

# 基于轨道扣件系统力学特性的动态拧紧策略设计

李鑫<sup>1</sup>, 柴立斌<sup>2</sup>, 王中玉<sup>3</sup>, 陈古波<sup>4</sup>, 梁举科<sup>1\*</sup>, 李晖<sup>5</sup>

<sup>1</sup>重庆理工大学机械工程学院, 重庆

<sup>2</sup>中国铁路北京局集团有限公司北京工电大修段, 北京

<sup>3</sup>中国铁路北京局集团有限公司北京高铁工务段, 北京

<sup>4</sup>重庆理工大学电子工程与技术学院, 重庆

<sup>5</sup>重庆理工大学材料科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2022年3月17日; 录用日期: 2022年5月22日; 发布日期: 2022年5月31日

## 摘要

对扣件系统进行受力分析, 并与普通螺栓连接进行对比分析拧紧过程的不同点; 对扣件弹条进行有限元仿真, 观察弹条的扣压力变化特性, 并设计扣压力试验和拧紧力学实验, 研究扣件系统拧紧力学特性; 基于扣件力学规律设计相应的动态拧紧策略, 并通过实验验证了算法的可靠性和有效性, 可有效提高拧紧扭矩的质量。

## 关键词

扣件系统, 螺栓拧紧, 扭矩控制, 算法

# Design of Dynamic Tightening Strategy Based on Mechanical Characteristics of Rail Fastener System

Xin Li<sup>1</sup>, Libin Chai<sup>2</sup>, Zhongyu Wang<sup>3</sup>, Gubo Chen<sup>4</sup>, Juke Liang<sup>1\*</sup>, Hui Li<sup>5</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing

<sup>2</sup>Beijing Engineering and Power Overhaul Section, China Railway Beijing Bureau Group Co. Ltd., Beijing

<sup>3</sup>Track Maintenance Division of Beijing High Speed Railway, China Railway Beijing Bureau Group Co. Ltd., Beijing

<sup>4</sup>College of Electronic Engineering and Technology, Chongqing University of Technology, Chongqing

<sup>5</sup>College of Material Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing

\*通讯作者。

文章引用: 李鑫, 柴立斌, 王中玉, 陈古波, 梁举科, 李晖. 基于轨道扣件系统力学特性的动态拧紧策略设计[J]. 交通技术, 2022, 11(3): 222-235. DOI: 10.12677/ojtt.2022.113023

## Abstract

The stress of fastener system is analyzed, and the difference of tightening process is compared with that of ordinary bolt connection. The finite element simulation of fastener spring bar is carried out to observe the change characteristics of spring bar's buckle pressure, and the buckle pressure test and tightening mechanics test are designed to study the tightening mechanics characteristics of fastener system. The corresponding dynamic tightening strategy is designed based on the mechanical law of fastener, and the experiment is carried out, the reliability and effectiveness of the algorithm are verified, which can effectively improve the quality of tightening torque.

## Keywords

Fastener System, Bolt Tightening, Torque Control, Algorithm

Copyright © 2022 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. 前言

高速铁路线路的品质主要源于科学的施工工艺、规范的维护规程和先进的建设、维护设备[1]。近年来,由于缺乏高精度定扭拧紧设备,导致高铁轨枕螺栓过拧紧或欠拧紧的现象时有发生,而螺栓的过拧或者欠拧直接导致扣件的扣压力不符安装设计规定,列车长期行驶作用下,将会使扣件弹条发生疲劳形变,弹条的弹程衰减等一系列危害[2] [3] [4]。传统的轨枕螺栓拧紧机往往采用机械传动拧紧方式,系统没有涉及对扭矩的控制算法,大多数通过机械式离合器打滑或者冲击机构控制扭矩拧紧,该类方法无法有效控制扭矩。螺栓拧紧理论发展成熟应用较广,目前已有的方法有扭矩法、扭矩转角法、屈服点法、螺栓伸长量法,本文从铁路轨道扣件系统的力学特性出发,结合传统的拧紧方法,设计了适用于铁路扣件的拧紧策略,可有效提高拧紧扭矩的控制精度。

## 2. 扣件系统受力分析

### 2.1. 普通螺栓受力分析

由图 1 可知,普通螺栓联接的目标力是螺栓轴向的预紧力,实际使用中预紧力往往不便于直接控制,转而通过控制拧紧扭矩的方式,间接控制预紧力的大小,由于存在螺纹摩擦和螺栓头端面摩擦,拧紧的扭矩中大约 90%用于克服摩擦力,通过扭矩控制法控制预紧力受到工件表面情况、摩擦因素的差异具有先天的不确定性[5]。

### 2.2. 扣件系统受力分析

以铁路扣件系统拧紧过程中的弹条为对象进行受力分析,如图 2 所示。受到螺栓向下的预紧力,和受到向上的前、中肢支撑力与后端支撑力。而在铁路建设中需要的是前中肢的扣压力(图 3 所示),与普通螺栓的拧紧规律具有明显差异,因此需要对扣压力与预紧力、拧紧扭矩的数学关系进行研究。

