

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.003

齿轨列车轮对-轨道耦合动力学研究

王振寰, 赵鑫

(西南交通大学 牵引动力学国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:基于显式有限元法建立齿轨列车轮对-轨道有限元分析模型, 针对齿轨列车运行具有较大影响的轨道坡度、列车运行速度、轮轨摩擦因数以及牵引系数等关键参数进行研究, 重点分析上述参数变化对齿轮齿条、轮轨间垂向接触力与牵引力的影响。结果表明: 轨道坡度重力作用对齿轨列车轮对-轨道系统啮合振动具有抑制作用, 同时坡度增加, 轮轨黏着作用逐渐减弱, 因此齿轮齿条承载增加, 轮轨承载减小; 随牵引系数增加, 齿轮承载增加, 齿条接触力随牵引转矩增长而增大, 而轮轨垂向接触力受其影响并不明显; 随着运行速度增长, 齿轮与车轮周向速度差增加, 使得齿轮齿条间啮合振动加剧, 即轮轨与齿条接触力波动范围增加。建议将齿轨列车大坡度路段运行时速度控制在 10~15 km/h。

关键词:齿轨列车; 显式有限元法; 轮轨瞬态接触; 齿轮齿条啮合

中图分类号: U234 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)05-0013-04

Research on Wheelset-Track Coupling Dynamics of Rackrail Trains

WANG Zhenhuan, ZHAO Xin

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the explicit finite element method, this paper establishes a finite element analysis model of gear rail train wheelset-track. The key parameters such as track slope, train running speed, wheel-rail friction coefficient and traction coefficient, which have great influence on the operation of gear rail train, are studied. The influence of the above parameters on the vertical contact force and traction force between gear rack and wheel-rail is analyzed. The results show that the gravity effect of the track slope has an inhibitory effect on the meshing vibration of the wheel-track system of the gear-rail train, and as the slope increases, the wheel-rail adhesion gradually weakens, so the load of the gear and rack increases and the wheel-rail load decreases. With the increase of traction coefficient, the gear load increases, the rack contact force increases with the increase of traction torque, while the wheel-rail contact force sees no obvious affection. With the increase of running speed, the circumferential velocity difference between gear and wheel increases, which aggravates the meshing vibration between gear and rack, namely, the fluctuation range of wheel-rail and rack contact force increases. Therefore, it is suggested that the running speed of gear rail train should be controlled at 10~15 km/h in large slope section.

Keywords: rackrail train; explicit finite element method; wheel-rail transient contact; gear-rack meshing

0 引言

现有铁路车辆多为轮轨黏着驱动, 大坡度路段所提供牵引力无法克服坡度阻力, 而齿轨列车通过齿轮啮合, 最大攀爬坡度可达 480‰。国内第一条齿轨线路——都四齿轨铁路于 2023 年底开始运营。

国外齿轨铁路最早可追溯至 1869 年华盛顿山齿轨铁路的正式运营。经过百余年的发展, 国内外许多学者对齿轨铁路开展相关研究, 为本文研究与工程实践提供了理论依据。HANSEN^[1]详细介绍了华盛顿山齿轨铁路的建造过程和车辆结构。冯帅^[2]对比不同轨道类型的优缺点, 分析齿

轨铁路在旅游观光铁路上的适用性。鄢红英等^[3]结合山地旅游轨道交通工程特点, 针对齿轨旅游轨道交通工程化方向提出建议。张乾等^[4]建立齿轨(钢轨)-轨枕-桥梁-墩台空间耦合计算模型, 在不同轮轨载荷分配下探究了齿轨轨缝布置对轨道与桥梁间相互作用的影响。张军等^[5]考虑材料弹塑性, 利用静态有限元法对采煤齿轨车齿条静态接触力、接触应力进行分析。NAGY 等^[6]依据布达佩斯齿轨铁路车辆、轨道结构特点, 对比分析了普通轮轨黏着列车与齿轨列车转向架系统运行过程中轮对受力的区别, 依此探究齿轨列车可能造成脱轨的因素。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52027807); 四川省国际科技创新合作项目(2021YFH0006); 牵引动力国家重点实验室自主课题资助项目(2022TPL_T06)

