

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.049

# C70型重载货车不同装载条件下的车辆运行性能分析

翟守才,程文明,饶雄

(西南交通大学 机械工程学院,四川 成都 610031)

**摘要:**为研究货车在不同货物装载条件下的动力学特性,基于多体动力学仿真方法,以C70型车辆为研究对象,分别在70 t、60 t、50 t、40 t和30 t 5种载质量条件下,对车辆非线性临界速度、直线运行平稳性及加速度曲线通过时的轮轴横向力、脱轨系数、轮质量减载率及磨损指数等动力学指标进行对比分析。研究表明:50 t载质量工况为非临界速度的拐点;载质量工况与运行平稳性及运行品质之间未呈现显著相关性;总体趋势上,对于所有小曲线半径,随着载质量的增加,车辆的轮轴横向力增加,脱轨系数减小,磨损指数增大。对于重载货车实际装载运行,需要着重注意载质量的增加对小曲线半径的安全性影响。

**关键词:**重载货车;装载条件;非线性临界速度;运行平稳性;运行稳定性

**中图分类号:**U469.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)06-0269-05

## Analysis of Vehicle Performance of C70 Type Heavy Haul Freight Wagons under Different Loading Conditions

ZHAI Shoucai, CHENG Wenming, RAO Xiong

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to study the dynamic characteristics of freight cars under different cargo loading conditions, by a multi-body dynamics simulation method, and with the C70 type vehicle as the research object, dynamic indicators such as nonlinear critical speed, straight-line running stability and acceleration, wheel-axle lateral force during curve passing, derailment coefficient, wheel load reduction rate, and wear index are compared and analyzed under the respective loading conditions of 70 t, 60 t, 50 t, 40 t, and 30 t. The results show that the 50 t loading condition represents the turning point of the nonlinear critical speed. There is no significant correlation between loading conditions and running stability or quality. In general, for all small curve radii, as the load increases, the wheel-axle lateral force increases, the derailment coefficient decreases, and the wear index increases. When operating heavy freight cars, special attention should be paid to the impact of increased loading on the safety of small curve radii.

**Keywords:** heavy haul freight wagons; loading conditions; nonlinear critical speed; running quality; running stability

### 0 引言

随着重载货运的快速发展,对列车的动力学性能提出了更高的要求。重载车辆在轨道上运行时,由于货物的质量和装载方式不同,车辆的动力学行为和性能表现存在较大差异,而列车的动力学性能又直接影响车辆的运行平稳性和稳定性。随着重载铁路提速及大轴重的发展,如何在保证运输效率的同时,确保列车平稳性、稳定性及安全性已成为铁路车辆动力学研究的核心问题<sup>[1-3]</sup>。

C70型车辆作为中国铁路重载运输的重要车型,其动力学性能在不同装载条件下的表现尚未得到充分的探讨,特别是对轨道磨损和运行安全

性的影响。目前,尽管已有大量关于铁路车辆动力学的研究成果,但研究多集中在某一特定装载状态下的车辆动力学分析,对多种货物装载条件下进行综合分析的研究较少,缺乏对多种装载条件下车辆动力学响应的综合性研究<sup>[4-14]</sup>。特别是针对不同装载条件对车辆稳定性、平稳性及轨道磨损等方面的影响尚未得到全面的探索。传统的动力学分析方法通常假设货物均匀分布,忽略了实际运输中货物装载的不均匀性和动态特性。这种简化假设导致模型与实际情况存在偏差,影响了对车辆性能的准确评估。随着运输需求的多样化,如何在保证重载货车平稳、稳定运行的同时,降低对轨道系统的磨损及运营风险,成为一个亟

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(12372049)

**第一作者简介:**翟守才(1980—),男,河南濮阳人,工程师,博士研究生,研究方向为机械设计及理论, zhaishoucai@foxmail.com。

待解决的科研难题。

基于此,本文通过多体动力学仿真方法,对 C70 型车辆在不同货物载质量条件下的动力学特性进行了系统分析。研究的内容包括车辆在 70 t、60 t、50 t、40 t 和 30 t 载质量条件下的非线性临界速度、直线运行平稳性和加速度、曲线安全性动力学指标。通过对各工况下车辆的直线平稳性和曲线通过性进行分析,揭示不同载质量工况对车辆动力学性能的影响规律,为车辆的实际运行提供理论支撑和数据参考。

