

齿轮加工

形成闭环机加工

采集信息是一项值得付出的努力，但只有在信息投入实际使用时才称得上值得。将测量数据应用于螺旋伞齿轮制造工艺的精简工作，更清晰体现出闭环机加工的真正价值。

文 | Russ Willcutt



图1 Francisco Milan 正在操作一台 Junker 外圆磨床加工行星齿轮，他说：“从一开始就为了这个目的而设计的 AS9100 认证机加工车间内，使用这台新设备的工作让我觉得很满足，而且也更容易完成高品质的工作。”

在一般用语当中，“闭环机加工”涉及到将测量数据返送至设计软件，设计软件自动调整偏差并发送修改后的代码至机床，确保最终加工结果与预定目标的几何形状相符。特别是当用于齿轮设计时，其好处包括了减少装卡次数、各个部件间差异最小化以及研磨加工所能生产的高质量表面。作为闭环齿轮机加工的领先倡导者，德克萨斯州 Seguin 的 Rave Gears 公司让这个概念深深渗透到自己的整个业务模式当中。

公司齿轮部副总裁 Thomas Alaniva 表示：“闭环制造是一种与其机加工过程一样重要的理念。它代表着从整个循环当中消除人为误差并让设计方案和成品快速而顺畅匹配的承诺。”

尽管闭环加工概念并非新生概念，但随着磨削和测量技术的进步，以及 Alaniva 先生多年来积累经验的运用，都让 Rave Gears 公司能够精简作业流程，同时改善齿轮质量并降低生产成本。

不断尝试

很难找到比 Alaniva 一样知名且更熟悉“闭环数字形状测量过程”的人士了。他参与过 Gleason 软件 Klingelnberg 版本的内部测试工作，而 Gleason 也是



图2 装载到 Haas VF-2SSYT 立式加工中心上的齿轮为的是执行其他机加工作业

其开发领域的先行者，当时是差不多 30 年前，他正在霍尼韦尔公司的发动机部工作。在这个职位上任职 21 年之后，并与系统创造者的儿子 Soeren Weiner 博士并肩工作，他随后在贝尔直升机公司的传动系统中心工作了 6 年。除其他工作之外，在那里他继续参与着螺旋齿轮和双曲面齿轮设计和制造用闭环系统的工作。Rave Gears 公司在 2012 年由首席执行官 Nick Patel 和总裁 Bruce Roberge 共同创立之后，Alaniva 先生看到了在企业环境下继续探索这个流程的机遇。他深受这两位计划所吸引，他们想要创建一家高精密齿轮制造公司，为航空、汽车、石油天然气、赛车和军事/国际市场服务，采用最新型的设备、工艺和技术。

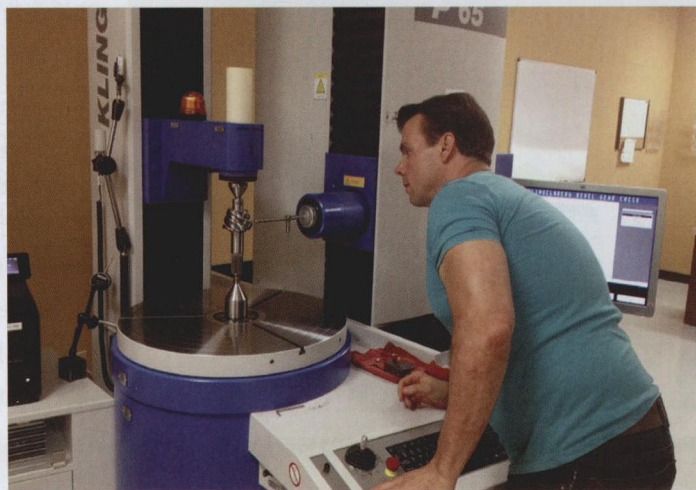
“我们最初采用了购买一两台重新制造机床的路径，但是我们很快意识到这并不是我们所想要做的。” Roberge 先生回忆道，并补充说：“我和 Patel 先生曾经在另一家齿轮制造公司共事多年，因此完全知道他们想要和想要继续做的事情。我们决定转向购买全新设备，自那之后从未后悔。”

其结果是一座占地 2 万 ft^2 ($1 \text{ ft} = 92\,903 \text{ mm}^2$) 的生产设施且即将扩建，这更像是一间展示室而不是生产车间，配备了来自 Höfler、DMG MORI、Haas、Mazak、Mitsubishi、Junker 和 Studer 的崭新车削、铣削和磨削中心，这些中心

