

The Optimization of FSAE Functional Racing Simulator Bracket and the Design of Its Main Part

Wenpu Wang, Ningning Liu, Yunjie Yan

School of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai
Email: mikewrwr@126.com

Received: Oct. 8th, 2017; accepted: Oct. 24th, 2017; published: Oct. 30th, 2017

Abstract

In this paper, a simulator bracket for driver training is designed and manufactured with the background of 2016 Formula Student Electricity China. The whole design process is based on the rules of the competition, the maximum reduction of drivers in the car sitting posture, improve the driver's situation reproduction ability, and to meet the requirements of the process to minimize the cost. The main work of this paper is to complete the design and calculation of the car simulator bracket, the utility analysis of the simulator bracket and the manufacture of the simulator bracket. The research and manufacture of this topic provide reference for the design of the training mode of FSAE driver in the future, and summarize the experience and lessons of the design and manufacturing process, which has a certain engineering value.

Keywords

Simulator Bracket, Driver Training, SAE 95%, Situation Reproduction

FSAE实用赛车模拟器支架优化及关键部件设计

王问璞, 刘宁宁, 严赟杰

上海工程技术大学汽车学院, 上海
Email: mikewrwr@126.com

收稿日期: 2017年10月8日; 录用日期: 2017年10月24日; 发布日期: 2017年10月30日

摘要

本论文以2016 FSEC中国大学生电动方程式汽车大赛为背景,设计并制造了一套用于车手训练的模拟器支架。整个设计过程在满足大赛规则的基础上,最大程度还原车手在赛车中的坐姿,提升了车手的情景再现能力,并且在满足工艺要求的前提下最大程度地降低了成本。本文的主要工作是完成赛车模拟器支架的设计计算,模拟器支架的效用分析和模拟器支架的制作。本课题的研究与制造为今后FSAE车手训练方式的设计提供参考,总结了设计与制造过程汇总的经验和教训,具有一定工程价值。

关键词

模拟器支架, 车手训练, SAE 95%位, 情景重现

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

近年来,随着 FASE 中国赛区的办赛水准逐渐提高,各大院校 FSAE 车队打造赛车的水准也水涨船高,各大强队的实力已经在伯仲之间。然而作为决定车队赛绩的一个重要因素——车手本身的能力仍然略显不足。甚至会出现因为车手实力不济,而导致一台拥有冠军竞争力的赛车未能夺冠,甚至仅仅排到中游水准。车手的个人因素已然成为 FSAE 中国区赛事向欧美等国赛事水准靠拢的一大阻碍。

本文正是结合车队目前实际存在的问题,来打造一款能够模拟出大学生方程式赛车驾驶氛围的模拟器支架,同时帮助车手完成情景重现,更好地完成训练任务。

1) 根据车手和赛规的要求设计并选择模拟器支架的设计思路,并完成赛车模拟器支架的优化及关键部件的设计,计算及布置方案。

2) 使用 Solidworks 三维建模软件完成模拟器支架的三维建模,并将模型导入有限元分析软件 ANSYS 中进行受力分析。分析结果证明符合受力要求。

3) 根据三维模型搭建模拟器支架台架,并根据车手实际坐姿的反馈,对于模拟器支架的布置和车手坐姿进行进一步的调整。

2. 绪论

2.1. 赛车座舱坐姿要求与民用汽车坐姿要求对比

在激烈赛事中,坐姿良好与否会直接影响成绩的好坏,每个车队都会为旗下的车手量身订作个人专属的座舱,虽说每个车手习惯不同,但据统计,他们所采的都是最轻松自然的坐姿,通常这也能使车手的坐姿是最不容易疲劳的。轮胎与地面摩擦所产生的抓地反映,经由方向盘及车身而传给驾驶者,我们一般称它为“路感”,而驾驶者就是根据路感的回馈,作出最适当的驾驶反映,因为要控制一部行进中的车辆除了转动方向盘之外,还有车身重心的转移,但是想精准的抓住车身重心,除了驾驶者自己本身的敏感度外,汽车座舱的坐姿也提供了极大的帮助[1]。图 1 为某品牌汽车的驾驶舱坐姿示意图。

对于民用车而言,驾驶舱的布置更加强调驾驶的舒适性,通过座椅的承托包裹和踏板方向盘的角度布置,减少驾驶员在长途驾驶过程中产生的疲劳感,同时提供最宽阔的视野,帮助驾驶员更好地应对道

路上产生的突发情况[2]。所以民用车的驾驶舱对于车辆的路况的反馈并不是特别强调。相反，对于赛车而言，首要强调的就是路况反馈，因为赛车是一样竞技性运动，所以并不强调视野和舒适性，车手的坐姿往往会非常低甚至贴近底盘，以获得良好的车况反馈感，如图2中所示。同时车手的坐姿将会帮助赛车实现更好的配重。