## 1 动力学模型

### 1.1 车辆基本结构

C70 车辆的转向架为传统的三大件式转向架,构架由两个独立的侧架和一个摇枕组成,但无交叉拉杆结构。在承载鞍和侧架之间设置橡胶垫以实现轮对的弹性定位,主悬挂系统位于摇枕和侧架之间,由螺旋弹簧和斜楔式摩擦减振器组成。中央悬挂弹簧采用空重车两级刚度特性,车体和转向架之间采用双作用常接触旁承。车辆的设计运行时速为 60 km/h。采用多体动力学仿真软件 Simpack 进行车辆动力学建模,动力学模型如图 1 所示,车辆主要参数如表 1 所示。



图 1 C70 货车车辆动力学模型

表 1 车辆主要参数

参数	数值
轮对内侧距/m	1.353
车轮滚动圆横向跨距之半/m	0.746 5
轨距/m	1.435
踏面外形	LM
钢轨外形/(kg/m)	60
转向架轴距/m	1.83
车辆定距/m	8.7
最高运行速度/(km/h)	60
通过最小曲线半径/m	145
轮对质量/kg	1 182
侧架质量/kg	478

(续表 1)

参数	数值
车体质量(载质量 30 t)/kg	43 354
车体质量(载质量 40 t)/kg	52 159
车体质量(载质量 50 t)/kg	63 149
车体质量(载质量 60 t)/kg	76 325
车体质量(载质量 70 t)/kg	83 563
车体质心距轨面高(载质量 30 t)/m	1.865
车体质心距轨面高(载质量 40 t)/m	1.923
车体质心距轨面高(载质量 50 t)/m	1.964
车体质心距轨面高(载质量 60 t)/m	1.989
车体质心距轨面高(载质量 70 t)/m	2.123

### 1.2 动力学评价指标

动力学方程车辆系统的动力学方程如式(1)所示:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(\ddot{x}, \dot{x}, t) \quad (1)$$

式中: $M$ 、 $C$ 、 $K$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $x$ 为矢量坐标数值; $F$ 为非线性力元,包括非线性悬挂力和轮轨力; $t$ 为时间。模型中的蠕滑力采用 Kalker 非线性蠕滑理论计算, Hertz 接触算法、FASTSIM 算法分别用于计算轮轨法向力和切向力,轮轨间摩擦因数在干燥环境下一般为 0.3~0.5,本模型取 0.35。

依据 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评估及测试规范》(以下简称 GB/T 5599—2019)<sup>[15]</sup>,评价指标如表 2 所示。

表 2 评价指标

类别	数据指标
车辆运行安全性	脱轨系数
	轮质量减载率
	轮轨横向力
车辆运行平稳性	磨损指数
	车体加速度
	Sperling 平稳性指标

## 2 不同装载下对车辆的运行影响

利用 Simpack,对 C70 型重载货车在不同货物装载状态下的直线平稳性和曲线通过性进行分析。依据 GB/T 5599—2019 对各种装载状态下车

辆的动力学特性进行评价。下文中各动力学指标: $A_x$  为横向加速度; $A_z$  为垂向加速度; $Q/P$  为脱轨系数; $H$  为轮轴横向力; $\Delta P/P$  为轮质量减载率。本文的线路激励均为美国四级谱。

### 2.1 临界速度

非线性临界速度是车辆设计中的一个关键参考指标,其数值应当超过车辆的设计运行速度。采用降速法进行,遵循 Stichel 的非线性临界速度流程。具体过程为:车辆以  $3.6 \text{ m/s}^2$  的速度递减,经过一段设有特定激励的轨道段后,再行驶到平滑无扰动的轨道上。在此过程中,观察轮对横向位移的变化。当该位移值稳定且不再变化时,此时车辆的速度即被认定为非线性临界速度。关于非线性临界速度的具体判定请参考文献<sup>[16-18]</sup>。

由图 2 可知,在不同载质量工况下,70 t 载质量工况下非线性临界速度最小,50 t 载质量工况为临界速度的拐点。从 30 t 载质量逐渐增大到 50 t 载质量时,临界速度逐渐增大,从 50 t 载质量工况逐渐增大为 70 t 载质量时,非线性临界速度逐渐减小。对于所有载质量工况均满足 60 km/h 的运营时速。

