

基于断面形状优化的地铁车轮减振降噪研究

柳拥军*, 刘晓芳

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘 要:以降低地铁车辆在运行中产生的轮轨接触噪声为目的,将结构动力优化方法运用于地铁车轮断面外形设计,建立了地铁车轮振动噪声最优化设计的数学模型,编制了相应的算法程序。以我国某地铁车轮为例,给出了以车轮断面外形几何参数为设计变量、车轮结构振动辐射噪声值最小为目标函数的优化计算实例,得到了车轮断面外形几何参数在可行域内的最优解。结果表明,该优化设计方法是成功的,可以有效地降低车轮因振动而产生的噪声。

关键词:地铁车轮;有限元模型;优化设计;遗传算法;振动;噪音

中图分类号:U260.11.1

文献标识码:A

1 引 言

城市铁路作为城市快速轨道交通,极大地方便了城市人口的出行,提高了人们居家择业的机动性和利于城市的环保。但城市铁路也给城市环境带来了诸如噪声、振动、电磁辐射及景观等方面的负面影响,其中以噪声和振动对沿线环境的影响最为突出。轮轨噪声被认为是城市铁路噪声污染的主要来源。轮轨噪声可分为滚动噪声、冲击噪声和尖啸噪声等三种类型,其中滚动噪声是铁道车辆在轨道上正常运行时,由于轮轨表面的粗糙度(振动激励源)、蠕滑力的作用,引起车轮和钢轨径向与横向耦合振动而发出的噪声,是三种类型噪声中最为普遍、持续时间最长的,许多理论和实验工作都围绕这一方面展开。研究表明轮轨滚动噪声由两部分组成:一部分是由于轨道的结构振动所引起,另一部分是由于车轮的结构振动所引起^[1-4]。近年来,通过采用焊接长钢轨、定期修整研磨轨面波纹状缺陷、硬化钢轨表面、控制钢轨表面腐蚀以及在钢轨与轨枕间、钢轨与轨条间采用弹性紧固件、防振钢轨,合理使用道床等措施,由轨道结构振动所引起的噪声问题已经在相当程度上得到了解决^[5]。与此同时车轮结构振动控制技术的发展却明显滞后。根据轮轨噪声理论,要想降低车轮噪声,可以采用以下措施:(1)用高阻尼材料连接轮辋和轮芯,或在

车轮上安装消声装置,把机械振动能转换成热能;(2)磨光车轮踏面,或增加踏面弹性,以达到减小激励的目的;(3)合理设计车轮断面形状,降低车轮的结构振动速度,从而降低车轮噪声^[6]。磨光车轮踏面对于降低车轮噪声的效果非常有限;弹性车轮尽管可以有效减少轮轨冲击噪声,缓和轮轨冲击振动,但是结构复杂,增加制造成本,同时也降低了车轮的承载强度——1998年6月德国高速列车脱轨事故造成100多人死亡,事故原因正是由于所采用的弹性车轮轮毂疲劳断裂,从而引起列车脱轨的^[7]。

因此就技术改进的成本和风险而言,合理设计车轮断面形状是最好的选择。为了控制铁路车轮的振动噪声,确保在动力环境下能够满足要求,改善其结构和机械系统的动态特性,这就涉及到车轮结构的动力优化设计。结构动力优化设计是结构力学的一个新兴分支,是近代的结构有限元法、结构动力学、数学规划方法和数值计算方法及程序设计等诸多学科相互交叉、有机结合的产物。它的任务是根据实际问题中对结构的要求,构建相应的结构动力优化设计数学模型,以计算机和算法语言为工具,将各种优化算法与结构动力学分析和计算相整合,对结构的设计方案包括构件的尺寸、结构的形状和类型以及材料等进行自动化的寻优设计^[8]。

本文以降低地铁车辆车轮在运行中产生的轮轨接触噪声为目的,将结构动力优化原理运用于车轮断面外形设计,在利用大型有限元分析软件ANSYS对地铁车轮进行有限元建模的基础上,建

收稿日期:2008-08-08;修改稿收到日期:2008-11-13.

基金项目:国家自然科学基金(50475059)资助项目.

作者简介:柳拥军*(1967-),男,博士,副教授

(E-mail: yjliu@bjtu.edu.cn).

