

A Review of Several Risks and Countermeasures for WS Ropeway Wire Ropes

Xinyao Li

Shandong Taishan Ropeway Industry Development Co., Ltd., Taian, Shandong, 271000, China

Abstract

Steel wire rope is one of the most important components of passenger ropeways and is the lifeline of the cableway. Once a failure occurs, the consequences are unimaginable. Its working condition directly affects the safety of the cableway. During use, it is often easy to overlook some abnormal risk phenomena, and allowing development to bring serious consequences. Therefore, it is necessary to strictly implement the safety policy of moving the checkpoint forward, strengthen refined management throughout the entire life cycle, attach importance to the analysis and judgment of various operational data, in order to ensure the essential safety of passenger cable rope. Based on the engineering and maintenance practice for many years, the author takes Mount Tai cableway as an example to illustrate the performance, stress characteristics, fatigue principle, coping strategies, dynamic comprehensive evaluation, management innovation and other aspects of cableway wire rope for reference.

Keywords

steel wire rope; elongation; joint; tired; risk; countermeasure

WS 型索道钢丝绳若干风险综述及其对策

李鑫尧

山东泰山索道产业发展有限公司，中国·山东 泰安 271000

摘 要

钢丝绳是客运索道最为重要的部件之一，是索道的生命线。一旦出现失效，后果不堪设想。其工作状态直接关乎索道的安全与否，在使用过程中，往往容易忽略一些异常风险现象，任由发展会带来比较严重的后果。因此有必要严格落实关口前移的安全方针，加强全生命周期精细化管理，重视各类运行数据的分析研判，以确保客运索道钢丝绳的本质安全。作者结合多年来的工程与维护实践，以泰山索道为例，从索道钢丝绳的性能、受力特性、疲劳原理、应对策略、动态综合评价、管理创新等方面进行阐述，供业内同行参考。

关键词

钢丝绳；伸长量；接头；疲劳；风险；对策

1 引言

瓦林吞（Warrington）-西鲁型（Seale）钢丝绳简称WS，在客运索道广泛应用，总使用量超过30%且逐年增加。本文主要以单线循环索道WS钢丝绳为例进行论述。这种钢丝绳广泛用于钢丝绳和较大直径的牵引索中，其结构为外层是西鲁型较大直径的丝，内部所有各层丝则是完全的瓦林吞钢绳，瓦林吞——西鲁型钢绳因此而得名。它也是线接触钢绳。其优点为耐磨、柔软、易编接等。

近年来，伴随着国家产业政策的支持与引导，客运索道事业发展迅猛，根据文献[1]市场监管总局关于2021年全国特种设备安全状况的通告公布，截至2023年底，全国共有客运索道1135条。作为连续运行设备，公众对索道的

安全性、舒适性期望值也越来越高。文献[2]《GB/T9075-2008 索道用钢丝绳检验和报废规范》详细规范了系列予以报废的情形。损坏形式主要体现在磨损、疲劳和腐蚀。但在实际的动态运行中，容易忽视一些异常现象，往往引发比较严重的后果。加之一些专业的检查检测周期比较长。从而很难精准把握报废的时间节点。过早报废会造成不必要的经济损失，过晚报废往往造成风险骤增。

2 WS 索道钢丝绳的受力特性及疲劳原理

文献[3]对该类型的钢丝绳结构、受力特点、设计、安装、维护中容易引起异常磨损疲劳的几种情形进行了阐述。横向载荷是索道钢丝绳的重要受力特征，表现在以下方面。

- 钢丝绳受力复杂，承载众多车厢，承受拉应力、弯曲应力。
- 承受挤压力（如抱索器的夹力）
- 剪力

【作者简介】李鑫尧（1990-），男，中国山东泰安人，本科，工程师，从事客运索道维护维修研究。

克服或减轻众多的复杂受力影响，只有一个办法：加大初拉力。现代索道钢丝绳选用的安全系数越来越低，寿命越长。磨损、疲劳和横向载荷有很大关系。有人研究，密封钢丝绳安全系数在 2.1 时，寿命最长，系数在 4 时，寿命迅速下降。循环式索道初拉力要求大于 15 倍车厢总重量。国内最大的达到 23 倍。

