

# 一种应用于铣削机床的壁厚补偿周期测量方法

王为东,姚彬

(上海拓璞数控科技股份有限公司,上海 201108)

**摘要:**针对薄壁零件在铣削加工过程中壁厚的补偿控制,提出一种对铣削机床的壁厚补偿响应周期测量方法。利用超声波探头检测工件厚度变化,壁厚数据通过串口通信发送给数控系统,数据采集软件对壁厚数据处理过程进行实时记录和保存。通过该方法可以有效获得零件加工过程中壁厚变化时壁厚的原始数据、过滤数据和写入数据的响应时间,可为壁厚补偿功能的优化和工艺参数的选择提供参考依据。

**关键词:**铣削加工;薄壁零件;壁厚补偿;响应周期

**中图分类号:** TG547 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2021)04-0049-04

## A Measurement Method of Wall Thickness Compensation Period Based on Milling Machine

WANG Weidong, YAO Bin

(Shanghai TOP Numerical Control Technology Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

**Abstract:** In regard to the wall thickness compensation control of thin-walled parts in milling process, a measuring response period method of wall thickness compensation based on milling machine tool is proposed. The ultrasonic probe is used to detect the thickness change of the workpiece. The wall thickness data is sent to the CNC system through serial communication. The data acquisition software records and saves the wall thickness data processing process in real time. By the method, the response time of original wall thickness data, wall thickness filtering data and wall thickness writing data can be effectively obtained when the wall thickness changes in the process of parts processing, providing reference basis for the optimization of wall thickness compensation function and the selection of process parameters.

**Keywords:** milling; thin-walled parts; wall thickness compensation; response period

## 0 引言

随着中国航空航天的发展,薄壁件的应用越来越广泛,新一代飞行器大量采用薄壁件,精度要求也越来越高,但薄壁件刚度低,对其进行高效精密铣削加工一直是一项技术难题<sup>[1]</sup>。为实现薄壁件的高效精密铣削加工,解决加工误差过大的问题,任宇强等通过优化薄壁件工艺路线和加工方法,有效减少加工中应力变形,提高了加工质量<sup>[2]</sup>;杨东辉等从铣削力、温度、残余应力、表面粗糙度等方面,分析了切削参数对薄壁件加工性能的影响<sup>[3]</sup>;赵淑军等建立了薄壁件铣削动力学模型和再生颤振系统的传递函数,为稳定切削参数的确定提供了参考<sup>[4]</sup>。本文从壁厚补偿角度研究薄壁件高效高精铣削方法,通过测量壁厚补偿周期,提高加工效率和质量。

薄壁件壁厚补偿加工是指在铣削过程中实时测量工件厚度变化情况并进行运动补偿,以保证工件加工精度。壁厚补偿响应周期是指工件厚度发生变化后到机床开始控制各轴进行补偿所经历的时间。在完成同样功能的情况下,周期越短,表明补偿算法效率越高,相应的机床进给速度、工件加工精度和加工效率也越高。因此,壁厚补偿

响应周期是衡量铣削加工壁厚补偿功能可行性的关键指标,对加工效率和精度有着重要的影响。

根据壁厚补偿原理和数据处理过程,本文提出一种工件壁厚补偿周期测量方法,对各阶段时间进行测量,为壁厚补偿算法优化和问题分析提供了参考。

## 1 壁厚补偿系统构建

数控机床系统本身并不具有壁厚补偿的能力,要实现工件壁厚加工补偿,必须首先在数控机床本身能力的基础上集成具有壁厚测量功能的装置,并开发具有数据采集功能的软件。因此,有效的系统集成是实现壁厚补偿的关键。壁厚补偿系统如图1所示,在机床上集成 OLYMPUS 38DL 超声测量装置,并基于数控系统开发数据采集软件,通过 RS232 串口通信实现测量装置与数控系统的连接与通信。

### 1.1 超声测量装置与数控系统集成

OLYMPUS 38DL 超声测量装置用于实现壁厚的实时测量,主要由探头、信号线缆、测厚仪和通信线缆组成<sup>[5]</sup>。其中探头用于超声信号的发射和接收;信号线缆用于将探头信号传送给测厚仪;测厚仪用于超声信号处理和数据显

基金项目:上海特种数控装备及工艺工程技术研究中心项目(17DZ2283200)

