

文章编号: 1005-0523(2019)06-0001-06

基于自适应响应面法的动车组牵引变压器弹性吊挂设计

王洋洋, 宫 岛, 周劲松

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 针对某型动车组原始吊挂刚度下车体地板振动较大导致乘坐不舒适的现象, 对动车组牵引变压器吊挂刚度进行优化设计。在优化设计过程中, 采用拉丁超立方设计方法进行采样, 根据所得的样本数据, 引入自适应响应面法对变压器吊挂刚度进行优化设计, 避免了传统响应面法完全依赖于最初样本点的问题。对优化设计后牵引变压器吊挂刚度的减振效果进行验证, 车体地板垂向振动加速度得到大幅度降低; 计算得到吊挂频率为 9.0 Hz, 远小于刚性吊挂时车体一阶垂弯频率; 并且模态分析后一阶垂弯模态频率保持在 10 Hz 以上, 符合动车组模态匹配要求。

关键词: 吊挂刚度; 自适应响应面法; 优化设计; 拉丁超立方采样

中图分类号: U270.1

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2019.06.001

随着国民经济的发展, 人们生活水平以及出行频率不断提高, 选择动车组作为出行工具也越来越多, 对动车组的舒适度要求也更高。而动车组的振动特性直接影响乘客的乘坐舒适性, 以往相关学者在减振方面研究的重点主要集中在轮轨激励或者转向架悬挂参数等方面。而随着动力分散型动车组的普及, 作为次要激励源质量较大的动车组车下设备对车体动力学性能的影响也日益得到关注。因此, 合理的选择下吊设备的悬挂参数具有重要意义^[1-2]。

针对车下牵引变压器引起的地板振动问题^[3-4], 本文通过建立某型动车组精细化有限元模型, 在原始吊挂刚度的基础上基于自适应响应面优化方法^[5]进行吊挂刚度的优化计算。并对优化后的模型进行模态分析以及动力学振动特性分析, 验证其优化结果, 结果显示优化效果良好, 说明此方法对动车组的结构参数优化具有一定的参考意义。

1 动车组车体振动仿真分析

1.1 动车组车体有限元模型建立

将某型动车组三维模型导入有限元分析软件进行网格划分。由于车体为箱体结构, 建立有限元模型时, 选择面网格(四边形或者三角形单元)来划分主结构模型, 并根据实际厚度进行设置, 隔音地板用实体单元进行模拟; 用 1D 单元模拟吊挂元件、接触以及梁等; 增加质量点以及吊挂设备得到车体整备质量; 根据车体与转向架的装配关系, 在 4 个空气弹簧处各设置一个 CBUSH 单元, 用以模拟车体二系悬挂的空簧; 利用实体单元生成部分附属结构。最终, 整车共划分 222 798 个单元, 153 157 个节点。整车结构多为铝型材, 其弹性模量为 69 000 MPa, 密度为 2.7×10^{-6} kg/mm³, 泊松比为 0.3, 地板材料主要包括各向异性的铝蜂窝材料(三向弹性模量和剪切模量分别为 0.7, 0.7, 1 700 MPa 和 0.4, 250, 125 MPa, 密度为 3.0×10^{-6} kg/mm³)以及隔音地板材料。最终得到整车有限元模型如图 1, 变压器质量为 4 480 kg, 其弹性吊挂位置如图 2 所示。

收稿日期: 2019-01-20

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAG19B02)