文献 [4] 论述了抱索器在钢丝绳上的弯折角一般在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 之间（见图 1），弯折角越大，对抱索器的磨损就越明显（同时对钢丝绳的寿命有直接的影响）。运行中，钢丝绳的弯折角不断的在变化，钳口与钢丝绳产生摩擦，主要表现在活钳口与固定钳口的两端磨损较中间严重。中天门索道抱索器开合 20000 次的时候，实测固定钳口磨损痕迹角度约为 3° 左右。弯折角的计算公式：

$$\alpha = \frac{2\sin^{-1} G}{2F}$$

式中：

α —钢丝绳弯折角

G —抱索器钳口载荷

F —钢丝绳张力

由此计算出某索道的线路最大折角 $\alpha=3.4^\circ$ ，与实际的摩擦痕迹基本相符。因此在日常的运行中，保证钢丝绳的正常张紧力是非常重要的。某索道的张紧系统为双液压缸拉紧，工作时的系统压力为 136—150bar 之间。



图 1 钢丝绳弯折角示意图

文献 [5] 规定，张力的最小张力 T 与最大横向力 Q 之比应大于 15，即： $T_{\min}/Q_{\max} > 15$ ，如果不到 15 的话，说明设计不够规范，达不到规范要求。

文献 [6] 指出钢丝绳的磨损主要体现在外部和内部的磨损。外部磨损主要表现在钢丝绳在安装过程以及使用过程中与索轮、绞盘、滑轮、导向轮等以及抱索器、吊索加油润滑等。内部磨损主要体现在内外股接触的钢丝，交变载荷，内外及相邻股间相对运动产生的磨损。

钢丝绳绳股接触位置（比如接头插入点）的绳股外层丝相互挤压，会在丝表面挤压出凹坑，这些凹坑上自然形成许多微裂纹。经过反复弯曲后微裂纹加宽加深，最后钢丝断裂。就是说，先有塑性变形，后有破坏。

对于线接触钢丝绳，在钢丝绳正常段，股内的钢丝之间都是线接触。但对于接头的插入点位置，插入股与其相邻股之间在插入点，表层丝接触位置为点接触，所以接头部分

比正常段损坏快。当钢丝绳绳芯变细后，绳芯变细位置的绳股之间的表层丝之间也存在点接触。对某索道原钢丝绳接头拆检时，发现接头插入点的表层丝存在凹痕（见图 2）。



图 2 插入股间磨损痕迹

3 容易忽视的几种风险现象

除意外或环境因素（雷击，飞机或车船碰撞，倾倒的大树，滚落的巨石等）和人为破坏外，容易忽视的几种安全风险有以下几种。

3.1 钢丝绳旋转

鉴于钢丝绳的旋转特性，文献 [7] 提出国外一些钢丝绳实验室通过实验来确定钢丝绳的旋转系数。

$$\kappa = \frac{T_g}{Fd}$$

式中：

κ —钢丝绳旋转系数

T_g —钢丝绳扭矩.单位Nm

F —钢丝绳张力.单位KN

d —钢丝绳直径.单位mm

瑞典 kollros 实验室部分 κ 值数据：捻距为 t ，钢丝绳直径为 d 。当 t/d 为 7.1 时， κ 值为 0.1195；当 t/d 为 6.6 时， κ 值为 0.1516；当 t/d 为 6.2 时， κ 值为 0.18；当 t/d 为 6.8 时， κ 值为 0.8。文献 [8] 提出钢丝绳的旋转力随着捻距的缩短而加强，这种扭矩对轮衬的破坏力比较大，是造成过早磨损的主要原因。

某索道在全线路支架轮组更换衬套、轮衬后，重新安装轮组却发现站内钢丝绳旋转达到 270° ，抱索器进站打开时出现摩擦异响。一般站内钢丝绳的旋转量不超过 90° ，通过多年研究发现，空气湿度 90% 以上时，钢丝绳在站内支架跨间的旋转明显降低，在站内抱索器开合时的异常声响基本消失。后对支架轮组索距、轮组平行度、垂直度进行精细化调整后，旋转现象减轻，站内旋转度数 90° 以内。