第一作者简介:王为东(1993—),男,工程师,硕士,研究方向为数控系统研发和先进加工控制技术。



图1 壁厚补偿系统组成

示;通信线缆则用于外界设备与测厚仪通信和采集数据。加工过程中测厚仪上壁厚数据显示如图2所示。



图2 测厚仪数据显示

本试验机床上运行的数控系统为西门子 Sinumerik 840D sl,系统软件版本为SW4.7,由独立的PCU和NCP组成。PCU如图3所示,通过RS232串口通信即可与测厚仪集成,实现数控系统与测厚仪之间的实时数据通信。



图3 Sinumerik 840D sl 数控系统

### 1.2 数据采集软件与数控系统集成

数据采集功能是基于西门子数控系统二次开发包(SINUMERIK integrate create MyHMI 3GL 4.5 SP1)开发的<sup>[6]</sup>,开发完成后集成在数控系统主界面上,如图4所示。

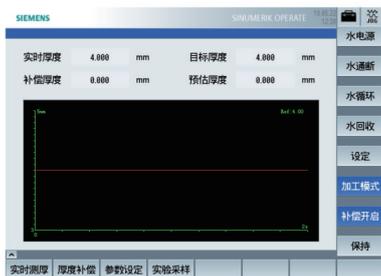


图4 数据采集功能

### 1.3 壁厚数据读取和处理过程

根据上述壁厚补偿系统可知,壁厚数据读取和处理过程如图5所示。

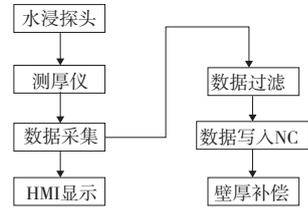


图5 壁厚数据处理过程

- 1)测厚仪通过水浸探头实时检测工件壁厚变化;
- 2)数据采集软件实时从测厚仪中获取工件壁厚原始数据;
- 3)采集软件通过滤波等算法对壁厚原始数据进行处理和分析;
- 4)数据处理完成后,将壁厚数据和处理结果写入数控系统,用于加工补偿和运动控制。

## 2 响应周期的测量方法

### 2.1 响应周期测量流程

壁厚补偿响应周期是指工件厚度发生变化后到机床开始控制各轴进行补偿所经历的时间。根据壁厚补偿过程中数据处理流程,设计以下方案(图6)对壁厚响应周期进行测量:

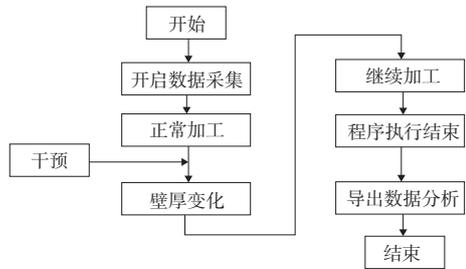


图6 壁厚补偿响应周期测量

- 1)基于数据采集软件实时采集壁厚补偿过程中壁厚数据变化情况;
- 2)在正常加工过程中,通过外加补偿量控制刀具沿刀轴方向运动,使工件壁厚发生变化;
- 3)继续加工,程序结束后导出数据;
- 4)对采集的壁厚数据进行分析,计算从补偿开始到壁厚数据反馈到数控系统中的响应时间,即壁厚补偿响应周期。

### 2.2 响应周期计算

正常加工是指在不进行补偿和干预情况下进行铣削加工,通过调整工件安装位置,使测厚仪示数基本为常数;干预时刀具沿刀轴向工件方向进行补偿,使壁厚发生变化,设干预时系统时间为 $S_{干预}$ ;在整个加工过程中数据采

集软件会对壁厚原始数据、壁厚过滤数据和壁厚写入数据进行实时采集,通过分析可得壁厚原始数据开始变化时(壁厚数据有明显小于开始正常加工时的壁厚数据的趋势)的系统时间、壁厚过滤数据开始变化时的系统时间和壁厚写入数据开始变化时的系统时间,分别设为 $S_{原始}$ 、 $S_{过滤}$ 和 $S_{写入}$ 。则从 $S_{干预}$ 至 $S_{原始}$ 的时间即为壁厚原始数据响应时间 $T_{原始}$ ,即:

$$T_{原始} = S_{原始} - S_{干预} \quad (1)$$

同理,壁厚过滤数据响应时间 $T_{过滤}$ 和壁厚写入数据响应时间 $T_{写入}$ 的计算公式:

$$T_{过滤} = S_{过滤} - S_{干预} \quad (2)$$

$$T_{写入} = S_{写入} - S_{干预} \quad (3)$$

其中 $T_{写入}$ 即为壁厚补偿响应周期 $T$ 。进一步可得壁厚数据获取耗时 $\Delta T_{原始}$ 、数据过滤和处理耗时 $\Delta T_{过滤}$ 和数据写入系统耗时 $\Delta T_{写入}$ ,即:

$$T = T_{写入} \quad (4)$$

$$\Delta T_{原始} = T_{原始} \quad (5)$$

$$\Delta T_{过滤} = T_{过滤} - T_{原始} \quad (6)$$

$$\Delta T_{写入} = T_{写入} - T_{过滤} \quad (7)$$

综上,即可计算得到壁厚补偿周期和各阶段耗时情况。其中各阶段耗时情况可根据实际算法和数据处理过程进行修改和细化,以获得更准确和更详细的响应数据,对算法进行分析和优化。

### 3 实例分析

为验证壁厚响应周期测量方法的可行性,基于以上设施,设计如下方案进行测量实验:首先将待加工工件安装在矩形工装中,并堆放在机床上合适区域,然后进行轮廓扫描和逆向,在工件轮廓表面得到加工程序,接着关闭壁厚补偿功能,执行加工程序。通过调整W1轴(沿刀具轴向方向)位置,使铣刀刚好与工件表面接触,更改加工程序,控制W1轴在刀路中间位置向工件方向铣削0.5mm,最后开启加工数据采集功能,执行加工程序,对加工过程中壁厚数据进行采集。为保证测量结果的准确性,本次试验在3个位置生成3条加工程序进行实验。

按照以上方案进行实验,加工刀路如图7所示,加工时采集的数据如图8-图10所示。其中,第1列为采样时间,采样频率为16Hz,第2列为数据采集软件实时从测厚仪中读取的壁厚数据,第3列为过滤处理后的壁厚数据,第4列为写入NC中的壁厚数据,L1-L4为用于监测工件变形情况的4个电涡流数值,最后两列分别为刀路中间W1轴向工件方向补偿0.5mm的信号值和W1轴的机床坐标。



图7 实验位置

采样时间	原始壁厚	过滤壁厚	写入壁厚	L1	L2	L3	L4	补偿开始	W1轴位置
589 9-08-12-14-14:02.299	1.519	1.519	1.519	2.453	2.352	2.544	2.507	0	-0.1
590 9-08-12-14-14:02.359	1.519	1.519	1.519	2.454	2.352	2.548	2.507	0	-0.1
591 9-08-12-14-14:02.425	1.519	1.519	1.519	2.459	2.360	2.54	2.51	1	-0.249
592 9-08-12-14-14:02.492	1.519	1.519	1.519	2.172	2.097	2.249	2.321	1	-0.6
593 9-08-12-14-14:02.552	1.519	1.519	1.519	2.259	2.177	2.339	2.31	1	-0.6
594 9-08-12-14-14:02.612	1.519	1.519	1.519	2.259	2.18	2.341	2.317	1	-0.6
595 9-08-12-14-14:02.733	1.343	1.519	1.519	2.268	2.19	2.355	2.335	1	-0.6
596 9-08-12-14-14:02.802	1.343	1.519	1.519	2.281	2.203	2.386	2.359	1	-0.6
597 9-08-12-14-14:02.860	1.339	1.499	1.519	2.289	2.208	2.394	2.37	1	-0.6
598 9-08-12-14-14:02.922	1.334	1.464	1.499	2.291	2.214	2.396	2.371	1	-0.6
599 9-08-12-14-14:03.018	1.338	1.428	1.428	2.29	2.191	2.394	2.35	1	-0.6
600 9-08-12-14-14:03.048	1.322	1.355	1.392	2.297	2.208	2.387	2.348	1	-0.6

