



(12) 发明专利申请

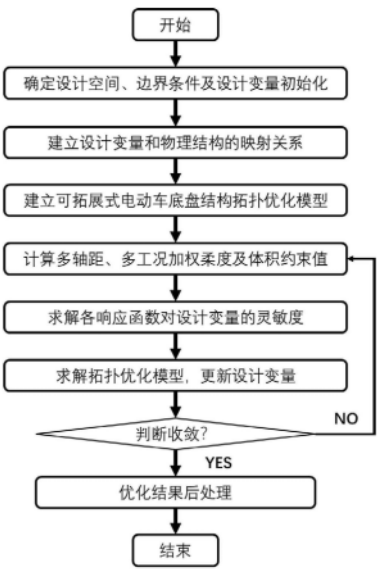
(10) 申请公布号 CN 115577441 A
(43) 申请公布日 2023. 01. 06

(21) 申请号 202210466624.7
(22) 申请日 2022.04.26
(71) 申请人 上海交通大学
地址 200240 上海市闵行区东川路800号
(72) 发明人 周明东 刘义畅 金一涵 陆宇帆
(74) 专利代理机构 上海旭诚知识产权代理有限公司 31220
专利代理师 郑立
(51) Int. Cl.
G06F 30/15 (2020.01)
G06F 30/23 (2020.01)
G06F 111/04 (2020.01)

权利要求书3页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称
一种可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法

(57) 摘要
本发明公开了一种可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法,涉及电动车底盘结构设计领域,包括以下步骤:步骤1、确定设计空间、边界条件及设计变量初始化;步骤2、建立设计变量与物理结构间的映射关系;步骤3、拓扑优化建模;步骤4、设计响应求解;步骤5、灵敏度分析;步骤6、优化模型求解;步骤7、收敛性判断;步骤8、优化结果后处理。本发明解决了传统“面向不同应用需求重复开发”成本高、周期长且性能鲁棒性难以保证的问题,可获得适配于不同轴距、不同负载、不同续航需求下的可扩展式电动车底盘构型。



1. 一种可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1、采用有限单元离散底盘结构设计空间,包括设置前后车架、中间大梁、电芯区;确定各工况下所受载荷及边界条件,建立电动车底盘结构有限元模型;定义设计变量并初始化;

步骤2、建立所述设计变量与物理结构间的映射关系;

步骤3、根据目标函数和约束条件,建立可扩展式电动车底盘结构拓扑优化模型;

步骤4、设计响应求解;

步骤5、基于链式法则,计算所述目标函数对所述设计变量的灵敏度值;

步骤6、利用移动渐近线算法,求解拓扑优化模型,更新所述设计变量;

步骤7、收敛性判断;

步骤8、优化结果后处理。

2. 如权利要求1所述的可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法,其特征在于,所述前后车架设置为三维设计域 Ω_1 与 Ω_2 ;所述中间大梁取横截面设置为二维设计域 Ω'_2 ;所述电芯区设置为非设计域 Ω_* ;所述设计变量定义为 μ 和 ν ,设计变量 μ 间接控制设计域 Ω_1 与 Ω_2 中材料有无,设计变量 ν 间接控制设计域 Ω'_2 中材料有无。

3. 如权利要求2所述的可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法,其特征在于,所述步骤2还包括:

步骤2.1、基于密度过滤、Heaviside投影函数,将所述设计变量 μ 和 ν 转换为物理变量 $\bar{\mu}$ 和 $\bar{\nu}$;

步骤2.2、基于SIMP公式,构建单元物理变量与单元刚度的插值模型。

4. 如权利要求3所述的可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法,其特征在于,所述密度过滤公式如下:

$$\tilde{\mu}_e = \frac{\sum_{i \in M_e} H_{ie} \mu_i}{\sum_{i \in M_e} H_{ie}}, e \in \Omega_{1,2}$$

$$\tilde{\nu}_e = \frac{\sum_{i \in M_e} H_{ie} \nu_i}{\sum_{i \in M_e} H_{ie}}, e \in \Omega'_2$$

式中, $M_e = \{i \mid ||X_i - X_e|| \leq r_{\min}\}$ 为单元 e 以 r_{\min} 为半径的邻域, X_i 与 X_e 分别为单元 i 与单元 e 的中心坐标, $H_{ie} = \max\{r_{\min} - ||X_i - X_e||, 0\}$ 为权重系数;

