿轮加工误差进行了深入的理论研究,建立了电子齿轮箱的理论误差控制模型。吴路路^[1]提出了轮廓误差补偿控制,将轮廓误差

收稿日期:2020-04-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB1300800)

作者简介:何英武(1963-),男,四川富顺人,工程博士生,主要从事机床数控、机器人控制方面的研究。E-mail:gskhyw@163.com

进行了解耦计算,然后再将轮廓误差的分量值补偿到各伺服轴,实现了轮廓误差补偿;王静^[2]提出了基于 CTC 优化的双层轮廓误差补偿算法;田晓青等^[3]构建了电子齿轮箱的理论模型,详细分析了数控系统的数据传输过程;马进群^[4]在华中 8 型专用数控系统上开发了电子齿轮控制模块。

这些学者提出的控制模型对工程应用有一定的指导作用,但这些理论模型主要从理论上估算误差,理论模型的复杂性和跟实际应用场景的差异性,使其在工程实践上的应用受到限制。为此,需要研究实用性的齿轮加工误差控制方法。

本文对影响齿轮重复加工的跟踪误差、耦合误差等因素进行研究,并结合齿轮重复加工的应用需求,对耦合误差的构成和耦合误差对轮廓精度的决定性影响及相关误差补偿方法进行归纳,提出通过实时相位误

差反馈来对耦合误差进行实时补偿的齿轮加工控制系统模型,开发一种新的相位误差动态闭环补偿技术。

1 影响齿轮重复加工的误差因素

1.1 误差产生原因

齿轮加工的关联轴是按照固定比例的耦合关系进行联动,但各个轴在不同负载、不同机械刚性等外部因素影响下,各个轴的跟踪误差是独立存在的,随着不同的动力学特性,跟踪误差是动态变化的,并且跟踪误差不满足耦合关系。这样机床各个轴的实际运动位置就不是满足严格要求的固定比例的耦合位置关系,会引起执行末端滚刀与工件的相对位置发生偏差。

