基于 EPB 与电机控制的电动汽车坡道辅助系统

王 坚，时武林，陈显鑫，周炳松
（柳州五菱新能源汽车有限公司，广西 柳州 545007）

摘 要：提出一种基于电子驻车制动系统与电机转矩控制的电动汽车坡道辅助系统，当检测到车辆有溜坡趋势时，通过预加载转矩、比例积分调节，使车辆快速、平稳地停在坡道上，确保车辆的安全性。

关键词：电动汽车；电子驻车制动系统；坡道辅助；比例积分调节
中图分类号：U461.3 **文献标志码**：A **文章编号**：1006-3331(2024)04-0028-04

Ramp Assist System for Electric Vehicles Based on EPB and Motor Control

WANG Jian, SHI Wulin, CHEN Xianxin, ZHOU Bingsong
(Liuzhou Wuling New Energy Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545007, China)

Abstract: This paper proposes a ramp assist system for electric vehicles based on electronic parking brake and motor torque control. When a vehicle detects to tend to slide, the system can make it stop quickly and smoothly on the ramp through preloading torque and proportional integral regulation to ensure vehicle safety.

Key words: electric vehicle; EPB; ramp assist; proportional integral regulation

目前，中低配电动汽车往往因成本原因未配置坡道辅助功能，起步时可能会因踩电门过浅，车辆受重力作用而溜坡，严重影响驾驶安全和用户体验[1]。单速比电动汽车因其整车质量大以及由电机加单级减速器组成的驱动系统阻力小等特点导致溜坡现象尤为严重[2]。故应通过电动汽车的驱动电机堵转实现坡道辅助功能，但电机在堵转状态下电流非常大，长时间堵转可能引发驱动电动机过热烧毁失效[3]、出现退出坡道辅助功能等现象。因此，有必要对此进行专门研究[4]。

1 车辆动力学模型分析

由汽车理论可知[5]，图1状态下的汽车行驶总阻力为：

$$F_t = F_i + F_f + F_j + F_w \tag{1}$$

式中：F_t 为驱动力；F_i 为坡度阻力；F_f 为滚动阻力；F_j 为加速阻力；F_w 为空气阻力。

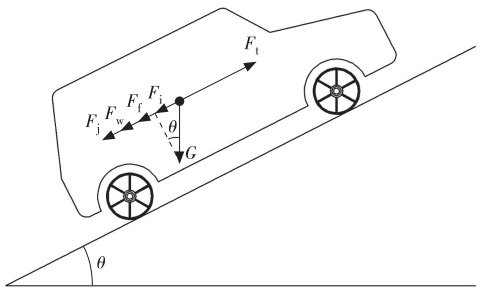

图1 车辆坡道受力分析图

由于车辆起步时车速很低，加速阻力和空气阻力可忽略不计[6]，可认为车辆仅受坡度阻力和滚动阻力的影响。坡度阻力和滚动阻力分别为：

$$F_i = mg\sin\theta, F_f = mgf\cos\theta \tag{2}$$

式中：m 为车辆质量；g 为重力加速度；θ 为坡道与地面夹角；f 为滚动阻力系数。

电机产生的转矩 T_q，经过传动系统传到驱动轮产生的驱动力 F_t 为：

收稿日期：2024-02-17。

第一作者：王 坚（1985—），男，工程师；主要从事新能源汽车高压系统开发及电机控制器标定工作。E-mail：wangjian02@wuling.com.cn。

$$F_t = T_q i_g \eta_T / r \tag{3}$$

式中:i_g 为减速器传动比;η_T 为传动系统效率;r 为车轮半径。

由此,可得到汽车驻坡动力学平衡方程为:

$$T_q i_g \eta_T / r = mg\sin\theta + mgf\cos\theta \tag{4}$$

其中,取 $i_g = 8.513$;$\eta_T = 94\%$;$r = 0.3$ m;$m = 1\,600$ kg;$g = 9.8$ m/s^2;使用低滚阻轮胎,f 取沥青路面的滚动阻力系数,为 0.007 5;坡道取 15% 的坡度,即 $\theta = 8.5°$。将这些数值代入式(4)可得 $T_q = 85.9$ N·m,与测得的实际驻坡稳定转矩 84 N·m 接近,表明建立的动力学模型正确可用。

