

Research on Ramp Auxiliary Start Control Strategy of EPB Electronic Parking Brake System

Yan SUN

Human Univesity, Changsha, China,410008

Email: 996463257@qq.com

Abstract: Recent years,with the consumers' higher concentration on the security of cars and rapid development on the technology of electronic control,EPB(electric parking brake) has received more and more regards.The center point of this paper is research on the strategy for the ramp start of cars with EPB.On the basis of motion and force analysis during the ramp start for vehicles,a suitable strategy has been constructed as well as its simulation model in Simulink.In order to get the output curve of this simulation model,we set dynamic input parameters respectively.And finally,the outcomes of simulation would show us the feasibility and strength of the model as well as the strategy.Hope it will be helpful for the research behind.

Key words :EPB, ramp start,control strategy, Simulink&simulation,module simulation

EPB电控驻车制动系统坡道辅助起步控制策略研究

孙延

湖南大学, 长沙, 中国, 410008

Email: 996463257@qq.com

摘要: 近些年来, 随着消费者对于汽车安全性的重视, 以及电控技术的发展, EPB(Electric Parking Brake)电控驻车制动系统也受到了越来越多的重视。论文重点研究了 EPB 的辅助坡道起步控制策略, 通过对起步过程整体的运动与受力分析, 制定出合适的控制策略, 并在 simulink 环境下建立了对应的仿真模型。通过设定动态输入参数的方式, 得到了控制策略系统仿真模型的输出曲线。最后通过仿真检验模型与策略的匹配度, 并得出策略的可行性与优势所在, 对 EPB 的后期研究开发有所帮助。

关键词: 电子驻车制动系统, 坡道起步, 控制策略, simulink 仿真, 模块仿真

1 引言

近些年来, 随着人们对于车辆安全重视程度的加深, 消费者和生产商对汽车安全性的要求也越来越高, 大量的新技术被使用在汽车上以保障车辆的安全。而随着电子技术和控制技术的飞速发展, 越来越多的机械设备和结构开始使用更为精确的电子控制技术替代了原先的人工手动操作。本文研究和论述的中心 EPB (electric parking brake) 电子驻车制动系统就是在上述两个条件下延伸出来的汽车主动安全技术之一。

目前国外的相关研究主要有, 美国天合汽车集团 (TRW) 研究开发的电子驻车制动系统最早已于 2001 年在菲亚特的中高档轿车 Lancia 上首次投入使用。博世公司研发的自动驻车系统 APB-M (自动驻车制动一机电制动器) 由在两个后轴制动卡钳上的电机来施行驻车制动, 同电子稳定系统 ESP 匹配以协调工作[1]。国内目前的研究还处于起步阶段, 西华大学的研究团队将 EPB 的控制分为常规控制策略、智能自动控制策略、坡道辅助起步控制策略、应急制动控制策略及系统所致时机的选择和紧急解除, 五大模块[2]。在北京理工大学学报的相关文献中, 针对 EPB 系统的主要特色功能——坡道辅助起步控制制定了控制策略[3]。

本文主要研究 EPB 系统的坡道辅助起步控制功能, 结合运动和力学分析, 提出了一套相对简明、有效的控制策略, 简化了整个过程的控制步骤, 也提高了控制的精度和准确性。并在 simulink 中完成了控制系统的建模, 通过简单的数值仿真检验了模型的准确性和策略的可行性。

2 简述 EPB 系统

2.1 EPB 的组成与工作原理

如图 1 所示，常规的 EPB 系统由系统电子控制中心 ECU、驻车制动开关、自动驻车按钮（AUTO HOLD）、离合器与发动机等传感器、轮边制动执行机构和指示灯系统构成^[1]。

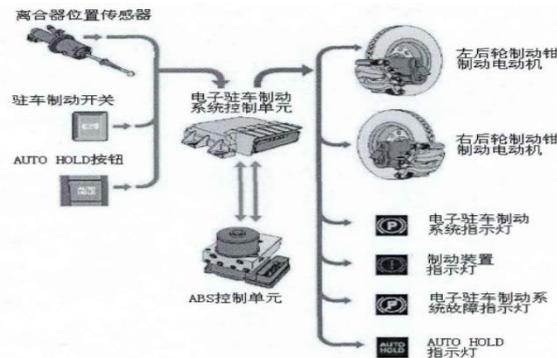


Figure 1. structure of EPB system

图 1 EPB 系统结构图

其工作原理为，由各传感器感知汽车内部和外部的运动和机械参数（如离合器主从动盘相对位置、发动机转速和坡道角度等），并将数据发至控制中心 ECU 中；ECU 计算出车辆的外部受力和运动情况，结合 ABS 控制单元制定车辆的制动方案；最后由轮边制动执行机构执行具体的制动操作。

2.2 EPB 的功能

系统功能具体如下：

1. 驻车制动功能。此功能保证实现汽车的基本驻车制动功能^[4]，相当于在安装机械式驻车制动汽车中操作手动驻车拉杆，实现停车制动^[1]。
2. 坡道起步辅助控制功能。对于配备电子驻车制动系统的汽车^[5]，当 EPB 按钮按下系统通电时，由控制中心对离合器结合与制动踏板的放松进行精确控制，从而避免了起步时熄火和后溜的发生，简化了驾驶员的操作。
3. 动态紧急制动功能。当制动踏板失灵或者意外锁止时，驾驶员长按驻车制动开关，电子驻车制动系统控制中心通过总线与控制单元互相通信，根据车辆状况控制单元启动压力制动器，在制动器中建立压力，执行车辆的制动^[1]。
4. 自动驻车功能（AUTO HOLD）。

