

# 纯电动乘用车瞬态冲击虚拟仿真建模分析方法

王明正 赵建 何洪源 仲崇发 闫东 魏廷轩

(中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130013)

**【摘要】**为在整车产品开发前期对纯电动乘用车急踩/急松油门踏板(Tip in/ Tip out)工况下 Clunk 异响水平进行评估,考虑传动系统中花键、轴齿、半轴球笼和轴承的间隙,建立了整车多体动力学模型,利用该模型计算获得轴承时域载荷,结合有限元分析方法获得减速器壳体关键点表面振动加速度时域信号,并与试验结果进行对比,验证了模型的准确性,基于此提出传动系统 Clunk 异响问题分析模型的建立和参数整定方法,从而实现在前期策划阶段对纯电动乘用车 Clunk 异响水平的评估。

**关键词:**纯电动乘用车 传动系统 间隙 多体动力学 瞬态响应 Clunk 异响

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20240242

## Virtual Simulation & Modeling Analysis Method for the Transient Impact of Pure Electric Passenger Vehicle

Wang Mingzheng, Zhao Jian, He Hongyuan, Zhong Chongfa, Yan Dong, Wei Tingxuan

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

**【Abstract】**In order to evaluate the Clunk noise level of pure electric passenger vehicle under the condition of sudden pressing/releasing of the accelerator pedal (tip in/tip out) in the early stage of vehicle product development, a multi-body dynamic model of the vehicle is established considering the clearance between the splines, shaft teeth, half shaft ball cage and bearings in the transmission system. The time-domain load of the bearings is calculated using the model, and the time-domain vibration acceleration signal of the key points on the reducer housing is obtained by combining the finite element analysis method. The accuracy of the model is verified by comparing it with the experimental results. An analysis model for Clunk noise in the transmission system and a parameter tuning method are proposed to evaluate the Clunk noise level of pure electric passenger vehicles in the early planning stage.

**Key words:** Electric passenger vehicle, Transmission system, Clearance, Multi-body dynamic, Transient response, Clunk noise

**【引用格式】**王明正,赵建,何洪源,等.纯电动乘用车瞬态冲击虚拟仿真建模分析方法[J].汽车工程师,2025(1):26-31.

WANG M Z, ZHAO J, HE H Y, et al. Virtual Simulation & Modeling Analysis Method for the Transient Impact of Pure Electric Passenger Vehicle[J]. Automotive Engineer, 2025(1): 26-31.

## 1 前言

对于纯电动乘用车,急踩/急松油门踏板(Tip in/ Tip out)工况为其常用工况,该工况下传动系统瞬态冲击性能控制和优化是汽车行业的技术难点。该工况发生在车辆驱动轴扭矩由正转负或由负转正的瞬时,主观感受为传动系统的松散性和底板的冲击振动,同时,传动系统间隙引发撞击声。

国内外专业技术人员针对此类瞬态性能的分

析开展了大量研究:张晨<sup>[1]</sup>对车辆传动系统瞬态振动特性进行了研究;文献[2]~文献[4]面向齿轮间隙研究,提出了反向齿隙模型、微分模型和方程模型等;李占江<sup>[5]</sup>提出了一种考虑间隙的急踩和急松油门踏板工况冲击抑制控制器;文献[6]、文献[7]对间隙实时估计器和控制器进行了研究。此外,文献[8]~文献[11]对带间隙的传动系统进行了主动或被动控制研究,文献[12]对无离合器的纯电动汽车传动系统间隙进行了特性分析,文献[13]、文献[14]对驱

动半轴球笼万向节间隙进行了研究。针对传动系统瞬态冲击问题,主动控制方法应用越来越广泛,文献[15]通过反馈力矩控制优化了传动系统扭振。

本文采用多体动力学软件、有限元前后处理软件与试验相结合的方法,对某款纯电动乘用车传动系统进行多体动力学建模分析,考虑传动系统中存在的间隙,同时对各轴承力开展仿真分析,并对减速器壳体总成进行有限元建模和瞬态响应分析,考虑动力总成悬置刚度并结合试验数据,验证模型的可靠性。最后,提出考虑传动系统间隙的多体动力学模型建立方法,并对试验结果和仿真分析结果进行对比。

