

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.10.009

# 基于 SimulationX 的汽车制动系统 踏板感觉仿真分析

程海波<sup>1</sup>, 田明<sup>1</sup>, 李晓迪<sup>1</sup>, 秦合营<sup>2</sup>, 刘琛<sup>2</sup>, 贝晓狮<sup>2</sup>

(1. 华晨汽车工程研究院, 辽宁 沈阳 110141; 2. 世冠科技有限公司, 北京 100027)

**摘要:** 针对于整车制动系统踏板感觉的分析与调校问题,当前的模拟分析手段不能精确地模拟制动系统踏板感觉;通过引入多学科领域系统仿真软件SimulationX,应用该软件建立了单个零部件仿真模型,并搭建了整个制动系统仿真模型,进而对制动性能进行了动态仿真;根据仿真模型,调整制动系统零件尺寸参数、特性曲线及特性值等,可模拟出最理想的制动系统踏板感觉性能曲线;为检验模型的准确性,对车辆进行了实际道路测试,并将测试结果与SimulationX模拟结果进行了对比。分析结果表明,基于SimulationX建立的整车制动系统模型仿真结果与实际测试结果基本相符,SimulationX作为一种模拟分析软件,可以较好的满足制动系统踏板感觉调校的需要。

**关键词:** 制动系统; 系统仿真; ITI SimulationX; 踏板感觉

中图分类号: U463.5; TH122

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)10-1206-04

## Simulation of automotive brake system for pedal feel analysis based on SimulationX

CHENG Hai-bo<sup>1</sup>, TIAN Ming<sup>1</sup>, LI Xiao-di<sup>1</sup>, QIN He-ying<sup>2</sup>, LIU Chen<sup>2</sup>, LIONEL Bel-mon<sup>2</sup>

(1. Brilliance Automotive Engineering Research Institute, Shenyang 110141, China;

2. Global Crown Technology, Beijing 100027, China)

**Abstract:** Aiming at analysis and tuning of the vehicle brake pedal feeling, the current simulation way can not be used to simulate the brake pedal feeling accurately. The SimulationX was applied of analyzing the brake pedal feeling as a number of scientific disciplines, this software was used to establish the parts simulation model and the whole vehicle brake system simulation model, and this software also was used to run the brake performance dynamic simulation. According to simulation model, the brake parts dimensions and characteristics curve and value were changed and adjusted, then the most ideal brake pedal feeling curve was gotten. The car was tested on the road for checking the correction of model, and the testing result was compared with the SimulationX. The result indicates that SimulationX model result is very similar with testing data of the car, so SimulationX as a simulation analysis software can be satisfied with the requirement of brake pedal feeling tuning.

**Key words:** brake system; system simulation; ITI SimulationX; brake pedal feeling

## 0 引 言

汽车制动性能是车辆行驶安全的重要保证,踏板感觉是制动性能最重要的组成部分,更易被驾驶者察觉,对评价制动系统的优劣起到了关键的作用<sup>[1]</sup>。作为

驾驶者日常行驶中最重要的部分,制动踏板感觉越来越受到重视,尤其J.D.Power之IQSAPEAL等报告中占有较重的权重(如刹车不灵敏/不够力)<sup>[2]</sup>。因此,目前国内外各大汽车公司,不惜花费大量的人力、物力专门从事该方面的研究、调校及测试;目前踏板感觉的调校

收稿日期: 2013-02-18

作者简介: 程海波(1978-),男,辽宁沈阳人,主要从事汽车底盘方面的研究。E-mail: haibo.cheng@brilliance-auto.com

在国内还处于初级阶段,缺乏系统的解决方案与手段。

为了在整车设计与调校阶段达到所要求制动系统的性能和踏板感觉,本研究尝试在设计中引入CAE仿真分析技术,研究制动系统部件的设计参数与整个制动系统乃至整车性能之间的关系,优化设计参数,从而避免设计后期在试验中发现设计缺陷,减少设计后期试验的次数,降低设计风险。

