

扭力梁横梁结构参数对模态频率的影响分析^{*}

周兵,李泉辉[†],吴晓建

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室,湖南 长沙 410082)

摘要:作为扭力梁的关键组成部分,横梁对扭力梁模态频率有着重要影响,为从本质上探究横梁结构大变形下对模态频率的作用机理,以在概念设计阶段为扭力梁结构提供设计参考,开展了扭力梁横梁结构参数对模态频率的影响分析.将扭力梁模型抽象为具有定性特点的简化模型,采用 Hypermesh 建立了相应有限元模型;选取横梁水平位置、开口方向以及开口角度大小等横梁主要参数作为研究对象,采用 Hypormorph 网格变形以及模型重建的方法改变横梁结构参数,分析了这些参数对扭力梁扭转以及垂直弯曲模态频率的影响规律,得到了以上横梁参数与相关模态频率的特性关系曲线.结果表明:扭力梁模态频率随着横梁开口角度的增大呈线性递减,随着横梁开口方向的改变其各阶模态频率呈正弦变化,以及横梁在远离衬套后会使得扭力梁各阶模态频率呈下降趋势.根据扭力梁作用机理分析上述结论,对扭力梁简化模型进行了优化,在不改变横梁质量的情况下,仅优化上述三项横梁结构参数即可较大幅度提高扭力梁模态频率,有效论证了作用机理分析的准确性.

关键词:扭力梁;模态频率;网格变形;横梁结构参数

中图分类号:U461.3

文献标志码:A

Analysis on Effect of Structural Parameters of Torsion Beam Cross Section on Modal Frequencies

ZHOU Bing, LI Quanhui[†], WU Xiaojian

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: As a key component of a torsion beam, the transverse beam has an important influence on the modal frequency of the torsion beam. In order to explore the mechanism of the modal frequency under large deformation of the beam structure in essence, this study provided the design reference for the torsion beam structure in the conceptual design stage and carried out the analysis on the influence of the parameters of the torsion beam cross beam on the modal frequency. The torsion beam model was abstracted as a simplified model with qualitative characteristics, and the corresponding finite element model was established by Hypermesh. The main parameters of the transverse beam such as beam horizontal position, opening direction and opening angle were selected as the research objects. The parameters of the beam

^{*} 收稿日期:2017-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275162,51575167), National Natural Science Foundation of China(51275162,51575167); 国家重点研发计划新能源汽车重点专项项目(2016YFB0100903-2), National Key Research and Development Plan of New Energy Vehicle Special Projects(2016YFB0100903-2); 江西科技学院协同中心开放基金项目(16XTKFYB03), Jiangxi Institute of Science and Technology Cooperative Center Open Fund Project.

作者简介:周兵(1972-),湖南长沙人,湖南大学副教授,博士后

[†] 通讯联系人, E-mail: 441888388@qq.com

structure were changed by using the Hypormorph mesh deformation and model reconstruction. The influence of the parameters on the torsion and vertical bending modal frequencies of the torsion beam was analyzed, and then the characteristic curves of the above cross beam parameters and the related modal frequencies were obtained. The analysis results indicated that the modal frequencies of the torsion beam decreased linearly with the increase of the opening angle of the beam. With the change of the opening direction of the beam, the modal frequencies of the torsion beam showed different sine. For the beam away from the Bush, the modal frequencies of torsion beams showed a downward trend. According to the analysis of the mechanism, the simplified model of the torsion beam was optimized. The modal frequency of the torsion beam can be greatly improved by optimizing the three beam structure parameters without changing the mass of the beam. The accuracy of the mechanism analysis was proved effectively.