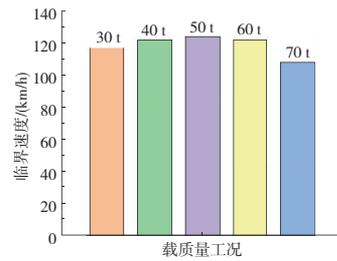


图 2 不同载质量工况下的临界速度

### 2.2 直线运行平稳性

考虑设计时速和运行情况,计算了车辆在 30~60 km/h 速度范围内直线行驶的运行平稳性指数和运行品质。分析不同速度变化下的变化趋势,结果取最大值。

由图 3 可知,不同载质量工况下的直线运行平稳性均小于 3.5,达到优级标准,垂向加速度均小于  $5 \text{ m/s}^2$ ,横向加速度均小于  $3 \text{ m/s}^2$ ,均满足 GB/T5599—2019 的标准。随着速度增加,不同载质量工况下的平稳性和运行品质均呈现增长趋势;载质量工况与运行平稳性及运行品质之间未呈现显著相关性。

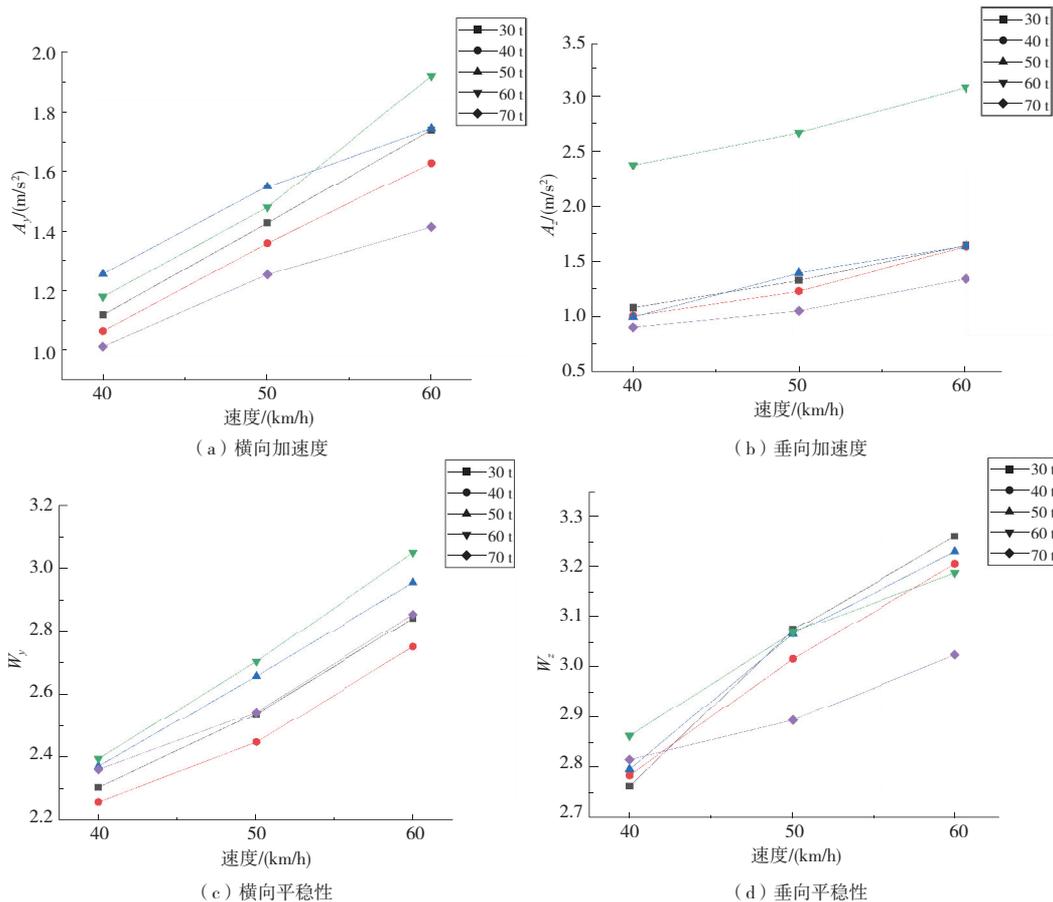


图 3 不同载质量工况下平稳性及运行品质

### 2.3 曲线通过稳定性

根据 TB10625—2017《重载铁路设计规范》和实际运行线路,选取 4 种典型小半径曲线,曲线参数如表 3 所示。曲线工况下稳定性指标如图 4 所示。

表 3 曲线参数设置

工况	曲线半径 $R/m$	超高 $h/mm$	缓和曲线长度 $m$	运行速度 / (km/h)
1	300	90	110	60
2	400	60	110	60
3	600	40	110	60
4	800	30	110	60