目前制动系统性能计算及分析手段还比较原始,不能精准地反映车辆的真实情况,而SimulationX可以通过软件和台架试验结果相结合,能为制动系统的开发提供良好的解决方案。本研究引入SimulationX为代表的多领域系统仿真平台,介绍对某车型制动系统中制动踏板感觉及其影响因素的仿真分析。

## 1 SimulationX 简介

首先,SimulationX<sup>[3-4]</sup>是基于标准的物理建模语言Modelica的先进大型工程软件,它在同一平台上实现了多学科领域系统工程的建模和仿真,包括:机械、液压、气动、热、电、磁等物理领域。

其次,该软件还提供了用于多体动力学分析的3D多体模型库,如液压、电机、动力传动这样的动力源可以直接跟3D的机械机构连接在一起,来研究完整的动作执行过程。这比再使用一个多体软件进行共仿真的效率高很多,SimulationX三维多体模型如图1所示。

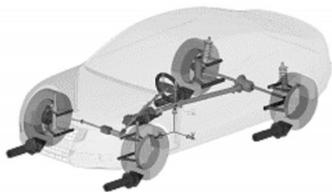


图1 SimulationX 三维多体模型

总之,SimulationX可以涵盖从系统级分析到详细部件级分析直至多学科优化的整个流程,可为制动系统的仿真分析和设计优化提供完整的解决方案。

## 2 制动系统元件建模及验证

整车制动系统结构组成复杂,包括制动踏板、真空助力器、制动总泵、制动钳、制动鼓以及连接这些部件的机械元件和液压管路等部件。本研究通过SimulationX所提供的机械库、液压元件设计库、控制信号库等相结合建立起每个元件的动力学模型,并以台架试验数据验证其精确性,即保证模型分析结果与试验数据吻合。

至于是搭建详细模型还是功能模型,这取决于仿真分析的目标和所掌握参数的详细程度。比如,在该项目中,制动总泵是详细模型,而真空助力器是功能

模型,因为其特性曲线即可满足仿真要求。

### 2.1 整车模型

整车模型对如下参数进行设定:空载质量、满载质量、试验中的实际质量、风阻系数、初始速度等。

### 2.2 轮地接触模型

在轮地接触模型中,用到的是典型的滑动曲线,输入的参数有:轮胎半径、滚阻系数、作用于轮胎的力等。

其中,整车受力如图2所示。

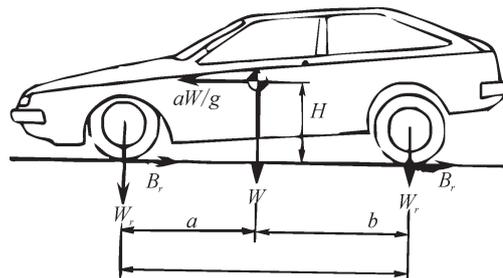


图2 制动力计算模型

在制动过程中,轮胎上的作用力随着车辆减速度的变化而变化。当减速度为 $\alpha$ 时,前、后轴法向反作用力分别为 $w_f$ 和 $w_r$ <sup>[5]</sup>:

$$\begin{cases} w_f = \frac{1}{L}(W \times b + \frac{W}{g} \times \alpha \times H) \\ w_r = \frac{1}{L}(W \times a - \frac{W}{g} \times \alpha \times H) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $W$ —汽车总质量,N; $L$ —轴距,m; $\alpha$ —减速度, $m/s^2$ ; $a, b$ —质心到前、后轴的距离,m; $H$ —质心高度,m。

### 2.3 轮边模型

前、后轮边结构为前盘式和后鼓式,其制动力矩由摩擦系数、轮缸缸径、有效作用直径等参数决定<sup>[6]</sup>。根据参数的设置来区分盘式或鼓式。制动器模型封装前后如图3所示,在属性表中对摩擦面数目、摩擦系数等相关参数进行设定。

