

加工圆柱齿轮 的先进方法

〔苏〕Н.А.科加诺夫 等著

ПРОГРЕССИВНЫЕ
МЕТОДЫ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ЗУБЧАТЫХ
КОЛЕС

本书论述了以综合运用各种先进的制齿方法和硬质合金刀具为基础的加工圆柱齿轮的高效工艺方法,以采用铣刀进行圆柱齿轮的齿形粗加工及精加工的实例说明大大提高加工生产率的可能性,论述了由带齿的模锻齿轮坯加工齿轮的工艺方法。

本书适用于机械制造厂的工程技术人员阅读。也可供有关大专院校师生参考。

**ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

И.А.КОГАНОВ Ю.Н.ФЕДОРОВ

Е.Н.ВАЛИКОВ

《МАШИНОСТРОЕНИЕ》 1981

• • •

加工圆柱齿轮的先进方法

〔苏〕И.А.科加诺夫 等著

张兴隆 译 刘湘川 校

•

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

•

开本 787×1092 1/32·印张 5·字数 108 千字

1987年2月北京第一版·1987年2月北京第一次印刷

印数 0,001—4,175·定价 1.25 元

•

统一书号: 15033·6513

译 者 的 话

本书采用分析切削图的办法，对加工圆柱齿轮的各种新的切齿方法，诸如高效滚齿、旋转拉齿、 0° 齿形角铣刀铣齿等方法进行了深入的理论研究。盘铣刀切齿又采用变速进给法（即平稳切削）、等厚切齿法、等宽切齿法等，利用这些方法可实现优化切齿，在保证加工精度的前提下减少切齿需要的切削刀数，从而提高生产率，同时刀具的寿命还有所延长。

本书还对新型刀具的设计，刀具材料、实现变进给切削的机床改装作了简要介绍。此外，对于齿坯制造、切齿前的齿坯加工、倒角及去毛刺、端齿离合器加工也作了介绍，这些加工方法都具有一定特色。

全书译出后由刘湘川同志负责校订，在此谨致谢意。在翻译时，对原书中的一些明显错误作了改正。由于译者水平所限，错误和不妥之处恳请广大读者批评指正。

目 录

译者的话

绪论	1
----	---

第一章 高效铣齿的原理	2
-------------	---

1. 提高滚齿效率的主要途径 2
2. 用梳刀和盘铣刀粗切齿 7
3. 用大直径滚刀滚齿 9
4. 旋转拉齿 12
5. 用 0° 齿形角铣刀精加工圆柱齿轮 16

第二章 优化切齿的理论基础	21
---------------	----

1. 平稳切削的条件 22
2. 切屑厚度及切屑面积的确定 (切削图的几何分析) 24
3. 等宽切削法 36
4. 等厚切削法 (使用齿条形刀具时) 43
5. 利用组合图使切削平稳 46
6. 切削力与切屑面积的关系 49
7. 平稳切削时刀具的寿命 51

第三章 用大直径铣刀和滚刀粗切齿	53
------------------	----

1. 改装卧式铣床, 用盘铣刀切齿 53
2. 盘铣刀的结构 56
3. 用大直径硬质合金滚刀粗切齿 62

第四章 用 0° 齿形角铣刀精切齿	72
--------------------------	----

1. 刀具的工作部分齿形及其安装参数的计算方法 72
2. 工件纵向齿形的分析 82
3. 齿面的棱面, 按棱面高度实现优化切削 86
4. 铣刀结构 91

5. 精切齿所用的设备	98
第五章 齿廓倒角和端齿离合器爪的加工	108
1. 用梳刀去毛刺和齿廓倒角	108
2 用铣刀加工端齿离合器爪	119
第六章 由带齿的模锻齿轮坯制造齿轮的综 合工艺方法	133
1. 制坯方法的选择	133
2. 配合孔及轮毂端面的加工	140
3. 齿圈外圆及端面的加工	145
4. 加工的工艺路线	151
参考文献	155

