

# 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

杜子学 杨 进

(重庆交通大学轨道交通研究院, 400074, 重庆//第一作者, 教授)

**摘 要** 在某跨坐式单轨车辆头车车体前期开发中, 引入“分析驱动设计”理念, 建立了隐式全参数化车体模型, 并根据车体空间布置情况, 设定了车体骨架 5 个厚度变量和 4 个形状变量的变化范围; 通过试验设计建立了近似模型, 得到了输入变量与性能指标之间的关系; 最后进行轻量化优化, 获得了满足一阶扭转模态、一阶弯曲模态及弯曲刚度多学科性能要求的前期全参数化车体模型。

**关键词** 跨坐式单轨车辆; 车体; 隐式参数化模型; 多学科优化; 轻量化

**中图分类号** U270.3:U232

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2019.12.020

## Multidisciplinary Lightweight of Straddle-type Monorail Vehicle Body Based on Implicit Parametric Model

DU Zixue, YANG Jin

**Abstract** In the early development of a head body of straddle-type monorail vehicle, the concept of analysis driven design is introduced, an implicit parametric model is built and the range of 5 thickness variables and 4 shape variables related to the car body frame is set up based on the space layout of car body. An approximate model is established through experimental design, and the relationships between input variables and performance indexes are obtained. At last, through lightweight optimization, the full parameterized car body model in the early stage is obtained, which could meet the multidisciplinary performance requirements for the first order torsional mode, first order bending mode and bending stiffness.

**Key words** straddle-type monorail vehicle; car body; implicit parametric model; multidisciplinary improvement; lightweight

**Author's address** Research Institute of Rail Transit, Chongqing Jiaotong University, 400074, Chongqing, China

传统以有限元方法为基础的产品开发流程是由 CAD(计算机辅助设计)到 CAE(计算机辅助工程), 然后再返回 CAD 的往复循环过程, 其工作量

大、耗时费力, 严重影响产品的开发效率<sup>[1]</sup>。本文采用 SFE-Concept 软件对车体进行隐式参数化建模, 其理念为“分析驱动设计”, 即在产品的 CAD 概念设计阶段, 就能快速生成可以直接参与计算的有限元模型, 同时对大量数据、方案进行仿真分析, 通过仿真数据的优化与评估, 得到满足设计变量与性能之间的关系, 进而在概念设计阶段就能更早、更清晰地制定出满足多学科性能指标的最优设计变量组合和输出最优参数化模型。这样为车体详细设计阶段提供了一系列满足多学科性能指标的全参数化参考模型, 大大减少了设计修改周期, 提高了开发效率。

本文使用 SFE-Concept、Isight、Nastran 商业软件联合对车体进行多学科轻量化优化。首先, 创建了车体隐式参数化几何模型与有限元模型; 然后, 介绍了多学科轻量化优化技术与方法, 确定了跨坐式单轨车辆车体<sup>[2]</sup>多学科轻量化优化的数学模型; 利用试验设计方法建立了近似模型, 得到了设计变量与性能指标之间的关系; 通过对近似模型的优化, 得到了满足不同学科条件下的可行性设计; 最后对优化结果与传统有限元原始分析结果进行了对比评估。

## 1 跨坐式单轨车辆车体隐式参数化建模

### 1.1 隐式参数化几何模型

在传统的车体参数化设计中, 设计人员通常利用一些参数的输入, 而不是利用如多项式等数学描述来实现几何模型的建立和修改。零部件几何体只可通过一些线性方程组进行描述, 这称为显式参数化。在隐式参数化对模型的描述中, 单一零部件模型的几何形状只由控制点位置、基线曲率以及截面形状 3 种类型参数加以控制; 多个零部件之间, 通过数学映射关系实现零部件几何体之间连接的拓

扑关系描述。

采用软件 SFE-Concept 进行模型的建立时,遵循控制点→基线→截面→梁→接头→曲面,即点、线、面、梁的建模步骤。本文创新性地在我国首次将汽车车身全参数化模型的设计方法应用于轨道交通车辆车体开发中,建立了跨坐式单轨车辆头车车体隐式参数化几何模型,如图 1 所示。

