



## HyPneu Case Study

### 汽车 ABS 刹车系统仿真分析示例

#### Description - 说明

汽车 ABS 刹车系统(Anti-locked Braking System), 即防抱死刹车系统, 是在普通的液压或气动刹车的基础上增加了刹车控制系统, 以防止刹车时车轮被抱死, 在尽可能得到最大的制动力同时, 又能保证制动方向稳定性, 防止侧滑和跑偏。

防抱死的基本原理是: 使车轮的滑移率处于最佳的范围内。滑移率定义为:

$$\lambda = \frac{\text{车速} - \text{轮速}}{\text{车速}} \times 100\%$$

由定义可以看出, 滑移率的范围取值范围为 0~1, 当滑移率为 1 时, 说明车轮完全抱死, 车在地面呈纯滑动; 当滑移率为 0 时, 说明完全无抱死现象, 车轮纯滚动; 滑移率介于 0 与 1 之间时, 说明有一定抱死, 车轮呈半滚半滑状态。滑移系数与附着系数有一定关系, 通常, 当滑移率介于 15%~20%时, 能得到最大的附着系数, 即得到最大的制动力。

#### Simulation and Optimization - 仿真与优化

ABS 刹车系统是一个机、电、液一体的系统, 为实现精确模拟, 示例中采用 HyPneu 软件与 Matlab/Simulink 软件进行联合仿真的方法, 使 HyPneu 软件来模拟 ABS 刹车系统的液压部分, 使用 Simulink 软件来模拟电控及汽车动力学部分, 两者之间通过联合仿真接口来实现信息交互。

首先在 HyPneu 中建立刹车液压系统模型, 如图 1 所示。图 1 模型中, 显示了部分 ABS 刹车液压系统(3 通道防抱死系统, 仅用后轮液压系统), ABS 刹车关键部件 ABS 单元是建立在普通刹车系统之上。通过联合仿真实接口, HyPneu 液压模型将刹车压力传递给 Simulink 的动力学模型,

