

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416794

基于测力轮对的纵向轮轨力测量方法研究^{*}

杜 佳 陈建政 吴 越 任 愈

(西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室 成都 610031)

摘 要: 由于地形条件的限制,越来越多的铁路线路设计不得不采用长大坡道,使得传统仅针对横向和垂向轮轨力的测力轮对技术已经无法解决后续运营维护阶段衍生的一系列问题,需要进一步开展纵向轮轨力测试技术研究。本文提出一种基于 LM 算法的纵向轮轨力测量方法。首先,通过有限元仿真计算验证纵向力的可测性并探明其作用规律,以此为基础设计纵向力测量电桥,将求解纵向力的问题转化为求解超定多元非线性方程组问题。利用阶次分解拟合任意角度下的标定系数,采用 LM 算法求解旋转角度与轮轨力。借助 SIMPACK 模拟列车不同条件下的爬坡运行状态,验证了本文方法的有效性并量化作用点位置对纵向力测量误差的影响。研究结果表明,本文提出纵向力测量方法具有较高的测量精度,其相对误差小于 6%。

关键词: 测力轮对;轮轨纵向力;LM;超定元非线性方程组

中图分类号: U270.1;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.8300

Research on longitudinal wheel-rail force measurement
method based on instrumented wheelset

Du Jia Chen Jianzheng Wu Yue Ren Yu

(State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Due to the limited terrain conditions, an increasing number of railway lines have to be designed with long inclines, rendering traditional wheel-rail force measurement technology, which only addresses lateral and vertical wheel-rail forces, inadequate for addressing the subsequent operational and maintenance issues. Further research into longitudinal wheel-rail force measurement technology is required to effectively address these challenges. Therefore, this paper introduces a longitudinal wheel-rail force measurement method based on the LM algorithm. Initially, the measurability of longitudinal force is validated and its governing principles are investigated through finite element simulation calculations. Subsequently, a longitudinal force measurement bridge is designed as a foundation for transforming the problem of solving longitudinal force into that of solving an overdetermined multivariate nonlinear equation system. Then, the degree decomposition is used for fitting calibration coefficient under arbitrary angle and the rotation angle and wheel-rail force is solved through the LM algorithm. By employing SIMPACK to simulate train uphill operation under diverse conditions, this study validated the proposed method and quantified the influence of contact point on longitudinal force measurement error. The results demonstrate that the proposed method exhibits high precision, with a relative error of less than 6%.

Keywords: instrumented wheelset; longitudinal wheel-rail force; LM; overdetermined multivariate nonlinear equations

0 引 言

线路起伏带来的长大坡道会造成更严峻的轮轨接触问题进而直接影响列车的行驶安全^[1]。因为纵向力与爬坡、减速制动依赖有密切的联系,故纵向力的监测对于特殊线路上轮轨关系的研究以及列车运行安全性的影响都具有重

要的意义。

关于纵向轮轨力的研究与垂向、横向轮轨力(之后统称纵向力、垂向力和横向力)类似,均主要以目前应用最为广泛且效果最佳的测力轮对为研究媒介^[2]。

国内外学者从纵向力的可测量性出发,针对纵向力对垂向力、横向力和接触点测量精度造成的影响展开了大量

收稿日期:2024-09-03

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(U21A20167)、四川省科技计划项目(2023YFH0049)资助

研究。Hondo 等^[3]主要针对测力轮对的交叉灵敏度特性进行了探究,通过仿真对不同车轮踏面位置施加纵向力,发现用于测量垂向力和横向力的桥路中均可观测到输出,说明了纵向力的可测量性。Hondo 等^[4]指出纵向力同样会对接触点的测量精度产生影响。金新灿等^[5]证明辐板应变对不同方向轮轨力敏感程度不同。上述研究仅停留在纵向力对其他作用力造成干扰的角度展开,因为缺少对纵向力的具体测量方法,因而并未对纵向力本身及其造成的影响做出深入研究。

铁路运输发展中呈现出的两个显著趋势之一便是重载化,重载列车面临着车轮踏面剥离等问题,将大大影响列车运行安全性及使用寿命^[6-8]。其中重要的原因便是纵向力,且重载情形下,纵向力的作用规律与常规情形下有所不同。周桂源等^[9]指出列车在加速和减速过程中车轮将承受纵向力的作用,随着纵向力的增加,车轮的损伤也随之加重。常崇义等^[10]发现纵向力的影响在全制动以及紧急制动时更为显著。徐明龙等^[11]则着重分析了机车在具体线路的循环控制过程中的纵向力劣化机理。上述学者进一步探究了纵向力具有不同于垂向力与横向力的作用特性,并针对纵向力对轮轨造成的具体损伤情况进行了说明,但对纵向力具体测量方法的展开及纵向力具体数值的量化仍有欠缺。

Wu 等^[12]提到大多数铁路轨道动力学模型集中在垂直方向和横向方向,很少考虑到纵向方向,于是研究了具有模拟轨道纵向力和和轨道蠕变现象能力的模型,说明纵向力已经被学者纳入轨道动力学研究范畴。Hondo^[13]从信号处理的角度进行切入,可实现在不使用旋转编码器的情况下,利用现有应变数据借助最小二乘法提取车轮转动时纵向力的平均值,但此种方法需要对轮对辐板进行打孔,破坏了轮对本身的完整结构。Urda 等^[14]提出了一种将纵向力纳入考虑范畴的基于人工神经网络的轮轨接触力实验测量算法,该算法旨在成为谐波抵消方法的有效替代方法,但并未具体计算出纵向力的值。Lu 等^[15]研究低附着条件下高速铁路轮轨动力相互作用,侧重于研究纵向蠕滑力对钢轨磨损损伤造成的影响,但仍旧不涉及纵向力的测量问题。

