编者按：

本篇原作为德文，作者 Armin Rüegg, 系瑞士籍数控专家，曾在苏黎世大学任教。他在 Grundig Atek Systems AG 任职期间开发了用于高速切削的数控系统，1996 至 2000 年担任北京科诺科电子有限公司总经理，从事高速铣床应用软件开发，并把倍福（Beckhoff）基于 PC 的控制技术引入中国市场。Armin Rüegg 先生因二十三年前的一次意外事故中止了他在中国的职业生涯。本文由倍福中国公司创始人梁力强先生翻译并经北航知名数控专家邬极教授修改校对。光阴荏苒，这篇论文自问世至今已过去二十多年，期间随着计算机与通信技术的快速发展，国内外数控技术和数控系统也不断更新迭代，但时至今日，本文对于数控系统研究开发仍具有一定的参考价值。

本刊有幸首次刊登这篇尘封已久的论文，谨以此纪念这位长期致力于数控技术教学与研究的瑞士专家。

数控系统

从控制系统生产厂家的角度看高速加工问题

文 | Armin Rüegg 北京科诺科电子有限公司总裁

概述

如果我们研究一下高速铣削加工的整个工作过程（从编制数据指令到完成工件加工）就会发现，在这个过程中有许多对加工情况产生影响的因素，这些因素将会对成品的质量和生产成本产生决定性的影响，这主要体现在精度、表面光洁度和加工时间这三个方面，并且这三个方面是互不可分的。伴随着整个加工过程，会出现一系列的误差，当信息在各个系统间进行传递时，这类误差将会贯穿于信息传递的整个过程。

为了实现高质、高产，必须对控制系统的各个部分进行优化设计，为此而产生的工作量明显增加，因为从物理学的角度来看，我们正越来越接近各种极限。

从数据说起

用确定的数学描述来定义输出模型的数据是一种理想的表示方式。这类数据可以从 CAD/CAM 系统中获得。人们不禁要问，我们为什么不能直接从这些数据中计算出刀具的轨迹，然后从 B 样条曲线的形式输出并传递给 CNC 计算机数控系统。

在为生成数控程序准备数据时，我们现在往往是把已存储的模型转变成对多面体的描述，在此过程中已经产生某种原始性误差，由此而得出不精确的数据。这种不精确的数据又会产生新的误差，由许多段直线位移所组成的刀具轨迹（G01 语句）正是在使用这种新误差的情况下求得的。

到目前为止，还没有一家计算机辅助制造（CAM）厂家能够设计出可供工业上实际应用的刀具中心点轨迹的 B 样条曲线。人们不得不采取措施以清除目前关于刀具轨迹描述中所存在的一些主要不足点。提供可以连接 CAM 系统中的 CNC 数控系统的接口并不是一个主要问题，问题在于必须要提供这一接口，并在实际使用中对它进行检测。

由于在公差范围内形成的弧线是一

条由许多条小直线组成的近似弧线，故轨迹点的分布是不整齐（均匀）的，从而形成一个“不平整”的表面，这种现象在相邻的线条上，表现得更为突出。这些线条经过不同的点阵图案处理后有可能形成莫尔条纹图案，这种莫尔条纹图案会影响表面光洁度并由此可以推测影响表面质量的其他原因。机床的性能（动态性）越好，这种现象所产生的后果就越严重。

数控程序引起的谐振频率

由数控程序直接引起机床的谐振频率也是完全有可能的，当程序块执行周期为 20 ms 且刀具的预定轨迹不够圆滑时，很可能产生比如 50 Hz 的额定加速激发频率。一旦由此而使机床产生谐振频率，则这种谐振频率很快在工件上形成震颤痕迹。此时如果转动进刀按钮，改变加工速度，震颤痕迹就会消失了，然而，它又会在别的位置上出现。

