零裕量加工

全面致力于零裕量加工

将关键的模具表面铣削加工到最后的尺寸，或是加工到不足“十分之一”裕量的尺寸，从理论上说来已经没有留下任何误差余量。这样做需要对加工工艺的每一个步骤都信心十足并且绝对确信。

文 | Mark Albert

Redoe Mold 公司和 Eifel Mold & Engineering 公司代表了模具车间类型的两个极端：Redoe 公司是一家拥有 100 多名雇员和多种模具制造设备的国际公司；而 Eifel 公司则是一家只有 15 名员工的家族式模具企业。Redoe 公司专门从事大型、复杂的车灯模具生产；Eifel 公司则是以方向盘和内饰仪表板模具生产而著称（图 1）。

图 1 零裕量加工的实践，适用于大型、复杂模具的元件，例如图中 Redoe 公司生产的这种汽车尾灯模具的型芯

这两个车间的相同之处是：它们都在全面致力于零裕量加工。也就是说，在关键模具表面的铣削加工中不再保留多余的加工裕量（除了因刀具磨损、精度不足或无法控制的工艺变量所导致的特殊情况），即加工后没有利用手工打磨进行纠正或补偿的机会。

然而，在铣床上直接加工出几乎完美的模具表面，需要绕过几个增加模具生产时间的步骤。材料淬硬后可采用粗加工、半精加工和精加工操作（对于小型模具而言，通常可以在一台机床上通过一次性装卡调试就可以完成这些操作）。在加工后很少或根本不需要手工打磨（如果光学质量的模具要达到镜面级的表面光洁度，可能会需要采用金刚砂软膏进行抛光，但也仅此而已）。在较小的模具上，花费在纠正压力机验证型芯与型腔之间对准度上的时间从几天减少到几个小时，花费在较大型模具上的时间从几个星期减少到一两天。在大多数情况下，采用零裕量加工生产的模具，可在客户的注塑模加工生产中更长时间和更有效地运行。采用零裕量加工策略达到的最高效率，能够帮助这两家企业

在全球范围内提供价格极具争力的产品，并及时交货。Redoe 公司和 Eifel 公司的实践证明：这种技术既适用于小型模具公司也适用于大型模具公司，并能够取得良好效果。

成功的零裕量加工依赖于生产技术中四个领域的协调发展：适合于高速加工的高刚性、超精度加工机床、灵活和高重复精度的工件夹具、刀尖半径极其精确的刚性刀具夹座、在无灯光作业模式下能够生成高精度加工刀具路径的 CAM 软件。Redoe 公司和 Eifel 公司对零裕量加工所需的硬件和软件已准备就绪。更重要的是，这两个车间都具备了一支充分理解和掌握无错加工方法的队伍，从而可实现模具加工中所需的零裕量加工。

共同基础

虽然 Redoe 公司和 Eifel 公司在实施零裕量加工方面存在的区别令人兴趣十足，且非常重要，但这两个车间之间的共同点也很明显。双方负责人都是这一策略的支持者，并且保持着科学客观的态度。Eifel 公司总裁兼首席执行官 Rick Hecker 先生和 Redoe 公司 Eric Leene 先生的工作都是负责将零裕量加工技术应用于各自的车间，并确保严格按照程序执行，使其与新技术的发展保持一致。并且这两个车间主要从事汽车模具的生产。

Redoe 公司专门从事汽车大灯、尾灯和反光镜模具的加工，这些组件从本质上决定了汽车的外观。“设计师们正在以微小的拔模角度和光线折射纹理图案创建较长和较深的 3D 形状，以产生令人注目的视觉效果。”Leene 先生解释说。这意味着相应的模具要有更深的隐

图 2 这个方向盘模具型腔的近视图可显示出其加工时的表面质量，按照“模型”进行零余裕量加工，需要机床、刀具组装件和 CAM 编程具有极高的精度

窝、更复杂的轮廓和更精密的间隙等特点，这使得加工面临新的挑战。成型元件的光学表面质量要求会将最细微的缺陷放大，以至于破坏您所需的表面效果。

Eifel 公司也面临着相似的压力，但这是来自消费者从车内获得的感受。“方向盘外观不但看起来要漂亮，而且手感更要舒适（图 2）。”Hecker 解释说。模具必须满足这些关键的需求。另一个影响到模具加工审美的实例是仪表板的框架。这些问题同样会影响到 Eifel 公司生产模具的标准。例如，透明框架的部分必须按照型芯和型腔中的 A 级表面质量进行精加工。

