

有轨电车车体轻量化优化分析

段华东^{1,2}, 蒋忠城^{1,2}, 刘亚妮^{1,2}

(1. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412001;
2. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 基于 Ansys 参数化模型研究设计变量和优化目标间关系, 探索不同板材厚度的有效组合, 获取全局性最优解以实现车体轻量化。针对有轨电车车体的轻量化案例, 提出车体轻量化方案流程, 通过 DOE 计算和敏感度分析确定优化变量, 探索优化变量的设计空间, 为车体改进提供参考依据。优化结果表明: 依据上述方法对车体进行轻量化设计能取得显著的减重效果, 整个优化流程可重复使用。

关键词: 多学科优化方法; 车体轻量化; 参数化模型; 设计变量; 敏感度分析; 有轨电车

中图分类号: U482.1

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.06.022

Light Wight Optimization of Tramcar Body

DUAN Huadong^{1,2}, JIANG Zhongcheng^{1,2}, LIU Yani^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of System Integration for High-power AC Drive Electric Locomotives, Zhuzhou, Hunan 412001, China; 2. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Based on Ansys parametric model, the relationship between design variables and optimization objectives was studied, and the effective combination of different sheet thickness was explored, which could obtain the global optimal solution to realize body light weight quantization. Aiming at the light weight case of tramcar body, the flow of vehicle body light weight scheme was proposed, which determined the optimization variables through DOE calculation and sensitivity analysis, and explored the design space of optimization variables, providing a reference basis for vehicle body improvement. The optimization results showed that the light weight design of the vehicle body could achieve significant weight loss and the whole optimization process could be reused.

Keywords: multidisciplinary optimal method; light weight car body; parametric model; design variable; sensitivity analysis; tramcar

0 引言

车辆轻量化可减轻对线路的磨损, 降低线路的损耗量, 延长线路使用寿命, 提高车辆的启动加速度、制动减速度、列车的运行速度及曲线通过速度, 所以轻量化车体是轨道车辆轻量化的一种方向。

Isight 是一款多学科优化探索工具, 利用其全局优化算法, 结合 Ansys 的建模方法与建模规则, 运用 Ansys 的求解和其参数化建模脚本, 实现参数化车体全局敏感性研究, 基于全局性板材厚度对重量、焊缝的应力敏感性分析, 探索出不同板材厚度的有效组合,

获取全局性最优解, 来实现车体轻量化的目的。本文以储能式低地板有轨电车车体进行优化为案例, 对这种优化方法进行介绍。

1 车体轻量化方案流程

以有轨电车车体为优化对象, 以车体减重作为优化目标, 车体轻量化流程如图 1 所示。在车体轻量化分析过程中, 首先对车体有限元模型进行参数化, 基于参数化模型研究设计变量和优化目标间关系, 且该过程利用试验设计方法^[1] (DOE, Design of Experiments) 有计划获取最优目标, 分析设计变量在典型工况下对优化目标的敏感度。

收稿日期: 2016-12-14; 修回日期: 2018-09-05

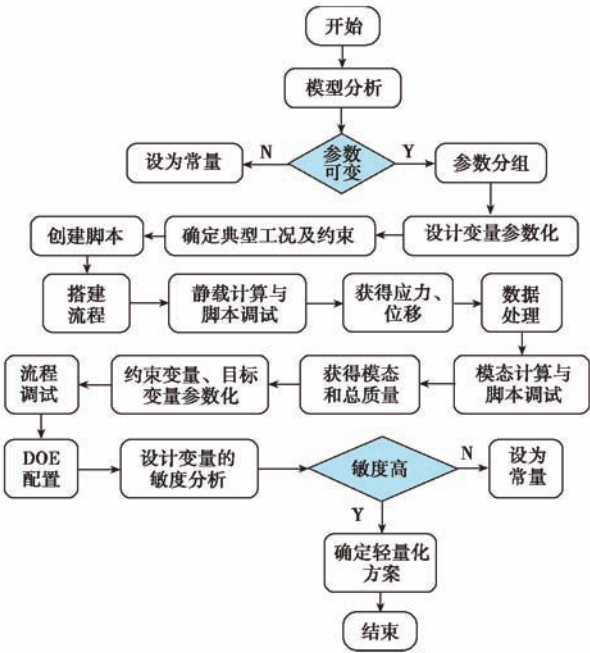


图1 车体轻量化流程图

2 方案实现

2.1 创建参数化模型

创建车体参数化模型是按照轻量化方案确定设计变量、约束变量和目标变量参数化。创建参数化模型的第一步是参数分组，按位置、厚度及工程经验将母材厚度分类；第二步对影响设计目标的所有参数进行分析、比较，从中选择出对设计质量大小确有显著影响且能直接控制的独立参数作为设计变量，其他参数通常作为常量处理；第三步根据强度、刚度及模态分析等方面的需求定义约束变量；第四步定义目标变量。按照上述方法，根据设计需求、参考车型和工程经验，建立了由33组变量控制的车体模型，并根据整车布置空间的约束和工程经验，确立设计变量的实际有效范围。确定的部分设计变量如表1所示。

