

基于 MK100 的赛车 ABS 系统设计与开发

王俊杰, 任德志, 颜翔宇

哈尔滨工业大学(威海)

【摘要】 ABS 的全名是 Anti-lock Brake System (防抱死制动系统), 它能够充分利用轮胎与地面的附着系数, 有效控制车轮保持在滚动状态, 提高制动时赛车的稳定性及较差路面条件下的汽车制动性能。目前国内市场一般使用于乘用车中, 而现今 FSAE 中此项技术应用尚不充分。本文依托于 Conti 的 MK100 作为硬件设备, 依据 ABS 的工作原理, 分析设计了基于逻辑门限值的控制策略, 并自行开发了 ABS 控制板和驱动板, 可以让 ABS 系统接入整车 CAN 网络实时获取当前工况控制 MK100 内的电磁阀和电机迅速动作, 从而使车轮获得理想滑移率, 通过设计出可应用于赛车的三通道轮控式 ABS 系统, 提高了赛车的安全性和操纵性, 并依托于 Carsim 进行仿真试验, 取得了一定成果。

【关键词】: ABS、电控、逻辑门、FSAE

Design and Development of Racing ABS System Based on MK100

Wang Junjie, Ren Dezhi, Yan Xiangyu

Harbin Institute of Technology(Weihai)

Abstract: The full name of ABS is Anti-lock Brake System, which can make full use of the adhesion coefficient between the tire and the ground. That can effectively control the wheels to keep rolling, and improve the stability of vehicle braking performance during braking and poor roads. At present, the domestic market is generally used in passenger cars, but the current application of this technology in FSAE is still insufficient. This article is based on MK100 as a hardware device, and designs a control strategy of logic thresholds based on the working principle of ABS. And we design a control panel and drive panel, which can allow the system to connect to the CAN network in real time. Acquire the current working conditions to control the solenoid valves and motors in the MK100 to move quickly, so as to obtain the ideal slip rate of the wheels. By designing a three channel of the wheel-controlled system that can be applied to racing cars. The safety and maneuverability of racing cars are improved. And relying on Carsim to carry out simulation tests, and achieved certain results.

Key words: ABS, electric control, logic thresholds, FSAE

引言

防抱死制动系统作为主动安全装置^[1], 能够充分利用轮胎与地面的附着系数, 提高车辆在制动时的操纵稳定性和制动效率, 大大提高车辆的行驶安全性, 我国汽车工业发展规划中把 ABS 技术开发应用列为第一条,

颁布有《汽车制动系统结构、性能和实验方法》的强制性法规。然而由于技术的垄断, 国内乘用车 ABS 自主产品市场占有率仅在 10% 左右。在 FSAE 赛车产业方面的 ABS 应用更是有极大缺口, 由于 FSAE 赛事的特殊性, 需要充分发挥赛车手和赛车的极限, 对赛车的安全性和操纵性有着更高的要求, 但

致谢

首先要感谢 HRT 车队指导老师王剑锋, 给予广大学生一个能够充分学习和展示的平台, 感谢伍练、东鹏玮等学长提供的硬件支持, 感谢 HRT-19D ESC 设计团队, 包括但不限于卢奇麟、王书鹏、赵砚秋、胥亚西等, 给我带来极大的启发, 同时也要感谢参考文献中的作者们, 他们的研究文章给了我的研究课题出发点很大的启发。最后感谢 HRT-C 的全体队员!

目前赛事中 ABS 系统应用极少。因此，为了提高赛车的操纵稳定性和制动效率，避免由于入弯刹车时间过晚，或者车手紧急制动导致车轮抱死无法转向而造成的损失，我们决定进行 ABS 系统的设计与开发。

