

跨座式单轨车辆转向架构架结构优化设计

谢 双* 陈明勇

重庆市轨道交通（集团）有限公司，重庆 401120

摘 要：跨座式单轨车辆的关键部件之一就是转向架，车辆行驶运行的安全性直接与转向架结构性能有密切的联系。本文主要在Hyper Works/Optistruct平台基础上，联合拓扑优化技术，对跨座式单轨车辆转向架结构进一步改进和优化，结果显示跨座式单轨车辆转向架可以在满足车辆运行性能的基础上，适当将原有构架用材减少，可以有效保证结构刚度。希望通过本文的分析和总结可以为今后的跨座式单轨车辆转向架结构的进一步优化设计起一定的参考意义。

关键词：跨座式单轨车辆；转向架；构建结构；优化设计

一、前言

跨座式单轨交通作为交通方式的一种，与其他交通方式相比，具有明显的优势。比如跨座单轨交通可靠性较强、技术较先进、建设周期剪短、造价较低等。以上优点促使跨座式单轨交通在今后有广阔的发展前景^[1]。车辆技术直接关系城市轨道交通的发展，而作为车辆重要组成部分的转向架，对车辆运行安全性起到至关重要的作用^[2]。车辆转向架是各个零部件安装的基础，主要承受来车体的纵向力、横向力以及垂向力。转向架结构性能直接影响车辆运行安全性、乘坐舒适性以及走行平稳性^[3]。单根轨道支持并稳定和导向作用是跨座式单轨的主要特征，车轮材料采用橡胶轮胎，适用于跨骑在轨道梁上运行形式，此种交通运行模式已经在重庆广泛使用，适应性及爬坡性强、噪声低、转弯半径小是跨座式单轨的特点。该交通运行模式在地形地貌较为复杂的地区具有很高的实用性。高架桥桥墩宽度为2 m，所占据的地面宽度较小，使得该高架轨道交通与其他轨道制式桥墩占地宽度明显减少，可将高架桥墩修建于城市道路两旁绿化带或者道路中央处，具有占地遮挡小、选线灵活、对周围干扰小等诸多优势。

以下是本文在Hyper Works/Optistruct平台基础上，联合拓扑优化技术，对跨座式单轨车辆转向架结构进一步改进和优化的分析。

二、优化设计理论基础分析

（一）结构优化设计内容分析

结构优化设计的内容较多，比如形状的进一步优化，尺寸的进一步优化，拓扑优化等^[4]。在形状和尺寸优化技术较为熟练的领域为生产制造行业。不断优化并完善是现阶段我国拓扑优化技术最显著的发展特点。拓扑优化技术在产品研发初期非常适用，该技术可以进一步对优化结构设计，将结构的拓扑关系改变。由此可见拓扑技术在今后是该领域工作人员关注的重点^[5]。

（二）拓扑优化设计概念分析

所谓拓扑优化设计就是提前标定好设计区域和相关材料特性，借助结构优化方法，得到结构布局相应的形式和构件尺寸，需要注意的问题是所得到的结构布局形状和构件尺寸不尽量不要满足自身的约束条件，还要确保目标函数的最优化性。拓扑优化设计目标函数的结构应变能最小，保持体积和结构两者之间的平衡性是约束条件的主要内容^[6]。其中被优化后的数学模型如下面的公式所示。

$$\text{Min}C = F^T D$$

$$s.t.f = (V - V_1) / V_0$$

$$X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max}$$

$$F = KD$$

*通讯作者：谢双，1986年4月，男，汉族，四川绵阳人，现任重庆市轨道交通（集团）有限公司车间副主任，工程师，本科。研究方向：轨道交通（车辆）。

上述数学模型公式中, 结构应变能— C 、结构充满材料的体积— V 、结构外载荷矢量— F 、单元密度小于 X_{min} 的材料体积— V_1 、剩余材料的百分比— f 、结构设计域体积— V_0 、单元设计变量— X_i 、单元密度上限— X_{max} 、单元密度下限— X_{min} 、结构刚度矩阵— K 。