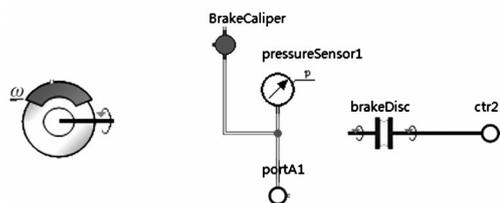


图3 轮边模型

可以通过如下公式来计算制动力力矩:

$$T_{br} = [BEF]RPA \quad (2)$$

式中: $BEF$ —制动器效能因数, $R$ —制动有效作用半径, $P$ —管路压力, $A$ —轮缸的作用面积。

### 2.4 总泵模型

制动总泵是一个典型的液压元件,根据其关键结

构参数搭建的总泵详细模型如图 4 所示。本研究将该模型与真空助力器和制动踏板模型结合构成总制动单元,根据总制动单元的特征曲线验证该总泵模型。

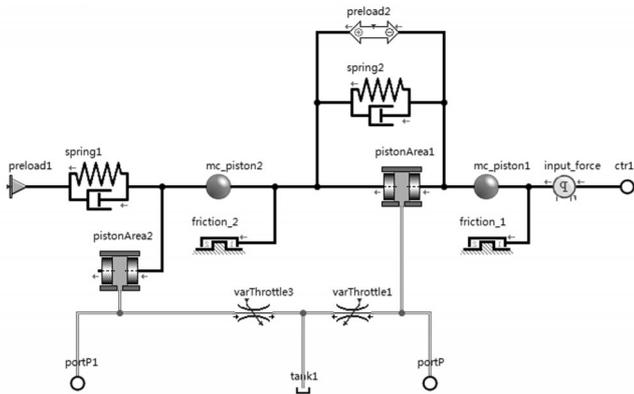


图 4 制动总泵模型

### 2.5 真空助力器模型

根据真空助力器的输入—输出特性曲线,将该曲线输入到模型中,建立的真空助力器模型如图 5 所示,在属性表中对助力器输入、输出进行设定,包括始力、跳跃值、助力比等参数<sup>[7]</sup>。

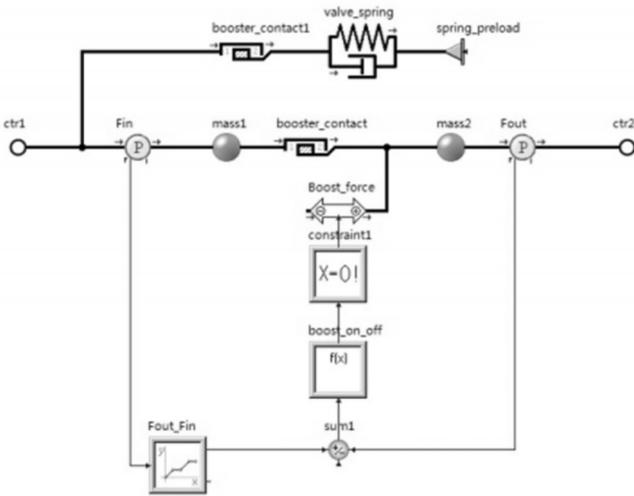


图 5 真空助力器模型

### 2.6 制动踏板模型

制动踏板在整个系统中起到增力功能,同时把旋转运动转换为近似的直线运动,在模型中需要定义其杠杆比,踏板模型如图 6 所示。

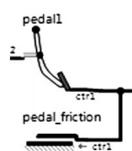


图 6 踏板模型

另外,踏板弹簧力的计算涉及复杂的几何问题,该模型通过读入公式的方式来解决。

以上为整车制动系统中主要的零部件模型,除此之

外,还需对软管、硬管、ABS 液压单元等建立仿真模型。

在制动系统元件模型开发过程中,研究者可以通过 SimulationX 元件库封装功能,将制动系统元件模型封装,定制专用元件库;该库中可以包括单膜片式真空助力器、双膜片式真空助力器、制动总泵、制动钳、各类鼓式制动器、比例阀、感载比例阀、制动软管、踏板等模型。

