

缓进磨削新技术文集

下

航空工业部 303 研究所

一九八五年九月

带连续修整的缓进磨削

〔美〕 Stuart O. Salmon

胡传霖 译 沈淑雯 校

摘 要

本文作者研究的金刚石滚轮连续修整与缓进磨削相结合在磨削加工业中引起了一场革命。这种技术正在迅速地取代拉削、铣削和往复式磨削。从研究工作推导出的缓进磨削的原理的论述表明，与“未来的工厂”磨削单元系统一体化的全新一代的平面磨床，正在以很高的生产率生产航天工业的产品。

前 言

缓进磨削并不是一项新工艺，已在欧洲应用了20余年。缓进磨削在美国并未受到热情的欢迎。以前由于采用的砂轮级别不正确，修整条件差，工艺参数令人不满意，缓进磨削在美国应用并不成功。结果未给人留下深刻的印象，由于这个工艺获得的表面完整性差而造成若干次事故之后就以为无用。但是在欧洲却获得了巨大的成功，因此，多年来缓进磨削被认为是美国的“前沿技术”。现在在欧洲，已经建立的缓进磨削工艺正在进入连续修整缓进磨削的新纪元，结果生产率极大地提高，吸引美国市场再一次来观察与自动磨削设备一体化的有

连续修整的缓进磨削，这种工艺用来加工超精零件，以无人的计算机控制方式工作。

缓进磨削通常是用去去除难加工材料的大余量的平磨技术，特别用于工件最后完工表面要求精密形状的加工。有一些缓进磨削用于圆磨，但很少。

本文作者在英国产业（罗尔斯—罗依斯公司）和英国科学研究委员会的资助下，于七十年代在英国开展了研究工作。研究的目的是理解缓进磨削工艺的原理，开发这项技术，与用户（其中多数是航天厂商）一起促进机床业。

这项研究导致磨削工业的一次革命，自1980年以来，使得世界航天工业的生产率获得空前的提高。

传统的加工方法是用多工位夹具装卡许多另件，用往复式磨削加工。用手工装卡及检查工件在夹具中的位置需要相当多的时间。这是非生产时间，因为在工件装卸期间，机床不能运转。一旦工件装好，就修整砂轮。修整通常用台式安装挤轮，金刚石滚轮、金刚石笔进行，甚至用单颗粒金刚石仿形修整。近来，由于修整周期较短，应用顶置式金刚石滚轮修整砂轮。零件一装好，砂轮修整完毕，即可开始加工。应连续监控加工过程，检查砂轮质量是否降低。在工件一次装卡加工期间，加工循环可以停止多次，来重新修整砂轮，因为砂轮重载切削而丧失形状或造成了堵塞而振动。因此，效率极低。从装零件到卸下零件，占机时间太长。

连续修整的缓进磨削的切削率极高。与工件装卡和卸下所需的时间相比较切削时间就变得几乎微乎其微了。因此，使材料操作自动化，从而充分利用加工时间短的优点是极其重要的。

研究表明，应用顶置式金刚石滚轮修整器连续修整磨轮，材料去

除率较一般缓进磨削提高二十倍。除了提高了材料去除率之外，还避免了对工件表面造成热损坏在切削过程中产生的能量低得多，保证加工出高质量的可靠的工件。

今天，生产设施正在证实这些研究数据，若干厂商正在取得的成就表明，磨削加工正进入一个新世纪。专用工业及航天工业并不是从这项新技术中获得利益的唯一的工业。带连续修整的缓进磨削正在有利地与普通拉削、铣削和往复式磨削竞争，因为这种工艺具有高的金属去除率，加工出高精度的零件表面。

往 复 式 磨 削

往复式平磨是在美国应用的最古老和最流行的平磨技术。往复式磨床的设计从一个世纪开发以来，变化极小。往复式砂轮通常是硬砂轮，与较新技术的缓进砂轮相反，诱导孔隙率极小，而诱导孔隙率是缓进磨削工艺成功的必不可少的条件。

