

电动方程式传动系统匹配的优化设计

陈建宾^{1*}, 李仁焕², 师维涛^{1#}

¹南宁学院交通运输学院, 广西 南宁

²南宁市第四十七中学, 广西 南宁

收稿日期: 2025年3月4日; 录用日期: 2025年3月23日; 发布日期: 2025年4月3日

摘要

中国大学生电动方程式大赛是一项由中国汽车工程学会全力主办的面向所有高校学生的赛事, 目的是培养中国未来电动汽车领域的技术人才, 为中国汽车行业输送高等人才。本文以FSEC赛事规则为基准, 针对纯电动方程式赛车的传动系统匹配问题, 提出了一套涵盖电机选型、传动比优化与仿真验证的系统性设计方法。通过理论计算与仿真工具(OptimumLap、CarSim)的结合, 实现了动力性与经济性的协同优化, 为参赛车队提供了可落地的技术参考。

关键词

电动方程式赛车, 传动系统, 链传动, 传动比优化

Optimized Design for the Transmission System Matching of the Formula E

Jianbin Chen^{1*}, Renhuan Li², Weitao Shi^{1#}

¹College of Traffic and Transportation, Nanning University, Nanning Guangxi

²Nanning No. 47 Middle School, Nanning Guangxi

Received: Mar. 4th, 2025; accepted: Mar. 23rd, 2025; published: Apr. 3rd, 2025

Abstract

The China Student Formula E Competition is a competition for all college students sponsored by the Society of Automotive Engineers of China, with the aim of cultivating technical talents in the field of electric vehicles in China's future and providing high-level talents for China's automotive industry.

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 陈建宾, 李仁焕, 师维涛. 电动方程式传动系统匹配的优化设计[J]. 动力系统与控制, 2025, 14(2): 88-93.
DOI: 10.12677/dsc.2025.142010

Based on the FSEC competition rules, this paper proposes a set of systematic design methods covering motor selection, transmission ratio optimization and simulation verification for the transmission system matching problem of pure electric formula cars. Through the combination of theoretical calculation and simulation tools (OptimumLap, CarSim), the collaborative optimization of power and economy is realized, providing a practical technical reference for the participating teams.

Keywords

Formula E Racing Car, Transmission System, Chain Transmission, Transmission Ratio Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

中国大学生方程式汽车大赛(FSC)是以培养工程创新人才为目标的国家级学科竞赛,由教育部机械类专业教学指导委员会协同行业学会联合主办。赛事要求参赛团队基于 SAE International 颁布的工程标准,在 12 个月周期内完成一款单座竞技赛车的全流程开发,涵盖概念设计、轻量化结构拓扑优化、动力总成匹配及动态稳定性验证等核心环节。最终成果需通过高速避障、8 字绕环、75 米直线加速及耐久性测试四类严苛工况评估,全面检验车辆在极限工况下的综合性能表现与团队技术实现能力[1]。传动系统作为赛车动力传递的核心部件,直接影响车辆的加速性能、续航能力及操控稳定性。传统设计方法多依赖经验公式,难以应对 FSEC 赛事中复合工况(直线加速、高速绕障等)的动态需求。本文基于赛事规则与车队实际参数,通过理论建模与仿真验证,系统性地探讨传动系统匹配的优化策略。

2. 赛车动力性要求

根据赛事规则规定,我们的赛车必须要完成四项测试,其中包括 75 米直线加速测试、桩桶高速避障性能测试、极限 8 字绕环桩桶测试、车辆竞速耐久赛测试,根据这些要求条件和设置自定赛车参数(见表 1)对传动系统进行匹配计算、再优化(注:基本参数为设计赛车时根据总体设计方向所定的,空气阻力系数与滚动阻力系数均为国标参数,不需要计算)。

Table 1. Basic parameters

表 1. 基本参数

基本参数		
车重		320 kg
75 m		4.8 s
最大速度		≤120 km/h
前后轴距比		45/55
轮胎半径		225 mm
空气阻力		0.2
滚动阻力		0.018

3. 赛车性能要求

设定赛车参数目标:

- 1) 最高车速 ≤ 120 km/h;
- 2) 0~75 m 加速时间 ≤ 4.8 s。

4. 赛车电机参数匹配计算

在纯电动方程式赛车的电机选型过程中, 需基于整车动力学性能与能量效率的协同目标进行精细化匹配。若驱动功率冗余度过高, 虽可提升理论加速能力, 但会引发传动系统效率衰减($\eta < 85\%$)及轮端扭矩过剩问题, 导致驱动轮附着力下降、动态失稳风险增大; 反之, 若功率储备不足, 则无法满足 FSEC 赛事中短距冲刺(0~75 m 加速 ≤ 4.8 s)与高速绕桩($v \geq 80$ km/h)的瞬态响应需求, 直接影响赛道竞争力, 电机的选择需要考虑整车性能的需求不能过于极限[2]。电动机的功率主要与电机额定功率和最大功率的确定有关系[3], 电机选型根据目前已知国内外各大车队选择的电机厂家有 AMK、EMRAX、JJE 等, 需要在性能与重量上选择好电机, 按公式计算所需电机额定功率(以下公式为通用公式):

$$P_{v_{\max-e}} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{mgf}{3600} \cdot v_{\max} + \frac{C_D A}{76,140} \cdot v_{\max}^3 \right)$$

其中, η 为传动效率; m 为整车质量, 单位 kg; f 为滚动阻力系数; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积, 单位 m^2 。

代入数据算得 $P_{v_{\max-e}} = 20$ kw。

计算 75 米的直线加速工况来确定一个目标电机的峰值功率 P 。

$$S = \frac{\bar{v}t}{3.6}$$
$$S = \frac{v_0 t}{3.6} + \frac{\bar{a}t^2}{2}$$

其中, S 为加速距离, 单位 m; $\bar{v}$ 为行驶平均速度, 单位 km/h; t 为加速时间, 单位 s; v_0 为初速度, 单位 km/h; $\bar{a}$ 为平均加速度, 单位 m/s^2 。

计算得出结果 $\bar{v} = 56$ km/h, $\bar{a} = 6.5$ km/s²。

接下来, 再计算 75 m 加速工况下的电机峰值功率 P :

$$P = \frac{1}{\eta} \cdot \left(\frac{mgf}{3600} \cdot \bar{v} + \frac{C_D A}{76,140} \cdot v^{-3} + \frac{\delta m \bar{v}}{3600} \bar{a} \right)$$

求得 $P = 47$ kw。

即可得到额定功率 $P_{\text{额}} \geq 20$ kw, 峰值功率 $P_{\text{max}} \geq 47$ kw。

根据计算结果可以看出电机峰值功率为 47 kw, 考虑到功率还需要考虑电机重量以及赛事允许最大功率($P < 80$ kw), 目前电机功率可以限定为 80 kw, 在重量上对比可以选择较轻的, 下面是选出的电机参数(见表 2)。

Table 2. Motor parameters
表 2. 电机参数

额定功率(kw)	40 kw	额定功率(kw)	80 kw
峰值扭矩(n·m)	128 n·m	最高转速(rpm)	5600 rpm

5. 传动系统参数匹配设计

方程式电动赛车传动系的设计主要是为了满足降速增扭的作用降低转速来增加扭矩使赛车性能更强,同时应使电机具有较大的调速范围及在高效率区运转方便设计以及优化[4]。在设计上要考虑到轻量化的问题,所以赛车采用的是链传动,由链条与大小链轮组成,外加一个差速器。

根据赛车基本参数计算传动比。

确定最小传动比 $i_{\min}$,

$$\frac{T_{v_{\max}} \cdot i_{\min} \cdot \eta}{r} = mgf + \frac{C_D A}{21.15} v_{\max}^2$$

其中, $T_{v_{\max}}$ 为最高速度时的扭矩, 单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$; r 为轮胎滚动半径, 单位为 m 。