1、ABS 电子控制单元实现

1.1 ABS 电控单元整体架构

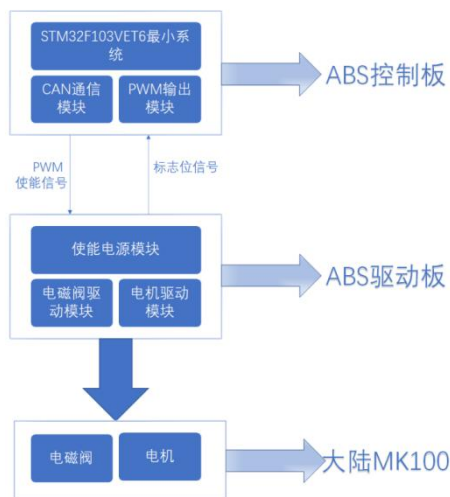


图 1 ABS 电控单元框图

ABS 控制板接入整车 CAN 网络，并从 CAN 报文中解析出制动油压、四轮轮速等数据，用于 ABS 控制。ABS 控制板与驱动板之间通过两个板对板插头连接，ABS 控制板根据一定的控制策略向 ABS 驱动板输出使能信号和 15 路 PWM，ABS 驱动板向 ABS 控制板输出 L9348 工作的标志位信号。

1.2 ABS 硬件电路设计

1.2.1 控制板电路设计

电源模块：由于 21C 整车增加了 5V 供电总线，所以电源模块选择了以 AMS1117-3V3 低压稳压芯片，并在芯片的输入输出端都增加了电容滤波，以保证控制板 3.3V 电位的稳定，还增加了电源指示灯，便于实际使用时观察控制板是否上电成功。

STM32F103VET6 最小系统模块：STM32 的最小系统包含了主控芯片、外部晶振电路、芯片电源电路、复位电路以及调试下载

模块，由于要实现 ESC 的功能需要输出多达 15 路的 PWM，还要有使能驱动板电源，接收驱动板标志位以及接收 CAN 通信数据等，需要相对较多的引脚和相对较快的处理速度，综合考虑成本以及可靠性之后，ABS 控制板选择了 STM32F103VET6 微处理器作为主控芯片。

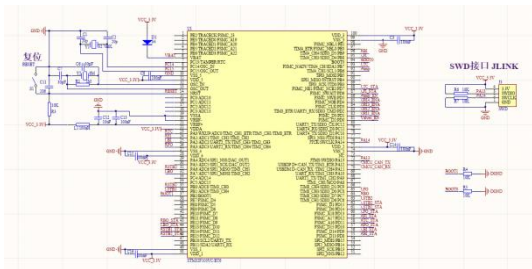


图 2 控制板最小系统

CAN 通信模块^[2]：CAN 通信模块采用的是高速 CAN 收发器 TJA1050T 帮助 ABS 控制板接入到整车 CAN 网络当中。在 CANH 和 CANL 之间还预留出终端电阻 120 Ω 的焊盘，实际装车时，视该控制板在 CAN 总线上节点的位置来决定是否焊上 120 Ω 电阻。

PWM 输出模块：由于 STM32F103VET6 引脚输出带负载的能力比较差，考虑使用 74HC244 增加其带负载的能力。74HC244 是一款常见的驱动信号芯片，常用于各种单片机 MCU 系统中，单片机 I/O 口输出的电流很小，而 244 芯片可以用来放大电流，它是具有三态输出的八路单向缓冲器和线路驱动器。ENA 和 ENB 分别是两个四位三态缓冲器的使能端。当 ENA 和 ENB 都为低电平时，输出端 YA 和输入端 A，YB 端和 B 端状态相同；当 ENA 和 ENB 都为高电平时，输出都呈高阻态。不用的管脚（B4）可以悬空。

