



线控制动系统设计与分析虚拟仿真教学平台

于蕾艳, 李云祥, 石永军, 侯泽宇, 吴永辉, 陈科燃, 郭营宗

(中国石油大学(华东)机电工程学院, 青岛 266580)

摘要: 无人驾驶汽车线控底盘的设计方法与性能分析是车辆工程专业新工科教学的重要内容。本文为清晰展示线控制动系统的结构设计和性能分析过程, 融合多款软件开发了用户界面友好的虚拟仿真教学平台。基于 MATLAB GUI 完成了平台人机界面设计, 编写了回调函数, 进行了线控制动系统的详细设计; 基于 AutoCAD 设计了关键零部件的二维图纸; 基于 SOLIDWORKS 搭建了三维模型; 基于 ANSYS 进行了制动盘等关键零部件模态分析和瞬态力学性能分析。平台实现了设计过程与性能分析有效联接、可视化、直观显示, 提升了学生面向新工科的线控底盘创新设计能力和性能分析方面的工程应用能力。

关键词: 无人驾驶汽车; 线控制动系统; 设计; 性能分析; 虚拟仿真教学平台

中图分类号: G642

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220440

Virtual Simulation Teaching Platform for Design and Analysis of Brake-by-Wire System

YU Leiyan, LI Yunxiang, SHI Yongjun, HOU Zeyu, WU Yonghui, CHEN Keran, GUO Yingzong

(College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: The design methods and performance analysis of chassis by wire for driverless vehicle are important for the new engineering teaching of the vehicle engineering specialty. In order to clearly show the structure design and performance analysis process of the brake-by-wire system, a user-friendly virtual simulation teaching platform was developed based on the multiple software. Firstly, the human-machine interface design of the platform was completed based on MATLAB GUI, showing design and analysis process, and the detailed design of the brake-by-wire system was carried out to write callback functions. Secondly, 2D drawings of key components were drawn based on AutoCAD. Thirdly, 3D models were built based on SOLIDWORKS to realize system movement process demonstration. Finally, the modal analysis and transient mechanical performance analysis of key components, such as brake disc, were carried out with ANSYS. The results show force changes of brake disc during braking and the possible failure forms under different modes. The platform realizes the integration and visualization of design process and performance analysis, and improves students' innovative design ability of new engineering and engineering application ability of performance analysis.

Key words: driverless vehicle; brake-by-wire system; design; performance analysis; virtual simulation teaching platform

汽车线控底盘包括线控制动系统、线控转向系统和线控驱动系统等, 结构简化、控制灵活, 是无人驾驶汽车控制执行的核心技术^[1]。线控制动系统相比传统制动系统, 具有动态响应速度快、制动力反应迅速的优点, 能够对无人驾驶汽车的制动过程进行更精细的自动控制, 提升无人驾驶汽车在面对复杂交通场景时的安全性和稳定性。线控制动系统包括电子液压制动(electro-hydraulic

brake, EHB)系统和电子机械制动(electro-mechanical brake, EMB)系统等^[2]。由于 EMB 比 EHB 具有提高乘坐舒适性、缩短制动响应时间与制动距离、提高行驶安全性、结构紧凑、轻量化和节能减排等优点, 更符合汽车智能化、网联化、共享化和电动化的发展方向, 所以, 本文以 EMB 为例, 进行无人驾驶汽车线控制动系统设计与分析虚拟仿真教学平台的开发。国内外在 EMB 设计方

收稿日期: 2022-07-13; 修回日期: 2023-09-03

基金项目: 山东省研究生教育优质课程建设项目(SDYKC21027); 教育部产学合作协同育人项目(220505209254133); 中国石油大学(华东)研究生教育教学改革项目(YJG2022036)。