笔者利用齿轮加工系统试验平台进行试验。齿轮加工过程中存在的跟踪误差和相位误差如图 1 所示。

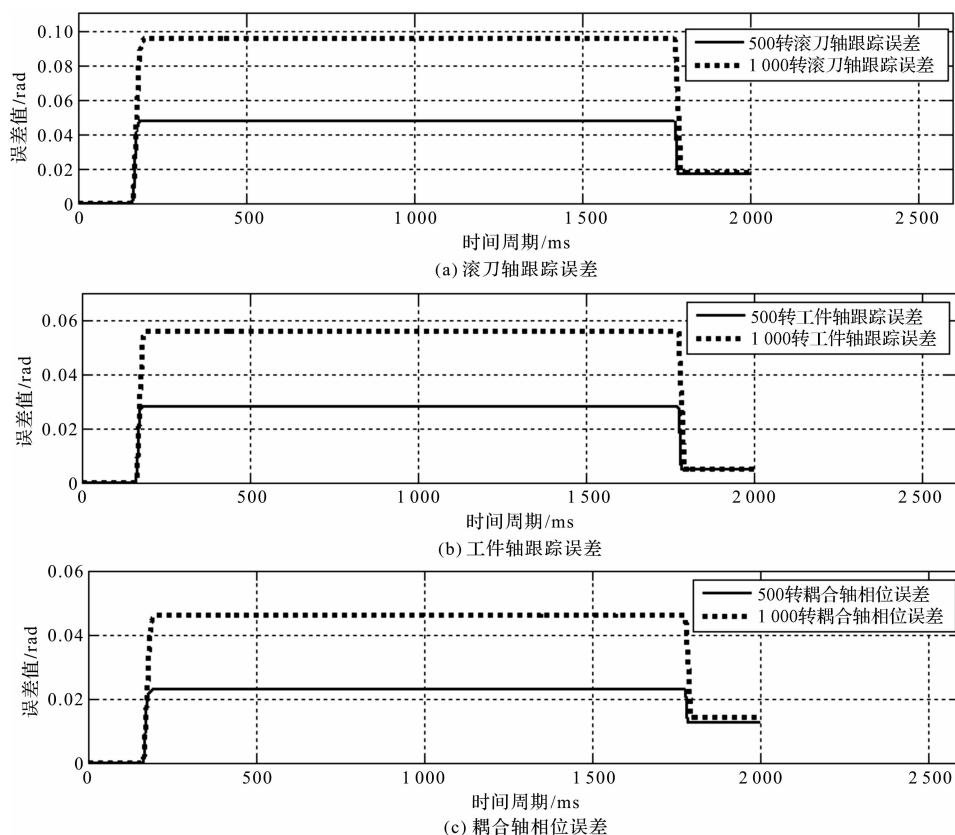


图 1 齿轮加工过程中存在跟踪误差和相位误差图

从图 1 中可以看出:在齿轮加工中,耦合联动轴的跟踪误差和相位误差随着切削速度的变化而变化。

在很多情况下,跟踪误差和耦合误差会严重影响加工质量。如加工过程中,大多数情况下零件不是一次性成型加工,而是分成不同切削速度的粗精刀路,重复加工;有些大工件也不可能一次性加工完成,而是加工完成一部分,然后再接刀衔接加工剩余部分。这样,因为实际存在的跟踪误差和耦合误差,使粗精加工或

不同加工时间的切削轨迹无法衔接,导致滚刀与工件的接触点无法重合,出现工件轮廓受损,大大降低齿轮的加工精度。

误差引起的齿轮乱齿如图 2 所示。

图 2 中,由于跟踪误差和耦合误差引起加工齿轮乱齿,工件报废。

如何控制耦合联动轴的跟踪误差和耦合误差,使执行末端滚刀和工件保持严格的耦合关系进行联动,是能



图2 误差引起的齿轮乱齿图

否提高齿轮加工精度的关键问题。国外的系统如 SIE-MENS、FAUNC 等主流系统都开发了相位同步调整功能^[5,6],但这些都是商业机密,没有具体资料可参考。

1.2 补偿方法

国内学者针对这个关键问题进行了多方面深入的研究^[7-10],其基本思路如下:

(1) 由各个轴跟踪误差预估模型估算的跟踪误差和耦合联动关系模型,计算了各个轴的理论位置,得到了预测的各个轴实际位置,如下式所示:

$$P_a = P_r - e \quad (1)$$

式中: P_a —各个轴预测实际位置,mm; e —估算的各个轴跟踪误差,mm; P_r —耦合关系模型得到的理论位置,mm。

(2) 再根据刀具主轴转角、机床各个轴的实际位置,计算了刀具切削刃和工件齿面的实际啮合点 P_{ef} 。同时,根据机床各个轴的参考位置计算刀具切削刃和工件齿面的理论啮合点 P_{et} ,求得了当前齿面轮廓误差,并解耦轮廓误差在 YZ 轴上的分量,如下式所示:

$$\begin{aligned} \varepsilon_Y &= \varepsilon \cos \theta_Y \\ \varepsilon_Z &= \varepsilon \cos \theta_Z \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ε —齿面轮廓误差,mm; θ_Y, θ_Z —啮合线与机床坐标 Y, Z 轴的夹角,rad。

解耦轮廓误差在正交坐标系 Y' 轴上的分量和需要补偿的 C 轴转角误差,如下式所示:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Y'} &= \varepsilon \cos \theta'_{Y'} \\ \varepsilon_C &= \varepsilon \cos \theta'_{Y'} / R \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ε —齿面轮廓误差,mm; $\theta'_{Y'}$ —啮合线与正交轴 Y' 的夹角,rad; R —近似为分度圆的半径,mm; ε_C —需要补偿的 C 轴转角误差,rad。

上述理论控制模型在理论上是正确的,但计算过程过于繁琐,存在太多的预估不确定性和干扰因素,因此,在工程上很难对此进行实时补偿。

2 相位误差的动态闭环补偿

笔者通过研究分析,得出了以下几点结论:

(1) 单轴跟踪误差对加工精度的影响是间接的,耦合误差是主要影响因素;

(2) 耦合误差里面包含了滚刀轴与工件轴耦合联动的耦合误差, Z 轴与工件轴 C 轴联动的耦合误差, Y 轴与工件轴 C 轴联动的耦合误差;其中滚刀轴与工件轴耦合联动的耦合误差是主要误差,起决定性作用,另两个误差量相对而言可忽略不计;

(3) 滚刀轴与工件轴耦合联动的耦合误差可以通过理论位置和伺服实际反馈位置得到,两个轴的相位误差即为耦合误差,而不需要繁琐地求解轮廓误差后再解耦,工程上可行性高;

(4) 相位误差是动态变化,不可能一次补偿完成,而是需要一个动态闭环补偿过程。

基于以上几点结论,笔者提出了齿轮加工系统控制模型,如图3所示。

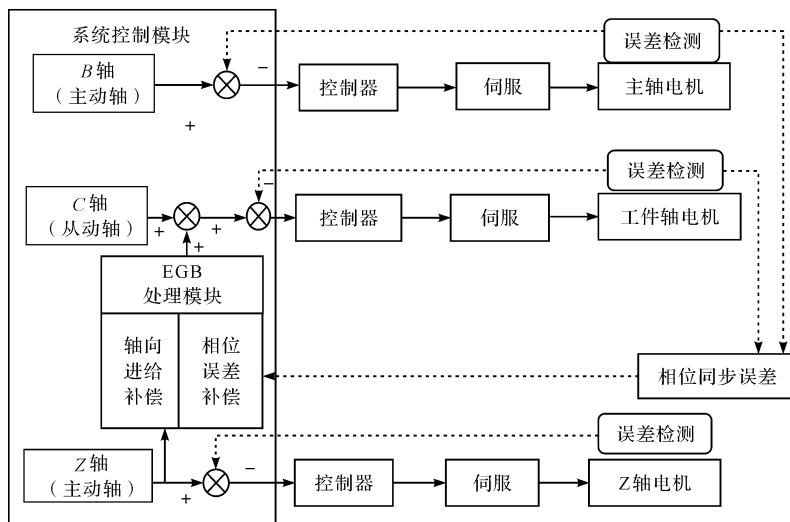


图3 齿轮加工系统控制模型图

图 3 中,模型中显示了耦合联动指令位置的下发和各个轴误差的反馈,并对相位误差进行补偿的处理模块。上述控制模型的系统控制模块部分,以软件代码形式在齿轮加工试验平台上得以实现,为下一步验证相位误差补偿技术奠定基础。

下面笔者就如何计算相位误差及相位误差的动态闭环补偿技术进行描述。

2.1 动态补偿

首先计算滚刀轴与工件轴的相对位移偏差即相位误差,如下式所示:

$$\varepsilon_s = P_{FC} \times \frac{P_s}{P_c} - P_{FS} \quad (4)$$

式中: P_c —滚刀轴下发的累计指令位置值,rad; P_s —工件轴下发的累计指令位置值,rad; P_{FC} —滚刀轴伺服系统反馈的累计实际位置值,rad; P_{FS} —工件轴伺服系统反馈的累计实际位置值,rad。

