

刀具监控技术 在金属切削过程中的应用

Application of Cutting Tool Monitoring Technology in Metal Cutting Process

南昌航空大学航机学院 龚廷恺 王细洋



龚廷恺

硕士,南昌航空大学航机学院助教,主要从事高速切削加工过程中刀具监控系统开发和理论方法研究。

从1870年俄国学者基麦教授开始进行金属切屑形成过程研究开始,经过众多学者1个多世纪的努力,金属切削加工理论体系和工程实际应用的规范才得以完成。在这个阶段,人们主要力图认识切削过程的本质及其内在规律(如切屑形成过程、切削力、切削温度、刀具磨损与耐

刀具的监测技术是集切削加工技术、传感器技术、信号处理技术、微电子技术和计算机技术为一体的综合系统,它的发展是现代化制造技术的重要组成部分,也必将随着制造技术的发展而发展。

用度、切削加工性、加工表面质量、切削用量、刀具几何参数选择等),并以此来指导并服务生产。这个时期的刀具切削状态监控主要是靠人与机械结合来实现的^[1],所以不可避免地存在下列问题:一方面,如果刀具磨损量低于磨钝标准,则会因为刀具的实际寿命没有得到充分利用而带来浪费,增加制造成本;另一方面,如果刀具磨损量高于磨钝标准,刀具已经磨钝或破损,工件的加工表面质量和尺寸精度则会受到影响,严重时甚至会损坏机床。此外,在自动化加工、无人化加工以及自适应加工过程中,不仅要求能够在加工过程中实时获知刀具的准确磨损状态,而且还要求根据刀具的磨损状态改变切削参数,以便优化生产率和加工质量。

解决这些问题的关键在于对实

际加工过程中的刀具状态进行自动和实时地检测。这一工作的重要性正如美国学者B.M.Kramer在CIRP第35届年会上所说,在提高计算机集成制造系统生产率方面,没有任何一项技术比准确地估计刀具寿命更重要^[2]。

刀具监测技术的发展历史

自从有了切削加工技术,随之而来的就是刀具监测问题。然而,在切削加工技术发展的各个阶段,检测的内容与自动化程度是不同的。一般地,刀具监测技术是随自动化技术的发展而发展的。总的来说,切削监控技术的发展大致可分为3个阶段:

第1阶段:人工检测阶段。在这个阶段,刀具状态监测主要依靠操作者个人的经验来完成,多为定性、直

观而简单的监控过程。

第2阶段: 机床进入程序控制时代。这时的刀具状态监控多采用人工强迫定时成组换刀(此阶段为20世纪50年代末至80年代)。这种方法是以牺牲刀具的利用率来保证加工可靠性的,因此会产生较大的浪费和加工成本的提高。

第3阶段: 加工系统进入数字化控制或柔性化控制时代(20世纪80年代以后)。高性能传感器和高速电子计算机的应用,使切削状态实时监控成为可能。此时切削时的刀具状态可以由传感器检测、由监控系统进行控制和管理,不需要人为实时干预,从而实现真正意义的自动加工,即人工智能监控下的自动化加工、遥控加工等。

刀具监测方法

现代工业生产中,生产方式的改变和市场竞争的需要促使计算机辅助的自动化加工迅速发展。刀具磨损监测系统作为自动化加工系统不可缺少的组成部分,日益受到国内外研究人员的重视。

一个理想的刀具状态监测系统必须能够对刀具在加工中出现的各种异常进行可靠监测,如检测刀具的破损、刀具的非正常切入及碰撞以及刀具不同部位的磨损等。针对刀具损坏形式的不同,出现了不同研究目标的刀具状态监测系统,主要包括:

(1) 刀具破损监测系统: 以检测刀具突发性损坏为目标,不能准确判断刀具的磨损状态。

(2) 刀具磨损监测系统: 以准确检测刀具实际的磨损状态或具体的磨损值为目标,包括刀具磨损分类和刀具磨损量计算。

经过长期研究,刀具破损以及非正常切入、碰撞等问题已基本得到了圆满地解决。刀具磨损监测却由于磨损过程的复杂性而一直未能获得圆满的解决方案,这也是国内外研

究人员致力于刀具磨损监测技术研究的原因。

综合国内外检测刀具磨损的诸多方法,根据刀具磨损量检测原理的不同,刀具磨损检测主要分为直接检测方法和间接监测方法。

1 直接监测方法

直接测量刀具磨损量或刀具破损的方法称为刀具状态的直接监测方法。常用的方法主要有接触法、放射线法和光学检测方法。直接检测刀具磨损的传感器有接触探测传感器、光学显微镜、高速摄像机等。