在观察旋转的同时也走访了多家索道同行，大多南方的索道几乎没有发现旋转现象，地域特点明显。

3.2 接头区域插入股间间隙

钢丝绳接头部位是整段钢丝绳最薄弱的部位，钢丝绳

的接头的运行情况决定了整条钢丝绳的寿命。最为明显的是两入股之间的间隙不断增大且伴随着相应的绳股出现松股隆起。另外有些插接点部位出现直径过细，由于插入股缠绕物不到位或位移导致。这些点位中由于没有了弹性物质的支撑，股与股直接接触，极易造成股间应力集中，导致钢丝提前疲劳。当前采用的措施就是经常性的对这些部位进行检查测量，润滑防锈。如变细部位长度超过 30mm 时，个别绳股会出现松股现象，随着插入股间的间隙越来越大，松股现象会更为明显。针对这种情况可考虑释放张力以后进行人工填充修复或者考虑进行重新编结。

钢丝绳的编接区段是整条钢丝绳的最薄弱环节，除了日常的低速目测检查，要经常性的对编接区段的中心点，插接点，两入股之间的间隙等进行测量检查。由于这些部位没有正常绳芯的充分支撑，极容易出现疲劳断丝。国内某索道在某次编接拆检中，插入股端之间的间隙高达 70mm，钢丝绳接头两端绳股外凸松股明显，单股集中断丝达 20 根，直径变细是造成断丝急剧增加的主要原因（见图 3）。

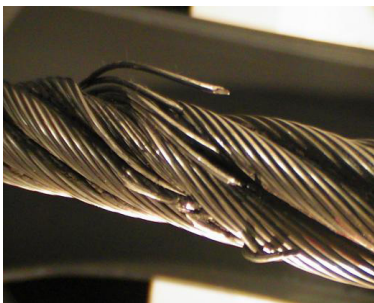


图 3 直径变细部位集中断丝

3.3 绳芯断裂挤出

绳芯的重要性已被索道行业越来越重视，绳芯对钢绳的寿命和伸长量起到非常重要的作用，某索道自 2000 年 10 月通车至今，共使用 3 根钢丝绳。第一根于 2006 年 11 月份换下，由奥地利奥钢联生产。期间 2004 年进行二次编接，编接前接头部位出现断丝 3-5 根，正常部位多处出现尼龙纤维绳芯断裂挤出现象（见图 4），直径变小、导致股间锈蚀等异常现象。二次编接后编接区段断丝集中出现，更换新绳前达到二十几根。



图 4 尼龙纤维绳芯断裂挤出

3.4 “缰绳”之后的突然伸长

受拉力后，最初几个小时至几天，钢绳持续以较快的速度伸长，这为第一阶段，称为初始残余伸长，以后速度变缓，在钢绳整个正常运行期间，以较慢的速度逐渐伸长，这为第二阶段，称为正常残余伸长，当钢绳走向破坏阶段，虽然拉力并未增加，但伸长却突然加快，并出现连续断丝，这为第三阶段，即不稳定伸长。此时应立即更换新绳。如前所述，残余伸长与钢绳结构有关，目前公认的数据为：麻芯股捻钢绳 2ε 为 1% 左右，纤维尼龙芯为 0.3 — 0.5%，尼龙棒和复合绳芯为 0.15 — 0.18%，密封钢绳为 0.15% 左右。

观察张紧小车行程的数据，发现第二根钢丝绳伸长已经处于比较稳定的状态，已经没有明显的伸长，说明绳子已经进入相对僵硬时期，活性弹性降低（见表 1）。如果等到绳子突然伸长（进入危险突变状态）时，再采取措施的话，将非常的被动，加之钢丝绳的订货周期与运输比较长。因此综合以上几点因素，建议尽早更换了该钢丝绳。

表 1 张紧小车后移尺寸对比表

记录日期	2009.6.7	2010.6.7	2011.6.7	2012.6.7
行程数据（m）	1.94	1.70	1.51	1.50

3.5 关于温度对伸长量的影响

考虑到某索道处于海拔 800-1400m 之间，冬季低温达到 -22℃，夏季温度到 30℃，冬夏温差超过 50℃。在保持线路张力不变的情况下，通过观测发现冬夏极限温度下的钢丝绳伸长量相差在 0.2‰，如周长 4000m 的绳子伸缩量为 0.8m 左右。