3 车辆坡道起步分析与计算

3.1 坡道起步受力分析

汽车在坡道上起步时，默认路面附着情况良好，且忽略车轮滑转和路面不平变形时，其受力主要为：坡道下滑力 F_i 、滚动阻力、路面法向支撑力 F_n 、加速阻力 F_j 、制动力 F_{xb} 和驱动力 F_t 。其中滚动阻力为汽车正式启动时才出现，且相对于坡道阻力即下滑力，滚动阻力数值较小，所以在下文的运动分析中，我们将忽略滚动阻力；加速阻力为驾驶员松开制动踏板时产生^[6]，本文中的控制策略目标结果，当驱动力等于起步阻力时控制车辆自动松开制动踏板，而刚刚起步时汽车受到的加速阻力相对较小，所以此时加速阻力也可以忽略不计。受力情况如图所示：

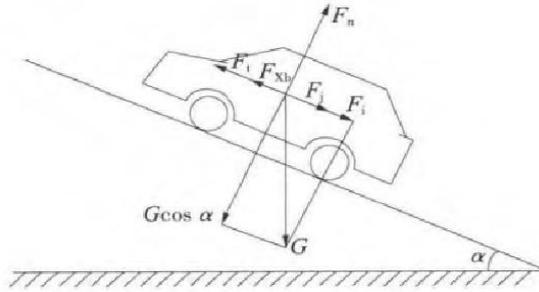


Figure 2. force condition for the car on a ramp

图2 汽车在坡道上的受力情况

3.2 坡道起步过程分析

汽车坡道起步的关键为发动机、离合器与制动器的精确配合，只有当发动机输出力矩足够；离合器主从动盘结合恰当、传递力矩足够；且轮边输出的动力大于等于外界阻力时，才能保证汽车的平稳起步。具体起步过程分析如图3所示。

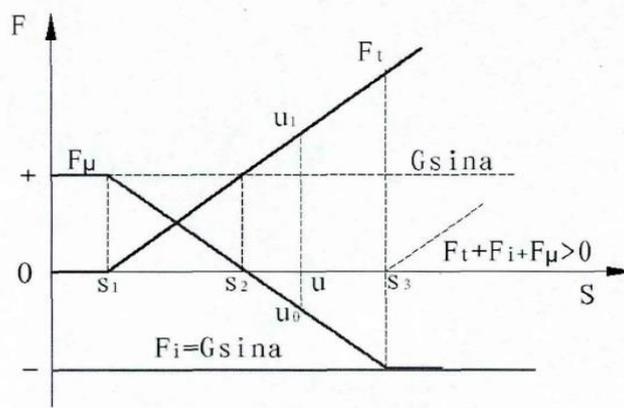


Figure 3. the force condition in the process of ramp start

图3 坡道起步受力过程示意图

图3-3显示了汽车在坡道起步时受力的变化过程，横坐标 S 表示离合器行程，即离合器主从动盘的相对位移量；纵坐标 F 为车辆在坡道上起步时所受的各种外力，且沿汽车前进方向上的取为正向力。

阶段一，原点 0 至 S_1 。此阶段为离合器从主从动盘完全分离^[7]，至开始接合的阶段，直到 S_1 点，离合器的主从动盘开始接合^[8]。汽车的总体受力情况为：

$$F_{\mu} + F_i + F_t = 0 \quad (3-1)$$

阶段二， S_1 至 S_2 。在此阶段中，从 S_1 点开始，离合器主从动盘开始接合，从离合器传递至驱动轮中的驱动力矩逐渐增大^[9]，即车辆的驱动力逐渐提升。直到 S_2 点，车辆的驱动力 F_t 等于坡道阻力 F_i ，即：

$$F_t = G \sin \alpha \quad (3-2)$$

阶段三， S_2 至 S_3 。此阶段中，离合器的主从动盘进一步接合，经由离合器传递至车轮的驱动力 F_t 也进一步增大。当横坐标到达 U 点时，汽车的驱动力将大于车辆坡道起步的阻力极限值，此时起步阻力包括坡道阻力 F_i 和滚动阻力 F_f ，所以^[10]：

$$F_t > G \sin \alpha + Gf \cos \alpha \quad (3-3)$$

如图所示，在这个阶段中，制动器制动力依然存在，但是由于车辆的驱动力已经大于起步阻力，所以此时地面制动力将反向，从沿坡道向上的动力变为沿坡道向下的阻力，即地面制动力将阻碍汽车的起步而不是防止其下滑。但总体上驱动力还是小于制动力和坡道阻力的总和，即：

$$F_t > F_\mu + F_i \quad (3-4)$$

阶段四，S3 至 S。此阶段中，离合器主从动盘继续接合，则离合器传递的动力也继续增大，直到驱动力大于路面最大阻力和起步阻力的总和，即：

$$F_t > F_\mu + F_i \quad (3-5)$$

3.3 制定坡道起步控制策略

由上述分析可知，传统的手刹汽车在坡道起步时，对驾驶员有较为苛刻的要求，不仅需要驾驶员熟练的在离合器踏板、油门踏板和制动踏板之间切换，而且还需要准确的把握车辆的运动和受力情况并精准快速的操纵车辆起步。这样的操作难度和经验掌握，对于一般的驾车人员尚且难以掌握，对于新手驾驶员更是尤其困难，稍微的疏忽就可能造成坡道后溜或猛冲的危险状况的发生^[13]。

