齿轮加工中剃齿的误差分析及处理

德州德隆（集团）机床有限责任公司 （山东 253003） 孙自龙 闫凤英 刘 丽

剃齿是齿轮齿面精加工的高效工艺，在汽车制造、机床工具等行业被广泛采用。这不仅因为剃齿具有较高的加工效率和较低的加工成本，可大幅度提高齿轮精度和降低表面粗糙度，而且能实现齿形修形，从而降低齿轮传动噪声，提高齿轮承载能力和安全系数，延长齿轮工作寿命。

1. 运动精度误差分析

剃齿加工过程中，刀具与工件间没有传动链，而是一种自由运动。剃齿对校正被剃齿轮的各项误差能力是不同的，有些剃齿误差能够校正，有些剃齿误差基本不能校正，或校正后又转换为以别的误差形式出现。剃齿是“自由啮合”，无强制的分齿运动，故分齿均匀性无法控制。由于剃前齿轮有径向误差，在开始剃齿时，剃齿刀只能与工件上距旋转中心较远的齿廓作无侧隙啮合的剃削，而与其他齿则变成有齿侧间隙，但此时无剃削作用。连续径向进给，其他齿逐渐与刀齿作无侧隙啮合。结果齿圈原有的径向跳动 ΔF_r 减少了，但齿廓的位置沿切向发生了新的变化，公法线长度变动量 ΔF_w 增加。其转移量的大小可按下式计算：

$$\Delta F_{w转} = \Delta F_r \sin 2\alpha$$

式中，α 是齿轮的压力角。当 $\alpha = 20°$ 时，$\Delta F_{w转} = 0.64\Delta F_r$，因此，剃齿后虽然齿圈径向跳动 ΔF_r 减小了，但由于其减小量转换成了 $\Delta F_{w转}$，齿轮总的运动精度误差却没有变化。故剃齿加工不能修正齿轮的齿距累积误差（周节累计误差）。当 $\alpha = 20°$ 时，ΔF_r 的减小量只有64%转换为 $\Delta F_{w转}$。在用 ΔF_w 与 ΔF_r 组合评价齿轮的运动精度时，其合成值 $\sqrt{\Delta F_r^2 + \Delta F_w^2}$ 要小于实测的运动精度。所以，剃齿后出现齿轮公法线长度变动量超差，并不一定意味着该齿轮运动精度不合格。只要齿轮的齿圈径向跳动和公法线长度变动量这两个误差项目的实际误差值之和不超过两单项允许误差之和，即可认为该工件合格。这就避免了因单项误差超差就判断齿轮报废而造成的损失。

按上所述，剃齿虽对齿轮的齿圈径向跳动有较强的修正能力，但为了避免由于径向跳动过大而在剃削过程中导致公法线长度的进一步变动，进而要求剃前齿轮的径向误差不能过大。

2. 传动平稳性的误差分析

理论上讲，剃齿加工出来的齿轮齿廓应为标准渐开线。但在实际加工过程中表明，使用具有正确渐开线齿形的剃齿刀剃削齿轮时，剃出的轮齿齿形往往在其齿高节点附近常常凹进去一部分，称为“中凹”（见图1），凹进量大致在0.01～0.03mm范围内，“中凹”部分大约占有效齿面长度的50%。这种现象在少齿数直齿轮上表现更为突出。中凹齿形齿轮在实际使用中传动平稳性差、啮合噪声大，因此应极力避免这种中凹齿形的产生。中凹齿形是剃齿加工过程中存在的主要问题。

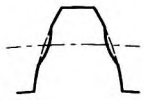
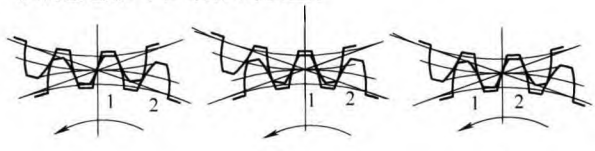


