

齿轮的基本参数及其设计结果评价

作者：ETAGEAR 齿轮技术总监 茅国兴

本文主要回答 2 个问题：

- 1, 齿轮的基本参数有哪些？
- 2, 设计齿轮时我们怎么对齿轮进行评价？

齿轮基本参数有哪些呢？要约束完整一个齿轮我们需要标注的基本参数有齿数、法向模数，法向压力角，螺旋角，齿宽，齿顶圆，齿根圆，跨齿数，公法线（跨齿数和公法线可以由量棒直接和跨棒距替代），中心距。看到这里大家会奇怪，为什么没有变位系数呢？下面我们分别来介绍下各参数的意义并来回答下为什么我们应该标注公法线而不是变位系数。

齿数，代号 Z ，只齿轮整个圆周上齿的总数。

法向模数，代号 m_n ，除了法向模数还有端面模数，代号 m_t 。在直齿中法向模数和端面模数相等，而斜齿轮中他们的关系为：

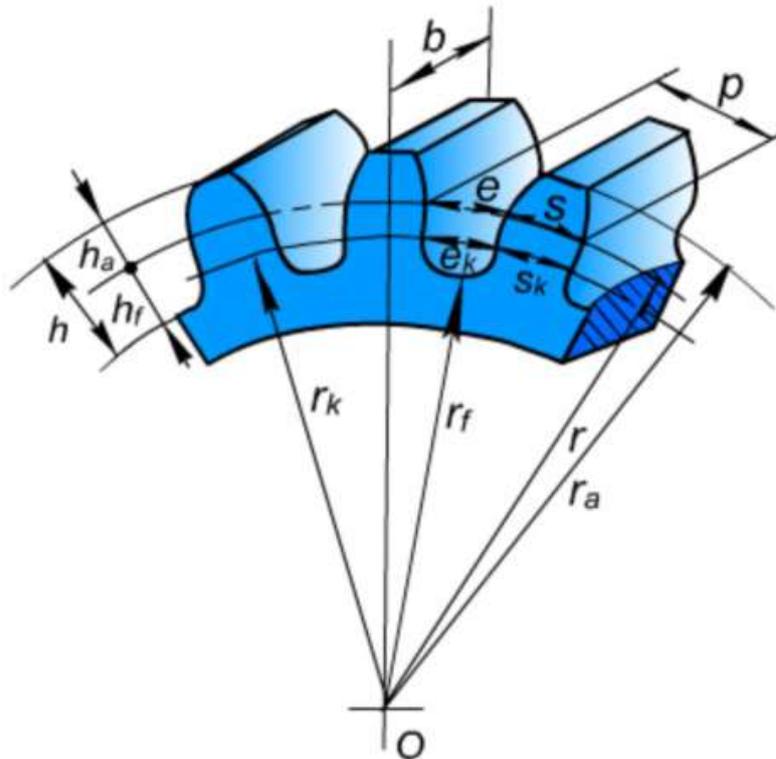
$$m_t = \frac{m_n}{\cos\beta}$$

式中： β 指齿轮螺旋角。

法向模数指加工齿轮的刀具的模数，其所在平面与螺旋角母线垂直。端面模数指齿轮的端面平行的平面上齿轮的模数。

模数 m 本身没有物理意义，它的作用是替代齿轮节距 P ：