重视钢丝绳的伸长、张紧行程、温差变化、运行里程等数据记录与分析极端重要，钢丝绳使用多年以后会变得僵硬，弹性下降，几乎没有残余伸长。当编接部位松股、正常段股间集中断丝、疲劳至一定程度会出现突然伸长，如不能及时捕捉这一现象，任由发展会引发重大事故。

3.6 维修及安装过程中的损坏

但使用不当时仍会发生小丝被挤出且被压断的严重情况，诸如制造时外层丝未捻紧压不住小丝，钢丝绳张紧力小，安全系数过大。安装和检修时使用吊索工具不当致使内部过大的挤压力造成断丝集中，因此必须吸取这些经验教训，避免类似事件的发生。

4 WS 索道钢丝绳的风险应对策略

4.1 关于接头二次编结

在以往的实践中，大都认为在截绳时多截取一部分来延长截绳周期，以求减少维护量和对运营效益的影响。通过多年来钢丝绳运行规律和经验，如果一次性截取太多，在之后的运行中，一旦发现绳头出现问题，要想采取截绳方式来弥补就比较困难了。根据每条索道钢丝绳的伸长规律，结合本索道的运行速度、强度、张紧范围等因素，提前计划，科学制定二次编结计划，充分发挥钢丝绳的安全、经济效益。

文献[9]建议钢丝绳在整体通过迂回轮40000~50000次要进行重新编结。

4.2 编结质量控制

钢丝绳作为索道重要的部件之一,接头编结质量的优劣程度直接影响着索道的运行安全。尤其是在单线循环脱挂式索道的运行中,一旦接头部位直径超过10%,会经常触动检测开关或造成支架脱索。更为严重的是结头部位一旦处理不当容易出现松股、断丝、扭转、变形。如不及时停运处理,极易出现钢丝绳断裂的危险,后果不堪设想。

钢丝绳的编结原理并不复杂,但是一项要求配合性比较强的工作,由于受编结技术水平、编结工艺、场地限制等因素的制约,编结出质量上乘的结头还是有一定的难度,因为理想的结头不仅是在编结后尺寸及外观达标,还要经得起长时间的运转检验!

主编人员的水平固然重要,但是整个编接过程不是主编一人全部完成的,绝大部分工作还是由索道机电员工、施工队辅助完成的,在操作工程中难免出现不能完全和正确领会主编人意图的现象,这样就很容易出现一些偏差,从而影响整个接头的编接质量。

4.3 增强选型设计的科学性

文献[3]对客运索道WS型钢丝绳选型进行了说明。瓦林吞--西鲁型钢丝绳共有六种,其结构为6x26WS+FC、6x31WS+FC、6x36WS+FC、6x41WS+FC、6x49WS+FC、6x55SWS+F。客运索道一般选用:6x26WS,6x31WS,6x36WS,6x41WS等4种。 $\phi 35\text{mm}$ 以下选6x26WS; $\phi 35\text{mm}-40\text{mm}$ 选6x31WS; $\phi 38\text{mm}-\phi 52\text{mm}$ 选6x36WS; $\phi 50\text{mm}$ 以上选6x41WS。

4.4 状态监测技术的应用

可适当收集钢丝绳运行过程中磨损颗粒进行分析研究钢丝绳疲劳破坏的类型。文献[10]提出通过铁谱磨粒实验分析了钢丝绳的损坏状况以预测潜在的风险。另外由于钢丝绳的构造比较复杂,刚度及阻尼系数等参数计算繁杂,使用建模工具进行仿真计算还不够精确。需要结合一定的试验数据进行综合评估,相互验证。

4.5 润滑工作

关于钢丝绳的润滑,存在较大分歧。根据作者多年来的维护经验,单线循环式索道大都选用镀锌钢丝绳,正常区段如果没有损伤刮蹭,可以不进行润滑,非镀锌钢丝绳要根据实际情况适当润滑。而现在普遍使用的股间带隔离功能的WS型钢丝绳维护更为方便。但是对于编结部位的薄弱环节,如插接点,中心点,插入段之间的间隙,绳直径有明显变化的部位要经常性的润滑,值得注意的是润滑油必须对橡胶轮衬无腐蚀性。