三、改进转向架结构及设计空间

转向架牵引电机悬挂方式有不同的分类, 一类是架悬、一类是轴悬, 还有一类是体悬。现阶段一台独立的牵引电机驱动跨座式单轨转向架中的单根轴, 其中促使牵引电机完成跨座式单轨转向架驱动任务的是减速器。构架稳定轮支架上要安装减速器和电机。电机轴与减速器之间的连接依靠联轴器, 电机驱动轴和输出轴呈垂直的位置关系^[7]。借助体悬的方式将牵引电机悬挂在车体底架上, 此种悬挂方式可有效控制转向架构架质量, 并与高蛇形稳定临界速度保持相对一致。此外, 体悬方式还可以确保列车整体运行过程中的稳定性, 进一步提升牵引电机的可维护性和可靠性, 对于列车整体运行速度的提升有重要帮助。

本次研究中进一步改进转向架构架结果的整体思路如下: 基于架构中心相对对称的优化目的, 将原设计牵引电机支座去除, 将原有半轴设计改为通轴设计。其中拓扑优化转向架构架CAD模型如图1所示。该模型与原有的转向架构架相比较, 半轴驱动形式是其驱动轴驱动主要模式, 在结构优化的基础上将其改为通轴驱动形式, 由此得出了构架优化区域和非优化区域, 实现了网络划分转向架构架整体的目的。其中优化转向架构架网格模型如图2所示。

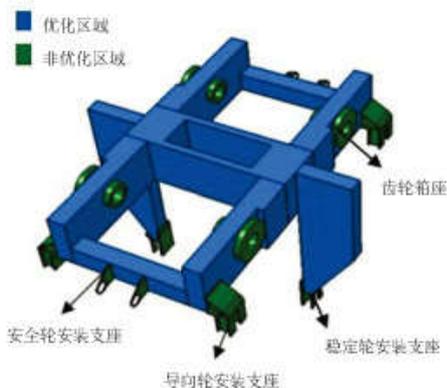


图1 拓扑优化转向架构架CAD模型

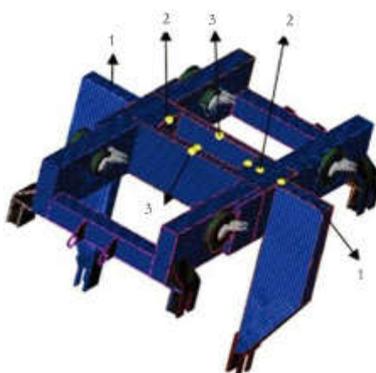


图2 优化转向架构架网格模型

四、构建拓扑优化模型

(一) 转向架构架材料的选择

16 MnR是跨座式单轨转向架构架的主要材料, 其中此种材料的具体参数如下: $7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 为此种材料的密度, $2.09 \times 10^5 \text{ MPa}$ 为此种材料的弹性模量, 396 MPa为此种材料的屈服极限, 566 MPa为此种材料的强度极限, 340 MPa为此种材料的许用应力^[8]。

(二) 荷载和约束分析

集合跨座式单轨车辆的运行特点, 本次研究中分别选择了三种具有代表意义的工况, 第一种为满载静止工况; 第

二种为转弯制动工况；第三种为转弯牵引工况，分别对以上三种工况下构架的受力情况进行分析。其中详细的分析过程见表1所示。

表1 三种工况荷载及约束计算条件分析

工况类型	载荷	约束
工况1: 满载静止工况	位置1(如图2)施加垂直载荷, 将预压力施加在导向轮和稳定轮上;	齿轮箱座处施加x、y、z方向的约束, 约束其6个自由度
工况2: 转弯制动工况	位置1(如图2)施加垂直载荷; 将预压力施加在导向轮和稳定轮上; 位置2(如图2)施加侧向力; 位置3(如图2)施加惯性力	齿轮箱座处施加x、y、z方向的约束, 约束其6个自由度
工况3: 转弯牵引工况	位置1(如图2)施加垂直载荷; 将预压力施加在导向轮和稳定轮上; 位置2(如图2)施加侧向力; 位置3(如图2)施加惯性力	齿轮箱座处施加x、y、z方向的约束, 约束其6个自由度