第一作者简介: 王振寰(1998—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向为齿轨列车齿轮传动, 2690258876@qq.com。

由上可见,现有研究鲜有关关注齿轮与车轮耦合作用下动力学表现。因此,本文基于显式有限元法建立齿轨轮对-轨道瞬态接触模型,于时域内模拟齿轮齿条啮合和轮轨滚动接触间耦合动力作用,分析不同工况下齿轮齿条、轮轨间垂向接触力与牵引力时域变化。旨在为齿轨列车齿轮齿条啮合与轮轨滚动接触间耦合作用机理提供一种精确预测工具。

1 齿轨轮对-轨道瞬态接触模型

以 Strub 型齿轨铁路为对象,考虑到系统对称性,在 ANSYS/Ls-dyna 中建立包含半个轮对和半个直线轨道的有限元模型。鉴于国内齿轨铁路并未正式运行,轮对和轨道结构借鉴了现有地铁和山地(齿轨)轨道交通技术规范,车轮半径取 840 mm,运行在轨距 1 000 mm 的无砟轨道,钢轨选用 CN60,详细结构参数如表 1 所示。需指出,本文所考虑的系统参数带有一定的随意性,并不能代表未来实际的齿轨铁路,但不影响本文机理研究。

表 1 模型参数

部件	参数	数值
一系悬挂	刚度/(MN/m)	0.88
	阻尼/(kN·s/m)	4
扣件	刚度/(MN/m)	22
	阻尼/(kN·s/m)	60
齿轨紧固件	刚度/(MN/m)	22
	阻尼/(kN·s/m)	65
车轮、钢轨材料	轮对总质量/kg	1 340
	弹性模量/GPa	250.9
	泊松比	0.3
	密度/(kg/m ³)	7 790
轨道板材料	弹性模量/GPa	34.5
	泊松比	0.25
	密度/(kg/m ³)	2 400
砂浆层	弹性模量/GPa	8
	泊松比	0.2
	密度/(kg/m ³)	1 600
齿轮、齿条	模数/mm	100/π
	齿数	22
	压力角	actan(1/4)
	变位系数	0.305

模型忽略轮对横移,轮对(包括齿轮)、齿条、钢轨和道床等实体均采用八节点实体单元离散,车辆一系悬挂、轨道扣件和齿条紧固件由分布的弹簧阻尼单元表征,车辆簧上质量由质量单元模拟。为保证接触计算精度,齿面及轮轨接触表面分别采用表面尺寸 0.95 mm×1.00 mm 和 1.00 mm×1.00 mm 的细化网格,非接触区域网格尽可能稀疏。最终模型总节点和单元数分别为 211.3 万和 192.3 万。模型中定义了整体笛卡儿坐标系 O_{xyz} ,原点位于轮轨接触斑中心的初始位置, xOz 平面与水平面重合, x 、 y 和 z 轴分别为轴向、垂向和纵向。

采用隐、显式积分结合的时间积分方法^[7],于时域内模拟齿轮齿条间瞬态啮合接触及轮轨间瞬态滚动接触,积分步长由最小单元尺寸决定,值为 6.65×10^{-8} s。对模型施加重力载荷,并于齿轮中心施加时变牵引转矩,0 时刻对轮对施加初始平移速度和角速度,如图 1 所示。边界条件设置如下:钢轨、齿条、轨道板纵向两端及车轴对称面对称约束,模拟轨道无限长特征,轨道板底面全约束,一系悬挂两端节点横、纵向耦合,确保重力有效施加。