而对于安装了 EPB 电子驻车制动系统的车辆来说，EPB 将结合坡道情况和发动机、离合器等内部状态，在无需驾驶员干预驻车制动系统的情况下，智能控制实现车辆的平稳起步。

起步时机是坡道起步控制的重点和难点所在。传统汽车对于离合器与油门的控制，实际上就是对于离合器所能传递力矩和发动机输出驱动力的控制；驾驶员对于车身抖动和手刹制动的释放时机的掌控，实际上即为坡道阻力（包括坡道角度）和驱动力的估计；而手刹的拉起和释放与离合器半联动状态的控制，实际上为起步阻力与驱动力平衡时机的把握^[15]。综上所述，总结 EPB 坡道起步的控制策略并附上控制策略步骤结构图如下：

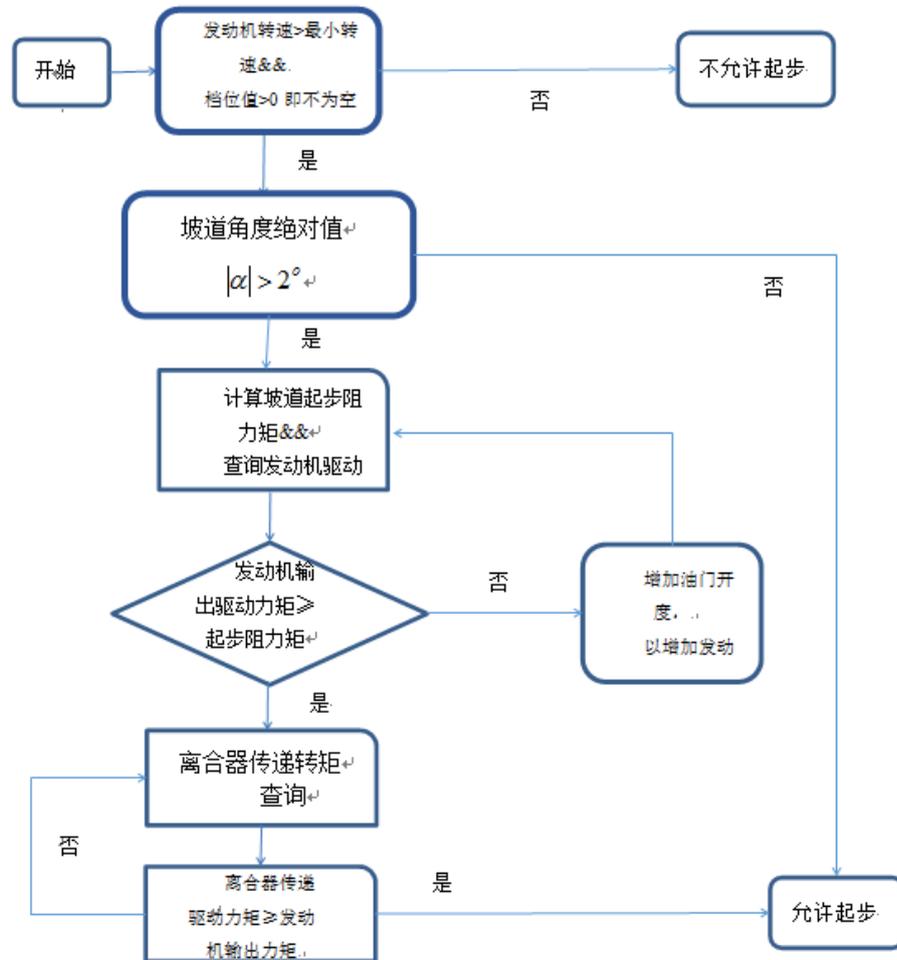


Figure 4. EPB ramp start control strategy step
图 4 EPB 坡道起步控制策略步骤结构图

4.控制策略的模型建立与试验验证

4.1 起步阻力矩的数学模型

已知坡道阻力矩的计算公式为:

$$T_f = \frac{(G \sin \alpha + Gf \cos \alpha) \cdot R}{K_k \cdot i_s \cdot i_g} \quad (1)$$

式(1)中除了坡道角度值需要坡道角度传感器测量得知以外,其余量都为已知。

由上式可知,模型需要一个持续的坡道角度值输入,才能产生连续变化的坡道阻力矩输出量。所以本模型中将采用一个 sin 函数作为坡道角度值的信号输入。查阅有关资料知,路面的坡道角度值一般不大于 30°,因此设定该 sin 函数的因变量——角度值输入在 0 到 30 度之间。

