

文章编号 1004-924X(2007)10-1553-05

双盘式渐开线测量仪测点位置调整方式

姜志峰¹, 王立鼎^{1,2}, 张玉玲³, 马勇¹, 王晓东^{1,2}

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;
2. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116023;
3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:分析了双盘式渐开线测量仪中测点位置偏差对渐开线齿形测量的影响,探讨了高精度调整测点位置的两种方法:试验调整法与误差补偿调整法。试验调整法是根据测点偏离导轨平面测量渐开线齿形时,测量结果中齿形角小于实际值的原理,调整测头处于不同位置并测量渐开线齿形,齿形角最大的测量曲线对应的测点位置即为最佳位置。误差补偿调整法是在测点处于高于导轨平面的两个位置时,分别测量同一渐开线齿形,通过对测点偏移量逐次试值,补偿两次测量结果,使得测量结果中齿形偏差相同,获得测头偏移量。分析得出,上述两种方法调整测头位置的极限偏差分别为 ± 0.010 mm和 ± 0.015 mm,均可满足1级(GB/T10 095.1-2 001)渐开线齿形的测量要求。

关键词:渐开线齿轮;齿形误差;双盘式测量仪;测头调整

中图分类号:TH132.413;TG86 **文献标识码:**A

Adjustment of stylus in double-disc involute measuring instrument

LOU Zhi-feng¹, WANG Li-ding^{1,2}, ZHANG Yu-ling³, MA Yong¹, WANG Xiao-dong^{1,2}

- (1. *Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;*
2. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;*
3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)*

Abstract: The measurement error caused by the stylus position deviation in the double-disc involute measuring instrument was analyzed, and two methods, the test method and the error compensation method, for adjusting the stylus position accurately were introduced. In test method, with the angle of tooth profile being less than its real value when the stylus deviates the rails surface, the same involute tooth profile is measured repeatedly when the stylus is at different positions. The result shows that the stylus is in the best position when the angle of the tooth profile is maximal. In the error compensation method, the involute tooth profile is measured when the stylus is at two different positions over the rails, the results are compensated by attempting different values of the stylus deviation to get two results same, and the real deviation value can be obtained. The limited deviations of the two methods for adjusting the stylus position are ± 0.010 mm and ± 0.015 mm, which can meet demands

收稿日期:2007-04-03;修订日期:2007-07-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50475151)

for measuring level 1(GB/T10 095.1-2 001) involute tooth profile.

Key words: involute gear; error of gear tooth profile; double-disc device; stylus adjustment

1 引言

齿轮是机械领域中重要的传动部件,制造质量的提高取决于多方面,其中齿轮测试技术是一个重要的因素。在齿轮的若干精度指标中,渐开线圆柱齿轮的齿形检验是一个难度较大的测试技术问题。

齿形误差是指在齿轮端截面上齿形工作部分包容实际齿形的两条最近设计齿形间的法向距离。文献[1]分析了渐开线齿形测量的研究现状,比较了各种测量仪器的测量精度。渐开线齿形的测量方法主要可以分为标准曲线法、标准轨迹法和坐标法。高精度渐开线齿形的测量主要采用单盘式和电子展成式齿形测量仪。单盘式渐开线测量仪的测量原理完全符合渐开线展成原理,结构简单,测量尺寸链短;电子展成式齿形测量仪的测量精度主要取决于测头位置调整、光栅等传感器的精度,以及直线导轨与旋转主轴的制造与调整精度。以上两种测量仪属于标准轨迹法(展成法)测量渐开线齿形,均具有较高的测量精度,但对 1 级精度渐开线齿形的测量仍略显不足。当前很多高精度齿轮测量仪器采用激光测量技术进行长度坐标测量或修正测量误差,测量精度与电子展成式测量仪相比有一定提高,但相应制造成本更高^[1]。

相比以上渐开线测量仪器,双盘式渐开线测量仪在测量渐开线齿形时,具有最少的测量误差源,只要保证仪器结构设计和关键零部件的制造精度,并通过关键测量误差源的补偿,能够满足 1 级渐开线齿形的测量要求。

