

# 电力线路维护中受力监测紧线器的设计

税 涛<sup>1\*</sup>, 马珮淇<sup>1</sup>, 程 林<sup>1</sup>, 付爱晋<sup>1</sup>, 鲁大勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>重庆科技大学电子与电气工程学院, 重庆

<sup>2</sup>西南油气田公司川西北天然气净化厂, 四川 江油

收稿日期: 2024年11月11日; 录用日期: 2024年12月4日; 发布日期: 2024年12月11日

## 摘要

针对目前电网作业中传动紧线器在牵引过程中, 因受力过载发生安全问题, 研制一种适用于电力线路的维护、检修的具有受力监测功能的新型紧线器。本文首先阐述了紧线器的基本结构和原理, 同时采用ANSYS Workbench仿真软件对螺栓连接承拉板件的强度进行验算, 基于紧线器施工特性和吊钩及连接部件的受力特点, 采用基于电阻应变式测量原理制作开孔为M24螺纹孔的S型拉压受力传感器进行数据的采集和处理。最后, 根据拉力传感器的结构确定连接金具的外形结构, 决定采用40 Cr工具钢材料进行连接金具外壳的制作, 完成带有受力监测功能的紧线器。

## 关键词

紧线器, 传感器, 有限元仿真

# Design of Stress Monitoring Tighteners for Power Line Maintenance

Tao Shui<sup>1\*</sup>, Peiqi Ma<sup>1</sup>, Lin Cheng<sup>1</sup>, Aijin Fu<sup>1</sup>, Dayong Lu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic and Electrical Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

<sup>2</sup>Northwest Sichuan Natural Gas Purification Plant, Southwest Oil and Gas Field Company, Jiangyou Sichuan

Received: Nov. 11<sup>th</sup>, 2024; accepted: Dec. 4<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 11<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Aiming at the current power grid operation transmission tightener in the traction process, due to the force overload occurring safety problems, the development of a suitable one for the maintenance of power lines, and overhaul with the force monitoring function of the new tightener. This paper first explains the basic structure and principle of the tightener and, at the same time, adopts ANSYS Work-

\*通讯作者。

bench simulation software to calculate the strength of the bolt connection bearing plate parts, based on the construction characteristics of the tightener and the force characteristics of the hooks and connecting parts, adopts based on the principle of resistance-strain measurement to make the S-type pulling and compression force sensors with the opening of M24 threaded holes for the acquisition and processing of data. Finally, according to the structure of the tension sensor to determine the shape of the connecting fixture, it was decided to use 40Cr tool steel material for the production of the connecting fixture shell, to complete the tightener with the function of force monitoring.

## Keywords

**Tightener, Sensor, Finite Element Simulation**

Copyright © 2024 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/>



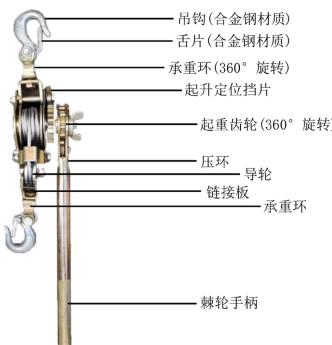
Open Access

## 1. 引言

绝缘紧线器(又称棘轮紧线器)作为维护输电线路安全运行和防止线路故障起到了关键作用[1]。用于在架空线路敷设施工中作为拉紧导线，传统手动棘轮紧线器作为不停电作业中的主要选择，在使用过程中主要依靠人工完成对线路紧绷度的控制，对工作人员体力要求极高的同时，紧线器的控制过程较为繁琐，易导致操作错误，甚至可能产生安全隐患[2]。

目前，现有不停电作业工具的机械试验周期为绝缘工具每年一次、金属工具两年一次。作业人员仅通过视觉观察难以及时地明确导线受力过载的临界状态[3]。近年来研究团队陆续提出了基于拉力传感器的受力监测解决方案[4]，如葛雄[5]等结合电阻应变式测力传感器、A/D 转换器等元件，实现实时监测承力工具的负荷，解决了国网输电线路中承力工具无法及时反映实际承力的问题；刘源等[6]通过改进卸扣和应变片布局，实现了输电线路铁塔组立施工中的高精度受力检测；刘祥和[7]设计了一种基于光纤光栅的输电导线拉力传感器，实现对输电线路的健康监测。但传感器安装较复杂，且对环境变化敏感，限制了大规模应用。从整体来看在输电线路中通过安装传感器来帮助作业人员协同工作，减少工作安全风险。因此有必要对紧线器进行载荷实时监测，本文在传统紧线器的基础之上设计新的承力部件安装拉力传感器进行紧线器的载荷监测，为作业人员提供安全预警、提高检修效率开展研究。

