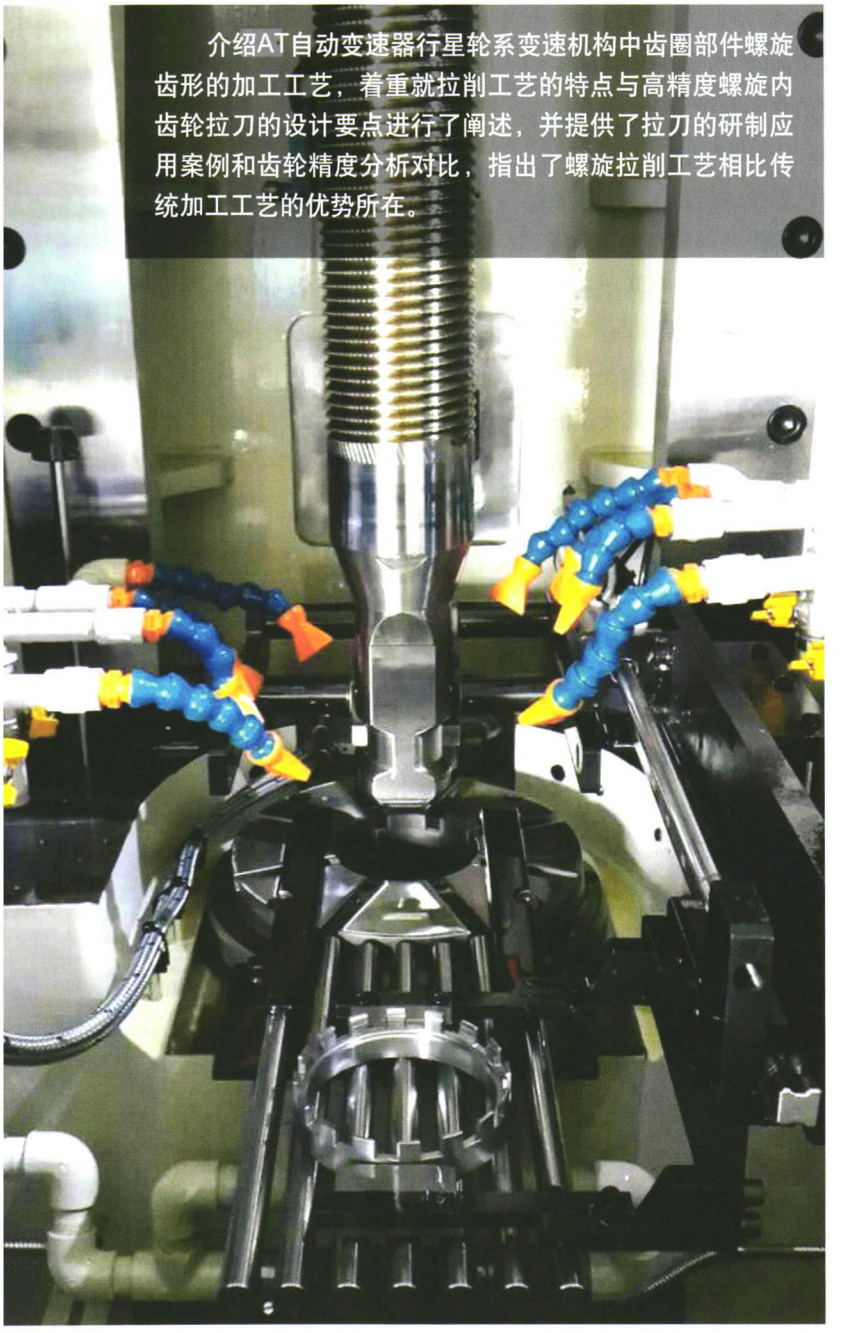
内齿圈加工的革命

——拉削工艺及刀具

□ 恒锋工具股份有限公司/何勤松

介绍AT自动变速器行星轮系变速机构中齿圈部件螺旋齿形的加工工艺，着重就拉削工艺的特点与高精度螺旋内齿轮拉刀的设计要点进行了阐述，并提供了拉刀的研制应用案例和齿轮精度分析对比，指出了螺旋拉削工艺相比传统加工工艺的优势所在。



作为市场主流的AT自动汽车变速器，它是通过液力传递和行星轮系齿轮组合的方式来达到变矩变速的。齿圈作为行星轮系的关键部件之一，因其是螺旋内齿轮，相比工艺性更强的外齿加工而言，其齿形加工受工艺能力限制，尤其因其热后齿形磨削不易实现，更需在加工精度的保证上充分考虑热处理或其他表面处理工艺过程中零件变形带来的影响。精度不高、量产受限，极大地制约了行星轮系齿轮传动精度的提升，也是自动变速器自主研发滞后的重要因素之一。