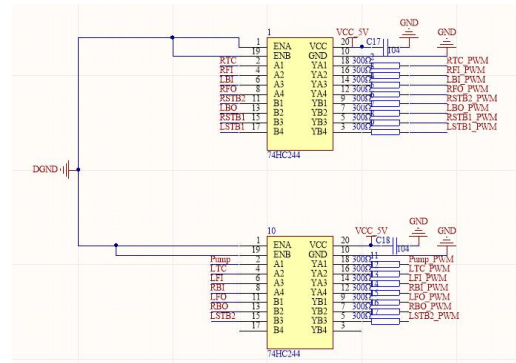


图 3 PWM 输出模块

1.2.2 驱动板电路设计

电源使能模块^[3]: AUIR3241S 是宽电压供电的大功率电源控制芯片,其供电电压可以为 3-36V 的任意值,输入端的电压可以在 2.5-5V 之间实现整个电源电路的通断,可以兼容单片机 3.3V,控制部分使用 MOS 管将电压抬升至 5V。SQD40N06 是大功率 MOS 管流经所有的电源电压,可承受 40A 的电流,完全符合系统的要求(电磁阀部分最大约 12A)。V40PWM45C 是低正向压降(VF=0.33V@IF=5A)、低功耗损耗的肖特基整流器.该应用电路可以通过输入引脚 IN 实现对 Gate 开关的控制,进而控制电磁阀供电电源的通断^[4]。

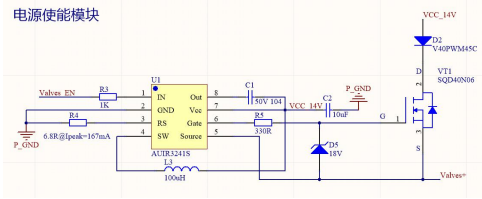


图 4 电源使能模块

电磁阀驱动模块^[5]: L9348 是单片机集成四端驱动芯片,在汽车和其它工业常用于驱动感性负载(继电器、电磁阀)。每一个 L9348 芯片可以分别输出 4 路独立的 PWM,对应四个电磁阀的开关,大陆 MK100 共有 14 个电磁阀,所以共使用 4 个 L9348 芯片^[6]。L9348 芯片包含四个输入端,4 个状态输出端,4 个电流输出状态,以及一个总的使能引脚。控制板使用 4 个引脚分别控制 4 个芯片的使能,便于之后对 ABS 的功能进行选择,在不使用时不使能。

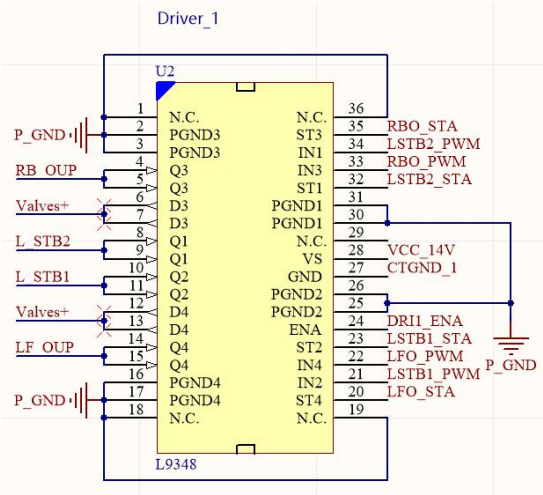


图 5 电磁阀驱动模块

电机驱动模块: 该电路用于控制电机的停转。由于电机属于感性负载,其上的电流不能突变,不能直接使用 PWM 控制二极管通断供电。IR2184 是一种半桥功率放大芯片,可以通过两路相反的输出来分别控制电源和 GND 的通断,从而实现 PWM 直接控制电机的功能。

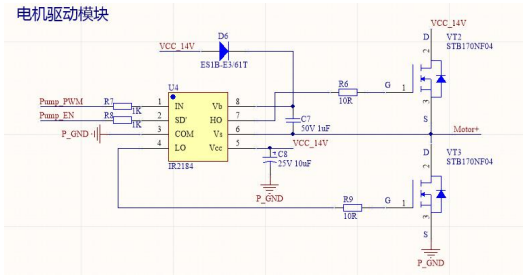


图 6 电机驱动模块

1.2.3 硬件的连接方式

ABS 控制板与整车的连接,通过 1.25mm 贴片卧插,接入整车 5V 电源和 CAN 总线网络。

2 ABS 控制系统设计

轮控式 ABS 系统^[8]：也称单轮控制，即每个车轮均根据各自车轮转速传感器信号单独进行控制。三通道式 ABS 系统：前轮采用轮控式，后轮采用低选轴控式，后轮制动管路中各装有一个制动压力调节器，由 ECU 按低选原则统一控制。研究过程即选用三通道式控制方式。