动力学模型将 ABS 的电控信号（油泵启动及电磁阀控制信号）传回到液压系统，控制刹车液压系统，进而控制刹车压力。

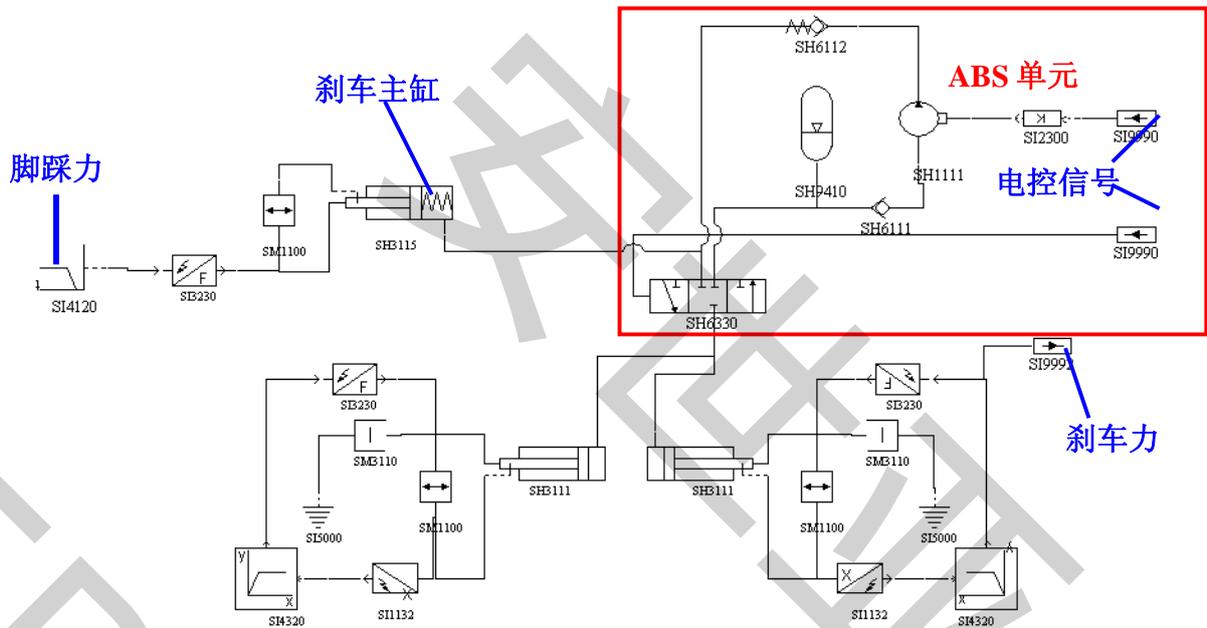


图 1 ABS 刹车液压系统 HyPneu 仿真原理图

然后建立 Simulink 仿真模型，如图 2 所示。

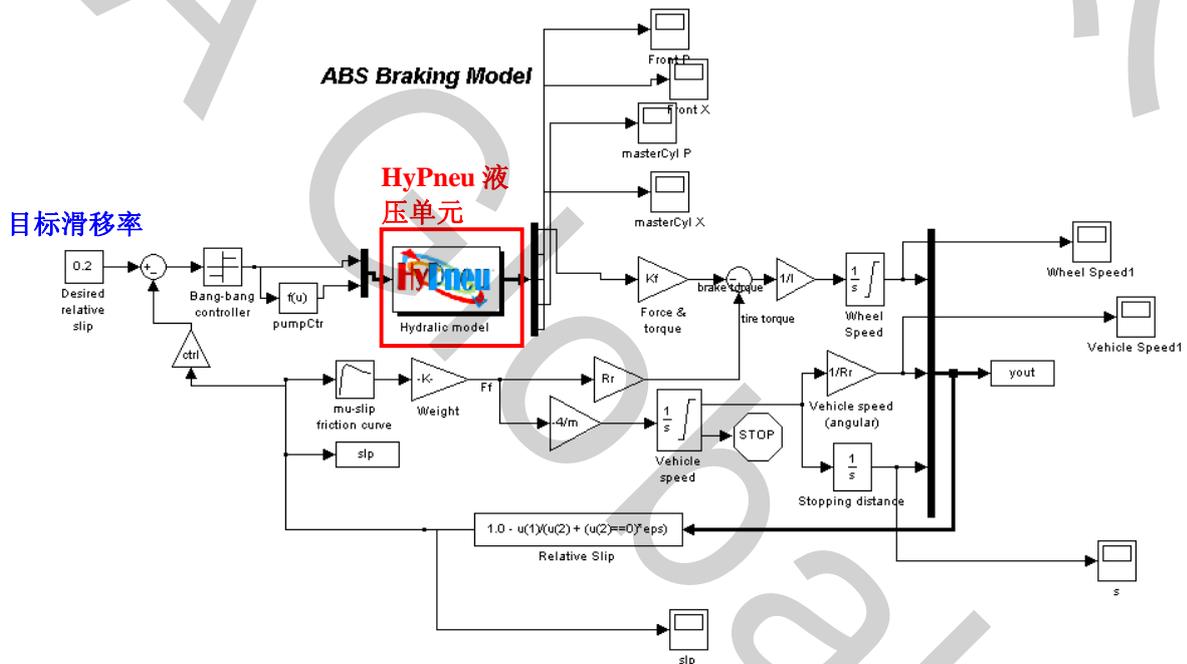


图 2 汽车动力学及控制系统 Simulink 仿真模型

图 2 中，显示了 Simulink 中根据基本动力学方程构建的汽车轮胎及车身动力学模型，同时还包含防抱死控制系统。在该模型中，设定了滑移率-附着系统关系曲线(描述轮胎及路面摩擦特性的曲线)。另外在该模型中，还加入了红方框所示的 HyPneu 液压单元，该单元在联合仿真时调用 HyPneu 软件，实时计算液压模型，交与 Simulink 模型进行实时数据交互。

设定目标滑移率为 0.2，初始车速为 20m/s，开始进行仿真分析。仿真结果如下：

由图 3 仿真结果可以看出，开始时，在急剧增加的刹车力作用下，轮速(单位 rad/s)迅速降低，低于车速(单位 rad/s)，即表明开始出现滑移，当轮速与车速之差达到一定程度（达到目标滑移率 0.2 时），ABS 开始工作，调节液压刹车压力，使滑移率尽可能保持在目标值 0.2 附近。图 4 显示了滑移率曲线。

