电动滑板桥轻量化优化设计

撰文 / 厦门大学嘉庚学院　陈毅龙　林育兹　郑伟

本文通过 SolidWorks 建立参数化的电动滑板桥三维模型，导入 ANSYS Workbench 中进行静力学分析，根据分析的应力、应变结果，进行拓扑优化，得到合理的拓扑结构。结合拓扑优化结果和工程经验，以质量最小为目标函数，强度为约束条件，进行滑板桥尺寸优化设计，在保证滑板桥强度前提下，优化后的滑板桥比原滑板桥质量减少了 33.33%，取得良好的轻量化效果。该优化方法为电动滑板车轻量化设计提供一种思路。

一、引言

电动滑板是在传统滑板上加装一套电控驱动系统，它通过遥控器控制专用电机转向和转速，经传动机构带动滑板的轮子转动，从而使滑板行进，实现代步的作用，其作为一款新型的代步工具，深受年轻人喜爱，成为一种流行趋势。电动滑板桥是连接轮子与板面的支架结构，承担轮子与板面之间动力传递。目前，国内电动滑板桥均沿用了传统滑板桥的结构设计，但由于电动滑板不需要做出传统滑板诸如起跳、翻转之类的动作，受力情况单一，传统滑板桥结构便显得较为笨拙，强度上存在较大冗余，因此去除桥结构多余材料，减轻重量变得尤为重要。国内对电动滑板研究主要集中在电控系统和板面材料选择上，针对桥结构优化鲜有研究。

针对以上情况，本文建立了电动滑板桥有限元模型，通过静力学分析，得到电动滑板桥的应力、应变结果，根据分析结构，进行拓扑优化，得到合理的拓扑结构。随后，以质量最小为目标函数，强度为约束条件，进行电动滑板桥尺寸优化设计，在保证滑板桥强度前提下，取得了良好的轻量化效果。该研究为电动滑板桥结构设计优化提供一种思路，对减轻重量、节约成本具有重要意义。

二、电动滑板桥结构应力分析

1. 电动滑板桥有限元模型

所选电动滑板桥实物，如图 1 所示，材质为结构钢，重量为 0.66kg。根据电动滑板桥实物，在 SolidWorks 中建立三维模型，然后通过专用接口将 SolidWorks 模型无缝导入 ANSYS Workbench 中。在 ANSYS Workbench 中对其进行网格划分，划分后网格的主要参数为：网格形状六面体，网格大小 3mm，网格数 28490 个，节点数 43633 个。建立起的有限元模型，如图 2 所示。

图 1 所选电动滑板桥实物图

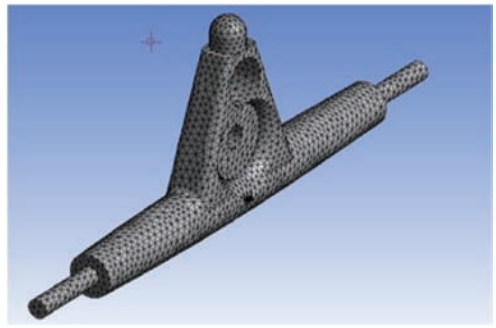

图 2 电动滑板桥有限元模型

2. 电动滑板桥静力学分析

桥两端通过滚动轴承与车轮连接，中部凹坑处通过螺栓与滑板连接，该处承受来自滑板的主要压力，顶部半球结构通过球面副与滑板连接，该处结构用于转向之用，同时承受一部分压力。电机带动车轮旋转，通过滚动轴承推动桥行进，该桥不做转动，可忽略对剪切力的分析。滑板起动瞬间，桥左右两端将受到轮子传来的水平推动力，考虑到起动瞬间并非常规状态，同时滑板匀速行驶过程中该力为零，将模型简化，本文只对静态下受力情况进行分析。

当人静止的站在滑板上时，受力分析如图 3 所示。人和滑板自重合计 100kg，重力 G 为 1000N，每根桥竖直方向承重 F 为 500N，因桥与地面水平方向成 45°，所以桥承受来自板面的压力 N 约为 700N。取左右 2 端轴承连接处为固定端，得到载荷模型，如图 3 所示。其中 A 处紫色部分为固定约束，B 处红色部分为施加在桥上的载荷。

