

Lightweight Formula Frame Analysis Research

Xinan Cheng, Chuanchang Li, Jianjun Zhao

School of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai
Email: 935482575@qq.com

Received: Jun. 8th, 2017; accepted: Jun. 23rd, 2017; published: Jun. 28th, 2017

Abstract

Formula racing frame is the vehicle assembly and components of the assembly and bearing the base. It is more than 10% of the quality of car racing, so the lightweight frame can improve the car's fuel economy, power and handling stability and other dynamic performance. In this paper, the design criteria and rules of the frame are analyzed, and the optimization method of steel frame design is studied. Then, the 3D geometric model of the FSC racing frame is established, the geometric model is introduced into the finite element software, the finite element model of the frame is established, the static force analysis and the modal analysis are carried out on the frame, and the structure optimization and lightweight design are analyzed according to the simulation results, and finally the racing frame program is determined to achieve the framework to reduce the quality of 1.4 kg structure optimization goals. The lightweight design method has important reference for other industrial products design and manufacture.

Keywords

FSC Racing Car, Lightweight Frame, Finite Element, Frame

方程式赛车车架轻量化分析研究

程锡男, 李传昌, 赵健俊

上海工程技术大学 汽车学院, 上海
Email: 935482575@qq.com

收稿日期: 2017年6月8日; 录用日期: 2017年6月23日; 发布日期: 2017年6月28日

摘要

方程式赛车车架是整车各总成及零部件的装配和承载基体。它所占赛车整备质量百分比10%以上, 因此

轻量化的车架可以提高赛车的燃油经济性、动力性及操纵稳定性等动态性能。本文首先分析了车架设计标准与规则,研究了钢管车架设计优化方法。然后建立FSC赛车车架的三维几何模型,将几何模型导入到有限元软件中,建立了车架的有限元模型,对车架进行了静态受力和模态分析,根据仿真分析结果进行结构优化和轻量化设计,最后确定赛车车架方案,实现车架减轻质量1.4 kg结构优化目标。本文轻量化设计方法对赛车或其他工业制品设计制造有重要借鉴意义。

关键词

FSC赛车, 车架轻量化, 有限元, 车架

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

汽车车架是整车结构的重要组成部分,它支撑和连接了汽车的其他总成和部件。同时它承受着传递给它的各种力和力矩。对于赛车而言,较轻的车架可提高燃油经济性与动力性,因此,汽车车架要在尽量减少重量的基础上,保证有足够的强度、刚度、可靠性及寿命。钢管车架常用于赛车领域,为了增强赛车的安全性而增设。赛车比赛容易发生碰撞和翻滚,因此会将比赛车的内饰拆除,焊装一根根按照车厢内部的轮廓进行连接或焊接的框架。大学生方程式赛车主要分为桁架式结构的钢管车架和复合材料的单体壳结构这两种类型。本文采取的是桁架式钢管车架作为赛车的车架。

车架基本结构包括:前鼻,前后防滚架,主防滚架,防滚架斜撑,前隔板支撑系统,侧面防撞结构。前鼻指的是前环之前的部分,前鼻需要承受悬架跳动,车轮冲击,踏板载荷以及可能出现的正面撞击等多种载荷。前后防滚架是使用冷拔无缝碳素钢管弯制而成的可拆卸的钢管组合件,能在车辆遭受强烈冲击时保护车身不发生严重变形损坏。侧面防撞机构则是在车辆遭受侧方向的冲击时提供保护。

2. 方程式赛车车架结构设计

FSC 赛事规则对钢管车架的结构,钢管规格,材质都做出了要求。本设计车架使用钢管组成的桁架式(空间管阵式)车架,它具有刚度大、质量小、成本低和结构紧凑的特点。钢管车架结构设计规则如图1,图2所示。

车架结构方面主要要求钢管之间的连接必须点对点,形成三角稳定结构。如图3所示,这样在发生碰撞时,每根钢管都会有力的传递予以支撑。另外,这种设计还保证了车手在赛车发生侧翻或翻滚时,车手的头部和身体都不会和地面发生接触,从而保证车手安全。