用简单控制器控制机床时位置调节回路中的滞后误差对工件轮廓具有平整作用，所以能加工出较光滑的表面，不过它也会产生 1/10 mm 以内的误差，即便控制系统能够借助 Spline- 功能（比如 Akima）对这些数据进行插补，根据经验也只会加大数据的波动性，其轨迹震动衰减会比采用原始数据时还要强烈，因而其表面光洁度不是变得更好而是更差。在控制系统中，如谨慎地采用数字式滤波器，则可以改善表面光洁度，并且不必在加工精度方面做过多的牺牲。

前瞻插补准备

控制系统对数据进行的下一步处理，首先是由程序译码器把 DIN 指令翻译成在控制系统内部能被理解和接受，可供插补器执行的数据。借助于对轮廓线路走向的分析，可以对插补器进行控制，使参与运动的各轴产生平缓的移动，为此，控制系统必须能够对数百个位移语句进行预处理，以便产生一个不会出现加速跳跃的受脉冲限制的运动过程。（通常把这一功能称为脉冲限制，或者也可以称作 jerk 控制）。简言之：位移增量越小，进给速度越高，机床的加速度能力越低，所需要的缓冲器数目也就越大。

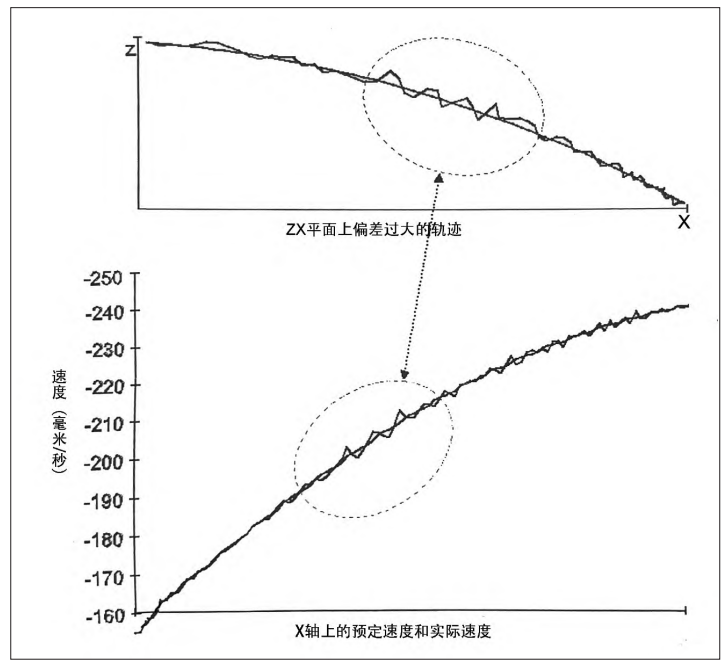


图 1 产生谐振频率的问题

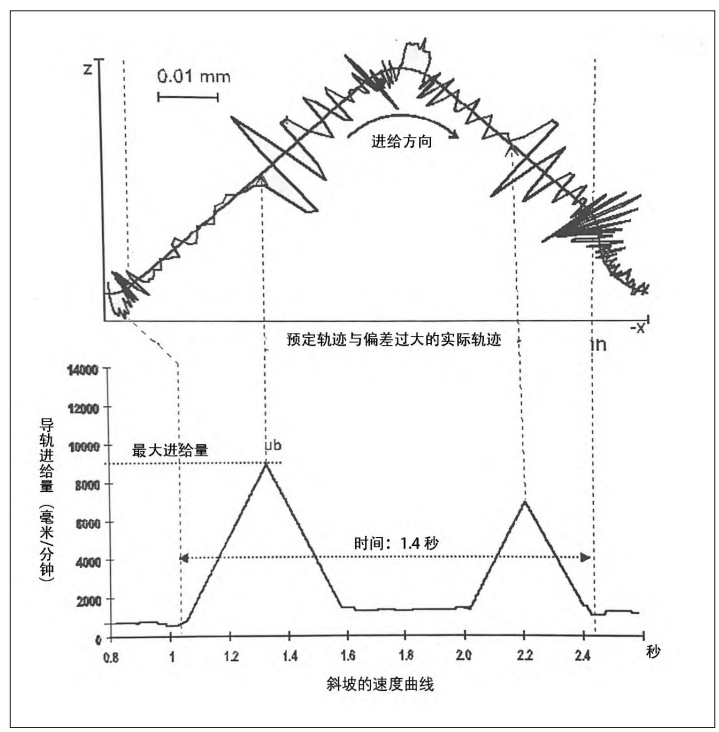


图 2 斜坡情况下所引起的振荡

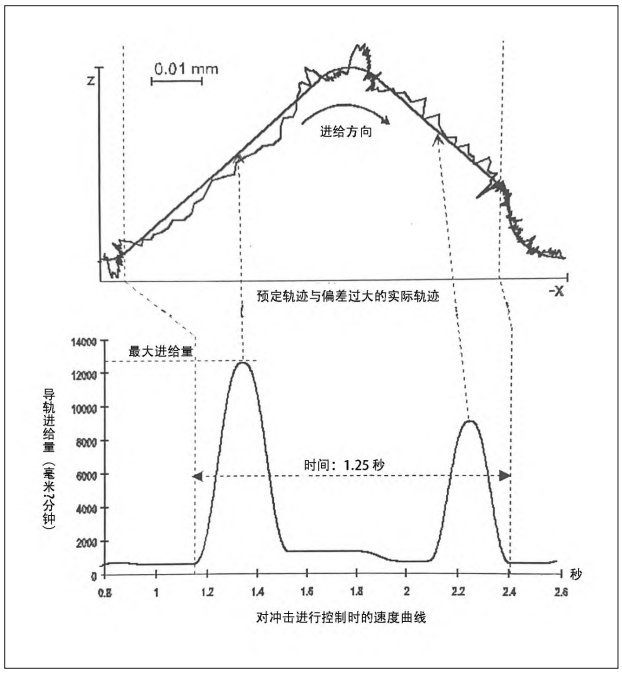


图 3 在冲击受到控制的情况下带平缓斜面的加速

“增强前瞻”