根据上述相位误差计算公式,笔者开发了控制相位误差动态闭环补偿功能的程序。这种相位误差动态闭环补偿功能在电子齿轮开始运行或指令速度发生变化时触发。

相位误差动态补偿流程如图 4 所示。

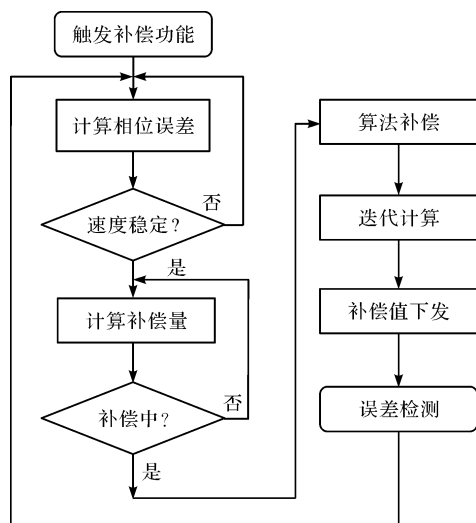


图 4 相位误差动态补偿流程图

由图 4 可知,相位误差的动态闭环补偿技术数据流程是一个循环反复补偿的过程,直到相位误差小于所设的下限值,电子齿轮才能继续执行。上述相位误差补偿技术在齿轮加工试验平台中以软件代码实现,并通过试验平台进行了实验测试。

开启补偿功能后,不同转速不同耦合比相位误差变化过程如图 5 所示。

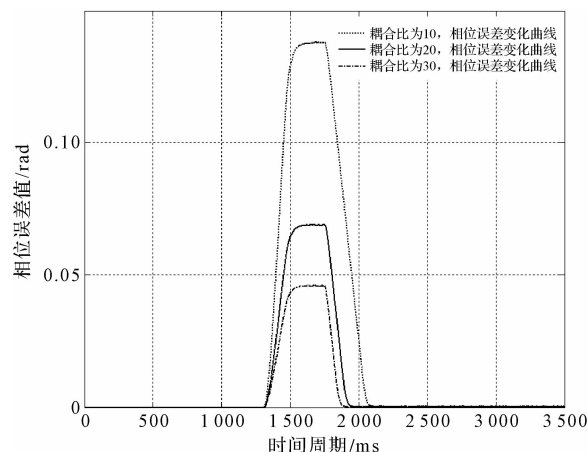


图 5 开启补偿功能,不同转速不同耦合比相位误差变化过程图

图 5 中,随着指令加速,不同耦合比的相位误差不断加大,速度平稳后,相位误差也趋于稳定;开启相位补偿后,相位误差快速减小。由此可见,开启相位误差动态闭环补偿功能后,相位误差值能得到大幅减小。

开启补偿功能前后相位误差值对比,如表 1 所示。

从表 1 中可以看出:开启相位误差补偿功能后,在不同转速不同耦合比的实验条件下,耦合轴的相位误差值都得到了大幅减小。

2.2 实际应用

根据上述实验结果,笔者所开发的齿轮加工控制系统已配套了多家齿轮机床厂,并且在终端用户的实际加工应用中,明显改善了齿轮重复加工的轮廓精度,满足了用户的零件加工精度要求。

相位误差动态补偿技术在实际加工的应用效果如图 6 所示。

表 1 开启补偿功能前后相位误差值对比

相位误差变化说明	耦合比为 10	耦合比为 20	耦合比为 30
指令 1 000 转补偿前相位误差值/rad	0.138 010	0.068 981	0.045 971
指令 1 000 转补偿后相位误差值/rad	0.000 143	0.000 191	0.000 09
指令 1 000 转补偿后相位误差下降率	下降 99.8%	下降 99.7%	下降 99.7%
指令 500 转补偿前相位误差值/rad	0.069 029	0.034 466	0.023 105
指令 500 转补偿后相位误差值/rad	0.000 04	0.000 143	0.000 09
指令 500 转补偿后相位误差下降率	下降 99.9%	下降 99.5%	下降 99.5%