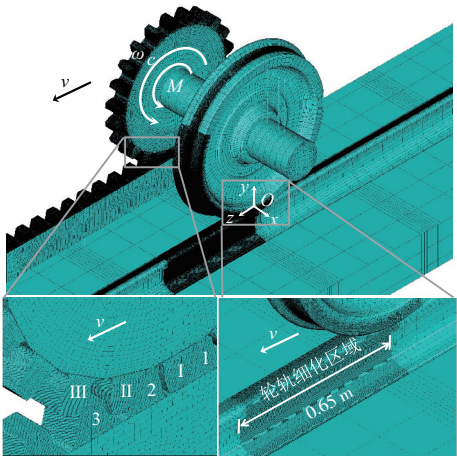


图 1 齿轨轮对-轨道瞬态接触模型

2 模型合理性验证

图 2 所示为齿轨列车在 0 坡度纯轮轨黏着驱动路段以最大平地运行速度 120 km/h 时轮轨三向接触力随时的变化。可见,由于模型在隐式积分计算时施加牵引转矩,因此在瞬态计算初期轮轨接触力能够在较小的时间步长内达到稳态波动。轮轨垂向接触力稳定在 65 kN 附近波动,与所施加重力总载荷 65.5 kN 近似相等;同时因纵向接触力主要受牵引转矩变化影响,本文牵引转

矩由 0 增加至 8.3 kNm,纵向接触力对应由初始时刻至 5 ms 时刻逐渐从 0 增加至 20 kN 附近波动;由于模型将轮对两端横向约束已忽略轮对横向位移影响,因此横向接触力结果近似为 0。以上接触力结果均符合普通轮轨黏着铁路轮轨瞬态接触解,验证本文模型结果合理。

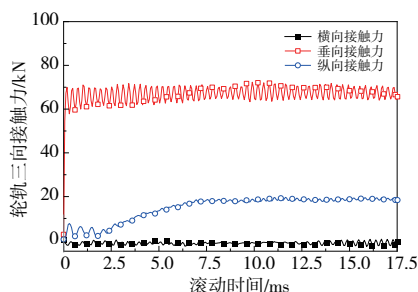


图2 0坡度、120 km/h下轮轨三向接触力

3 齿轨列车动力学响应

针对轨道坡度、运行速度、轮轨摩擦因数以及牵引系数等关键参数进行研究,预测上述参数变化对齿轮齿条、轮轨间垂向接触力与牵引力的影响。需指出,考虑到山地线路轨面污染可能性大,非零轮轨摩擦因数 μ_{wr} 取低值0.2。

3.1 轨道坡度影响

选取0、240‰、480‰这3种坡度,在速度10 km/h、牵引系数 μ (牵引力与列车总质量的比值)0.3的加速上坡工况下分析坡度变化对齿条、轮轨间接触力的影响。

图3展示了齿条、轮轨垂向接触力特征值变化,图中柱子高度表示接触力均值,误差线上、下横线表示最大、最小值。若不作特殊说明,本文均采用图1中3号齿啮合周期内的齿轮齿条、轮轨间动态接触结果进行分析。