2.2. 赛事对于座舱布置要求

赛事对于车手座舱的要求[3]如图3所示：

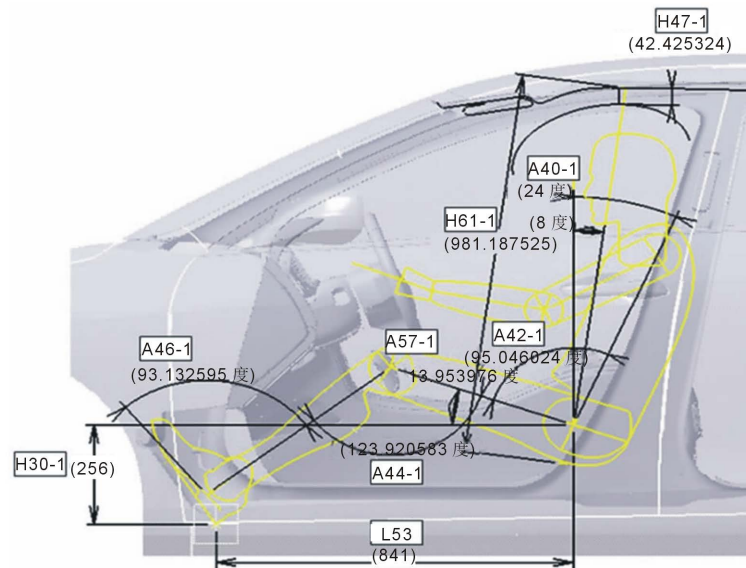


Figure 1. A schematic diagram of the seating position of a car driver
图1. 某车型驾驶员座舱坐姿示意图