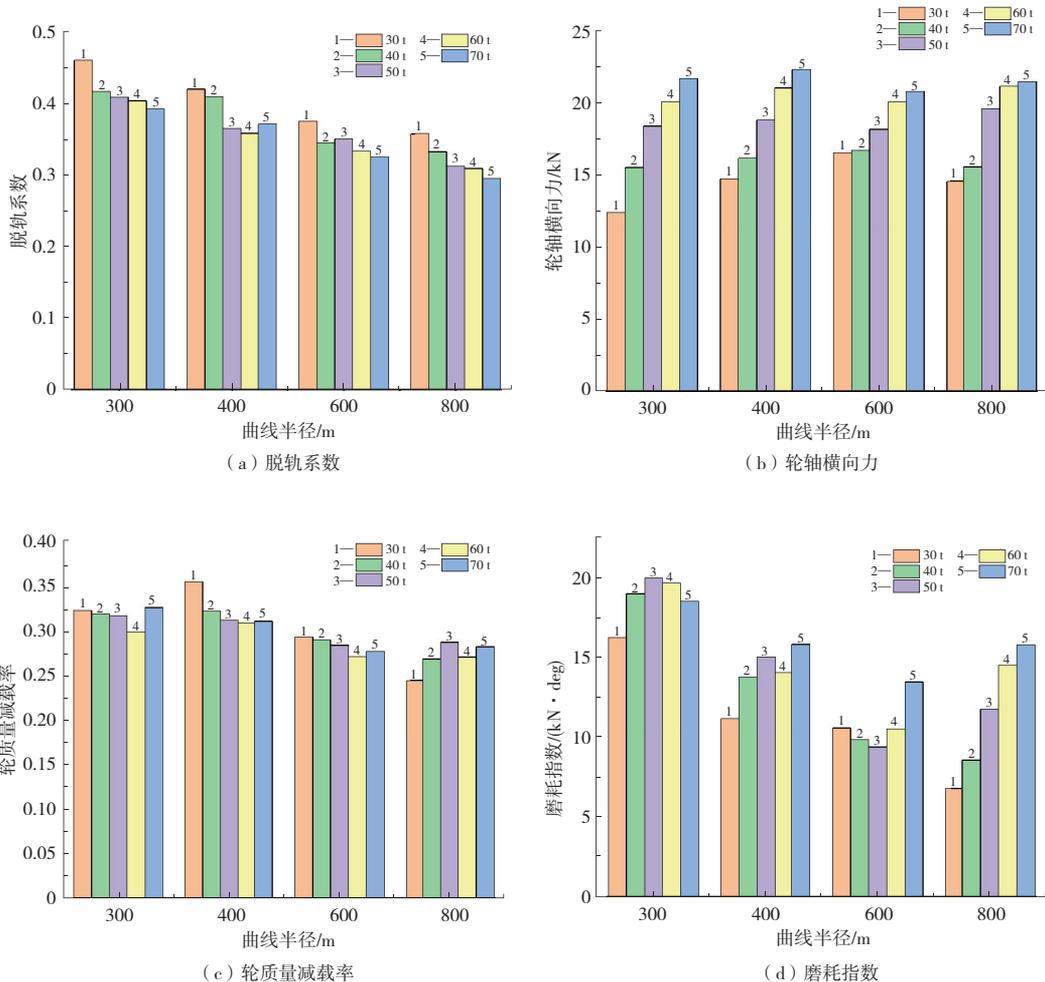


图 4 曲线工况下稳定性指标

由图 4 可知,对于所有小半径曲线,不同载质量工况的安全性指标均满足 GB/T5599—2019 标准;总体趋势上,对于所有小曲线半径,随着载质量的增加,车辆的轮轴横向力增加,脱轨系数减小,磨耗指数增大。

