

零件加工质量（尺寸和表面粗糙度） 在线检测技术研究

陈爱弟，王信义

（北京理工大学机械工程与自动化学院，北京 100081）

[摘要] 文章研究零件加工质量在线检测的方法和关键技术。在分析在线检测工件尺寸和表面粗糙度检测方法及特点的基础上，建立检测工件尺寸的神经网络和检测表面粗糙度的模糊神经网络，并且建立了零件加工质量在线检测系统。实验表明该方法能够正确地实时检测工件的尺寸变化和工件表面粗糙度。

[关键词] 在线检测；神经网络；模糊神经网络；尺寸精度；表面粗糙度

零件加工尺寸和表面粗糙度是零件加工质量的主要指标。为了避免或者减少零件在加工过程中的废品率和监测加工过程的状态，需要采用在线检测零件尺寸和表面粗糙度的方法。

目前在线直接检测工件尺寸和表面粗糙度还十分困难，主要原因是受种种条件，如检测传感器安装困难，切屑和冷却液飞溅等的限制^[1,2]。

由于影响零件加工质量的因素复杂，目前国内外对在线间接检测的研究还不多。笔者在分析零件加工尺寸和表面粗糙度检测特殊性的基础上，提出不直接检测工件的尺寸和表面粗糙度，而是通过监测切削过程的状态参数如切削用量、工件材料、AE（声发射）信号和振动信号等，用适当的方法在线间接检测工件加工尺寸和表面粗糙度^[1,2]。

本文首先分析在线检测零件加工尺寸和表面粗糙度的原理，然后介绍检测零件加工尺寸和表面粗糙度的方法和关键技术，最后介绍零件加工质量实时检测系统的组成及实验结果。

1 零件加工质量在线检测原理

1.1 零件加工尺寸在线检测原理

零件尺寸是由初始切削尺寸和切削过程中的尺

寸变化量组成的，初始切削尺寸决定于对刀精度。因此，所谓零件加工尺寸的在线检测，实际上是检测切削过程中工件的尺寸变化。

在正常加工条件下，影响工件尺寸变化的主要因素是刀具磨损、切削热引起的刀具伸长和工件膨胀，以及机床、刀具、工件组成的工艺系统弹性变形等，这些因素在理论上可以通过被监测的切削过程状态参数计算出来，刀具磨损还可以通过声发射信号和振动信号间接获得^[3]。但是各主要因素对工件尺寸变化的影响程度与规律各有不同，主要因素彼此间也互有影响，其中最主要的是刀具磨损对切削热和切削力的影响^[1]。

一批刀具本身由于刃磨质量、刀尖强度和几何角度的差异使其具有分散性，不同刀具在相同的切削时间其磨损量是有差异的。根据研究，同批的不同刀具在切削时间相同时磨损量有很大的不同^[1,3]。磨损量对切削热和切削力都有很大影响，但在用理论公式计算工件、刀具热膨胀和系统受力变形量时，在同一切削条件下，最后都归结为时间的函数，也就是说用不同刀具切削时，某一时刻在理论上，系统（刀具、工件、卡具）具有相同的热变形和相同的受力变形。实际上由于不同刀具在此

[收稿日期] 2000-07-10；修回日期 2000-08-28

[基金项目] 国防科技基金预研资助项目（96J18.3.1 BQ0147）

[作者简介] 陈爱弟（1974-），男，上海市奉贤县人，北京理工大学博士研究生

刻磨损量有差异,工件、刀具热膨胀量和系统受力变形量的实际值都与理论计算值有差异。这种差异需要通过刀具磨损量和切削时间这两个量进行补偿,然而这种补偿关系异常复杂,目前直接通过解析公式来确定这种补偿关系还比较困难^[1]。

笔者提出了在合理选择样本的基础上,利用神经网络建立输入输出间映射关系,通过刀具磨损量和切削时间对理论热变形和受力变形进行修正,从而达到在线检测零件加工质量的目的^[1]。

1.2 零件表面粗糙度在线检测原理

相对零件尺寸而言,影响零件加工表面粗糙度的因素更加复杂^[2,4]。从在线检测角度来看,影响因素越多,检测越困难。

为了便于检测,将零件表面粗糙度分解成基本表面粗糙度和附加表面粗糙度。切削进给量和刀具几何角度基本决定了加工零件的基本表面粗糙度,其它因素引起加工过程中零件表面粗糙度在基本表面粗糙度基础上的变化,称为附加表面粗糙度^[2]。

