

试验·研究

转向架构架柔度对构架垂向动态载荷影响的分析

姚远, 张红军, 罗赞, 张开林

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 运用刚-柔耦合动力学方法,通过有限元软件 ANSYS 和多体动力学软件 SIMPACK,分别考虑构架刚性、柔性,建立两种完整机车动力学模型。在改变直线上机车运行速度、一系垂向刚度值以及使机车通过曲线段等多种工况下,对基于弹性变形的构架动态载荷进行分析,为进一步对构架疲劳寿命分析提供依据。研究结果表明,相对构架刚性处理,考虑构架柔性可以改善构架一系垂向动态载荷,但一系垂向力主频范围较刚性处理时要宽。另外,基于刚-柔耦合计算方法对柔性构架研究具有借鉴意义。

关键词: 机车; 转向架; 柔性构架; 弹性振动; 动载荷; ANSYS; SIMPACK

中图分类号: U260.331⁺.8 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-1820(2008)02-0007-04

1 前言

构架作为机车转向架的一个重要承力部件,设计中需要保证其有足够的强度和刚度。传统设计中,为了保证转向架的强度和刚度,往往将构架设计得粗大而笨重。随着机车运行速度的提高,作为簧间质量的构架需实现轻量化,以提高机车的动力学性能。轻型构架需要尽可能地按照等应力梁来设计,以获得较小的自重。但轻型构架较传统构架的柔度有所增加^[1]。对于2轴转向架来说,构架垂向为4支点承力,属于静不定问题。由于轨道垂向不平顺、车轮扁疤、轨面三角坑及通过道岔等垂向激励因素,构架的柔性将影响机车动力学性能。

机车运行时,刚性构架可出现三点承载的情况,使一轮减载悬空;具有一定柔度的构架,其一系悬挂点的垂向刚度与一系弹簧共同作用,可影响构架受力状态和机车垂向动力学性能。本文针对2B₀轴式架悬高速机车,利用刚-柔耦合多体动力学计

算方法,探讨考虑构架柔性时转向架构架动态载荷的变化,为进一步分析构架疲劳寿命提供依据。

2 刚-柔耦合多体动力学计算方法

刚-柔耦合多体动力学采用混合坐标来描述柔性体位形。对柔性构件建立浮动坐标系,将构件的位形认为是浮动坐标系的大范围运动与相对于该坐标系的变形的叠加。利用大范围浮动系的刚体坐标与柔性体的节点坐标(或模态坐标)建立动力学模型。选择主自由度,在有限元中通过矩阵缩减,减少系统自由度,提高计算速度;另外,机车车辆构架的载荷主要为低频载荷,截取模态的前阶成分,运用振型叠加原理计算弹性体弹性形变^[3,4]。

对于模态选取,传统是选取若干低阶正则模态作为模态函数,可直接由有限元方法得到,且用正则模态得到的模态质量阵和模态刚度阵为对角阵,减少了计算时间。但正则模态是通过特征值分析得到的,只能较好地解决自由振动问题。而机车构架由于外力作用,属于强迫振动问题,模态的选取必须考虑到动载荷的大小及其频率特性。为了减少计算误差,在模态中引入静力校正模态,即将静力变形作为模态坐标阵的一部分。在变形模态中

收修回稿日期: 2007-06-14

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助 (IRT0452)

作者简介: 姚远 (1983—), 男, 安徽安庆人, 博士研究生。

同时选取正则模态的少量的静力校正模态^[5],通过 Gram-Schmidt 正交化方法使它们相互正交。在 SIMPACK 前处理模块 FEMBS 中,在 FRM(Frequency Response Modes) 设置频率为零的外载荷来计算静力校正模态^[7]。

3 模型建立

本文应用多体系统动力学(MBS)结合有限元(FEM)分析法。首先利用有限元软件 ANSYS,采用子结构法建立构架有限元模型,选择相应的主自由度,施加边界条件生成超单元,可以参照有限元矩阵缩减有关文献^[6]。计算一定频率范围内的各阶振动模态,并得到两个标准输出文件 *.sub 和 *.rst,前者包含构架结构信息,后者包含构架模态信息。然后在 SIMPACK 软件前处理模块 FEMBS 中调入这两个文件,生成 *.fbi 文件,再通过修改相关参数,选择相应的参与动力学计算模态,加入实际静态载荷以生成静态校正模态,最后得到 *.SID - FEM 调入到 SIMPACK 中代替刚性构架参与计算,如图 1 所示^[2,7]。

