

基于扭曲量的V形聚能铜切割索直线度检测方法研究

汪辉强, 李 聪, 李泽东*, 阙 刚, 邹远彬, 陈子豪, 冯 俊, 李 翔, 赵世兵

四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月14日

摘 要

V形聚能切割索的校直直线度对于产品质量有着重要影响。目前切割索校直后通过目测的方式检测其直线度, 存在效率低、各检验人员标准不一致、无法量化等问题, 给生产及交付造成了瓶颈。针对以上问题, 提出一种能够量化V形聚能切割索是否合格的算法, 并设计了一套能检测V形聚能切割索直线度的装置。试验表明, 该检测方法能够很好的对V形聚能切割索校直程度进行判定。

关键词

V形聚能切割索, 直线度, 检测

Research on Straightness Detection Method of V-Shaped Linear Shaped Cutting Device Based on Distortion

Huiqiang Wang, Cong Li, Zedong Li*, Gang Que, Yuanbin Zou, Zihao Chen, Jun Feng, Xiang Li, Shibing Zhao

Sichuan Aerospace Chuannan Initiating Explosive Technology Limited, Luzhou Sichuan

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 14th, 2025

Abstract

The V-shaped linear shaped cutting device straightening straightness for product quality has an important influence. The linear shaped cutting device after alignment through the visual way of detecting

*通讯作者。

文章引用: 汪辉强, 李聪, 李泽东, 阙刚, 邹远彬, 陈子豪, 冯俊, 李翔, 赵世兵. 基于扭曲量的 V 形聚能铜切割索直线度检测方法研究[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 289-296. DOI: 10.12677/jsta.2025.133029

the straightness, efficiency is low, the insepction personnel of inconsisitent standards, unable to quantify the problem, to the production and delivery caused by the bottleneck. To solve the above problems, so we design a set of detection linear shaped cutting device equipment and straightness is proposed to quantify the executioner reward eligibility cut algorithm has important significance. In order to overcome the disadvantages of existing technology, design of cutting cable straightness detection platform, and puts forward to the distorted size determine the alignment or not, experiments show that the detection method can be very good for the linear shaped cutting device judged.

Keywords

The V-Shaped, Linear Shaped, Cutting Device

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铜切割索是一种切割性能优异的线性分离火工品，具有重量轻，结构简单，工作可靠性高等优点。广泛用于航天级间分离、自毁和舱体切割等方面[1] [2]。

铜切割索为带 V 型聚能槽的线性装药结构[3]，见图 1，在成形后会发生如图 2 所示的弯曲和扭转，在使用前必须进行校直且检测直线度。

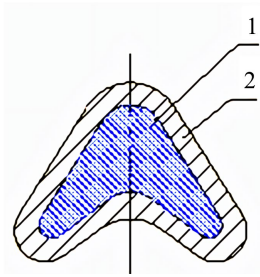


Figure 1. Typical shape of copper cutting cable. 1: Explosives; 2: Copper skins

图 1. 典型铜切割索形状。1：炸药；2：铜皮



Figure 2. Post-production state of a copper cutting cable

图 2. 某铜切割索生产后状态

中国工程物理研究院的徐森等人[4]采用加工和保存短基准平尺进行拼接重构,实现对 600 mm 以上的大行程导轨的直线度测量。中北大学的杨璐等人[5]利用横向光电效应开发了一种检测火炮身管直线度的系统,通过爬行器带动位敏传感器在身管内部沿身管轴线运动,计算得到火炮身管直线度。南京理工大学的刘不凡等人[6]提出一种基于激光的导轨直线度检测算法,通过在滑块上安装激光,并照射导轨末端的位置传感器,利用光斑离坐标系的距离计算得到导轨倾斜角和直线度。

由于铜切割索截面尺寸较小且存在安全风险,不便于采用以上需使用硬件直接接触被测对象表面的方法,而常用的激光跟踪仪[7]、三坐标测量仪[8]、经纬仪、球杆仪等高精度非接触式检测仪器的操作技能要求高、测量过程复杂、价格昂贵。因此目前对校直后的铜切割索的直线度采用目测进行检测,其方法为:将铜切割索放置在工作台上,通过观察铜切割索与台面的间隙对铜切割索直线度进行判断,间隙越小,铜切割索越直,如图 3 所示。



Figure 3. Sketch of straightness measurement of a copper cutting cable
图 3. 某铜切割索直线度检测示意图

目前检测方法存在以下问题:

- 1) 桌面水平度不高,不能作为直线度检测的理想参照。
- 2) 直线度的大小由检测人员采用肉眼判断,主观因素影响较大,且没有直线度的相应判据。

目前检测方式存在各检验人员标准不一致及无法量化等问题,已经给生产及交付造成了瓶颈。因此设计一套能检测铜切割索直线度的装置以及提出一种能够量化铜切割索是否合格的算法具有重要意义。

2. 直线度检测方法及原理

直线度为限制实际直线对理想直线变动量的一种形状公差,常用的检测方法有直尺法、重力法、直线法、光隙法、垫塞法、节距法、准直法、光学准直法等[4],以上检测方法按原理分为两类,第 1 类为将被测物体与理想物体进行比较的方法进行测量,如光隙法[5],如图 4 所示。第 2 类为通过数据采集,然后采用最小二乘法的数据处理方式进行直线度误差评定[6],如节距法,如图 5 所示。

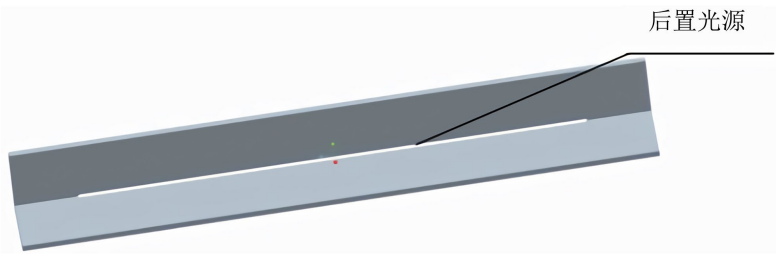


Figure 4. Detection principle of optical gap method
图 4. 光隙法检测原理

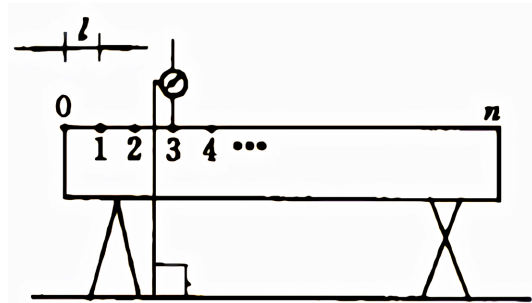


Figure 5. Principle of pitch method
图 5. 节距法原理

由于铜切割索材质较软，大于一定长度后会由于自重而发生弯曲，因此在进行直线度检测时，必须有一基准平台支撑铜切割索。当采用第 1 类检测原理检测铜切割索直线度时，如采用光隙法检测时，通过人眼判断光隙的大小来确定铜切割索直线度，由于人眼每次观测位置不固定，造成检测的直线度误差较大。采用光隙法时，也可采用规定塞尺塞入光隙以测量铜切割索偏离量，操作时，采用不同规格塞尺反复塞入光隙以确定铜切割索偏离量，以光隙满足一定要求为合格。由于切割索与光隙之间间隙较小，使用该方法手工操作难度大，采用人工将塞尺塞入光隙检测过程中可能会被塞尺顶起，造成检查结果比实际偏大，故第 1 类检测原理不适合铜切割索直线度检测。

当采用第 2 类检测原理时，由于铜切割索为 V 形的两面结构，其 V 形夹角顶部及 V 形面都需检测直线度。由于铜切割索为异型面校直，其在校直过程中可能会发生扭转，若采用节距法等仅检测其中一面的方法难于实现对铜切割索扭转的检测。同时，由于切割索外形结构特性，发生扭转时其 V 形夹角顶部及 V 形面直线度会发生改变，为克服现有技术的不足，提出了以铜切割索扭曲量大小来判定其校直与否的检测方法。