尽管零件基本表面粗糙度可以通过理论公式来求取^[1,4],但是由于刀具本身的分散性,刀具初始状态不相同,所以用不同刀具切削时基本表面粗糙度是不同的。由于附加表面粗糙度是由切削过程中的多种因素引起的,因此分析检测也非常困难^[2]。

在监测方法方面,由于人工神经网络具有网络学习联想能力、并行处理能力和一定的容错性^[5],目前作为研究热点在检测方法的研究中得到广泛应用^[6]。神经网络检测方法的缺点是容错的条件性。神经网络的容错性是在样本比较正确、样本输入间隔选择合适的条件下得出的^[1,4]。如果训练样本(输入输出)间隔过大,容错性就变得异常脆弱,造成很大的误差。在线检测零件表面粗糙度时,这个问题变得异常突出。因为影响零件表面粗糙度的因素很多,需要大量的样本数量,这使得利用纯粹的神经网络在线检测零件表面粗糙度变得十分困难。另一方面,有些状态参数的微小变化不会引起附加零件表面粗糙度的变化,有时候甚至可以忽略。因此没有必要追求间隔过小的样本输入。

模糊逻辑系统由于其高度容错性^[2,7],目前在检测方法的研究中备受关注。高度容错性主要是由于在推理过程中规则的前提不是点集而是模糊语言和隶属度,因此对样本的间隔要求不高。但是模糊逻辑存在着模糊规则库的获取和点隶属于模糊集合的隶属度的确定问题。模糊规则以往要由专家来确

定,隶属度的确定更是带有主观性^[2,7]。

笔者利用具有结构与参数学习的模糊神经网络,汇集神经网络和模糊逻辑两者的优点,用神经网络自动确定隶属度函数和最优逻辑推理规则,利用模糊逻辑系统的高度容错性来提高神经网络的容错性,将其应用到表面粗糙度的在线检测中^[2]。

2 零件加工质量在线检测关键技术

2.1 信号的特征优选

合理选择信号特征是模式识别和在线检测的关键之一。合理的特征具有时间上的稳定性和对检测对象的敏感性。

2.1.1 稳定特征的优选 笔者提出用模糊聚类特征优选法来优选稳定特征^[8]。模糊聚类特征优选法研究反映对象不同特征间的相似程度,它与用于模式识别和对象归类的普通模糊聚类不同。模糊聚类特征优选法是利用不稳定特征在不同时间检测,模糊分析后被明显地分在不同类中的特点,来剔除不稳定的特征,达到获取稳定特征的目的。

对于声发射信号而言,利用模糊聚类特征优选法发现均方根值、峰值因子、振铃计数、方差、幅度期望和陡度(四阶中心距)6个声发射特征是比较稳定的^[8]。

2.1.2 敏感特征的优选 尽管利用稳定特征可以满足在线检测的要求,但在稳定特征中包含不敏感特征,不敏感特征的引入必然造成信息冗余。尤其在利用神经网络作为检测方法时,不敏感特征使得神经网络的输入增加,网络计算复杂度呈几何级数增加^[5,7]。

笔者提出利用模糊神经网络中规则的自动获取来优选敏感特征。利用不敏感特征在最终规则的前提中模糊隶属度较小或者是所有规则的前提这一特点来剔除不敏感特征,从而达到优选敏感特征的目的^[8]。利用这种敏感特征优选方法发现,在稳定的声发射特征中幅度期望和陡度为零件表面粗糙度的不敏感特征^[2,8]。

值得指出的是稳定性特征的优选只考虑过程性而与具体检测过程中的对象无关,而敏感特征的优选则与检测对象有关^[8]。

2.2 磨损量的在线检测

刀具的磨损量会严重影响工件的加工质量,尤其是直接影响工件的尺寸,它还是修正理论热变形和受力变形的关键,因此要求比较正确地在线检测

刀具磨损量^[3,4]。

为了在加工过程中对刀具磨损量进行实时监测和预报，针对神经网络在监测刀具磨损量中存在的缺点，笔者提出了在选择合适的模糊聚类标准样本的基础上，利用模糊聚类方法，加以适当推理来在线检测刀具磨损量^[3]。实验分析表明，该方法在