Key words: torsion beam; modal frequencies; mesh deformation; beam structural parameters

扭力梁悬架结构简单,在车辆中应用广泛.然而,随着近些年扭力梁开裂或断轴事件频繁出现,它的结构设计已引起厂家的重视.通过结构优化对车辆平顺性、操稳性及自身疲劳寿命等性能进行综合考量成为一个重要研究课题.扭力梁结构对车辆性能的影响在于扭力梁结构参数决定了其模态频率及振型,因此,扭力梁固有频率应该尽量选择大于车体其他结构以及人体的固有频率.需要注意的是,作为扭力梁的核心组成部分,扭力梁横梁的结构参数是模态频率设计、疲劳寿命保障的重要参数,它的优化设计是掌握扭力梁设计的关键.良好的横梁参数既可以避免扭力梁自身刚度的降低,提升扭力梁的模态振动频率,减少结构共振的产生,从而提高扭力梁的疲劳寿命,也可以直接或者间接地改善汽车的乘坐舒适度和行驶稳定性.目前,国内外学者应用了不同的方法对扭力梁结构参数优化以及模态频率进行了研究,高晋等^[1]详细分析了扭力梁各结构参数对悬架 K&C 特性的影响.罗明军等^[2]基于整车道路实验和工作应变模态识别法得到后扭力梁的低阶模态频率,分析了衬套边界条件对于扭力梁模态频率的影响.范大力等^[3]分析了衬套刚度对扭力梁悬架模态分布的影响.Lee 等^[4]对扭力梁进行参数化建模,分析计算了扭力梁截面参数对其扭转刚度的影响.但以上研究都是建立在特定的扭力梁模型上的优化,不具备普适性,而且没有系统地建立起扭力梁最重要的横梁与模态频率的对应关系,无法从机理上给出横梁设计方法.

基于此,有必要应用有限元虚拟设计方法进行模态分析,得出扭力梁横梁参数与模态频率的对应关系,在概念设计阶段选择合适的扭力梁横梁结构,尽量提高扭力梁的模态频率,优化扭力梁的性能,将

对扭力梁横梁的匹配设计具有重要的应用价值.文章通过 Hypermesh 软件建立了扭力梁的有限元简化模型,根据扭力梁的结构,选择了扭力梁横梁水平位置、横梁开口方向、横梁开口大小(侧板角度)作为设计参数,研究并总结不同扭力梁横梁结构对于扭力梁模态频率的影响及规律.

1 扭力梁有限元模型的建立

典型扭力梁结构如图 1 所示.目前,国内不少企业对于扭力梁的设计优化是基于模型反求之后的实车测试,甚至在产品发生故障之后才予以弥补,这样不仅浪费时间,降低品牌形象,而且优化空间较小.文章提出在扭力梁的概念设计阶段选择合适的横梁参数配置来优化扭力梁的模态频率.由于概念设计阶段不需要完整的扭力梁模型,因而文章根据扭力梁结构图将其简化成如图 2 所示的模型^[5],以方便探究扭力梁横梁结构参数对于其固有频率的影响.

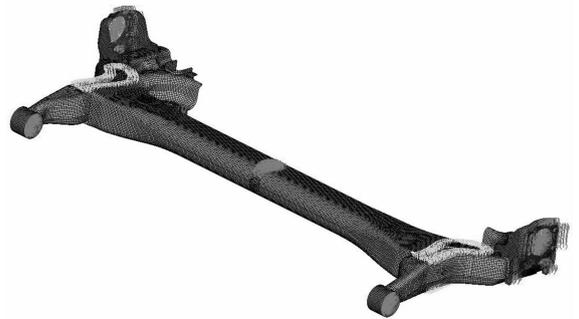


图 1 扭力梁结构图

Fig. 1 Structural diagram of torsion beam

采用 CATIA 建立扭力梁简化模型,将简化模型导入 Hypermesh,抽取其中面后采用板壳单元对

模型进行离散,然后对其进行网格划分,得到图 3 所示简化扭力梁有限元模型,整个模型共划分为 21 937 个单元,22 302 个节点.

弹性结构在任意时刻的振动形状是所有模态的线性组合,即

$$u = \sum \theta_i \xi_i \tag{4}$$

其中 u 为某单个节点的节点位移; ξ_i 为第 i 阶模态位移.

文章利用 Hypermesh 中的 Opstruct 对扭力梁的结构进行模态分析,得到扭力梁各阶模态频率与振型.由于模态分析中,前 6 阶自由模态为扭力梁的刚性模态,所以不予考虑,而高阶模态由于频率过大,对于扭力梁的动力学特性影响很小,也可以予以忽略.分析得到初始扭力梁简化模型的 7~9 阶模态特征参数,如表 1 所示.