3. 基于扭曲量的铜切割索检测方法

3.1. 检测方法的确定

根据铜切割索为 V 形面结构的特点，要想获得其直线度，需检测其顶部以及侧面两个方向的直线度。根据其结构，可分别在上述两个面采用百分表对其跳动量进行检测，如图 6 所示。要求选用灵敏度较高的百分表，避免百分表测头压迫铜切割索使得其受压变形。

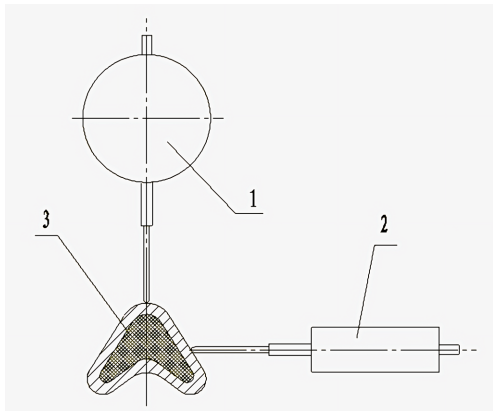


Figure 6. Detection of copper cutting cable. 1: Dial indicator A; 2: Dial indicator B; 3: Copper cutting cable
图 6. 铜切割索检测。1：百分表 A；2：百分表 B；3：铜切割索

铜切割索为带角度的 V 形面结构，其 V 形面带有一定倾斜角度，可利用该角度对铜切割索进行限位，如图 7 所示。

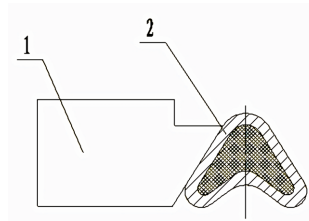


Figure 7. Baffle and copper cutting cable. 1: Baffle; 2: Copper cutting cable

图 7. 挡板与铜切割索。1: 挡板；2: 铜切割索

通过设计装置将挡板和百分表固定在台面上，形成了铜切割索直线度检测装置示意图，如图 8 所示。

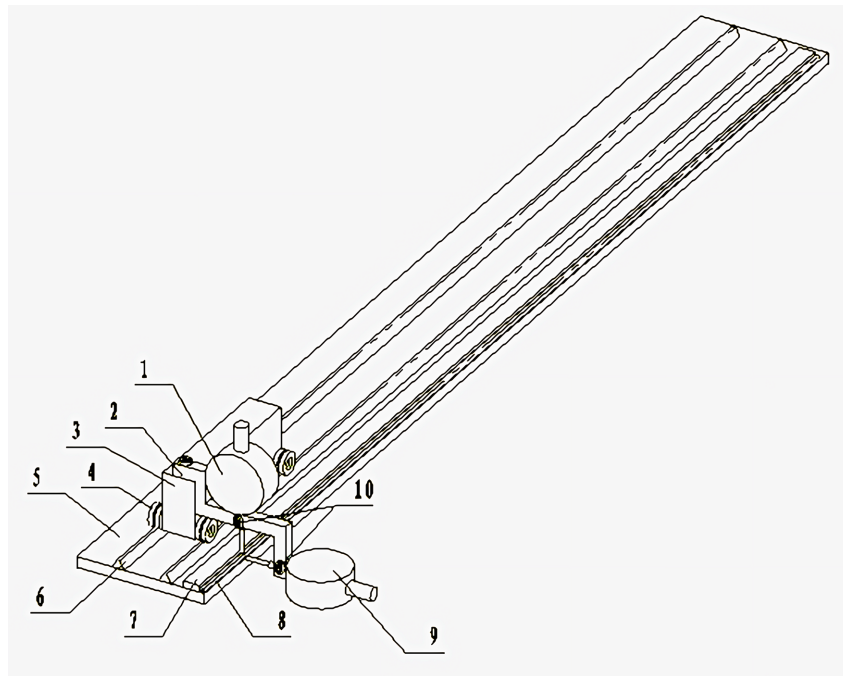


Figure 8. Schematic diagram of copper cutting cable straightness detection device. 1: Dial indicator A; 2: Support

frame; 3: Trolley; 4: Roller; 5: Base; 6: Rail; 7: Barrier; 8: Copper cutting cable; 9: Dial indicator B; 10: Screw