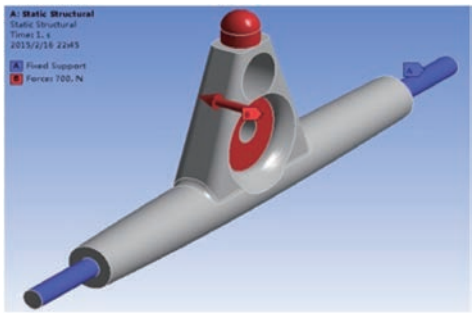

图 3 电动滑板桥载荷模型图

根据材料力学第四强度理论，分析计算后的最大等效应力云图如图 4 所示，总变形量如图 5 所示。

由图 5 可见，应力最大处主要集中在桥左右 2 端的位置 4 处，该处截面形状的突变引起了应力集中现象，最大等效应力达到了 138.75MP。在该模型下，滑板桥等效应力小

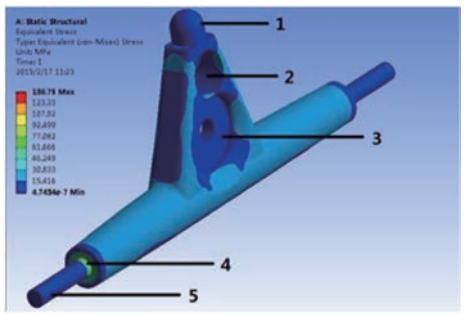

图 4 最大等效应力分析云图

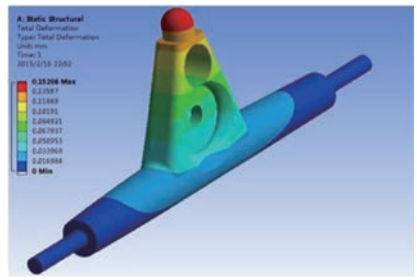

图 5 总变形量分析云图

于 45 钢屈服极限 355MP，安全系数为：

$$K=\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_s}=\frac{355MP}{138.75MP}=2.56$$

该安全系数大于塑性材料结构钢常用的 1.2 ~ 2.5 安全系数，因此该滑板桥满足强度要求。

由图 6 可知，最大变形处发生在红色半球结构上，变形量为 0.15mm，该变形量对于间隙配合的球面副结构没有影响，因此该轮桥可正常使用。

由图 5 可见，大多数位置最大等效应力较小，其中位置 1、2、3、5 处最大等效应力很小，在 15.42MP 以下，整根桥应力分布不均，材料存在大量浪费现象，额外的重量也影响动力性能。由于电动滑板的工作情况较单一，原桥结构强度冗余较大，无法满足电动滑板车设计要求，因此对该桥进行拓扑优化设计，去除掉多余的材料，重新设计结构。

三、电动滑板桥结构拓扑优化

1. 拓扑优化理论基础

拓扑优化的目的是寻求结构的刚度在设计空间最佳的分布形式，或在设计域空间需求结构最佳的传力路线，以优化结构的某些性能或减轻结构的重量。拓扑优化主要应用于概念设计阶段，得到最佳的材料分布，避免设计的盲目性，经拓扑优化后设计方案再经形状和尺寸优化以得到最优方案。

针对连续体拓扑优化，目前有变厚度法、均匀化理论和变密度法等诸多理论。本文中采用变密度法，其本质上是一种 $\{0,1\}$ 离散变量的组合优化问题，因此可建立如下数学模型：

$$Find: x=\left(x_1,x_2,\cdots x_n\right)^T$$

$$Min: \mathrm{C}\left(x\right)=F^TU$$

$$S.t.\begin{cases} V\le V^m \\ F\le KU \\ 0<x_{\min}\le x_i\le 1\left(i=1,\cdots,n\right)\end{cases}$$

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

式中，*xi* 为设计变量，代表离散单元相对密度，取值在 [x_{min},1] 之间连续值 ,*n* 代表设计变量个数。*K* 为总刚度矩阵，*U* 为结构的位移向量，*F* 为结构所受的外力向量，*V* 为结构体积。

2. 电动滑板桥拓扑优化设计

以最大等效应力为约束条件，质量为目标函数，通过 ANSYS Workbench 中的 Shape Optimization 功能对所选桥进行优化，选择 Target Reduction 值为 30%，优化后结果如图 6、图 7 所示。

