

采用信息化故障诊断技术 提高数控装备智能化水平

Using Fault Diagnosis Technology of Information to Improve the Intellinent Level of NC Equipment

中航工业北京航空制造工程研究所 李初晔 王海涛 马 岩



李初晔

高级工程师,主要研究方向为结构动力学分析和优化计算,先后参与多项国家重大科技项目攻关,获国家发明专利 2 项,发表论文 40 余篇。

制造业是国民经济的支柱,而装备制造业是制造业的核心。国家 2012 年 1 月颁布的《工业转型升级规划(2011~2015 年)》将发展先进装备制造业列为第一项重点发展领域。作为先进制造装备的代表,数控机床制造业承担着如何转型升级的重大历史使命。

高档数控机床自动化程度高,一旦发生故障,检测和维修都比较困难。随着数控机床产品应用普及率的不断提高、高速化加工需求的不断增加,使得设备的故障诊断功能已成为用户选购数控机床产品时越来越重要的考虑因素。该功能既可以使机床制造商受益,又可以使机床制造商与用户建立起长期和密切的关系。

高档数控机床与基础制造装备已列入我国中长期科学和技术发展规划纲要确定的 16 个重大科技专项,数控机床作为大飞机制造中的关键设备,设计水平的高低直接影响飞机零件的性能。虽然近年来我国机床工业发展很快,但高精尖机床与国外先进水平相比差距依然非常明显。发达国家一直非常重视基础装备制造业的创新发展,美国国防部 2009 年公布的制造技术项目战略计划中,确立了制造技术在国防技术中的核心地位,其重点是通过传感器的广泛应用,使机床设计向自动化和智能化方向发展。根据该计划,美国正致力于研制能思考的智能机床,通过在机床各个部位甚至在材料本体内部植

入传感器和网络,对加工制造过程进行全方位监控,保证从设计到生产整个过程准确无误,提高飞机制造的精确性和可靠性^[1-2]。

故障预警与诊断技术 重要意义

众所周知,飞机结构件要求精度高且价格昂贵,加工制造非常复杂而且费时费力,为提高飞机构件的刚质比、可靠性和隐身性能,近来采用对大型整体金属板料“掏空”的方法来制造机翼、机身等大型零件,以替代由多个零件通过铆钉、螺钉联结方式拼装的大型零部件,有些零件的加工去除率甚至达到 98%,加工过程中一旦出现故障造成的损失是惊人的。

由于机床在加工过程中出现不可预期的故障,如随着主轴或丝杆温度的升高,机床部件会发生热变形,使加工的零件精度达不到设计目标,更有甚者是量变到质变的积累,出现甬刀、甬刃、传动部位严重磨损而突然断裂等严重事故,除了使机床发生严重损坏外,还使加工零件彻底报废,造成极大的财产损失^[3]。

就像自然界任何灾变发生之前都有预兆一样,数控机床加工中出现的这些严重故障在发生之前也有迹象可寻,如随着刀具磨损的增大,切削热、噪声和振动信号都会有明显的改变,通过实时在线检测这些信号的变化,根据其特征值的变化范围可以提前对刀具的加工状态分级预警^[4-5]。目前大部分电主轴内都安装了振动和温度传感器,用于实时记录加工过程,并将采集到的加工过程信息通过数控系统显示,操作人员可利用这些数据对加工参数进行优化,如调整主轴转速和进给速度以减少故障发生的概率。但对于机械驱动装置,由于其结构和信号状态的复杂性,现在国内所见的数控机床上都缺少信号检测装置^[6]。为提高机床的智能化水平,目前,我国一些飞机主机厂、研究院所及高校等部门对数控机床的故障预警和诊断进行了深入的研究,其根本任务就是通过测取设备上相关检测源的信号来识别设备的运行状态,达到设备诊断的功用,防患于未然,并根据具体诊断结果采取相应的处理措施。

故障诊断是一种了解和掌握设备使用状态,确定其整体或局部是否运转正常,早期发现故障及其原因,并能预报故障的发展趋势的技术。这种技术日益得到重视,主要原因在于制造业的迅速发展。随着数控装备工作强度的不断增大,生产效率、自动化程度越来越高,同时设备结构更加复杂多变,各部分的关联也越加密切,柔性程度提高很快。所以,即

使是某个地方的一个微小故障,也有可能爆发连锁反应,导致整台设备乃至于设备有关的环境遭受灾难性的毁坏。这不仅造成巨大的经济损失,严重时还会危及人身安全,后果不堪设想。设备的诊断技术能够获得发展的另一个原因是维修体制的改革,可以大大降低设备的维修费用,逐步摒弃计划维修的不合理性,通过实施工况监控和故障诊断技术,最终实现可靠高效地发挥数控装备应有的功能,并且提高设备的使用寿命。