## 2. 棘轮紧线器的结构



**Figure 1.** Structure of ratchet wire tightener

**图 1.** 棘轮紧线器的结构图

目前棘轮紧线器由多部件构成，各自承担不同的功能，共同实现电线的拉紧和松弛[8]。其基本构成结构如图1所示，在紧线器的使用过程中，首先将钢丝绳或镀锌铁线松开，并固定在横担上。利用夹线钳夹住输电导线后，借助专用扳手操作，通过棘爪的防倒转功能，逐步利用钢丝绳、锌铁线缠绕在棘轮滚筒上，最终实现导线的收紧。把收紧的导线固定在绝缘子上[9]。然后先松开棘爪，使钢丝绳松开，再松开夹线钳，最后把钢丝绳绕在棘轮的滚筒上。实际作业过程中，通过对起升定位挡片位置的调整来精准控制电线的紧绷度。紧线器作为牵引装置，其承重环和起重齿轮均可以 $360^{\circ}$ 旋转，以适应户外作业的复杂工作环境[10]。

### 3. 棘轮绝缘紧线器的设计与分析

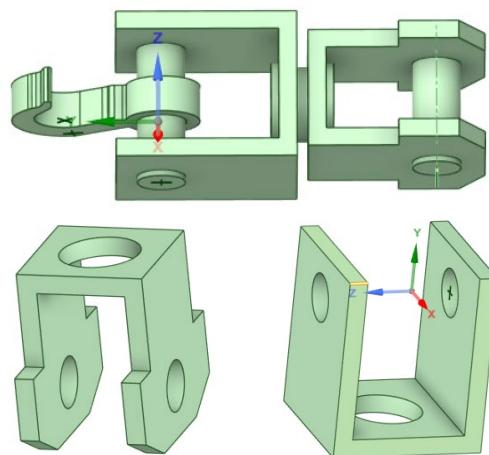
#### 3.1. 棘轮绝缘紧线器的连接结构设计

本设计意在发明一种新型的具有自动测量拉力功能的滑轮紧线器工装。经分析，由于滑轮是省力结构，所以受力最大的部位为吊钩、承重环和链接板。其结构如图2所示。



**Figure 2.** Diagram of load-bearing connecting parts  
**图 2.** 承力连接部件图

选用具有测量拉力功能的滑轮紧线器工装的最大承力为3吨。为确保拉压力传感器能够有效地安装于滑轮紧线器工装中，需对连接部件进行相应的改造。首先，依据传感器的安装要求，优化连接部件的几何形状，以确保其与紧线器的接口能够形成稳固且精准的配合。在Ansys SpaceClaim中建立仿真模型对链接处工件改造如图3所示。



**Figure 3.** High fidelity model  
**图 3.** 高保真模型

### 3.2. 力学分析与校核

计算许用应力的公式:

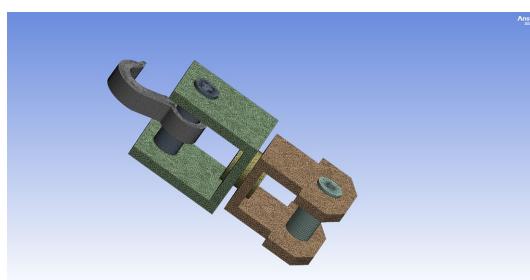
$$[\sigma] = \frac{\sigma_y}{n} \quad (1)$$