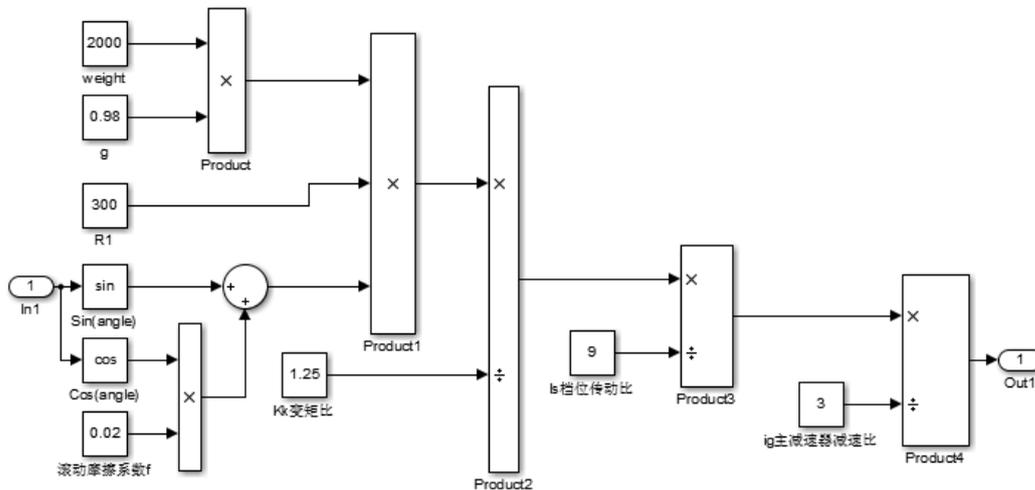


Figure5.subsystem for the ramp resistance moment calculation

图 5 坡道阻力矩计算子系统

4.2 离合器传递转矩模型

离合器部分借鉴了相关文献中的结果,将离合器的运动划分成 3 个阶段,即完全分离阶段、半接合阶段与完全接合阶段^[12,14]。最后由相关结果设计仿真系统如下:

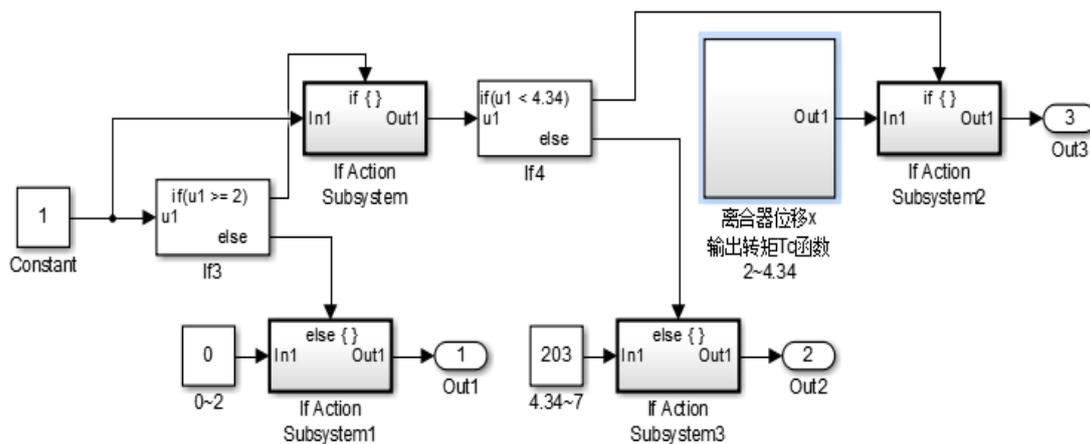


Figure 6.simulation model for the clutch system

图 6 离合器总体模块仿真模型

4.3 发动机输出转矩模型

发动机是一个相当复杂的组合体，目前暂时无法建立一个完备的模型整体可以完整的表现出发动机的特性。所以目前通常使用稳态工作状态下的发动机试验数据，制作出发动机稳态输出特性曲线来作为发动机输出特性的仿真模型。

本文将使用 simulink 中的二维查表法模块实现发动机输出特性曲线模型的建立。通过输入油门开度值和发动机转速值，并输入对应位置的发动机稳态输出转矩，在 2-D 查表法模块中形成二维输入对应一维输出的查表模块，即发动机输出转矩模块。具体发动机稳态输出拟合数据成表如下：

Table 1.table of engine output parameters in the steady state
表 1 发动机稳态输出参数表

n β	12%	22%	29%	38%	47%	57%	67%	80%	100%
1200	50.0	76.7	93.6	99.8	104.4	108.9	108.9	108.9	118.7
1600	28.4	57.1	84.9	102.9	111.6	120.4	125.6	125.6	131.6
2000		38.7	67.6	94.4	108.9	122.4	129.3	131.1	142.4
2400		26.7	51.1	81.1	100.4	120.0	129.1	131.1	142.4
2800			40.0	70.0	91.1	115.8	131.3	138.7	148.9
3200			28.4	57.3	82.7	110.0	131.1	137.8	150.7
3600			20.2	47.8	72.7	101.1	128.9	135.6	145.6
4000				37.3	61.1	92.9	124.4	133.1	137.8
4400				35.1	58.9	91.6	124.4	132.2	140.0
4800				23.3	47.8	79.6	118.9	128.9	140.4
5200					40.4	69.6	108.4	121.3	130.0