## 2 纯电动乘用车传动系统多体动力学模型

### 2.1 传动系统结构

本文的研究对象为某前置前驱纯电动乘用车,传动系统总成结构及相应间隙如图1所示:电机转子通过花键与减速器输入轴连接,减速器采用两挡齿轮系统,减速器中的差速器壳体通过花键与左、右半轴连接,半轴通过花键与轮毂轴承连接。

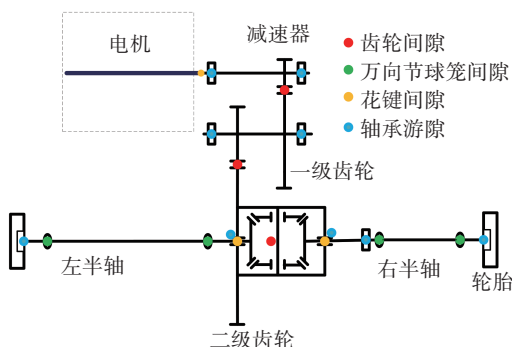


图1 传动系统总成结构示意图

传动系统中的间隙共19处,包括:电机转子轴外花键和减速器输入轴内花键的间隙,减速器两对齿轮侧隙,减速器输入轴、中间轴和输出轴轴承游隙,减速器差速器齿轮间隙,半轴和差速器连接处花键间隙,半轴球笼间隙和半轴与轮轴轴承连接处花键间隙。

### 2.2 建模和计算流程

模型搭建和计算流程如图2所示。建模过程需获取电机转子、减速器轴齿、驱动半轴、轮胎的惯量、刚度和阻尼,以及整车等效惯量、整備质量等参数。用模态法计算动力总成壳体表面瞬态响应,需获取减速器总成三维装配模型(包含悬置支架总成)及总成各部件的材料牌号、材料属性参数,含密度、弹性模量、泊松比等。为验证模型,需获取总成各部件的质量和悬置刚度,综合动力学轴承力计算结果和有限元模型,运用模态法进行总成瞬态响应仿真分析。

### 2.3 间隙模型理论

传动系统间隙控制是NVH性能控制中的难点。目前,针对间隙非线性问题,已经发展出多个间隙数学模型,包括死点模型、物理模型、描述方程和迟滞模型。其中,应用最广泛的是间隙死点模型,经典的死点模型(即简化死点模型)不考虑阻尼,模型公式为:

$$T_s = \begin{cases} k_s(\theta_s - \alpha), & \theta_s > \alpha \\ 0, & \theta_s = \alpha \\ k_s(\theta_s + \alpha), & \theta_s < \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_s$ 为轴的扭矩, $k_s$ 为轴的刚度, $\theta_s$ 为总位移, $\alpha$ 为间隙的一半。

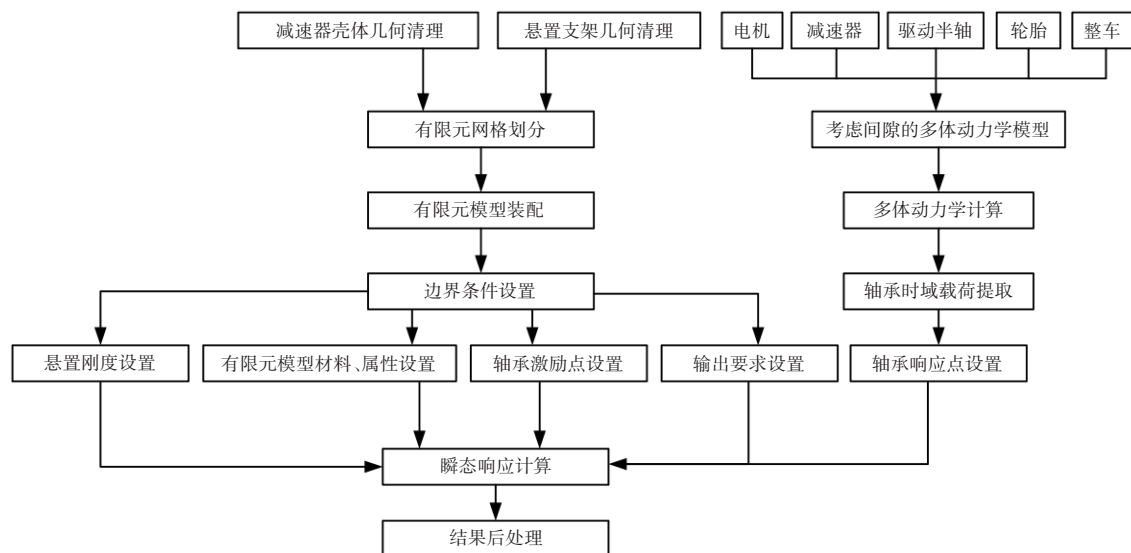


图2 建模和计算流程示意

在考虑阻尼  $c$  的前提下,死点模型调整为:

$$T_s = \begin{cases} k_s(\theta_s - \alpha) + c\dot{\theta}_s, & \theta_s > \alpha \\ 0, & \theta_s = \alpha \\ k_s(\theta_s + \alpha) + c\dot{\theta}_s, & \theta_s < \alpha \end{cases} \quad (2)$$