其中  $[\sigma]$  为许用应力;  $\sigma_y$  为屈服极限或条件屈服极限;  $n$  为安全系数。安全系数  $n$  根据材料的类型和使用条件不同而取不同的值, 对于铸钢件, 安全系数  $n$  取值范围为 1.8~2.5。在本次设计中, 最终选择安全系数为 2。确保了在设计应力范围内, 连接件具有足够的安全裕度。对于脆性材料, 破断力  $Q$  可以表示为:

$$Q = [\sigma] \cdot n_c \quad (2)$$

国标 GB/T18037-2008 规定当构件承受动荷重或冲击荷重时,  $n_c$  取值还应再增大 1.5 倍~2.0 倍[11]。因此破断力  $Q = 30,000 \text{ N} \times 4.0 = 120,000 \text{ N}$ 。GB/T18037-2008 中要求对孔装零件的吊钩的典型截面处的强度条件进行校核, 要求对螺栓连接承拉板件的强度进行验算。设计中包括拉应力和剪应力。

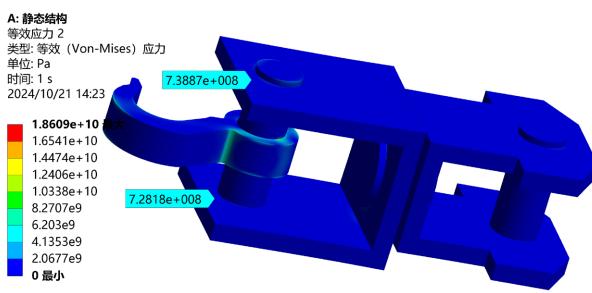
将简化后的三维模型导入 Ansys Workbench 软件中进行网格划分, 采用几何结构网格, 如图 4 所示, 初始尺度种子选择为装配体, 过度速度降为缓慢, 整体几何尺寸设置为 1 mm, 为确保仿真的精度, 并在关键受力位置和螺栓孔处进行加密处理加密尺度为 0.5 mm, 最后共计 44 万网格, 110 万节点数。



**Figure 4.** Load-Bearing workpiece meshing  
**图 4.** 承力工件网格划分

### 3.3. 仿真分析结果

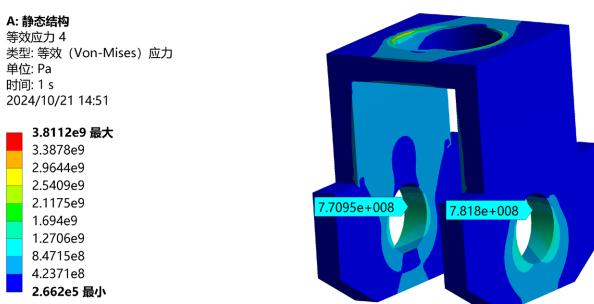
在链接板的螺栓处采用固定支撑, 并在吊钩前缘设定为 120000 N 的拉力, 并将结构在 X, Z 方向处的自由度设置为 0, Y 方向为自由。在连接关系上, 吊钩, 承重构件, 链接板与螺栓的接触关系为摩擦, 摩擦系数设定为 0.2, 求解公式选择广义拉格朗日, 此外, 两个连接件与之间螺栓的接触关系为绑定, 求解公式选择为 MPC。在 ANSYS Workbench 软件中, 对棘轮紧线器承力结构的有限元仿真分析进行求解, 得到整体及部件的等效应力云图, 图 5 和图 6 分别展示了在工况 12 t 的极限拉力下, 链接部件的应力云图和位移云图。