刀具磨损量在线检测中具有较好的容错性和可分析性。在标准样本合适的条件下，利用模糊聚类方法能够正确地进行在线检测和预报刀具磨损量^[3]。

2.3 零件加工尺寸在线检测方法

根据零件加工尺寸在线检测原理，建立了如图 1 的神经网络来在线检测工件的尺寸变化^[1]。

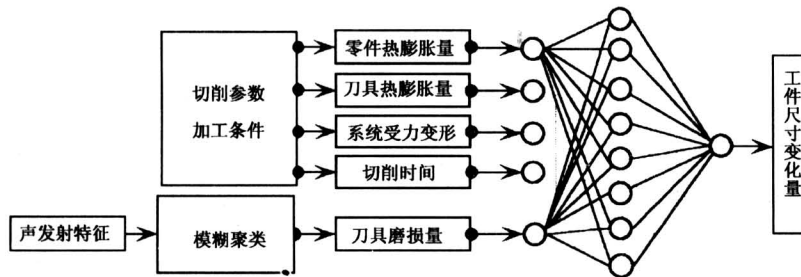


图 1 检测工件尺寸的三层神经网络结构图

Fig.1 Three layers neural network structure for detecting part dimension

神经网络的输入为工艺系统变形量、工件热膨胀量、刀具热膨胀量、刀具磨损量、切削时间 5 个输入量。神经网络的隐层按经验取 8 个节点。神经网络的输出为工件相对初始切削的变化量。刀具磨损量可根据预选的标准样本用模糊聚类的方法来确定，切削时间作为模糊聚类确定刀具磨损量的辅助判断量。切削过程中，以相同时间采集信号，切削完毕后，在信号采集处用千分表检测尺寸变化量，以此作为标准样本。实验结果表明该方法切削单个零件时能够正确地实时检测工件的尺寸变化^[1]。

2.4 零件表面粗糙度在线检测方法

根据零件表面粗糙度的在线检测原理，采用声发射信号的优化特征^[1~3,7]均方根值（RMS）、峰值因子、振铃计数、方差和振动信号的均方根 5 个特征参数作为模糊神经网络的输入；模糊神经网络的输出为附加表面粗糙度；零件材料硬度比和模糊神经网络输入的零时刻初始值作为神经网络的输入；神经网络的输出为工件基本表面粗糙度；系统输出为附加表面粗糙度和基本表面粗糙度的合成即表面粗糙度^[2]，如图 2 所示。图中， $\bar{x}_{\text{RMSAE}}(t)$ 、 $C_{\text{AE}}(t)$ 、 $N_{\text{CAE}}(t)$ 和 $\sigma_{\text{xAE}}^2(t)$ 分别为 t 时刻声发射信号的均方根值、峰值因子、振铃计数和方差； $\bar{x}_{\text{RMSAE}}(t)$ 为 t 时刻振动信号的均方根值； $\bar{x}_{\text{RMSAE}}(0)$ 、 $C_{\text{AE}}(0)$ 、 $N_{\text{CAE}}(0)$ 和 $\sigma_{\text{xAE}}^2(0)$ 分别为开始切削时声发射信号的均方根值、峰值因子、振铃计数和方差。

系统中的基本表面粗糙度虽然可以由理论公式确定^[2,4]，但是由于刀具的分散性^[2,3]，以不同刀具切削时基本表面粗糙度有很大的不同，通过理论计算必然造成很大的误差。所以采用以不同刀具切削时的初始特征值和基本表面粗糙度组成的神经网络来在线检测工件基本表面粗糙度^[2]。

