

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311001

齿轮法向啮合齿廓及其测量*

石照耀, 孙衍强

(北京工业大学北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心 北京 100124)

摘 要:法向啮合齿廓是齿轮齿面上能反映齿轮的加工与传动质量的一条工程意义独特的曲线,在齿轮滚齿、蜗杆砂轮磨齿等展成法加工中,是齿面加工的形成曲线,在渐开螺旋齿轮传动中,是齿轮传动的工作曲线。然而,现有的齿轮测量仪器并没有法向啮合齿廓的测量功能。结合法向啮合齿廓的形成原理,给出了其理论模型,基于现有齿轮测量中心,提出了法向啮合齿廓偏差测量的四坐标测量法和三坐标测量法。测量实践表明,采用现有的齿轮测量仪器,能方便的实现法向啮合齿廓偏差测量与评定,四坐标法测得的法向啮合齿廓形状偏差、倾斜偏差和总偏差与三坐标法的测量结果相比分别相差 0.2、1.3、0.6 μm 。与渐开线和螺旋线相比较,法向啮合齿廓具有综合性、统一性和唯一性,通过对渐开线偏差和螺旋线偏差的相互补偿,可优化对法向啮合齿廓的控制,有效降低对渐开线和螺旋线的精度要求。

关键词: 法向啮合齿廓; 齿轮测量; 齿轮偏差; 齿轮

中图分类号: TH71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Gear profile of the path of contact and its measurement

Shi Zhaoyao, Sun Yanqiang

(Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Profile of the path of contact (PPC), as a characteristic curve on the gear tooth surface, is with specific engineering significance. It can reflect the quality of gear machining and gear transmission. The PPC is not only the generative curve in gear hobbing, worm grinding and other generative machining, but also the working curve in the involute gear transmission. However, there is no function to measure the deviation of PPC for the existing gear measuring instruments. The theoretical model of the PPC is presented, which is based on the gear geometry. By means of the existing gear measuring center, the four-coordinate method and the three-coordinate method for measuring the deviation of PPC are proposed. The measurement practice indicates that the measurement and evaluation of the PPC can be realized by using the existing gear measuring instruments. The form deviation, slope deviation and total deviation of the PPC measured by the four-coordinate method are 0.2, 1.3, and 0.6 μm , which are different from those measured by the three-coordinate method. Compared with the gear involute and helix, the PPC has features of comprehensiveness, unity, and uniqueness. The optimal deviation of PPC is obtained through synthesizing the involute deviation and helix deviation of the gear, which effectively reduces accuracy requirements for the gear involute and helix.

Keywords: profile of the path of contact; gear measurement; gear deviations; gear

0 引 言

渐开螺旋齿面上有渐开线、螺旋线、法向啮合齿廓和接触线等 4 条特征线^[1]。理论上,这 4 条线中任意两条

线的组合都能形成该渐开螺旋齿面,因而也能用于该齿轮质量控制,但特征线的选取受齿轮设计、加工方法、服役状态、可测性等诸多因素限制。实践中,渐开线和螺旋线因几何意义明确而为人们熟知,国内外齿轮精度标准^[2-4]都将渐开线和螺旋线作为控制齿轮质量的精度指

收稿日期:2023-01-23 Received Date: 2023-01-23

* 基金项目:国家自然科学基金(52227809)项目资助

标,开发了相应的测量仪器^[5],形成了系统化的评价方法^[6]。其实,法向啮合齿廓作为齿面上一条工程意义鲜明的特征线^[7-8],有独特价值,更值得关注。

渐开线齿轮有平行轴、交叉轴两种传动形式,前者是后者的特例。交叉轴渐开螺旋齿轮传动,属于点接触传动,接触点在齿面上留下的轨迹即为法向啮合齿廓。因此,交叉轴渐开螺旋齿轮是通过法向啮合齿廓来传动运动的,法向啮合齿廓就是齿轮传动的工作曲线,能反映齿轮的实际运动状况。

在滚齿、插齿、剃齿、蜗杆砂轮磨等展成法加工中,其展成运动也是基于交叉轴渐开螺旋齿轮啮合原理^[9],工具与工件齿轮的接触轨迹也是法向啮合齿廓。因此,在齿轮展成法加工中,齿轮法向啮合齿廓就是齿面形成的加工曲线,控制法向啮合齿廓对控制齿轮加工质量具有独特的优势。

法向啮合齿廓作为齿轮工作曲线和齿面形成曲线,本质上是渐开线和螺旋线综合作用的结果,更能表征齿轮的质量,可用于齿轮工艺误差分析,也可用于齿轮动态性能预报。对渐开线直齿轮而言,其法向啮合齿廓就是渐开线。

在法向啮合齿廓测量方面,1970年,我国在齿轮测量技术方面取得突破,在世界上首创了基于“跳牙”蜗杆的齿轮整体误差测量技术^[10-11],采用“跳牙”蜗杆测量的齿轮齿廓就是法向啮合齿廓。但该方法需要标准蜗杆,影响了该测量方法的通用性。

为此,本文提出基于现有齿轮测量中心和坐标测量机的法向啮合齿廓通用测量方法,并实现与渐开线测量方法相统一。

1 法向啮合齿廓

1.1 几何含义

如图1所示,在渐开线圆柱齿轮传动中,每一瞬间主从轮齿面接触点处都有一条公共法线(图1中直线 ad'_0),这条线与螺旋齿面的发生母线(图1中直线 M_1M_{II})相垂直,且在空间保持不变,称为啮合线。啮合线和齿面交点在齿面上留下的轨迹(图1中曲线 ad_0)即为齿轮的法向啮合齿廓。对平行轴圆柱齿轮来说,每一回转瞬间都有很多接触点,就会有很多条平行的啮合线,形成一个啮合平面(图1中平面 S)也就是齿轮基圆柱的切平面,在齿面上会留下一簇法向啮合齿廓线。

法向啮合齿廓沿轴线做螺旋运动形成渐开螺旋面,与公知的端面渐开线齿廓(图1中曲线 ad_1)沿轴线做螺旋运动形成的渐开螺旋面是同一个曲面。齿轮是齿面法向即沿啮合线方向传递运动和动力的,也就是沿齿面上法向啮合齿廓线进行的,而不是沿渐开线。只是对直齿

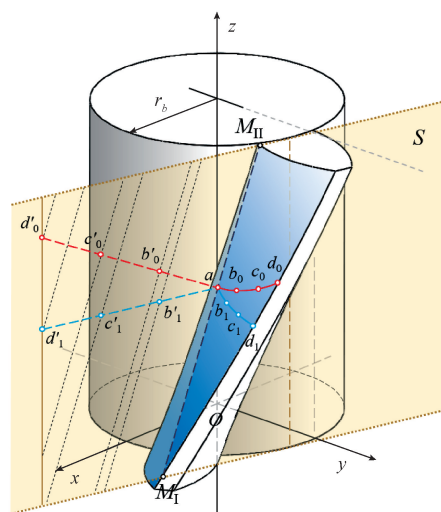


图1 法向啮合齿廓

Fig. 1 Profile of the path of contact

轮来说,法向啮合齿廓与端面渐开线重合,齿轮啮合线与渐开线法线重合,这是渐开螺旋齿轮的一个特例。

1.2 数学模型

如图2所示,渐开螺旋齿面是由一根与基圆柱相切,并且与轴线有固定夹角的直线沿着基圆柱滚动而形成的空间曲面^[12]。

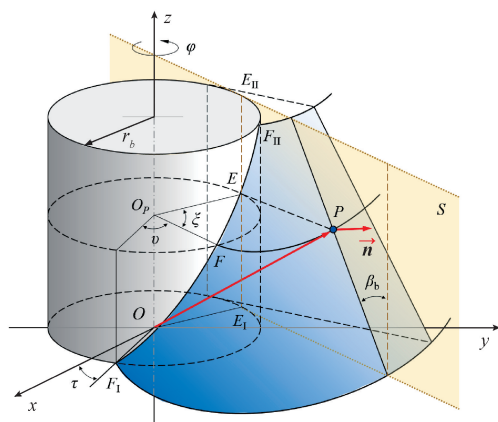


图2 渐开螺旋面

Fig. 2 Involute helicoid

齿面上任意一点 P 可表示为:

$$\begin{cases} x = r_b \cos \delta + \xi r_b \sin \delta \\ y = r_b \sin \delta - \xi r_b \cos \delta \\ z = z \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\delta = \tau + v + \xi$ 。 τ 为该齿面对应的位置角,也就是基圆螺旋线起始点偏离 x 轴的角度; v 为基圆螺旋线由下端面上升至点 P 所在横截面的转动角; ξ 为点 P 处渐开线的滚转角,也就是该点处渐开线展开角与压力角之

和。 r_b 为基圆柱半径, $\tan \beta_b = r_b/p$, p 为导程, β_b 为基圆螺旋角, p 和 β_b 右旋为正,左旋为负,因此 $v = z \tan \beta_b / r_b$ 。

齿轮在啮合过程中,如果转角为 φ ,则渐开螺旋面方程为:

$$\begin{cases} x = r_b \cos(\delta + \varphi) + \xi r_b \sin(\delta + \varphi) \\ y = r_b \sin(\delta + \varphi) - \xi r_b \cos(\delta + \varphi) \\ z = z \end{cases} \quad (2)$$

齿面上任意一点处的法向量为:

$$\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)^T = (\sin(\delta + \varphi), -\cos(\delta + \varphi), \tan \beta_b)^T \quad (3)$$

齿面接触点处的法线,即为齿轮传动过程中的啮合线,且通过主动轮与从动轮两分度圆柱的切点。因此,齿面上任意接触点的法线可表示为:

$$\frac{x-r}{n_x} = \frac{y}{n_y} = \frac{z}{n_z} \quad (4)$$

由式(4)可知, $\cos(\delta + \varphi) = r_b/r$, $\alpha_t = \delta + \varphi$ 既是齿轮的端面压力角,为定值。