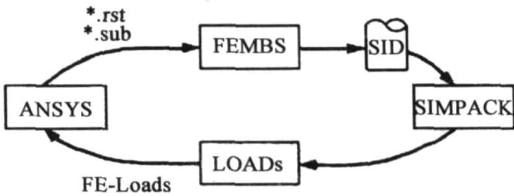


图 1 构架弹性化处理过程

3.1 柔性构架模型

应用 ANSYS 分别建立有端梁和无端梁构架模型,计算前 5 阶固有频率,图 2 为构架有限元模型。单元为 SHELL63,上盖板、下盖板、侧板及中间隔板设置不同厚度实常数。有端梁构架模型单元数为 27620。图 3 为构架有限元模型生成的超单元及主自由度模型。利用超单元和非超单元计算所得到



图 2 构架有限元模型

的构架无约束自由振动模态信息见表 1。

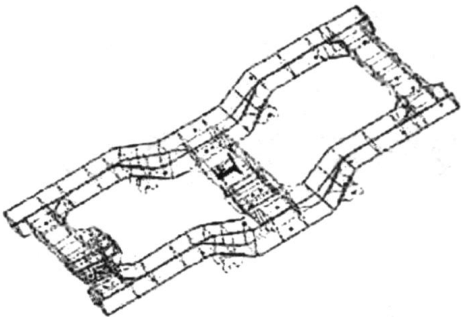


图 3 超单元及主自由度

表 1 有限元计算模态

振动形式	固有频率/ Hz	超单元计算固有频率/ Hz
侧梁垂向扭曲	49.2	49.2
侧梁垂向弯曲	57.3	57.2
侧梁纵向剪切	93.9	92.7
中梁横向弯曲	99.4	100.1
侧梁垂向反向弯曲	116.6	118.7

3.2 机车动力学模型

以某出口 2B₀ 轴式架悬机车为研究对象。利用多刚体动力学软件 SIMPACK,建立动力学计算物理模型,见图 4。模型考虑了车体、2 个构架、4 个轮对、8 个转臂轴箱、一二系弹簧和减振器等。牵引电机刚性架悬在构架上。其中模型共 14 个刚体和 1 个柔性体。第 1 位转向架构架为柔性体。轮对的垂向和侧滚运动是由垂向位移决定的,不是独立自由度;转臂轴箱仅考虑点头和摇头自由度。模型主要参数:转向架轴距 2.9 m;转向架中心距 10.65 m;轨距 1 520 mm;轮径 1 250 mm;轴箱转臂长 450 mm;轴箱横向自由间隙 0.5 mm,弹性间隙 8 mm;一系弹簧纵、横向刚度都为 1.147 kN/mm,垂向刚度为 1.557 kN/mm;转臂轴箱橡胶节点的径向和轴向刚度分别为 17 kN/mm 和 4 kN/mm;一二系静挠度分别为 59.5 mm 和 154.4 mm;轴重 22 t。



图 4 2B₀ 轴式架悬机车的物理模型

为了比较柔性构架特点,分别采用刚性和柔性两种动力学模型计算。本文中,采用美国 AAR 标准 5、6 级轨道不平顺。踏面采用俄罗斯标准磨耗型踏面,等效锥度在 0.12 左右。轨道为 P65 钢轨,轨底坡为 1:40。用数值积分方法求解,充分考虑轮轨接触几何和蠕滑关系的非线性、轮对自由横动量和轴箱横向止挡的非线性、二系横向止挡刚度的非线性以及各减振器的卸荷特性,机车在 AAR6 级线路上临界速度为 280 km/h。

4 仿真结果分析

图 5、6 分别为在相同条件下直线运行,考虑构架刚性和柔性时一系弹簧垂向载荷谱。很明显,当考虑柔性时,一系垂向动态载荷方差值大大减小,提高了构架的疲劳寿命。另外,当机车高速运行时,轮轨垂向力主频范围同构架固有频率接近,轮轨激励引起构架振动,也影响了构架动态载荷。本文在比较构架动态载荷时,选取一、二系弹簧力 3 倍标准差值作比较分析。

