五轴加工

将汽车加工的经验教训应用到航空航天

更多精彩请扫描二维码

尽管赛车运动是前 NASCAR 车手 Brian Ickler 所拥有的工厂关注的焦点，但对五轴加工和工艺设计的重视已经打开了通向新航空航天项目的大门。

文 | Matt Danford

当12 岁的 Brian Ickler 在南加州的沙漠中第一次爬进父亲的定制车车座之前，他就知道未来会从事赛车项目。然而 20 多年以后，Ickler 把更多的时间花在了数控加工机床当中，而非赛车车轮后面。Ickler 之前在 NASCAR 的竞争对手会不断推动这些部件向极限强度（超越极限强度）发展，以满足他们对每圈用时缩短零点几秒的永恒追求。

关注点的改变意味着向雄心壮志妥协。在全身心投入制造业务之前，他只是一个业余爱好者，这位从车手转型的工厂主人在不到四年的时间里见证了，Ickler 制造公司的面积从 4500 ft^2（1 ft^2=0.093 m^2）增加到 14 000 ft^2，规模从一台数控加工机床发展到七台机床。生产主要围绕两台五轴模型，它们同时承担“3+2”成角操作和全部的等高线同时绘制工作，而五人团队保持所有设备（和一般业务）最高效率地运行。

快速发展提醒工厂将眼光放的更为长远。目前超过 90% 的设备由部件组成，这驱使人们不再循规蹈矩，而是希望冲破云霄。这些快速周转的航空航天和防御原型与推动位于 Mooresville 多数公司

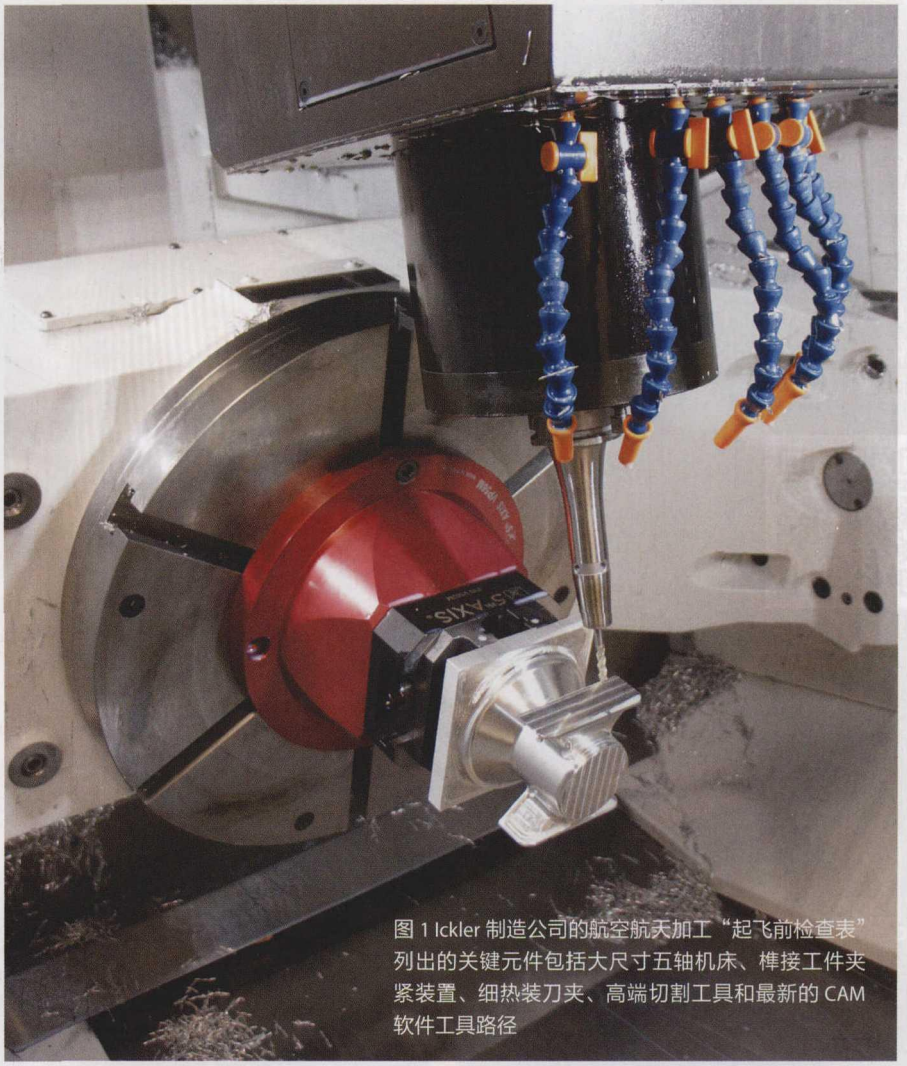

图 1 Ickler 制造公司的航空航天加工“起飞前检查表”列出的关键元件包括大尺寸五轴机床、榫接工件夹紧装置、细热装刀夹、高端切割工具和最新的 CAM 软件工具路径