(三) 拓扑优化模型设计

拓扑优化时采用变密度法, 此种方法的发展基础为均匀化方法。其中变密度法的基本思路是, 引入一种密度可变材料, 该材料的密度在[0,1], 离散连续体结构, 将其变为有限元结构, 随后将设计变量看作每个单元的密度, 由此就实现了结构优化问题到单元材料最优分布问题的转变。其中拓扑优化构架有限元模型如图3所示。六面体网络是该有限元模型采取的划分模式, 128575为单元总个数, 164940为节点个数。在优化设计理论基础下, 将数学模型问题设计给优化对象, 其中具体描述如下: 设计区域柔度最小的为目标函数; 体积分数是约束条件, 体积分数 = (当前迭代的总体积-初始非设计区域体积)/初始设计体积, 为计算体积分数的公式, 对体积分数的要求是最大为0.3。纵向、横向两中心平面对称构架。



图3 拓扑优化构架有限元模型

五、拓扑优化结果分析

Optistruct计算结束后, 要想对拓扑优化后的结果进行查看需要借助HyperView。0.3可以为密度阈值。其中拓扑优化后的结果见图4~图6。



图4 工况1拓扑优化后的结果



图5 工况2拓扑优化后的结果



图6 工况3拓扑优化后的结果

分析上图可以发展, 3种工况下的稳定轮安装支架和齿轮箱座安装支架的拓扑优化结果是一样的。其中工况2和工况3的拓扑优化结果高度一致。工况2和工况3的拓扑优化结果与工况1相比较, 在施加惯性力和侧向力的情况下, 产生了竖梁。其中竖梁位于图2位置2和3处。斜撑结构出现在了两侧侧向力竖梁处。工况2和工况3的拓扑优化结果中, 安全轮安装支架位置出现了斜撑结构; 当前转向架与走行轮安装之间的形状具有很高相似性, 除去电机安装座稳定轮支架后, 起到的优化效果是非常显著的, 中间的斜撑可以起到较强的加固作用, 这与力的传递效果高度一致^[9]。其中工况1中一共迭代25次。工况2中一共迭代28次, 工况3中一共迭代29次。在逐步增加迭代的过程中, 应变能的趋势为逐渐下降, 其中前4次拓扑优化变化最为明显, > 60%为应变能下降幅度, 第5次迭代到最后一次迭代, 平缓为应变能变化特

征。整体分析可见拓扑优化之后的转向架构架应变能,与初始应变能相比较,下降趋势明显,有明显的优化效果。

六、结语

综上所述,跨座式单轨车辆转向架在未来的开发与优化设计上,在满足车辆运行性能的基础上,可以尝试传动机构多种布局方式,适当将原有构架用材减少,促使转向架结构进一步简化、轻量化,实现构架中心的完全对称性,这对提高车辆运行平稳性有重要意义。

参考文献:

- [1]王振,韩晓辉,樊贵新,李和平,李继山.跨坐式单轨车辆用气转液制动夹钳单元的研究[J].铁道机车车辆,2016,36(01):108-113+118.
- [2]杜子学,杨进.基于隐式参数化模型的跨坐式单轨车辆车体多学科轻量化优化[J].城市轨道交通研究,2019,22(12):85-88.
- [3]王志伟,葛怀普,赵明明,朱龙辉,吴月峰.跨坐式单轨车辆转向架构架总组定位工装设计[J].城市轨道交通研究,2019,22(10):118-121.
- [4]李小珍,葛延龙,晋智斌,朱艳.轨道梁动力行为对跨座式单轨车辆走行性能的影响[J].铁道科学与工程学报,2018,15(12):3225-3231.
- [5]许亮.曲线超高率对单轴转向架跨座式单轨车辆曲线通过性能的影响[J].无线互联科技,2018,15(16):117-119.
- [6]杜子学,唐飞,何钦洪,闫志明.走行轮失效对跨座式单轨车辆动力学性能的影响分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(09):122-127.
- [7]罗湘萍,田师娇.双轴跨坐式单轨车辆迫导向转向架曲线通过性能研究[J].机电一体化,2016,22(11):19-23+34.
- [8]杜子学,曹丹婷.跨座式单轨车辆空气弹簧失效对行车安全性能的影响研究[J].机车电传动,2016(05):76-80.
- [9]李旭娟,缪炳荣,史艳民,陈建政,谭仕发.CZ170型跨坐式单轨作业车转向架构架结构分析与测试[J].铁道机车车辆,2016,36(02):107-111.