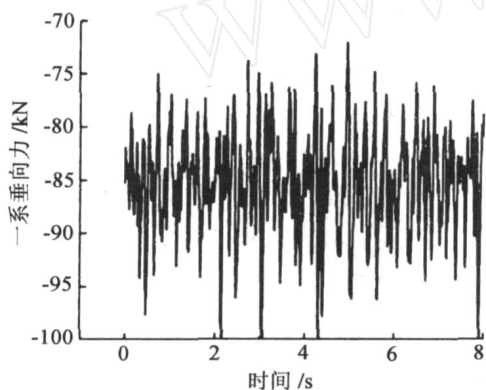


图 5 构架刚性一系垂向动载荷

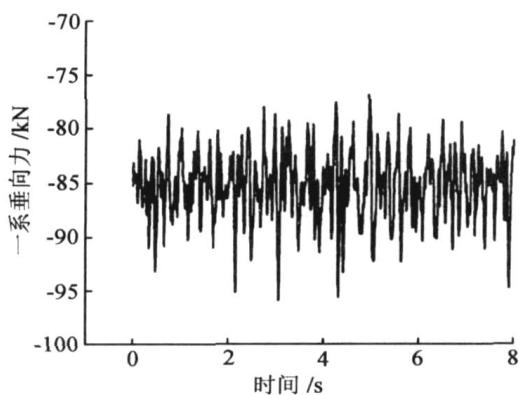


图 6 构架柔性一系垂向动载荷

4.1 直线运行时构架动载荷

对刚性和柔性构架的动力学模型,以相同条件

直线运行。机车在运行过程中,二系和一系施加给构架的动载荷与机车速度的关系见图 7、8、9。由图 7 可知,构架的柔度对二系垂向载荷影响甚微;由图 8、9 可知,刚性构架的一系垂向载荷要比柔性构架的大,且随着速度增大,其差值也增大。机车高速运行时,柔性构架较刚性构架更能显示其柔性的优势。机车在美国 5 级线路上运行,一系对构架施加的载荷差值比在 6 级线路上运行变化更显著。当机车速度为 200 km/h,在 5 级线路上运行时,刚性和柔性构架所受的一系垂向动载荷(3 倍标准差值)分别为 17.4 kN 和 14.8 kN;在 6 级线路上运行时,分别为 7.4 kN 和 6.6 kN。构架柔性较刚性所受的一系垂向动载荷,在美国 5、6 级线路分别改善 15.2 %和 10.8 %。

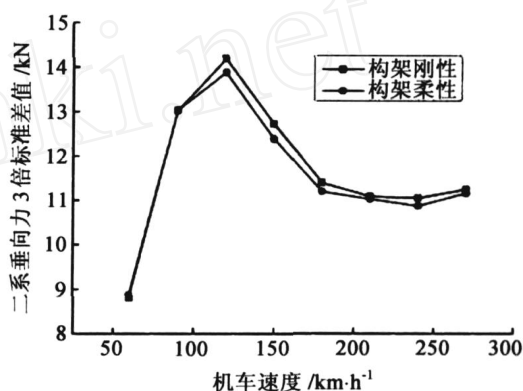


图 7 5 级轨道上二系垂向动载荷

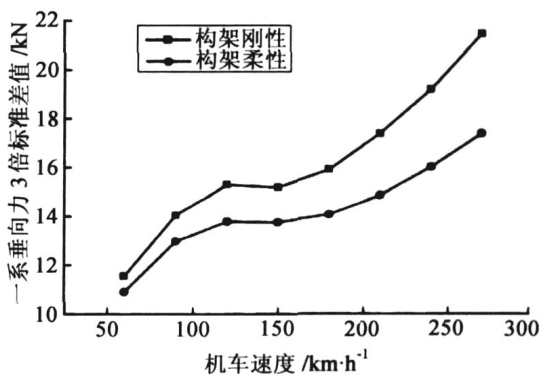


图 8 5 级轨道上一系垂向动载荷

图 10、11 为机车速度为 160 km/h 时, AAR5 级直线线路上两种模型一系垂向力功率谱密度。构架柔性一系垂向力主频范围比刚性的要宽。且频率在 2~10 Hz 以内,为机车敏感频率段,对机车动力学性能有不利的影响,参数匹配时需引起重视。

