

# 行波管螺旋线的光学检测方法

王建\*, 李飞, 方有维

中国科学院空天信息创新研究院, 北京 101407

**摘要** 为解决行波管螺旋线(TWT)测量中存在的效率低和结果不稳定的问题,发展了一种高效的光学检测方法,主要包括:选取基于双标准棒滚动的螺旋线摆放与调整装置,使零件的旋转角度可控,摆放直线度优于0.01 mm;采用直线取景器有效避免了毛刺、翻边等缺陷的干扰,增加了自动寻边过程的稳定性,测量结果重复性优于0.8  $\mu\text{m}$ ;基于45°直角棱镜开发了端口处内径测量系统,获得了对比度鲜明的成像效果;基于激光共聚焦显微镜测量了螺旋线外表面粗糙度,得到了与工艺规律相吻合的数据;将分段阵列的编程策略和交点距离的算法应用到变螺距螺旋线检测中,具有较高的操作效率和灵活性,单根螺旋线的检测时间缩短为传统方式的三分之一。该结果对于提高螺旋线行波管产品的合格率、实现其批量化生产具有重要意义。

**关键词** 测量; 装置设计; 行波管螺旋线; 变螺距; 变直径; 粗糙度

**中图分类号** O435; TP23; TN124

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/AOS202040.0912001

## Optical Measurement Method for a Traveling Wave Tube Helix

Wang Jian\*, Li Fei, Fang Youwei

*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China*

**Abstract** A high-efficiency optical method was developed to solve the problems of measurement inefficiency and instability in the helix of a traveling wave tube (TWT). This method offers several improvements over existing methods. First, a device for helix placement and adjustment based on double standard bar rolling was chosen to make the rotation angle of the parts controllable and the placement straightness within 0.01 mm. Second, a linear viewfinder was used to effectively increase the stability of the automatic edge finding process by avoiding burr and overturn interference; the repeatability of the measurement results was better than 0.8  $\mu\text{m}$ . Next, a port inner diameter measurement setup based on a 45° rectangular prism was developed to obtain a distinct contrast imaging effect, and the helix's outer surface roughness was measured using a laser confocal microscope; the measurement results were in good agreement with those in process law. Finally, high efficiency and flexibility was achieved by applying a segmented array programming strategy and intersection distance algorithm for the detection of the stepping pitch helix; the detection time for a single helix reduced to one-third that of the existing method. These results are of great significance for improving the qualification rate of helical TWT products and realizing their batch production.

**Key words** measurement; device design; traveling wave tube helix; variable pitch; variable diameter; roughness

**OCIS codes** 120.4570; 120.4630; 120.6660; 180.1790

## 1 引 言

行波管(TWT)是一种常见的电真空器件,它的基本原理是通过电子注与高频电磁波的相互作用,将电子注的能量交给高频电磁波,使高频电磁波得到放大<sup>[1]</sup>。相互作用的基本条件是电子注与高频电磁波速度一致,然而实际电子是无法加速到光速的,需要设计特别的金属导体结构将电磁波的传播速度降低,故各种行波管慢波结构应运而生,如螺旋线、耦

合腔、折叠波导、微带曲折等<sup>[2]</sup>,其中形状酷似一根弹簧的螺旋线慢波结构,具有高增益、大功率和宽频带的特点,且制造工艺相对简单,已取得了广泛的应用。

广大国内外学者对其进行深入的研究后发现,相互作用过程中,交出部分能量的电子注速度降低,如果电磁波继续在均匀螺距的螺旋线上传输,将不能满足互作用的同步条件,导致互作用效率降低。此外,宽带行波管的频带内往往包含一些噪声信号,

收稿日期: 2019-12-11; 修回日期: 2019-12-25; 录用日期: 2020-01-15

基金项目: 中国科学院重点实验室基金(Y73Z230258)

\* E-mail: wjnust@163.com

如低频段的二次谐波,如果不进行有效的抑制,则会被互作用的过程放大,进而影响输出稳定性。为了解决这些问题,人们发展了螺距渐变、跳变,螺旋线外径带锥角等方法,理论分析、模拟仿真与实测结果都表明采用这些方法效果显著<sup>[3-9]</sup>。然而,上述异形螺旋线的发展给零件的检测带来了巨大的挑战。在加工制备过程中,为了保证电子效率、同步电压、二次谐波等设计指标,以及装配过盈量<sup>[10]</sup>、散热系数、力学强度等工艺指标,众多几何要素都成为了全检项目。螺旋线结构脆弱、摆放与调整困难、几何要素测量精度要求高,要实现其精确快速的检测还有许多问题需要解决<sup>[11]</sup>。其中测量效率低、测量结果不稳定、测量项不足仍是当前存在的主要问题。此外,随着卫星在侦察、通信、导航、测地等领域的大规模应用,尤其是低轨通信卫星“星链”技术的发展,未来对行波管数量的需求,将出现井喷式的发展,开发一种行波管螺旋线的高效检测方法已变得十分迫切。