在双盘式渐开线测量仪中,测头位置的调整是影响齿形测量精度的一个重要的环节。本文在分析测点位置偏差对渐开线测量影响的基础上,探讨了试验调整法与误差补偿调整法,可以实现测头位置的精密调整。

2 双盘式渐开线测量仪测量原理^[1-2]

双盘式渐开线测量仪结构如图 1 所示,基圆

盘直径等于被测渐开线齿形的基圆直径,被测齿轮由芯轴与两个基圆盘相连,安装在芯轴的一端;测头安装于测量架上,位于导轨侧面,测量前需调整测头的测点与导轨处于同一平面。开始测量时,双基圆盘首先在驱动系统的作用下同时紧靠仪器左侧基准板;调正位置后,双基圆盘沿导轨向右侧滚动;测头微力压紧齿面,根据渐开线展成原理,在基圆盘滚动的过程中,测头的偏移量即为该点的齿形误差。

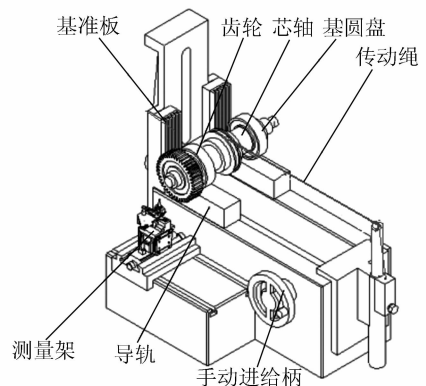


图 1 双盘式渐开线测量仪

Fig. 1 Double-disc involute measuring instrument

双盘式渐开线测量仪与单盘式渐开线测量仪相比,只是多制作一个基圆盘,但却具有如下优点:(1)导尺与导轨同一化,免除了导轨直线度误差与两者平行度误差的影响;(2)双盘比单盘接触刚度,芯轴处于自由状态,没有大的受压变形;(3)主轴与芯轴变成一根,消除了不同轴度误差;(4)测量点位于导尺同一平面上,测头位置固定,完全避免了阿贝误差。与电子展成式齿形测量仪相比,双盘式测量仪在精度方面的优点是:(1)形成标准渐开线的轨迹是连续的,且直观地符合渐开线展成原理;(2)结构上环节少,易保证精度;(3)不存在由于测头位置引起的阿贝误差;(4)基圆盘可选择与齿轮相同材料,消除了环境温度对测量精度的影响。

3 测点位置偏差对渐开线测量的影响

根据测量原理,在双盘式渐开线测量仪中,

测点必须与导轨处于同一平面上。但在实际安装过程中,测点可能出现三种情况,即位于导轨同一平面,高于或低于导轨平面。相对于这三种情况,测量过程中,仪器生成的标准曲线分别为理论渐开线、延长渐开线或缩短渐开线。以下对测点高于导轨平面时,测量渐开线齿形产生的测量误差进行分析^[3]。

当测点高于导轨平面时,如图 2 所示,设偏移距离为 b ,在 A 点画出延长渐开线 ACK ,当被检测的渐开线齿形 CH 导向测点时,其渐开线起点会在 C 点与测点开始接触。

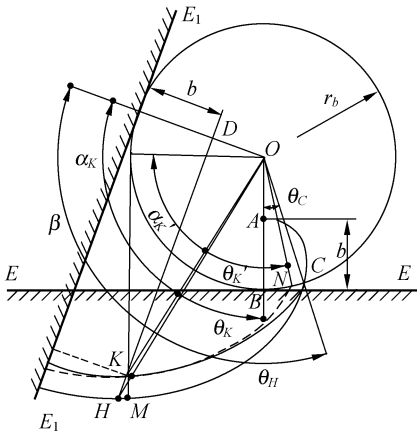


图 2 测点高于导轨平面时的模型图

Fig. 2 Analysis model when the stylus is over rail surface

根据延长渐开线极坐标方程:

$$\begin{cases} r = \frac{r_b - b}{\cos \alpha} \\ \theta = \frac{(r_b - b) \tan \alpha}{r_b} - \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

