

# 模数 2 基准标准齿轮的研制

王立鼎 卢占山

**摘要** 本文扼要论述研制西德 *DIN* 3962—3963 标准中 2 级精度标准齿轮的若干工艺技术措施。其中包括改装精化国产齿轮磨床, 提高齿轮周节精度, 确立机床新的操作调整工艺, 提高轮齿渐开线精度等方面的问题。为保证齿轮精度和尺寸稳定性, 本文还介绍了齿坯加工和热处理工艺。

## 前 言

标准齿轮的制造精度是一个国家精密齿轮制造水平的标志之一。

标准齿轮(或称度量齿轮)是综合测量齿轮精度的标准元件(或称测量件),它的精度要高于被测齿轮二级到三级。我国已能制造相当于 *JB*179—60 齿轮标准中 4 ~ 3 级精度齿轮的标准齿轮。工业发达的西德、瑞士、美、英等国能制造出精度较高的标准齿轮。其中,中模数标准齿轮制造精度最高的是西德马尔(*MAHR*)公司,它的高档产品达到西德齿轮标准 *DIN*3962—3963 中的 2 级精度,比我国标准齿轮的制造精度高一级以上。

2 级精度的标准齿轮可称为基准标准齿轮(或母标准齿轮、主标准齿轮)。它用于综合测量批量生产中普通精度的标准齿轮和标准蜗杆,以及校验齿轮量仪。

过去,我国工业部门使用的 3 级精度标准齿轮都是从国外进口的。随着我国齿轮综合测量和齿轮整体误差测量技术的发展以及齿轮工艺水平的不断提高,并结合全国机械学发展规划的要求,我们开展了模数 2 基准标准齿轮的研究工作,研制出了一批 *DIN* 2 级精度的标准齿轮。

本文概要地介绍基准标准齿轮的齿坯工艺,机床精化和磨齿工艺中的几个问题。李萍同志参加了磨齿实验工作,在此致谢!

## 一、齿坯工艺

### (一) 标准齿轮的工艺过程

图 1 是所研制的标准齿轮的零件图。选用 *GCr*15 齿轮材料,其工艺过程如下:

1. 下料:对材料进行化学分析,并检查非金属夹杂和偏析等缺陷。
2. 锻造:始锻 1050℃,终锻 800℃,镦拉二次,锻坯  $\phi 132^{+2} \times 38^{+3}$ 。
3. 热处理:900°~920°C 正火,770°~790°C 球化退火。
4. 车:外圆只粗车,留量 2,其他各面精车。要求左端面与孔一次装夹车出,孔径车至  $\phi 39.6^{+0.04}$ ,端面留量 0.2。
5. 平磨:磨  $\phi 60$  右端面,达  $\nabla 7$ ,平行度 0.02。
6. 车:穿  $\phi 39.6$  心轴,精车外圆并倒角,外圆留量 0.5。

7. 滚齿：外圆找正，径向跳动不大于0.02，用磨前滚刀滚齿， $L = 40.30^{±0.03} (n = 7)$ 。
8. 刻字：模数、齿数、压力角、制造单位、齿轮编号，字高4。
9. 热处理：835°~845℃淬火，-196℃液氮冰冷处理1小时，150°~170℃低温回火3小时，打硬度。

其余▽6

1. 倒角  $1 \times 45^\circ$ 、圆角  $R1$ ；
2. 淬火  $Rc62 \sim 65$ ，稳定处理；
3. 非磨面喷砂镀铬。

10. 表面处理：酸洗，喷砂镀铬。
11. 内磨：按孔与  $\phi 60$  左端面找正并磨削，内孔磨到  $\phi 40_{-0.015}^{-0.007}$ ，圆柱度公差为0.003，端面对基准孔轴线的垂直度公差为0.003。
12. 平磨：磨  $\phi 60$  右端面，平行度公差为0.004。
13. 研磨：研孔与两个▽10端面达图纸要求（参考标准心轴配研孔）。
14. 外磨：穿 1:10000 的锥心轴磨外圆和靠磨大端面，达图纸要求。