在数据的准备阶段，即使对跨语句的位移过程和加速过程也要进行“柔和地”控制，这一点是重要的。在线性斜坡加减速情况下，在从加速阶段向减速阶段过渡时，引起插补器之后的调节器的加速跳跃，这一加速跳跃与机械系统一起使设备产生振动（参见图 2）。为避免出现这些振动，多数情况下会使用滤波器，不过加装滤波器后，在出现弯曲轨迹的情况下会导致偏差，这意味着精度下降，或者为了把偏差控制在允许的公差范围内，在出现曲率线的情况下过分地降低速度，另外，还不得不降低运动的加速能力，使加工复杂工件时的工作时间拉长。

这就是说，并不是对每一次单独的位移都计算其速度曲线，而是把运动过程互相关联的一组语句归纳为一次“柔和的”运动。预先向前看的处理方法最终是借助于一个动态的机器模型和被定义为参数的一段公差来计算沿着运动轨迹所要求的速度曲线（参见图 3）。在执行程序过程中，可在动态情况下，对这种参数化进行更改。这样就可以对刀具轨迹进行有效的控制，使实际运行轨迹始终处于所要求的公差范围内。HS PLUS 控制是以上述考虑为基础的，这种预处理的全部功能被 Grundig-Atek 公司称为“增强前瞻”。

程序段循环时间

至今为止，数控语句是为执行下一步操作所做的准备，这一过程通常被称为语句处理。在评价 CNC 控制系统的性能时，经常用到的一个数据是程序段循环时间。程序段循环时间通常以毫秒计算，它所表示的意义是，控制系统处理一个语句所需要的时间，普遍认为，程序段循环时间越短，控制精度越高。

在这里，首先要明确的是，程序段循环时间到底包括哪一段时间。有些制造厂商只提及处理程序所需要的时间，而不包括对刀具或其他部件进行修正所需要的时间，并且只字不提与几何和运动学有关的因素。而本文所说的程序段循环时间包括整个处理过程。