4.6 不断完善相关标准规范

基于以上认识,建议有关部门对于客运索道相关的标准规范修订也不断吸收最新研究成果,较好地体现综合动态

评价。作为运营单位也应该不断完善风险管控与隐患排查清单,完善维护项目,及时汇总分析判断相关数据,跟踪钢丝绳运行变化状态。

5 泰山索道在钢丝绳管理维护方面的创新

5.1 进行技术培训,提高人员素质

自上世纪九十年代起,派工程技术人员到抚顺煤矿设计院进行钢丝绳探伤技术培训,先后购进了抚顺煤矿设计院自行设计的GST-II型钢丝绳探伤仪、俄罗斯INTRON公司生产的MH24-64钢丝绳探伤仪,不定期对钢丝绳进行探伤。利用旅游淡季多次请长沙有色院教授级高工石奉强等知名专家对机电人员进行钢丝绳技术理论授课,提高广大工程技术人员的技术水平。

5.2 强化实践,加强技术交流

当前全中心有六十余名机电员工,每逢各索道进行钢丝绳编结时,要求机电员工都要参与编结配合工作。多年来,中心多次派人外出学习交流,先后参加了国内多条索道的钢丝绳编结工作。学习归来,要写出深刻详细的学习体会供大家交流切磋。

5.3 对于钢丝绳日常维护及探伤检查

泰山索道作为《GB/T9075-2008 索道用钢丝绳检验和报废规范》参编单位,严格落实钢丝绳全生命周期精细化管理方针,指定有丰富经验的工程技术人员跟踪管理,对编结区域的薄弱环节进行重点关注,将每次测定的技术数据进行分析比对,时刻掌握钢丝绳的运行状态。并且经常性对钢丝绳编结部位的各薄弱点进行润滑,防止各薄弱点生锈。

5.4 为掌握绳头使用状况,对钢丝绳接头的拆检

泰山索道多次对更换下来的钢丝绳接头进行全面拆检研究。石奉强教授(国家索检中心高级技术顾问)在泰山索道进行钢丝绳技术授课时,全体机电人员与石老一起,将每个接头的股、每股的内外层钢丝的状态进行了详细拆解,对填充物、插入股之间空隙、以及各薄弱点的锈蚀、磨损、断丝情况进行了详细记录。拆解完后,机电人员同石老进行了长时间的分析讨论。石老感慨的说,像这样对换下的旧钢绳接头进行全面的拆解研究,弄清报废后的钢丝绳接头的实际状况,在国内外这一领域实属罕见。他也因此建议,编结人员如有条件,多参加这样的活动,以便更好的积累经验,提高钢丝绳维护与编结技艺。

6 结语

综上所述,我们可以看出越是大运量、高负荷、运行环境恶劣、在线运行时间长的钢丝绳,其运行寿命也就越短。其次各条索道的运行工况不同,难以采用一个通用的标准和一次周期较长的检测来确定报废和更换,应加强自检与监测,该将各种风险迹象进行动态综合评价,适时进行报废更新,确保索道运行安全。鉴于多年来国内外客运索道因钢丝绳失效造成的事故也时有发生,加强钢丝绳各类风险的研究

及应对具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局.市场监管总局关于2023年全国特种设备安全状况的通告[R].北京:国家市场监督管理总局,2023.
- [2] GB/T 9075-2008.索道用钢丝绳检验和报废规范[S].
- [3] 石奉强.WS型钢丝绳在客运索道中的应用[J].金属制品,2002(06):1-3+6.
- [4] 艾宪忠.架空索道DT脱挂抱索器异常磨损分析与对策[J].起重运输机械,2008(04):90-92.
- [5] GB12352--2018.客运架空索道安全规范[S].
- [6] 客圣俊,王慧,宋宝,崔卫华,张建彪.钢丝绳失效机理研究综述[J].现代制造技术与装备,2018(01):1
- [7] 严芃芃. 大起升高度钢丝绳悬垂与扭转机理研究[D].武汉理工大学,2017.-4.DOI:10.16107/j.cnki.mmte.2018.0002.
- [8] 石奉强. 钢丝绳的捻距对客运索道的影响[C]//.全国线材深加工技术研讨会会议文集.[出版者不详],2005:108-113.
- [9] 艾宪忠.客运索道关键设备的重点维护与管理[J].起重运输机械,2022(05):64-66.
- [10] 贾尚雨. 不旋转钢丝绳的力学特性与失效研究[D].华南理工大学,2011.