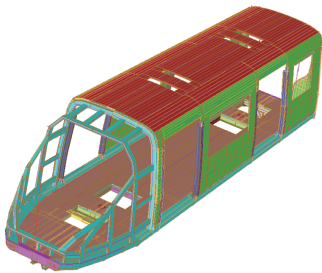


图 1 跨坐式单轨车辆头车车体隐式参数化几何模型

### 1.2 有限元模型的快速生成

按照企业提供的 CAD 模型量取各零部件厚度,并在有限元模型中赋予材料相应的参数和厚度,车体主要由大型冲压板件构成,采用的单元类型以四边形壳单元为主、三角形单元为辅,车体有限元模型设置的网格全局尺寸为 20 mm。利用 SFE-Concept 软件一键生成高质量网格并实现各零部件间参数化装配关系的功能,自动生成车体有限元模型。

## 2 多学科优化技术

### 2.1 试验设计

试验设计(DOE)<sup>[3]</sup>是一种以数理统计和概率论为理论基础来设计试验的方法,同时也是一种利用有限数据获取信息的方法。在试验设计中,将影响试验的条件与原因称为因素;每个试验因素下的参数范围,称为水平。因素和水平亦是 DOE 的两个基础概念。通过 DOE 可以对各因素及各因素水平进行有效抽样,系统地研究设计空间,找到较优参数组合,得到设计变量如何对目标函数与约束产生影响;同时可以分析影响因素之间的相互作用及大小,以及可以进行设计变量的灵敏度分析,提高优化效率。在实际工程中,常用的 DOE 方法有正交试验设计(OAD)、中心复合试验设计(CCD)、拉丁超立方试验设计(LHD)等。

### 2.2 近似模型

近似模型<sup>[4-5]</sup>是运用数学模型代替实际工程问

题,通过数学模型的方法来逼近因素(输入变量)与响应(输出变量)之间的关系,其目的是为了加快对工程目标优化算法的寻优速度。不同因素的任意组合及不同因素下不同水平的任意组合都可以利用近似模型来预测。

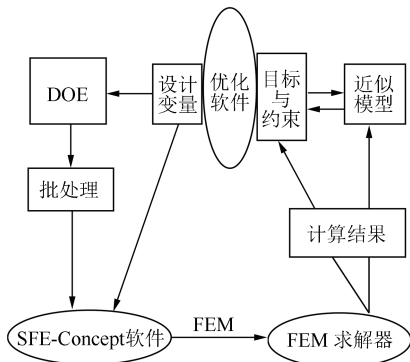
工程中,用以拟合近似模型的常用方法有径向基(RBF)方法、克里格(Kriging)方法及多项式响应面(RSM)方法等。

### 2.3 优化算法

目前各种优化算法<sup>[6]</sup>已经比较成熟并且在工程中得到了广泛的应用。工程中的问题一般较为复杂,比如变量的取值可能是连续的也可能是离散的;约束条件和目标函数的复杂程度可能是连续、线性单峰的函数,也可能是离散、非线性多峰的函数。根据不同优化问题可选择不同的算法,对于连续、线性较为简单的工程多学科优化问题,可以选择梯度法、直接搜索法、单纯形法、拉格朗日法等;而对于一些复杂非线性的多学科优化问题,可以选择能遍历整个参数空间的、能强调工程约束问题的优化算法,如模拟退火算法、粒子群算法及遗传算法等。

### 2.4 优化循环的实现

当隐式参数化模型建立后,将 SFE-Concept 软件与优化软件、有限元求解器进行联合,并设定目标、约束条件以及变量,使用批处理命令自动调用变化中的参数化模型,实现自动化的循环优化过程,如图 2 所示。通过 DOE 技术获取变量中对性能指标影响较大的样本点,进而建立近似模型,得到变量与性能指标之间的关系。通过对近似模型进行优化,最终达到优化实际工程问题的目的。



注: FEM 为有限单元法

图 2 优化循环过程

3 车体多学科轻量化优化模型

3.1 优化目标

以车体结构轻量化为目标,在车体模态频率和弯曲刚度指标达到要求的情况下尽可能降低车体质量。

3.2 约束条件

在保证参数化车体模态频率和弯曲刚度性能条件下的车体轻量化设计中,约束车体结构的一阶扭转模态频率、一阶弯曲模态频率及弯曲刚度值。由此根据工程经验,设定车体结构最小一阶扭转模态值为 12 Hz、最大一阶弯曲模态值为 15 Hz。按照 TBT 1335—1996《铁道车辆强度设计及试验鉴定规范》设定车体结构弯曲刚度约束值,车体结构最小相当弯曲刚度为  $1.3\times10^9\text{ N}\cdot\text{m}^2$ ,即底架边梁中央垂向位移不大于 9.47 mm。