本文间隙模型采用考虑阻尼的死点模型。

### 2.4 考虑间隙的多体动力学模型

考虑间隙的纯电动乘用车传动系统多体动力学模型如图3所示。模型包含花键、轴齿、球笼和轴承等间隙,按照以下原则简化:

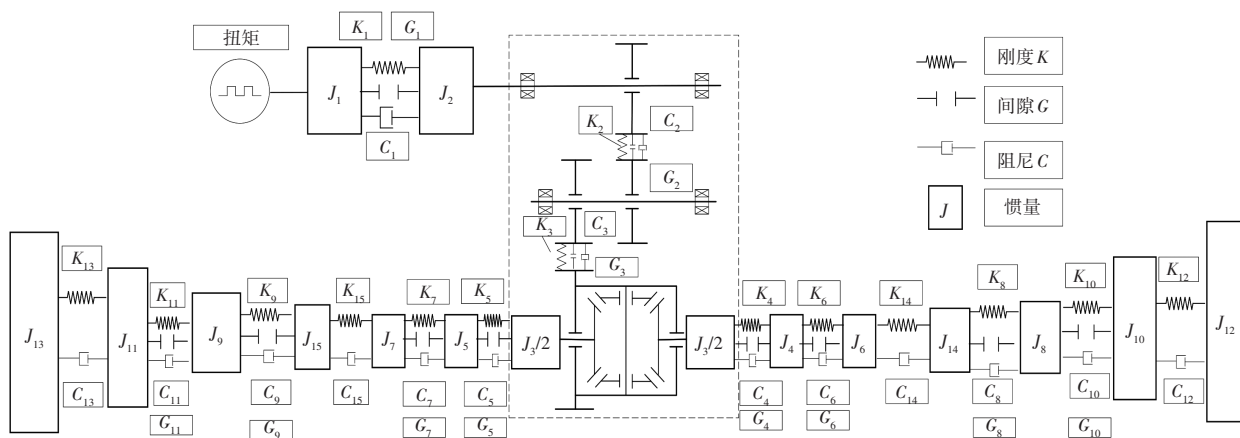


图3 考虑间隙的纯电动乘用车传动系多体动力学模型示意

- 各部件采用集中惯量模型;
- 忽略加工制造和装配误差,齿轮采用常啮合刚度,忽略变速器的差速作用;
- 忽略系统弯曲和拉压振动;
- 不考虑侧向和转向特性,只考虑纵向特性;
- 忽略轮胎纵向滑移。

图3中,  $J_1$  为电机转子相对于质心的转动惯量,  $J_2$  为减速器第1对和第2对齿轮的等效惯量,  $J_3$  为变速器惯量,  $G_1, K_1, C_1$  分别为电机和减速器输入轴花键的间隙、刚度、阻尼,  $G_2, K_2, C_2$  分别为减速器第1对齿轮的间隙、刚度、阻尼,  $G_3, K_3, C_3$  分别为减速器第2对齿轮的间隙、刚度、阻尼,  $G_4, G_5$  分别为右侧、左侧变速器间隙的一半,  $G_6, G_7$  分别为右侧、左侧半轴移动节球笼间隙,  $G_8, G_9$  分别为右侧、左侧半轴固定节球笼间隙,  $K_6, K_7$  分别为右侧、左侧半轴移动节刚度,  $K_8, K_9$  分别为右侧、左侧半轴固定节刚度,  $K_{14}, K_{15}$  分别为右侧、左侧半轴轴管刚度,  $C_6, C_7$  分别为右侧、左侧半轴移动节阻尼,  $C_8, C_9$  分别为右侧、左侧半轴固定节阻尼,  $C_{14}, C_{15}$  分别为右侧、左侧半轴轴管阻尼。此外,为等效整车惯量,还需要轮胎半径  $r$ 、惯量、刚度和阻尼参数,并获取整车质量  $m$ 。