以上学者在都对纵向力测量做出了不同程度的尝试,但并未能在确保轮对完整性的基础上给出确切的测量方案。本文为实现纵向力的测量,基于测力轮对方法,利用有限元仿真,探明纵向力作用下辐板应变规律,进而设计出针对纵向力的测量桥路,结合阶次分解拟合任意角度下的标定系数,将纵向力求解问题转化为超定多元非线性方程组求解问题,最后利用 SIMPACK 动力学仿真结合列文伯格-马夸尔特算法(Levenberg-Marquardt algorithm, LM)优化,综合考虑垂向力、横向力、纵向力、作用点位置等因素完成方法验证,提出完整的一套轮轨纵向力测量方法。

1 仿真分析与组桥方案设计

1.1 有限元仿真及车轮辐板应变分析

利用有限元软件建立某地铁曲辐板轮对三维有限元仿真分析模型。使用 6 面体 8 节点实体单元 Solid185 进行网格划分,总共有节点 776 015 个,实体单元 740 280 个,建立的有限元模型如图 1 所示。材料参数设置中杨氏模量 $E = 2.1 \times 11 \text{ Pa}$,泊松比为 0.3,密度 7.85 g/cm^3 。计算时在车轴两端施加固定约束,在踏面上名义滚动圆位置施加横向力、垂向力或纵向力。得到车轮曲辐板法向 x 、 y 、 z 和剪切 xy 、 yz 、 xz 共 6 个方向的表面应变,通过变换转换为实际应变片测量得到的径向应变^[16]。

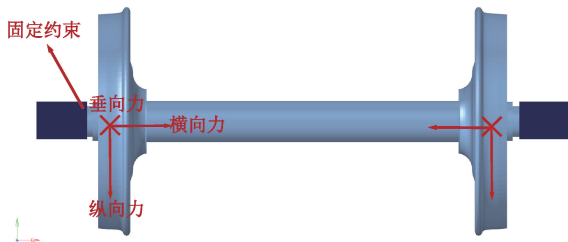


图 1 轮对有限元模型

Fig. 1 Finite element model of wheelset

为探明在不同方向轮轨力作用下,轮对辐板的应变响应规律,图 2~4 给出了纵向力、横向力和垂向力单独作用在名义滚动圆位置时辐板内外侧径向应变的作用规律。图中横坐标为角度,纵坐标为微应变。此处角度定义为最大响应位置与作用力加载位置之间所对应的夹角,其中 0° 是正响应位置, 180° 是负响应位置。图中作图半径为纵向力单独作用时辐板内外侧较为明显的半径(178~233 mm)。

图 2 为 10 kN 纵向力单独作用下,辐板内外侧应变响应。由图 2 可知,在进行纵向力单独加载时,辐板内侧最大径向应变在 $8 \mu\epsilon$ 左右,辐板外侧最大径向应变在 $12 \mu\epsilon$ 左右,由应变片的特性可知,当其为应变超过 $5 \mu\epsilon$ 则可以进行测量,故证明纵向力具有可测性。

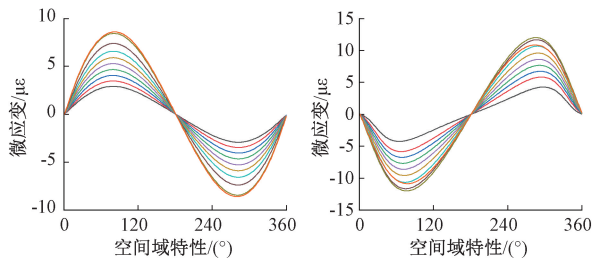


图 2 纵向加载

Fig. 2 Longitudinal loading

图 3 和 4 给出了 10 kN 垂向力和 10 kN 横向力分别单独作用下,辐板内外侧应变响应。由图可知,在垂向力和横向力单独作用下,辐板内外侧应变最大响应位置与作用点位置之间分别为 0° 、 180° 和 360° 。对比图 2 可知,在 10 kN

纵向力作用下,应变最大响应位置与作用点位置间有明显的角度差纵向力作时,该角度差为 75° 左右。纵向力出现的峰值位置不会因为与垂向力、横向力峰值位置重合而被覆盖,进而说明了测量纵向力在实际工程中的可行性。

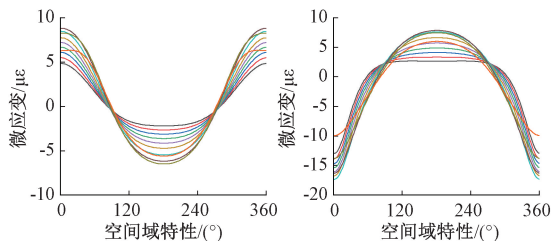


图 3 垂向加载

Fig. 3 Vertical loading

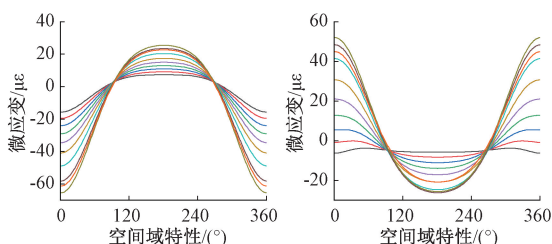


图 4 横向加载

Fig. 4 Lateral loading

纵向力作用下辐板内、外侧径向应变作用规律不同于垂向力、横向力的周期性、偶对称变化规律,在后续组桥过程中,将以此为切入点,寻找在某些角度下纵向力作用明显但垂向力与横向力作用并不明显的位置,以此达到突出纵向力作用效果而减少横向力、垂向力干扰的目的。