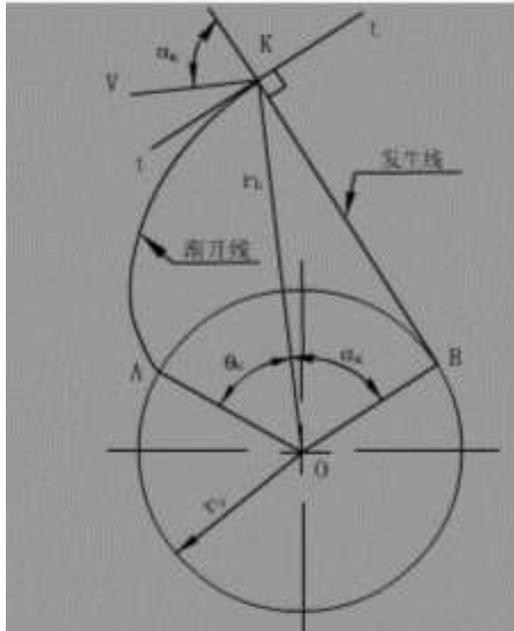
$$P = \pi m$$



定了模数 m 基本确定了齿轮的单个齿的厚度，结合齿数 Z 一个齿轮的大小也就基本确定了。模数 m 影响齿轮强度，折断，磨损都可以通过增大模数来改善。

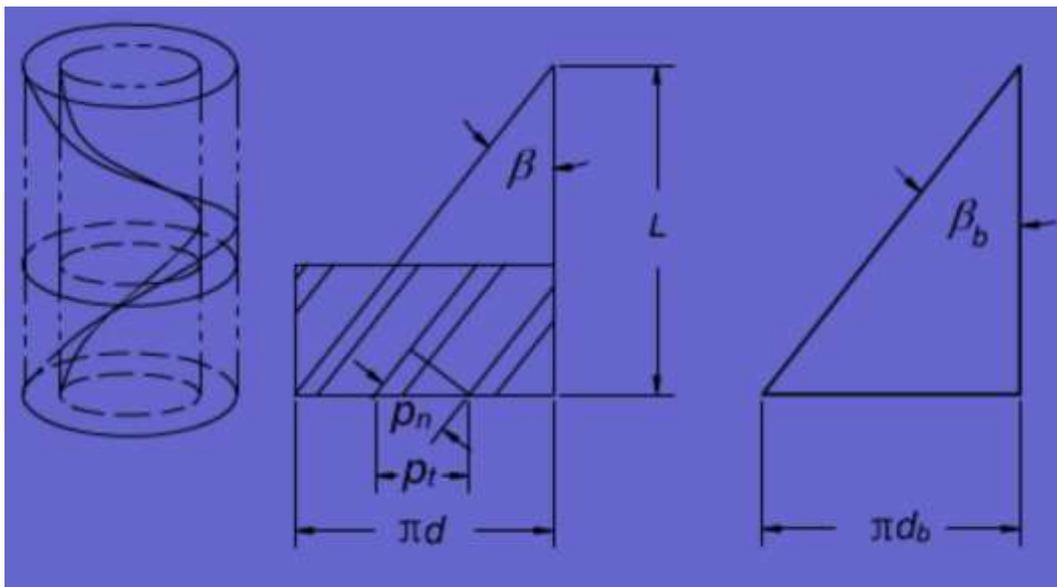
法向压力角，代号 α_n 。压力角是渐开线运动方向与受力方向的夹角，渐开线上每个点

的压力角是不同的，离基圆越远，压力角越大。基圆处压力角为 0° ，在世界上绝大部分国家分度圆处的压力角为 20° 。



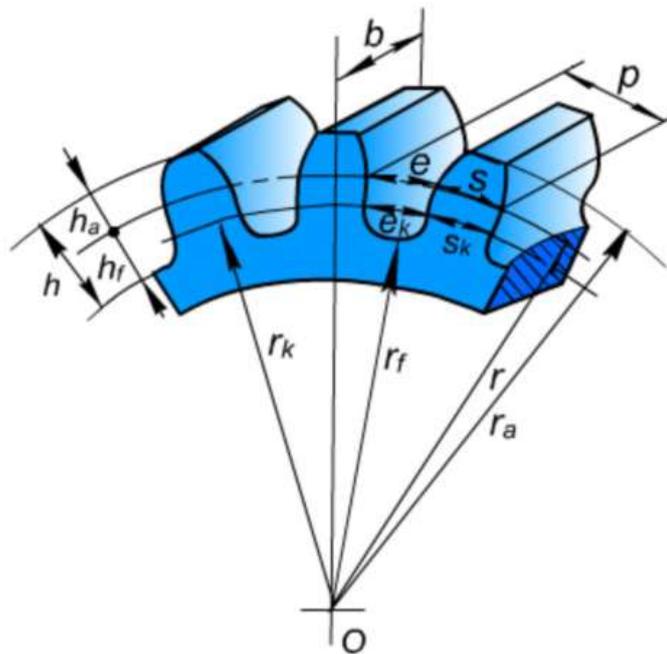
这里有个概念大家要清楚，齿轮上不同点处压力角不一样，所以有些人说改变压力角可以改变重合度改变强度等等都是对的。但是原理是通过调整渐开线的形状来优化齿轮传动的。一般情况下我们可以使用调整变位系数的方法实现同样的效果。调整压力角需要更换刀具，而变位系数只需调整刀具位置即可实现，所以正常情况下我们能通过调整变位系数实现齿轮优化的调整变位系数来实现，无法通过变位系数调整的才来调整压力角。因为压力角改变必须要重新订刀，周期长，价格也高。