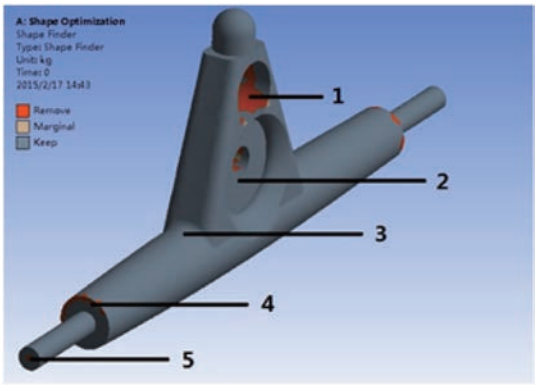

图 6 桥拓扑优化外貌云图

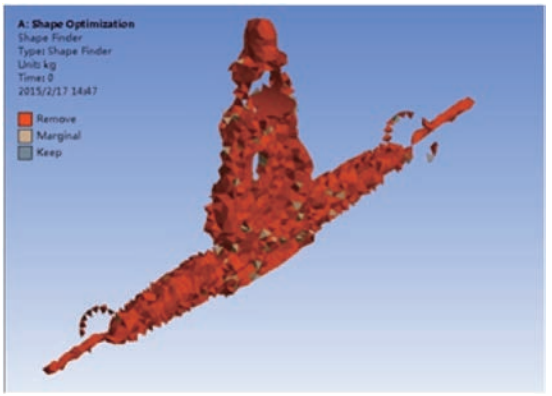

图 7 桥拓扑优化去除云图

图 6 为 Shape Optimization 给出的优化外貌图，其中橙色部分为可去除部分，米黄部分为边界区域，灰色部分为保留部分。图 7 为上限等值面云图，表示该轮桥内部可去除的部分。

综合分析图 4 ~ 7，对原滑板桥做形状优化处理。

（1）整体可去除量很大，达 30% 以上，考虑到内部掏空方式在制造上较难实现，主要采取从外部挖除材料方法进行优化设计。

（2）图 6 中 1 处圆孔可进一步扩大。

（3）2 处为连接处，因配合要求，中心形状不变，周边一圈挖除多余材料。

（4）3 处有 1 过渡圆角，经 Design Exploration 模块参数化分析后可知，圆角几乎不会影响最大等效应力，但会影响最大形变量，随着圆角增大形变趋小。

（5）4 处考虑到与轴承的配合，受到尺寸约束，不做车削外径处理。

（6）5 处考虑到加工难度和成本，不做镗孔去除处理。

根据以上几点，先在 SolidWorks 中对该桥形状做修改，随后导入 ANSYS 中进行静力学分析，经过几十次修改和比较，得到新形状，新形状的最大等效应力和总变形量如图 8、9 所示。

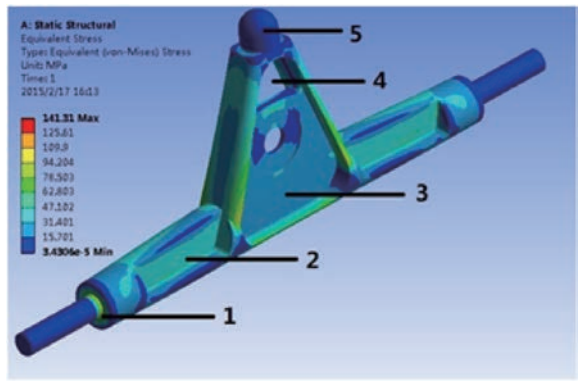

图 8 形状优化后最大等效应力云图

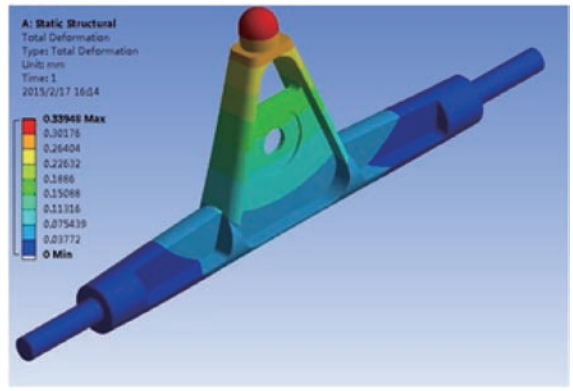

图 9 形状优化后总变形量云图

图 8 中，2、3、4 处挖除多余材料 ,1、5 处不变，整体应力分布较原结构均匀。应力最大处位于 1 处截面突变处，为 141.31MP，略大于优化前的 138.75MP。重量为 0.46kg，仅为优化前质量的 69.79%。最大变形量 0.34mm，虽较优

