

文章编号: 1001-3806(2012)06-0793-05

外螺纹垂直投影测量法及应用分析

陈曼龙

(陕西理工学院 机械工程学院, 汉中 723003)

摘要: 为了实现外螺纹的高效测量, 采用理论分析与实验验证对垂直投影测量方法进行了研究。解释了垂直投影测量法在外螺纹牙形测量过程中出现的牙形失真现象, 分析了牙形失真现象的产生原因和发生条件, 分别给出了普通三角螺纹和梯形螺纹牙形失真发生条件, 证明了采用垂直测量法进行普通三角螺纹测量不会发生牙形失真现象, 而梯形螺纹会发生牙形失真。通过用工具显微镜和影像测量仪对普通三角螺纹与梯形螺纹测量数据进行了对比。结果表明, 普通三角螺纹和管螺纹可适用垂直投影测量方法测量, 而梯形螺纹采用该方法测量会有较大的测量误差。这一结果对利用垂直投影测量方法实现外螺纹高效测量是有帮助的。

关键词: 测量与计量; 外螺纹测量方法; 应用分析; 垂直投影测量法; 牙形失真

中图分类号: TN247 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.020

Vertical projection measuring method for male thread and its application analysis

CHEN Man-long

(School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723003, China)

Abstract: In order to measure male thread efficiently, vertical projection measurement method was studied in theory and experiment. The reason and conditions for the distortion of thread profiles in process of measuring profile angles was explained taking tri-angular thread and acme thread as examples. It is proved in principle that thread profile distortion cannot occur in measuring tri-angular thread profiles with vertical projection measuring method, while it does for acme thread. After comparing the measurement data of tri-angular thread and acme thread that measured with tool microscope and image instrument respectively, it shows that tri-angular and pipe thread can be measured properly with vertical projection measurement, and it can bring about big error for acme thread measurement. The result is helpful to measure male thread efficiently with vertical projection measurement.

Key words: measurement and metrology; male thread measurement; application analysis; vertical projection measuring method; thread profile distortion

引言

螺纹的检测有两类方法, 即综合检验法和单参量检测法。就单参量检测而言, 外螺纹测量主要有机械接触测量和非接触测量方法。机械接触测量又有两种, 一种是纯机械接触测量, 另一种是利用机械接触形式进行定位, 数据测量则是光学手段。纯机械接触测量采用万能量具, 存在测头磨损快、测量效率低的缺点; 后一种则可以纳入光学测量方法中。传统的非接触螺纹测量一般采用影像法, 采用工具显微镜作为测量工具, 测量时需要根据被测螺纹的

螺旋升角反复摆动显微镜立柱倾角, 费时、费力, 而且由于得到的是法向参量, 还需对测量结果进行修正^[1]。现代非接触螺纹测量多以工业电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 传感器或光纤传感器作为检测元件。光纤传感器测量法主要应用于内螺纹测量, 而且目前还处于实验研究阶段^[2]。CCD 传感器测量法能在一次测量过程中获得多项参量值, 测量效率非常高, 是目前热点研究的螺纹测量方法^[3]。在利用 CCD 传感器测量方面, 对于较大几何尺寸外螺纹参量测量, 以线阵 CCD 传感器作为检测元件进行测量能够获得较高的测量精度^[4-5]; 而用正弦振动干涉激光投射工件几何外形到面阵 CCD 传感器上, 进行一定图像处理可以实现精密的螺纹塞规, 甚至滚珠丝杠参量测量^[6-7]。按投影方向, 利用 CCD 传感器实现外螺纹测量时, 主要有光切法和垂直投影测量法^[8]。垂直投影测量方法对工件安装要求低, 易

基金项目: 陕西省火炬计划资助项目(2011HJ28)

