

# 不同启动条件对货运索道工作索载荷的影响研究

李燕雷<sup>1</sup>, 赵江涛<sup>1</sup>, 苏朝晖<sup>1</sup>, 程永锋<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国家电网有限公司, 北京

<sup>2</sup>中国电力科学研究院有限公司, 北京

Email: 286488316@qq.com

收稿日期: 2020年12月24日; 录用日期: 2021年1月20日; 发布日期: 2021年1月27日

## 摘要

为研究货运索道在动力因素影响下结构受力性能, 采用索道动力结构计算方法, 根据货运索道典型施工工况及主要技术参数, 针对影响索道安全性能运输启动因素, 设计了不同参数变化下的索道启动时计算工况。通过对比索道载荷、启动速度、启动位置、索道高差变化、索道跨距变化因素对索道启动时承载索、牵引索的张力变化情况, 对索道启动动力影响进行了量化分析, 并针对性的提出启动因素对牵引索、牵引装置在结构计算中的载荷系数, 为货运索道的的设计提供更加科学合理的参考依据。

## 关键词

输电线路, 货运索道, 启动, 承载索, 牵引索

# Study on the Effect of Different Starting Conditions on the Load of Freight Ropeway Working-Rope

Yanlei Li<sup>1</sup>, Jiangtao Zhao<sup>1</sup>, Zhaohui Su<sup>1</sup>, Yongfeng Cheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Grid Corporation of China, Beijing

<sup>2</sup>China Electric Power Research Institute, Beijing

Email: 286488316@qq.com

Received: Dec. 24<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jan. 20<sup>th</sup>, 2021; published: Jan. 27<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to study the structural mechanical performance of freight ropeway under the influence of dynamic factors, the calculation method of ropeway dynamic structure is adopted. According to

the typical construction conditions and main technical parameters of freight ropeway, the calculation conditions of ropeway start-up under different parameters are designed according to the transportation start-up factors affecting the safety performance of ropeway. By comparing the cable load, start-up speed, start-up position, height difference change and span change of the cableway, this paper makes a quantitative analysis on the influence of the cableway start-up power, and puts forward the load coefficient of the start-up factors on the structure calculation of the towing cable and the towing device, so as to provide more scientific and reasonable reference for the design of the freight cableway.

## Keywords

Transmission Line, Freight Ropeway, Start-Up, Carrying Rope, Haulage Rope

Copyright © 2021 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

输电线路货运索道具有架设难度低、地形适应强、环境破坏少及投资小等优势，在架空输电线路山区复杂地形的施工中得到广泛应用[1] [2]。

目前货运索道承载索的计算主要基于抛物线和悬链线理论等静力学模型进行工作索的选型和结构设计[3] [4] [5] [6]，索道单档内主要考虑静止的单个或少数集中荷载的工况，没有从索道的动力学效应考虑移动式多荷载及振动对索道承载力的影响[7]，安全系数的取值也缺乏理论及试验依据。