从图 4 中可以看出，在机器加速和必要的程序段循环时间（把轨迹公差作为参数）之间存在着有趣的相互关系。以上图形是由小段直线连接而成的近似曲线，它表示一个圆周运动。沿着轨迹方向的速度被加速，直至这一向心加速度达到所允许的最大值为止。由此可以确定执行一个适合于不同边界条件（与刀具轨迹的弦线公差和机床加速能力有关的边界条件）的 G01 语句所需要的时间。这里讨论的不是机床的最大加速能力，而是指能使刀具在公差范围内走成一个圆周并获得良好表面质量时的机器加速能力。

对于一台大型铣床来说，其加速能力大约为 0.8 m/s^2，于是在 5 和 10 µm 之间的典型公差段内，要求使最短的程序段循环时间达到 10 ms。

即便是加速度为 3 m/s^2 的小型大功率机床，4 ms 的语句处理时间也足够了，前提是公差要求相同。然而，目前流行的被称之为“HSC”（高速切削）的高速加工技术也未能达到任意高的加速值，因为随着不断的加速，对一些干扰因素的反应也会变得越来越敏感，这样就影响工件的表面光洁度。对此，如何找到最佳方案，则是对整套系统进行调节所面临的任务。将语句处理时间降低到机床加速能力所要求的值以下是不必要的，

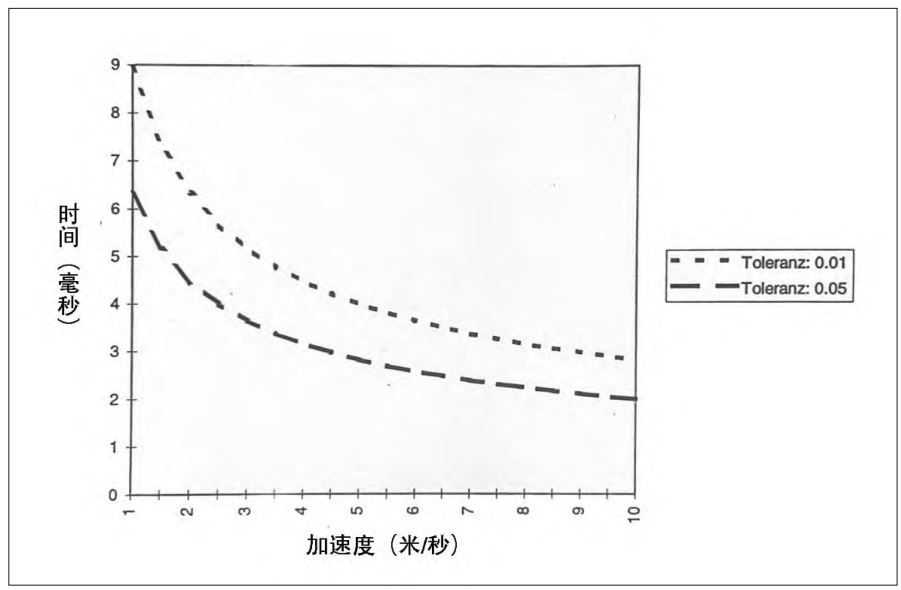


图 4 程序段循环时间和机床加速能力

而且不会因此而缩短工件的加工时间，因为极限来自于机床的物理特性。

插补

机床的实际运行过程通常由直线测量系统测得，因而在闭环回路以外发生的位移无法测出。关于这方面的细节在讨论其他问题时还要讲到。插补器按高次方程运算（B 样条曲线），从这一点出发，轨迹数据的直接传输也是以 B 样条曲线的形式出现。

采用附加连接的滤波器可使非连续的轮廓曲线变得圆滑。在此情况下是有意识地对轨迹进行变形处理。根据物理学的基本原理，在拐角处必须把速度降到零才能准确地绕出拐角，因此为了使刀具以一定的容许误差绕过拐角且不必把速度降至零，或者为了在某些区域避免机床产生谐振频率，我们可以使用上述滤波器。