根据公式推算出最小传动比 $i_{\min} = 1.6$ 。

算最大传动比 $i_{\max}$,

$$i_{\max} = \frac{0.377 \cdot r \cdot n_{\max}}{v_{\max}}$$

其中, $n_{\max}$ 为最大转速, 单位为 r/min , $v_{\max}$ 为最大速度, 单位为 km/h 。

计算 $i_{\max} = 4.3$ 。

所以选择的传动比范围为 1.6~4.3。

6. 传动比优化选择

传动比的选择对赛车性能十分重要。过小的传动比会导致轮端扭矩不足, 无法满足短距离加速需求; 过大的传动比则会使电机过早进入恒功率区, 降低加速效率, 可以通过使用 OptimumLap 与 CarSim 的联合仿真, 对不同传动比(1.6~4.3)下的赛车性能进行动态评估来选择传动比。

6.1. OptimumLap

OptimumLap 基于准静态模型, 通过赛道圈速模拟优化传动比设计。输入参数包括电机功率-转速曲线、传动比范围、轮胎滚动半径及整车质量等, 重点分析传动比对加速性能与能耗效率的影响。

将电机与车辆数据导入, 调试传动比通过模拟跑圈数据来选出最佳传动比(见图 1)。

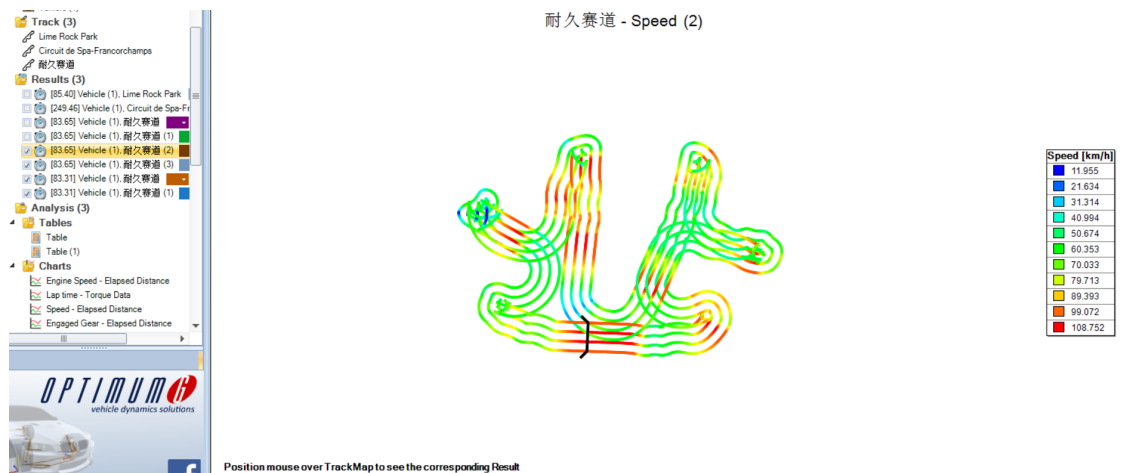


Figure 1. Lap speed simulation diagram

图 1. 圈速模拟图

6.2. CarSim 对最终结果的模拟验证

基于 CarSim 车辆动力学仿真软件, 建立车辆动力学模型[5], 将选好的传动比与车辆数据在八字绕环与 75 m 直线加速工况下模拟测试, 取得仿真值与实际值比较(见图 2)。

