

汽车驱动桥准双曲面齿轮齿面测量误差精确计算

邓效忠¹ 李天兴^{1,2} 李聚波³ 周广才⁴

1. 河南科技大学, 洛阳, 471003 2. 西北工业大学, 西安, 710072

3. 江苏大学, 镇江, 212013 4. 哈尔滨精达测量仪器有限公司, 哈尔滨, 150078

摘要:为精确获取汽车驱动桥齿轮实际加工齿面的真实误差,改善汽车齿轮的齿面精度,结合汽车驱动桥齿轮在传动方面的优越性及其在机床调整计算、加工方法和齿面测量等方面的特殊性,对其齿面数控展成与数字化检测的运动关系进行了深入分析;鉴于汽车驱动桥齿轮齿面拓扑结构的复杂性,结合齿面误差计算原理,在实际加工齿面检测信息的基础上,提出了一种汽车驱动桥齿轮齿面误差的精确计算方法;最后,通过齿轮齿面加工测量结果的比对,验证了该齿面误差精确计算方法的正确性和有效性。

关键词:汽车驱动桥齿轮;齿面精度;齿面误差;精确计算

中图分类号: TH132.4

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.12.024

Accurate Calculation of Tooth Surface Deviation Based on Automobile Driving Axle Hypoid Gear

Deng Xiaozhong¹ Li Tianxing^{1,2} Li Jubo³ Zhou Guangcai⁴

1. Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan, 471003

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072

3. Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, 212013

4. Harbin Jingda Measuring Instruments Co., Ltd., Harbin, 150078

Abstract: In order to obtain accurately the deviation of the actual machined tooth surface and improve effectively the tooth surface precision for the automobile driving axle gear, the kinematic relations of the NC machining and the digital measurement were deeply analyzed by combining the superiority in gear transmission of automobile driving axle gear and the particularity in the machine tool adjustment, the machining method and the tooth surface detection so on. By means of the complexity of topological structure of tooth surface of the automobile driving axle gear and the calculation principles of tooth surface deviation, an accurate calculation method was put forward to determine the real tooth surface deviation of automobile driving axle gear on the basis of the measurement data of the actual tooth surface. Finally, the correctness and effectiveness of the accurate calculation method of tooth surface deviation was verified by the comparisons of the machining and measuring results.

Key words: automobile driving axle gear; tooth surface precision; tooth surface deviation; accurate calculation

0 引言

汽车驱动桥齿轮作为汽车动力传动系统中的关键零件,普遍采用螺旋锥齿轮中最为复杂的准双曲面齿轮。准双曲面齿轮传动平稳、噪声低,尤其是其主动轮轴线相对于被动轮轴线的偏置在汽车制造工业中具有特殊的优越性,能使汽车的车身增高或降低,从而提高汽车的越野性能和稳定性。在使用上的诸多优点,使得人们对汽车驱动桥齿轮的啮合传动性能要求愈来愈高,其高精度、高速度、低噪声等高品质性能目标对齿面几何精度及啮合传动质量控制也提出了更高的要求^[1-2]。

从外观上看,汽车驱动桥齿轮与一般弧齿锥齿轮很相似,但是其齿面几何拓扑结构更加复杂,

轮坯的设计计算、制造工艺及机床调整加工等比一般弧齿锥齿轮要繁琐和困难,与之相应的齿面展成技术、齿面检测技术以及齿面修正理论都较为落后,亟待进行深入研究。

在美国、日本及德国等汽车制造大国,汽车驱动桥齿轮的数字化闭环制造已经替代传统制造模式^[3-6],齿面检测技术已成为加工过程中不可或缺的重要环节,其齿轮产品的几何精度和啮合质量等综合性能非常优越,甚至达到了可互换的程度^[7-10]。而在国内,目前广泛以理论齿面的 TCA 分析作为汽车驱动桥齿轮的设计评价方法,以传统的滚动检验作为轮齿啮合质量检验的主要手段,存在切齿调整复杂、质量不稳定、生产效率低下等缺点,这些缺点导致汽车后桥传动系统啮合质量、振动噪声及使用寿命等问题日益突出^[2,11]。国内汽车齿轮的配套生产厂家为了提高齿面精

收稿日期:2011-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075121);河南省杰出人才创新基金资助项目(094200510007)

度,缩短加工周期,也一直致力于齿轮几何结构和啮合性能的改善与提高,除了引进国外先进设备外,大批的国产设备也逐渐应用到汽车生产线中,但齿面精度及接触区控制效果不佳。问题就在于在检测过程中对测量随机误差源的研究不够深入,检测后的数据补偿处理及齿面误差计算不正确或不精确,使得最终得到的齿面误差失真,从而对实际齿面接触区调整与修正起到了误导作用。所以,通过测量模型的正确构建与齿面误差的精确计算,获取实际加工齿面的真实误差,对汽车驱动桥齿轮齿面精度的数字化控制具有重要的现实意义。

