DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904708

基于激光三角法的汽车同步带齿形轮廓参数测量*

史尧臣[1],周 宏[2],唐武生[1],李占国[2,3],赵希禄[4]

(1. 长春大学机械与车辆工程学院 长春 130022; 2. 长春理工大学机电工程学院 长春 130022;
3. 长春工业大学机电工程学院 长春 130021; 4. 琦玉工业大学工学部 深谷 3690293)

摘 要:针对目前汽车同步带齿形轮廓参数测量过程中存在的测量效率低和人为因素影响大等问题,提出了一种基于激光三角法的汽车同步带齿形轮廓参数非接触式测量方案,并设计了相应的汽车同步带齿形测量装置。该装置通过激光位移传感器与汽车同步带传动速度的配合,对汽车同步带齿形轮廓数据进行采集,并提出一种改进后的分割算法对采集到的齿形截面轮廓数据进行特征分割。通过对分割后齿形数据的拟合,实现了齿形轮廓曲线特征的分段重构并获得被测带齿的轮廓参数。基于激光三角法对汽车同步带齿形轮廓参数进行测量,实现了对齿形轮廓参数自动测量提高了测量效率避免了人为因素的影响,保证了测量精度,有望在汽车同步带实际生产中得到应用。

关键词: 汽车同步带;激光三角法;分割算法;轮廓拟合;齿形测量

中图分类号: TH-39 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.4020

Profile parameters measurement of automotive synchronous belt based on laser triangulation method

Shi Yaochen[1], Zhou Hong[2], Tang Wusheng[1], Li Zhanguo[2,3], Zhao Xilu[4]

(*1.School of Mechanical and Vehicle Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China;*
2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
3.School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130022, China;
4.Department of Engineering, Saitama Institute of Technology, Saitama 3690293, Japan)

Abstract: To measure profile parameters of automotive synchronous belt, the problems include low efficiency and the influence of human factors. This paper proposes a non-contact measurement scheme based on laser triangulation. The measurement device of automobile synchronous belt tooth profile is designed. The profile data acquisition of the synchronous belt is realized by the laser displacement sensor coincidence with the transmission speed of the synchronous belt. The improved segmentation algorithm is proposed to achieve feature segmentation of the collected profile data. By fitting these data after segmentation, the profile curve features are reconstructed and the profile parameters of the measured teeth are obtained. Based on the laser triangulation method, the profile parameters of synchronous belt are measured. The automatic measurement of profile parameters of automobile synchronous belt is realized, which can enhance the measurement efficiency and avoid the influence of human factors. The measurement accuracy is also ensured. It is expected that this method can be applied in the practical production of synchronous belt.

Keywords: automotive synchronous belt; laser triangulation; segmentation algorithm; contour fitting; tooth profile measurement

收稿日期:2019-01-29 Received Date:2019-01-29

* 基金项目:国家教育部春晖计划(Z2017028)、吉林省科技厅优秀青年人才基金(20190103009JH)、吉林省发改委产业技术开发专项(2019C040-1)、吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20180942KJ)、长春市科技局地院合作专项(18DY031)资助

0　引　　言

汽车同步带是依靠带齿与带轮轮齿啮合传递运动和动力[1],带齿齿形尺寸精度直接影响带传动过程中的载荷分布和啮合干涉,齿形尺寸偏差会导致传动过程中齿面磨损,影响传动平稳性和带的使用寿命并产生较大的冲击噪声[2]。带在生产过程中由于是复合性橡胶材料通过模具硫化加工成型,因此模具的磨损、压力和成型温度等会导致成型后的带齿齿面存在一定的尺寸偏差,成型过程中的模具与带齿包布之间的气泡和杂质等会导致带齿齿面存在明显凹坑缺陷[3]。目前国内胶带生产企业对带齿形进行检查时依靠投影测量方法进行抽检[4],带齿型投影检测设备如图 1 所示,该方法在检测前需对同步带进行切片处理,只能检测单一齿侧面,检测效率低、人为影响因素大。同时难以检测带宽方向上的表面凹坑等缺陷。

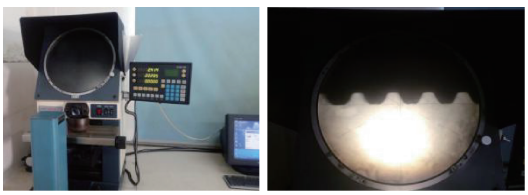


图 1　同步带带齿投影检测设备

Fig.1　Synchronized belt tooth projection detection equipment

激光三角法由于检测速度快,检测效率高,被逐渐应用在齿轮齿型、螺栓螺纹等常见工业零件的检测技术中。宋丽梅等[5]根据激光三角法检原理研发出齿轮齿向检测系统,该系统对齿轮螺旋线测量结果与金量测量系统检测结果误差仅为 2 μm,能够满足工业中齿轮高精度无损检测要求。孙兴伟等[6]结合激光三角法原理设计了螺纹测量方案,通过对检测到的螺纹轮廓数据点进行滤波处理及分段拟合,实现了螺纹参数的自动化测量,误差不超过 0.017 mm。訾豪等[7]将激光三角法应用在蜗轮的齿型和齿距偏差,并完成了检测装置构建,理论测量精度为 0.2 μm,通过对蜗轮的齿形、齿距偏差算法的设计,实现了高精度、快速测量。