机械系统所产生的影响

每台机床都是由可能产生振动的部件组成的。（这些部件也可简称为二阶质量弹簧系统）

这些部件由于刚性和质量的原因产生谐振频率，谐振频率会限制加速度达到最大限度，进而限制了位置调节器的增益。提高刚性，减少质量会增大谐振频率，使设备变得“更为动态”。这意味着只是把原有的问题转变成新的问题（更高的谐振频率），实际上问题并没得到解决而且是不可能解决的。

如前所述，控制系统只能调节从测量系统反馈回来的动作。如果刀具发生的动作没能被测量系统测出，比如支承刀具的支架发生摇摆，会使刀具尖刃在实际轨迹上产生扭曲，出现这种情况是因为一些轴的运动又带动另一些轴的运动，以及对某一个轴的加速过程会引起机床其他机构的加速或把加速度冲击传导给其他轴。尤其对于大型机床来说，这种由机械结构产生的影响不容忽视，它所引起的典型偏差范围是 0.01 mm。

专家点评

论文介绍了高速数控铣削加工数控程序和控制系统性能对加工表面精度、光洁度和加工效率的影响机理，介绍了先进的数控系统（例如 Grundig-Atek）为提高高速数控铣削加工质量和效率所提供的控制功能，例如轨迹光顺平滑技术和可参数编程优化的升降速技术。这些技术在 2000 年之前是当时数控系统的标志性前沿控制技术，也是目前数控系统一直在研究发展的技术。因此，本论文对目前数控系统研究开发具有参考价值。

——北京航空航天大学 数控专家 郇极 教授

刀具

当使用有自动换刀刀盘的刀具时，必须想到：如果刀具的精度不是非常的高，则仅仅换刀具这一动作就会产生 0.1 mm 范围的误差。即便是精度极高的刀具，在更换刀具时也会产生百分之几毫米的误差。刀具在刃磨时可能不太精确，装夹刀具时可能出现过短或过长的情况，对于第二种情况可用刀具长度补偿来修正。刀具还可能发生摇摆冲击，这种摇摆冲击随着不同转速而产生不同的影响。当主轴转速较慢时，刀具旋转直径似乎过大，而主轴转速较快时就变得正常。如装夹刀具时偏心，则会产生相反的效应：转速低时，刀具产生固定的旋转直径，转速高时，刀具旋转直径似乎增大。

刀具工艺与进给速度

根据不同的切削深度，某些刀具（CBN u.ä.）对最低进给速度有限制。如果不能满足这一要求，刀具的耐用度就会急剧下降。为了把轨迹精度控制在某一给定的公差段范围之内，典型的做法是在刀具中心轨迹上的某个拐角处降低进给速度。然而这样做存在着损坏刀具的危险。控制系统的动态的参数优化允许处理这类情况。不过，为了避免损坏刀具，在精度和所要求的最低进给速度之间总能找到一个妥协方案。经过涂层的刀具有一个优点：即它们的尺寸稳定，因此要么尺寸符合要求，要么发生断裂。

斜置刀具

大多数情况下是用球面铣刀进行切削。不过在三轴运转的情况下，采用球面铣刀有个缺点，那就是某一部分的铣削必须由刀尖来完成，而此时刀尖的切削速度正好为零。如果铣床的工作头架可以在两个转动轴上进行调节（手动或电动均可），就可以将刀具斜置，以便始终保持良好的切削条件（切削角度），因此而需要的变换（转换）必须由机床运动学方面所产生的补偿（平衡）来加以实现。在这种情况下，控制系统把它当作一台五轴机床来进行运算。

结论

通过对控制技术提出一些基本的问题，最终揭示了许多情况和相互关系，对于这些情况和相互关系，控制技术完全不起作用，或者最多也不过是起到一个有助于补偿其他现象所产生的影响的装置，或者只不过使这些影响变得具体化和容易把握罢了。对于高速铣削来说，控制系统是一个重要的组成部分，然而整套系统（CAM，CNC，机床本身）务必协调一致，只有这样才能在采用高速切削技术加工复杂工件时达到最佳结果。在所有的参数之间去寻找解决办法，这是一种最好的妥协方案。MM