

CIMES 2012

特刊(三)



绿色、智能， 未来机床的发展方向

绿色机床是制造母机的发展目标之一。绿色机床是指机床在生产、应用过程中的“绿色”化，在绿色机床的生产过程中，能量的消耗更低，材料更少，重量更轻，使用时驱动能量更小，效率更高。智能是人类利用技术改造自然的极致，绿色是人类和自然和谐相处的见证。智能机床是数控机床的发展趋势之一。智能机床是对加工制造过程能够作出决定的机床，智能机床了解制造的整个过程，能够监控、诊断和修正生产过程中出现的各类偏差，并且能为生产的最优化提供方案。机床技术发展的目标是能够实现装备制造业的全面自动化，由单机自动化向FMC、CIM、CIMS发展，提高加工精度、效率，降低制造成本，为人类创造更多的财富。绿色与智能的结合将是未来机床的发展方向。绿色、智能机床的出现，为未来装备制造业实现全面快速发展创造了条件。

在CIMES 2012即将召开之际，作为展会特刊，我刊也针对展会倡导绿色、智能的主题，特别策划了关于绿色机床和智能机床的内容，本期特别邀请到了行业的专家和企业的优秀骨干来共同探讨未来机床发展的方向。

策划：索菲娅



高效绿色机床技术分析与发展展望

重庆大学绿色制造技术研究所 (400044) 曹华军 罗毅



重庆大学绿色制造技术研究所所长曹华军教授、博导

批量化生产率不断提高的需求导致了以机械化为特征的工业革命；生产柔性化、自动化需求导致了数控机床技术和自动生产线的快速发展；随着全球资源、能源短缺和环境污染问题的不断加剧，资源效率、环境友好必将成为下一代制造技术的发展方向。我国是制造业大国，资源消耗和环境排放与制造业的可持续发展的矛盾尤为突出。国家统计局2010年数据表明，我国制造业能源消耗占能源消费总量的60%左右，每年约产生55亿t无害废物和7亿t有害废物。我国金属加工业实现绿色制造的关键是高效绿色机床技术的发展。我国已发展成为全球机床保有量、产销量均列世界第一的国家。据统计，机床保有量超过800万台，2011年机床产量达85.99万台，均列世界第一。但我国机床行业仍存在大而不强等共性特点，普遍存在机床材料消耗大、能耗高、可靠性不高等特点，但可喜的是我国机床行业仍然是世界机床产业发展最活跃的区域，2011年同比增长率是15.11%，也是全球第一。我国机床产业活跃的发展潜力是技术进步的强劲动力。

目前，国内外学术界和企业界积极开展对高效绿色机床技术的研究和创新实践。2009年，CIRP

主席Byrne教授CIRP会议上作了题为“制造工程未来方向：环境与能源”的主题报告，指出：“显然，未来实现制造工艺的生态效率主要取决于能量利用效率”。2011德国汉诺威机床展（EMO）可持续生产大会上，德国机床制造商协会M.Kapp先生介绍了德国机床行业以持续提升机床能效为核心的“Blue Competence®”倡议计划，该计划意味着德国机床行业主动全面考虑机床能效问题，并举行了“Blue Competence”的专题展。新颁布的欧洲用能产品生态设计指令（Eco-Design of Energy-Using Products -Directive 2009/125/EC, Erp）提出的，该指令将机床列为10项优先实施的产品之一。国际标准化组织（ISO）制定了ISO/DIS14955机床环境评价标准（Environment Evaluation of Machine Tools），重点要求提高机床的能效水平，实现机床产品的节能降耗。

德马吉公司致力发展的各项节能加工技术和节能设备提升了机床使用过程的节能效果；西门子提出的全面节能解决方案（TIES）及其成功的案例应用也在一定程度上促进了机床节能技术的提高。

《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》（国发[2010]32号）中将“节能环保产业”列为重要发展领域之一，并提到“重点开发推广高效节能技术装备及产品，实现重点领域关键技术突破，带动能效整体水平提高。”科技部立项的“十一五”科技支撑计划重大项目“绿色制造关键技术与装备”、“十二五”重点专项“绿色制造”也对机床轻量化和能效等方面资助了不少研究课题。