随着汽车同步带传动性能要求的不断提高,对带的齿形检测效率和精度也提出了更高的要求,本文利用激光三角法[8-10]设计了汽车同步带带齿自动检测装置,采用改进的斜率差分算法对测量数据进行分割,通过最小二乘拟合法得到同步带带齿的齿根和齿顶圆角、齿宽、齿高等轮廓参数。据国内相关文献检索结果表明,这是国内首次利用激光三角法进行同步带齿形快速检测的相关研究,为汽车同步带加工精度和传动平稳性的提高提供了检测基础[11-13]。

1　激光三角法检测原理

激光三角法是光电非接触检测领域中常用的测量方法,被广泛应用在位置、距离及轮廓测量方面[15],因其在测量时激光器发射的入射光线与被测物体表面形成的反射光线会构成相应的三角形,故被称为激光三角法[16-19]。激光三角法的检测系统主要由激光发射器、聚光透镜、成像透镜及线阵 CCD 光敏面构成,直射式激光三角法入射激光与被测表面垂直光路结构设计简单、放大倍数高,更适用与工业零件轮廓的测量,其测量原理如图 2 所示[20-21]。

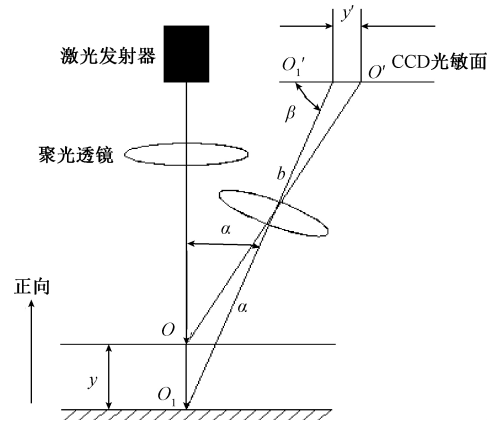


图 2　直射式激光三角法测量原理

Fig.2　Measure principle of direct laser triangulation

如图 2 所示,激光发射器发射出的激光在聚光透镜的汇聚作用下沿垂直于参考平面的方向入射到被测物体上交点为 O,与参考平面交点为 O_1,点 O 处的漫反射光通过成像透镜汇聚在线阵 CCD 光敏面上形成像点 O',点 O_1 在光敏感面上形成像点 O'_1,光路系统中入射激光束与反射光束之间所成夹角为 α,反射光束与线阵 CCD 光敏面之间所成夹角为 β,O_1 点与成像透镜之间的距离为 a(即:物距),O'_1点与成像之间的距离为 b(即:像距),O'与 O'_1点之间的距离 y'可通过光电信号转换后直接得到,故根据三角形相似原理可知 O 点到 O_1 点的真实距离 y 满足函数关系式:

$$y = \frac{ax\sin\beta}{b\sin\alpha + y'\sin(\alpha+\beta)} \tag{1}$$

通过式(1)对被测轮廓上的点逐个进行求取,即可由数据变化情况描述出轮廓形状的变化情况。

2　汽车同步带齿型参数及测量方案

2.1　汽车同步带齿形参数

ZA 型汽车同步带由于结构简单,加工方便,是目前汽

车正时系统传动中广泛应用的同步带类型，文献[14]中ZA型汽车同步带齿型结构如图3所示，主要的结构参数包括齿顶圆角 r_a、齿根圆角 r_r、齿形角 β、齿高 h_t 等，其具体尺寸如表1所示。由汽车同步带齿型结构可以看出带齿主要由齿底和齿顶处的直线、齿面斜线以及齿根齿顶处的圆角组成。其中齿根、齿顶和齿面是构成齿型的主要图元，直接影响传动性能的齿高、齿宽等参数，即由这些主要图元组成标准齿廓中齿底和齿顶的斜率为0，两侧齿面的斜率为±2.747 4；齿根齿顶圆角在齿廓中主要起过渡作用，可减小齿根处的应力集中并降低模具加工难度，属于次要图元，齿根齿顶圆角半径均为0.51 mm，斜率为0.7。