作者简介: 于蕾艳(1980-), 女, 博士, 副教授, 主要从事智能汽车动力学与控制技术方面的研究。E-mail: yulyx2009@163.com

法和性能分析等方面取得了一定研究进展。

1 EMB 的设计方法与性能分析

1) EMB 的设计方法

由上层控制器和 4 个 EMB 执行机构组成，在驾驶模拟器进行实验，提高极限工况下车辆动力学和安全性^[3]。步进电机和蜗杆传动提高了动态稳定性和可靠性^[4-5]。基于磁流变效应的 EMB 根据路面附着系数变化实时精准、稳定调节制动力矩^[6]。楔形增力型 EMB 采用电机—行星齿轮减速器—滚珠丝杠传动将电机转动变为直线运动，滚珠丝杠为楔形结构，活塞推动摩擦衬块，传动比较大，结构紧凑^[7]。

2) EMB 的性能分析

主要包括 EMB 控制算法效果分析、动力学分析和有限元分析等。如 EMB 控制算法效果分析方面，基于逆模型的摩擦补偿控制策略提高 EMB 摩擦衬块定位跟踪性能，实验结果较好^[8]。动力学分析方面，针对执行器零部件设计参数，在 ADAMS 建立了动力学模型，确定了执行器性能的主要影

响因素，优化设计后质量降低、性能提高^[9]。用 Simulink 对基于钢球和楔形斜面增力机构的 EMB 进行动态性能分析，快速提供制动力、提高制动效能，改善主动安全性^[10]。用 ADAMS 对重型汽车 EMB 制动器运动学和动力学性能仿真分析^[11]。EMB 有限元分析方面，用 ANSYS 对主要零部件进行力学性能分析、优化和振动模态分析^[12]。在 Workbench/Magnetostatic 进行电机三维静态电磁仿真，用 ANSYS/Mechanical APDL 优化设计^[13]。

无人驾驶汽车线控制动系统设计与性能分析是车辆工程专业新工科的重要教学内容。但目前国内没有专门的线控制动系统设计与分析虚拟仿真教学平台，无法实现线控制动系统设计过程、性能分析过程的智慧型案例教学^[14-15]。为促进车辆工程专业创新型新工科人才培养，体现以学生为中心的研究性教学理念，促进学生在线控制动系统的设计过程、性能分析过程的实践，提升知识迁移和运用能力，以如图 1 所示的楔形增力型 EMB 结构为基础，融合多软件平台开发了无人驾驶汽车线控制动系统设计与分析虚拟仿真教学平台。

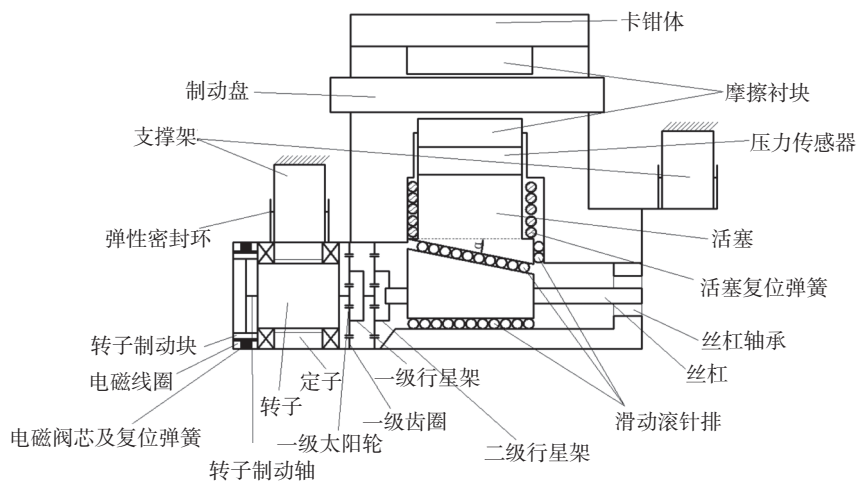


图 1 楔形增力型 EMB 的结构

2 平台的总体架构

为体现模块化特色、以学生为中心的教学理念，考虑学生学习特点，设计平台总体架构如图 2 所示，包括设计与分析流程模块、详细设计模块和性能分析模块，通过主界面启用各模块功能。“设计与分析流程”模块的功能是引导用户按设计流程输入参数，高效得到设计与性能分析结果。以 MATLAB 2021b 为开发环境，MATLAB 编

