高速切削技术现状与展望

同济大学现代制造技术研究所 （上海 200092） 陈炳森 吴军一

一、概述

迄今为止，切削加工仍是机械制造领域应用广泛的一种加工方法。集高效率、高精度和低成本于一身的高速切削加工技术的迅速崛起，正对机械制造业的发展产生着深远的影响。

高速切削加工概念首先是由德国的 C.Salomon 博士提出，并于 1931 年 4 月发表了著名的切削速度与切削温度的理论。该理论的核心是：在常规的切削速度范围内，切削温度随着切削速度的增大而提高，当到达某一速度极限后，切削温度随着切削速度的提高反而降低。此后，高速切削技术的发展经历了以下四个阶段：高速切削的设想和理论探索阶段（1931～1971 年）、高速切削应用探索阶段（1972～1978 年）、高速切削进入实用阶段（1979～1984 年）、高速切削逐渐进入比较成熟阶段（20 世纪 80 年代至今）。

高速切削是一个相对概念，对于不同的工件材料及不同的加工方式，高速切削有相应不同的切削速度范围。一般认为高速切削速度是普通切削的 5～10 倍。通常主轴转速在 10 000～20 000 r/min以上为高速切削。不同加工方式所对应的高速切削速度范围如下表所示：

加工方式	切削速度/m·min^{-1}
车削	700～7 000
铣削	300～6 000
钻削	200～1 100
拉削	30～75
铰削	20～500
磨削	5 000～10 000

高速切削加工与常规切削加工相比具有以下优点：

（1）随着切削速度的提高，如果刀具每齿的切削厚度基本不变，进给速度也可相应提高 5～10 倍。这样，单位时间内的材料切除率可增加 3～6 倍，从而缩短了机加工时间，提高了生产效率。

（2）切削力可以降低 30%以上。尤其是径向切削分力大幅度减小，特别有利于提高薄壁件、细长件等刚性差的零件的加工精度。

（3）切削过程极其迅速，95%以上的切削热被切屑带走，来不及传给工件，因此在高速切削时，工件基本上保持冷态，特别适合容易热变形的零件。

（4）高速切削时，机床的激振频率远离“机床—工件—刀具”工艺系统的固有频率，工作平稳，振动较小，因而能加工出精密和光洁的零件。

高速切削主要应用于航空、航天、汽车、模具、光学和机床等行业，加工材料主要为铝合金、铸铁和工程塑料等。高速切削技术的发展，不仅改变了传统的加工方式，而且还改变了生产线的组织形式。特别对于大中批量的生产线，合理地配备专用机床、高速加工中心和高速加工单元是组成高效率、低成本生产线的重要方式。

二、高速切削的发展现状

国际上，美国、欧洲和日本都非常重视高速切削技术的研究，并取得了显著的成果。目前，高速机床的研制已成为国际机床工业发展的主流。高速切削是一项综合技术，在其技术领域内涉及到机床、刀具、工件、加工工艺及切削机理等诸多方面。下面将结合高速主轴系统、高速进给系统、高性能 CNC 控制系统、高性能切削刀具、高速切削工艺等方面介绍高速切削技术的现状。

1. 高速主轴

高速主轴是高速加工中心最关键的部件之一。目前主轴转速在 20 000～40 000r/min 的加工中心越来越普及，一些欧洲的高速加工中心的主轴转速已经达到 60 000r/min，转速高达 100 000r/min 以上的高速主轴也正在研制开发中。高速主轴的转速、功率、动态平衡、刚性、锥度孔型及热变形特性等，对高速加工中心的刚性和热稳定性都有相当程度的影响。这样就要求高速加工中心主轴和电机

合而为一制成电主轴，实现无中间环节的直接传动，减少传动部件，具有更高的可靠性。

主轴轴承也是决定主轴寿命和负荷容量的关键部件。为了适应高速切削加工，高速加工中心的主轴设计采用了先进的主轴轴承的润滑、散热技术。目前高速主轴主要采用三种特殊轴承：①陶瓷轴承。②磁力轴承。③空气轴承。主轴轴承润滑对主轴转速的提高起着重要的作用，高速主轴一般采用油空气润滑或喷油润滑。