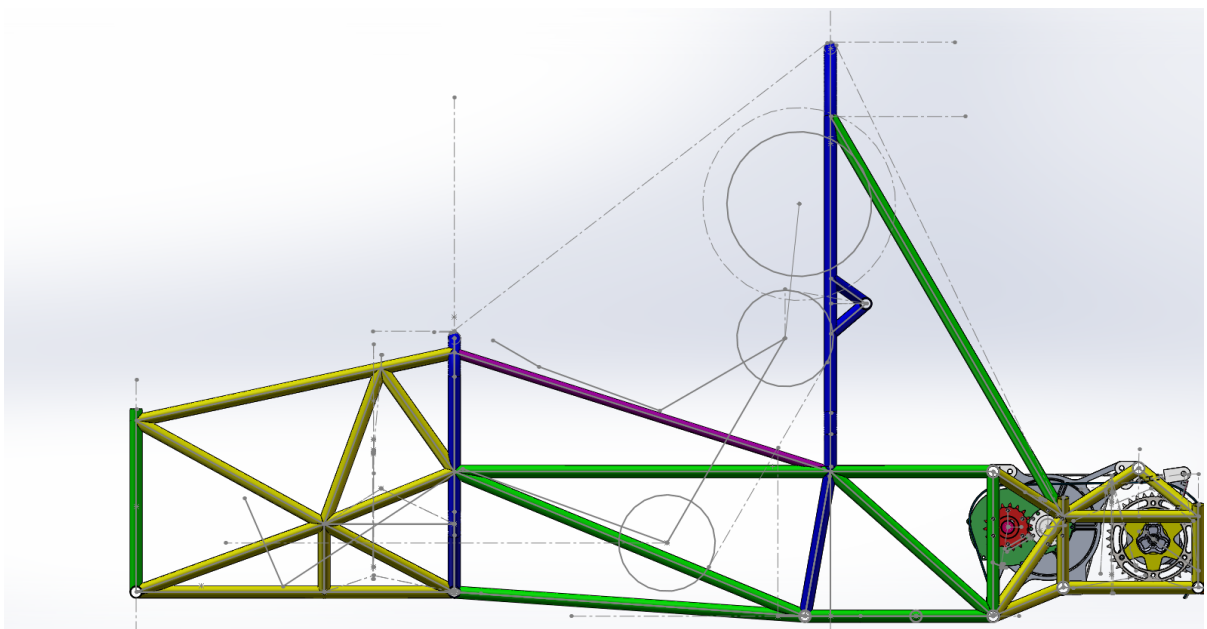


Figure 2. Seating diagram of cockpit of FSAE car
图2. 大学生方程式赛车座舱坐姿示意图

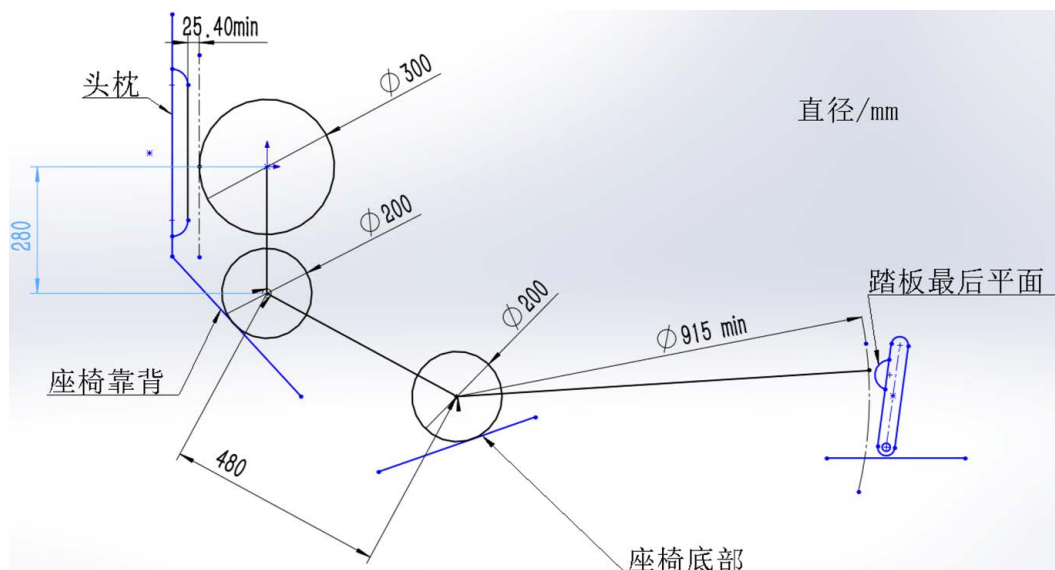


Figure 3. A sketch of the requirements of the seating position

图3. 赛事座舱坐姿检验要求示意图

- 1) 用直径为 200 mm (7.87 英寸)的圆代表髋部和臀部;
- 2) 用直径为 200 mm (7.87 英寸)的圆代表肩膀及颈部区域;
- 3) 用直径为 300 mm (11.81 英寸)的圆代表佩戴有头盔的头部;
- 4) 用一条长为 490 mm (19.29 英寸)的直线连接两个直径为 200 mm 圆的圆心;
- 5) 用一条 280 mm (11.02 英寸)的直线连接位于上方的直径为 200 mm 和 300 mm 的头部圆的圆心;
- 6) 将座椅调整到最靠后的位置;
- 7) 将踏板调整到最靠前的位置;
- 8) 将底部直径为 200 mm 的圆放置到座椅底部以使得该圆圆心到踏板最后端面的距离不少于 915 mm (36 英寸);
- 9) 将中部直径为 200 mm 的圆, 代表肩部, 放置到椅背上;
- 10) 将上部直径为 300 mm 的圆放置在距离头枕不超过 25.4 mm (1 英寸)的位置, 即通常情况下车手头盔所处的位置。

3. 赛车模拟器支架原理简述

3.1. 赛车模拟器支架原理简述

赛车模拟器的仿真内容, 主要包括操纵件的力仿真和位置仿真; 车手在驾驶过程中需要观察的仪表仿真; 驾驶座舱的姿态仿真; 满足车手听觉要求的发动机噪声仿真; 满足驾驶视觉要求的视景仿真以及车辆动力学和运动学仿真等。

驾驶座舱的姿态仿真, 其主要目的是满足车手驾驶过程中的体感需求, 如图4所示的F1模拟器座舱。驾驶座舱操作机构的操纵要与车手在模拟器中获得的感觉和模拟器显示的视景一致, 方能达到最好的模拟器训练效果, 所以各个操纵机构在模拟器支架上布置的位置就显得尤其重要了。

3.2. 赛车模拟器支架设计理论

鉴于本赛车模拟器支架是基于 FSAE 赛事研发的, 所有的操纵机构的布置, 车手坐姿的要求自然都



Figure 4. Bracket arrangement of F1 racing simulator
图 4. F1 赛车模拟器支架布置图

是需要按照赛规来进行的。同时又要满足 SAE95%的要求,这样才能够对于车手起到实质性的训练提升。

3.2.1. 驾驶员 SAE95%人体坐姿舒适性

根据 SAE 标准,通常在进行整车人体坐姿校核时主要校核的内容有:驾驶员 SAE95%人体坐姿舒适性校核、驾驶员 SAE5%人体坐姿舒适性校核。因为驾驶员除了要满足 SAE95%高个人体舒适性外,还需要满足 SAE5%的小个人体舒适性,以满足不同人群的驾驶需要。

在进行整车人体舒适性校核时,涉及到的边界条件有:整车内表面 CAS 数据、加速踏板参考点、方向盘中心、方向盘倾角、驾驶员 H 点、驾驶员踵点、后排乘员 H 点、后排乘员踵点、驾驶员 H 点可调节范围。

3.2.2. SAE95%人体坐姿在模拟器支架设计中的应用

在 Solidworks 软件中调用参数化的 SAE 人体模型[4],将人体模型摆放至整车设计状态,根据踵点、踏板参考点、驾驶员设计 H 点、方向盘中心位置及座椅靠背角确定驾驶员坐姿。人体模型摆放完毕后,开始进行尺寸测量,FSAE 方程式车手 SAE95%人体模型各尺寸测量结果,如图 5 所示。测量后将人体模型坐姿测量值进行对比,如表 1 所示。通过验证后方可运用到模拟器支架设计中。

3.3. 赛车模拟器情景重现

情景重现的定义是:在符合需要的前提下,以提供的材料为原型,使事件中的人物、事件、情节、场面、景物、情绪。在脑海里不断浮现,形成连续活动的画面,并不断引发相应的态度、感情,这个过程就是情景再现。

对于赛车如此高强度,速度极快的运动项目而言,驾驶赛车依靠更多地是车手本能反应而不是经过仔细思考后的举动,如何培养车手形成情景重现从而形成条件反射是赛车模拟器的重要职责,车手可以不断通过模拟器反复训练同一个动作使之成为本能。这一点需要通过模拟器环境的良好布置方能实现。