螺旋角，代号 β ，斜齿轮分度圆柱螺旋线的切线与其轴线所夹的锐角称为分度圆柱螺旋角，简称分度圆螺旋角或螺旋角。



斜齿轮相对直齿轮的优势在于斜齿轮具有更大的重合度，使得齿轮强度和平稳性都有所提升。所以同等加工精度下斜齿轮适用更高转速。直齿轮螺旋角为 0 。当然斜齿轮的缺点是啮合会产生轴向分力，斜齿轮的轴向定位要求比直齿轮高很多。

齿宽，代号 b ，齿轮的有齿部位沿分度圆柱面的直母线方向量度的宽度。

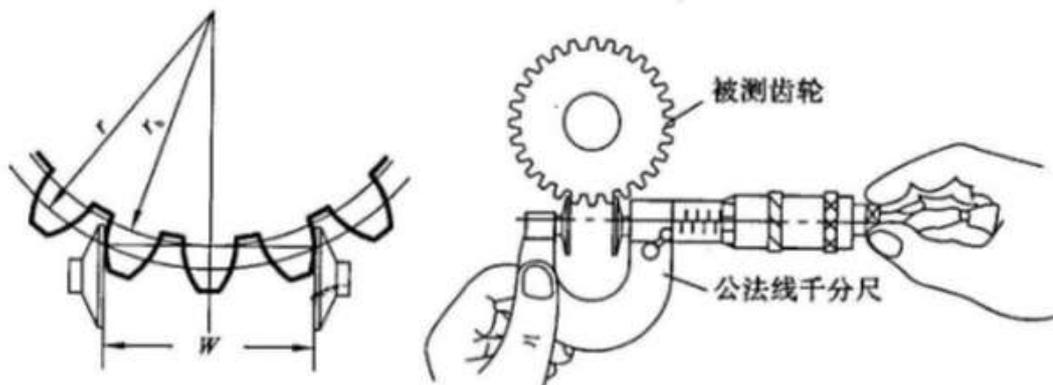


齿宽的大小影响斜齿轮的重合度，同时由于影响接触面积的大小，所以对齿轮的强度也有影响。理想状态下齿宽越长那么提升强度越大，但是事实上由于存在加工误差，所以齿宽越长，误差量会越大，造成齿轮的啮合冲击加剧从而造成齿轮强度下降。所以选取合适的齿宽是非常必要的，齿宽越长强度越好是错误的观念。

齿顶圆，代号 d_a ，过齿轮各轮齿顶端的圆，直径用 d_a 表示，半径用 r_a 表示。齿顶圆在齿轮参数里面非常重要，其值影响重合度，滑动率，齿顶厚等，甚至取值不当会引起齿轮啮合干涉。

齿根圆，代号 d_f ，与齿轮各轮齿齿槽底部相切的圆，其直径用 d_f ，半径用 r_f 表示。齿根圆影响齿轮的顶隙。影响齿根处应力集中位置，对于薄壁齿轮该值对齿轮的弯曲强度影响非常明显。有很多人认为这个值可以不标注，但是我们强烈推荐在图纸上进行标示，出问题查起来方便。不过齿根圆的加工控制不必严格，因为齿根圆由刀具和公法线决定。第一次加工正确后面加工出错的概率很小。但是如果忽视这个值一旦出问题你和厂家责任不好确定。