所述Heaviside投影函数公式如下:

$$\bar{\mu}_e = \frac{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(\tilde{\mu}_e - \eta))}{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(1 - \eta))}$$

$$\bar{\nu}_e = \frac{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(\tilde{\nu}_e - \eta))}{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(1 - \eta))}$$

式中, β 为投影的陡度, η 为投影阈值;投影陡度 β 每100个优化迭代步翻倍一次,直到其达到预设最大值;其中 $\bar{\mu}_e$ 和 $\bar{\nu}_e$ 分别表示 Ω_1 与 Ω_2 的单元物理变量、 Ω'_2 的单元物理变量。

5. 如权利要求4所述的可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法,其特征在于,所述单元物理变量与单元刚度的插值模型如下:

$$E_e = E_{\min} + \bar{\mu}_e^p (E_0 - E_{\min})$$

$$E_e = E_{\min} + \bar{\nu}_e^p (E_0 - E_{\min})$$

式中, E_e 为单元 e 经插值获得的杨氏模量; E_0 为所用材料的杨氏模量; E_{\min} 为避免有限元求解矩阵奇异引入的小值; p 为SIMP公式的惩罚系数, 通常取3。

6. 如权利要求5所述的可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法, 其特征在于, 所述可扩展式电动车底盘结构拓扑优化模型如下:

$$\min_{\mu, \nu} c = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N c^{ij} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N U^{ijT} K^i U^{ij}$$

$$\text{s. t. } V_G \leq 0$$

$$\mu_e, \nu_e \in [0, 1], e \in \Omega_1, \Omega_2, \Omega'$$

$$K^i U^{ij} = F^{ij}$$

式中, 以最小化多轴距、多工况加权结构柔度 c 为目标函数, 以底盘车架结构体积约束 V_G 为约束条件; c^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的结构柔度, K^i 代表轴距为 d_i 底盘结构刚度矩阵, U^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的变形向量, F^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的外力载荷, M 代表工况总数, N 代表底盘可扩展的轴距类型数目。

7. 如权利要求6所述的可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法, 其特征在于, 所述步骤4还包括:

基于当前优化迭代步下的结构密度场, 通过求解 $K^i U^{ij} = F^{ij}$, 获得第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的变形向量, 计算出加权结构柔度, 并求解底盘车架结构体积约束响应。

8. 如权利要求7所述的可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法, 其特征在于, 所述步骤5还包括:

结构柔度 c 对设计变量 μ_e 的灵敏度可由链式法则求得:

$$\frac{\partial c}{\partial \mu_e} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{z=1}^m \sum_{l=1}^m \frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\mu}_z} \frac{\partial \bar{\mu}_z}{\partial \tilde{\mu}_l} \frac{\partial \tilde{\mu}_l}{\partial \mu_e}$$

其中 $\frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\mu}_z}$ 通过如下公式求得:

$$\frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\mu}_z} = p (E_0 - E_{\min}) \bar{\mu}_z^{p-1} (u_z^{ijT} k_0^i u_z^{ij})$$

式中, m 为设计域 Ω_1 与 Ω_2 的单元总数, u_z^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的第 z 个单元变形量, k_0^i 代表轴距为 d_i 底盘结构的单元刚度矩阵;

结构柔度 c 对设计变量 ν_e 的灵敏度可由链式法则求得:

$$\frac{\partial c}{\partial \nu_e} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{z=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\nu}_z} \frac{\partial \bar{\nu}_z}{\partial \tilde{\nu}_l} \frac{\partial \tilde{\nu}_l}{\partial \nu_e}$$

其中 $\frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\nu}_z}$ 通过如下公式求得:

$$\frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\nu}_z} = p (E_0 - E_{\min}) \bar{\nu}_z^{p-1} (u_z^{ijT} k_0^i u_z^{ij})$$

式中, n 为设计域 Ω' 的单元总数。

9.如权利要求8所述的可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法,其特征在于,所述步骤7还包括:

若所述目标函数的变化率在当前5个迭代步内低于0.2%,则判定当前优化结果已收敛,优化完成,输出优化结果,否则重复所述步骤4至所述步骤7。

10.如权利要求9所述的可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法,其特征在于,所述步骤8还包括:

采用投影二分法,设定阈值为0.5,消除优化结果中的灰度单元,呈现出清晰的优化结果,并绘制该类型底盘在不同需求下的扩展状态。

一种可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电动车底盘结构设计领域,尤其涉及一种可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法。