车架基准钢铁材料应使用低碳钢或合金钢管件,不同部件均要保证赛规最小尺寸规格要求。其中4130钢的力学性能远远高于Q235与45钢,虽然焊接稍有困难,但是靠当下的焊接工艺完全可以保证,所以4130钢管材非常适合制作车架。车架各部位使用钢管尺寸如表1所示。

车架侧边防撞结构要求桁架式车架的侧边防撞结构必须由车手(车手以正常驾驶姿势乘坐)两边各至少三根管件构成,侧面防撞设计结构如图4所示。

驾驶舱为了保证驾驶员的逃生空间和腿部空间,规则还限定了驾驶舱最小开口和驾驶舱内部横截面的空间要求。驾驶舱空间要求如图5所示。

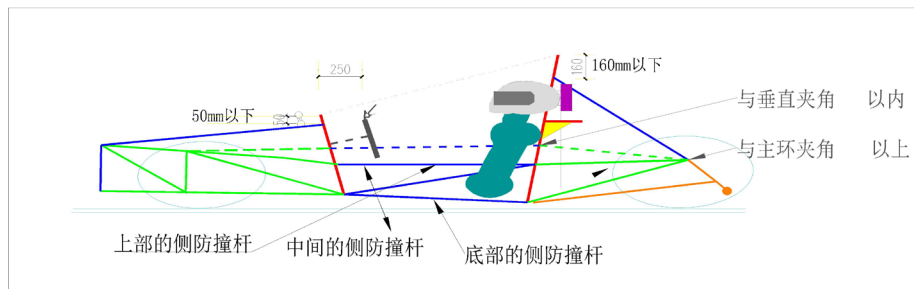


Figure 1. Overall frame rules requirements
图 1. 车架规则总体要求

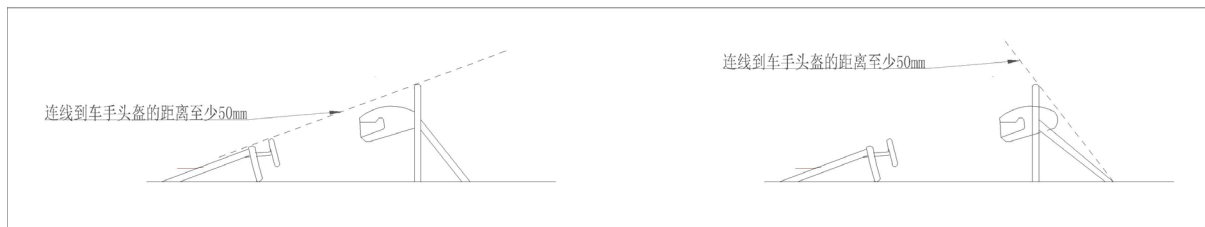


Figure 2. Frame structure
图 2. 车架头部结构要求

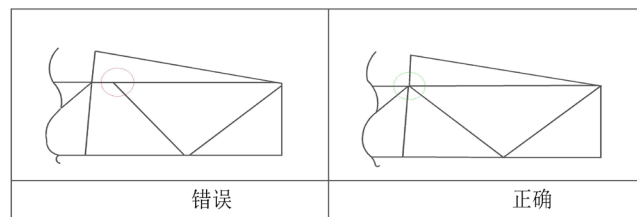


Figure 3. Frame geometry structure requirements
图 3. 车架几何结构要求

Table 1. Benchmark minimum size iron and steel materials
表 1. 基准钢铁材料最小尺寸规格

部件或用途	外径 * 壁厚
主环和前环, 肩带安装杆	圆管 25.4 * 2.4 mm;
	圆管 25.0 * 2.50 mm
侧边防撞机构, 前隔板, 防滚架斜撑, 安全带安装杆 (不包括上述部分, 指肩带安装杆)	圆管 25.4 mm * 1.65 mm;
	圆管 25.0 mm * 1.75 mm;
	圆管 25.4 mm * 1.60 mm;
	方管 25.4 mm * 25.4 mm * 1.25 mm;
	方管 25.0 mm * 25.0 mm * 1.25 mm;
前隔板支撑, 主环斜撑支撑	方管 26.0 mm * 26.0 mm * 1.2 mm
	圆管 25.4 mm * 1.25 mm
	圆管 25.0 mm * 1.5 mm
	圆管 26.0 mm * 1.2 mm

