软件

刀具监控能够在硬质航空航天材料中实现低转速切削

Caron Engineering 公司的 TMAC MP 在多年前就引入了刀具监控系统，但是它的“锯齿算法”现在仍然可以满足飞机引擎加工中一项特殊的加工要求。

更多精彩请扫描二维码

文 | JEDD COLE

“首先，航空航天材料的加工非常困难，”Caron Engineering 公司创始人和总裁 Rob Caron 表示。他讲述了机加工在生产加工航空零件时会碰到的困难。对于引擎部件，其材料可能是硬质且难于加工的合金：钛、蒙乃尔合金、哈氏合金或铬镍铁合金，当然还有其他各种材料。

飞机标准非常严苛，许多航空航天的零件必须从在一个硬质材料上进行整体加工，保证材料最大程度的完整性同时帮助飞机升空。这意味着铣削车床可能需要上拱金属负荷，降低至净形并最后得到最终部件。

因为材料非常坚硬，刀具的功能会随着切削逐渐退化：“刀具的加工能力在切削过程慢慢会减弱。”Caron 先生称，“因为材料切除和刀具功能的弱化，从用户的角度纠正进给速率非常困难。”这甚至还未考虑材料各部分之间的天然硬度差异。当然，如果下一块材料同前一块材料之间存在属性差异，那么这些进给速率可能不会重复。

对于许多航空航天的机加工而言，解决方案就是让步。对于进给和速度，应谨慎行事。操作人员将假设出最差的加工环境，并对工具进行编程，降低穿过材料的速度。

原因非常简单，Caron 先生说：“太多的因素需要考虑，且材料成本非常高，因此刀具退化可能会导致昂贵的零件被浪费，因为他们会采用这种保守的方法避免这种情况。”这时，Caron Engineering 公司的自适应控制技术就显示出了自己的优势。

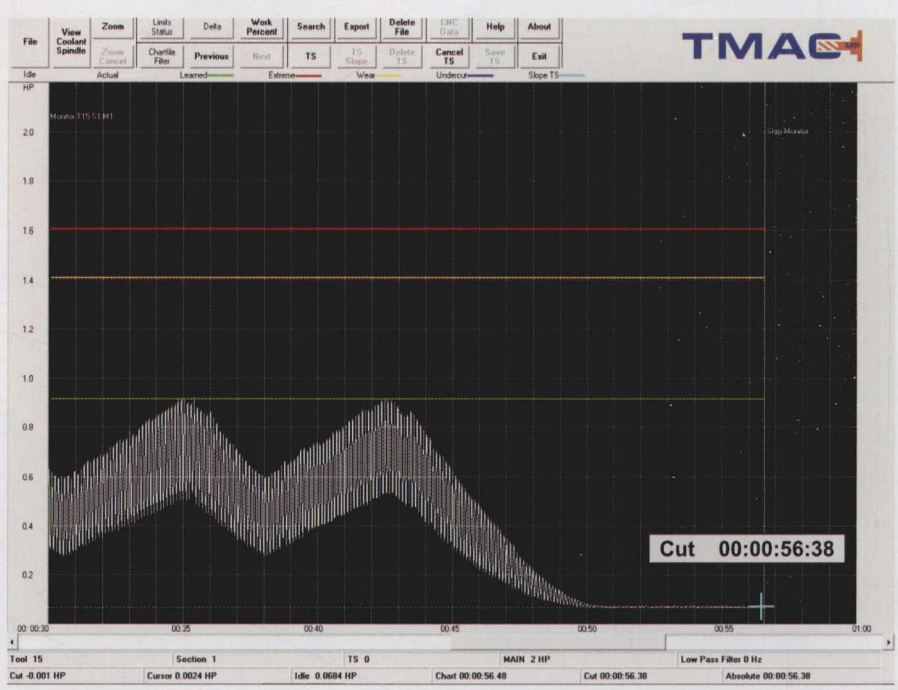

图 1 Caron Engineering 公司的 TMAC MP 首先是一套刀具监控系统，包括安装在机床上的多个传感器以及一个显示主轴和刀具数据的独立处理器。但是，通过搭配一个功率变送器，使得 TMAC 能够超驰刀具的进给速率以及进行自适应控制优化切削，这一功能特别适用于上拱难于加工的航空合金

自适应控制技术的工作原理

Caron Engineering 公司的 TMAC MP（刀具监控和多工艺监控自适应控制系统）的目的是精准地解决上述难题。TMAC 系统包括多个传感器、一个通信中央处理器和一台多范围功率变送器，可以“学习”刀具的最优功率负荷，实现进给速率的自适应控制。

前提非常简单。如上所述，机加工在上拱坚硬的航空航天合金材料时在速度和进给方面往往会采用传统方式。刀具慢速按照恒定进给速率穿过金属，随着刀具穿过加工难度不同的材料部件部分，主轴传动机构的功率负荷会升高和降低。除了缺乏效率之外，在某种意义，如果用户不注意，这种功率抬升会造成刀具破裂问题。

为避免这种情况的出现，TMAC 连接了数控系统对整个切削过程进行进给速率超驰。在机床使用新刀具切削零件时采用“学习模式”监控主轴功率，该系统可以建立峰值和最优功率负荷目标，同时可以自动调整进给速率，保持负荷稳定。

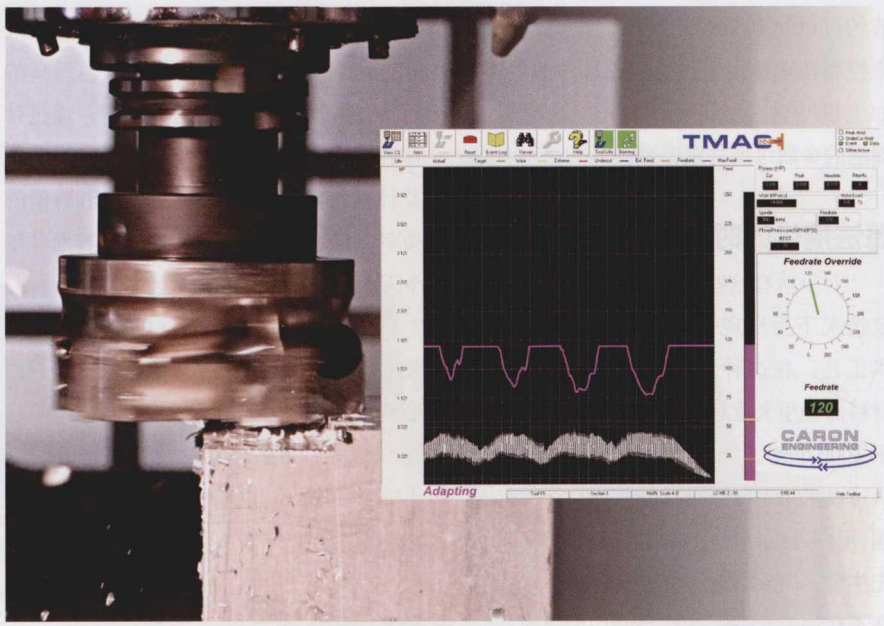

图 3 这种低转速切削方式是一种典型的难于加工的材料的上拱应用形式，比如钛或铬镍铁合金。每个小“锯齿”形状反映了切削过程中套式铣刀 5 个出屑槽的切入材料导致的功率抬升。TMAC 的“固定限值”模式，即主轴功率保持处于或低于绿线所反映的最优学习水平。如图中右侧底部所示，总切削时间约 56 s

刀具在切削过程中随材料条件的变化进行加速或减速，图中所示为刀具如何展现在 TMAC MP 系统屏幕上。图 1 所示为示例切削的过程：白线为随时间变化的实际切削功率负荷，以马力为单位，基于左侧 *Y* 轴进行测量；紫线为实时进给调整。在加工难度较低的切削部位功率负荷下降，进给速率提高。刀具进入较硬的切削部位时，功率负荷上升，进给速率下降。

机床学习流程让 TMAC 系统可以为功率负荷预先设定目标上限（绿色直线所示），同时为进给速率设定下限（橙色线），低于该值时系统会知道刀具磨损必须更换，因为随着刀具功能的减弱切削需要增加功率（图 2）。

此外，因为该系统接入了数控系统，可以将进给速率降至零并且发出信号自动换刀。这基本上可以避免出现刀具破裂情况。同通常情况下刀具持续进给直至无法继续切削不同，随着刀具钝化需要更高功率，自适应控制的监控功能会逐渐降低进给速率，并且通常将至少完成切削。

Caron Engineering 公司认为，自适应控制的整体好处是能够更积极更高效地切削硬质航空航天金属材料，减少气割并节约时间。根据公司的说法，循环时间

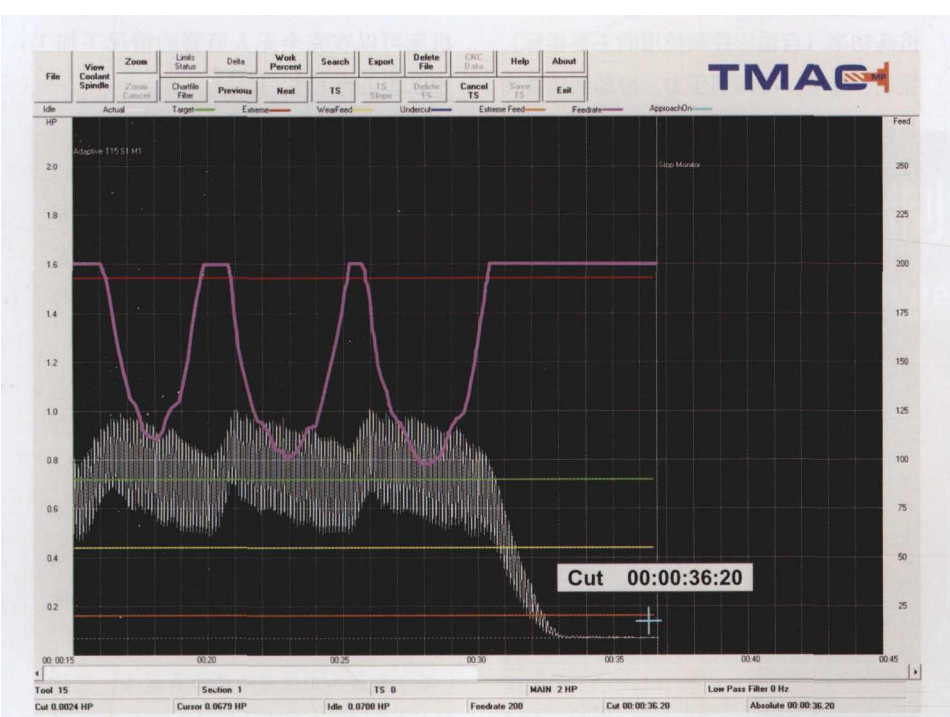

图 2 该 TMAC MP 用户界面图片展示了一种带有自适应控制功能的典型铣削切削。白线为随着时间推移切削的实际功率负荷，采用马力为单位。功率负荷的上升或下降取决于切削条件。紫线为进给速率，TMAC 可以进行实时自动调整，维持恒定的功率负荷同时最大化切削时间。在这种模式下，彩色直线为（从上到下）最高功率上限（红色），达到该上限时系统将立即停止主轴并收回刀具；学习最优功率（绿色）；最低进给速率，显示刀具磨损（黄色）情况，低于该值时 TMAC 将结束切削然后发出刀具更换信号；以及进给速率最低限值（橙色）。用户可以放大或缩小上述比例尺进行功率分析，功率可以采用马力或千瓦为单位进行测量

节约可以达到 20% ~ 60%。据称，自适应控制特别适用于飞机引擎部件的生产，如上拱叶盘、加工整体转子，这时焊缝周围的金属可能非常坚硬。

算法提供的时间节约

对于所有这些优势，Caron 发现在特定情况下会出现一种复杂的问题，即上拱工艺，在这种工艺中，硬质航空航天材料需使用大直径刀具进行低速切削（低于 1000 rpm）。“如果加工铝合金材料，那么可以采用 10 000 rpm 的转速，这没有问题，用户可以加工想要的任何数量。”Caron 先生称，“但是如果加工钛金属，材料特性不允许刀具采用这么高的切削速度。”

在这种情况下，TMAC 系统的灵敏性就会成为问题，因为在这么低的切削速度下（有时候会低至 200 或 300 rpm），因为刀齿切入材料时的阻力，会导致系统功率提高。这会导致线条呈现出奇怪的锯齿形状，许多功率振荡会呈现出齿状形状。图 3 所示为使用一种五齿套式铣刀进行的这种切削的示例，切削时间约为 56 s。如果采用传统的自适应控制方式，TMAC 系统的进给速率调整将结束每次微幅功率抬升的反应，这会影响效率。

TMAC 系统的最新创新 Caron 先生将其称之为“锯齿算法”，这是一种先进的自适应控制方式，通过学习各刀具的“刀齿通过频率”解决这一问题。通过计算各刀齿通过材料时的准确功率振荡以及针对特定旋转平均分配所有出屑槽的功率，自适应控制可以对整个刀具而非单个刀齿的切削动作做出反应。

图 4 中是同图 3 相同的切削，但加入了锯齿算法。进给速率不再呈现出锯齿形状（紫线），线条更平滑，随着切削过程中刀具平均功率负荷的变化起伏。切削用时降至约 36 s。“我们让低速切削变得同高速切削一样。”Caron 先生表示。