作者简介: 王洋洋(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道车辆振动与噪声控制。

通讯作者: 周劲松(1969—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为机车车辆动力学与控制。

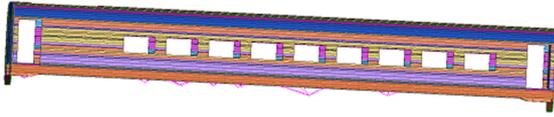


图1 动车组整备状态有限元模型

Fig.1 The finite element model of the ready state of EMU

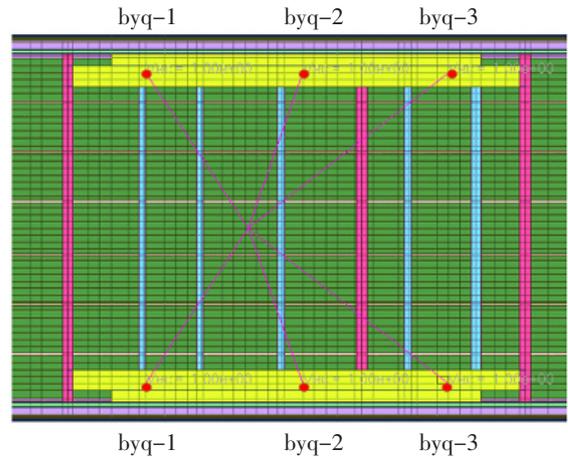


图2 变压器吊挂位置及吊挂刚度编号

Fig.2 The number of suspension position and stiffness of the transformer

1.2 动车组整备状态模态及振动特性分析

对动车组整备状态在刚性吊挂以及原始弹性吊挂刚度下进行模态计算,原始吊挂刚度如表1所示。模态分析结果为:刚性吊挂状态下车体一阶垂弯振型频率为12.59 Hz,原始刚度下车体一阶垂弯振型频率为14.5 Hz。

表1 原始吊挂刚度表

Tab.1 Original hanging stiffness

N/mm

吊挂位置	纵向(X)刚度	横向(Y)刚度	垂向(Z)刚度
byq-1	4 270	1 281	4 270
byq-2	3 850	1 155	3 850
byq-3	410	123	410

在动车组有限元模型空簧处施加试验测试得到的加速度激励频谱,如图3所示。分别对刚性吊挂和原始吊挂刚度下的车体进行频响计算,得到地板中心响应点的频响曲线,如图4所示。根据频响曲线可知,刚性吊挂频响曲线第一个峰值坐标为(12.5,0.004 72),原始吊挂刚度频响曲线第一个峰值坐标为(14.5,0.002 79)。可发现振动加速度幅值较大,因此优化目标主要是降低第一个波峰的幅值。

