

# 游乐设施架空单轨车车轮螺栓防松工艺方法研究

吴兴旺

株洲中车特种装备科技有限公司，湖南 株洲 412001

DOI:10.61369/ERA.2026090001

**摘 要：** 在大型游乐设施安全保障体系中，架空单轨观光车行走轮连接系统的可靠性至关重要。车轮螺栓作为关键连接件，在长期振动、循环载荷及装配不当等多重因素影响下，容易出现预紧力下降、松动移位甚至断裂失效等问题。本文以架空单轨车车轮螺栓为研究对象，系统分析螺纹副松动机理，并基于6列试验车总计908颗螺栓的多周期跟踪检测数据，确定配合面涂装、拧紧工艺不合理及缺乏运行后复拧是关键诱因。在此基础上，提出以配合面预处理、对称交叉分步拧紧、运行后复拧为核心的集成化防松工艺方案。实车应用结果表明，该方案能有效缓解装配憋劲、涂层减摩等问题，显著提升预紧力保持性能，使螺栓松动率降至零，可为同类游乐设施关键紧固件的设计、装配与运维提供实践参考。

**关 键 词：** 架空单轨车；车轮螺栓；防松技术；预紧力；游乐设施安全

## Research on the Process Method for Preventing Wheel Bolt Loosening in Overhead Monorail Vehicles of Amusement Facilities

Wu Xingwang

Zhuzhou CRRC Special Equipment Technology Co., Ltd. Zhuzhou, Hunan 412001

**Abstract：** In the safety assurance system of large-scale amusement facilities, the reliability of the drive wheel connection system for overhead monorail sightseeing vehicles is critical. As key connecting components, wheel bolts are prone to issues such as reduced preload force, loosening, displacement, or even fracture failure under prolonged vibration, cyclic loads, and improper assembly. This study focuses on the wheel bolts of overhead monorails, systematically analyzing the mechanisms of thread pair loosening. Based on multi-cycle monitoring data from 908 bolts across six test vehicles, the research identifies improper coating application on mating surfaces, suboptimal tightening procedures, and lack of post-operation re-tightening as primary contributing factors. An integrated anti-loosening solution is proposed, emphasizing surface pretreatment, symmetrical cross-step tightening, and post-operation re-tightening. The practical application results show that this scheme can effectively alleviate the problems of assembly pressure and coating friction reduction, significantly improve the pre tightening force retention performance, and reduce the bolt loosening rate to zero. It can provide practical reference for the design, assembly, and operation of key fasteners for similar amusement facilities.

**Keywords：** aerial monorail vehicle; wheel bolts; anti-loosening technology; preload force; amusement facility safety

## 引言

随着文旅行业的持续繁荣与消费升级，大型游乐设施正朝着多样化、高速化、舒适化的方向不断升级。在众多游乐设备中，架空单轨观光车凭借其轨道适应性强、观光视野开阔、运行平稳安全等突出优势，在主题公园、景区观光交通体系中得到了日益广泛的应用。该类设备依靠多组行走轮与轨道接触，实现承载、导向与驱动功能。车轮与轮毂之间采用多颗高强度螺栓贯通连接，在运行过程中需持续承受垂向振动、加减速冲击、弯道离心力等复合动态载荷，属于典型的动载荷关键安全部件。我国相关安全技术规范（如 GB 8408-2018）对游乐设施关键紧固件的连接强度、防松措施及定期检查项目均作出明确规定，要求核心螺栓连接具备稳定的预紧力保持能力与可靠的防松效果，确保设备在设计使用周期内的安全稳定运行。

然而，针对游乐设施架空单轨车车轮螺栓的专项研究相对较少，已有成果多停留在故障案例分析层面，缺乏基于长期实车监测数据的系统性工艺优化与验证。基于此，本文以景区在用架空单轨车为研究对象，结合车轮螺栓防松跟踪实测数据，深入分析松动诱因与展规律，构建一套可落地、可复制、可推广的车轮螺栓防松工艺体系，为提升游乐设施关键连接系统的安全水平提供坚实的技术支撑。

## 一、车轮螺栓松动机理，车轮螺栓防松试验与数据统计分析

架空单轨车车轮连接系统主要由车轮组件、车轮垫环、轮毂及高强度螺栓构成。本文所涉及的螺栓为10.9级全螺纹螺栓，标准设计拧紧扭矩为 $120\text{N} \cdot \text{m}$ ，针对运行中实测易发生松动的部位，适当将拧紧扭矩提高至 $130\text{N} \cdot \text{m}$ 以增强锁紧效果。从力学本质上看，螺栓松动是一个预紧力持续衰减并最终引发螺纹副相对转动的过程。在动态循环载荷作用下，松动通常经历三个典型阶段：初始应力松弛、接触面微动滑移以及螺纹副宏观相对转动。装配残余应力、接触面状态不良、拧紧工艺不合理以及运行过程中的交变载荷共同作用，推动松动不断演化，最终导致连接结构失效。

