数控磨床磨削力自适应控制方法

威海华东数控股份有限公司 （山东 264205） 郑曙光 李文鑫

摘要：提供一种在磨削加工过程中实现磨削力自适应控制的方法。通过对影响加工效率和精度的物理量进行检测、建模和提取特征，自动感知加工系统内部状态及外部环境，快速做出智能决策，对进给速度、主轴转速等工艺参数进行实时控制，使磨削处于最佳状态。

数控机床加工领域的发展日新月异，在实际磨削加工过程中，由于余量的不均匀，材料硬度不一，砂轮磨损变化等因素，使得实际加工中只能采用保守的磨削进给速度。而依靠操作工人的现场干预，其效果有限，且当速度稍高时，人工干预难以进行。由于上述因素，使得数控磨床的应有效能未能发挥，在磨削质量方面，不适当的磨削用量也会使机床工艺系统难以控制在合理范围之内，此外磨削中还应防止磨削过载，避免砂轮、工件和机床因过载而损坏。

自适应磨削加工技术就是解决上述问题的重要途径之一。

1. 自适应磨削技术简述

由机电运动方程式得知，在稳定磨削加工时，伺服电动机的电磁转矩应该与外加负载转矩相平衡，即$T_m=T_L$。而磨削加工时的磨削力F_c通过丝杠螺母副转化为磨削力矩T_c，成为负载转矩的一部分。机电传动系统中的转矩平衡方程式为

$$T_m=T_f+T_c+T_0$$

式中，T_f是折算到电动机轴上的摩擦力矩；T_c是折算到电动机轴上的磨削力矩；T_0是折算到电动机轴上的附加摩擦力矩。

$$T_f=F_0L_0/（2\pi\eta i）$$

式中，F_0是导轨摩擦力；L_0是滚珠丝杠导程；i是传动比；η是传动链总效益。

$$T_0=F_{p0}L_0/（2\pi\eta i）\times（1-\eta_0^2）$$

式中，F_{p0}是滚珠丝杠预加负荷；η_0是滚珠丝杠未预紧时的传动效率。

$$T_c=F_cL_0/（2\pi\eta i）$$

式中，F_c是进给方向的最大磨削力。

所以$T_m=L_0/（2\pi\eta i）\times[F_0+F_{p0}（1-\eta_0^2）+F_c]$

可见，交流伺服电动机的电磁转矩与磨削力之间存在一定的对应关系，当磨削力增大时，电动机的电磁转矩也应相应增大，由于电磁转矩与进给伺服电动机电流存在一定的线性关系，当磨削力增大时，电流也随之增大，反之亦然。通过测量进给伺服电动机的电流大小完全可以实现对实际磨削时磨削力的间接测量。如图1所示为总体方案控制流程。

建立理论上的进给伺服电流与磨削力的数学模型，通过两个霍尔电流传感器检测伺服电动机的两相定子电流i_A、i_B，通过三相平衡电流公式

$$i_A+i_B+i_C=0$$

得出另外一相定子电流i_C，通过矢量变化$（2/3）^{0.5}\rightarrow e^{i\theta}$，实现三相交流向单相直流$i_A$，$i_B$，$i_C\rightarrow i_{qs}$的转化，并通过该电流幅值的调整

$$T=K\times\Psi_f i_{qs}$$

实现伺服电动机输出电磁转矩与外加负载转矩的平衡

$$T=T^*$$

找出影响磨削力电流的信号，将该特征信号经过矢量运算送往微处理器。经过控制算法对进给速度倍率修调实现自动调

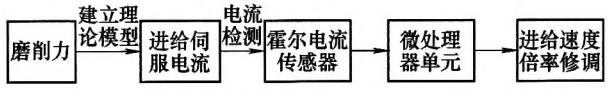

图1 总体方案

节。

2. 具体实施方式

如图2所示，霍尔元件利用电磁感应原理检测交变电流的大小，能在一个较大范围内基本保持线性关系，用于采集各进给伺服单元的单相电流信号，并送入控制器。

采用霍尔元件的电流传感器测量两相电流，选择合适范围的测量电阻R_m，将待测电流信号转化为0～5V的电压信号，进入A/D转换器进行变换，将结果输入CPU。

将合成电流信号送入自适应控制器后，其根据矢量合成电流信号所反应出的加工状态，通过模糊控制算法计算出进给速度的修调率（见图3）。

图4所示为模糊智能积分参数自动调整控制器原理图，以偏差e和偏差的变化△e为输入量，调节倍数W_{k1}、W_{k2}和W_{k3}为输出变量，建立调整规划表，将此表存储于计算机中，系统工作时，只需按输入的值查询相应的表格，求出调节量W_{k1}、W_{k2}和W_{k3}。