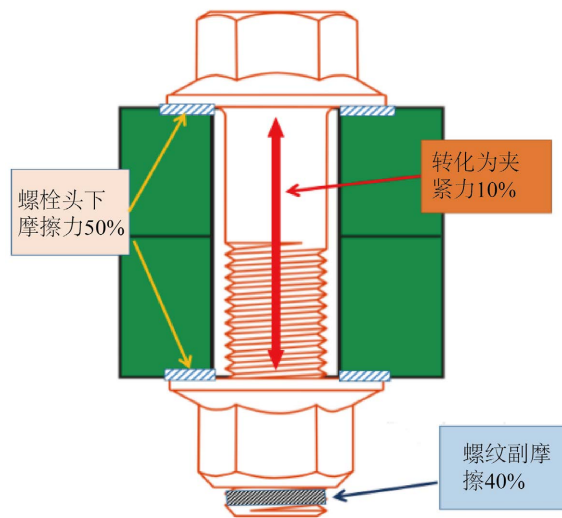


Figure 1. Stress distribution of bolted connection  
图 1. 螺栓连接受力分布

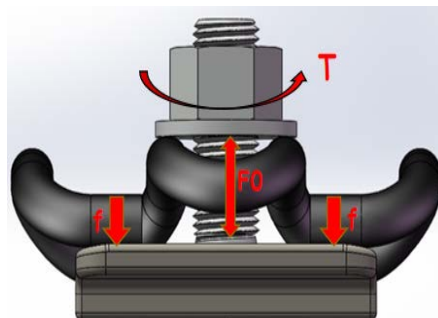


Figure 2. Model of rail fastener system  
图 2. 轨道扣件系统模型

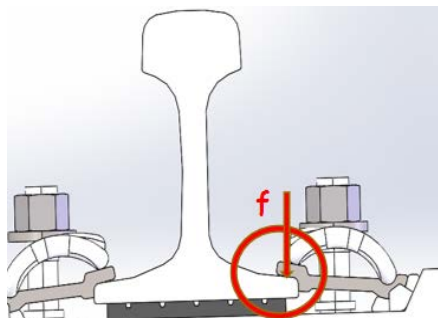


Figure 3. Stress analysis of fastener system  
图 3. 扣件系统受力分析

### 2.3. 扣件螺栓拧紧与普通螺栓拧紧区别

1) 被连接件结构差异：普通螺栓被连接件大多属于刚性较高的材料结构，而扣件螺栓拧紧弹条具有较大的弹性。

2) 拧紧过程阶段化差异：扣件螺栓在拧紧过程中随着拧紧扭矩的增加，弹条中肢发生形变，逐渐接触到轨距挡板，因此在拧紧过程中，受力接触点的变化引起了拧紧规律的具有分段特性。

3) 目标力值差异：普通螺栓的拧紧是根据扭矩 - 预紧力的数学关系，通过控制扭矩的方式间接控制预紧力。而扣件螺栓的目标力值是扣压力而非螺栓的预紧力。

4) 普通拧紧过程规律不适用：普通螺栓的拧紧跟螺栓的头部接触面积有关，而扣件螺栓的头部接触面与弹条之间为曲面。

因此传统的拧紧策略在轨枕螺栓的拧紧场合并不适用，拧紧过程的相关数学规律需要重新推导。

### 3. 扣件系统拧紧力学研究

对扣件系统的拧紧过程中扣压力、拧紧扭矩、拧紧角度、预紧力的变化规律进行研究，对拧紧算法的设计具有理论指导意义。因此本文通过仿真结合实验的方法对扣件系统进行研究，仿真结果与实验结果相互佐证。

#### 3.1. 扣件弹条扣压力仿真

本课题针对采用 W 型扣件的扣件系统，其结构如下图 4 所示，其组成包括螺栓、弹条，轨距挡板，重型垫片、螺母等。通过对扣件系统三维模型的建立，对扣件弹条的组装和工作受力原理进一步明确[6]。

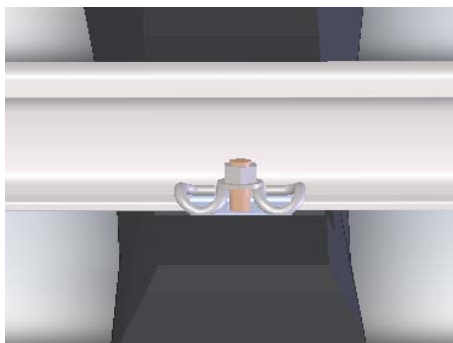


Figure 4. Three dimensional model of fastener system

图 4. 扣件系统三维图

##### ① 扣件系统结构简化

扣件系统地完整安装结构较复杂，且有大量仿真不必要的配件，为了减少不必要的计算量，提升运算效率，需要对扣件系统进行简化。扣件系统的受力情况由前文所知，在螺母扭矩的拧紧下，螺栓预紧力通过螺母和端面施加给被连接件，因此，弹条是本仿真的主要研究目标。对系统进行简化后的结构如下图 5 所示。