鉴于此,本文针对汽车后桥齿轮齿面误差的计算原理及精确计算方法展开研究,通过对齿面数控展成与检测的深入分析,基于国产齿轮测量中心的检测数据,提出了一种汽车后桥齿轮齿面误差的精确计算方法。该方法有助于准确完成齿面检测,有效减小测量随机误差,从而获取实际齿面的真实误差,为改善汽车后桥齿轮齿面几何精度,提高其啮合质量提供理论和方法指导。

1 齿面的数控展成与误差检测

与一般锥齿轮相比,汽车驱动桥齿轮主动轮的上下偏置以及其螺旋角远远大于被动轮螺旋角的特殊性增加了齿轮啮合的重叠系数,提高了运动的均匀性和平稳性。同时,主动轮齿形曲率变化大和齿面几何拓扑结构的复杂性^[12-13]使得轮齿的齿面解析表达、切齿加工调整及齿面误差检测等更加困难。而其特殊的用途与优越的啮合性能对齿面几何精度和啮合性能要求又十分苛刻,因此汽车驱动桥齿轮齿面的数控展成和数字化检测就成为提高齿面几何精度及啮合性能的重要技术手段^[14]。

图1所示为汽车驱动桥齿轮的数控展成模型。在齿轮加工过程中,通过控制3个直线轴(X 、 Y 、 Z 轴)和2个旋转轴(A 、 B 轴)的相对位置和运动轨迹(即机床运动参数: X^* 、 Y^* 、 Z^* 、 A^* 、 B^* 等)来确保齿面展成运动的准确性。该数控展成模型中,坐标系 $S_f(O_f X_f Y_f Z_f)$ 与床身固连; $S_t(O_t X_t Y_t Z_t)$ 和 $S_w(O_w X_w Y_w Z_w)$ 分别与刀盘和齿轮固连; $S_h(O_h X_h Y_h Z_h)$ 和 $S_m(O_m X_m Y_m Z_m)$ 与坐标系 S_f 平行,分别固连于 Y 方向滑台和 Z 方向滑台; O_h 在 S_f 中的位置用坐标 $(X^*, Y^*, 0)$ 表示,用以描述 X 轴和 Y 轴自由度; O_m 在 S_f 中位置用坐标 $(0, 0, Z^*)$ 表示,用以描述 Z 轴自由度; S_t 绕坐标轴 Z_h 转动,转角为 ϕ ; $S_p(O_p X_p Y_p Z_p)$ 为辅助

坐标系,原点 O_p 位置由机床常数 H 和转角 γ (轮坯根锥角)确定,转角 γ 描述 B 轴旋转自由度;坐标系 S_w 绕坐标轴 X_p 旋转的角度 θ 描述 A 轴旋转自由度。

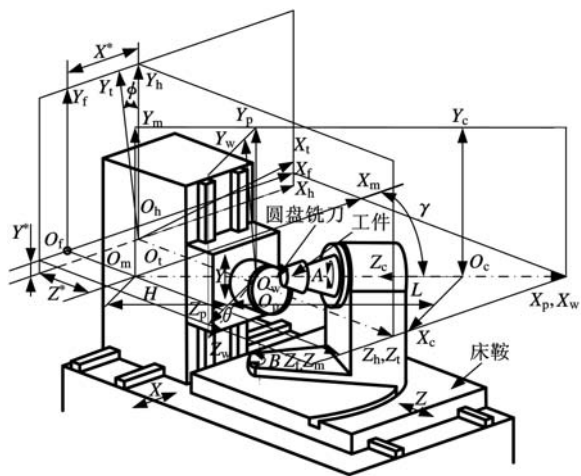


图1 齿面的数控展成模型

在加工过程中,数控铣齿机的各数控轴联动,灵活控制被加工齿轮与铣刀盘在空间中的位置和运动,然后通过复合空间运动可完成实际展成运动形成加工齿面。一个齿槽切削完毕,各数控轴返回到初始位置,工件箱后退,同时被加工齿轮转过一定的分齿角度,进入下一个切齿循环。反复进行即可完成所有齿面的加工。

数控展成的实际齿面只有与理论设计齿面几何结构相一致才能确保齿面啮合性能最优。这就需要在齿轮测量中心上通过对齿面进行检测来获取实际加工齿面偏离理论设计齿面的法向偏差。图2所示为汽车驱动桥齿轮齿面误差的检测模型。在该模型中, $S_w(O_w X_w Y_w Z_w)$ 为在数控展成中与轮坯固连的工件坐标系,测量坐标系 $S_c(O_c X_c Y_c Z_c)$ 为左手坐标系,固连于齿轮测量中心上,原点 O_c 位于测量中心回转工作台中心,坐标轴 X_c 和 Y_c 分别与 S_p 的坐标轴 Y_p 和 Z_p 平行,

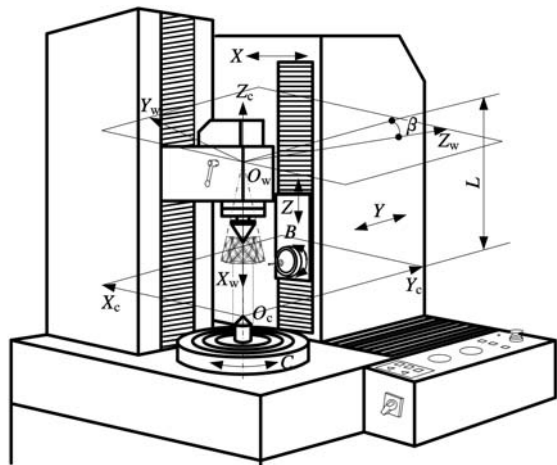


图2 齿面的数字化检测及模型

Z_c 与 X_p 反向。直线位移 L 与角位移 θ 分别确定了被测齿轮和被测齿面在坐标系 S_c 中的具体方位,二者可在测量过程中通过间接测量或计算得到。

齿轮测量中心采用坐标测量原理,实际上是圆柱(极)坐标测量机^[4]。在齿轮测量过程中,中心计算机根据被测齿轮齿面的理论数据控制各直线轴(X 、 Y 、 Z 轴)和旋转轴(C 轴)的运动,同时齿轮不断转动使每个被测点法线方向的 Y 轴分量接近于 0。与一般锥齿轮的齿面检测相比,由于汽车驱动桥齿轮齿面曲率很大,因此需要控制 B 轴旋转一定角度,保证一维测头始终沿着被测点的法线方向与齿面靠近、接触。在测头沿齿轮齿面运动的过程中,计算机不断采集各坐标轴的实际位置,并存储起来,这些数据记录了被测齿轮实际加工齿面的数据,由计算机与理论齿面进行比较处理后得出实际齿面的齿面误差。

2 测量齿面的数字化处理

由齿面展成与检测的运动分析可知,汽车驱动桥齿轮的齿面几何完全取决于数控机床和齿轮测量中心运动时的自由度参数。根据齿轮啮合理论和微分几何学原理,齿轮齿面与刀具切削面是一对共轭曲面,通过齿面展成的运动关系和啮合方程,可以确定理论齿面的解析表达式。

假设机床运动参数 Φ_j (j 为机床运动参数个数, $j=1,2,\dots,m$) 已知,经过一系列的空间坐标变换与推导过程^[11],可以得到工件坐标系 S_w 下的理论齿面 H_0 和单位法矢 n_0 :

$$\left. \begin{aligned} H_0 &= H_0(\theta, \phi; \Phi_j) \\ n_0 &= n_0(\theta, \phi; \Phi_j) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

为了便于齿面的精密测量与数据处理,需要对齿面点进行数字化处理,并确定各点的空间坐标和法线方向。根据美国齿轮制造商协会标准,一般取 45 个齿面点^[11,13],如图 3 所示。

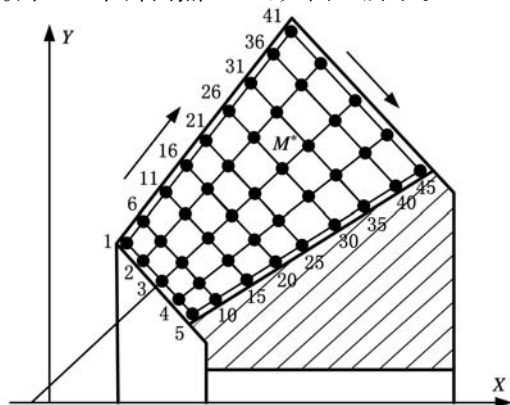


图 3 测量齿面的数字化

M^* 为齿面上任一被测点。由齿面的平面几何关系可确定 M^* 点在旋转投影面中的坐标 (x^*, y^*) ,该点与理论齿面 H_0 上第 i 点 (i 为齿面测量点序号, $i=1,2,\dots,45$) 的坐标 (x_i, y_i, z_i) 有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= x^* \\ \sqrt{y_i^2 + z_i^2} &= y^* \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

机床运动参数 Φ_j 已知,利用优化方法或数值迭代求解式(2),可得到各被测点的齿面参数 θ 和 ϕ ,将其代入式(1)即可得到 S_w 下的齿面理论坐标和法矢。

坐标系 S_w 下的理论齿面 $H_0(\theta, \phi; \Phi_j)$ 和法矢 $n_0(\theta, \phi; \Phi_j)$ 经过由 S_w 到 S_c 的空间转换矩阵 M_{cw} 的变换,即可得到 S_c 下的理论齿面 $H(\theta, \phi; \Phi_j)$ 和单位法矢 $n(\theta, \phi; \Phi_j)$:

$$\left. \begin{aligned} H(\theta, \phi; \Phi_j) &= M_{cw} H_0(\theta, \phi; \Phi_j) \\ n(\theta, \phi; \Phi_j) &= M_{cw} n_0(\theta, \phi; \Phi_j) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$M_{cw} = \begin{bmatrix} 0 & \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ -1 & 0 & 0 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, β 为坐标系 S_c 与 S_w 的转角偏移量。