式中 r 为极径, θ 为极角, α 为从母线与基圆切点引出的半径与极径的夹角, r_b 为基圆半径。

当 $r = r_b$ 时,延长渐开线上的 C 点极角 θ_C 为:

$$\theta_C = \alpha_C - \sin \alpha_C \quad (2)$$

式中 $\alpha_C = \arccos(\frac{r_b - b}{r_b})$ 。

当母线回转一个角度,由 EE 转到 E_1E_1 时,仪器测点随导轨一起转动,将按延长渐开线的规律由 A 点移至 K 点,但测点抵在渐开线齿形上,因此测点位于与 E_1E_1 平行的直线 DK 与渐开线 CH 的交点 H 上, KH 即为对应于此点的测量误差。

设 H 点为渐开线齿形的顶点时,对应理论渐

开线展角 θ_H 为:

$$\theta_H = \tan \alpha_H - \alpha_H, \quad (3)$$

式中 $\alpha_H = \arccos(\frac{r_b}{r_H})$, r_H 为 H 点极径。

对于延长渐开线上 K 点,其滚动角为:

$$\varphi_K = \alpha_K + \theta_K = \theta_H - \theta_C + \beta, \quad (4)$$

式中 $\beta = \arccos(\frac{r_b - b}{r_H})$ 。

根据延长渐开线极坐标方程(1)可得:

$$\theta_K = \frac{r_b - b}{r_b} \tan \alpha_K - \alpha_K, \quad (5)$$

式中 $\alpha_K = \arctan[\frac{r_b}{r_b - b}(\theta_H - \theta_C + \beta)]$ 。

由 K 点做理论渐开线 KN ,法线与渐开线 CH 相交于 M , K 在理论渐开线上对应的展角为:

$$\theta_K' = \tan \alpha_K' - \alpha_K', \quad (6)$$

式中 $\alpha_K' = \arccos(\frac{r_b}{OK}) = \arccos(\frac{r_b \cos \alpha_K}{r_b - b})$ 。

则可得在测量过程中此点的测量误差为:

$$KH \approx KM = (\theta_K + \theta_C - \theta_K') r_b. \quad (7)$$

对于齿面上其它测点 K_1 ,假设其在展长方向上与齿顶的间隔为 Δl ,则对应滚动角为:

$$\varphi_{K_1} = \varphi_K - \Delta\varphi = \alpha_{K_1} + \theta_{K_1} = \frac{r_b - b}{r_b} \tan \alpha_{K_1}, \quad (8)$$

式中 $\Delta\varphi = \Delta l / r_b$ 。

同理根据式(4)-(7)可求得 K_1 点的测量误差。

测点低于导轨平面时测量渐开线齿形的测量误差与高于导轨平面时推导过程相似,在此不再叙述。

表 1 测点偏离导轨时的测量误差
Tab. 1 Measurement errors when stylus deviates rail surface

基圆直径(mm)	高于导轨距离(mm)	测量误差(μm)	低于导轨距离(mm)	测量误差(μm)
50	0.01	0.093	0.01	0.191
	0.02	0.260	0.02	0.535
	0.05	0.993	0.05	2.077
80	0.01	0.074	0.01	0.151
	0.02	0.207	0.02	0.424
	0.05	0.793	0.05	1.651
100	0.01	0.067	0.01	0.135
	0.02	0.185	0.02	0.380
	0.05	0.713	0.05	1.480

对于不同基圆直径,测点偏离导轨平面时,可以得出测量渐开线齿形的测量误差,如表 1 所示。测点低于导轨平面时产生的测量误差远大于测点高于导轨平面时产生的测量误差,所以调整过程中,应避免测点低于导轨平面。