2. 高速进给系统

提高高速切削进给速度是提升加工效率所必须的。目前高速加工中心的切削进给速度一般为 20～40m/min，有的直线电机驱动 X、Y 轴的立式加工中心，其高速进给速度达 140m/min，有的高速加工中心进给速度甚至高达 208m/min。要实现并准确控制这样高的进给速度，对高速加工中心导轨、滚珠丝杠、伺服系统、工作台结构等提出了新的要求。直线电机的成熟应用使高速加工中心在效率、精度和实用性方面翻开了新的一页。直线电机为非接触的直接驱动方式，移动部件少，无扭曲变形问题，采用这种技术，机床制造达到了应用传统滚珠丝杠所无法达到的水平。直线电机具有很高的加速和减速特性，加速度可达 $3g$ 以上，为传统驱动装置的 10～20 倍，进给速度是传统的 4～5 倍。

3. 高速 CNC 控制系统

高速加工中心要求 CNC 控制系统具有快速数据处理能力和高的功能特性，以保证在高速切削时（特别是 4～5 轴坐标联动加工复杂曲面时）仍具有良好的加工性能。高速 CNC 控制系统的数据处理能力有两个重要指标：一是单个程序段处理时间要短，为此，需要增加 RISC 芯片的处理器进行预处理，并采用多处理器；二是插补精度要有前馈和大数目超前程序段处理功能，此外，还可采用 NURBS（非线性 B 样条）插补、回冲加速、平滑插补、钟型加减速等轮廓控制技术。高速切削加工 CNC 系统的功能特征包括：①加减预插补。②前馈控制。③精确矢量补偿。④最佳拐角加速度。为了增加 NC 系统的智能性及交互能力，便产生了开放结构的数控系统，即 CNC 开放体系结构（SOSAS）。其具体的两种实现形式有：基于 PC 和 PC 嵌入式的 CNC 系统。另外，基于 STEP，并把 STEP 扩展到 NC，形成“STEP-NC”的 CNC 控制器数据模型。在此基础上，结合计算机在通信及网络的发展，建立参数资料库系统，进行 CAD/CAM 与 CNC 一体化的加工制造，将是未来发展的新趋势。

4. 高速切削刀具

已发展的刀具材料主要有聚晶金刚石（PCD）、立方氮化硼（PCBN）、硬质合金涂层刀具、陶瓷刀具等，都能适应铝合金、铸铁、钢和耐热合金的高速切削，其切削水平如下：铝合金 2 500～5 000 m/min（Si 含量≥12%为 500～1 500m/min），铸铁 500～1 500m/min，钢 300～1 000m/min，淬硬钢、耐热合金 100～400m/min，钛合金 90～200 m/min。随着新的刀具材料的研制出现，切削速度将更进一步地提高。

刀具结构要进行动平衡，特别是对于刀柄外伸较长的刀具，用以防止高速引起离心力使抗弯强度和断裂韧性较低的刀柄或刀片发生断裂，给高速机床和操作者带来危险。

刀柄系统选择也会影响自动换刀的重复精度和刀具切削刚性。针对目前 7:24 锥度的单面夹紧刀柄系统（ISO、CAT、DIN、BT）的不足，相继开发了刀柄与主轴内孔锥面和端面同时贴紧的两面定位的刀柄。主要有两大类：一类是对现有 7:24 锥度刀柄进行的改进性设计，如 BIG-PLUS、WSU、ABSC 等系统；另一类是新设计的 1:10 中空短锥刀柄系统，有德国开发的 HSK、美国开发的 KM 及日本开发的 NC5 等几种形式。

5. 高速切削工艺

在高速加工中常采用高转速、中切深、快进给、多行程的切削方式，目前尚没有完整的加工参数表可供选择，也没有更多的加工实例可供参考。试验研究表明，单纯提高主轴转速会令刀具寿命缩短；而单纯提高进给速度也会使机床导轨损耗增大，因而减低机床刚性。因此，要全面理解高速加工的概念，其主旨是以最短时间完成工件加工，即所谓的高效能加工，其特点是具有高刚性的机床床身，以确保高精度及稳定的质量，令切削量恰到好处，缩短整体加工时间。另外，通过主轴、导轨及床身的互相配合，能发挥刀具的最佳表现，延长机床、主轴和刀具的寿命，使生产成本降低。因此建立起实用化的高速切削数据库，优化高速加工的工艺参数，也是今后重要的研究工作内容。