1.2 组桥方案设计

垂向力、横向力、纵向力单独作用下单个电桥的输出如式(1)所示。

$$\begin{aligned} s_p &= \sum_{i=1}^k P b_{pi} \cos(i\theta) \\ s_q &= \sum_{i=1}^k Q b_{qi} \cos(i\theta) \\ s_l &= \sum_{i=1}^k L b_{li} \cos(i\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: b_{pi} 为垂向力作用下 i 阶谐波分量对应的电桥输出比例系数, b_{qi} 为横向力作用下 i 阶谐波分量对应的电桥输出比例系数, b_{li} 纵向力作用下 i 阶谐波分量对应的电桥输出比例系数。 P 、 Q 、 L 分别为垂向力、横向力和纵向力, θ 为车轮旋转角度。

由式(1)可知,辐板应变是车轮旋转角度的函数,轮轨力测量中的难点便是旋转角度的求解。连续测力轮对法的思路是先通过单个电桥的谐波分析,寻找最优的组桥方案,消除或减小高次谐波的干扰。再通过电桥联合输出的方式消除角度的影响,将非线性方程转化为线性方程进行求解

实现轮轨力的解耦。

多个应变片组合的轴对称组桥的电桥输出通用表达式为:

$$\begin{aligned} \epsilon_{out} &= \sum_{i=1}^m [\epsilon_i(\theta) - \epsilon_i(\theta + \pi)] = \\ &= \sum_{i=1}^m \left[a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos[n(\theta + \alpha_i)] \right] - \\ &= \sum_{i=1}^m \left[a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos[n(\theta + \alpha_i + \pi)] \right] = \\ &= \sum_{n=1}^m (A_{2n-1} \sin((2n-1)\theta + \varphi)) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ϵ_i 表示辐板某点的应变输出, a_n 、 b_n 表示各项系数。 m 代表桥路中有 m 组对称应变片, α_i 表示各组对称应变片的初始相位, φ 为电桥的初始相位, A_{2n-1} 为各阶谐波分量的幅值。

$$\begin{aligned} A_{2n-1} &= 2a_{2n-1} \left\{ \left(\sum_{i=1}^m [\cos((2n-1)\alpha_i)] \right)^2 \times \right. \\ &\left. \left(\sum_{i=1}^m [\sin((2n-1)\alpha_i)] \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (3)$$

本文中不再以消除角度影响作为目标,而是选择以角度作为切入点,进行轮轨力的计算。国内外学者通过大量研究,尝试优化组桥方案,其中陈建政提出的布桥方案在后续研究中被广泛应用。该方案通过讨论 m 的取值与对应各组对称应变片的初始相位以达到单桥可消除 3、5、9 次高阶谐波影响的作用,使得单桥输出近似为正余弦波^[17-18]。如图 5 所示,采用 4 组对称应变片的单桥布置方案,每组应变片布置角度为 $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = (0, \frac{\pi}{5}, \frac{\pi}{3}, \frac{8\pi}{15})$ 。相较于国标法^[19]组桥方案拟合旋转角度较大复杂性而言,此种方案对于拟合各个旋转角度下的标定系数更有优势,故本文同样采用此布桥方案。

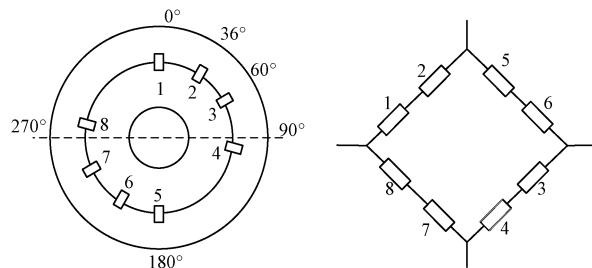


图 5 组桥方案设计

Fig. 5 Group bridge scheme design

如式(1)所示,包括旋转角度 θ 、垂向力 P 、横向力 Q 与纵向力 L 共计 4 个未知量,如果仅针对垂向力、横向力和纵向力布置间隔角度为 $(0, \frac{\pi}{5}, \frac{\pi}{3}, \frac{8\pi}{15})$ 的单桥,只能组成 3 个方程,不足以完成 4 个未知参数的求解,故采用 2 个单桥间隔 90° 布置的思路。但 2 个单桥并不进行平方和相加消除角度,而是直接采用 6 个单桥,将求解垂向力、横向力、

纵向力与作用点位置的问题转化为求解超定多元非线性方程组问题。

超定多元非线性方程组的求解中组桥半径的选择十分重要,因为系数矩阵需要有良好的数值稳定性。以式(4)为例,当矩阵输出 S 有微小变化时,轮轨力 F 的变化也应较小,如若矩阵输出发生微小变化,轮轨力 F 波动巨大,则矩阵数值稳定性不佳,或称矩阵病态。

$$AF = S \quad (4)$$

$$\text{cond}(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\| \quad (5)$$

式中: $\|A\|$ 为矩阵 A 的范数, $\|A^{-1}\|$ 为矩阵 A 的逆的范数, $\text{cond}(A)$ 为矩阵条件数。

除了通过矩阵条件数排除病态矩阵后,还需考虑不同桥路之间布桥半径不可相隔过近,不可过于靠近轮缘或轮毂位置。按照上述两个条件进行筛选后所有符合条件的半径组合按照矩阵条件数排序后由图 6 所示。

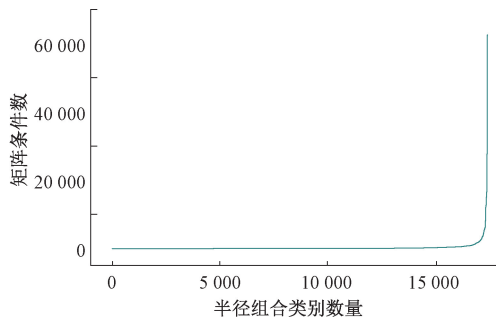


图 6 按照矩阵条件数进行排序的半径组合

Fig. 6 Radius combinations sorted by the number of matrix conditions

当半径组合对应的矩阵条件数相近差异不大时,优先考虑纵向力作用下辐板外侧径向应变较大的半径组合以保证纵向力的可测性。

在考虑条件数,灵敏度等因素后,还需保证该组桥方案中辐板一圈任意角度系数矩阵的矩阵条件数均满足数值稳定性良好这一条件。由图 7 可知,该组桥半径对应的矩阵条件数在辐板一圈任意角度下均低于 2.8,验证了该组半径对应的下对应的系数矩阵 A 对误差敏感,数值稳定性较好。

