

文章编号:1001-4888(2016)04-0458-09

铁路货车纵向载荷的试验测量和统计推断研究^{*}

路梓照, 王曦, 李广全

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要:通过线路测试得到我国通用线路 C70 货车车钩纵向载荷时间历程,利用雨流计数法得到车钩纵向载荷均值—频次谱。分别对我国通用线路 C70 货车车钩纵向载荷谱、大秦线 C80B 货车车钩纵向载荷谱、AAR90.7t 漏斗车车钩纵向载荷谱及 FMG 矿石车车钩纵向载荷谱的分布特征进行分析,并对最大纵向载荷进行统计推断研究。研究结果表明:铁路货车最大纵向载荷随着轴重、牵引吨位的增大而增大。经纵向动力学仿真分析发现,单车轴重、牵引吨位、编组方式的不同是导致上述变化的原因。

关键词:铁路货车;纵向载荷;统计推断;纵向动力学

中图分类号: U272; U270.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-214

0 引言

重载铁路运输是我国铁路发展的两大方向之一。随着铁路货车牵引重量的大幅提升,车辆间的纵向冲击力不断加大,造成车钩疲劳裂损问题越来越突出。同时重载运输的复杂工况使得车钩受力状况变得更加恶劣^[1,2]。车钩纵向力是作用在车体上的重要载荷之一,过大的列车纵向力对运行安全性和经济性有不利的影响。因此铁路货车纵向载荷的研究对列车车辆的合理设计、安全操作等都具有重要的指导意义。

目前国内外对于铁路货车纵向载荷的研究主要包括两种:一种是试验研究,主要通过实际线路试验获得列车纵向载荷的分布和统计规律,此方法周期较长,耗资较大;另一种是列车纵向动力学仿真研究,主要仿真不同列车编组和线路条件下最大车钩力发生位置及数值,但由于模型过于简化,仿真分析难以与实际的复杂工况完全一致。为确保铁路货车的运行安全,国内外开展了大量的铁路货车线路载荷谱试验工作。美国通过线路试验对重载货车车体纵向、浮沉、扭转和侧滚载荷谱进行了研究,并编入 Association of American Railroads(AAR)机务标准手册,形成货车设计制造规范,为列车的设计和疲劳评价提供了重要的依据^[3]。对于我国的铁路货车,上海铁道学院测试了 13 号车钩线路随机纵向载荷,测试车辆牵引吨位在 2000t~4000t 之间,并编制了车钩拉伸及压缩程序载荷谱^[4]。北京交通大学先后进行了 5000t 编组的 C70 型敞车的线路测试及 20000t 编组的 C80B 型敞车线路测试,并利用测得的载荷谱对车体疲劳寿命进行评估^[5]。徐倩^[6]等根据 10000t 及 20000t 编组重载列车纵向冲动分布试验,分析重载列车在不同线路工况、不同机车操纵方式以及不同车钩间隙下车钩力大小和分布变化规律,研究改善重载列车运行和受力状况的途径。

铁路货车车钩载荷的研究已经取得了一定成果,对货车疲劳设计和强度评价具有指导意义,但是不同类型货车车钩纵向载荷特性仍需进一步研究。本文依托“铁路货车 C70 型敞车通用线路载荷谱的试验及应用研究”项目进行了车钩纵向载荷线路实测试验。选用威布尔分布对货车线路实测纵向载荷数

^{*} 收稿日期:2015-11-09;修回日期:2016-01-24

通讯作者:王曦(1976—),男,博士,教授。研究方向:结构可靠性。Email: wangxi@bjtu.edu.cn

据进行拟合,利用相关系数估计法得到威布尔分布的 3 个参数,并利用统计推断得到最大纵向载荷。结合前期不同类型重载货车线路测试试验数据,从统计推断的角度出发,分析了货车在运行工况下车钩纵向载荷的分布特征,得到不同轴重、牵引吨位下最大车钩载荷的变化规律。最后,基于列车纵向动力学仿真方法研究单车轴重、牵引吨位、编组方式对纵向载荷的影响,分析纵向载荷统计推断规律的原因。

1 纵向载荷测试试验

1.1 试验方案

试验车组由一辆 C70E 型通用敞车和一辆搭载测试设备的 NX70 型通用平车组成,该试验车组被随机编组于 5000t 货运列车中。试验线路综合考虑线路条件、环境因素、线路等级等因素,选择北京—广州、北京—成都和北京—哈尔滨三条典型线路进行试验。三条线路覆盖区域广,包括典型线路形式和各类型隧道、道岔等,线路测试数据有足够代表性。车钩纵向载荷时间历程测试在通用线路 5000t 编组列车正常运行条件下进行,采用两个测力车钩实时测试列车纵向载荷信号数据,试验全程采用无人值守同步连续测试系统对数据进行采集,采集设备选取 IMC SL 宽温系列测试仪器^[7]。