本文将在国内外对高效绿色机床技术研究现状的基础上，结合机床能耗特性，对相关技术和发展趋势作出展望。

机床能耗特性

在机床生命周期中，90%以上的能耗发生在运

行使用过程中。重庆大学刘飞、徐宗俊等曾建立了卧式车床系统的能量平衡方程,认为机床能量消耗由切削能耗、空载能耗和载荷附加能耗构成。麻省理工学院Daumus和Gutowski的研究表明:在现代数控机床加工过程中,只有不足15%能量消耗在切削过程中,其他为辅助能量消耗,包括上下料、切削液泵、启动与制动、空行程、CNC系统、冷却、照明等,占比达85%左右。德国Fraunhofer IZM研究所通过能耗测试得出了Heller H 2000铣削中心电能消耗图,如图1所示。

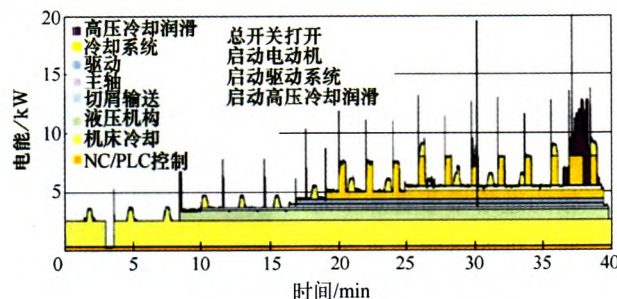


图1 Heller H 2000铣削中心电能消耗情况

从图中可见,机床用于辅助装置如冷却、润滑等的部分占了相当的比例。以冷却润滑剂的使用为例,其提升泵的能耗占大约13%,高压过滤装置耗能约9%,排气能耗约为13%,高压冷却部分约为18%。其它部分如机床冷却约为17%,动力系统为7%,液压部分和压缩空气耗能均约为6%。而且机床有大量的能耗是在非工作时间发生的,根据生产规模的不同,非加工过程的能耗比例在62%(大规模)和85%(小规模)之间波动。

美国加州大学伯克利分校D.Dornfeld研究团队在文献中,将机床能耗划分为三部分,包括不变能耗、可变能耗、切削相关的能耗等,如图2所示。不变能耗是机床运行过程中不论是否进行材料加工都会发生的,它是保证机床正常运行的基本能耗,如风扇、照明、伺服系统产生的能耗;可变能耗主要是在操纵和控制机床的过程中产生的能耗,比如主轴电动机、各轴的进给电动机产生的能耗;而与切削相关的能耗大小主要是受切削材料

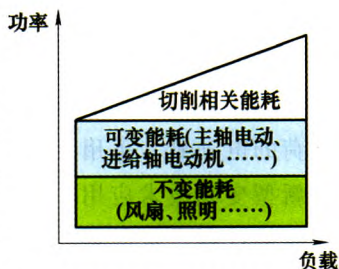


图2 机床加工过程能耗分解

的种类、材料去除率和使用刀具等因素的影响。

按照上述思想,机床加工过程中的总体能耗由切削能耗 $E_{切}$,可变能耗 $E_{变}$ 和不变能耗 $E_{恒}$ 组,即 $E = E_{切} + E_{变} + E_{恒}$ 。对于切削能耗的计算,可表示为

$$E_{切} = K_{切} \cdot w \cdot b \cdot z^p \cdot v_f^{1-p} \cdot n^p \quad (1)$$

式中, v_f 是进给率, n 为主轴转速, w 和 b 分别为切削宽度和深度, z 和自动化程度和切削液等因素有关。

对于可变能耗主要从主轴和进给轴两方面考虑,主轴能耗由两方面组成,一方面用于维持机床运转的正常进行,另一方面则是去除材料所需要的能耗,因此,主轴能耗可用如下式子表示

$$E_{主} = E_{运行} + E_{切削} = \int_{t_{运行始}}^{t_{运行终}} p_{运行} dt + \int_{t_{切削始}}^{t_{切削终}} p_{切削} dt \quad (2)$$

进给轴的耗能主要是用来使刀具靠近或远离工作台时的快速运动和切削加工时移动刀具的慢速进给运动,因此其能耗情况可用如下式子来表示

$$E_{进} = \sum_{i=1}^n \int_{t_{开始}}^{t_{结束}} (p_i^{快} + p_i^{慢}) dt \quad (3)$$

式中, n 为进给轴电动机的数目。

最后,不变能耗部分是比较简单的,因为各部分的耗能部件功率几乎是恒定的,因此其能耗可简单表示如下

$$E_{恒} = \sum_{i=1}^m p_i \cdot (t_{i终} - t_{i始}) \quad (4)$$

机床能效技术分析与展望

根据欧盟“下一代生产系统”研究计划,绿色机床应具有如下特点:①机床主要零部件由可再生材料制造。②机床的重量和体积减少50%以上。③通过减轻移动部件质量、降低空运转功率等措施使功率消耗减少30%~40%。④使用过程的各种废弃物减少50%~60%,保证基本没有污染的工作环境。⑤报废机床的材料接近100%可回收。当然,要完全达到这样的要求并非易事,但国内外许多的学者和企业已开展了积极的行动,大量的科研成果和企业实践使高效绿色机床技术不断涌现,使机床产品符合环保要求。