机床故障预警诊断系统研究内容

数控机床集机械、电气、液压和气动等模块于一体,具有知识融合和技术密集的显著特点。如果在使用过程中发生故障,诊断的难度较大,特别是侧重于机械零部件的检测和诊断更为困难,不易收集到相关的有效信息,并作到及时反馈,通常情况下误诊率也很高,因而对故障预警的需求愈来愈强烈。

数控机床故障预警和诊断系统的研制是为了实现数控机床在线和远程故障预警和自动诊断,对机床关键部件加工状态进行监测,研究关键部件发生故障的机理,建立关键部件的故障模型,并在此基础上实现对机床设备的故障预警和诊断。主要研究内容包括:

- (1) 高档数控机床工作状态信息的在线采集技术;
- (2) 监测信号提取与识别;
- (3) 多传感器信息的智能融合技术;
- (4) 关键部件的故障机理研究;
- (5) 数控机床加工状态的实时在线显示;
- (6) 智能化故障预警和诊断技术;
- (7) 故障预报系统与MES系统的无缝集成。

机械故障会产生各种与之对应

的信息,如温度、振动、噪声等,信息获取是机械故障诊断的前提和基础。从机械系统获取的各种信息不仅仅是故障信息,还包括了大量的与故障无关的信息成分,而且一般情况下无法直观地从信息的表象判断故障。这一点以振动信号尤为显著,在机械系统的振动信号中,既包含了故障引发的振动信号分量,也包含了机械运转产生的正常振动信号分量。同时,受采样频率的限制和测试噪声的影响,原始的时域振动信号杂乱无章,无法直接识别出信号的内在特征。因此,需要利用信号分析方法从信号中提取故障引发的特征信息,以便于人工识别或计算机智能识别,这一步骤被称为特征提取^[3-4]。

在特征提取之后,需要根据特征提取结果判断故障和分析机械运行状态,通过阈值的设定将设备运行状态进行分级预警。在目前的情况下,专家系统、神经网络等方法还不能直接识别故障特征信号,所以只有深入研究故障产生的机理,从故障引发的各种现象中挖掘出最典型、最独特、与故障有确定性关系、对故障最敏感的信息,通过一次和二次故障特征提取,对机床加工状态进行实时预报^[1-2,6]。

故障信息一次特征提取方法的典型代表是时域同步平均技术和阶比分析技术,并已在旋转机械故障诊断中得到广泛应用。DASP-RAM-MOL在线监测和故障诊断系统通过对齿轮轴承等旋转机械的信息提取建立旋转机械的典型故障图谱,对比轴心的轨迹变化判断机械故障,实现机械设备长期运行中的自动报警。

状态信号实时在线采集及常见故障原因分析

在信号采集阶段,研究的主要内容是机床检测部件和检测部位的确定,传感器的选型安装和定位,监测

信号的采集和前期预处理。在测试中通常先将被测对象输出的物理量转换为电量,然后根据需要对变换后的电信号进行处理,最后以适当的形式显示、输出。

1 机械主轴和主轴箱体信号监测与故障特征

(1)随着加工的进行,刀具磨损加重,加工零件精度受到影响,需要通过传感器采集信号预测这种量变的过程;刀具磨损积累到一定程度发生质变,出现崩刃甚至刀具断裂现象,在这一过程中,实时在线采集到的信号会有预兆,如振幅和噪声会显著增大,通过对采集信号的处理,设定阈值对故障预警。

(2)随着主轴温度的升高,主轴热变形增大,轴向伸长。若主轴伸长量超出一定范围,将影响零件的加工精度,导致废品的产生。在机床设计阶段通过增加一些传感器对主轴振动和温度进行实时监测是非常重要的。其通过采集主轴温度,设定阈值对主轴温升实时报警。

某国产三坐标高档数控机床的主轴箱部件,主要对主轴前端径向振动、主轴前轴承温度和主轴箱内噪声进行监测,在主轴前端布置一个振动和温度传感器,主轴箱体内布置一个噪声传感器。

2 传动丝杠的信号监测

滚珠丝杠的设计以循环滚珠原理为基础,初始的预紧力非常重要。只有施加合适的预紧力,驱动系统才能达到最佳运转状态,此时的系统稳定性最大、磨损量最小、产生的热量最小。因此,预紧力不当导致丝杠驱动精度降低是丝杠容易发生的第1种主要故障。丝杠的抗弯刚度和模态频率会随着预紧力的提高而增加,当预紧力过小时会增大丝杠的弯曲,进而增大丝杠的磨损;当预紧力过大时,丝杠刚度和频率值很大,会在工作中出现高频振荡。预紧力与丝杠刚度和频率值之间的关系可