因此本文在向量式有限元法的基础上，分析索道在悬挂载荷的状态下，索道启动时载荷重量、启动速度等因素对工作索张力的影响，为充分发挥索道的承载能力提供理论支撑。

## 2. 货运索道结构

货运索道主要包括承载索、牵引索、支架、运行小车等结构部件，索道档距  $L$ ，高差  $H$ 。如图 1 所示。

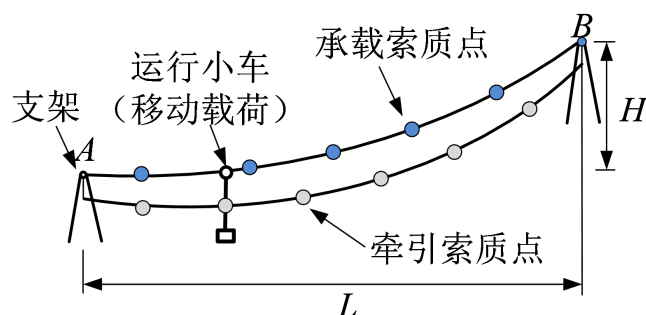


Figure 1. Diagram of structural of cableway

图 1. 索道结构示意图

采用向量式有限元法将承载索及牵引索离散为一系列质点的集合，如图 1 所示。索的质量由质点分担，质点间通过单元连接，质点的运动遵循牛顿第二定律。

### 3. 索道启动过程的动力影响

在索道启动运行时，由于牵引索的突然加速，造成牵引索张力的剧烈变化，同时对承载索也有一定影响，在此根据几种工况进行索道启动状态张力与稳定状态张力进行对比分析。

考虑动力应用作用衰减较快，对索长影响距离较短，因此以单承载索单档索道为例；根据常规索道，一般档内跨距多在 200~400 m 间，高差角多在 20° 以内，因此货运索道的最大跨距设计为 350 m，高度差设计为 130 m；货运索道运输重量一般不超过 4 t，在此设计载荷分别为 2 t、3 t、4 t。

货运索道工作索包括承载索与牵引索，其中承载索直径 30 mm，单位重量 4.57 kg/m，弹性模量为 110 GPa，设承载索初始长度 375 m；牵引索直径设计为 26 mm，单位重量为 3.4 kg/m，弹性模量为 110 GPa。

在此采用向量式有限元法分别分析载荷重量、载荷启动位置、启动速度、索道高差、索道跨距等因素对启动张力的影响，计算承载索、牵引索最大张力变化情况，工况设计如表 1 所示。

Table 1. Working condition table

表 1. 工况表

工况	载荷(t)	启动位置(m)	启动速度(m/min)	高差(m)	跨距(m)
1	2, 3, 4	190	30	130	350
2	2	75, 190, 300	30	130	350
3	2	190	15, 30, 60	130	350
4	2	190	30	80, 105, 130	350
5	2	190	30	130	280, 315, 350
6	2	190	30	130	350

### 4. 启动因素的计算分析

#### 4.1. 载荷对工作索张力的影响

如图 2 所示，分别为载重 2 t、3 t 和 4 t 索道启动时承载索和牵引索的张力变化曲线。经过对比计算，当载荷为 2 t 时承载索启动状态张力与稳定状态最大波动偏差为 2.29%，牵引索为 125.18%；当载荷为 3 t 时承载索启动状态张力与稳定状态最大波动偏差为 3.14%，牵引索为 94.24%；当载荷为 4 t 时承载索启动状态张力与稳定状态最大波动偏差为 3.45%，牵引索为 69.77%。可见，启动状态对承载索影响较小，对牵引索张力影响较大；同时载荷重量越小，启动时牵引索张力动力波动越大。