3.3 设计变量

根据工程经验,本文选取了 5 个厚度变量和 4 个形状变量,共计 9 个设计变量。其中,5 个厚度变量分别为车头骨架、车顶边梁、底架横梁、底架边梁和侧墙立柱,编号分别为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$ ;4 个形

状变量分别为侧墙立柱截面形状变量、底架边梁截面形状变量、车顶边梁截面形状变量及端墙截面形状变量,分别用  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  表示。输出响应分别为车体一阶扭转模态、一阶弯曲模态、底架边梁中央垂向位移及车体质量,采用  $E_{\text{igr1},1}$ 、 $E_{\text{igr1},2}$ 、 $D_z$ 、 $M_{\text{ass}}$  表示。

4 车体多学科轻量化优化设计

为了建立车体多学科轻量化优化模型中设计变量与输出响应的关系,本文采用优化拉丁超立方试验设计方法(LHD)来完成设计变量样本点的采集,共采集了 50 组数据用于构建输出响应函数的近似模型。其 DOE 流程如图 3 所示。所采集的 50 组输入变量及其输出响应的部分数据,如表 1 所示。

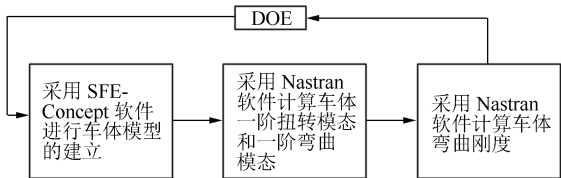


图 3 DOE 流程图

表 1 输入变量与输出响应的部分采集数据

编号	厚度设计变量/mm					形状设计变量/mm				输出响应			
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$E_{\text{igr1},1}/\text{Hz}$	$E_{\text{igr1},2}/\text{Hz}$	$D_z/\text{mm}$	$M_{\text{ass}}/\text{t}$
1	5.4	4.2	5.8	4.2	3.8	3.4	2.9	2.0	0.5	12.85	15.59	8.23	3.309
2	4.8	3.8	5.8	4.8	4.4	2.5	3.2	-3.0	3.3	12.63	15.24	8.85	3.173
3	4.4	4.2	6.0	5.0	4.0	0.9	-2.5	-1.4	1.5	12.92	15.50	8.47	3.276
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48	5.2	4.0	5.8	4.6	4.2	0.7	2.7	3.4	3.0	12.73	15.33	8.58	3.189
49	5.0	4.6	5.2	5.2	3.8	-2.5	-1.7	0	2.5	12.98	15.74	8.08	3.331
50	5.2	4.0	6.0	5.0	4.6	-3.3	1.0	-2.2	3.2	12.82	15.42	8.32	3.243

本文创建的近似模型以模型的精度最高为依据,据此文中车体一阶扭转模态频率、一阶弯曲模态频率、弯曲刚度(底架边梁中央垂向位移)和车体质量分别选用径向基函数近似模型(RBF)、RBF、响应面函数近似模型(RSM)、RBF 进行近似模型拟合。各输出响应关于侧墙立柱厚度  $t_{\text{cqlz}}$  和底架边梁厚度  $t_{\text{djbl}}$  的近似模型示意,如图 4 所示。

以一阶扭转模态、一阶弯曲模态和弯曲刚度为约束条件,以质量为目标进行优化,基于近似模型使用混合整型序列二次规划法算法(MISQP)可以得到最优设计变量组合。近似模型的建立及车体结构多学科轻量化优化流程,如图 5 所示。

由于优化时厚度变量与形状变量都是连续变

化的,经过优化计算后的车体板件厚度与形状变量含有多位有效数字,不适合实际的制造生产,应根据公司已有的规格对优化后的最优板件厚度及形状变量进行调整。调整后的最优车体结构各设计变量如表 2 所示。

优化后得到的车体结构一阶扭转模态频率为 12.34 Hz,较优化前降低了 3.4%;一阶弯曲模态为 15.07 Hz,较优化前降低了 2.3%。由此可知,动态性能满足要求。底架边梁中央垂向位移为 8.8 mm(优化前为 8.45 mm);车体结构弯曲刚度为  $1.39\times10^9\text{ N}\cdot\text{m}^2$ ,较优化前降低了 4.1%,但车体结构弯曲刚度仍然满足设计要求。此时,车体结构质量为 3.124 t,较优化前减少了约 5.2%。轻量化前后车体