1.2 测力车钩

许多工程结构都受到复杂的随机动载荷作用,为了对工作结构的结构强度及疲劳可靠性进行分析,首先必须进行载荷—时间历程的测试^[8]。为获得货车车钩所受的载荷—时间历程,需将货车车钩变成可测力的传感器。在车钩钩身两对称侧壁的纵向中心线上顺向及横向粘贴电阻应变片式传感器,通过三向精细标定筛选测点的方法确定贴片位置,以消除横向和垂向载荷对测量信号的影响。测力车钩和应变片位置筛选过程如图 1 所示。电阻应变片式传感器通过应变片组桥方式制成,包括工作应变片和温度补偿片。温度补偿片的布置位置在工作应变片邻近处与纵向轴线相垂直方向,主要为了消除试验过程中温度变化产生的干扰信号。图 2 为电阻应变片式传感器的检测原理图^[9]。其中 R_1 为工作应变片; R_2 为温度补偿片; R_3 、 R_4 为保持平衡用的不工作应变片。电桥补偿法是最有效的温度误差补偿方法。



图 1 测力车钩的制作与标定

Fig. 1 Fabrication and calibration of test coupler

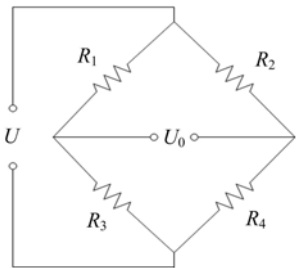


图 2 测量全桥组接示意图

Fig. 2 Full-bridge group for measurement

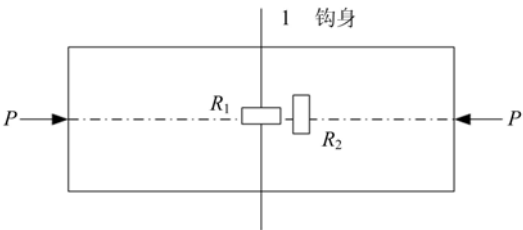


图 3 测力车钩标定

Fig. 3 The calibration of coupler used for measure

在应变片灵敏系数和电桥输入电压一定的条件下,电桥的输出电压只随应变的变化而变化。测力车钩在使用前需要进行静力标定试验,如图 3 所示,标定时对车钩施加纵向载荷 P ,测得断面 1 的应变

通过前端的放大器转换为电压后值为 U_1 , 在实际线路试验运行中, 断面 1 的实测输出电压为 U_2 , 通过式 $P/U_1 = P_c/U_2 \Rightarrow PU_2/U_1$ 可得到实际载荷值 P_c 。

1.3 典型工况下的车钩力曲线

通过对车钩传感器记录的载荷时间历程进行分析, 可以得出典型工况下车钩纵向力曲线。铁路货车线路测试过程中应变片会受到诸如温度、电磁及设备本身性能等干扰信号的影响, 所以需对测到的原始信号进行前期处理, 包括去除毛刺信号、去除干扰滤波。车钩纵向载荷数据处理流程如图 4 所示。

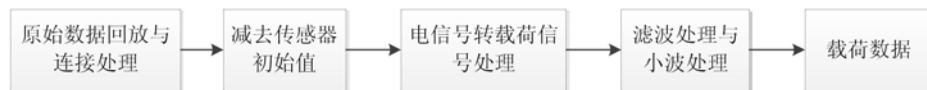


图 4 线路实测载荷数据处理流程图

Fig. 4 The flow chart of load data process

图 5、图 6 分别是列车在启动工况和制动工况下测得的车钩力—时间历程曲线。列车启动时, 牵引力提升较快会造成剧烈的纵向冲动。车钩处于拉伸状态时能减小列车启动时的纵向冲动, 而车钩处于压缩状态时有利于列车启动。图 5 所示为列车启动工况, 列车启动前车钩处于压缩状态, 这是停车制动造成的车钩压缩。列车启动前无负向冲击载荷, 说明列车启动前没有进行倒车压钩, 符合减小列车纵向冲动的操纵原则^[10]。图 6 所示为列车制动工况的车钩力曲线, 列车制动时由于制动时间不同步造成车辆之间相互挤压, 车钩处于压缩状态。随着列车速度下降, 受车辆本身制动力及前部车辆车钩力的影响, 车钩压缩载荷逐渐减小, 车钩由压缩状态变为拉伸状态, 当车钩拉伸状态达到最大后, 列车又由拉伸状态向压缩状态变化直至列车停止。