螺旋内齿轮加工工艺介绍

1.插齿工艺

目前国内生产商对齿圈齿形加工大多采用传统的插齿工艺，效率不高。以模数1.25mm、直径125mm左右的常见规格齿圈为例，即便高速插齿加工也需十多分钟，远远适应不了大批量生产的需求。更主要的是该切削原理受机床、刀具、装夹等整个工艺系统的影响，尚不能完全满足7级及以上齿轮加工精度要求。而在国外，AT变速器行星齿圈的加工，传统的插齿工艺只在少量试验加工中应用。

2.旋分滚插工艺

旋分滚插制齿是一种经济型加工工艺，在维拉机床上采用交错轴螺旋齿轮啮合齿面有相对滑移的原理，滚插刀具和被加工内齿轮根据参数实际设置不同的转速比并高速旋

转，以轴向进给从而加工出齿形，该工艺单件加工时间相比插齿而言，生产效率得以较大提高。与插齿工艺一样，因切削原理限制，加工数量不多刀具就会磨损，需要频繁地换刀、调整和检测，另外加工精度也类似于插齿。该工艺国内亦有厂商引进，当前只限于小批量生产，精度有待提升。

3.拉削工艺

不同于上述两种工艺的切削，螺旋内齿轮拉削为成形切削原理，与单向螺旋花键孔的拉削工艺极其类似，刀具与工件之间成相对的直线加旋转位移运动，切削进给通过拉刀刀齿齿升自我实现，瞬间切削成形，该工艺具备十几甚至几十倍于插齿的高效率。但齿轮毕竟不同于花键，齿轮是精密机械传动部件，花键只是一种机械联接方式，两者精度要求相距甚远。齿轮精度的几项关键要素齿距累积、齿廓形状、螺旋线误差等，通常热前加工不能低于7级，因此该工艺对机床和拉刀都有较高的要求。目前国外常用的是上拉式结构CNC拉床，即工件（工作台）走直线向上运动，拉刀作周向旋转运动，两个运动的关系以零件螺旋线导程实际设置，齿轮螺旋线精度亦通过该运动实现。由于拉削为成形切削原理，零件齿距累积、齿廓形状精度与拉刀自身精度关联极为密切，接近于1：1的直接反映。另外，还需解决拉削因同时工作齿数变化而振动影响切削精度的缺陷，因而高精度的螺旋内齿轮拉刀研制难度非常大。

螺旋拉削工艺在汽车工业强国已相对成熟，因其刀具可重复修磨至少10次以上，单次拉削数量达数千件，工艺系统相互间影响较小。加工过程中尺寸、齿形精度稳定性好，极大地保证了产能与精度，并降低制造成本，因而越来越多地受到重视，已成为当前国外大批量生产的主流加工工艺。螺旋拉削在国内还是一种新兴加工工艺，由于该工艺对拉刀的精度要求极为苛刻，刀具结构复杂，制造难度大，所以长期以来被欧美日少数几家刀具公司技术垄断。目前我国已有多家整车制造或齿轮专业制造企业引进了拉削工艺，但对高精度螺旋拉刀还主要依靠进口，刀具单价昂贵，成本居高不下，因此目前急需从现有的技术条件出发，自主设计制造出可以达到国际水平的螺旋拉刀。

螺旋内齿轮拉刀的设计要点

1.渐成式粗拉、同廓式精切拉分层拉削组合结构设计

如图1所示，拉刀前段为渐成式粗拉齿，外圆为主切削刃，通过外圆逐齿递增形成零件齿形雏形，一般齿宽方向留0.15～0.25mm精拉余量；拉刀后段为同廓式精拉齿，齿侧为主切削刃，通过齿宽的逐齿加厚由最后一组精切齿最终形成齿形。由于拉刀精拉齿是齿形形成的关键部位，必须提高拉刀制造工艺性并确保精度的可控性，所以拉刀设计为分体式结构，即精拉齿部分以刀套形式通过键联接置于粗拉刀体后端，通常单独加工成形后再装配。精拉刀套长度短，自重轻，加工工艺性强，易实现在齿轮检测中心上对齿距累积、齿廓形状、螺旋线等综合误差以及齿侧齿升量的直接测量。

