弧齿锥齿轮设计中TE值影响因素及控制方法

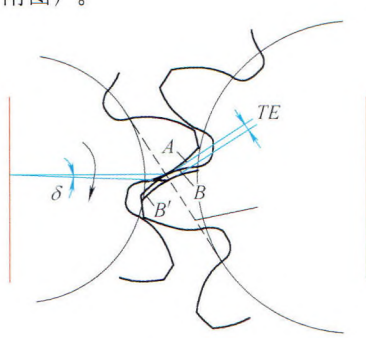
□ 山东荣成曙光齿轮有限责任公司/樊大伟 王殿秋 姚庆芬

本文介绍了影响弧齿锥齿轮副啮合噪声的重要因素即齿轮传动误差——TE值，同时对影响TE值一些主要因素进行介绍。

随着我国汽车工业的发展，汽车消费者对汽车的NVH（Noise、Vibration、Harshness）的性能要求也在不断提升，而汽车后桥主减速器总成的噪声已成为评定汽车质量好坏的一项重要指标。汽车后桥主减速器总成用弧齿锥齿轮是其最主要的传动件，设法降低其噪声已成为各齿轮生产厂家必须解决的实际问题，而影响弧齿锥齿轮副啮合噪声的重要因素即齿轮传动误差——TE值。TE值是齿轮振动的激励之源，齿轮的动态性能主要决定于齿轮副的TE值。

齿轮副的传动误差TE值

在一对弧齿锥齿轮副中，假定主动轮匀速转动，在绝对理想条件下即：无制造、装配误差；齿轮齿形为圆弧齿、延伸外摆线；齿轮为刚性材料；从动轮将匀速转动，齿轮传动也绝对平稳。但因实际上有制造、装配误差，为保证齿轮齿面有比较理想接触而在设计及齿轮加工过程中对齿轮齿面进行一到两次的修正，齿轮材料受载后有弹性变形，从而导致主动轮均匀转动时，从动轮不是均匀转动的。这种不均匀转动就是齿轮传动的不平稳性。它是齿轮振动与噪声的“导火线”，即：激励。传递误差是用来描述齿轮传动不平稳性的参数（见附图）。



齿轮传动不平稳性的参数

弧齿锥齿轮副啮合示意

主动轮齿廓A和从动轮上理想齿廓B相啮合时，从动轮可以被主动轮匀速带动。但由于上述诸原因，从动轮上实际齿廓在B'处，主动轮齿廓A须多转一个角度d使齿廓A沿啮合线继续移动一个附加距离TE之后，齿廓A才和从动轮的实际齿廓B'相啮合。这个距离TE就是传递误差。显然啮合点由齿根向齿顶逐渐移动时，各点对应的TE 值即传递误差可以不相同。换言之：沿啮合线方向度量从动轮上的齿廓在实际啮合时所处位置同理想条件下应处位置之间的偏差就是传递误差。显然，传递误差的波动直接反映了从动轮转动不均匀性。传递误差对传动系统的振动、噪声有着重要影响

通常衡量弧齿锥齿轮副啮合质量的重要指标是传动误差和接触印迹。评价齿轮轮齿接触和运动传递质量的通常方法是：将齿轮副安装在滚检机上，在齿轮表面涂红丹粉，在轻载下转动齿轮副，观察齿轮副的接触印迹、测量其噪声。轮

副的传动误差和接触印迹是由其设计和加工参数所决定的。传统的设计方法是基于印痕控制的方法，加工设计、切齿、检测，到不断反复修正，实际上是以印迹为控制目标的逼近过程，在这一过程中，齿面印迹是最终的目标，对静态性能考虑较多，对动态性能考虑不足。在具体的生产中，由于接触印迹比较直观，通常对接触印迹提出各种要求，因此在齿轮的测试和检验中，基本上依赖于齿面印痕的位置及尺寸。但齿面印痕仅反映了部分啮合信息，其中主要是部分强度状况，而对动态特性的反映远远不足，往往忽略另一个影响螺旋伞齿轮副啮合质量的重要因素——TE值。

由于现代科技的发展，高精度的TE测量设备已经设计出来，并逐渐得到认可和广泛应用。其测量原理如下：首先按照最终安装情况（安装距和侧隙），大轮小轮进入啮合位置；然后，在低转矩条件下，低速转动，整个评价过程保持只有一对齿面接触；最后，通过高精度的编码器监控大轮和小轮的角向位置。

TE值是齿轮振动的激励之源，已为前人的大量成果所证实。齿轮的动态性能主要决定于齿轮副的TE值。但目前在设计或制造中都对TE值缺乏必要的考虑和实用的方法，本文主要通过奥利康Kimos 5齿轮设计软件来展示齿轮设计时对TE值的一些控制方法。

软件设计中对不同齿制TE值控制方法

TE值是检验齿轮啮合质量的一个重要指标,也可以为进一步改善齿轮的设计和加工提供实验依据。

1.渐缩齿

对于渐缩齿，在初始设计时利用磨齿工艺来保证产品的TE值，在设计该系列产品时一般设计中传动误差控制在即TE值70μrad以下，以客车后桥齿轮153系列（模数10.1，被动齿轮外径435mm）为例，设计时的传动误差分别为：正车=41.7μrad，反车=34.2μrad，产品经切齿、热处理及磨齿后在奥利康T60测量机检测其TE值为：正车39.7μrad，反车39.6μrad，可以看出在现代化的加工理念下，现代化的设备如：奥利康C50切齿机及G60磨齿机上以及完整的闭环反调系统可以让TE值得到有效的保证。