高速切削 NC 编程需要对标准的操作规程加以

高速切削技术及刀具组件的平衡

云南农业大学工程技术学院 （云南昆明 650201） 汪 溪

高速切削加工对刀具组件的平衡性能提出了很高要求。所谓刀具组件包括了刀具和刀夹。首先，任何旋转体在转动过程中都要受到离心力的作用 $F = mr\omega^2$，公式中 m 代表旋转体的质量，r 代表重心与轴心间的距离，ω 代表角速度。如果旋转体完全处于平衡状态，也就是说重心与轴心一致，即可看作离心力 $F = 0$。如果旋转体处于非平衡状态，也就是重心与轴心不同轴时，那么旋转体在高速旋转时将受到很大的离心力作用（如图 1）。因此，如果刀具处在这种情况下，将会明显地降低刀具的性能，使刀杆弯曲并产生振动，过量的振动将导致径向跳动问题，从而缩短刀具寿命，增加停机时间并会增大加工表面粗糙度，降低工件加工尺寸精度。其次，毫无疑问，代价最高也是最费时的问题是主轴部件的损坏。不平衡的刀具组件会对主轴轴承旋以附加的负荷，并且离心力会使主轴轴承受到方向不断变化的径向力的作用，从而使轴承早期磨损或失效，并引起机床振动，甚至可能造成事故。所以，我们在高速切削时必须对刀具组件充分地进行平衡，以消除有害的动态不平衡力。

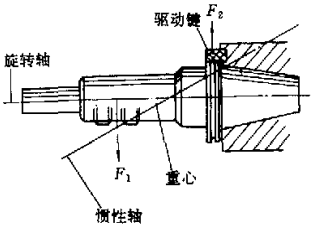

图 1

修改。零件程序要求精确并必须保证切削负荷稳定。多数 CNC 软件中的自动编程都还不能满足高速切削加工的要求，需要由人工编程加以补充。应该采用一种全新的编程方式，使切削数据适合高速主轴的功率特性曲线。目前，Cimatron、MasterCAM、UG、Pro/E 等软件，都已添加了适合于高速切削的编程模块。

三、高速切削的展望

随着微电子技术、数控技术、新材料以及网络信息等各种相关技术的发展，高速切削技术取得了显著的进步。从国际上的高速加工中心的现状可以看出，高速、高效、复合、精密、网络化是当今高速机床发展的总趋势：

以电主轴实现主轴转速进一步提高。另外，直线电动机驱动技术成熟，制造成本下降，使得直线电动机驱动的机床开始实用化、普及化。机床的工作效率得到进一步的提高。

多轴加工机床从模具制造业扩大应用到一般制造业，5 轴和多面加工机床使得 5 轴联动和 5 面加工合二为一，实现复合加工，减少工件装卸次数，提高加工效率和加工精度。

复合加工，即工序复合和工种复合，是机床技术发展最活跃的方向。在一次安装下完成工件全部加工，是今后制造技术发展的总趋势。它不但能缩短加工时间，提高加工精度，而且能大大缩短生产周期，减少库存，实现精益生产。

精密机床为航天航空、天文、光学、激光等尖端技术行业所需的大型极高精度的核心部件提供纳米级的切削加工手段和相关的技术支持。

高速数控机床向智能化、网络化发展，除了实现机床的远程监控和服务功能外，更进一步强调通过网络化，将信息技术与加工技术融合在一起，以提高机床的生产率。

以高速机床为代表的高速切削技术近年来发展迅速，并取得令人瞩目的成就。为使高速切削技术更加完善，今后高速切削发展趋势和研究方向主要有：①新一代高速度、大功率高速机床的研制。②高速切削机理的研究，其重点是难加工材料。③新一代刀具材料及刀具系统的研制。④高速切削工艺的完善，建立相应的高速切削数据库。⑤在干切削或准干切削状态下实现绿色的高速切削。⑥开发基于新型检测技术的加工状态监控系统。

（收稿日期：20030715）