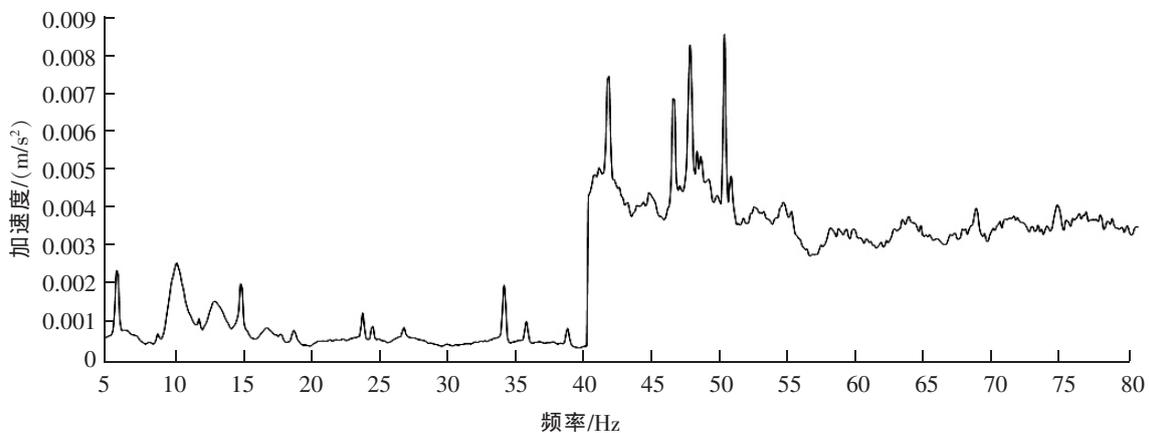


图3 空簧处加速度激励频谱曲线

Fig.3 Acceleration excitation spectrum curve at air spring

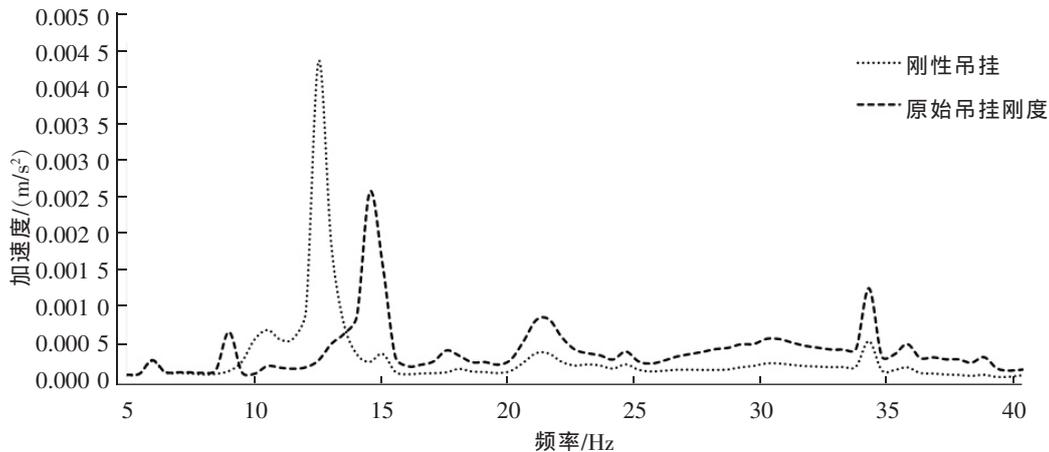


图 4 刚性吊挂和原始吊挂刚度地板中心点频响曲线

Fig.4 Frequency response curve of the floor center point with rigid suspension and original suspension stiffness

2 变压器吊挂刚度的优化设计

动车组乘坐舒适性与地板的垂向振动加速度密切相关,因此优化目标为尽可能降低频响曲线的第一个波峰幅值。另外,由于一阶垂弯振型与频响曲线的第一个波峰相对应,根据模态匹配设计经验为防止车体与转向架发生共振,因此需要确保一阶垂弯频率大于 10 Hz。故优化约束条件定为频响曲线的第一个峰值频率大于 10 Hz。而设计变量即为变压器 6 个吊点的吊挂刚度,由于左右吊挂刚度相同,并且根据吊挂元件为橡胶楔形减振器的特性可知:横向吊挂刚度为纵向吊挂刚度的 0.3 倍,纵向吊挂刚度与垂向吊挂刚度相同。因此,实际设计变量包括 3 个:吊点 1 处纵向刚度 $x_{\text{byq-1}}$,吊点 2 处纵向刚度 $x_{\text{byq-2}}$,吊点 3 处纵向刚度 $x_{\text{byq-3}}$ 。

2.1 拉丁超立方采样试验设计

试验设计的目的在于利用较少的采样点尽可能地反映整个设计空间的特点。拉丁超立方采样方法^[6]是由 McKay 等人于 1979 年提出的,是一种“充满空间”的试验设计方法,属于分层抽样技术。利用“分层”原理在设计空间随机采样,既能保证采样点不聚集,具有较好的空间覆盖性,又能提高抽样效率。具体步骤如下:① 根据需要采样的样本点数 N ,在 M 个设计变量中将每个设计变量等分成 N 个互不重叠的子空间;② 在设计变量的每个子域中进行等概率的随机抽样一次,得到 N 个数据;③ 将 M 个数据组中的元素不重复的随机组合,即可得到 N 个样本点(其中每个变量的每个水平只使用 1 次)。

本次试验设计共有 3 个关键设计变量,根据二阶响应面进行拟合具有 10 个多项式系数,因此需要 10 个样本点。 $x_{\text{byq-1}}, x_{\text{byq-2}}, x_{\text{byq-3}}$ 为初始值取原始吊挂刚度。取值范围为: $x_{\text{byq-1}} \in [1\ 100, 6\ 450]$; $x_{\text{byq-2}} \in [700, 4\ 200]$; $x_{\text{byq-3}} \in [370, 2\ 200]$ 。根据拉丁超立方采样法得出试验方案,并通过仿真计算得出实验数据,见表 2。