往复式磨削砂轮的切削深度很小，粗加工时一般在 0.002 英寸左右，精磨时在 0.0005 英寸左右，由被磨削的材料而定。工件向砂轮的进给速度很快，一般为 $50\sim 80$ 英尺/分。小切削深度、进给速度快必然导致砂轮上釉。在磨粒由于过度摩擦而磨损时即产生上釉。砂轮的粘结强度，特别是在工件材料较硬的情况下，会影响上釉效应。粘结牢固将磨粒保持在砂轮基体上，从而在磨粒由粘合剂上脱出时，与平面面积成正比的加在磨粒上的磨削力要高到足以使砂轮基体的粘结桥断裂。各个磨粒在往复式磨削过程中的切削深度很小，因而实际上是摩擦，而不是切削。这样促使砂轮表面变平滑。变钝的磨粒产生很高的法向力，从而产生巨大的摩擦热量。由摩擦能部分产生的所有

热量几乎都传导到工件的表面上,从而造成热破坏,工件表面质量差。

堵塞也造成砂轮表面平滑。堵塞是工件材料粘附在砂轮表面上形平滑表面的专用名词。堵塞在磨削软材料或者“粘性”材料中是常见的。软材料涂在或沉积在工件表面上以及砂轮的周边上。

上述的平滑表面在上釉和堵塞过程中常称为“磨损平面”,惊人地升高了砂轮上的法向力。往复式磨床设计的刚性差,与往复式磨削工艺切削深度小一起,造成磨床振动,对被磨削材料的表面完整性、获得精确尺寸的能力及工艺的总效率极为有害。

往复式磨削工艺不能很好地保持精确的形状。砂轮每次与工件角相碰撞就破坏砂轮周边上修整的形状。因此,大量的时间浪费在修整砂轮使它更新上面,特别是在接近工件最后尺寸时更是这样。

往复式磨削的效率由于工作台在行程一端终止时过分的空切时间而进一步被恶化。在几百次往复式循环中,大量的切削时间都消耗在工作台每个过程的停止和反向上。

往复式磨削的优点是往复式磨床的初始费用一般来说相当低。往复式磨削工艺是众所周知的,被工业界所接受。然而,往复式工艺的增长趋势却较差,特别是在加工难于加工的材料方面更差。

缓 进 磨 削

缓进磨削工艺要求专门为缓进磨削设计砂轮和磨床。美国机床制造厂商已认识到缓进磨削的重要性和增长潜力,并且认识到对往复式磨床改装也不会成功。与欧洲有经验的缓进磨床竞争打入市场也希望渺茫。

缓进磨削特别对于难加工的材料有较高的余量去除能力,有保持

尺寸和形状严紧公差的能力。缓进磨削在余量去除和精加工工艺方面能与拉削和铣削竞争。缓进磨削技术与传统的两种加工过程铣削、淬火然后往复式精磨方法相比较，单件加工成本低，一次加工表面质量好。

缓进磨削工艺限制了加工长零件能力。在缓进磨削工艺范围之内，由于砂轮质量降低，工件总是烧伤这样就限制了工件在一定切削深度下可能达到的磨削长度。

砂轮在缓进磨削中的切削深度比较大，在很多情况下是往复式磨削切削深度的10到100倍。对于容易磨削的材料，切削深度在1英寸以上并不是少见的。但与铣削工作台的速度相比较，工件进给速度慢。缓进磨削工艺与铣削类似，只是用砂轮代替铣刀。一般情况下，砂轮一次通过或者两次通过去除材料，先粗加工出形状，在砂轮修整之后精磨达到尺寸。