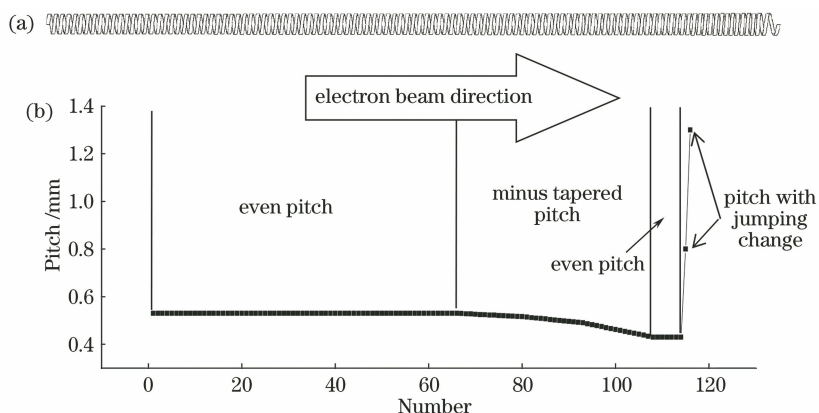


图1 行波管螺旋线的基本情况。(a)螺旋线外形;(b)螺距分布

Fig. 1 Basic information of TWT helix. (a) Helix's outline; (b) distribution of pitch

## 2.1 传统手动测量的难点

传统手工检测的方式如图2所示。测量开始之前,首先将螺旋线紧贴固定条,保持螺旋线轴线近似水平,然后用小挡块手工压紧,防止其在测量过程中发生滚动,但未被挡块接触的区域,有时会因残余应力的影响,离开固定条,导致整根螺旋线摆放直线度超过0.05 mm。假如采用一根大尺寸的长直挡块,虽然可以获得较好的摆放直线度,但手工移动挡块时,较大的推力可能会将螺旋线挤压变形,所以一般不采用长直挡块。随后,根据图纸要求,手动测量一端的跳变或渐变螺距,如图3所示(输出螺旋线一般从电子注行进方向的末尾开始测量,输入螺旋线则从电子注的入口开始测量,因为二者的另外一端大都是均匀螺距,所以只有整根测量完毕后,才可能知

晓渐变段、跳变段是否符合公差要求)。假如测量结果不在公差范围内,沿螺旋线轴线,手动旋转,重复测量,直到满足公差要求后,再对之后的全部螺距进行自动测量。

## 2 行波管螺旋线的检测难点

以某波段输出螺旋线为例进行分析,其外形轮廓如图1(a)所示。总计116圈,由截面尺寸为0.26 mm×0.1 mm的钨带绕制,螺距分布如图1(b)所示,从左至右,依次包含66圈均匀螺距、41圈负渐变螺距(−1 μm 渐变量13圈,−2 μm 渐变量13圈,−4 μm 渐变量15圈)、7圈均匀螺距和2圈跳变螺距,总长59.716 mm,锥角0.191°,外径渐变,左端内径1.4 mm、外径1.6 mm,右端内径1.6 mm、外径1.8 mm。

以上操作过程中,存在的问题有:1)手调压力不稳导致螺旋线变形,2)旋转角度不定导致寻找起始圈效率低,3)手套或指套含有污染物。

## 2.2 自动测量面对的困难

采用全自动视频影像仪测量时,常见的问题有以下三点:

1) 自动寻边取景器的选择与算法。当选择点测量时:假如摆放直线度、平行度不良,如图4(a)所示,会导致测量方向偏离轴线,产生如图4(b)所示的误差;假如取点位置恰好存在毛刺、翻边等缺陷,

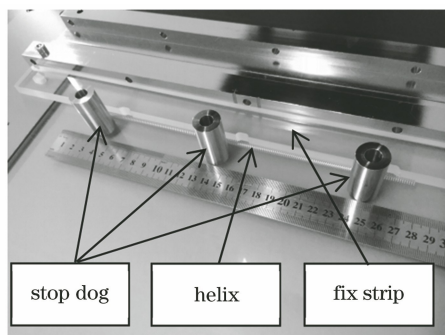


图 2 螺旋线的传统摆放

Fig. 2 Traditional placement of helix

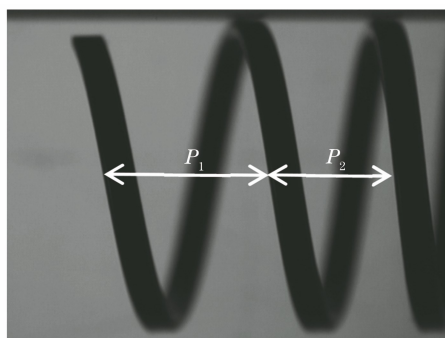


图 3 起始位置变螺距

Fig. 3 Variable pitch at start position

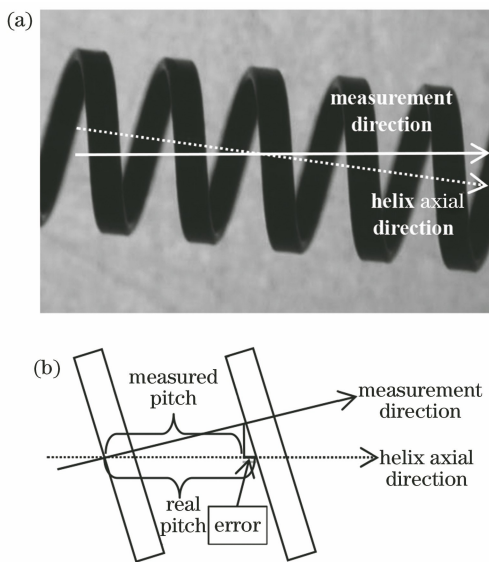


图 4 点测量算法的螺距的测量误差。(a)测量方向与螺旋线轴向不平行;(b)误差来源示意图

Fig. 4 Measurement error of pitch based on point measurement algorithm. (a) Measurement direction deviates from helix axial direction; (b) schematic of error source