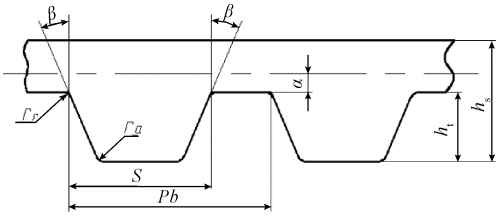


图3 ZA型汽车同步带齿形结构

Fig.3 Tooth profile of ZA type synchronized belt

表1 ZA型汽车同步带齿形参数

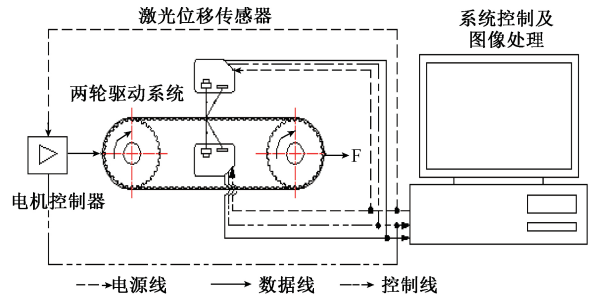
Table 1 Tooth profile parameters of ZA type synchronous belt

名称	代号	公称尺寸	名称	代号	公称尺寸
齿根圆角半径/mm	r_r	0.51	齿顶圆角半径/mm	r_a	0.51
齿形角/(°)	2β	40	齿高/mm	h_t	1.91
带高/mm	h_s	4.1	齿宽/mm	S	4.65

2.2 汽车同步带齿形测量装置

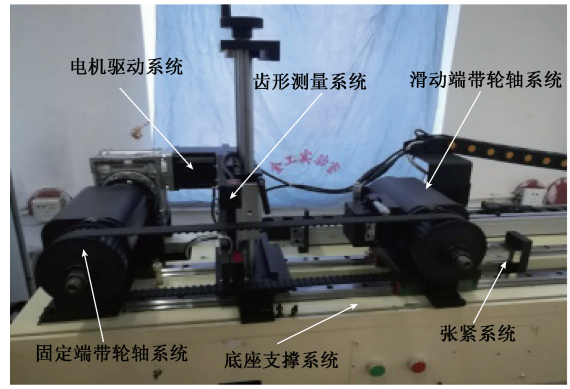
基于激光三角法设计的汽车同步带齿形检测系统基本原理如图4(a)所示，装置齿形测量结构如图4(b)所示，主要由固定端带轮轴系统、电机驱动系统、齿形测量系统、滑动端带轮轴系统、底座支撑系统和张紧系统等组成。固定端带轮轴系统和滑动端带轮轴系统构成两轮传动系统，其中滑动端轴承座位置可根据被测同步带中心距的不同对进行调节，并与张紧系统相连实现对同步带的张紧；本装置对同步带的张紧主要是通过丝杠调节滑动端带轮轴系统位置进行加载，并通过拉力传感器进行控制张紧力大小。

测量时通过丝杠调节带的张紧力到合适大小，通过伺服电机驱动两轮传动系统使带进入平稳运动状态，通过激光位移传感器以采样频率 f 测量齿面和带背的位移参数，以齿面测量起始激光光斑中心为原点O，沿带直线运动方向为 x 方向，垂直于带运动向为 y 方向，随着同步带的直线运动依次可以采集到齿面上的一系列点 $P_1(x_1, y_1)$，$P_2(x_2, y_2)$，…，$P_i(x_i, y_i)$，设同步带的线速度为 v，在伺服电机的控制下相邻点沿 x 方向距离相同均为 v/f。为确保齿形测量时同步带处于低速平稳运动状态，装置对汽车同步带实际驱动转速为1 r/min，当实验用带轮齿数为32时带移动的线速度 v=5.08 mm/s；激光位移传感器采样频率 f=100 Hz，测量精度可达±0.001 mm，采样中心距离为40 mm，测量范围为±10 mm。



(a) 汽车同步带齿形检测系统原理

(a) Principle diagram of tooth profile detection system for synchronized belt



(b) 汽车同步带齿形测量装置结构

(b) Structure of tooth profile measurement device for synchronous belt

图4 汽车同步带齿形测量系统原理及结构

Fig.4 Principle and structure of synchronous belt tooth profile measurement system

3 汽车同步带齿型轮廓参数识别

对汽车同步带测量得到的轮廓数据点进行整体拟合效率低，速度慢，参数提取困难不适合快速检测。因此需要进行测量数据分割，常见的分割方法有斜率差分和曲率差分等，由于同步带带齿齿面为尼龙包布，表面粗糙，带齿尺寸较小，采用曲率差分算法难以准确的进行测量数据分割。本文利用同步带的斜率变化规律找出齿面与齿顶齿根圆角特征点，通过改进的斜率差分算法对齿形轮廓数据进行分割，将复杂的齿形轮廓数据点分解为简单的几何图元数据，有效降低了齿形轮廓的拟合难度，测量轮廓数据点的分割流程如图5所示。