自动调整的步骤是：①以原始的K_1、K_2和K_3对偏差e和偏差的变化△e进行量化。②查调整表得出调整倍数W_{k1}、W_{k2}和W_{k3}，使$K_1^*=K_1\times W_{k1}$、$K_2^*=K_2\times W_{k2}$和$K_3^*=K_3\times W_{k3}$。③用调整后的K_1^*、K_2^*和K_3^*对偏差e和偏差的变化△e进行量化。④用重新量化的e和偏差的变化△e查控制表，

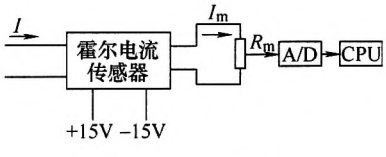

图2　电流测量电路框图

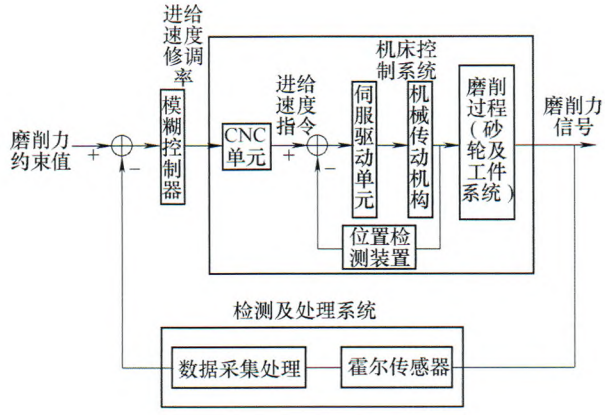

图3　模糊控制系统结构框图

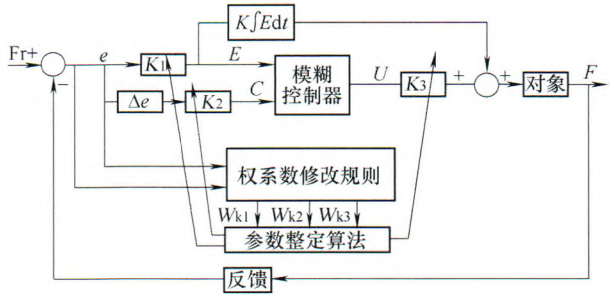

图4　模糊智能积分参数自动调整控制器原理图

得出控制量。⑤用比例因子K_3乘以U获得新的控制量。

自适应控制器输出的进给速度修调率通过RS232C通信协议，实现从外置PC机内存到CNC主机内存的直接传送。CNC系统在每一个采样周期内读取一次该内存区中的进给速度修调率，并通过与设定进给速度乘运算，可及时把运算结果传递给伺服电动机，来控制各轴的进给速度，以实现磨削力的自适应控制。

3. 结语

本方法为提高磨床磨削加工时磨削效率和磨削精度提供了重要途径。通过对影响加工效率和精度的物理量进行检测、建模和提取特征，自动感知加工系统内部状态及外部环境，快速做出智能决策，对进给速度、主轴转速等工艺参数进行实时控制，使磨削加工处于最佳状态。

采用此方法应用自适应加工技术，一般可以提高磨削工效20%～40%，结合现在CBN等新型砂轮的广泛应用，可以使磨削效率和磨削精度进一步提高。

参考文献：

[1] 胡俊达，胡慧. 自适应控制技术在数控与组合机床中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术，2004（11）：73-75

[2] 汪德才，李从心. 数控加工自适应控制研究与应用状况及关键技术[J]. 磨具技术，2001（6）：69-72

[3] 李水进. 基于进给伺服电流的铣削力间接测量与恒进给力加工控制技术研究[D]. 华中科技大学，2001.

MW（收稿日期：20170713）