

# 基于洛伦兹力的汽车转向节缺陷检测方法研究<sup>\*</sup>

黄欣<sup>†</sup> 李爱娟

(山东交通学院 济南市 250357)

**摘要** 转向节作为连接汽车转向系统和悬架系统的关键部件,其性能直接影响交通事故的发生率.本文针对汽车转向节缺陷检测方法与技术存在的缺点和不足,提出一种基于洛伦兹力的汽车转向节缺陷检测新方法.新方法通过控制电磁信号耦合在转向节内产生洛伦兹力,洛伦兹力使转向节内部固体粒子振动激发超声信号,通过采集超声信号重建图像以检测转向节缺陷分布.本文研究了洛伦兹力检测的基本原理,通过控制电场和磁场信号激励产生洛伦兹力的过程,进一步就检测方法中的平面模型进行了理论分析和仿真计算.计算结果表明,以洛伦兹力为声源的耦合检测方法中,转向节中的电流密度分布、洛伦兹力分布和洛伦兹力散度分布均能够体现转向节的电导率分布.本文的研究工作为新方法的应用提供研究基础,有利于推动汽车安全检测行业的新检测技术理论的发展,新检测技术的应用.

**关键词** 转向节, 缺陷检测, 洛伦兹力

DOI: 10.6052/1672-6553-2021-011

## 引言

提高车辆安全性能,降低交通事故的发生率和人员死亡率已成为国家道路交通安全检测部门亟待解决的问题.据 WHO2008 年公布的数据,2000 年以来,我国每年死于车祸的人数不低于 10 万<sup>[1]</sup>,平均每天约 180 人死于车祸,每小时死亡约 8 人<sup>[2]</sup>.汽车安全检测对于改善汽车的安全性和使用性以及提高汽车质量的提高有着重要意义.汽车转向系的性能直接影响道路交通事故的发生.汽车在行驶过程中,转向节受交变载荷、热腐蚀、高温氧化和机械磨损等多种作用影响,最容易产生疲劳裂纹损伤甚至断裂,引起严重事故<sup>[3]</sup>.因此,实现汽车转向节的缺陷检测与状态预警,对减少人员和设备财产的损失、促进安全生产意义重大.

转向节作为连接汽车转向系统和悬架系统的关键部件,从功能上讲,它既是前桥(转向桥)转向的主要部件,又是前悬架与轮毂、车架连接的关键部件,同时又是转向系传动机构的重要部件;从底盘的位置讲,转向节是车桥、悬架和转向系统传动机构三者交汇处的核心部件,支撑车体重量,传递转向力矩和承受前轮刹车制动力矩<sup>[4]</sup>.因此,对转

向节的实时/定期检测至关重要.目前汽车转向节缺陷检测的研究还不完善,没有系统的缺陷检测方法和实用化的装置,转向节的缺陷诊断基本还停留在眼看、耳听、手摸阶段,因此对汽车转向节的缺陷检测方法进行深入研究是非常必要的.

现有转向节缺陷的检测方法主要有以下几种,磁粉检测(Magnetic Particle Testing, MT)<sup>[5,6]</sup>、渗透检测(Penetrant Testing, PT)<sup>[7]</sup>以及 X 射线检测(X-Radiographic Testing, RT)等<sup>[8]</sup>,这些传统的检测方法普遍存在检测效率低、灵敏度差以及辐射危害等问题,因此国内外对汽车关键部件转向节缺陷检测,尚缺少有针对性的高效无损的缺陷检测方法.针对汽车转向节缺陷检测目前存在的问题,本文主要研究了基于洛伦兹力的汽车转向节检测方法,控制电场、磁场耦合产生洛伦兹力,洛伦兹力使转向节内部固体粒子振动激发超声信号,利用采集到的超声信号进行转向节缺陷的图像重建,实现高分辨率和高对比度的转向节表面及内部的缺陷检测.