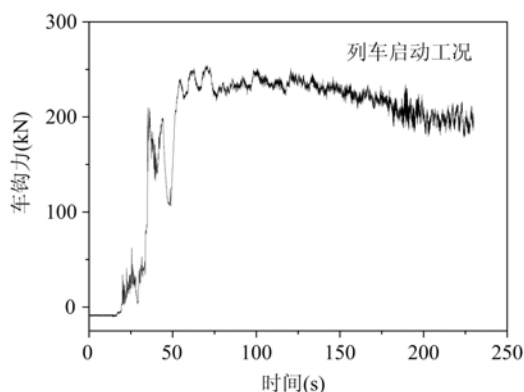


图 5 列车启动时车钩载荷—时间历程

Fig. 5 Load-time history of coupler during the start process

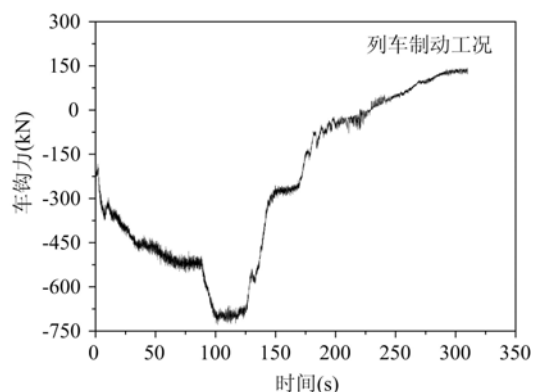


图 6 列车制动时车钩载荷—时间历程

Fig. 6 Load-time history of coupler during the braking process

1.4 车钩载荷谱编制

雨流计数法可将线路实测随机不规则的载荷—时间历程转换为一系列循环, 是国内外编制载荷谱普遍采用的方法。雨流计数法未考虑载荷循环的先后次序, 忽略了载荷先后次序的影响, 如果选用适宜的载荷—时间历程, 可使载荷循环先后次序的影响减至最小^[11]。通过对线路实测数据进行雨流计数^[12], 得到车钩载荷“最大—最小”谱。车钩载荷谱可拆分为拉-拉谱、压-压谱及拉-压谱。对车钩载荷最大—最小频次谱进行统计分析, 可分别得到拉伸载荷与压缩载荷作用的载荷—频次谱。表 1、表 2 所示为我国通用线路 C70 货车拉伸载荷、压缩载荷的均值—频次谱。

表 1 通用线路 C70 敞车拉伸载荷的均值与频次

Tab. 1 The mean and frequency of tensile load under general line

拉伸载荷(kN)	频次	拉伸载荷(kN)	频次	拉伸载荷(kN)	频次	拉伸载荷(kN)	频次
653.165	7	486.118	90	319.068	993	152.018	3925
611.405	12	444.355	159	277.306	1543	110.256	3722
569.640	22	402.593	277	235.543	2608	68.494	2522
527.880	42	360.831	492	193.781	3607	26.731	759

表 2 通用线路 C70 敞车压缩载荷的均值与频次

Tab. 2 The mean and frequency of compressive load under general line

压缩载荷(kN)	频次	压缩载荷(kN)	频次	压缩载荷(kN)	频次	压缩载荷(kN)	频次
1977.87	1	1184.38	9	766.76	10	349.13	559
1894.34	1	1142.62	5	725.00	15	307.37	1128
1518.48	4	1100.86	11	683.23	10	265.61	2081
1476.72	1	1059.09	7	641.47	16	223.84	3639
1434.96	5	1017.33	15	599.71	15	182.08	4348
1393.19	4	975.57	10	557.95	30	140.32	3267
1351.43	7	933.81	9	516.18	78	98.56	3787
1309.67	6	892.05	13	474.42	133	56.79	1837
1267.91	7	850.28	9	432.66	168	15.03	1808
1226.14	5	808.52	11	390.89	320	—	—

2 纵向载荷统计推断

2.1 分布估计及检验

威布尔分布拟合能力强,对于各种试验数据一般均能拟合,通过对铁路货车车钩载荷分布特征的研究,表明车钩纵向载荷服从威布尔分布。

式(1)是威布尔分布概率密度函数:

$$f(x) = b/\sigma[(x - \mu)/\sigma]^{b-1} \exp\{-[(x - \mu)/\sigma]^b\}, \xi \geq \mu \tag{1}$$

式中, μ 、 σ 、 b 为威布尔分布的三个参数,其中 μ 为下限,也称最小寿命参数; σ 为尺度参数,反映了数据的分散性; b 为形状参数。

式(2)表示威布尔分布的超值累积频率函数:

$$P(x) = 1 - F(x) = \exp\{-[(x - \mu)/\sigma]^b\}, \quad x \geq \mu \tag{2}$$

将超值累积频率函数取两次对数化成线性方程:

$$y = Ax + B \tag{3}$$

式中, $x = \ln \ln [P(x)]^{-1}$; $y = \ln(x - \mu)$; $A = 1/b$; $B = \ln(\sigma)$ 。

采用相关系数估计法得到位置参数。相关系数 $r=0$ 时,因变量与自变量之间不存在线性相关关系;当 $|r|=1$ 时,因变量与自变量存在确定的线性函数关系;当 $0<|r|<1$ 时,因变量与自变量之间存在着一定的线性相关关系, $|r|$ 值越大,线性相关程度也越密切^[13]。因而可以用相关系数 r 作为目标函数,相关系数 r 最大时的 $\hat{\mu}$,就是位置参数的最佳估计值。计算求得位置参数估计值后,利用最小二乘估计法可以求得形状参数 b 和尺度参数 σ 的估计值^[14]。