程、编写回调函数，实现绘制制动相关曲线及图像、计算制动参数和详细设计等功能。用三维建模软件 SOLIDWORKS 实现线控制动系统的三维建模和运动演示功能，用二维绘图软件 AutoCAD 实现关键零部件图纸绘制等功能，用有限元分析软件 ANSYS 实现关键零部件有限元分析。各页面设提示栏，具有良好的人机交互性，设计过程与性能分析过程一体化，有利于缩短优化设计周期和提升性能。

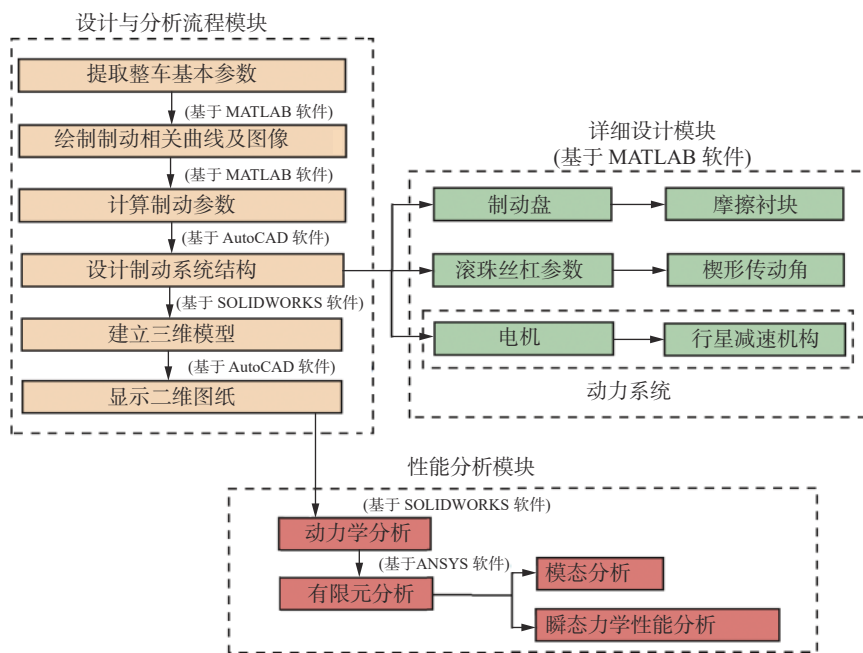


图 2 平台的总体架构

3 基于 MATLAB GUI 的平台界面设计

利用 MATLAB GUI 设计平台的主界面和子界面, 由主界面引出相应的子界面。每个界面由按钮、静态文本和编辑框等图形对象组成, 为图形对象编写回调函数, 实现数据获取、处理、计算、图像绘制与显示等功能。

如图 3 所示, 平台的主界面分为蓝色、浅灰色和深灰色 3 大功能区域。蓝色区域为制动系统设计与分析流程区, 箭头所指顺序即线控制动系统整体设计思路, 按照流程点击各按钮展示各模块具体内容。按照底部提示栏逐步操作。浅灰色区域为线控制动系统详细设计区, 实现制动盘、滚珠丝杠和动力系统等关键零部件设计计算。深灰色区域为线控制动系统性能分析区, 点击按钮, 得到制动时线控制动系统动力学分析、制动盘模态分析和瞬态力学性能分析等有限元分析结果, 检验设计的合理性。

4 设计与分析实例

4.1 设计与分析流程

通过线控制动系统设计与分析实例说明展示设计过程、动力学分析和关键零部件有限元分析过程和结果。在图 3 中主界面设计与分析流程区域按箭头所示顺序逐步操作, 点击按钮, 弹出对应子界面。

1) 点击“提取整车基本参数”按钮, 出现如图 4 所示的“整车基本参数”子界面, 在子界面下拉列表选中“2022 款奥德赛 2.0 L e:HEV 悦·悦享版车型”, 显示车型详细参数, 平台可据此绘制与选中车型制动性能相关的参考曲线与图像, 进一步确立制动系统设计目标。



图 3 平台的主界面

2) 点击“绘制制动相关曲线及图像”按钮, 出现如图 5 所示的“制动相关曲线及图像”子界面, 点击左侧系列按钮, 选择需要参考的曲线及图像类型, 通过对按钮编写的回调函数、基于所选车型的参数计算、绘图, 在右侧图像区生成相关曲线及图像。单击“制动曲线及图像汇总”时, 展现制动器制动力分配曲线、制动效率