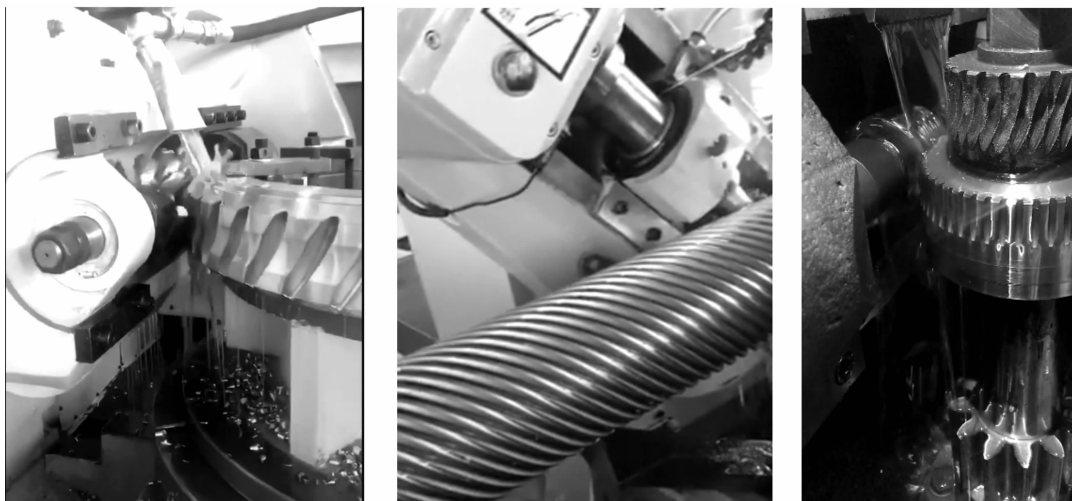


图6 相位误差动态补偿技术在实际加工的应用效果图

图6中,齿轮加工系统应用了相位误差动态闭环补偿技术后,齿轮加工精度有了显著提高,加工的齿轮达到了用户的精度要求。

3 结束语

为了解决齿轮重复加工的精度控制难题,笔者对影响齿轮加工精度的跟踪误差和耦合误差进行了分析,并参考国内外学者的相关研究,对误差补偿方法进行了归纳,提出了控制相位误差的齿轮加工系统控制模型,开发出了补偿相位误差的相位同步动态补偿技术;最后对所提出的系统控制模型和误差补偿技术通过软件代码,在齿轮加工试验平台上进行了验证,通过采集实验数据进行了仿真。

研究表明:相位误差动态闭环补偿技术能有效减少耦合联动轴的相位误差;通过试验平台的实际加工零件检测说明,相位误差补偿功能可以有效提高齿轮重复加工的轮廓精度,提高齿轮的轮廓精度等级,可以满足实际工业应用的需要。

参考文献 (References):

[1] 吴路路. 电子齿轮箱高速高精度控制及误差补偿算法研

究[D]. 合肥:合肥工业大学机械电子工程系,2017.

[2] 王 静. 高精度数控凸轮磨削的速度优化与轮廓误差补偿[D]. 吉林:吉林大学控制科学与工程系,2017.

[3] 田晓青,韩 江,夏 链. 高速高精度电子齿轮技术研究及实现[J]. 中国机械工程,2014,25(1):11-16

[4] 马进群. 基于华中8型的蜗杆砂轮磨齿机专用数控系统开发[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2017.

[5] FANUC. LTD. FANUC Series31i 车床系统加工中心通用用户手册[EB/OL]. [2005-01-20]. <http://www.fanuc.co.jp>.

[6] SIEMENS. SINUMERIK 840D/840Di/810D 编程说明[EB/OL]. [2004-03-04]<http://www.ad.siemens.de>.

[7] 梁 媛,孙建业,祝 辉. NUM 控制系统的滚齿机数控系统开发[J]. 沈阳理工大学学报,2011,3(6):70-73.

[8] 韩 江,夏 链,田晓青. 一种高速高精度柔性电子齿轮箱的控制方法[P]. 中国:ZL201310180873,2013.

[9] 谭伟明,胡赤兵,阎树田,等. 基于电子齿轮原理的滚齿加工 CNC 系统的联动结构[J]. 中国机械工程,1998,9(5):48-50.

[10] 胡赤兵,田芳勇,姜衍仓. 电子齿轮箱在非圆齿轮滚齿加工中的应用[J]. 机械设计与制造,2009,6(12):79-81.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

何英武,梅江平,陈光锋. 齿轮重复加工中的相位误差补偿技术研究[J]. 机电工程,2021,38(1):93-97.

HE Ying-wu, MEI Jiang-ping, CHEN Guang-feng. Phase error compensation technology in gear repeated machining[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021,38(1):93-97.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>