物联网成为先机

TMAC MP 系统首先是一个机床监控器，该系统拥有独立的处理器并且采用 Caron 公司的自有传感器套件，这让该系统可以用于传统机床；但是在自适应控制功能方面存在局限性，因为该系统需要一套数控系统使 TMAC 对进给速率进行超驰。尽管如此，该系统可以测定主轴电机高功率（自适应控制使用的主要指标）、振动、应变、冷却剂压力、冷却剂流量和主轴速度，借此监控刀具寿命、工件消耗、轴承健康度和实际切削时间。

虽然该产品已经推向市场超过 30 年，但该公司似乎发现自己在某些时候在串联生产区和收集数据方面仍然具有竞争力。实际上，Caron 的传感器可以收集大量数据用于工艺诊断、系统整合和高级分析。同 Caron 公司的其他监控产品一样，TMAC 系统同样符合 MTConnect 标准。

“我们在工业物联网这个词流行之前基本上就已经是一家工业物联网产品生产厂商了，因为我们采集数据并提供给所有人。”Caron 称。

TMAC 可以利用所有传感器对正常作业的机床中的异常做出反应，这些传感器可以向用户发出消息并进行警告。这种功能提供的最大机遇是无人作业，因为通过 TMAC 系统自动监控功率、实时调整以及通知用户换刀（或订购自动刀具进行更换），机床附近将不需要安排人员。

“曾经有一位用户遇到过从每台机床需要一位操作人员变为一位操作人员负责 7 台机床的装料的情况。”Caron 先生表示。很明显，为配备了 TMAC 系统和自适应控制的生产单元加装装卸机器让机床可以在完全无人监督的情况下加工难以加工的工件。MM

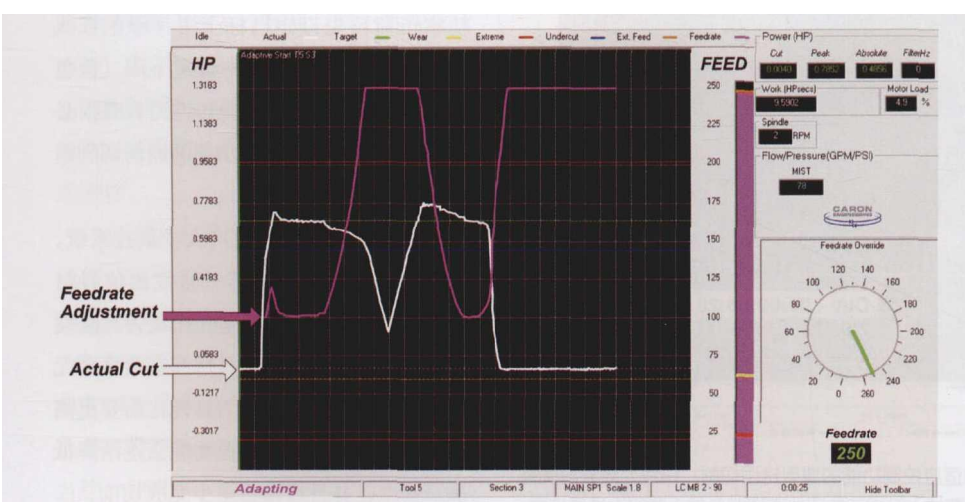

图 4 这是同一种切削，但采用了先进的自适应控制技术。在这种模式下，TMAC 可以完全控制进给速率（由紫线表示）。随着切削条件变得困难，进给速率会下降，反之亦然。传统的自适应控制可以针对各刀齿的每次上升和下降调整进给速率，Caron Engineering 公司的“锯齿算法”知道每次旋转将穿过材料的齿数或槽数量，因此为整个刀具旋转平均化了这种调整。时间节约效果非常显著，在上述切削中可以节约 20 s

MTConnect 协议

这是一种制造业标准，用于有组织的从设备中检索过程信息。研究 MTConnect 在数控加工在线监测中的应用，利用电流传感器、电压传感器、加速度传感器、声发射传感器构建基于 MTConnect 标准的数控加工过程在线监测系统。研究加工监测系统的数据采集、存储、分析等内容。利用电流、电压传感器，设计基于 MTConnect 的机床电信号采集软硬件系统，监控机床用电状态；利用声发射传感器、NI 数据采集卡，采集数控加工过程中的噪声信号，设计基于 MTConnect 的加工过程颤振监测系统；利用加速度传感器、NI 数据采集卡，采集加工过程中特定机床部件的振动信号，构建数控加工过程中振动状态监控软硬件系统。