

FSAE 赛车车架有限元分析与结构优化

徐丰¹, 崔国华¹, 麻林川², 张建卫³

(1. 河北工程大学机电工程学院, 河北邯郸 056038; 2. 中国汽车技术研究中心, 天津 300300;

3. 冀中能源股份有限公司水泥厂 河北邯郸 054103)

摘要: 为了更好地优化 FSAE 赛车车架性能, 使用 Solidworks 软件建立车架三维模型, 在 Hypermesh 中进行有限元分析前处理, 进而在 Nastran 中进行静态受力分析和模态分析。根据上述分析方法提出在 BEAM 单元有限元模型中首先进行车架结构优化与评价, 再修改车架的三维几何模型的优化方法, 节省了车架优化过程中修改三维模型再分析的时间, 缩短了车架研发周期, 提高了效率, 对优化赛车车架具有重要的意义。

关键词: 车架; 静态; 模态; 有限元; 优化方法

中图分类号: TU463.32

文献标识码: A

Finite element analysis and structural optimization on FSAE racing frame

XU Feng¹, CUI Guo-hua¹, MA Lin-chuan², ZHANG Jian-wei³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;

2. China Automotive Technology and Research Center, Tianjin 300300, China;

3. Jizhong Energy Co., Ltd. Cement Plant in Handan, Hebei Handan 054103, China)

Abstract: In order to better optimize the performance of FSAE racing frame, a three-dimensional model of frame was built by using Solidworks software, finite element analysis was pre-treated in HyperMesh, and then static stress analysis and modal analysis were carried out in Nastran. The frame structure was optimized and evaluated firstly in BEAM unit of finite element models, and then the frame of the three-dimensional geometry optimization model was modified, which above saved time of reanalysis during modifying three-dimensional model of frame optimization, shortened the period of study and exploration and improve the efficiency. The results have great signification to optimize the car frame.

Key words: frame; static; modal; finite element; optimization method

车架是 FSAE 赛车所有总成的承载体及重要的受力结构, 对 FSAE 赛车车架分析与优化具有重要意义, 吉林大学赵帅等通过利用 MSC Patran 建立车架的梁单元有限元模型, 并进行多种工况的强度和刚度分析^[1]; 辽宁工业大学张宝玉等通过利用 HyperMesh 对车架进行中面提取, 壳网格划分, 并对强度和刚度进行了分析^[2]。

本文通过有限元方法, 对桁架式赛车车架进行静态受力分析和模态分析, 比较 SHELL 单元与 BEAM 单元建立的有限元模型对分析结果的影

响^[3]。提出在 BEAM 单元有限元模型中首先进行车架结构优化与评价, 再修改车架的三维几何模型的优化方法, 节省了车架优化过程中修改三维模型再分析的时间, 缩短了车架研发周期, 提高了效率。

1 建立几何模型和有限元模型

1.1 三维几何模型的建立

根据中国大学生方程式赛车车架的结构要

求^[4]在 Solidworks 中建立车架的三维几何模型。Solidworks 集成的焊件模块使空间桁架结构设计方便、快捷^[5]。插入结构构件,先创建构件的线框布局图,再通过 Solidworks 焊件轮廓库中的标准型材插入结构构件轮廓,就生成了需要的桁架结构。赛车车架的三维几何模型如图 1 所示。