作者简介: 陈曼龙(1968-) 男, 硕士, 副教授, 现主要从事精密测量与精密仪器设计方向的研究。

E-mail: hz202053@126.com

收稿日期: 2012-01-14; 收到修改稿日期: 2012-03-26

于实现螺纹在线检测,研究和分析这种测量方法对提高螺纹检测的效率具有积极意义。

1 垂直投影测量法

1.1 垂直投影测量法

所谓“垂直投影测量法”,就是用垂直于螺纹轴线(比如丝杠的轴线)的光线入射待测螺纹,并用得到的正投影影像尺寸来反映待测螺纹实际几何尺寸的测量方法。采用垂直投影测量法时,CCD传感器与待测工件可以在整个测量过程中保持固定的方位,无需调节CCD传感器的角度。在图1a中,待测工件放置在V型块上,光源发出垂直于待测工件轴线OO'的平行光,从而使待测工件的外螺纹影像投射到CCD传感器,在测量过程中CCD传感器的感光面和待测螺纹轴线始终与光源光线方向垂直。对于牙形失真问题,垂直投影测量法通过遮挡分析,利用牙形修正的办法解决。

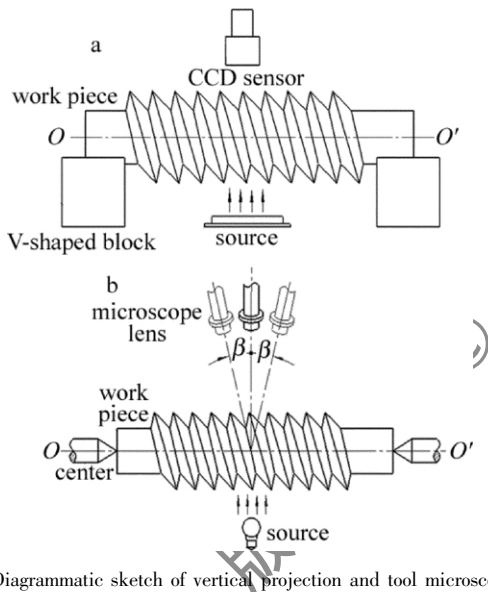


Fig. 1 Diagrammatic sketch of vertical projection and tool microscope imaging measurement

a—vertical projection measurement b—tool microscope imaging measurement

区别于垂直投影测量法,工具显微镜影像法测量螺纹中径时采用光切法,如图1b所示,需要将显微镜镜头摆动 β (β 为待测螺纹螺旋升角),以保证光源的入射光线与待测工件螺旋面相切,避免因牙形失真带来的测量误差,但也由此带来调焦和法向牙形的问题^[1]。

1.2 垂直投影测量法特点

(1) 效率高。采用双顶尖定位时,CCD传感器只需一次调焦,就可以对不同导程、直径的螺纹进行测量,工件安装操作简单。工件也可以直接安放在V型块。

(2) 适应面广。就测量对象外部条件方面,由于

不需要将工件相对于投影方向摆动一个螺旋角以使光线与螺旋面相切,所以可以对不带顶尖孔或直径较大、长度较长的管螺纹进行测量;针对不同类型的螺纹(如惠氏螺纹),测控系统只是软件算法不同,硬件几乎完全相同。

(3) 直接获得螺纹基本牙形(螺纹轴线剖面上的牙形)参量,符合国家标准对螺纹参量的定义。

(4) 非接触测量。与其它非影像法测量相比,没有测头或测量工具的磨损。

(5) 测量精度会受到牙形失真现象影响。在一定情况下会受到延伸螺旋面影响,得到的影像可能不能反映待测螺纹牙形。

1.3 螺纹垂直投影测量法的“牙形失真”现象

采用垂直投影测量法测量时,光源光线方向垂直于待测螺纹轴线,由于延伸螺旋面遮挡,将得到产生轴向畸变的成像,由于成像无法正确反映牙形的真实轴向形状,就把这种现象称为牙形失真。图2中的阴影部分所示为牙形失真部分。试验观察中发现,采用垂直投影测量法产生的牙形失真程度与待测螺纹的牙形角和螺旋升角关系密切。

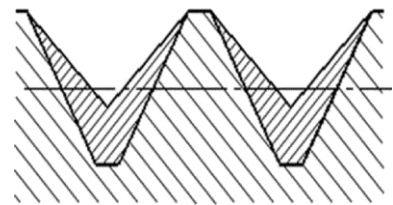


Fig. 2 Tooth distortion with vertical projection method

2 牙形失真产生原因及发生条件分析

2.1 牙形失真现象原因分析

对普通三角螺纹建立按螺纹轴线为z轴的直角坐标系,如图3所示。图3a是螺纹沿螺纹轴线方向的局部正视图,图3b为其左视图,图中d为螺纹外径,d₁为螺纹小径,d₂为螺纹中径。图3a中,当光源S以垂直于螺纹轴线方向入射左旋螺纹时,与y轴重合的EF线段将投影螺旋面分为左、右两部分。图中E、F、D3点分别是经过螺纹轴线且与光源S垂直的平面与牙