## 1 检测基本原理

基于洛伦兹力检测技术是利用电磁场激发和声信号接收来实现汽车转向节电导率的成像,从而

2020-08-01 收到第 1 稿,2020-09-16 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(61601265,51505258)

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: 64813187@qq.com

实现转向节缺陷的检测.磁声检测是2005年由明尼苏达大学的He等<sup>[12,13]</sup>人提出并应用于生物医学领域<sup>[9,10]</sup>的成像新方法,作为一种非常有前景的医学影像学技术<sup>[11]</sup>,MAT在国际上正在受到越来越多的关注.本文中采用注入电流的方式进行转向节缺陷的检测.其原理图如图1所示.将汽车关键部件转向节放置于静态磁场 $B_0 = B_0 z$ 中,通过电极向汽车关键部件转向节注入交变电流 $I(t)$ ,转向节所在空间中的电流分布为 $J(r, t)$ ,假定静磁场在转向节所在区域内均匀分布,则在静磁场的作用下,转向节内部 $r$ 处的电流受到的洛伦兹力大小为 $F_L(r, t) = J(r, t) \times B_0$ ,洛伦兹力在转向节内部激发振动,产生超声信号向外传播,通过对超声信号的采集能够重建转向节内部电导率的分布,从而实现汽车关键部件转向节缺陷的检测.

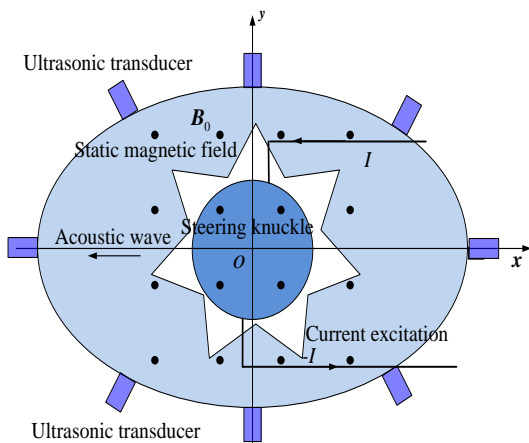


图1 磁声耦合汽车转向节缺陷检测方法原理

Fig.1 Principle of defect detection of vehicle steering knuckle with Magnetoacoustic Tomography

转向节受洛伦兹力激发产生的超声传播问题,可以用方程(1)描述<sup>[14]</sup>

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla \cdot (J \times B_0) \quad (1)$$

其中, $c_s$ 为声波在汽车关键部件转向节中的传播速度, $p$ 为超声中的声压, $B_0$ 为静磁场的磁通密度.公式(1)右边的项即 $\nabla \cdot (J \times B_0)$ 为转向节中产生的洛伦兹力散度,即超声声源.

超声换能器接收到超声信号,利用采集到的声信号由公式(1)得到洛伦兹力散度,进一步由公式(2)重建汽车关键部件转向节的电导率分布图像,即可读取汽车关键部件转向节缺陷的位置等特征.

$$\sigma \approx -\frac{(\nabla \times J) \cdot B_0}{B_1 \cdot B_0} = -\frac{\nabla \cdot (J \times B_0)}{B_1 \cdot B_0} \quad (2)$$

基于磁声耦合汽车转向节缺陷检测方法在数学上的问题,可以分为正问题和逆问题.正问题指的是已知汽车转向节内的电导率分布,求解超声的分布.逆问题是由超声的分布求解汽车转向节的电导率分布.正问题的研究分为两个部分,一是电磁场的正问题,二是声场的正问题.本文研究电磁场正问题,即转向节中的电流和静磁场相互作用产生洛伦兹力声源的过程.

## 2 转向节模型的正问题研究

转向节形状比较复杂,本文先选取转向节中的一个平面来进行电磁场正问题的理论研究.取汽车转向节中的一平面作为模型,通过对模型注入脉冲电流,求解模型中的电流密度分布,进一步求解洛伦兹力分布及其散度,即声源分布.假设转向节的电导率为 $\sigma$ ,转向节放置在磁通密度为 $B_0$ 的静磁场中.注入电流后转向节中的电流密度为 $J$ ,那么转向节中的电场强度为 $E$ .