2　坡道辅助系统设计

2.1　辅助系统架构

坡道辅助系统由决策机构(包括电机控制器、整车控制器)、执行机构(包括电机、减速器、EPB)等[7]组成,如图 2 所示。整车控制器采集挡位信号、加速踏板信号、制动踏板信号;电机控制器接收整车控制器的驻坡使能信号、EPB 纵向加速度信号,并采集电机转速信号,当检测到车辆有后溜趋势(D 挡电机转速为负,R 挡电机转速为正)时,则执行相应的控制策略,使车辆稳定在坡道上。

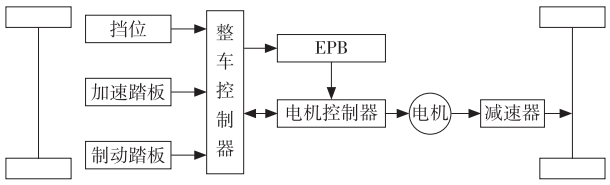

图 2　坡道辅助系统架构图

坡道辅助功能最基础的原理是对驱动电机进行目标转速(0 r/min)的比例积分(PI)调节,即根据给定值与实际输出值的差异构成控制偏差,将控制偏差的比例和积分通过线性组合构成控制量,对被控对象进行 PI 调节控制。由于 PI 调节需要一定的调节时间,所以在车辆出现溜坡趋势时根据坡度大小预先加载适当的驱动转矩是防止车辆溜坡的有效方法。

2.2　预加载驱动转矩

如上所述,引入预加载驱动转矩可降低 PI 调节的时间,从而更快、更平稳地把车停在坡道上。

2.2.1　坡道角度计算

要确定预加载驱动转矩的大小,系统首先要进行坡道角度的计算。目前车辆识别坡道的方式主要有 2 种:一种是基于汽车纵向动力学识别方式,另一种是基于坡度传感器的直接测量[8]。由于车辆配置了 EPB,可测量纵向加速度信号,因此本文采用第一种方法,即由电机控制器根据 EPB 向 CAN 总线发出的纵向加速度信号 a_{sen} 计算坡道角度 θ[9]。

$$\theta = \arcsin[(a_{sen} - a)/g] \tag{5}$$

式中:a_{sen} 为 EPB 检测到的纵向加速度信号;a 为实际的整车纵向加速度信号。

由于车辆驻坡时整车纵向加速度 a 为 0,因此式(5)可简化为:

$$\theta = \arcsin(a_{sen}/g) \tag{6}$$

2.2.2　预加载转矩取值

预加载转矩的取值有 2 种常用的方法:一种是根据式(4)计算得到不同坡度下的理论驻坡转矩,另一种是通过标定得到不同坡度下的驻坡稳定转矩。再将上述获得的转矩 T_θ 乘以一定的系数 k_θ,即:

$$T_{pre} = k_\theta T_\theta \tag{7}$$

式中:T_{pre} 为预加载转矩;T_θ 为计算得到的理论驻坡转矩或通过标定得到的驻坡稳定转矩;k_θ 为预加载比例系数,为消除后桥冲击带给驾乘人员的不适感,需要降低预加载转矩(即 k_θ 应<1),不同路面的预加载比例系数按 0.7 统一取值,此时转矩不足,需要进行 PI 调节。

2.3　EPB 控制

本系统加入了 EPB 控制功能。当车辆稳定在坡道上时,若坡度过大或者车辆过重,电机大电流堵转状态会导致电机过热,使电机性能下降。因此,当坡道辅助功能开启时间达到 5 s,驾驶员仍无操控车辆起步的行为时,整车控制器会通过 CAN 总线发送报文控制 EPB 拉起。

2.4　坡道辅助控制设计

坡道辅助控制原理框图如图 3 所示。将目标转速(0 r/min)与电机实时转速的差值作为 PI 调节的输入[10],对电机输出转矩进行闭环控制,使电机输出转矩=预加载转矩+调节转矩。