实验结果表明该方法能够正确地实时检测工件的表面粗糙度。

3 零件加工质量实时在线检测系统

整个检测系统主要由传感器、信号处理电路、采集频率为 2.5MHz 的高速采集板和微机组成，检测系统框图如图 3 所示。

检测系统中的传感器为加速度计和声发射传感器。加速度计和声发射传感器都放置在垂直于切深方向的刀架侧面，声发射信号经过 40~150kHz 的带通滤波。

图 3 中，加工参数主要有工件长度、工件直径、工件材料、切削用量、切削时间、尾顶尖和主轴的刚度、刀具参数等，这些参数主要用于计算工艺系统变形量、工件热膨胀量、刀具热膨胀量和作为确定基本表面粗糙度神经网络的输入^[2,3]。刀具磨损量可根据预选的标准样本用模糊聚类的方法来确定，切削时间作为模糊聚类确定刀具磨损量的辅助判断量^[3]。切削前输入有关加工参数。开始切削工件时，微机采集传感器信号并提取信号特征，

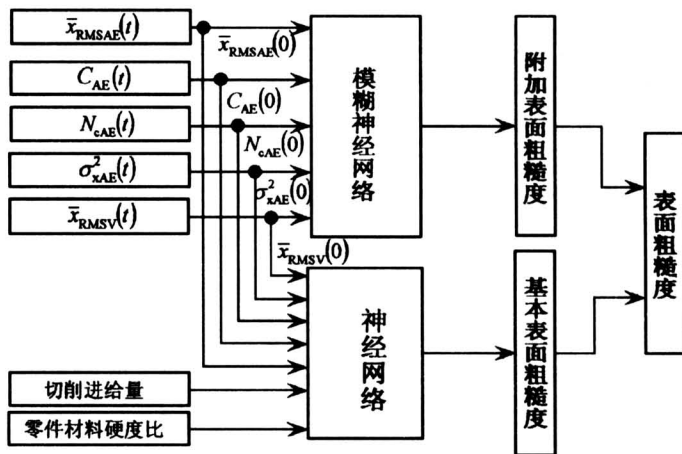


图 2 检测工件表面粗糙度的模糊神经网络结构

Fig.2 Fuzzy neural network structure for detecting part surface roughness

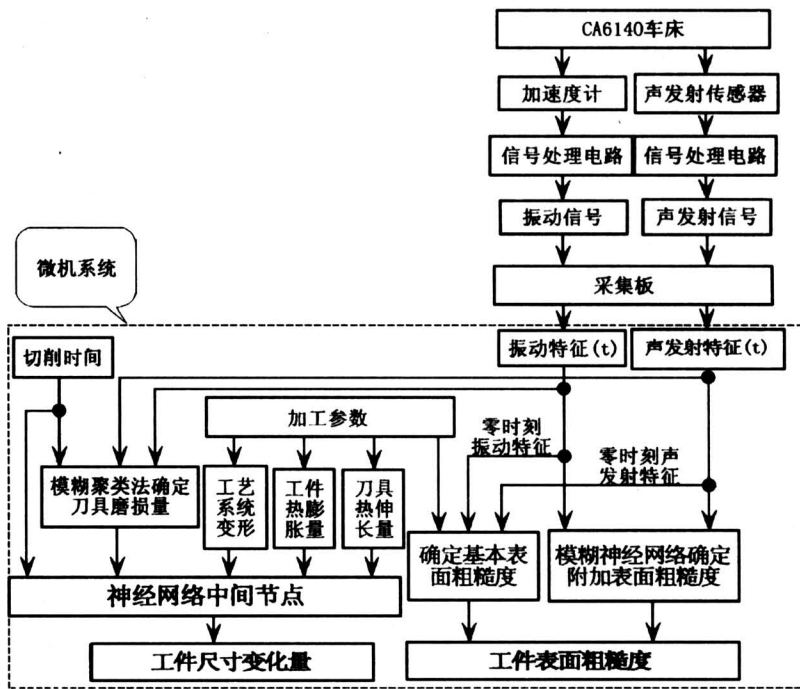


图 3 在线检测工件加工质量的系统框图

Fig.3 System diagram for detecting part quality

通过已训练好的网络获得该采集时刻的工件尺寸和表面粗糙度，如此循环下去，直到切削完毕。

工件材料为 45# 钢，调质处理硬度为 HB290，在切削速度为 98 m/min，进给量为 0.1 mm/r，切深为 0.8 mm 的条件下，任取 10 把 YT15 车刀做 10 组切削实验，切削过程中微机根据采集的传感

