

# 基于 Simulink 动力学模型仿真与台架试验的巴哈赛车传动系统优化

屈奕恒

武汉理工大学汽车工程学院 湖北 武汉 430070

**摘要：**赛车传动系统是赛车性能的关键组成部分，本文介绍了针对中国汽车工程学会巴哈大赛的小型越野赛车的集成式四驱传动系统的优化设计，通过汽车台架试验研究了不同参数的 CVT 对整车动力性的影响，并使用 Simulink 建立动力学模型使汽车动力性的评价指标可视化，指导对四驱系统转矩分配系数的优化。通过整体性设计，让赛车的通过脱困能力、爬坡性能等都有一定的提升。

**关键词：**巴哈赛车；传动系统；Simulink；无级变速器；台架试验

赛车传动系统是赛车性能的关键组成部分，其性能直接影响到赛车的加速性能、最高速度和最大爬坡度。因此，对赛车传动系统进行优化设计具有重要的实际意义。本文通过台架试验对 CVT 速比变化特性进行研究，通过研究不同重量普利珠与弹簧刚度对 CVT 速比变化特性与整车加速性能的影响，确定普利珠与弹簧刚度参数以获得最佳的动力性，并得到 CVT 传动比随发动机转速变化曲线指导后续进行 Simulink 动力学模型建立，通过动力学模型帮助进行四轮驱动转矩分配系数的选择，优化赛车的加速与爬坡性能。

## 1 动力系统台架试验

### 1.1 试验台架介绍

为了研究巴哈赛车无级变速器的速比变化特性，通过台架模拟实车工况测得所选取的不同普利珠和弹簧组合下的 CVT 主从动轮转速比随发动机转速变化情况，在对数据进行分析后优化 CVT 参数的选择。

#### 1.1.1 试验台架

试验台架由发动机、CVT、主减速器、联轴器、扭矩传感器、磁粉测功机组成，为模拟试车工况对 CVT 的速比变化特性进行研究，确定台架传动路线如图 1 所示，试验台架如图 2 所示。

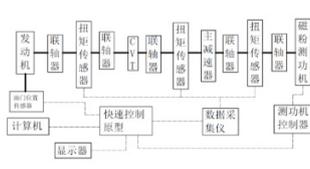


图 1 试验台架传动路线



图 2 试验台架

### 1.2 台架试验与数据处理

#### 1.2.1 试验过程

台架试验将如表 1 所示两种不同参数的 CVT 分组进行试验，获取主从动轮转速数据。

通过磁粉测功机施加 192N·m 的负载，发动机节气门全开，由怠速加速到最高稳定车速，获取此加速过程中主从动轮转速数据，根据主从动轮转速计算得到 CVT 的传动比，理论车速。下表为 CVT 参数。

普利珠质量	主动轮弹簧刚度	从动轮弹簧刚度
53g	700N/m	451N/m
50g	550N/m	451N/m

#### 1.2.2 数据处理

读取数据，通过 Excel 软件绘制传动比 - 主动轮转速曲线

图，即传动比 - 发动机转速曲线图如图 3 与车速 - 时间曲线图 4。通过 Matlab 拟合函数工具，得到两组不同参数 CVT 在发动机达到发出最大功率时的转速后的加速过程中传动比随车速变化曲线的拟合函数。函数 y 轴为 CVT 传动比  $i_g$ ，x 轴为车速的倒数，拟合得到  $i_g$  与  $1/u_a$  的线性函数  $f(x) = p_1x + p_2$

53kg 700N/m	$p_1 = 34.41 p_2 = 0.05851$
50g 550N/m	$p_1 = 32.25 p_2 = 0.1161$

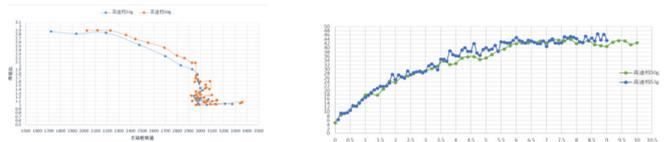


图 3 传动比 - 发动机转速曲线图 图 4 速度 - 时间曲线图

### 1.3 试验结果分析

为使发动机在任何车速下都能发出最大功率，获得最佳的动力性，CVT 无级变速器的传动比应随车速按下式规律变化：

$$i_g = 0.377 \frac{rn_p}{i_0 u_a}$$

式中  $n_p$  为发动机发出最大功率时的转速  $n_p=3060rpm$ 。

参数为 53g 普利珠、700N/m 主动轮弹簧刚度的无级变速器的  $i_g$  与  $1/u_a$  拟合函数与理想情况无级变速器传动比随车速变化函数更为接近，故选用该参数的 CVT 以获得更加的动力性。图 4 的速度 - 时间曲线体现出参数为 53g 普利珠、700N/m 主动轮弹簧刚度的无级变速器有更好的加速性能，符合 CVT 速比变化特性试验结果。

## 2 动力学模型仿真

### 2.1 动力学模型建立

#### 2.1.1 发动机模型

根据百力通 M19 风冷发动机输出转矩与转速曲线图 5，通过 matlab 得到该发动机转速  $n$  与扭矩  $T_p$  关系曲线拟合函数为

$$T_{tq} = -2.91 \times 10^{-6} \times n^2 + 0.01727 \times n - 5.523$$

#### 2.1.2 Simulink 模型的建立

##### 2.1.2.1 参数设置

根据 2022 赛季武汉理工大学巴哈赛车给出整车具体参数如下表

整车满载质量/m/kg	263
车轮半径r/mm	275
滚动阻力系数	0.085

作者简介：屈奕恒（2002— ），男，汉族，湖北武汉人，武汉理工大学本科在读。

基金：国家大学生创新创业训练计划项目，编号S202210497251

传动效率 $\eta_l$	0.88
轮胎附着系数	0.65
主减速器传动比 $i_0$	0.876
轴距 $L/mm$	1430
前后轴荷比	0.45: 0.55
迎风面积 $A/m^2$	$1.2 \times 0.79$
风阻系数 $C_D$	0.35
转矩分配系数 $\psi$	0.5
质心高度 $h_g/m$	0.49

2.1.2.2 仿真模型的建立

汽车行驶方程式： $\frac{T_{tq} i_0 \eta_T}{r} = Gf \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 + G \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt}$

汽车旋转质量换算系数： $\delta = 1 + \frac{\sum I_w}{m r^2} + \frac{I_f i_0^2}{m r^2}$

汽车驱动力与发动机转矩关系： $F_t = \frac{T_{tq} i_0 \eta_T}{r}$

通常巴汽车动力因数作为表征汽车动力性的指标，汽车动力性因数为：

$$D = \frac{F_t - F_w}{mg} = \psi + \frac{\delta du}{g dt}$$

其中， $\psi = f \cos \alpha + \sin \alpha$ 为道路阻力系数。

空气阻力： $F_w = \frac{C_D A}{21.15} u^2$  汽车车速： $u = \frac{0.377 r n}{i_0 i_g}$

汽车加速度： $a_j = \frac{g}{\delta} (D - f)$  爬坡角： $i = \tan [\arcsin \frac{D - f \sqrt{1 - D^2 + f^2}}{1 + f^2}]$

根据以上汽车动力学基础，通过 Simulink 搭建动力性仿真模型对赛车动力性进行评估，如图 6 所示。

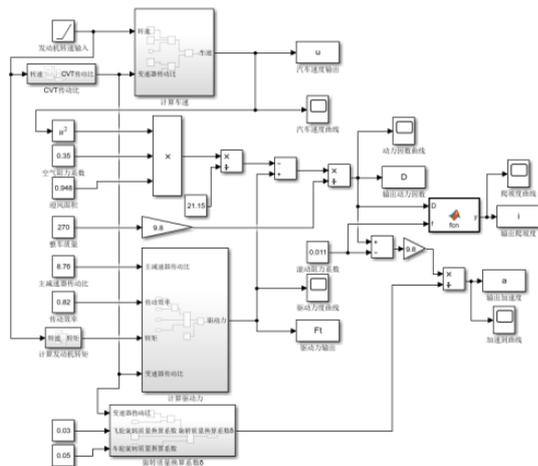


图 6 动力学模型

2.1.3 Simulink 动力学仿真结果

2.1.3.1 动力性评估

汽车的动力性主要可由汽车的最高车速、汽车的加速时间、汽车的最大爬坡度三方面的指标来评估。也可通过动力特性图即动力因数与车速关系曲线来分析汽车的动力性。Simulink 动力学模型输出动力特性图如图 7 所示。