由于工件与砂轮的冲击减少，砂轮周边上修整的形状保持较长的时间。这意味着更有效地利用切削时间。缓进磨削时没有横向进给。

缓进磨削通常采用玻璃化的氧化铝砂轮或者碳化硅砂轮，虽然应用玻璃化的超级磨料，在许多专用磨削中正成功地应用环氧树脂和金属粘结剂。

应用玻璃化缓进磨削砂轮要考虑的关键因素是砂轮级别要软，在D-K范围内，要求强度适中的开式结构。砂轮的气孔在砂轮整个结构中必须均匀。缓进磨削砂轮的多气孔性使砂轮将切削液带到切削的长弧内，从而带走磨削所产生的热量。磨屑往往是很卷曲的绒状碎屑。砂轮的孔隙大也有助于排除切屑。

缓进磨削的切削深度大，产生长的切削弧。长切削弧往往使磨削振动衰减，从而减少震颤问题。切削弧长即意味着砂轮比往复式磨削

有多得多的颗粒与工件接触。虽然缓进磨削加在工件上的力要大，但在每个颗粒上的力却小，因而软砂轮可以满意地工作。

应用玻璃化砂轮时，砂轮修整基本上是用金刚石滚轮。其目的是将修整砂轮尽可能方便，同时保持形状精度。有两种方法进给修整器。一种是顶置式修整，将修整滚轮径向进给到砂轮；另一种是切向修整，金刚石滚轮在工作台上安装修整装置切向接触砂轮。最流行的方法是顶置式修整法，因为比工作台安装法修整来得快。工作台安装修整法更为精确，但是，新式的缓进磨削机床具有主轴增长闭环温度补偿。消除定位的热偏差，因为温度控制使修整器一直与工件夹具相一致。

在缓进磨削中正确应用切削液是十分重要的。缓进磨削砂轮的专门设计及其高诱导的多孔性，有助于这种情况，但是要求高压、高流速的切削液来保证切削液渗透到砂轮的孔隙中，导入切削弧内。切削液应用的不正确是结果差的一个主要原因。切削液的流速必须很高，为60~80加仑/分，喷嘴压力在80~100磅/英寸左右。设想出这种理论，即用喷嘴供给切削液时，切削液的速度应该等于或者超过砂轮线速度。这样保证切削液渗入砂轮周边，被带到切削弧中。在实际中切削末端经常出现缺乏切削液的现象，结果形成烧伤的痕迹。可以在工件后面接一条切削液导向槽，保证切削液流向切削弧的方法来克服这个问题。

研究表明，切削液的整体温度对缓进磨削的热损坏临界值有重要的影响。试验表明，切削液在通过切削弧时温度上升。切削液的热容量随切削弧的温度升高而降低。在缓进磨削的极限内，热传递方式将很快地由成核沸腾的对流和传导变成膜沸腾，造成工件烧伤。

为保持冷却切削液的温度稳定，将为缓进磨削提供热量控制。因

而，切削液致冷是有利的。

缓进磨削连续修整

缓进磨削和金刚石滚轮连续修整相结合是本文作者于七十年代在英国进行的研究成果。研究表明，在磨削的同时连续修整砂轮，同时补偿砂轮直径的变化，结果余量去除率提高极大。一个附带的优点是工件绝不会出现热损坏。

缓进磨削工艺的研究集中在确定砂轮周边的平面面积的磨损百分率，作为划分磨削能量的决定性因素。任务磨削工艺的总磨削能量由三种能量构成：切削、耕犁、摩擦。过去对往复式磨削进行的研究表明，切削和耕犁是总磨削能量的一个重要的量。在研究过程中进行的测量和统计检测表明，缓进磨削的磨削能量的划分是相当不同的。

应用连续修整工艺进行的研究能严格控制磨削参数，从而精确地确定磨损平面的比例与本过程的特有的能量的关系。结果表明，总磨削能量中只有3%是切削和耕犁，97%是摩擦。连续修整消除了大部分摩擦能量，从而使砂轮切削效率高。连续修整时，磨削能量的残余应力和热形式顺切削方向分布或随切屑离开磨削区，工件上的磨削力急剧地下降。砂轮稳定的锋利状态而且保留它的形状，使工件进给率在达到本过程的极限之前较一般缓进磨削提高二十倍。