2.螺旋前刀面设计（见图2）

拉刀前刀面通常垂直于切削运动方向，这是保持切屑流向、控

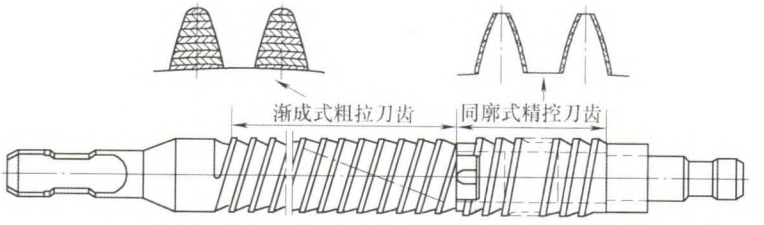


图1 螺旋内齿轮拉刀结构

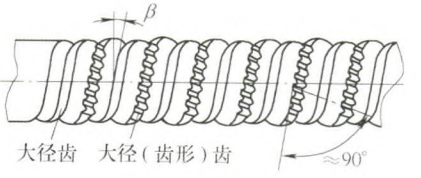


图2 拉刀螺旋前刀面及大小径同心式错齿排列结构

制零件表面粗糙度的必要条件，因此螺旋齿轮拉刀尤其精拉刀套前刀面设计为与齿轮螺旋角相反的螺旋面，拉刀刀齿前刀面与键齿螺旋角呈90°相交的螺旋形状结构。螺旋前刀面在保持切屑流向的同时，切削刃在圆周上逐渐切入、切出，拉削过程中能确保切削力平衡，充分消除冲击和共振现象，因此工件切削变形很小，尺寸精度、形位公差与表面粗糙度能得到充分保证，并提高了刀具寿命，同时也为提升拉削速度、提高加工效率创造了有利条件。

3.同心式错齿排列刀齿结构设计

如图2所示，螺旋内齿轮拉刀粗拉部分末段通常设计为刀齿交错排列的方式，即小径刀齿与大径（齿形）刀齿逐一交错排列，拉削过程中基本不受刀具自身外因素的影响，保证了拉后零件小径与大径（齿形）具备较高的同轴度。在齿轮精度检测或后续加工中，可以小径为定位基准，不仅定位可靠，而且工装、检具制造相对简单，成本低。刀具磨削如图3所示。

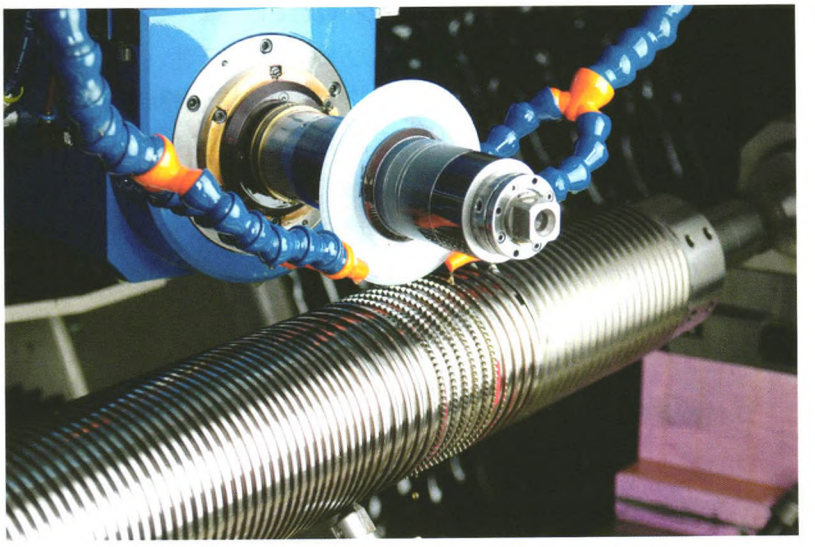


图 3

螺旋内齿轮拉削验证

以恒锋公司近期所设计制造的其中一款拉刀为例，对其拉削后齿圈做齿轮精度检测评定。案例齿轮参数为：m_n=1.265，z=89，a_n=18.5°，β=20°，齿宽20mm，拉刀采用渐成式粗拉、同廓式精拉分层拉削分体组装，粗拉前刀面采用环形、精拉刀套为螺旋前刀面加同心式结构设计。拉刀主要设计制造技术指标：齿距累积误差≤0.02mm；齿形误差≤0.01mm；拉刀螺旋度误差≤0.02mm/1000mm；拉刀同轴度误差≤0.01mm。通过对齿圈齿距累积误差、齿廓形状误差和螺旋线误差的检测，证明刀具及工艺对内齿圈的加工具有革命性。

附表为零件实测结果归纳后与GB/T10095齿轮精度等级对比，从表中可以看到，零件拉削后齿距累积、齿廓形状已经达到或接近6级精度，螺旋线偏差在7级精度，完全满足制造需求。同时也验证了齿距累积、齿廓形状主要取决于拉刀自身制造精度的论点。

齿轮精度等级对比表

GB/T10095	6级	7级	8级	零件实测
累积误差F_p/mm	0.026	0.037	0.052	<0.02
齿廓F_α/mm	0.0085	0.012	0.017	<0.01
螺旋线F_β/mm	0.011	0.015	0.021	<0.015

结语

近年来，以恒锋公司为代表的专业工具厂通过科技投入、设计创新，并通过与国内专业齿轮制造企业的密切合作，高精度内齿轮螺旋拉刀自主研发已经实现了从试制到批量设计制造，内齿轮拉削工艺应用条件已经成熟。

随着汽车自动变速器自主研制开发进程的加快，该工艺的成本优势与质量稳定性凸显，在内齿圈加工的应用中也会越来越广泛。AME

何勤松
技术工程师
恒锋工具股份有限公司