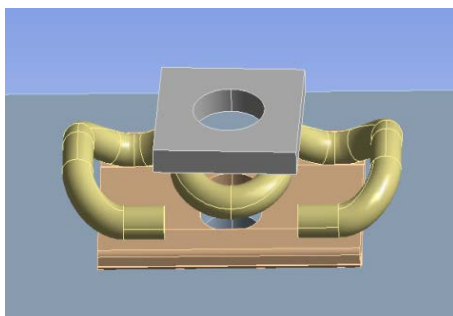


Figure 5. Simplified 3D model of fastener system

图 5. 扣件系统简化三维模型

### ② 材料定义及网格划分

弹条的材料为硅锰钢: 60Si2MnA, 弹性模量为  $2.05 \times 10^5$  MPa, 屈服强度为 1600 MPa, 泊松比 0.3。其他接触材料为结构钢。轨距挡板与地板接触方式为绑定; 弹条与轨距挡板为摩擦接触, 摩擦系数为 0.15; 弹条与垫片的接触方式为摩擦接触, 摩擦系数为 0.15。对设置好的图形进行网格划分, 设置机械物理场偏好, 根据单元类型和尺寸自动选择网格类型进行网格划分, 模型节点数量及单元数量越多, 分析计算量越大分析结果精度越高, 划分好的网格如下图 6 所示, 共有节点 255,683 个, 单元 169,092 个。

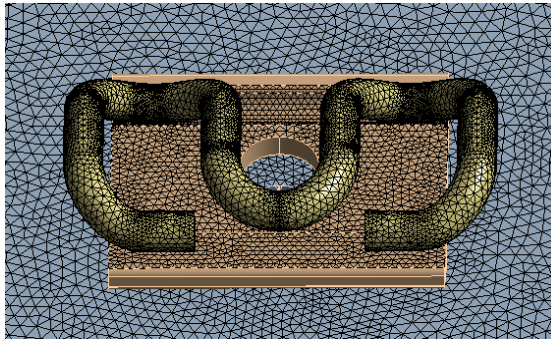


Figure 6. Finite element mesh of fastener  
图 6. 扣件的有限元网格图

### ③ 施加载荷与约束

根据弹条受力情况, 将底板设置为固定约束, 垫片设置为 X 轴的负方向施加载荷, 设定为 X 轴向平移约束。示意图如图 7 所示。

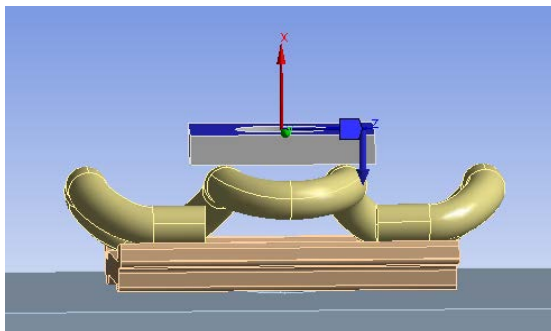


Figure 7. Schematic diagram of restraint load  
图 7. 约束载荷示意图

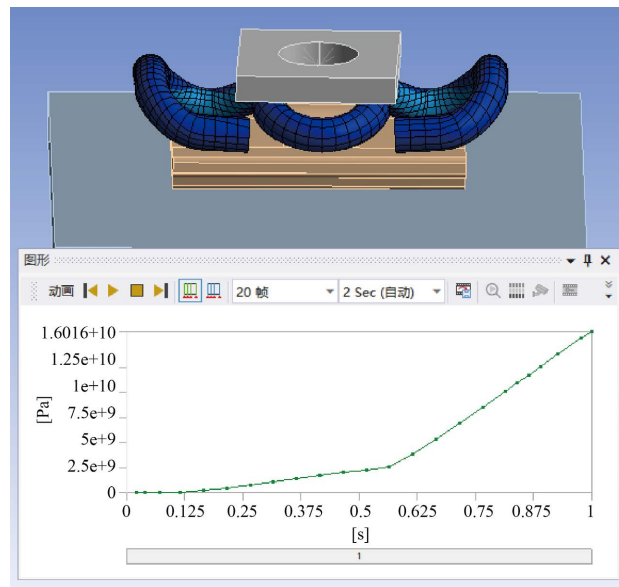
### ④ 求解计算

设置好相应的参数及相关属性以后, 确保没有报错提示, 选择静力学分析类型, 设置力收敛求解方案输出并计算。对求解好的工程添加需要观测的物理量, 本仿真主要观测弹条的力变化曲线, 因此添加应力查看窗口即可, 仿真结果如图 8 所示。

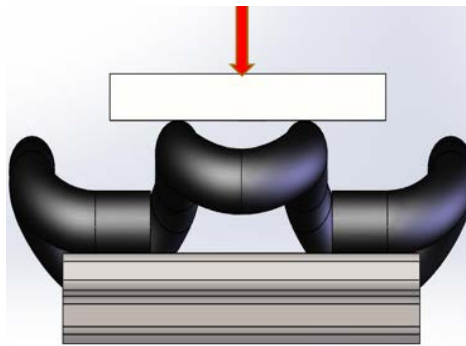
## 3.2. 扣压试验

实验原理: 如图 9, 图 10 所示, 通过给标准 W1 型弹条施加垂向载荷模拟弹条安装时受螺栓预紧力的工作状态, 同时测量垂向载荷大小和变形量, 绘制力 - 变形曲线, 观察弹条弹性性能曲线, 找出变形