跨齿数，代号 k 。**公法线**，代号 w_k 。跨齿数和公法线其实是一个物理量。公法线指与两个异侧齿面相切的两平行平面间的距离。也可以理解为用公法线千分尺测量的跨 k 各齿的距离。下图所为为跨 3 齿的公法线距离 w 。



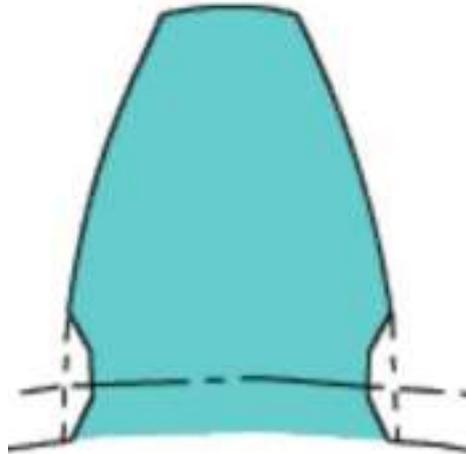
测量跨齿数的目的是为了测量齿轮的齿厚，也可以认为是在测量齿轮的变位系数。在齿轮参数中我们实际加工时测量公法线，而不会去太关注变位系数。因为变位系数表示刀具的偏移距离，但是我们无法在齿轮上直接量出来，而公法线可以直接测量，通过它可以算出来变位系数的具体值。这里要明白的是变位系数也是有误差范围的。

最后一个参数是**中心距**，代号 a' 。中心距指两个齿轮轴线之间距离，也就是齿轮轴线间的安装距离。对于齿轮新手来说，往往使用**标准中心距 a** 作为实际中心距 a' 。但是在工程上，我们都对齿轮进行角变位，多采用正变位，就是说实际中心距 a' 都是大于标准中心距 a 的。中心距选择的不同会影响单个齿轮变位系数的选择，同时影响齿轮的重合度，滑动率，干涉情况等等。中心距并不影响单个齿轮，但是对齿轮啮合的平稳性和强度具有非常大的影响。

上面介绍的这些就是齿轮图纸上必须要标注的项，否则你的齿轮参数就是不完整的，不完整的齿轮参数有各种可能，如果交付给对齿轮不是很了解的齿轮工厂加工，那么您的齿轮很容易出现问题，甚至可能都无法装配起来。

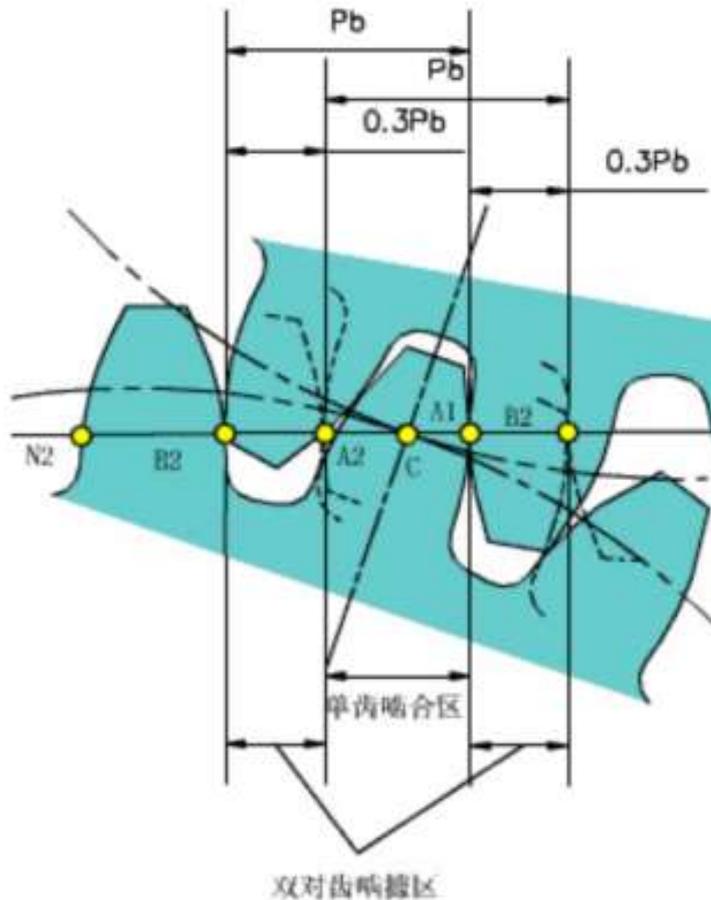
上面是告诉大家齿轮的基本参数，他们被标注了那么齿轮参数完整的。下面我们介绍下齿轮设计过程中，我们查看哪些指标。

