

## 磨削力自适应控制系统的设计

沈志煌,姚斌,朱健,王萌萌  
(厦门大学 机电工程系 福建 厦门 361005)

**摘要:**可转位刀片的传统磨削加工大多采用恒进给量控制法,若工件的余量不均、材质不均、磨削速度较高、砂轮的切削性能较差时,在进给速度较大时,将对工件的加工表面质量产生不良影响,如表面粗糙度增大,工件表面烧伤和产生微裂纹,砂轮磨损加剧,砂轮轴变形,甚至砂轮崩裂。若降低进给速度势必会影响加工效率。自适应加工技术是解决上述问题的重要途径,论文讨论了应用该技术对影响加工效率和精度的切削力、转矩、功率、刀具磨损、尺寸精度、和表面粗糙度等物理量进行检测、建模、提取特征,对进给速度、主轴转速等工艺参数进行实时控制,使机床的工艺系统在高效加工中处于最佳状态。

**关键词:**可转位刀片;磨削力;自适应控制

**中图分类号:**TH16;TH164 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3997(2014)11-0220-03

## The Design of Self-Adaptive Control System for Grinding Force

SHEN Zhi-huang, YAO Bin, ZHU Jian, WANG Meng-meng

(Department of Mechanical &amp; Electrical Engineering, Xiamen University, Fujian Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Mostly, the traditional method of grinding indexable insert is to keep constant feed rate. If the allowance of workpiece was uneven, the material was nonuniform, the speed of grinding was high and cutting performance of grinding wheel was poor, a large feed rate would exert a bad effect on the quality of manufacturing. For example, surface roughness would increase, surface would burn and emerge tiny fissures, grind wheel wear would exacerbate, shaft would distort, even crack. However, if you reduce the feed rate, efficiency will certainly be low. Self-adaptive manufacturing technology is an important way to solve those problems above. The technology detects, builds up models and extracts characteristics of physical quantities, such as force, torque, power, tool wear, dimensional accuracy and surface roughness which affect processing efficiency and precision. Then, it keeps feed rate, spindle speed and other parameters in real-time control to ensure the best condition.

**Key Words:** Indexable Inserts; Grinding Force; Self-Adaptive

## 1 引言

为保护刀具和机床,编程时进给速率必须按照负荷最大的工况进行编程,并且贯穿于整个加工过程。但是实际加工过程是复杂多变的,这种最大负荷工况只占整个工序的5%,这就极大的限制了数控机床的加工效率<sup>[1]</sup>。自适应控制技术使机床不仅能够正常设计的条件下,实现复杂外形工件的高精度、高效率的自动加工,而且在受某些不确定因素影响和出现某些偶然的不正常情况下,仍能按照预期的工况准则自动调整控制规律,使加工顺利完成。自适应控制系统的特点是在不能预知的随机变化环境中能够针对给定的系统运行指标,连续地监测系统的运行状态,并能以闭环方式自动地校正系统的可调参数,使系统达到最佳状态。

## 2 机床自适应控制基本原理

机床自适应控制系统是全闭环控制系统,如图1所示。除了电机位置、速度的检测和控制外,主要通过机床加工过程变量(切

削力、转矩、功率、刀具磨损、尺寸精度和表面粗糙度等)的在线检测和实时控制来调节加工参数(切削速度、进给量等),能够消除加工过程中机床状态变化和外界扰动的影响,以优化整个机床加工过程(经济性能、生产率和产品质量)。

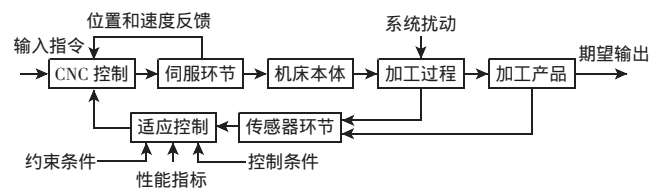


图1 机床自适应控制系统

Fig. 1 Self-Adaptive Control System of Machine Tools

机床自适应控制的最终目的是通过增加金属切除率来提高生产效率。根据加工材料种类和零件复杂程度的不同,自适应控制系统的生产效率比传统数控系统提高(20~80)%<sup>[2]</sup>。对保护刀具、保证机床精度和保障产品加工质量具有重要影响。