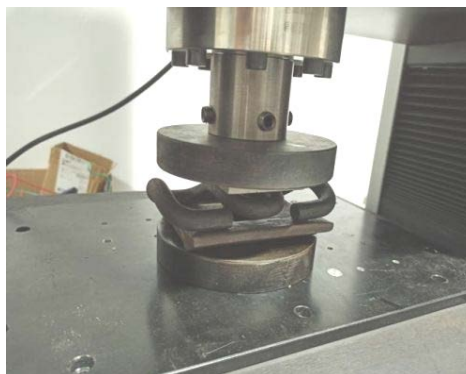
量与载荷的变形规律，根据弹性材料的弹性特性，充分了解弹条的承载力、压缩位移等力学性能变化。绘制预紧力 - 变形曲线。



**Figure 8.** Simulation results  
**图 8.** 仿真结果图



**Figure 9.** Schematic diagram of buckling test  
**图 9.** 扣压实验示意图



**Figure 10.** Photos of buckling test  
**图 10.** 扣压试验照片

试验设计包含 20 组随机挑选的 W1 型弹条，对每组弹条进行 5 次扣压力试验，一共 100 组数据。对数据进行处理并拟合，弹条扣压力曲线如下图 11 所示。

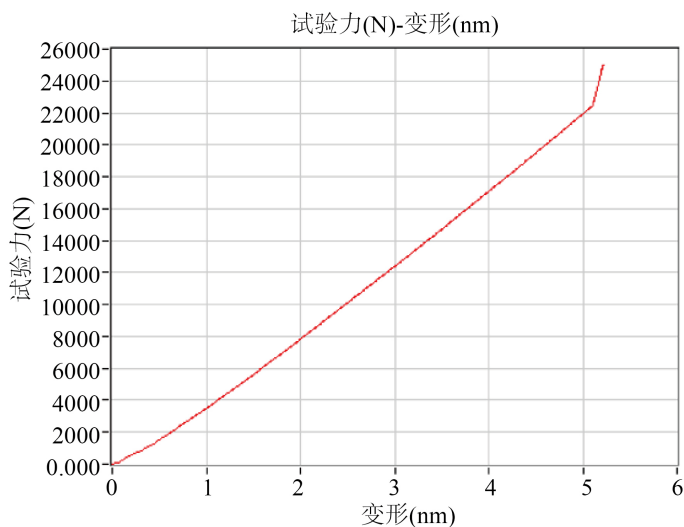


Figure 11. Pressure curve of elastic strip buckle  
图 11. 弹条扣压力曲线图

### 3.3. 拧紧试验

通过模拟扣件系统在铁路线路的安装情况，还原铁路扣件的工作场景，设计相应的实验台(图 12)。按照标准的铺设安装，并在轨距挡板下安装压力传感器测量弹条的扣压力，在螺母与弹条之间安装环形压力传感器测量预紧力，通过对螺母施加拧紧扭矩，记录对应的预紧力、扣压力、拧紧扭矩等数据，并绘制相应的曲线变化图，观察扣压力与预紧力的分配关系，进一步确定扣压力 - 拧紧扭矩的关系。