表 1 原扭力梁结构模态分析结果(7~9 阶)
Tab.1 Modal analysis results of the original torsion beam structure (7~9 order)

阶数	固有频率/Hz	振型
7	12.70	扭力梁整体一阶扭转
8	67.55	扭力梁整体一阶垂向弯曲
9	83.85	扭力梁整体一阶纵向弯曲

3 研究方法

3.1 横梁结构参数的选取

文献[7-8]定义了影响扭力梁横梁结构的三个具体参数,以此为参考,在图 4 中,取横梁中心距离衬套中心的长度 c 作为横梁水平位置参数、横梁截面开口在纵臂上的开口方向的角度 α 以及横梁的两个侧板所形成的角度 β 作为横梁可以调整的截面参数.选择这三个参数来探究横梁对于扭力梁模态频率的影响并一定程度上优化扭力梁简化模型.

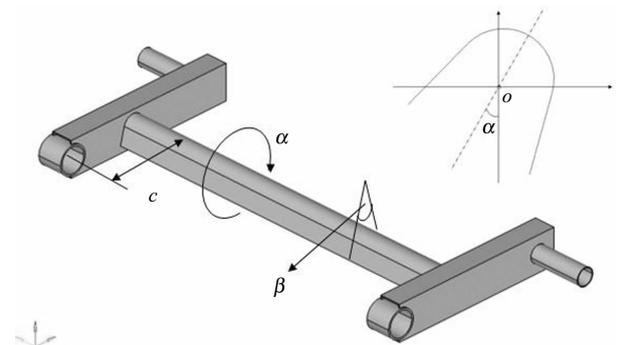


图 4 横梁结构参数示意图
Fig.4 Schematic diagram of cross beam structural parameters

图 2 扭力梁简化模型

Fig.2 Simplified model of torsion beam

图 3 扭力梁有限元简化模型

Fig.3 Simplified finite element model of torsion beam

2 模态分析理论

振动模态是弹性结构固有的、整体的特性,模态分析方法可用于研究扭力梁结构的固有频率和振型,进而明确扭力梁在易受影响的频率范围内的各阶主要模态的特性,以对扭力梁进行结构上的优化.振动模态分析方法中,自由模态分析是在不考虑结构阻尼以及外界影响的情况下进行的,因而,可通过自由模态分析得到受到外界激励后自由振动的共振频率.自由模态分析所对应的运动方程^[6]为:

$$K\theta \sin(\omega t) - \omega^2 M\theta \sin(\omega t) = 0 \tag{1}$$

将公式(1)简化为:

$$(K - \omega^2 M)\theta = 0 \tag{2}$$

式中: K 代表刚度矩阵; ω 为圆频率; M 为质量矩阵; θ 为特征向量.

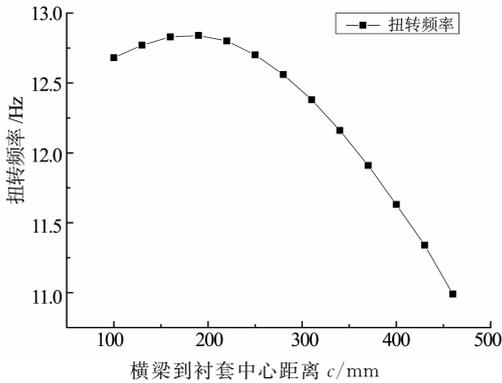
由公式(2)可得:

$$\det(K - \omega M) = 0 \tag{3}$$

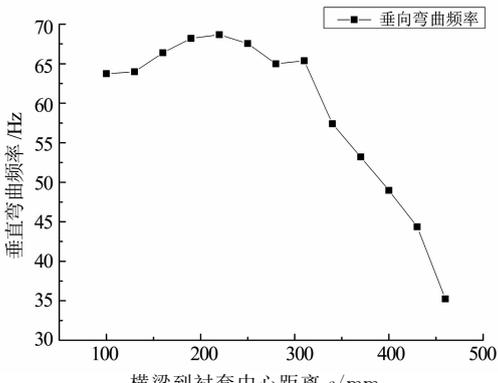
根据公式(3)可获得第 i 阶固有频率 ω_i 和相对应的特征向量(振型) θ_i . 在自由(或强迫)振动下线