其中,等效转动惯量  $J_2$  的计算公式为:

$$J_2 = J_{1c} + \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 \cdot J_{2c} \quad (3)$$

式中:  $J_{1c}, J_{2c}$  分别为减速器输入轴、中间轴齿轮转动惯量,  $Z_1, Z_2$  分别为第1对齿轮主动端、被动端齿数。

基于上述分析,利用 AMESim 软件建立多体动力学模型如图4所示,模型中的参数根据实际车型提供,对轴承力进行计算分析并提取,19处间隙设置采用软件自带的间隙模块,减速器惯量等效到输入轴位置。鉴于本文开展趋势性分析,且真实阻尼难以获得,模型中的阻尼采用经验值。结构采用刚性单元,忽略齿轮之间、轴承之间等位置的摩擦特性。

### 3 动力总成有限元模型

动力总成有限元模型包含电机壳体、减速器壳体和悬置支架,忽略附着在动力总成上的线路、管路等。有限元模型采用四面体二阶单元建立,单元平均大小推荐为 3 mm,生成三维网格前先生成二维网格,二维网格单元的要求为:95%以上的单元长宽比小于 5,95%以上的单元翘曲角小于  $10^\circ$ ,95%以上的单元歪斜角大于  $60^\circ$ ,95%以上的单元最小角大于  $40^\circ$ ,95%以上的单元最大角小于  $120^\circ$ 。

电机壳体与减速器壳体之间,减速器前、后壳体之间,减速器、电机壳体与悬置支架之间采用螺栓连接,接触面螺栓孔处设置 2.5 倍螺栓半径的圆形区域,如图5所示。被连接件处于螺纹孔中螺纹长度区域,如图6所示。建模方式为:

- 被连接件与螺栓头部接触面需划分两层单元;

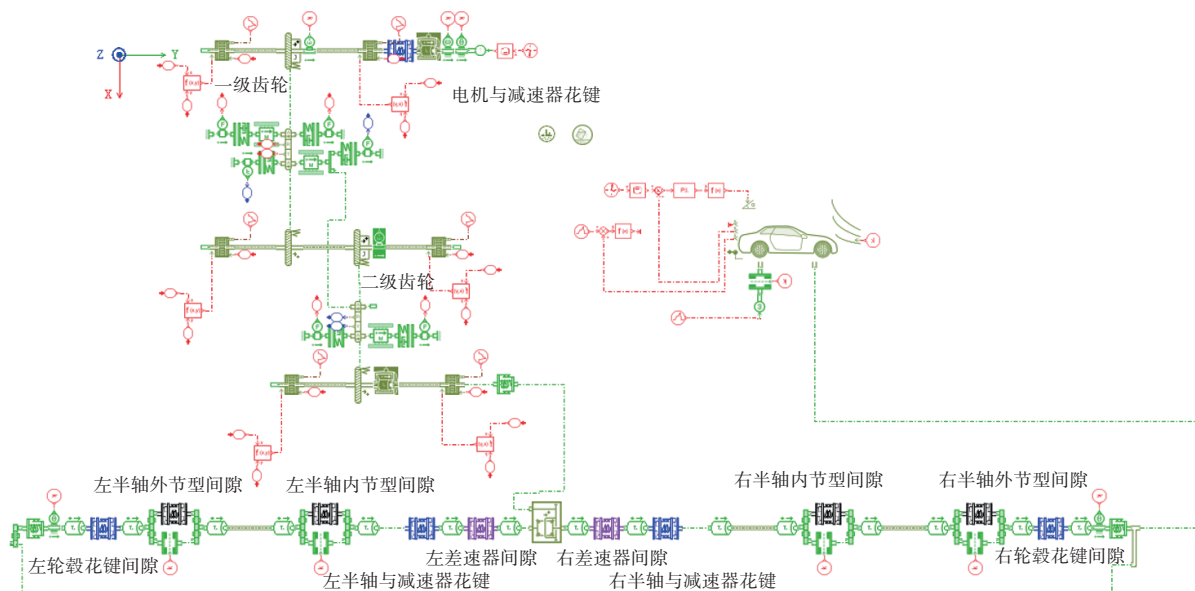


图4 多体动力学模型

b. 被连接件与连接件在 2.5 倍螺栓半径范围内视为接触面区域,接触面内至少划分两层单元,如实际接触面区域小于 2.5 倍螺栓半径,则按实际接触面处理;