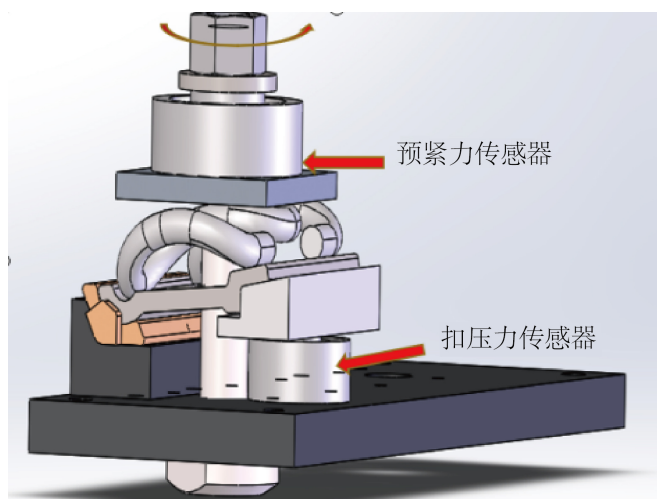


Figure 12. Three dimensional model of test platform  
图 12. 试验平台搭建三维模拟图

对采集的数据进行分段线性拟合，结果如下图 13~15 所示。

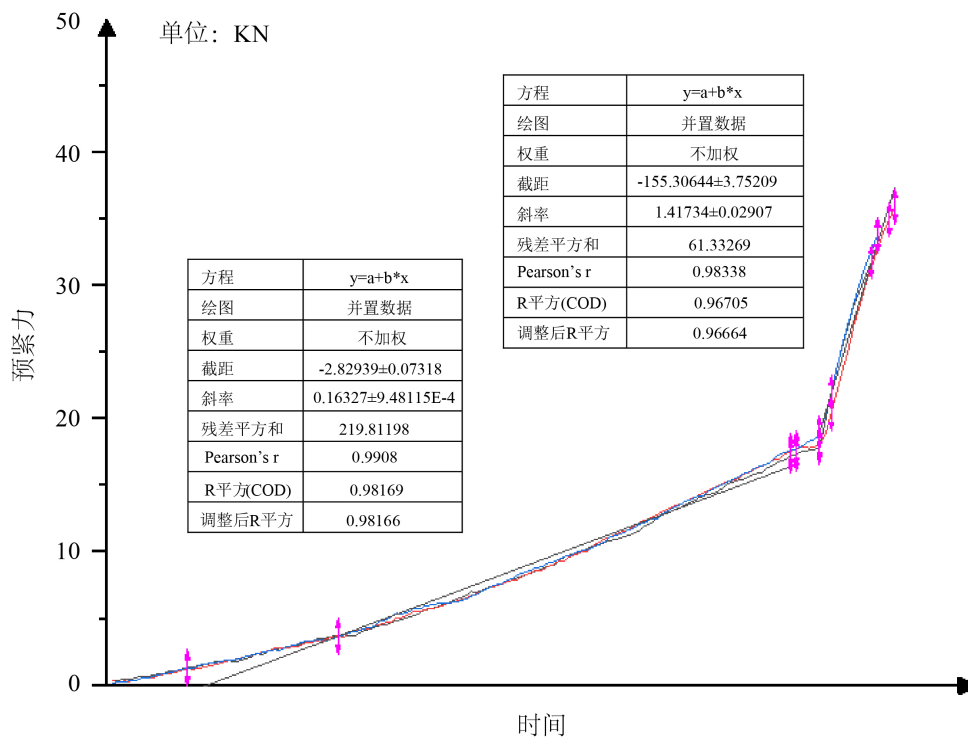


Figure 13. Fitting diagram of preload  
图 13. 预紧力拟合图

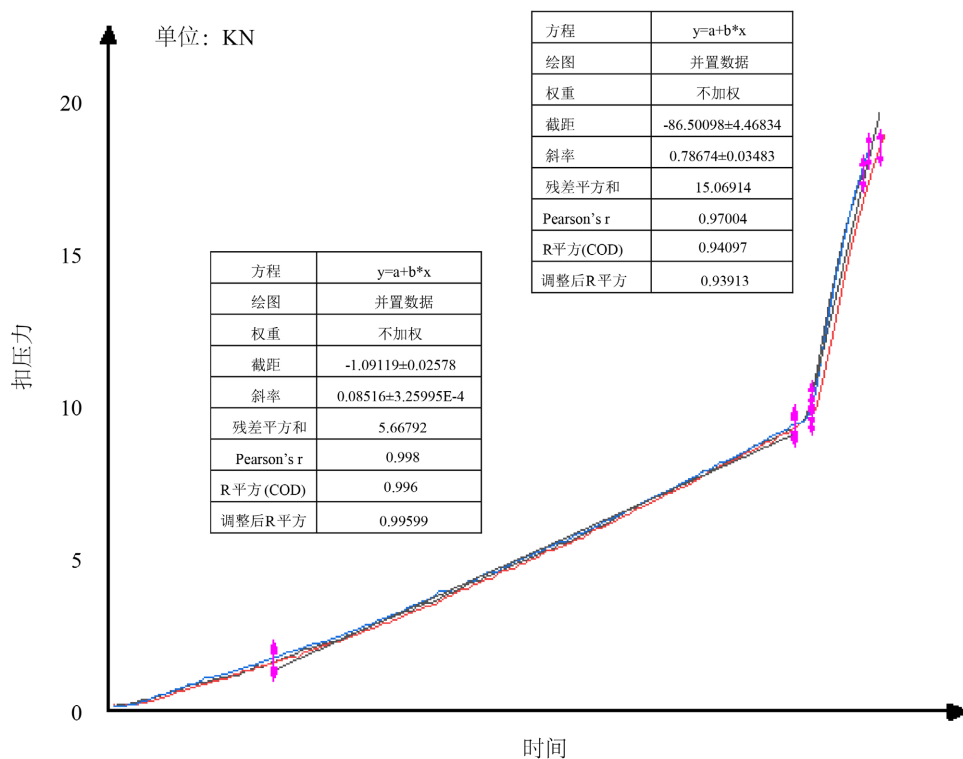


Figure 14. Fitting diagram of buckle pressure  
图 14. 扣压力拟合图



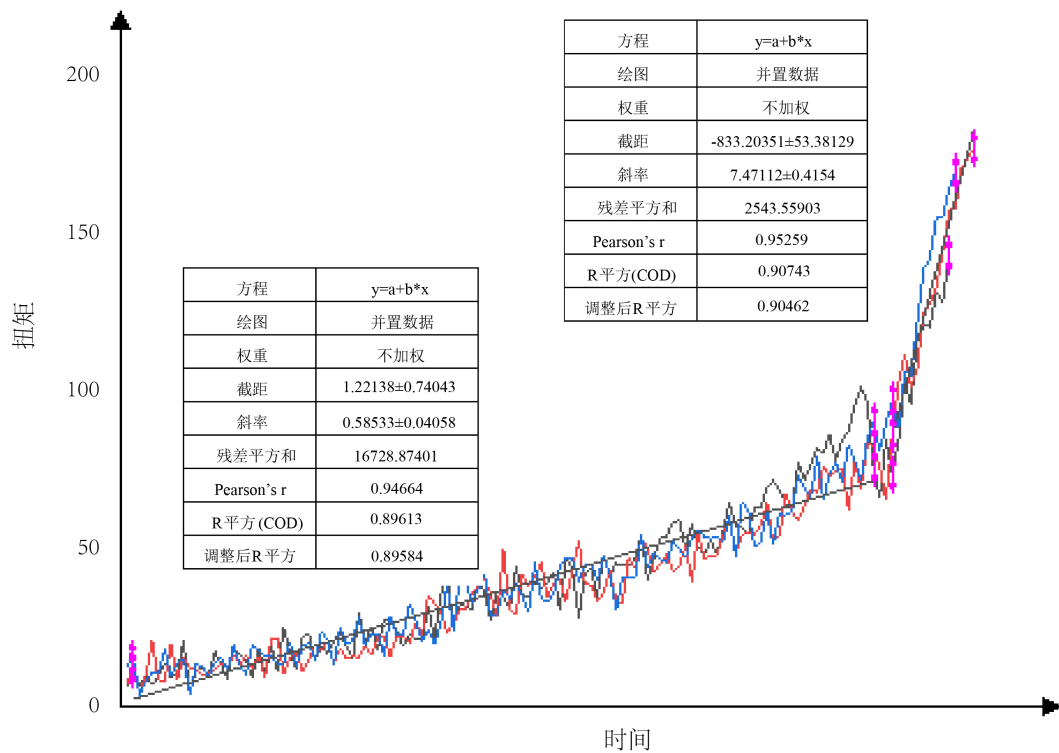


Figure 15. Fitting diagram of tightening torque  
图 15. 拧紧扭矩拟合图

## 4. 扣压力学关系推导

### 4.1. 扣压力拧紧角度公式推导

由扣压力试验可得出扣压力 - 位移数学关系为:

$$\begin{aligned} F_1 &= 4553L \quad (1 \leq L \leq 5.1) \\ F_2 &= 24233.5L - 100601 \quad (L > 5.1) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $F_1$ : 第一阶段扣压;  $F_2$ : 第二阶段扣压力;  $L$ : 弹条中肢垂直位移。

弹条的垂直位移  $L$  是由螺母的拧紧挤压引起的, 因此  $L = P * n = (P$ ——螺距,  $n$ ——转过的圈数)一个螺距等于 3 mm, 因此扣压力 - 位移的关系可以推导为扣压力 - 拧紧角度关系。

$$\begin{aligned} F_1 &= 37.94\omega \quad (0 \leq \omega \leq 608^\circ) \\ F_2 &= 201.85\omega - 100601 \quad (\omega > 608^\circ) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $F_1$ : 第一阶段扣压力;  $F_2$ : 第二阶段扣压力;  $\omega$ : 拧紧角度。

### 4.2. 拧紧扭矩 - 拧紧角度公式推导

由拧紧试验数据可推导出各个物理量的拟合公式:

扭矩拟合公式:

$$\begin{aligned} F_1 &= 0.163t - 2.83 \\ F_2 &= 1.417t - 155.31 \end{aligned} \quad (3)$$

扣压力拟合公式:

$$\begin{aligned} T_1 &= 0.585t + 1.22 \\ T_2 &= 7.4716t - 833.2 \end{aligned} \quad (4)$$

预紧力拟合公式:

$$\begin{aligned} f_1 &= 0.085t - 1.091 \\ f_2 &= 0.786t - 86.5 \end{aligned} \quad (5)$$

预紧力与拧紧角度的关系:

$$\begin{aligned} F_1 &= 4.553L (L \leq 5.07) \\ F_2 &= 24.234L - 100.6 (L > 5.07) \\ L &= P \cdot n = P \cdot \frac{\omega}{360^\circ} \\ \Rightarrow F_1 &= 39.94\omega (\omega \leq 610^\circ) \\ \Rightarrow F_2 &= 201.85\omega - 100601 (\omega > 610^\circ) \end{aligned} \quad (6)$$

结合扣压力试验和扣件拧紧试验成果, 即可推导出拧紧扭矩 - 角度的关系:

$$\begin{aligned} T_1 &= 0.143\omega + 11.36 (0 \leq \omega \leq 604) \\ T_2 &= 1.063\omega - 544 (605 < \omega \leq 900) \end{aligned} \quad (7)$$

线性拟合后拧紧角度与扭矩的曲线如下图 16 所示。

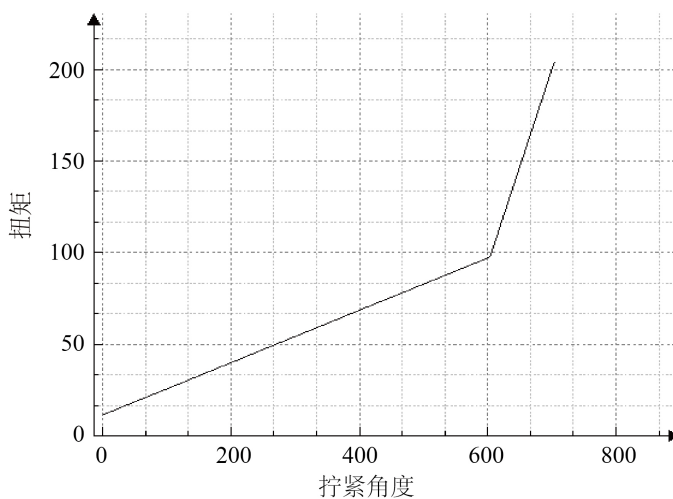


Figure 16. Fitting curve of tightening angle and torque  
图 16. 拧紧角度与扭矩拟合曲线

## 5. 拧紧策略设计及验证

### 5.1. 动态拧紧策略设计

拧紧方法的选择是从拧紧原理上定义拧紧所需要的条件和拧紧方式, 但是在实际的拧紧过程中, 即便是同一个方法, 采用不同的拧紧策略, 拧紧的精度, 稳定性都有所区别, 因此需要对拧紧方法的不同策略进行对比研究, 探究最适合该场景的拧紧策略。本课题设计了扭矩分段控制法和动态扭矩转角法的

不同拧紧策略，通过拧紧对比实验，择优选择综合效果最好的作为最终的拧紧策略。

### 1) 扭矩分段动态控制法

扭矩反馈分段控制策略的根本拧紧方法是扭矩法[7]，根据轨道扣件系统的扭矩变化特征，设计了扭矩反馈分段拧紧控制方法。由之前的拧紧误差因素分析可知，拧紧轴转速会影响最终的扭矩结果，转速越快拧紧精度越低，因此在接近拧紧目标值时应该降低转速，减小停机阶段延迟对扭矩的影响。为了兼顾拧紧效率和拧紧精度，由此产生了分段动态控制的思路，即根据拧紧扭矩的变化，分段调整拧紧的速度，以此保证拧紧效率和拧紧扭矩之间的最优解。

拧紧策略如下：目标值为  $T$ ，扭矩值小于  $fT$  时，以转速  $R_1$  拧紧，扭矩值在： $fT \sim T$  时，以低速  $R_2$  拧紧 ( $0 \leq f \leq 1$ )。其中的初拧系数  $f$ ，转速  $R_1$ 、 $R_2$  为可调参数，具体值需要根据拧紧试验对比确定，拧紧逻辑示意图如图 17 所示。

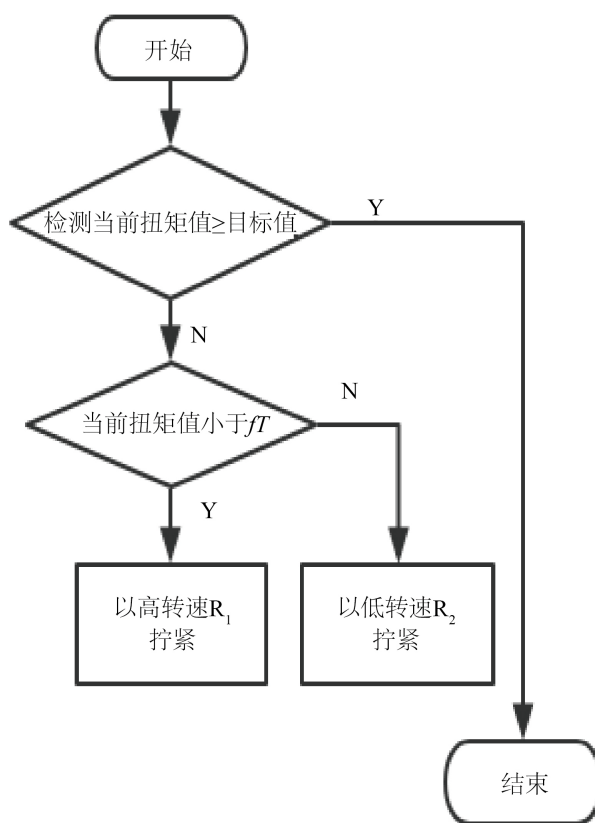


Figure 17. Flowchat of tightening logic of torque subsection dynamic control method

图 17. 扭矩分段动态控制法拧紧逻辑示意图

### 2) 扭矩 + 动态转角控制法

欠扭矩 + 拧紧角度的控制策略是属于扭矩角度控制方法，即在一定拧紧扭矩的基础上，根据扣件系统的拧紧角度和扭矩的关系，再拧紧一个角度的方法。使用该方法需要设备具有扭矩检测功能以及角度检测和控制功能，其中第一阶段的拧紧扭矩的设置影响到拧紧速度，第二阶段的拧紧角度涉及拧紧精度，因此合理设计相关参数，对拧紧效果影响重大。