2.2 约束与目标冲突的权衡

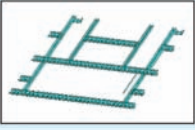
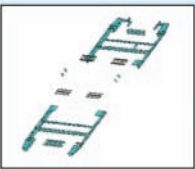
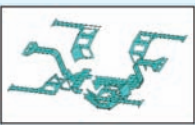
约束包括性能约束、区间约束和工况约束。性能约束主要考虑结构强度和刚度要求；区间约束规定了设计变量的取值范围；工况约束规定了每个工况仿真计算的边界约束条件。

约束与目标是设计考核指标，但约束与目标对设计变量的作用是相反的，如减小厚度减轻重量往往会增大应力。鉴于前述结构优化的单调性，优化中各性能指标之间的相互影响，需要借助Isight中的多目标优化和决策支持。

2.3 创建参数化脚本

APDL脚本语言 (Ansys Parametric Design Language) 能实现参数化有限元分析全过程，包括参数建模、施加参数化载荷与求解以及参数化后处理结果的显示。本方案创建的参数化脚本是实现车体轻量化设计优化或车体结构优化的命令流文本，优化过程中

表1 设计变量参数化详表

序号	部位	区域	设计变量	初始值 /mm	取值范 围/mm
1	顶盖		dg78_hliang2	2	0.5~3.5
2	顶盖		dg79_bianliang3	3	1~5
3	侧墙		cq79_bianzhu3	3	1~5
4	底架		dj79_zsl3	3	1~5
5	底架		dj81_qianyinl5	5	3~7
6	底架		dj86_qianliang10	10	7~13
7	波纹板		bwb94_cheti08	0.8	0.6~1.0

材料厚度的变更、变量的数据传递、求解及计算结果的读取等均通过APDL命令流实现，这些脚本文件包括车体参数化脚本、静载荷求解脚本、模态求解脚本、总重量获取脚本、模态获取脚本、焊缝应力和位移获取脚本。

车体参数化脚本如下：

```
/prep7
bwb94_cheti08=0.8
cq78_cqb2=2.0
.....
dj86_qianyinb10=10.0
dj88_zuoban12=12.0
r,9914,bwb94_cheti08 !N 9914
r,9915,cq78_cqb2 !N 9915
.....
r,9945,dj86_qianyinb10 !N 9945,
r,9946,dj88_zuoban12 !N 9946,
cmsel,s,bwb94_cheti08
```

.....

cmsel,s,dj88_zuoban12

allsell,all

eplot

2.4 选择典型工况

典型工况是工程分析中需要认真考虑的重点工况,这也是分析、设计及优化所必需满足的工况,这样才能保证设计是合格的。模型轻量化既要考虑车体变形的规律,又要控制其计算规模,同时还得保证分析设计的合理性,因此要根据 EN 12663-1 和合同要求确定 3~5 个强度、刚度极限工况作为典型工况,并给出各典型工况约束条件。选择的典型工况如表 2。

表 2 选择的典型工况

序号	典型工况
1	最大测试载荷
2	车钩高度压缩
3	车钩高度拉伸
4	车体纵向冲击
5	车体垂向冲击工况

2.5 创建轻量化分析流程

在多学科软件中创建轻量化分析流程并调试,步骤如下:①在仿真流程面板中创建任务计算模块;②加入文本读/写组件,用于调用车体参数化脚本并创建和配置参数;③加入程序集成或执行组件,调用参数化模型、载荷和静载荷求解脚本、焊缝应力提取脚本、调用求解器执行脚本;④文件参数变更、文件参数传递、焊缝应力和位移结果获取以及脚本调试;⑤加入文本读/写组件,输出焊缝应力;⑥加入计算器组件,对约束变量的焊缝应力和位移等进行结果处理或判断;⑦加入程序集成或执行组件,调用参数化模型、模态求解脚本、模态提取脚本、总重量提取脚本、求解器执行脚本;⑧文件参数变更、文件参数传递、总重量和模态结果获取以及脚本调试;⑨加入文本读/写组件,输出目标变量的总重量和模态。