以采用有限元分析工具进行详细研究^[7-8]。

丝杠易发生的第2种故障是由于摩擦生热降低了丝杠的弯曲刚度,进而加大了丝杠的磨损。金属材料都有热软化的特性,随着温度的提高,材料的弹性模量降低。通过对丝杠材料热特性的研究建立起丝杠弯曲变形量随温度的变化规律,从而实现这一故障的分级预警。

丝杠容易发生的第3种故障是由于丝杠内部滚珠的磨损导致丝杠与螺母之间产生间隙,随着磨损的加剧间隙也随之增大,积累到一定程度导致进给换向时产生冲击,从而影响加工精度。

综合以上分析,为实时掌握丝杠在工作中的运行状态,预测故障的发生,需要对振动、噪声和温度信号进行实时监测。如四川长征718机床床身Y向丝杠的传感器布置方案为:通过安装支架把振动、温度和噪声传感器分别安装在丝杠螺母附近,以监测其运行状态。

故障信息阈值合理设定研究

通过信号提取得到很多种信息,

包括振动信号、温度信号和噪声信号等,对同一种信号比如振动量,不同监测部位的振动幅值大小会有较大差别,报警阈值的合理设定显得尤为重要^[9]。

故障的本质特征是使加工零件精度达不到设计要求,各路信号变化都会对最终加工刀具末端造成位置误差,从而影响加工零件的精度。有些信号影响是直接的,如安装在主轴部位的加速度传感器,经过实时积分变换得到瞬态位移,位移幅值的大小反映了加工偏差。另外一些信号是间接影响加工精度,如安装在工作台上的温度传感器,导轨面温度不均匀会影响导轨直线度,进而加剧导轨滚动块的磨损和振动,使加工出现偏差。监测信号门限值的合理设定是故障预警的前提条件,一直以来是信号采集处理和自动监测技术的研究重点,为了避免发生误判和漏判,选择一个快速准确的判别函数是实现在线监测和控制的关键^[7-8]。

DASP-V10经过信号采集处理可以得到各种参数,表1列出了一些参数的定义。加工过程从稳定状态向颤振或共振状态过渡时,在时域上振动幅值将增大,在频域上信号主要

表1 DASP-V10各种报警监测参数的定义

最大峰值	$\bar{X} = \max x(t) $	平均值	$\bar{X}_p = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$
平均幅值	$\bar{X}_p = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$	有效值	$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$
方根幅值	$X_r = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{x(t)} dt \right)^2$	标准差	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \bar{X}]^2 dt}$
偏度指标	$a_3 = \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \bar{X}]^3 dt$	偏态因数	$C_s = \frac{a_3}{\sigma^3}$
峭度指标	$a_4 = \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \bar{X}]^4 dt$	峰态因数	$C_s = \frac{a_4}{\sigma^4} - 3$
波形因数	$K = \frac{X_{RMS}}{\bar{X}_p}$	脉冲因数	$I = \frac{\bar{X}}{\bar{X}_p}$
峰值因数	$C = \frac{\hat{X}}{X_{RMS}}$	裕度因数	$L = \frac{\hat{X}}{X_p}$

频带将从高频段向低频段移动,信号能量在频域上的分布由分散变为集中。这些参数中,最大峰值参数、平均值参数、平均幅值参数和有效值参数能很好的反映振动量的大小,可以作为评价振动大小的标准数据,并且在开发出的故障诊断系统上这些参数的变化都将实时展现在视屏上,帮助机床加工人员对机床的工作状态有更直观的了解。但是,不同部位振动量的幅值是不一样的,有时相差会很大,这对制定门限值不利。

1 信号的方差分析

信号的方差 σ^2 (DASP 参数中标准差的平方) 是反映信号在时域中幅值变化趋势的一个理想特征量,若从采样数据计算,计算公式为^[10]:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2, \quad (1)$$

式中, x_i 为采样信号; \bar{x}_i 为采样信号的平均值; N 为采样点数。

方差能较好的屏蔽一些杂音信号,使待考察的故障特征清晰的浮现出来,利于计算机自动判别的软件实现。图1是某机床加工时采集到的时域振动信号,图2是该信号的实时方差。对比这2种状态,能明显看出

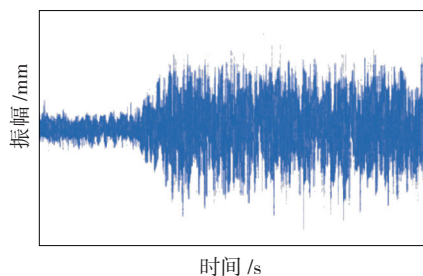


图1 某机床加工时的颤振信号

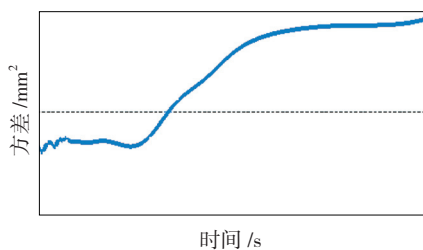


图2 颤振信号的方差

机床发生颤振时振动能量明显加大,信号的方差能很好地表达出振动幅值的变化情况,但是如果信号中混入较大的杂音,引起时域波形局部显著放大,采用方差可能会造成故障误判现象^[11]。

2 信号的互相关分析

方差分析是仅针对一路信号作出的数据统计,在信号杂音较大的情况下会影响故障诊断的准确性,而且也存在阈值设定的难题^[10-11]。互相关函数通过对两路信号进行分析,可以在监测部位采集两个方向的振动信号,对于两路信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间的关系表示为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t + \tau) dt. \quad (2)$$

互相关系数的定义如下:

$$\rho_{xy} = \frac{R_{xy}(\tau) \bar{X} \cdot \bar{Y}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (3)$$

式中, \bar{X} 、 \bar{Y} 为信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的平均值; σ_x 、 σ_y 为信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的标准差。

研究表明,互相关系数 ρ_{xy} 具有很好的值域性,其绝对值大小总是在 $[0, 1]$ 的区间内,因此通过互相关分析就有可能统一制定不同信号的门限值。将门限值的范围限制在 $[0, 1]$ 区间内,后期通过一段时间的实验将门限值调整到合理的范围,使故障诊断的结果更加精确。

结束语

高档数控机床自动化程度高,一旦发生故障,检测和维修都比较困难。随着数控机床产品应用普及率的不断提高、高速化加工需求的不断增加,使得设备的故障诊断功能已成为用户选购数控机床产品时越来越重要的考虑因素。该功能既可以使机床制造商受益,又可以使机床制造商与用户建立起长期和密切的关系。

通过数控机床故障预警与诊断系统的研制,能迅速有目的地查明原

因并确定故障部位,实现预知维修,及早发现故障隐患,减少机床停机时间、防止突发事故、提高生产率。另外,在机床生产调试、使用和维修中起重要的指导作用。故障诊断和远程监控功能可以直接组合到控制系统中,这些功能都是获得机床最大利用率的先决条件,特别是在与自动化设备连接时更是如此。

最近的发展趋势是,利用集成传感器(自适应控制)探测到的数据,通过专门的技术主动干预加工过程。

参考文献

- [1] 闻邦椿,武新华,丁干. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验. 北京: 科学出版社, 2004: 210-223.
- [2] 沈国际,陶利民,徐永成. 时域同步平均的相位误差累积效应研究. 振动工程学报, 2007(4): 335-338.
- [3] 李辉,郑海起,杨绍普. 基于幅值和相位解调分析的齿轮箱起动过程故障诊断. 振动与冲击, 2008(2): 8-11.
- [4] 马辉,赵鑫,赵群超,等. 时频分析在旋转机械故障诊断中的应用. 振动与冲击, 2007(3): 61-63.
- [5] 张龙,熊国良,柳和生,等. 时变参数模型及其在非平稳振动分析中的应用. 振动与冲击, 2006(6): 49-53.
- [6] 于英华,徐兴强,徐平. 切削颤振的在线监测与控制研究现状分析. 振动与冲击, 2007(1): 130-134.
- [7] Soliman E, Ismail F. Control System for chatter Avoidance by Ramp ing the Sp indle Speed. Manufact Science and Engineering, 1998, 120(4): 674-683.
- [8] Peng Z, Chu F, He Y. Vibration Signal Analysis and Feature Extraction Based on Reassigned Wavelet Scalogram. Journal of Sound and Vibration, 2002, 253(5): 1087-1100.
- [9] 刘成瑞,傅惠民. 基于方差随机序列的故障诊断方法. 机械强度, 2006, 28(2): 190-195.
- [10] 黄大荣,黄席樾. 基于方差约束控制的专家系统故障预测技术研究. 计算机仿真, 2005(12): 114-116.
- [11] 徐惠钢,薄煜明,杜国平. 基于特征频率功率谱方差的故障实时检测. 东南大学学报(自然科学版), 2003(S1): 130-133.

(责编 三丰)