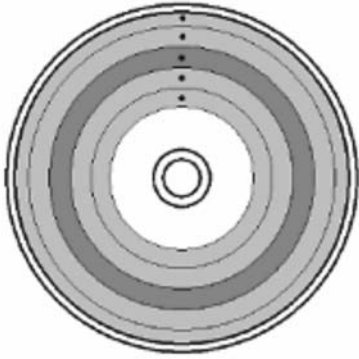


图 3 计算节点的选取
Fig. 3 Select of calculation nodes

声源特性的物理量,其大小反映声源辐射声能的本领,它与声强 I 的关系为

$$W = \oint_s I ds \tag{3}$$

式中 W 为声功率, S 为包围声源的封闭面积。

由于基于有限元模型的声功率数值计算量过大,优化过程不易收敛,而大量的数值试验结果表明,车轮各部分有代表性的节点的振动速度平方加权之和大致与声功率成正比的关系,可以用来表征车轮发射噪音的水平。因此本文采用如下方法来构造优化设计的目标函数。首先在车轮有限元模型中自轮毂到轮辋方向沿辐板按等距离选取 5 个节点如图 3 所示,假定这五个节点在车轮某个模态下的振动位移为 $d_i (i = 1, 2, \dots, 5)$, 则目标函数的表达式为

$$\varphi = \sum_{k=1}^{modes} \sum_{i=1}^5 (f_k \cdot d_i)^2 \frac{S_i}{S_{total}} \tag{4}$$

式中 φ 为车轮减振降噪最优化设计目标函数, f_k 为车轮的 k 阶固有频率(Hz), d_i 为车轮有限元模型中节点 i 的位移(m), S_i 为包含节点 i 的环形部分的面积(m^2), S_{total} 为 S_i 的总和(m^2)。 S_i/S_{total} 表征了每个节点对车轮总体振动量的贡献。

3.2 设计变量

铁道车辆车轮轮辋和踏面的轮廓以及轮毂的设计参数都是按相关的国家标准和铁路行业标准执行的,因此并不是所有车轮的设计参数都可以供设计人员进行修改的。另外,轮对的内侧距与轨距决定了轮辋相对于轮毂位置的偏移尺寸,而轮毂直径取决于车轴直径,也是预先确定的。因此,能够进行参数改进设计的只有车轮辐板位置、辐板角度、辐板与轮辋、轮毂连接处的半径。为了保证优化设计后的车轮断面不会偏离原设计太远,本文选取辐板与轮辋、轮毂连接处的内外侧半径作为设计变量。如图 4 所示,变量 r_1 为辐板与轮辋在车轮内侧

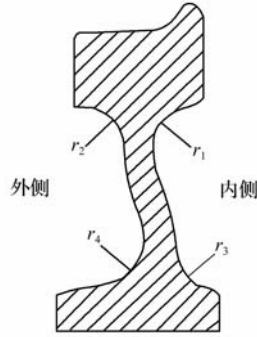


图 4 设计变量示意图
Fig. 4 Overview of the design variables

连接处的半径,变量 r_2 为辐板与轮辋在车轮外侧连接处的半径,变量 r_3 为辐板与轮毂在车轮内侧连接处的半径,变量 r_4 为辐板与轮毂在车轮外侧连接处的半径。因此设计参数可描述为

$$X = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}^T \tag{5}$$

3.3 约束条件

在车轮断面设计时,由于结构尺寸及结构强度性能的限制,几何外形设计变量都有各自的上限及下限,从而形成区域约束,即

$$a_i \leq r_i \leq b_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{6}$$

根据国内外铁道车轮的设计经验,过小的 r_i 会危害车轮的承载强度,而过大的 r_i 则会降低车轮垂向弹性,由于地铁车轮原始断面设计参数是经过多年运营考验的,从工程应用的角度出发,最优设计也不应偏离原设计太远。

4 车轮结构振动噪声优化算法

本文的车轮结构振动噪声优化属于非线性规划问题,是一个约束优化问题,且优化计算的每一次迭代均涉及离散结构的动力响应分析,计算量巨大。显然,传统的动力优化方法,如数学规划法和优化准则法,求解这类问题具有很大局限性。因为传统优化方法大都属于基于梯度的局部优化方法,需要针对特定问题进行繁琐的动力灵敏度分析,通用性和易用性差,而且容易陷入局部极值点,难以有效搜索不连通或非凸的复杂可行域^[12]。遗传算法 GA(Genetic Algorithm) 是一类基于自然选择和群体遗传学机理上的自适应概率搜索的全局优化方法,它不需要梯度信息指导搜索方向,只是以目标函数值作为搜索信息,为求解复杂优化问题提供了一个通用框架^[13,14],很适合于本文所提出的优化问题。但是,遗传算法不能直接计算有约束的优化问题,必须将有约束的优化问题转化为无约束优化问题进行求解。由于本文所提出的优化问题约束