图1 齿形中凹示意图

（1）中凹齿形产生的机理 剃齿时，剃齿刀与工件是一对无侧隙的角变位螺旋齿轮啮合。盘形剃齿刀可以看成是一个变位圆柱齿轮，切削时经过加工的工件（剃前齿轮）装夹在心轴上，顶在机床工作台上的两顶尖之间，可以自由转动。在螺旋齿轮啮合中，两齿轮的齿面接触在理论上是点接触，运用这一啮合原理进行加工的齿轮，在每个轮齿的啮合过程中，当齿面由偶数齿接触过渡到单齿接触时，其两侧齿形上都同样地存在着齿形接触点的数量变

化。如图2所示，当法向齿形重叠系数 $1<\varepsilon<2$ 时，观察其一侧齿形的啮合过程可以看出：当齿1的齿顶进入啮合时，有两个齿形接触点同时工作（见图2a）；当齿1的齿腹进入啮合时，只有一个齿形接触工作（见图2b）；当齿1的齿根进入啮合时，齿2的齿顶已进入啮合，又有两个齿形接触点同时工作（见图2c）。以两个齿形接触点同时工作的两点区总是位于齿顶和齿根处，而以一个齿形接触点工作的单点区总是在齿轮的节圆部分。同理，另一侧齿形上同样存在这样的规律。由于径向进刀的总压力大致一定，使作用于每个接触点的分压力发生变化。根部处于双齿啮合区，金属的切除量较少，节圆附近处于单齿啮合区，金属的切除量较大，因此造成了剃齿齿廓中凹现象的发生。



(a) (b) (c)

图2 瞬时齿形接触点的变化图

另外，实践证明，即使啮合齿轮具有正确的渐开线齿形，其啮合质量并不一定就很好，不能保证不产生噪声。因为如果这种齿轮在安装和传动时稍有偏斜和变形，它们的接触面就会偏向一端，致使啮合齿轮的实际工作齿形及齿向大大超差，接触面偏向一端，影响工件的平稳传动。为此，要采取适当的措施。

（2）对中凹齿形采取的措施　第一种采用剃齿刀修形法来实现被剃齿轮的齿形修形。齿形修形是指对轮齿的齿顶与齿根进行修缘，大多数采用齿顶修缘，有时也可同时对齿顶和齿根修缘，使之修正后的齿形曲线在轮齿节圆附近形成一定的鼓形。对主动齿轮与被动齿轮应采取不同的修形方法。在修形时主动齿轮齿顶偏正，压力角略小，鼓形最大点应略高于节圆点；从动齿轮齿根略正，压力角略大，鼓形最大点应略低于节圆点。

被剃齿轮的精度和廓形在很大程度上取决于剃齿刀的精度和廓形，而剃齿刀的精度和刀齿廓形又是通过剃齿刀的修磨获得的，因此，剃齿刀的修磨及剃齿刀磨床的性能对于保证剃齿质量十分重要。

很长时间以来，剃齿刀齿形修形采用Y7125型普通磨齿机的靠模板法。根据标准剃齿刀所剃齿轮齿形中凹的位置和程度制作一个修形靠模，借助靠模，在Y7125型磨齿机上用金刚石工具修整磨刀砂轮廓形，使磨出的剃齿刀齿形中凹，从而使剃出的齿轮齿形正确，此法经生产应用证明技术上可靠，但制作靠模→修整砂轮→磨剃齿刀→剃齿的过程需多次反复，修形工艺耗时费事。

随着数控技术的发展，各种多轴数控剃刀磨床的出现使剃刀的修形变得非常容易。如德国HURT（胡尔特）SRS410—CNC型剃刀磨床就是一种12轴全数控、5轴联动且具有在线检测功能的剃刀刃磨机床。它把繁琐的调整机床转变为轻便快捷的键盘输入，极大地提高了效率和修形精度。其修形采用在计算机屏幕上直接分段、作图，直观快捷，操作简便，修形精度可达0.000 1mm。将稳定成功的程序存入计算机，重复修形时，一键即可调出原定的程序，从而快速进行工作。剃齿刀修磨后精度要求达到相邻周节误差≤3μm，周节累积误差≤12μm，齿形误差≤5μm。

第二种采用平衡剃齿法。这种方法就是通过改进刀具设计使工件啮合过程中始终保持轮齿两侧接触点数目相等，即轮齿在任何啮合瞬时两侧分别有相同数目的接触点，轮齿两侧各接触点压力总是接近相等，即压力平衡，这样轮齿两侧被剃去的金属就一样多，不易产生中凹现象。