为准确掌握架空单轨车车轮螺栓的松动规律，并验证不同改进措施的实际防松效果，本研究选取了某景区正在运营的6列架空单轨车作为试验对象。其中，对5列车进行了轮毂钻通孔处理（旨在释放配合面憋劲应力），对1列车进行了配合面除漆处理，另设1列车保持原状（未除漆）作为对照样本。整个跟踪监测周期为11月10日至12月29日，历时约50天。期间共开展了5次定点检测，详细记录了每列车的起始里程、单次行驶里程、累计行驶里程、螺栓松动数量、防松标记状态以及实测扭矩值。试验覆盖的螺栓总数共计908颗。

对试验数据进行系统的对比分析，可以得出以下重要结论：

1. 表面处理方式对防松效果影响极为显著。经过配合面除漆处理的车辆，在整个约50天的跟踪周期内，扭矩始终保持稳定，无任何螺栓松动记录，防松表现最优。这说明直接清除涂层、恢复金属间的高摩擦接触是实现长效防松最可靠的途径。

2. 轮毂钻通孔处理配合优化工艺效果良好。钻通孔处理的车辆，在初期可能存在一定的松动问题，但一旦同步实施了优化拧紧工艺与运行后复拧，其状态迅速由高松动率转变为完全稳定。这表明通孔处理能够有效释放装配应力、改善散热，为优化工艺的发挥创造了有利条件。

3. 提高扭矩与执行复拧可以弥补部分涂层缺陷。未除漆但通过提高拧紧扭矩（至 $130\text{N} \cdot \text{m}$ ）并严格执行运行后复拧的车辆，也在后期实现了零松动。这说明在无法完全除漆的现场条件下，通过提高预紧力和及时补偿衰减，也能取得较好的防松效果。

4. 行驶里程与松动风险存在明确关联。从里程角度分析，螺栓松动事件主要集中在累计行驶500公里以内的初期阶段。这一时期是连接界面磨合、残余应力释放和预紧力衰减的关键期。500公里之后，各接触界面趋于稳定，微动滑移显著减弱，松动的概率大幅降低。这一规律为科学制定复拧时机提供了直接的数据支撑。

统计结果还表明，防松标记能够直观反映螺栓是否发生了宏观转动，但无法完全代表扭矩的实际保持情况。部分螺栓标记未错位而扭矩已下降的事实说明，仅靠标记检查存在明显的局限性，必须结合定期的扭矩复测，才能准确判断螺栓连接的真实安全状态。经过系统性工艺优化后，所有试验车在连续行驶与多次

检测中均保持稳定，证明以“表面处理、分步拧紧、运行复拧”为核心的综合方案是解决架空单轨车车轮螺栓松动难题的有效手段，具备在现场大规模推广的价值。

## 二、车轮螺栓综合防松工艺优化与实施

基于上述松动机理分析与试验数据所揭示的规律，本文构建了一套适用于游乐设施架空单轨车车轮螺栓的综合防松工艺体系。该体系以“消除涂层干扰、均衡装配应力、稳定预紧力、强化运维检测”为目标，从表面处理、拧紧工艺、复拧制度、检查管理四个维度进行全面优化，确保螺栓连接的长期可靠。

### （一）接触面表面处理

原则是“非配合面全涂装、配合面裸金属”。在装配前，必须对轮毂与车轮组件的配合面进行局部处理：使用专用工具清除油漆、油污、氧化皮及毛刺，保证两接触面为清洁、干燥、无涂层的金属贴合。此举旨在提升接触面的摩擦系数与抗微动滑移能力。对于结构限制不便进行完全除漆的车辆，可采用轮毂钻通孔的替代方案。通孔能够释放装配应力，改善散热条件，降低憋劲与应力集中风险。此外，在所有螺栓的螺纹配合部位，应均匀涂抹指定型号的专用防松胶，以增强螺纹副之间的摩擦锁紧作用。所有螺栓必须统一采用10.9级全螺纹高强度螺栓，严禁在同一连接副中混用不同性能等级的螺栓，以保证连接强度的一致性。

### （二）拧紧工艺优化

彻底摒弃传统的“单向顺次、一次性拧紧”方式，全面推行“对称交叉、分步递增、先消除后终拧”的标准化流程。

1. 预定位：首先将所有螺栓手动旋合到位，确保车轮、垫环、轮毂三者对中良好，无卡滞、无偏斜。

2. 初拧（消除）：按照对称交叉的顺序（如“星形”或“对角线”顺序），使用扭矩扳手对所有螺栓进行初拧。扭矩目标值控制在设计扭矩的80%（约 $96\text{N} \cdot \text{m}$ ）。此步骤的核心目的是在无偏载的情况下，缓慢、均匀地消除各构件之间的装配间隙。

3. 终拧：以与初拧完全相同的对称交叉顺序，将螺栓拧紧至100%的设计扭矩（标准部位 $120\text{N} \cdot \text{m}$ ，易松动部位提高至 $130\text{N} \cdot \text{m}$ ）。