根据有限状态机原理要求，将 ABS 控制系统采用分层模块化设计，并分为数据处理阶段、逻辑控制阶段、执行阶段三个部分^[9]，各个部分根据功能分成若干个子模块，各子模块分别提供相应信息完成相应功能^[7]。

2.1 数据处理阶段设计

在数据处理阶段中主要输入信号为四个车轮轮速（ u ）、四个车轮制动油压（Brake pressure）。输出信号为每个车轮的角加速度。根据 FSAE 实车情况，在保证轻量化和稳定性的前提下，加装轮速传感器和油压传感器。

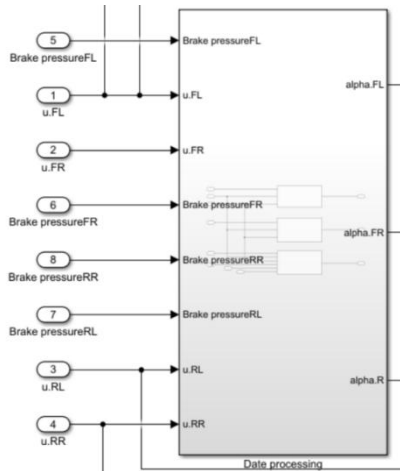


图 9 数据处理层

在数据处理阶段中，根据滑移率的计算公式^[8]，并根据前后制动卡钳的不同尺寸，在 Simulink 中建立车辆制动动力学模型。

$$Slip = \frac{u - u_{FL}}{u} \quad (1)$$

式中，Slip 是车轮滑移率（%）； u 是参考车速（m/s）； u_{FL} 是单轮角速度（rad/s）； F_f 是单轮摩擦力（N）； R 是车轮滚动半径

（m）；

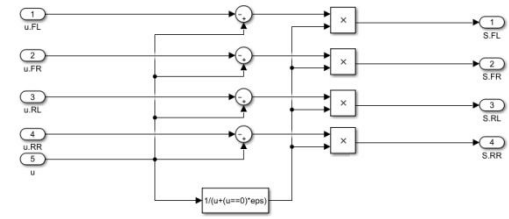


图 10 滑移率计算模型

制动力矩的计算：

$$T_f = N \cdot P_f \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot f \cdot R_f \cdot BEF \quad (2)$$

式中 N 是单侧轮制动盘上的摩擦衬块个数， P_f 是单侧轮制动盘上的制动压力， d 是制动卡钳处活塞直径， f 是摩擦衬块与制动盘的摩擦系数， R_f 是轮胎有效制动半径， BEF 是制动器效力系数，指制动器的输入与输出比，常取 0.6~0.9。

得出角加速度：

$$\alpha = \frac{F_f \times R - T_b}{I} \quad (3)$$

式中， T_b 是制动转矩（N/m）； I 是车轮转动惯量（ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ）。

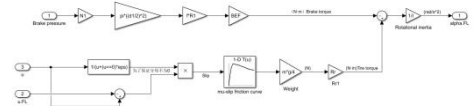


图 11 角加速度计算模型

2.2 逻辑控制阶段设计

期望滑移率是汽车制动时的理想状态^[12]，当轮胎抱死时，滑移率将会增大，横向和纵向附着系数将会降低，从而车轮出现滑移车辆失控。此时可以通过对各个轮胎的制动油压进行干预，从而使车辆的实际状况逼近理想稳定状态。由于稳定性控制的工况复杂多变，研究过程中采用逻辑门限值控制进行算法设计，这对于非线性系统是一种有效的控制方法。以滑移率、参考车速、轮胎角加速度作为输入，制动油压作为反馈量，从而构成一个闭环控制。