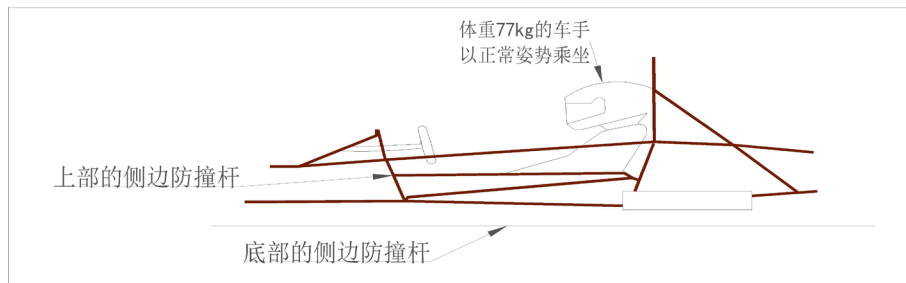


Figure 4. Frame side fender structure requirements

图 4. 车架侧面防撞结构要求

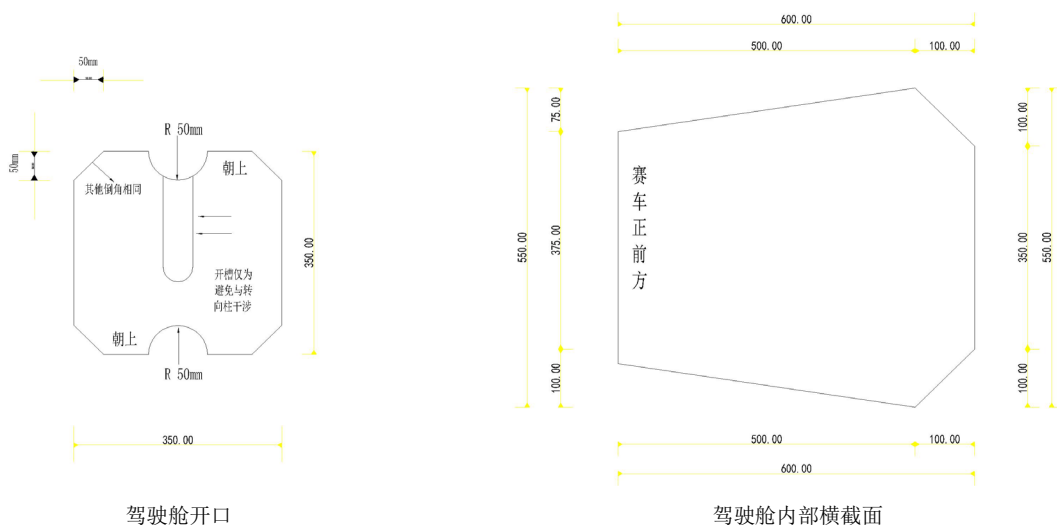


Figure 5. The cockpit space requirements

图 5. 驾驶舱空间要求

车架轻量化的研究不是单一的，轻量化主要有三个方向：一是材料轻量化，轻质高强度材料的选择。二是工艺轻量化，制作工艺的创新和提升。三是结构轻量化，优化车架结构和整体布局。以上三种轻量化方法既能独立实现，也能相辅相成，构成一套思路完整的 FSC 赛车车架轻量化体系[1]。

3. 轻量化的方法

3.1. 方程式赛车车架材料轻量化

材料轻量化是指运用轻质高强度材料来实现降低车架质量的方法。对于车架，受载荷后在尺寸和形状上出现变形等现象。根据载荷的不同形式，变形可以分为剪切、拉伸、压缩、弯曲及扭转等。每种材料都有独特的特性，呈现出来的承受荷载的能力也不相同，这个不相同的现象被称为材料的强度特性和刚度特性[2]。