点测量取景器无法进行滤波,会导致测量结果产生粗大误差<sup>[12]</sup>。当选择线测量取景器时,软件只能得出两条线段公垂线的长度,需要将其除以导程角的

余弦值换算成螺距,计算过程较为复杂,变螺距的设计带来了导程角的不断变化。

2) 如图 5 所示,外径带锥角的螺旋线水平摆放在测量平台上时,各处高度不等,为了对焦清晰,测量时,需对每个位置的镜头高度进行调整,操作量较大;某些品牌的影像仪,虽然可以将 Z 轴按照一定的高度阵列设置,但调整后,影像仪的 Z 轴运动稳定性、与测量平台的垂直度,都会成为测量误差的来源。

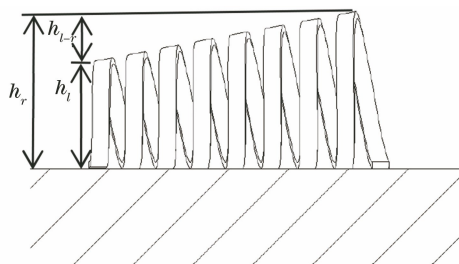


图 5 外径带锥角的螺旋线的摆放高度变化(非比例模型)

Fig. 5 Change of placement height of helix with cone angle in outer diameter (not scaled)

3) 如图 6 所示,螺距检测时,最理想的照射光源为底部同轴光,当螺旋线绕制过密时,部分边界已被遮挡,测得的直线段变短,测量误差增大;对于变螺距的设计,测得的两条线段不平行,对公垂线的评价结果将不能代表螺距数值,软件算法失效。

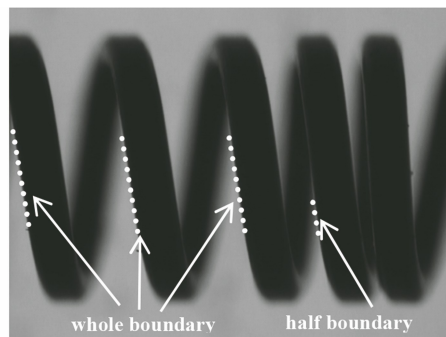


图 6 螺距边界被遮挡

Fig. 6 Pitch boundary was hidden from view

### 2.3 尚存难以检测的项目

绕制后螺旋线内径和外表面粗糙度的检测,靠现有技术手段实现还有以下困难:1)圆柱体零件在测量端面内外径时,可以很方便地竖直摆放在影像仪镜头下,而螺旋线刚度差、长径比大,无法自然直立,采用模具夹紧的操作可能会引起螺旋线的变形;某些低波段螺旋线,如 1~2 GHz 的 L 波段,输出螺旋线长度可达 280 mm 以上,超过了大部分影像仪 Z 轴的量程(经过调研,大量程的影像仪,一般只扩大 XY 方向的量程,Z 轴恒定为 200 mm 或

250 mm,增加量有限,如需增加 Z 轴高度,则需要定制或采购特殊的型号);2)螺旋结构的内外表面均无足够面积的平面供探针划测,目前还无法用探针式粗糙度测量仪检测粗糙度,仅能够对绕制之前的展平螺带进行检测。

综合以上分析,行波管螺旋线的检测难点主要集中在:零件摆放,变螺距起始点的寻找,螺距检测软件算法的稳定性,检测效率,内径、粗糙度指标检测技术等。

### 3 检测方案

#### 3.1 光学测量装置设计

零件摆放与调整的光学测量装置如图 7 所示。装置的主体为一对标准圆棒,直线度均优于 0.01 mm,圆棒同时向一个方向滚动,可以带动放置在其上的螺旋线向相反的方向滚动,底部同轴光透过两根圆棒的缝隙照射上来,可在影像仪下快速找到符合设计要求的变螺距起始点。装置包含一对卡块:卡块下表面设计有 V 型槽,自由下落的重力会将槽内放置的两根标准圆棒向内挤压;卡块中间有一个垂直贯穿的阶梯孔,从孔内穿入一根所需直径的针规,经过针规外套使针规保持竖直姿态;上述两根圆棒向内运动最终被针规限制,同时提供给卡块支撑,卡块下表面最终不与测量仪台面接触。

针规的直径  $2R_z$ ,由图 7(e)的几何位置关系,可得

$$\sin 60^\circ = \frac{R_b + R_z}{R_b + R_h}, \quad (1)$$

$$R_z = \sin 60^\circ (R_b + R_h) - R_b = 0.866R_h - 0.134R_b, \quad (2)$$

式中: $R_h$  为螺旋线的外半径, $R_b$  为圆棒的半径,一般取  $R_b = (2 - 2.5)R_h$ ,这是因为选择较粗壮圆棒,可以获得良好的支撑稳定性。

让螺旋线带锥角,可在一端放置一垫片,抬高卡块、两根圆棒,垫片厚度  $\delta$  的计算公式为

$$\delta = \tan \alpha \cdot L, \quad (3)$$

式中: $\alpha$  为螺旋线锥角; $L$  为卡块距离。

采用上述摆放方式时,自动测量过程中镜头高度无变化,仅是从便于测量的方式出发。测量过程中还需计算实测位置与理想位置的差值。二者的余弦误差  $E$  为

$$E = P' - P = \frac{P}{\cos \alpha} - P = \frac{0.5}{\cos 0.0955^\circ} - 0.5 = 6.9455 \times 10^{-7} \text{ mm} \approx 0.7 \text{ nm}, \quad (4)$$