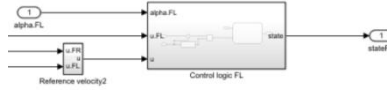


图 12 控制逻辑层

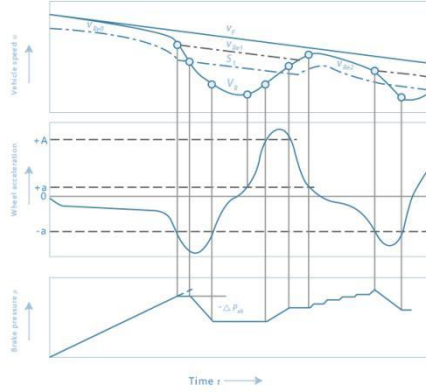


图 13 控制示意图

2.2.1 参考车速

参考车速可以通过以下方法进行构造。第一种是通过加装加速度传感器，根据传感器读出的数据进行积分。第二种是根据两个前轮轮速的平均值求得。第三种^[10]是在加速度大于 $-a_0$ 时， $v_{Re0}=v_R$ ；当加速度小于 $-a_0$ 时，

$$v_{Re1}=v_{Re0}-a_{Re} \times t \quad (4)$$

（ a_{Re} 为一般路面能达到的减速度）；

然后在减压过程中，车轮增速，当 $v_R > v_{Re1}$ 时（在制动过程中，轮速不应大于车速，因此对 v_{Re1} 进行修正为 v_{Re2} ），令 $v_{Re2}=v_R$ ；第一个循环后，

$$a_{Re} = \frac{v_R - v_{R0}}{t_1 - t_0} \quad (5)$$

a_{Re} 也被修正，其中包含有路面特征，从而提高控制精度

2.2.2 控制逻辑

基于 conti 的 MK100，控制逻辑中的执行阶段分为 4 个状态，分别是人工增压、保压、减压、增压。并将控制逻辑中的有限状态机部分分为 5 个阶段（如下流程图），并将其在 stateflow 中实现。

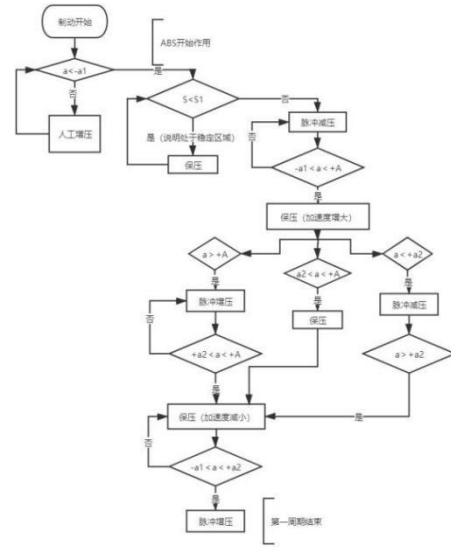


图 14 控制逻辑流程图

当角加速度大于门限值第一减速度 $-a_1$ 时，处于人工增压阶段，当小于门限值第一减速度 $-a_1$ 时，进入 ABS 控制第一阶段，首先对滑移率进行判断，建立门限值参考滑移率 S_1 ，由参考车速和目标滑移率在 20% 左右，可以得到轮速的范围，即参考车速与轮速的差别在 20% 左右。

$$S_1 = v_{Re} \cdot (1 - 20\%) \quad (6)$$

当轮速小于参考滑移率时，处于稳定区域，进行保压。相反则退出第一阶段，进入第二阶段进行减压。

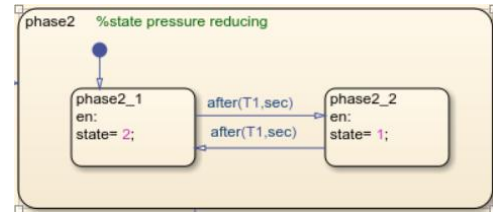


图 15 减压过程

减压过程中轮速又开始回升，当车轮的加速度大于门限值第一减速度 $-a_1$ 时，进入第三阶段，减压过程结束又开始保压。在一定保压时间后进入第四阶段，用于识别路面的附着系数是高、中、低的三种情况。针对地面附着系数的大小，轮胎的附着力也相应变化，从而驱动力矩大于制动力矩，车轮加速度增大。