采用 F 检验法^[15],构造 F 统计量,在显著性水平 α 下对一元线性模型式(3)进行线性回归效果显著性检验。线性回归效果显著性的 F 检验法则若满足 $F \geq F_{1-\alpha}(1, n-2)$,则认为线性回归效果显著,车钩纵向载荷服从拟合参数的威布尔分布,否则假设不成立。

2.2 最大载荷概率计算

根据 Conver^[16]的建议, 10^6 次循环可包括那些极少发生的载荷值, 涵盖了最严重情况在内的全部载荷。一般求最大值是将累积频次曲线的总频次扩展到 10^6 次, 因此以概率为 10^{-6} 所对应的载荷为最大载荷。

利用相关系数估计法拟合得到车钩载荷的威布尔分布函数。将 $P(x) = 10^{-6}$ 代入超值累积频率分布函数式(2), 则有 $10^{-6} = \exp\{-[x_{\max} - \mu]/\sigma]^b\}$, 求解 $x_{\max}$ 的值即为最大车钩纵向载荷。

2.3 最大载荷统计推断结果

以我国通用线路 C70 货车车钩纵向载荷谱、大秦线 C80B 货车车钩纵向载荷谱、美国 AAR 漏斗车车钩纵向载荷谱、FMG 矿石车车钩纵向载荷谱为研究对象, 将不同载荷谱作为子样, 按照威布尔分布进行统计分析, 对其参数进行估计和假设检验。根据 2.2 节中提出的方法, 进行最大拉伸载荷、最大压缩载荷统计推断研究, 得到不同铁路货车最大车钩载荷的统计推断值。表 3 为铁路货车车钩纵向载荷谱基本信息, 表 4 为不同铁路货车最大车钩纵向载荷统计推断值。

表 3 铁路货车车钩纵向载荷谱基本信息

Tab. 3 Basic information of longitudinal load spectrum of railway freight cars

车型	轴重(t)	编组及牵引吨位	测试里程(km)
通用线 C70	23	单编, 5000t	47350
大秦线 C80B	25	组合列车 1+1, 20000t	12500
AAR 漏斗车	29.6	单元列车, 10000t	23797
FMG 矿石车	40	38400t	12432

表 4 不同铁路货车最大车钩纵向载荷统计推断值

Tab. 4 Statistical inference values on longitudinal load of different railway freight cars

车型	轴重(t)	牵引吨位(t)	拉伸载荷(kN)	压缩载荷(kN)
通用线 C70	23	5000	798.51	1832.29
大秦线 C80B	25	20000	1528.16	2171.71
AAR 漏斗车	29.6	10000	2194.44	2400.62
FMG 矿石车	40	38400	2405.42	2442.49

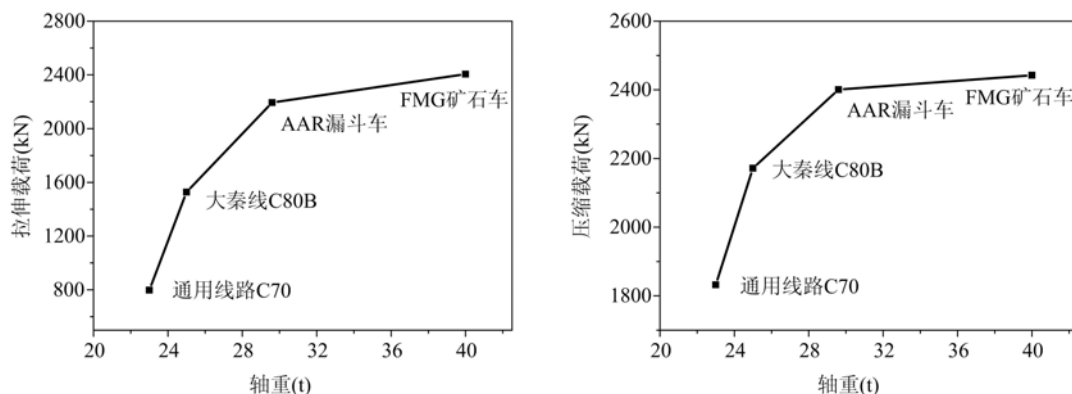


图 7 轴重与最大纵向载荷的关系

Fig. 7 Relationship between axle load and maximum longitudinal load

以轴重为横坐标, 纵向载荷为纵坐标, 绘制曲线如图 7 所示。由计算结果可发现, 我国通用线路 C70 货车车钩纵向载荷、大秦线 C80B 货车车钩纵向载荷、美国 AAR90.7t 重载漏斗车车钩纵向载荷以及 FMG 矿石车车钩纵向载荷, 轴重越大, 纵向载荷统计推断值越大。最大拉伸载荷与压缩载荷的变化趋势基本一致。以牵引吨位为横坐标, 最大载荷为纵坐标绘制曲线如图 8 所示。随着牵引吨位增大, 纵

