电子机械制动踏板模拟器刚度特性仿真分析*

孙曙光　闫鲁平　杨涛　张建斌　蒋帅　隋清海

（中国第一汽车股份有限公司研发总院，长春 130013）

【欢迎引用】孙曙光，闫鲁平，杨涛，等．电子机械制动踏板模拟器刚度特性仿真分析[J]．汽车文摘，2026(7)：32-36.

【Cite this paper】SUN S G, YAN L P, YANG T, et al. Simulation Analysis of Stiffness Characteristics for Electro-Mechanical Brake Pedal Simulator[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(7): 32-36.

【摘要】为获得优异的制动踏板操纵感，支撑电子机械制动踏板模拟器高效设计，以制动踏板刚度特性为核心目标，在AMESim仿真平台构建电子机械制动踏板模拟器各关键元件的动力学模型，对踏板系统动态特性进行仿真分析。基于所建模型，探究弹簧组件预紧力、最大可压缩行程以及弹簧刚度对制动踏板刚度特性的影响规律，明确参数与刚度特性的量化映射关系，形成基于制动踏板刚度目标的参数正向分解方法，为电子机械制动踏板模拟器设计提供参考。

关键词：踏板模拟器；刚度特性；仿真；敏感度分析

中图分类号：U463.55　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250197

Simulation Analysis of Stiffness Characteristics for Electro-Mechanical Brake Pedal Simulator

Sun Shuguang, Yan Luping, Yang Tao, Zhang Jianbin, Jiang Shuai, Sui Qinghai

(Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013)

【Abstract】To achieve an excellent brake pedal feeling and support the efficient design of electromechanical brake pedal simulator, this paper takes the brake pedal stiffness characteristics as the core objective. Dynamic models of key components of the electromechanical brake pedal simulator are established on the AMESim simulation platform, and the dynamic performance of the pedal system is analyzed via simulation. Based on the developed models, the paper systematically investigates the influences of the preload force, maximum compressible stroke and spring stiffness of the spring assembly on the brake pedal stiffness characteristics, and clarifies the quantitative mapping relationship between parameters and stiffness performance. A forward parameter decomposition method targeting brake pedal stiffness is proposed, which provides a reference for the design of electromechanical brake pedal simulator.

Key words: Pedal simulator, Stiffness characteristics, Simulation, Sensitivity analysis

0　引言

随着新能源汽车与智能驾驶技术的快速发展，传统的液压制动系统正逐步向电子化、智能化的线控制动系统（Brake By Wire，BBW）演进[1]。在线控制动系统中，驾驶员踩下制动踏板的制动力不再直接通过液压管路传递，而是由传感器采集踏板行程或角度信号，交由电子控制单元（Electronic Control Unit，ECU）识别驾驶意图，并结合车辆状态计算目标制动力，最终通过电机制动执行器实现制动。由于BBW取消了机械连接，驾驶员无法通过传统方式感受真实的制动反馈，因此需要在制动踏板总成中设计专门的踏板操纵感模拟装置，以提供符合人机工程学的力学反馈，确保驾驶员获得稳定、可预期的制动操作感。其中，制动踏板的刚度特性是影响驾驶感受的关键因素，其性能受踏板硬点布置、弹簧参数及转轴摩擦等多种因素共同影响。

踏板感模拟装置分为湿式踏板模拟器和干式踏板模拟器。湿式踏板模拟器一般用于线控液压制动系统，干式踏板模拟器一般用于电子机械制动系统。

*基金项目：2023年度一汽自主创新（关键核心技术研发）重大科技专项“适应智能化、少件化发展的冗余线控机械制动关键技术研究”（20230301022ZD）。

文献[2]和文献[3]分别对2种不同的湿式踏板模拟器建立了AMESim仿真模型并进行了踏板刚度仿真分析，文献[4]针对湿式踏板模拟器建立了状态空间方程和Simulink仿真模型。

目前，针对干式踏板模拟器刚度特性仿真的研究较少，参数匹配多依赖经验设计与反复调试，开发效率较低。本文针对一种干式电子机械制动踏板模拟器提出一种踏板刚度特性仿真分析方法，以期为电子机械制动踏板模拟器方案设计提供参考。

1 电子机械制动踏板模拟器结构和工作原理

1.1 电子机械制动踏板模拟器结构

如图1所示，电子机械制动踏板模拟器结构包括踏板臂组件、踏板臂转轴、主转角传感器、辅转角传感器、摩擦组件、弹簧组件、踏板支架和限位橡胶。踏板臂组件可以围绕踏板臂转轴运动；弹簧组件一端与踏板臂组件铰链连接，另一端与摩擦组件铰链连接；摩擦组件与踏板支架铰链连接，可以围绕踏板支架运动，摩擦组件与踏板臂组件贴合并施加正压力；限位橡胶安装于踏板支架。

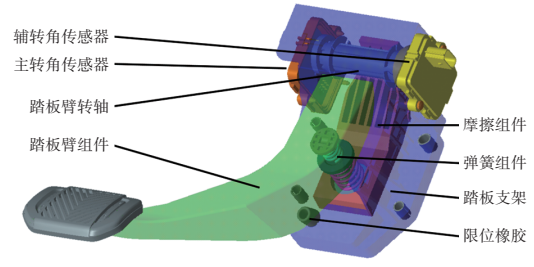


图1 电子机械制动踏板模拟器结构

如图2所示，弹簧组件结构包括弹簧座1、弹簧座2、弹簧座3、弹簧1和弹簧2。弹簧组件两端分别与踏板臂组件和摩擦组件铰链连接。

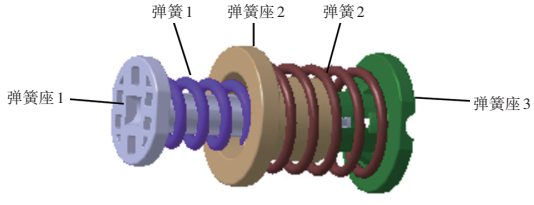


图2 弹簧组件结构

1.2 电子机械制动踏板模拟器工作原理

当驾驶员未踩制动踏板时，踏板臂组件在弹簧组件预紧力、支架对踏板臂的限位力共同作用下保持静止。

当驾驶员踩下制动踏板时，踏板臂组件绕轴转动，该过程同时引发电信号与机械响应。一方面，转角传感器随踏板臂组件转动产生电信号，该信号通过硬线传递至与之相连接的ECU。另一方面，踏板臂组件绕转轴运动受到3个阻力作用：(1)踏板臂组件在绕踏板臂转动过程中压缩弹簧组件，导致弹簧组件反作用力增大；(2)经铰接点推压摩擦组件，使其围绕支架组件运动或产生运动趋势，增大了摩擦组件对踏板臂组件的压力，进而产生阻碍踏板臂组件转动的摩擦力矩；(3)当踏板臂组件运动至触及限位橡胶时，限位橡胶受压变形产生阻力。因此，施加在踏板上的踩踏力需克服上述弹簧力、摩擦力矩以及限位橡胶变形阻力。

2 电子机械制动踏板模拟器刚度特性仿真

2.1 仿真模型

电子机械制动踏板模拟器的运动可等效为平面内多体耦合运动，建立X、Z平面坐标系，提取电子机械制动踏板模拟器关键硬点，如图3所示。其中，A点为驾驶员踩踏人机点，B点为踏板臂初始位置限位中心点，C点为踏板臂转动中心点，D点为弹簧组件与踏板臂铰接点，E点为踏板臂与限位橡胶接触位置中心点，F点为限位橡胶与踏板臂接触位置中心点，G点为限位橡胶与踏板支架安装面中心点，I点为弹簧组件与摩擦组件铰接点，J点为摩擦组件绕踏板支架转动中心点，K点为摩擦组件中摩擦材料上表面中心点，L点为摩擦组件中摩擦材料下表面中心点。

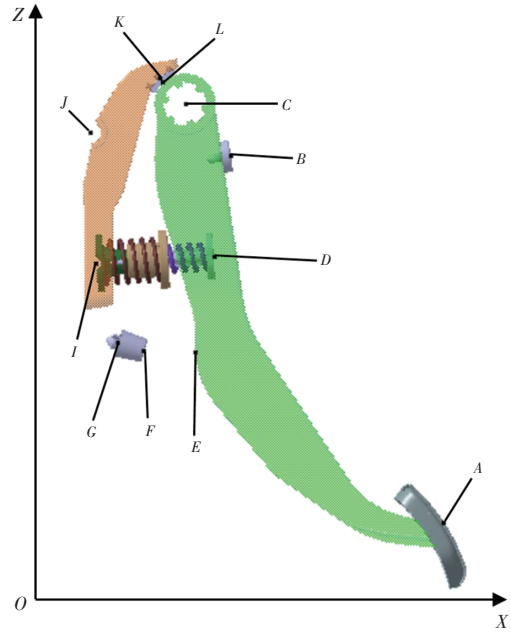


图3 制动踏板硬点坐标系

利用AMESim软件中的信号库、一维机械元件库和二维机械元件库建立基于关键硬点的电子机械制动踏板模拟器仿真模型，如图4所示。某车型的电子

机械制动踏板模拟器初始位置硬点参数如表1所示，其他参数信息如表2所示。

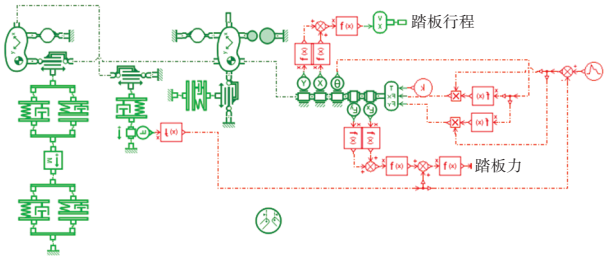


图4　电子机械制动踏板模拟器仿真模型

表1　电子机械制动踏板模拟器初始位置硬点参数　mm

参数	X坐标	Z坐标
A点坐标	1 604.890	1 235.730
B点坐标	1 522.950	1 463.420
C点坐标	1 502.680	1 496.900
D点坐标	1 503.840	1 409.040
E点坐标	1 483.830	1 357.020
F点坐标	1 455.310	1 363.780
G点坐标	1 441.370	1 370.550
I点坐标	1 437.310	1 416.960
J点坐标	1 447.380	1 490.390
K点坐标	1 490.975	1 514.010
L点坐标	1 492.560	1 511.470

表2　电子机械制动踏板模拟器其他参数

参数	数值
弹簧1预紧力/N	20
弹簧1刚度/N·mm^{-1}	2.5
弹簧1阻尼/N·s·mm^{-1}	1
弹簧1最大可压缩行程/mm	7
弹簧2预紧力/N	20
弹簧2刚度/N·mm^{-1}	35
弹簧2阻尼/N·s·mm^{-1}	1
弹簧2最大可压缩行程/mm	19.24
限位橡胶刚度/N·mm^{-1}	120
限位橡胶阻尼/N·s·mm^{-1}	10
摩擦材料刚度/N·mm^{-1}	10^9
摩擦材料阻尼/N·s·mm^{-1}	1
摩擦材料与踏板臂组件的摩擦因数	0.4
踏板臂转轴半径/mm	17.2
踏板臂组件质量/kg	0.7
摩擦组件质量/kg	0.5
踏板臂组件绕质心转动惯量/kg·mm^2	0.02
摩擦组件绕质心转动惯量/kg·mm^2	0.01

2.2　仿真结果

模型输入的踏板力在3 s内由0增大至500 N，模拟驾驶员踩下制动踏板，如图5所示。

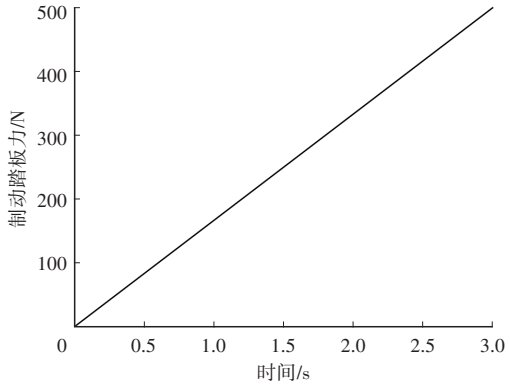


图5　电子机械制动踏板模拟器模拟输入力

仿真模型输出制动踏板力和踏板行程仿真曲线如图6所示，踏板刚度随踩踏进程发生阶段性切换，以此适应驾驶员不同程度的制动需求。结合模型仿真过程对具体工作过程进行分析，如图7所示。

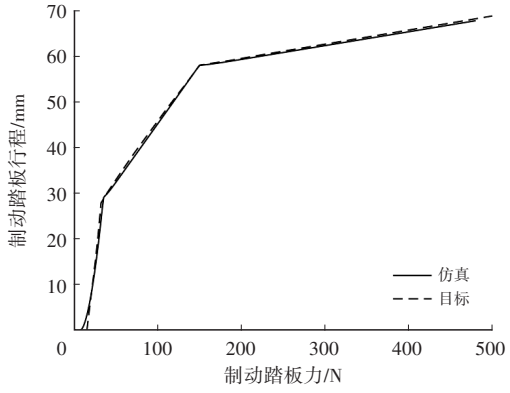


图6　电子机械制动踏板模拟器踏板刚度仿真

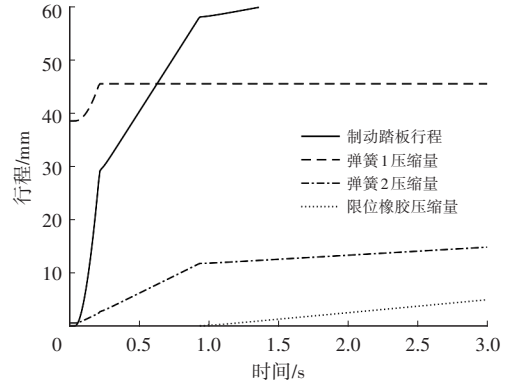


图7　电子机械制动踏板模拟器仿真模型位移运动

此工况下电子机械制动踏板模拟器内部各部件的运动顺序如下：(1)驾驶员施加制动力时，踏板臂组件克服弹簧组件预紧力和摩擦组件对踏板臂组件的摩擦力后开始运动。弹簧组件中的弹簧1和弹簧2受到压缩，导致弹簧组件的反作用力增大，传递至摩擦组件的推力、摩擦材料对踏板臂组件的压力、摩擦组

件与踏板臂组件之间的摩擦力均同步增大。在此过程中,弹簧1、弹簧2和摩擦组件共同模拟助力器跳增前的踏板力反馈,此时踏板刚度和踏板力均较小,驾驶员可以较轻松获得所需制动减速度。(2)随着踏板力持续增加,弹簧组件被进一步压缩,由于弹簧1的刚度和最大可压缩行程均小于弹簧2,弹簧1率先达到最大行程。当弹簧座1与弹簧座2接触时,弹簧1停止工作,弹簧2继续受到压缩。由于弹簧2的刚度大于弹簧1与弹簧2串联的等效刚度,此段可以模拟驾驶员踩踏达到跳增后产生制动压力的力学反馈特性,对应中度制动踏板刚度阶段。(3)随着踏板力进一步增大,弹簧2持续压缩直至踏板臂组件与限位橡胶发生接触。此时,踏板臂除了受到弹簧组件阻力和摩擦组件摩擦阻力外,还受到限位橡胶阻力。此段用于模拟真空助力器达到最大助力点后,无法继续提供助力时的力学反馈特性。

3 参数敏感度分析

影响电子机械制动踏板模拟器踏板刚度特性的因素主要包括电子机械制动踏板模拟器关键硬点、弹簧组件刚度、弹簧组件阻尼、踏板臂转轴半径、摩擦组件与踏板臂组件之间的摩擦因数、限位橡胶刚度、限位橡胶阻尼。本文基于上述因素建立动力学模型和仿真模型,从弹性元件的变形角度出发,研究弹簧组件预紧力、刚度和最大可压缩行程对踏板刚度特性的影响。

3.1 弹簧组件预紧力敏感度分析

不同弹簧组件预紧力对踏板刚度特性的影响如图8所示。弹簧组件预紧力越大,相同踏板行程下的踏板力越大,弹簧组件预紧力对踏板刚度的影响表现为曲线形态保持不变,但位置整体发生偏移。

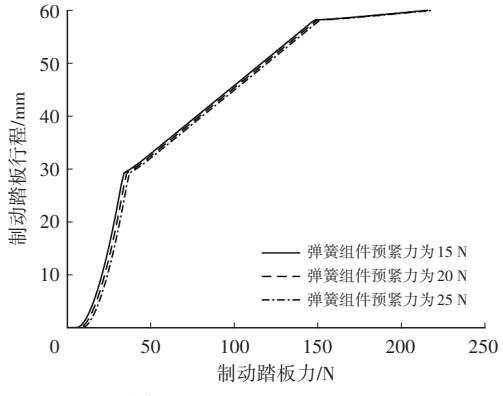


图8 不同弹簧预紧力对制动踏板刚度特性的影响

3.2 弹簧组件最大可压缩行程敏感度分析

此处采用3种最大可压缩行程不同的弹簧1进行踏板刚度特性仿真,对比结果如图9所示。弹簧1的最大可压缩行程越大,助力跳增点越大,助力段相应的踏板力越小。

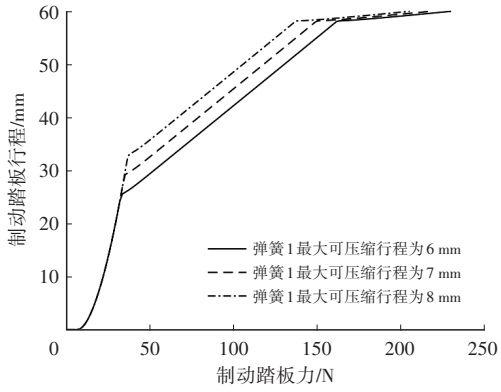


图9 弹簧最大可压缩行程对踏板刚度特性的影响

3.3 弹簧组件刚度敏感度分析

3.3.1 弹簧1刚度

此处采用3种不同刚度的弹簧1进行踏板刚度特性仿真,对比结果如图10所示。弹簧1的刚度对跳增前的踏板刚度影响较小。

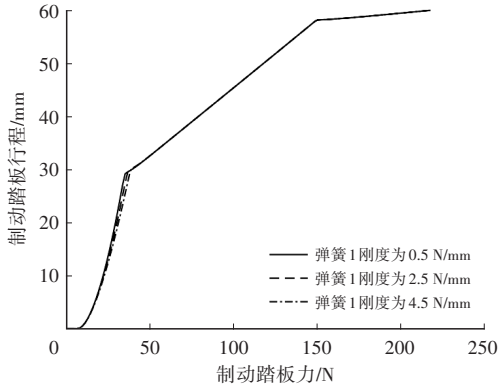


图10 弹簧1刚度对制动踏板刚度的影响

3.3.2 弹簧2刚度

此处采用3种不同刚度的弹簧2进行踏板刚度特性仿真分析,对比结果如图11所示。弹簧2的刚度对助力段的踏板刚度影响较大,但不影响最大助力点。

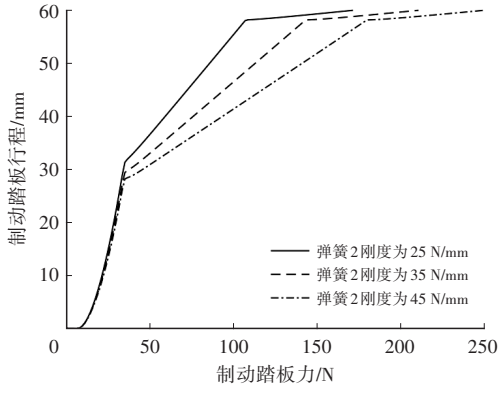


图11 弹簧2刚度对制动踏板刚度的影响

4 结束语

本文从电子机械制动踏板模拟器的物理结构和工作原理出发，建立基于AMESim的电子机械制动踏板模拟器动力学仿真模型，进行踏板刚度特性仿真分析，通过模型中弹簧组件的预紧力、最大可压缩行程和弹簧刚度关键参数对踏板刚度特性影响的敏感度分析，得出关键参数的设定对踏板刚度特性的影响。弹簧组件预紧力及弹簧1刚度对制动踏板刚度影响不明显；弹簧组件最大可压缩行程与踏板刚度呈负相关；弹簧2刚度对制动踏板影响较大，但对最大助力点无显著影响。后续可根据整车制动踏板刚度目标进行正向分解，指导电子机械制动踏板模拟器方案设计，从而获得优异的制动踏板操纵感。

参 考 文 献

[1] 苑春霞, 张树乾. 线控制动技术发展与标准研究[J]. 汽车知识, 2025, 25(6): 51-53.

[2] 蒋帅, 隋清海, 郝占武, 等. 集成式制动系统踏板感觉仿真分析[J]. 汽车工程师, 2023(1): 31-37

[3] 金智林, 施瑞康, 赵又群, 等. 联合AMESim/Matlab的汽车制动踏板模拟器动态性能分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2011, 25(1): 1-4.

[4] 阴法国. 集成式电液制动系统踏板感觉研究[D]. 广州：华南理工大学, 2021.

（责任编辑 **梵玲**）

《汽车工程师》征稿启事

《汽车工程师》于1974年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主管、中国第一汽车股份有限公司主办的国内外公开发行的汽车应用技术类学术期刊，为RCCSE中国准核心学术期刊、CACJ中国应用型扩展期刊，被哥白尼精选数据库、EBSCO学术数据库、欧洲学术出版中心（EuroPub）数据库、J-Gate数据库收录。

《汽车工程师》以报道汽车产品设计领域的技术研究成果为主，专注于技术开发与应用层面的创新成果，提供汽车设计创新解决方案。《汽车工程师》将把握电动化、智能化、网联化、共享化的汽车技术主流发展趋势，努力吸收优质稿源，为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。重点征稿方向包括：锂离子电池与新体系电池、动力电池热管理与热失控、燃料电池及其关键零部件、车用电机及其控制器、自动驾驶汽车环境感知与感知融合、自动驾驶汽车定位与建图、自动驾驶汽车测试、人工驾驶-无人驾驶车辆混行条件下的自动驾驶控制、智能线控底盘、一体化底盘、功能安全和预期功能安全。

热忱欢迎汽车行业的专家学者不吝赐稿，反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将优先发表，我们期待与您共同践行“把论文写在祖国大地上”的指示精神，为强大中国汽车工业作贡献！

本刊使用协同采编系统处理稿件，请登陆期刊网站注册后投稿，投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的作者指南，网址：http://tjqc.cbpt.cnki.net。

《汽车工程师》编辑部