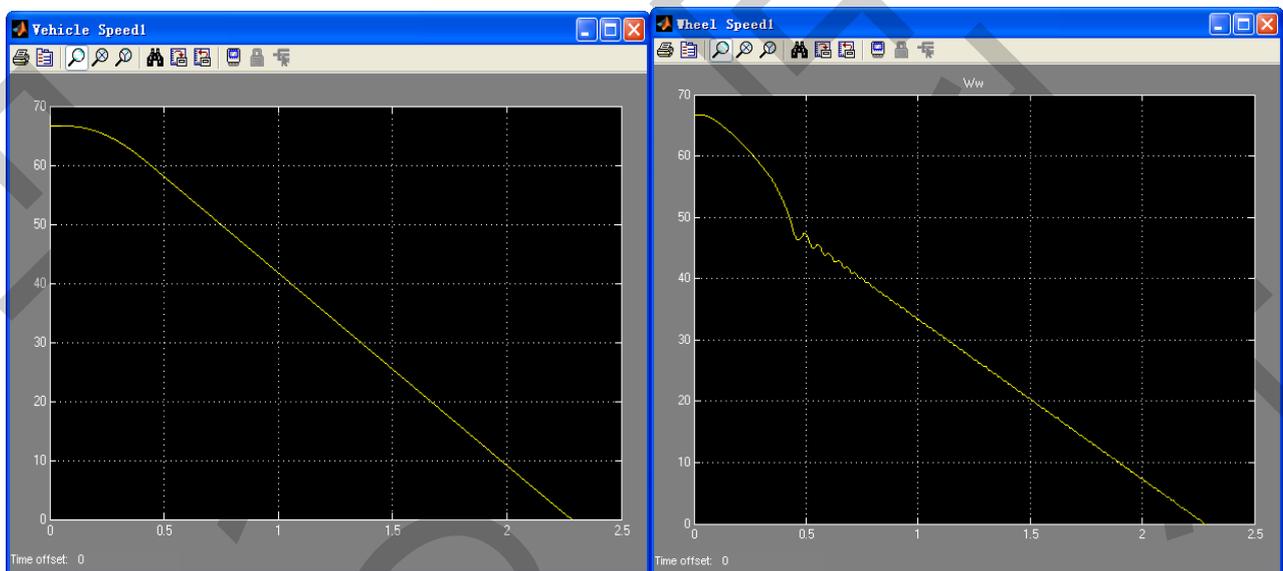


图 3 仿真结果——车速（左）及轮速（右）曲线

ABS 实际所做工作就是：不断调节液压控制阀，使刹车液压系统在增压、保压和减压三个状态循环，从保持较为合适的刹车液压力，避免刹车液压力过大，产生轮胎抱死。从轮速变化曲线及滑移率曲线中可以看到 ABS 系统不断进行调节的效果。

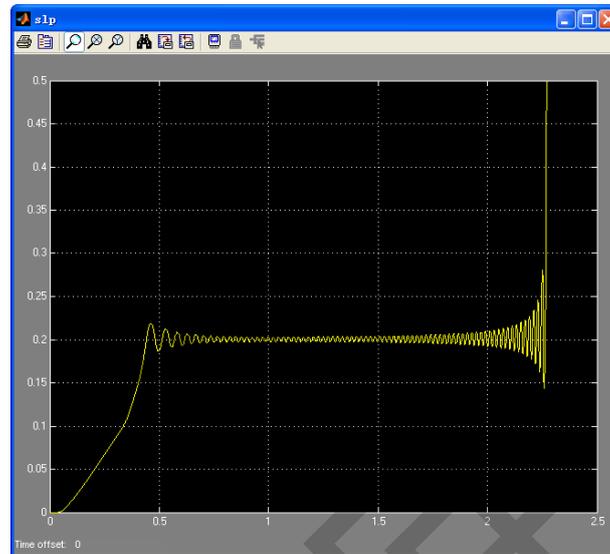


图 4 仿真结果——实际滑移率曲线

另外，从联合仿真还可以得到许多的信息，如实际刹车距离（图 5 所示）、液压主缸位移（图 6 所示）、主缸内压力（图 7 所示）和刹车力（图 8 所示）等内容。

图 6 中可以看出液压主缸在踏板踩下时，由于 ABS 工作，主缸不断跳动，甚至被顶起的状态。这是由于 ABS 刹车过程中，不断进行的增压和减压过程所引起的。增压过程制动液瞬间从主缸到分液压缸，减压中液压系统中电动泵将制动液打回主缸时，这两个过程引起主缸行程不断变化，进而导致刹车踏板有明显颤动，称为踏板反应。这种反应能让驾驶员知道 ABS 开始工作。

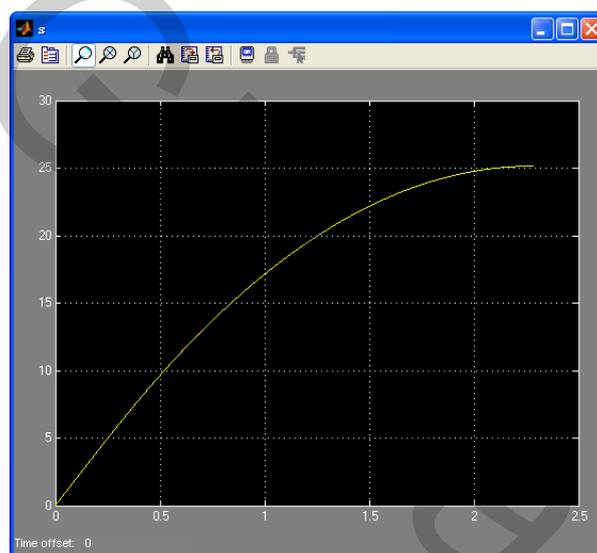


图 5 仿真结果——刹车距离

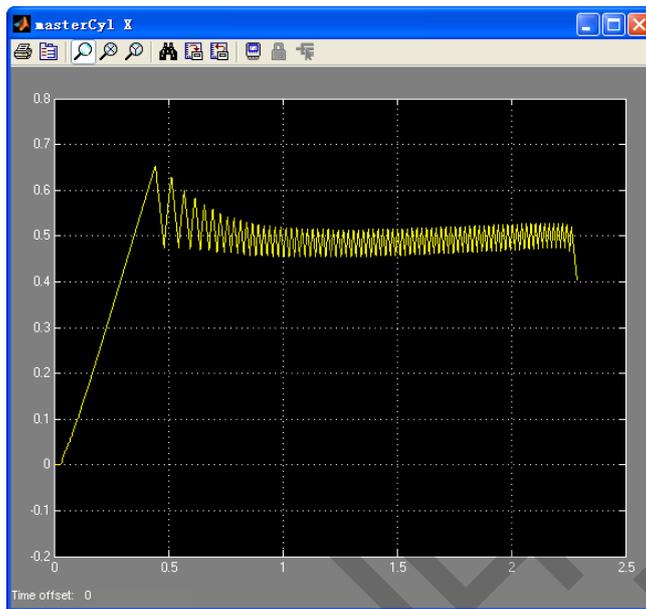


图 6 仿真结果——主缸位移

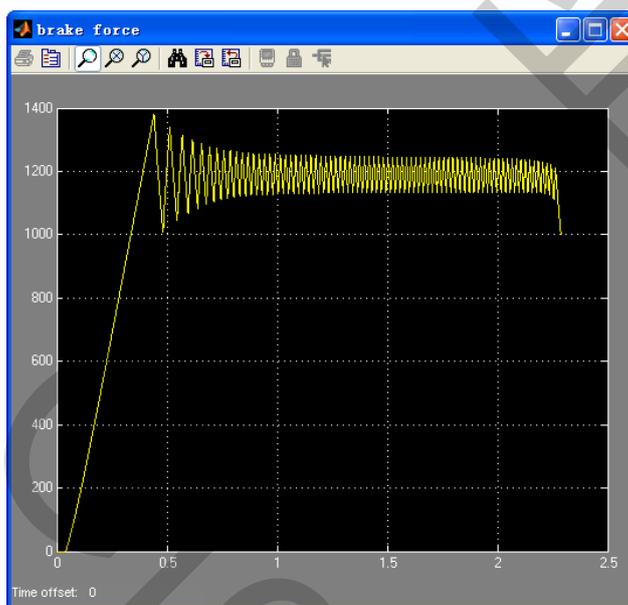


图 7 仿真结果——刹车压力

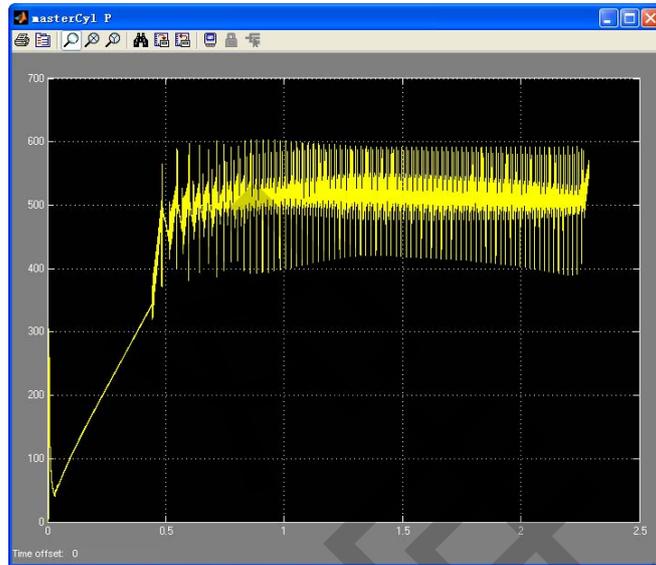


图 8 仿真结果——主缸压力

在此仿真模型上，可以进行其它许多工作。如在 HyPneu 液压模型中，可以得到主缸、分液压缸、管路、换向阀、蓄能器等元件的压力和流量变化情况，以及液压缸位移、速度等情况，通过改变参数或更换元件，分析不同刹车片特性、管路特性及全液压系统性能。而在 Simulink 模型中，可以得到刹车减速度等物理量，还可对动力学模型做修改，得到不同滑移率-附着系数曲线及其它因素影响下（如风阻、滚动阻力等）的刹车特性。