式中: $P'$  为实测位置的距离; $P$  为真实螺距; $n$  为圈数。

根据计算结果,实测位置与理想位置的差值即余弦误差  $E$  可忽略不计。

螺旋线摆放与调整的操作步骤如下:1)在固定条和装置间放一对等直径的大尺寸滚动定位针规,再用活动条压紧上述装置,如图 7(b)和图 7(c)所示;2)将螺旋线放置在两根圆棒上,利用从两根圆棒的缝隙照射上来的底部同轴光对初始几圈螺距进行测量;3)如发现所测位置的螺距不符合图纸要求,更换其他尺寸的滚动定位针规,继续顶紧装置,使卡块平移,带动圆棒转动,再带动螺旋线转动,转动方向的逻辑关系如图 7(d)所示;4)继续复测螺距,直到符合图纸要求,确定螺距的测量起始点。

若测量结果显示相邻两个螺距值的偏差方向相反,且都超差,则将一个螺距向公差带方向转动,若另外一个螺距超差更加严重,则可以判定螺旋线起始位置不合格。

滚动定位针规更换的尺寸遵循以下原则:从大到小更换,摆放装置不回退,减小空回误差,螺旋线始终往一个方向转动。

更换过程中,直径差  $\Delta D$  的计算公式为

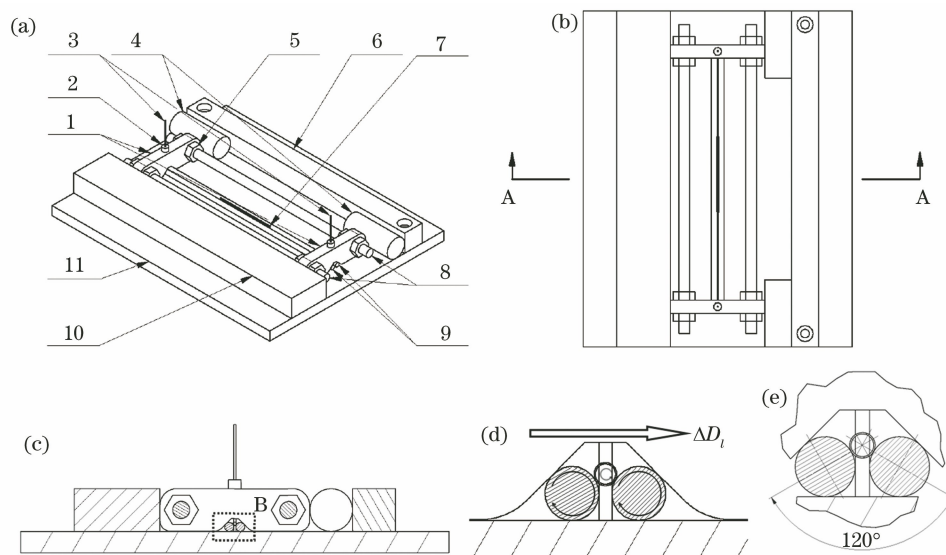
$$\Delta D = \frac{\beta \cdot \pi \cdot R_h}{180^\circ}, \quad (5)$$

式中: $\beta = \frac{|P_n - P|}{|P_n - P_{n-1}|} \times 360^\circ$ ,即认为跳变或渐变的相邻两圈螺距是一个渐变的过程,整个圆周方向  $360^\circ$  各处渐变量相等,将螺旋线旋转  $\beta$  角后,即可让符合公差的螺距位置处在镜头正下方; $P$  为第  $n$  圈实测的螺距值, $P_n$  为第  $n$  圈螺距的设计值,一般为靠近端面的第一圈, $P_{n-1}$  为第  $n-1$  圈螺距的设计值,一般为靠近端面的第二圈。

如图 7(d)所示,卡块平移  $\Delta D$  后,两根圆棒的圆心向同方向移动  $\Delta D$ ,弧长滚动  $\Delta D$ ,因两根圆棒与螺旋线始终保持接触,螺旋线的弧长同样滚动  $\Delta D$ ,即实现了大小为  $\beta$  角的转动。

#### 3.2 建立工件坐标系

以第一圈螺距的起始点为坐标原点进行工件定位,该起始点已由上述零件摆放与调整装置确定。螺旋线自然摆放在两根圆棒内的缝隙上,因此坐标轴向可由圆棒确定。具体的操作办法如图 8 所示,在圆棒左右各两个区域取点,然后在左、右两侧分别求各自的中点,以左右中点的连线作为 X 轴。这种方法在减小测量误差方面,有三个优势:1)圆棒为标



1: fixture block; 2: plug gauge sleeve; 3: plug gauge; 4: roll plug gauge for location; 5: nut; 6: fixed strip on measuring platform; 7: helix; 8: double-screw bolt; 9: standard round bar; 10: slide-impacted strip on measuring platform; 11: measuring platform

图 7 螺旋线摆放与调整装置。(a)等轴侧视图;(b)俯视图;(c)剖视图 A-A;(d)局部放大视图 B;(e)螺旋线被支撑位置与角度  
Fig. 7 Device of placement and adjustment of helix. (a) Isometric view; (b) top view; (c) section view of A-A; (d) partial enlarge view of B; (e) supported position and angle of helix

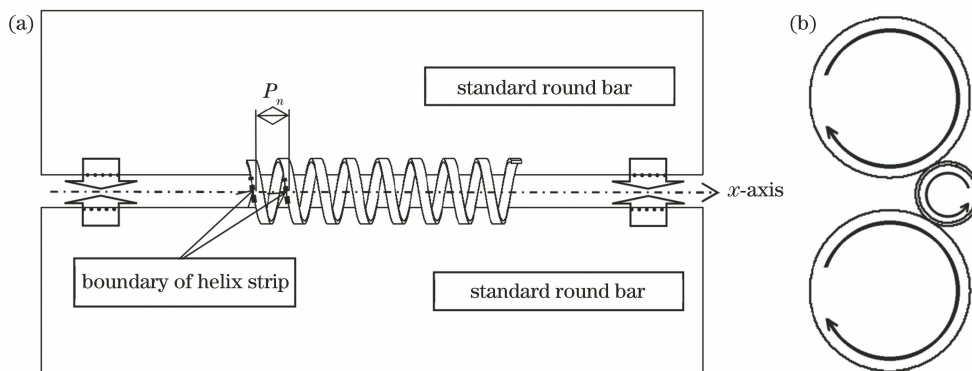


图 8 在摆放装置上建立工件坐标系。(a)俯视图;(b)左视图  
Fig. 8 Workpiece coordinate system on the placement device. (a) Top view; (b) left view