图等多种曲线及图像，对比分析，根据制动法规进行整车制动性能校核。满载同步附着系数初步定为 0.9；参考制动相关曲线及图像，拟定前轴地面最大制动力为 14 000 N，后轴地面最大制动力为 6 600 N。

3) 在“计算制动参数”子界面中点击“参数计算”按钮，平台根据相关公式^[16]计算质心参数和整车制动参数。

4) 点击“参数计算”按钮出现如图 6 所示界面，显示了参数计算结果，根据设计经验^[17]，乘用车的最大制动减速度应不低于 0.85 g，计算所得的最大制动减速度满足要求。

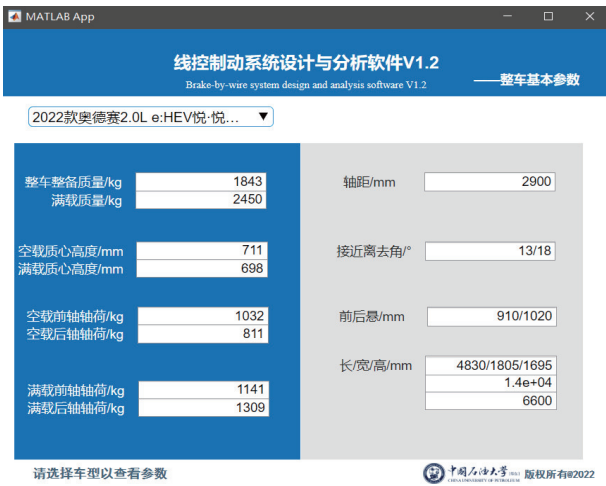


图 4 “整车基本参数”子界面

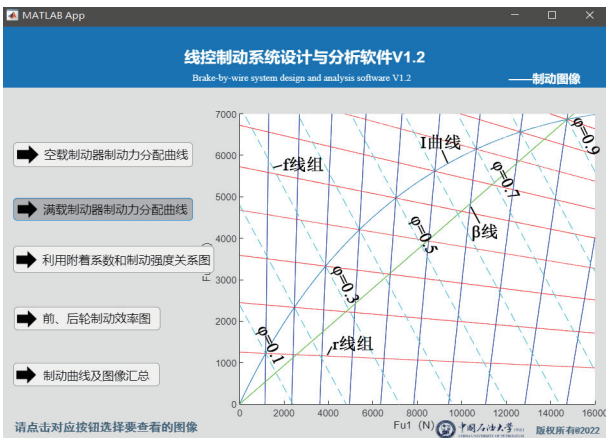


图 5 “制动相关曲线及图像”子界面

5) 在主界面点击“设计制动系统结构”按钮，进入其子界面得到类似图 1 的 EMB 组成图；点击“设计三维模型”按钮，进入其子界面显示线控系统装配体三维模型；点击“显示二维图纸”按钮，进入其子界面中可以查看 AutoCAD 已绘制好的关键零部件二维图纸，依次点击子界