小车间的大成就

Eifel 公司和 Redoe 公司全都采用零裕量加工生产，每个车间则是按照自己的方式实施这一概念。其最大的区别在于各车间按照其最有效的加工策略进行工作。Hecker 先生认为，在 Eifel 公司零裕量加工大约在 2005 年已经开始。他在 Single Source Technologies 公司（以下简称“SST”）工作时，就开始接触这一概念，这是一家在 Auburn Hills 附近的技术供应商。大约在 12 年前，SST 公司率先推出这一策略，这种工艺为许多模具车间带来了光明，其中就包括 Eifel 公司和 Redoe 公司。

两台来自 Hermle 公司的立式加工中心是 Eifel 公司零裕量加工的主要生产设备。2008 年，该公司安装了一台 C40 型机床；2011 年又安装了一台微小的 C30 型机床。新机床采用高压和通过主轴传送冷却液的方式进行冷却，并采用带有冷却液孔的新一代硬质合金涂层刀具，事实证明其对铣削和钻削加工是很有价值的。否则，这两台机床将没有多大的区别。这两台机床都配有旋转工作台，在第四根轴和第五轴根轴的两端，采用耳轴支持（图 3）。

Hecker 先生说：“我们之所以选用这些机床，因为其具有极高的精度和刚性。”对于 Eifel 公司来说，采用耳轴式的配置是特别重要的，因为该车间更倾向于尽可能使用 3 + 2 加工。在这种加工模式下，旋转轴被用作工件的导向，这样三根轴（X、Y 和 Z 轴）就可同时进行切削加工。

按照 Hercker 先生的说法，对于带有很小很深隐窝和很多凸缘的模具来说，采用 3+2 加工是非常理想的。其主要的优势之一是，只要使用较短和刚性更好的组合刀具，就能够达到工件的加工面。刚性更高的刀具，增强了零裕量加工概念核心中的高速加工技术（HSM）。HSM 高速加工技术涉及到用高进给速度与紧密间隔的步距进行轻切削加工。“一把刚性良好的短刀具将可承受较高的进给速度，不会发生偏转，因而我们就可以用最佳的切削深度达到最佳的切屑负荷，即使是直径小于 1 mm 的刀具。”Hecker 先生解释说。这也有助于该车间可以在这些机床转速为 18 000 r/min 的主轴上实现满负荷生产。

当然，3+2 加工所固有的优势

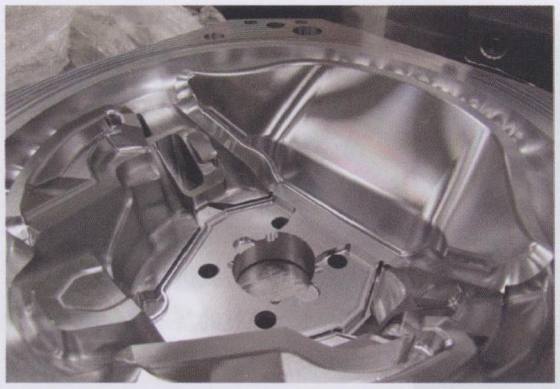

图 3 在 Eifel 公司的 Hermle C40 和 C30 型五轴加工中心上，配有一套旋转工作台，其两侧由耳轴支持，提供有第四轴和第五轴

刀具策略，得到其他零裕量加工先决条件的支持，例如 HSK 刀具接口和经过平衡的热套刀夹，如来自 Haimer USA 公司的 Slim-Line 式锥形长刀夹。对于半精加工和精密加工而言，Eifel 公司通常采用球头立铣刀。对于直径为 0.020 in（1 in=25.4 mm，下同）或小于该尺寸的刀具，该车间采用来自 SST 公司的 NS Tool 刀具产品。如果是较大的刀具，该车间一般从 DIJET 公司购买。首要考虑的因素是刀尖半径的精度（精加工操作的标准精度是 ±0.0002 in），精加工走刀时的跨步间隔可能接近 0.0005 in（图 4）。