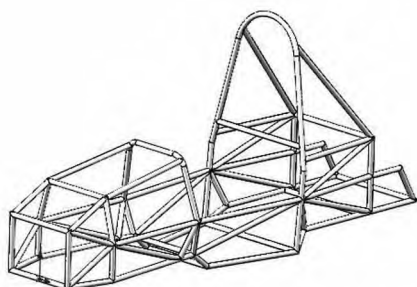


图1 FSAE赛车车架三维几何模型

Fig.1 The three-dimensional geometric model of FSAE racing frame

1.2 有限元模型的建模和简化

在确定赛车实体车架制造之前,构造一个有限元模型来进行静态受力分析和模态分析,确保整车的安全性、动力性及操作稳定性等。

利用 Hypermesh 作为的 CAE 前处理工具,快速建立高质量 CAE 分析模型。在导入的车架三维模型中进行中面提取、几何清理、网格划分和网格质量检查,管件之间的焊缝通过 RBAR 单元焊接,如图 2 所示。对于厚度尺寸远小于长度的杆件可以使用中面提取功能,可以代替实际的几何体。网格质量是指网格形状的合理性,使用 AutoMesh 划分的网格不能直接用于分析^[6],因此网格质量检查是有限元分析计算中必不可少的一步。网格质量检查包括:单元连续性检查、单元的法线方向的检查、重复单元的检查 and 单元各项质量检查等^[7]。

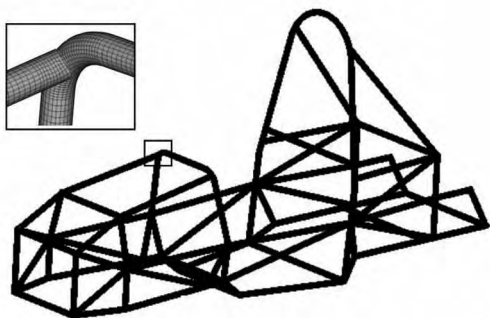


图2 车架SHELL单元有限元模型

Fig.2 The finite element model of SHELL unit frame

有限元模型的单元种类很多,用不同单元建

立的模型也会影响最终计算和分析的结果,单元的数量、大小和方向以及加载和边界条件都是获得车架刚度的关键^[8-9]。桁架式车架可以进一步被分解简化,保留焊接接头,将其余部分钢管简化成 1D 单元,在 HyperMesh 中用 Beam 单元作为 1D 单元用来取代各个钢管^[10],从导入的几何模型提取出各个钢管的中心线进行 Beam 单元划分,单元大小为 5 mm,钢管连接处通过 rigid 进行连接,建立成赛车车架的 1D 简化杆件有限元模型,如图 3 所示。

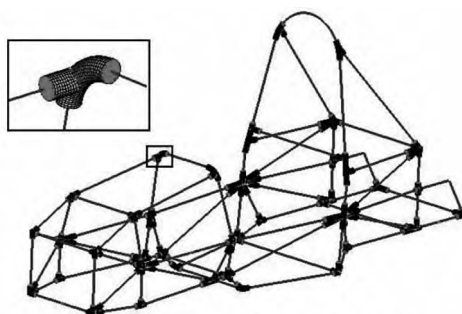


图3 车架SHELL_B单元有限元模型

Fig.3 The finite element model of frame SHELL_B unit

进一步将连接处简化成一个节点,桁架式车架被分解简化成节点和 1D 单元,分别代表钢管连接点和每一根钢管,可能有多个 1D 单元连接在同一个节点处。如图 4 所示。

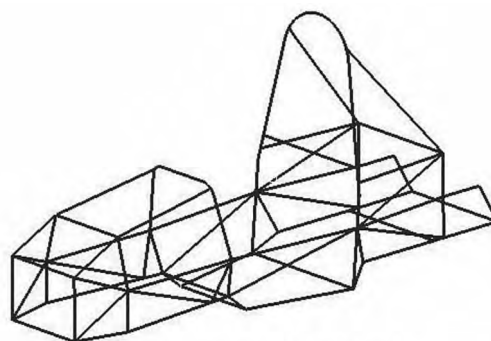


图4 车架BEAM单元有限元模型

Fig.4 The finite element model of frame BEAM unit

2 车架结构刚度

刚度的评价指标主要有扭转刚度和弯曲刚度等,车架的扭转刚度是影响力学性能的重要指标^[11]。模拟车架扭转变形,约束后右悬架下 A 臂与车架连接点中点 3 个平动自由度;约束后左悬架下 A 臂与车架连接中点 Y、Z 向两个平动自由度;约束最前端下杆中点 Z 向平动自由度。对前左、右摇臂与车架连接点分别施加 +1000 N、-

1000 N 的力,让车架发生纯扭转变形。在 Nastran 中计算,得到施加力的作用点的位移和总变形图,如图 5 所示。

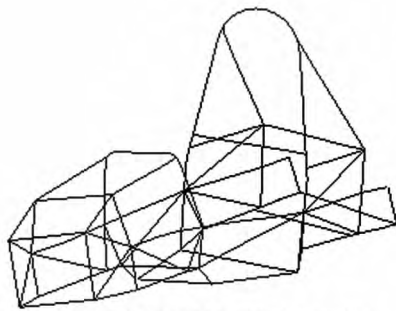


图5 简化后的车架扭转变形图

Fig.5 The torsional deformation maps of simplified frame

扭转刚度计算公式如下:

$$K_T = \frac{T}{\theta} = \frac{Fb}{\theta} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{h}{\pi d} \times 180 \quad (2)$$

式中 T - 车架在扭转载荷下的扭矩; b - 前悬左右弹簧两连接点距离; θ - 车架扭转角,即前轴转角; h - 加载点垂直位移差; d - 两加载点的距离。

将前悬架处的扭转刚度作为车架的扭转刚度(则 $d = b$) ,有

$$K_T = \frac{T}{\theta} = \frac{F\pi b^2}{180h} \quad (3)$$

经计算,得到车架在 3 种有限元模型下的扭转刚度,如表 1。

表 1 车架在 3 种有限元模型下的扭转刚度

Tab.1 The three kinds of finite element model of torsional stiffness of frame

	F/N	h/m	b/m	K_T //Nm \cdot $^{\circ}$ $^{-1}$
SHELL	1000	0.012 674	0.502	346.86
SHELL_B	1000	0.011 754	0.502	374.01
BEAM	1000	0.010 37	0.502	423.92

所得 3 种车架有限元模型的扭转刚度值相近,且成递增趋势,在一定的误差范围内。国内外赛车所设计的车架扭转刚度经验值一般为 1 000 N \cdot m/deg 以上^[12],故本车架扭转刚度值偏小,可以尽可能多地使用三角形结构提高车架的抗扭转刚度。

3 模态分析

赛车车架的模态分析就是运用有限元计算方法求取固有频率和固有振型^[13]。赛车的激励源主要有来自道路不平度引起的激励频率低于 1 ~

20 Hz,来自车轮不平衡引起的激励频率低于 11 Hz,发动机怠速为 3 000 r/min 时频率为 100 Hz,发动机常用转速 7 000 ~ 10 000 r/min 时频率为 233 ~ 333 Hz,赛车车架是否满足振动要求,主要取决于车架的各级固有频率能不能避开赛车的激振频率。通过有限元方法,在 Nastran 软件中对车架模型进行自由模态分析,分析结果如图 6 所示。

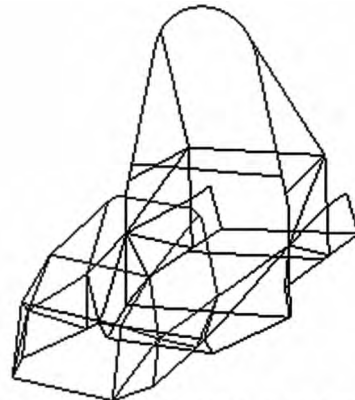


图6 车架BEAM单元模态分析结果

Fig.6 The analysis results of frame BEAM unit modal

模态分析前 6 阶是结构发生刚体位移,自然频率为 0,从第 7 阶开始计算车架在弯曲、扭转以及其组合情况下的 5 阶振动频率,计算结果如表 2 所示。

表 2 车架在 3 种有限元模型下的模态分析结果

Tab.2 The analysis results of frame with three kinds of finite element model modal

阶数	频率/Hz		
	SHELL	SHELL_B	BEAM
7	32.12	33.13	34.58
8	52.64	53.81	56.69
9	60.94	62.8	67.8
10	74.94	78.05	76.78
11	77.58	79.98	86.14

分析结果可得:3 种车架有限元模型的振动频率相近,且成递增趋势,不同单元对结果的影响误差在 10 Hz 以内。车架的最低振动频率 32.12 Hz,大于因赛道不平和车轮不平衡引起的振动频率,车架的最高频率 86.14 Hz,也低于发动机在怠速及常用车速下引起的振动频率。所以该车架不会发生共振,满足设计要求。同时也说明了有限元模型的简化可以保证计算与分析的精度。

4 结构优化方法

车架是自制部件中最重要的一个部分,是赛车的基体,车架轻量化对赛车动力性及燃油经济性影响比较大。但轻量化不可以牺牲赛车的整体

性能和忽视基本的安全要求甚至违反大赛规则。车架受力最为复杂,要承受所有部件传来的力,如车架上零部件所施加的载荷、地面的反馈力。车架的刚度对比赛的最终成绩影响不是很明显,但提高车架的扭转刚度是设计车架的重要指标之一。采用更多的三角形稳定结构能够很好的提高车架的刚度,同时不能增加太多车架重量,通过单位质量扭转刚度进行评价。通过对桁架式赛车车架 BEAM 单元有限元模型进行优化,分析得到优化结果后再对三维几何模型进行修改。

前隔壁顶端硬点坐标由原来的(0,190,280)、(0,-190,280)分别修改为(0,140,280)、(0,-140,280),就是将两个硬点分别向里(即分别向Y轴的正负方向)移动50mm,使前隔壁变成梯形;前驾驶室顶端硬点坐标(-244.7,190,400)、(-244.7,-190,400)分别修改为(-244.7,140,400)、(-244.7,-140,400),也就是将两个硬点分别向里(即分别向Y轴的正负方向)移动50mm,与前环接触的硬点坐标(-782.54,170.34,480)、(-782.54,-170.34,480)分别修改为(-780.41,149,495.13)、(-780.41,-149,495.13),使前驾驶室顶部也成为一个梯形;前驾驶室侧面上端加两根斜杆,把梯形分成3个三角形稳定结构。

驾驶室底部加两根交叉斜杆,将一个梯形分成4个三角形结构,在发动机舱底部加一根横杆,封闭底部结构,后桥部分加一根横杆,封闭结构,同时两边各加一根斜杆与发动机舱构成三角形结构,优化结构如图7所示。

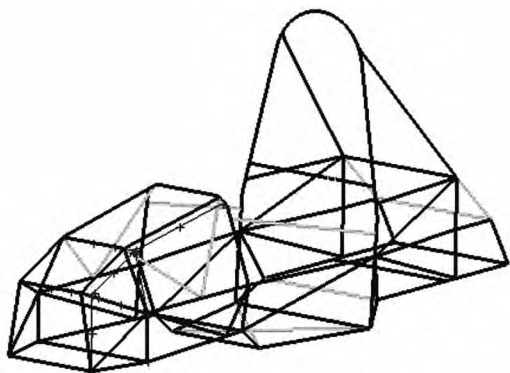


图7 BEAM单元优化车架结构

Fig.7 BEAM unit frame structure optimization

分析结果: $F = 1\ 000\ \text{N}$, $h = 2.013\ \text{mm}$, $b = 502\ \text{mm}$, $m = 34.65\ \text{kg}$, 由式(3)计算得扭转刚度 $K_T = 1\ 091.92\ \text{N} \cdot \text{m}/\text{deg}$, 扭转刚度比优化前提升了157.58%, 有显著提高。同时质量也增加了

12.24%。

质量增加对整车动力性及燃油经济性不利,所以在保证扭转刚度显著提升的前提下,减轻车架重量也有重要意义^[14]。在前面已经优化的基础上进行减重,将前驾驶室侧面上部的两根斜杆简化成一根斜拉杆,也就是将梯形分成2个三角形;去掉驾驶室底部的两根斜拉杆;在主环支撑上增加一根横杆。如图8所示。