面中各个按钮即显示对应模型或零件二维图，部分显示结果如图 7 所示。



图 6 点击“参数计算”按钮后的界面

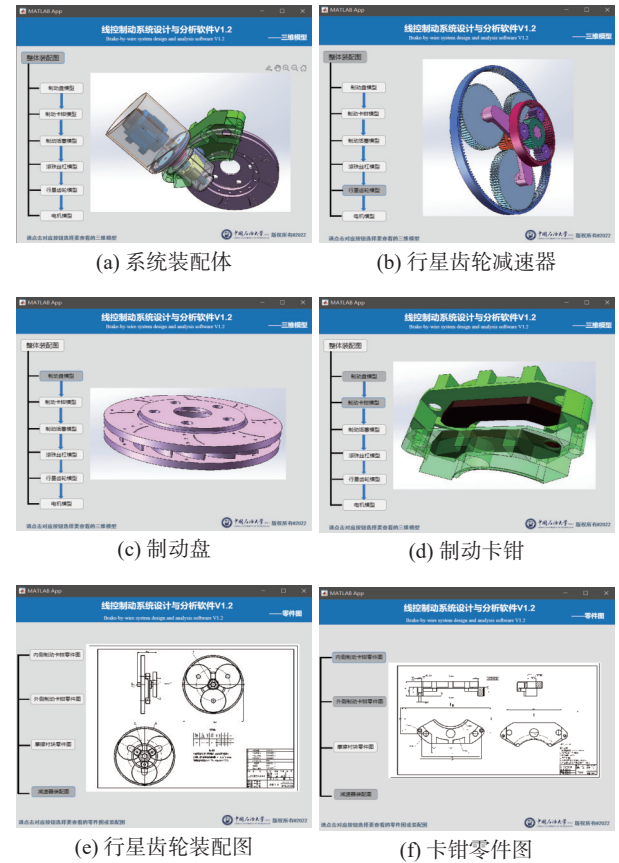


图 7 “设计三维模型”“显示二维图纸”界面

4.2 线控系统结构设计

在详细设计区选择“制动盘”“摩擦衬块”等按钮，进行零部件详细设计。

1) 制动盘和摩擦衬块设计

点击“制动盘”按钮，弹出如图 8(a)所示的“制动盘参数设计”子界面，输入轮胎直径，得

到制动盘允许尺寸范围。前面所选轮胎为 16 英寸, 点击“确认”按钮后, 制动盘所允许最大半径为 321.1 mm, 最小半径为 284.5 mm。点击“摩擦衬块”按钮, 出现如图 8(b)所示的子界面, 输

入摩擦衬块外半径、摩擦衬块内半径和单个摩擦衬块面积, 点击“确认”后, 得到摩擦衬块设计结果, 符合右下角红色提示栏要求, 保证摩擦衬块尺寸合理和磨损均匀。



(a) “制动盘参数设计”子界面



(b) “摩擦衬块”子界面



(c) “楔形传动角优化设计”子界面



(d) “行星齿轮减速机构”子界面

图 8 设计界面

2) 滚珠丝杠的设计

点击“滚珠丝杠”按钮, 查看选型设计要求。在如图 8(c)所示的“楔形传动角优化设计”子界面中进行楔形传动角优化设计。界面左侧显示了选用的楔形结构参数, 右侧可输入相关力的数值, 基于 MATLAB Fmincon 函数计算出楔形结构传动比、最佳角度和滚珠丝杠的实际最大轴向推力。以“楔形传动角优化设计”为例, 展示回调函数。在主界面中对“楔形传动角优化设计”界面进行调用, 回调函数代码如下:

```
function
zhidongpan_2ButtonPushed(app,event)
```

xiexingchuandong;

end

建立优化设计数学模型: 以传动比最大为设计目标, 楔形传动角为设计变量, 材料接触面许用应力和制动器最大制动力为约束条件, 进行楔形传动角优化设计, 部分回调函数代码如下:

```
fun3=@(x)-1/tan(x(1))
x0=[0.3,0];
function [g,h]=fun4(x);
g(1)=cos(x(1))+8560/9877;
g(2)=13.3/20-tan(x(1));
g(3)=8560*tan(x(1))-3030;
```

```

h=[];
end;
A=[];
B=[];
Aeq=[];
Beq=[];
LB=[0,8 560];
UB=[pi/4,8 560];
NONLCON=@fun4;
[x,y]=fmincon( fun3,x0,A,B,Aeq,Beq,LB,UB,N
ONLCON);
app.TextArea.Value= num2str(y);
app.EditField_3.Value=(atan(1/(-1*y)))*57.3;
app.EditField.Value=9 877;
app.EditField_2.Value=3 030;
app.EditField_4.Value=3 565;
优化的最佳楔形传动角为 20°。
    
```

3) 动力系统设计

动力系统由永磁同步电机和 2K-H 型行星齿轮减速机构组成。依照前面的设计结果，进行动力系统的设计。点击主界面“行星齿轮减速机构”，出现如图 8(d)所示的“行星齿轮减速机构”子界面。输入太阳轮齿数、行星轮齿数及行星轮数量后，单击“确认”按钮，得到计算结果，满足右下角中提示栏均布条件、邻接条件、同心条件和最小齿数限制，保证行星齿轮减速机构运转平稳，轮齿磨损均匀，避免轮齿干涉和根切。