### 3 结语

通过对不同载质量工况下的直线运行平稳性和曲线通过稳定性分析,可以得到如下结论。

1) 50 t 载质量工况为临界速度的拐点(30 t 载质量逐渐增大到 50 t 时临界速度递增,50 t 载质量逐渐增大到 70 t 时临界速度递减)。对于所

有载质量工况均满足 60 km/h 的运营时速。

2) 不同载质量工况下的直线运行平稳性均满足 GB/T5599—2019 的标准;随着速度增加,不同载质量工况下的平稳性和运行品质均呈现增长趋势;载质量工况与运行平稳性及运行品质之间未呈现显著相关性。

3) 对于所有小半径曲线,不同载质量工况的安全性指标均满足 GB/T5599—2019 标准;总体趋势上,对于所有小曲线半径,随着载质量的增加,车辆的轮轴横向力增加,脱轨系数减小,磨耗指数增大。

4) 对于大质量载货车实际装载运行时,直线

段的运行平稳性和运行品质可以暂不考虑,需要着重注意载质量的增加对小曲线半径的安全性影响。建议实际运营中,通过小半径曲线时,需要注意装载的上限,以免超过标准,从而威胁车辆的安全性。后续可结合货物分布非均匀性及动态载荷条件,进一步探究复杂工况下的车辆动力学响应。

### 参考文献:

- [1] 翟婉明,涂贵军,高建敏. 地铁线路钢轨焊接区轮轨动力学问题[J]. 振动·测试与诊断,2012,32(5):701-708,858.
- [2] 翟婉明,赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报,2016,51(2):209-226.
- [3] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 2版. 北京:中国铁道出版社,2001.
- [4] ZBOINSKI K, GOLOFIT-STAWINSKA M. Determination and comparative analysis of critical velocity for five objects of railway vehicle class[J]. Sustainability,2022,14(11):6649.
- [5] 赵苍鹏,代亮成,池茂儒,等. 面向低锥度晃车的高速列车车向纵向减振器参数优化设计[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(10):3956-3968.
- [6] 徐小毛,池茂儒,金学松,等. 基于 SIMPACK 研究电机横向减振器与列车动力学性能关系[J]. 液压气动与密封,2021,41(11):15-18.
- [7] 王云鹏,李东,龚晓波,等. 既有货车服役状态调查分析与动力学性能预测[J]. 铁道机车车辆,2025,45(2):126-133.
- [8] 刘振明. 货车转向架相对摩擦系数分析及设计建议[J]. 铁道机车车辆,2023,43(1):122-127.
- [9] 刘鹏飞,刘红军,高昊,等. 铁路重载货车轮对弹性振动及其动态影响[J]. 西南交通大学学报,2022,57(1):91-99,234.
- [10] 杨春雷,王开云,黄运华,等. 重载货车通过曲线轨道时的悬挂特性分析[J]. 铁道学报,2022,44(6):18-29.
- [11] 杨春雷,黄运华,丁军君. 重载轨道曲线几何参数对轮轨耦合动力特性的影响[J]. 交通运输工程学报,2021,21(3):215-227.
- [12] 杨春雷,黄运华,丁军君. 曲线几何参数对不同类型货车转向架轮轨动力作用的影响分析[J]. 振动工程学报,2023,36(1):159-169.
- [13] 杨春雷,黄运华,李芾. 我国重载货车转向架曲线性能对比仿真[J]. 西南交通大学学报,2019,54(3):619-625.
- [14] PANDEY M. Effect of carbody flexibility on the dynamic performance of an empty freight wagon[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,2022,236(5):490-500.
- [15] GB/T 5599—2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].
- [16] TRUE H. Multiple attractors and critical parameters and how to find them numerically: the right, the wrong and the gambling way[J]. Vehicle System Dynamics,2013,51(3):443-459.
- [17] IWICKI S, SPIRYAGIN M, COLE C, et al. Handbook of railway vehicle dynamics[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press,2020.
- [18] ZBOINSKI K, GOLOFIT - STAWINSKA M. Determination and comparative analysis of critical velocity for five objects of railway vehicle class[J]. Sustainability,2022,14(11):6649.

收稿日期:2025-02-05