4 测点位置的调整方式

在双盘式渐开线测量仪中,采用交叉弹簧片式的铰链结构作为误差传递杠杆,使测头测量的齿形误差准确传递到电感测头。交叉弹簧片的铰链结构对于微量的转动来说灵敏度很高,附加测量力很小,理论上会有摆动中心变动的误差,但对 $10\ \mu\text{m}$ 以内的摆动量来说,其误差可以忽略不计^[1]。测头及误差传递杠杆组件固定于测量架上(如图 3 所示),高度可以进行微动调整;电感测头压紧于误差传递杠杆的另一端。在双盘式渐开线测量仪中,用于测头位置调整的方法有:显微镜调整法,试验调整法和误差补偿调整法。

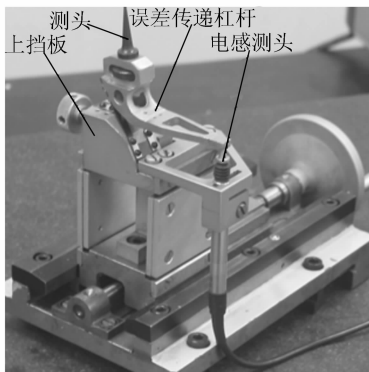


图 3 双盘式渐开线测量仪测量架装置

Fig. 3 Measurement device in double-disc involute measuring instrument

4.1 显微镜调整法

显微镜调整法是指在导轨面上放置直角尺,通过读数显微镜观测,调整测点与直角尺下边缘重合。此调整方法直观简便,但显微镜的示值误差、直角尺边缘的直线度误差、及其端面与测点难以调整到同一焦平面等因素均会对调整精度产生影响,此方法调整测头位置的极限误差为 $\pm 0.020\ \text{mm}$ 。

4.2 试验调整法

由分析可知,当测点偏离导轨平面时,双盘式渐开线测量仪生成的标准曲线为延长渐开线或缩短渐开线,两种情况均会使齿形测量曲线中的齿

形角变小,特别在齿根附近影响较大。根据此原理,首先通过显微镜调整测点低于导轨平面,逐次微量调高测头高度,同时反复测量一高精度齿轮的渐开线齿形,直至测点高于导轨平面。在测量结果中齿根处齿形角最大的测量曲线(也可比较齿廓倾斜偏差)对应的测头位置即为调整最佳位置。

使用试验法调整测点位置时,对仪器的测量重复性精度要求较高。表 2 为测头位于调整起点,双盘式渐开线测量仪重复测量 $m=4, z=30, \alpha=20^\circ$, 标准渐开线齿形齿根处展长为 $5.2\ \text{mm}$ 的齿形偏差,计算可得测量平均倾斜偏差的极限误差为 $\pm 0.011\ \mu\text{m}$ ^[4]。调整过程中,测头高度调整间隔为 $0.010\ \text{mm}$, 选取同段齿形多次测量的平均倾斜偏差进行比对。表 3 为测头位置由低于导轨面逐渐调高测得上述齿形的平均齿廓倾斜偏差,其中位置 4 为测头的最佳位置。试验调整法调整测头位置的极限偏差为 $\pm 0.010\ \text{mm}$ 。

表 2 渐开线齿形重复测量结果(单位: μm)

Tab. 2 Repetition measurement of involute tooth profiles (Unit: μm)

序号	总偏差	倾斜偏差	序号	总偏差	倾斜偏差
1	0.489	-0.327	6	0.460	-0.292
2	0.485	-0.309	7	0.485	-0.321
3	0.469	-0.306	8	0.467	-0.316
4	0.463	-0.300	9	0.454	-0.303
5	0.441	-0.303	10	0.466	-0.317

表 3 测头位置调整时平均齿廓倾斜偏差(单位: μm)

Tab. 3 Mean slope deviations when stylus is adjusted (Unit: μm)

测头位置	平均齿廓倾斜偏差
1	-0.334
2	-0.315
3	-0.315
4	-0.302
5	-0.333
6	-0.340

4.3 误差补偿调整法

误差补偿调整法是指根据式(1)-(8),通过对测点位置偏差进行试值,对测头处于不同位置时测量的渐开线齿形误差进行补偿,寻求测头偏移量。具体过程如下:首先,通过显微镜调整测点到