### 2.1 正问题理论基础

对于平面模型,根据Maxwell方程<sup>[15]</sup>,转向节中的磁场强度和外加电流的关系可以表示成

$$\nabla \times H = J + \sigma E \quad (3)$$

其中, $J$ 为外加电流密度, $H$ 为电流产生的磁场强度,进一步可得

$$\rho(\nabla \times H - J) = \sigma E \quad (4)$$

其中 $\rho$ 为电阻率.法拉第电磁感应定律的微分形式为

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

其中, $B$ 为磁通密度, $\mu$ 为磁导率,对公式(4)两边求旋度,并根据公式(5),可得

$$\nabla \times \rho(\nabla \times H - J) = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (6)$$

假定转向节分布在 $x-o-y$ 平面内,通过电极对转向节注入脉冲电流,电流密度只有 $x$ 、 $y$ 两个方向的分量,电流产生的磁场强度只有 $z$ 分量 $H_z$ ,那么磁场强度的旋度为

$$\nabla \times H = \frac{\partial H_z}{\partial y} e_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} e_y \quad (7)$$

则有

$$\nabla \times (\rho \nabla \times H) = \nabla \cdot (-\rho \nabla H_z) e_z \quad (8)$$

联立公式(6)、公式(8)可得

$$\nabla \cdot (\rho \nabla H_z) + \nabla \times (\rho \mathbf{J}_s) \Big|_z - \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

根据公式(9),可以利用 Comsol Multiphysics 软件中的 In-Plane Induction Currents, Magnetic Field 模块来计算平面模型的电磁场分布.

## 2.2 平面模型正问题的仿真计算

### 2.2.1 平面模型的建立

汽车转向节形状比较复杂,本文先研究一种最基本的模型,平面模型进行计算分析.从汽车转向节截取一正方形模块作为模型进行仿真计算,平面模型几何形状如图 2 所示,正方形模型  $E_1$  尺寸为  $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ ,几何中心点的坐标为  $(0, 0)$ ,电导率为  $\sigma_{E1} = 1\text{S/m}$ ,内部有三个电导率不同的区域.整个平面模型的厚度为  $d = 0.001\text{m}$ .将平面模型放置于  $x - o - y$  平面内,静磁场的磁通密度  $B_0$  的方向沿  $z$  方向,大小为  $B_0$ .通过电极将脉冲电流注入平面模型,注入电流的方向为  $y$  方向.

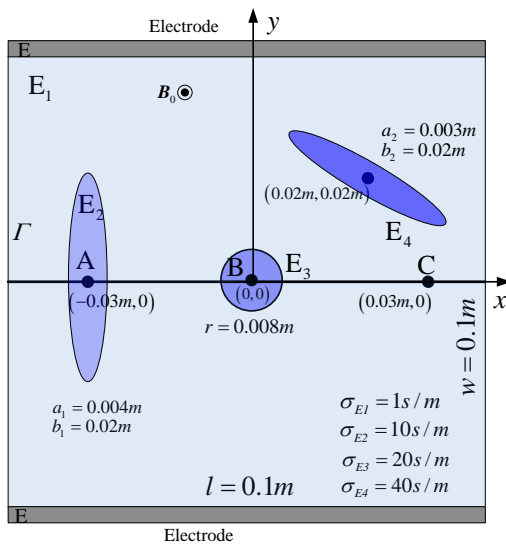


图 2 转向节的几何模型图

Fig.2 The geometric model of the steering knuckle

由公式(9)可以求得汽车关键部件转向节中电流产生的磁场强度  $H_z$ ,那么汽车关键部件转向节中的电流密度为

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial H_z}{\partial y} \mathbf{e}_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} \mathbf{e}_y \quad (10)$$

静磁场的方向沿  $z$  方向,平面模型中的电流和静磁场相互作用会产生洛伦兹力,本文中,平面模型中电流产生的磁场的磁通密度远远小于静磁场的磁通密度,那么平面模型中的洛伦兹力主要由静磁场和平面模型中的电流激励产生,则平面模型中洛伦兹力密度为

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}_0 - \frac{\partial H_z}{\partial x} B_0 \mathbf{e}_x - \frac{\partial H_z}{\partial y} B_0 \mathbf{e}_y \quad (11)$$

平面模型中的声源即为洛伦兹力散度,其表达式为

$$\nabla \cdot \mathbf{f} = -\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} B_0 - \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} B_0 \quad (12)$$

### 2.2.2 平面模型的仿真计算

通过电极对平面模型注入脉宽约为  $1\mu\text{s}$  的脉冲电流,其波形如图 3 所示.