3.2 横梁水平位置对扭力梁模态频率的影响

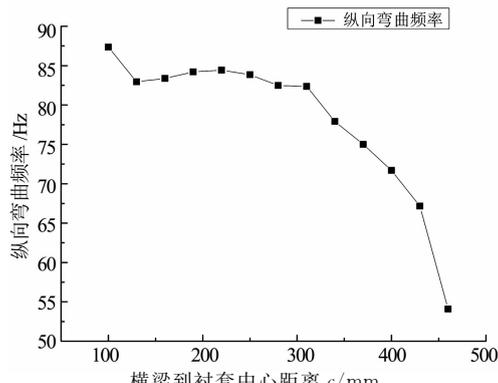
取横梁中心与衬套中心的距离 c 作为横梁水平位置参数,通过 Hypermesh 对扭力梁横梁网格的水平位置进行水平方向上的平移并重新建立模型,采用 Opstruct 求出这些扭力梁的 7~9 阶模态频率 (f_1, f_2, f_3),将数据整理成图 5 所示的关系图^[9].



(a) 横梁水平位置 c 与扭转频率关系曲线



(b) 横梁水平位置 c 与垂直弯曲频率关系曲线



(c) 横梁水平位置 c 与纵向弯曲频率关系曲线

图 5 横梁水平位置 c 与扭力梁模态频率的关系
Fig. 5 Relationship between horizontal position of beam c and modal frequency of torsion beam

从图 5 可以发现;

1) 随着横梁中心到衬套中心距离 c 的增加,扭

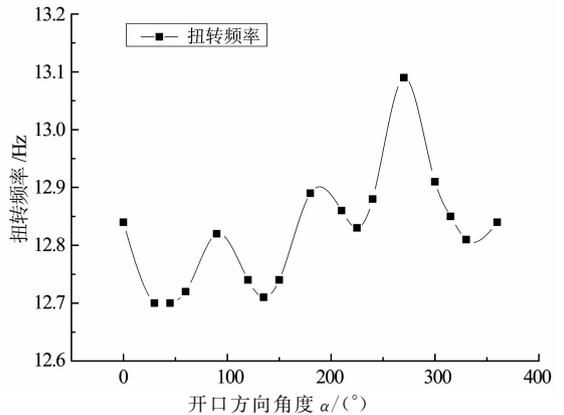
力梁扭转频率 f_1 经历了一个先增后减的过程. 在 $c = 190 \text{ mm}$ 时, f_1 取极大值 (12.84 Hz); 当 c 大于 190 mm 后, 随着距离 c 的增加 f_1 开始单调下降.

2) 随着横梁中心到衬套中心距离 c 的增加, 扭力梁垂直弯曲频率 f_2 经历了一个先增后减的过程. 在 $c = 220 \text{ mm}$ 时, f_2 取得极大值 (68.68 Hz); 当 c 大于 220 mm 后, 随着距离 c 的增加 f_2 开始单调下降.

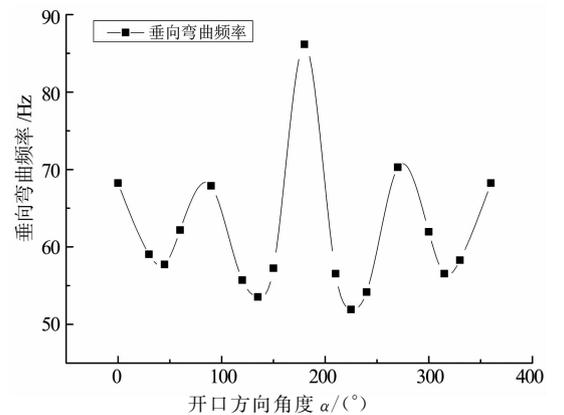
3) 随着横梁中心到衬套中心距离 c 的增加, 扭力梁纵向弯曲频率 f_3 经历了一个先增后减的过程. 在 $c = 220 \text{ mm}$ 时, f_3 取得极大值 (84.42 Hz); 当 c 大于 220 mm 后, 随着距离 c 的增加 f_3 开始单调下降.