## 3 制动系统建模及仿真

制动系统各部件模型建立完成后,本研究采用机械、液压管道等部件连接在一起,构成整车制动回路的模型,如图 7 所示。

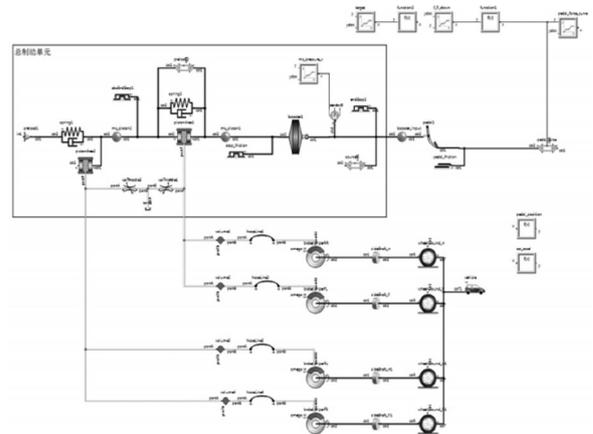


图 7 制动系统模型

在仿真过程中,本研究对整个系统进行动态监控,调整系统各零部件参数,并根据车辆优化前测试数据,进行模型的校准工作。输出相应参数(踏板杠杆比、助力器空行程及其输入端弹簧刚度、制动总泵缸径、软管膨胀量和摩擦系数等)对系统性能的影响,根据其影响的大小、工程实现的难易、成本的高低,选取最优、最可行的方案。

在调试的过程中,本研究选择对总泵缸径、轮边效能参数调整,并进行仿真分析。

踏板行程—减速度曲线如图 8 所示;

踏板力—减速度曲线如图 9 所示;

踏板力—踏板行程曲线如图 10 所示。

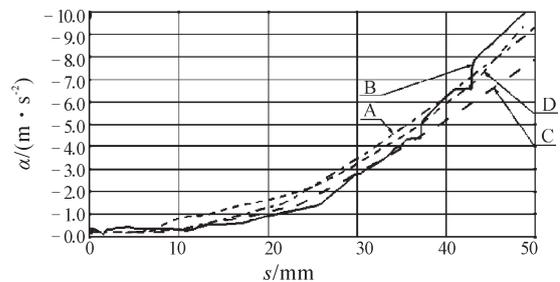


图 8 踏板行程—减速度曲线

A—目标曲线;B—优化前实际测试曲线;C—模型输出曲线;D—优化后的曲线

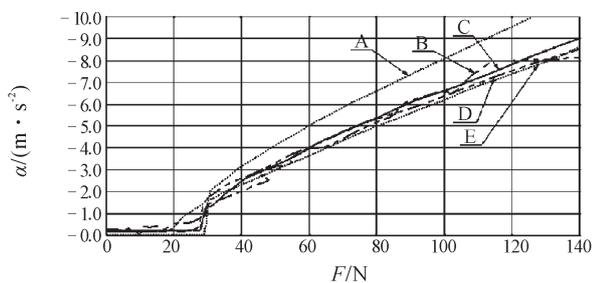


图9 踏板力—减速度曲线

A/E—目标曲线(分为上限和下限);B—优化前实际测试曲线;  
C—模型输出曲线;D—优化后的曲线

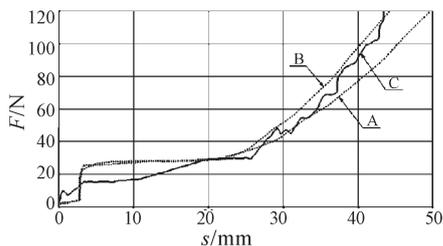


图10 踏板力—踏板行程曲线

A—模型输出曲线;B—优化后的曲线;C—优化前实际测试曲线

### 4 整车测试

本研究根据SimulationX制动系统仿真分析结果提出的优化方案,对制动系统相关部件(制动踏板、总泵、摩擦片)参数进行调整,通过制动系统测试设备实际测试整车制动性能,并分析踏板力、踏板行程及减速度的关系<sup>[8-9]</sup>。踏板行程与减速度关系如图11所示。