方程式赛车车架材料的强度

结构杆件所用材料在规定的荷载作用下，材料发生破坏时的应力称为强度，要求不破坏的要求，称为强度要求。根据外力作用方式不同，材料会受到抗拉强度、抗压强度、抗剪强度、屈服强度、抗弯强度、冲击强度、疲劳强度、蠕变强度等。在 FSC 赛车车身轻量化设计中屈服强度是需要研究的。传统的强度设计方法，塑性材料以屈服强度为标准，规定许用应力 $[\sigma] = \sigma_{ys}/n$ ，安全系数 n 因场合不同可从 1.1 到 2 或更大，对脆性材料，以抗拉强度为标准，规定许用应力 $[\sigma] = \sigma_b/n$ ，安全系数 n 一般取 6。关于材

料强度和质量的轻量化可以通过材料的屈服强度来分析，屈服强度越高，车架性能越好。

方程式赛车车架材料的刚度

材料刚度符号： E ， $E = \sigma/\varepsilon$ 式中 σ -在弹性变形范围内的应力(MPa)， ε -在应力作用下产生的应变，即相对变形量，无量纲。材料刚度简称刚度，即材料力学中的弹性模量。从公式中可看出它的物理意义是指金属材料产生单位弹性的相对变形所需的应力，它是表征材料抵抗弹性变形能力的力学性能指标。FSC 赛车中常用的几种轻质材料比屈服强度与效率值对比见表 2。

3.2. 方程式赛车车架结构轻量化

结构优化是在原车架基础上分析存在的问题，在确定优化目标后，根据总布置、人机工程的要求，确定优化边界条件，建立拓扑优化模型，车架的拓扑优化模型包括概念空间几何模型和有限元模型。概念空间几何模型严格按照 FSC 赛事规则要求进行建立。FSC 比赛规则包括车架各个部位的空间尺寸大小、驾驶舱开口尺寸、主环和前环尺寸等。之后便建立车架三维模型，尺寸优化是优化参数的必须环节。对车架进行分析，确认车架是否符合设计者要求，如果不符合便重新对车架进行拓扑优化，直至车架符合设计者要求[3]。

方程式赛车车架拓扑优化

拓扑优化是一种新型的设计方式，以材料分布为优化对象，通过拓扑优化，可以在均匀分布材料的设计空间中找到最佳的分布方案，这样具有更多的设计自由度，能够获得更大的设计空间，是结构优化最具发展前景的一个方面。对桁架结构的拓扑优化而言就是在给定节点位置情况下，确定各节点的最佳连接关系。对连续体结构拓扑优化而言，不仅要使结构的边界形状发生改变，而且对结构中的孔洞个数及形状分布也要进行优化，从而提升赛车整体性能[4]。

方程式赛车车架尺寸优化

根据横截面拓扑优化的结果，确定主梁横截面拓扑，建立考虑壳、梁和索单元的斜拉桥形状和尺寸优化设计模型，对斜拉桥主梁进行了纵向的形状和尺寸优化，目标函数为主梁应变能最小。在保持结构的形状和拓扑结构不变的情况下，通过优化杆件的截面面积、板壳的厚度等尺寸参数，寻求结构组件的最优截面尺寸和设计域内最佳数值，从而提升赛车整体性能。

3.3. 方程式赛车车架模型建立

FSC 赛车车架设计依据中国大学生方程式赛车车架结构要求来建立车架三维模型，选用的建模软件为 SolidWorks，车架是空间杆系，可以由各管中心线构成的空间直线系直接生成管道而形成车架。

与前鼻连接的零部件有前悬上下 A 臂、踏板、转向机等，需要承受悬架跳动，承受车轮冲击、踏板

Table 2. Common lightweight material performance

表 2. 常见轻质材料性能

材料	密度/(g/cm ³)	比屈服强度/(m ² /s ²)	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	E/	√E/
碳素结构钢 q235	7.8	30.13 * 10 ³	235	206	26.41 * 10 ⁶	58.19
低合金结构钢 q345	7.85	43.95 * 10 ³	345	207	26.37 * 10 ⁶	57.96
4130 钢	7.9	99.37 * 10 ³	785	211	26.70 * 10 ⁶	58.15
合金铝 7075	2.82	178.37 * 10 ³	503	71	25.18 * 10 ⁶	94.49
HT 碳纤维(纵向)	1.9	2210.53 * 10 ³	4200	7.9	99.37 * 10 ³	785
玻璃纤维	2.6	1076.92 * 10 ³	2800	86	33.08 * 10 ⁶	112.79
ABS (HP441)	0.98	3.47 * 10 ³	3.4	0.30	0.21 * 10 ⁶	17.61