3.3 横梁开口方向对扭力梁模态频率的影响

取横梁开口方向竖直向下为初始值 0 , 把图 4 中横梁开口与数值方向夹角 α 作为变量^[10], 将横梁在纵臂平面上多次沿顺时针方向旋转 30° 与 45° 作为 α 取值, 使用 Hypermesh 对有限元模型进行参数调整. 得到 $0 \sim 360^\circ$ 各种开口方向下的扭力梁有限元模型, 然后对其进行模态分析, 得到扭力梁模态频率 (f_4, f_5, f_6) 与扭力梁开口方向之间的关系如图 6 所示.



(a) 横梁开口方向 α 与扭转频率关系曲线



(b) 横梁开口方向 α 与垂直弯曲频率关系曲线

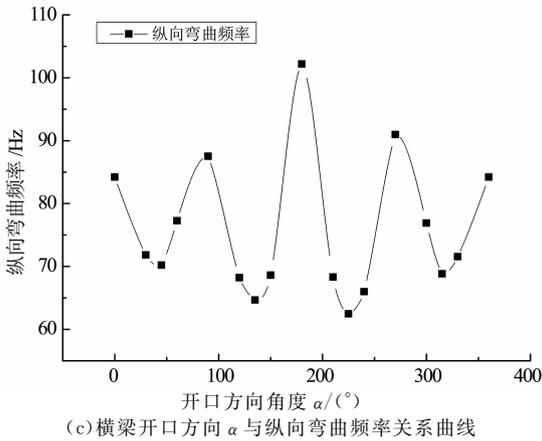


图 6 横梁开口方向 α 与扭力梁模态频率的关系
Fig. 6 Relation between the opening direction of the beam α and the modal frequency of the torsion beam

由图 6 可以得到如下结论:

1) 随着开口方向角度 α 的增大, 扭力梁扭转频率出现正弦波动. 在 $\alpha = (k\pi/4 - \pi/4), k = 1, 3, 5, 7$ 时, f_4 存在波峰即局部极大值; 在 $\alpha = (k\pi/4 - \pi/4), k = 2, 4, 6, 8$ 时, f_4 存在波谷即局部极小值, 并且在 $\alpha = 3\pi/2$ 时, f_4 取得最大值 (13.09 Hz).

2) 随着开口方向角度 α 的增大, 扭力梁垂向弯曲频率出现正弦波动. 在 $\alpha = (k\pi/4 - \pi/4), k = 1, 3, 5, 7$ 时, f_5 存在波峰即局部极大值; 在 $\alpha = (k\pi/4 - \pi/4), k = 2, 4, 6, 8$ 时, f_5 存在波谷即局部极小值, 并且在 $\alpha = \pi$ 时, f_5 取得最大值 (86.16 Hz).

3) 随着开口方向角度 α 的增大, 扭力梁纵向弯曲频率出现正弦波动. 在 $\alpha = (k\pi/4 - \pi/4), k = 1, 3, 5, 7$ 时, f_6 存在波峰即局部极大值; 在 $\alpha = (k\pi/4 - \pi/4), k = 2, 4, 6, 8$ 时, f_6 存在波谷即局部极小值, 并且在 $\alpha = \pi$ 时, f_6 取得最大值 (102.2 Hz).

3.4 横梁开口角度大小对扭力梁模态频率的影响

取扭力梁的两个侧板的角 β 作为其横梁开口角度大小的参数, 使用 Hypermesh 中的 Hypermorph 模块对模型参数进行网格变形以修改横梁截面参数, 得到不同的有限元模型.

Hypermorph 变形模块具有良好的操作界面, 能够简单地实现有限元模型的网格变形, 除此之外, 它还能够保证变形后网格的质量以及相关的 RBE2 等类型单元的连接关系^[1]. Hypermorph 还能够对有限元模型进行相应的参数化建模, 并能够通过控制参数的改变继而实现对有限元模型的网格变形, 其实现过程见图 7.