特别是连续修整，它适用于一切形式的金刚石滚轮修整，金刚石滚轮速度必须接近砂轮线速度，速度为砂轮线速度的0.8。直径为4至6英寸的金刚石滚轮的速度在3000~4500转/分的范围内。由砂轮直径决定的严密控制的金刚石滚轮的径向进给率是极重要的。砂轮每转一转径向修整器的最大进给率为0.00008英寸左右。

这是特别高的修整器进给率。一般应用砂轮每转0.000008英寸的修整器进给率，但由材料、切削深度和长度以及工件装卸的相应时间决定，这在以后讨论。因此，修整系统相对于每分钟转速必须动态平衡；使用宽金刚滚轮，修整器进给要有足够的刚性，修整器精确的进给增量对着修整力方向。

带有连续修整的缓进磨削不仅使砂轮保持锋利，还保持砂轮周边的形状。在缓进磨削极限内，在连续修整之前缓进磨轮的脆弱易碎部分脱落，从而保护工件不被热损害。工件加工成带余量尺寸，在理论上其废品为零。工件可以再加工，保证表面无冶金损坏。

连续修整缓进磨削尽管可能是一次加工过程，给出砂轮应用高的印象，但并不一定是这样。它加工每一工件并不比缓进磨削用的砂轮量大。由于其生产率较缓进磨削高，因此，可能要更经常地换砂轮。

生产率的提高改变了磨削加工的局面，现在，切削时间只占停机时间的很小一部分。尽管本过程的专用能士较小，但加工时间短，从而要求机床主轴的峰值马力要高得多。目前连续修整缓进磨床的主轴驱动为45至100马力。因此，磨床刚性要大，静态和动态都要稳定。某些机床制造商提供环氧树脂混凝土床身，从而提高机床的全面的稳定性。磨削加工系统的特征应该是自动操作、工件自动装卸、自动检验和反馈，砂轮自动更换，在快速调整时在机器上平衡。所有这些特征都是在现代磨床设计中由连续修整缓进磨削得到的全部潜力。

工艺过程比较

应该理解，缓进磨削和连续修整缓进磨削并不能解决一切磨削加工应用的问题。往复式磨削对于容易磨削的材料，且要求去除的余量

少。要磨削的形状不太复杂的成形磨削的效费比是合算的。缓进磨削适合加工去除中等余量的难加工材料的短工件。连续修整缓进磨削可以很快地去除大余量，不管工件长度如何可以保持很精确的轮廓。从而，缓进磨削和连续修整缓进磨削正在取代铣削和拉削。

缓进磨削的优点是生产率高，能加工难加工的合金，取消铣削过程，保持更精确的形状，表面光洁度很好。缓进磨削是比机床工作台的运动超出工件不大的往复式磨削效率更高的工艺过程，大部分空闲时间都用于加工。缓进磨削的主要缺点，是在本过程的极限内会产生热损坏，结果工件表面 定整性差，出现冶金损坏。

连续修整缓进磨削表现出对最难加工的合金的高余量去除能力，其缺点是它太快，在机床和有关自动化设施上要求大量的投资。对这三种现有的磨削工艺进行比较，有助于认识它们的优缺点。很难进行总的比较，提出包括全部的拇指定律。下面的例子是有代表性的，中等难度的材料用成型磨削成复杂的形状，形状公差为0.0005英寸，尺寸公差优于0.002英寸。

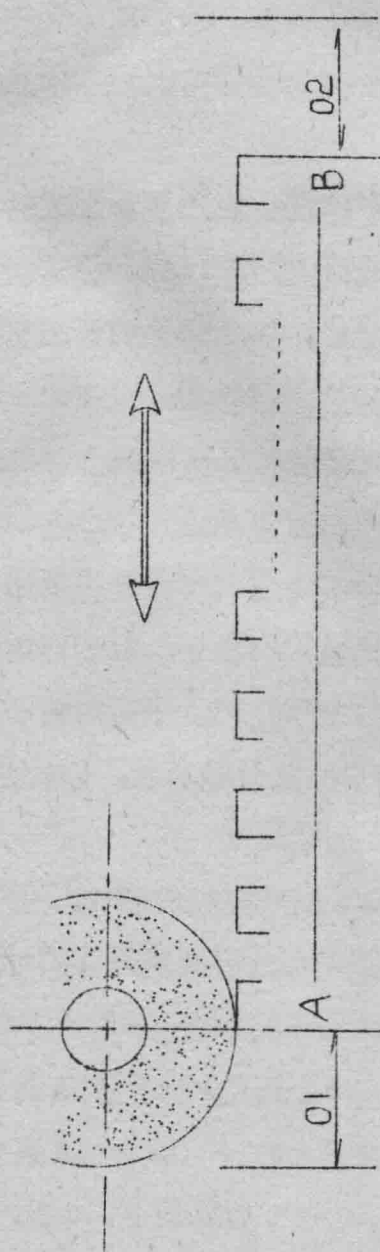
每一种工艺都应用24英寸直径的砂轮。

工件长1英寸，各固定部分的间隔是1英寸。

1. 往复式磨削

工作台的进给率为50英尺/分。从A到B的切削距离为23英寸，超出工件距离 $0.1 + 0.2 = 1.3$ 英寸，假设加速度和减速度无限，每36英寸行程用3.6秒。

向下粗磨进刀0.002英寸~0.240英寸(120次行程)，
向下精磨进刀0.0005~0.250英寸(20次行程)，无火花磨削5次行程。一共125次行程，切削时间450秒。

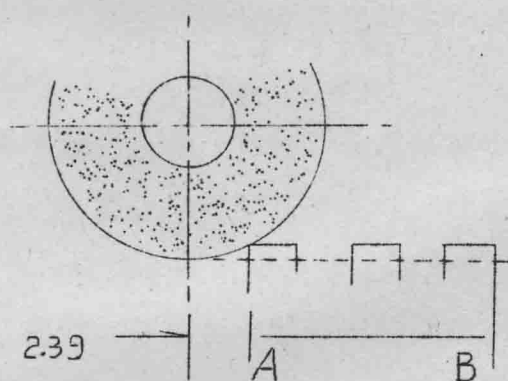


每件切削时间：37.5秒。

每次修整0.003英寸，修整6次砂轮径向磨损为0.018英寸。

2. 缓进磨削

缓进磨削极限仅三个工件。工作台进给率：粗磨为4.5英寸/分，切削深度0.240英寸；精磨进给率为60英寸/分，切削深度0.010英寸。从A到B的切削距离=5英寸。切削弧距离2.39英寸，粗磨一共7.39英寸，精磨5英寸，切削时间103.5秒。