4.2 曲线通过时构架动载荷

为了讨论构架柔性时曲线通过动态载荷的影

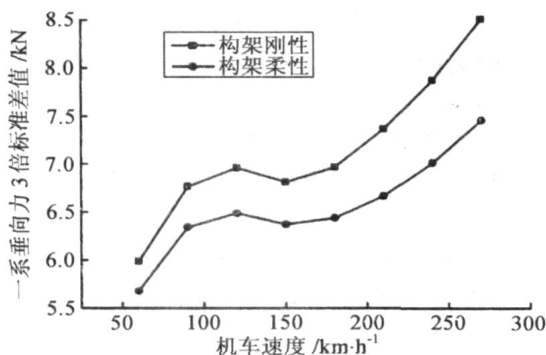


图9 6级轨道上一系垂向动载荷

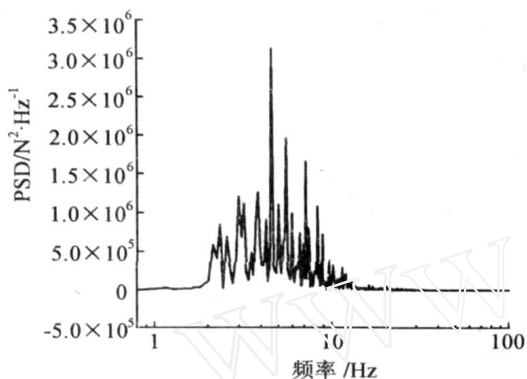


图10 刚性构架一系垂向载荷功率谱密度

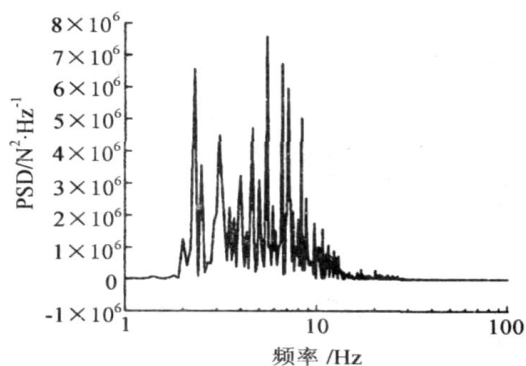


图11 柔性构架一系垂向载荷功率谱密度

响,让机车通过一定长度曲线,比较一系弹簧垂向载荷大小。曲线由20 m直线—150 m缓和曲线—200 m圆曲线—150 m缓和曲线—20 m直线轨道组成。为了方便对比,曲线通过时未考虑轨道不平顺影响。计算工况见表2。

计算结果:第1轮对导向轮侧一系垂向动载荷与运行距离的关系如图12所示。当机车在缓和曲线上运行时,导向轮侧一系弹簧垂向冲击力峰值较大,考虑构架柔性时能有效地降低构架一系垂向冲击动载。

表2 机车曲线通过计算工况

圆曲线半径	外轨超高	欠超高	通过速度	轨距加宽
/m	/mm	/mm	/km·h⁻¹	/mm
2000	105	-98	140	0

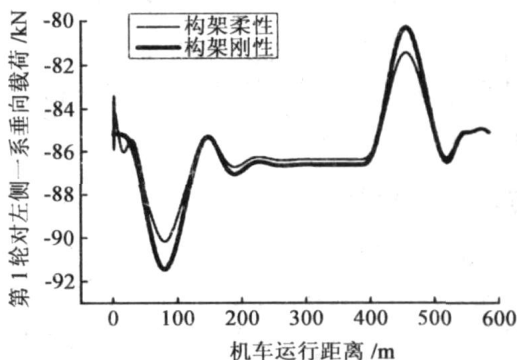


图12 曲线通过时第1轮对左侧一系垂向动载荷

4.3 改变一系刚度值时一系垂向动载荷

构架变形刚度和一系悬挂刚度共同组成机车一系刚度,当构架变形刚度和一系悬挂刚度相当时,构架的柔性才显出优势。现代高速机车悬挂刚度遵循一系硬二系软的设计原则,一系刚度值比较大,本文讨论不同的一系悬挂刚度对构架垂向动态载荷的影响具有意义。前文计算一系弹簧垂向刚度为1.557 kN/mm,现分别选取2、3、4倍刚度计算,机车以180 km/h的速度在不平顺为AAR5、6级直线线路上运行。得出不同刚度值下一系垂向动态载荷。其结果如图13、14所示。