背景技术

[0002] 随着全球变暖与能源危机的日趋突出,电动汽车以其低污染、低噪声优势,成为汽车行业的发展新方向。当前电动汽车制造商通常采用“纯电动开发”模式,即根据三电系统(电机、电控、电池)外形特征,合理设计车身与底盘结构。然而,如果车型、尺寸、续航等需求改变,需重新走相同流程进行开发,这就造成“纯电动开发”模式的开发周期长、量产线投入成本高,难以满足当今电动汽车个性化定制、中等批量生产、快速市场响应的需求。近期兴起的滑板式电动车底盘有望突破上述瓶颈,其基于电池包与底盘结构一体化设计思路,一方面,一体化设计可进一步挖掘结构轻量化潜力,以提升电动汽车续航能力;另一方面,汽车的主要承载结构转变为底盘结构,因而降低了车身上装对承载安全性能的要求,支持为不同需求车身上装提供相同底盘的新商业模式,可极大降低企业的研发周期与制造成本。

[0003] 尽管滑板式电动车底盘具有如上开发优势,但如何科学设计轴距、续航里程、负载要求使之成为可扩展式电动车底盘结构尚未形成标准。当前,制造商通常依赖于已市场化的现成产品,在拓扑形式不变的前提下,通过简单增加大梁长度并在额外空间内添加电芯、增加大梁或横纵梁的截面厚度,实现同一类型底盘在不同负载、不同轴距、不同续航能力电动车上的拓展应用。但这种设计方法无法保证电动车底盘在所有场景下的性能鲁棒性,部分场景下电动车底盘结构的某些机械性能可能无法满足设计要求,或因结构较重难以达到预期续航能力,通常还要依赖工程师的反复试错调整,开发周期较长。

[0004] 因此,本领域的技术人员致力于开发一种可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法,可获得适配于不同轴距、不同负载、不同续航需求下的可扩展式电动车底盘构型。

发明内容

[0005] 有鉴于现有技术的上述缺陷,本发明所要解决的技术问题是传统“面向不同应用需求重复开发”成本高、周期长且性能鲁棒性难以保证。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供了一种可扩展式电动车底盘结构拓扑优化方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤1、采用有限单元离散底盘结构设计空间,包括设置前后车架、中间大梁、电芯区;基于各种工况,确定相应的载荷及边界条件,建立电动车底盘结构有限元模型;定义设计变量并初始化;

[0008] 步骤2、建立所述设计变量与物理结构间的映射关系;

[0009] 步骤3、根据目标函数和约束条件,建立可扩展式电动车底盘结构拓扑优化模型;

[0010] 步骤4、设计响应求解;

[0011] 步骤5、基于链式法则,计算所述目标函数对所述设计变量的灵敏度值;

[0012] 步骤6、利用移动渐近线算法,求解拓扑优化模型,更新所述设计变量;

[0013] 步骤7、优化收敛性判断;

[0014] 步骤8、优化结果后处理。

[0015] 进一步地,所述前后车架设置为三维设计域 Ω_1 与 Ω_2 ;所述中间大梁取横截面设置为二维设计域 Ω'_2 ;所述电芯区设置为非设计域 Ω_* ;所述设计变量定义为 μ 和 ν ,设计变量 μ 间接控制设计域 Ω_1 与 Ω_2 中材料有无,设计变量 ν 间接控制设计域 Ω'_2 中材料有无。

[0016] 进一步地,所述步骤2还包括:

[0017] 步骤2.1、基于密度过滤、Heaviside投影函数,将所述设计变量 μ 和 ν 转换为物理变量 $\bar{\mu}$ 和 $\bar{\nu}$;

[0018] 步骤2.2、基于具有惩罚的实体各向同性材料方法 (SIMP) 公式,构建单元物理变量与单元刚度的插值模型。

[0019] 进一步地,所述密度过滤公式如下:

$$[0020] \quad \tilde{\mu}_e = \frac{\sum_{i \in M_e} H_{ie} \mu_i}{\sum_{i \in M_e} H_{ie}}, e \in \Omega_{1,2}$$

$$[0021] \quad \tilde{\nu}_e = \frac{\sum_{i \in M_e} H_{ie} \nu_i}{\sum_{i \in M_e} H_{ie}}, e \in \Omega'_2$$

[0022] 式中, $M_e = \{i \mid ||X_i - X_e|| \leq r_{\min}\}$ 为单元 e 以 r_{\min} 为半径的邻域, X_i 与 X_e 分别为单元 i 与单元 e 的中心坐标, $H_{ie} = \max\{r_{\min} - ||X_i - X_e||, 0\}$ 为权重系数;