4. 赛车模拟器支架坐姿选用

FSAE 赛车作为一台单座方程式赛车,其座舱布局方式更显紧凑,更重视驾驶体验[5]。作为对于车手

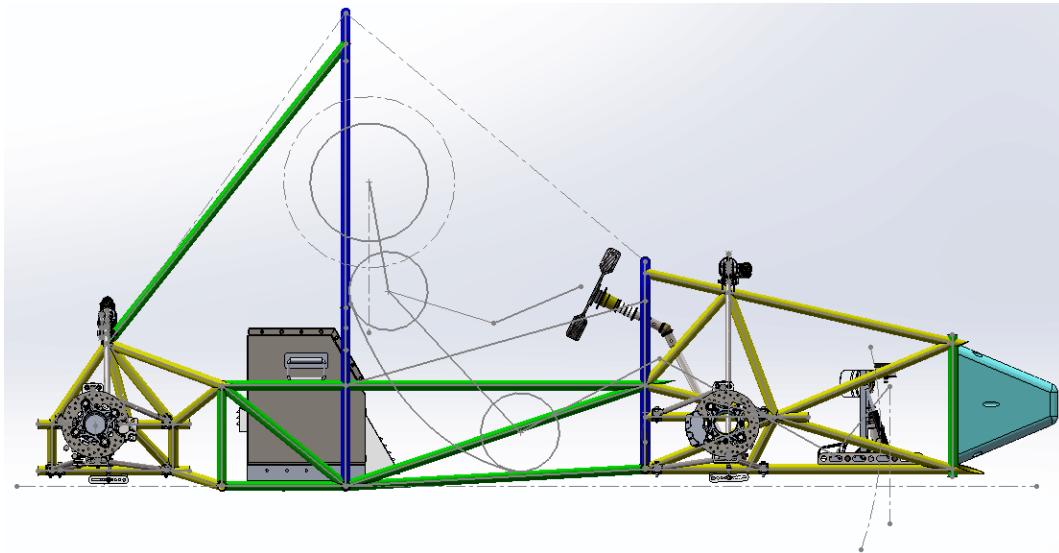


Figure 5. SAE 95% schematics of 2016 FSAE formula race car
图 5. 2016 FSAE 方程式赛车 SAE 95% 示意图

Table 1. SAE 95% seating measurement of Vehicle driver
表 1. 车辆驾驶员 SAE 95% 人体坐姿测量值

代码	尺寸名称	测量值	舒适参考范围
H30-1	R 点到踵点的垂直距离/mm	256.00	250~405
L53	R 点到踵点的水平距离/mm	841.00	
A40-1	靠背角/(°)	24.00	20~30
A42-1	躯干与大腿夹角/(°)	95.05	95~115
A57-1	大腿与水平面夹角/(°)	13.95	
A44-1	膝盖角/(°)	123.92	100~145
A46-1	脚角/(°)	93.12	87~110
H61-1	头部有效空间/mm	981.19	950~1100
H47-1	头部包络线与顶篷的最小间隙/mm	42.43	40~80

培训的模拟器支架要在这方面完全重现驾驶氛围，首当其冲的就是驾驶坐姿的选用。

4.1. 直立式坐姿形式

“直立驾驶姿势”定义：座椅靠背与竖直方向所成夹角不超过 30 度。该种驾驶姿势在民用车中经常被使用，如图 6 所示。优点是车手视野开阔，方向盘与车手手臂之间形成一定的夹角使得车手在长时间驾驶过程中不会出现明显的手臂疲劳感，同时有利于座舱其他操纵机构的布置。缺点是车手坐姿偏高，增大了整车风阻系数，对于路面的反馈不够灵敏，同时不利于车辆配重布置。

4.2. 斜躺式坐姿形式

“斜躺驾驶姿势”定义：座椅靠背与垂直方向所成夹角大于三十度。该种驾驶姿势通常被运用在跑车和赛车上，如图 7 所示，优点是车手坐姿较低，对于车辆的反馈能较为敏锐地做出反应，同时赛车的重心得以进一步降低，方便赛车配重，降低了风阻系数。缺点是车手视野受限，手臂几乎与方向盘呈 90