某一位置,保证其高于导轨平面,设测点与导轨面的距离为 x ,对齿根处一段渐开线齿形进行重复测量;调高测头距离为 Δ ,继续重复测量同一齿形;对 x 取不同的值,根据式(1)-(8)分别对两次测量结果进行补偿,使两次补偿结果平均齿廓总偏差相同的 x 值即为初次调整时测点偏离导轨平面距离,补偿后的齿形误差值也为渐开线齿形的实际偏差。图 4 为对 $m=4, z=30, \alpha=20^\circ$, 标准渐开线齿形齿根处展长为 7 mm 的齿形偏差进行单次测量,使用误差补偿调整法计算测点偏移

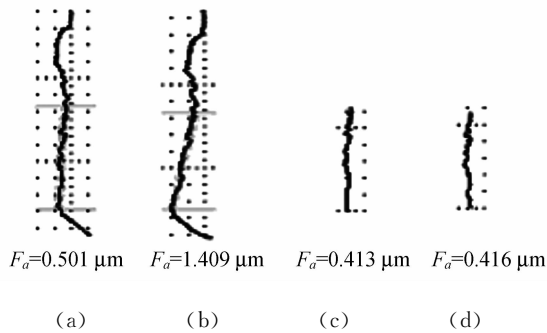


图 4 误差补偿调整法调整测头位置

Fig. 4 Error compensation method for adjusting stylus

量的测量曲线。其中图 4(a)为测头位于初始点(距导轨面为 x)的齿形误差测量曲线,取齿根处展长为 7 mm 的齿形作为评定区间;图 4(b)为调高测头($\Delta=0.1$ mm)齿形误差测量曲线,取与曲线(a)相同评定区间;图 4(c)(d)分别为 $x=0.068$ mm 时,对曲线(a)(b)进行补偿的误差曲线, x 值采用试值得到,其使得曲线(c)(d)的误差相同。根据仪器的测量重复性精度,误差补偿调整法调整测点位置的极限偏差约为 ± 0.015 mm。

5 结 论

在双盘式渐开线测量仪中,测头位置调整偏差是影响测量仪测量齿形精度的一个重要的环节。本文在分析测点偏差对渐开线齿形测量影响的基础上,探讨了高精度调整测点位置的两种方法:试验调整法与误差补偿调整法,调整测点位置的极限偏差分别为 ± 0.010 mm 和 ± 0.015 mm, 均可满足 1 级渐开线齿形的测量要求。上述调整测头位置的原理同样可以应用于其它展成法渐开线齿形量仪中测头位置的调整。

参考文献:

- [1] 王立鼎,娄志峰,王晓东,等.超精密渐开线齿形的测量方法[J].光学精密工程,2006,14(6):980-985.
WANG L D, LOU ZH F, WANG X D, et al.. Measuring methods of ultraprecision involute tooth profile[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 980-985. (in Chinese)
- [2] 张玉玲,王立鼎,佟晓冬.超精密齿轮渐开线齿形的测量仪器[J].光学精密工程,1993,1(4):30-33.
ZHANG Y L, WANG L D, TONG X D. Measuring apparatus of involute tooth profile for super precision gears [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1993, 1(4): 30-33. (in Chinese)
- [3] 马丘申.插齿刀:制造和检查[M].北京:机械工业出版社,1957.
MA Q SH. *Slotting Cutter: Manufacture and Inspection* [M]. Beijing: China Machine Press, 1957. (in Chinese)
- [4] 费业泰.误差理论与数据处理[M].北京:机械工业出版社,2004.
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:娄志峰(1978—),男,大连理工大学机械工程学院博士研究生,研究方向为超精密齿轮测量技术。E-mail: louzf@student.dlut.edu.cn

王立鼎(1934—),男,大连理工大学机械工程学院教授,博士生导师,中国科学院院士,研究方向为超精密齿轮工艺与测试、精密机械设计及微纳米机械。E-mail: wangld@dlut.edu.cn