齿轮根部台阶问题与解决方案

□ 上海汽车变速器有限公司/贺鹏

本文主要介绍了变速器齿轮制造中根部挖根和台阶的定义和影响，讨论了热处理前后粗加工刀具凸角量的设计和制造有误导致的台阶问题，给出了判定条件和凸角量修正方法；分析了热处理前后精加工刀具的超越量计算与粗加工刀具不匹配导致齿根过渡区域产生台阶的原理，给出了常见失效案例及解决措施；针对零件精加工前后的状态，剖析齿形、齿向、齿距和径向圆跳动的误差对齿轮根部台阶的影响，并从齿轮制造中的刀具修形、工艺选择和热变形角度提出了相关解决方案。

随着燃油、排放法规的不断加严以及双积分政策的实施，汽车新能源、轻量化和电动化进程正在进一步加快。变速器齿轮大转矩负载和高速精密要求日趋严格，在满足NVH要求的同时，如何规避齿轮根部台阶是关键问题。本文针对该问题分析了不同台阶的形状特点，讨论了产生的原因，并给出了解决方案。

齿轮的挖根与台阶

如图1所示，齿轮的挖根是由

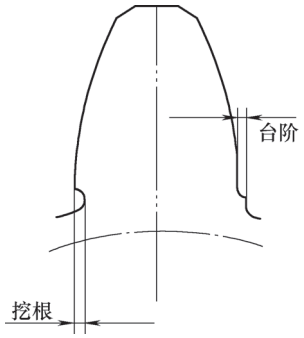


图1　齿轮的挖根与台阶

粗加工刀具凸角刃部切出的区域，为后续精加工齿面留出了退刀空间，避免产生接刀台阶。如果精加工前的挖根形状尺寸有问题，则有可能在后续加工中发生台阶或挖根问题。

台阶会导致齿轮根部弯曲强度的降低。没有台阶时，只需考虑最大挖根位置处的危险截面形状和尺寸；有台阶时，还需考虑台阶的形状和尺寸（见图2），详细请查阅国标ISO-6336相关章节。

强度降低估算公式：

$$Y_{sg}=\frac{1.3Y_s}{1.3-0.6\sqrt{\frac{t_g}{\rho_g}}}$$

式中　t_g——在端面上，齿轮根部台阶处沿法向的最大台阶量（mm）；

ρ_g——台阶最大位置处的曲率半径（mm）；

Y_s——没有台阶时的齿轮弯曲强度系数；

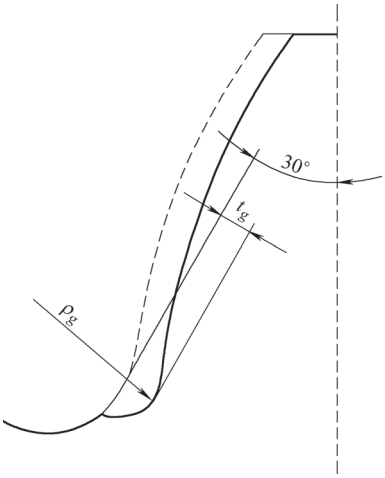


图2　齿轮台阶强度估算示意

Y_{sg}——有台阶时的齿轮弯曲强度估算系数。

其中，$\sqrt{\frac{t_g}{\rho_g}}<2.0$。此外，如果台阶的位置落在齿轮的正常啮合区域，则会引起异常的传动噪声。不但影响了变速器的使用体验，还可能存在功能性风险。