根切判断，指在用范成法加工渐开线齿轮的过程中，有时刀具齿顶会把被加工齿轮根部的渐开线齿廓切去一部分的现象。根切的坏处将削弱齿根强度，甚至可能降低传动的重合度，影响传动质量。虽然根切有不利影响，但是现在也有企业利用根切来抵消渐开线干涉现象。有根切时利用软件计算的齿根弯曲强度值会比实际情况大，此时就需要工程师自己判断了。特别注意的是根切并不意味的绝对不允许存在，要看实际情况。



齿顶厚，代号 s_a ，指齿轮顶部处的圆弧长。该值的目的是为了保证齿轮齿形的完整度。怎么理解呢？当变位系数增大时，齿轮的齿顶会变得越来越尖。如果不校核该值，工程师会将其忽略掉，造成齿轮的顶部无法加工出来，也就是齿顶圆无法加工到需要的尺寸，那么我们计算的重合度，滑动率等就是不正确的。同时齿顶变尖会造成由于齿轮啮合冲击存在而出现崩顶，一旦这些颗粒进入齿面那么齿轮会非常快磨损。所以齿顶厚的计算很重要。一般要求 $s_a \geq 0.25m_n$ ，对于表面淬火的齿轮，要求 $s_a > 0.4 m_n$ 。

重合度，代号 ϵ ，重合度的大小表明同时参与啮合的轮齿对数的多少。如 $\epsilon = 1$ 表示，齿轮传动的过程中始终只有一对齿啮合。若 $\epsilon = 1.3$ 的情况如图所示，在实际啮合线的 $B2A1$ 和 $A2B1$ （长度各为 $0.3P_b$ ）段有两对轮齿同时在啮合，称为双齿啮合区；而在节点 P 附近 $A1A2$ 段（长度为 $0.7P_b$ ），只有一对轮齿在啮合，称为单齿啮合区。



重合度一般是越大越好的，所以我们在设计时为了保证齿轮的连续平稳转动，如果计算过程带入了齿轮公差，那么最小重合度应该大于 1.05，如果不带入公差进行计算，那么重合度至少要大于 1.2。

滑动率，代号 η ，滑动率是两个齿轮啮合时两个啮合点之间的速度差。他的大小影响的是齿轮的磨损和发热量。设计时我们计算的是最大滑动率，最大滑动率出现在齿轮的齿顶与对应齿轮啮合的位置。齿数越少滑动率容易越大，我们建议滑动率不要超过 3，最大也不要超过 5。高速齿轮滑动率非常重要，线速度不高是还能再适当放宽。

侧隙，代号 j_n ，齿轮啮合传动时，为了在啮合齿廓之间形成润滑油膜，避免因齿轮摩擦发热膨胀而卡死，齿廓之间必须留有间隙，此间隙称为齿侧间隙，简称侧隙。但是，齿侧间隙的存在会产生齿间冲击，影响齿轮传动的平稳性。因此，这个间隙只能很小，通常由齿轮公差来保证。齿轮和壳体精度越高的齿轮侧隙允许做的越小，否则一定要保留适当的侧隙。所以在设计过程中我们有个参数叫最小侧隙，最小侧隙是当一个齿轮的齿以最大允许实效齿厚与一个也具有最大允许实效齿厚的相配齿在最紧的允许中心距相啮合时，在静态条件下允许侧隙。特别注意的是最小侧隙是带公差计算的结果，不是按理论值计算的。在一般工程应用中最小侧隙的推荐值按下面的公式计算。

$$j_{bnmin} = \frac{2}{3} \times (0.06 + 0.0005 \times a + 0.03 \times mn)$$

顶隙，代号 c ，顶隙是一对齿轮啮合时，一个齿轮的齿顶与另一个齿轮的齿根之间的间隙。它主要由顶隙系数控制。设计时要注意，齿顶不能过小，否则中心距变化时会冲击。同时顶隙还有储油的作用，所以保留合适的顶隙是很必要的。一般按照 $0.25mn$ 控制