当地面为大附着系数路面时，即触发门限值第二加速度 $+A$ ，意味着此时油路中的制

动压力已不能提供足够的制动力矩，因此进行增压。

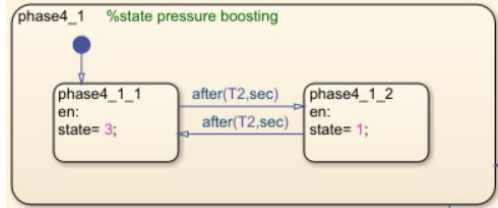


图 16 增压过程

若加速度无法触发门限值第一加速度 $+a_1$ ，则为小附着系数路面，意味着制动压力过大，则开始进行减压再保压，重复循环直到加速度达到门限值第一加速度 $+a_1$ ，此时轮胎可能处于抱死。

在第四阶段中针对不同附着系数路面，触发门限值第一加速度 $+a_1$ 后，则退出第四阶段，进入第五阶段，进行增压控制。随着轮胎加速度小于门限值第一减速度 $-a_1$ 时，则为第一周期结束，开始第二周期。

2.2.3 低选原则

当车辆左右两侧车轮的附着力相近时，两侧车轮所产生的制动力几乎相等，车辆能够具有良好的稳定性和操纵性，但当两侧车轮的附着力相差较大时（例如车辆行驶在附着系数分离的路面或两侧车轮的垂直载荷相差较大时），制动过程中两侧车轮的制动力就相差较大。因此 ABS 系统通常不对四个车轮进行独立的制动压力调节。

车辆在紧急制动时会发生很大的轴荷转移，使前轮的附着力比后轮的大得多，因此对前轮进行独立控制，可使两前轮在制动过程中始终保持较大的抵抗外界横向力作用的能力，使汽车保持良好的转向操纵能力。对两后轮按低选原则进行一同控制时，即使车辆两侧车轮附着力相差较大时，两后轮的制动力都将被限制在较小附着力的水平，使两后轮的制动力始终保持平衡。通过 switch: MAX (Choose low principle) 输出两后轮滑移率的最大值，即附着率的最小值，从而实现低选原则。

同时为防止后轮先于前轮抱死，造成甩尾车辆失控等现象，所以后轮的滑移率要始终小于前轮的滑移率，通过 switch: MIN 输

出两前轮滑移率的最小值，再通过 switch1 保证后轮的滑移率始终小于前轮的滑移率 [11]。

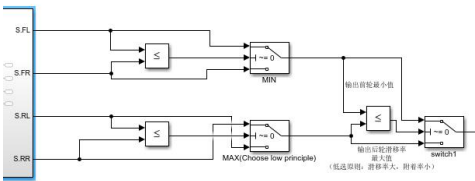


图 17 低选原则

2.3 执行阶段设计

在逻辑控制阶段中，最终输出结果为 0，1，2，3，分别代表人工增压，保压，减压，增压四种状态。针对 MK 100 的液压控制单元，基于 stateflow 设计如下执行阶段 [13]：

人工增压时：常开阀不通电，常闭阀不通电，液压泵不通电，制动油压线性增加。

保压时：常开阀通电，常闭阀不通电，液压泵不通电，制动油压保持。

减压时：常开阀通电，常闭阀通电，液压泵通电，制动油液经蓄能器泵回制动主缸，制动油压阶梯下降。

增压时：常开阀不通电，常闭阀不通电，液压泵通电，制动油压阶梯增加。

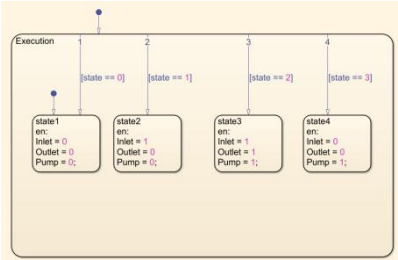


图 18 执行阶段

此处的制动油压阶梯性变化 [13]，通过 stateflow 中的 after (T, sec) 指令实现。

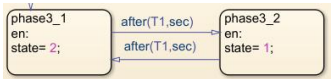


图 19 阶梯性变化

在执行阶段中，输出指令为 0 和 1，0 表示不通电，1 表示通电。

3 仿真试验

在 Simulink 中搭建 ABS 控制系统模型，在 Carsim 中搭建整车模型，通过 Simulink-Carsim 进行联合仿真，仿真条件如下^[14]：