来稿日期 2014-04-20

基金项目 国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项资助(2010ZX04001-162)

作者简介 沈志煌(1988-)男,福建人,在读博士,学生,主要研究方向:复杂曲面成形;

姚斌(1963-)男,湖北人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:复杂曲面、智能装备制造

### 3 基于电机功率的磨削力间接测量技术

为了控制加工负荷就必须实时检测加工负荷的反馈值, 反应负荷最为敏感的物理量就是磨削力。目前国内外, 磨削力信号的获取通常是通过测力仪直接测量而进行的。

而目前市场上的磨削力传感器应用于数控加工时主要有两个问题:

- (1) 安装不方便;
- (2) 可靠性不高, 需要满足一定的环境条件, 否则精度得不到保证。

为此, 有必要寻求一种经济方便易于实现的间接测量方法。近年来国内外众多学者对磨削力的间接测量做了大量的研究, 通过对主轴电机或者伺服电机的电流、功率等物理量的监测来间接测量磨削力的方法进行了详细分析并应用于工业生产中, 为切削负荷的间接测量奠定了理论和实践基础<sup>[3-5]</sup>。由于伺服电机功率包含太多的机床本体信息, 如刚性、摩擦、热量等, 这样功率对磨削力的变化反映就变得不准确。而主轴路径的砂轮负载传递直接, 主轴电机功率中没有大量的机床本体信息, 故其功率更能直接的反映磨削力。因此, 论文采用了通过采集主轴电机功率信号来反映加工时磨削力的变化情况, 以达到自适应磨削的目的。

数控工具磨床主轴传动链, 如图 2 所示。传动链系统主要包括主轴电机、电机轴、联轴器、主轴等, 由电机电枢的信号控制主轴运转。

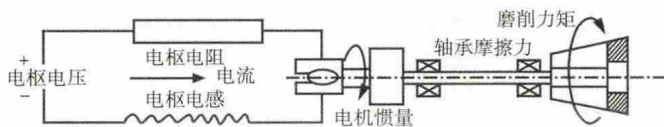


图 2 主轴驱动系统示意图  
Fig.2 Spindle Drive System

在磨削加工中, 主轴电机的输出扭矩不仅包括切削扭矩, 还包括轴承等引起的摩擦力矩和传动系统惯量等, 系统整体主要受到变化的磨削力、电机驱动力、轴承摩擦力等作用。其系统方程可表示为<sup>[6]</sup>:

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + F_t R \quad (1)$$

- 式中  $T$ —电机输出扭矩;
- $J$ —电机等效惯量;
- $\omega$ —主轴电机角速度;
- $B$ —等效阻尼系数;
- $F_t$ —切向磨削力;
- $R$ —砂轮半径。

切削扭矩可以看做是主轴电机系统的一个输入扰动, 而电机系统摩擦扭矩本质上是粘性和库伦摩擦, 其模型是时变和非线性的。

考虑在主轴转速不变的情况下, 有  $J \frac{d\omega}{dt} = 0$ , 则有:

$$T = \frac{\pi n B}{30} + F_t R \quad (2)$$

由电机学理论可知<sup>[7]</sup>:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{30P}{\pi n} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得:

$$F_t = \frac{900P - \pi^2 n^2 B}{30\pi n R} \quad (4)$$

- 式中  $F_t$ —切向磨削力;
- $P$ —主轴电机功率;
- $n$ —电机转速;
- $B$ —等效阻尼系数;
- $R$ —砂轮半径。

由此可看出, 在一定转速下并且主轴传动系统摩擦状态稳定的情况下, 电机功率与切向磨削力可以简单认为呈线性关系。因此电机功率信号可以很好地反映磨削力的变化情况。

### 4 基于电机功率反馈的磨削力自适应控制系统设计

根据前述的电机功率反馈理论, 结合可转位刀片的实际磨削加工情况, 设计了数控工具磨床磨削力自适应控制系统模型, 如图 3 所示。其工作原理: 首先驱动主轴电机工作, 进行可转位刀片的磨削加工, 加工过程中利用磨削力间接测量技术实时采集主轴电机功率, 然后将采集结果与预设功率值比较, 判定当前电机功率是否在调节范围内, 以此来决定是否通过 PLC 自动调节伺服轴的进给速率。