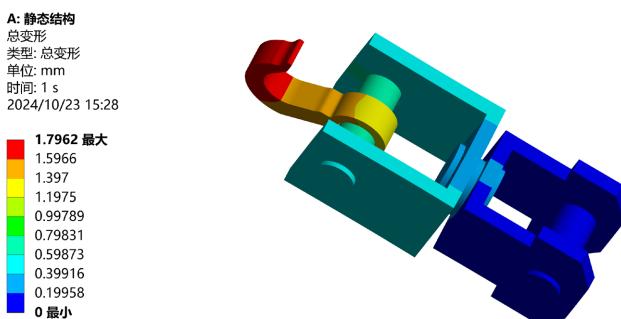
(a) 承力链接部件



(b) 吊钩



(c) 链接板

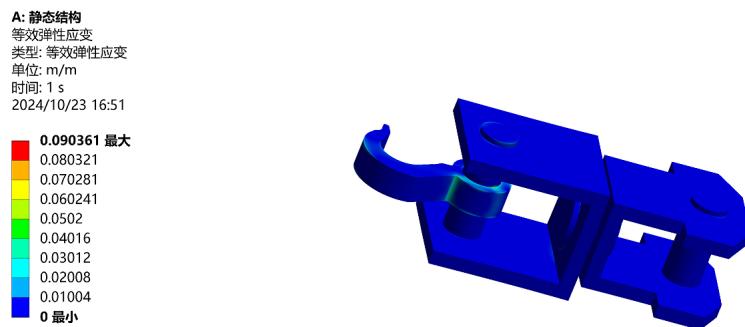
**Figure 5.** Simulated stress clouds**图 5.** 仿真应力云图**Figure 6.** Plot of morphological variables (Math.)**图 6.** 形变量分布图

从图中可以看到，选取连接部件的典型受力面，其应力集中分布在开孔圆角位置处，测得应力大小均小于所选材料 40 Cr 工具钢的屈服应力(785 MPa)，结构承力连接部件的强度符合国标要求及强度设计要求。根据工况下的仿真结果分析，在施加 12 t 荷载的作用力下，改装后的连接部件中，吊钩的最大变形量为 1.79 mm，链接板和承力板件的最大变形量均小于 1 mm，符合设计要求。紧线器承力结构总变形结果如图 6 所示，从图中可以看出，紧线器最大变形处为吊钩，变形从吊钩位置到链接板呈现从大到小的趋势。

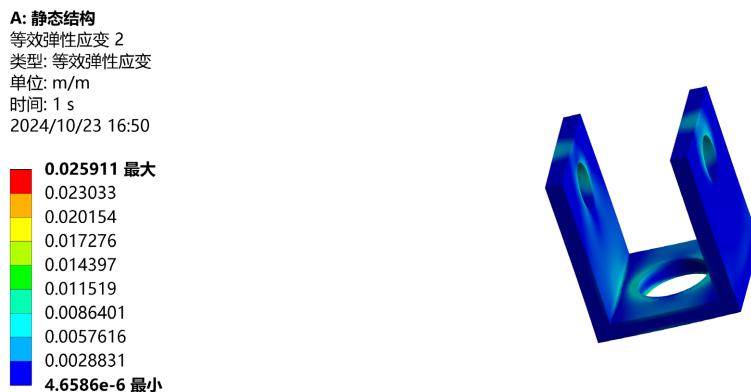
棘轮紧线器承力结构的整体弹性及承力构件的应变模拟结果如图 7 和图 8 所示，可以看出，承力结构的模型弹性应变在绝对部分区域都比较小，其中最大弹性应变集中于吊钩与承重板的连接处为  $0.090361 \times 10^{-4}$  Pa，最小弹性应变集中于承力板的两端开孔处为  $4.6586 \times 10^{-6}$  Pa。

从对最大等效弹性应变分析可看出，紧线器受力过程中，最容易产生弹性应变的部分就是吊钩以及

与承力部件的开孔连接部分。综合分析图 6 与图 7 可知, 承力结构等效弹性应变的分布位置与等效应力集中的位置基本一致, 这表明应力集中的区域会导致相应位置产生较大的弹性变。



**Figure 7.** Equivalent elastic strain diagram  
**图 7.** 等效弹性应变图



**Figure 8.** Equivalent elastic strain diagrams for load-bearing members  
**图 8.** 承力构件等效弹性应变图

## 4. 连接件外形材料的设计与安装

### 4.1. 外形材料的设计

为方便对 S 型传感器进行安装, 在承力构件和链接板设有螺栓连接孔, 选用六角头螺栓(GB/T5782-2016)、六角螺母(GB/T6175-2016)与平垫圈(GB/T95-2002)等连接件进行连接。同时为了保证传感器与两个连接件顺利连接同时不产生摇动, 工件采用 40 mm 厚度的 40 Cr 工具钢进行线切割加工, 在机械加工后进行热处理和表面处理。热处理淬火温度 840~870°C, 回火温度 100°C, 40 Cr 工具钢的屈服应力为 785 MPa。