这种方法能够满足剃齿平衡条件的齿轮比较有限。随着剃齿刀的修磨，刀具齿厚逐渐减薄，刀具外径也发生了变化，使得平衡啮合角随之发生变化，平衡关系被破坏后仍会出现中凹现象。平衡啮合角的变化虽然可通过改变刀具外径进行补偿，但是这种改变很难随机实现，所以平衡剃齿虽然效果很好，但其应用受到了一些条件的限制。

第三种采用径向剃齿技术。径向剃齿的工作原理为：剃削啮合过程中刀具齿廓与工件齿廓为线接触。与普通剃齿相比，一方面增加了重合度，另一方面也增加了齿面啮合进给压力的承载面积，因而可以使剃齿剃除余量大小对啮合时啮合齿接触点数目变化的敏感度下降，这样就可以减缓齿形中凹的形成。

3. 结语

齿轮剃齿加工中出现的齿距超差及齿形修形问题一直是齿轮加工行业所面临的加工难题，虽然有几

巧测龙门机床立柱导轨共面

陕西秦川机械发展股份有限公司　（宝鸡　721009）　袁安平

1. 问题的提出

在重型龙门式机床的生产中，遇到了关于“两立柱导轨面共面测量”的新课题。如图 1 所示，其立柱导轨跨距一般在 4m 以上。查阅现有资料，此项目有采用钢丝法测量的先例，但对操作者水平要求较高，其准确性及效率不能适应现阶段的生产需要。因此，急需探索一种新方法来解决这一问题。

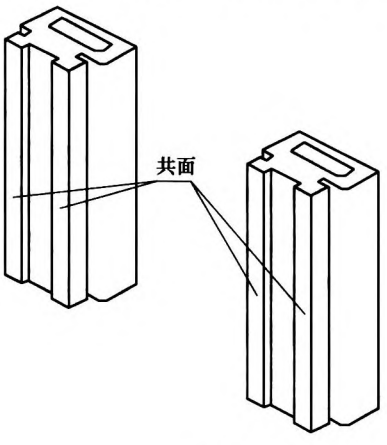


图　1

2. 问题的分析

导轨的共面测量，实质上就是采用同一基准测量各被测面的直线度。而直线度测量的常规方法有：

（1）直尺比较法　此法测量时必须配备相应规格的直尺，故在本例的远距离测量中适用性不强。

（2）水平仪或自准直仪测量法　此法属角度偏差测量法，测量时量具必须首尾相接进行连续测量，而被测二导轨面又是非连续的，必须有导向基准方可实施，故不方便采用。

（3）激光干涉仪测量法　此法在测量过程中激光束不允许脱靶，而在被测面非连续的情况下，仍然需要有导向基准，故可操作性不足。

那么，有没有其他可行的办法呢？经过分析，我们想到了激光对中仪测量法。激光对中仪作为一种新型仪器，也具备直线度测量功能。由于激光对中仪测量直线度的原理属绝对坐标法，直接以激光作为测量基准，测量有效长度可达 10m 甚至更远，测量过程中激光脱靶又不会对读数产生影响，从理论上分析应该是完全可行的。

3. 问题的解决

基于以上分析，经过在我公司龙门式复合加工中心产品“两立柱导轨面共面测量”中的实际检测、反复验证，并对测量误差进行分析、控制，其准确性完全能满足要求，同时兼具高效与便捷的优点。下面对此进行介绍。

（1）测量原理　激光对中仪的测量原理是：位置传感装置感应激光发射器产生的激光束的坐标位置从而进行读数，当被测面存在直线度误差时，各

种办法参考，但要与本企业的加工设备、检测能力及工艺水平相结合，找到适合自己的加工方法。另外值得注意的是，剃齿后各种齿轮检测项目的合格不能仅仅依靠于剃刀的精度及修形，而是首先要保证剃前齿轮的精度。只有剃前齿轮齿形的渐开线有一定的稳定的齿形精度，才能够保证剃齿时齿形两啮合线上啮合点数目相等。否则，紊乱变化的齿形会使啮合线上的啮合点变化无常，不可能使剃齿时刀具与工件啮合平衡。因此，保证剃前齿轮精度才是首选。**MW**

（收稿日期：20131026）