2.2 自适应响应面方法优化

对于复杂的非线性优化问题进行求解时,由于初步拟合的近似模型样本空间较大,若直接采用数值方法进行寻优,将会导致响应面函数的精度难以保证,很难得到精确的最优解。因此,这种情况就需要利用自适应响应面法^[7-8]。

在自适应响应面法中,目标函数和约束函数按照以下二阶多项式进行拟合

$$g_l(x) \approx \hat{g}_j(x) = a_{j0} + \sum_{l=1}^n a_{jl} X_l + \sum_{l=1}^n a_{jl} X_l X_k \quad (j=1, \dots, m+1), 1 \leq l < k \leq n \quad (1)$$

式中: m 为约束的个数; n 为设计变量的个数; a_{j0}, a_{jl}, a_{jl} 为二次多项式系数。

自适应响应面法的基本思想是先逐步构造出二阶响应面模型,在后续的迭代过程中继续引入新的设计点来优化二阶响应面。如果在连续两次迭代中所得最优点的响应或者变量的变化小于设定的阈值,则

表2 拉丁超立方采样方案及仿真结果
Tab.2 Latin hypercube sampling scheme and simulation results

试验 编号	试验设计变量/(N/mm)			试验结果	
	x_{byq-1}	x_{byq-2}	x_{byq-3}	频响峰值/(m/s^2)	一阶垂弯频率/Hz
1	3 720	1 151	1 224	0.002 90	14.13
2	4 356	793	754	0.003 99	13.99
3	1 866	1 888	393	0.003 20	13.87
4	2 170	3 499	651	0.002 58	14.16
5	2 859	3 201	614	0.001 97	14.24
6	5 488	2 610	1 468	0.002 43	14.72
7	4 700	2 130	1 754	0.002 57	14.56
8	1 238	1 497	1 009	0.003 01	13.77
9	3 239	2 368	909	0.002 17	14.21
10	6 242	3 824	2 089	0.002 71	15.24

计算结果收敛;如果迭代次数超过设定值,迭代便会终止。采用自适应响应面法的优点就是通过在全局最优点附近缩小设计空间,并通过补充计算过程中新的样本点来重新构造响应面,从而改善响应面的精度和逼近范围。

根据计算思想,将响应值的阈值设定为 0.001,最大迭代次数设定为 23 次。该方法经过 14 次迭代后收敛,并得到最优解。则优化后所有吊挂刚度最优解如表 3 所示,响应和约束的迭代历程曲线如图 5 和图 6 所示。

表3 所有吊挂刚度最优解
Tab.3 Optimal solution of all suspension stiffness

试验设计变量	N/mm		
	纵向(X)刚度	横向(Y)刚度	垂向(Z)刚度
$byq-1$	3 630	1 089	3 630
$byq-2$	3 182	955	3 182
$byq-3$	459	138	459