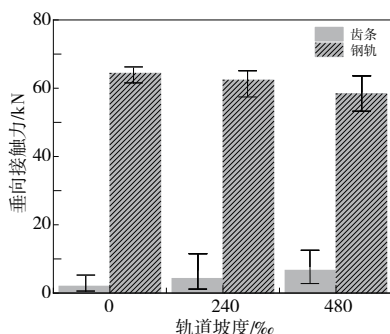


图3 变坡度垂向接触力对比

在0、240‰、480‰这3种轨道坡度下齿条垂

向接触力最大值分别为5.14 kN、11.34 kN、12.67 kN,占净质量的7.73%、17.05%、19.05%;钢轨垂向接触力最大值分别为66.03 kN、65.20 kN、63.49 kN,占净质量的99.29%、98.40%、95.48%。相应3种坡度条件下齿条波动范围分别为5.18 kN、8.48 kN、9.64 kN。钢轨波动范围分别为4.48 kN、6.64 kN和11.04 kN。总之,随着坡度增加,齿条垂向接触力最大值增加,钢轨垂向接触力最大值相应减小,但两者波动范围均增大。轨道坡度变化对齿条、轮轨牵引力的影响如图4所示。在0、240‰、480‰这3种轨道坡度下齿条牵引力(纵向接触力)最大值分别为14.36 kN、15.11 kN、16.70 kN,钢轨牵引力最大值分别为13.20 kN、12.78 kN、11.27 kN。这是由于重力作用在钢轨接触面的法向分量随轨道坡度增长而减小,轮轨黏着所提供牵引力随之减小,因此齿条承载牵引转矩增加。同时值得注意的是各工况下齿条与轮轨垂向接触力均值之和在重力载荷65.5 kN附近波动,侧面证明了模型结果的合理性。

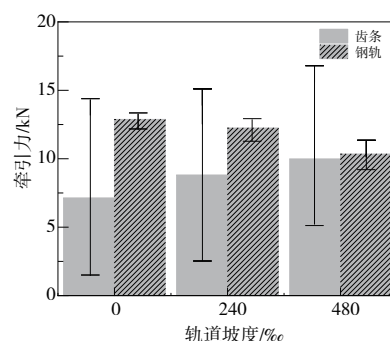


图4 变坡度牵引力对比

3.2 牵引系数影响

选取0.25、0.30、0.40、0.50这4个牵引系数,在速度10 km/h、240‰坡度的加速上坡工况下分析牵引系数变化对齿条、轮轨间接触力的影响。

如图5所示,垂向接触力在不同牵引系数下特征值变化随牵引系数增加,齿条承受重力载荷增加,主要表现为垂向接触力最大值增加。在牵引系数 μ 分别为0.25、0.30、0.40、0.50条件下,齿条垂向接触力最大值分别为7.55 kN、11.33 kN、14.50 kN、17.46 kN。 $\mu=0.50$ 工况下垂向接触力最大值为 $\mu=0.25$ 工况的2.31倍。同时齿条垂向接触力波动值也相应增加,在4种牵引条件下,齿条垂向接触力波动值分别为7.55 kN、10.37 kN、11.36 kN、12.47 kN。而轮轨垂向接触力随牵引系数增加而减小,其峰值分别为66.65 kN、65.20

kN、64.19 kN、63.64 kN。牵引力矩增加,对齿轮齿条进出齿啮合影响更加明显,轮轨垂向力波动范围随之增长。在 4 种牵引条件下,轮轨垂向力波动值分别为 6.40 kN、7.64 kN、8.95 kN、11.95 kN。

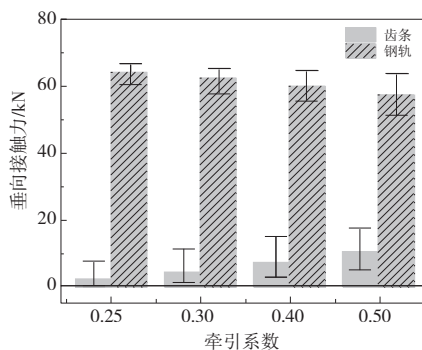


图5 变牵引系数垂向接触力对比

图6所示为不同牵引系数下,齿条、轮轨牵引力特征值变化。可知,牵引力变化趋势与垂向接触力变化趋势基本相同。齿条牵引力随牵引系数增加,其最大值分别为 19.58 kN、16.70 kN、24.03 kN、30.09 kN。值得注意的是,轮轨牵引力随牵引系数增加波动值范围明显增大,但由于齿轮与车轮因轮径不同,同轴的两轮周向速度存在差值,使得轮轨滚动接触间具有明显的蠕滑,轮轨牵引力最大值为垂向接触力与轮轨摩擦因数的乘积,因此其最大值变化较齿条牵引力幅值变化并不明显。轮轨牵引力峰值在 4 种牵引系数工况下分别为 13.07 kN、12.77 kN、12.57 kN、12.48 kN, $\mu=0.25$ 与 $\mu=0.50$ 条件下轮轨牵引力峰值仅相差 0.59 kN。