扭矩转角法的控制思路[8]：目标值为  $T$ ，扭矩小于  $fT$  时，快速拧紧到  $fT$ ，再根据扭矩与角度的计算

公式计算出需要的角度并拧紧。

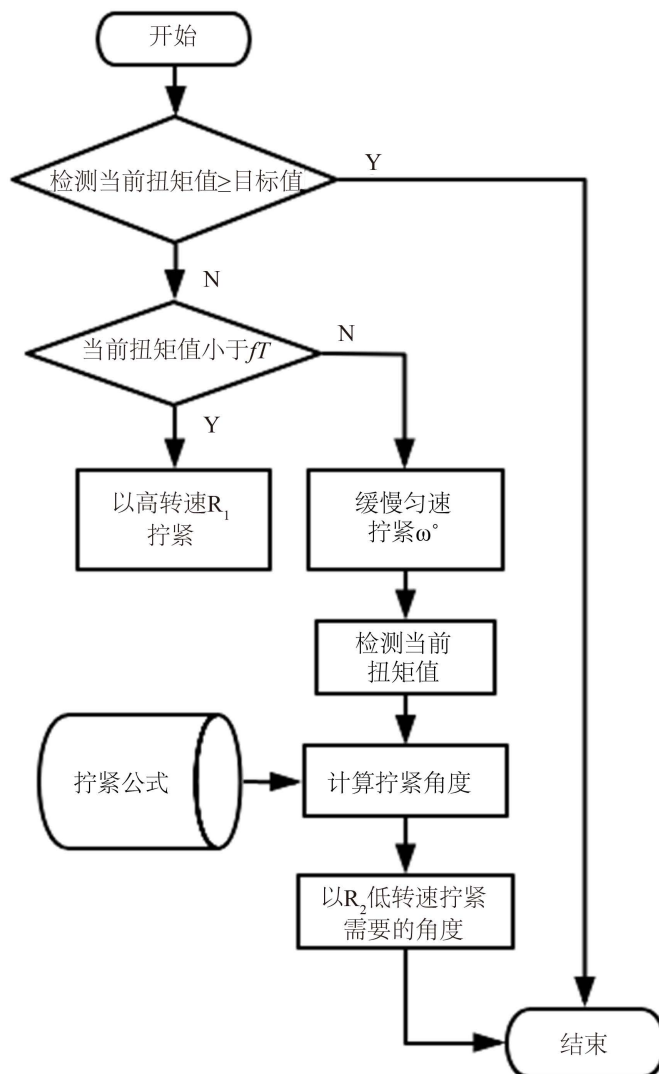


Figure 18. Flowchat of tightening logic of torque angle method  
图 18. 扭矩转角法拧紧逻辑流程图

经过大量试验发现，第一阶段由于拧紧速度太快，拧紧扭矩值与设定的  $fT$  偏差较大，导致根据此扭矩值计算出的拧紧角度也相差的太大，没有实用价值。因此对扭矩转角拧紧法提出了改进，称为扭矩 + 动态转角控制法。

扭矩 + 动态转角控制法：目标值为  $T$ ，扭矩小于  $fT$  时，快速拧紧到  $fT$ ，在缓慢匀速拧紧  $\omega^\circ$ ，并检测出此阶段动态扭矩，结合动态扭矩和扭矩 - 角度数学关系，计算出当前扭矩值到最终扭矩值需要拧紧的角度，再控制电机转动相应的角度。拧紧逻辑图如图 18 所示。

## 5.2. 拧紧算法验证试验

为了验证拧紧策略的有效性，设计了拧紧试验，如图 19 所示通过给拧紧设备输出轴串联动态扭矩校准仪来测量拧紧扭矩，并计算拧紧精度。



Figure 19. Tightening experiment  
图 19. 拧紧实验图

通过对不同的策略进行拧紧试验，并不断根据拧紧结果调整相应的参数，最终确定了最匹配的拧紧方案。即扭矩分段控制法：以 1500 r/min 的转速拧到 0.7 T 的扭矩值，再以 500 r/min 的转速拧到 T，此时的拧紧精度达到 4.7%。扭矩 + 动态转角控制法：先以 1500 r/min 转速拧紧到 0.7 T，然后以 800 r/min 转速拧 50°，并根据此时的扭矩值计算需要拧紧的角度值，最后再以 500 r/min 的转速拧紧需要的角度，此时的拧紧精度达到 4.1%。其拧紧精度如表 1 所示。

Table 1. Tightening accuracy  
表 1. 拧紧精度表

拧紧策略		设定值	拧紧平均值	拧紧精度
分段控制方法	方案①	120	149.1	24.2%
	方案②	120	143.4	19.5%
	方案③	120	136.7	13.9%
	方案④	120	125.6	4.7%
欠扭矩 + 拧紧角度	方案①	120	144	19.1%
	方案②	120	114.1	-4.9%
	方案③	120	142.5	18.7%
	方案④	120	129.5	7.9%
	方案⑤	120	125.0	4.1%

通过对拧紧过程的动态控制，可以有效提高拧紧扭矩精度，解决了传统机械式拧紧机拧紧精度低的问题。

## 6. 结论

- 1) 本文对铁路轨道扣件系统进行力学研究，通过实验的方法推导出了扣压力 - 拧紧扭矩 - 预紧力 - 拧紧角度的数学关系。
- 2) 基于扣件螺栓的拧紧数学关系，选择合适的拧紧方法，并设计了动态拧紧策略。

3) 通过拧紧实验的方法, 验证了拧紧策略的有效性和准确性。

本文的研究结果对铁路扣件螺栓拧紧机的拧紧算法设计具有极强的指导意义和参考价值。

## 项目支持

重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-fxydX0065)。

## 参考文献

- [1] 许佑顶. 高速铁路无砟轨道扣件设计要点[J]. 铁道工程学报, 2010(4): 40-43.
- [2] 袁媛. 高速铁路扣件系统疲劳性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [3] 陆健亮. 螺纹拧紧力矩控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [4] 赵静岩. 大型养路机械的现状与发展分析[J]. 内燃机与配件, 2018(5): 254-255.
- [5] 黄志刚, 许玢. ANSYS 19.0 有限元分析完全自学手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019.
- [6] 张亮亮, 王玉林. 扭矩法与扭矩/转角法预紧力的计算及对比研究[J]. 内燃机与配件, 2016(1): 7-8.
- [7] 汤春球, 张继伟, 莫易敏. 扭矩转角法工艺与检测方法[J]. 机械设计与研究, 2018, 24(6): 103-108.
- [8] Company Norbar, Norbar Torque Tools, Wrenches, Multipliers and Calibration Equipment.  
<https://www.norbar.com/en-gb/>