2.6 DOE 流程创建及算法

在轻量化模型中添加 DOE 任务,并进行 DOE 算法设置,如图 2 所示。本方案采用最优拉丁超立方

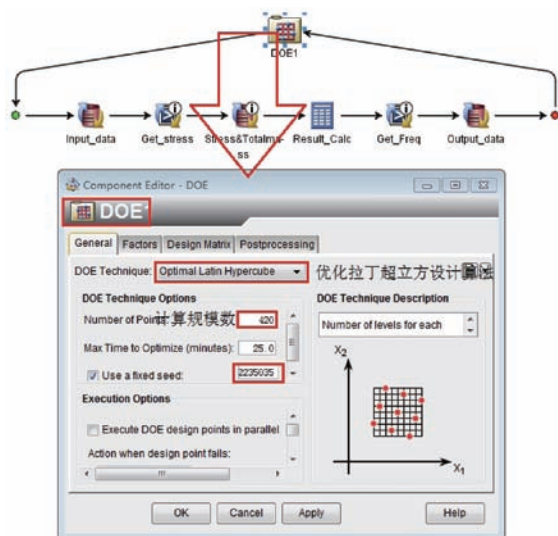


图 2 DOE 流程设置

计算法,该算法考虑了空间均匀性,具有非常好的空间填充性和均衡性,既保证了点的规模,又保证了探索设计空间的有限性,使得因子和响应的拟合更加精确真实。

3 灵敏度分析

灵敏度分析是研究和确定设计变量对目标变量影响程度的过程。由于分析过程中参数较多,全参数灵敏度分析复杂,分析灵敏度时在一次分析中不能够分析所有参数,因此采取部分参数分析的方法,多次进行分析。也可以在后处理 Table 中进行数值查看,对数值进行分析或者排序,然后根据重要程度依次进行分析。在灵敏度分析中,需要分析众多参数之间的效应情况。Isight 提供了设计变量对响应目标的一次线性分析,另外还可考虑设计变量对响应目标的二次非线性分析,以反映样本拟合后模型中设计变量对响应目标的贡献程度百分比。如图 3 所示,可以看出,设计变量 dg79_bianliang3 的减重贡献率最大。另外,Isight 提供了设计变量的主效应分析、交互效应分析。如图 4 所示,

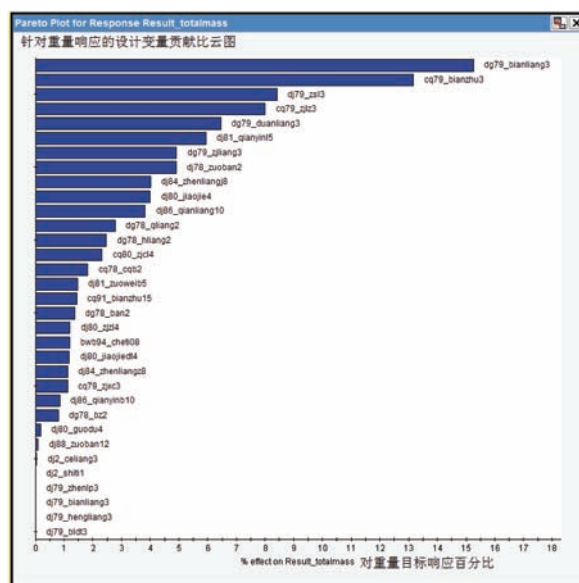


图 3 一次线性分析

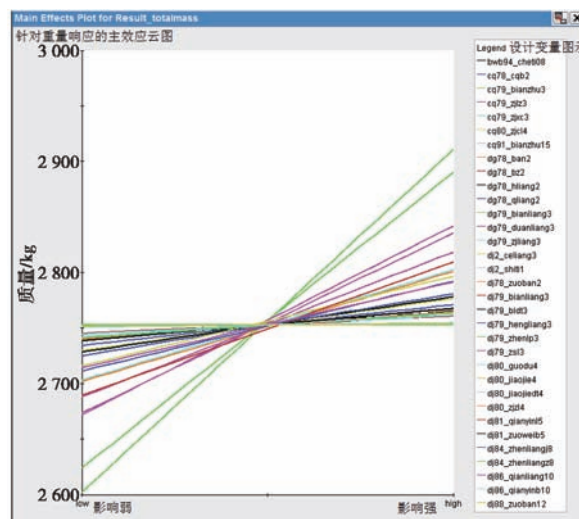


图 4 主效应图

设计变量 dg79_bianliang3 的斜率越大，对减重目标的主效应越明显。如图 5 所示，在减重过程中，设计变量 cq79_zjlz3 与 cq78_cqb2 之间无交互效应，不相互影响。