c. 螺栓与连接件接触柱面上至少划分三层单元;

d. 如被连接件为壳单元模型,则接触面按 2.5 倍螺栓半径范围处理。

如图 7 所示,装配模型如图 8 所示。连接件与被连接件装配时,节点 1 与节点 4 使用与螺栓相同材料和直径的梁单元相连,节点 2 与节点 3 共节点连接。如被连接件为壳单元模型,则节点 1 与节点 2 重合,节点 2 和节点 4 使用与螺栓相同材料和直径的梁单元相连,节点 2 与节点 3 共节点连接。

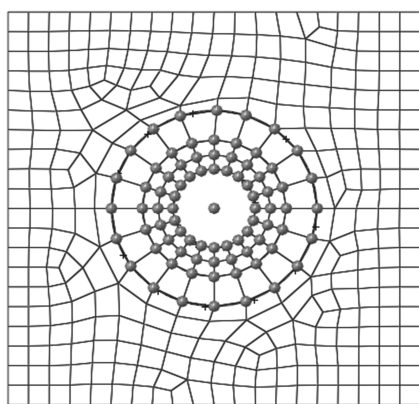


图5 螺栓接触区域示意

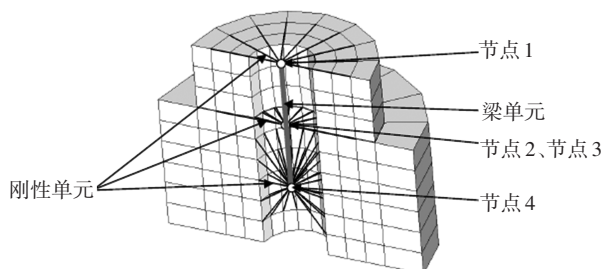


图7 螺栓简化模型示意

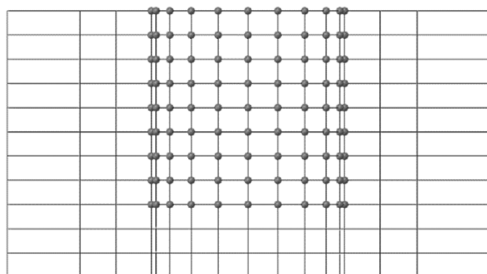


图6 螺纹连接示意

对螺栓连接区域进行简化建模,螺栓简化模型

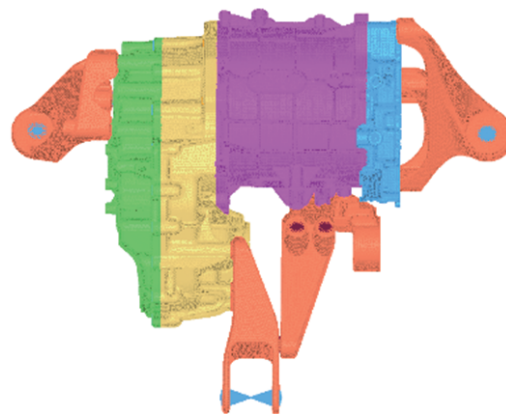


图8 动力总成有限元模型示意

悬置刚度由试验测得。除壳体外,总成内部部件等效质量、惯量在动力总成质心位置简化。

螺栓连接件如图9所示,对于部分特殊情况,处理方式为:

a. 若部件1与部件2连接区域小于2.5倍螺栓直径,则按照连接区域最大原则处理(选择区域小的全部接触区域);

b. 若螺栓与部件1之间的连接区域小于螺帽,按照最小原则处理(选择螺栓螺帽区域)。

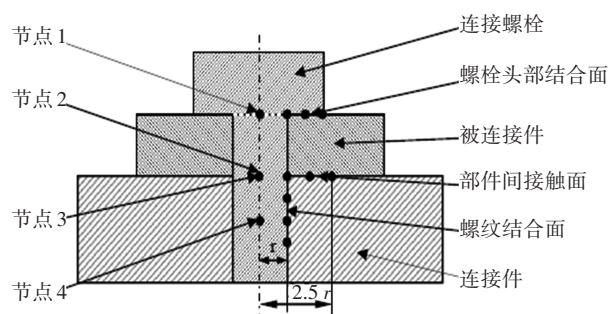


图9 螺栓简化示意

#### 4 减速器总成瞬态虚拟仿真分析

利用多体动力学模型计算获得轴承处3个方向的轴承力,并输入有限元模型,计算时长为6 s,将瞬态响应分析结果与试验结果进行对比。

试验在平直沥青路面进行,减速器放油塞处粘贴三向加速度传感器,在车速10 km/h时快速踩下加速踏板,然后迅速抬起踏板,间隙时间大于3 s,重复上述动作,记录电机扭矩和振动信号。