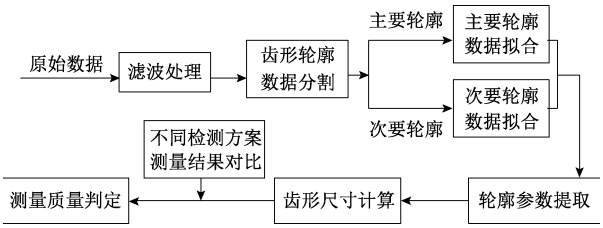


图 5　汽车同步带齿形轮廓参数识别流程

Fig.5　Flowchart of identifying profile parameters of synchronous belt

3.1　基于采样频率的斜率差分数据分割改进算法

设 $P_1(x_1,y_1)$,$P_2(x_2,y_2)$,$P_3(x_3,y_3)$,…,$P_n(x_n,y_n)$,$(i=1,2,3,\cdots,n)$ 为测量得到的齿型轮廓点,如图 6 所示,则可由式(2)和(3)求得相邻点的斜率分别为:k_1,k_2,k_3,…,k_i,$(i=1,2,3,\cdots,n)$

$$k_i=\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}(i=1,2,3,\cdots,n) \tag{2}$$

$$k_{i+1}=\frac{y_{i+2}-y_{i+1}}{x_{i+2}-x_{i+1}}(i=1,2,3,\cdots,n) \tag{3}$$

记相邻 k 的差值的绝对值为齿型斜率差:

$$F=|k_{(i+1)}-k_{(i)}| \tag{4}$$

由于 ZA 型汽车同步带标准齿形齿根圆角两端点连线的斜率为 0.7,齿面斜线斜率为±2.747 4,理论上汽车同步带齿型斜率差最大值位于齿面斜线与齿根和齿顶的圆弧交点处,故为分割测量数据可先通过在一个齿形的轮廓数据内找到斜率差最大值来实现。由于同步带齿型为左右对称结构,因此也可以简化为半个齿型内的斜率差最大值的求解。由于同步带齿面为包布材料粗糙,因此测量时由于包布表面结构会导致齿面与齿根、齿顶处圆角斜率值存在一定偏差,所以在半个齿形范围内应求出两个极大值来提取齿面与齿根、齿顶处圆角上的交点。

令 $F'(k_i)=0 \quad i\in(0,p_b*f/2v)$ (5)

式中:P_b 为一个带齿的节距;f 为传感器采样频率;v 为带直线移动速度。

由式(5)求出最大值点 P_{max1},将其从点序列中提取出,再由式(5)求出剩余点中的最大值点 P_{max2},则 P_{max1}、P_{max2} 即齿根齿顶圆弧与齿面斜线的两个交点。斜率差及提取到交点如图 7 所示。针对后续对齿形圆角数据的提取,应区分 $P_{max1}(x_1,y_1)$、$P_{max2}(x_2,y_2)$ 对应齿根圆角还是齿顶圆角位置,若 $y_1-y_2>0$,则 P_{max1} 为齿根圆角,否则相反。两交点 P_1 P_2 之间的线段为齿面斜线,提取出的齿面轮廓点如图 8 所示,提取出齿面轮廓点后需进一步将齿根齿顶圆角轮廓点分割出才能得到齿顶和齿顶轮廓直线,为了快速分割齿顶和齿顶圆弧轮廓,本文提出了一种基于采样频率的斜率差分改进算法。由于齿根、齿顶圆弧弧长在 x 方向投影为 L,在激光采样频率为 f 的条件下可得弧长 L 上的轮廓点数量为:

$$N=L\times f/v \tag{6}$$

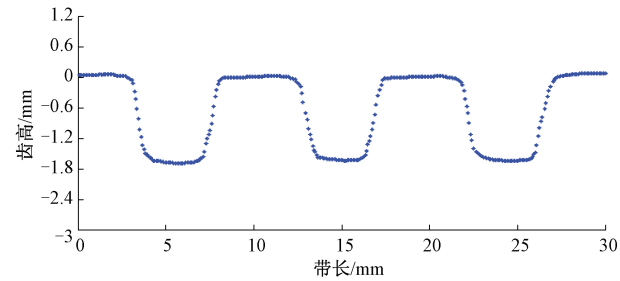


图 6　实际齿形轮廓数据采集结果

Fig.6　Acquisition results of actual tooth profile data

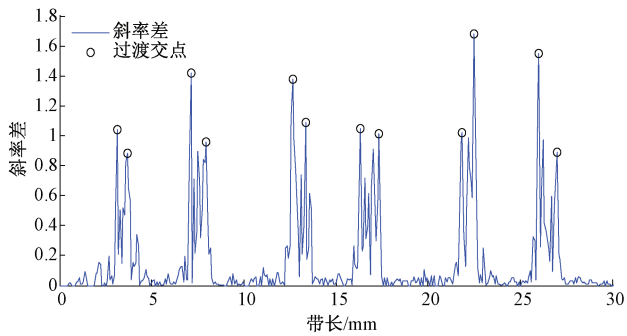


图 7　斜率差分及交点提取结果

Fig.7　Slope difference and intersection extraction results

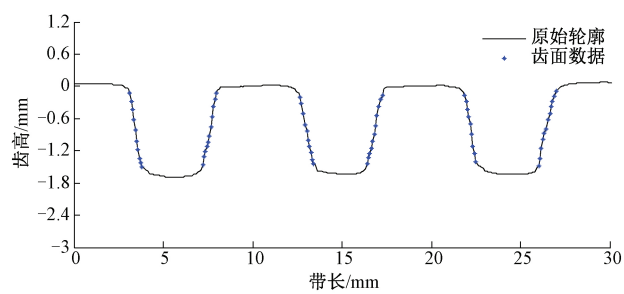


图 8　齿面数据分离结果

Fig.8　Separation results of tooth surface data

为了实现快速分割,若 $y_1-y_2>0$ 可以直接判断齿根圆与齿面交点的前 N 个点为齿根圆角,齿顶圆与齿面交点的后 N 个点为齿顶圆角;否则,齿根圆与齿面交点的后 N 个点为齿根圆角,齿顶圆与齿面交点的前 N 个点为齿顶圆角。识别得到的齿根齿顶圆角轮廓点如图 9(a)所示,则剩余轮廓点即为齿顶和齿根轮廓数据点,如图 9(b)所示。通过 y 方向坐标值即可区分齿根齿顶数据。

3.2　测量结果拟合方法

通过数据分割后得到各个图元轮廓数据后,还需要对这些轮廓数据进行拟合才能得到轮廓参数和齿型参数。ZA 型汽车同步带齿形数据中齿顶、齿底和齿面为直

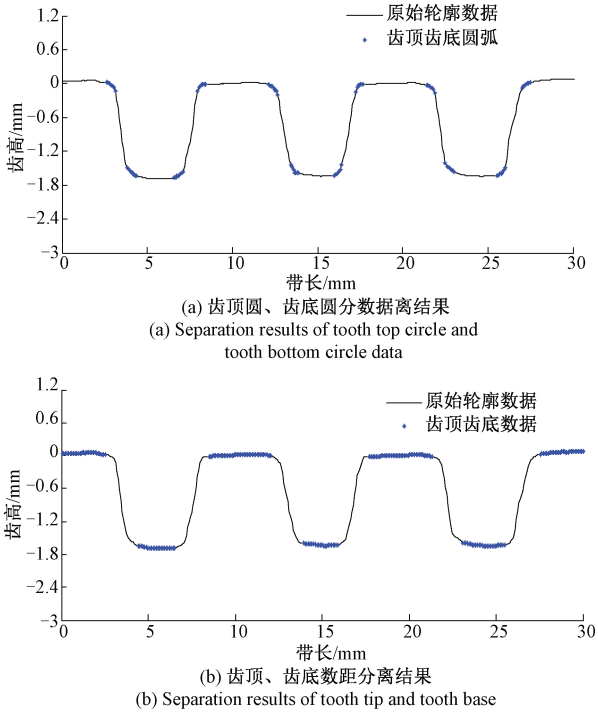


图 9 齿形数据离结果

Fig.9 Separation results of tooth shape data

线,方程可写为:

$$y = k \cdot x + b \tag{7}$$

式中:k 为直线的斜率;b 为截距。二者数值的大小由被拟合直线与 x 轴夹角和直线所处的位置决定。

齿顶圆角与齿根圆角均为圆弧,方程为:

$$(x - p)^2 + (y - q)^2 = r^2 \tag{8}$$

式中:(p,q) 为圆心坐标;r 为被测圆角半径。

由于最小二乘法是通过求解最小误差平方和来获取数据最佳匹配函数,能够快速的进行直线和圆弧拟合。取数据组 $(x_j,y_i)(j=1,2,3,\cdots,m)$,求该组数据满足系数为 $a_i(i=0,1,2,\cdots,n)$ 且次数不超高 $m-1$ 的多项式,根据最小二乘法求解原理,引入函数 $F(a_0,a_1,\cdots,a_n)$ 满足式(9):

$$F(a_0,a_1,\cdots,a_n) = \sum_{j=1}^{m}[P(x_j) - y_j]^2 = \sum_{j=1}^{m}\left(\sum_{i=0}^{n} a_i x_j^{\,i} - y_j\right)^2 \tag{9}$$

当 $F(a_0,a_1,\cdots,a_n)$ 为最小值时,得到的多项式 $P(x) = \sum_{j=0}^{n} a_j x^i (n \leqslant m-1)$ 为最佳拟合多项式,故对函数 $F(a_0,a_1,\cdots,a_n)$ 求偏导得到 $n+1$ 个方程:

$$\frac{\partial F}{\partial a_k} = 2\sum_{i=1}^{m}\left(\sum_{j=0}^{n} a_j x_j^{\,i} - y_i\right) x_i^k = 2\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n} a_j x_i^{j+k} - \sum_{i=1}^{m} y_i x_i^k\right) = 0 \tag{10}$$