向载荷统计推断值增大, 牵引吨位与纵向载荷统计推断值基本成线性关系。

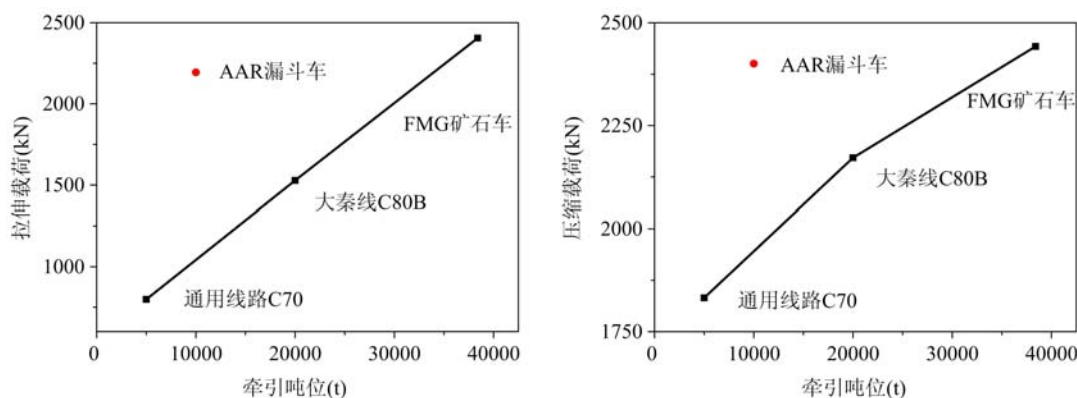


图8 牵引吨位与最大纵向载荷的关系

Fig. 8 Relationship between traction tonnage and maximum longitudinal load

3 分析与讨论

铁路货车在轴重、牵引吨位、编组方式、制动能力等方面均有区别, 这些因素都可能是造成铁路货车最大纵向载荷统计推断值不同的原因, 因此本节将利用列车纵向动力学仿真方法^[17,18]研究单一因素对纵向载荷的影响, 分析纵向载荷统计推断规律的原因。

3.1 纵向动力学仿真计算模型

在列车纵向动力学研究中, 一般将每一个机车或车辆看作匀质刚体, 每个质点只有一个纵向自由度。每节车辆对应的纵向动力学运动方程为:

$$m_i \ddot{x}_i = F_{Gi} - F_{G(i+1)} + F_L - F_{Bk} - F_{Wi} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中, m_i 为第 i 辆车的质量; $\ddot{x}_i$ 为第 i 辆车的加速度; F_{Gi} 和 $F_{G(i+1)}$ 分别为第 i 辆车的前后车钩力; F_L 为机车牵引力或动力制动力; F_{Bk} 为第 i 辆车的空气制动力; F_{Wi} 为第 i 辆车上的总运行阻力, 包括基本阻力和附加阻力。牵引力和空气制动力可根据列车的牵引特性曲线和制动压力波动曲线求解; 车钩力求解采用文献^[19]中的缓冲器模型; 其他相关参数按《牵规》中要求选取^[20]。

3.2 单车轴重对车钩纵向载荷的影响

在同样编组辆数条件下, 提高货车轴重能显著提高列车的运输能力, 由于轴重的提高, 在同样的列车牵引重量条件下可减少列车编组辆数和总长度。为了分析轴重对列车车钩纵向载荷的影响, 以 25t 轴重 C80 万吨单编列车 (HXD1+105C80) 的实际数据为仿真条件, 通过调整列车轴重由 25t 变为 30t, 并控制制动能力相同, 即车辆制动倍率由 $n_1=8.5$ 等效改变为 $n_2=10.2$, 模拟两种轴重编组列车在平道紧急制动工况下车钩纵向载荷沿车长的分布, 制动初速度为 75km/h。

图 9 为紧急制动工况下不同轴重编组列车最大车钩纵向载荷沿车长的分布曲线。由图可以看出, 轴重为 30t 时最大车钩纵向载荷基本大于轴重为 25t 时最大车钩纵向载荷。由此可以说明单车轴重增加, 车钩纵向载荷会增加。

3.3 牵引吨位对车钩纵向载荷的影响

以 25t 轴重 C80 万吨单编列车的实际数据为仿真条件, 分别模拟列车牵引吨位为 5000t、8000t、10000t、12000t、15000t 编组平道紧急制动工况下最大车钩纵向载荷沿车长的分布, 制动初速度为 75km/h。以牵引吨位为横坐标, 不同编组情况下最大车钩纵向载荷为纵坐标绘制曲线如图 10 所示。可以看出列车牵引吨位越大, 车钩纵向载荷也越大。