Eifel 公司依赖 3+2 加工对 CAM 编程也有影响。对于所有的零裕量加工，该车间采用来自 Delcam 公司的 PowerMILL 软件。该车间数控经理 Gary Schulz 先生说，这款软件对这个加工策略具有特别的价值：可选用多种方式使刀具接近工件表面。“在达到深口隐窝底部的狭小空间时，接近角可能会受到限制，所以最好是有多种可选用的方法。这一切都是为了使刀具在接触工件时能够得到很好的保护。”Schulz 先生解释说。

具有亮点的其他功能是其对库存模型的可视化功能。PowerMILL 软件可显示出前一把刀具加工操作后遗留在其背后的材料。这允许编程员选择“其余加工”选项所需的下一把较小的刀具。“此功能有助于我们能够确定，这把刀具是否会遇到意想不到的材料。”Schulz 先生说。

最后，在 3+2 操作过程中，先进的碰撞检测法将能提供另一个层次的保护功能。Schulz 先生说，在计划 3 + 2 加工时，可以很容易地想到工件表面和刀尖的问题，而忽视考虑其附近的几何形状和整个刀具组装件的形状。他解释说，通过碰撞检测可能会捕捉到造成刀具断裂或主轴头毁损的疏漏问题。

大模具 大效益

由于多种原因，零裕量加工技术更容易被生产小型模具的车间所接受。生产较大和复杂模具的车间，起初将零裕量加工看作是一种风险很大、很昂贵和很困难的加工。在 Redoe 公司，Leene 先生不同意这种说。随着加工技术的进步，已大大缓解了在大型工件上进行零裕量加工的风险和困难。

Leene 先生指着车间内两台来自牧野公司的 MCC 2013 型六轴卧式加工中心作为例子向我们介绍，这些机床是 Redoe 公司加工大型模具型芯和型腔的核心设备，精加工后很少或无需后续手工打磨（图 5）。“这些机床整天加工的公差精度可保持在 ±0.001~0.002 in。”Leene 先生肯定地说，“这种极端精度，既可靠又精确，使我们可以加快模具的生产速度和大幅度减少模具的逐点打磨时间。”

在 Redoe 公司，“零裕量加工”通常意味着关键的模具表面可以切削加工到 -0.001 in 的状态。确切地说，达到 CAD 所规定的几何形状之下的水平。其原因可以追溯到 Redoe 公司生产的模具尺寸。“我们经常需要用 15 in 或 18 in 长的刀具切削加工，我们可以预测到会出现略微的偏差。如果发生这样的情况，可将其切削加工到负公差状态，允许其出现那种偏差。此外，当零件的尺寸被切削加工掉 0.001 in 时，插件和挺杆极有可能会自动下降就位，无需匹配。对我们来说这是非常理想的一点。”Leene 先生解释说。

出现负裕量的情况，说明他对这些机床充满了信心。虽然这种方法看起来会增加其表面达到低于可接受公差的可能性，但 Leene 先生

图 4 Rick Hecker 先生、Gary Schulz 先生和 Brainda Johson 先生正在检查一个安全气囊保持器外壳的模具，这个模具是由 H13 号模具钢在淬火状态下切削加工而成的，其完工后不需要经过手工打磨或逐点打磨

并不担心。他说："有了这些机床，我们从来没有碰到过需要焊接的情况。"这里指的是：在实践中，将新的材料堆焊在模具的表面上，以便再次加工，作为一种纠正补救措施。

Redoe公司的第一台MCC2013型机床在2007年安装。这台机床标志着该车间的大型模具零件开始向卧式加工方向过渡。事实证明，机床的卧式配置具有一定的优越性，因为它提供有更好的排屑功能、更大的换刀装置、具有多次调试设置的更大空间、减少了每一个模具的调试设置次数，因为它可以接近工件的多个加工面。

采用卧式加工鼓励车间探索使用更加灵活的工装夹具。而Eifel公司发现，在立式加工中心上加工小型工件，采用磁性夹座是非常理想的，Redoe公司需要在标尺上使用模块化的集成夹具系统，使其能够迅速、精确和重复地夹紧固定大型模具工件。采用FCS系统的夹具组件，它使用精确的参考基准点，以确保精确的重复定位精度。