粗加工刀具的凸角量问题

1.粗加工刀具凸角量的定义

粗加工刀具的凸角量是刀尖部分沿主切削刃翘起的一块区域，它由副切削刃引出，直至刀尖圆弧终止点结束，其中以滚刀和插齿刀最为常见，如图3和图4所示。

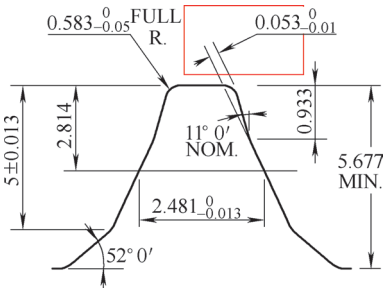


图3　滚刀的凸角量

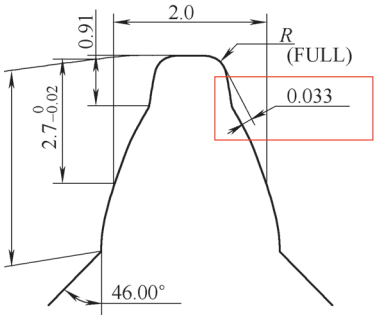


图4　插齿刀的凸角量

注意，凸角量的大小和加工出来的挖根量并不能直接划等号。因为凸角量是刀具齿形上标注的法面尺寸，而齿轮测量仪测出的挖根量是零件的端面尺寸。只有通过刀具与零件的轴交角，才能把凸角量转化为挖根量。

2.粗加工刀具的凸角量问题及解决方案

齿轮的精加工工艺一般分为热处理前和热处理后两种。热处理前工艺一般是指插齿和滚齿分别与剃齿组合的工艺；热处理后工艺一般是指插齿和滚齿分别与珩齿和磨齿组合的工艺。两者相比，在粗加工刀具凸角量问题上的表现形式基本一致，而热处理前精加工没有热变形的影响，其挖根和台阶控制较为容易。如果出现台阶问题，需第一时间检查粗加工刀具的凸角量设计和制造是否正确，下面以滚剃工艺为例进行分析。

（1）台阶发生的位置靠近挖根的最大位置。该情况下的台阶特征在报告上较难识别，通常需要标注剃前挖根的最大位置来识别，如图5所示。

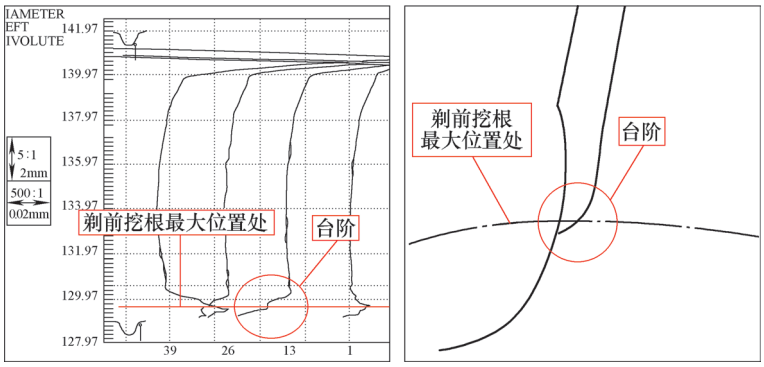


图5　台阶在挖根最大位置处的报告和轮廓示意

（2）台阶发生的位置在挖根最大位置上方。该情况下的台阶容易识别，特征如图6所示，台阶为滚刀切出的挖根圆弧和剃刀切出的挖根圆弧之间的突起形状。

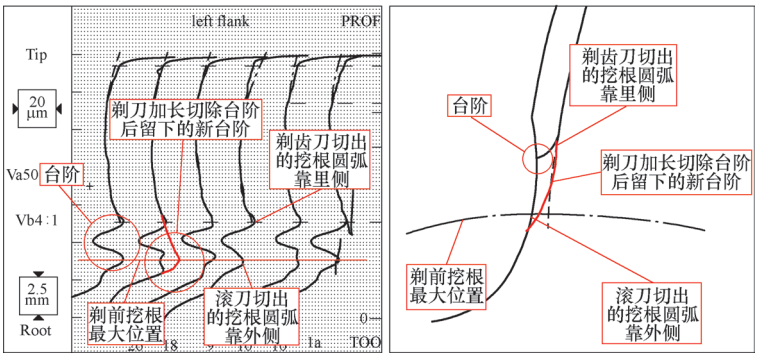


图6　台阶在挖根上方的报告和轮廓示意

针对上述两类问题，因为如果尝试增加精加工刀具的齿顶高来去除台阶，则台阶和挖根会被精加工刀尖一并切掉，从而留下新台阶，所以应检查和修正粗加工刀具的凸角量。

方法一：检查滚刀的凸角量是否有制造误差。滚刀加工的零件实测报告显示，挖根量在0.043～0.048mm之间。图7是通过模拟滚齿展成得到的零件端面上的挖根区域图，挖根量数值为0.056±0.006mm。可以发现，实测挖根量的上极限尺寸0.048mm比模拟结果的下极限尺寸0.050mm还小，说明刀具的凸角量加工与设计不符，应该对刀具齿形进行修磨，直至能够加工出合格的挖根。

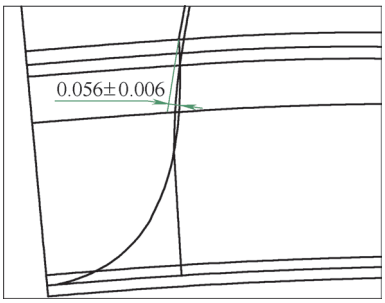


图7　零件端面的滚齿挖根模拟图

方法二：调整工艺中*M*值的名义值，使余量适配刀具凸角量。不过该方法有其局限性，当发现*M*值的调整仍无法消除台阶时，则需修磨刀具齿形。

方法三：上述方法都无法解决问题时，则需收集热处理变形稳定后的热处理前、热处理后以及成品的加工报告，数据统计由热变形导致的挖根变化量，得到凸角量补偿值，从而修正滚刀设计。

精加工刀具的超越量问题

1.精加工刀具超越量定义

精加工刀具的种类有很多，常用的有剃刀、珩齿刀具和磨齿刀具。为了避免台阶，这些刀具的设计都必须满足超越量大于零的要求。超越量的定义是精加工刀具能够加工到的最低点的展长与真实渐开线起始点展长的差值。图8所示齿形示意供参考。

可见，当刮削起始点的位置在真实渐开线起始点的下方时，超越量为正值，表示真实的渐开线起始点可以加工出来，没有台阶产生；当刮削起始点的位置在真实渐开线起始点的上方时，超越量为负值，表示真实的渐开线起始点无法加工到，有台阶产生。