3.4 编组方式对车钩纵向载荷的影响

以 25t 轴重 C80 万吨单编列车的实际数据为仿真条件, 改变列车的编组方式为“1+1”编组, 仿真分析采用机车无线同步操纵技术对列车车钩纵向载荷的影响。在组合列车运行过程中, 主、从机车很难做到完全同步, 为同时分析制动延时的影响, 分别仿真单编万吨、“1+1”编组无延时、延时 1s、延时 2s 平道

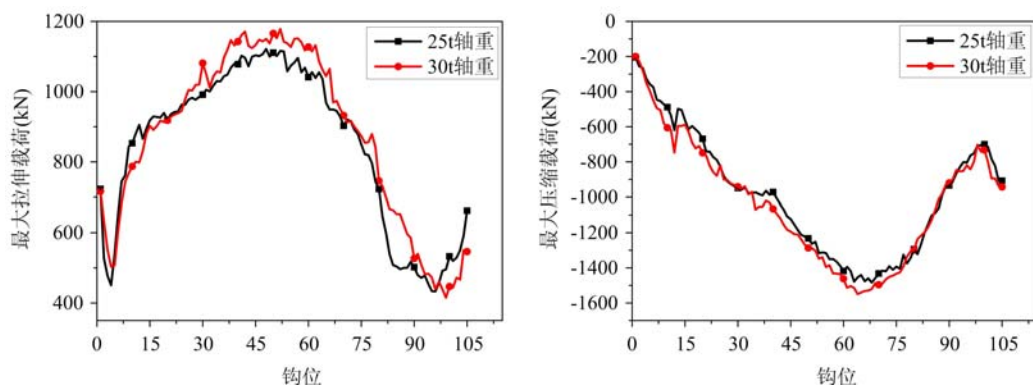


图 9 不同轴重紧急制动工况下最大车钩纵向载荷的分布

Fig. 9 Distribution of maximum longitudinal load under different axle-load (emergency brake scenario)

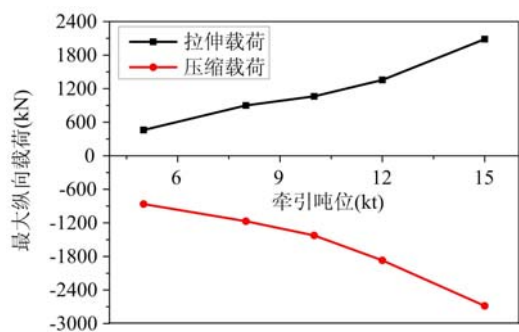


图 10 紧急制动工况下最大车钩纵向载荷与牵引吨位的关系

Fig. 10 Relationship between traction tonnage and maximum longitudinal load (emergency brake scenario)

紧急制动工况,制动初速度为 75km/h。由图 11可以看出,在同样万吨编组的情况下,单编万吨列车紧急制动工况造成的车钩纵向载荷远远大于“1+1”编组列车,可以说明采用机车无线同步操纵技术“1+1”编组能够有效缓解列车纵向冲击。采用该技术产生的延时时间对列车的纵向载荷也有较大影响,且延时时间越长则在同样的编组制动条件下产生的纵向冲击越大。因此,采用机车无线同步操纵技术的组合列车,一定程度上可以减小列车的最大纵向载荷,但同时需要控制主、从机车延时时间,避免造成更大的列车纵向冲击,影响列车运行安全。

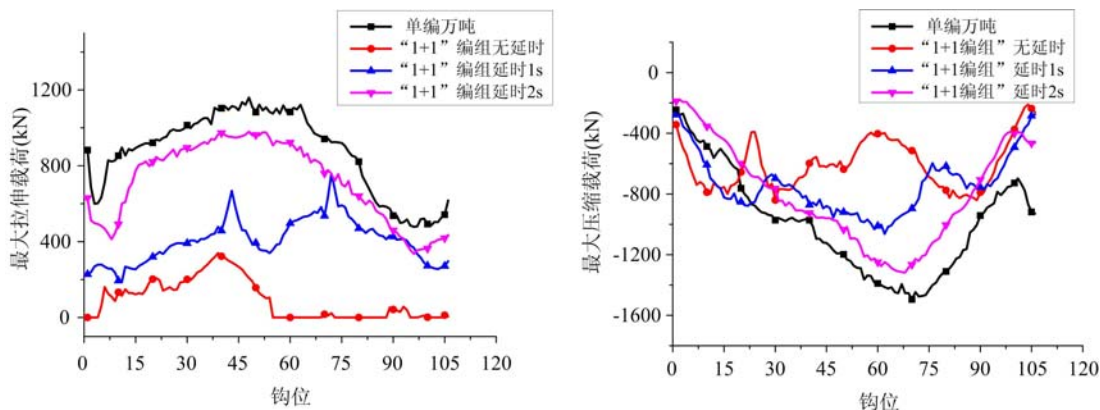


图 11 不同编组方式紧急制动工况下最大车钩纵向载荷的分布

Fig. 11 Distribution of maximum longitudinal load under different formation types (emergency brake scenario)