通过对(10)式中 $n+1$ 个方程联立求解即可得出 $a_i(i=1,2,3,\cdots,n)$,进而得到的拟合多项式为:

$$P(x) = a_0 + a_1 x + \cdots + a_n x^n (n < m) \tag{11}$$

采用该方法分别对 ZA 齿形的齿面直线、齿顶圆角、齿根圆角、齿顶及齿底进行拟合,拟合结果与原始数值对比如图 10 所示,通过拟合得到的直线和圆弧的轮廓参数如表 2、3 所示,计算得到的同步带齿型参数如表 4 所示。

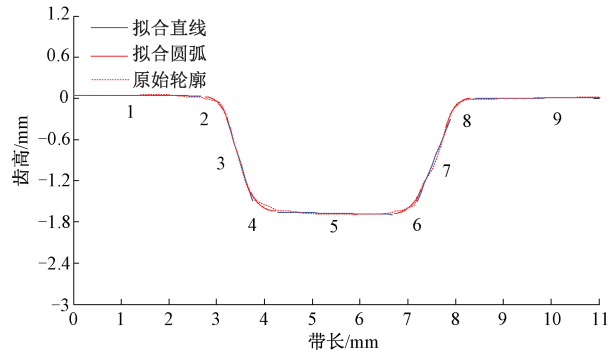


图 10 拟合结果与原始图形对比

Fig.10 Comparison of fitting results with the original figure

表 2 拟合直线参数表

Table 2 Fitting line parameters (mm)

图上代号	名称	拟合模型 k	拟合模型 b
1	齿底	-0.002 7	0.076 4
3	左侧齿面	-2.235 1	6.882 7
5	齿顶	-0.014 5	-1.595 3
7	右侧齿面	2.129 0	-17.028 4
9	齿底	0.007 6	-0.070 4

表 3 拟合圆弧参数表

Table 3 Parameters of fitting arc (mm)

图上代号	名称	圆心坐标(x_0,y_0)	半径 R
2	左侧齿根圆	(2.758 3,-0.456 2)	0.532 5
4	左侧齿顶圆	(4.252 2,-0.965 6)	0.629 7
6	右侧齿根圆	(6.719 0,-0.514 8)	0.590 4
8	右侧齿顶圆	(8.296 2,-1.079 1)	0.516 2

4 测量结果分析

采用研制的汽车同步带齿形测量装置对带宽为 19 mm齿数为 99 的 ZA 型汽车同步带进行测量,激光位移传感器采样频率为 100 Hz,试验用带轮齿数为 32,带轮转速为 1 r/min,带移动的线速度为 5.08 mm/s,完成整根带上所有带齿齿形测量所需时间约为 186 s,装置采

表 4　测得带齿参数

Table 4　Measured parameters with teeth

名称	代号	测得尺寸	名称	代号	测得尺寸
左侧齿根圆半径/mm	r_r	0.532 5	右侧齿根圆半径/mm	r_r	0.590 4
左侧齿顶圆半径/mm	r_a	0.629 7	右侧齿顶圆半径/mm	r_a	0.516 2
齿形角/度	2β	49	齿高/mm	h_t	1.738 2
齿宽/mm	S	4.850 7			

集到的去噪后的带齿轮廓如图 11 所示。为判定装置系统误差对测量结果的影响,取测得的 12 个连续带齿齿高 h_t,其尺寸分布如图 12 所示,均值为 1.708 3 mm,最大齿高值为 1.743 2 mm,最小齿高值为 1.692 9 mm,齿高偏差为 0.050 3<0.1 mm,满足齿高测量要求。

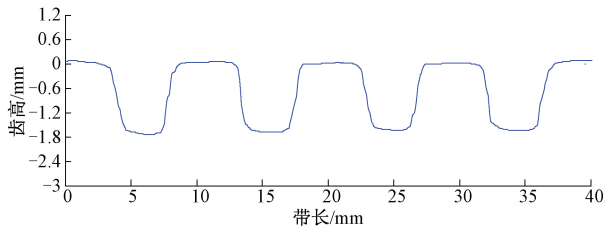


图 11　齿形测量装置采集到的齿形轮廓

Fig.11　Tooth profile acquired by the tooth profile measurement device

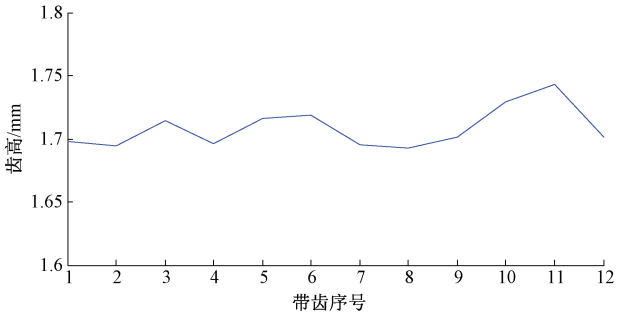


图 12　齿高 h_t 分布

Fig.12　Distribution of tooth height h_t

为了判定本文所设计的汽车同步带齿形测量装置测量结果的准确性和快速性,将测量结果与超景深显微镜测量结果进行对比分析。图 13 所示为德国莱卡 DVM2500 超景深显微镜测量得到的单一带齿 3D 结构和截面轮廓数据。测量得到的参数与汽车同步带齿形测量得的齿形参数进行对比结果如表 5 结果。