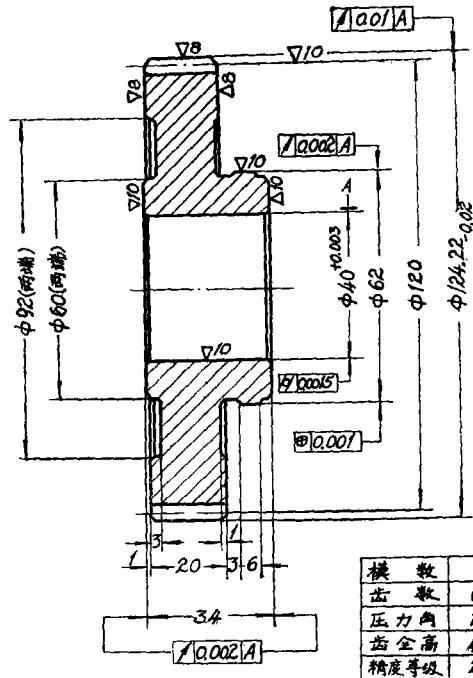


图 1. 标准齿轮零件图

15. 粗磨齿：在 NQ40 磨齿机上粗磨齿，达 6—7—7 级精度， $L = 40.19^{±0.02} (n = 7)$ 。
16. 半精磨齿：在 Y7125 磨齿机上磨齿达 4~3 级精度， $L = 40.10^{+0.02} (n = 7)$ 。
17. 时效：在 125℃ 油煮 16 小时。
18. 倒锐角：倒圆齿顶与齿端尖角。
19. 精磨齿：在 Y7431 磨齿机上磨齿，达到图纸要求。
20. 检齿：在 20℃ 恒温条件下鉴定齿轮精度。

## (二) 标准齿轮的热加工工艺

金属材料 and 热加工工艺是确保标准齿轮具有高硬度、耐磨损和尺寸稳定的重要因素。因此只在齿坯和齿形精加工方面下功夫来满足图纸要求还不行，为了长期保持标准齿轮的工作精度，必须重视齿轮材料的选择和热加工工艺。

1. 下料前必须检验原材料的化学成份，检查非金属夹杂和偏析等缺陷。

GCr15 钢的化学成份为：1.30~1.65%Cr、0.95~1.10%C、0.15~0.35%Si、0.20~0.40%Mn、<0.02%S、<0.027%P。

### 2. 锻造

加热温度勿过高，防止过烧和晶粒粗大。终锻温度勿过高或过低，防止出现粗大网状碳化物或带状组织。

### 3. 正火、球化退火

正火用于弥补锻造不足，消除由于终锻温度过高、冷速过慢或终锻温度过低，在金属组织中形成的网状或带状碳化物，并且可以细化晶粒。

球化退火的目的有两个：(1)使金属组织变为均布的细粒状珠光体，为淬火提供最佳的原始组织。(2)把硬度降低到有利于切削加工的范围。

正火、球化退火后的组织按 JB1255—72 第一级别图 1~2 级为合格；网状碳化物按 JB1255—72 第三级别图 ≤ 3 级为合格。

#### 4. 淬火、冷处理、低温回火

淬火、冷处理和低温回火是标准齿轮热加工工艺中影响齿轮机械性能和尺寸稳定性的关键工序。

淬火过程是使 GCr15 钢的高温奥氏体组织转变为马氏体组织。冷处理是淬火过程的继续，对于马氏体最终转变点在 0℃ 以下的标准齿轮用钢，在深冷过程中能使部分残留奥氏体继续发生马氏体转变，并使留下的更少量的残余奥氏体稳定下来。淬火之后应立即冷处理，间隔不应超过 30 分钟，否则会产生奥氏体的陈化稳定现象，影响到冷处理的效果。冷处理温度应依马氏体的最终转变点的温度而定。产业部门常采用干冰为冷处理介质。为了提高冷处理效果，我们采用了比干冰温度低的液氮做为介质。

低温回火可以消除淬火和冷处理应力。

#### 5. 时效

在半精磨齿与精磨齿之间，用低于原回火温度 20°~30℃ 的温度再次长时间的回火，可以消除磨削应力，进一步稳定组织，提高齿轮的尺寸稳定性。

## 二、精化机床

近年来国外齿轮磨床的新产品，如瑞士 MAAG 公司的 SD32XK、REISHAUER 公司的 AZA 和全电子式的 RZ300E，西德 CARL HÜRTH 公司的 SRS—400 以及苏联的 5A893C 等齿轮磨床，其加工精度为西德齿轮标准 DIN3962~3967 中的 4~3 级。个别精度指标能达到 2 级。

我们在研制模数 2 的基准标准齿轮之前，对国产 Y7431 型齿轮磨床进行了精化改装工作，以满足磨削 2 级精度齿轮的需要。

### (一) 改装机床工件主轴<sup>[2]</sup>

机床原轴系是具有 2~4 微米间隙的滑动轴系，主轴回转误差为 2 微米。1966 年改成装四百粒 0 级钢球的有微量过盈的密珠轴系，主轴回转误差减小到 0.5 微米，轴线稳定，有利于提高磨齿精度。

### (二) 改装机床分度机构

机床原分度机构对分度精度有影响的主要元件是机械式分度盘。分度盘的齿槽累积误差通常为 20"~30"，相邻误差为 3"~5"。这样的分度精度只适于磨削 5~3 级精度齿轮。我们曾采用“正弦消减法”和手工修研齿槽的办法来提高分度盘的工作精度，可以满足磨削 3~2 级精度齿轮的周节累积误差和单一周节差的要求。但是，这种办法提高磨齿精度是有限度的，而且修研过的齿槽精度不易保持。

根据研制基准标准齿轮的需要，我们试图用一种精度更高、工作可靠的新的机床分度机构取代原定位爪与分度盘的分度机构。1966 年在 Y7431 型齿轮磨床上曾做过光栅反馈试验，通过反馈，机床分度机构大周期误差明显下降，小周期误差减小甚微，而且，由于电控部分零点漂移，致使磨齿工作难以稳定。根据美国 MOORE 公司 0.2" 精度多齿盘圆转台的分度原理，1974 年设计了多齿分度装置，经过几年时间的研制与实验，它成功地用于 Y7431 型齿轮磨床分度机构的改装精化。图 2 是 Y7431 磨齿机多齿分度机构示意图。用 12 面棱体全组合

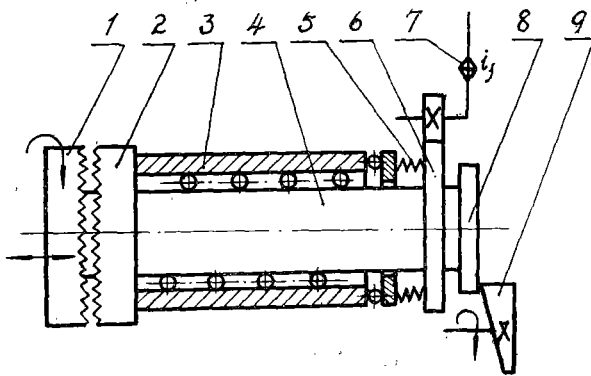


图2 Y7431磨齿机多齿分度机构示意图

1. 动齿盘; 2. 定齿盘; 3. 轴套; 4. 主轴; 5. 弹簧; 6. 中心齿轮; 7. 分度挂轮;
8. 控制盘; 9. 凸轮。

法测量, 机床总分度误差仅为 $1.71'' \pm 0.18''$ 。实验证明: 改装后机床的分度精度稳定, 磨齿精度明显提高, 齿轮的周节累积误差和单一周节差可以达到西德 DIN3962 中的 2~1 级精度。

几种分度机构磨齿精度的比较, 见表 1。

表 1 y7431 三种分度机构磨齿精度的比较

误差项目 \ 分度机构	分度盘	光栅反馈	多齿盘
周节累积误差	15''~40''	11''	5''~15''
单一周节差	4''~8''	5.5''	2.5''~5''
双啮单齿跳动	2~5微米		≤2微米

从表 1 中看出, 机床改装成多齿分度机构以后, 由于单一周节差的减小, 双啮单齿跳动也随之减小。除此之外, 从磨制基准标准齿轮的实测误差来看, 齿圈径向跳动量也有所减小, 这是由于机床分度机构误差减小的缘故。

### 三、磨齿工艺中的几个问题

#### (一) 提高齿坯的安装精度

当机床分度精度确定之后, 齿坯的安装精度就成了影响齿轮周节累积误差的重要因素。除此之外, 齿坯的安装精度还影响到齿轮的单一周节差、齿形误差以及齿向误差等。

提高齿坯的安装精度要解决两方面问题: 一是磨齿心轴相对于机床工件主轴的安装精度, 二是齿坯相对于磨齿心轴的安装精度。

原磨齿心轴是 1:10 的工具锥与机床工件主轴连接, 这种安装方式难以使心轴上装齿轮的工作轴颈的径向跳动控制在 2 微米以内。如果改用如图 3 径向可调式滚珠心轴, 可使心轴工作轴颈的径向跳动调到 1 微米之内。齿轮孔与轴间加三排有 2~5 微米过盈量的 0 级精度钢球, 比齿轮在心轴上普通的安装方法 (有间隙的滑动配合) 有如下优点: (1) 齿坯在心轴上安装时不易产生偏心, 因为加钢球后孔与轴间有过盈量, 齿轮不会因自重下沉, 而是被周围若干粒钢球浮起来, 齿轮孔与心轴自动对中。(2) 齿轮孔为  $\phi 40^{+0.003}$ , 如用滑配心轴, 它

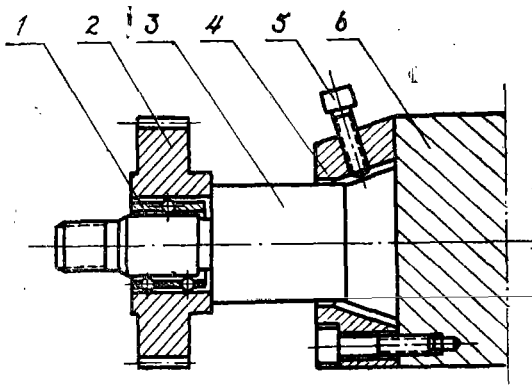


图3. 径向可调式滚珠磨齿心轴

1. 滚珠保持器；2. 标准齿轮；3. 心轴；
4. 压坯；5. 调整螺钉；机床工件主轴。

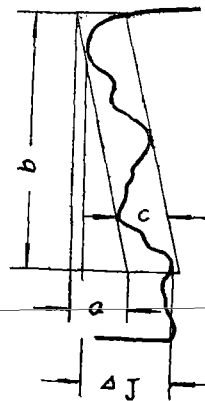


图4 齿形误差分析

的尺寸为  $\phi 39.999$ 。当齿轮实际孔径为  $\phi 40.000$  时，它与心轴的配合一定过紧，当孔径为  $\phi 40.003$  时，它与心轴的配合又显得过松，易产生安装误差。而选用滚珠心轴对于齿轮孔在公差范围内的尺寸变化是不敏感的。(3) 齿轮在滚珠心轴上用滚动法安装，安装性能好，孔与心轴表面均不易划伤。(4) 由于三排有过盈的钢球，使齿轮相对于心轴外圆柱有导向作用，在精磨齿切削力小的条件下，将心轴上的螺帽锁紧力减小些，则可以减小齿坯定位端面对于孔的不垂直度和心轴定位端面对于工作轴颈的不垂直度对齿轮齿向误差的影响。

### (二) 提高齿轮的齿形精度

按机床出厂精度规定：磨削模数 2 的齿轮，齿形误差的指标是 4 微米。基准标准齿轮齿形误差的公差仅为 2 微米。这样，必须采取一些工艺措施来提高齿轮的齿形精度。

根据误差来源不同，可把图 4 中的齿形误差  $\Delta J$  分解为  $a$  和  $c$  两部分。 $a$  是齿廓有效工作段  $b$  内齿形的总体倾斜量， $c$  是齿面的形状误差。

#### 1. 减小齿形的总体倾斜量

齿轮总体倾斜是齿轮有齿形角误差的反映，也说明机床的工作基圆调整有误差。用解析法导出了消除齿形总体倾斜量，机床头架安装角微量调整值 ( $\Delta\alpha_y$ ) 的计算公式

$$\Delta\alpha_y = -\frac{a}{S \cdot \text{tg}\alpha_y} \quad (\text{弧度})$$

为了提高微量调整精度，把  $\Delta\alpha_y$  换算成图 5 中百分表在机床头架尾端的直线位移量 ( $\delta$ )。

$$\delta = -\frac{640a}{S \cdot \text{tg}\alpha_y} \quad (\text{毫米})$$

式中， $S$ ——测量齿形时基圆展开弧长（可查表，单位为毫米）。

$\alpha_y$ ——机床头架安装角（度）。

$a$  值应取被测若干个齿的平均值，单位为毫米。

在恒温条件较差的磨齿实验室内精磨齿，由于室温的相对变化也会引起齿轮齿形的总体倾斜。消除这种倾斜仍可用上述方法计算调整。实践表明：

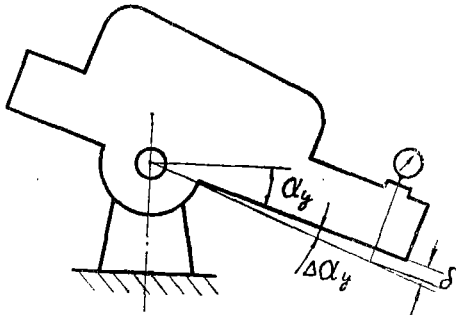


图5 精调头架安装角

室温变化 $1^{\circ}\text{C}$ ， $\alpha$ 值约为0.0005毫米。室温下降， $\alpha$ 要调小；室温上升， $\alpha$ 要调大。

## 2. 减小齿面的形状误差

(1) 要保证砂轮的工作质量。精磨用的砂轮要精确平衡。金刚石刀架移动的不直线性要求 $\gt 0.001/40$ 毫米，且摩擦阻尼适当。修整砂轮时，金刚石笔的吃刀深度为 $10\sim 3$ 微米（接近终磨时，逐渐减小。金刚石笔的进刀丝杆的螺距由1改为0.5毫米）。每修一次砂轮，金刚石刀架缓慢而均匀地往复移动一次，移动速度为 $80\sim 30$ 毫米/分（接近终磨时，逐渐减慢）。

(2) 凸轮挡板经修研，使之与渐开线凸轮均匀接触。凸轮渐开线对理论渐开线的形状误差是影响齿轮齿面形状误差的主要因素之一，选择渐开线凸轮的工作段就成为一个值得重视的问题。一般，凸轮在整个渐开线段上的误差为2微米左右，但在各局部的渐开线段的误差数值和状况并不相同。因此，可按磨齿实验确定最佳的渐开线工作段。

(3) 在 $20^{\circ}\text{C}$ 恒温室工作条件下，机床头架导轨润滑油建议选用40号导轨油。

(4) 经常检查带动头架摆动的蜗轮和偏心盘与轴间的二个平键是否松动。如果键松动，头架移动中产生突跳，会影响齿轮齿面的形状误差。

(5) 精磨齿实验室周围不许有大的振源，机床混凝土地基的深度应超过1.2米，下面垫浮沙，四周有隔振沟。

## (三) 提高齿面光洁度

通常，在Y7431磨齿机上精磨齿面可以达到 $\nabla 9$ 的光洁度。采取如下措施齿面光洁度可以达到 $\nabla 10$ ：

1. 选用直径400毫米、粒度 $280^{\#}\sim 320^{\#}$ 、硬度 $R_3\sim ZR_3$ 、陶土粘结剂的螺丝磨床用的细砂轮，这是提高齿面光洁度的重要因素。

2. 选用粒度为 $100^{\#}\sim 120^{\#}$ 的金刚石粉制做的金刚石笔代替金刚石，它具有多刃切削，保持长期锋利等优点（切削刃钝时，将笔转动一个角度即可继续使用），因此它可以提高修整砂轮的质量。

3. 砂轮修整后，用木条轻轻触及修好的砂轮工作面，清除浮砂，把切削进给量控制在2微米以下，磨削火花逐渐消失，砂轮处于半塞实状态停车，此时齿面光洁度可以达到 $\nabla 10$ 。

此外，关于控制齿轮的齿圈径向跳动量及提高齿向精度的工艺措施，可参阅“高精度小模数标准齿轮的制造”一文<sup>[3]</sup>。

## 四、基准标准齿轮的精度与国外产比较

1980年搜集了工业发达国家名牌公司标准齿轮的制造公差列于表2，为便于比较，将我所研制的基准标准齿轮的精度鉴定结果也列于表2。

## 小 结

1. 在齿坯加工中，除了要重视磨、研精加工工序以外，要强调重视热加工工艺，它关系到齿轮精度能否长期保持。
2. 将机床改装成多齿分度机构，使机床的分度精度提高了一个数量级，其小周期误差是当前国内外齿轮机床中最小的，它有利于提高齿轮周节精度等多方面的技术指标。
3. 必须探索最科学的磨齿工艺方法，对于磨削高精度齿轮来说，它与精化齿轮磨床同等重要。

表 2.

各国模数2标准齿轮的精度比较表

单位: 微米

公差 (误差) 数值 检验项目	国别	西德	英国	瑞士	日本	美国	中 国		
	公司	Mahr	Goulder Mikron	Maag		Invo	长春光机所		
	精度等级	DIN2级			MOO		DIN 2级		
	齿数 齿轮编号	Z40	Z38	Z56	Z40	Z38	Z60		
							2011	2012	2013
周节累积误差		6	10	11	9		2.2	1.8	1.6
单一周节差		2	±2.5	2	3		0.5	0.5	0.7
齿形误差		2	±2.5	2	3		1.6	1.9	1.6
齿向误差		3.5	2	2	6		1.2	1.2	1.3
齿圈径向跳动		4	5	8	6	7.5	2	2.3	2.7
双啮单齿跳动		2	(2.5~1.5)				≤2	≤2	≤2

• 2.5~1.5微米是Goulder Mikron公司小模数标准齿轮系列的公差值。

## 参 考 文 献

- [1] 滚动轴承热处理编写组; 滚动轴承热处理 (上册), 洛阳轴承研究所出版, 1974.  
 [2] 王立鼎; 吉林机械, 1981, 1, 44.  
 [3] 王立鼎、卢占山; 北京机械, 1980, 5, 20.