[0023] 所述Heaviside投影函数公式如下:

$$[0024] \quad \bar{\mu}_e = \frac{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(\tilde{\mu}_e - \eta))}{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(1 - \eta))}$$

$$[0025] \quad \bar{\nu}_e = \frac{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(\tilde{\nu}_e - \eta))}{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(1 - \eta))}$$

[0026] 式中, β 为投影的陡度, η 为投影阈值;投影陡度 β 每100个优化迭代步翻倍一次,直到其达到预设最大值;其中 $\bar{\mu}_e$ 和 $\bar{\nu}_e$ 分别表示 Ω_1 与 Ω_2 的单元物理变量、 Ω'_2 的单元物理变量。

[0027] 进一步地,所述单元物理变量与单元刚度的插值模型如下:

$$[0028] \quad E_e = E_{\min} + \bar{\mu}_e^p (E_0 - E_{\min})$$

$$[0029] \quad E_e = E_{\min} + \bar{\nu}_e^p (E_0 - E_{\min})$$

[0030] 式中, E_e 为单元 e 经插值获得的杨氏模量; E_0 为所用材料的杨氏模量; E_{\min} 为避免有限元求解矩阵奇异引入的小值; p 为SIMP公式的惩罚系数,通常取3。

[0031] 进一步地,所述可扩展式电动车底盘结构拓扑优化模型如下:

$$[0032] \quad \min_{\mu, \nu} c = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N c^{ij} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N U^{ijT} K^i U^{ij}$$

$$[0033] \quad s.t. V_G \leq 0$$

$$[0034] \quad \mu_e, \nu_e \in [0, 1], e \in \Omega_1, \Omega_2, \Omega'_2$$

[0035] $K^i U^{ij} = F^{ij}$

[0036] 式中,以最小化多轴距、多工况加权结构柔度 c 为目标函数,以底盘车架结构体积约束 V_G 为约束条件; c^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的结构柔度, K^i 代表轴距为 d_i 底盘结构刚度矩阵, U^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的变形向量, F^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的外力载荷, M 代表工况总数, N 代表底盘可扩展的轴距类型数目。

[0037] 进一步地,所述步骤4还包括:

[0038] 基于当前优化迭代步下的结构密度场,通过求解 $K^i U^{ij} = F^{ij}$,获得第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的变形向量,计算出加权结构柔度,并求解底盘车架结构体积约束响应。

[0039] 进一步地,所述步骤5还包括:

[0040] 结构柔度 c 对设计变量 μ_e 的灵敏度可由链式法则求得:

$$[0041] \quad \frac{\partial c}{\partial \mu_e} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{z=1}^m \sum_{l=1}^m \frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\mu}_z} \frac{\partial \bar{\mu}_z}{\partial \tilde{\mu}_l} \frac{\partial \tilde{\mu}_l}{\partial \mu_e}$$

[0042] 其中 $\frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\mu}_z}$ 通过如下公式求得:

$$[0043] \quad \frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\mu}_z} = p(E_0 - E_{\min}) \bar{\mu}_z^{p-1} (u_z^{ijT} k_0^i u_z^{ij})$$

[0044] 式中, m 为设计域 Ω_1 与 Ω_2 的单元总数, u_z^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的第 z 个单元变形量, k_0^i 代表轴距为 d_i 底盘结构的单元刚度矩阵;

[0045] 结构柔度 c 对设计变量 v_e 的灵敏度可由链式法则求得:

$$[0046] \quad \frac{\partial c}{\partial v_e} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{z=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{v}_z} \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \tilde{v}_l} \frac{\partial \tilde{v}_l}{\partial v_e}$$

[0047] 其中 $\frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{v}_z}$ 通过如下公式求得:

$$[0048] \quad \frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{v}_z} = p(E_0 - E_{\min}) \bar{v}_z^{p-1} (u_z^{ijT} k_0^i u_z^{ij})$$

[0049] 式中, n 为设计域 Ω_2 的单元总数。

[0050] 进一步地,所述步骤7还包括:

[0051] 若所述目标函数的变化率在当前5个迭代步内低于0.2%,则判定当前优化结果已收敛,优化完成,输出优化结果,否则重复所述步骤4至所述步骤7。

[0052] 进一步地,所述步骤8还包括:

[0053] 采用投影二分法,设定阈值为0.5,消除优化结果中的灰度单元,呈现出清晰的优化结果,并绘制该类型底盘在不同需求下的扩展状态。

[0054] 与现有技术相比,本发明至少具有如下有益的技术效果:

[0055] 本发明的可扩展式电动车底盘结构优化设计方法,在设计阶段综合考虑电动车底盘在不同轴距、续航需求下的可扩展性,获得性能鲁棒性高的电动车底盘结构设计,降低开发成本与研发周期。

[0056] 以下将结合附图对本发明的构思、具体结构及产生的技术效果作进一步说明,以充分地了解本发明的目的、特征和效果。

附图说明

- [0057] 图1是本发明的一个较佳实施例的方法流程图；
 [0058] 图2是本发明的一个较佳实施例的设计域示意图；
 [0059] 图3是本发明的一个较佳实施例的优化结果示意图。

具体实施方式

[0060] 以下参考说明书附图介绍本发明的多个优选实施例,使其技术内容更加清楚和便于理解。本发明可以通过许多不同形式的实施例来得以体现,本发明的保护范围并非仅限于文中提到的实施例。

[0061] 在附图中,结构相同的部件以相同数字标号表示,各处结构或功能相似的组件以相似数字标号表示。附图所示的每一组件的尺寸和厚度是任意示出的,本发明并没有限定每个组件的尺寸和厚度。为了使图示更清晰,附图中有些地方适当夸大了部件的厚度。

[0062] 如图1所示,是本发明的一个较佳实施例的方法流程图,根据流程图按照技术方案开展设计工作,包括以下步骤:

[0063] 步骤1、如图2所示,底盘结构尺寸参数为 $L1=L2=L3=L4=2m$, $L5=1.2m$;前后车架、中间大梁为铝合金,弹性模量设置为69GPa,泊松比0.30;采用边长为1cm的方形单元,对待设计电动车底盘区域进行离散建模,建立有限元模型,设置扭转、正向碰撞、侧向弯曲3类工况对应的载荷与边界条件;定义两种类型的底盘设计空间,前后车架设置为三维设计域 Ω_1 与 Ω_2 ,中间大梁取横截面设置为二维设计域 Ω'_2 ,电芯区设置为非设计域 Ω_* ,其中,m为设计域 Ω_1 与 Ω_2 单元总数,n为设计域 Ω'_2 单元总数;设计变量定义为 μ 和 ν ,设计变量 μ 间接控制设计域 Ω_1 与 Ω_2 中材料有无,设计变量 ν 间接控制设计域 Ω'_2 中材料有无。

[0064] 步骤2、本实施例对于两个设计变量 μ 和 ν ,采用的密度过滤公式如:

$$[0065] \quad \tilde{\mu}_e = \frac{\sum_{i \in M_e} H_{ie} \mu_i}{\sum_{i \in M_e} H_{ie}}, e \in \Omega_{1,2}$$

$$[0066] \quad \tilde{\nu}_e = \frac{\sum_{i \in M_e} H_{ie} \nu_i}{\sum_{i \in M_e} H_{ie}}, e \in \Omega'_2$$

[0067] 式中, $M_e = \{i \mid ||X_i - X_e|| \leq r_{\min}\}$ 为单元e以 r_{\min} 为半径的邻域, X_i 与 X_e 分别为单元i与单元e的中心坐标, $H_{ie} = \max\{r_{\min} - ||X_i - X_e||, 0\}$ 为权重系数;

[0068] 本实施例所采用的Heaviside投影函数公式如下:

$$[0069] \quad \bar{\mu}_e = \frac{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(\tilde{\mu}_e - \eta))}{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(1 - \eta))}$$

$$[0070] \quad \bar{\nu}_e = \frac{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(\tilde{\nu}_e - \eta))}{\tanh(\beta\eta) + \tanh(\beta(1 - \eta))}$$

[0071] 式中, β 为投影的陡度, η 为投影阈值;投影陡度 β 每100个优化迭代步翻倍一次,直到其达到预设最大值;其中 $\bar{\mu}_e$ 和 $\bar{\nu}_e$ 分别表示 Ω_1 与 Ω_2 的单元物理变量、 Ω'_2 的单元物理变量;

[0072] 采用密度过滤与Heaviside投影函数后,设计变量 μ 和 ν 转换为物理变量 $\bar{\mu}$ 和 $\bar{\nu}$;采

用具有惩罚的实体各向同性材料方法 (SIMP) 公式, 构建单元物理变量与单元刚度的插值模型, 如下:

$$[0073] \quad E_e = E_{\min} + \bar{\mu}_e^p (E_0 - E_{\min})$$

$$[0074] \quad E_e = E_{\min} + \bar{v}_e^p (E_0 - E_{\min})$$

[0075] 式中, E_e 为单元 e 经插值获得的杨氏模量; E_0 为所用材料的杨氏模量; E_{\min} 为避免有限元求解矩阵奇异引入的小值, 本实施例中为 1.0×10^{-4} MPa; p 为 SIMP 公式的惩罚系数, 通常取 3。