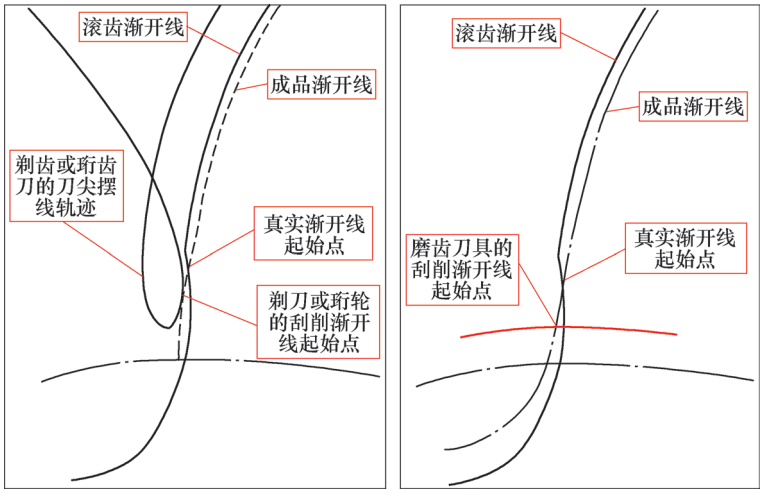


图8　剃齿或珩齿的加工轨迹（左）、磨齿的加工轨迹（右）

2.超越量问题及解决方案

（1）热处理前。热处理前加工主要以剃齿工艺为代表，剃刀的超越量问题如图9所示。

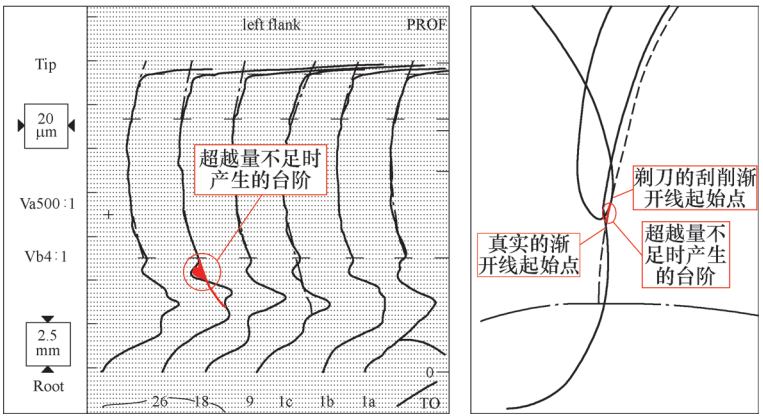


图9　剃刀超越量不足时切出的台阶

主要原因如下：一是剃刀的修磨问题，外径和齿厚不匹配。外径过小，超越量会不足，切出台阶；外径过大，则会导致刀尖与零件齿根过渡圆弧干涉的问题。可通过剃刀的重磨参数表来控制，使外径和齿厚正确的匹配，避免此类问题的发生。二是剃刀的设计问题，超越量没有覆盖最大余量极限情况下的真实渐开线起始点位置（简称TIF点）。该位置会比中差余量下的TIF点低很多（约0.2～0.5mm），如果剃刀设计时只考虑中差余量的超越量，则可能会在余量接近最大情况的时候无法满足要求，导致台阶的产生。

（2）热处理后。热处理后加工工艺以珩齿和磨齿工艺为主，刀具包括金刚轮和砂轮。超越量问题主要和金刚轮的渐开线起始点有关，该点的位

置过大会导致刀具切削零件时的超越量偏小。

珩齿刀具的超越量问题和剃刀基本一样，可完全参照剃齿的问题诊断模式和解决方案。磨齿刀具的超越量问题有些不同，但台阶出现的模式很相近，如图10所示。

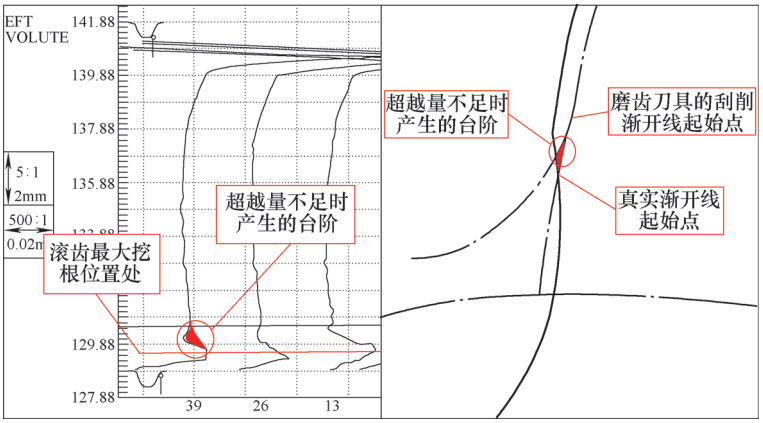


图10　磨齿刀具超越量不足时切出的台阶

磨齿的加工方式分为展成磨和成形磨，两者原理不同。展成磨的刮削渐开线起始点的计算和滚齿类似，其刀尖刮削的轨迹也是摆线，只是大小比滚齿摆线要小一些，而且更密集。成形磨的刮削渐开线起始点不是摆线，而是靠金刚石刀具根据坐标修磨出来的。

发生超越量问题的主要原因有两点：

一是砂轮修磨问题。在展成磨工艺中，如果由金刚轮修整的砂轮齿顶高和齿厚匹配没做好，会导致超越量问题的出现。比如，修整砂轮外径尺寸偏小，砂轮齿顶圆弧与主切削刃的接刀发生偏移等；在成形磨工艺中，金刚轮或金刚笔发生磨损，导致砂轮齿形修整不到位，也会使加工出的零件根部出现台阶。