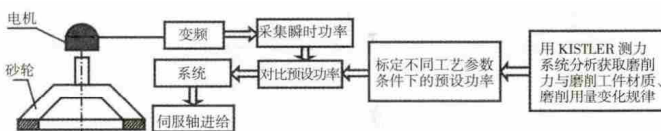


图 3 机床磨削力自适应控制系统模型  
Fig.3 Self-Adaptive Control System Model of Machine Grinding Force

### 5 实验研究

为了检验机床自适应控制系统能否达到预期效果, 对其进行实际加工试验。工件: 正三角形可转位刀片, 材料: 硬质合金, 内切圆直径: 12.7mm, 厚度: 4.8mm。刀具: 金刚石砂轮, 直径: 400mm, 主轴转速: 2000r/min, 磨削深度: 0.5mm, 进给速度: 12mm/min, Y 轴摆动频率: 0.5Hz。实际加工试验现场, 如图 4 所示。

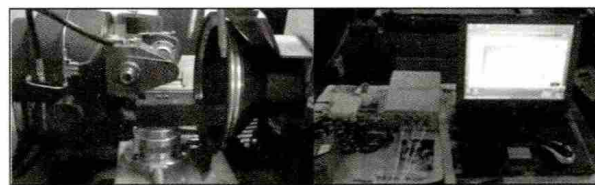
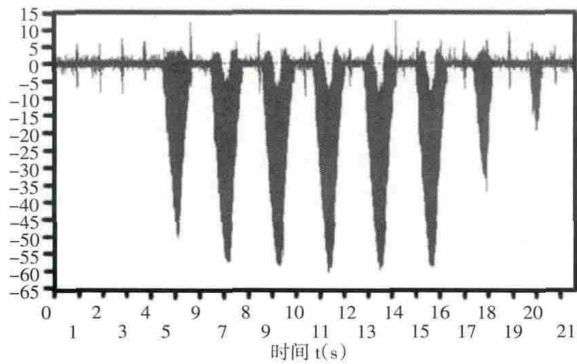


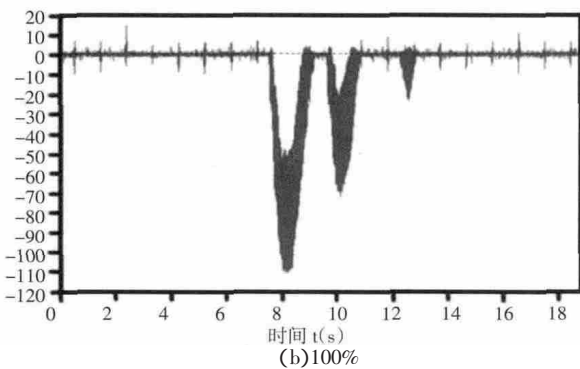
图 4 实际加工试验现场  
Fig.4 Actual Processing Test Site

在上述加工条件下, 分别做了无自适应控制和有自适应控制的加工比较实验。在无自适应控制条件下加工时, 初始进给速率分别为 20%和 100%, 在整个加工过程中, 进给速度保持恒定, KISTLER 测力系统所测结果, 如图 5 所示。横坐标为磨削时间  $s$ , 纵坐标为法向磨削力, 波峰表示机床磨削刀片时, KISTLER 测力系统测得的磨削力。

在自适应控制条件下,初始进给速率为60%,当砂轮刚切入工件时,磨削力较小,速率升至自适应系统设定的100%,当磨削力增大超过系统的允许值时,速率降低至20%。随着磨削力的不断变化,自适应系统就这样对进给速率进行自动调整。自适应调节下的磨削力大小,如图6所示。横坐标为磨削时间 $s$ ,纵坐标为法向磨削力。



(a)20%



(b)100%

图5 无自适应控制加工倍率为20%与100%时磨削力测量结果

Fig.5 Measurement Results of the Grinding Force for the Processing Rate of 20% and 100% Without Self-Adaptive Control

