

工艺优化

走可持续发展的生产道路

加工周期和刀具寿命是制造厂商经常力求提升的加工工艺变量之一，与之相比，耗能量在一般情况下并不会得到同等程度的关注。

文 | Peter Zelinski

生产厂商通常都不会对任意给定加工工艺的耗能量进行测量或追踪，虽然电力价格很贵，但其昂贵程度还是无法与机床本身或切削作业所耗用的刀具费用相提并论。此外，刀具路径和切削参数等相关因素都直接影响着加工周期和刀具寿命。因此，切削加工所耗用的能量量通常都不在考虑的范围內。

一项旨在节约能耗的研究

GKN 公司（位于密苏里州 Hazerlwood）的研究人员最近证明了，一些与 CNC 加工耗能量相关的研究发现却与上述观点有着非常大的差异。在美国国家国防制造与加工中心的监督之下，作为美国空军可持续制造计划组成部分开展研究时，GKN 发现他们在飞机部件生产过程当中存在着

相当大的节能空间，于是该公司将他的一个挠性加工单元应用到了本项目当中，而本项目的计划是找出在飞机部件加工当中到底可以节约多少能源。这项研究集中考察了一种 6Al-4V 材料的样品部件，此部件设计用于国防飞机部件典型的深型腔加工的卧式加工中心。通过功率的计量，研究人员统计了各种旨在节约此项加工应用耗能量的措施的效果。研究人员发现，与刀具、冷却剂、编程和参数相关的各种节能措施总共可以降低此项工厂内已确立工艺通常耗电量的 73%。

此项发现事实上已经超越了节能的范畴。资助此项研究的美国空军不仅正在促使供货商做好准备应对未来可能更高的能源成本，还要促使他们寻求更高的制造效率。研究表明这些措施节能的原因在于能够很好地缩短加工周期，而缩短加工周期本身就是一项非常有价值的改进。参与了此项可持续加工研究项目的 GKN 公司的总工程师 Cedo Nedic 和数控编程师 John Shain 表示。

每转切削更多

这项研究所涉及的刀具相关



图 1 该冷却剂循环系统能够在满负荷生产时通过减少冷却剂和水的用量来降低生产成本



图2 刃数更多的刀具能够通过缩短加工周期节约能源。研究人员发现，16 刃的刀具具有最高的能效，但其成本也最为昂贵

变量之一就是硬质合金端铣刀的刃数。GKN 公司通常会使用一种 6 刃刀具来进行金属的粗加工，然后用一种 4 刃刀具进行精加工，从未系统地研究刀刃数量对加工的影响。然而，刃数与节能效果之间的联系却是不言而喻的。采用更多的刀刃时，由于刀具每转一圈所执行的切削量更大，所以“浪费”掉的刀具旋转量就更少。

Brubaker 公司为 GKN 公司供应了用于研究刃数的端铣刀以及用于研究冷却剂的端铣刀。研究人员确认了拥有更多刀刃的工具确实带来了节能的功效。这些刀具允许采用更快的进给速率，缩短了加工周期并减少了每个部件的耗能量。但是当刃数过多时会产生另一个问题。试验表明，使用 20 刃刀具时在切割深度的上半部分出现了快速的刀具磨损现象，而这种程度的磨损不得不归因于切屑排出问题。将刀刃数量减少至 16 个，通过充分拓宽各刀刃之间的通道以便切屑能够及时排出可以防止出现这种磨损现象。因此 GKN 发现，在只考虑能效这一个因素时，16 刃是能效最高

的方案。

而刀具的成本效益是否良好就是另一回事了。Nedic 先生指出，更多刃数的刀具更为昂贵而且重新打磨时也更为困难。能源成本上的节约并不足以证明额外增加的刀具支出的合理性。他表示，8 刃的刀具在成本与高进给速率之间提供了一个更好的折中方案，并且 GKN 公司已经在越来越多的采用 8 刃刀具。

关于冷却剂的研究

冷却剂输送方式的有效性也在项目中得到了验证。采用射流冷却的整体端铣刀作为试验运行的一方，通过刀刃尖端附近的出孔来输送冷却剂的内冷式端铣刀作为试验的对比方。试验结果表明，这种内部冷却的方式从多个

方面被证实了可以更好地延长刀具使用寿命。贯穿刀具的冷却液不仅提升了标准刀具使用寿命，而且同一把刀具上刀刃之间的磨损程度也更为一致化。这种一致化可以有效地延长刀具寿命，因为如果可以预测到刀具磨损的方式，那么就可以确认该刀具仍然能够长时间地进行加工。

但在这种情况下，其成本效益比也受到了影响。Nedic 先生表示，他们对内冷式冷却剂的试验证明刀具寿命的改善幅度高达 30%。这个改善本身很显著，但内冷式刀具的成本比传统刀具的价格高出 100% 以上，这个改善幅度又很小了。基于这些发现，Nedic 先生表示，他本人不会推荐在钛刀具上使用内冷式冷却剂，除非这种输送方式有助于解决刀削排空问题。