绪 论

在齿轮加工的整个过程中，齿形加工特别重要。加工圆柱齿轮时，滚齿和插齿应用最广，并在不断改进。

提高切削速度，即采用硬质合金刀具是进一步提高生产率的途径。为了提高切削速度，最好是采用铣削。采用硬质合金滚刀是很困难的。因为硬质合金滚刀的制造很困难，而且现在多数滚齿机对切削速度有严格的限制。

图尔工学院的机械制造工艺教研室与图尔机械厂合作，采用硬质合金铣刀按新的制齿方法在提高制齿生产率方面进行了多年的研究。

加工狭窄（齿圈宽度不大的）齿轮时，用大直径滚刀作无纵进给的粗加工（剃前加工），再配合采用变速滚切进给实现平稳切削，可以大大提高生产率。

在圆柱齿轮的成批及大量生产中，常采用粗切齿——剃齿的方法。在一定的条件下，剃齿的生产率高，成本低，并且能达到6~7级精度。但是只有在剃前粗加工的精度不低于8级的条件下才能稳定地达到这个精度。剃前加工的误差过大，剃齿也无法校正。

采用0°齿形角铣刀作精加工，不论粗加工的精度如何，即使是模锻轮齿的齿轮坯，都能稳定地达到6~7级精度。这就使得能在生产条件下采用先进的、预先已制有轮齿的齿轮坯件。

在分开式阴模中采用复合挤压变形法模锻是获得精密齿

轮坯的最合理方法（如摩托车齿轮）。这种方法可确保材料很好地充满阴模的型腔，获得无拔模斜度、无余边废料的坯件，采用通用设备就可锻造。

图尔机械厂的B.M.雅比柯夫已在分开式阴模中采用复合挤压齿轮毛坯的方法制坯，并用 0° 齿形角铣刀对此种坯件进行齿形精加工。这样，热模锻 -0° 齿形角铣刀精加工这种新的工艺方法就得到了实际应用。这种方法的经济效果是很明显的，因为减少了一道切齿工序，节约了材料，大大减少了车削加工量。

在齿轮的整个加工过程中，除了主要的制齿工序要具有较高的生产率外，其它较次要的工序，比如去毛刺和齿廓倒角以及端齿离合器爪的加工都应有较高的生产率。

第一章 高效铣齿的原理

1. 提高滚齿效率的主要途径

自从滚齿方法出现以来，其原理一直沿用至今。但是仍进行了大量研究，使这种方法在生产率和加工精度方面都在不断提高。

分析计算滚齿的基本工艺时间的公式，则可找出提高其生产率的途径：

$$t_0 = \frac{(b + y_1 + y_2)z\pi D_\phi}{1000skv} \quad (1)$$

式中 b ——齿圈的宽度，mm；

y_1 ——切入行程的长度, mm;

y_2 ——切出行程的长度, mm;

z ——工件的齿数;

s ——工件的每转进给量, mm/r;

k ——滚刀头数;

v ——切速, m/min;

D_ϕ ——滚刀直径, mm。

除了提高切削速度、增大进给量、缩短进给行程长度等传统的提高滚齿生产率的方法外, 尚有一特殊参数——滚刀头数可提高滚齿生产率。

提高切削速度的可能性 改进切削刀具的材料是提高切削速度的常用方法。对于滚刀, 则是采用超高速钢及硬质合金, 实际上都是采用超高速钢。比如用钢P6M5K5制做的滚刀, 切削速度可达到 $v = 70\text{m/min}$, 为普通高速钢或其代用材料的切削速度的 2 倍。