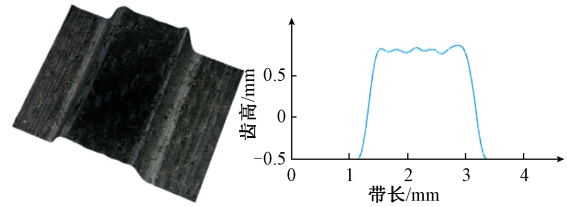


图 13　智能 3D 数码显微镜及测量原理

Fig.13　Intelligent 3D digital microscope and measurement

表 5　齿形测量结果对比

Table 5　Comparison of static and dynamic tooth profile measurement results

测量方法	超景深显微镜	齿形测量装置	偏差
两侧齿根圆角半径 r_r/mm	0.548 2	0.532 5	−0.015 7
	0.598 8	0.590 4	−0.008 4
两侧齿顶圆角半径 r_a/mm	0.581 1	0.629 7	0.048 6
	0.532 7	0.516 2	−0.016 5
齿形角 2β/(°)	51	49	−2
齿高 h_t/mm	1.751 3	1.738 2	−0.013 1
齿宽 S/ mm	4.828 0	4.850 7	0.022 7

从表 5 可以看出采用激光三角法测量结果与商用超景深显微镜静态测量结果基本一致,直线轮廓检测偏差小于 0.03 mm,圆弧轮廓检测偏差小于 0.05 mm,误差较小,在快速测量的同时保证了测量精度。

5　结　　论

针对汽车同步带检测效率低、速度慢的问题,基于激光三角法设计了汽车同步带齿形测量装置,针对 ZA 型汽车同步带齿形特点,通过分析齿形结构提出了一种基于采样频率的斜率差分数据分割改进算法,将带齿齿形分为直线和圆弧等基本图元结构,通过最小二乘拟合得到了轮廓数据和齿型参数,通过对同步带齿形检测对比试验,结果表明所提出的测量方法直线检测误差小于 0.03 mm,圆弧误差小于 0.05 mm,能够快速准确的进行汽车同步带的带齿齿形检测。

参考文献

[1]　曹忠亮,胡清明,杨英东,等.基于 RecurDyn 的汽车同步带传动性能研究[J].机械强度,2017,39(3):652-656.

CAO ZH L, HU Q M, YANG Y D, et al. Research on the transmission characteristic of automotive synchronous belt based on recurdyn[J]. Mechanical strength, 2017, 39(3): 652-656.

[2] 史尧臣,李占国,李水清,等.汽车同步带传动噪声仿真分析与试验研究[J].机械传动,2016,40(9):145-149.
SHI Y CH, LI ZH G, LI SH Q, et al. Simulation analysis and experimental study of automobile synchronous belt transmission noise [J]. Mechanical Transmission, 2016,40(9): 145-149.

[3] 吴贻珍.传动带新产品研究进展[J].机械传动,2013,37(8): 4-9.
WU Y ZH. Research progress of new products of transmission belt [J]. Mechanical Transmission, 2013, 37(8): 4-9.

[4] 秦书安,周玉杰,周鹏."带"动标准,"输送"时代之音——改革开放 40 周年带轮与带标准化工作发展历程[J].机械工业标准化与质量,2018(11):13-18,34.
QIN SH AN, ZHOU Y J, ZHOU P. "Belt" moving standards, "delivery" voice of the times — reform and opening up 40 years of belt wheel and belt standardization work development history [J]. Mechanical Industry Standardization and Quality, 2018(11):13-18,34.

[5] 宋丽梅,覃名翠,杨燕罡,等.激光视觉方法用于检测齿轮加工误差[J].光电工程,2015,42(1):1-5.
SONG L M, QIN M C, YANG Y G, et al. The laser vision method is used to detect the machining errors of gears[J]. Photoelectric Engineering, 2015,42(1):1-5.

[6] 孙兴伟,张静,王可,等.基于激光三角法的螺纹型面信息采集技术研究[J].机床与液压.2015,43(23):80-82.
SUN X W, ZHANG J, WANG K, et al. Research on information acquisition technology of thread profile based on laser triangulation [J]. Machine Tools and Hydraulics, 2015,43(23):80-82.

[7] 訾豪,彭云,储月刚,等.基于激光位移传感器的蜗轮蜗杆精密测量[J].机械传动,2019,43(5):84-90.
ZI H, PENG Y, CHU Y G, et al. Precision measurement of worm gear based on laser displacement sensor [J]. Mechanical Transmission, 2019,43(5):84-90.