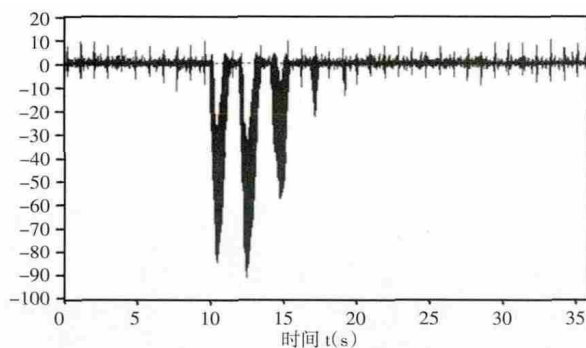


图6 自适应控制加工磨削力测量结果

Fig.6 Measurement Results of the Grinding Force with Self-Adaptive Control

对比实验结果,如表1所示。明显看出低倍率加工时,磨削力较小,未超过加工允许的最大磨削力,但加工耗时太长;在高倍率下,加工耗时短效率高,但磨削力超出允许范围,容易烧伤工件表面。在自适应控制下,不仅磨削力控制在了理想范围,而且加工时长也相对缩短。因此,机床的磨削力自适应控制系统达到了预期效果,可应用于实际加工中,以提高机床的生产效率。

表1 对比实验结果

Tab.1 Comparison of Experimental Results

	磨削力	加工时间
自适应控制	91.156 N	7s
恒定进给速 20%	60.394 N	13s
恒定进给速 100%	110.443 N	4s

## 6 小结

研究了基于电机功率的磨削力间接测量技术,设计了电机功率监测模块。最后,基于电机功率反馈理论设计了磨削力的自适应控制系统,通过实际加工试验达到了预期效果,可以应用于生产实践中。

## 参考文献

- [1] 刘艳明.机床适应控制系统[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.  
(Liu Yan-ming.Adaptive Control System of Machine Tool[M].Wuhan: Huazhong University of Science and Technology press,2002.)
- [2] 曹为.基于神经网络的数控铣削自适应加工系统的研究[D].武汉:华中科技大学,2007.  
(Cao Wei.Research of self-adaptive machining system for CNC milling based on the neural network[D].Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press,2002.)
- [3] L.W.Peng,B.Yao,F.Li,X.Wang,B.S.Yao.The flexible grinding technology based on the electric current control[J].Fourth International Conference on Machine Vision,2011(83491).
- [4] X.Wang,B.Yao,L.W.Peng.The research of force-controlled grinding based on the current feedback system[J].Second International Conference on Test and Measurement,2010:649-651.
- [5] 曹翔.可转位刀片周边数控工具磨床自动控制关键技术研究[D].厦门:厦门大学,2013.  
(Cao Xiang.Research on auto-control kernel technology for cnc tool grinder of indexable inserts[D].Xiamen University,2013.)
- [6] 赵起超.数控凸轮磨床磨削力适应控制的研究[D].秦皇岛:燕山大学,2007.  
(Zhao Qi-chao.Grinding force with adaptive control of CNC cams grinder[D].Qihuangdao:Yanshan University,2007.)
- [7] 李发海,王岩.电机与拖动基础[M].北京:清华大学出版社,2005.  
(Li Fa-hai,Wang Yan.The Foundation of Motor and Drag[D].Beijing: Tsinghua University Press,2005.)
- [8] 黄国权,顾勇进.高速切削技术及高速切削可转位铣刀的研究[J].机械设计与制造,2004(1):100-102.  
(Huang Guo-quan,Gu Yong-jin.Studying on high speed cutting technology and high speed Indexable milling cutter[J].Machinery Design & Manufacture,2004(1):100-102.)
- [9] Ersoy A,Atici U.Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks[J].Diamond and Related Materials,2004,13(1):22-37.
- [10] Banuelos GS,Walse SS,Yang SI.Quantification,localization and speciation of selenium in seeds of canola and two mustard species compared to seed-meals produced by hydraulic press[J].Analytical Chemistry,2012(14):6024-6030.