4. 标记：拧紧完成后，使用统一颜色的记号笔，沿螺栓头、螺母与被连接件（轮毂）的外表面，绘制一条连续的、清晰可见的直线标记。该标记是后续日常检查的重要参照。

所有拧紧作业必须使用经计量校准合格的定值扭矩扳手，每日使用前应进行快速校验，确保扭矩控制精度。

### （三）运行后复拧制度

针对预紧力衰减的关键期建立分阶段复拧制度，以实现精准补偿。

首次复拧：车辆完成装配后，先进行空载跑合试运行。在累计行驶里程达到200公里至300公里时，进行首次全面复拧。操作内容：核对防松标记；对全部螺栓复测扭矩；对扭矩值低于标准下限或标记错位的螺栓，按标准工艺重新拧紧并补做标记。

二次复拧：在累计行驶里程达到500公里时，进行第二次全

面复拧，以进一步稳定预紧力，使连接界面完全贴合稳定。

日常运维复拧：正式投入运营后，每15天或每累计行驶1000公里（以先到者为准），进行一次全面的扭矩检查与复测，形成常态化的复拧机制，及时消除早期隐患。

### 三、工艺验证效果与工程应用价值

对比优化前后的状态，传统工艺下螺栓松动问题频发，需要频繁安排检修、复拧甚至提前更换螺栓，运维工作量大、备件成本高、设备停机时间长。而在实施优化工艺后，检修频次大幅降低，螺栓的实际使用寿命显著延长，设备的有效运营时间增加，在提升安全保障能力的同时，也带来了可观的经济效益。经过除漆处理与钻通孔处理的车辆均实现了稳定运行，证明该工艺能够适配不同的现场条件与车辆状态，具备较强的通用性和实用性。

从行业应用的角度看，本文所提出的防松思路与工艺方法，不仅适用于架空单轨车，还可较为方便地拓展应用于架空游览车、小火车、滑行车类等同样依靠螺栓连接行走轮的其他游乐设施。其核心原理——优化接触面摩擦状态、规范分步对称拧紧工艺、严格执行运行后分阶段复拧——符合螺纹连接防松的基本力学规律，能够为游乐设施行业关键紧固件的设计选型、现场装配、检验验收与日常运维提供标准化的技术参考。同时，本文的研究结论完全基于真实的实车实测数据，避免了纯理论分析的局限性，研究成果贴近工程现场、可直接落地转化，对提升我国游乐设施整体安全技术水平具有重要的工程价值。

### 四、结论

本文针对游乐设施架空单轨车车轮螺栓松动这一实际工程问

题，通过系统的机理分析、详尽的实车跟踪、严谨的数据统计与针对性的工艺优化，得出以下主要结论：

1. 系统揭示了车轮螺栓松动由装配憋劲、涂层干扰、振动载荷与运维缺失共同引发的内在规律。装配时单向顺次拧紧导致的应力不均、配合面油漆涂层导致的摩擦系数下降、运行中复合动态载荷的持续作用，以及缺乏运行后复拧补偿，是导致松动发生与发展的关键因素。

2. 构建并验证了以“配合面状态优化、对称交叉分步拧紧、运行后分阶段复拧紧固”为核心的综合防松工艺体系。该体系从表面处理、拧紧工艺、复拧制度、检查管理四个维度进行了全面优化。

3. 试验验证表明，该综合防松工艺能有效消除装配应力不均与接触面摩擦不足的固有缺陷，显著提升预紧力稳定性。在实车应用中，使螺栓松动率由初期的高位水平最终降至零，实现了长效防松，从源头防范了螺栓失效风险。

4. 研究结果证实：清除配合面油漆可最大限度提升连接稳定性；钻通孔处理能有效释放装配应力；对称交叉分步拧紧可保证各螺栓受力均匀；运行后分阶段复拧能及时补偿预紧力衰减。四项措施协同作用，是实现长效防松的关键。

5. 本文形成的工艺方案与管理要求，符合现行安全标准，具有操作简便、成本可控、效果可靠的突出优点，可为游乐设施的制造、安装、运维单位提供直接的技术指导，对保障大型游乐设施安全运行、推动行业高质量发展具有积极意义。

### 参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局. GB 8408-2018 大型游乐设施安全规范 [S]. 北京：中国标准出版社，2018.
- [2] 国家市场监督管理总局. GB/T 18166-2025 架空游览车类游乐设施通用技术条件 [S]. 北京：中国标准出版社，2025.
- [3] 李军. 螺纹连接松动机理及防松技术研究进展 [J]. 机械科学与技术，2023，42(05): 721-728.
- [4] 张晓明. 高强度螺栓拧紧工艺对预紧力稳定性的影响 [J]. 工程机械，2022，53(11): 45-49.
- [5] 刘艳斌. 游乐设施关键紧固件失效分析及防控措施 [J]. 中国特种设备安全，2022，38(08): 82-85.
- [6] 赵志强. 大型游乐设施行走机构螺栓连接可靠性研究 [J]. 机械工程师，2021(12): 112-114.
- [7] 周明. 轨道交通车轮螺栓防松工艺优化及应用 [J]. 铁道机车车辆，2020，40(04): 98-101.
- [8] 王雪峰. 游乐设施架空单轨车行走轮系统故障分析与改进 [J]. 设备管理与维修，2023(10): 123-125.