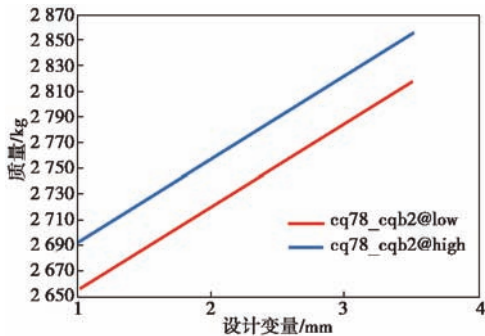


图 5 交互效应图

表 3 为敏感度分析数据，归一化后设计变量对质量大小的敏感度和影响类型。表中“正”表示设计变量与响应正比例关系，“负”表示存在非线性（相对于初始位置）。从低水平变化到高水平过程中较低水平影响明显。表 4 为重点优化的部分设计变量及其敏感度。

表 3 归一化后设计变量对质量大小的敏感度和影响类型

序号	设计变量	影响类型	敏感度
1	dg79_bianliang3	正	15.246 10
2	cq78_cqb2	正	1.809 50
3	cq79_bianzhu3	正	13.150 43
4	cq79_zjlz3	正	7.987 10
5	cq79_zjxc3	正	1.106 90
6	dj79_hengliang3	负	-0.000 02

表 4 重点优化的设计变量及其敏感度

序号	设计变量	敏感度	初始值/mm
1	dg79_bianliang3	15.246 10	3
2	cq79_bianzhu3	13.150 43	3
3	dj79_zsl3	8.396 62	3
4	cq79_zjlz3	7.987 10	3
5	cq79_zjxc3	1.1069 0	3

4 工程寻优

工程寻优流程如图 6 所示。优化后 Mc 车体的

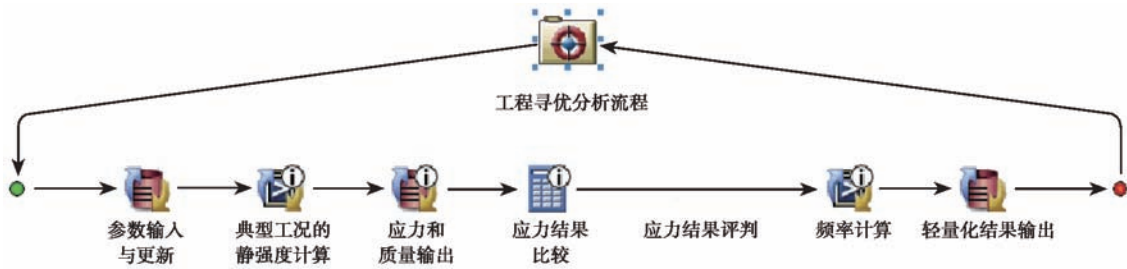


图 6 寻优流程

质量为 3 022.994 kg，比原质量 3 223.783 kg 减小 200.789 kg，减重比例达到 6.2%；优化后 T 车体的质量为 2 899.846 kg，比原质量 3 123.56 kg 减小 223.914 kg，减重比例达到 7.2%。

4 结语

通过对有轨电车车体轻量化优化研究，成功实现了模型参数化和 Ansys 模型材料参数自动化更新，建立了基于 Isight 的车体敏感度分析模型，建立的整个优化流程可重复使用。依据这种方法对车体进行轻量化设计能取得显著的减重效果，这种方法可为后续车体研究开发提供参考。

参考文献：

[1] 赖宇阳，姜欣，方立桥，等. Isight 参数优化理论与实例详解[M].

北京：北京航空航天大学出版社，2012.
[2] 卢健钊，殷国富，王玲. 基于 Isight 的机床结构 CAD/CAE 集成优化方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术，2013(2)：22-24.
[3] 赵艳涛，樊文欣，刘培杰. Isight 在发动机性能参数优化中的应用[J]. 机械制造与自动化，2009(5)：26-28.
[4] 裴晓强，袁博，袁征难，等. 基于 Isight 优化平台的卫星多学科设计优化[J]. 航天器工程，2009(5)：32-36.
[5] 任利，邵园园，韩虎. 基于 Isight 的多学科设计优化技术研究与应用[J]. 起重运输机械，2008(5)：45-48.

作者简介：段华东（1980-），男，硕士，高级工程师，主要从事轨道车辆车体基础研究与仿真分析。