[0076] 步骤 3、以最小化多轴距、多工况加权结构柔度 c 为目标函数, 以底盘车架结构体积约束 V_G 作为约束条件, 构建可扩展式电动车底盘结构拓扑优化模型, 如下:

$$[0077] \quad \min_{\mu, v} \quad c = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N c^{ij} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \mathbf{U}^{ijT} \mathbf{K}^i \mathbf{U}^{ij}$$

$$[0078] \quad \text{s. t. } V_G \leq 0$$

$$[0079] \quad \mu_e, v_e \in [0, 1], e \in \Omega_1, \Omega_2, \Omega'_2$$

$$[0080] \quad \mathbf{K}^i \mathbf{U}^{ij} = \mathbf{F}^{ij}$$

[0081] 式中, c^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的结构柔度, \mathbf{K}^i 代表轴距为 d_i 底盘结构刚度矩阵, \mathbf{U}^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的变形向量, \mathbf{F}^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的外力载荷, M 代表工况总数, 本实施例为 3 个, 即扭转、正碰、侧弯, N 代表底盘可扩展的轴距类型数目, 本实施例中共有两类轴距需求 d_1 与 d_2 。

[0082] 步骤 4、基于当前优化迭代步下的结构密度场, 通过求解 $\mathbf{K}^i \mathbf{U}^{ij} = \mathbf{F}^{ij}$, 获得第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的变形向量, 计算出加权结构柔度, 并求解底盘车架结构体积约束响应。

[0083] 步骤 5、基于链式法则, 计算所述目标函数对所述设计变量的灵敏度值, 公式如下:

[0084] 结构柔度 c 对设计变量 μ_e 的灵敏度可由链式法则求得:

$$[0085] \quad \frac{\partial c}{\partial \mu_e} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{z=1}^m \sum_{l=1}^m \frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\mu}_z} \frac{\partial \bar{\mu}_z}{\partial \tilde{\mu}_l} \frac{\partial \tilde{\mu}_l}{\partial \mu_e}$$

[0086] 其中 $\frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\mu}_z}$ 通过如下公式求得:

$$[0087] \quad \frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{\mu}_z} = p (E_0 - E_{\min}) \bar{\mu}_z^{p-1} (\mathbf{u}_z^{ijT} \mathbf{k}_0^i \mathbf{u}_z^{ij})$$

[0088] 式中, m 为设计域 Ω_1 与 Ω_2 的单元总数, \mathbf{u}_z^{ij} 代表第 j 种工况下轴距为 d_i 底盘的第 z 个单元变形量, \mathbf{k}_0^i 代表轴距为 d_i 底盘结构的单元刚度矩阵;

[0089] 结构柔度 c 对设计变量 v_e 的灵敏度可由链式法则求得:

$$[0090] \quad \frac{\partial c}{\partial v_e} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{z=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{v}_z} \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \tilde{v}_l} \frac{\partial \tilde{v}_l}{\partial v_e}$$

[0091] 其中 $\frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{v}_z}$ 通过如下公式求得:

$$[0092] \quad \frac{\partial c^{ij}}{\partial \bar{v}_z} = p (E_0 - E_{\min}) \bar{v}_z^{p-1} (\mathbf{u}_z^{ijT} \mathbf{k}_0^i \mathbf{u}_z^{ij})$$

[0093] 式中, n 为设计域 Ω'_2 的单元总数。

[0094] 步骤6、利用移动渐近线算法 (MMA), 求解拓扑优化模型, 更新所述设计变量 μ 和 ν ;

[0095] 步骤7、进行优化收敛性判断; 若所述目标函数的变化率在当前5个迭代步内低于0.2%, 则判定当前优化结果已收敛, 优化完成, 输出优化结果, 否则重复步骤4至步骤7。

[0096] 步骤8、优化结果后处理, 基于投影二分法, 设定阈值为0.5, 将上述优化结果转化为无灰度单元的清晰电动车底盘结构, 绘制该底盘结构在不同轴距 (d_1 与 d_2)、不同电芯容量 (12块标准方形电芯与15块标准方形电芯) 下的扩展状态, 如图3所示。