二是金刚轮设计或修整程序问题。展成磨工艺中，金刚轮的渐开线起始点设计的过高（见图10）；在成形磨工艺中，金刚轮修磨砂轮程序的刮削起始点参数过大。两者都会使砂轮的刮削渐开线起始点位置高于零件的真实渐开线起始点，导致超越量不足，引起台阶的问题。

（3）解决方案。展成磨金刚轮设计或成形磨修整程序设置的初始阶段，必须模拟校核刀具齿形的刮削起始点位置，保证最大余量的极限情况下有充足的超越量。此外，金刚轮的制造及砂轮的修整过程，必须严格控制齿顶高和齿厚的尺寸公差，并按寿命强制更换修整工具，加强检测（建议关键齿形尺寸100%检测）。

零件的齿形齿向和齿距径向圆跳动问题

对于台阶的问题，除了粗精加工刀具带来的影响，零件精加工前后的精度也和台阶的产生有着重要的关联（各精度参数的含义可参考GB、ISO或VDI等标准）。

1.齿形引起的台阶问题及解决方案

（1）问题分析。从零件的齿形方面考虑，零件的齿形角度误差fH_a和齿形鼓形量C_a如果在精加工前后的数值或方向不一致，则有可能在根部产生台阶。fH_a和C_a在齿轮中截面的根部切削余量情况如图11所示。

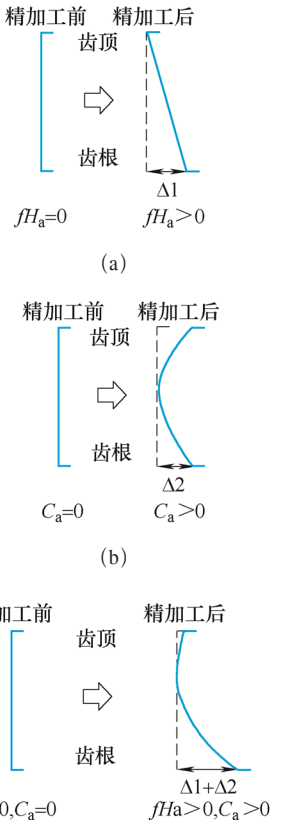


图11　fH_a和C_a三种情况下的根部切削余量

图11a显示因fH_a在加工前后不一致，导致根部的切削余量偏大；图11b显示因C_a在加工前后不一致，导致根部的切削余量偏大；图11c是同时考虑fH_a和C_a在加工前后不一致的情况，根部增大的余量叠加在一起，台阶出现的风险会更大。

当然，上图描述的只是“加工

前fH_a=0，加工后fH_a>0”的情况。实际生产过程中还有“加工前fH_a<0，加工后fH_a>0”的情况出现，根部余量会再次增大，这样的台阶基本就无法避免了。

还有一种情况在磨齿工艺中比较常见，当磨齿的齿向鼓形量较大时，齿形在三截面上会呈现一种自然扭曲的情况，如图12和图13所示。

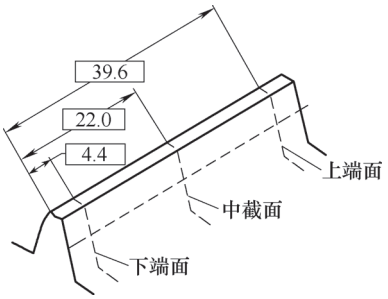


图12　沿齿向方向的齿形三截面

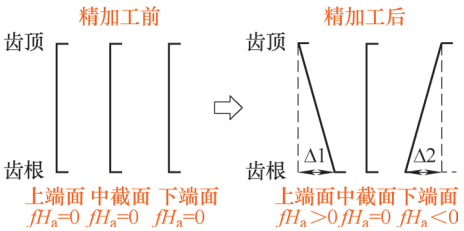


图13　fH_a在磨齿后出现的自然扭曲示意

在零件齿宽上下两端的截面上，磨齿前后的齿形角度fH_a发生了改变。原来竖直的齿形角度（fH_a=0），开始倾斜，且方向相反（上端面fH_a>0，下端面fH_a<0）。此时，上端面的根部余量变大，容易产生台阶。