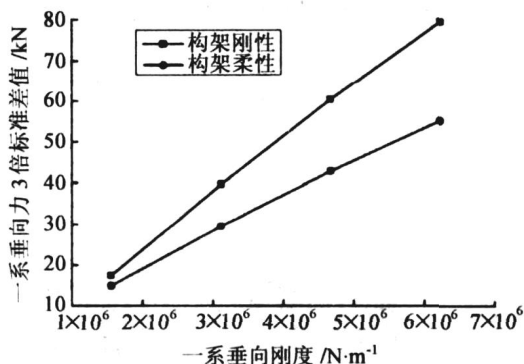


图13 5级线路上一系刚度对垂向动载荷的影响

计算结果表明,随着一系垂向刚度值的增加,一系垂向力3倍标准差值近似线性增大;考虑构架弹性变形时构架一系垂向动态载荷相对构架刚性减小量随一系垂向刚度值的增加而线性增大,也就是说一系垂向刚度值增大时,构架柔性优势更加明

【下转第27页】

于导通状态,此时,由于运放A输出低电平,所以KG仍处于关断状态,YC线圈中无电流,YC不吸合,空压机仍处于停止打风状态。当风源压力继续下降,使 $U_{\text{压}} < U_{\text{设高压}}$,且 $U_{\text{压}} < U_{\text{设低压}}$ 时,运放A、B皆输出高电平,KG、T皆导通,YC再次吸合,空压机又开始打风,如此周而复始。

3.3 其他

在电子式YK的控制器部件中,压力设定部分相当于原机械式YK的高低压调整螺钉。设定压力范围时,高低压设定信号相互独立,无相互牵制关联作用。控制机构采用集成电路为核心原件,其相当于机械压力开关的杠杆部分。因信号输入环节具有很高的输入阻抗,所以,压力设定信号值和实测的风源压力信号值都几乎无衰减,确保控制信号的输出准确无误。执行机构采用电子元件,放大执行控制机构输出的控制信号,控制YC线圈中电流的通断,取代原机械压力开关的机械触头,实现了本开关器件的无触点控制。

为了提高控制器的可靠性,防止过电压对控制机构压力检测等部件造成损伤,特在设计过程中,精心计算,合理选择器件,设置适当的过压保护电路。执行机构中元件选择大余量、高耐压值的电子元件。同时还进一步采取措施,防止正反向过压、过流对开关元件的损伤,保证控制器可靠性和持久性。

4 效果

为了证实电子式YK设计理论原理的正确性,我们制作出第一个样本产品。经过实验室模拟实验合格后,将样本试验品装在DF₄型657号机车上,经受了机车挂载、起机、打风等各种操作的考验,并进行了为期半年的电气性能考核实验,控制器一直都能按照预先设定进行准确控制,各部电气性能良好。同时,又对其进行了多次调压实验,电子式YK表现出了无相互牵制、控制准确等特点,发挥了设计的预期优越性。

【上接第10页】

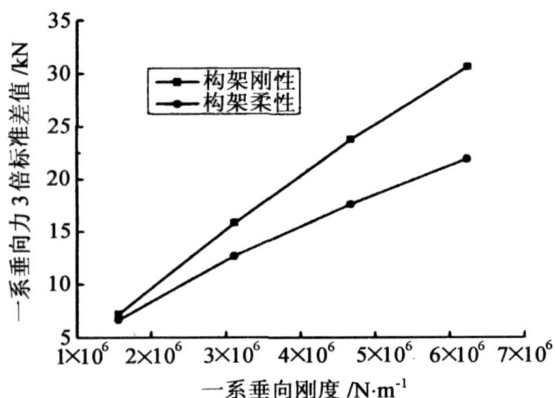


图14 6级线路上一系刚度对垂向动载荷的影响

显;如图13所示,当一系垂向刚度值为原来4倍时,柔性构架一系垂向力3倍标准差值为刚性构架的66.6%。

5 结论

本文运用有限元软件ANSYS和多体动力学软件SIMPACK建立刚-柔耦合动力学模型,通过仿真模拟机车直线和曲线运行,分析构架刚性和柔性对一系和二系施加在构架动态载荷的影响。其结论如下:

(1) 柔性构架较刚性构架能有效地改善一系

垂向悬挂动态载荷,且随着速度的提高,这种柔性优势发挥得更明显。

(2) 机车通过曲线不考虑线路不平顺时,柔性构架能显著降低通过缓和曲线时的一系列垂向冲击力,而对圆曲线段无改善。

(3) 当线路等级低时,柔性构架能较好地改善一系垂向动态载荷。另外,机车运行速度高或是一系悬挂刚度同构架变形刚度相当时,这种优势显得更加明显。

参考文献:

- [1] 师建章,赵善渊. 高速动车转向架构架“柔性”设计[A]. 高速动车车体及转向架实施技术攻关暨学术讨论会论文集[C]. 成都:西南交通大学出版社,1994.
- [2] 任尊松,孙守光,李强,毛娟. 构架结构振动与动态应力仿真研究[J]. 机械工程学报,2004,(8).
- [3] 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1999.
- [4] 阳光武,肖守讷,金鼎昌. 基于弹性构架的地铁车辆动力学分析[J]. 中国铁道科学,2004,(4).
- [5] 于清,洪嘉振. 柔性多体系统动力学的若干热点问题[J]. 力学进展,1999,(2).
- [6] Gyan R J. Reduction of Stiffness and Mass Matrices [J]. AIAA Journal, 1965,3.
- [7] Intec GmbH. SIMPACK User's Manual [Z]. Germany: Wessling, 2000.

ABSTRACTS

Recent development of DC diesel locomotive in America and its enlightenment to us

CHENG Yong-lu

(Dalian Locomotive Research Institute Co., Ltd.,
Dalian, 116021, China)

Abstract: The delivery and orders of DC and AC diesel locomotives manufactured in last ten years by GE and EMD, the two biggest diesel locomotive manufacturers in America and in the world, were described in brief. The main design characteristics and technical parameters of some typical DC diesel locomotives produced recently by the both companies were given. The main reasons for DC diesel locomotive to be popularized in America were analyzed. And finally, in view of the development status of Chinese diesel locomotive, some proposals were put forward.

Key words: DC diesel locomotive; American railroads; market; design characteristic; technical parameter; proposals

Study of vertical dynamic loading of bogie with elastic frame

YAO Yuan, ZHANG Hong-jun,
LUO Yun, ZHANG Kai-lin

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

Abstract: Based on dynamics of the coupling system for rigid and elastic motions, with ANSYS and SIMPACK software, the two different dynamic models of the complete railway vehicle system are established in which the bogie's frame is taken as elastic and rigid respectively. By changing the velocity of the locomotive model in straight-line, the vertical stiffness of preliminary suspension of the model and passing curve, the dynamic loading of bogie with elastic frame on locomotive is analysed to supply the theory about fatigue life prediction. The results show that the vertical dynamic loading of preliminary suspension has been decreased when the frame is considered as elastic body, but the domain of basic frequency become broader. The study method in this thesis about dynamics of the coupling system for rigid and elastic motions is helpful to analyse elastic bogie in future.

Key words: elastic bogie; elastic vibration; dynamic loading; ANSYS; SIMPACK

Analysis of and dealing with load constraints in the locomotive body-strength calculation

LI Hua-li¹, XIAO Shou-ne¹,
WANG Song², HUANG Xiao-ye^{1,3}

(1. Locomotive & Rolling Stock Institute of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Dalian Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Dalian 116022, China; 3. Institute of Technology, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: A particular finite element analysis model of a shunting locomotive body structure was set up with finite element method and ANSYS software. Underframe of car body was taken as analytical object according to the load-carrying characteristic. Two methods were applied to compensating load, the FEM calculational loads, constant operating conditions and assessing standards of the model were confirmed, and the car body static strength and its distortion were compared. The result indicates that the static strength and distortion of car body structure meet the relative design requirements in constant operating conditions, at the same time, their values are very close (the difference between them is less than 0.5%) under the two methods.

Key words: diesel locomotive; car body; finite element; static strength; compensating load

Research of cylinder liner-piston group wear based on wavelet packet and GA-BP neural network

CHEN Qian-gen^{1,2}, YUAN Dong-lai¹, FEI Wang-long¹
(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Shanhe Intelligent Machinery Co., Ltd., Changsha 410110, China)

Abstract: The comparison experiment method was used to study the influence of the diesel engine cylinder liner-piston group wear on the gas leakage rate and specific fuel consumption. The different wear conditions of cylinder liner-piston group were analyzed by use of the vibration signal from the engine block. Then, the wavelet packet time-frequency analysis method was used to extract characteristic parameters, and finally wear conditions were identified by use of the BP neural network improved by genetic algorithm.

Key words: wear; cylinder liner-piston group; vi-