1. 运动部件的轻量化技术

机床轻量化,特别是运动部件轻量化设计 and 应用是提高机床能效的关键技术之一。目前机床轻量化技术主要从两个方面开展:①采用重量更轻但能达到同样要求的材料替换现在使用的材料。②对机床部件进行结构优化来减少材料的使用。在轻量化



改造时, 需要注意的原则是机床部件的可靠性和使用性能不能降低, 另外在改造时的材料特性、费用和技术都是需要综合考虑的问题。如图3所示为一个夹持部件轻

量化的例子, 利用碳纤维材料替代钢材可以减少2/3的重量, 而且强度

和刚度更好, 完全能够满足夹持要求。

将此结构应用于车床, 结果表明主轴的加速到最大值的时间减少了30%, 如图4所示。



图3 夹持结构的轻量化设计

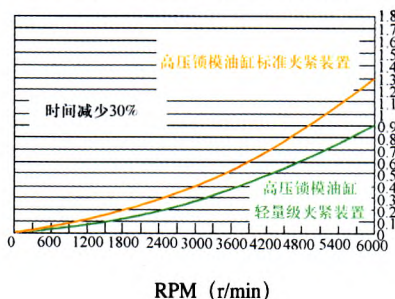


图4 两者加速时间比较

2. 高效能量监控与管理技术

机床在运行过程中, 大部分时间处于待机、停机或空行程状态, 而不是切削状态。基于软件服务的全面高效能量管理技术可以使机床在生产和使用过程中更加节能。目前市场上有关能量管理的软件有许多, 如德马吉公司的DMG ENERGY Saving软件和服务等, 这类技术涵盖的范围十分广泛, 其中的关键技术对绿色机床的能效提升有重要意义。

(1) 虚拟机床优化技术 这项技术是在实际加工之前, 采用与实际机床完全相同的虚拟机床进行加工, 以检查和优化NC程序。它的核心是确保加工过程无缺陷, 这样可以最佳的检查和计划生产加工过程, 最大限度缩短预备时间并避免废品产生, 从而大大提升了机床整体效率和利用率。图5是德马吉公司的虚拟机床技术。



图5 德马吉虚拟机床技术

管理技术DMG AUTOShutdown可以自定义数控系统待机参数, 类似于我们平时的笔记本电脑省电模式。一般的机床在完成加工任务后通常还保持工作状态, 而本技术的自动关闭功能可以控制机床进入休眠状态, 最大限度降低能源消耗。另外, 该功能模块还可以支持唤醒和预热功能, 控制机床在设定的时间提前进入工作状态并预热至工作温度。

(3) 加工过程监控技术 基于软件的加工过程监控技术, 可以使操作者获得加工过程的详细能量的使用情况, 进而作好能耗与物料及经济性之间的平衡。例如以色列OMAT公司的OMATIVE SYSTEM, 该产品可以

监控主轴在加工时的负载情况, 通过调整进给轴的进给率节省加工时间, 进而达到节省切削时的能耗, 如图6所示。

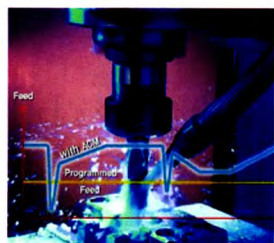


图6 铣削时的主轴监测系统

通过该系统, 可以对进给率进行即时的调整从而使其最佳化, 对整个实际加工状况进行连续监测, 可以使粗加工的时间节省约30%。另外, 该系统还可以进行刀具磨损监控和刀具破裂保护从而延长刀具的使用寿命。

3. 高效电动机和变频技术

一台电动机的能耗成本在其整个生命周期成本中占97%以上, 因此高效的电动机产品可以在原有的基础上, 通过点、磁、机械和通风的优化, 使用优质材料和先进的制造工艺, 切实有效地降低电动机各方面损耗, 降低运行的成本和加快投资的回收。如西门子的高效电动机的功率损耗可降低高达45%, 并且由于温度的降低, 电动机和润滑剂的使用寿命得到延长, 如图7所示。