（2）解决方案。问题一的理想的条件是加工前后的齿形fH_a和C_a非常接近，得到该零件稳定的齿形热变形数据后，再调整前道工序的齿形要求。这样在设计刀具时就可以做出相应的齿形修正，使之与加工后的成品要求保持一致。

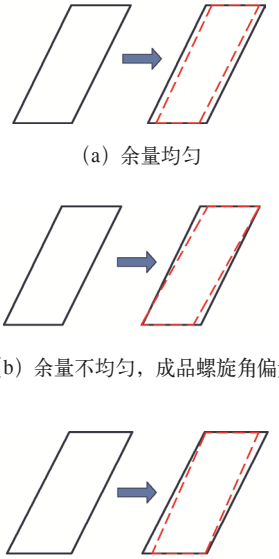
磨齿工艺中台阶问题的解决方案：一是可将自然扭曲放在前道工序进行反补，可粗精加工刀具的差异和热变形趋势较难把控，该方案实现起来很有挑战；二是可在磨齿机床上加入反扭曲的程序功能，这相对而言较为容易，特别对工艺试制的开发周期与成本减少有较大帮助。

2.齿向引起的台阶问题及解决方案

（1）问题分析。齿向角度误差fH_b和齿向鼓形量C_b同样会影响到齿轮根部台阶的产生。如图14所示。

可见，如果精加工前的齿向角度偏差和精加工后的一致，则沿齿向上的齿厚加工余量是均匀的；如果差异较大，余量从一端至另一端差值较多，那么余量多的那端就有产生台阶的风险。

（2）解决方案。与齿形修正办法相似，通过实验得到稳定的齿向热变形数据，然后反补到前道工序上。注意，一旦增加了齿向修形要求，齿形的修形也会受其影响。那么设计相关刀具时，需同时考虑齿形和齿向的修形，才能做到正确的弥补和调整，使加工前后的修形状态保持一致。



（a）余量均匀

（b）余量不均匀，成品螺旋角偏大

（c）余量不均匀，成品螺旋角偏小

图14　余量和螺旋角的影响

3.齿距和径向圆跳动引起的台阶问题及解决方案

（1）单个齿距误差F_p和相邻齿距误差f_u过大引起的台阶问题。

分析：此类问题通常发生在粗加工工序中，最为典型的是滚齿工艺。当零件齿数较少，滚刀采用多头，特别是零件齿数与滚刀头数能够互约（如零件齿数为14，滚刀头数为2），则问题发生的概率非常大。如图15所示，案例中的零件每个轮齿的中心偏离其理论齿形的中心位置，在后续精加工过程中，远离中心线一侧的齿厚加工余量会变多，则会导致齿轮根部台阶的产生。