不同因素对铁路货车车钩纵向载荷均有重要影响,以上三种不同的因素使得不同铁路货车纵向载荷统计推断值不同。轴重越大,最大载荷统计推断值越大,最大载荷统计推断值随着牵引吨位的增大而逐渐增大。美国 AAR 漏斗车纵向载荷大于大秦线 C80B 重载货车纵向载荷,一方面由于美国 AAR90.7t 漏斗车采用万吨编组,大秦线 C80B 重载货车 20000t 编组,采用“1+1”编组方式,说明无线同步操纵技术能够有效地减小列车纵向冲击力;另一方面由于轴重不同,AAR 漏斗车轴重 29.6t,大秦线 C80B 重载货车轴重 25t。不同因素造成 AAR 漏斗车纵向载荷统计推断值大于大秦线 C80B 重载货车纵向载荷统计推断值。

4 结论与展望

采用线路实测试验获得我国通用线路 C70 型货车车钩纵向载荷时间历程,并采用雨流计数法进行统计分析,获得车钩纵向拉伸载荷、压缩载荷均值—频次谱。结合前期不同类型铁路货车线路测试试验数据,采用相关系数估计法,分别求解纵向载荷威布尔分布函数的三个参数,根据 Conver 的建议统计推断出我国通用线路 C70 货车、大秦线 C80B 重载货车、美国 AAR90.7t 漏斗车、FMG 矿石车车钩载荷最大值进行分析,结论如下:

(1)不同因素对铁路货车最大纵向载荷均有重要影响,包括轴重、牵引吨位、单车载重等。对比不同货车载荷统计推断值,可发现轴重越大,最大载荷统计推断值越大;最大载荷统计推断值随着牵引吨位的增大逐渐增大。

(2)利用列车纵向动力学仿真方法,以单编万吨列车为研究对象,研究了不同因素对纵向载荷的影响,得到同样编组的情况下,轴重增加会增大列车纵向载荷;增加列车牵引吨位会加剧列车的纵向冲动;列车的编组方式也会影响列车的纵向冲击,采用机车无线同步操纵技术能够缓解列车的纵向冲动,但需控制主从机车延时时间。

铁路货车载荷谱线路测试条件变量较多,试验车辆的轴重、牵引吨位、编组情况、制动能力等纵向载荷影响因素不尽相同。铁路货车纵向载荷的影响因素还需进一步研究,以便为车钩纵向载荷的评价标准及铁路货车设计提供可靠的依据。

参考文献:

- [1] 范振平,李强,黄倩.大秦线2万吨重载列车车钩纵向力特性研究[J].物流技术,2011,30(3):125—127 (FAN Zhenping, LI Qiang, HUANG Qian. Study on the characteristics of the longitudinal force on heavy-haul locomotive couplers[J]. Logistics Technology, 2011, 30(3):125—127 (in Chinese))
- [2] 孟庆民,卢碧红,姜岩.铁路重载货车车钩裂纹故障探讨[J].铁道车辆,2008,46(10):36—39 (MENG Qingmin, LU Bihong, JIANG Yan. Discussion of cracking troubles in couplers for heavy haul railway freight cars [J]. Rolling Stock, 2008, 46(10):36—39 (in Chinese))
- [3] AAR Standard, Section C Part (II). Fatigue Design of Freight Train [S]. America, AAR, 2007.
- [4] 张振森,戚文星,薛向东等.13号车钩疲劳寿命的研究[J].上海铁道学院报,1993,14(4):23—32 (ZHANG Zhenmiao, QI Wenxing, XUE Xiangdong, et al. A study on the fatigue life of NO. 13 freight car coupler[J]. Journal of Shanghai Institute of Railway Technology, 1993, 14(4):23—32 (in Chinese))
- [5] 谢基龙,孙守光,李强等.大秦线重载列车基础理论研究—列车载荷谱的试验研究总结报告[R].北京交通大学结构强度检测实验室,2010 (XIE Jilong, SUN Shouguang, LI Qiang, et al. Studies on basic theory of heavy haul railway freight cars on Datong-Qinhuangdao railway-research report of spectrum test [R]. Structural strength testing laboratory of Beijing Jiaotong University, 2010 (in Chinese))
- [6] 徐倩,王悦明,倪纯双.重载列车纵向冲动分布试验研究[J].中国铁道科学,2013,34(4):77—83 (XU Qian, WANG Yueming, NI Chunshuang. Test study on the longitudinal impulse distribution of heavy haul train[J]. China Railway Science, 2013, 34(4):77—83 (in Chinese))
- [7] 陈晟. C70 型通用货车载荷谱测试与研究[D].北京交通大学,2014 (CHEN Sheng. Test and study of load spectrum of C70 universal open wagon car body[D]. Beijing Jiaotong University, 2014 (in Chinese))
- [8] 王琴放.四通道疲劳载荷的实时处理[J].实验力学,1986,1(3):273—276 (WANG Qinfang. Real time processing for 4 channels fatigue load [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1986, 1(3):273—276 (in Chinese))
- [9] 邓阳春,陈钢,杨笑峰等.消除电阻应变片大应变测量计算误差的算法研究[J].实验力学,2008,23(3):227—233 (DENG Yangchun, CHEN Gang, YANG Xiaofeng, et al. Algorithm study of eliminating calculation errors in large strain measurement with strain gauges[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(3):227—233 (in Chinese))
- [10] 王帅,安中正,白晶等.万吨重载列车的平稳操纵[J].机车电传动,2005(6):60—61,65 (WANG Shuai, AN