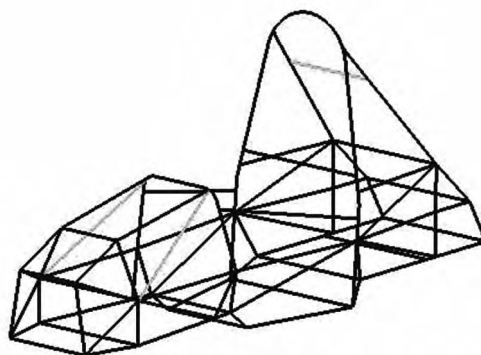


图8 减重后的优化结构

Fig.8 Optimize the structure after weight loss

分析结果: $F = 1\ 000\ \text{N}$, $h = 3.27\ \text{mm}$, $b = 502\ \text{mm}$, $m = 31.72\ \text{kg}$, 由式(3)计算得扭转刚度 $K_T = 671.57\ \text{N} \cdot \text{m}/\text{deg}$, 扭转刚度比优化前提升了58.4%, 有显著提高。同时质量只增加了2.75%。根据 BEAM 单元有限元模型的优化结果修改三维几何模型如图9所示。

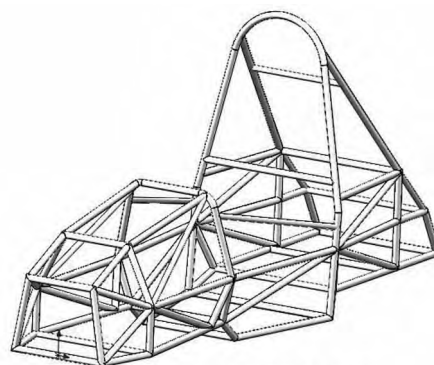


图9 优化后的三维几何模型

Fig.9 3D geometric models optimized

5 结论

BEAM 单元与 SHELL 单元建立的车架有限元模型的分析结果基本相同。在梁单元有限元模型中首先进行车架结构优化与评价,再修改车架的三维几何模型,节省了车架优化过程中修改三维模型再分析的时间,缩短了车架研发周期,提高了效率。

参考文献:

- [1]赵帅,隰大帅,王世朝,等. FSAE 赛车车架的强度和刚度分析[J]. 计算机辅助工程, 2011(04): 53-56.
- [2]张宝玉,韩忠浩,杨鹏. FSC 赛车车架的强度及刚度计算与分析[J]. 辽宁工业大学学报:自然科学版, 2013(06): 378-382.
- [3]董永朋,王佩艳,刘洋,等. 采用 Beam 单元模拟复合材料加筋桁条的优化分析[J]. 材料科学与工程学报, 2010(06): 857-861.
- [4]中国大学生方程式汽车大赛组委会. 2014 中国大学生方程式汽车大赛参赛手册[R]. 北京: 中国汽车工程协会, 2014.
- [5]孟祥宇,石义民,李子珍,等. 基于 SolidWorks 焊件模块的消防车骨架建模[J]. 专用汽车, 2014(05): 105-108.
- [6]王明强,朱永梅,刘文欣. 有限元网格划分方法应用研究[J]. 机械设计与制造, 2004(01): 22-24.
- [7]李海峰,吴冀川,刘建波,等. 有限元网格剖分与网格质量判定指标[J]. 中国机械工程, 2012(03): 368-377.
- [8]赵紫纯. 车架结构轻量化设计研究[D]. 中北大学, 2013.
- [9]于少东,黄丹平,田建平,等. 基于 Kinetis K60 的智能车控制系统设计[J]. 四川理工学院学报:自然科学版, 2014, 27(5): 37-42.
- [10]田云强. 基于虚拟样机技术的摩托车车架结构强度分析[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [11]陈宾. 基于 FSAE 整车动力学仿真的车架 CAE 分析及优化[D]. 西安:长安大学, 2013.
- [12]李越辉,尉庆国. 基于 ANSYS 的 FSC 赛车车架有限元分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2012(11): 21-24.
- [13]王桂梅,李凤玲,张平,等. 基于 PRO/E 和 NAS-TRAN 的装载机工作装置模态分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2011, 28(03): 91-93.
- [14]冯启山,殷承良,朱禹. 混合动力汽车动力性和经济性道路试验[J]. 机械工程学报, 2005(12): 19-24.

(责任编辑 刘存英)