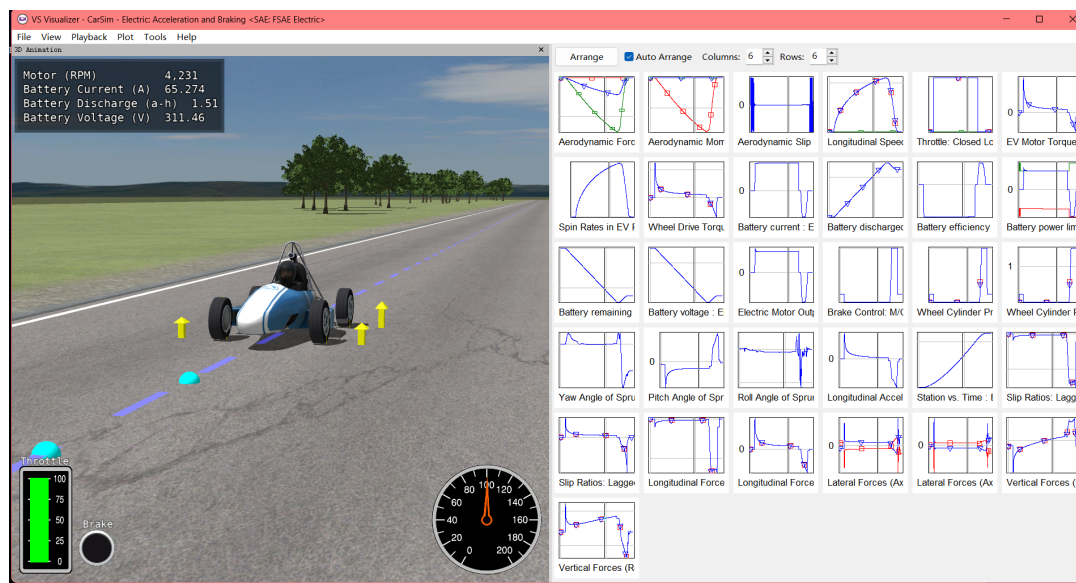


Figure 2. Linear acceleration simulation diagram

图 2. 直线加速模拟图

工具验证: OptimumLap 基于准静态模型计算圈速, 其加速工况误差率 $\leq 3\%$; CarSim 采用多体动力学模型, 可精确模拟轮胎滑移率与差速器动态响应, 与实车测试数据的偏差控制在 5% 以内。两工具结合可覆盖稳态与瞬态工况的仿真需求。

参数敏感性(OptimumLap 与 CarSim): 模型输入参数中, 滚动阻力系数(f)与轮胎半径(r)的误差对仿真结果的影响较为明显。例如, f 值偏差 $\pm 10\%$ 时, 加速时间变化 ± 0.3 s; r 值偏差 $\pm 2\%$ 时, 最高车速误差达 ± 4 km/h。因此, 实际设计中需通过实测校准关键参数。

误差来源: 仿真未考虑车手操作差异(如油门响应延迟)及赛道表面摩擦系数波动, 可能导致加速时间预测有些许偏差。

传动比对加速性能与最高车速的影响最大, 是优化的核心变量; 每改变一次传动比会得到不同的尾速, 这也是设计中需要重点关注的一个参数。在确定最终的传动比时, 首先要使电机在比赛中高效功率范围内运行, 在比赛车耐久赛时, 车速应对应在电机设计转速范围内。本文采用的是电机理想的外特性曲线进行的仿真, 但实际的加速时间与车手的驾驶习惯与车队的竞赛策略有关, 要在保证加速性能最大化的条件下, 实际选择的传动比要考虑到对加速时间的裕量, 使得赛车的整体性能有较大的提高。

7. 总结

纯电动赛车动力系统的参数匹配需以赛事规范为前提进行设计。在确定电机功率时, 需分阶段完成: 首先基于规定的最高时速和加速性能指标进行基础功率计算, 随后结合驱动系统的扭矩特性、调速区间以及峰值功率持续时间等动态参数, 对初选功率值进行多维度校验与优化调整。该流程需重点考量电机在极端工况下的性能维持能力与系统匹配度, 确保动力参数在满足竞赛需求的同时, 达到最优匹配状态。再使用软件对传动系统进行一个完整模拟, 得到的结果更加接近真实结果, 对我们的赛车研发设计有着

许多好处, 不仅帮助我们降低了前期开发成本, 同时还能提高我们的学习能力。

基金项目

2023 年国家级大学生创新创业训练计划项目《汽车宽体行走的达芬奇》(202311549045)。

参考文献

- [1] 中国大学生方程式大赛规则委员会. 中国大学生方程式汽车大赛规则[EB/OL]. (2019-04-03) <http://www.formulastudent.com.cn/>, 2022-09-07.
- [2] 郝远. FSC 纯电动方程式赛车动力系统参数匹配和电子差速控制研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [3] 叶升强. 大学生方程式电动赛车电机、电池选型与匹配[J]. 内燃机与配件, 2018(21): 172-174.
- [4] 廖全立, 乔旭强, 边涛, 等. 纯电动方程式赛车动力匹配计算[J]. 数字化用户, 2013(14): 120-121.
- [5] 陈正春. 基于 CarSim 整车动力学建模及性能分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.