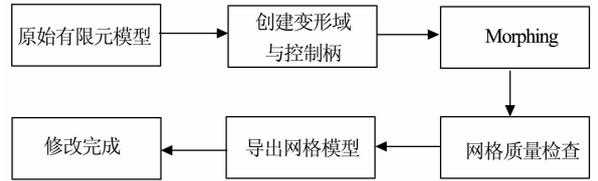


图 7 Hypermorph 网格变形流程
Fig. 7 Mesh deformation process of Hypermorph

如图 8 所示, 在 Hypermorph 中选择扭力梁截面中最上面和最下面共三个 Domains(控制柄)作为基准点, 然后确定以上三点中心点为上圆弧中心, 以此为参考使用 Morph 模块修改扭力梁横梁的截面上两侧的 Domains(控制柄)来调整横梁截面上半部分的圆弧半径及弧度参数, 得出不同的扭力梁横梁截面; 而后计算得出其横梁的开口角度大小(侧板角度) β 作为变量参数, 探究扭力梁横梁开口角度大小对于扭力梁固有频率的影响, 以便于概念设计阶段选择合适的横梁截面参数.

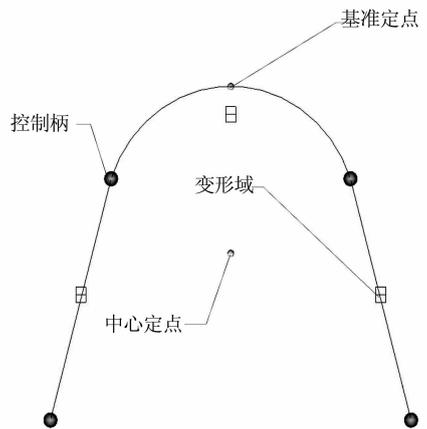


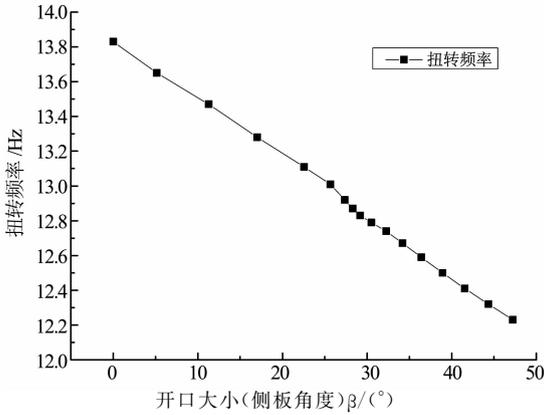
图 8 扭力梁控制柄与变形域示意图
Fig. 8 Schematic diagram of control handle and deformation domain of torsion beam

经过网格变形后得出不同开口大小的扭力梁有限元模型, 对这些模型进行模态分析, 得到横梁开口角度大小与扭力梁模态频率 (f_7, f_8, f_9) 的关系, 如图 9 所示.

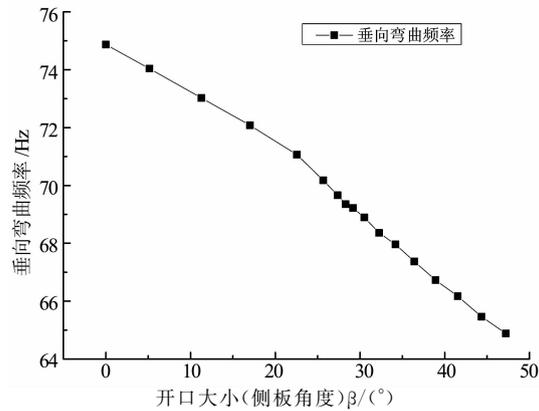
1) 从图 9(a) 中可以看出, 随着扭力梁侧板角度 β 的增加, 扭力梁扭转频率 f_7 呈线性单调递减, 在扭力梁适用的侧板角度范围内, 当 $\beta = 0$ 时, 其扭转频率出现最大值 (13.83 Hz)

2) 从图 9(b)(c) 中可以看出, 随着扭力梁侧板角度 β 的增加, 扭力梁弯曲频率 f_8, f_9 呈线性单调递减, 在扭力梁适用的侧板角度范围内, 当 $\beta = 0$ 时, 其弯曲频率出现最大值 (74.87 Hz, 90.62 Hz)

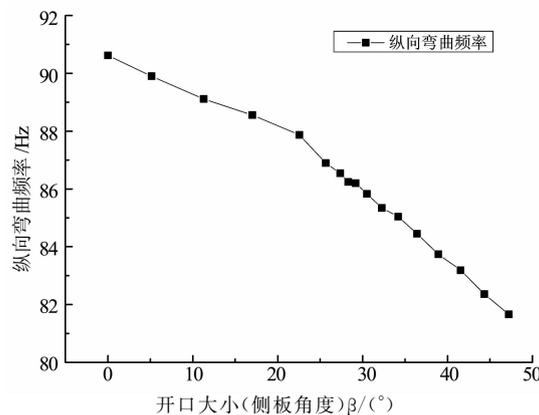
在以上三个参数中,可以优先选择设计横梁开口角度大小,其次为横梁开口方向,最后为横梁水平位置进行优化设计.