载荷以及可能出现的正面撞击等多种载荷，所以需要进行合理设计。“规则”中“点对点三角结构”规定：将车架结构投影到一个面上，在此平面内施加一个任意方向的载荷到任意节点，只会导致车架管件受到拉伸力或是压缩力，因此也称为“正确三角形结构”，这么做能保证在节点上不会产生对任意杆件的弯矩导致杆弯曲变形，是强度和刚度的有力保证。

驾驶舱指的是前环、主环和侧边防撞机构构成的舱体。“防撞”构件是承载能力较高的管件，底面承担驾驶员的单元也是如此，所以采用 $25.4\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$ 的钢管。

车架后部指的是主环以后的所有杆件，与前鼻类似，后部有后悬架上下 a 臂固定杆，也有一个与 x 方向垂直的平面，用于固定传动部件和连接悬架固定杆，此外还有肩带安装杆，主环斜撑等结构。车架后部采用了短车架形式，传动吊耳固定在后框杆件上，而传动轴、大链轮系统位于后框的后面，同时悬架后掠线与车架形成钝角三角形，最终车架模型如图 6 所示[5]。

4. 车架有限元分析

赛车车架全部由规则的圆形钢管组成，因此可以选择对实体组件直接进行中面抽取，而不需要一个面一个面的选择，节省了时间。车架是赛车零部件的安装载体，安装附件比较多，有些部件对有限元分析结果影响很小，但还是会增加建模难度，导致在有限元分析时，会出现计算量大、耗时长、效率低等问题。所以在建模时，尽量对车架进行简化。将车架三维模型导入 ANSYS 有限元分析，编辑材料属性 4130 (30CrMo) 进行分析。

整体分析是将各个单元再拼合成离散的结构物，以代替原来的连续弹性。整体分析的目的就是将单元刚度矩阵组合为整体刚度矩阵，刚度集成法一般是组合整体矩阵的途径。

4.1. 车架强度与刚度性能分析

4.1.1. 弯曲工况载荷计算

弯曲工况主要是分析汽车静止或汽车匀速行驶在良好路面上，车架的应力及变形状况。在此工况下，车架的弯曲刚度起主要作用，车架主要受到驾驶员、发动机以及其他零部件的竖直方向作用力。

弯曲工况的约束条件及加载此工况主要是模拟赛车在平直路面上静止或匀速行驶时的受力状态，这是一种静态工况。本文在分析此工况时，为了考虑动态载荷，加入了 1.5 倍的动载系数。在有限元模型中约束左、右后悬支座点的 X、Y、Z、TX 和 TY 自由度，仅保留 TX 自由度，约束左右前悬支座点的 Z