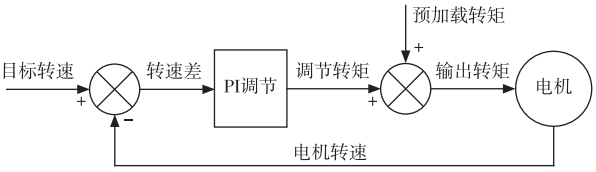

图 3 坡道辅助控制原理框图

当车辆出现后溜趋势时,电机控制器根据不同坡度计算预加载转矩 T_{pre} 并输出,然后通过 PI 调节快速、平稳地把车停稳。详细流程如下:

1) 电机控制器接收整车控制器的挡位信号、加速踏板信号、制动踏板信号、坡道辅助使能信号。

2) 当车辆停稳后,EPB 采集纵向加速度信号 a_{sen} 并发送到 CAN 总线上,电机控制器读取总线上的 a_{sen} 信号计算坡度。

3) 当电机控制器检测到车辆有后溜趋势(D 挡时电机转速<-15 r/min;R 挡时电机转速>15 r/min)时,根据坡度查表确定比例系数 K_p、积分系数 K_i、预加载转矩 T_{pre}。

4) 电机控制器控制电机以 1 N·m/ms 的斜率输出转矩 T,直到转矩大小等于预加载转矩 T_{pre}。

5) 维持预加载转矩输出一定时间,一般选取 30~40 ms。

6) 进行电机目标转速为 0 r/min 的 PI 调节,即根据实时转速变化对防溜转矩进行调节。

7) 当坡道辅助功能开启时间达到 5 s,整车控制器通过 CAN 总线发送报文控制 EPB 拉起。

8) 在第 4)到第 7)步中,如果驾驶员踩下加速踏板,需求转矩大于防溜坡转矩(+5 N·m),则退出防溜坡模式,驱动系统立即根据驾驶员需求输出转矩。

9) 当 EPB 拉起后,电机控制器退出防溜坡模式,电机转矩在 300 ms 内降为 0。

3 实车验证

为验证系统效果,选取总质量为 2 t 的多用途乘用车作为试验车辆,在坡度为 20%的坡道上进行满载的坡道辅助系统试验。下面分 3 种情况对坡道辅助系统进行测试:①电机目标转速为 0 r/min 的纯 PI 调节;②在纯 PI 调节基础上增加预加载转矩;③长时间驻坡后拉起 EPB。

3.1 纯 PI 调节

车在坡道停稳后松开行车制动,当车辆后溜转速达到-15 r/min 时,系统直接进行 0 转速 PI 调节。若 K_p、K_i 参数过小,则可能导致坡道起步失效从而后溜;若 K_p、K_i 参数过大,则会引起车辆剧烈冲击,降低驾驶感受。经标定,选取合适的 K_p、K_i 参数进行纯 PI 调节测试,结果如图 4 所示。经过 1.6 s 的 PI 调节,车辆稳定在坡道上,此时后溜距离约为 18 cm,后溜最大转速约为-80 r/min。

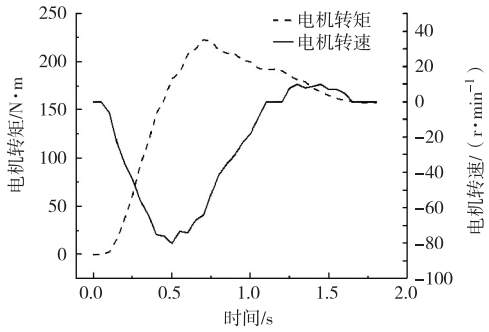

图 4 纯 PI 调节的坡道辅助控制

3.2 有预加载转矩的 PI 调节

在前述纯 PI 调节基础上加入预加载转矩 T_{pre} = 57 N·m。检测到车辆后溜时,先输出预加载转矩并维持 40 ms,再进行 0 转速 PI 调节。为减小调节初期的冲击,需要减小预加载转矩的大小和上升斜率,一般将电机转速控制在 40 r/min 以下(此时转速带来的冲击可忽略)。如图 5 所示,车辆经过 1.2 s 的 PI 调节,车辆稳定在坡道上,此时后溜距离约为 11 cm,后溜最大转速约为-40 r/min。