从理论上讲,齿面检测后得到的是测球球心的运动轨迹坐标,因此需要对理论齿面进行测头半径补偿处理。假设测头半径为 ρ ,得到 S_c 下测头的理论运动轨迹面 H_c :

$$H_c(\theta, \phi; \Phi_j) = H(\theta, \phi; \Phi_j) + \rho n(\theta, \phi; \Phi_j) \quad (4)$$

这就是齿面检测所必需的理论数据,同时也是进行齿面误差精确计算的基础。齿轮测量中心可以根据此数据完成整个齿面检测。

3 齿面误差的精确计算

在汽车驱动桥齿轮的设计与加工过程中存在许多影响齿面精度的因素,如切齿计算的近似性、机床几何及运动精度误差、热力变形、机床运动调整误差及刀盘误差等。这些因素的存在造成了实际加工齿面偏离理论设计齿面,产生齿面误差。生产实践和统计学原理证明,汽车驱动桥齿轮的这种齿面误差是各种精度影响因素的综合反映,具有一定的稳定性和重复性,能够被测量和储存,因此就可以在重复加工中进行修正补偿来减小或消除。在实际的加工测量过程中发现,切齿计算误差、机床几何及运动精度误差、热力变形等影响因素的修正补偿均可以通过机床运动参数和刀盘参数来予以转化或替代,所以借助于机床运动参数和刀盘参数的修正可以达到消除或减小齿面误差的目的^[13]。因此,真实齿面误差的获取和精确

计算就成为改善齿面几何精度的前提条件。

如图 4 所示,齿面误差 δ 的计算原理大体分两种。

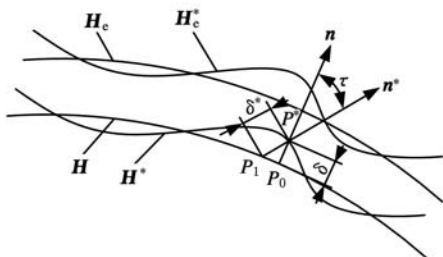


图 4 齿面误差计算原理

(1) 方法 1。齿面误差 δ 通常在 \mathbf{H} 的法线方向 \mathbf{n} 上进行度量,定义为实际齿面 \mathbf{H}^* 偏离理论齿面 \mathbf{H} 的法向距离^[15]。对理论齿面 \mathbf{H} 上一点 P_0 ,过其法矢 \mathbf{n} ,找到与 P_0 对应的实际齿面 \mathbf{H}^* 上的点 P^* ,计算这两点之间的偏差即为齿面加工时在 P_0 点所形成的齿面误差 δ :

$$\delta = (\mathbf{H}^* - \mathbf{H}) \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

图 4 中 P_0P^* 是齿面误差 δ 的几何描述。

(2) 方法 2。齿面误差的存在使得实际齿面 \mathbf{H}^* 的法线方向 \mathbf{n}^* 往往偏离理论法线 \mathbf{n} ,以实际齿面点 P^* 为初始基准点,沿实际齿面法矢方向 \mathbf{n}^* 找到理论齿面上与实际齿面点 P^* 对应的点 P_1 ,对应点之间距离 P_1P^* 即为齿面误差 δ^* :

$$\delta^* = (\mathbf{H}^* - \mathbf{H}) \cdot \mathbf{n}^* \quad (6)$$

图 4 中, P_1P^* 是齿面误差 δ^* 的几何描述。

令 τ 为法线 \mathbf{n}^* 过 P^* 与 \mathbf{n} 的微小夹角,即实际齿面法矢因齿面误差的影响而在空间转过的角度(图 4)。两种齿面误差计算方法的差异的数学描述为

$$(\delta - \delta^*)\mathbf{n} = (\mathbf{H}^* - \mathbf{H}) - (\mathbf{H}^* - \mathbf{H})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}^*) = (\mathbf{H}^* - \mathbf{H})(1 - \cos\tau) \quad (7)$$

τ 一般较小,将 $\cos\tau$ 展开为级数并略去高次项,式(7)可表示为

$$(\delta - \delta^*)\mathbf{n} \approx \frac{1}{2}\tau^2(\mathbf{H}^* - \mathbf{H}) \quad (8)$$

可以看到,两种齿面误差分析模型计算值的差异仅与 τ 和 δ 相关。 τ 决定于 $(\mathbf{n}, \mathbf{n}^*)$, δ 决定于实际齿面精度。若齿面精度较高, τ 和 δ 就较小,两误差模型的差异将十分微小,可忽略不计。但汽车驱动桥齿轮的齿面曲率变化较大,这种差异不容忽视。方法 2 由实际齿面点寻找理论齿面上对应点时,理论齿面已经解析表达,避免了齿面重构时的拟合误差;方法 1 由理论齿面点寻找实际齿面上对应点时,需要对检测数据进行曲面重构,这样必然带入拟合误差,有可能掩盖真实加工误差,不利于齿面精度评价和机床参数反调。但是,在齿