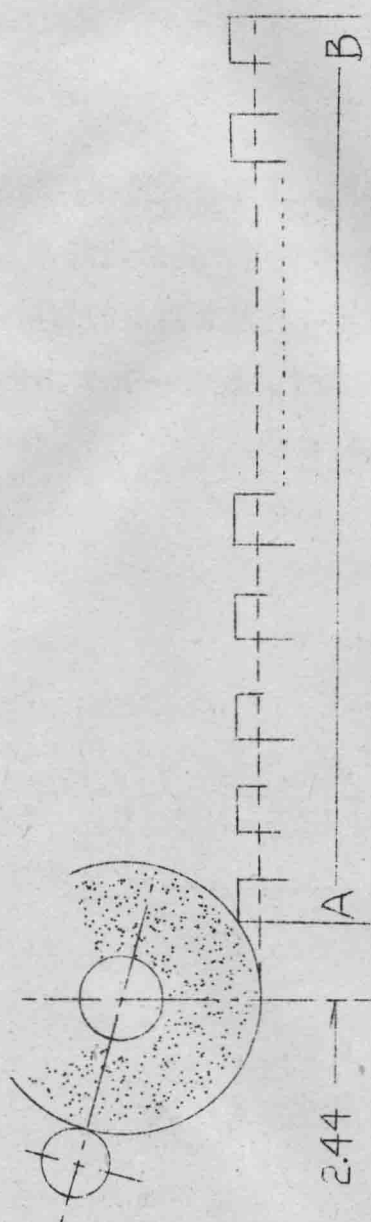


每件切削时间为34.5秒。

砂轮径向磨损0.010英寸修整一次。

3. 带连续修整缓进磨削

工作台进给率为50英寸/分，一次切削深度0.250英寸。切削距离A到B为23英寸，切削弧距离2.44英寸，一共



25.44 英寸，切削时间 30.53 秒。

每件切削时间 2.54 秒。

修整器连续进给速度在 1000 转/分时为 0.00002 英寸/转，砂轮总径向磨损为 0.010 英寸。

先进的磨削机床概念

连续修整缓进磨削工艺在机床设计中引起了一场革命。这种技术的高度生产性质实质上消除了手工操作，因此，机床的基本结构可以引进刚性更好的系统。在早期研究中已认识到连续修整缓进磨削用机床比一般缓进磨床需要的功率要大得多。适于连续修整缓进磨削机床，在砂轮线速度 5800 英尺/分相对应的主轴速度需 45 至 100 马力。

修整系统要求紧密控制，保持砂轮与修整器的同步速度比 0.8。修整器进给系统是关键，分辨率在砂轮每一转时为 $8 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$ 英寸。进给系统有点复杂，因为修整器的径向进给受到砂轮转数的限制。因此，修整器的线性进给率必须随着砂轮变小而增大，以保持稳定的线速度。根据修整器每分钟的径向进给速率应用修整器线性进给率是较易控制的特征。这种进给控制的修整器导致修整力不均匀。砂轮特性曲线随选择的进给率而不同。

金刚石滚轮的支承和进给机构在修整轮廓的稳定宽度和热循环方面易受机床振动的影响，为保证连续修整的成功，修整系统的刚性和热稳定性一定要格外好，修整器应采用直流电机驱动，其进给驱动应该是带位置反馈控制的直接的、典型的滚珠丝杠机械传动。修整系统是机床的关键部件，它不仅控制连续修整性能，也影响整个加工过程

的精度。

尽管使用连续修整。切削液应该大量供给，切削液的应用对连续进给缓进磨削的成功不象对缓进磨削那样关键。为保证尺寸和加工的一致性，切削液应该致冷。切削液系统的一个重要部分是密切注意悬浮在切削液表面上的磨屑的过滤和处理，旋风式和溢流式清洗系统不适用，也不可靠。连续修整过程会产生大量的切屑。首要的是需要一个系统来处理大量的“棉絮状”切削屑。建议用旋风式精滤作为备用设备的移动式纸带过滤器，翻转带或者撇渣液系统。根据选择的系统，总系统中大量切削液的量必须仔细地计算，以给出过滤和热稳定作用所需的足够的时间。

连续修整时，由于否定砂轮硬度的影响，砂轮的级别不是太关键，但是磨料粒度可以改变。氧化铝砂轮不能很好地加工钛，而碳化硅却能极成功地加工钛。CBN和金刚石适用于不同的材料，不同的另件结构和不同的本批量尺寸。

也有更复杂的磨床控制系统，即使在连续修整时，在磨床工作台移动时能升高和降低磨头。这种插入控制特征能沿磨床工作台轴线进行整形。

为达到高度的灵活性，磨床应该提供自动更换砂轮和在磨床上平衡的装置。在系统中应装修整器自动更换的设备，结合检测和控制反馈，以致磨床按给定的尺寸数据能自动调整。

在磨床工作台上应装一个类似上述的检测和敏感系统。用螺栓固定在磨床工作台上的常规另件紧固系统会有损于柔性单元系统。磨床应该设计成能容纳直线滑梭或者标准尺寸的盒式夹具，工件尺寸直接与滑梭和盒式夹具系统相关。被加工工件应离开加工单元紧固，存在缓冲存储库内。在盒式夹具内的各工件的标志应该用手工在紧固工位