计算输入端使用试验采集的电机转速信号,获取6个轴承处3个方向的轴承力,利用Nastran软件对动力总成壳体进行瞬态仿真分析,仿真与试验结果如图10所示。

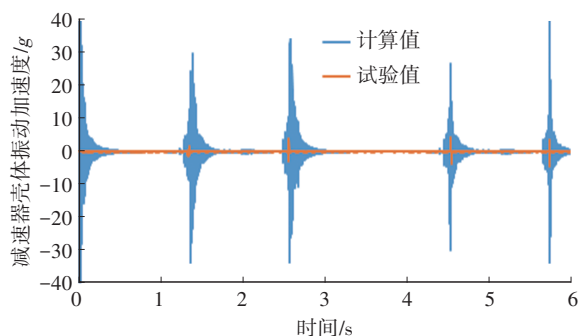


图10 试验和计算结果对比

计算结果与试验结果趋势一致,故可以在整车产品开发早期阶段对整车Clunk噪声问题进行初步分析优化。受模型间隙非线性、摩擦非线性和结构非线性影响,仿真结果的振动加速度幅值存在一定误差。

#### 5 结束语

本文对考虑间隙的纯电动乘用车传动系统进行了动力学建模,构建了花键、轴齿、球笼等部件的间隙模型,并用有限元方法建立了总成模型,对螺栓连接建模方式进行了规定,同时考虑了悬置刚度。通过多体动力学分析获得6个轴承处3个方向的力,输入有限元总成模型中进行了瞬态响应分析,分析结果显示,试验结果和计算结果趋势一致,说明了本文建模和分析流程对间隙设计和扭矩控制具有一定的参考意义。

由于系统阻尼、结构、摩擦非线性等对瞬态性能的影响较为复杂,仿真计算结果存在一定误差,后续需进行更精细的仿真模型调试和试验验证。

#### 参考文献

- [1] 张晨,石兴磊,邹家远. 车辆传动系统瞬态振动特性研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(4): 49-54.
- ZHANG C, SHI X L, ZOU J Y. Research on the Transient Vibration Characteristics of Vehicle Transmission System[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(4): 49-54.
- [2] TAO G, KOKOTOVIC P V. Adaptive Control of Systems with Actuator and Sensor Nonlinearities[M]. New York: Wiley, 1996.
- [3] GOODMAN T P. How to Calculate Dynamic Effects of Backlash[J]. Machine Design, 1963: 150-157.
- [4] THOMAS C H. Stability Characteristics of Closed Loop Systems with Dead Band[J]. Transactions of the ASME, 1954: 1365-1382.
- [5] 李占江. 纯电动汽车传动系统冲击抑制控制[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- LI Z J. Anti-Jerk Control of Driving System in Electric Vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [6] LAGERBERG A, EGARDT B S. Estimation of Backlash with Application to Automotive Powertrains[C]// 42nd IEEE International Conference on Decision and Control. Maui, HI, USA: IEEE, 2003.
- [7] LAGERBERG A, EGARDT B S. Backlash Estimation with Application to Automotive Powertrains[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(3): 483-493.
- [8] ANGERINGER U. Drive Line Control for Electrically Driven Vehicles Using Generalized Second Order Sliding Modes[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(30): 79-84.
- [9] BROGLIATO B. Feedback Control of Multibody Systems