完成行星齿轮减速机构设计后，点击“电机”按钮，进入其子界面，查看电机参数；点击“动力系统参数”按钮，进入其子界面查看电机和减速机构组成的动力系统相关参数。

4.3 线控制动系统的性能分析

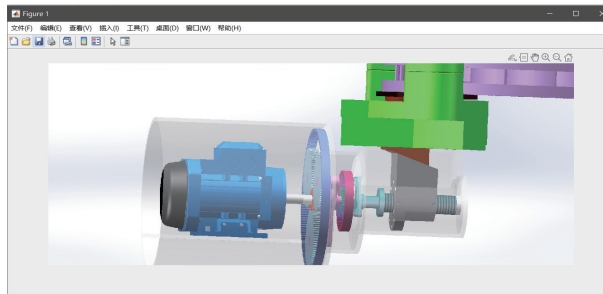
在线控制制动系统分析区点击分析类型按钮，进行详细分析。

1) 动力学分析

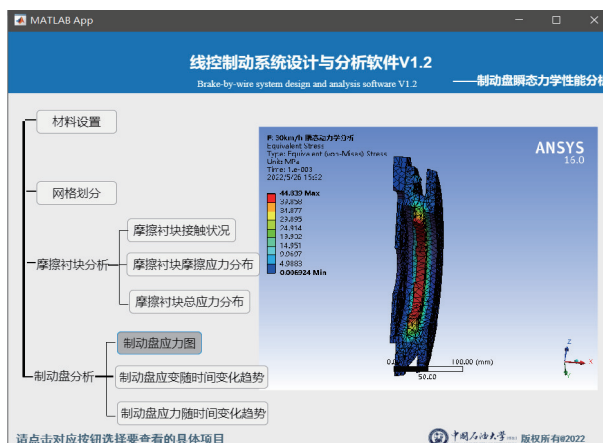
如图 9(a)所示，“动力学分析”界面展示了线控制制动系统三维模型运动仿真动画和动力传递过程，对关键接触部分运动过程局部放大，加深了用户对线控制制动系统结构和运动过程的理解。

2) 制动盘的瞬态力学性能分析

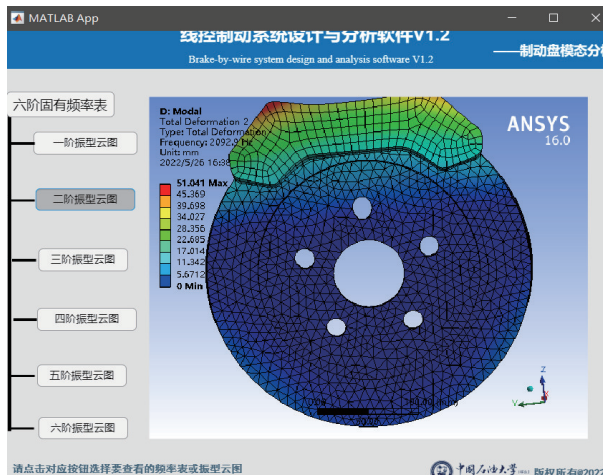
在制动盘瞬态力学性能分析中，车辆设计行驶车速为 30 km/h，以最大制动强度进行制动，制动盘和摩擦衬块相关参数设置如表 1 所示。



(a) “动力学分析”子界面



(b) “制动盘瞬态力学性能分析”子界面



(c) “制动盘模态分析”子界面

图 9 性能分析界面

表 1 制动盘和摩擦衬块相关参数

参数	材料	
	ZG ₁ Cr ₁₃ (制动盘)	树脂基复合材料 (摩擦衬块)
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 228	2 150
热膨胀系数 a/K^{-1}	4.39×10^{-6}	11.65×10^{-6}
弹性模量 E/GPa	175.00	2.20
泊松比 ν	0.30	0.30
摩擦系数 f	0.40	0.40