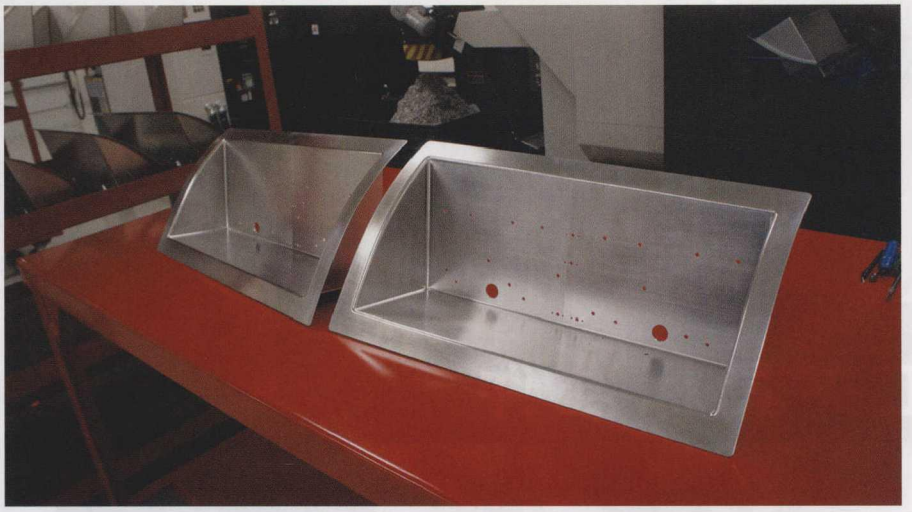

图 2 重型材料的去除对于航空航天和汽车零件是相似的。这些起落架灯罩使用的每块铝的重量均超过 200 lb。在传统的三轴粗加工过程中，要去除超过一半材料

发展的赛车零件有着诸多相似之处。它们非常相似，实际上，如果拿到一份有效的航空航天加工工艺“起飞前检查表”，Ickler 制造公司就可以在进入市场前核对所有必要的元件。“它们也很宝贵。”Ickler 在提到促进公司取得成功的各种赛车零件时说道，“它们不仅要发挥作用，还要美观。我很高兴我们现在自己做的东西质量，没有制造任何粗糙的零件。否则一切将会困难很多。”

与加工工作相关的一切东西都发生了变化。交付时间更加紧张，从以前的五周或六周缩短到一周或两周，减少了编程和设置的时间。还有很多程序要编制，因为单个程序不能使用太长时间。与汽车加工不同，新的原型最多只需要几个零件，所以机床要花更多时间切割不同的零件，而不是加工相同的零件。与更多零件和程序竞争还需要文件的流程文档，尤其对于敏感的航空航天和国防工程。

最后一点，Ickler 是第一个承认自己面临着巨大挑战的人。例如，增加一个专门的品质实验室和通过 AS9100 认证，这对于真正在航空航天领域站稳脚跟很重要。Ickler 仍然坚持认为公司已经做好了准备，因为 Ickler 在 NASCAR 和 Indycar 团队工作的经验为流程管理奠定了可靠的基础。

不断前进

航空航天领域有着广阔的机遇，而且单个零件的利润通常很高。

航空航天和国防合同为工厂有序过渡提供了优势。冗长和繁重的粗加工过程、严格的半径、经过雕刻的表面和光滑的混合材料，这一切都是第一个航空航天原型出现之前 Ickler 制造公司最为常见的东西，工厂也具备加工钛、铬镍铁合金等材料的经验。考虑到零件几何形状和材料的相似性，工厂按照自己的节奏基本能够适应新竞争领域的实际需要。

技术基础的核心是长期关注高速五轴加工。Ickler 回忆起自己拿到 NASCAR 的合同，但不能亲自驾驶赛车的时候，在火车上、飞机上和酒店房间里观看与加工相关的互联网视频。Ickler 从未有过别的想法。在他编写第一个数控加工程序后一年半左右，安装了第一台五轴机床。实际上，工厂使用带第四根轴旋转工作台的三轴 VMC 已经实现了快速发展，而且工厂的首要目标是提升产量，而不是提高能力。尽管他从未用五轴机床编程，但他理解其中的潜力。