2.等高齿

对于等高齿，由于热处理变形的存在，需要用研齿工艺来保证产品的TE值，在设计该系列产品时一般设计中传动误差重型产品（被动齿轮外径＞400mm）一般控制在85μrad以下，轻型齿轮产品控制在70μrad以下，以某轻型齿轮（模数5.6，被动齿轮外径229mm）为例，设计时的传动误差分别为：正车=56.2μrad，反车=46.5μrad，产品在奥利康C27切齿机加工出来后由于热处理导致齿部变形，在奥利康T60测量机检测其TE值为：正车82.28μrad，反车115.27μrad，在奥利康L60研齿机研齿后，其TE值为：正车13.1μrad，反车19.43μrad，可以看出等高齿在研齿工艺的保证下同样使TE值得到有效的保证。

可以看出，依靠奥利康KIMOS5设计软件以及奥利康的先进齿轮加工设备C27及L60研齿机，可以有效地保证产品的TE值。

3.螺旋角对TE值影响

螺旋角在设计中主要控制接触印迹在齿长方向的位移，螺旋角过大过小都会影响设计中的传动误差，对于渐缩齿采用磨齿工艺的产品，将接触印迹控制在符合要求的位置，并且TE值满足＜70μrad的螺旋角即可。对于等高齿齿制的齿轮，由于存在热处理的变形并且一般是螺旋角的变形，在设计时应考虑到该现象，对螺旋角进行相应的调整，调整后设计中的传动误差会比实际理论的大。但是热处理以后由于我们对热处理的变形做了补偿，有利于我们研齿，通过研齿工艺使TE值得到有效的保证。

4.内对角对TE值影响

适当的内对角可以增加齿轮副的重叠系数，增加齿轮副的啮合轨迹，从而增加齿轮副啮合的平稳性，对改善噪声有一定的帮助。奥利康的KIMOS5软件采用干切技术，使软件在设计时就存在一定的内对角，对控制产品的TE值起到了很大的帮助。

内对角对TE值影响非常大，减小内对角会使TE值增大很多，因此适当的内对角对控制产品TE值尤为重要。对于研齿的产品，不能为了视觉效果，盲目的将内对角消除，应该按照设计要求对齿面轻微研磨即可。

生产应用

随着国家新能源的鼓励政策，对于纯电动商用车，由于电动机取

(下转第59页)

声。

$$F = m(e + f)\omega^2$$

根据离心力公式：

与离心力相平衡的弹力为：

$$P = \frac{48EJ}{l^3} f$$

式中 M——传动轴总成质量，kg；

ω——传动轴旋转的角速度，rad/s；

l——传动轴万向节中心距，mm；

E——弹性模量，2.15×10^5 MPa；

J——轴管截面抗弯惯性矩，mm^4。

通过以上可以看出，在零部件质量m一定的情况下，轴管的挠度f越小，离心力越小，所以抗弯刚度EJ直接影响离心力的大小。

3. 优化设计

通过以上分析，为了减小传动轴轴管的挠度f，我们在不增加传动轴质量m的前提下，增加传动轴轴管截面抗弯惯性矩J。

更改前轴管参数：

轴管材料：440QZ

轴管质量：4.88kg

外径×内径=82.6mm×78.6mm

$$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = 4.11 \times 10^5 mm^4$$

更改后轴管参数：

轴管材料：440QZ

轴管重量：4.74 kg

外径×内径=89mm×85.4mm

$$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = 4.68 \times 10^5 mm^4$$

通过以上对比，可以看出更改轴管截面尺寸后，在不增加质量的同时，轴管的抗弯刚度大大提高。通过NVH测试结果见附表（后桥处振动测试）。

振动测试对比

状态	加速			匀速		
	150km/h（4481r/min）			150km/h		
方向	X	Y	Z	X	Y	Z
原状态	1.42	2.39	2.84	0.08	0.49	0.54
传动轴加粗，壁厚减薄	1.21	2.07	3.03	0.08	0.28	0.34

通过加速及匀速试车，车辆在进行高环试验（150km/h）时，后桥处X、Y、Z三个方向的振动明显降低，并通过主观评价车内振动及噪声可以接受。

4. 结语

通过本文分析，传动轴设计时要考虑轴管的抗弯刚度，特别是对于长度较长的传动轴，我们可以选择直径较大、壁厚较薄的薄壁管，这样既能减重，又能提高轴管的抗弯刚度，改善了整车NVH性能，希望本文能给设计开发人员提供一定的借鉴。AUTO1950

（上接第57页）

代传统发动机，使后桥噪声显得尤为明显，在新能源车型上，对后桥齿轮的噪声要求也越来越高。对于传统被动齿轮外圆直径460mm，大端模数10以上的后桥齿轮噪声要求一般为800r/min时78dB，很难达到新能源车型的使用要求。为解决此问题，通过使用T60设备检测齿轮副的TE值，通过降低TE值控制齿轮副的传动性能，使得我司产品可以达到1 000r/min时68～74dB的噪声水平，成功替代了某些进口齿轮，降低了桥厂的成本。目前通过该技术已成功为方盛车桥、安凯车桥等车桥厂的车轿解决了噪声问题。

结语

本文对齿轮TE值的含义进行了阐述，同时对弧齿锥齿轮无论是渐缩齿还是等高齿在设计时如何确定影响TE值的相关参数，同时齿轮加工及经热处理后齿轮精度也是影响TE值一个重要因素，另外齿轮通过磨齿（渐缩齿）、研齿（等高齿）来提高齿轮齿面粗糙度及比较适合的齿轮接触区从而有效的控制TE值，总之在弧齿锥齿轮生产全过程中必须对影响齿轮副TE值主要的因素如：齿距、齿轮形貌、印迹位置形状、粗糙度以及材料进行有效控制，从而获得比较理想的齿轮副。AUTO1950