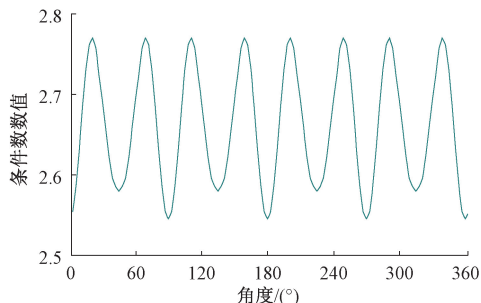


图 7 任意角度的系数矩阵对应的矩阵条件数

Fig. 7 The number of matrix conditions corresponding to the coefficient matrix of any angle

综上,垂向桥组桥半径为 267 mm,横向桥组桥半径为 296 mm,纵向桥组桥半径为 233 mm,上述组桥半径在辐板外侧上的具体位置如图 8 所示。

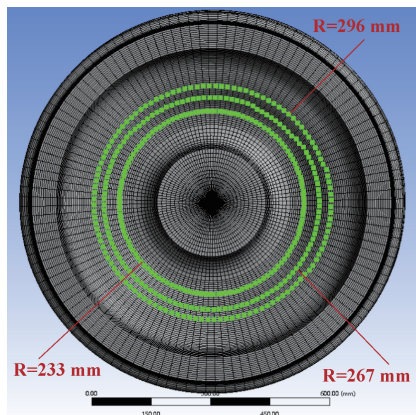


图 8 组桥半径位置示意图

Fig. 8 The number of matrix conditions corresponding to the coefficient matrix of any angle

2 LM 算法求解旋转角度与轮轨力

2.1 阶次分解

由式(1)可知单个轮轨力作用时的桥路输出,根据线性叠加原理,垂向力、横向力、纵向力同时作用时,单个电桥输出为:

$$s_{out} = s_p + s_q + s_l = \sum_{i=1}^k (Pb_{pi} + Qb_{qi} + Lb_{li}) \cos(i\theta) \quad (6)$$

采用 36° 桥布片时,得到单个电桥输出为^[20]:

$$s_1 = (\epsilon_0 + \epsilon_{36} + \epsilon_{60} + \epsilon_{96}) - (\epsilon_{180} + \epsilon_{216} + \epsilon_{240} + \epsilon_{276}) \quad (7)$$

式中: ϵ, θ 为辐板应变在不同布片角度下的输出。

由于是双桥,第 2 个电桥与第 1 个电桥间隔 90°。其中应变信号是以角度为自变量的傅里叶级数:

$$\epsilon_\theta = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)) \quad (8)$$

因为 ϵ_θ 是偶函数, a_n 是余弦分量系数, b_n 是正弦分量系数,但由于 b_n 的谐波系数贡献太小,故忽略。

由组桥方案设计可知,测量垂向力、横向力与纵向力的电桥分别由两个单桥组成,将上述单桥分别进行编号,编号依次为: $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$, 其中 S_1 和 S_2 是在组桥半径为 267 mm 下间隔 90° 的垂向桥输出, S_3 和 S_4 是在组桥半径为 296 mm 下间隔 90° 的横向桥输出, S_5 和 S_6 是在组桥半径为 233 mm 下间隔 90° 的纵向桥输出,每一个电桥的输出均由 3 个方向的轮轨力共同决定:

$$\begin{cases} a_{11} \cdot P + a_{12} \cdot Q + a_{13} \cdot L = S_1 \\ a_{21} \cdot P + a_{22} \cdot Q + a_{23} \cdot L = S_2 \\ a_{31} \cdot P + a_{32} \cdot Q + a_{33} \cdot L = S_3 \\ a_{41} \cdot P + a_{42} \cdot Q + a_{43} \cdot L = S_4 \\ a_{51} \cdot P + a_{52} \cdot Q + a_{53} \cdot L = S_5 \\ a_{61} \cdot P + a_{62} \cdot Q + a_{63} \cdot L = S_6 \end{cases} \quad (9)$$

式中: a_{11}, a_{12}, a_{13} 分别代表垂向、横向、纵向加载对电桥输出 S_1 的影响系数; a_{21}, a_{22}, a_{23} 分别代表垂向、横向、纵向加载对电桥输出的影响系数; a_{31}, a_{32}, a_{33} 分别代表垂向、横向、纵向加载对电桥输出 S_3 的影响系数; a_{41}, a_{42}, a_{43} 分别代表垂向、横向、纵向加载对电桥输出 S_4 的影响系数; a_{51}, a_{52}, a_{53} 分别代表垂向、横向、纵向加载对电桥输出 S_5 的影响系数; a_{61}, a_{62}, a_{63} 分别代表垂向、横向、纵向加载对电桥输出 S_6 的影响系数。

式(9)中标定系数 $a_{11} \sim a_{63}$ 可组成系数矩阵 $\mathbf{A}$:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} \end{bmatrix} \quad (10)$$

垂向力, 横向力与纵向力可组成另一矩阵 $\mathbf{F}$:

$$\mathbf{F} = [P \quad Q \quad L]^T \quad (11)$$

式中: P 为垂向力, Q 为横向力, L 为纵向力。

综上可得桥路输出与标定系数及轮轨力之间存在如下关系:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{F} = \mathbf{S} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{S} = [S_1 \quad S_2 \quad S_3 \quad S_4 \quad S_5 \quad S_6]^T$ 。