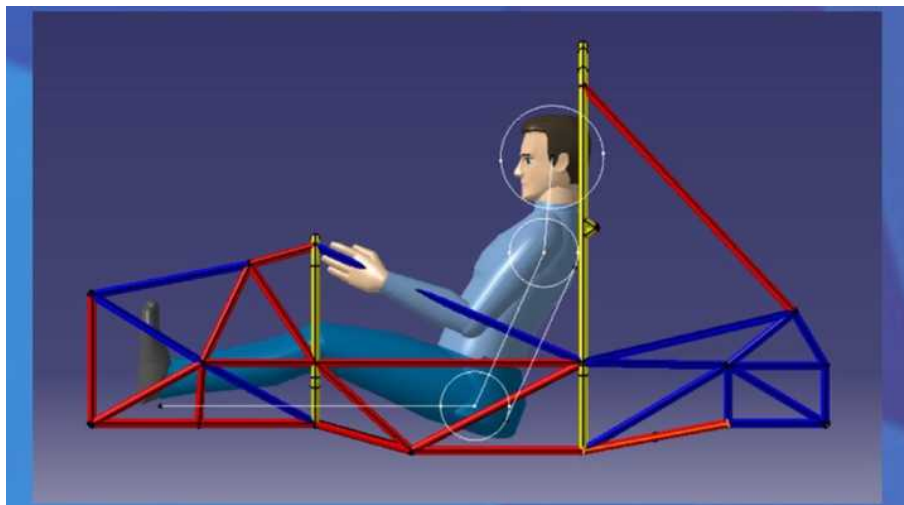


Figure 6. Sitting position effect drawing
图 6. 直立式坐姿效果图

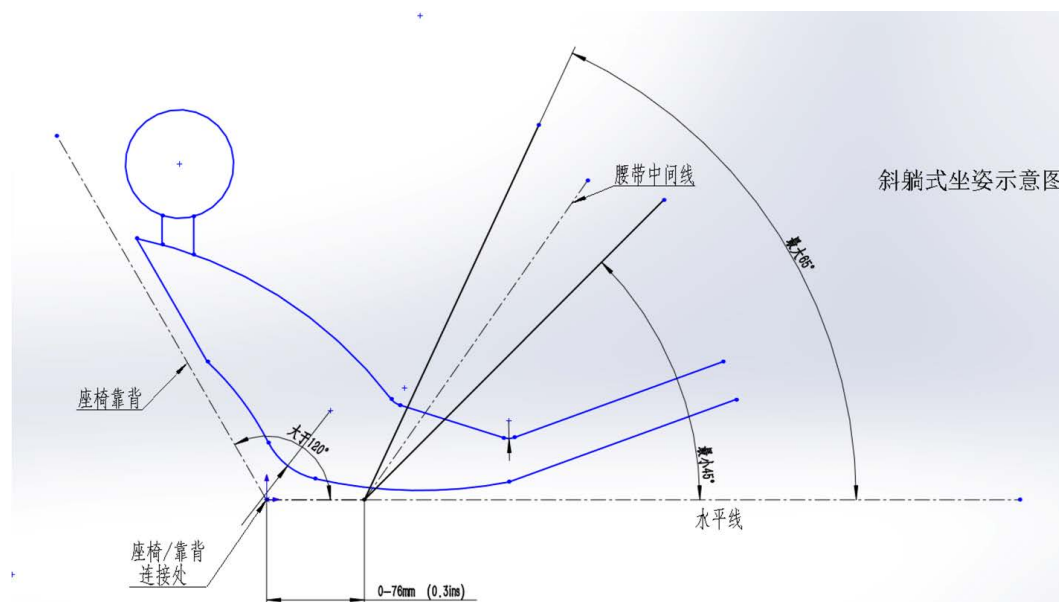


Figure 7. Diagram of oblique recumbent sitting posture
图 7. 斜躺式坐姿示意图

度角，不利于长时间驾驶，同时坐姿降低导致座舱空间增大，对于操纵机构布置提出考验。

4.3. 坐姿形式选用

鉴于我们的方程式赛车是为了极限操控而生，为了最大化地模拟实际的驾驶环境，同时在征求过老一代车手的意见后，故决定采用斜躺式坐姿。所有的操纵机构的布置均按照斜躺式坐姿的方案进行布置，力求完美还原赛车座舱内部感受。座椅的选用模型如图 8 所示。

5. 赛车模拟器支架设计

考虑到本模拟器支架的成本控制问题与搭建问题，故采用铝型材作为主要的支撑结构，铝型材的中空结构有利于各个转接件的搭建，占用空间较小，同时也能保证一定的强度。

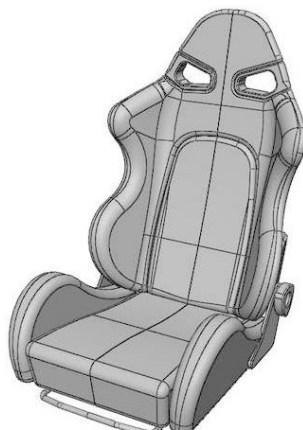


Figure 8. Inclined seat model
图 8. 斜躺式座椅模型图

5.1. 铝型材参数选用与计算

在选用工业铝型材受力变形量计算时，变形量将是一个重要的选择依据。根据计算公式，很容易计算出铝型材在自重与受力的情况下所产生的变形量。

鉴于我们选用的是 40 mm 4040 铝型材通过计算我们所有零部件的载荷并选择固定方式，通过受力分析得出该铝型材符合我们的要求。计算公式如图 9。

5.2. 新型转接头设计

原有模拟器上的转接头体积较大且由于中间采用了铰接结构，导致了故障率较高，可靠性较低，新的转接头采用螺栓与滑轨与铝型材直接接触，同时通过螺栓松紧直接调整，即减轻了重量又简化了设计，为模拟器设备的布置腾出了更多的空间。图 10，图 11 分别展示了转接头的设计图纸以及支架的总装。

6. 赛车模拟器支架设计分析

模拟器支架所用的铝型材虽然在之前的计算中满足受力分析要求，但是实际的工况却未经过有限元分析认证，同时车手的实际反馈也将影响该模拟器支架的最终效果，故需要对于该模拟器支架进行有限元分析和台架的实际检验。

6.1. ANSYS 分析

作为承载模拟器和车手全部重量的铝型材，需要通过有限元受力分析进行优化，将完成建模的铝型材三维模型导入 ANSYS 有限元分析软件中进行静态受力分析如图 12 所示，随后进行拓扑优化，优化支架结构。如图 13 所示。

通过 ANSYS 受力分析和拓扑优化发现，铝型材的中央部分产生了应力集中的问题，但是通过滑轨的结构搭建与拓扑优化，减少的不必要的多余材料，使得支架受力最大化，同时完成了支架的轻量化。

6.2. 台架搭建与车手舒适度反馈

模拟器支架的初步模型完成后，需要通过搭建台架进行试验，通过车手的反馈进行调整模拟器指甲上对应设备的拜访位置从而让车手在有限的空间里获得最舒适的驾驶感受。

在选用工业铝型材时，变形量将是一个重要的选择依据。根据下列计算公式，很容易计算出铝型材在自重与受力的情况下所产生的变形量。

m 铝型材线性密度 (kg)

F 载荷 (N)

L 铝型材无支撑长度 (mm)

E 弹性模量 (7000N/mm²)

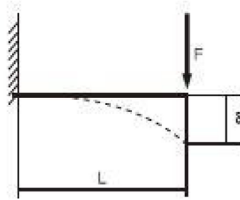
I 集合惯量 (cm⁴)

Z 截面惯性 (cm³)

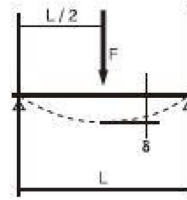
g 9.81N/kg

δ 变形量 (mm)