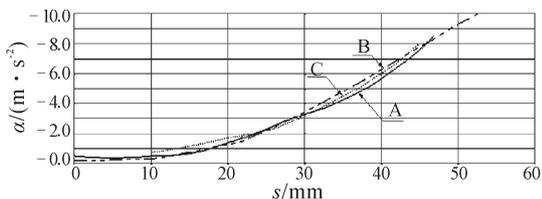


图11 踏板行程与减速度

A—优化测试曲线;B—Simulationx优化曲线;C—目标曲线

图11中,对比各曲线分析可知,在消除制动系统自由间隙后,优化的制动系统在减速度方面上升明显;空行程方面明显减少,整个行程与减速度对应的关系与目标曲线符合较好。

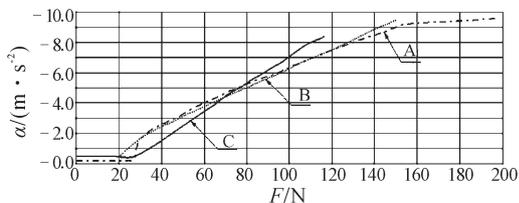


图12 踏板力与减速度

A—SimulationX优化;B—目标曲线;C—优化测试曲线

踏板力与减速度关系如图12所示。图12中,对比曲线分析可知,优化后的踏板力与优化前相比,在相同

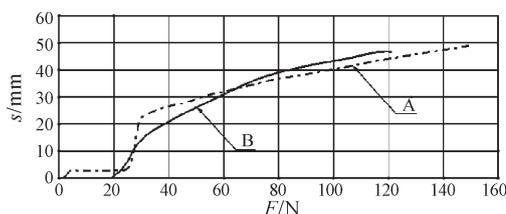


图13 踏板力与踏板行程

A—SimulationX优化曲线;B—优化测试曲线

减速度的情况下,踏板力相差并不大,整体却是一致;而与目标曲线相比,虽然有些差距,但优化后的测试曲线已经明显向目标曲线靠近,证明方向性是一致的,只是在力计算的细节如效率损失方面需要进一步研究。

踏板力与踏板行程关系如图13所示。图13中,对比曲线分析可知,踏板力与踏板行程关系曲线基本一致。

### 5 结束语

本研究基于仿真工具SimulationX建立了汽车制动系统的完整模型,可以构建所有典型的制动回路模型,包括不同的液压结构,以及不同的制动器配置,如:X型、H型、I型、全盘式、前盘后鼓式<sup>[10]</sup>。

通过该模型,研究者能够直接分析制动踏板输入到制动钳输出的整个回路中任一部件的动态响应。通过完整制动灰度动态仿真,研究者可以计算得到每个制动盘上产生的制动力随制动踏板上所受力的变化,从而了解整个系统的动态特性,找到影响制动系统性能的主要因素,尽量做到设计的准确性,减少后期试验次数,缩短研发周期,降低研发设计成本,为未来制动系统的开发提供了一种全新的思路。

### 参考文献(References):

- [1] 花庆荣,陈世杰. 室轿车制动踏板感觉评估与制动感觉指数[J]. 上海汽车,2008(6)6:35-37,46.
- [2] J.D.Power. IQSAPEAL报告[R]. J.D.Power,2012.
- [3] ITI公司. SimulationX[M]. ITI公司,2002.
- [4] 刘艳芳. SimulationX精解与实例:多学科领域系统动力学建模与仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [5] 方泳龙. 制动理论与设计[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [6] 德国BOSCH公司. 汽车工程手册[M]. 2版.北京:北京理工大学出版社,2004.
- [7] 赵凯. 汽车真空助力器的原理及参数计算[J]. 汽车技术,2001(1):1-4.
- [8] 全国汽车标准化技术委员会. GB21670-2008 乘用车制动系统技术要求及试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [9] 全国汽车标准化技术委员会.GB12676-1999 汽车制动系统结构、性能和试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [10] 陈家瑞.汽车构造[M]. 4版. 北京:人民交通出版社,2005.

[编辑:张翔]