注： n 为发动机转速， β 为油门开度，输出值为发动机转矩值(N·m)。

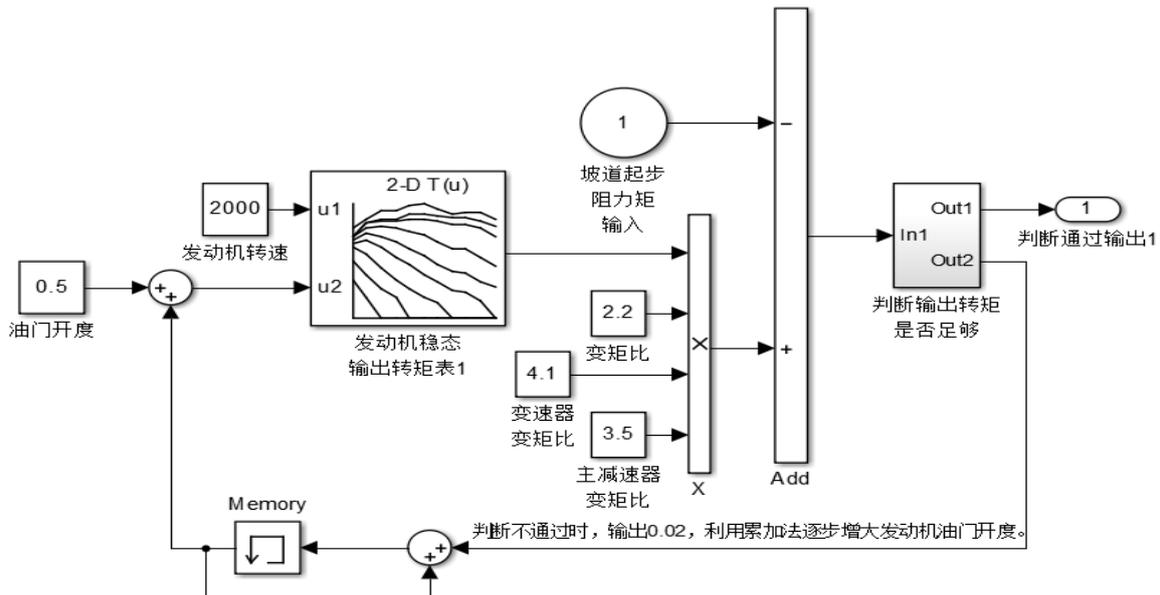


Figure 7.simulation model for the engine outputs and auto-control throttle

图 7 发动机输出驱动转矩总成及油门自动控制模块

如图 7 所示，运用 memory 和 sum 模块完成累加操作。Memory 模块为记忆模块，功能为记忆状态参量的上一个状态值并输出；sum 模块的作用为将输入的参数求和。所以本次设计将 memory 模块和 sum 模块结合起来，通过

memory 的反向输入，完成了参数的累加操作。正如控制策略所说，当判定发动机输出驱动力矩值小于起步阻力矩时，即驱动力不足以驱动车辆平稳起步时，由 EPB 系统自动控制适度的阶跃增大油门开度，以达到逐步在增大发动机驱动转矩的目的。该步骤将在判断通过，即驱动力足以克服阻力矩时失效。