(1) 接触检测方法。

接触探测传感器于1974年由Renishaw发明,它能够检测刀具的磨损和破损程度。检测时,旋转刀具,让刀具后刀面接触传感器,它根据刀具加工前后的直径变化获得刀具的磨损量,并根据刀具的接触力大小判断刀具的破损程度。德国Malto公司利用该方法研制的刀具破损监测装置,能够成功监测刀具的破损情况。该方法检测精度较高,但只能在停车时进行检测,不能用于实时监控。

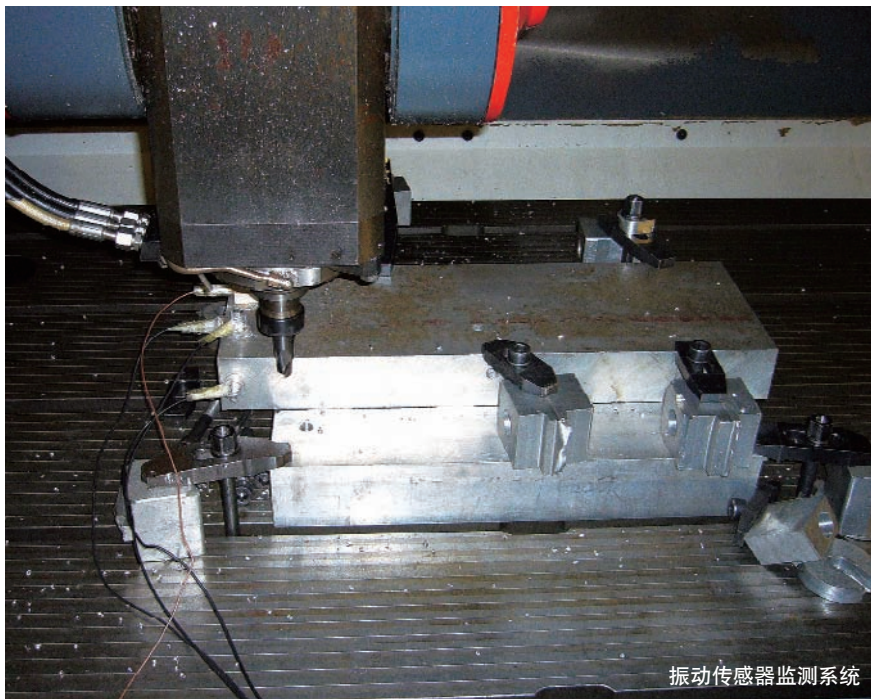
(2) 放射线检测方法。

由Massachusetts技术研究所开发的放射线检测装置,用于检测刀具是否达到预先指定的磨损状态,此方法预先在刀具后刀面设定的位置,放置少量放射性物质,在切削周期的间隙中定期用盖革-弥勒离子管检查放射物质是否存在。如果该物质不存在,就说明已经达到磨钝标准。此方法的缺点是不能进行实时监控,并且具有放射性污染。

(3) 光学检测法。

通过光学传感器获得刀具磨损区域的图形,并利用图像处理技术得到刀具的磨损状态。和其他检测方法相比,采用光学法检测刀具磨损的优点是: 不受切削条件和工件材料影响,能够同时获得刀具多个磨损模式的图形,便于整体了解刀具的磨损形态; 缺点是易受加工方式的影响,许多加工方法无法采用光学法监测其刀具状态,此外,冷却液的使用、切屑及光源都会影响图像质量,获得清晰和完整的刀具图形并非易事。

文献[3]介绍了一种新型的激光位移传感器监测系统,直接测量刀具的空间图像,测量精度达 $40\mu\text{m}$,而且能够避免冷却液和切屑对监测的



干扰。

2 间接监测方法

通过监测与刀具磨损或破损密切相关的传感器信号,并利用建立的刀具磨损或破损与传感器信号特征之间的数学模型,间接获得刀具磨损状态的方法称为刀具状态的间接监测方法。

间接监测刀具磨损的传感器有:振动传感器、测力仪、声发射传感器、扭矩传感器、电流传感器和功率传感器等。与直接监测刀具磨损的方法相比,间接测量方法具有不影响加工过程、可连续监测的优点,更适宜在线监测。因此,大多数国内外学者都利用这种方法来研究刀具磨损监测中的相关技术难题^[4]。

(1) 基于振动(加速度)的监测技术。

切削过程中,振动信号包含丰富的与刀具状态密切相关的信息,它主要由切削力中的动态分量引起,且与刀具-工件-机床构成的切削系统本身的动态特性密切相关。在具体应用过程中,与力信号分解方式一样,振动信号被分解为3个方向的振动。根据不同的加工方式,可选择不同方向的振动信号来监测刀具磨损。

测量振动信号的传感器是加速度传感器,传感器通过磁力直接吸附在工件表面,安装非常简便,但是不同的安装位置对信号也会产生不同的影响,这也是使用振动信号监测刀

具状态实用化进程的一个障碍。

文献[5]使用振动信号监测刀具状态,分别采用通过建立振动信号与刀具磨损的回归模型,或抽取振动信号与刀具磨损相关的不同特征的方法监测刀具磨损的变化,均达到了一定的效果。

(2) 切削力监测技术。

研究表明,作为加工过程中最稳定、最可靠的信号,切削力信号与刀具磨损和破损密切相关。此外,测力传感器在工业上的成功应用,使得切削力监测技术成为刀具磨损监测研究领域应用最广泛、最具优势的方法。

文献[6]通过抽取切削力信号的不同特征,利用神经网络建立了刀具磨损与切削力的映射关系,对刀具磨损状态进行识别或计算精确的刀具磨损值。

(3) 基于电流和功率的监测技术。

刀具磨损时切削力增大,从而造成切削功率和扭矩的增加,使得机床电机电流增大,负载功率也随之增大,因此部分研究人员采用监测电流或功率的方法识别刀具磨损状态的变化^[7]。

电流监测方法和功率监测方法具有安装简易、测量信号简便、成本低、不受加工条件限制、不干扰加工过程等优点,因此成为一种广泛采用的监测方法。而分辨率低和响应慢

的问题成为限制该方法发展的关键,尤其在精加工时,进给量和切削深度的改变对机床功率和电流的改变影响很小,识别精度无法提高严重影响了它的应用范围。

(4) 基于温度的监测方法。

由金属切削机

理可知,随着刀具磨损量的增加,切削温度明显升高,温度升高的同时也会加速刀具的磨损,因此刀具磨损和温度变化密切相关,可以利用这一因素进行刀具状态监测。

传统测量温度的传感器是热电偶,然而在实际加工中几乎没有一种工件允许在其内部埋置热电偶,且热电偶热惯性大,响应慢,因此不适合在线监测。

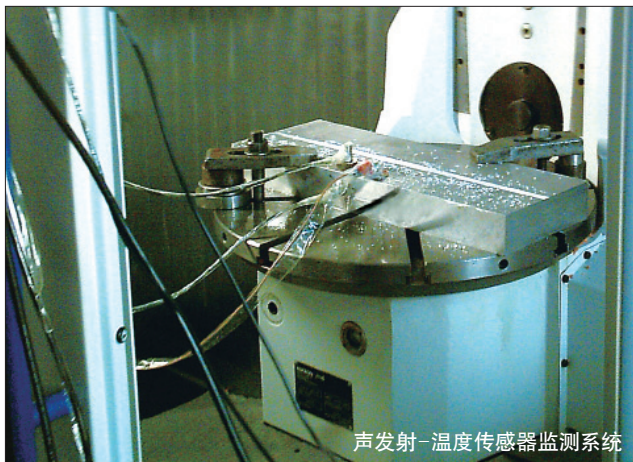
利用红外线辐射方法可以间接检测切削温度。将红外辐射感温器对准切削区,由它接收切削区红外辐射强度的变化。由于切削区的红外辐射强度与其温度高低有直接联系,这样红外辐射温度计的读数将反映切削区温度的变化,从而间接测量了刀具的磨损和破损程度。该方法的原理很完善,但在实际加工中,因为切屑经常缠绕刀具,或工件等对切削区的阻挡,可能无法顺利获得切削区的切削温度。另外,在使用切削液时,该方法的使用将受到更多限制。

(5) 超声波监测法。

用来检测刀具状态的超声波传感器是一套超声波发射和接收装置。在机械加工过程中,将一束超声波打在刀具磨损表面或工件的已加工表面上,随着刀具磨损程度变化,由刀具反射回的超声波能量也随之变化。另外,刀具磨损变化也会引起已加工表面粗糙度的变化,由已加工表面反射回来的超声波能量也发生变化。通过对接收到的能量变化进行检测,就可以间接获得刀具磨损状态^[8]。

(6) 声发射监测法。

声发射(Acoustic Emission, AE)信号是金属材料在受力后发生品格位错、裂纹扩展和断裂时释放出一种超高频应力波(一般为0.1~1MHz)的脉动信号。声发射监测法的优点是:避开了切削过程中振动音频噪声污染严重的低频区,受切削条件变动影响比较小,抗环境干扰的能力较强。由于声发射信号能直接



反映金属材料内部晶格的变化,所以有可能对刀具破损进行预报,被认为是一种很有前途的刀具磨损与破损监控方法。近年来,在日本和美国掀起了一股研究 AE 监控热,许多公司竞相开发 AE 监控仪。国内清华大学、哈尔滨工业大学、华中理工大学、西北工业大学等也开展了这方面工作。

AE 信号非常灵敏,一旦刀具发生破损,甚至是破损游瞬间,AE 信号的特征量或特征参数就会有显著变化,所以说它对刀具破损的检测相比功率法、电流法具有明显的优势。在进行切削量变化较大的加工(如 FMS、MC 等)时,可将 AE 法与电机功率法或电流法结合起来,不但能扩大监控范围,而且可提高监控的可靠性。

表 1 总结了各种刀具磨损监测方法的特点应用范围。

以上介绍的方法都是通过各种传感器技术采集数据进行相应的分析,这些传感器信号的分析方法有以下几类:

(1) 单因子法: 包括阈值法和专家系统、模型决策等。

(2) 多因子法: 包括多传感器信息融合法、模式识别、聚类分析、人工神经网络、模糊决策、基因遗传算法和混沌算法与控制。

(3) 时-频分析法: 包括时域法、频域法和时频分析方法。

国内外刀具监测技术的发展状况和趋势

1 发展状况

从刀具监测技术来看,刀具监控与数控技术、柔性加工技术、CIMS 技术等是同步发展的。近年来,德国、法国、美国、瑞典、日本、意大利等国已开发出多种实时监控系统,有的与本公司生产的机械加工设备配套的,如德国的 SANtec Automation 公司、吉德曼公司、蒂森公司等开发的刀具破损监控仪都是为该公司生产的加工中心配套,美国有名的机床生产厂家辛辛那提-兰姆公司开发的加工过程监控器也专为该公司生产的车削加工中心配套。

目前,国外刀具监控仪(系统)开发归纳起来有以下几个特点:

(1) 检测方法多样化。

(2) 监控功能不断扩展。

(3) 致力于提高监控的可靠性。

(4) 刀具状态(磨损和破损)检测能力在提高,但其预报的能力仍然较差,多产生误报、迟报。

2 发展趋势

刀具监控技术总的发展趋势是进一步提高刀具监控系统灵敏性、实

用性和可靠性,向着真正智能化方向发展。

(1) 继续研究开发高可靠性、高灵敏度、高寿命、抗干扰能力强的监控专用传感器。

(2) 采用多传感器、多监控模型进行信息集成与融合。由单监控向多参数监控发展,加大信息量,提高决策精度。

(3) 提高智能监控水平,进一步完善和提高智能化系统的自组织、自学习、自适应、自我诊断、自我决策能力。探讨既精确又快捷的神经网络、模糊模式识别等新算法。

(4) 为实现高质量的刀具监控,监控的基础理论和技术的研究仍是非常重要的,刀具失效的本质和机理,监控信号和监控目标的内在联系要进一步深入探讨。特别是刀具磨损的在线检测和刀具破损的预报,及其超前控制,将是未来的攻坚项目。

(5) 监控系统与主机交联或一体化也将是未来的发展方向。要使监控系统正常而稳定地发挥作用,必须改变原有的主机设计观念,使监控系统成为主机的组成部分,而不是一个“附件”或“多余的累赘”。如把力传感器(力、声发射等)装入机床主轴,使测力测温轴承成为机床的必要零部件,其控制系统也与主机交联,执行器也属机床的一个部件等。这样就会显著提高监控系统的可靠性、降低制造成本,便于推广使用。

结束语

刀具的监测技术是集切削加工技术、传感器技术、信号处理技术、微电子技术和计算机技术为一体的综合系统,它的发展是现代化制造技术的重要组成部分,也必将随着制造技术的发展而发展。

本文有参考文献 8 篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 小颖)

表 1 刀具磨损的监测方法

监测方法		适用范围	特点
直接监测法	光学法	各种加工	分辨率高,成本高,易受加工环境影响,实用化困难
	接触法	车削加工	受温度和切屑影响
	放射线法	各种加工	对人体有危害,已停止使用
间接监测法	切削力	车、铣、钻等	灵敏度高,工作稳定,价格高
	功率(电流)	车、铣、钻等	灵敏度低,响应慢,成本低
	振动	车、钻、铣	单独使用效果差,易受环境影响
	切削温度	车	灵敏度低,受冷却液影响大
	超声波	车、铣	适于精加工,非接触测量
	声发射	车、铣	对刀具磨损敏感,有较大应用价值