图 8. 铜切割索直线度检测装置示意图。1: 百分表 A; 2: 支撑架; 3: 小车; 4: 滚轮; 5: 底座; 6: 导轨;

7: 挡板; 8: 铜切割索; 9: 百分表 B; 10: 紧定螺钉

底座上表面为平面，待测铜切割索放置在底座的上表面；导轨固定在底座的上表面，且待测铜切割索与导轨平行。

挡板固定在底座的上表面，具有倾斜的侧面，该倾斜的侧面与铜切割索的一个外侧面匹配，定位铜切割索。

支撑架固定在小车上，具有水平部和竖直部，水平部用于固定百分表 A，竖直部用于固定百分表 B。

百分表 B 水平放置，固定在支撑架的竖直部，测量杆穿过竖直部的通孔，表头接触铜切割索的另一个外侧面。

百分表 A 竖直放置，固定在支撑架的水平部，测量杆穿过水平部的通孔，表头接触铜切割索的顶端。

小车用于承载支撑架沿导轨滑行。

以铜切割索端头起始点作为零点，通过小车的运动带动百分表 A、百分表 B 在铜切割索上运动，每隔一定长度记录一次百分表 A、百分表 B 读数。

获取并记录工艺参数 X , Y ，其中 X 为水平方向百分表读数， Y 为垂直方向百分表读数。可得：

$$\Delta X_{n-1} = X_n - X_{n-1}$$

$$\Delta Y_{n-1} = Y_n - Y_{n-1}$$

其中， n ——铜切割索上的点； X_n ——水平方向上第 n 点百分表读数； X_{n-1} ——水平方向上第 $n-1$ 点百分表读数； ΔX_{n-1} ——水平方向相邻两点的差值(即第 $n-1$ 段的差值)； Y_n ——垂直方向上第 n 点百分表读数； Y_{n-1} ——垂直方向上第 $n-1$ 点百分表读数； ΔY_{n-1} ——垂直方向相邻两点的差值(即第 $n-1$ 段的差值)；作出的 ΔX_{n-1} , ΔY_{n-1} 的矢量图，如图 9 所示。

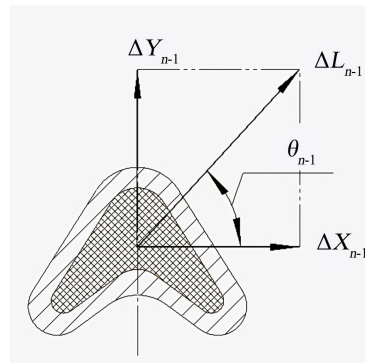


Figure 9. Vector graphic
图 9. 矢量图

可得：

$$\Delta X_{n-1} + \Delta Y_{n-1} = \Delta Z_{n-1}$$

$$\Delta Z_{n-1} = \sqrt{\Delta X_{n-1}^2 + \Delta Y_{n-1}^2}$$

其中， ΔX_{n-1} 为 ΔX_{n-1} 的矢量值； ΔY_{n-1} 为 ΔY_{n-1} 的矢量值； ΔZ_{n-1} 为 ΔX_{n-1} 、 ΔY_{n-1} 在第 $n-1$ 段的矢量值； ΔZ_{n-1} 为 ΔZ_{n-1} 向量数值。