对于系数 $a_{12} \sim a_{63}$, 对其进行阶次分解, 下面以 a_{11} 为例:

$$\begin{aligned} a_{11} &= a_{p1} \cos \theta + \cdots + a_{pi} \cos i \theta \\ a_{12} &= a_{q1} \cos \theta + \cdots + a_{qi} \cos i \theta \\ &\vdots \\ a_{63} &= a_{l1} \cos \theta + \cdots + a_{li} \cos i \theta \end{aligned} \quad (13)$$

其中, a_{p1} 和 a_{pi} 分别是标定系数 a_{11} 展开之后的1阶与 i 阶谐波系数, 同理针对 $a_{12} \sim a_{63}$ 均对其进行谐波展开, 为了尽可能精确的拟合标定系数的大小, 本文展开到18阶, 标定系数与拟合系数之间差距最大为0.042, 满足后续计算需求。由式(13)可以看出, 通过阶次展开之后, 可以拟合任意角度下的标定系数。

2.2 基于LM算法的纵向轮轨力测量方法研究

LM算法同时具有梯度下降法和牛顿法的特点, 属于“信赖域”算法的一种。在优化算法中, 目标都是求解函数的极小值, 每一步中, 都要求目标函数处于下降状态, 所谓信赖域法, 就是从初始点开始, 先假设一个可以信赖的最大位移, 然后以当前点为中心, 以最大位移为半径的区域内,

通过寻找目标函数的二次近似函数的最优点, 来求解得到真正的位移, 得到真正位移之后, 在计算目标函数值, 如若目标函数值的下降满足了一定的条件, 就说明此位移是可靠的, 则继续按照此规则迭代下去; 如果不能使目标函数的下降满足一定条件, 则应减小信赖域的范围, 重新求解。

在合理的步长前提下, 梯度下降法的搜索方向虽然始终为下降方向, 但是收敛速度太慢; 牛顿法虽然收敛速度得到了很大提升, 但搜索方向未必是函数下降方向, LM算法吸取了二者的优点, 通过引入参数, 使其能够快速下降, 又能保证总体沿着下降方向进行搜索。并且, 当陷入局部最优解时, 可以调整搜索方向, 跳出局部最优解, 极大提高了收敛到全局最优解的概率。

利用LM算法求解轮轨力的过程中, 存在4个未知量, 即旋转角度 θ , 垂向力 P , 横向力 Q , 纵向力 L 。后续过程中, 以上述4个参数作为迭代值, 求解超定多元非线性最小二乘优化问题。

在4个参数中, 旋转角度是求解超定多元非线性方程组的关键, 当旋转角度明确后, 超定多元非线性方程组将转化为超定多元线性方程组。旋转角度的初值可以根据迭代得到, 那么根据角度初值 θ_0 , 角速度 ω 与角加速度 β 之间的关系:

$$\theta_t = \theta_0 + \omega t + 0.5 \beta t^2 \quad (14)$$

如式(14)所示, 由于动力学仿真中列车线路设置了坡度, 那么车辆并非处于匀速状态, 车轮旋转角度的初值根据迭代求得, 根据式(14), 求出任意时刻的角度值。任意时刻车轮的理论旋转角度代入初值 x_0 , 后续每一次迭代都有理论旋转角度值作为先验值, 参与到后续的迭代过程中。

根据式(13), 任意角度的标定系数都可以根据阶次拟合求得, 已知初值为:

$$x_0 = [\theta \quad P \quad Q \quad L]^T \quad (15)$$

目标函数 f 为:

$$f(x^{(k)}) = [f_{s1}, f_{s2}, f_{s3}, f_{s4}, f_{s5}, f_{s6}]^T - \mathbf{S} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{其中, } f_{s1} - f_{s6} \text{ 都是与拟合理论桥路输出} \\ f_{s1}(\theta, P, Q, L) &= a_{11} \cdot P + a_{12} \cdot Q + a_{13} \cdot L \\ f_{s2}(\theta, P, Q, L) &= a_{21} \cdot P + a_{22} \cdot Q + a_{23} \cdot L \\ f_{s3}(\theta, P, Q, L) &= a_{31} \cdot P + a_{32} \cdot Q + a_{33} \cdot L \\ f_{s4}(\theta, P, Q, L) &= a_{41} \cdot P + a_{42} \cdot Q + a_{43} \cdot L \\ f_{s5}(\theta, P, Q, L) &= a_{51} \cdot P + a_{52} \cdot Q + a_{53} \cdot L \\ f_{s6}(\theta, P, Q, L) &= a_{61} \cdot P + a_{62} \cdot Q + a_{63} \cdot L \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)中系数都是角度与谐波系数所共同决定。 $[f_{s1} \quad f_{s2} \quad f_{s3} \quad f_{s4} \quad f_{s5} \quad f_{s6}]^T$ 是理论桥路输出, $\mathbf{S}$ 是真实桥路输出, 二者之间存在一定的差值, 当二者最接近时, 认为这便是迭代值的最终结果。

在实际迭代过程中, 以最小二乘 y 作为体现:

$$y(x^{(k)}) = f^T f \quad (18)$$

定义目标函数 $f(x^{(k)})$ 与最小二乘 $y(x^{(k)})$ 后, 计算函数 $f(x^{(k)})$ 的雅可比矩阵, 通过雅可比矩阵求解梯度:

$$\begin{cases} \nabla S(x^{(k)}) = (\nabla f(x^{(k)}))^T f(x^{(k)}) \\ H = (\nabla f(x^{(k)}))^T \nabla f(x^{(k)}) \end{cases} \quad (19)$$