由于硬质合金滚刀制造困难, 并且大多数滚齿机难于充分发挥硬质合金的优良切削性能, 因而直到现在, 硬质合金滚刀还没有得到实际应用。不过, 现在已能制造出与滚刀的结构相似的铣刀。因而, 可以认为制造硬质合金滚刀的困难已基本克服。使用金钢石砂轮磨削, 再配合电-物理和电-化学的加工方法完全能解决硬质合金滚刀的制造问题。而困难主要在于滚齿机的结构还不能充分发挥硬质合金的优良切削性能。不难相信, 任何滚齿机, 即使是现在最先进的滚齿机都还不能适用于太高的切削速度 ($v = 150 \sim 200\text{m/min}$)。滚齿时, 切削速度, 即滚刀的转速受工件转速的限制。滚刀转速增大几倍, 工件转速也必然伴随着增大几倍, 即机床工作台的转速要增大几倍。工作台是由传动比很大的分齿蜗轮副

驱动的。当工作台转速增高时，就使得分齿蜗轮副的滑动速度增大，而这是不允许的。通常，在滚齿机的说明书中已根据分齿蜗轮副的许用滑动速度限定了分齿蜗杆的转速。

例如，在5K32A型滚齿机的说明书中规定分齿蜗杆的转速不应超过1200r/min。选择切削速度（滚刀转速）时，要考虑这个限制并按下式计算：

$$n_{\phi} \leq \frac{1200 z}{96 k} \quad (2)$$

式中 z ——工件齿数；

k ——滚刀头数。

此外，还应该考虑到滚齿机的传动链复杂。传动链的各构件的转速过高，则摩擦损失增大，使主运动所需的有效功率不足。

由于上述原因，所以直到现在还不能在生产实践中应用硬质合金滚刀作高速切削。

缩短走刀长度的可能性 一件一件地加工齿轮时，刀具切入所占时间甚多。因此，建议这时采用复合进给：径向进给进行切入，纵向进给进行主要切削（图1a）。采用这种加工循环时，行程长度与刀具的直径无关，在使用大直径滚刀时这点特别重要。用大直径滚刀加工狭窄齿轮时可作无纵进