北美市场由SST公司负责分销FCS System公司的夹具，该系统由基板组成，配有公用定位孔网络，通过接口与模块式安装立柱连接，而安装立柱以直立的位置附装于模具基座上（图6）。将安装立柱中的夹紧圈在定位孔中拧紧，以提供一个正向的位置。安装立柱也有夹持模具基座，使其与工作台保持一定的距离，以增加五轴加工的间隙。支持托盘化作业为将来实现更高的自动化生产水平开创了一条道路。

第二台MCC2013型机床在2011年初安装。与原先这类机床的明显区别是，牧野公司的VG（可变几何形状）技术是为六轴功能服务的。在这种情况下，第六轴是一个内置式旋转工作台，具有相同的精度和刚性，但增加了更大的灵活性。Leene先生说，接近模具功能的改进是其一个很大的优点，这对Redoe公司来说是特别重要的。例如，为了接近深圆角，机床可以编程处理，除了使*A*轴和*C*轴旋转外，还可对*B*轴进行分度。实际上，这可使壁体倾斜，离开刀具的侧面。

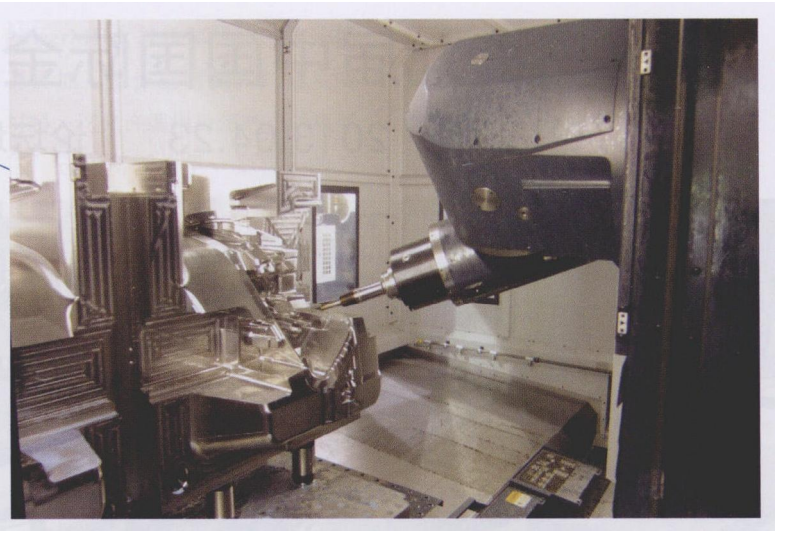

图5 Redoe公司从牧野公司引进的MCC2013VG型机床是一台六轴卧式加工中心，其工作面积为1500 mm×1200 mm，具有六轴加工能力

此外，支撑结构一端的设计具有更好的可接近性，使长度较短的刀具可以伸展到深圆角的位置。"为了以必要的刚性保持我们所需要的精度，对困难的深度加工部分，采用负裕量加工是十分必要的。"Leene先生解释说。六轴VG技术的另一个优势是其可伸展11 in的大型关节。在典型的多轴机床上，这个距离要短得多，可能会造成干扰，因此需要更长的刀具组装件。

Leene先生说："这里的最主要的优点是产量更高，我们可以让这台机床保持每天24 h和每周7天的切削加工。"

Redoe公司零裕量加工策略另一个值得注意的方面是：决定保留MCC2013型机床，主要是为半精加工和精加工操作提供服务。Leene先生说："我们可以在这些机床上进行粗加工作业，但我们选择采用具有较高扭矩和较低主轴转速的东芝镗铣床。"这一策略之所以可行的一个原因是：当工件从一台机床转移到另一台机床时，其共同的FCS工件夹具系统可最大限度地减少转换时间，而不会降低其定位精度。