式中： $\nabla S(x^{(k)})$ 为桥路输出的梯度， $\nabla f(x^{(k)})$ 为目标函数的梯度。

之后计算每一步迭代变化量 dx ：

$$|H + \mu I| dx = -\nabla S(x^{(k)}) \quad (20)$$

更新初值：

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + dx \quad (21)$$

计算终止条件是否满足，即迭代量 dx 是否满足终止条件，如若不满足则判断下一分支：

$$S(x^{(k+1)}) < S(x^{(k)}) + \beta(\nabla S(x^{(k)}))dx \quad (22)$$

β 为自定义参数，若满足式(22)，则有 $\mu = \mu/v$ ，其中 μ 为阻尼系数， v 为放大系数。

如若不满足，则令 $\mu = \mu v$ ，重新回到式(19)进行计算。

3 方法验证

3.1 SIMPACK 仿真分析

纵向力主要产生于列车爬坡与制动减速阶段，通过在动力学仿真软件中进行特定线路设计，模拟车辆牵引爬坡或减速制动状态。本文仿真线路按照国内某地铁线路设计运行速度设置，坡度为 3‰，仿真初始速度设为 80 km/h，车辆运行时，在没有坡度的路段处于近似匀速状态，在爬坡时处于减速状态。

具体过弯半径及线路长度设计如图 9 所示，采样频率为 200 Hz，采样时间设置为 60 s，获得共计 12 000 个样本数据点。

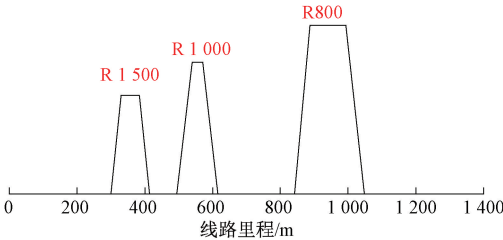


图 9 SIMPACK 仿真线路设计

Fig. 9 SIMPACK simulation circuit design

3.2 LM 算法结果验证及分析

图 10 和 11 是旋转角度、垂向力、横向力和纵向力对应的输入值与 LM 算法计算值的对比图。

由图 10 和 11 可知，车轮旋转角度、垂向力、横向力与纵向力理论加载值与迭代值基本重合，拟合结果较好。

表 1 为旋转角度、垂向力、横向力与纵向力的平均绝对误差和最大绝对误差。

如表 1 所示，旋转角度的平均绝对误差为 0.134 5°，最大绝对误差为 1.563 9°；垂向力的平均绝对误差为 0.297 0 kN，最大绝对误差为 1.265 9 kN；横向力的平均绝对误差为 -0.180 6 kN，最大绝对误差为 0.703 9 kN；纵向力平均绝对误差为 0.266 1 kN，最大绝对误差为 2.010 5 kN。

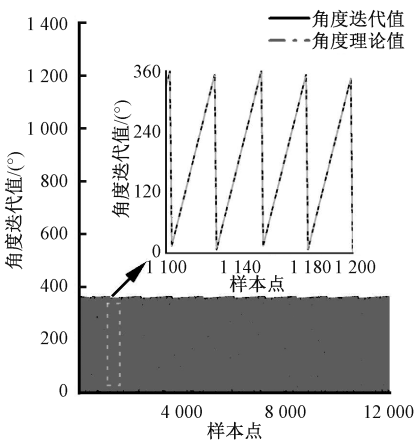
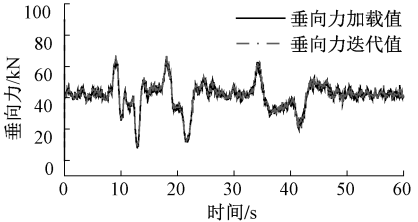
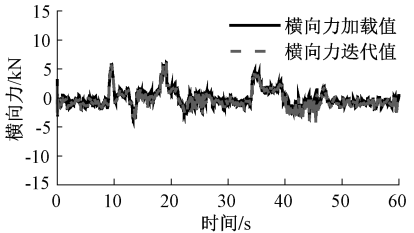


图 10 旋转角度输入值与 LM 算法计算值对比

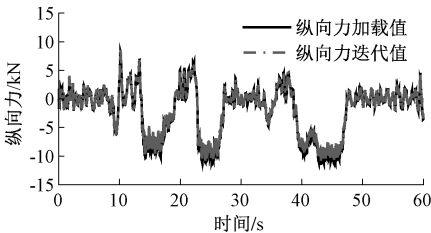
Fig. 10 Comparison between the input value of rotation angle and calculated value of LM algorithm



(a) 垂向力
(a) Vertical force



(b) 横向力
(b) Lateral force



(c) 纵向力
(c) Longitudinal force

图 11 轮轨作用力输入值与 LM 算法计算值对比

Fig. 11 Comparison between the input value of wheel-rail force and calculated value of LM algorithm

表 1 平均绝对误差与最大绝对误差

Table 1 Mean absolute error and maximum absolute error

变量	平均绝对误差	最大绝对误差
旋转角度/(°)	0.134 5	1.563 9
垂向力/kN	0.297 0	1.265 9
横向力/kN	-0.180 6	0.703 9
纵向力/kN	0.266 1	2.010 5

在仿真过程中,轮轨力之间的变化过程是连续且随机的,由文献[21]中的先验知识可知对解耦造成较大影响的是车辆通过弯道过程中的接触点位置变化。

对于作用点位置偏移具体图形解释如图 12 所示,名义滚动圆位置为作用点位置与轮缘内侧距离 70 mm。当间距小于 70 mm 时为内侧偏移,当间距大于 70 mm 时为外侧偏移。为后续进一步分析车辆通过弯道位置的影响因素,图 13 给出了 SIMPACK 仿真结果中轮轨接触点的具体变化过程。