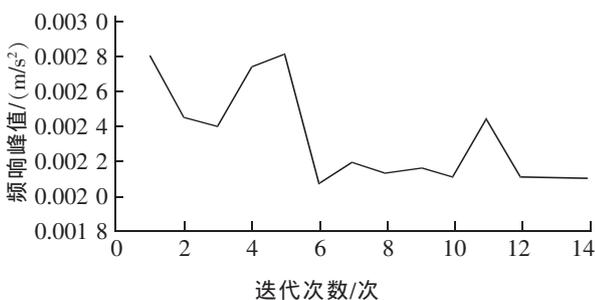


图5 频响峰值优化过程

Fig.5 The peak value of frequency response

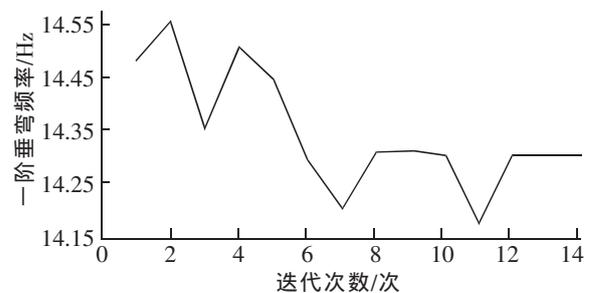


图6 模态频率优化过程

Fig.6 Modal frequency optimization process

3 优化结果的验证

将表 3 中求解的最优刚度值代入原有限元仿真模型进行计算,一阶垂弯模态如图 7 所示,可知优化后一阶垂弯模态频率为 14.31 Hz,大于 10 Hz,满足模态匹配理论要求。并且根据优化后吊挂刚度以及变压器质量,计算出吊挂系统频率为 9.0 Hz,远小于刚性吊挂时的一阶垂弯频率 12.59 Hz,符合车下设备减振设计准则。频响计算结果如图 8 所示,并与原始结果进行比较。可知优化后第一个峰值加速度响应值为 0.002 07 m/s²,相对于原始响应降低了 25.8%,极大的提高了乘坐舒适度和平稳性。综上,确定表 3 为最优方案。