- Zhongzheng, BAI Jing, et al. Stable operation for 10000-ton heavy load train[J]. Electric Drive For Locomotives, 2005(6):60—61, 65 (in Chinese))
- [11] 陈爱雅, 高镇同. 二维疲劳载荷谱的编制[J]. 实验力学, 1986, 1(1):60—66 (CHEN Aiya, GAO Zhentong. Compilation of two-dimensional fatigue load spectrum [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1986, 1(1):60—66 (in Chinese))
- [12] 邱承昌. 第三讲数据处理(上)[J]. 实验力学, 1987, 2(3):83—91 (QIU Chengchang. Lesson three: Data processing (part one) [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1987, 2(3):83—91 (in Chinese))
- [13] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京:国防工业出版社, 1986:82—87 (GAO Zhentong. Fatigue Applied Statistics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1986:82—87 (in Chinese))
- [14] 赵冰锋, 吴素君. 三参数威布尔分布参数估计方法[J]. 金属热处理, 2007, 32(增刊):443—446 (ZHAO Bingfeng, WU Sujun. Parameter estimation methods for 3-parameter Weibull distribution [J]. Metal Heat Treatment, 2007, 32(S):443—446 (in Chinese))
- [15] 熊峻江, 高镇同, 傅惠民. 疲劳对比试验的可靠寿命假设检验[J]. 实验力学, 1995, 10(2):120—124 (XIONG Junjiang, GAO Zhentong, FU Huimin. An assumption test method of the reliable life in fatigue comparative test [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1995, 10(2):120—124 (in Chinese))
- [16] 侯卫星. 统计推断理论在转向架载荷谱研究中的应用[J]. 铁道车辆, 1990(7):39—45 (HOU Weixing. Statistical inference theory and its application in bogie spectrum. [J]. Railway Locomotive & Car, 1990(7):39—45 (in Chinese))
- [17] 丁莉芬. 重载列车纵向动力学建模研究[D]. 北京交通大学, 2012 (DING Lifen. Study on modelling the longitudinal dynamics of heavy haul train[D]. Beijing Jiaotong University, 2012 (in Chinese))
- [18] 魏伟, 赵连刚. 两万吨列车纵向动力学性能预测[J]. 大连交通大学学报, 2009, 30(2):39—43 (WEI Wei, ZHAO Liangang. Prediction of longitudinal dynamic coupler force of 20000-ton connected train[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2009, 30(2):39—43 (in Chinese))
- [19] 齐朝晖, 黄志浩, 孔宪超 等. 摩擦式缓冲器阻抗特性在列车纵向动力学中的应用[J]. 铁道学报, 2011, 33(12):27—32 (QI Zhaohui, HUANG Zhihao, KONG Xianchao, et al. Application of dynamic impedance characteristics of frictional draft gear in longitudinal train dynamics[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(12):27—32 (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国铁道部. TB/T1407—1998 列车牵引计算规程[S]. 北京:中国标准出版社, 1998 (Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB/T1407—1998 regulations on railway train traction calculation[S]. Beijing: China Standards Press, 1998 (in Chinese))

On the Experimental Measurement and Statistical Inference of Railway Freight Train Longitudinal Load

LU Zi-zhao, WANG Xi, LI Guang-quan

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Through on-line testing, the coupling gear longitudinal load time history of universal line C70 freight train was obtained. By using rain-flow counting method, the longitudinal load mean value of coupling gear and frequency spectrum were obtained, respectively. The distribution characteristics of coupling gear longitudinal load spectrum taken from universal line C70 freight train, Da-Qin line C80B freight train, AAR 90. 7t hopper wagon and FMG ore car respectively, were analyzed, the statistical inference of the maximum longitudinal load was conducted. Results show that the maximum longitudinal load of railway freight train increases with the increase of axle load and traction tonnage. Longitudinal dynamics simulation reveals that the single freight train axle load, the traction tonnage and different train grouping types are the main causes of above results.

Keywords: railway freight train; longitudinal load; statistical inference; longitudinal dynamics