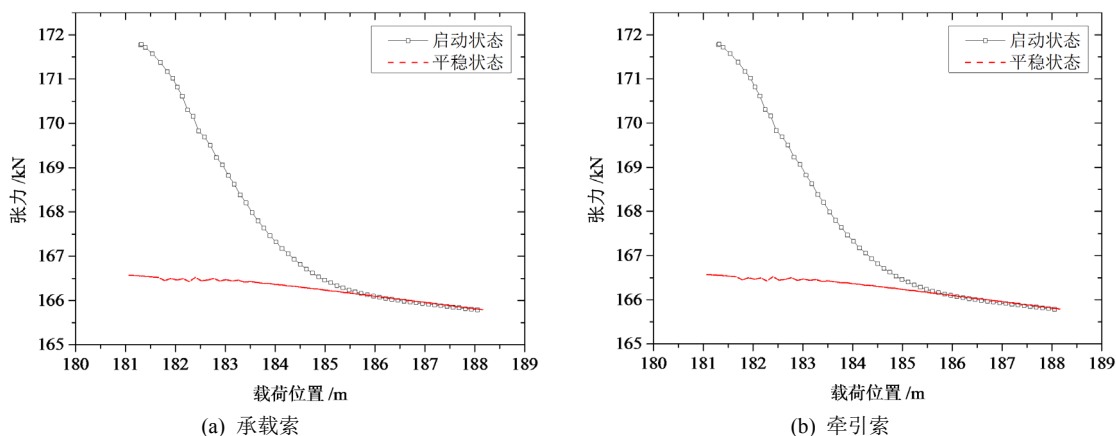


Figure 2. Change curve of starting tension under 4 t load

图 2. 4t 载重时启动张力变化曲线

## 4.2. 启动速度对工作索张力的影响

分别为索道以速度 15 m/min、30 m/min、60 m/min 启动时承载索和牵引索的张力变化曲线。图 3 为 60 m/min 启动速度时张力变化曲线。当索道以 15 m/min 启动时承载索张力与稳定状态最大波动偏差为 0.78%，牵引索为 56.19%；当索道以 30 m/min 启动时承载索张力与稳定状态最大波动偏差为 2.29%，牵引索为 125.18%；当索道以 60 m/min 启动时承载索张力与稳定状态最大波动偏差为 3.81%，牵引索为 149.41%。可见，启动速度对承载索影响较小，而对牵引索张力影响较大，并且启动速度越大牵引索张力波动越大。因此，索道启动时应降低索道牵引装置的运行速度。

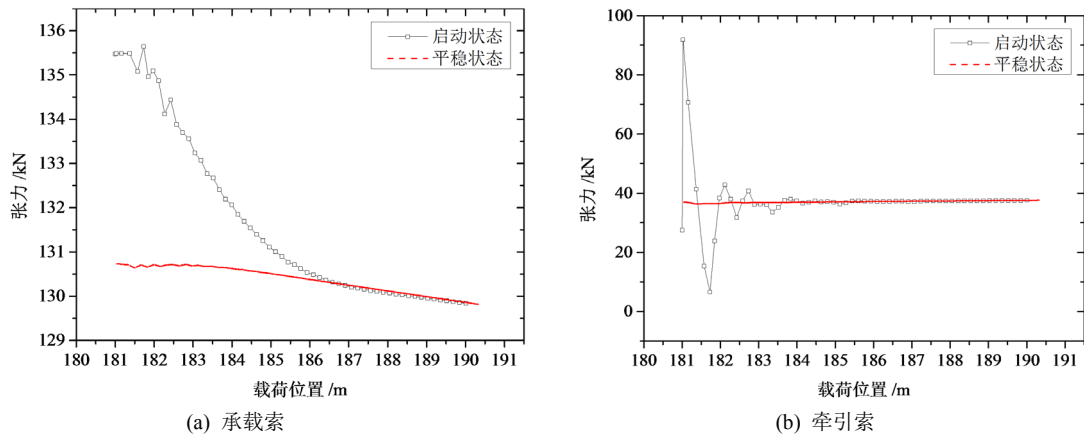


Figure 3. Tension curve at 60 m/min starting speed

图 3. 60 m/min 启动速度时张力变化曲线

## 4.3. 启动位置对工作索张力的影响

图 4 和图 5 分别为索道在档前(75 m)、档后(300 m)位置启动时承载索和牵引索的张力变化曲线。当在档前位置(75 m)启动时承载索张力与稳定状态最大波动偏差为-2.14%，牵引索为 92.35%；当在档中(190 m)位置启动时承载索张力与稳定状态最大波动偏差为 2.29%，牵引索为 125.18%；当在档后(300 m)位置启动时承载索张力与稳定状态最大波动偏差为 3.13%，牵引索为 164.28%。可见，对牵引索张力影响较大，并且启动时载荷越靠近末端支架牵引索张力波动越大。因此，应尽量避免载荷在档后位置时索道进行启停操作。

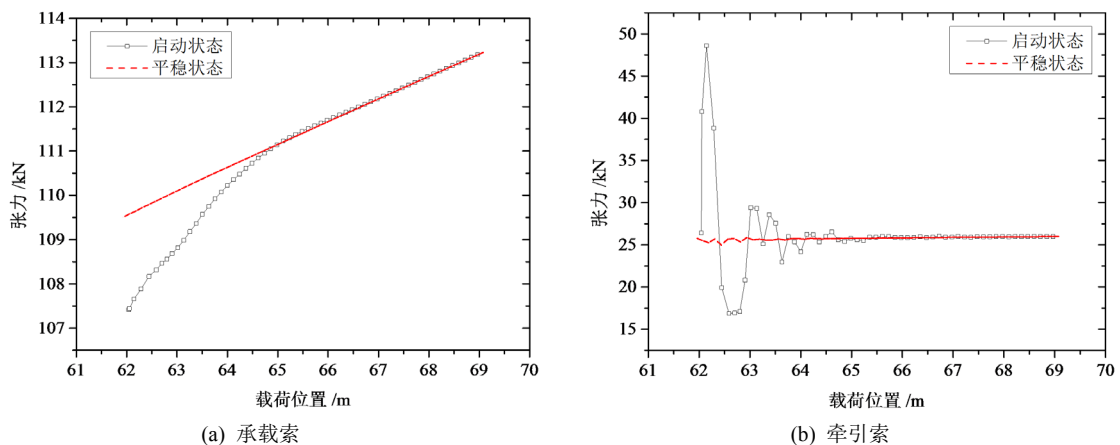
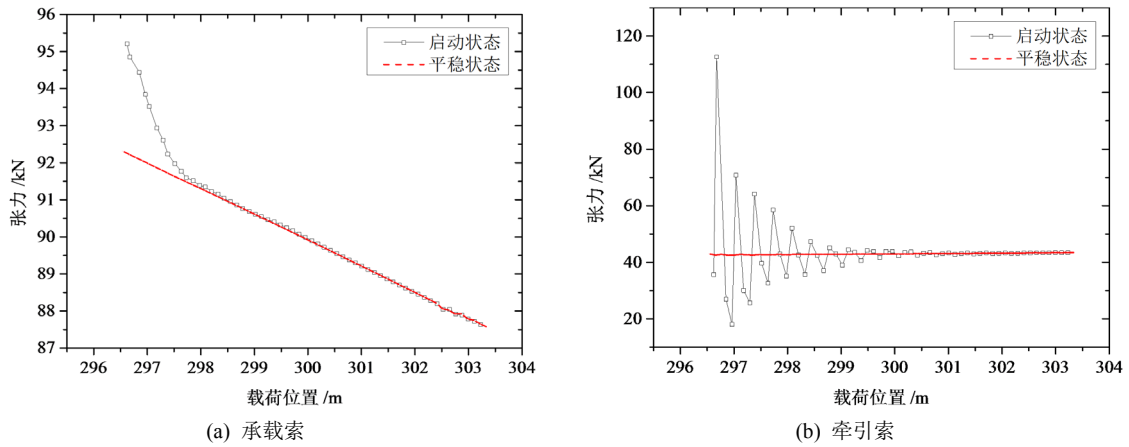


Figure 4. Tension of working cable in front of gear (75 m)