形式为区域约束,因此可以通过特殊的编码把有约束的优化问题转化为无约束问题。

本文中, r_1 和 r_2 属于区间 $[36,43]$, r_3 和 r_4 属于区间 $[47,54]$,将这两个区间都划分为 7 个等分,每个等分的长度 $\delta = 1\text{ mm}$ 。 r_1, r_2, r_3 和 r_4 都采用长度为 3 的二进制编码串来表示, r_1 和 r_2 编码的对应关系如下:

000 = 0	→	36
001 = 1	→	37
...		
111 = 7	→	43

r_3 和 r_4 的编码对应关系则为

000 = 0	→	47
001 = 1	→	48
...		
111 = 7	→	54

四个变量 r_1, r_2, r_3 和 r_4 组成一组 12 位二进制整数,构成一个个体的基因型。上述编码方法保证了搜索空间中一个个体的点与解空间内一个可行解的点有一一对应的关系,同时也保证了经过交叉、变异等遗传算子作用之后产生的新个体在解空间中也有确定的对应解,而不会产生超出约束区间的无效解。采用这种处理方法的另一个原因是在遗传算法中设置最小搜索空间,能够提高遗传算法的搜索效率。

按照上述算法,对于任意一组给定的设计变量,使用 ANSYS 软件进行模态分析和响应分析,得到车轮所选节点的位移、应力等,计算目标函数和优良度。根据计算结果,用遗传算法对设计变量进行优化并给出下一代群体参数。具体实施方法如下:

- (1) 给出一个表示初始设计的有限元计算模型。
 - (2) 随机生成一个初始群体。
 - (3) 运用 ANSYS,计算目标函数和优良度。
 - (4) 执行遗传算法,对个体进行配对、交叉和变异,形成新一代群体。
 - (5) 运用 ANSYS,目标函数和优良度。
- 重复执行步骤(1~5)直至求得最优解。

5 优化设计结果分析及验证

运用上述方法对所选车轮进行了振动噪声最优化设计,不仅得到了最优结果,也输出了部分中间结果,列入表 2。

最后,利用 LMS/SYSNOISE 振动声学软件,采用统计能量法对优化后的 3 个断面设计进行了振动噪声预测。预测结果表明,与原设计相比采用优化后的断面设计 1 的车轮发射噪音的声功率级降低了 3 分贝,采用优化后的断面设计 2、优化后

表 2 不同断面车轮目标函数计算结果

Tab. 2 Results of optimization design

车轮模型	r_1/mm	r_2/mm	r_3/mm	r_4/mm	φ	φ 降低的百分比/%
初始断面设计	40	40	50	50	580117	—
最优断面设计	38	39	52	54	401685	30.8
优化后的断面设计 2	36	42	54	51	421036	27.4
优化后的断面设计 3	42	43	53	54	430879	25.7

的断面设计 3 的车轮发射噪音的声功率级也都降低了 1~2 个分贝。这个结果证明应用遗传算法对地铁车轮进行的最优化设计是成功的。

6 结 论

(1) 地铁车轮辐板与轮辋、轮毂连接处的内外侧半径对于车轮的振动特性具有较大影响,通过对这些半径的优化设计可以有效降低车轮在外界激励作用下的振动幅值,从而降低滚动噪声。本文的计算结果表明,采用这种优化模型理论上最多可以使车轮减低 3 分贝的噪声。当然,这种优化过程的实际效果还需要通过列车运行试验来验证。

(2) 遗传算法计算过程仅涉及目标函数与约束条件的分析比较约束条件不需要用设计变量的显式表示,是离散变量动力优化问题较优越的特点,大大减少了计算工作量。但是,本文针对车轮振动噪声的优化设计过程表明当设计变量增多,离散点增多时,收敛速度呈数量级地下降,如何针对此类问题进一步提高收敛速度是今后应研究的课题。

(3) 城市轨道交通车辆车轮的噪声辐射已经成为主要的交通噪声源之一,而车轮断面的几何形状是车轮振动和噪声辐射的重要影响因素,车轮断面几何形状声学优化问题的目标函数计算涉及大量的有限元计算,具有高度非线性特点,难以用解析或数学规划的方法有效地解决。而遗传算法不仅可以找到车轮辐射噪声优化设计的全局最优化设计,同时还可以得到接近全局最优化设计范围的其他备选设计,在提高优化计算效率的同时,还提供了更多的工程应用选择,因此遗传算法与结构动力分析理论相结合是解决此类问题的有效手段之一,为城市轨道交通振动噪声控制领域的研究开辟了新的途径。

参考文献(References):

[1] THOMPSON D J. Wheel-rail noise generation, Part II: wheel vibration[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1993, **161**: 401-419.