面测量过程中,采样点的个数远远大于理论齿面测量点的个数,若采用非均匀有理 B 样条对实际齿面测量点进行拟合,必有较好的保凸性,不会造成实际加工信息损失,有利于确保评定精度。另外,汽车驱动桥齿轮齿面在数控展成和误差检测中都是以理论设计齿面为基础的,因此,无论是从误差评定的准确程度,还是数控展成和误差检测的便捷程度,选用方法 1 来分析计算齿面误差将更加准确方便。

由式(5)可知, \mathbf{H} 上每一点均有唯一一个 δ 与之对应,因此, δ 是 \mathbf{H} 上点的函数,即曲面坐标 (θ, ϕ) 的函数,而 (θ, ϕ) 又由机床运动参数 Φ_j 决定,即 Φ_j 是 δ 的参变量。所以

$$\mathbf{H}^* = \mathbf{H} + \delta(\theta, \phi; \Phi_j)\mathbf{n} \quad (9)$$

实际齿面的法线 \mathbf{n}^* 造成了空间夹角 τ 的存在,会对齿面的测量产生一定影响,是测量误差的来源之一。 \mathbf{n}^* 可表示如下:

$$\mathbf{n}^* = \frac{(\mathbf{H}_\theta + \delta_\theta\mathbf{n}) \times (\mathbf{H}_\phi + \delta_\phi\mathbf{n})}{|(\mathbf{H}_\theta + \delta_\theta\mathbf{n}) \times (\mathbf{H}_\phi + \delta_\phi\mathbf{n})|} \quad (10)$$

$$\mathbf{H}_\theta = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \theta} \quad \mathbf{H}_\phi = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \phi}$$

$$\delta_\theta = \frac{\partial \delta}{\partial \theta} \quad \delta_\phi = \frac{\partial \delta}{\partial \phi}$$

因此,测量坐标系下测头的实际运动轨迹面 \mathbf{H}_c^* 可表示为

$$\mathbf{H}_c^* = \mathbf{H}^* + \rho\mathbf{n}^* \quad (11)$$

值得一提的是,在汽车驱动桥齿轮齿面这种复杂曲面的测量过程中,并不能做到实际加工齿面和理论齿面完全重合。为了减小或消除测量基准不重合误差及齿距误差,需要对测头的实际运动轨迹面 \mathbf{H}_c^* 进行适当的平移和旋转等坐标变换,使得变换后的 \mathbf{H}_c^* 与理论齿面充分吻合^[15]。因此,利用参数曲面的几何不变性,将 \mathbf{H}_c^* 与 \mathbf{H}_c 进行曲面匹配后并作比较,得

$$\mathbf{H}_c^* - \mathbf{H}_c = \mathbf{H}^* - \mathbf{H} + \rho(\mathbf{n}^* - \mathbf{n}) \quad (12)$$

将式(9)代入式(12),得

$$\mathbf{H}_c^* - \mathbf{H}_c = \delta(\theta, \phi; \Phi_j)\mathbf{n} + \rho(\mathbf{n}^* - \mathbf{n}) \quad (13)$$

式(13)两边与法矢 \mathbf{n} 作点积,得

$$(\mathbf{H}_c^* - \mathbf{H}_c) \cdot \mathbf{n} = \delta(\theta, \phi; \Phi_j) + \rho(\cos\tau - 1) \quad (14)$$

式(14)可写为

$$(\mathbf{H}_c^* - \mathbf{H}_c) \cdot \mathbf{n} = \delta(\theta, \phi; \Phi_j) + \Delta\epsilon \quad (15)$$

$$\Delta\epsilon = \rho(\cos\tau - 1) \approx \rho\tau^2/2$$

可以看出, $\Delta\epsilon$ 是关于 ρ 和 τ 的函数,而 τ 则与齿面误差 δ 有直接联系, δ 越大,法线方向 \mathbf{n}^* 和 \mathbf{n} 的空间夹角 τ 越大。例如,测头直径 $\rho = 1.0\text{mm}$, $\tau = 1'$, 则 $\Delta\epsilon = 0.14\mu\text{m}$ 。由此可见,如果 ρ 或 τ 较大, $\Delta\epsilon$ 就是测量中的一项重要误差源。因此,采用小直径测头是减小测量误差的重要手段。

一般情况下, $\Delta\epsilon$ 较小, 甚至可以忽略不计。忽略 $\Delta\epsilon$ 则有

$$H_c(\theta, \phi; \Phi_j) + \delta(\theta, \phi; \Phi_j)n(\theta, \phi; \Phi_j) \approx H_c^* \quad (16)$$

将式(4)代入式(16)整理得

$$H(\theta, \phi; \Phi_j) + (\rho + \delta(\theta, \phi; \Phi_j))n(\theta, \phi; \Phi_j) \approx H_c^* \quad (17)$$

由于测头直径 ρ 和机床运动参数 Φ_j 为已知量, 测头实际轨迹面 H_c^* 由齿面测量后进行曲面拟合得到, 理论齿面 H 和法矢 n 经理论计算确定。因此, 式(17)是一个以 δ, θ 和 ϕ 为变量的非线性方程组, 优化迭代求解即可得到真实齿面误差。同样, 如果需要进行齿面误差修正, 则 δ 为已知量, 以 Φ_j, θ 和 ϕ 为变量进行优化迭代, 寻求最佳机床参数 Φ^* 使得 δ 趋于最小即可。由此可见, 式(17)体现了齿面误差计算与齿面修正的可逆求解过程, 反映了齿面偏差 δ 与曲面参数 θ, ϕ 和机床运动参数 Φ_j 之间的映射关系。

4 实验验证

以一对汽车后桥齿轮为例来验证其齿面误差分析与精确计算的准确性与有效性。齿轮几何参数如表 1 所示。被加工大轮在一次装夹中用双面刀盘同时铣削凹面和凸面; 被加工小轮轮齿的凹面和凸面采用不同刀盘、不同机床运动参数分别加工。通过给定初始展成位置及插补步长, 并结合测量齿面的数字化处理, 即可得到展成时各联动数控轴的瞬时运动轨迹位置, 如表 2 所示。

表 1 齿轮几何参数

	大轮	小轮
齿数	41	10
偏置距离(mm)	31.8	
旋向	右旋	左旋
外锥距(mm)	101.26	122.26
齿宽(mm)	28	33.53
根锥角(°)	69.18	14.53
节锥角(°)	73.70	15.64
面锥角(°)	74.48	19.55
全齿高(mm)	9.36	9.54

表 2 机床运动参数

X 轴(mm)	Y 轴(mm)	Z 轴(mm)	A 轴(°)	B 轴(°)
69.6800	-66.3211	19.2078	-99.1723	14.2
71.4020	-66.6031	19.2078	-94.0831	14.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
104.4024	-66.1999	19.2078	0	14.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
135.4737	-55.0747	19.2078	87.9966	14.2
136.9894	-54.2102	19.2078	92.4283	14.2

根据齿面展成与检测的运动关系分析及测量模型, 首先建立理论齿面及法矢方程, 见式(1)。运用空间坐标转换技术, 进行理论齿面 H

的数字化处理; 选取测头直径 $\rho = 1.5\text{mm}$ 作测头半径补偿处理, 并根据式(4)得到齿面检测所必需的测头理论运动轨迹坐标; 基于此坐标, 采取点阵式接触测量方法(图 3), 测量定位基准面选取与设计基准一致, 在 JD45+型齿轮测量中心上对试切后的小轮进行实际齿面检测, 获取测头实际运动轨迹坐标 H_c^* 。

采用 JD45+型齿轮测量中心检测数据来验证本文计算方法和实验结果的有效性, 该仪器的精度——齿形示值误差、齿向示值误差以及仪器示值变动性(重复性精度)分别为 $1.6\mu\text{m}$ 、 $1.7\mu\text{m}$ 和 $0.6\mu\text{m}$, 符合国家标准 GB/T 22097-2008 和企业标准 Q/HAD 001-2010。齿面检测及规划流程分别如图 5 和图 6 所示。



图 5 齿面误差测量

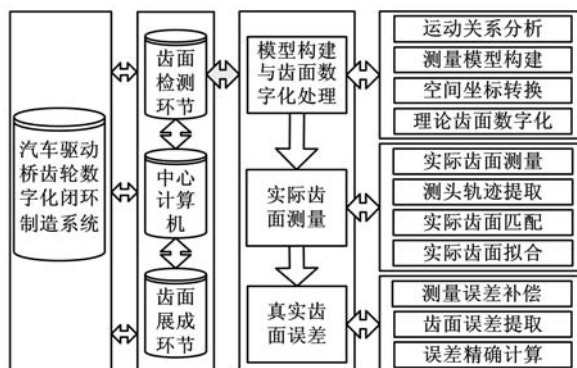


图 6 齿面误差计算流程规划

严格来讲, 实际齿面检测后得到的是测头中心的实际轨迹, 因此实际加工齿面 H^* 的确定可以通过测头半径的第二次补偿处理得到; 另外, 由于汽车齿轮的特殊性和复杂性, 为确保齿面数据处理及修正的准确性, 需要根据加工和检测中的角位移 θ , 利用微分几何原理进行坐标转换, 使得整个轮齿面处于测量前的初始位置, 然后运用优化方法进行齿面的最佳匹配来补偿轮坯安装误差、齿面定位误差及随机性误差对测量结果的影响; 最后进行实际齿面重构得到测头实际轨迹面 H_c^* 。此时, 测头直径 ρ 、机床运动参数 Φ_j 、测头实际轨迹表达 H_c^* 、理论齿面 H 及法矢 n 均完全确定, 进行测量误差补偿处理后并利用非线性方程式(17)即可精确计算齿面误差值, 如图 7 所示。由齿面误差分析可知, 齿面误差越大, 则法矢 n^* 与 n 空间夹角 τ 越大。为了确定测量误差对齿面误差计算的影响大小, 笔者提取了程序运行的中

间变量,得到齿面误差 $\delta = 0.1900\text{mm}$ 处的法矢 n^* 与 n 的夹角 $\tau = 0.025^\circ$,得到 $\Delta\epsilon = 0.47\mu\text{m}$ 。可见,测量误差对精确计算齿面误差产生了一定的影响,需要进行补偿处理以确保计算误差的真实性。

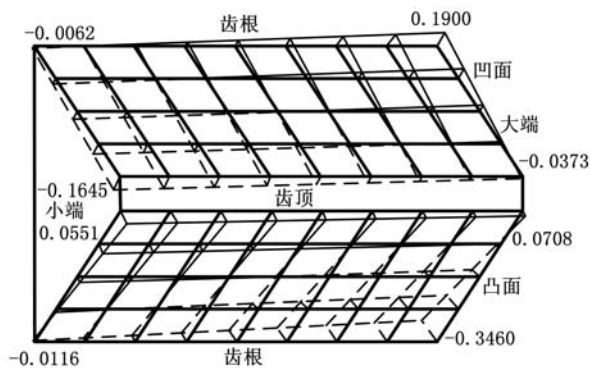


图7 JD45+型测量中心上检测的小轮齿面测量误差(单位:mm)

为了验证齿面误差计算方法的正确性并提高实验结果的可比性,在使用三维测头的 M&M 3525 测量中心上对同一轮坯的同一齿面也进行了测量,测量结果如图 8 所示。

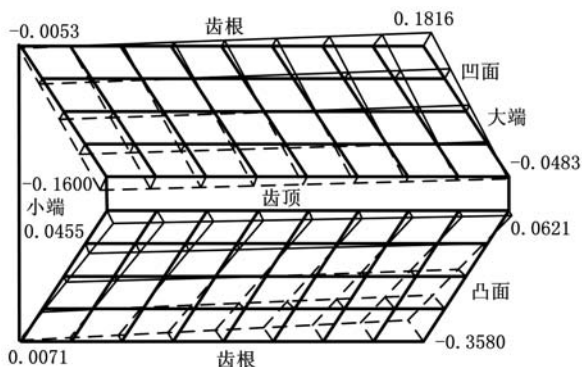


图8 M&M 3525 型测量中心上检测的小轮齿面测量误差(单位:mm)

由图 7 和图 8 的齿面误差拓扑图可以看到,JD45+型测量中心上测得的小齿面测量误差的总体趋势和 M&M3525 型测量中心上测量结果保持一致,从而说明了所构建的测量模型和齿面误差计算方法的正确性。从图中还可以看到,齿面误差最大差值在 0.01mm 以内。究其原因大致有:①三维测头与一维测头的工作原理、测量方法以及在齿面检测过程中对法线方向和测球接触位置等测量误差的补偿处理不同,使得测量数值存在微小差异;②测量过程中测量参考点的选取位置、测量区域大小及定位基准等因素可能导致差异;③测头的球度也是影响测量结果重复性和准确性的重要因素之一。

为了更充分地验证误差计算方法的正确性,对配对的大轮也进行了齿面加工和测量,具体过

程与小轮类似,测量结果如图 9 和图 10 所示。可以看到,大轮测量结果也是一致的,充分表明该模型和计算方法是正确有效的。

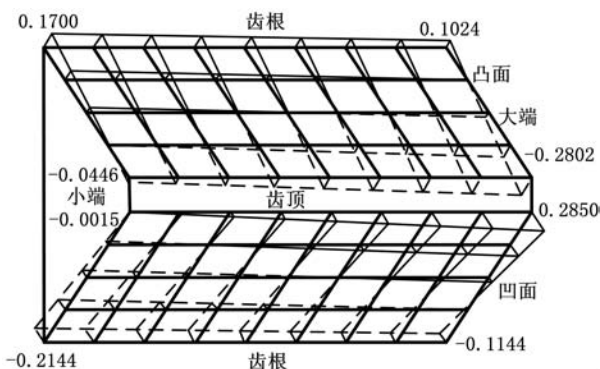


图9 JD45+型测量中心上检测的大轮齿面测量误差(单位:mm)

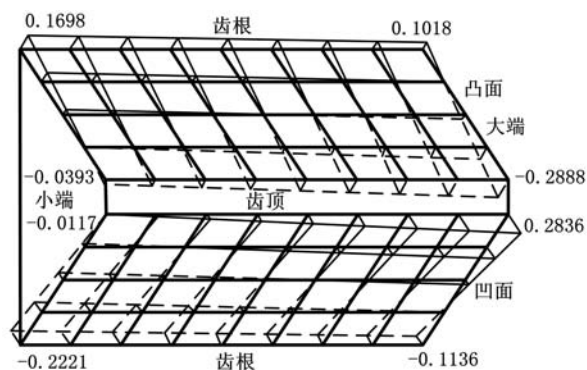


图10 M&M 3525 型测量中心上检测的大轮齿面测量误差(单位:mm)

5 结语

汽车驱动桥齿轮加工测量实验的结果表明本文所提出的齿面误差精确计算方法是切实可行的,同时在汽车齿轮生产中大量的实际应用也证明了该方法的实用性和正确性。该方法不仅为汽车驱动桥齿轮的齿面精度改善及数字化闭环制造生产线的顺利实施提供了技术支持,同时也为国内高品质的奥利康汽车齿轮制造提供了有价值的参考。

参考文献:

- [1] 汪中厚,周晓玲.汽车驱动桥锥齿轮齿面检测与质量控制[J].现代零部件,2005(11):57-61.
- [2] 曾韬.汽车后桥螺旋锥齿轮制造的发展方向与对策[J].世界制造技术与装备市场,2006(6):79-83.
- [3] 石照耀,张万年,林家春.小模数齿轮测量:现状与趋势[J].北京工业大学学报,2008,34(2):113-119.
- [4] 石照耀,费业泰,谢华锟.齿轮测量技术100年一回顾与展望[J].中国工程科学,2003,5(9):13-17.
- [5] 刘慧玲,于水琴,曾韬.数字化闭环加工系统在螺旋

车轮残余应力测试方法研究

丁涛 王广科

安徽工业大学, 马鞍山, 243002

摘要:采用仿真分析的方法研究了火车轮径向锯切过程中锯缝宽度的变化以及锯缝附近踏面上应力/应变的变化规律。分析表明,当锯切深度达到轮辋与辐板连接处时,锯缝附近残余应力的释放已经十分充分,可根据残余应力的释放情况计算踏面上残余应力的大小。按照径向锯切方法,在锯缝附近粘贴应变片,径向锯切到轮辋与辐板连接圆弧处时停止锯切,依据应变片记录的应变值可计算踏面上的残余应力。

关键词:火车轮;残余应力;残余应力测试;仿真分析

中图分类号:U260.331.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.12.025

Research on Residual Stress Measurement of Railway Wheel

Ding Tao Wang Guangke

Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui, 243002

Abstract: With the help of simulation analysis method, the change laws of saw kerf width and stress/strain near the kerf were studied when radial saw cutting. The analyses show that when the saw cutting depth reaches the joint of rim and plate, the release of residual stress is sufficient enough to calculate the residual stress on the tread based on release information of residual stress. On the basis of the radial saw cutting method, strain gauges were pasted near the kerf and record the strain change when saw cutting. The residual stress was calculated according to the strain change information.

Key words: railway wheel; residual stress; residual stress test; simulation analysis

0 引言

火车轮踏面残余压应力的大小及其沿轮辋的

分布是评价车轮质量的一个重要指标。通过热处理方法使车轮踏面产生残余周向压应力,能够阻碍裂纹的形成及发展,从而延缓疲劳裂纹的形成,这对于提高车轮的使用寿命,改善车轮的运行性能十分有利。文献[1-3]研究了车轮制造过程中

收稿日期:2011-04-07

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助重点项目(2008AA030703)

锥齿轮制造中的应用[J]. 机械工程师, 2008(4): 103-105.

[6] 郭晓东,张明德,张卫青,等. 锥齿轮齿距及齿形偏差测量与分析方法[J]. 工具技术, 2009, 43(11): 80-83.

[7] 让·德福,樊奇. 格里森专家制造系统(GEMS)开创弧齿锥齿轮及双曲面齿轮数字化制造新纪元[J]. 世界制造技术与装备市场, 2005(4): 87-93.

[8] Tobisawa K, Kano M, Saiki K, et al. Real Tooth Contact Analysis of Loaded Hypoid Gear Directly Using Measured Tooth Surfaces[J]. Review of Automotive Engineering, 2006, 27(2): 317-324.

[9] Litvin F L, Zhang Y, Kieffer J, et al. Identification and Minimization of Deviations of Real Gear Tooth Surfaces[J]. Journal of Mechanical Design, ASME, 1991, 113(1): 55-62.

[10] Litvin F L, Kuan C, Wang J C, et al. Minimization of Deviations of Gear Real Tooth Surfaces Determined by Coordinate Measurements[J]. Journal of Mechanical Design, ASME, 1993, 115(4): 995-1001.

[11] 李天兴,邓效忠,魏冰阳. 基于一维测头准双曲面齿轮齿面偏差的测量[J]. 中国机械工程, 2007, 18(8): 958-962.

[12] 曾韬. 螺旋锥齿轮设计与加工[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.

[13] Litvin F L, Fuentes A. Gear Geometry and Applied Theory [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

[14] 曹雪梅,王军,张海英. 弧齿锥齿轮齿面误差检测与实验验证[J]. 中国机械工程, 2009, 20(15): 1799-1801.

[15] 石照耀,谢华锟,费业泰. 复杂曲面测量模式与关键技术[J]. 工具技术, 2000, 34(11): 31-34.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 邓效忠,男,1957年生。河南科技大学机电工程学院院长、教授、博士研究生导师。研究方向为机械传动理论及先进制造技术。发表论文100余篇。李天兴,男,1975年生。河南科技大学机电工程学院讲师,西北工业大学机电学院博士研究生。李聚波,男,1978年生。江苏大学机械工程学院博士。周广才,男,1962年生。哈尔滨精达测量仪器有限公司董事长。