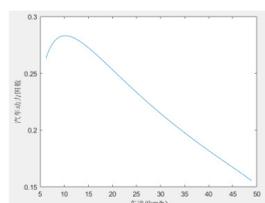


图 7 动力特性图

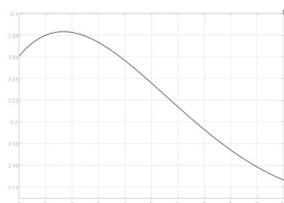


图 8 爬坡度图

2.1.3.2 转矩分配系数优化

转矩分配系数的选择，首先必须满足前、后驱动轴可承受的转矩负荷需求，其次必须满足前、后驱动轴的可承受轴荷的需求，最后按照行驶工况，必须满足不同坡道行驶工况求。前、后驱动轮的附着率即充分发挥驱动力作用以达到目标等效坡度  $q$  所要求的最低附着系数，分别为：

$$C_{\varphi 1} = \frac{(1 - \psi)q}{b/L - h_g q/L} \quad C_{\varphi 2} = \frac{\psi q}{a/L + h_g q/L}$$

若  $C_{\varphi 1} > C_{\varphi 2}$ ，在一定附着系数  $\varphi$  的路面上，实际能达到的等效坡度为  $q = \frac{b/L}{\frac{1-\psi}{\varphi} - \frac{h_g}{L}}$ ，若  $C_{\varphi 1} < C_{\varphi 2}$ ，实际能达到的等效坡度为  $q = \frac{a/L}{\frac{\psi}{\varphi} - \frac{h_g}{L}}$ ，搭建从附着条件考虑的爬坡度计算模型，分析

当路面条件恶劣附着系数低下时，无法充分发挥驱动力作用情况下能达到的等效坡度，如图 9 所示。

根据图 8 所示爬坡度图可知，从驱动力角度考虑的最大爬坡度为  $i=0.285$ ，故充分发挥驱动力作用时要求的最低附着系数，即前、后驱动轮的附着率分别为  $C_{\varphi 1}$ 、 $C_{\varphi 2}$ 。输入转矩分配系数  $\psi = [0.5, 0.6, 0.65, 0.7]$ ，后轮驱动  $\psi=1$ ，输出等效爬坡度随附着系数  $\varphi$  变化的曲线图如图 10。

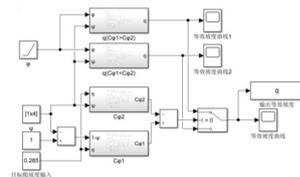


图 9 等效爬坡度计算模型

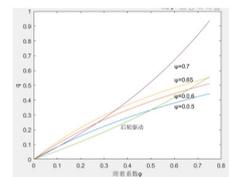


图 10 等效爬坡度

图 10 中给出了采用四种不同四驱传动系统转矩分配系数和后轮驱动的赛车的等效爬坡度与地面附着系数的关系曲线，由于充分发挥驱动力作用所能达到的最大爬坡度  $i=0.285$ ，故该图曲线仅在  $q < 0.285$  时有意义，由图可知转矩分配系数  $\psi=0.65$  时，相同的地面附着系数条件下能达到更大的等效爬坡度，较目前选取转矩分配系数  $\psi=0.5$  的情况明显拥有更好的爬坡能力。

3 小结

本文通过台架试验对无级变速器的速比变化特性进行了研究，确定最佳的普利珠与弹簧刚度参数以获得更好的动力性，并得到 CVT 传动比随发动机转速变化曲线指导后续进行 Simulink 动力学模型建立。通过 Simulink 动力学模型对赛车传动系统进行的仿真分析，使赛车在传动系统参数调整的过程中体现的动力性变化更加可视化，指导了在恶劣的路面条件下，如何进行转矩分配系数的选择以获得最佳的爬坡性能，对于提高赛车性能和竞争力具有重要的实际意义。

参考文献

- [1] 余志生. 汽车理论 [M]. 第六版. 北京：机械工业出版社，2018.9
- [2] 余国芹. 基于模型的车辆状态参数估计研究 [D]. 武汉：武汉科技大学，2016.
- [3] 杨京昊，董明望，辜勇. 基于 Simulink 混合动力起重建模与仿真 [J]. 起重运输机械. 2020 (9)：55-60.
- [4] 李业炜，刘涛，庞同轩等. 基于 Simulink 建模的插电式混合动力汽车动力学仿真 [J]. 汽车实用技术，2023，48 (01)：17-21.
- [5] 田佳佳. 橡胶带式 CVT 传动特性研究 [D]. 重庆大学，2010
- [6] 任卫群，杜常清. 新技术趋势下汽车工业中的系统仿真技术 [J]. 计算机仿真，2021，38 (08)：1-6+42.