当然，Redoe公司在刀具和CAM编程能力方面，坚持零裕量加工所要求的原则。直径3 mm和小于3 mm的刀具从NS Tool公司采购，而较大的刀具则由OSG Tap and Die公司提供。至于在编程方面，该车间采用来自于CGS North America公司的CAM-Tool软件，用于要求达到光学级表面质量的模具编程。Leene先生说，这款CAM产品的强度是一致的，在高速精加工走刀过程中，它始终保持稳定的切削负荷。这些加工通常涉及到一把2 mm的球端铣刀，其相互之间的步距间隔为0.0015~0.002 in。五轴机床的所有其他编程都采用Delcam公司的PowerMILL软件，并在车间内进行处理。

共同的理念

将零裕量加工称之为模具车间的一种"生活方式"，是毫不夸张的。在这种生活方式的背后，

有一套哲学理论，Hecker 先生和 Leene 先生都认为其是必不可少的。这些原则分为三部分：人员、工艺流程和技术。

1. 人员

车间的工作人员必须对他们的团队能力充满信心，确信他们能够生产出近乎完美的模具表面。在生产技能和工作经验方面，机床操作员和编程员必须在互相沟通和尊重的基础上，相互信任。每个团队成员都必须承担起责任，使生产原料的产出达到最大化，包括最充分地利用无人化加工生产的能力。

必须充分理解，诸如零裕量加工这类先进技术，代表了最好的工作安全性，因为它们对于具有竞争力的价格和及时交货是必不可少的。车间里的每个人都是一个利益共享者（图 7）。

2. 工艺流程

在加工后很少需要处理或无需处理的模具表面加工生产，要求采用一套系统的方法。工艺流程中的所有组件必须做到无缝连接，相互配合，中间不能有薄弱的环节。

加工后模具表面的精度和平滑度，取决于工艺流程中每一个加工步骤的内在固有精度，包括高精度机床性能、高精度刀具路径指令以及高精度刀尖半径。高产量是其首要目标之一。零裕量加工技术大大加速了模具的生产，但并没有增加车间内工作人员的数量。

图 6 由 FCS System 公司提供的一套以网络为基础的精密夹具系统，可以让 Redoe 公司将大型模具基座从一台机床上搬移到另一台机床上，不需要建立指定的位置，带定位销的立柱与每台机床上安装的基板网络模型孔接口连接

图 7 Eric Leene 先生（右）和 Chad Nadeau 先生正从下模中取出其生产的尾灯灯罩

3. 技术

车间内应配置合适的加工设备，包括机床、刀具、CAM 软件和工装夹具，这是一个不能妥协的要求。根据整个模具生产过程中的整体节约总量考虑，作为一个工程包，投资购置全套技术组件可以而且应该是合乎情理的。

技术并不是一成不变的。致力于零裕量加工的模具车间，应该始终不渝地为下一阶段寻求最新的发展前景，并期望继续不断地增加投资。应用自动化技术是至关重要的。利用自动化技术缩减劳动时间，使生产系统的产出达到最大化是其首要目标。

塑造未来

根据其性质，零裕量加工要求将全部精力集中在当前的时刻。然而，Leene 先生和 Hecker 先生显然将重点着眼于未来。每个人对其车间下一步需要做什么工作都有一个明确的想法。他们的计划涉及到更多的自动化生产，以提高机床的产量，而不增加劳动力的投入。具体来说，Redoe 公司正在为另一台六轴 MCC2013 VG 机床，制订 ROI 投资回报率计划。而 Eifel 公司正在寻找一个新厂房的位置，以便有充足的空间安置机床，使其具有更好的工作流程和实现托盘化生产。

使这两个车间脱颖而出的原因是：他们确信，在北美生产制造模具确实是很有前途的。SST 公司副总裁 Keith Kauzlerich 先生认为，看到这些本地公司重获全球竞争能力将会给他带来很大的鼓舞。“我看到很多公司对这个行业的未来再次充满了信心。十年前，模具车间已濒临绝望的境地。那些幸存下来的企业已发展得更为强大，正所谓适者生存。”Keith Kauzlerich 先生说，“零裕量加工是一项以技术为基础的工艺，可以使企业下定决心，采用一种专用刀具。这是一个关键性的适应过程，只有通过这一过程才能使其发生根本的转变。”

最重要的是：这种方法可以创建一个良好的车间环境，在这个环境中，一个有能力的员工可以感受到它的动力和活力。“这是一种车间的生活方式，正在吸引着模具制造商的新一代青年俊才。”Hecker 先生说。MM