器信号对工件尺寸和表面粗糙度进行实时检测，得出的结果与切削完毕后实际测量的尺寸和表面粗糙度进行比较，结果表明系统实时检测值与事后实际测量值比较吻合。图 4 为系统实时检测的尺寸与事后实际测量值的比较，图 5 为系统实时检测的表面粗糙度值与事后实际测量值的比较。

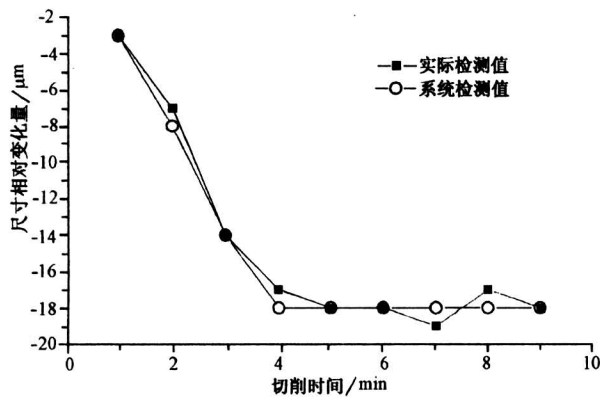


图 4 系统实时检测的尺寸值与事后实际测量值比较

Fig.4 Compare on-line detecting dimension with factual dimension

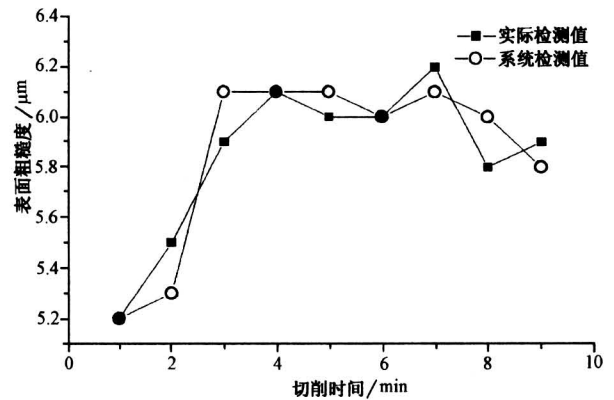


图 5 系统实时检测的表面粗糙度值与事后实际测量值比较

Fig.5 Compare on-line detecting surface roughness with factual surface roughness

4 结论

根据工件加工质量在线检测原理，分别建立了检测工件尺寸的神经网络和检测表面粗糙度的模糊神经网络，并且探讨了在线检测工件质量的关键技术。在此基础上建立了工件加工质量的在线检测系统。实验结果表明该方法能够正确地实时检测工件的尺寸变化和工件表面粗糙度。

参考文献

- [1] 陈爱弟, 王信义. 加工过程中尺寸在线检测技术 [J]. 制造业自动化, 2000, (10): 35~39
- [2] 陈爱弟. 零件加工质量实时在线检测技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2000
- [3] 陈爱弟, 王信义, 杨大勇, 等. 基于模糊聚类的刀具磨损量监测方法的研究 [J]. 北京理工大学学报, 2000, 20 (3): 270~276
- [4] 王信义, 计志孝, 张建民, 等. 机械制造工艺学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990
- [5] 焦李成. 神经网络系统理论 [M]. 西安: 西安电子科技大学, 1992
- [6] 邢济收. 刀具状态实时在线检测传感方式和检测方法研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 1997
- [7] 王士同. 神经模糊系统及其应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997
- [8] 陈爱弟, 王信义. 用于检测刀具磨损的声发射 (AE) 特征优选方法 [J]. 北京理工大学学报, 2000, 20 (3): 276~280

Research on On-line Detecting Method and Key Technologies for Part Quality (Dimension and Surface Roughness)

Chen Aidi, Wang Xinyi

(School of Mechanical Engineering and Automation,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

[Abstract] To research on on-line detecting method and key technologies for part quality, based on the analysis of methods and features of on-line detecting of part dimension and surface roughness, an artificial neural network system for on-line detecting of part dimension and a fuzzy neural network system for on-line detecting of part surface roughness are developed. The Scheme of on-line detecting method for part quality can detect part dimension and surface roughness correctly.

[Key words] on-line detecting; neural network; fuzzy neural network; dimension precision; surface roughness