恰当的说，新机床的第一份收入源于在 Facebook 上发布的一个图片。从那以后，多数零件的加工顺序都变成了先粗加工，然后逐步使用更小的球头端铣刀进行高转速、高速度、低切割深度和小步距的加工。haimer 生产的热装刀夹可以确保使用第五根轴工件夹紧装置提供的固定装置上 0.08 in 的榫头充分接触到工件的五个面。这种方法的优势是避免了直接冲击和设置步骤产生的连锁反应。“即使零件可以在三轴上加工，使用五轴机床却可以帮助你将零件倾斜 15° 。使用球头工具清理表面时镜面光洁度更高。”Ickler 说道。

如果不具备使用技巧，则技术的价值会打折扣。例如，一年多之前加入团队后，Chris Graham 早期的贡献之一就是开发和

图 3 起落架灯罩的精加工多数在工厂使用最新五轴加工中心进行。这个画面描绘了老式五轴机床上进行了第三组操作，即清理第二步接触不到的零件区域。尽管该操作也可以在三轴机床上进行，但倾斜零件，提高清洁效果在五轴机床上更容易实现

图 4 五轴操作使用第五根轴工件夹紧装置，通过三轴 VMC 上加工的 0.08 in 榫头夹紧零件，与背景中所示的 Okuma Genos M560V 相似

优化了在五轴机床上安装大型汽车油盘所需的固定装置和程序。

爬到更高处

创造性的编程和固定装置对于争取业务非常关键。然而，Ickler 只看到了充分利用新程序员才华面临的障碍，工厂需要第二台五轴机床来处理超过 100 个油盘零件的项目（以及类似项目），从而避免过量使用第一台机床。这就是购买第一台五轴机床时的情况，2016 年 9 月购买 Okuma MU-5000V 时，Ickler 决定改变产量优先的想法。除了需要占用更大的工作区域之外（*X*、*Y* 和 *Z* 轴行程从 30 in × 20 in × 20 in 增大到 31.5 in × 41.34 in × 23.62 in，1 in=25.4 mm），机床的双柱设计避免了悬垂 *Y* 轴。相比之下，使用老式的 C 框架机床时，程序员必须把更多注意力放在特定零件如何才能精确位于工作区域之内。新的机床清理碎片的效率更高，这对于长时间无人值守运行尤为重要。

最重要的是，它几乎在任何情况下都能够快速去除多于材料。Graham 引用了之前提到的油盘零件周期缩短约 50% 的例子。进料速率从 75 提高到 500 ipm 后，加工用时从 30 h 缩短到 14 h。由于在安装五轴机床之后很快又安装了 Okuma Genos M560V VMC，工厂支持三轴的能力也得到的同水平的提升。“每台五轴机床需要三轴机床提供支持。”Graham 提到处理大部分粗加工和二次加工，如清理零件榫接面时说道。“零件真的和完成最后一道工序时一样完美。”Ickler 补充说道。

Ickler 制造公司技术投资的显著变化趋势是购买更多超出工厂当前需要的设备。例如，购买现在用于切割 14 in 直径杆的 H-14A 数控加工带锯时，多数设备采用了直径小于 4 in 的零件。Ickler 将其称为“超前购买趋势”。考虑他的切割工具使用方法：如果一个端铣刀比另一个成本低 5 美元，则可能成为购买前者的理由。

最终结果会证实这一点。“我不能相信有一天我们会真正考虑切割原材料。”Ickler 这样表达对于锯的看法。他也准备好了一个切割工具实例，它是一款多用刀具，可以完成各种铝切割操作。具体说，它是 Helical Solutions 公司生产的 0.5 in 直径的三槽端铣刀，带有 0.03 in 的拐角半径和边缘刮板，在 MU-5000V 上经过最近三个月的粗加工后仍然保持完好。

这种刀具的寿命部分取决于工厂是否保持使用最新的 Mastercam 软件，Graham 补充说。具体地说，他愿意不断升级的原因是软件的动态研磨工具路径为冗长的粗加工流程带来了显著的利好。软件设计可以通过定义超出区域边界的 2D 和 3D 工具路径来确保始终如一的切割条件。例如，通过实时调整参数保持统一的切削力。除了延长刀具寿命，动态研磨还能使用更多的刀槽，而不必担心埋没刀具，这样就降低了热量的产生，并提高了碎片清理性能。