表 1 Carsim 参数设置

| | |
|-------|--------------|
| 初始车速 | 65km/h |
| 节气门开度 | 0 |
| 挡位控制 | 闭环五档控制 |
| 制动 | 10Mpa@0.1sec |
| 方向盘转角 | 0 deg |
| 路面 | 对开路面 |
| 仿真时间 | 10 |
| 仿真步长 | 0.0005 |

分别与 Carsim 数据库中与无 ABS 的原有车辆进行对照。联合仿真结果显示，从有无 ABS 车速图和加速度图中可看出，无 ABS 车辆在经过左侧结冰路面后，车速和加速度都有巨大跃变，说明车辆已经失控滑移，而安装有本文设计的 ABS 系统的车辆能够在对开路面中保持车辆稳定制动。

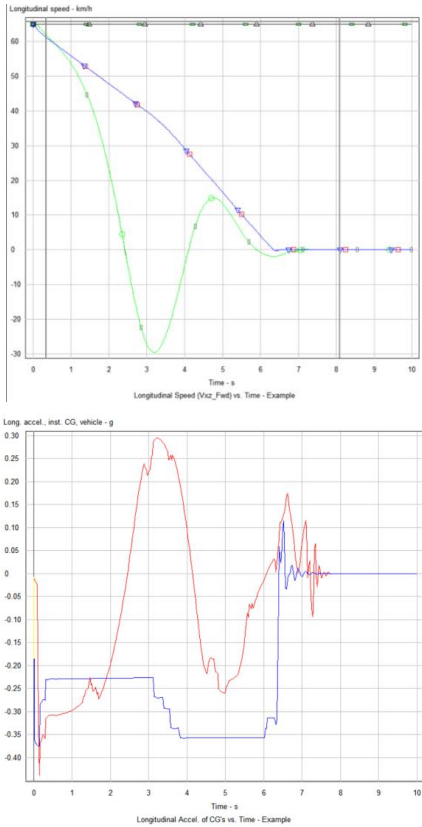


图 20 有无 ABS 车速和加速度图

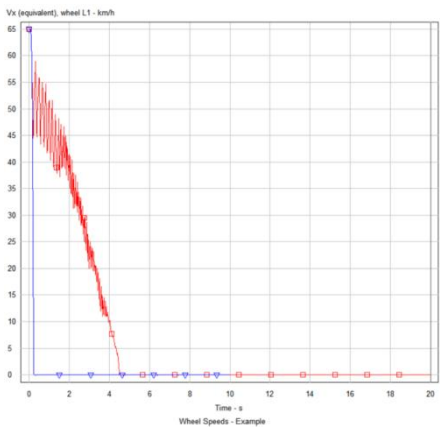


图 21 有无 ABS 轮速图



图 22 Carsim 对比动画

4 硬件选型及布置

4.1 硬件选型

德国大陆特维斯的 ESC 产品主要用于欧洲车上，在亚洲车上较为少见。大陆特维斯的 ESC 产品在性能上与博世 ESP 有得一拼。其型号为 MK60A 的 ESC 系统在性能上与博世 ESP8.0 相若。而 MK100 则是大陆特维斯最新的 ESC 产品。通过不同的调教，能够适用于小型车至小型货车等多种级别车型。