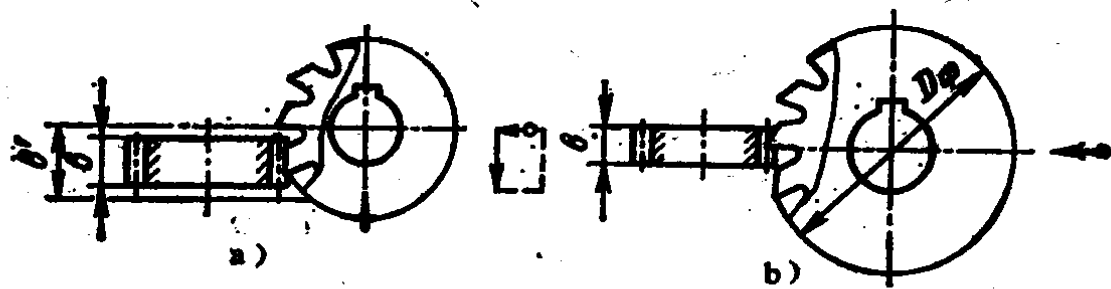


图1 切齿方法
a) 双向进给切削 b) 径向进给切削

给切削，即应用最短走刀长度原理（图1b）。

无纵进给切削时，在齿面及齿根会形成凹面。由图2可知，齿根凹面的高度 f 为：

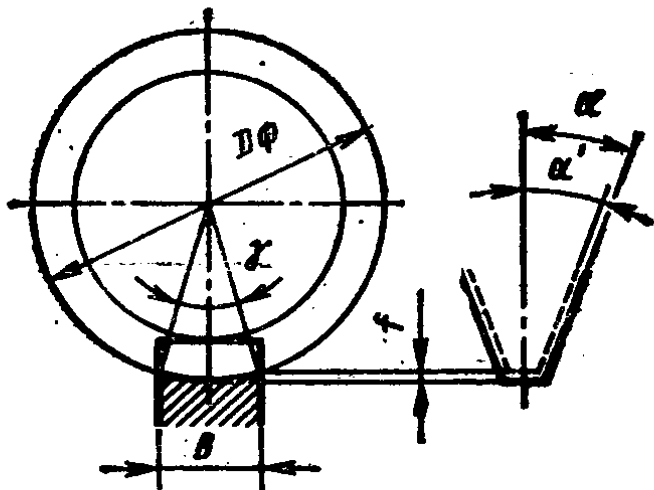


图2 径向进给切削时齿根凹面圆弧高度 f 的计算

$$f = R_o - R_o \cos \frac{\gamma}{2} = R_o \left(1 - \cos \frac{\gamma}{2} \right) = 2R_o \sin^2 \left(\frac{\gamma}{4} \right).$$

当角 γ 很小时，

$$f \approx 2R_o \frac{\gamma^2}{16} = \frac{R_o \gamma^2}{8}, \text{ 且 } \gamma \approx \frac{B}{R_o}$$

因此

$$f = \frac{B^2}{8R_o} \quad (3)$$

计算齿面的凹弧面高度时，可认为在齿轮的端截面内刀具齿条的齿廓为直线，廓形角 $\alpha' = \alpha$ 。这时，在工件齿廓法向测量的齿廓凹弧面高 f_0 ，由图2可知：

$$f_0 = f \sin \alpha = \frac{B^2}{8R_o} \sin \alpha \quad (4)$$

由于在齿面形成了凹面，因而限制了应用大直径滚刀作径向切削，而只能用于粗加工，例如用于剃前加工。

增加滚刀头数 为了提高滚齿生产率可采用多头滚刀。由式(1)可知,增加滚刀头数可成比例地减少滚齿的基本工艺时间——提高生产率。

但是,采用多头滚刀时,由于参与切削齿面的刀数减少了,必然使工件齿面的棱面增大,使工件的精度下降。增大滚刀直径并适当增加其齿数可以弥补这个缺点。但是增大滚刀直径又会降低生产率。不过,增大滚刀直径使生产率降低的倍数仍小于增加滚刀头数使生产率提高的倍数。

同时增大滚刀直径和滚刀头数可大大地提高切齿生产率。因此,大直径多头滚刀应该认为是很先进的滚刀〔6〕。使用这种滚刀时,应采取适当措施减少因切削行程增大使生产率降低的损失。为此,可采用径向进给切削(对狭窄齿轮的粗加工)或双向进给切削。

使用多头滚刀时,必须考虑到滚齿机分齿蜗轮副对切削速度的限制。因为增加滚刀头数会相应地增高分齿蜗杆的转速,特别是表现在加工齿数少的齿轮时。

增大进给量的可能性 滚齿时,合理分配滚刀刀齿上的负荷是能够显著增大进给量的最常用办法。滚切齿数多的大模数齿轮时,均匀分配各刀齿的负荷特别重要。对于这类齿轮,不可能按正常切削所需的滚刀长度来制造滚刀,而总是比正常切削所需的滚刀长度短。这样,就会使最先进入切削的刀齿的负荷加重。最先进入切削的刀齿就要切下本来应该由缺少的那些刀齿切下的切屑,因而所切下的切屑厚度增大。为了避免制造过分长的滚刀,并使各刀齿的负荷均匀,就要改进刀齿的形状。最简单的方法是制造锥度滚刀。“进步滚刀”〔7〕和苏联金属切削机床研究所研制的滚刀结构都相当复杂。

用锥度滚刀加工中小模数的齿轮不太合理, 因为提高的生产率还不能弥补增加的刀具制造费和使用费。同时还应考虑到, 锥度滚刀的安装位置是固定的, 不能使其作轴向移动来提高寿命。

采用新牌号的高速钢和增加滚刀头数能显著提高滚齿生产率。例如, 使用P6M5K5钢制造的三头滚刀加工 $m=2.5\sim 3\text{mm}$ 的齿轮, 切削速度 $v=70\text{m/min}$ 时的生产率可达 3s/齿 , 为标准滚刀的生产率的 $3\sim 4$ 倍。