[0097] 以上详细描述了本发明的较佳具体实施例。应当理解, 本领域的普通技术人员无需创造性劳动就可以根据本发明的构思作出诸多修改和变化。因此, 凡本技术领域技术人员依本发明的构思在现有技术的基础上通过逻辑分析、推理或者有限的实验可以得到的技术方案, 皆应在由权利要求书所确定的保护范围内。

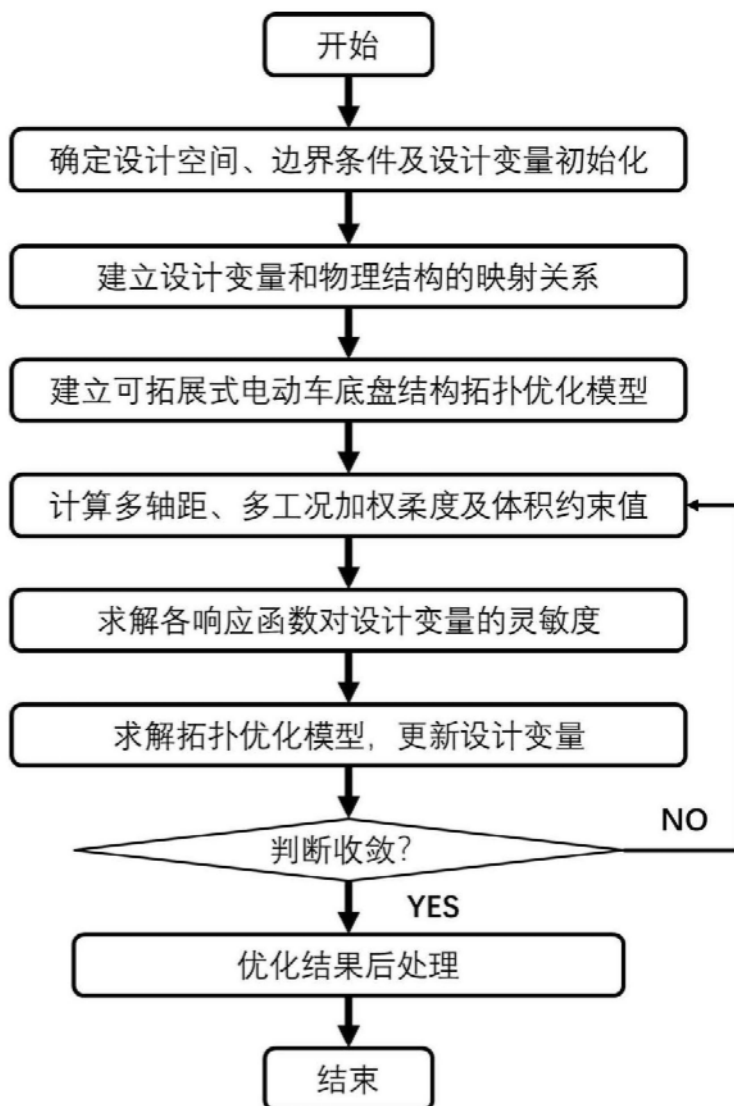


图1

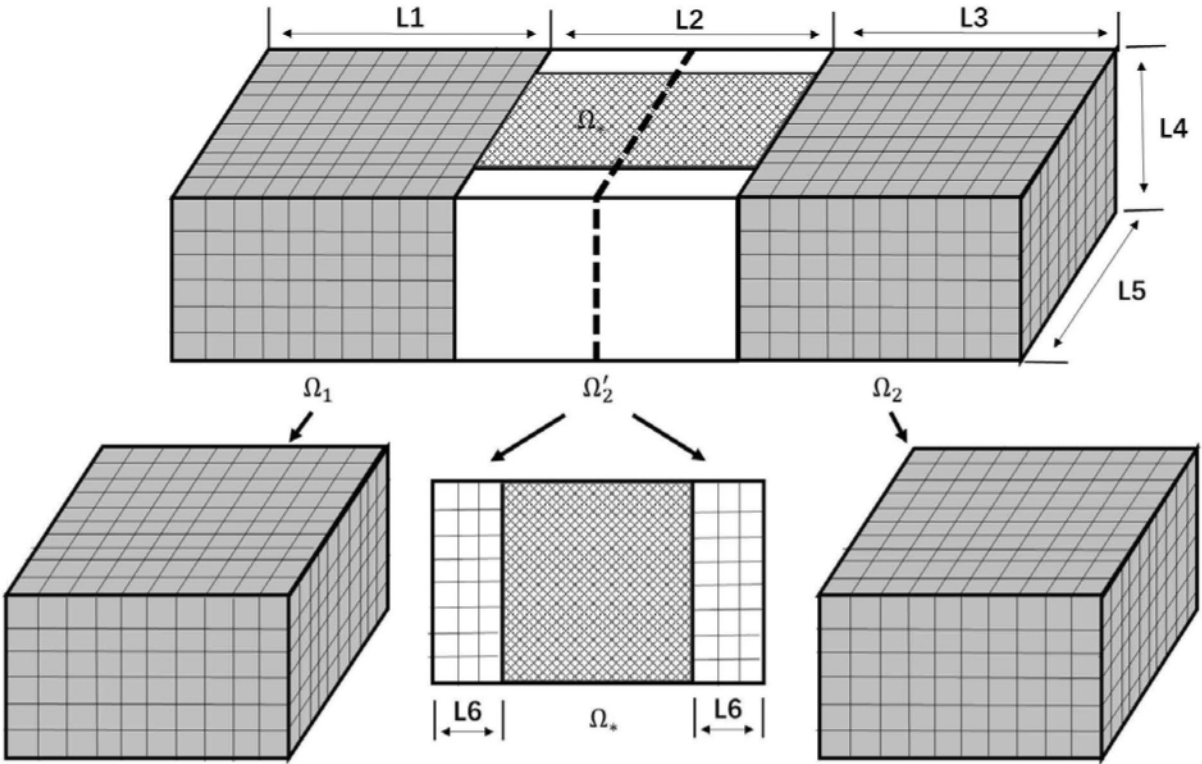


图2

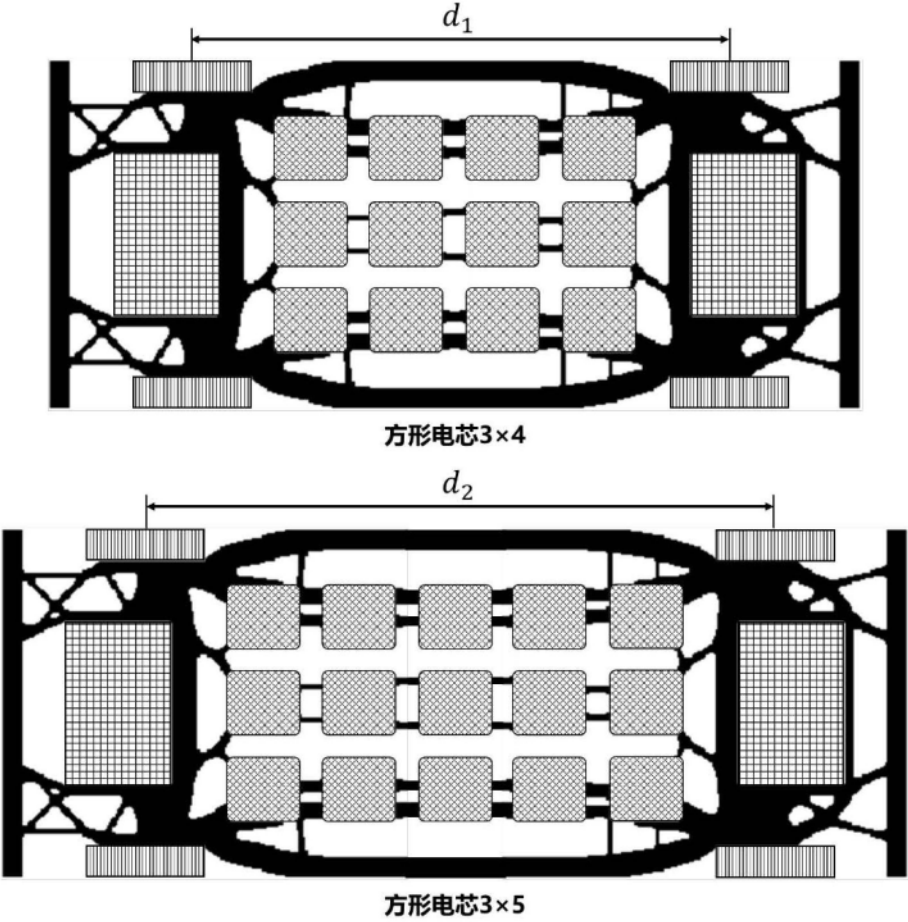


图3