图8 位置1实验数据

采样时间	原始壁厚	过滤壁厚	写入壁厚	L1	L2	L3	L4	补偿开始	W1轴位置
786 9-08-12-14-21:08.821	1.532	1.532	1.532	2.338	2.283	2.451	2.457	0	-0.1
787 9-08-12-14-21:08.888	1.532	1.532	1.532	2.378	2.298	2.469	2.45	0	-0.1
788 9-08-12-14-21:08.946	1.532	1.532	1.532	2.329	2.251	2.422	2.401	1	-0.315
789 9-08-12-14-21:08.010	1.533	1.533	1.533	2.184	2.088	2.244	2.311	1	-0.6
790 9-08-12-14-21:09.094	1.532	1.532	1.532	2.198	2.11	2.295	2.298	1	-0.6
791 9-08-12-14-21:09.134	1.532	1.532	1.532	2.214	2.158	2.31	2.311	1	-0.6
792 9-08-12-14-21:09.202	1.306	1.532	1.532	2.222	2.183	2.327	2.342	1	-0.6
793 9-08-12-14-21:09.257	1.304	1.532	1.532	2.231	2.188	2.333	2.354	1	-0.6
794 9-08-12-14-21:09.377	1.296	1.512	1.532	2.24	2.195	2.347	2.361	1	-0.6
795 9-08-12-14-21:09.449	1.293	1.427	1.427	2.257	2.195	2.366	2.358	1	-0.6
796 9-08-12-14-21:09.521	1.286	1.38	1.38	2.24	2.212	2.347	2.365	1	-0.6
797 9-08-12-14-21:09.576	1.284	1.332	1.332	2.264	2.2	2.377	2.364	1	-0.6

图9 位置2实验数据

采样时间	原始壁厚	过滤壁厚	写入壁厚	L1	L2	L3	L4	补偿开始	W1轴位置
877 9-08-12-14-29:42.402	1.467	1.47	1.47	2.394	2.361	2.468	2.498	0	-0.1
878 9-08-12-14-29:42.444	1.467	1.469	1.469	2.382	2.316	2.447	2.451	0	-0.1
879 9-08-12-14-29:42.608	1.467	1.469	1.469	2.166	2.145	2.231	2.272	1	-0.6
880 9-08-12-14-29:42.724	1.465	1.461	1.461	2.223	2.203	2.285	2.327	1	-0.6
881 9-08-12-14-29:42.755	1.465	1.466	1.466	2.239	2.21	2.3	2.331	1	-0.6
882 9-08-12-14-29:42.822	1.295	1.466	1.466	2.242	2.216	2.328	2.354	1	-0.6
883 9-08-12-14-29:42.882	1.264	1.466	1.466	2.254	2.226	2.337	2.362	1	-0.6
884 9-08-12-14-29:42.942	1.264	1.445	1.445	2.263	2.234	2.343	2.37	1	-0.6
885 9-08-12-14-29:43.019	1.259	1.406	1.406	2.272	2.223	2.341	2.355	1	-0.6
886 9-08-12-14-29:43.067	1.256	1.365	1.365	2.265	2.236	2.347	2.378	1	-0.6
887 9-08-12-14-29:43.127	1.245	1.325	1.325	2.265	2.236	2.349	2.383	1	-0.6

图10 位置3实验数据

本次实验用于测量当工件厚度变化时,壁厚补偿功能的响应周期。其中工件厚度变化通过W1轴负方向补偿0.5mm实现,当补偿开始时(信号值从0变为1),W1轴开始向工件方向补偿,即图8-图10中白色框框选区域(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。L1-L4反映了加工过程中电涡流数值变化情况,可见当W1轴向工件方向补偿时,L1-L4的数值减小,说明工件发生变形,但变形量小于W1轴的移动量。因此,在W1轴向工件方向移动0.5mm的过程中,工件厚度是发生变化的。图8-图10上表格中第2列、第3列和第4列分别反映了壁厚原始数据、壁厚过滤数据和壁厚写入数据,壁厚数据的响应时间为W1轴补偿开始后到壁厚数据开始变化时所使用的时间,如图8-图10中蓝色框框选区域,3次实验的壁厚补偿响应时间计算如表1所示。

表1 实验数据分析结果

项目	响应时间/s		
	原始数据	过滤数据	写入数据
位置1	0.308	0.435	0.497
位置2	0.256	0.431	0.503
位置3	0.214	0.334	0.334
平均值	0.259	0.400	0.450

综上,壁厚原始数据平均响应时间为0.259s,壁厚过滤数据平均响应时间为0.4s,壁厚写入数据平均响应时间为0.45s。

因此,当工件厚度发生变化后,大约需要0.45s反馈给NC进行补偿,即壁厚补偿响应周期为0.45s。其中原始数据获取耗时0.259s,数据过滤和处理耗时0.141s,厚

度数据写入 NC 耗时 0.05 s。时间大多花费在原始数据获取和数据处理上,可以根据实际情况对该功能进行优化;若加工进给速度为 1000 mm/min,则当工件厚度变化后反馈到 NC 时,机床已经移动 7.5 mm。为保证加工质量,有必要对进给速度、刀具直径、壁厚补偿算法进行合理选择和优化。