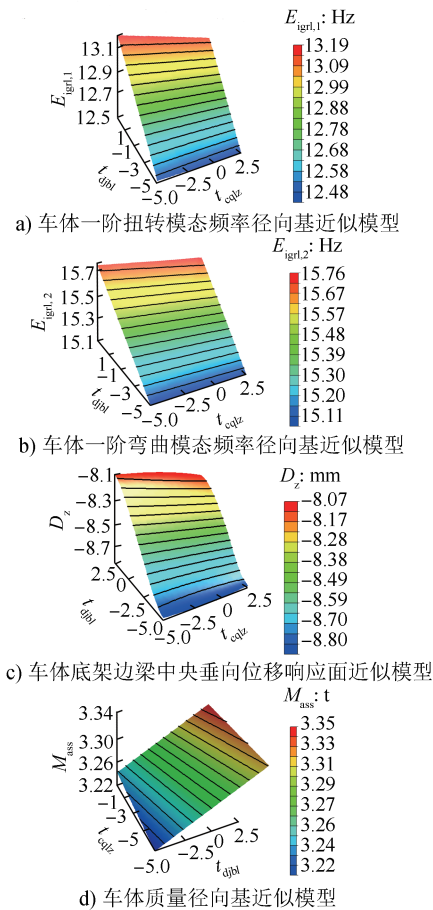


图 4 车体各输出响应关于设计变量的近似模型图

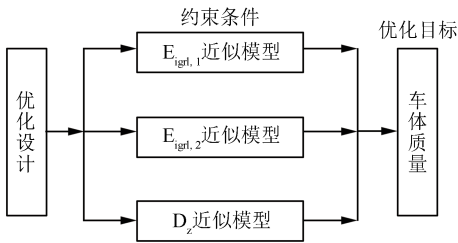


图 5 车体结构多学科轻量化优化流程

各性能指标的变化,如表 3 所示。

5 结语

建立了我国第一款全参数化的跨坐式单轨车

表 2 车体结构各设计变量初始值及优化结果 mm

变量	初始值	优化结果	
厚度变量	$T_1$	5.0	4.5
	$T_2$	4.0	4.4
	$T_3$	6.0	5.4
	$T_4$	5.0	4.5
	$T_5$	4.0	4.2
形状变量	$S_1$	截面内侧节点向车体外侧移动 2.4	
	$S_2$	截面内侧节点向车体内侧移动 1.8	
	$S_3$	截面内侧节点想车体外侧移动 2.3	
	$S_4$	截面后端节点向车体后端移动 1.5	

表 3 轻量化前后的车体主要性能指标变化表

性能指标	优化前	优化后
质量/t	3.297	3.124
一阶扭转模态频率/Hz	12.820	12.340
一阶弯曲模态频率/Hz	15.420	15.070
弯曲刚度/(N·m <sup>2</sup> )	1.450×10 <sup>9</sup>	1.390×10 <sup>9</sup>

辆头车车体 SFE-Concept 隐式参数化模型,第一次通过 DOE 技术,基于隐式参数化模型,建立性能指标近似模型对车体进行多学科轻量化优化。通过对轻量化前后的车体主要性能指标进行对比,证实了优化模型的有效性。

参考文献

[1] 史国宏,陈勇,姜欣,等.基于全参数化模型的白车身多学科设计优化[J].汽车工程,2010(11): 928.

[2] 仲建华,杜子学,何希和.跨座式单轨交通车辆道岔及结构分析[M].北京:人民交通出版社,2013.

[3] 刘文卿.试验设计[M].北京:清华大学出版社,2005.

[4] 赖宇阳.Isight 参数优化理论与实例详解[M].北京:航空航天大学出版社,2012: 123.

[5] 谢晨.车身结构隐式参数化建模及其在轻量化设计中的应用研究[D].吉林:吉林大学,2014.

[6] 瞿晓彬,戴铁.基于隐式参数化的白车身建模方法[J].计算机辅助工程,2012(2): 42.

[7] 史国宏,陈勇,杨雨泽,等.白车身多学科轻量化优化设计应用[J].机械工程学报,2012(8): 110.

(收稿日期:2018-03-05)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》  
服务热线 021—51030704