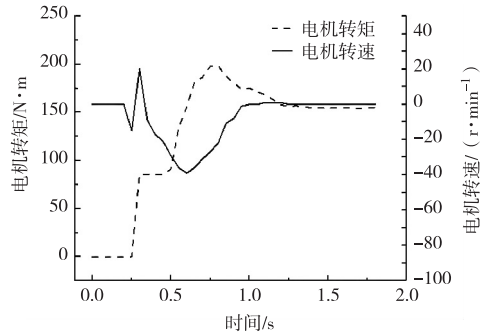

图 5 有预加载转矩的 PI 调节坡道辅助控制

3.3　预加载转矩并增加 EPB 控制的 PI 调节

电机大电流堵转发热严重，长时间的热量积累会导致电机性能下降，不能输出足够的驻坡转矩，导致车辆后溜，从而酿成事故。因此需加入 EPB 控制功能，如图 6 所示。在坡道起步辅助控制功能执行 5 s 后，若驾驶员仍未踩下加速踏板，则认为驾驶员无起步意图，系统自动拉起 EPB 进行驻车制动，第 6.5 s 时 EPB 完全拉紧。测试结果如图 6 所示，电机控制器退出坡道起步功能，电机转矩逐渐降到 0 N·m。

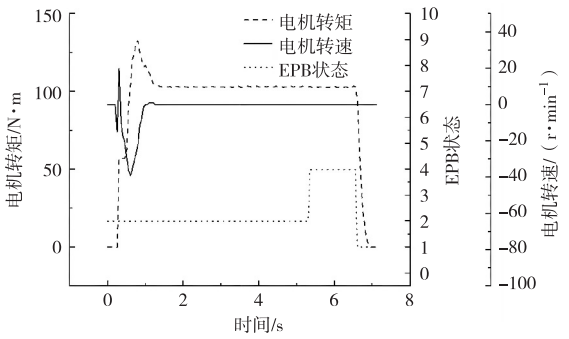

图 6　预加载转矩并增加 EPB 控制的 PI 调节坡道辅助控制

4　结　论

本文以某多用途乘用车为例，通过 PI 调节、预加载转矩、EPB 控制等措施，可有效、平稳地实现坡道起步，可节省坡道辅助专用器件的成本，并得到以下结论：

1）本系统电机控制器通过自主检测转速判断是否溜坡并快速输出防溜坡转矩，可有效地降低 CAN 总线数据交互带来的滞后的影响。

2）本系统具备预加载转矩的 PI 调节方法，能有效减少防溜坡调节时间、缩短溜坡距离。

3）坡道起步超时后，本系统自动拉起 EPB，可有效降低电机堵转过热引起的电机性能下降和溜坡的风险。

参考文献：

[1] 徐小兵，鲁振辉，窦本岗，等. 纯电动客车坡道起步辅助电机扭矩控制算法研究[J]. 客车技术与研究，2020，42(6)：8-10.

[2] 张庆，熊会元. 单速比电动汽车坡道起步控制研究[J]. 机械传动，2016，40(9)：132-136.

[3] 何鹏林，黄炘，蔡志涛，等. 电动汽车 PMSM 堵转特性及试验研究[J]. 电气技术，2018，19(3)：76-79.

[4] 朱德祥，孟钊，韩记新. 一种纯电动汽车坡道辅助起步系统研究[J]. 汽车电器，2021(4)：21-22.

[5] 余志生. 汽车理论：第 6 版[M]. 北京：机械工业出版社，2018：7-19.

[6] 沙文瀚，刘琳，任彦君，等. 基于转矩控制的上坡辅助电控系统[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2021，51(5)：905-913.

[7] 欧阳智，杨杰君，周艳辉，等. 纯电动汽车坡道起步辅助控制策略研究[J]. 客车技术与研究，2022，44(4)：15-17.

[8] 吴兵显，周萍. 基于纯电动汽车的坡道起步控制策略研究[J]. 农业装备与车辆工程，2019，57(5)：37-40.

[9] 金辉，李磊，李斌虎，等. 基于加速度区间判断的坡道识别方法[J]. 中国公路学报，2010，23(1)：122-126.

[10] 刘景林，公超，韩泽秀，等. 永磁同步电机闭环控制系统数字 PI 参数整定[J]. 电机与控制学报，2018，22(4)：26-32.