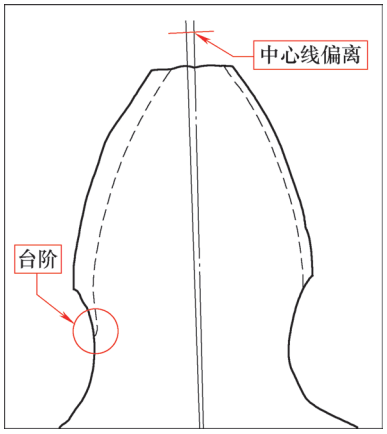


图15 f_p和f_0导致的台阶问题

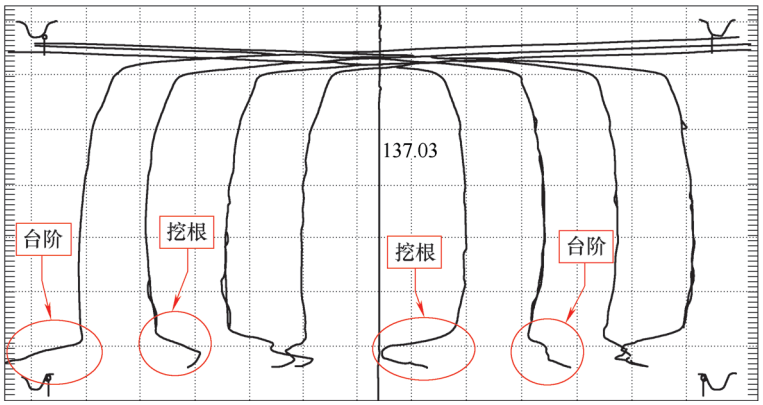
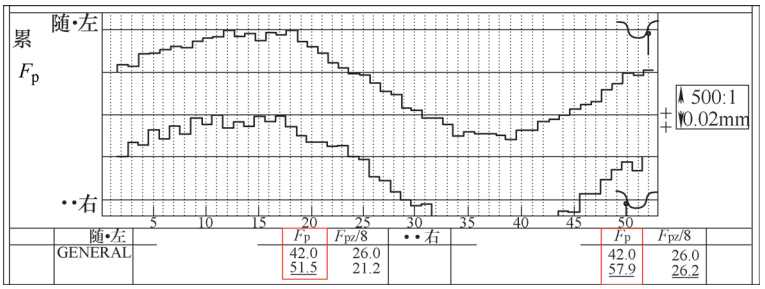
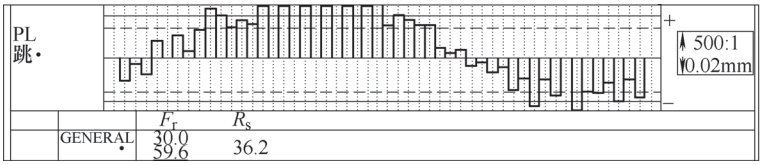


图16 径向圆跳动引起的台阶问题



（a）热处理后齿距累积误差F_p报告



（b）热处理后径向圆跳动误差F_r报告

图17 误差报告结果

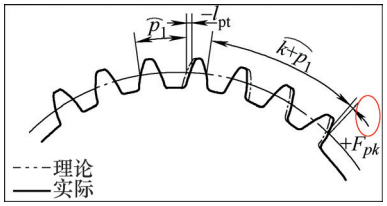


图18 F_p和F_r影响下的偏离理论齿形

解决方案：需从滚刀的设计着手，在加工节拍允许的条件下，尽量采用较少的头数；如果节拍要求很高，头数必须多头，则需提高滚刀的制造精度，或进一步采用成本较高的全磨齿廓工艺。

（2）累积误差和径向圆跳动过大引起的台阶问题。

分析：此类问题通常发生在热处理后精加工工艺（磨齿、珩齿）中，问题报告如图16所示，表现形式为同一齿侧既有挖根又有台阶。

主要原因还是热处理后的齿距累积误差F_p和径向圆跳动误差产生了较大的变化，如图17所示。综合累积误差在台阶问题上的表现形式与单个齿距误差类似，经过一圈的齿距累积后，加上径向圆跳动带来的影响，个别轮齿的中心线会大大偏离其理论齿形的中心位置。如图18所示。

精加工后（磨齿）的零件也会有综合累积误差和径向圆跳动误差，倘若两者的曲线趋势与加工前的状态刚好相反，则部分轮齿产生台阶的可能性将大大增加。

解决方案：需根据零件热处理变形的形式，优化工艺过程的齿轮切削参数；优化与加工基准孔和端面相关的定位夹持方式；或者优化热处理工艺参数和工装定位方式；如有必要甚至需要优化齿轮的材料品种和结构设计。

综上所述，只有将热变形不规律的原因找到，才能有针对性地控制热变形形式，将热变形量减少到最低程度，齿根的台阶问题也将随着热变形量的减少而减少，直至消失。AUTO1950