顶隙即可。

渐开线干涉判断：当一齿轮的齿顶与另一齿轮根部的过渡曲线接触时，不能保证其传动比为常数，此情况称为过渡曲线干涉。当所选的变位系数的绝对值过大时，可能发生这种干涉。齿轮齿数较少时非常容易出现这种现象，一旦出现这种现象我们可以看到小轮的根部大轮的顶部出现明显磨损。如果继续运转就会转化为整个齿面磨损。设计时渐开线干涉是一定要消除的，有部分工程师认为将小轮做根切就能消除渐开线干涉也是不完全正确的。需要仔细计算才能确定是否消除了渐开线干涉。

知道上面这些参数在利用我们的计算软件就可以完成专业的齿轮设计了，下面我们看下设计过程：

第一步：确定齿数，模数，压力角（ 20° ），齿宽，螺旋角（直齿 0° ，斜齿一般 $8\sim 20^\circ$ ，最好不要超过 35° ）。设定最小侧隙值，并输入小齿轮的转速。我们举个具体例子：齿数 13/49，模数 1.25，压力角 20° ，齿宽 10mm，螺旋角 20° ，最小侧隙设为 0.1，小齿轮转速为 5000r/min

第二步：在其他参数栏勾选自动计算。

第三步：公差设置里面输入加工公差，一般由加工方式和供应商能力决定。只进行理论值计算的话所有公差设为 0 即可。

第四步：如果模数参考样机或者以前的产品的话并不一定需要计算强度，我们不勾选计算强度即可。

第五步：点击下方的“计算结果”按钮即可完成参数计算。

	小齿轮	大齿轮	配齿工具	
齿数 Z	13	49		
法向模数 mn	1.25	法向压力角 α_n	20	
有效齿宽 b	10	螺旋角 β	20	
最小侧隙值	0.1	小轮转速 r/min	5000	
其他参数				
<input checked="" type="checkbox"/> 自动计算	实际中心距		41.80	
小轮变位系数	0.410	大轮变位系数	-0.042	
公差设置				
<input type="radio"/> 全零公差		<input checked="" type="radio"/> 默认公差		设置
中心距上偏差		0.05	中心距下偏差	
			-0.05	
	小齿上偏差	小齿下偏差	大齿上偏差	大齿下偏差
齿顶圆直径公差	0	-0.1	0	-0.1
齿根圆直径公差	0	-0.1	0	-0.1
齿厚公差	0	-0.05	0	-0.05
设置强度相关系数				
<input type="checkbox"/> 计算强度		功率 Kw	1.3	
期望寿命 小时	100	使用系数 KA	1.25	
齿形修形量 μm	0	齿向鼓形量 μm	0	
支撑类型	1	轴承跨距 mm	120	
齿轮中点与轴承距中心距离 s	10			
润滑油粘度 40°C	200	堵转扭矩 $\text{N}\cdot\text{m}$	6	
	小齿轮	大齿轮	硬度换算表	
齿轮硬度 HB	684	612		
齿轮内孔直径	0	0		
小齿轮材料及热处理	20CrMnTi	渗碳	选择材料	
大齿轮材料及热处理	20CrMnTi	渗碳	选择材料	
计算结果		联系我们	赞助软件	帮助文件