化前小幅提升，但仍然很小，对正常使用没有影响。

四、电动滑板桥尺寸优化设计

1. 尺寸优化理论基础

尺寸优化是拓扑和形状固定条件下一种参数化的技术，以几何尺寸为设计变量，寻找最优参数组合的一种方法。优化设计有 3 要素，即设计变量、目标函数和约束条件。设计变量是发生改变从而提高性能的一组参数；目标函数要求最优的设计性能，是关于设计变量的函数；约束条件是对设计的限制，是对设计变量和其他性能的要求。尺寸优化数学模型如下：

$$min: f(x) = Mass$$

$$X = (x_1, x_2, \cdots x_n)^T$$

$$S.t.: f_i(x) \geq f_1(x)$$

$$x_{i\max} \leq x_i \leq x_{i\min}$$

式中，$f(x)$ 为目标函数，X 为设计变量，$f_i(x)$ 为约束条件，x_2 为设计变量约束。

2. 四轮电动滑板车轮尺寸优化

根据尺寸优化数学模型，选取图 8 中 2 处的挖除深度为变量 X，质量为目标函数 $f(x)$，等效应力为约束条件 $f_i(x)$，经过 Design Exploration 模块求解后，获得参数响应图，如图 10、11 所示。

图 10 中，横坐标表示挖除深度，纵坐标表示最大等效应力，最大等效应力随着挖除深度增加而变大。图 11 中，横坐标表示挖除深度，纵坐标表示桥的质量，质量随着挖除深度增加而减小。

取安全系数 2.5，则允许最大等效应力为 142MP，取该值为约束条件，优化后的目标质量为 0.44kg。滑板桥优

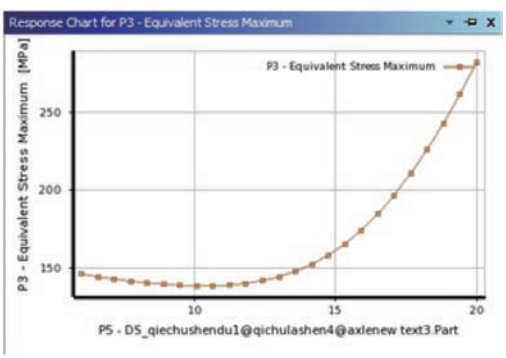

图 10 最大等效应力参数响应图

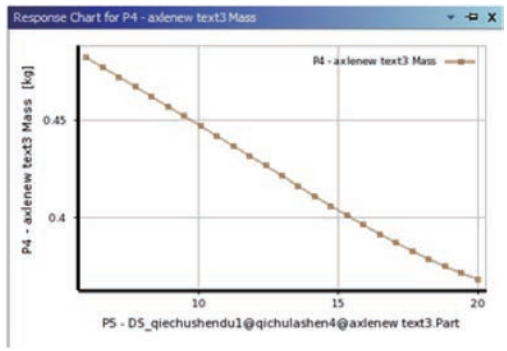

图 11 质量参数响应图

化前后最大等效应力、质量对比如表所示。

表 优化前后最大等效应力、质量对比情况

参数优化前优化后对比			
最大等效应力	138.75MP	142MP	增加 2.29%
桥质量	0.66kg	0.44kg	减少 33.33%

由表可知，通过优化设计，在满足强度前提下，将质量减少了 33.33%，获得了良好的轻量化效果。

五、结语

根据某电动滑板桥实物，建立有限元模型，通过拓扑优化，将冗余材料去除，设计出新的结构，解决了应力分布不均的问题并进行尺寸优化。优化结果表明，在满足强度的情况下，桥质量减少了 33.33%，获得了良好的轻量化效果。通过轻量化优化，减少原滑板桥质量、提高材料利用率、降低生产成本、提高动力性能，使该电动滑板更具市场竞争力。该优化设计为电动滑板桥改进提供借鉴，具有工程实际意义。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn