

AEB系统控制算法（上）

安全距离模型主要有Mazda模型、Honda模型、Berkeley模型、SeungwukMoon 模型，本文分析和对比了五种避撞算法模型。

AEB 仿真系统控制算法包含**信号处理**、**距离模型**、**执行判断**三部分。整个 AEB 仿真系统控制算法的功能是接收并处理传感器的信号输入，判断驾驶员操作状态及路 道路环境安全，并根据安全距离模型做出相应的警告或者自动制动的动作。

AEB 系统的信号处理

由于在 Simulink 仿真中，雷达的扫描频率有限，数据会出现短暂的不连续跳跃 信号。如果出现一个错误信号致使全力制动标旗被激发，由此产生的错误制动会严重 干扰驾驶员。因此在控制系统中检测信号的连续多个值，并且只有当信号连续的多个 值，同时满足触发自动制动的条件时，才触发自动制动，从而提高算法的稳定性，过 滤那些离散突变的信号。具体 Simulink 流程图如下图 4.1 所示：Memory 模块存储上 一时刻的状态值，AND 模块为逻辑“与”，因此 3 个 memory 模块表示 3 个的状态值 都为“真”时，输出“真”；否则输出“假”。

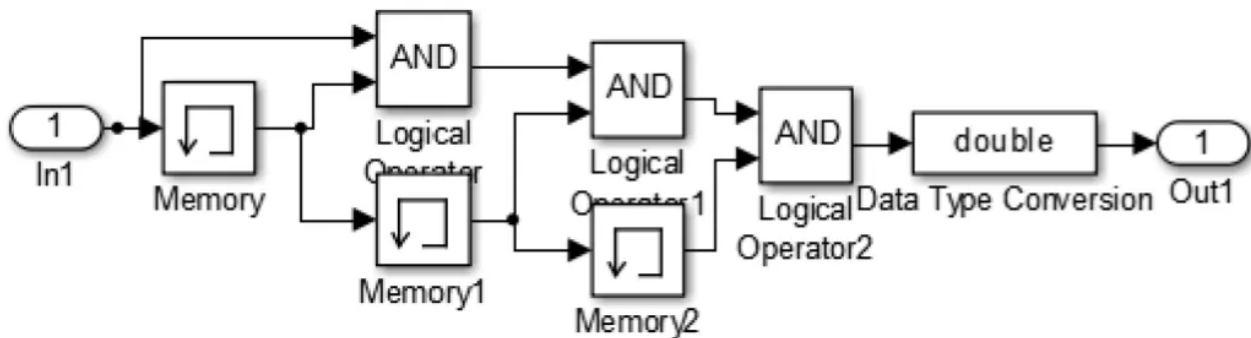


图 4.1 过滤离散突变信号的 Simulink 模型

TIS 信号输出结果是本检测物与雷达之间的距离（Range）与水平方位角（ θ ）极 坐标系转换为原点中心在雷达位置的笛卡尔直角坐标系。

在式 4.1、4.2 中， x_p 是目标在相对于本车在原点中心在雷达位置的 X 坐标位置， y_p 表示相应的 X 坐标位置， r 表示极坐标下的距离。在图 5.2 中 θ (rad)、 $range$ (m) 指距离和水平方位角，Saturation 模块表示对输出信号进行最大最小值限制。

$$x_p = \cos\theta \cdot r \quad \text{式 (4-1)}$$

$$y_p = \sin\theta \cdot r \quad \text{式 (4-2)}$$

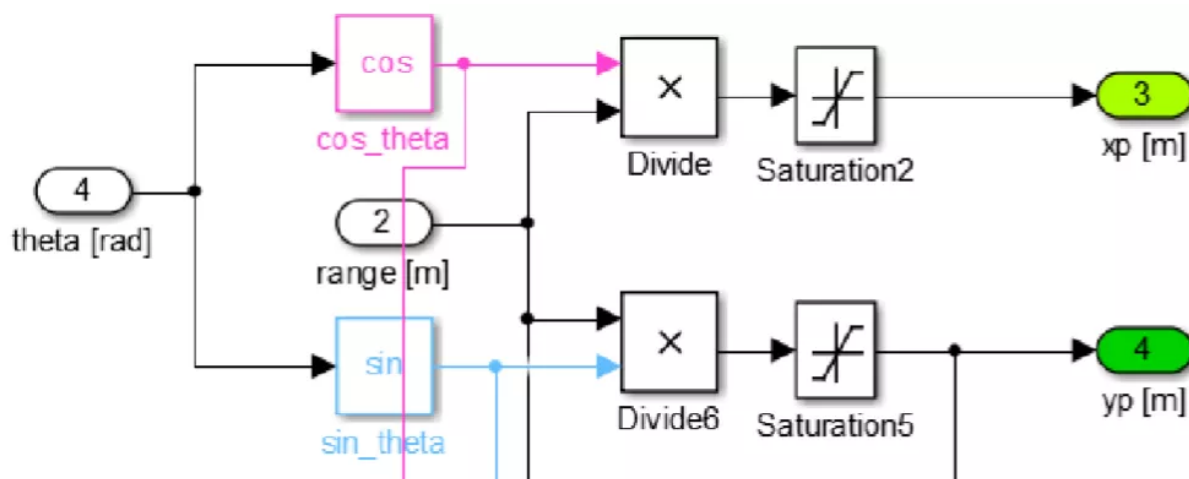


图 4.2 坐标系转换的 Simulink 模型

如果没有检测到任何信号，则输出距离值应该从 0 调到最大探测距离。否则如果是距离零信号，则在计算时会出现计算错误。如图 4.3 所示，range max 表示设定的最大距离值，Switch 表示开关模块：如果输入型号大于设定的值时，输出上方端口的信号，否则输出下方端口的信号。

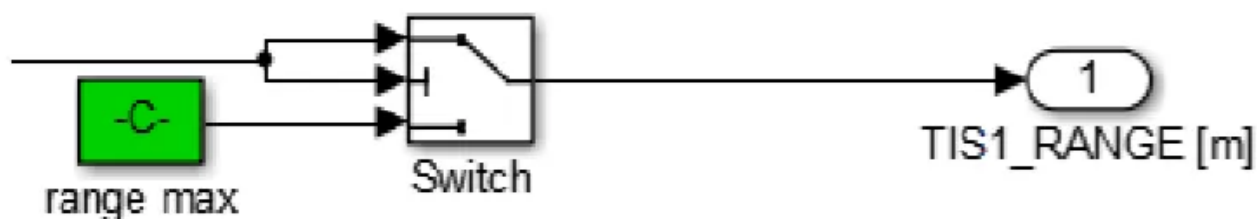


图 4.3 传感器无信号处理的 Simulink 模型

安全距离模型分析

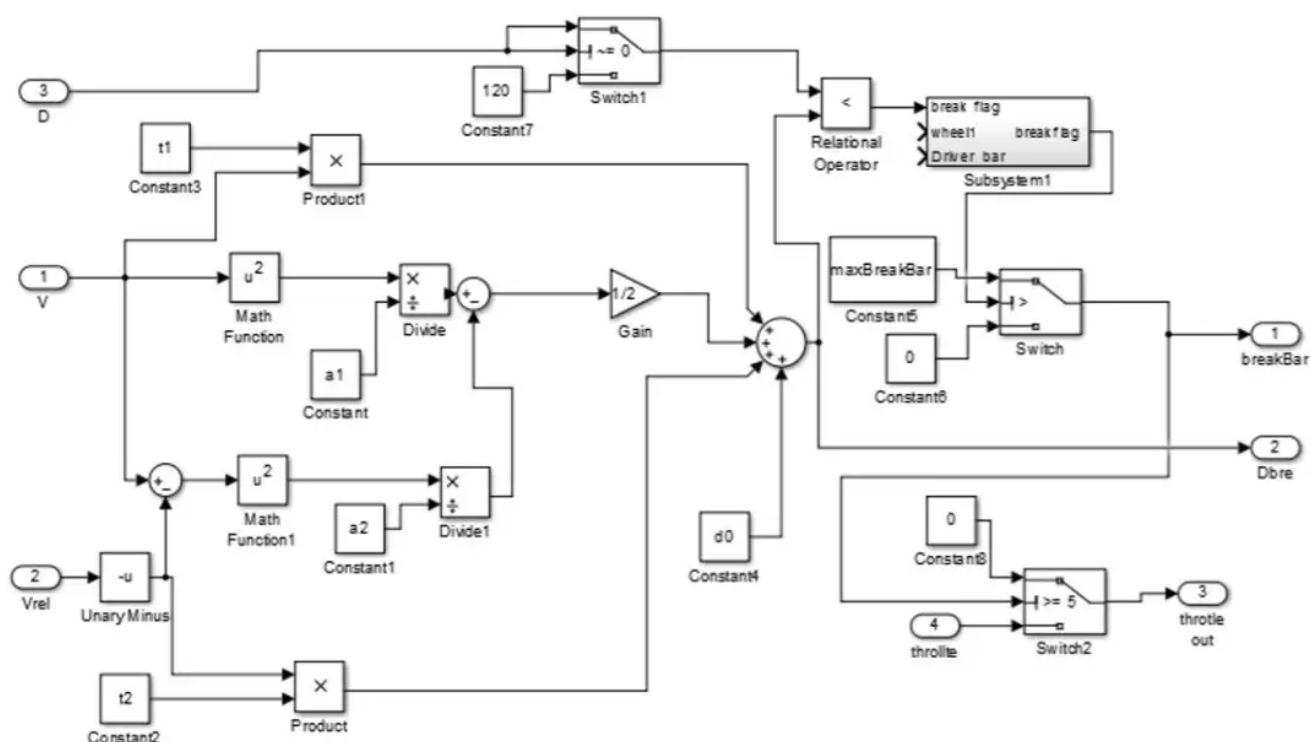
目前安全距离模型主要有Mazda模型、Honda模型、Berkeley模型、SeungwukMoon 模型。这五种避撞算法的避撞效果目前没有一种很好的方法来进行复杂工况的验证对比，因此本文分析和对比了五种避撞算法模型。利用 PreScan 软件建立的目标车静止和目标车减速的两种工况，本车从 10km/h 到 80km/h 的车速接近目标车，在 Simulink 中运行模型，并提出利用自动制动结束时的车距（d_end）来表示 AEB 系统的避撞效果，验证对比这五种 AEB 避撞算法的避撞效果。

1. Mazda 模型：

$$d_{br}=0.5 [(v)^2/a_1-(v-v_{rel})^2/a_2]+v \ t_1+v_{rel} \ t_2+d_0 \quad \text{式 (4-3)}$$

式中， d_{br} :制动距离， v ：本车车速， v_{rel} ：相对车速， a_1 ：本车最大减速度（这里取 6 m/s^2 ）， a_2 ：目标车的最大减速度（这里取 8 m/s^2 ）， t_1 ：驾驶员反应延迟时间（这里取 0.1 s ）， t_2 ：制动器延迟时间（这里取 0.6 s ）， d_0 :最小停车距离（这里取 3 m ）。

当 v_{rel} 大于 v 时，制定危险距离 d_{br} 为零。当两车使用全力制动时，最小停车距离 d_0 能够确保两车不发生碰撞。增加延迟时间 t_1 、 t_2 ，能够使系统更加保守。Mazda 模型的安全距离模型如图 4.4 所示。



(a)

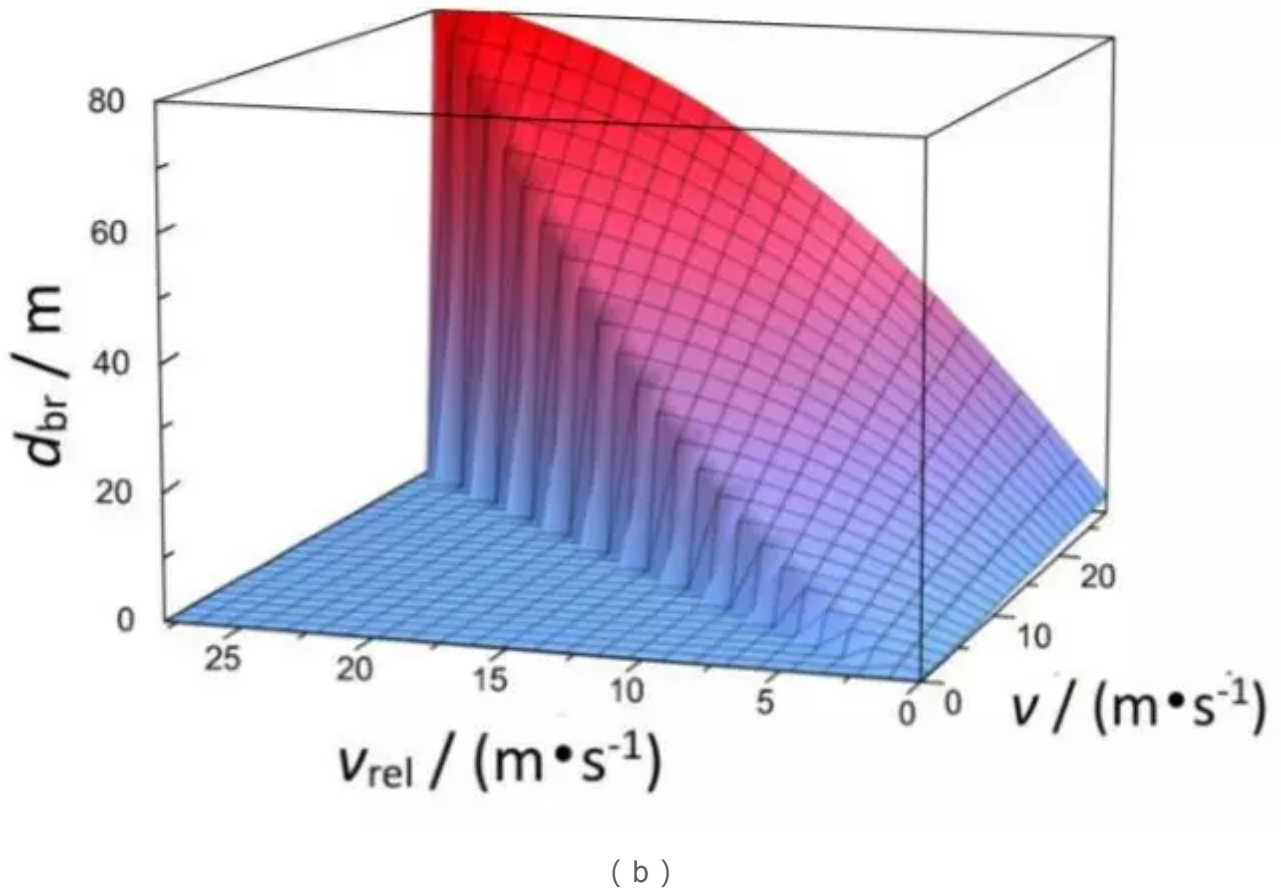


图 4.4 (a) Mazda 安全距离 Simulink 模型 (b) Mazda 安全距离三维图模型

2. Honda 模型：

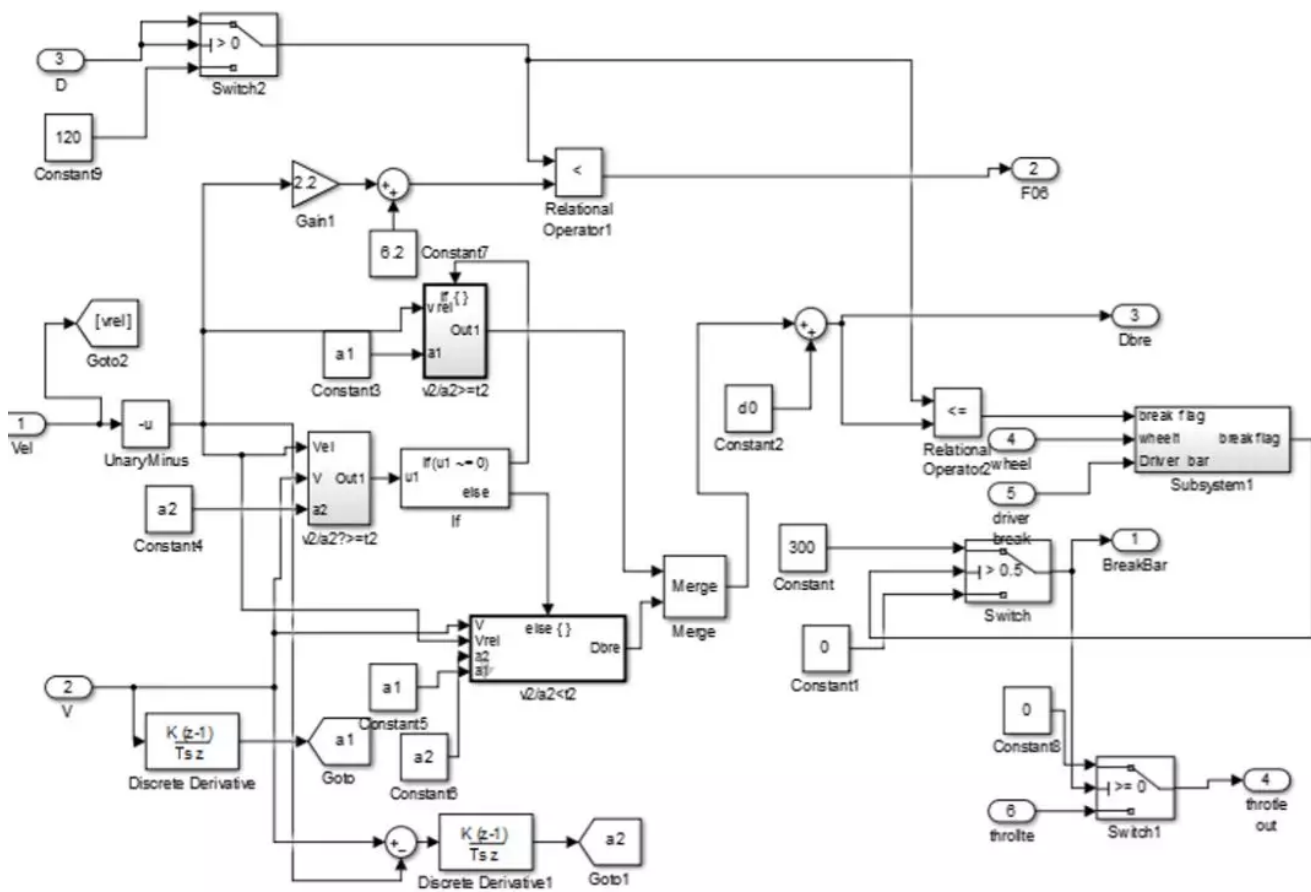
Honda 的避撞逻辑包含碰撞预警(CW)和碰撞避免(CA)两个部分,碰撞预警的逻辑。其算法如下：

$$d_w = 2.2 v_{rel} + 6.2 \quad \text{式 (4-4)}$$

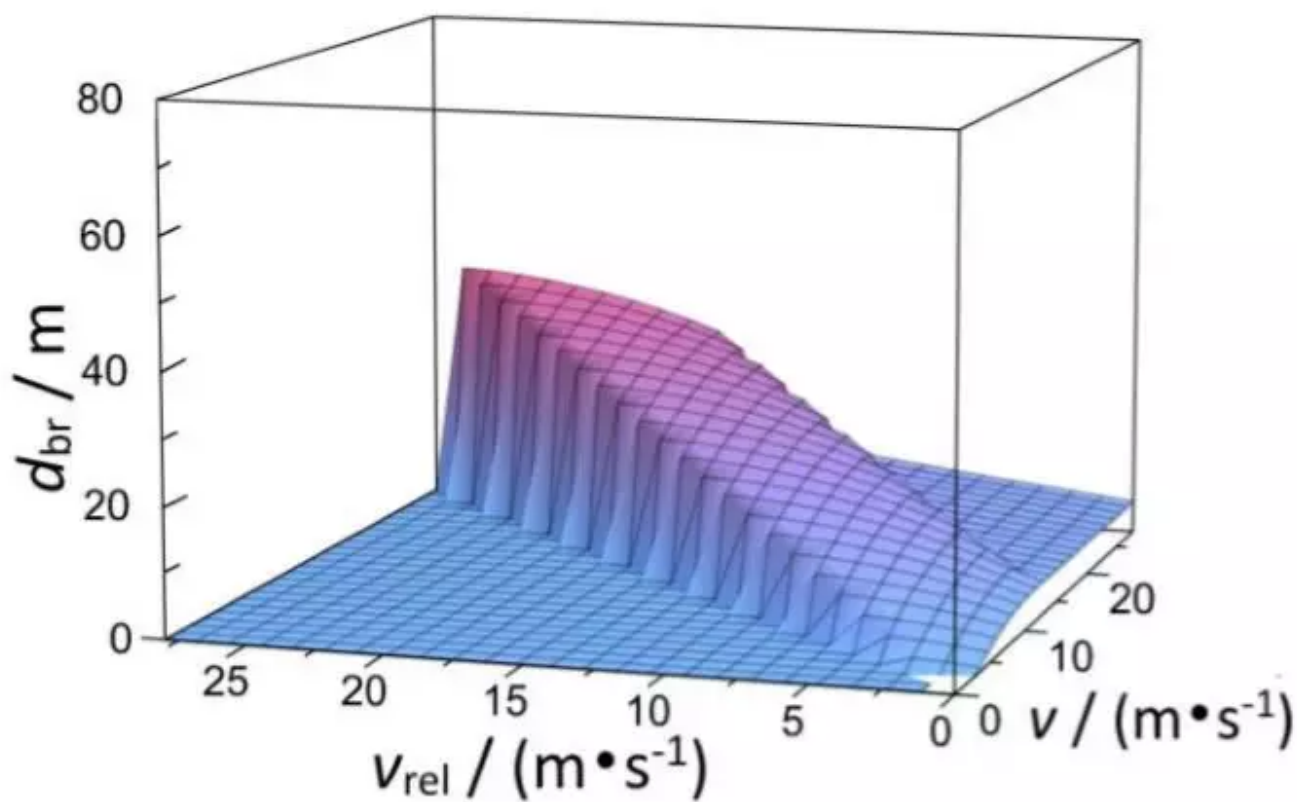
$$d_{br} = t_2 v_{rel} + t_1 t_2 a_1 - 0.5 a_1 t_1^2 \quad (v_2/a_2) \geq t_2 \quad \text{式 (4-5)}$$

$$d_{br} = t_2 v - 0.5 (t_2 - t_1)^2 - (v_2^2) / (2 a_2) \quad (v_2/a_2) < t_2 \quad \text{式 (4-6)}$$

其中 v 是本车车速， v_{rel} 是两车相对车速， v_2 是目标车车速， a_1 、 a_2 分别是本车和目标车的最大减速度， t_1 、 t_2 分别是系统延迟时间和制动时间。在此式中， a_1 、 a_2 、都取 7.8 m/s^2 、 $t_1 = 0.5 \text{ s}$ 、 $t_2 = 1.5 \text{ s}$ 。Honda 模型的安全距离模型如图 4.5 所示。



(a)



(b)

图 4.5 (a) Honda 安全距离 Simulink 模型 (b) Honda 安全距离三维图模型

3. Berkeley 模型：

由此可以看到 Honda 模型有一个碰撞预警系统，而且 Honda 模型对的危险制动距离明显比 Mazda 模型更短。Honda 模型自动制动就介入更晚，这样的算法更加符合驾驶习惯，并且对驾驶员的正常驾驶的影响也更小。

建立目标车突然匀减速制动，后车匀速向前运动的运动场景。

在碰撞预警阶段，本车如果发生碰撞，则公式是：

$$x_1(t) = x_{10} + v_1 t \quad \text{式 (4-7)}$$

$$x_2(t) = x_{20} + v_2 t - 0.5 a_2 t^2 \quad \text{式 (4-8)}$$

$$x_1(t) = x_{20} - x_{10} + x_2(t) \quad \text{式 (4-9)}$$

$$v_{rel} = v_1 - v_2 \quad \text{式 (4-10)}$$

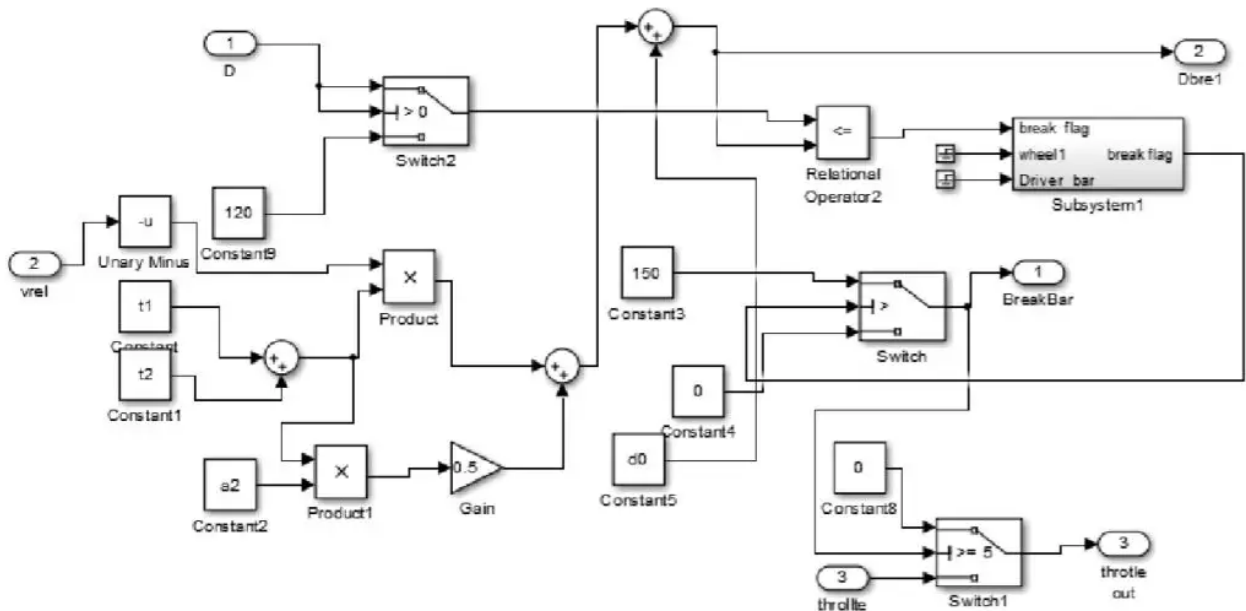
$$t = t_1 + t_2 \quad \text{式 (4-11)}$$

$$d = x_{20} - x_{10} \quad \text{式 (4-12)}$$

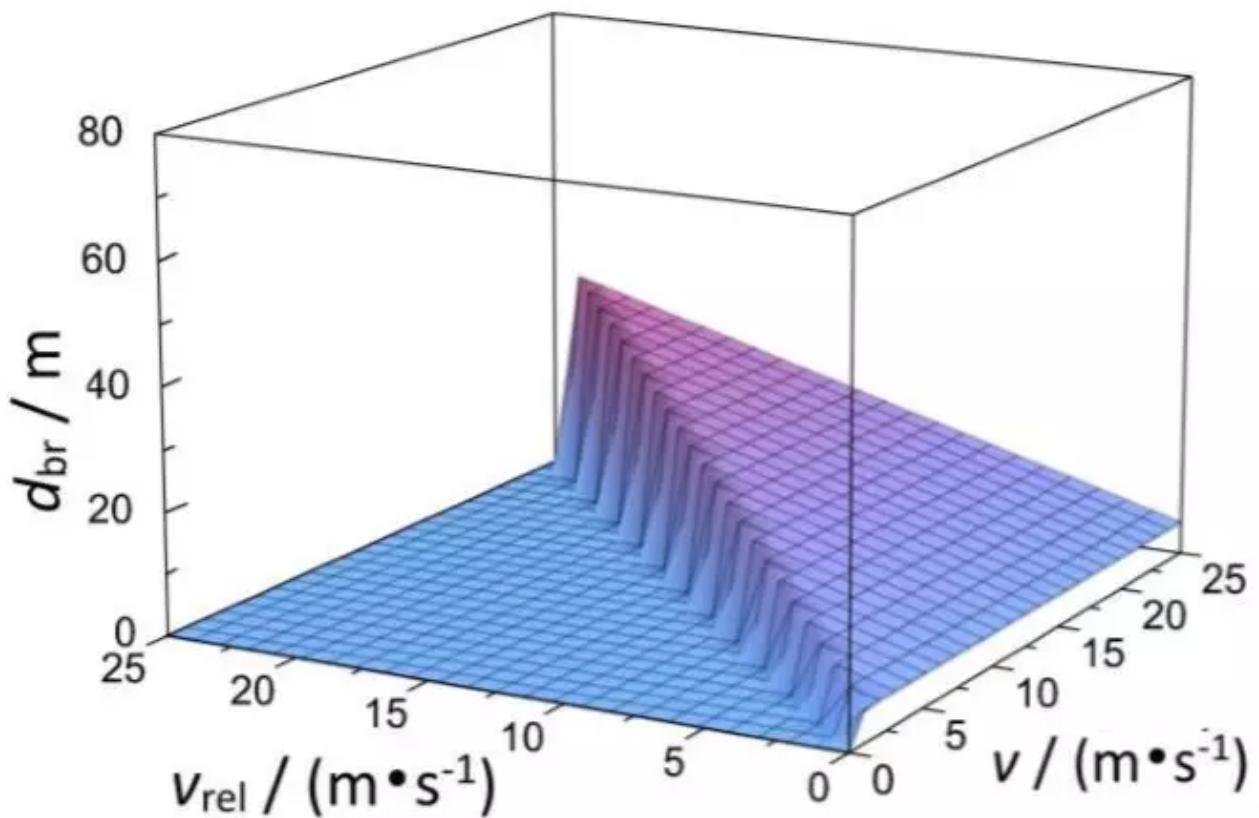
$$d_{br} = v_{rel} (t_1 + t_2) + 0.5 a_2 (t_1 + t_2)^2 \quad \text{式 (4-13)}$$

式中， v_{rel} ：两车相对速度， t_1 ：驾驶员反应时间（取1s）， t_2 ：制动系统延迟时间（取0.2s）， a_2 ：两车最大制动减速度（取6 m/s²）。

Berkeley 模型的安全距离模型如图 4.6 所示。



(a)



(b)

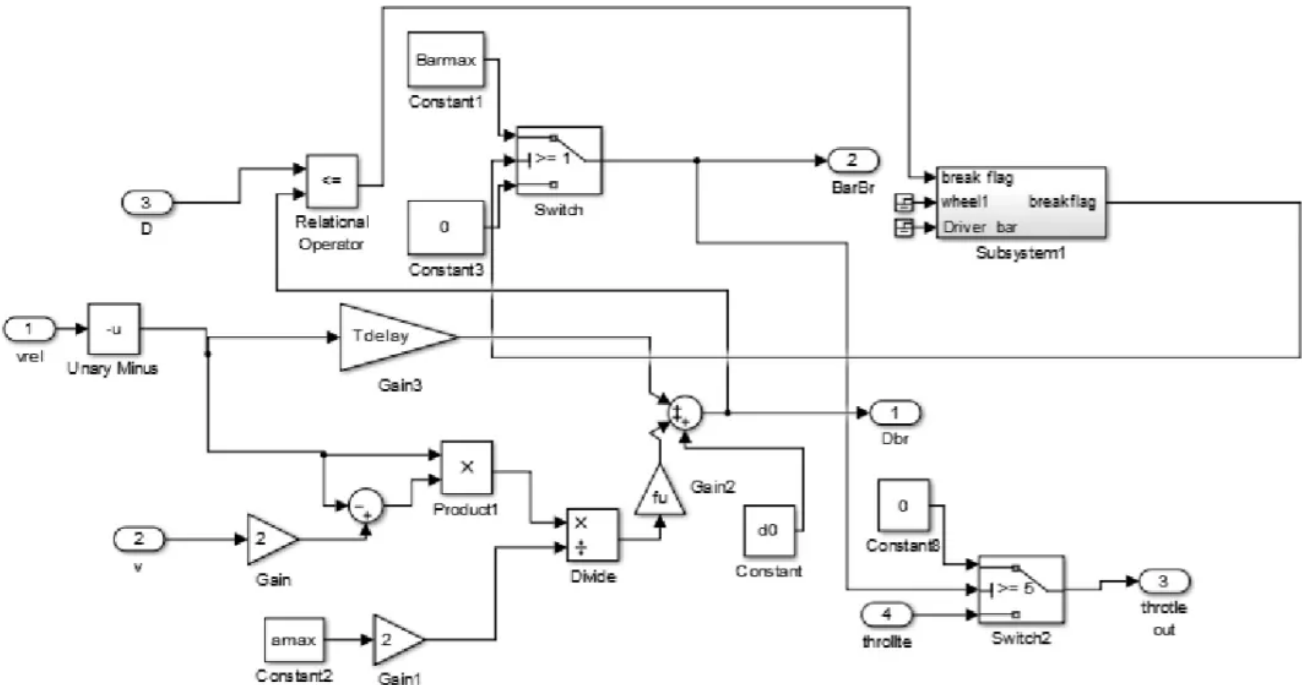
图 4.6 (a) Berkeley 安全距离 Simulink 模型 (b) Berkeley 安全距离三维图模型

4. SeungwukMoon 模型 :

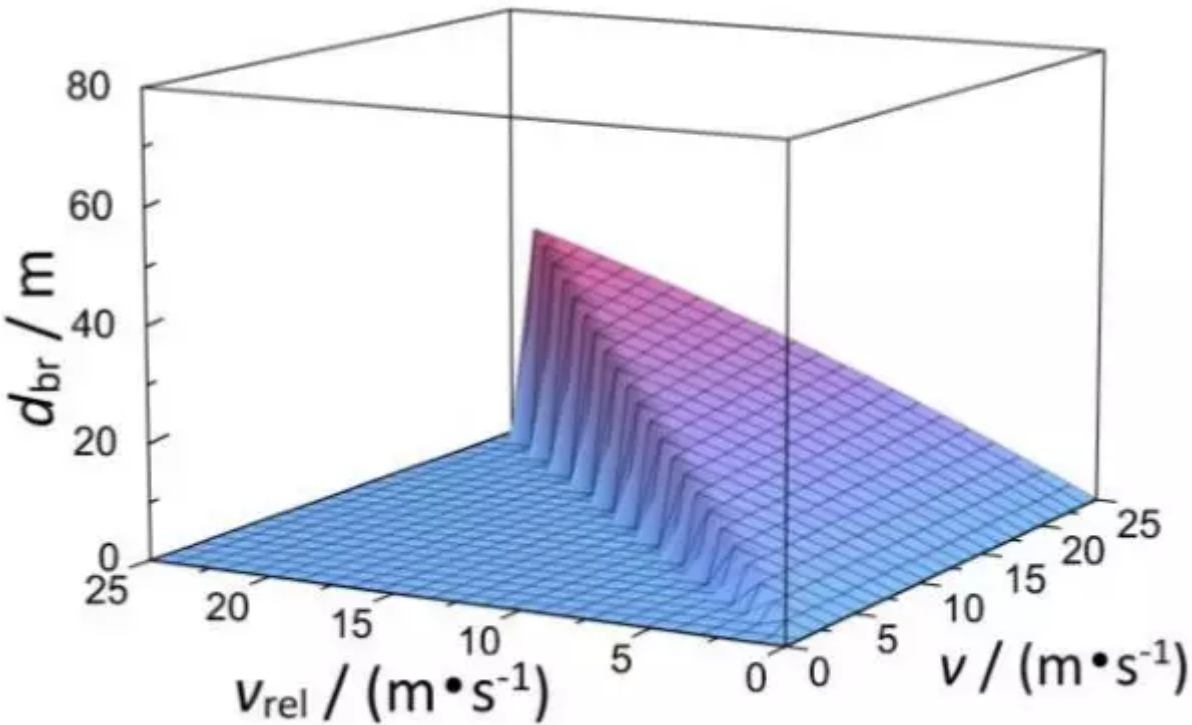
$$d_{br} = v_{rel} T_{delay} + f(u) (2 v_{sv} - v_{rel}) v_r / (2 a_{max}) \quad \text{式 (4-14)}$$

其中， d_{br} :制动危险距离， v_{rel} :两车相对速度， T_{delay} :系统延迟时间（取 1.2s）， $f(u)$:制动因数（取1）， v_{sv} :本车车速， a_{max} :最大制动减速度（取 6 m/s^2 ）。

SeungwukMoon 模型的危险距离阈值模型如图4.7 所示。



(a)



(b)

图 4.7 (a) SeungwukMoon 安全距离 Simulink 模型 (b) SeungwukMoon 安全距离三维图模型

5. TTC 模型：

TTC 是指两车相撞所需的时间，也被称为即碰时间避撞算法。在定义危险制动 距离时，TTC 的制动距离被用在算法逻辑中，如果 TTC 小于所有延迟时间（系统制 动延迟时间与驾驶员反应时间），驾驶员没有对碰撞预警做出反应，则在这时候系统 应该自动制动。

$$TTC=D/v_{rel}$$

式（4-15）

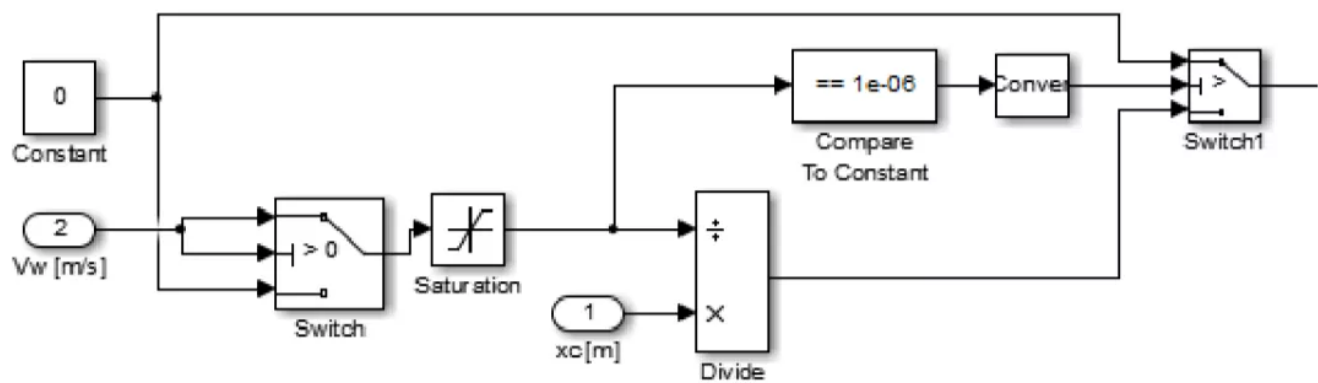
其中，D：两车相对距离， v_{rel} ；两车相对车速，由此可以得到危险制动距离 d_{br} ：

$$d_{br}=TTC \ v_{rel}+d_0$$

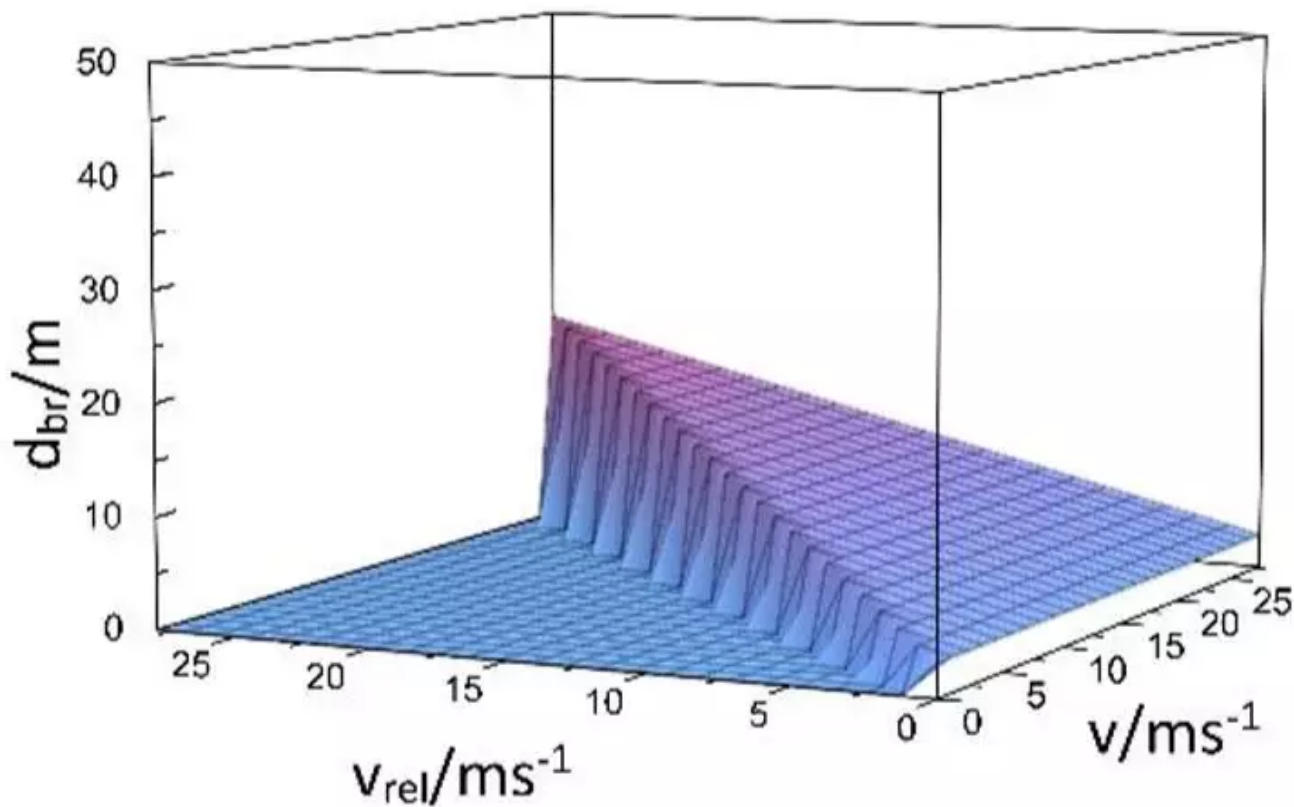
式（4-16）

d_0 ：安全停车距离，这里取3m

图 4.8 为 TTC 全力制动的危险距离阈值模型。



(a)



(b)

图 4.8 (a)TTC 安全距离 Simulink 模型 (b) TTC 安全距离三维图模型

由于当两车相对速度为零时，TTC无解，所以设定 V_{rel} 的下限，在 PreScan 的模型中 V_{rel} 下限取 $1 \cdot e^{-6}$ 。TTC 时间一般在1.1s到1.4s之间，车辆的制动减速度的平均值为0.52g。在 TTC 算法中，设定预警危险 TTC 为2.6s，部分制动 TTC 为 1.6s，全力制动 TTC 为0.6s。当系统计算实际TTC达到2.6s、1.6s、0.6s时，分别竖起警告标旗（2.6sflag）、部分制动标旗（1.6sflag）、全力制动标旗（0.6s flag）。

表 4.1 TTC 避撞模型控制逻辑

2.6sflag	1.6sflag	0.6sflag	系统动作
0	0	0	无动作
0	0	1	无动作
0	1	0	实施 40%制动
0	1	1	实施最大制动
1	0	0	输出驾驶员制动
1	0	1	输出驾驶员的制动
1	1	0	实施 40%制动
1	1	1	实施最大制动

在此 TTC 控制算法中，当部分制动标旗（1.6sflag）竖起时，保持部分制动额外的 0.5 s，以确保避免潜在的危险状况。当制动标旗竖起时，保持住全力制动，直到 车速降为零。

PreScan 安全距离仿真结果

在 PreScan、Simulink 软件仿真结果得到的数据却表明：Honda、Mazda、SeungwukMoon控制算法均能在10km/h到80km/h的速度场景下，均能成功避免碰撞。但是，在 TTC、Berkeley 避撞算法中，在车速达到 70 km/h 时候，并不能成功避免碰撞，不过 TTC 避撞算法能减少碰撞的伤害，速度由初速度 80 km/h,降低到碰撞时刻 30 km/h,减少了 62.5%的碰撞速度。仿真结果如 4.9 所示。

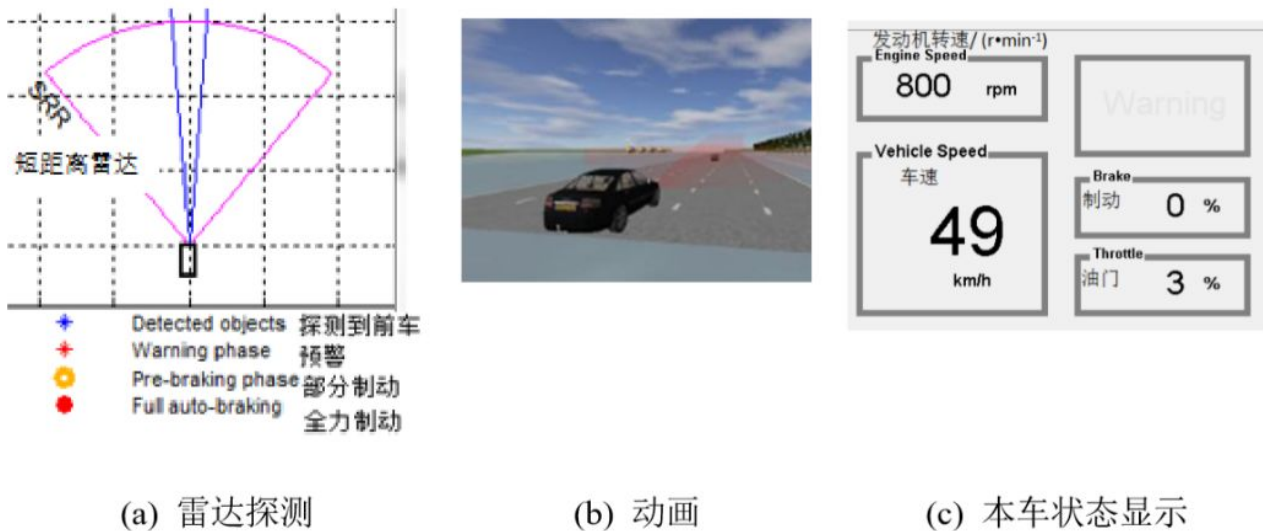


图 4.9 AEB 仿真结果

TTC 避撞算法在 70km/h 及以上的速度不能完全避免碰撞，但是可以通过调整 TTC 的三个即碰时间阈值，达到成功避免碰撞的目的。一方面如果即碰时间阈值设置过大，虽然可以成功避免碰撞，但是会影响驾驶员正常驾驶；另一方面如果即碰时间阈值设置过小，就无法达到避免碰撞的目的。所以避撞算法需要做到既不会过早地介入制动系统，不影响驾驶员正常驾驶，又能成功避免碰撞的目的。

在这个 TTC 避撞算法中，将预警时间阈值、部分制动时间阈值、全力制动时间阈值，分别设置为 2.9 s、1.9 s、0.9 s 时，能够成功避免碰撞，又不会过早介入制动系统影响驾驶员正常驾驶。调整 Berkeley 避撞算法 $d_0=7$ m 时，能在 10 km/h 到 80 km/h 的速度场景下，能够成功避免碰撞。

在本文中用自动制动结束时的车距 (d_{end}) 来表示 AEB 系统的避撞效果，如果 d_{end} 的数值大于等于零，则表明避撞成功；如果 d_{end} 的数值大于 3m 车，则说明该算法过早的进行了自动制动，由此说明该算法很可能会干预驾驶员的正常驾驶。如果 d_{end} 的数值较小，则表明该算法较为激进；当同一算法在不同工况下 d_{end} 的各值很集中，则表明该避撞算法能在各种不同工况下表现的较为一致。

具体调整后的仿真结果如下图 4.10 所示：

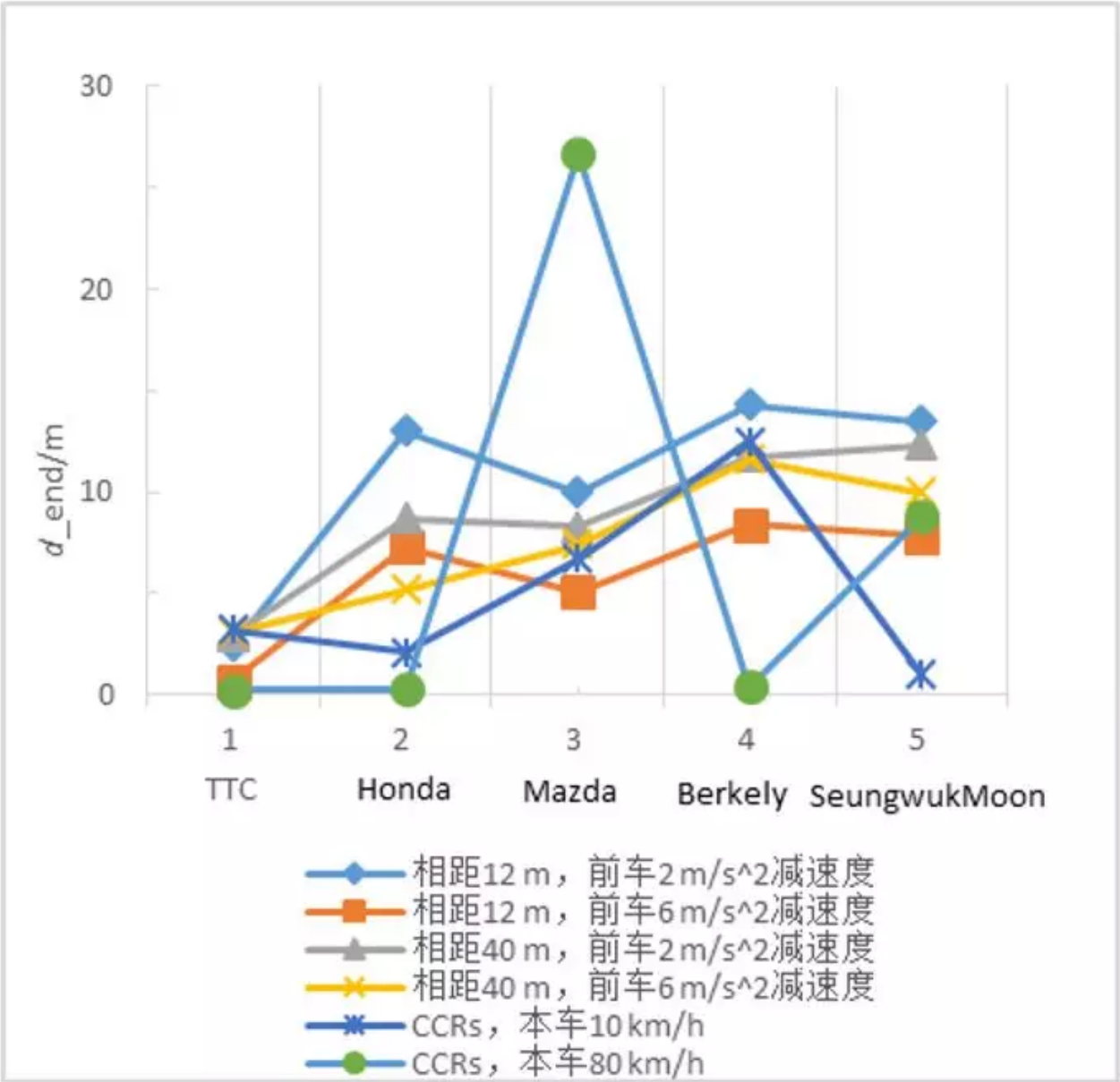


图 4.10 各算法仿真结果

由此仿真结果可得知 TTC 避撞算法：在不同工况下，自动制动结束时的相对车 距最为集中；所需输入参数少，只需要相对车速 v 与相对车距 D ；避撞公式简单，方 便调整即碰时间阈值以适应不同车型的避撞算法开发。

Honda 较为激进，在 CCRs 高速（本车车速 80 km/h）工况下，当设置 $d_0=3$ m , d_{end} 仅仅为 0.3 m，然而在其他工况下， d_{end} 分布的较为分散。

Mazda 算法在 d_{end} 为 26.7 m 说明 Mazda 算法在 CCRs 高速（本车车速 80 km/h）工 况下，介入制动系统的时机较早，容易干涉驾驶员的正常驾驶。

Berkeley 算法也表现较为激进，在 CCRs 高速（本车车速 80 km/h）工况下， d_{end} 为 0.4 m；在其他工况， d_{end} 在 8.4 m-14.3 m 之间，避撞算法介入制动时间较为均衡。

SeungwukMoon 算法表现较好，在 CCRb 工况下， d_{end} 均在 7.8 m-13.5 m 之间。CCRs 高速（本车车速 80 km/h）工况下，SeungwukMoon 算法介入时机较为及时， d_{end} 为 8.8 m；其在 CCRs 低速（本车车速 10 km/h）工况也表现较好， d_{end} 为 1 m。