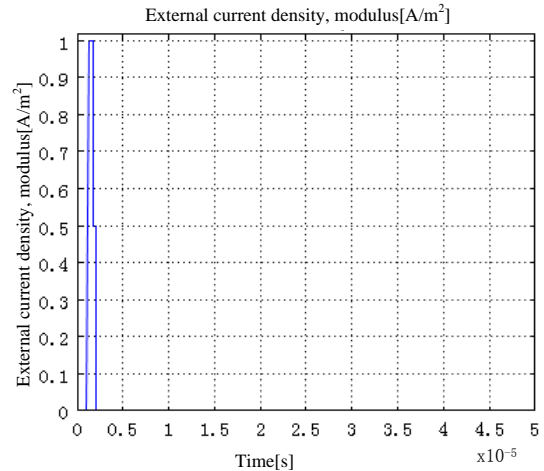


图 3 激励电流波形

Fig.3 The waveform of excitation current

由公式(10)计算得到的平面模型中的总电流密度模值,如图 4 所示.图 5 为汽车关键部件转向节平面模型的电导率分布图.由图 4 和图 5 可以看出,电流密度的模值和电导率的大小相对应.由于趋肤效应及电导率突变等的影响,电导率均匀的区域中电流密度不完全均匀.由公式(11)可以计算可以得到样品中的洛伦兹力模值的分布如图 6 所示.