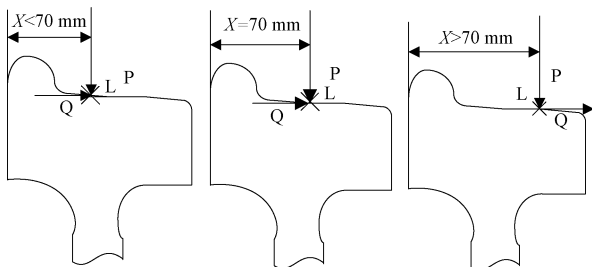


图 12 接触点位置与轮缘之间的距离

Fig. 12 The distance between the contact point and the rim

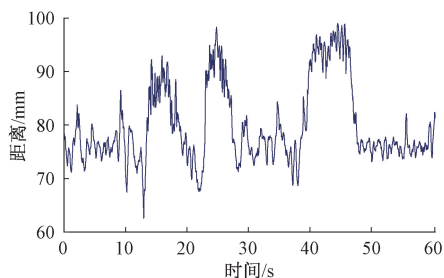


图 13 接触点位置变化

Fig. 13 Change in the position of the contact point

根据旋转角度、垂向力、横向力与纵向力的最大绝对误差,对应找到最大绝对误差对应的作用点位置偏移量,如表 2 所示。

表 2 最大绝对误差对应的轮轨作用点位置偏移量

Table 2 The maximum absolute error corresponds to the offset of the wheel-rail contact point's position

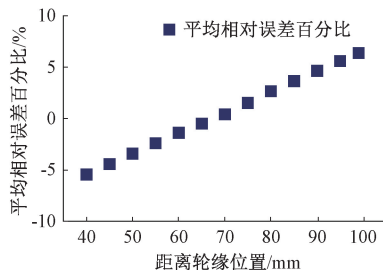
作用点位置与 轮缘间距/mm	角度	垂向力	横向力	纵向力
98.62	97.75	99.02	97.75	

由表 2 可知,最大误差出现的位置,都在作用点位置偏移量较大的位置,上述 4 个位置对应的作用点位置偏移量都达到了 95 mm(偏离名义滚动圆位置 25 mm)以上,说明作用点位置偏移量对于测量误差有较大的影响。

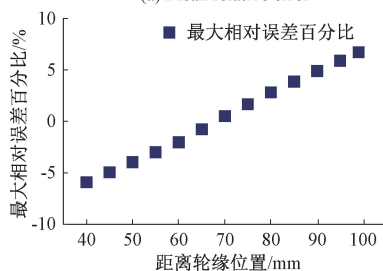
为了进一步量化作用点位置偏移对纵向力测量误差造成的影响大小,本文在 10 kN 垂向力、10 kN 横向力与 10 kN 纵向力共同作用时,沿着辐板一圈 360 度加载三力,分析辐板受力状态。

根据图 13 将作用点位置偏移进一步细分为间隔

10 mm 的不同情况,分别是接触点位置距离轮缘位置 40、50、60、70、80、90、100 mm 共 7 种不同作用点位置,分别得到的纵向力测量绝对误差,以此量化作用点位置造成的影响,如图 14 所示。由图可知,作用点位置在距离轮缘 40~100 mm 的位置之间偏移,相对误差保持在 $-6\% \sim 7\%$ 以内。当作用点位置与轮缘间距离小于 70 mm,相对误差为负;当作用点位置与轮缘间距离大于 70 mm 时,相对误差为正,且随作用点位置偏移,相对误差基本呈现线性变化。



(a) 平均相对误差
(a) Mean relative error



(b) 最大相对误差
(b) Maximum relative error

图 14 相对误差随作用点位置偏移

Fig. 14 The relative error shifts with the position of the contact point

之前纵向力测量方法中同样指出作用点位置偏移将对纵向力测量精度造成影响,在作用点位置偏移的情况下,偏移造成纵向力误差的平均值为 1.2 kN,通过此本文中的方法,将平均绝对误差降到 0.266 kN,测量精度更高。

为了解垂向力、横向力与纵向力共同作用时,在轮对辐板一圈加载的纵向力计算误差情况,进一步绘制了如图 15

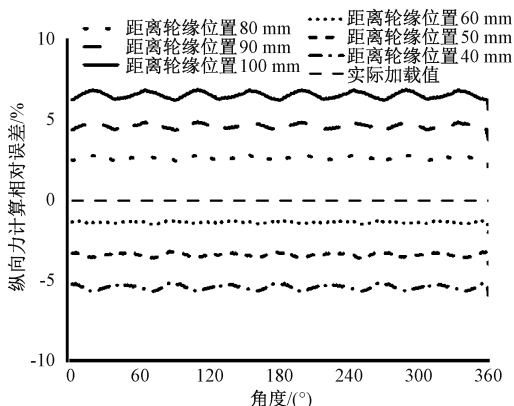


图 15 纵向力相对误差随加载角度和接触点位置变化情况

Fig. 15 Relative error of longitudinal force with loading angle and contact position

所示的绝对误差百分比图,可知纵向力相对误差百分比随着作用点位置和加载角度偏移均会有相应的波动,但整体都在 $-10\%\sim 10\%$ 以内。

4 结 论

由于实际工程应用对纵向力测量的需要,本文在传统测力轮对技术的基础上,以车轮旋转角度作为切入点,设计出针对纵向力的测量方法,并通过 SIMPACK 动力学仿真结合 LM 算法对该解耦方法进行验证,将纵向力计算平均绝对误差减少到 0.266 1 kN。并且对于纵向力测量精度的主要干扰因素,即作用点位置进行了定量分析,探明了纵向力最大绝对误差率与作用点位置偏移之间的线性关系,进一步验证了本文方法的有效性及优越性。