通过部署形成一个精简的工作流程。公司最新购入了第 2 台大型 Klingelnberg/Oerlikon G60 螺旋伞齿轮磨床，这台磨床支持 Rave 公司对深磨工艺的持续开发，也就是直接从实心坯件磨制齿轮的工艺。

公司在深磨领域取得了如此之大的成功，以致于在事实上深磨已经成为公司所生产这些齿轮的标准作业规程。Roberge 说：“我们的车间里并没有用于切削轮齿的齿轮切割机。从实心坯件磨制成轮齿的工艺对我们来说已经是如此普通，不再是一种令人惊叹的方式，只是我们做自己工作的方式而已。而 Thomas 花费这么多年潜心研究和完善的闭环过程也是其中一项重大原因。”

图3 作为齿轮事业部副总裁的 Thomas Alaniva 已经在研究和改进螺旋伞齿轮闭环制造过程中花费了近 30 年，包括对这款设计软件最早版本的内部测试



日常磨削工作

尽管许多公司提供了用于不同类型齿轮以及其他部件的闭环设计 / 制造用软件，但其基本概念仍然涉及到采用坚实可靠的设计方案，特别是用保持原位不动的坯料机加工出齿轮、测量尺寸，然后自动与原始设计方案相比较，做出纠正并随后完成机加工。相比之下，Rave Gears 的步骤包括：设计齿轮、计划磨削次序、按接近目标值生产齿轮、在一台 3D 齿轮分析仪上测量结果并与原始设计方案做对比、计算设计方案与近目标齿轮之间的差异、做出调整，重新将齿轮安装到磨床上，继续磨削加工直至完成。

Alaniva 说：“这基本上就是一套消除了操作者干预所形成错误的系统。如果您将从设计直至制造和检验再至发货的整个过程做成了闭环形式，那么其中就不包括任何主观性。所有事情非黑即白，而您就一直根据可靠的数字来减少差异。”

从一套坚实可靠设计方案的发展开始，这套方案应能够使用 Klingelnberg 公司的 Kimos/Komet 软件和 Gleason 公司的 Gage/Cage 软件生成一种带负荷的仿真接触斑点，Alaniva 做出调整，诸如轮廓变化，然后将形成的机加工代码载入到磨床。他说：“在我设计齿轮组时，软件正在生成用于在磨床上实际生产部件的程序。软件能够仿真一项滚动试验，告诉我传动错误、齿根受拉、表面压力，所有这些都需要建立启动机加工的数字化

数据。”

这套 Klingelnberg 闭环加工软件将随后运行一个仿真纠正程序，将实际测试数据设计方案当中体现的理论与完美部件相对比。程序将识别出偏差，运行数千次假设机加工动作，确定最优路径，并随后自动发送修改后的完工部件程序至机床控制装置。“在重新将部件安装到磨床上后，操作者所要做的不过是按下一个按钮接受这些纠正，绝大多数闭环加工软件都会生成中立代码，这些代码可以载入到 Klingelnberg 或 Gleason 磨床上。其中不存在键盘误敲输入错误数字的风险，也不存在输入小数点位置错误数据的问题。操作者只需按下按钮，这样就基本上消除了人为失误。” Alaniva 说。

勇往直前

经过在其权利范围内长期提倡闭环齿轮制造工艺之后，对于这个工艺已经做出了一些重大改进，这些改进随着不断进步的技术和 30 多年来大量实践实验和应用所累积的专业经验而发生。



图 4 这些行星齿轮正在等候机加工车间进行深度磨齿，该工序将带来更严紧的公差和优异的表面粗糙度

图 5 放在保护套当中的齿轮正准备发货给美国的客户，包括航空、汽车、石油天然气、赛车和军事/国防客户



Roberge 说：“齿轮测量已经比以前更为优秀。我们对接触斑点已经有了如此之大的控制权，以致于可以只需看一下坐标测量机所测得的图形就预测出是否能够‘首件发货’。这套闭环系统提供给我们的是一种可以称为对结果的绝对确定性。我们从来没有遇到过实验室所生成的数据不能与理论设计方案在一个合理而且可容易纠正的裕量范围内相匹配的状况，所以第一个磨制的齿轮就是第一个发货的齿轮，我们从未失望过。”

针对过去 30 年来对闭环制造工艺所做出的种种具体改善，更像是一种想要拥抱新型和改进技术的渴望。对于那些纠结于过时老旧设备以及坚持用以往原有方式执行工作的公司，将在市场竞争中遇到越来越大的困难，因为这个市场就像是一个一直通过新设备设计和改进机加工工艺向着积极进取团队有利方向倾斜的市场。