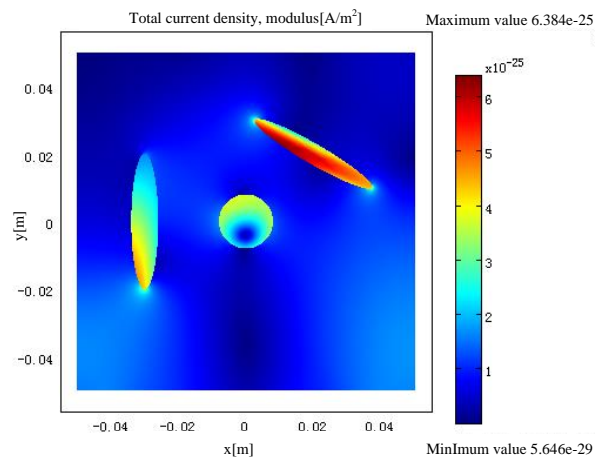


图 4 电流密度模值分布

Fig.4 The distribution of current density modulus

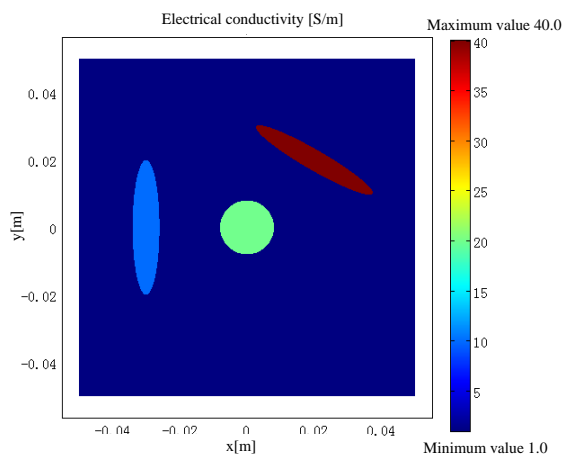


图5 电导率分布

Fig.5 The distribution of electrical conductivity

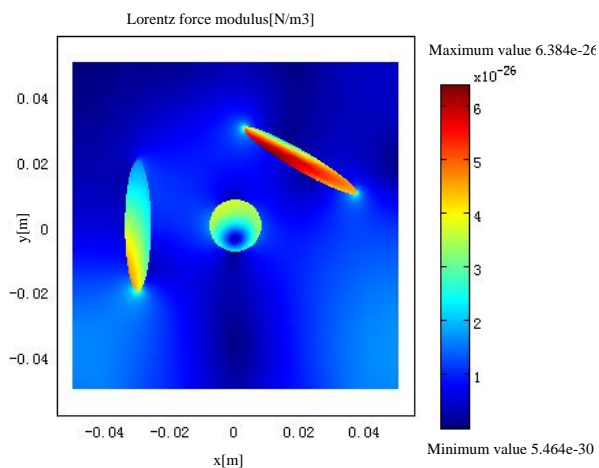


图6 洛伦兹力模值分布

Fig.6 The distribution of Lorentz force modulus

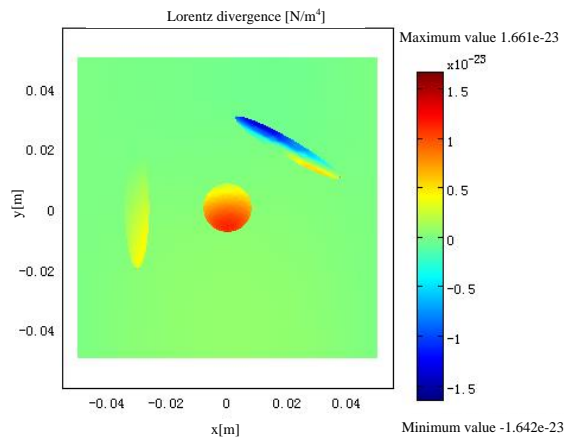


图7 洛伦兹力散度分布

Fig.7 The distribution of Lorentz force divergence

由图6洛伦兹力模值分布图可得知,电导率越大的区域洛伦兹力模值就越强,即声源强度和样品的洛伦兹力模值存在对应关系.由公式(12)可求得样品洛伦兹力散度,即声源分布图,如图7所示.由

注入电流式磁声成像原始声场满足的方程可知,洛伦兹力散度大的区域,原始声场就强.由图7洛伦兹力散度分布图可得知,电导率越大的区域声源强度就越强,即声源强度和样品的电导率存在对应关系.

以上计算结果表明,模型的电流密度分布,洛伦兹力分布以及洛伦兹力散度分布均能够反映汽车转向的电导率分布,因此以上物理量分布的重建结果都可以作为汽车转向节电导率分布的参考.

### 3 结论

本文针对汽车关键部件转向节缺陷检测目前存在的问题,提出了一种基于磁声耦合汽车转向节缺陷检测方法.研究了磁声耦合汽车转向节缺陷检测方法中的电磁场正问题,即向转向节中施加交变电流之后,转向节中的电流分布,以及电场和磁场控制下洛伦兹力和洛伦兹力散度的分布.本文对其进行了理论分析和仿真计算,证明电流密度分布、洛伦兹力分布、洛伦兹力散度分布和转向节电导率的分布存在一一对应的关系,通过对电流密度分布、洛伦兹力分布、洛伦兹力散度分布的重建能够得到转向节电导率的分布.研究结果为汽车转向节缺陷检测提供了一种新的方法.后续可以进一步进行声场正问题以及逆问题的研究分析.

### 参 考 文 献

- 1 池桂波,王声勇.中国道路交通伤害长期趋势及其影响因素分析.中华流行病学杂志,2007,28(2):148~153 (Chi G B, Wang S Y. Study on the secular trend of road traffic injuries and its influencing factors in china. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2007, 28(2): 148~153 (in Chinese))
- 2 刘文华.深圳市宝安区道路交通伤的流行病学特征[硕士学位论文]广州:南方医科大学,2013(Liu W H. Epidemiological characteristics of road traffic injuries in Bao'an District, Shenzhen [Master Thesis] Guangzhou: Southern Medical University, 2013 (in Chinese))
- 3 杨苍禄,朱传敏,刘素.汽车转向节疲劳寿命分析和试验研究.机电工程.2015,32(7):950~953 (Yang C L, Zhu C M, Liu S. Fatigue life analysis and experimental validation of automobile steering knuckle. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*. 2015, 32(7): 950~953 (in Chinese))
- 4 田国富,张晓强.汽车转向节强度与多轴疲劳寿命分