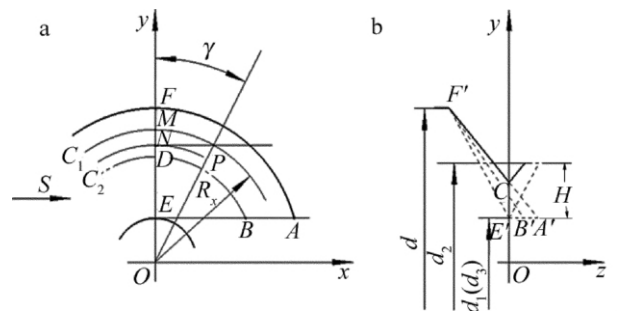


Fig. 3 Analysis of tooth distortion

顶圆柱面、中径圆柱面和小径螺旋面在螺旋面上的点，而A点和B点则是平行于光源方向且与小径圆柱面相切的平面与牙顶圆柱面、中径圆柱面在螺旋面上的点。由于螺旋升角原因，点A、B所在的右侧螺旋面EFA会就z轴方向上高于左侧螺旋面，结果形成图3b中的F'E'A'(图3b中F'、E'、A'是图3a中对应字母点F、E、A的投影点)的牙形失真区域。

2.2 牙形失真发生条件

图3中，假设P点是螺纹螺旋面上任意一点，令其所在圆柱面在x-O-y平面投影圆为C₁、半径为R_x，C₁圆与y轴坐标交点为M。当采用垂直于螺纹轴线方向作投影方向时，其投影到y轴上的点为N点，并令N点所在圆柱面在x-O-y平面投影圆为C₂。连接OP，设其与y轴夹角为γ。由图3中的几何关系可以得到：MN=OP-ON=R_x(1-cosγ)。设螺纹牙形角为α，导程为L。可得M点与N点z轴坐标差为MN·tan(α/2)，即R_x(1-cosγ)tan(α/2)，其中γ=arccos(d₁/2R_x)。P点可以认为是M点转过γ角后在圆C₁上的点，因此相对于M点，P点z轴坐标增加γL/2π，显然，在图3上P点欲遮挡N点，P点z轴坐标必须大于N点。即：

$$R_x(1 - \cos\gamma) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) < \frac{\gamma L}{2\pi} \quad (1)$$

成立，就会发生牙形失真。

2.3 普通三角螺纹和梯形螺纹牙形失真条件分析

2.3.1 普通三角螺纹牙形失真条件分析 对单头普通三角螺纹而言，牙形角α=π/3，基本三角形牙高H₀

与螺距P(单头螺纹导程等于螺距)关系为：H₀=³/₂P。

而基本削平高度(图3b中的H)H=⁵/₈H₀。由图3可知

γ取值范围为[0, arccos(d₁/d)]，且对(1)式而言，γ

越大越容易成立。把参考文献[9]中GB196-81所定义的全部M1~M600尺寸的普通粗牙螺纹γ值计算(同尺寸情况下，细牙螺纹γ值较粗牙螺纹要小)，均有γ≤43°。取γ=43°，代入(1)式，得：

$$R_x < 0.245P \quad (2)$$

对于这个条件，普通三角螺纹是不能成立的。说明普通三角螺纹不会发生牙形失真现象。

2.3.2 梯形螺纹牙形失真情况分析 相对于普通三角螺纹而言，作为传动螺纹的梯形螺纹由于自锁和效率的要求，其牙形角较小，螺旋升角大^[10]，会易于发生牙

形失真现象。为便于分析，考察图3中P点在外径和中径上时(即A点和B点)对小径上点E点的遮挡情况。

(1) 外径上点对牙根点的遮挡条件。

相对于其它圆柱面上的点，外径上点有较大的γ，应该容易产生遮挡。在图3中，即A点对E点的遮挡情况。此时R_x=d/2，γ=arccos(d₃/d)，d和d₃分别为梯形螺纹外径和小径。将R_x、γ和L=nP=πd₂tanβ代入(1)式，得：

$$\tan\beta > \frac{(d - d_3) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d_2 \arccos\left(\frac{d_3}{d}\right)} \quad (3)$$

满足(3)式说明牙顶圆柱面上的点会在垂直投影时遮挡牙根部上的点。

(2) 中径上的点对牙根点的遮挡条件。

同上，即图3中B点对E点的遮挡情况。此时，R_x=d₂/2，γ=arccos(d₃/d₂)。代入(1)式得：

$$\tan\beta > \frac{(d_2 - d_3) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d_2 \arccos\left(\frac{d_3}{d_2}\right)} \quad (4)$$

满足(4)式，说明牙中径圆柱面上的点会在垂直投影时遮挡牙根部上的点。

另外，比较(3)式和(4)式，由于d-d₃>d₂-d₃，且d与d₂相差不大，说明牙中径上圆柱面上的点更易于遮挡牙根部。

3 实验及分析

为验证以上牙形失真判断有效性，以普通三角螺纹和梯形螺纹为例，先进行牙形失真判断，然后对螺纹中径、牙形角和螺距参量分别按常规测量和垂直投影测量法进行测量(梯形螺纹只对牙形半角进行测量)，最后对测量数据比较、分析。

普通三角螺纹选用M16×1.5单头螺纹，梯形螺纹选用Tr24×5-7e单头梯形螺纹。常规测量仪器选用JX19万能工具显微镜，垂直投影测量选用二次元影像测量仪YF2010 2倍镜头。

(1) 牙形失真判断。

将M16×1.5单头三角螺纹小径d₁=14.376mm、螺距P=1.5mm、牙形角α=π/3代入(3)式，该式不能成立，说明该螺纹不会发生牙形失真，可以直接采用垂直投影法测量；梯形丝杠Tr24×5-7e的丝杠小径d₃=18.5mm、中径d₂=21.5mm、螺旋升角4°14'1"代

入(4)式,(4)式成立,说明该梯形丝杠采用垂直投影测量方法会产生牙形失真。

(2) 测量数据。

Table 1 M16 × 1.5 data measuring by tool microscope and image instrument

No.	pitch diameter/mm		half-angle		pitch/mm	
	tool microscope	image instrument	tool microscope	image instrument	tool microscope	image instrument
1	15.0655	15.058	30°13′	30°28′	1.490	1.488
2	15.0770	15.042	30°21′	29°59′	1.502	1.485
3	15.0695	15.060	30°24′	30°06′	1.493	1.496
4	15.0645	15.050	30°19′	30°17′	1.497	1.512
5	15.0645	15.059	30°16′	30°18′	1.500	1.490
6	15.0675	15.058	30°07′	29°54′	1.492	1.490
7	15.0595	15.038	30°14′	30°01′	1.504	1.518
8	15.0625	15.060	30°09′	30°26′	1.510	1.496

Table 2 Tr24 × 5-7e half-angle data measuring by tool microscope and image instrument

No.	tool microscope			image instrument
	left side	right side	modifier	
1	15°23′	14°18′	29°46′	31°54′
2	15°02′	14°32′	29°32′	32°04′
3	15°14′	14°06′	29°24′	31°26′
4	14°56′	14°16′	29°16′	31°44′
5	14°49′	14°35′	29°28′	31°59′
6	15°22′	14°28′	29°54′	31°40′
7	14°46′	14°10′	29°02′	32°10′
8	15°17′	14°21′	29°42′	31°47′

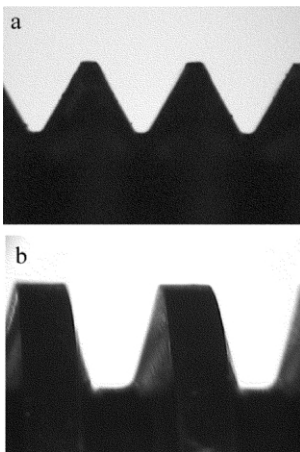


Fig. 4 Projection image by vertical projection measurement
a—angle of thread tooth is 60° b—angle of thread tooth is 30°

表1中工具显微镜测量数据螺距用0.3mm量刀按测量刀轴切法测量得到;中径用0.796mm量针按三针法测量得到;牙形角采用影像法(立柱摆动)在JX19工具显微镜上进行测量得到的左、右值平均值。