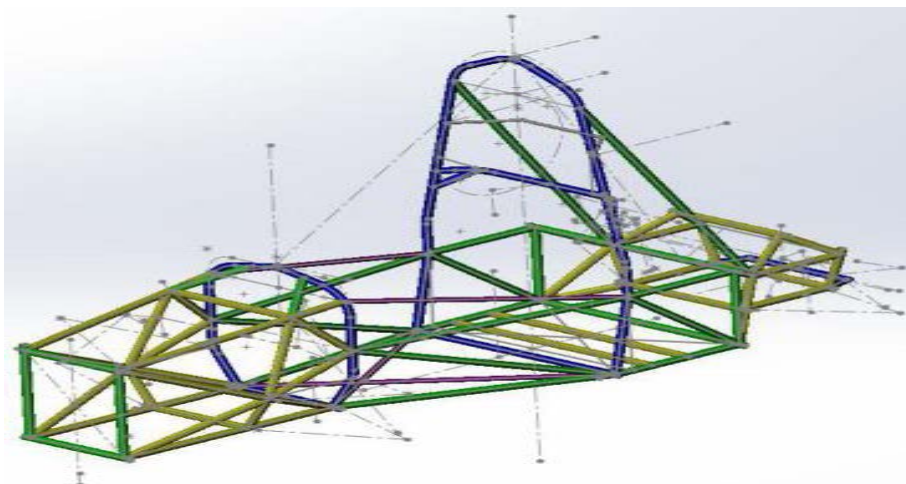


Figure 6. The frame structure

图 6. 车架结构

方向平动自由度，另外离心力会导致赛车在急转弯时产生侧向载荷。

所以车架应能承受侧向载荷，赛车经常有高速过弯的情况，此时车速较高、向心加速度较大(可达到 0.8 g 以上)，转弯工况即模拟赛车以 0.9 g 加速度左转弯，动载因数取 1.5，此时计算车架所受的侧向力。

$$\sigma = \frac{M \times y}{I} = 178 \text{ MPa}$$

4.1.2. 扭转工况载荷计算

扭转工况是由于汽车转弯或在不平的路面上行驶时，汽车四个车轮可能不在同一水平平面内，即会因车轮经过不平路面抬起而产生扭转，在此工况下，车架的抗扭刚度起主要影响。

一般来说，当汽车行驶在崎岖不平的路面上时，车架才会受到最严重的扭转弯曲。这种工况下的载荷一般变化比较缓慢，所以惯性载荷较小，最大动载系数以不超过 1.3 为宜。约束左、右后传动轴对应车架部位的 X、Y、Z、TY、TZ 自由度，仅保留 TX 自由度；根据加载次序分别约束左右前悬支座对应车架部位的 X、Z 方向平动自由度。

赛车在扭转工况时，车架除受各部件重力外，还受纵向惯性力作用，同时轴荷发生转移，车架内部应力也发生变化。本文模拟赛车以 1.4 g 的减速度制动，动载因数取 1.5，车架及其负重共 196 kg，因此整车可以计算制动力。

$$\sigma = \frac{M \times y}{I} = 470 \text{ MPa}$$

4.2. 车架有限元分析

直观上，车架主要载荷集中在座舱和发动机上，根据图 7 从分析结果上看在三种工况中车辆弯曲工况的位移最小，车架紧急制动工况的应力最小。应力最大值为急转弯工况的(419.55 MPa)，远小于车架材