交通控制

对于处理与原型相关的小规模订单，最重要的是设计，保持程序比机床更先进。相应策略如下：

程序标准化

对于从事研磨的工厂来说，标准化的最佳实例就是列出一份工具清单。不同机床具备的相同换刀装置槽内的同样刀具可以确保满足程序员的一切要求，并且避免发生混淆。“我们确定了一组在多数情况下都要用到的工具。”Graham 说，“我们不希望有几百种选择，我们想知道有什么工具以及在不同情况下如何使用这些工具。”

这样可以缩减切割工具的库存量，对于 Ickler 制造公司这样经常使用专用道具加工复杂零件的工厂很有好处。最近的一个实例是，Indycar 的一款零件在进行一系

列同步五轴等高线绘制和“3+2”研磨及钻孔时需要 60 种独立的工具。

工具距离实现标准化还差得很远。工厂还有些参数标准，例如尖点高度（多数饰面为 0.0001 in）。坯料的标准长度为 12 ft，所有材料都有相同的 0.08 in 榫头，尽可能固定在相同的固定装置上。总体上看，这种方法不仅能加工高品质零件，还能加工 Ickler 制造公司独有的零件。

图 6 尽管工厂很快就采用了五轴技术，伊 Ickler 在更换四轴旋转工作台之前才首次学习给三轴机床写程序。在工厂最早购买的机床当中，Haas?VF4 VMC 仍让和以前一样忙碌

几乎能定义一切

CAM 软件工具库存储的信息不仅涉及切割刀具本身，存储条目还包括各种刀具架的具体悬臂长度。即便超出了工具库的范围，对每种设备部件，甚至一个小的虎钳螺栓建模对于优化编程流程都至关重要。“我们可以轻松地将信息从一台机床导入另一台机床，您可以在几分钟内对粗加工程序进行编程，因为一切都准备好了，固定装置、竖板和刀夹。有时候你只需要重新关联刀具路径。”Graham 介绍。

将经验教训纳入加工流程

Graham 使用“重新关联”这个术语并非意外。加工策略可以针对不同项目而修改，并且差异很大的零件之间通常也存在相似的特征。其实就是对于特殊的几何形状和材料，在合适的情况下使用正确的切割刀具。

先进的 CAM 软件使得存储最佳实践数据变得相对容易，并且可以查看工件在加工之前究竟会发生什么。为了做到这一点，工厂要维护好数据库，数据库中存储着适合切割各种材料的具体刀具信息。“两个版本的 Mastercam 设置方法安全相同。”Ickler 补充说，“对于半英寸的 30 毫英寸半径外圆角铝，它直到粗加工步距、切削厚度、进给量和转速都是现成的。我们可以进行细调，但我们知道这些数据能发挥作用并且安全可靠。之后，精加工变成了挑选拐角和保持典型薄壁零件的安装刚度。”

认真议价

任何工厂的产能都是有限的，但确保加工的零件符合要求对于航空航天工业非常重要。例如，工厂可能要避免竞标需要大量电火花加工（EDM）工作的项目，因为自身不具备这样的能力，而且无法控制。有些工艺，尤其是各种形式的表面处理是不可避免的，但即便如此，工厂的目标仍然是一次性完成加工，尽可能减少中断，并且避免在制工件混乱堆积。由于工件价格昂贵，Ickler 通常会考虑项目利润能够支付额外购买原材料的花费。这样做，即便出现问题，仍然可以满足订单要求。与客户和供应商定期沟通也很重要。

图 5 切割工件的数控加工带锯（Hydmech H-14A）最初看似很有“杀伤力”

无人值守的情况下运行

编程和设置工作在白班期间完成，冗长的加工程序在无人值守的夜班期间完成。看起来很简单，但无人值守的加工方式对于工厂是一个全新领域，这需要花点时间去适应。这种加工方式对于以上几乎所有策略都有所帮助。

“一切问题都要考虑”超出了无人值守加工模式。尽管 Ickler 认真强调了自己对即将到来的挑战并无幻想，但 Ickler 相信促进工厂取得当前成功的思维方式将会继续发挥作用。他已经计划布局多达 20 台机床。近期目标包括建设一个专用的品质实验室，并配备专职的质量经理和坐标测量机，同时增加一个企业资源规划系统，用于管理和跟踪数据。

“对于其他操作，与文档和可追溯性相关的工具可能发生变化，但基础已经具备。坦率地说，我们不用再做什么很不一样的工作。”MM