## 4 结语

本文针对薄壁零件在铣削加工过程中壁厚补偿控制问题,提出一种应用于铣削机床的壁厚补偿响应周期测量方法。从加工理论、平台搭建和实验分析等方面论述了该方法的正确性和可实施性。通过该方法不仅可以有效获得壁厚补偿响应周期,还可以分别获取壁厚控制算法中各环节的耗时情况,为壁厚补偿功能的优化和工艺参数的选

择提供参考依据。

### 参考文献:

- [1] 李文东. 高速铣削薄壁件加工变形控制及工艺优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2012.
- [2] 任宇强,李国剑,白浩. 大型薄壁硬质铝合金零件加工技术研究[J]. 工具技术,2020,54(4):58-60.
- [3] 杨东辉,曾天俊,缪宏,等. 薄壁件切削参数模型理论仿真与实验研究[J]. 农业装备技术,2019,45(3):16-22.
- [4] 赵淑军,刘均,刘亚萍,等. 薄壁件铣削加工稳定性分析及试验验证[J]. 机床与液压,2018,46(7):43-49.
- [5] 38DL. PLUS 用户手册[Z]. [S.I.:s.n.]. 2016.
- [6] SINUMERIK. 840D. sl 编程手册[Z]. [S.I.:s.n.]. 2012.

收稿日期:2020-07-06

(上接第 42 页)

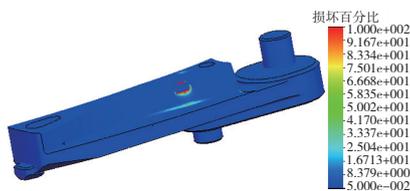


图9 疲劳分析损坏百分比图

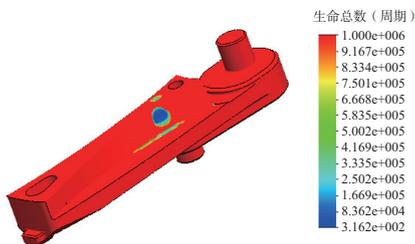


图10 疲劳分析生命周期

均 $<1$ ,图9中换向器的深色区域为换向器的薄弱区域,即换向器与滚轮接触处,说明此处应力较为集中,容易发生疲劳裂纹和破坏。

从图10可知,换向器各个部位的最低疲劳次数大概为316次,寿命较低的区域集中在换向器与滚轮接触处,且区域较小,表示换向器在转膛自动机正常工作316次后,换向器将会产生疲劳裂纹。

某新型转膛自动机在经过500发左右击发后,换向器出现了裂纹,如图11所示。其余位置在试验过程中未发生疲劳破坏,计算结果和试验结果在数量级上较为接近,说明文中采用的疲劳寿命分析方法具有较高的工程实用价值。

## 4 结语

在对某新型转膛自动机进行动力学分析的基础上,通过有限元方法分析得出换向器在正常工况下的应力分布,



图11 试验疲劳损坏

发现换向器在一定次数工作循环后易产生疲劳失效。在对正常工作循环下的换向器进行疲劳分析,得出换向器损坏的大概位置,并估算出其工作寿命为击发316发弹,与试验结果量级相一致。本文上述分析为换向器后续的改进设计和工艺提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 戴劲松. 现代火炮自动机设计理论[M]. 北京:国防工业出版社,2018.
- [2] 菅润基,于存贵,李昊,等. 基于ADAMS的转膛机构滑板优化分析[J]. 装备环境工程,2019,16(10):71-75.
- [3] 李慧水. 某新型重载高速自动机动力学分析[D]. 南京:南京理工大学,2016.
- [4] 闫彬,姚忠,王瑞,等. 某火炮自动机转膛机构运动特性分析[J]. 火炮发射与控制学报,2010,31(2):66-69.
- [5] 张相炎,郑建国,袁人枢. 火炮设计理论[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014.
- [6] 谭添. 某新型低后坐力自动机动态特性分析[D]. 南京:南京理工大学,2018.
- [7] 孙强,周重光,袁书强,等. 超高强度钢研究进展及其在军事上的应用[J]. 材料导报:网络版,2006(3):14-16.
- [8] 刘鸿文. 材料力学- II [M]. 5版. 北京:高等教育出版社,2011.
- [9] 张安哥,朱成九,陈梦成. 疲劳、断裂与损伤[M]. 成都:西南交通大学出版社,2006.
- [10] 熊峻江. 疲劳断裂可靠性工程学[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

收稿日期:2020-08-10