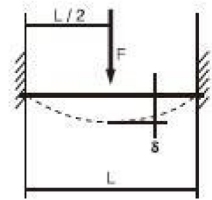
① 一端固定



② 两端支撑



③ 两端固定



* 静载荷状态下的铝型材变形量计算

$$\delta_{\text{e}} = \frac{F \times L^3}{3E \times 1 \times 10^4}$$

$$\delta_{\text{e}} = \frac{F \times L^3}{48E \times 1 \times 10^4}$$

$$\delta_{\text{e}} = \frac{F \times L^3}{192E \times 1 \times 10^4}$$

* 无载荷状态下的铝型材变形量计算

$$\delta_{\text{e}} = \frac{m \times g \times L^4}{8E \times 1 \times 10^4}$$

$$\delta_{\text{e}} = \frac{5 \times m \times g \times L^4}{384E \times 1 \times 10^4}$$

$$\delta_{\text{e}} = \frac{m \times g \times L^4}{384E \times 1 \times 10^4}$$

* 铝型材最大允许弯曲应力: $\sigma_{\text{max}} < 200\text{N}/\text{m}^3$

$$Q_{\text{e}} = \frac{(m \times g \times L + F) \times L}{Z \times 10^3}$$

$$Q_{\text{e}} = \frac{(m \times g \times L + F) \times L}{4Z \times 10^3}$$

$$Q_{\text{e}} = \frac{(m \times g \times L + F) \times L}{8Z \times 10^3}$$

计算举例：选用 4545 铝型材，长度 L=500mm，载荷 (1kgf=9.81N)，两端固定支撑：

$$\text{变形量 } \delta = \frac{800 \times 500^3}{192 \times 70000 \times 15.12 \times 10^4} \approx 0.05\text{mm}$$

Figure 9. Formula for calculating the force of Aluminium profile

图 9. 某型号铝型材受力计算公式

7. 赛车模拟器支架加工制作

7.1. 铝型材的切割与磨口

由于购买回来的铝型材都是长度 2 m 以上的，同时铝型材的接口与自制的转接头不符合，所以先要对购买回来的铝型材进行加工，将其切割成模型上对应的长度，随后再将借口打磨平整。

7.2. 模拟器支架的主体搭建

完成了所有铝型材的切割准备，准备好转接头等零部件后就可可在平台上进行支架的搭建了。

在搭建平台上利用 C 型卡，夹具，螺栓等固定设备优先固定底座以及重要支撑部位。图 14，图 15 展示了新型转接头在支架上的应用图和支架的搭建。

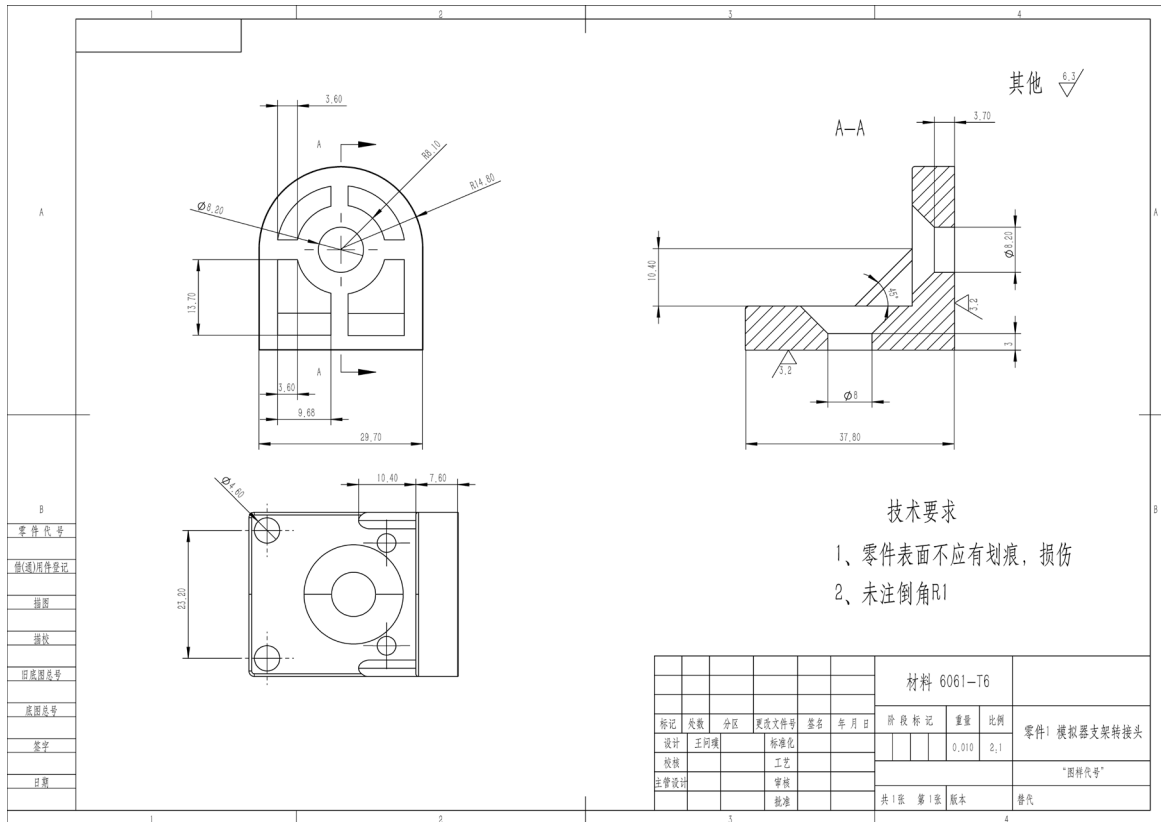


Figure 10. New joint drawing
图 10. 新转接头图纸

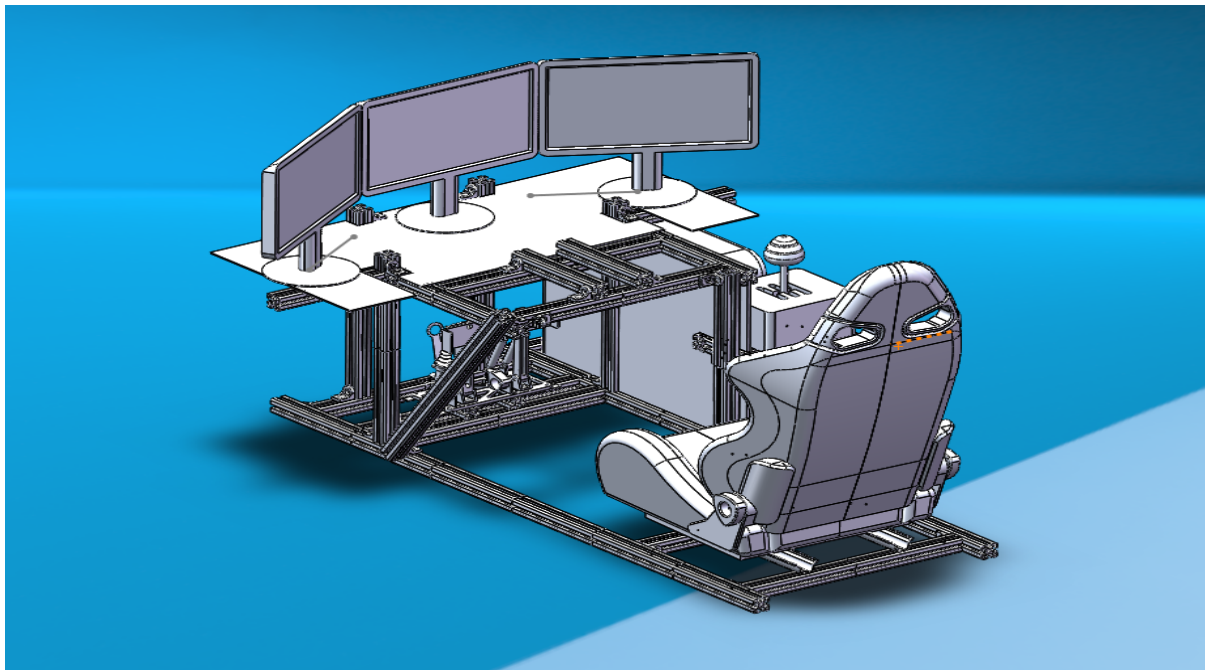


Figure 11. The modeling diagram of the simulator bracket for the new rotary joint is used
图 11. 运用了新转接头的模拟器支架建模图