图 23 MK 100

4.2 布置形式

为了试验其有效性，我们将在 21 赛季的 HRT 燃油式方程式赛车上进行装配，布置形式如下。

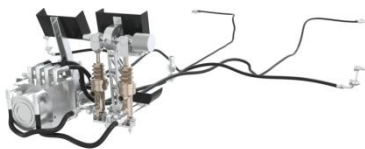


图 24 MK 100 布置形式

5 结论

汽车的安全性能已经变得越来越重要，而汽车制动性能是汽车安全性的决定性因素。ABS、EBD 等电子系统的出现，让汽车安全性提升了很大的进步。而大学生方程式比赛中，由于赛车手经验不足以及各种原因，导致赛车在高速过弯时出现甩尾甚至漂移等不安全问题，我们可以借助已经发展成熟的 ABS 系统去改善问题。本文针对大学生方程式大赛，做出一套适用于 HRT 燃油方程式赛车的安全系统。从而降低赛车过弯时甩尾的可能性，即增加了赛车的稳定性和安全性，又能提高赛车的比赛成绩。本文设计了赛车 ABS 电子控制硬件软件，并通过 Carsim 和 Simulink 联合仿真的方法，对 ABS 电子控制系统制动过程进行了虚拟整车的制动仿真，得出了以下结论：

1) 通过对乘用车 ABS 系统原理的研究

与分析，提出了本文对赛车 ABS 系统的逻辑门限值控制策略。

3) 使用 Matlab/Simulink 的强大建模功能，建立赛车 ABS 控制策略模型，并使用 Carsim 建立整车模型，道路模型。

4) 通过 Carsim 和 Simulink 联合仿真，分别对没有 ABS 系统的车辆和装有 ABS 系统的车辆进行跑动仿真。在对开路面进行测试，得到其车速时间变化对比、加速度对比以及轮速对比的分析。得出有装 ABS 的车辆比没有装 ABS 的车辆，速度变化更稳定，并防止了滑移、甩头的现象。证明本文赛车 ABS 控制系统策略对赛车稳定性有很大的帮助。

参考文献

- [1] Edward Becker Anti-lock braking and tire pressure systems[J].Tribology & Lubrication Technology,Volume 77, Issue 2. 2021. PP 58-58
- [2] 岳彩云,雷霖,李跃鹏.基于双 STM32 的行车辅助信息记录装置设计 [J]. 成都大学学报 (自然科学版),2020,39(02):185-189.
- [3] 성노훈,최영준,장지웅. Joint Operation of ABS with Power Control and Derivation of an Effective ABS Ratio for LTE Hetnet Environments[J]. The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences,2015,40(12).
- [4] 顾宏超,ABS 电磁阀过渡套与阀套装配的设备. 安徽省,芜湖全程智能科技有限公司,2018-07-03.
- [5] 邹开凤,胡新生.高速电磁阀响应特性的研究[J].移动电源与车辆,2021,52(01):40-42.
- [6] 朱献晶.基于 L9352B 的电磁阀控制电路设计与实现[J].光源与照明,2020(09):39-40.
- [7] 田敏,刘革,董兆晨.基于 MATLAB 的汽车 ABS 安全仿真研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46 (05) : 134-136.
- [8] 麻友良. 汽车电器与电子控制系统 [M] . 第 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2013. 7, 333-338.
- [9] Wenyan Xia. The Simulation Research of ABS System based on Simulink[J]. International Journal of Civil Engineering and Machinery Manufacture,2019,4(1).
- [10] 郑太雄,单荣明,蒋国英,杨勇. 汽车 ABS 参考车速的确定方法[J]. 汽车技术,2010 (03) :37-40.
- [11] 谭树梁. 轻型汽车电子机械制动执行器及硬件在环试验台研究[D]. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2007: 39-43.

- [12] Wei Zhang,Guanneng Xu,Xuexun Guo,Wen Zhang.
Research and Simulation of ABS Control Method[A].
Wuhan Zhicheng Times Cultural Development
Co..Selected,Peer Reviewed Papers from the 2014
International Conference on Energy Science and Applied
Technology(ESAT 2014 V733)[C].Wuhan Zhicheng
Times Cultural Development Co.:武汉志诚时代文化发
展有限公司,2014:5.
- [13] 李建华,孙世伦,马英通,张文奇,刘轶材,张飞. 应用于
大学生方程式赛车的 ABS 系统控制策略[J]. 汽车实用
技术, 2020, 45 (20) :83-86.
- [14] 秦程现,张蕾,严英. 汽车 ESP 系统的
CarMaker/Simulink 建模与仿真[J]. 机械科学与技
术, 2020, 39 (08) :1263-1270