[2] REMINGTON P J. Wheel/railing noise, II: Vibration of the theory[J]. *Acoust Soc Am*, 1987, **81**(6): 1824-1832.

- [3] 圣小珍,雷晓燕. 欧洲铁路轮轨噪声研究方法和进展[J]. 华东交通大学学报, 2001, **18**(3): 6-10. (SHENG Xiao-zhen, LEI Xiao-yan. Methods and advances in study of wheel rail noise for Europe railway[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2001, **18**(3): 6-10. (in Chinese))
- [4] 刘林芽,雷晓燕. 轮轨噪声的预测[J]. 铁道学报, 2004, **26**(1): 101-104. (LIU Lin-ya, LEI Xiao-yan. Prediction of wheel/rail noises[J]. *Journal of The China Railway Society*, 2004, **26**(1): 101-104. (in Chinese))
- [5] 彭 华,杨广庆. 城市轨道交通的噪声与振动及其控制措施[J]. 铁道工程学报, 2001, **12**(4): 38-40. (PENG Hua, YANG Guang-qing. Noise & vibration caused by urban rail transit and measures taken to control them[J]. *Journal of The China Railway Society*, 2001, **12**(4): 38-40. (in Chinese))
- [6] 赵洪伦,许小强. 弹性车轮减噪声学特性研究[J]. 铁道学报, 2001, **23**(6): 26-30. (ZHAO Hong-lun, XU Xiao-qiang. Study on noise reduction properties of resilient wheels[J]. *Journal of The China Railway Society*, 2001, **23**(6): 26-30. (in Chinese))
- [7] 陆 译. ICE-884 高速列车脱轨事故[J]. 劳动保护, 2007, **1**: 74-77. (LU Yi. Derail Accident of ICE-884 High-speed Train[J]. *Labor Protection*, 2007, **1**: 74-77. (in Chinese))
- [8] 陈建军,车建文. 结构动力优化设计述评与展望[J]. 力学进展, 2001, **31**(2): 181-192. (CHEN Jian-jun, CHE Jian-wen. A review on structural dynamic optimum design[J]. *Advances in Mechanics*, 2001, **31**(2): 181-192. (in Chinese))
- [9] (澳)诺顿. 工程噪声和振动分析基础[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993. (NORTON M P. *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993. (in Chinese))
- [10] 商跃进. 有限元原理与 ANSYS 应用指南. 北京: 清华大学出版社, 2005. (SHANG Yue-jin. *Finite Element Theory and ANSYS Application Guide*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国铁道部标准 TB 453-85[S]. 铁道车辆用辗钢整体轮——型式尺寸. (Rolled steel solid wheel used by rolling stock: style and size[S]. Ministry Standard, China Railway Ministry, TB 453-85. (in Chinese))
- [12] NIKOLAOS D. Lagaros, Manolis Papadrakakis, George Kokossalakis, Structural optimization using evolutionary algorithms[J]. *Computers and Structures*, 2002, **80**: 571-589.
- [13] MARCELIN J L. Evolutionary Optimization of Mechanical Structures: Towards an Integrated Optimization[J]. *Engineering with Computers*, 1999, **15**: 326-333.
- [14] 周 明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. (ZHOU Ming, Sun Shu-dong. *Genetic Algorithms: Theory and Application*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. (in Chinese))

Optimizing cross-sectional shape of subway wheel to decrease vibration and noise

LIU Yong-jun*, LIU Xiao-fang

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In this paper, with the purpose of reducing wheel/rail contact noise emitted from subway vehicle travel, the Structural Dynamic Optimum Design theory was introduced to the Cross-sectional shape design of Subway wheel. A mathematical model was established and an effective algorithm was compiled as well. The objective of the optimization method was to find a design of the selected railway wheel, which without the use of damping or tuning devices, emits less vibration/noise compared to the original design. The optimization method used, was based on Genetic Algorithms (GAs). GAs are a robust optimization method that performs regardless of the optimization problem. A FEM model of the wheel was employed, and ANSYS was utilized running in batch mode for the calculation of the objective function values of the population of each generation. Taken the wheel of a subway car as an example, geometric parameters of wheel Cross-sectional shape were taken as the design variables, while the minimal noises emitted from wheel structural vibration was considered as the objective function. The optimal geometric parameter of wheel Cross-sectional shape in feasible field was presented. The results showed that this optimal design method is successful, which can reduce noises emitted from wheel vibration to a great extent.

Key words: subway wheel; FEM; optimal design; Genetic Algorithms; vibration; noise