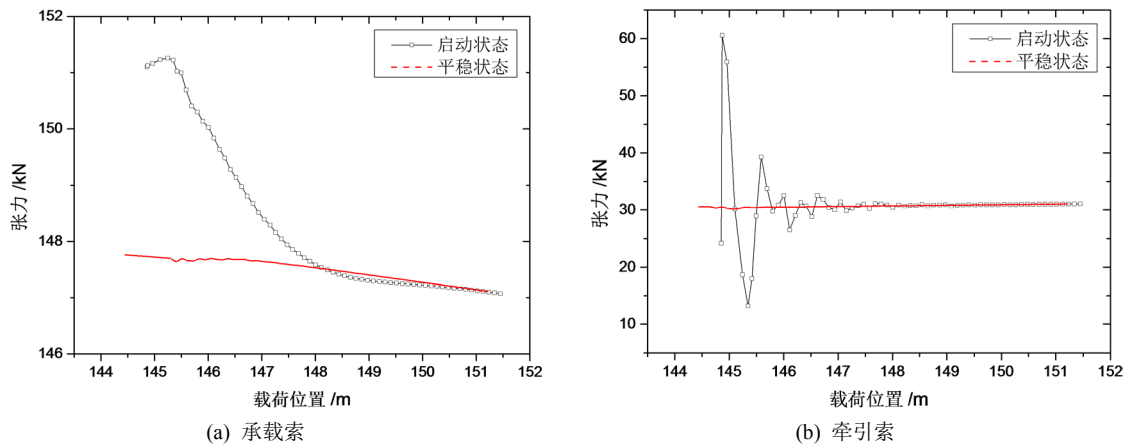
图 4. 档前启动(75 m)的工作索张力



**Figure 5.** Working cable tension after starting (300 m)  
**图 5.** 档后启动(300 m)的工作索张力

#### 4.4. 索道跨距对工作索张力的影响

当索道跨距为 280 m，索道高差 100 m，启动位置设在档中部时，索道启动时刻承载索和牵引索的张力变化曲线如图 6 所示。



**Figure 6.** When the span of tension curve changes 280 m  
**图 6.** 跨距 280 m 时启动张力变化曲线

对跨距 280 m、315 m 和 350 m 的索道启动时刻承载索和牵引索的张力进行对比计算，当跨距为 280 m 索道启动时承载索张力与稳定状态最大波动偏差为 2.39%，牵引索为 97.97%；当跨距为 315 m 索道启动时承载索张力与稳定状态最大波动偏差为 2.27%，牵引索为 114.01%；当跨距为 350 m 索道启动时承载索张力与稳定状态最大波动偏差为 2.29%，牵引索为 125.18%。可见，启动状态对承载索影响较小，而对牵引索张力影响较大。并且，跨距大小同启动过程牵引索张力波动呈正相关。跨距越大的索道启动时牵引索张力波动越大。

#### 4.5. 索道高差对工作索张力的影响

当索道跨距 350 m，高差分别为 130 m，启动位置设在档中部时，分别对高差 80 m、105 m 和 130 m 的索道启动时刻承载索和牵引索的张力进行对比分析计算，当高差为 80 m 索道启动时承载索张力与稳定

状态最大波动偏差为 2.03%，牵引索为 136.02%；当高差为 105 m 索道启动时承载索张力与稳定状态最大波动偏差为 2.13%，牵引索为 131.24%；当高差为 130 m 索道启动时承载索张力与稳定状态最大波动偏差为 2.29%，牵引索为 125.18%。可见，启动状态对承载索影响较小，而对牵引索张力影响较大。并且，高差大小同启动过程牵引索张力波动呈负相关，但是影响程度较小。

## 5. 总结

本文采用基于向量式有限元法理论的货运索道动力计算方法，通过分析索道启动时不同载荷、启动速度、启动位置、索道高差变化、索道跨距变化对索道承载索、牵引索张力变化，得出启动过程对承载索最大张力波动影响较小，最大不超过 4%；对牵引索最大张力波动影响较大，特别是启动速度和启动位置对牵引索张力影响最大，最大达到 164.68%，因此索道启动时应降低索道牵引装置的运行速度。并且应重点关注启动位置和启动速度的影响。根据计算分析结果，索道启动作用对牵引索的荷载影响系数可以取值 2。考虑索道牵引装置受力同牵引索最大张力相关，索道牵引装置的荷载影响系数同样取值 2。

## 参考文献

- [1] 秦剑, 乔良, 张映晖, 等. 多档货运索道动力计算方法及结构冲击影响研究[J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(2): 59-68.
- [2] 秦剑, 乔良, 李其莹, 等. 多索索道承载索耦合计算方法及安全性评估[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 42-49.
- [3] 张志国, 靳明君, 邹振祝. 自重荷载作用下悬索静力解析解[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 67-70.
- [4] 陈常松, 陈政清, 颜东煌. 悬索桥主缆初始位形的悬链线方程精细迭代分析法[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 62-68.
- [5] 秦剑, 夏拥军. 基于分段悬链线理论的悬索分析矩阵迭代法[J]. 工程设计学报, 2013, 20(5): 404-408.
- [6] Wang, Y.M. (2000) The Transient Dynamics of a Cable-Mass System due to the Motion of an Attached Accelerating Mass. *International Journal of Solids and Structures*, 37, 1361-1383. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(98\)00293-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(98)00293-5)
- [7] Wang, L.H. and Rega, G. (2010) Modelling and Transient Planar Dynamics of Suspended Cables with Moving Mass. *International Journal of Solids and Structures*, 47, 2733-2744. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.06.002>