表2中,工具显微镜测得的是法向牙形半角,修正值为左侧和右侧之和并按 $\tan\alpha = \frac{\tan\alpha_n}{\cos\lambda}$ 进行修正后的值,其中 α_n 是左侧和右侧算数和, λ 为螺旋升角,此处取为 $\lambda = 4^\circ 14' 1''$ 。

如表1、表2所示。影像测量仪测量图像见图4。图4a和图4b分别为普通三角螺纹 M16 × 1.5 和梯形丝杠 Tr24 × 5-7e 测量时的影像。

(3) 测量结果分析。

对普通三角螺纹,比较表1中螺纹中径、牙形半角、螺距参量3组数据,测量结果基本相同;而对梯形螺纹,比较表2中两组对牙形半角的测量数据发现,当采用垂直投影法测量牙形失真时所得牙形角会偏大。至于垂直投影测量法测得的数据较工具显微镜重复性误差大,可能是采用垂直投影测量方法时光源受外部环境光影响所致。另外,图4b为垂直投影法测得梯形螺纹牙形,可以看出牙形左侧发生遮盖,牙形失真严重,说明影像法测量丝杠螺纹牙形半角是存在较大理论误差的测量方法。

4 结论

可以证明,55°管螺纹也不会发生牙形失真现象,这就避免了因牙形失真对影像测量精度的担忧。与传统光切法影像测量方法相比,垂直投影测量方法避免了测量过程中的螺旋角调整,具有高效、适应场合广泛的特点。采用垂直投影方法进行螺纹测量会发生牙形失真现象。牙形失真现象发生主要受到待测螺纹牙形角和螺旋升角影像,一般而言,牙形角越小、螺旋升角越大越易于发生牙形失真。普通三角螺纹牙形角大,螺旋升角较小,不会发生牙形失真;而梯形螺纹由于牙

形角小,易于发生牙形失真现象。采用垂直投影测量方法时,有必要先对待测螺纹进行牙形失真判断,以避免测量误差。而当测量中发生牙形失真时,则可对空间遮盖点恢复提出方法,相信进一步的研究会使垂直投影测量法有更广泛应用。

针对机器视觉实现测量螺纹技术这一近年来的研究热点,解释了垂直投影测量螺纹过程的牙形失真现象及发生原因。以普通三角螺纹和梯形螺纹为研究对象,理论推导了牙形失真的各自发生条件,并进行了试验验证。

参 考 文 献

- [1] XU X E. Screw thread test and measurement[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1984: 61-218-222, 231-234 (in Chinese).
- [2] HOPPE H, de ROSE T D, McDONALD J, *et al.* Surface reconstruction from unorganized points[J]. Computer Graphics, 1999, 26(2): 71-78.
- [3] LU D F. Research on laser screw thread parameter detection technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 10-11 (in Chinese).
- [4] MIAO S D, QIAO P L, LIN K Z, *et al.* Research of method in the precise measurement based on line scan CCD[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2006, 4(11): 1-3 (in Chinese).
- [5] HE F J, ZHANG R J, DU Z J, *et al.* Non-contact measurement of damaged external tapered thread based on linear array CCD[C] // International Symposium on Instrumentation Science and Technology. Washington, USA: Institute of Physics Publishing House, 2006: 676-680.
- [6] JIN H L, SASAKI O. Measurement of a cross-sectional profile of a thread gauge using a sinusoidally vibrating interference pattern[J]. Applied Optics, 2011, 50(7): 3470-3474.
- [7] HUANG H, JYWE W, LIU C, *et al.* Development of a novel laser-based measuring system for the thread profile of ballscrew[J]. Optical and Lasers in Engineering, 2010, 48(10): 1012-1018.
- [8] ZHU G, ZHU X F. Reading system for thread features based on image recognition[J]. Computer & Digital Engineering, 2010, 38(11): 156-159 (in Chinese).
- [9] CHENG D X. Mechanic design manual 2[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 5-5, 5-6 (in Chinese).
- [10] JIN G L, JIN Z F. Thread machining and measuring manual[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982: 461-463 (in Chinese).

版权所有 © 《激光技术》编辑部