准件,其刚度、直线度优良,避免了螺旋线局部畸变的影响;2)同侧区域取两处点阵,点阵明暗方向相反,可以抵消测量边界与真实边界的误差;3)选择了长度大于螺旋线总长的范围进行定向,进一步提高了定向精度。

### 3.3 螺距检测的软件算法分析

螺距的测量程序,主要包含两部分内容:第一部分是前两圈跳变螺距的测量,每次测量完成后,需要人工核对测量值与图纸的误差,并做调整;符合图纸要求后,执行第二部分内容,即完成其他全部螺距的测量。

在软件算法编写上,首先以线取景器在螺带边

界构造直线段,设置一定的滤波比例<sup>[13]</sup>,剔除可能出现的毛刺、翻边的影响,如图 9 所示。然后求直线段与 X 轴的交点,相邻两个交点的距离即认为是螺距值;对于密绕的螺旋线,平移 X 轴(图 10 中虚线)至直线段中心附近(图 10 中实线),可以大幅度减小测量误差。接下来是复制阵列上述步骤,完成余下全部螺距的自动测量。目前主流的影像仪测量软件,只具备等间距阵列的功能。对于渐变段,等间距阵列无法消除累计误差的影响,最终取景器会偏离螺带边界越来越多,导致无法自动寻边。倘若根据设计值一段一段地设置阵列,虽然可以获得一个非常完美的自动测量程序,但编程耗时往往是巨大的;

软件生成的测量程序源代码,也可进行二次开发,但阵列后,各行代码相对独立,修改效率远低于高级编程语言的循环语句。比较方便的方式是:1)根据渐变量一般不超过  $5\ \mu\text{m}$  的设计,选择  $10\sim 20$  圈的平均值进行阵列,可以确保螺带边界始终落在取景器范围内,然后再根据之后  $10\sim 20$  圈的平均值阵列,依次类推,完成全部螺距的测量;2)每个被阵列的单

元,均增加原点定位,可消除部分累计误差,使取景器中心更加接近螺带边界,降低误抓边的概率;3)测量完毕后,输出测量结果到 Excel 表格中,再与自动生成的设计值比较,即可高效地完成每一圈螺距的检测与评价,所编写的自动测量程序和结果模板,可以重复利用,再次测量同规格的螺旋线时,可以大幅度节省操作时间。各环节消耗的时间对比如表 1 所示。

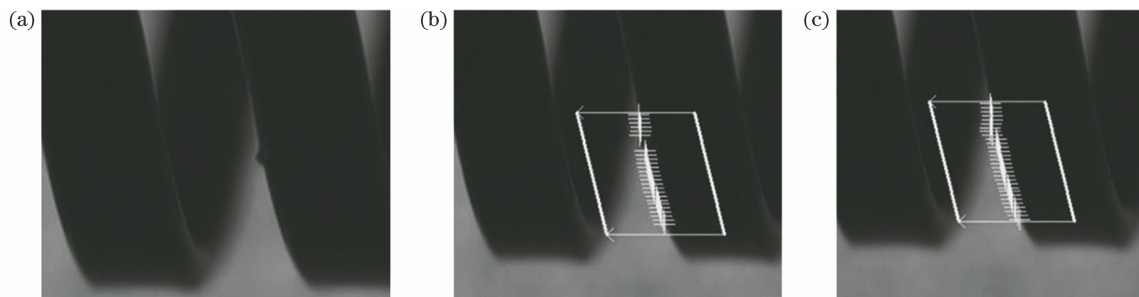


图 9 线取景器自动滤波效果图。(a)毛刺示意图;(b)有效滤波;(c)滤波失效

Fig. 9 Automatic filtering effect based on linear viewfinder. (a) Schematic diagram of burr; (b) effective filtering; (c) invalid filtering

表 1 各策略消耗的时间对比

Table 1 Comparison of time consumed by each strategy

Measurement strategy	Programming time	Running time	Report-writing time	Total time
	$t_1/\text{min}$	$t_2/\text{min}$	$t_3/\text{min}$	$t/\text{min}$
Manual measuring	0	30	1	31
Segmented programming	35	4.5	0.1	39.6
Segmented array programming+point measurement	5	5	2.5	12.5

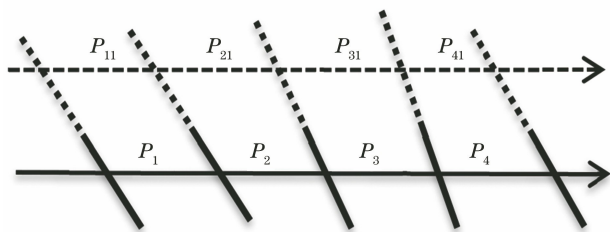


图 10 螺带边界不平行导致的交点距离误差

Fig. 10 Error of distance between intersection points caused by unparallel boundary of helix strip

采用上述自动测量程序,对一根螺旋线进行 10 次重复测量,得到的结果如图 11 所示。除两圈跳变螺距外,每圈取 10 次测量结果的最大值与最小值之差<sup>[14]</sup>,得到 114 个重复性数据指标,计算结果显示,重复性平均值达到  $0.8\ \mu\text{m}$ ,三处螺距存在畸变的区域均未漏检。之所以剔除跳变段,是因为跳变螺距的公差范围较大,为  $\pm 0.05\ \text{mm}$  或  $\pm 0.03\ \text{mm}$ ,每次旋转到合格范围内就可以记录数据,而均匀螺距、渐变螺距的公差为  $\pm 0.005\ \text{mm}$ ,甚至更为严格,二者不在一个数量级。

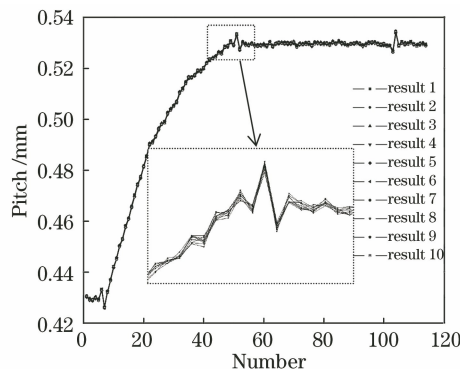


图 11 螺距测量结果的重复性

Fig. 11 Repeatability of pitch measurement results

### 3.4 内外径、锥角的检测

螺旋线的外径,可放置在如图 12 所示的专用垫块上,在垫块的通孔位置,用顶部同轴光照射,测量该处的外径,并通过不同位置的外径差值计算锥角<sup>[15]</sup>。用光原理如图 13 所示,照射至螺旋线上表面的光,大部分被反射至其他方向,无法返回镜头,照射至测量平台上的光因镜面反射,大部分又回到镜头,在螺旋线外径处形成了明暗对比鲜明的边界。

多个 V 型槽可同时固定多根螺旋线的旋转自由度；慢走丝获得的 V 型槽具有良好的直线度，可以令螺旋线摆放直线度优于 0.01 mm，以减小畸变对外径测量的影响。

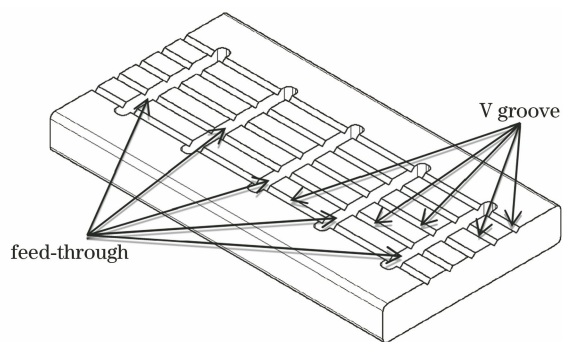


图 12 外径测量垫块

Fig. 12 Outer diameter measurement block

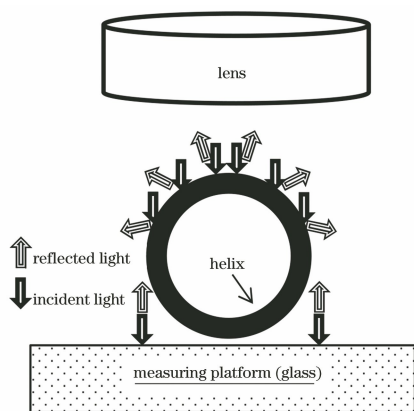


图 13 螺旋线外径测量光路图

Fig. 13 Schematic of outer diameter measurement

测量端口位置的内径时，依旧将螺旋线摆放在上述 V 型槽垫块上，侧面增加一套光源、遮光罩、导光管装置，提供一束与螺旋线直径相当的平行光照射螺旋线，采用 45°直角棱镜，将轮廓的阴影反射至影像测量仪镜头内，整个内径测量系统如图 14 所示<sup>[16]</sup>。通过调整合适的遮光罩外形和光源亮度，所得成像可从图 15(a)优化至图 15(b)，边界对比度鲜明，在圆形自动寻边取景器下，可捕捉到稳定的点。

为了消除内径测量装置摆放垂直度、光的折反射变形、仪器示值误差带来的影响，可先将与螺旋线设计直径相等的 1.4 mm 环规和 1.6 mm 环规放置在 V 型槽上进行校准，得出测量结果分别为 1.4019 mm、1.6022 mm，将之后螺旋线内径的测量结果分别向下修正 0.0019 mm 和 0.0022 mm。

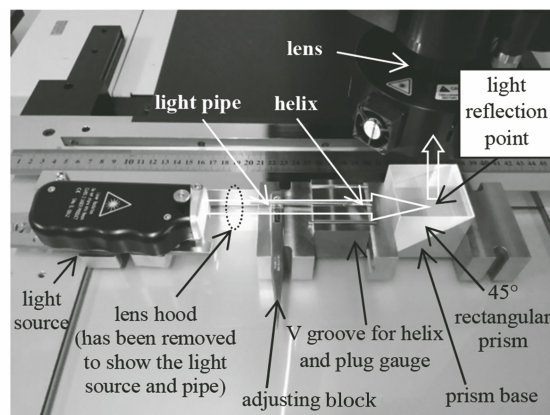


图 14 内径测量装置

Fig. 14 Inner diameter measuring device

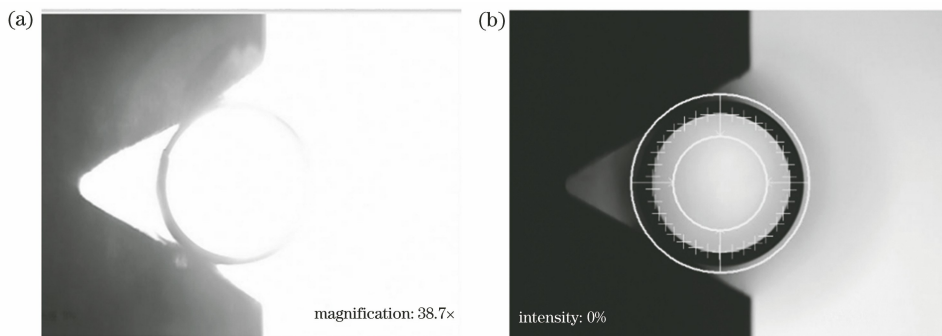


图 15 内径自动寻边效果。(a)优化前；(b)优化后

Fig. 15 Automatic search results for the edge of inner diameter. (a) Before optimization; (b) after optimization

### 3.5 粗糙度检测

采用 OLYMPUS OLS5000 激光共聚焦显微镜检测螺旋线外表面粗糙度的照片如图 16 所示。根据粗糙度  $R_a$  的估计值 0.5，按照线粗糙度的国标<sup>[17]</sup>要求，将取样长度设为  $l_R = 0.8$  mm，而实际测量区域并没有足够长的直线段能够用于线粗糙度的评

价<sup>[18-19]</sup>。解决方案有两种：一种是在图中手动绘制“线粗糙度评价曲线”路径，路径总长大于  $l_R$ ，按照国标<sup>[17]</sup>评价，操作较为麻烦；另外一种是直接采用共聚焦显微镜软件配置的面粗糙度标准<sup>[20]</sup>进行评价，框选任意区域，即可得到螺旋线外径的面粗糙度  $S_a$ ，实测结果平均值为 0.465，测量效率较高。

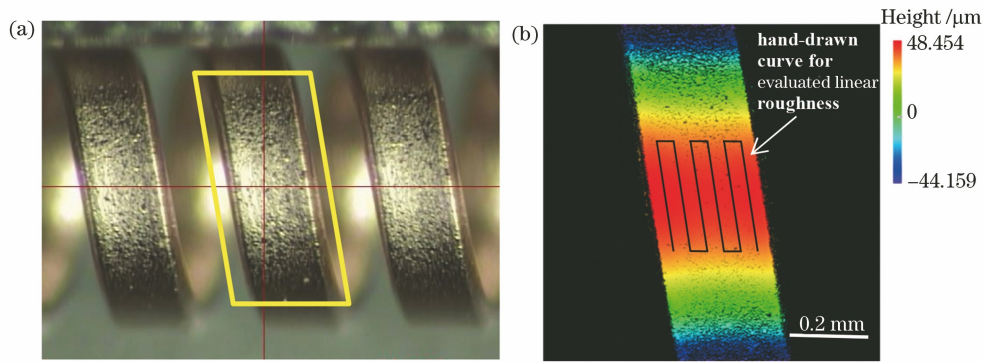


图 16 螺旋线外表面扫描云图。(a)光学显微镜成像;(b)激光共聚焦显微镜成像

Fig. 16 Scanning cloud chart of helix's outer surface. (a) Optical microscope imaging;  
(b) laser confocal microscope imaging

为了继续验证测量结果的精度,做了以下两个对比试验:1)分别采用接触式粗糙度轮廓测量仪 Hommel T8000SC 和上文的激光共聚焦显微镜测

量同一根展平的螺带;2)将绕制完成的螺旋线外表面抛光后,复测粗糙度变化。得到了符合工艺规律的结果,如表 2 所示。

表 2 粗糙度测量结果

Table 2 Roughness measurement results

Sample status	Measurement equipment	Testing result 1	Testing result 2	Testing result 3	Average
Flatten strip	Hommel T8000SC	$R_a=0.455$	$R_a=0.468$	$R_a=0.459$	0.460
Flatten strip	OLYMPUS OLS5000	$S_a=0.449$	$S_a=0.459$	$S_a=0.438$	0.448
Helix	OLYMPUS OLS5000	$S_a=0.471$	$S_a=0.459$	$S_a=0.466$	0.465
Helix after grinding	OLYMPUS OLS5000	$S_a=0.186$	$S_a=0.175$	$S_a=0.158$	0.173

1) 对同一根螺带的测量,激光共聚焦显微镜与传统接触式设备的差值为

$$\Delta_1 = \left| \frac{0.448 - 0.460}{0.460} \right| \times 100\% = 2.6\% \quad (6)$$

2) 螺带经绕制后,表面粗糙度略有下降,下降量为

$$\Delta_2 = \left| \frac{0.465 - 0.448}{0.448} \right| \times 100\% = 3.8\% \quad (7)$$

3) 表面经磨削后,粗糙度得到了明显改善,改善量为

$$\Delta_3 = \left| \frac{0.173 - 0.465}{0.465} \right| \times 100\% = 62.8\% \quad (8)$$

## 4 结 论

从行波管螺旋线的工程应用角度考虑,开发了两种检测装置,提高了零件摆放与调整的效率、精度和洁净度;具体测量时,举例说明取景器和软件算法的选择对测量误差的影响,最终采用直线取景器和分段阵列编程策略对行波管螺旋线进行了检测;选择激光共聚焦显微镜检测粗糙度;以上共同构成了

一套相对完整的行波管螺旋线检测方案。具体指标如下:

1) 基于双标准棒滚动的螺旋线装置,使零件的摆放直线度优于 0.01 mm,旋转角度可按目标值步进,仅调整 1~2 次就能找到变螺距的起始位置,调整过程不存在应力集中、手套污染等问题。

2) 测量软件的直线取景器对螺带的自动寻边过程稳定,将直线与螺旋线轴线或轴线平行线的交点作为螺距特征点,具有较好的算法稳定性,测量结果重复性优于 0.8 μm。

3) 采用分段阵列的编程策略,检测变螺距螺旋线,具有较高的操作效率和灵活性,一根 116 圈的螺旋线,总检测时间约为传统方式的三分之一,同时测量多根时,效率提升效果将更加明显。

4) 基于 45°直角棱镜开发了端口处内径测量系统,使螺旋线水平放置在 V 型槽上即可完成检测,获得了对比度鲜明的成像效果。

5) 基于激光共聚焦显微镜测量了螺旋线外表面粗糙度,得到了与工艺规律相吻合的数据,测量结果与传统接触式设备的差值为 2.6%。



## 参 考 文 献

- [1] Gilmour A S, Jr. Klystrons, traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons [M]. Boston: Artech House, 2011.
- [2] Feng C. Research on microstrip meander line traveling wave tube based on periodical metallic rods [D]. Nanjing: Southeast University, 2018: 3-12.  
冯程. 基于周期金属圆柱的微带曲折线行波管研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018: 3-12.
- [3] Ghosh T K, Challis A J, Jacob A, et al. Design of helix pitch profile for broadband traveling-wave tubes [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009, 56(5): 1135-1140.
- [4] D'Agostino S, Paoloni C. Cathode voltage adjustment to compensate helix pitch tolerance in TWTs[J]. Electronics Letters, 2004, 40(1): 36-38.
- [5] Zhang X M, Yang G, Ou H L, et al. Theoretical investigation into an ultra-wideband helix traveling-wave tube[C]//2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC), April 28-May 1, 2019, Busan, Korea (South). IEEE, 2019: 18792381.
- [6] Ghosh T K, Jacob A, Tokeley A, et al. Optimization of helix pitch profile for broadband Mini-TWTs[C]//2008 IEEE International Vacuum Electronics Conference, April 22-24, 2008, Monterey, CA, USA. IEEE, 2008: 10072808.
- [7] Gong Y B, Duan Z Y, Wang Y M, et al. Suppression of in-band power holes in helix traveling-wave tubes [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2011, 58(5): 1556-1561.
- [8] Wang X N, Su X B, Xiao L. Design of high-efficiency Ka/Q dual-band millimeter-wave helix traveling wave tube slow wave structure [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(11): 1234-1240.  
王小宁, 苏小保, 肖刘. 高效率双频段 Ka/Q 毫米波行波管螺旋慢波系统的研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(11): 1234-1240.
- [9] Tang K S, Zhao G, Li S, et al. Analysis and optimization of parameters of double-taper helical slow-wave structure [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(9): 1507-1510.  
唐康淞, 赵刚, 李实, 等. 双渐变螺旋线慢波结构参数分析及优化 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(9): 1507-1510.
- [10] Li X W, Wang X N, Yu S J, et al. Simulation of interference-fit of helix in assembling space helix traveling wave tube [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(9): 1017-1023.
- [11] Chen C. Traveling wave tube structure design and the error analysis of the processing [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016: 35-46.  
陈聪. 行波管结构设计及加工误差分析 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 35-46.
- [12] Xu X H, Wang Q, Qian Z, et al. Automatic measurement system of invar rods based on image processing [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1519-1522.  
徐新华, 王青, 钱峥, 等. 基于图像处理的钢钢尺自动检测系统 [J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1519-1522.
- [13] Guo H T, Tian T, Wang L Y, et al. Image segmentation using the maximum entropy of the two-dimensional bound histogram [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(4): 506-509.  
郭海涛, 田坦, 王连玉, 等. 利用二维属性直方图的最大熵的图像分割方法 [J]. 光学学报, 2006, 26(4): 506-509.
- [14] Xiao Q, Wang X L, Fu Q, et al. An optical device for on-line measurement of thickness [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0223002.  
肖青, 王兴龙, 傅谦, 等. 一种用于厚度在线检测的光学装置 [J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0223002.
- [15] Liu Z S, Peng L Z, Li Y, et al. Measurement of taper angle deviation and generatrix straightness of machined parts with large sizes [J]. Acta Metrologica Sinica, 1991(4): 257-261, 274.  
刘中生, 彭履忠, 李艳, 等. 大尺寸外圆锥锥角偏差及素线直线度误差的测量 [J]. 计量学报, 1991(4): 257-261, 274.
- [16] Wu X J, Guo Y X. An 360° panoramic imaging design method for cylindrical object [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0923002.  
吴晓军, 郭亚雪. 一种圆柱物体 360° 全景成像装置设计方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0923002.
- [17] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Geometrical product specifications (GPS)-surface texture: profile method-surface roughness parameters and their values: GB/T 1031—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 产品几何技术规范 (GPS) 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值: GB/T

- 1031—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [18] Chen H P, Li J B, Liu C C, et al. Research on angle measure error based on method of angle difference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1012003.  
陈海平, 李佳斌, 刘长春, 等. 基于角差法面形测量装置的测角误差研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1012003.
- [19] Cui T G, Zhang H J, Ma W S, et al. Improvements of surface profile measuring device for Wolter type-I mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0412007.  
崔天刚, 张宏吉, 马文生, 等. Wolter I型反射镜面形检测装置的改进[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0412007.
- [20] International Organization for Standardization. Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Areal-Part 2: terms, definitions and surface texture parameters: ISO 25178-2: 2012 [S]. Switzerland: IHS, 2012.