2. 用梳刀和盘铣刀粗切齿

要进一步提高切齿生产率就必须采用新的加工方法。新的加工方法首先就要能充分发挥先进刀具材料, 特别是硬质合金的优良切削性能。高效切齿应综合采用下述基本原则:

1) 切削运动 (即刀具的转动) 和轮齿的成形运动之间不采用内链传动;

2) 加工狭窄齿轮时用大直径盘铣刀作无纵进给切削, 以便大大提高生产率;

3) 用弧形齿面代替直齿面, 能得到具有高的使用性能的零件 (弧齿圆柱齿轮, 弧齿端齿离合器等), 还可提高加工效率;

4) 采用变进给切削法, 使切削过程平稳。

综合采用上述原则可实现高效切齿, 其中包括充分发挥刀具材料如硬质合金的优良切削性能, 合理分配刀具刀齿上的负荷。

用梳刀和大直径盘铣刀加工圆柱齿轮的特点是: 主运动 (即刀具的转动) 与工件的转动不是内链传动。工件的转动速度 (滚切进给速度), 实质即生产率取决于切削每一齿槽

所需的刀数，首先取决于刀具的每一圈刀齿上的刀齿数和刀具的转速，即切削速度。加工狭窄齿轮时可不作纵向进给。在这种情况下，工件应安装成使其齿圈的对称轴线与刀具的轴线重合。这时，工件的齿根和齿面都会切出凹面。为了消除凹面，必须再进行光整加工或精加工。

用梳刀加工的生产率最高。因为梳刀特别长（其长度应不小于工件的周长），可同时加工三个工件。计算表明，用硬质合金梳刀同时加工三个工件的生产率不超过0.5s/齿。

实际上制造大直径硬质合金梳刀是很复杂的工艺问题。比如，如果这种刀具采用单个的可互换的刀头，则存在着在每一圈上刀齿的安装精度和刀齿的轴向齿距精度问题。分析其有关尺寸链可知，要使每个可互换的刀头达到要求的齿距精度和侧刃的端跳精度实际上是办不到的。

在刀盘体上精确地加工出用来安装刀头的刀槽可较好地解决此问题。实质上这是用能达到精度的坐标法代替链环法。但是这样就使每圈刀齿上的刀头数减少了，从而使生产率降低。

考虑到梳刀所固有的这些缺点，故用硬质合金盘铣刀代替梳刀。用梳刀加工时，梳刀是连续转动的，而且刀齿圈数等于工件的齿数。用盘铣刀加工则不同，盘铣刀只有一圈刀齿。工件要周期性地转动，即转 $1/z$ 转实现分齿。

切削一开始，工件就和刀具作协调的运动，切出一个齿槽。加工好第一个齿槽后，工件转动 $1/z$ 转进行分齿。之后工件和刀具又作协调的运动，但工件的旋转方向相反，再加工出第二个齿槽。

从使用和制造的角度看，与梳刀相比较，盘铣刀有许多优点。特别是其重量轻，因而便于运输。另外，盘铣刀的装

配简单,并且装配好后才检验,刀盘体的制造也容易,等等。

由于使用单片盘铣刀有空行程,故会降低生产率。但与其它方法相比,其生产率仍很高(加工 $m=2.5\text{mm}$ 的 12XH3A 钢齿轮,生产率为 $1.5\sim 1.8\text{ s/齿}$)。这种高的生产率不仅是因为充分发挥了硬质合金的优良切削性能,而且因为切削时滚切进给量在不断变化,使得每刀得到合理的负荷分配。

图 3 的切削图表示用梳刀作匀速滚切进给加工时,刀齿在齿槽中的各个位置。每切一刀,切屑的厚度和面积都在不断变化。所以滚切进给量应根据最大切屑厚度或最大切屑面积确定。这样,加工齿槽的整个过程中,滚切进给量就太小了。在加工每个齿槽的过程中改变滚切进给量,就可按切屑面积和切屑厚度实现平稳切削,使加工每个齿槽过程中的各刀的负荷分配合理,从而提高生产率。