设 ΔZ_{n-1} 与 ΔX_{n-1} 夹角为 θ_{n-1} ，可得：

$$T_{n-1} = \tan \theta_{n-1} = \Delta Y_{n-1} / \Delta X_{n-1}$$

其中， n 为铜切割索上的点， T_{n-1} 为铜切割索上第 $n-1$ 段的扭曲量，通过对各点算得的 T_{n-1} 值进行统计，可得：

$$\Delta T = |T_{\max} - T_{\min}|$$

其中， $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ ——分别对应 T_{n-1} 最大值及最小值， ΔT ——为其差值，即为该铜切割索扭曲量，以 ΔT 值的大小(以经过检验合格，满足合格下限的切割索进行检测得出 ΔT 经验值通常设定为不大于 5)来判定铜切割索是否满足需求。

3.2. 检测平台设计

考虑到实际加工难度及平台各零件的自身直线度、平面度的检测难度，结合铜切割索实际使用长度

基本均在 0.5 m~1.2 m 之间, 故检测平台的长度可降低到 1.5 m, 以满足一般机床加工要求。故对检测平台的指标需求如下。

- 1) 系统测试误差: 不大于 0.2 mm/m;
- 2) 平台长度: 1.5 m;
- 3) 检测操作台宽度: ≥ 0.005 m。

根据指标需求, 设计了图 10 所示的检测平台, 该平台由底座、导轨、小车、万向节和百分表以及侧挡等组成。

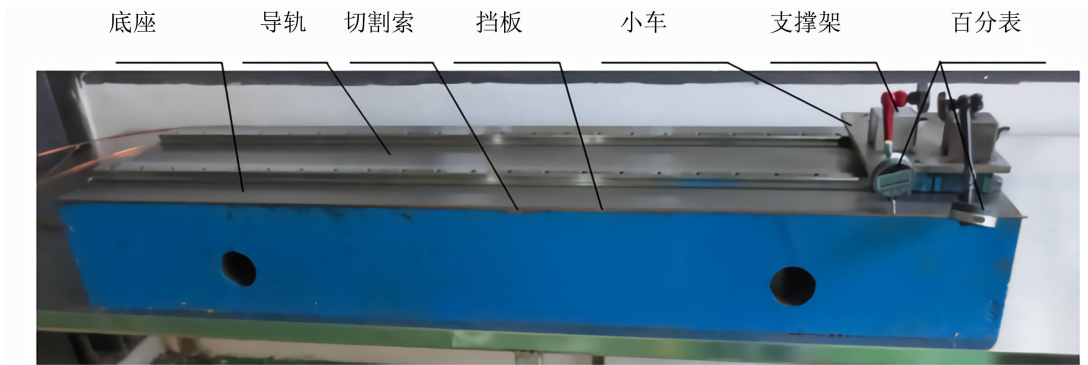


Figure 10. Detection platform
图 10. 检测平台

检测平台的总体测试误差要求小于 0.2 mm/m, 为保证测量精度, 考虑到各零件装配关系, 检测平台的底座由钢板经过研磨加工而成, 平面度不超过 0.01 mm, 导轨的直线度不超过 0.015 mm, 小车的同心度不超过 0.01 mm, 侧挡的平面度不超过 0.01 mm, 垂直度不超过 0.01 mm。

检测平台装配时采用精度为 0.01 mm 的经校准的平台使用打表的进行装配, 确保其装配精度满足检测要求, 装配完成后, 采用校准方式确认检测平台满足 0.2 mm/m 的使用要求。此外, 由于铜切割索背部角度一致, 故不同类型的铜切割索进行检测时仅需调整两个百分表探头与切割索接触的数值(一般百分表表头被压缩量不低于 0.5 mm)即可开始进行检测。

以水平平台作为检测基准, 用百分表测量铜皮切割索在不同位置的跳动情况, 以最大跳动值作为铜皮切割索的直线度检测结果。

检测时, 将铜切割索放置于底座上并靠近挡板, 将百分表表头与铜切割索接触并用表头压住铜切割索, 锁紧百分表并将百分表读数归零, 将百分表从铜切割索端头开始运动, 观察读数变化情况, 考虑到检测平台测试误差, 被检测铜切割索的指标应加严至 0.2 mm/m。采用三坐标仪对检测平台的系统误差进行测试, 其直线度为 0.1 mm/m, 满足指标要求。