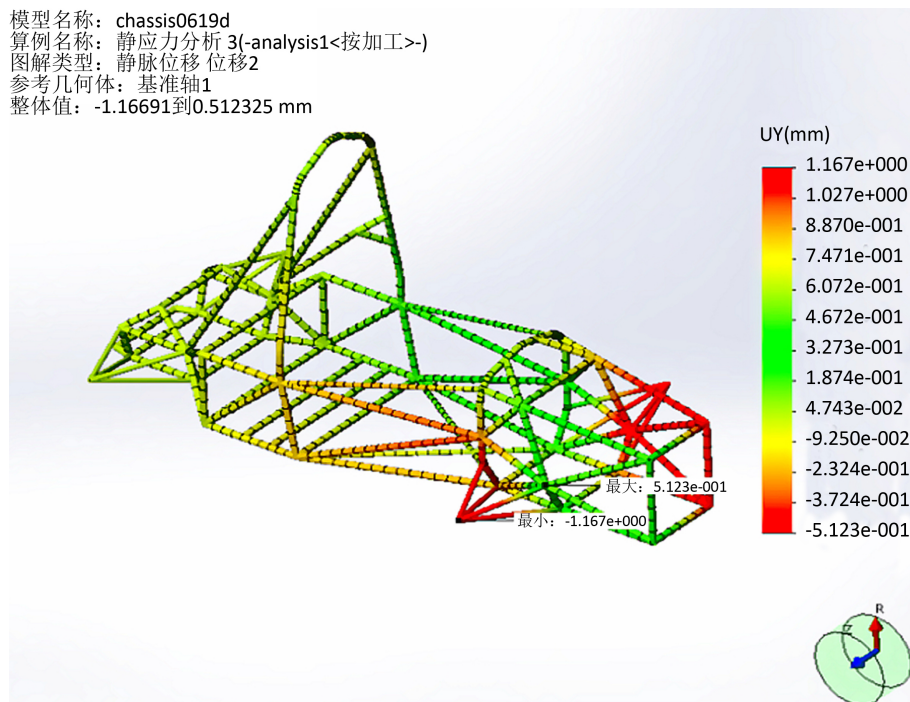


Figure 7. The frame structure

图 7. 车架结构

Table 3. Improved results contrast
表 3. 改进成果对比

项目	2016	2015	对比
最大长度	2062 mm	1999 mm	增加 8.5%
最大宽度	690 mm	670 mm	增加 2.9%
重量	24 kg	25.4 kg	减少 5.5%
满载弯曲工况最大位移	0.41 mm	1.32 mm	减少 68.9%
满载弯曲工况最大应力	145.7 MPa	178 MPa	减少 18.1%
急转弯工况最大位移	2.58 mm	1.6 mm	增加 61.2%
急转弯工况最大应力	419.55 MPa	168 MPa	增加 149.7%
紧急制动工况最大位移	0.2 mm	0.2 mm	不变
紧急制动工况最大应力	57.56 MPa	62.2 MPa	减少 7.4%
扭转刚度	2127.37 N * m/deg	1598.29 N * m/deg	增加 33.1%
扭转工况最大位移量	2.05 mm	2.73 mm	减少 24.9%
扭转工况最大应力	429.48 MPa	470.9 MPa	减少 8.8%

料 4130 (30 CrMo)的许用应力 785 MPa。变形量最大值为急转弯工况的 2.58 mm，可以看出车架的位移较小，车架强度完全满足设计要求。

根据(图 7)所得，车架扭转刚度为 $K = 2127.37 \text{ N}$ ，车架扭转刚度在 1000~4000 n. m 的合理范围内，在扭转工况最大位移量为 2.05，扭转工况最大应力为 429.48 Mpa。

综上分析，车架强度有较大的富裕，车架扭转刚度基本满足设计要求，车架弯曲应力稍低，有待提高。此外今年车架对于去年车架较轻，设计偏保守，架构紧凑性有待加强。综合评价，车架性能基本合格，但车架仍有进步空间。

4.3. 轻量化方法及应用结果

在综合运用上述轻量化方法后，我校 2016 年 fsc 赛车车架得到了显著的轻量化，赛车车架的刚度和强度均也得到大幅度优化，满足赛事的需求，与 2015 年赛车车架的对比效果如表 3 所示。

5. 结束语

方程式赛车车架的轻量化是一个系统工程，既要遵循轻量化设计原则，又要兼顾功能、材料、结构和经济性，我校经过轻量化设计，车架强度与刚度仿真分析，焊接加工制造实体车架，在 2015 年赛车车架的基础上得到了减重 5.5% 的显著效果，同时车架刚度与强度均得到显著提升，其中扭转刚度提升 33.1%，急转弯工况最大应力更是提升 149.7%，效果明显，将使 2016 年赛车在弯内表现更佳。车队 2016 年所设计的赛车车架能满足赛事所需的性能要求同时也提供了充足的安全保障，以确保圆满完成比赛。

参考文献 (References)

- [1] 中国大学生方程式汽车大赛组委会. 2011 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, 2012.
- [2] 土宏雁, 陈君毅. 汽车车身轻量化结构与轻质材料[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [3] 周永光, 阳林, 吴发亮, 邓仲卿. FSAE 赛车车架结构优化和轻量化[J]. 农业装备与车辆工程, 2012, 50(11): 38-41.
- [4] 郑文杰, 兰凤崇, 陈吉清. FSAE 赛车车架结构拓扑优化及轻量化设计研究[J]. 汽车工程学报, 2016, 6(1): 35-42.
- [5] 赵文娟. 赛车车架结构设计及其轻量化研究[D]: [学士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：met@hanspub.org