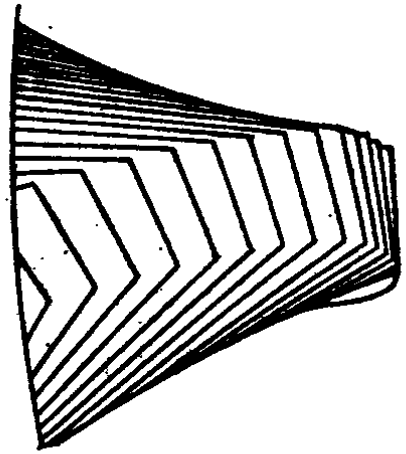


图 3 由梳刀的刀齿切削一个齿槽的切削图

采用传统的梳刀或插齿刀切齿的方法,要想改变滚切进给量使切削过程平稳是不可能的,因为加工时有若干刀齿同时切削工件的相邻轮齿的不同部位。

用盘铣刀加工圆柱齿轮时,能在切削齿槽的过程中改变工件的滚切进给量,这是因为盘铣刀只有一圈刀齿。用盘铣刀实现平稳切削的方法在第二章论述。

3. 用大直径滚刀滚齿

加工狭窄齿轮时,采用大直径滚刀作径向进给切削最合

理。如果一定要作纵向走刀（形成的凹面大时），为了缩短切削行程长度应采用双向进给切削法（图1a）。

如果大直径滚刀用硬质合金制造，则可更进一步提高生产率（因为可提高切削速度）。

但是，滚齿机的分齿蜗杆的允许极限转速要限制生产率的提高。例如，对于5K32A型滚齿机，式（2）为下述形式：

$$\frac{1000v}{\pi D_H} \leq \frac{1200z_{HP}}{96k}$$

式中 v ——切削速度；

D_H ——刀具的直径；

z_{HP} ——工件的极限齿数（最少齿数）；

k ——滚刀的头数。

于是，

$$z_{HP} \geq \frac{1000v \times 96k}{1200\pi D_H} \quad (5)$$

由上式可见，滚刀头数的增加与切削速度的提高一样，都可在分齿蜗杆转速允许的前提下增大工件的极限齿数。

这说明，加工齿数较多的工件可同时从两个方面提高生产率。但是，如果考虑到分齿蜗杆转速对生产率的限制，则应选择出提高生产率的最优方法：或者增加滚刀头数，或者提高切削速度。

简单的计算表明，使用大直径滚刀时，增加滚刀头数还不如采用相同直径的硬质合金滚刀更能提高生产率。例如，为了加工 $m=2.5\text{mm}$ 的齿轮，按标准应采用直径 $D_H=60\text{mm}$ 、 $z_H=10$ 的单头滚刀。在5K32A型滚齿机上，滚刀的最大直径为200mm（按刀架的结构）。如果取大直径滚刀的槽距与标

准滚刀的槽距相等, 则大直径滚刀的槽数 z_{H6} 为:

$$z_{H6} = \frac{\pi D_{H6}}{t_H}; \quad t_H = \frac{\pi D_H}{z_H}$$

式中 D_H ——标准滚刀的直径;

z_H ——标准滚刀的槽数;

D_{H6} ——大直径滚刀的直径。

因此

$$z_{H6} = \frac{\pi D_{H6} z_H}{\pi D_H} = \frac{200 \times 10}{60} \approx 33$$

由此可见, 用 $D_{H6}=200\text{mm}$ 的大直径多头滚刀时, 要使其参与切削齿廓的刀数与标准滚刀参与切削齿廓的刀数相等, 则大直径滚刀应为3头。按式(5), 这时应使 $z_{HP} \geq 14$ 。