考虑在架空线路敷设施工中受其恶劣环境的影响, 需增强工具的耐磨性, 以及为减少不停电作业工具的定期维护和更换对工具的抗氧化和腐蚀需求, 处理工艺为热镀锌。依据 GB/T18037-2008《带电作业工具基本技术要求与设计导则》对金属工具表面处理的要求, 本工件表面处理工艺为热镀锌。

### 4.2. 传感器的安装

拉力传感器基于电阻应变原理, 通过将施加的拉力转化为应变片的形变, 形变引起的电阻变化由惠斯通电桥转化为电压输出信号[12]。传感器选择由中皖金诺生产的 S 型拉压力传感器, 机器型号为 JLBS-

1, 量程为 0~5 t, 精度为 0.05%。传感器的两端开孔为 M24 螺纹孔, 传感器外形和安装如图 9 所示。传感器在作业人员实际使用过程中安装方便, 在手持棘轮手柄的工作过程中即可了解紧线器受力情况。



**Figure 9.** Tension Sensor Installation Diagram  
**图 9.** 拉力传感器安装示意图

## 5. 结论

本文针对电力线路维护中传动紧线器的安全隐患, 设计并研发了一种具备受力监测功能的新型紧线器。通过对紧线器的基本结构和工作原理的阐述, 以及利用 ANSYS Workbench 对其承载结构进行有限元仿真分析。

通过安装具有实时监测能力的 S 型拉压受力传感器, 实现作业人员的载荷可视化, 有限元分析结果表明, 在施加 12 吨拉力的工况下, 连接部件的最大应力小于 40 Cr 工具钢的屈服应力, 变形量控制在 1.79 mm 以内, 符合安全标准。验证了其在极限工况下的强度和稳定性。选用的 40 Cr 工具钢经过热处理和热镀锌处理, 确保了连接件的耐磨性和抗腐蚀能力, 适应恶劣环境。传感器的安装设计便于操作人员实时监测受力状态, 从而提高安全性。本研究为电力作业中紧线器的安全使用提供了有效的技术支持。

## 基金项目

重庆市重庆科技大学研究生科技创新计划(YKJCX2320407)资助项目。

## 参考文献

- [1] 赵柳恒, 覃小民, 郭璇, 等. 一种新型高压线路紧线器的设计与研制[J]. 电工技术, 2021(18): 114-115.
- [2] 董斌. 可远程控制的特高压输电线路液压紧线装置研究[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(5): 11-15.
- [3] 江全才, 叶翔, 黄成, 等. 利用悬浮式内摇臂抱杆分解组塔的施工工艺[J]. 南方电网技术, 2011, 5(3): 47-50.
- [4] 张龙斌, 唐波, 黄明祥, 等. 内悬浮抱杆组塔绳索受力监测传感器的研制[J]. 中国测试, 2023, 49(4): 119-126.
- [5] 葛雄, 程绳, 付军, 等. 输电线路智能承力工具的研制[J]. 电工技术, 2019(7): 42-44.
- [6] 刘源, 熊鹏文, 曾云飞, 等. 面向输电线路铁塔组立施工承力系统安全检测的力传感器设计[J]. 中国测试, 2024, 50(3): 116-122.
- [7] 刘祥和. 基于光纤光栅的输电导线拉力传感器设计及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- [8] 曾彦, 韦军, 谢殿海, 等. 10 kV 电动棘轮绝缘紧线器的设计及应用[J]. 自动化应用, 2023, 64(22): 119-121+124.
- [9] 胡勇, 陆莹. 一种新型紧线器在电网中的应用分析[J]. 广西电业, 2021(7): 65-69.

- 
- [10] 王煦, 王红梅, 秦凯. 某输电线路导线紧线过程中断裂机理分析[J]. 湖北电力, 2019, 43(4): 34-44.
  - [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T18037-2008 带电作业工具基本技术要求与设计导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
  - [12] Zafer, A. and Yadav, S. (2018) Design and Development of Strain Gauge Pressure Transducer Working in High Pressure Range of 500 MPa Using Autofrettage and Finite Element Method. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **19**, 793-800. <https://doi.org/10.1007/s12541-018-0095-y>