- with Joint Clearance and Dynamic Backlash: A Tutorial[J]. Multibody System Dynamics, 2018, 42(3): 283-315.
- [10] BOVEE K, RIZZONI G. Model-Based Torque Shaping for Smooth Acceleration Response in Hybrid Electric Vehicles [J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49: 525-532.
- [11] TEMPLIN P, EGARDT B. An LQR Torque Compensator for Driveline Oscillation Damping[C]// 2009 IEEE Control Applications (CCA) & Intelligent Control (ISIC). St. Petersburg, Russia: IEEE, 2009.
- [12] 张京旭. 考虑间隙的纯电动车传动系统低频纵振主动控制[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- ZHANG J X. Active Control of Low-Frequency Longitudinal Vibration for Pure Electric Vehicle Transmission System with Backlash[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [13] 黄钟灵. 等速万向节驱动轴总成动静态圆周间隙分析与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- HUANG Z L. Static and Dynamic Analysis and Research on Circumferential Clearance of Constant Velocity Universal Joint Drive Shaft Assembly[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [14] 杨红兴, 郭常宁, 石宝枢. 三点接触沟道球笼式等速万向节的圆周间隙分析[J]. 机械强度, 2013, 35(6): 804-809.
- YANG H X, GUO C N, SHI B S. Analysis on Circumferential Clearance of Three-Point Contact Raceway of Rzeppa Constant Velocity Joint[J]. Journal of Mechanical Strength, 2013, 35(6): 804-809.
- [15] BERRIRI M, CHEVREL P, LEFEBVRE D. Active Damping of Automotive Powertrain Oscillations by a Partial Torque Compensator[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(7): 874-883.
- (责任编辑 斛 畔)
- 修改稿收到日期为2024年10月26日。

## 《汽车文摘》2025年专项征稿启事

尊敬的汽车及相关技术领域专家学者、研发工程师、高校师生:

在全球汽车产业迎来深刻变革的今天,2025年将成为汽车技术发展的关键节点,新技术、新材料、新理念将不断涌现,推动汽车行业向更智能、更环保、更安全的方向发展。《汽车文摘》期刊作为中国汽车工程学会会刊,秉承“览全球汽车技术文献,指中国汽车技术之道”的使命,致力于成为汽车领域最具影响力的综述类期刊。在此,我们特别发布2025年专项征稿启事,聚焦以下十大技术方向,旨在征集具有前瞻性、综述性的高质量文章,以期为汽车技术的创新与进步提供创新的方向和理论的支持。

**1. 人工智能在汽车创新发展中的应用综述:**征集探讨人工智能技术在车辆自动驾驶、智能座舱、智能控制以及仿真和优化中的应用综述文章。

**2. 智能网联汽车信息安全技术综述:**征集分析智能网联汽车面临的信息安全挑战及解决方案的综述文章。

**3. 环境感知与智能决策技术综述:**征集研究环境感知技术的未来发展,包括新型传感器技术、多模态感知融合算法的最新进展等前瞻综述。

**4. 氢能技术在汽车产业中的应用综述:**征集探讨氢能技术在汽车产业中的应用,包括氢燃料电池、氢内燃机以及氢能在汽车能源系统中的整合等综述文章。

**5. 固态电池技术发展综述:**征集研究固态电池技术的最新进展,包括材料科学、电化学性能和系统集成等方面的综述。

**6. 汽车动力总成电动化技术综述:**征集探讨电动化动力总成设计、控制和集成技术的综述文章。

**7. 智能底盘技术发展综述:**征集探讨智能底盘技术的最新进展,包括底盘控制系统、悬挂系统和驱动系统的智能化技术综述。

**8. 自动驾驶法规与伦理问题综述:**征集分析自动驾驶技术发展中的法规和伦理问题的综述文章。

**9. 汽车共享经济与商业模式创新综述:**征集探讨汽车共享经济的发展及其对传统汽车产业影响的综述。

**10. 智能交通系统(ITS)技术发展综述:**征集研究智能交通系统技术如车路协同、交通流量管理等的综述。

**征稿要求:**

1. 投稿请注明“\*\*\*\*\*”技术方向专项征稿字样,本刊对符合征稿技术方向的稿件将优先审核,一经录用优先发表;

2. 综述篇幅在8 000~15 000字,图文并茂,图、表和公式非原创要求标注引用文献;

3. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数在200字左右;

4. 文章必须附有公开发表、体现本领域最新研究成果和高影响力出版物作为参考文献,一般要求参考文献在20篇以上,一半左右为外文参考文献,且在文中标注所引用文献;

5. 来稿保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;

6. 切勿一稿多投,《汽车文摘》投稿网址: <http://www.qcwz.cbpt.cnki.net>, 邮箱: [autodigest@faw.com.cn](mailto:autodigest@faw.com.cn)。

《汽车文摘》期刊期待您的精彩综述文章,共同探索汽车技术的未来发展。感谢您对《汽车文摘》期刊的支持与贡献,让我们携手推动汽车技术的创新与进步。

《汽车文摘》编辑部