4.4 坡道起步控制策略仿真模型

集合上述各子系统模块或功能模块与各输入与逻辑控制模块，即组成了控制策略的总体模型。其具体模型如下图所示：

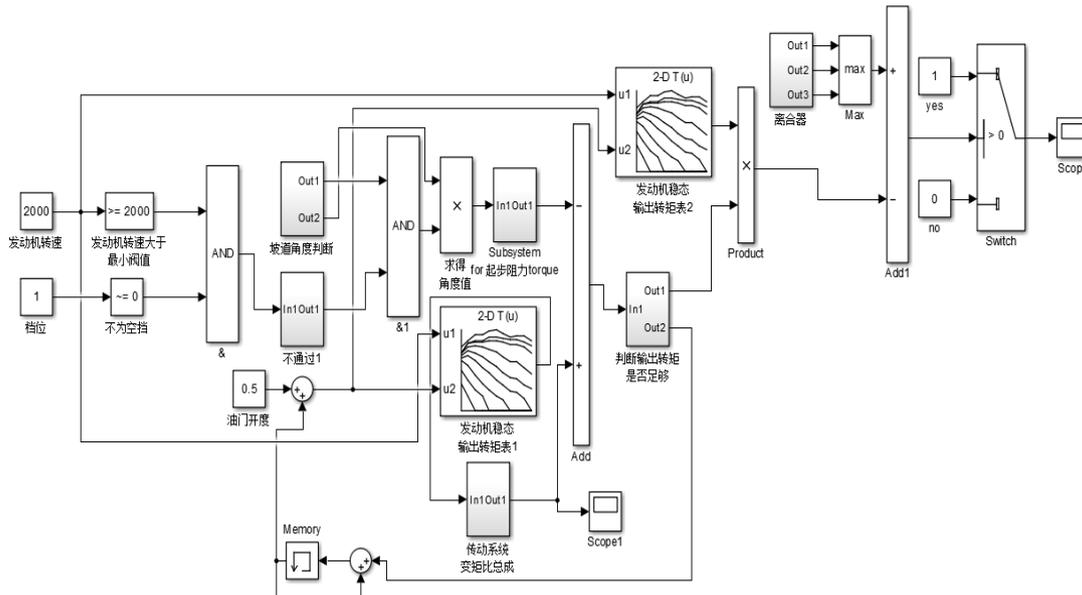


Figure8. simulation model for the EPB ramp-start control system

图 8 总仿真模型图

5 试验结果分析

5.1 坡道起步阻力矩对起步的影响

由前文的运动学分析可知，随着坡道角度绝对值的增大，坡道起步时的起步阻力矩也随之增大，则对应的驱动力需求也越来越大。在观察坡道角度值的影响时，采用 sin 信号作为坡道角度值的函数信号输入，且将其幅值设置为 30 度(即最大坡道角度值)。

按照设计的思路，在其他参数不变且逻辑上通过的前提下，当坡道角度为正且数值较大时，因为对应的坡道起步阻力矩较大，已有的驱动力矩不足以驱动车辆起步，所以输出为 0，判定不通过；当坡道角度为正且数值偏小时，现有的驱动力矩就可以克服起步阻力矩，所以输出为 1，判定通过；当坡道角度值为负且不论数值时，起步阻力矩方向与驱动力矩相同，则起步无障碍只需注意制动的缓慢释放，所以输出为 1，判定通过。

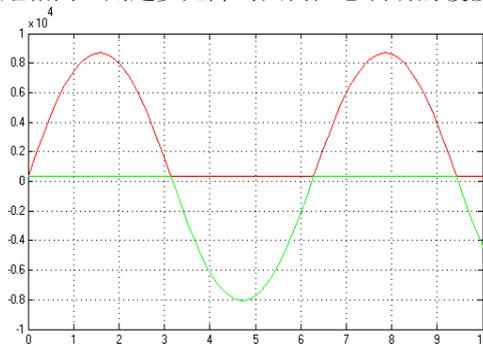


Figure 9.output of ramp start resistance moment

图 9 坡道起步阻力矩函数输出

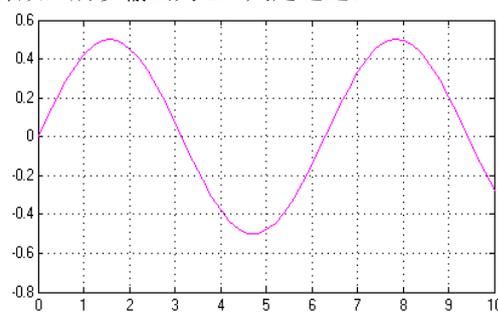


Figure 10.input function for the angle value of ramp

图 10 坡道角度值输入(x:角度值; y:时间 s)

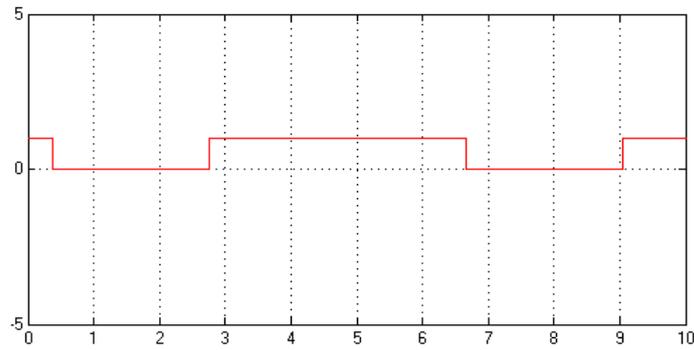


Figure 11.output function for start permissions(0/1)

图 11 判断通过与否输出量

坡道角度值输入曲线如图 10，采用 \sin 函数输入，并设置幅值为最大坡道角度值。随着输入角度值的变化，坡道起步阻力矩的变化情况如图 9，总体上阻力矩随着坡道角度值绝对值的变化做正相关变化，符合实际情况和计算要求。

从图 11 展示的判断输出值的变化曲线中，可以明显的看出判定通过，即输出值为 1 的时长远大于不通过时输出为 0 的时长。因为当坡道角度值为正且数值较小与坡道角度值为负的情况下，驱动力矩都是可以克服起步阻力矩完成车辆起步的，所以输出都为 1。而上述的两种情况出现时长是远大于坡道角度值为正且数值较大的情况，所以对应的输出为 1 的时长应该远大于输出为 0 的时长。则图示的输出量符合控制策略的设定逻辑。

5.2 发动机输出转矩拟合曲线

发动机输出转矩 T 为转速 n 和油门开度 β 的函数^[1]，即 $T = f(n, \beta)$ 。试验中，在不同固定的油门开度状态下，改变发动机转速，得到对应的输出转矩。整理数据得到发动机稳态输出特性数据。在 matlab 的 spline 插值（xyz 三次插值）函数拟合功能下，拟合出了关于发动机转速和油门开度的发动机稳态输出曲线。具体拟合曲线如下：