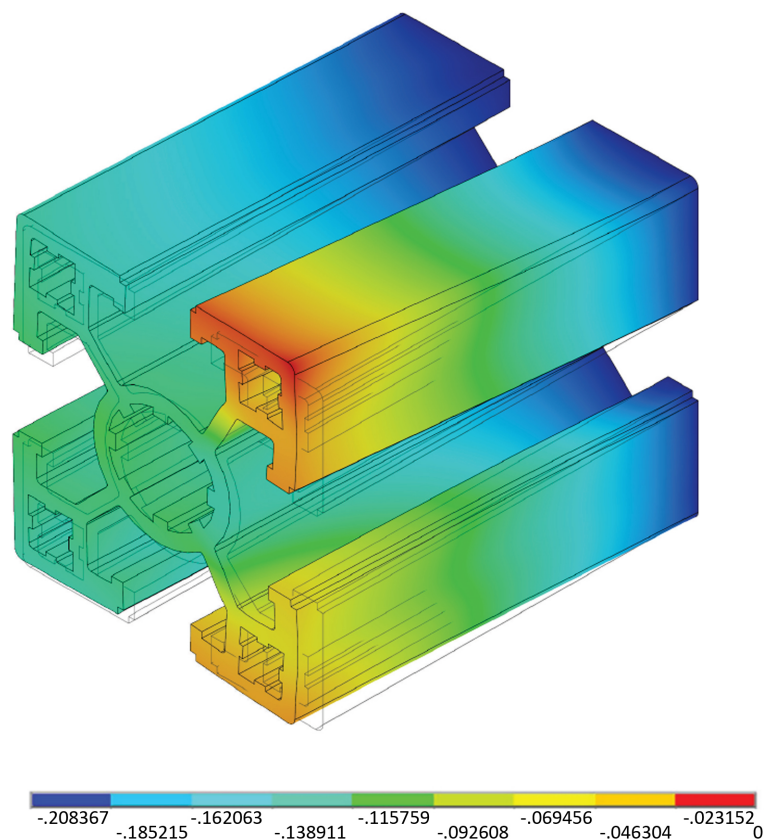


Figure 12. Deformation analysis of ANSYS aluminum material
图 12. ANSYS 铝型材的形变分析

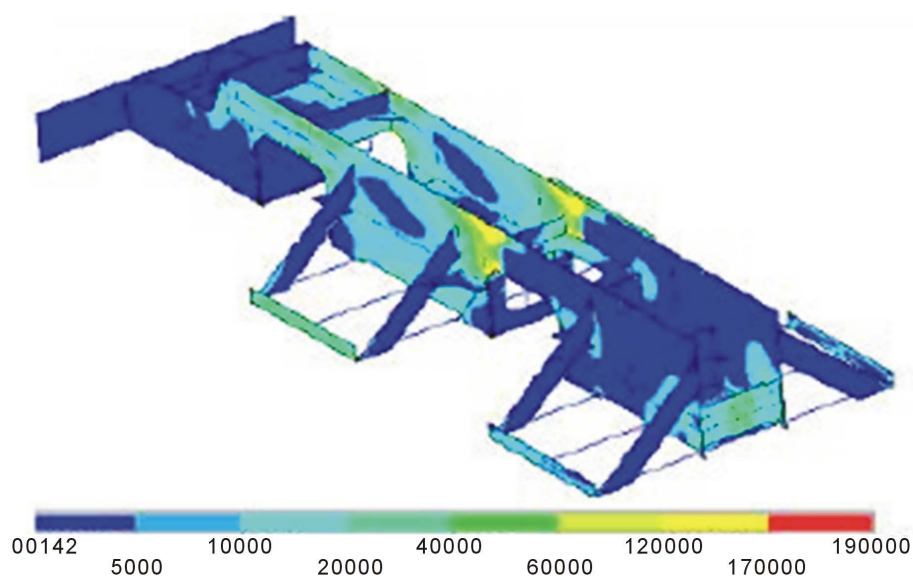


Figure 13. Topology optimization of aluminum section rails
图 13. 铝型材滑轨的拓扑优化

7.3. 模拟器支架测试

经过为期一个月的搭建台架和设备已安装完毕，如图 16 所示。由于设备预算原因和搭建问题，我们

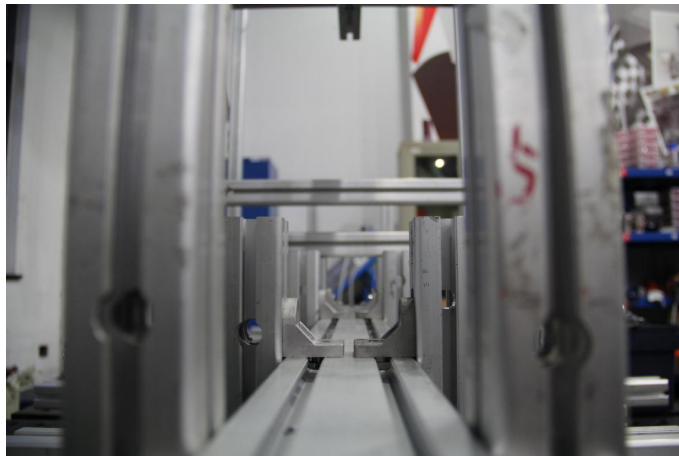


Figure 14. The figure of new type rotary joint
图 14. 新型转接头实物图

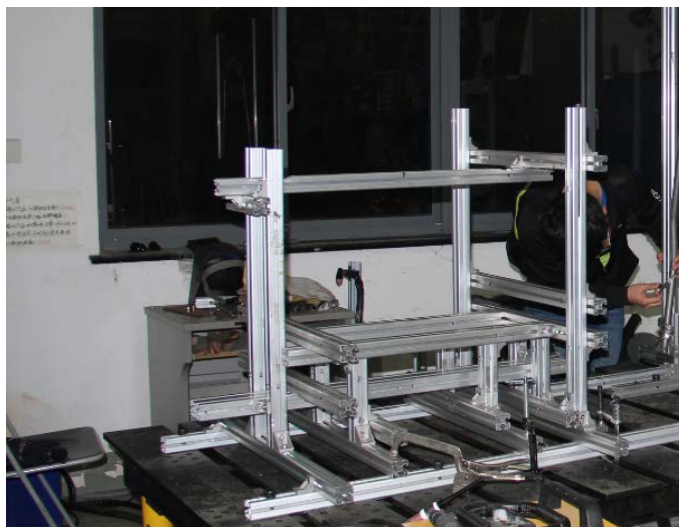


Figure 15. Close-up of the building front part of simulator support
图 15. 模拟器支架前部搭建过程特写



Figure 16. The completion figure of simulator support
图 16. 模拟器支架完成图

没有完成三屏幕的最初设想。但是我们还是安排了一场车手训练比赛用以实际检验模拟器支架在实际过程中的运行情况,车手需在模拟器上联系完成 15 圈的模拟比赛,在过程中我们会检验车手的圈速是否出现大幅度波动,或因为疲劳而产生的失误。

从车手实际驾驶的回馈中我们得到了如下信息:

- 1) 模拟器支架的承托感较好很紧凑较为符合驾驶要求;
- 2) 模拟器支架并没有很明显的不适,不容易产生疲劳;
- 3) 模拟器支架的设备布置位置仍有可以改进的部分。

所以总体而言我们的模拟器支架设计还是较为成功的。

8. 结论

通过对模拟器支架的关键部件从设计到制造到实验的过程,较为良好的实现了最初的优化目标。本文主要完成的任务有:

- 1) 收集各方面关于赛车人机工程优化案例的资料;
- 2) 根据赛规需求对于模拟器支架机构设计进行分析,并确定参数;
- 3) 使用 Solidworks 软件对于整个支架进行三维建模;
- 4) 使用 ANSYS 有限元分析软件对于关键部件进行分析;
- 5) 对于最终方案冻结,加工并测试得出成果。

本文通过对于 FASE 模拟器支架进行调研,设计,受力分析及拓扑优化,到最后的实际测试,为之后进一步改良或重新打造该类型模型漆支架铺垫了基础,具有一定的工程实践意义。

参考文献 (References)

- [1] 范卫萍. 乘用车人体坐姿舒适性校核[J]. 汽车工程师, 2016(4).
- [2] 陈家瑞. 汽车构造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 234-245.
- [3] 中国大学生方程式赛车规则委员会. 2016 大学生方程式汽车大赛规则[Z].
- [4] Solidworks 快速入门, 进阶与精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [5] 王赢. FSAE 大学生电动方程式赛车设计[C]//2016 中国汽车工程学会年会暨展览会. 中国汽车工程学会会议论文集: 2016 年卷.上海.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

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

期刊邮箱: met@hanspub.org