基本参数		主动轮		被动轮		主动轮		被动轮		其他参数	
齿数Z	13			49					速比i	3.77	
齿顶圆直径 d_a	20.82	0	-0.1	67.58	0	-0.1	齿顶高系数 h_{a}^*	1.00	1.00	模数 m_n	1.25
齿根圆直径 d_f	15.19	0	-0.1	61.95	0	-0.1	齿根高系数 h_{f}^*	1.25	1.25	压力角 α_n	20
跨齿数K	3			7			变位系数x	0.413	-0.047	螺旋角 β	20
公法线 W_k	9.85	0	-0.05	24.97	0	-0.05	端面分度圆齿厚 s_t	2.49	2.04	齿宽b	10
							中心距a	41.80	0.05	-0.05	
							<input type="radio"/> 默认公差		<input checked="" type="radio"/> 全零公差		

精度等级		9级 ISO 1328		计算强度		主动轮		被动轮	
齿廓总偏差 F_α	18.0			材料	20CrMnTi	渗碳	20CrMnTi	渗碳	
螺旋线总偏差 F_β	24.0			主动轮	3.2	3.2	被动轮	3.2	
单个齿距累积偏差 F_{pt}	19.0			输入功率	1.3	Kw	使用系数 K_A	1.25	
齿距累积偏差 F_p	45.0			输入转速	5000	r/min	堵转扭矩	6	N·m
齿廓形状偏差 $f_{f\alpha}$	14.0			齿根圆角	0.47	0.47	结构系数 K'	0	
径向跳动 F_r	36.0			内孔直径	0	0	硬度	684	612
				期望寿命	100	小时	轴承跨距 l	120	
				40℃润滑油粘度	200		齿轮中点与轴承距中心距离 s	10	

几何参数校核结果																			
理论值			最小值			最大值			理论值			最小值			最大值				
重合度 α	1.27	1.19	1.31	重合度 β	0.87	0.86	0.88	总重合度	2.15	2.05	2.19	端面侧隙jt	0.1	0.1	0.3	根切判断	无	无	无
齿顶厚 s_a	0.6	0.6	0.7	渐开线干涉判断	2.2	2.8	2.1	最大滑动率 η	1.4	1.1	1.6	顶隙C	0.4	0.4	0.6	齿顶厚 s_a	1.0	1.0	1.1
最大滑动率 η	1.4	1.1	1.6	顶隙C	0.4	0.4	0.6	顶隙C	0.4	0.4	0.6	顶隙C	0.4	0.4	0.6	渐开线干涉判断	2.2	2.8	2.1

强度结果																			
运行转速区间	0	临界转速比	0	工作作用力	0	堵转作用力	0	主动轮工作强度	主动轮堵转强度	被动轮工作强度	被动轮堵转强度								
								理论值	最小值	最大值	理论值	最小值	最大值	理论值	最小值	最大值	理论值	最小值	最大值
接触应力	0	0	0	接触应力	0	0	0	接触应力	0	0	0	接触应力	0	0	0	接触应力	0	0	0
许用接触应力	0	0	0	许用接触应力	0	0	0	许用接触应力	0	0	0	许用接触应力	0	0	0	许用接触应力	0	0	0
接触强度系数	0	0	0	接触强度系数	0	0	0	接触强度系数	0	0	0	接触强度系数	0	0	0	接触强度系数	0	0	0
弯曲应力	0	0	0	弯曲应力	0	0	0	弯曲应力	0	0	0	弯曲应力	0	0	0	弯曲应力	0	0	0
许用弯曲应力	0	0	0	许用弯曲应力	0	0	0	许用弯曲应力	0	0	0	许用弯曲应力	0	0	0	许用弯曲应力	0	0	0
弯曲强度系数	0	0	0	弯曲强度系数	0	0	0	弯曲强度系数	0	0	0	弯曲强度系数	0	0	0	弯曲强度系数	0	0	0

我们怎么评价参数好坏呢？看表格中部的颜色显示就可以了，绿色表示肯定没有问题，黄色的需要工程师来判断了，一般情况下黄色显示也是可以使用的，除非是要求较高的齿轮传动。我们点击保存参数可以将参数保存到一个文件中，下次方便打开。有了参数我们就可以出图了，具体的怎么出图参见我们网站的相关文章。

如果有任何问题欢迎各位发送邮件至 service@etagear.com，我们会竭尽所能为您服务。