选择“制动盘瞬态力学性能分析”，在弹出的子界面点击不同按钮，可以查看制动盘和摩擦

衬块材料设置、网格划分情况及摩擦衬块接触状况、摩擦衬块摩擦应力、总应力分布情况、制动盘应力分布、制动盘应变和应力随时间变化的分析结果。如图9(b)所示的“制动盘瞬态力学性能分析”子界面显示了制动瞬间制动盘纵剖面上的应力分布情况,应力从中心肋板处向两侧递减,中心肋板处最大应力值为44.839 MPa,制动盘所用材料ZG1Cr13的抗拉强度 ≥ 540.000 MPa,抗剪强度 ≥ 270.000 MPa,中心肋板处所受最大应力远小于上述值,制动盘的瞬态力学性能满足使用要求。

3) 制动盘的模态分析

如图9(c)所示的“制动盘模态分析”子界面显示了制动盘前六阶固有频率表和振型云图,判断制动盘共振频率和共振可能的破坏位置。

5 结束语

集成 MATLAB GUI 人机界面设计功能、MATLAB 计算与绘图功能、AutoCAD 绘图功能、SOLIDWORKS 三维建模和动画演示功能、ANSYS 有限元分析功能,开发了无人驾驶汽车线控制动系统设计与分析虚拟仿真教学平台,具有定制化、模块化和智慧教学等特色,设计和分析流程思路清晰,各界面有提示栏。选定车型数据,进行设计和性能分析,提高设计计算效率、缩短设计周期。用于汽车理论、汽车设计等理论课程,提升无人驾驶汽车设计与性能分析虚拟仿真教学效果,加深学生对车辆设计理论与方法的理解,提升学生的创新设计能力;用于毕业设计等实践课程,提升毕业设计质量和创新性。

未来研究将完善线控转向系统设计与分析模块,丰富车型数据,加强无人驾驶汽车新工科案例库建设,促进车辆工程专业一流专业和一流课程建设。

参考文献

- [1] 于蕾艳. 汽车线控技术[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2013.
- [2] 周明岳, 武振江, 冯天骥. 线控制动技术现状及趋势综述[J]. 中国汽车, 2020(7): 51-57.
- [3] MONTANI M, CAPITANI R, ANNICCHIARICO C. Development of a brake by wire system design for car stability controls [C]//AIAS 2019 International Conference on Stress Analysis. [S.l.]: ELSEVIER, 2019(24): 42-47.
- [4] 罗洋坤. 基于无人驾驶汽车的线控制动装置的设计与控制[J]. 电子元件与信息技术, 2021, 5(11): 181-182.
- [5] 张明容, 李景彬, 袁敏. 一种汽车线控制动系统的设计及实现[J]. 中国新技术新产品, 2021(10): 37-39.
- [6] 周邵云, 周亚琴, 上官尧, 等. 基于磁流变制动器的自供能式汽车线控制动系统的设计与分析[J]. 电子测试, 2017(8): 112-113.
- [7] 杨岩松. 基于楔形传动的电子机械线控制动系统的设计与研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [8] HOLWEG E G M, KLOMP R L, KLAASSENS J B, et al. Modeling and inverse model-based control of an electro-mechanical brake actuator[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2000, 33(26): 39-44.
- [9] 卢甲华. 汽车EMB系统性能分析与优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [10] 金智林, 赵曰贺, 赵峰, 等. 汽车电控机械制动系统设计及性能分析[J]. 机械设计与制造, 2014(6): 28-30.
- [11] 申伶. 电控机械式制动器(EMB)机械系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [12] 傅云峰. 汽车电子机械制动系统设计及其关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [13] 刘洋. 磁流变传动线控制动器结构原理与小尺寸原型实验[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [14] 于蕾艳, 郑亚军, 吴宝贵. 汽车线控转向系统实验平台开发[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(4): 5-9.
- [15] 杨峰, 张伟静, 史林波, 等. 基于电动汽车创新创业复合实验班的新工科人才培养实践[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(5): 124-128.
- [16] 余志生. 汽车理论[M]. 6版. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [17] 韩朋玉. 浅析某纯电动汽车同步附着系数的选择[C]//第十二届河南省汽车工程科技学术讨论会论文集. 焦作: 河南省汽车工程学会, 2015.

编辑 葛晋