变频器常用于机械控制的风机、泵类和压缩机及常处于低负荷的电动机。采用创新型变频技术应用于制动过程, 可以更加节能降耗。常规的

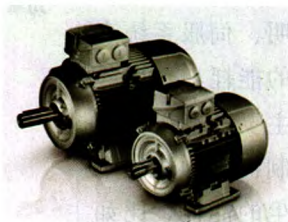


图7 西门子高效电动机

传动系统中, 制动产生的能量经常以热能的形式

被浪费掉，而通过技术创新的变频器具有再生能量回馈功能，可以把电动机的制动能量回馈到电网中，而不是在制动电阻中消耗，例如西门子的SINAMICS G120D变频器，在提升应用中，通过实施智能再生能量回馈技术，可节约能源多达50%，如图8所示。另外，有些部件如制动电阻可以省掉，减少了传动系统的安装空间和热量的产生。



图8 西门子变频器

4. 高效润滑技术

在机床进行切削加工过程中通常会需要使用切削液或冷却润滑液，其存储、使用和废弃处置都需要专门的技术支持，若使用不当会对环境造成污染，甚至对人的健康造成危害。因此人们对此更加重视，高效冷却润滑技术的创新有重要意义。

(1) 微量润滑 (MQL) 技术 在切削过程中不降低刀具使用寿命和加工表面质量的前提下使用最少的切削液去完成加工任务。它以具有高分解性的合成脂和油脂作切削润滑剂，与空气混合成气雾喷射在切削区。其油剂的消耗量非常少，通常小于50mL/h。如图9所示为采用了此项技术的德国DS-Ecospeed F HT加工中心。



图9 德国DS-Ecospeed F HT加工中心

(2) 高压喷射辅助加工 与传统的润滑方式不同，这种加工方式是在高压状态下喷射出

小流量的润滑剂（通常压力高达300MP），这样的话才可以穿透高温区域，达到冷却润滑的效果。由于是小流量的供应，因此润滑剂的消耗量很少，而效果却非常明显。

(3) 超微雾冷却润滑技术 该技术主要是利用高速空气的作用，将普通的润滑油进行粉碎，使其成为细微的超微油雾，通常直径小于 $2\mu\text{m}$ 。由于呈雾状特征因此能弥漫到所有需要润滑的地方，获得良好而均匀的润滑冷却效果。图10所示为日本Taco的超微雾化装置。

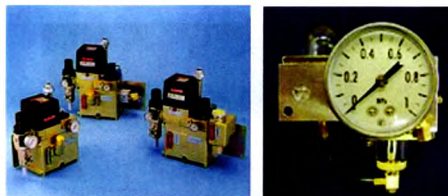


图10 超微雾化装置

介质而仅借助压缩空气冷却的加工过程，其优点是：省去切削液系统的费用，降低加工成本；体现了加工过程的绿色化。符合环境保护和劳动保护的要求。干切削的发展在很大程度上依赖于刀具技术、涂层技术和高速机床技术的发展。如图11为瑞士Fritz Studer AG机床。



图11 瑞士Fritz Studer AG机床

该机床在加工过程中不使用冷却液而直接采用高速

干切削技术，而且在床身的设计上采用斜床身结构，排屑的路径通畅，切削不与床身直接接触，能够保持机床的热稳定性。

结语

机床是装备制造业的核心，面对传统高能耗、高物耗的现状，发展高效绿色机床技术是实现制造业可持续发展的必由之路，对机床行业产业结构现代化转型有重大意义。

机床作为工作母机和长寿命产品，其能耗主要体现在生产和使用过程中。高效绿色的机床技术已成为国内外的学术和企业界的关注热点，运动部件轻量化技术既减少了机床物料消耗，又提高了运行效率，能量管理技术加强了对运行过程的能源消耗情况的管理，是迈向绿色化的重要一步；高效电动机和变频技术提高了驱动运行系统的运行效率，高效冷却润滑技术实现了加工过程资源的有效运用和效率的提高。

此外，提高工艺的稳定性，减少加工报废引起的加工能耗和材料的浪费也是节能的重要方面；采用高精度的近净成形技术替代粗加工或半精加工也具有很大的节能前景。MW

(收稿日期：20120520)