至于冷却剂本身，一项旨在节约成本的工艺改进就是冷却剂循环使用。在这项可持续性研究当中，GKN 工厂将加工单元连接到了一套冷却剂循环系统上，这套系统采用了一台产自 Master

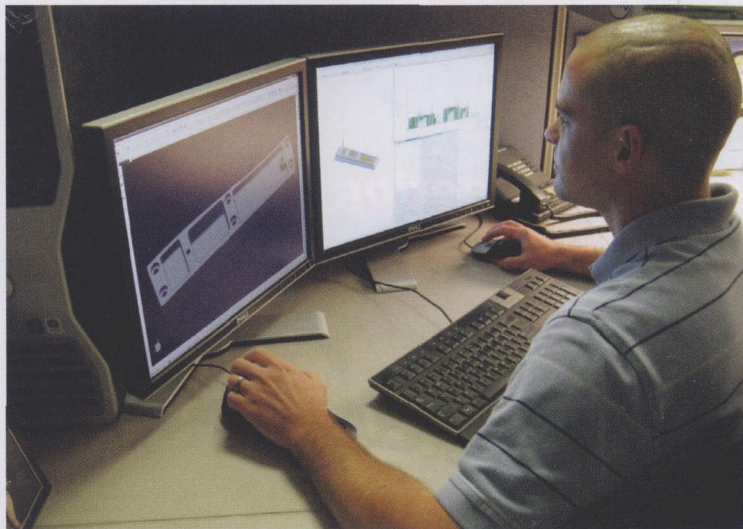


图3 通过优化编程可以大幅度地节约时间和能源。Shain 先生采用了能够预测刀具作用力的软件来进行优化

Chemical 的 Xybex 离心泵。将回收后的冷却剂与新冷却剂混合使用并未导致切削性能发生改变，但却在一定程度上节约了冷却剂的用量。在这个加工单元满负荷生产的情况下，经 GKN 估算，冷却剂循环使用每年将在冷却剂购买成本方面节约 45 000 美元，同时可以削减 11% 的切削用水量。

基于编程的优化

所有这些硬件的改变都应用于切削过程或设备本身。Shain 先生说，另一个同等重要的节约领域来自于加工作业开始之前，也就是在对加工周期进行编程之时。优化铣削加工程序的各种方式包括了改变刀具路径以及控制进给速率来“优化”参数。但这些方法是否都能减少耗能呢？

Shain 先生表示，这两种方法都有效果，特别是在同时运用时。研究人员采用了 Celeritive Technologies 的 VoluMill 软件，旨在铣削型腔时获得更为高效的刀具路径。VoluMill 的刀具路径并没有跟随型腔的形状，而是通过避免进给方向的急剧变化来保持刀具应力的稳定性。因此，这种刀具路径呈现出连续的曲线，与绝大多数机加工作业最终完成的表面特征形状并不相似。这些刀具路径所提供的应力稳定性有着提高转速和进给速度的潜力，包括那些存在明显应力波动的区域。采用 GKN 基准加工方式时，材料去除一般需要消耗 $1.18 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{in}^3$ ($1 \text{ in}=25.4 \text{ mm}$) 的电力，而一旦使用 VoluMill 进行编程时，耗电量就降至仅 $0.60 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{in}^3$ ，显然，这种更快速的切削方式有助于降低能耗。值得一提的是，更多刃数的刀具、内冷式刀具的冷却剂输送以及冷却剂循环利用，这些措施的耗能量也降低到了 $0.43 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{in}^3$ 。

Shain 先生表示，通过专门的软件进行刀具路径优化可以进一步地改进性能。但这种优化要以切屑量为基准，切屑量与切削力相关联，而切削力通常无法被准确地判断。Third Wave Systems 的 Production Module 软件采用有限元分析法为切削过程建模，有效避免了对切削力的预测过程。Shain 先生说，采用该软件设定切削参数可以让切削力保持稳定，从而带来节能成效的最后一步提升。在加工过程结合了所有这些改进之后，耗能量为 $0.32 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{in}^3$ ，比基准方式减少了 73%。

如今，对于 GKN 公司来说，原来的基准程序已经不再是例行做法了，部分原因要归功于这些研究结果给工厂带来的改善。各种目前进行的生产作业均采用 VoluMill 和 Production Module 软件针对节约加工周期进行了重新编程。“可持续发展”虽然通常用于表示降低耗能量，但保持一项生产作业的可持续性发展还意在保持一种零部件长期的低成本生产。这些目标之间并不相互矛盾。这次可持续性研究试验与优化编程的重大意义不仅在于节约了能源，而且通过缩短加工周期降低了成本并提升了生产能力，GKN 公司表示。[MM]

WEINGÄRTNER[®]
GmbH
MASCHINENBAU



▲反馈服务编码M4527



EMO
Hannover
16-21.9.2013

we increase productivity

turbines & generators

energy

downhole

weingartner.com