此方法目前受限于纵向轮轨力的加载标定,尚未进行线路实验,但现今已有机构完成了对纵向力加载试验台的研制且实验室拥有丰富的测力轮对标定试验台研制及试验经验,目前研究团队也正展开纵向轮轨力的相关试验,以求在线路实验中验证该方法的有效性。

参考文献

- [1] 刘应桃,郭世伟,付孟新,等.基于改进 Faster RCNN 的轮对踏面缺陷检测[J].电子测量技术,2023,46(12):34-41.
LIU Y T, GUO SH W, FU M X, et al. Wheelset tread defect detection based on improved Faster RCNN[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(12): 34-41.
- [2] BRACCIALI A, CAVALIERE F, MACHERELLI M. Review of instrumented wheelset technology and applications[C]. Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Italy: University of Florence, 2014.
- [3] HONDO T, TANAKA T, KUNIYUKI S, et al. Numerical and experimental investigations on cross-sensitivity characteristics of instrumented wheelset associated with longitudinal force and lateral contact position[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2022, 17(5): 051011.
- [4] HONDO T, NOGUCHI Y. Measurement method for longitudinal displacement of wheel/rail contact point using strain gauges put on wheels[J]. Mechanical Engineering Journal, 2020, 7(3): 19-00659.
- [5] 金新灿,孙守光,李强.高速车辆运行过程中轮轨接触点的测试研究[J].铁道学报,2019,41(4):41-47.
JIN X C, SUN SH G, LI Q. Research on measuring rail-wheel contact points during operation of high-speed rolling stocks[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(4): 41-47.
- [6] 唐思颖,高晓蓉,彭建平,等.车轮踏面动态感应热成像缺陷检测方法研究[J].仪器仪表学报,2022,43(3):163-170.
TANG S Y, GAO X R, PENG J P, et al. Research on dynamic induction thermography defect detection for wheel treads[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 163-170.
- [7] 赵思泽,刘泽,黄文超,等.列车车轮踏面缺陷在线磁粉检测[J].国外电子测量技术,2021,40(5):104-108.
ZHAO S Z, LIU Z, HUANG W CH, et al. Online magnetic particle inspection of defect on train wheel tread[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(5): 104-108.
- [8] 单明陶,高玮玮,杨亦乐,等.基于改进 Faster R-CNN 的刹车零件缺陷检测算法[J].国外电子测量技术,2022,41(4):22-28.
SHAN M T, GAO W W, YANG Y L, et al. Defect detection algorithm of brake parts based on improved Faster R-CNN[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(4): 22-28.
- [9] 周桂源,何成刚,文广,等.纵向力对列车车轮磨损特性的影响[J].润滑与密封,2015,40(12):7-12.
ZHOU G Y, HE CH G, WEN G, et al. Effect of longitudinal force on wear character of railway wheel[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(12): 7-12.
- [10] 常崇义,马颖明,郭刚,等.超长重载列车纵向力影响规律仿真研究[J].中国铁道科学,2021,42(1):87-94.
CHANG CH Y, MA Y M, GUO G, et al. Simulation study on the influence of longitudinal force on super long heavy haul trains[J]. China Railway Science, 2021, 42(1): 87-94.
- [11] 徐明龙,李谷,李蔚,等.重载组合列车纵向力劣化分析与运行安全研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(1):321-332.
XU M L, LI G, LI W, et al. Analysis of longitudinal force degradation and running safety of heavy-haul combined trains[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 321-332.
- [12] WU Q, SUN Y, SPIRYAGIN M, et al. Railway track longitudinal force model[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(1): 155-170.
- [13] HONDO T. Extraction method for a wheel rotation average of longitudinal creep force from strain data acquired by instrumented wheelset without the use of rotation angle sensor[J]. Transactions of the JSME(In Japanese), 2021, 87, DOI:10.1299/TRANSJSME.20-

- 00237.
- [14] URDA P, ACEITUNO J F, MUÑOZ S, et al. Artificial neural networks applied to the measurement of lateral wheel-rail contact force: A comparison with a harmonic cancellation method [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 153: 103968.
- [15] LU CH X, CHEN D L, SHI J, et al. Research on wheel-rail dynamic interaction of high-speed railway under low adhesion condition[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 157: 107935.
- [16] SHAHRI H R F, MAHDAVINEJAD R. Prediction of temperature and HAZ in thermal-based processes with Gaussian heat source by a hybrid GA-ANN model[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 99: 363-373.
- [17] 赖伊雯. 基于全相位滤波的高频轮轨力测量方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- LAI Y W. Research on high frequency wheel-rail force measurement method based on all-phase filter [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [18] 郭辉. 直辐板测力轮对在线连续测量方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- GUO H. Research on on-line continuous measurement method of straight and spoke plate force measuring wheelset [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [19] 国家铁路局. 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- National Railway Administration. Specification for evaluation and test of dynamic performance of railway vehicles: GB/T 5599-2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [20] ROPALKAR O S, YADAV O P, ZAMBARE C, et al. Improved estimation of rail-wheel contact forces from instrumented wheel-set data through higher harmonic cancellation and a back-propagation neural network scheme [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 119: 105811.
- [21] 李洲. 轮轨接触点位置对轮轨力测量的影响研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
- LI ZH. Research on the influence of wheel-rail contact point position on wheel-rail force measurement [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.

作者简介

杜佳, 硕士研究生, 主要研究方向为机车车辆故障诊断及安全监测。

E-mail: d15223780344@163.com

陈建政(通信作者), 主要研究方向为机车车辆动态检测技术及数据处理及机车车辆故障诊断及安全监测等。

E-mail: chenjzh@home.swjtu.edu.cn

吴越, 科研助理, 主要研究方向为高速列车车轮多边形。

E-mail: 249368594@qq.com

任愈, 硕士生导师, 主要研究方向为车辆运行安全检测、故障诊断与性能评估研究。

E-mail: jaderen@swjtu.edu.cn