[8] 王志永,刘威,曾韬,等.螺旋锥齿轮大轮齿形误差的在机测量[J].仪器仪表学报,2015,36(5):1047-1053.
WANG ZH Y, LIU W, ZENG T, et al. Measurement of tooth profile error of spiral bevel gear in machine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 1047-1053.

[9] 孙兴伟,于欣玉,董祉序,等.激光三角法高精度测量模型[J].红外与激光工程,2018,47(9):154-159.
SUN X W, YU X Y, DONG ZH X, et al. High precision measurement model of laser triangulation method [J]. Journal of Infrared and Laser Engineering, 2018,47(9): 154-159.

[10] 史红梅,张继科.基于激光三角测量原理的轨距检测系统研究[J].仪器仪表学报,2013,34(9):1934-1940.
SHI H M, ZHANG J K. Research on track measuring system based on laser triangulation principle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013,34(9):1934-1940.

[11] 崔玉国,刘康,惠相君,等.平面式大型微结构表面的螺旋扫描测量[J].仪器仪表学报.2018,39(9):91-98.
CUI Y G, LIU K, HUI X J, et al. Helical scanning measurement of large planar microstructures[J]. Journal of Instrumentation, 2018,39(9):91-98.

[12] 彭希锋,陈爽,李海星,等.基于激光位移传感器的面角度测量技术研究[J].仪器仪表学报,2017,38(11): 2735-2743.
PENG X F, CHEN SH, LI H X, et al. Research on surface angle measurement technology based on laser displacement sensor [J]. Journal of Instrumentation, 2017,38(11):2735-2743.

[13] HUANG Y G, LIN Y CH, WANG W, et al. Laser Autocollimation measurement of small angle based on cross correlation [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2010,8(2): 120-125.

[14] 中国机械工业联合会. 同步带传动 汽车同步带:GB/T 12734-2017 [S]. 北京:中国质检出版社.
CHINA MACHINERY INDUSTRY FEDERATION. Synchronous belt drives-automotive synchronous belts: GB / T 12734- 2017 [S]. Beijing: China Quality Inspection Publishing House.

[15] 王晓嘉,高隽,王磊.激光三角法综述[J].仪器仪表学报,2004,25(S2):601-604,608.
WANG X J, GAO J, WANG L. Overview of laser triangulation [J], Journal of Instrumentation, 2004, 25(S2): 601-604,608.

[16] 王可,逯海卿,孙兴伟.基于激光三角法的自由曲面零件测量[J].机床与液压,2015,43(23):92-94.
WANG K, LU H Q, SUN X W. Free surface measurement based on laser triangulation[J], Machine Tools and Hydraulics, 2015,43(23):92-94.

[17] 王玉田,刘辉,张玉燕,等.基于光源扫描的三角法位移测量方法[J].传感器与微系统,2007,26(10): 106-108.
WANG Y T, LIU H, ZHANG Y Y, et al. Triangulation displacement measurement method based on light source

scanning[J], Sensors and Microsystems, 2007,26(10): 106-108.

[18] 张欣婷,亢磊,安志勇,等.改进型激光三角测头设计[J].红外与激光工程,2018,47(10):305-309.
ZHANG X T, KANG L, AN ZH Y, et al. Design of improved laser triangle probe[J]. Journal of Infrared and laser Engineering,2018,47(10):305-309.

[19] 孙彬,李兵.一种量化的激光位移传感器倾角误差补偿模型[J].仪器仪表学报,2015,36(5):996-1004.
SUN B, LI B. A quantified compensation model for inclination error of laser displacement sensor is presented[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(5):996-1004.

[20] 刘明,曾理江.透射型激光三角法测量蜻蜓翅膀形状[J].仪器仪表学报,2003,24(S1):95-97.
LIU M, ZENG L J. The shape of dragonfly wings was measured by transmission laser triangulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2003,24(S1):95-97.

[21] 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.
ZHAN B H, GAO F, LI Y, et al. Research on in-machine measuring method of in-volute tooth grinding accuracy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(6): 48-55.

作者简介

史尧臣,2008 年于长春大学获得学士学位,2011 年于长春理工大学获得硕士学位,2016 年于长春理工大学获得博士学位,现为长春大学讲师,主要研究方向为现代机械设计及理论。

E-mail: 250793721@qq.com

Shi Yaochen received his B. Sc. degree from Changchun University in 2008, received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Changchun university of science and technology in 2011 and 2016, respectively. He is currently a lecture at Changchun University. His main research interest is the modern mechanical design method and theory.

周宏(通信作者),2014 年于长春大学获得学士学位,现为长春理工大学硕士研究生,主要研究方向为现代机械设计方法及理论。

E-mail: 1534931124@qq.com

Zhou Hong (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Changchun University in 2014. She is currently a M. Sc. student at Changchun University of Science and Technology. Her main research interest is the modern mechanical design method and theory.