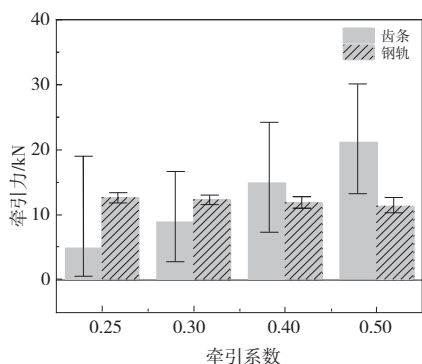


图6 变牵引系数牵引力对比

3.3 运行速度影响

选取 15 km/h、20 km/h、25 km/h、30 km/h 这 4 种运行速度,在牵引系数 0.30、坡度 240‰ 的加速上坡工况下分析运行速度变化对齿条、轮轨间接触力的影响。

图7所示为齿条 3 号齿啮合周期内在不同运行速度下齿条与轮轨垂向接触力变化情况。对比不同运行速度下垂向接触力可见,随运行速度增长,齿轮与车轮因轮径不同,导致的两轮周向速度差值增加,使得系统啮合振动加剧,即轮轨与齿条垂向接触力波动范围增加。 $v=30$ km/h 条件下,甚至存在齿条垂向接触力为 0 时刻,即存在齿轮齿条脱离啮合时刻,该速度下齿条、轮轨垂向接触力波动值分别为 24.80 kN、21.90 kN,占总重力载荷 G 的 37.78% 和 33.40%。 $v=15$ km/h、20 km/h、25 km/h、30 km/h 条件下轮轨垂向接触力波动值分别为 13.5 kN、13.7 kN、22.4 kN、23.3 kN。齿条垂向接触力波动值分别为 9.6 kN、11.8 kN、15.4 kN、24.8 kN。

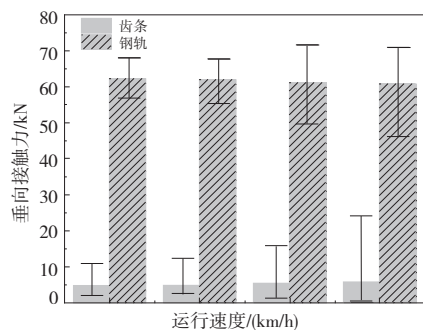


图7 变运行速度垂向接触力对比

图8所示为齿条 3 号齿啮合周期内在不同运行速度下齿条与轮轨牵引力变化情况。可见,牵引力变化趋势与垂向接触力变化基本相同,齿条牵引力波动范围随速度增加而增大。在 4 种速度下齿条牵引力波动值分别为 16.60 kN、19.90 kN、26.48 kN、42.49 kN,而轮轨牵引力变化并不显著。

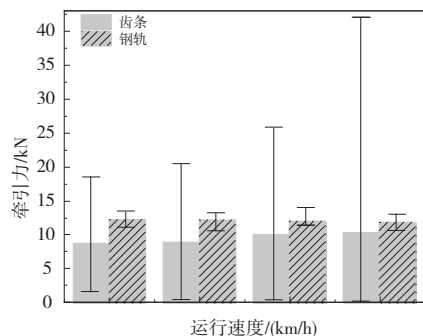


图8 变运行速度牵引力对比

综上所述,随速度增加,齿条接触力波动值成倍数增长,建议将齿轨列车大坡度路段运行时速度控制在 10~15 km/h。

(下转第 32 页)