输入到系统中去，以标识和跟踪。理想的夹具是能紧固一切形状的工作。这种夹具有可能由在单元中加工的工件结构决定。

连续修整缓进磨削工艺主要用于宇航工业中，特别用来制造已用磨削加工技术加工过的涡轮叶片。现在缓进磨削和带连续修整缓进磨削甚至在加工车间规模正在代替铣削和拉削操作。由于生产率极高，特别是在加工车间小批量加工时，系统需要设计成多方面的适应性。齿轮、泵转子及刀具的制造正在改革。园磨应用由于CBN的和多晶金刚石旋具的高速旋转性能而冲击较小。连续修整缓进磨削在园磨中的应用可能用于“难于加工”的材料，是以失去平衡，阻止高速旋转，为慢速旋转缓进磨削创造机会。在工具制造方面正在扩大应用：粗加工和精加工拉力，加工淬过火的滚刀、锯条、和螺纹加工模具。

磨削工具已成为未来结合恰当的自动化水平发展的关键。传统的往复式磨削过程总停机时间比例很大，如工件装卸时间、修整、砂轮和修整器更换等，机器切削时间在单停机时间中占很小的比例，另件装卸时间等已成为限制性的因素。

磨削单元 —— 灵活的自动化工厂

连续修整缓进磨削工艺极大地缩短了每个工件的加工时间。一个典型的例子，是用缓进磨削加工一个涡轮叶片需要2至3分钟，现在只需要3至4秒钟。

现有的缓进磨削机床尽管并不理想，但可以改造适应连续修整缓进磨削技术，取得合理的结果。如果改造机床是目的，则要极为谨慎。在1980年初，英国达比的Rolls-Royce公司决定走机床改造的路，努力在制造技术中领先。它当时拥有150多台缓进磨床和现有

机床设计在经过改造，用顶置式连续修整及用机器人自动装卸被加工零件。一个生产系统包括用机器人装卸工件的七台磨床，在每台磨床上进行一道磨削工序。涡轮叶片在取下送往下台机床加工之前经过清洗和检验。叶片固定在低熔点锌合金基体上运输。

Rolls-Royce 公司的七个单元线的缺点是锌合金基体的多次紧固，基体的繁重的装卸造成涡轮叶片因夹紧力在基体内的位置误差和运动。

Rolls-Royce 公司的第二代磨削加工单元目前正在安装。它包括一台专用机床，一次配置就能进行多个工序加工。密封的叶片被自动地装入上下有两个水平主轴的机床内。上水平轴有三个同轴砂轮，下轴有两个同轴砂轮，因而一次装入能加工五个面。一次可以操纵和加工一个叶片。这种机床的概念能使闭式涡轮叶片在三到四次夹紧即能完全加工。

挪威于1978年开始磨削涡轮叶片的RAMIGO（磨削操作的机器人技术及自动化测量）计划。挪威的康斯堡公司支持欧洲防御，承包仅用缓进磨削加工F16飞机的涡轮叶片。康斯堡公司经过可行性研究之后，于1982年得到美国空军（USAF）和普莱特·惠特尼飞机公司的财政支援来完成这项计划。RAMIGO系统于1984年1月运行生产硬件，表明自动化磨削单元系统可以怎样一体化，并且有利而成功地运行。

挪威的法律禁止上夜班工作。但是康斯堡公司已经利用了夜班，白天两班由人操作，夜班采用完全无人操作。RAMIGO系统已经实现了生产量增加50%，人力减少了75%。

这种系统的控制必须是双层次系统。低层的是机床级，控制系统监控机床状态，简化机床系统的诊断，控制另件管理系统和检验反馈