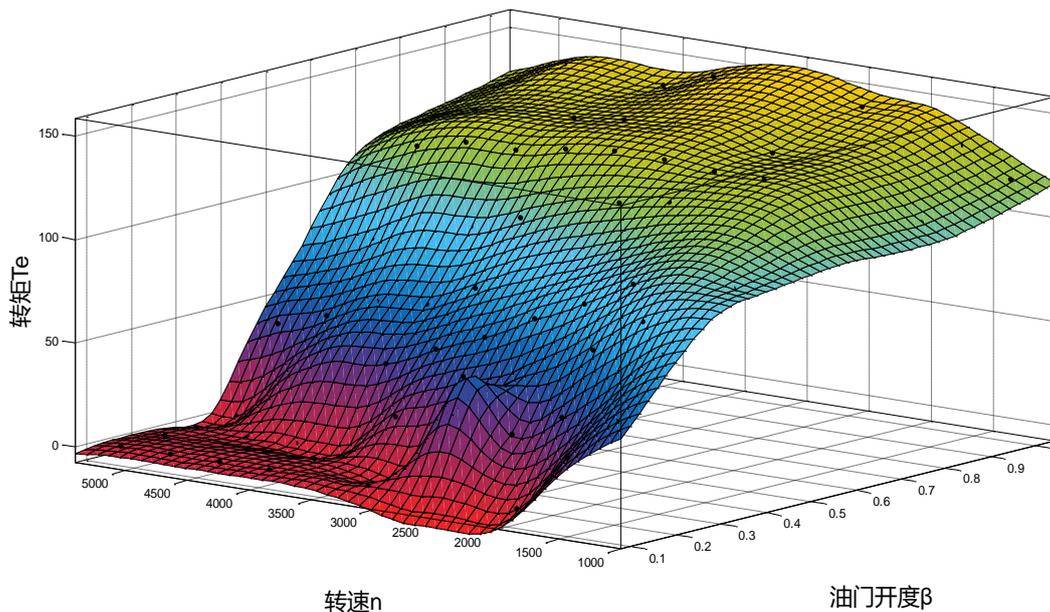


Figure 12.fitting curve of engine output in the steady state

图 12 发动机稳态输出拟合曲线

5.3 离合器传递转矩曲线

由上述离合器传递转矩模型，辅以线性输入的主从动盘相对位移量 e ，得到了离合器模型随着位移量(这里用时间 t 表示)变化的传递转矩的变化曲线如下：

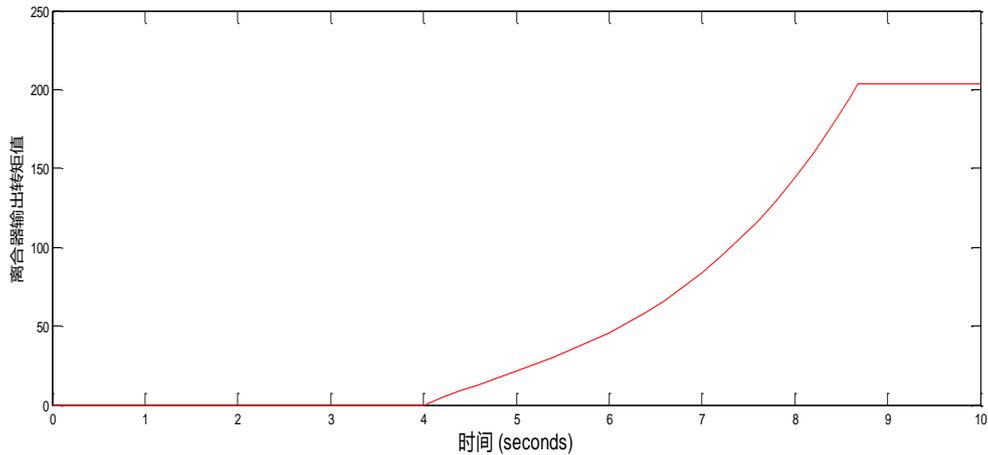


Figure 13. Curve: torque output of the clutch

图 13 离合器输出转矩曲线图

图 5-8 中离合器转矩值的单位为 $N \cdot m$ ；时间单位为 s 。

5.4 油门自动调节仿真

根据设计要求，当发动机输出驱动力矩不足以克服起步阻力矩时，按照控制策略的设计，系统将自动调节油门开度，以增大发动机输出力矩。其具体的调节仿真如下：

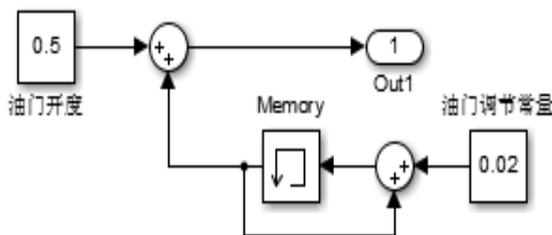


Figure 14. model for the auto-control throttle

图 14 实现累加的油门调节模块

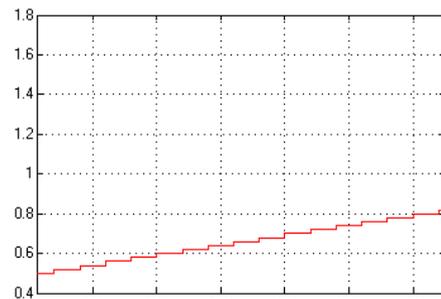


Figure 15. Curve: throttle adding process

图 15 油门增大步幅示意图

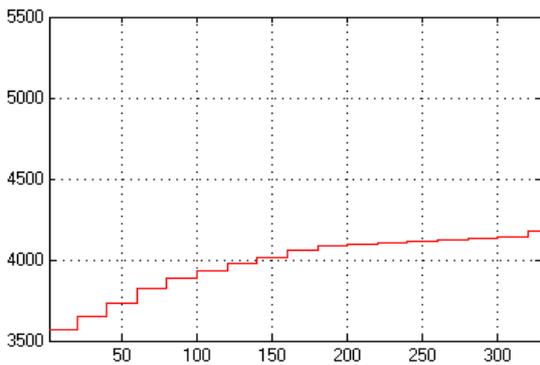


Figure 15. Curve: rising of the engine torque

图 15 发动机驱动力矩增长曲线

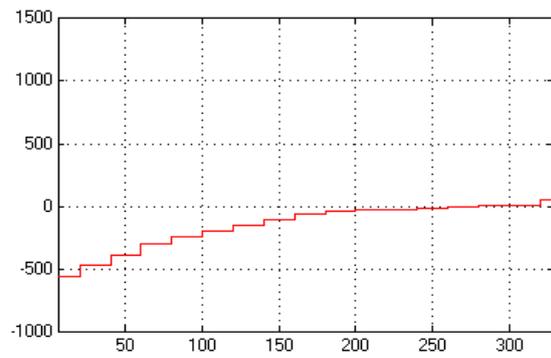


Figure 16. Curve: the torque difference between engine and ramp-start

图 16 起步阻力矩与发动机驱动力矩差值

如图 14; 15; 16 所示, 当发动机转矩小于起步阻力矩, 即发动机提供的动力不足以使车辆克服起步阻力时, 系统将激动调节, 以增大油门开度的方式, 增大发动机的输出动力矩。而随着油门的增大, 发动机输出转矩也随之增大, 并在起步阻力矩足够时停止该操作。试验结果精确的实现了控制策略的要求。

6 总结与展望

总结本文完成的研究任务如下:

首先完成了车辆的坡道起步时的受力和运动状态分析, 划分了起步时的各个运动阶段及其受力情况; 完成上述分析和计算后, 结合起步运动过程和对应受力分析的结果, 制定具体的控制策略, 策略保证车辆在保证驱动力足够的条件下安全起步; 接下来在 *simulink* 环境下根据既定的控制策略分模块建立仿真模型; 最后分步骤检验模型是否符合控制策略的设定, 验证模型与策略是否匹配, 并由试验结果分析出 *EPB* 控制的优势所在。

本文完成了电子驻车制动系统前期开发工作的一部分, *EPB* 控制策略还包括辅助行车制动控制策略、紧急制动控制策略和智能驻车控制策略。在完成策略的建立和仿真校验后, 还有实物建立和车载实验等步骤有待进一步的研究。

参考文献 (References)

- [1] 徐晓芬. 车辆电子驻车制动系统辅助坡道起步的研究[D]. 武汉, 武汉理工大学, 2011.
- [2] 惠艳翠. 汽车电子驻车制动(*EPB*)控制系统的研制[D]. 四川, 西华大学, 2011.
- [3] 王洪亮, 苑庆泽, 钟焕祥等. 基于 *EPB* 的汽车坡道起步自动控制技术[J]. 北京理工大学学报, 2014(4):34.4.
- [4] 毛俊. 汽车电子主动系统的研究初探[J]. 消费电子, 2015.
- [5] 苑庆泽. 电子驻车制动系统(*EPB*)直流电机匹配研究[J]. 汽车零部件, 2013.
- [6] 解振羽. 拖拉机汽车制动系统的制动过程[J]. 农机使用与维修, 2014.
- [7] 马慧龙. *AMT* 离合器起步接合过程控制研究[J]. 上海工程技术大学学报, 2013.
- [8] 陈黎. 汽车干式双离合变速器转矩传递分析与建模[J]. 机械与电子, 2013.
- [9] 任永强. *DCT* 离合器分离结合时间仿真分析[J]. 结合机床与自动化加工技术, 2012.
- [10] 赵胜一. 浅谈汽车电控机械制动系统(*EPB*)[J]. 黑龙江交通科技, 2016.
- [11] 倪向东. 拖拉机液力机械无级变速器速比匹配设计与实验[J]. 农业机械学报, 2016.
- [12] 葛安林, 雷雨龙, 高义峰, 等. 电控机械式自动变速器车辆坡道上起步控制研究[J]. 汽车工程, 1998 年第 3 期.
- [13] 刘天祥. 坡道起步应把握的几个关键点[J]. 汽车杂志, 2002.
- [14] 雷雨龙, 葛安林, 李永军. 离合器起步过程的控制策略[J]. 汽车工程, 2000, 22(4), 266-269.
- [15] Yi-qiang Peng, Wei Li. Research on Fuzzy Control Strategy for Automotive *EPB* System with *AMESim/Simulink* Co-simulation[D]. Xihua University, 2009.