结合式(4)和(2),齿轮的啮合线方程为:

$$\begin{cases} x = r_b [\cos \alpha_t + (\alpha_t - \varphi + \tan \alpha_t \tan^2 \beta_b) \cos^2 \beta_b \sin \alpha_t] \\ y = r_b [\sin \alpha_t - (\alpha_t - \varphi + \tan \alpha_t \tan^2 \beta_b) \cos^2 \beta_b \cos \alpha_t] \\ z = r_b (\alpha_t - \varphi - \tan \alpha_t) \cos \beta_b \sin \beta_b \end{cases} \quad (5)$$

结合式(4)和(1),齿轮齿面上的法向啮合齿廓方程为:

$$\begin{cases} x = r_b \cos(\alpha_t - \varphi) + r_b (\alpha_t - \varphi + \tan \alpha_t \tan^2 \beta_b) \cos^2 \beta_b \sin(\alpha_t - \varphi) \\ y = r_b \sin(\alpha_t - \varphi) - r_b (\alpha_t - \varphi + \tan \alpha_t \tan^2 \beta_b) \cos^2 \beta_b \cos(\alpha_t - \varphi) \\ z = r_b (\alpha_t - \varphi - \tan \alpha_t) \cos \beta_b \sin \beta_b \end{cases} \quad (6)$$

2 测量方法

2.1 法向啮合齿廓偏差四坐标测量法

由式(5)可知,齿轮的啮合线方程也可表示为:

$$\begin{cases} x = A_1 \varphi + B_1 \\ y = A_2 \varphi + B_2 \\ z = A_3 \varphi + B_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 B_3 均为常系数。

$$A_1 = -r_b \cos^2 \beta_b \sin \alpha_t$$

$$B_1 = r_b [\cos \alpha_t + (\alpha_t + \tan \alpha_t \tan^2 \beta_b) \cos^2 \beta_b \sin \alpha_t]$$

$$A_2 = r_b \cos^2 \beta_b \cos \alpha_t$$

$$B_2 = r_b [\sin \alpha_t - (\alpha_t + \tan \alpha_t \tan^2 \beta_b) \cos^2 \beta_b \cos \alpha_t]$$

$$A_3 = -r_b \cos \beta_b \sin \beta_b$$

$$B_3 = r_b (\alpha_t - \tan \alpha_t) \cos \beta_b \sin \beta_b$$

式(7)为齿轮法向啮合齿廓测量提供了理论依据。采用常见的齿轮测量中心,便可实现测量。如图3所示,齿轮测量中心包括1个旋转轴和3个正交直线轴,旋转轴用于安装被测齿轮,并带动被测齿轮实现回转运动,3个直线轴使接触测头在仪器测量范围内实现任意的三维运动。根据式(7)可知,3个直线轴与回转角成线性同步运动,便可测量齿轮法向啮合齿廓。

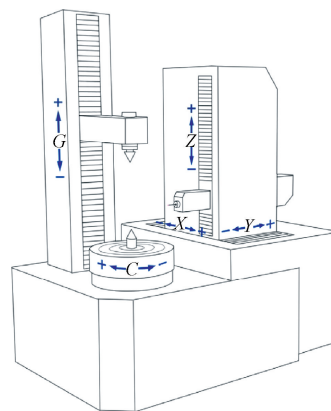


图3 齿轮测量中心

Fig. 3 Gear measuring center

图4所示为法向啮合齿廓偏差四坐标测量方法(φ, x, y, z),控制齿轮以一定角速度回转,3个直线轴根据式(7)的比例关系运动,测头将沿啮合线方向移动(图4中由点 a 移动至点 d'_0),在齿面上走过的轨迹便是法向啮合齿廓,齿面上的法向偏差就是法向啮合齿廓偏差为:

$$e_{PPC,4} = p_{actu}(x_{actu}, y_{actu}, z_{actu}) - p_{theo}(x_{theo}, y_{theo}, z_{theo}) \quad (8)$$

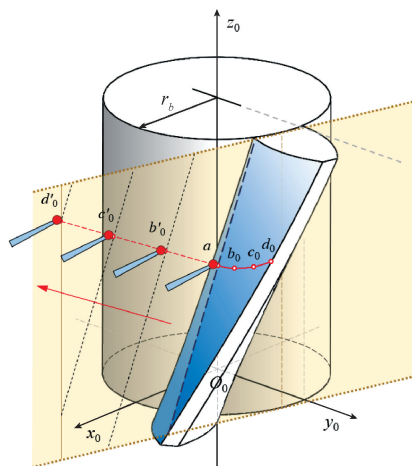


图4 法向啮合齿廓偏差四坐标测量法

Fig. 4 Four-coordinate measuring method of deviations of the profile of the path of contact

2.2 降维测量方案

1) 法向啮合齿廓偏差三坐标测量法

将基圆柱切平面旋转至与 y 轴垂直, 齿轮的啮合线方程可表示为:

$$\begin{cases} x = A_1\varphi + B_1 \\ y = r_b \\ z = A_3\varphi + B_3 \end{cases} \quad (9)$$

此时, 图5所示为法向啮合齿廓偏差三坐标测量方法(φ, x, z), 控制齿轮以一定角速度回转, 传感测头将根据式(9)的比例关系运动(图5中由点 a 移动至点 d'_0)。此时, 四轴运动缩减为三轴, 在齿面上留下的接触点轨迹仍是齿轮的法向啮合齿廓, 属于简化测量方法。法向啮合齿廓偏差为:

$$e_{PPC,3} = p_{actu}(x_{actu}, z_{actu}) - p_{theo}(x_{theo}, z_{theo}) \quad (10)$$

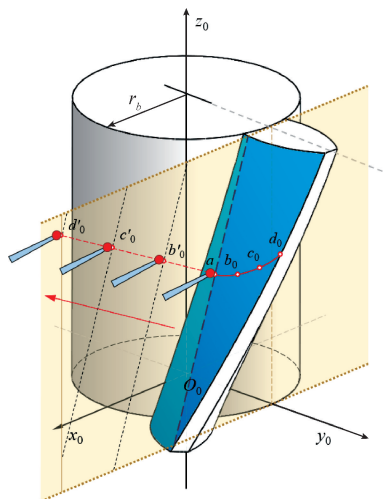


图5 法向啮合齿廓偏差三坐标测量法

Fig. 5 Three-coordinate measuring method of deviations of the profile of the path of contact

该方法减少了一个直线轴的运动, 减小了测头运动误差所带来的测量误差, 是一种有效的简化测量手段。

此外, 在齿轮滚刀啮合误差测量时^[13], 同样也是在基圆柱的切平面内沿啮合线的方向进行, 如图6所示, 也属于三轴运动测量法。

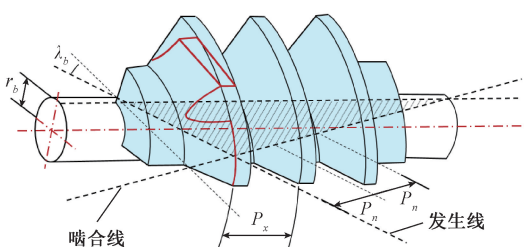


图6 滚刀啮合误差测量

Fig. 6 Measurement of hob meshing error

2) 渐开线齿廓法向展成测量方法

式(7)中, 设 $z = z_0$, 便可得到渐开线齿廓方程:

$$\begin{cases} x = A_1\varphi + B_1 \\ y = A_2\varphi + B_2 \\ z = z_0 \end{cases} \quad (11)$$

图7所示为渐开线齿廓法向展成测量方法(φ, x, y), 控制齿轮以一定角速度回转, 测头置于齿轮基圆柱切平面内, 根据式(11)的比例关系运动(图7中由点 a 移动至点 d'_1)。此时, 测头在齿面上留下的接触点轨迹则是齿轮的端面齿廓渐开线。渐开线齿廓偏差为:

$$e_{involute,3} = p_{actu}(x_{actu}, y_{actu}) - p_{theo}(x_{theo}, y_{theo}) \quad (12)$$

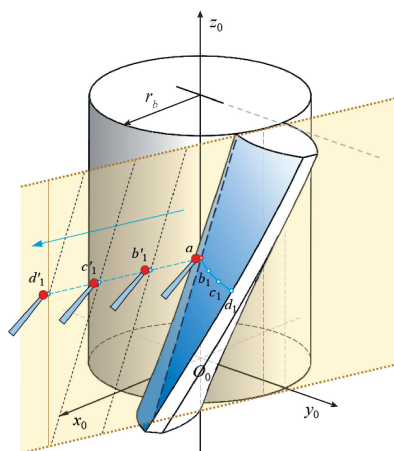


图7 渐开线齿廓偏差法向展成法

Fig. 7 Normal generative method of the involute profile deviation

这种三轴控制法(φ, x, y)就是文献[14]的NDG法测量渐开线齿廓的方案。该方法除了对齿轮进行回转控制外, 还需要两个直线轴的运动配合。该方案测头的移动方向在整个测量过程中始终与齿面法向保持一致, 无需考虑测球半径的修正问题, 但与传统方案相比增加了一个直线轴的运动, 引入了一定的运动误差。

对于大尺寸齿轮的测量, 对测量仪器的自身尺寸提出了更高的要求, 需要大行程的切向运动, 毫无疑问, 大尺寸齿轮测量仪器的加工、装配、调试和使用的难度是巨大的。采用法向展成的三轴控制法(φ, x, y)进行测量, 可以明显缩短仪器测量齿轮时在切向导轨的行程, 如图8(a)所示, 齿轮的尺寸越大优势越明显。

对于内齿轮的测量, 由于内齿轮自身的几何特殊性, 在测量过程中测量仪器的测球或测杆很容易与齿面发生干涉, 如图8(b)所示。采用法向展成的三轴控制法(φ, x, y)进行测量, 不仅可以有效避免机械干涉问题, 还可以改善因不同模数内齿轮测量需频繁更换不同直径测头的操作不便问题。

对于微小模数齿轮的测量,由于齿轮尺寸小、齿槽间隙小,传统测量仪器的测球很难进入齿槽进行正常测量,且在测量过程中也极易存在测球或测杆与齿面发生干涉的现象,如图 8(c) 所示。采用法向展成的三轴控制法(φ, x, y)进行测量,配合更易小尺寸制造的圆柱测针,可实现微小模数齿轮的渐开线齿廓测量。

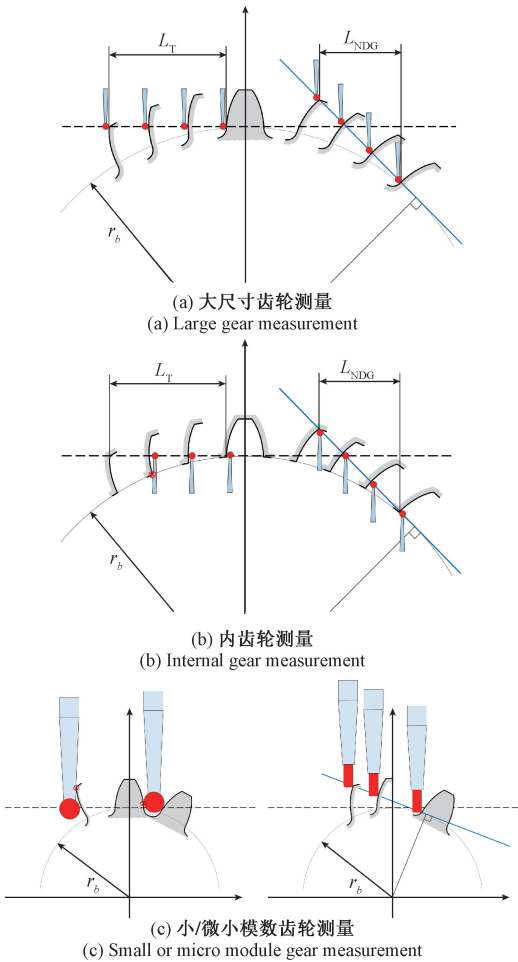


图 8 渐开线齿廓法向展成测量方法实例
Fig. 8 Example of the normal generative method of the involute profile deviation

因此,法向展成的三轴控制法(φ, x, y)在大尺寸齿轮、内齿轮、微小模数齿轮测量中,可兼顾紧凑的结构布局 and 较高的测量效率和测量精度,是一种有效且可行的解决方案。

3) 渐开线齿廓常规测量方法

将基圆柱切平面旋转至与 y 轴垂直,式(11)可表示为:

$$\begin{cases} x = A_1\varphi + B_1 \\ y = r_b \\ z = z_0 \end{cases} \quad (13)$$

此时,如图 9 所示为渐开线齿廓常规测量方法——两轴控制法(φ, x):控制齿轮以一定角速度回转,传感测头将根据式(13)的比例关系运动(图 9 中由点 a 移动至点 d'_1)。此时,三轴运动缩减为两轴,在齿面上留下的接触点轨迹仍是齿轮的端面齿廓渐开线,渐开线齿廓偏差为:

$$e_{involute,2} = p_{actu}(x_{actu}) - p_{theo}(x_{theo}) \quad (14)$$

该方法即为应用最广、最常见的渐开线齿廓的展成测量法。

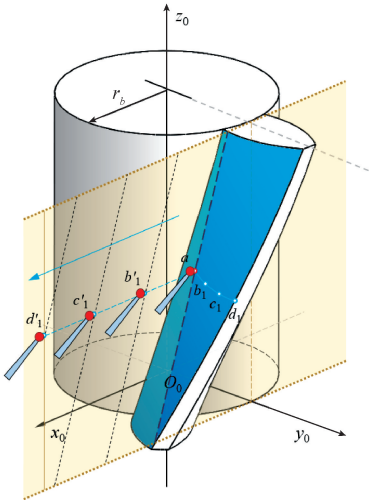


图 9 渐开线齿廓偏差常规测量法
Fig. 9 The conventional measuring method of the involute profile deviation

3 测量实践

被测齿轮参数如表 1 所示。采用现有齿轮测量中心(JD-JE32),将被测齿轮安装在仪器上随主轴回转,齿轮转角信号作为驱动信号,控制 3 个直线轴联动,实现齿面上法向齿廓线的测量,如图 10 所示。

表 1 被测齿轮参数

Table 1 Parameters of the tested gear						
参数	齿数	模数/mm	压力角/(°)	螺旋角/(°)	旋向	修形
数值	48	4	20	30	右旋	中鼓

3.1 法向啮合齿廓的测量与评价

根据式(7)可知,齿轮测量中心按照法向啮合齿廓偏差四坐标测量法(φ, x, y, z)进行四轴联动。测头在空间中齿面上走过的轨迹便是齿轮的法向啮合齿廓,测头的示数变化为法向啮合齿廓偏差,如图 11(a) 所示。将测头置于被测齿轮基圆柱切平面内且该基圆柱切平面与 y 轴垂直,则齿轮测量中心根据式(9)按法向啮合齿廓

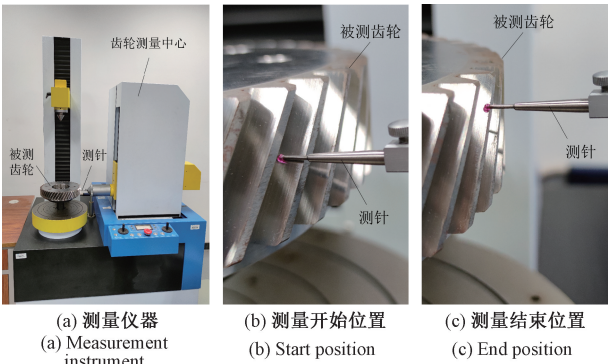


图 10 测量实践
Fig. 10 Measurement practices

三坐标测量法 (φ, x, z) 进行三轴联动, 测头在齿面上走过的轨迹同样是齿轮的法向啮合齿廓, 其偏差如图 11(b) 所示。被测齿轮的法向啮合齿廓偏差如表 2 所示。

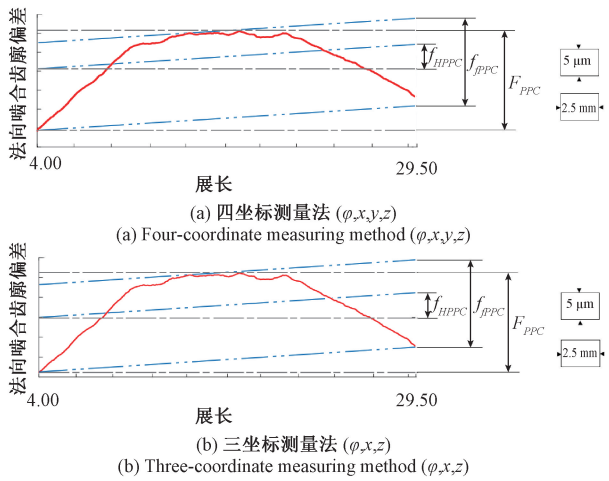


图 11 法向啮合齿廓偏差
Fig. 11 Deviations of the profile of the path of contact

表 2 法向啮合齿廓偏差和渐开线齿廓偏差
Table 2 Deviations of the profile of the path of contact and involute profile deviations μm

偏差项目	法向啮合齿廓		渐开线齿廓	
	四坐标测量法 (φ, x, y, z)	三坐标测量法 (φ, x, z)	法向展成测量法 (φ, x, y)	常规测量法 (φ, x)
形状偏差	23.8	23.6	18.9	18.7
倾斜偏差	7.2	5.9	-1.2	-1.6
总偏差	25.8	25.2	18.4	18.5

3.2 渐开线齿廓的测量与评价

根据式 (11) 可以测量齿轮的渐开线齿廓, 控制齿轮测量中心按照渐开线齿廓法向展成测量法 (φ, x, y) 进行三轴联动, 测头在空间中齿面上走过的轨迹为齿轮的端面渐开线齿廓, 其偏差如图 12(a) 所示。与法向啮合齿廓的测量方法类似, 如果将测头置于被测齿轮基圆柱切平面内且该基圆柱切平面与 y 轴垂直, 则齿轮测量中心根据式 (13) 按照渐开线齿廓常规测量法 (φ, x) 进行两轴联动, 测头在齿面上走过的轨迹同样是齿轮的端面渐开线齿廓, 其偏差如图 12(b) 所示。被测齿轮的各项渐开线齿廓偏差如表 2 所示。四坐标法测得的法向啮合齿廓形状偏差、倾斜偏差和总偏差与三坐标法的测量结果相比, 分别相差 0.2、1.3、0.6 μm ; 法向展成法测得的渐开线齿廓形状偏差、倾斜偏差和总偏差与常规测量法的测量结果相比, 分别相差 0.2、0.4、-0.1 μm 。

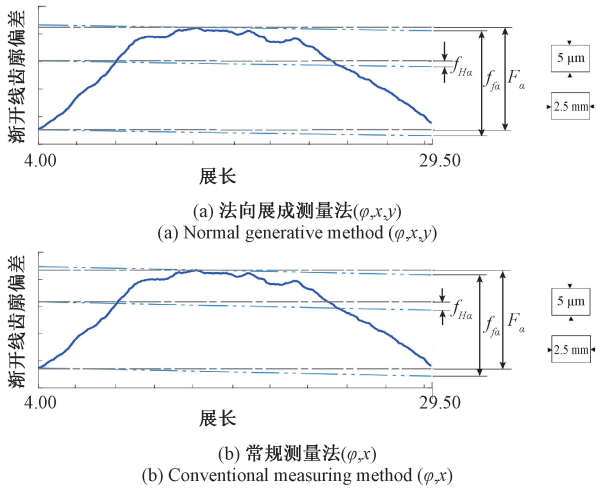


图 12 渐开线齿廓偏差
Fig. 12 Involute profile deviations

4 法向啮合齿廓与渐开线、螺旋线的关系

4.1 法向啮合齿廓的综合性

将齿面上的法向啮合齿廓、渐开线和螺旋线通过坐标变换转映射到齿轮啮合平面上, 根据文献 [15] 可知, 上述 3 条齿轮特征线在啮合平面上都是直线, 如图 13 所示, 法向啮合齿廓偏差是渐开线偏差和螺旋线偏差综合作用的结果, 是矢量和:

$$\vec{e}_{PPC} = \vec{e}_\alpha + \vec{e}_\beta \tag{15}$$

式中: $\vec{e}_{PPC}$ 为法向啮合齿廓偏差矢量; $\vec{e}_\alpha$ 为渐开线偏差矢量; $\vec{e}_\beta$ 为螺旋线偏差矢量。

4.2 法向啮合齿廓的统一性

在齿轮的啮合平面上, 法向啮合齿廓和渐开线齿廓之间的夹角为齿轮基圆螺旋角 β_0 , 如图 13 所示。当夹角

等于0时,齿轮的法向啮合齿廓与渐开线齿廓重合,此时为直齿轮。当夹角不断增大时,齿轮的法向啮合齿廓与渐开线齿廓开始分离,逐渐向螺旋线方向倾斜,此时为斜

齿轮。当夹角增大到一定程度时,螺旋角也就变得更大时,齿轮将呈现为渐开线蜗杆或齿轮滚刀,法向啮合齿廓偏差为蜗杆或滚刀的啮合误差^[16]。

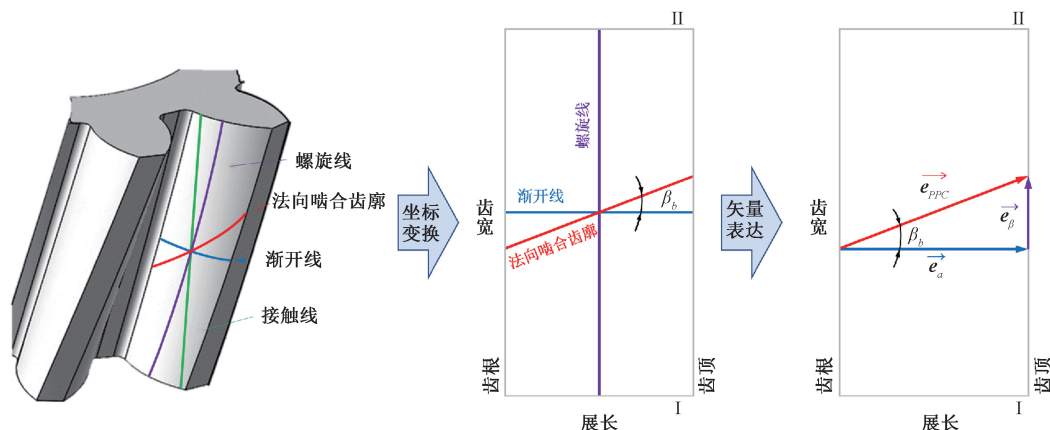


图13 渐开线、螺旋线与法向啮合齿廓的关系

Fig. 13 Relationship among involute, helix and profile of the path of contact

因此,齿轮的法向啮合齿廓与渐开线具有统一性。

4.3 法向啮合齿廓的唯一性

ISO、GB 等众多齿轮精度标准都定义了渐开线齿廓偏差和螺旋线偏差作为控制齿面质量的精度指标,并形成了系统化的评价方法。

在这套齿轮质量评价体系中,只有渐开线偏差和螺旋线偏差都合格,齿轮才是合格的;要让齿轮合格,渐开线偏差和螺旋线偏差都必须合格。

但从法向啮合齿廓的综合性考察,法向啮合齿廓偏差是渐开线偏差和螺旋线偏差综合作用的结果。只要法向啮合齿廓偏差是合格的,渐开螺旋齿轮就是合格的,而并不要求渐开线偏差和螺旋线偏差都必须合格。这就引出了一个重要技术思想:渐开线偏差和螺旋线偏差不合格,但齿轮可以是合格的,即可以通过渐开线偏差和螺旋线偏差相互补偿,去实现法向啮合齿廓偏差合格,从而使齿轮合格。

精度等级不好的渐开线和螺旋线也有可能相互补偿成精度等级更高的法向啮合齿廓。保障齿轮传动的最终使用性能,只需保证法向啮合齿廓的精度等级即可,这就给渐开线和螺旋线降低了要求。

这种技术思想在齿轮滚刀制造和验收中得到应用,只要啮合误差满足要求,齿轮滚刀就是合格的,即使螺旋线误差和螺旋线误差不合格。

5 结 论

法向啮合齿廓具有综合性,是渐开线和螺旋线综合作用的结果;法向啮合齿廓具有统一性,与渐开线相统

一,与渐开线蜗杆或齿轮滚刀的啮合线相统一;法向啮合齿廓具有唯一性,可用一个指标使能反映齿面精度质量,通过渐开线偏差和螺旋线偏差的相互补偿去取得更优的法向啮合齿廓偏差,以便取得更优的齿轮使用性能。本文提出了法向啮合齿廓偏差坐标测量方法,包括四坐标测量法和三坐标测量法。验证了降维后的渐开线齿廓法向展成测量法在大尺寸齿轮、内齿轮和微小模数齿轮的测量中具有突出优势。实现了在现有齿轮测量设备中也能测量法向啮合齿廓偏差的需求。建议齿轮测量中心和坐标测量机增加法向啮合齿廓偏差的测量功能,并在齿轮精度标准中增加法向啮合齿廓偏差项目。

参考文献

- [1] STADTFELD H J. Practical gear engineering [M]. Rochester: Gleason Corporation, 2019.
- [2] Cylindrical gears—ISO system of flank tolerance classification—Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth: ISO 1328-1: 2013 [S]. 2013.
- [3] 圆柱齿轮 ISO 齿面公差分级制 第1部分:齿面偏差的定义和允许值: GB/T 10095.1—2022[S]. 北京:中国标准出版社, 2022.
- [4] Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification — Part 1: Definition and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth: GB/T 10095.1—2022 [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd., 2022.
- [4] Measurement and testing of gears—evaluation of profile and helix measurements on cylindrical gears with involute

- profile: VDL/VDE 2612-1: 2018- 11 [S]. Dusseldorf, 2018.
- [5] 石照耀, 费业泰, 谢华锟. 齿轮测量技术 100 年——回顾与展望[J]. 中国工程科学, 2003, 5(9): 13-17.
SHI ZH Y, FEI Y T, XIE H K. 100 years of gear measurement technology: Review and prospect[J]. China Engineering Science, 2003, 5(9): 13-17.
- [6] 石照耀, 于渤, 宋辉旭, 等. 20 年来齿轮测量技术的发展[J]. 中国机械工程, 2022, 33(9): 1009-1024.
SHI ZH Y, YU B, SONG H X, et al. Development of gear measurement technology during last 20 years [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33 (9): 1009-1024.
- [7] SHI Z Y, SUN Y Q, LI H B. Methods for checking the profile of the path of contact of involute gears [C]. American Gear Manufacturers Association 2022 Fall Technical Meeting, 2022.
- [8] LITVIN F L, FAN Q, VECCHIATO D, et al. Computerized generation and simulation of meshing of modified spur and helical gears manufactured by shaving[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190(39): 5037-5055.
- [9] 赵柏涵, 高峰, 李艳, 等. 渐开线齿形磨削精度的在机测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 48-55.
ZHAO B H, GAO F, LI Y, et al. Research on on-machine measurement for grinding accuracy of involute profile [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 48-55.
- [10] 石照耀, 王笑一. 齿轮整体误差测量技术的过去、现在和未来[J]. 计测技术, 2018, 38(3): 112-119.
SHI ZH Y, WANG X Y. Past, present and future of gear integrated error measurement technologies[J]. Metrology and Measurement Technology, 2018, 38(3): 112-119.
- [11] SHI Z Y, WANG X Y, SHU Z H. Theoretical method for calculating the unit curve of gear integrated error [J]. Journal of Mechanical Design, 2016, 138(3): 033301.
- [12] LITVIN F L. Gear geometry and applied theory [M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc, 1994.
- [13] 石照耀. 论齿轮滚刀的啮合误差测量[J]. 机械, 1999(1): 46-48.
SHI ZH Y. Measurement of gear hob's meshing error[J]. Mechanics, 1999(1): 46-48.
- [14] MASATOSHI Y. Gear measuring machine by 'NDG Method' for gears ranging from miniature to super-large [J]. Gear Technology, 2011(3): 55-60.
- [15] 石照耀, 赵保亚, 于渤, 等. 齿轮特征线统一模型及在齿轮三维误差评定中的应用[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 1-9.
SHI ZH Y, ZHAO B Y, YU B, et al. Unified model of gear characteristic lines and its application in the evaluation of gears 3D deviation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 1-9.
- [16] 石照耀, 叶勇, 丁毅, 等. CNC 式高准确度滚刀测量机[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(5): 91-93.
SHI ZH Y, YE Y, DING Y, et al. CNC high precision measuring machine for hobs [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(5): 91-93.

作者简介



石照耀(通信作者), 1984 年于合肥工业大学获得学士学位, 1988 年于陕西机械学院获得硕士学位, 2001 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为北京工业大学教授、博士生导师、教育部长江学者特聘教授, 主要研究方向为精密测试技术和仪器、齿轮工程和精密减速器。

E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

Shi Zhaoyao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1984, M. Sc. degree from Shanxi Institute of Mechanical Engineering in 1988, and Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2001. He is currently a professor and a Ph. D. supervisor at Beijing University of Technology. He is a "Yangtze River Scholar" distinguished professor awarded by the Ministry of Education. His main research interests include precision measurement technology and instrument, gear engineering and precision reducer.



孙衍强, 2015 年于山东科技大学获得学士学位, 2018 年于北京工业大学获得硕士学位, 现为北京工业大学博士研究生, 主要研究方向为精密测试技术和仪器。

E-mail: syq_90@163.com

Sun Yanqiang received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2015, and M. Sc. degree from Beijing University of Technology in 2018. He is currently a Ph. D. candidate at Beijing University of Technology. His main research interest includes precision measurement technology and instrument.