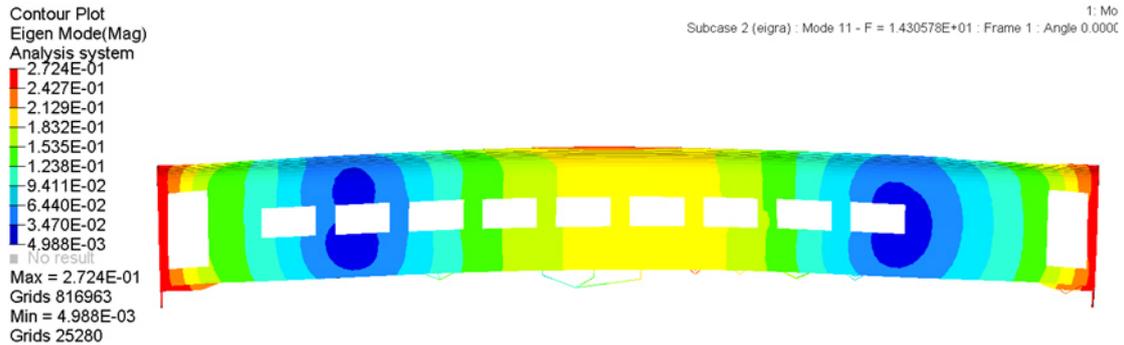


图 7 吊挂刚度优化后一阶垂弯模态

Fig.7 First vertical bending modal after optimization of suspension stiffness

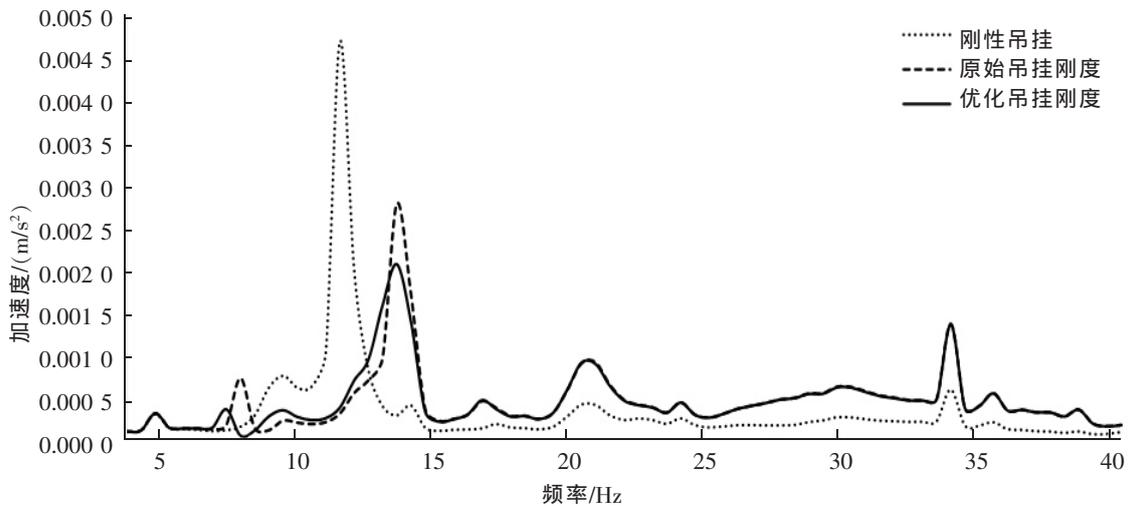


图 8 吊挂刚度优化后地板中心点频响曲线

Fig.8 Frequency response curve of floor center point after optimization of suspension stiffness

通过上述方法进行优化设计,证明通过自适应响应面法寻优求解的结果真实可靠,在保证车体一阶垂弯频率的情况下,达到了降低地板振动的目的,为动车组车下设备的弹性吊挂设计提供了新的思路。

4 结论

本文通过拉丁超立方采样方法进行方案设计,并构建二阶响应面模型,之后基于自适应响应面方法进行优化求解,使得地板响应点加速度降低 25.8%,乘坐舒适性大大提升,同时优化后吊挂系统频率满足车下设备减振设计准则,且一阶垂弯模态频率基本保持不变,达到了预期的减振效果。同时,这一设计方法为动车组相关优化提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 宫岛,周劲松,杜帅妹,等. 高速动车组车下设备对车体振动传递与模态频率的影响机理研究[J]. 机械工程学报,2016,52(18):126-133.
- [2] 罗光兵,曾京. 车下设备的连接方式及悬挂参数匹配研究[J]. 现代制造工程,2013(5):7-12.
- [3] 郭文兰. 动车组车体地板振动特性研究[J]. 铁道车辆,2018,56(6):1-5.
- [4] 兰清群,颜争. 动车组列车车下设备悬挂参数对车体振动的影响分析[J]. 湖南工程学院学报,2017,27(1):41-44.
- [5] 魏锦辉,任伟新. 结构有限元模型修正的自适应响应面方法[J]. 振动与冲击,2013,32(8):114-119.
- [6] 张疆平,关英俊,贾成阁,等. 基于自适应响应面法的数控铣床尺寸优化[J]. 机床与液压,2016,44(19):142-149.
- [7] 赵鹏飞,王丽娟,陈宗渝,等. 基于自适应响应面法的车身结构轻量化设计[J]. 南昌大学学报(工科版),2014,36(3):247-251.
- [8] 兰凤崇,钟阳,庄良飘,等. 基于自适应响应面法的车身前部吸能部件优化[J]. 汽车工程,2010,32(5):404-408.

Design of Elastic Suspension for Traction Transformer of EMU Based on Adaptive Response Surface Method

Wang Yangyang, Gong Dao, Zhou Jinsong

(Institute of Railway and Urban Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In view of the phenomenon that the large vibration of the car body floor leads to uncomfortable riding under the original hanging stiffness of a certain type of EMU, the optimal design of the hanging stiffness of traction transformer of the EMU was carried out. In the process of optimization design, the Latin hypercube design (LHD) method was used to sample. According to the sample data obtained, the adaptive response surface method (ARSM) was introduced to optimize the design of the suspension stiffness of transformer, which avoided the problem that the traditional response surface method was completely dependent on the original sample points. After the design optimization, the hanging stiffness of traction transformer was verified, and it was found that the vertical vibration acceleration of the car body floor was greatly reduced. The hoisting frequency was 9.0 Hz, which was much lower than the first vertical bending frequency of the rigid hanging car body. After modal analysis, the first vertical bending frequency was kept above 10 Hz, which conformed to the requirements of the modal matching for EMU.

Key words: suspension stiffness; adaptive response surface method; optimization design; Latin hypercube design method