如果用相同直径的硬质合金单头滚刀代替高速钢多头滚刀, 那么切削速度可提高5倍, 即生产率可提高一倍。但这时应使 $z_{HP} \geq 27$ 。

由上述可见, 用硬质合金多头大直径滚刀作径向进给加工狭窄齿轮的生产率很高。

用大直径滚刀加工小尺寸的齿轮采用变速径向进给还可提高生产率。图4表示匀速径向进给切削齿轮($z=17$)齿槽的情形。由该图可知, 工件每转一周在齿槽中切下的面积都在不断增大, 最后(工件转最后一转)增至最大。

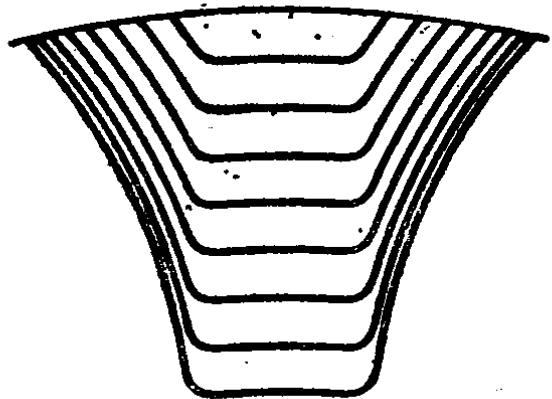


图4 用滚刀作匀速径向进给切削齿轮齿槽的情形

匀速径向进给切削时, 按切削到最后一刀的负荷最重的

条件选取切削用量，因而几乎整个切削过程中切削负荷未满载。用变进给切削则可避免这一缺点。在这种情况下，切削开始时进给量最大，然后逐渐减小，到加工快结束时采用非平稳切削（即匀速径向进给）时的进给量。这样就能减少加工整个齿槽所需要的工件转数，提高生产率。

4. 旋转拉齿

切削过程连续与否是影响生产率的最重要因素之一。滚齿加工比其它很多已采用的和推荐的方法相比优越得多，就在于它是连续切削的。

用齿条形刀具按包络法切削齿槽的典型切削图（图3）也具有旋转拉齿的特点。这个切削图还适用于用硬质合金盘铣刀加工狭窄齿轮。工件作一次滚切循环，则加工好全部齿槽。

故可用变进给切削法使原来的切削图实现

优化。其不足之处是切削过程是断续的，分齿时工件必须反转一个齿距。

采用大直径单圈滚刀 $\ominus$ 则可连续从齿轮齿槽中切除金属。这种滚刀的螺距为工件齿距的整数倍，并大于工件的切

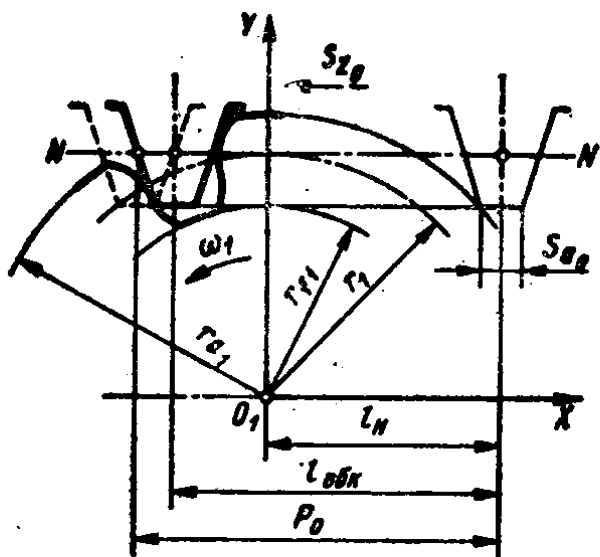


图5 刀具的第一个刀齿和最后一个刀齿与工件的相对位置

$\ominus$ 单圈滚刀——其刀齿刚好为一圈螺旋线的滚刀。这种滚刀多是单头，也可是多头。下同。——译者