Roberge 将改善了闭环机加工的技术进步分成 3 种领域：比以往更精确磨削的磨床，且采用了更大功率的传动装置；基本上消除了主

观性和人为误差的精密测量系统；以图形化用户界面为特色的闭环软件，这种界面比以往版本更具有交谈性和用户友好性，与 30 多年前引入的 DOS 界面软件相比有着天壤之别。

Alaniva 还指出了磨料技术领域的重大改进。配合动力更强、更稳定和刚性更好的磨床，砂轮黏合剂和颗粒结构也一直在发展，与深磨作业方式和所想得到的结果完美匹配。这就导致在例行情况下要满足航空和高端汽车行业公差要求的齿轮的工艺性价比越来越合理。

从经营角度来看，这点对于 Rave Gear 与其客户之间的关系有着巨大的影响。Roberge 说：“就在不久之前，在磨齿开发上用 12 h 进行夹装还被认为是高效，而且多年未变。如今，通过消除在切削机床上的夹装工序，并在磨床上执行所有加工作业，经常能够在 3 h 夹装好，同时磨床开始生产。要澄清一下，这里所谈论的是第一遍就形成一个已完工的螺旋伞齿轮，而我们过去花费 12 h 的繁忙工作有可能最终只得到一个不合格的部件，这意味着必须重新再来一遍。”

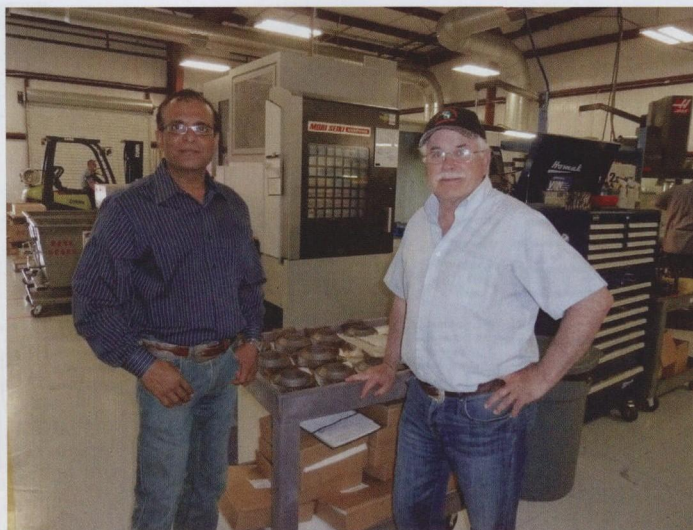
学到的教训

据 Roberge 介绍，这家公司对深磨以及闭环系统的全力投入帮助公司建立了快速、精确和经济地生产复杂齿轮的声誉。他说：“当人们打电话来要求为

120 套齿轮——3 个环齿轮和两个行星齿轮提出报价时，我们就能用之前几分之一成本来完成这些委托。如果按 5 次或 6 次加工作业向客户收费，那么就得不到这项工作。当我们将闭环工艺与深磨结合起来后，一次加工作业就能完成全部工作。另外，周转时间也缩减了，之前需花费几天的作业如今若干个小时就能完成了。”

Alaniva 说：“还有一项顾虑在深磨工艺帮助下被完全消除，并且得到了闭环工艺内在效率的放大，这就是围绕热处理而存在的不确定性。当您实施闭环系统达到我们这样的深度时，基本上从头到尾，那么就能减少自身 90% 以上的差异，甚至预测自己的热处理结果。深磨会以一种均匀的方式在整个部件范围内引发应力，就让我们能够准确预测出部件在热处理过程当中将发生的反应。

图 6 Nick Patel, Rave Gears 首席执行官(左), 和总裁 Bruce Roberge (右) 相识已经数十年, 他们在这座德克萨斯州小镇 Seguin 组建了一个顶级专家团队, 他们希望将这个团队打造成“美国高科技齿轮之巅”



如果您想要经过热处理直接做出大齿轮，那么没有比闭环工艺再好的方法了。”

Rave Gears 公司在采用闭环工艺或实心坯件磨制齿轮领域并非孤军奋战，而据 Roberge 表示：“我们是据我所知唯一一

家将这种组合方式作为自己生存理由的公司，看待这个市场的方式已经与以往不同。这个市场一直在发生一种重大转变并且一种新的方式正在出现，而我们很高兴走在这种转变的最前沿。” **MM**



纸媒



在线



会议



服务



关注MM《现代制造》微信，
关注有礼！

详细资料请垂询

☎ 广告部：010-63326090-230



Vogel 弗戈工业媒体

www.vogel.com.cn

MM 现代制造[®]
MASCHINENMARKT

MM创刊于1894年