

# 检测不同直径量棒跨棒距精修磨削压力角

范良成

浙江务成机械制造有限公司 浙江台州 318017

**摘要：**通过生产实例，详细介绍在Y7132型磨齿机上通过测量不同直径量棒的跨棒距来检测齿形，从而简便准确地修整砂轮磨削压力角，磨出渐开线大模数齿轮标准齿形。

**关键词：**量棒；跨棒距；磨削压力角；渐开线；标准齿形

## 1 序言

矿用汽车底盘类传动齿轮中以模数 $m$ 为5~10的大模数齿轮居多，压力角为 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 或 $30^\circ$ 。热处理方式为渗碳淬火，渗层深度为1~2mm，表面硬度为58~62HRC。由于热处理变形在所难免，所以为提高啮合质量须进行磨齿。磨齿机首选数控成形磨，不但精度和效率高，而且可进行齿形和齿向的修形，但数控成形磨价格昂贵，动辄百万元甚至更高。鉴于价格因素以及这类齿轮批量小、设备利用率低的特点，我公司对二手设备市场购得的Y7132型磨齿机经过简单的数控改装用于生产。数控改装仅是将展成运动、分度运动改为伺服电动机驱动；砂轮架滑座的往复（冲程）运动改为变频电动机驱动，其余运动，如砂轮修整运动均未改动；砂轮修整依然使用该设备原装的手调式修整器。

Y7132型磨齿机是一种锥形砂轮磨齿机，砂轮磨削压力角 $\alpha_{\text{磨}}$ 的修整精度直接关系到被磨削齿轮

的齿形精度，特别是对大模数齿轮的影响程度更大。而矿用汽车底盘类齿轮又属于小批量、多品种的生产模式，生产中需要经常调整砂轮磨削压力角。即便使用齿轮测量中心等设备检测，也应先将齿形磨到一个较高的精度。为此，笔者利用公法线长度 $W$ 和棒距值 $M$ 之间存在的对应关系，用测量不同直径量棒棒距的办法来检测齿形。通过实践，此办法既能简便准确地调整砂轮修整器，又能在不拆卸工件的情况下“在线检测”，减少不必要的浪费。

## 2 磨齿机工作原理

Y7132型磨齿机工作原理如图1所示。锥面砂轮磨削渐开线齿面是遵循齿轮和齿条啮合原理进行的。砂轮相当于假想齿条上的一个齿，齿轮的节圆沿齿条的节线作纯滚动，即当齿轮旋转一转，其移动距离应等于磨削节圆的圆周长。当磨完一个齿槽后，进行分度磨下一个齿槽，直到磨完全部齿

[2] 陈燕生. 液体静压支承原理和设计[M]. 北京：国防工业出版社，1980.

[3] 彭熙伟. 流体传动与控制基础[M]. 北京：机械工业出版社，2011.

[4] 邱勇. 工作台导轨静压改造[J]. 重型机械科技，2005（1）：23-26.

[5] 朱德志. 恒流静压技术在刨改铣中的应用[J]. 制造技术与机床，2005（7）：106-109.

[6] 吴博. 液压系统使用与维修手册[M]. 北京：机械工业出版社，2012.

[7] 张展. 机械设计通用手册[M]. 北京：机械工业出版社，2008.

[8] 李壮云. 液压元件与系统[M]. 3版. 北京：机械工业出版社，2011.

槽。砂轮沿齿轮轴向进给运动是由砂轮的往复运动来实现的,其往复冲程的长度以能否磨出齿宽为准<sup>[1-3]</sup>。

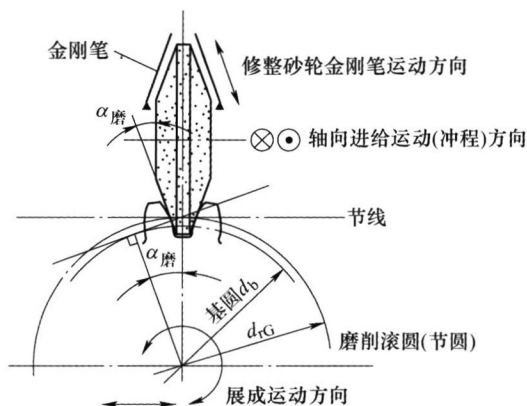


图1 锥形砂轮型磨齿机工作原理

磨削滚圆直径 $d_{rG}$ 的计算公式为

$$d_{rG} = m_n z \cos \alpha / (\cos \beta_M \cos \alpha_{\text{磨}}) \quad (1)$$

滚圆盘直径 $d_r$ 的计算公式为

$$d_r = d_{rG} - D_r \quad (2)$$

式中,  $m_n$ 为被磨齿轮法向模数;  $z$ 为被磨齿轮齿数;  $\alpha$ 为被磨齿轮压力角( $^\circ$ );  $\beta_M$ 为磨削螺旋角( $^\circ$ );  $\alpha_{\text{磨}}$ 为磨削压力角( $^\circ$ );  $D_r$ 为钢带厚度(mm)。

需说明的是,磨削滚圆直径 $d_{rG}$ 和滚圆盘直径 $d_r$ 是不同的两个概念。实践中,笔者发现很多老师傅都将其混淆。

### 3 磨削压力角对齿形的影响

由上可知,对于直齿轮而言,若磨削压力角 $\alpha_{\text{磨}}$ 等于被磨齿轮压力角 $\alpha$ ,则磨削滚圆直径 $d_{rG}$ 即为被磨齿轮分度圆直径 $d$ 。磨削过程中磨削滚圆直径 $d_{rG}$ 是不变的,为了磨出标准渐开线齿形,就要把磨削压力角 $\alpha_{\text{磨}}$ 修整到被磨齿轮压力角 $\alpha$ 的角度值,即磨削压力角 $\alpha_{\text{磨}}$ 的角度值会直接反映到磨削后的齿形上而影响齿形精度。

现以TR100矿用汽车轮边减速器二级行星齿轮为例进行说明。该齿轮为渐开线直齿圆柱齿轮,参数为:  $m=9.23636$  (DP=2.75mm $^{-1}$ );  $z=23$ ;  $\alpha=30^\circ$ ; 4齿公法线长度 $W_4=97.6423 \sim 97.7077$ mm (公差带宽度为0.0654mm); 齿廓总偏差 $F_{\alpha}=0.025$ mm。压力角偏差对齿形的影响如图2所示。图2中的两条渐开线是根据上述齿轮参数

利用电子图板(CAXA)中的“齿轮”功能绘制出来的,它们的4齿公法线长度刚好都是上极限偏差97.7077mm,但压力角为 $30^\circ 4'$ 的渐开线与压力角为 $30^\circ$ 的渐开线相比,在计值范围内其齿形误差已达0.024mm。即仅就 $4'$ 压力角误差所引起的齿形误差就已达齿廓总偏差的上限。鉴于机床本身或多或少还存在其他影响齿形精度的因素,所以砂轮磨削压力角 $\alpha_{\text{磨}}$ 的修整精度越高越好。

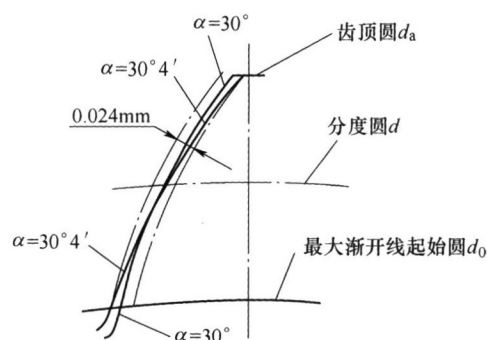


图2 压力角偏差对齿形的影响

在实践中,要用万能角度尺等量具精确地测量并修整出磨削压力角 $\alpha_{\text{磨}}$ ,并不是件容易的事情。另外,由图1和式(1)、式(2)可知:若滚圆盘直径 $d_r$ 存在制造误差而导致磨削滚圆直径 $d_{rG}$ 不等于被磨齿轮分度圆直径 $d$ 时,也可通过改变为磨削压力角 $\alpha_{\text{磨}}$ 来磨出标准渐开线齿形。因此,如何能精确地修整磨削压力角 $\alpha_{\text{磨}}$ 就成了问题的关键。笔者通过测量不同直径量棒跨棒距来检测齿形,根据实测的跨棒距数值与理论计算值进行比较,从而判断磨出实际压力角 $\alpha_{\text{实}}$ 比理论压力角 $\alpha$ 偏大还是偏小及其偏差值,然后调整砂轮修整器金刚笔的修整角度(即精调 $\alpha_{\text{磨}}$ ),直至磨出标准渐开线齿形。

### 4 公法线长度、棒距、齿形间对应关系

变位齿轮的齿形如图3所示。变位系数 $x$ 与齿厚

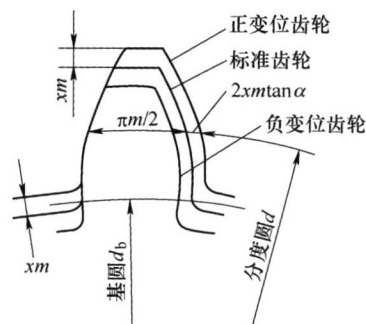


图3 变位齿轮的齿形

$s$ 、公法线长度、棒距等存在对应关系。若将标准齿轮理解成变位系数 $x$ 为“0”的变位齿轮，而齿厚的偏差也理解成“变位”，只是这个“ $x$ ”数值较小，小数点位数应取多些<sup>[4]</sup>。利用这个所谓的“ $x$ ”按变位齿轮的相关计算公式，就能计算出公法线长度和与之相应的棒距值。

若确定了一个渐开线齿轮的模数、齿数、压力角和变位系数这4个参数，其渐开线齿形也就随之确定了，若再确定量棒直径 $d_p$ ，则棒距值 $M$ 也是确定的。而量棒直径 $d_p$ 是可以自由选择的，那么就可将实测的不同直径量棒的棒距值 $M_{\text{实}}$ 与理论计算值 $M_{\text{理}}$ 进行比较从而检测齿形，如图4所示。

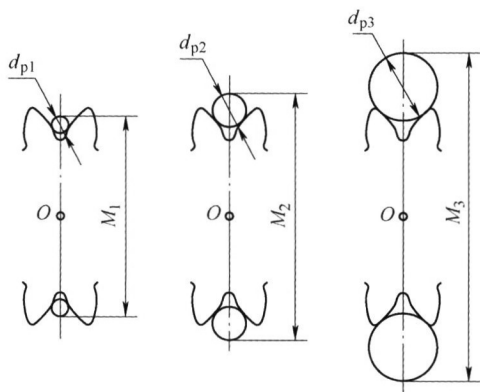


图4 不同直径量棒检测齿形

## 5 磨削实例分析

继续以上文提到的行星齿轮为例，先用万能角度尺或角度样板，边测量边修整砂轮磨削压力角，将该角度修到尽可能准确的程度，然后进行试磨。假设磨出的4齿公法线长度刚好是上极限偏差97.7077mm，选取 $d_{p1}=\phi 8\text{mm}$ 、 $d_{p2}=\phi 16\text{mm}$ 、 $d_{p3}=\phi 34\text{mm}$ 这3种直径量棒对其跨棒距进行实测。然后将实测值 $M_{\text{实}1}$ 、 $M_{\text{实}2}$ 、 $M_{\text{实}3}$ 分别与理论计算值 $M_{\text{理}1}$ 、 $M_{\text{理}2}$ 、 $M_{\text{理}3}$ 进行比较。因分度圆附近的齿形对跨棒距的影响较小， $M_{\text{实}2}$ 和 $M_{\text{理}2}$ 较为接近，而靠近齿底和齿顶的 $M_{\text{实}1}$ 和 $M_{\text{实}3}$ 与理论计算值相对来说相差大一些。若 $M_{\text{实}1}>M_{\text{理}1}$ ，而 $M_{\text{实}3}<M_{\text{理}3}$ ，则此时磨出的实际压力角 $\alpha_{\text{实}}>$ 理论压力角 $\alpha$ （反之亦然）。然后根据实测值调整砂轮修整器调小磨削压力角 $\alpha_{\text{磨}}$ ，直至 $M_{\text{实}}$ 与 $M_{\text{理}}$ 相差在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内。为保证测量精度，建议选用高等级千分尺和量棒，千分尺应与量块校准。

对于本例，求压力角为 $30^\circ$ 、4齿公法线长度刚

好为97.7077mm的齿形，其所对应的3种直径量棒跨棒距理论计算值。步骤如下。

1) 将已知参数代入变位直齿圆柱齿轮公法线长度计算公式即式(3)，反算出笔者所理解的“变位系数 $x$ ”。

$$W_k = m \cos \alpha [\pi (k - 0.5) + z \operatorname{inv} \alpha] + 2x m \sin \alpha \quad (3)$$

式中， $k$ 为跨测齿数（本例 $k=4$ ）。

计算可得：笔者所理解的“变位系数 $x$ ”= $-0.014506586153075433$ 。为提高计算精度，计算过程中，小数点位数尽可能多些，建议使用科学型计算器进行计算。

2) 将反求得到的所谓的“变位系数 $x$ ”、相应量棒直径 $d_p$ 和其他参数代入变位直齿圆柱齿轮量棒（球）跨距计算公式<sup>[5]</sup>，即式(4)和式(5)。

$$\operatorname{inv} \alpha_M = \operatorname{inv} \alpha \pm d_p / (m z \cos \alpha) \mp \pi / (2z) + 2x \tan \alpha / z \quad (4)$$

奇数齿时

$$M = m z \cos \alpha \cos (90^\circ / z) / \cos \alpha_M \pm d_p \quad (5)$$

式中， $\alpha_M$ 为量棒（球）中心所在圆的压力角（ $^\circ$ ）。

式(4)和式(5)中有“ $\pm$ ”或“ $\mp$ ”号处，上面的符号用于外齿轮，下面的符号用于内齿轮。计算得： $M_{\text{理}1}=209.7482\text{mm}$ ， $M_{\text{理}2}=234.2612\text{mm}$ ， $M_{\text{理}3}=281.5801\text{mm}$ 。

但在试磨过程中，一般情况下磨出的实际压力角不可能刚好是 $30^\circ$ 的标准值，公法线长度也不可能刚好磨到某个值。因此需要知道不同公法线长度和不同压力角所对应的3种直径量棒跨棒距理论计算值。通过实践，笔者总结出如下经验：在公法线长度上每相差0.01mm，分别计算该公法线长度值下的各种压力角的3种量棒跨棒距理论值，形成表格（见表1）方便试磨时查阅。

表1中数据显示，压力角相同时，如都为 $30^\circ 0'$ ，公法线长度变动量 $\Delta W_4$ 为0.01mm，而3种直径量棒的跨棒距变动量 $\Delta M_{\text{理}}$ 却是各不相同的，分别为 $\Delta M_{\text{理}1}=0.024\text{mm}$ ， $\Delta M_{\text{理}2}=0.019\text{mm}$ ， $\Delta M_{\text{理}3}=0.015\text{mm}$ 。规律为 $\Delta M_{\text{理}1}>\Delta M_{\text{理}2}>\Delta M_{\text{理}3}$ 。这是因为3种直径量棒的外圆与渐开线面接触点处的压力角 $\alpha_{\text{接触}}$ 不相同，且 $\alpha_{\text{接触}1}<\alpha_{\text{接触}2}<\alpha_{\text{接触}3}$ 。渐开线上越接近基圆处的压力角越小，其形状越“陡峭”，对跨棒距变动量影响越大，其原理如图5所示。从计量角度来说是有利的，相当于把齿形偏差的公差

表1 不同公法线长度及压力角所对应的3种直径量棒跨棒距理论计算值(部分)

| 4齿公法线长度<br>$W_4/\text{mm}$ | 实际压力角 $\alpha_{\text{实}}$ | 跨棒距理论计算值/mm     |                 |                 |
|----------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                            |                           | $M_{\text{理1}}$ | $M_{\text{理2}}$ | $M_{\text{理3}}$ |
| ...                        | ...                       | ...             | ...             | ...             |
| 97.700                     | 30° 6′                    | 209.781         | 234.238         | 281.516         |
|                            | 30° 4′                    | 209.764         | 234.241         | 281.533         |
|                            | 30° 2′                    | 209.747         | 234.244         | 281.551         |
|                            | 30° 0′                    | 209.729         | 234.247         | 281.568         |
|                            | 29° 58′                   | 209.712         | 234.249         | 281.586         |
|                            | 29° 56′                   | 209.694         | 234.252         | 281.603         |
|                            | 29° 54′                   | 209.676         | 234.255         | 281.620         |
| 97.690                     | 30° 6′                    | 209.757         | 234.219         | 281.501         |
|                            | 30° 4′                    | 209.740         | 234.222         | 281.519         |
|                            | 30° 2′                    | 209.723         | 234.225         | 281.536         |
|                            | 30° 0′                    | 209.705         | 234.228         | 281.553         |
|                            | 29° 58′                   | 209.687         | 234.231         | 281.571         |
|                            | 29° 56′                   | 209.670         | 234.234         | 281.588         |
|                            | 29° 54′                   | 209.651         | 234.236         | 281.605         |
| ...                        | ...                       | ...             | ...             | ...             |

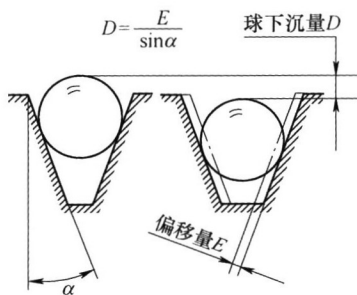


图5 偏移量与球下沉量的关系

带宽度放大了 $1/\sin\alpha_{\text{接触}}$ 倍,能更加精确地测出齿形偏差。

## 6 结束语

为减小径向圆跳动,使用了高精度可胀心轴。用上述方法磨出的齿轮,经齿轮测量中心检测,各项精度均符合图样要求。机床调试员积累一定经验后,调试过程中“边磨边调,又快又准”,调试“零报废”,而且设备改造费用却不高,使老设备变废为宝了。

### 参考文献:

- [1] 齿轮手册编委会. 齿轮手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [2] 孟少农. 机械加工工艺手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [3] 《齿轮制造工艺手册》编委会. 齿轮制造工艺手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.

[4] 范良成. 渐开线内花键线切割返修定位找正实例详解[J]. 金属加工(冷加工), 2021(8): 83-85.

[5] 成大先. 机械设计手册[M]. 5版. 北京: 化学工业出版社, 2008.

MW 20220505

## 稳经济大盘政策落地显效 工业经济稳步恢复

2022年上半年,各地区各部门高效统筹、积极应对,稳经济大盘系列政策落地显效,重点产业链供应链明显修复,工业品出口恢复两位数增长,工业经济总体呈企稳回升态势,体现宏观经济大盘“压舱石”作用。

(1) 上半年工业经济运行总体平稳 2022年上半年,全国工业增加值同比增长3.4%。能源、原材料保供稳价等政策效果明显,采矿业增加值同比增长9.5%;制造业增长2.8%;电力、热力、燃气及水生产和供应增长3.9%。在41个大类行业中,33个行业实现正增长,其中9个行业两位数增长。

(2) 二季度工业经济企稳回升 工业生产进一步边际改善。受突发疫情影响,4月份工业承压明显,全国工业增加值同比下降2.9%,二季度工业生产降至阶段性低点。随着国内疫情防控形势总体向好和全国稳经济大盘会议精神落地落实,工业经济逐步企稳回升,5、6月份工业生产同比分别增长0.7%、3.9%,增速连续两个月加快,边际改善特征明显,彰显强大韧性。

新动能引领作用持续显现。二季度,高技术制造业增加值同比增长5.7%,增速高于全部规模以上工业5.0个百分点,锂离子电池、电子元器件、集成电路等小类行业增加值增速均在20%以上,新动能增长继续发挥引领作用。二季度,单晶硅、多晶硅、光伏电池等产品产量分别增长61.3%、50.6%、30.4%,较一季度分别加快37.3、13.0、6.1个百分点。

产业链供应链修复加快。二季度,装备制造业增加值同比增长1.0%,增速高于全部规模以上工业0.3个百分点。5、6月份装备制造业增速分别较上月回升9.2和8.1个百分点,制造业产业链供应链快速修复,汽车产业链供应链修复节奏尤为明显。

(来源:国家统计局网站)