测量时, 按以下步骤执行:

- 1) 选取铜切割索并放置于待检测台面上, 向左推铜切割索并使得铜切割索左侧与挡板右侧相贴合;
- 2) 将小车放入轨道并将支撑架固定在小车上;
- 3) 将两个百分表从支撑架孔穿过, 使得百分表表头与铜切割索接触并用表头压住铜切割索, 然后用螺钉锁紧两个百分表;
- 4) 调整小车在轨道上位置, 使得百分表表头对准铜切割索端头;
- 5) 小车从铜切割索端头开始运动, 每隔一段距离(根据使用实际, 设置为 10 cm)停顿一次, 记录百分表读数, 直至运动至铜切割索终点;

6) 根据上述算法算得扭曲量并判定是否合格。

4. 试验验证

以某长度为 1030 mm 铜切割索为例，从铜切割索起点开始，每隔 100 mm 记录一次百分表跳动量。各点跳动量如表 1 所示。

Table 1. Jump momentum of a certain cutting cable
表 1. 某铜切割索跳动量

测点序号	X_n (mm)	Y_n (mm)	ΔX_{n-1} (mm)	ΔY_{n-1} (mm)	ΔZ_{n-1} (mm)	T_{n-1}
1	0.06	0.07				
2	0.05	0.08	-0.01	0.01	1.414	-1
3	0.04	0.07	-0.01	-0.01	1.414	1
4	0.06	0.06	0.02	-0.01	2.236	-0.5
5	0.05	0.08	-0.01	0.02	2.236	-2
6	0.04	0.06	-0.01	-0.02	2.236	2
7	0.06	0.04	0.02	-0.02	2.282	-1
8	0.07	0.03	0.01	-0.01	1.414	-1
9	0.08	0.04	0.01	0.01	1.414	1
10	0.06	0.05	0.02	0.01	2.236	0.5
11	0.07	0.03	0.01	-0.02	2.236	-2

按照此方法可以获得各段扭曲量 T_{n-1} ，可得 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为 2、-2，由

$$\Delta T = |T_{\max} - T_{\min}| = |2 - (-2)| = 4$$

满足 ΔT 绝对值不大于 5 的要求，该铜切割索直线度合格。经检验人员采用原目测检测方法对该铜切割索直线度进行检测，该铜切割索直线度合格。

5. 结论

通过基于扭曲量的 V 形聚能铜切割索直线度检测方法的提出，量化了切割索检测的具体指标，通过试验验证，该检测方法能够保证铜切割索检测质量的一致性、可靠性及安全性。

参考文献

[1] 陈锋, 曹始发, 王晓勇, 等. 聚能切割 T 形节点传爆性能研究[J]. 火工品, 2021(2): 10-12.
[2] 易建坤, 姜新权, 彭浩. 起爆方式对线性聚能装药射流形成的影响[J]. 火炸药学报, 2006, 29(3): 57-61.
[3] 刘超. 某型发动机铜管切割索的研究与设计[J]. 时代报告(学术版), 2012(12): 141.
[4] 徐淼, 王新宽, 钱林弘. 一种超精密大行程导轨直线度检测新方法[J]. 机床与液压, 2017, 45(10): 140-143.
[5] 杨璐, 王惠源. 基于横向光电效应的火炮身管直线度检测系统研究[J]. 中国测试, 2019, 45(4): 98-103.
[6] 刘不凡, 司欣格, 包建东, 等. 基于激光的导轨直线度检测算法研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 140-142.
[7] Nubiola, A. and Bonev, I.A. (2013) Absolute Calibration of an ABB IRB 1600 Robot Using a Laser Tracker. Pergamon Press, 236-245.
[8] 杜洋, 高志山. 使用高精度三坐标测量仪实现透镜定中心[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 639-644.