(a) 横梁开口角度大小 β 与扭转频率关系曲线



(b) 横梁开口角度大小 β 与垂向弯曲频率关系曲线



(c) 横梁开口角度大小 β 与纵向弯曲频率关系曲线

图9 横梁开口角度大小 β 与扭力梁模态频率的关系

Fig. 9 Relationship between the opening angle size of the beam β and the modal frequency of the torsion beam

3.5 结果分析与优化

综合以上分析,该扭力梁简化模型在三个横梁参数 c 取 190 mm、 α 取 270°和 β 取 0°时,扭力梁简

化模型可综合取得最大的模态频率与总体性能.其中优化前后模型的扭转模态振型图对比如图 10 所示.

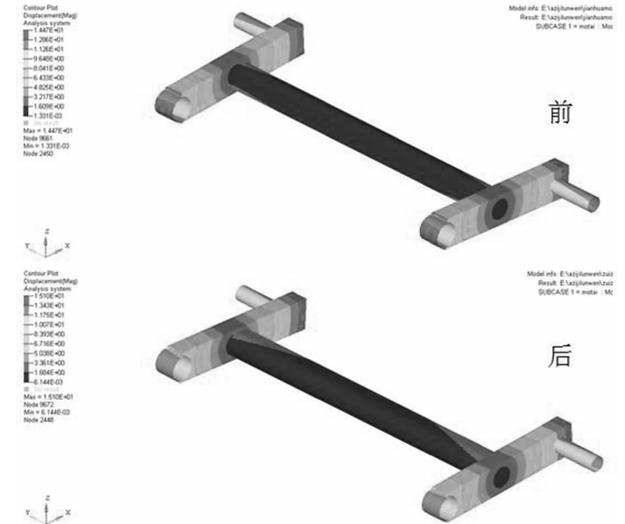


图 10 最终优化模型振型对比图

Fig. 10 Modal contrast diagram of final optimization model

此时的模态频率与初始值进行对比如表 2 所示.可以发现优化后的扭力梁第七、八、九阶模态频率分别增加了 14.88%、24.00%和 39.42%,优化效果较为明显.以此为基础设计完整的扭力梁模型,在保证其质量不变的前提下,可以最大程度减少优化步骤,增加扭力梁模态性能.

表 2 最终优化结果对比

Tab. 2 Comparison of final optimization results

模态阶数	初始值 / Hz	优化后数值 / Hz	优化率 / %
七阶模态	12.70	14.59	14.88
八阶模态	67.55	83.76	24.00
九阶模态	83.85	116.9	39.42

4 结论与展望

综合考虑各关键参数对扭力梁模态频率的影响,将这些影响因素总结起来,为概念设计提供设计准则^[12].在扭力梁概念设计阶段,通过有限元简化模型,选定横梁水平位置、横梁开口方向、横梁开口角度大小作为参数研究了扭力梁横梁结构参数对扭力梁模态频率的影响,并进行比较,得出以下结论:

1) 扭力梁的扭转频率以及弯曲频率在扭力梁横梁中心到衬套中心距离增加的过程中先单调递增然后再迅速单调递减,只是二者拐点不一样,均在接近

纵臂中间的位置存在局部最大值。

2) 扭力梁的扭转频率以及弯曲频率随着横梁开口方向的改变呈正弦波动,在扭力梁开口方向为正交方向时,扭力梁扭转及弯曲频率均出现极大值(波峰)。其中,在横梁开口方向正对轮心时,扭力梁扭转频率最大。在横梁开口方向垂直向上时,扭力梁弯曲频率最大。

3) 扭力梁的扭转频率以及弯曲频率随着扭力梁开口角度大小的增加,呈线性单调递减。

目前本文只是从扭转频率方面分析扭力梁横梁主要参数的影响,后续将该设计方法用于实际的扭力梁优化设计,并从悬架其余性能方面对比分析本分析结论的准确性。

参考文献

[1] 高晋,杨秀建,牛子孺,等. 扭转梁悬架性能影响因素分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2014,35(6):627-634.
GAO J, YANG X J, NIU Z R, *et al.* Influencing factors analysis of twist beam suspension characteristic [J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science), 2014,35(6):627-634. (In Chinese)

[2] 罗明军,张华,侯之超,等. 汽车后扭力梁橡胶衬套复杂边界条件的分析[J]. 机械设计,2014,31(1):84-88.
LUO M J, ZHANG H, HOU Z C, *et al.* Analysis for complicated boundary constraint of rubber bushing on rear torsion beam [J]. Journal of Machine Design, 2014,31(1):84-88. (In Chinese)

[3] 范大力,董大伟,丁渭平,等. 衬套刚度对扭力梁悬架模态分布影响研究[J]. 噪声与振动控制,2015,35(6):47-51.
FAN D L, DONG D W, DING W P, *et al.* Research on the effect of bushing stiffness on modal distribution of torsional beam suspension [J]. Noise and Vibration Control, 2015,35(6):47-51. (In Chinese)

[4] LEE D C, YANG C H. An analytical approach for design and performance evaluation of torsion beam rear suspension [J]. Finite Elements in Analysis and Design,2013,63:98-106.

[5] SILVERIRA M E, VASONCELOS L S D, CHRISTOFORO A L. Numerical simulation of the kinematic behavior of a twist beam suspension using finite element method [J]. Journal of Mechanical Engineering and Automation,2012,2(6):150-

158.

[6] 周兵,李宁,吴晓建,等. 减振器阻尼对扭力梁疲劳寿命的影响[J]. 中国机械工程,2017,25(5):544-549.
ZHOU B, LI N, WU X J, *et al.* Effects of shock absorber damping on fatigue lifes of torsion beams [J]. China Mechanical Engineering, 2017,25(5):544-549. (In Chinese)

[7] 曹树谦,张文德,萧龙翔. 振动结构模态分析:理论、实验与应用[M]. 天津:天津大学出版社,2001:18-12.
CAO S Q, ZHANG W D, XIAO L X. Modal analysis of vibration structures: theory, experiment and application[M]. Tianjin: Tianjin University Press,2001:18-22. (In Chinese)

[8] 晏海军. 某扭转梁悬架运动学及动力学分析与优化[D]. 长沙:湖南大学,2014.
YAN H J. Analysis and optimization of a torsion beam suspension kinematics and dynamics[D]. Changsha: Hunan University,2014. (In Chinese)

[9] 于金朋,张卫华,孙帮成,等. 高速车体结构参数对车体模态频率的影响分析[J]. 铁道学报,2015,37(9):32-37.
YU J P, ZHANG W H, SUN B C, *et al.* Analysis on effect of structure parameters of high-speed car body on modal frequencies [J]. Journal of the China Railway Society,2015,37(9):32-37. (In Chinese)

[10] 干宇文,张立民. 高速列车承载结构对车体模态频率的影响[J]. 设计与研究,2013,40(11):26-28.
GAN Y W, ZHANG L M. Effects of high-speed train load bearing structure on the car-body's modal characteristics [J]. Design and Research. 2013,40(11):26-28. (In Chinese)

[11] 赵阳阳,刘士煜,张伟. 车体下吊吊挂方式和弹性悬置质量对车体模态频率的影响[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2012,30(3):326-333.
ZHAO Y Y, LIU S Y, ZHANG W. The influence of hanging way and the flexible suspension mass on the body modal frequency [J]. Journal of Jiamusi University(Natural Science), 2012,30(3):326-333. (In Chinese)

[12] 黄远,朱正庚,郭亚飞. 大震下钢框架梁柱节点调弯和变形机制与设计方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(7):16-22.
HUANG Y, ZHU Z G, GUO Y F. Concerted deformation mechanism and design method of steel frame beam-column joints under rare earthquakes[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017,44(7):16-22. (In Chinese)