- 检验:物理分册,2017,53(3):204-207.
- [7] GRIZA S, DA SILVA M E G, DOS SANTOS S V, et al. The effect of bolt length in the fatigue strength of M24×3 bolt studs[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 34: 397-406.
- [8] LIU Y Z, CHEN J, ZHANG X, et al. Fatigue behaviour of blind bolts under tensile cyclic loads[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 16-27.
- [9] BENHADDOU T, CHIROL C, DAIDIE A, et al. Pre-tensioning effect on fatigue life of bolted shear joints[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 36: 36-43.
- [10] BERTO F, MUTIGNANI F, GUIDO E. Effect of hot dip galvanization on the fatigue behaviour of steel bolted connections[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 93: 168-172.
- [11] YU Q M, ZHOU H L, YU X D, et al. High-temperature low cycle fatigue life prediction and experimental research of pre-tightened bolts[J]. Metals, 2018, 8(10): 828.
- [12] LI L, WANG R. Failure analysis on fracture of worm gear connecting bolts[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 36: 439-446.
- [13] KECECIOGLU D, ZHANG Y C. Reliability prediction and optimum design of bolts under static and fatigue loads[C]//39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. Long Beach, CA, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1998: 2895-2995.
- [14] 杨可桢,程光蕴,李仲生. 机械设计基础[M]. 5版. 北京:高等教育出版社,2006.
- [15] 许巍,陈新,李旭东,等. 发动机材料高周疲劳 P-S-N 曲线优化处理方法[J]. 航空材料学报, 2020, 40(5): 96-103.
- [16] 鲁连涛,李伟,张继旺,等. GCr15 钢旋转弯曲超长寿命疲劳性能分析[J]. 金属学报, 2009, 45(1): 73-78.
- [17] WANG Q Y, BATHIAS C, KAWAGOISHI N, et al. Effect of inclusion on subsurface crack initiation and gigacycle fatigue strength[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(12): 1269-1274.
- [18] ZHANG J W, LU L T, WU P B, et al. Inclusion size evaluation and fatigue strength analysis of 35CrMo alloy railway axle steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 562: 211-217.

收稿日期:2023-02-15

(上接第 16 页)

4 结语

本文以 Strub 型齿轨铁路为对象,在 ANSYS/Ls-dyna 中建立齿轨列车轮对-轨道瞬态接触模型,并利用此模型研究在车辆轨道坡度 0~480‰、运行速度 10~30 km/h 以及牵引系数 0.25~0.50 下齿轨列车轮对接触力的变化。结果表明:

1) 0 坡度下轮轨黏着驱动工况结果与理论经验相符,且各工况下垂向接触力均值在施加的重力和附近波动,证明结果合理;

2) 轨道坡度重力作用对齿轨列车轮对-轨道系统啮合振动具有抑制作用,同时坡度增加,轮轨黏着作用逐渐减弱,因此齿轮齿条承载增加,轮轨承载减小;

3) 随牵引系数增加,齿轮承载增加,齿条接触力随牵引转矩增长而增大,而轮轨垂向接触力受其影响并不明显;

4) 随运行速度增长,齿轮与车轮周向速度差增加,使得齿轮齿条间啮合振动加剧,即轮轨与齿条接触力波动范围增加,建议齿轨列车大坡度路段运行时速度控制在 10~15 km/h。

参考文献:

- [1] HANSEN B. Gearing up: the mount Washington cog railway[J]. Civil Engineering Magazine, 2009, 79(4): 36-39.
- [2] 冯帅. 对齿轨铁路在旅游观光铁路上的适用性分析[J]. 交通企业管理, 2015, 30(1): 66-68.
- [3] 鄢红英,徐银光,李艳. 齿轨在山地旅游轨道交通中的应用及工程化发展方向[J]. 工程建设与设计, 2018(21): 136-138.
- [4] 张乾,蔡小培,蔡向辉,等. 齿轨铁路轨道-简支梁桥相互作用及轨缝合理位置研究[J]. 工程力学, 2021, 38(3): 248-256.
- [5] 张军,陆仲绩,汪崇建. 采煤机牵引行走机构的接触应力分析[J]. 煤矿机电, 2006(2): 39-40, 43.
- [6] NAGY A, LAKATOS I. Examining the movement differences in the behavior of normal and rack railway vehicle[J]. International Journal of Engineering and Management Sciences, 2019, 4(1): 96-103.
- [7] 黄双超,赵鑫,张笃超,等. 高阶多边形车轮的瞬态磨损行为分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(2): 648-658.

收稿日期:2023-03-17