- 析. 机械设计与制造, 2015, (4): 39~43 (Tian G F, Zhang X Q. Strength and multi-axia in: fatigue life analysis of automotive steering knuckie. *Machinery Design & Manufacture*. 2015, (4): 39~43 (in Chinese))
- 5 茅红霞. 基于PLC控制的磁粉探伤机系统的设计[硕士学位论文]. 南京:南京理工大学, 2011 (Mao H X. Design of magnetic particle flaw detector system based on PLC control [Master Thesis]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011 (in Chinese))
- 6 李世成, 方松利, 黄少衡, 等. 反应堆冷却剂主泵泵壳螺栓磁粉检测工艺. 无损检测, 2016, 38(1): 30~33 (Li S C, Fang S L, Huang S H, et al. Magnetic particle inspection technology of primary pump casing stud of reactor coolant, *Nondestructive Testing*, 2016, 38(1): 30~33 (in Chinese))
- 7 胡学知. 渗透检测. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007 (Hu X Z. Penetration test. Beijing: China Labor and Social Security Press, 2007 (in Chinese))
- 8 杨党纲, 史亦伟, 王铮, 等. 四通道水浸式超声C扫描检测软件研制. 真空与低温, 2012, 18(1): 43~46 (Yang D G, Shi Y W, Wang Z, et al. The development of four-channel immersion ultrasonic C-scan testing software, 2012, 18(1): 43~46 (in Chinese))
- 9 Xu Y, He B. Magnetoacoustic tomography with magnetic induction (MAT-MI). *Physics in Medicine and Biology*, 2005, 50(21): 5175~5187
- 10 Li X, Xia R M, He B. Acoustic vector tomography and its application to magnetoacoustic tomography with magnetic induction (MAT-MI). 30th Annual International IEEE EMBS Conference, 2008, 5834~5836
- 11 Roth B J. The role of magnetic forces in biology and medicine. *Experimental Biology & Medicine*, 2011, (236): 132~137
- 12 Hu G, Li X, He B. Imaging biological tissues with electrical conductivity contrast below 1 S m<sup>-1</sup> by means of magnetoacoustic tomography with magnetic induction, *Applied Physics Letters*, 2010, 97: 103705~103705
- 13 Hu G, He B. Magnetoacoustic imaging of human liver tumor with magnetic induction. *Applied Physics Letters*, 2011, 98: 023703
- 14 张海澜. 理论声学. 北京: 高等教育出版社, 2007 (Zhang H L. Theoretical Acoustics. Beijing: Higher Education Press, 2007 (in Chinese))
- 15 金立军. 电磁场与电磁波. 北京: 中国电力出版社, 2012 (Jin L J. Electromagnetic fields and waves. Beijing: China Electric Power Press, 2012 (in Chinese))

## RESEARCH ON DEFECT DETECTION METHOD OF AUTOMOBILE STEERING KNUCKLE BASED ON LORENTZ FORCE \*

Huang Xin<sup>†</sup> Li Aijuan

(Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China)

**Abstract** The steering knuckle is a key component to connect automobile steering system and suspension system, and the performance of steering knuckles affects the incidence rate of road traffic accidents directly. In this paper, in view of the shortcomings and deficiencies of the defect detection methods and technologies of automobile steering knuckle, a new defect detection method of automobile steering knuckle based on Lorentz force is proposed. The new method generates Lorentz force in steering knuckle by controlling electromagnetic signal coupling. Explicitly, Lorentz force excites ultrasonic signals by vibrating solid particles in the steering knuckle, and then the ultrasonic signals are reconstructed to detect the defect distribution in the steering knuckle. In this paper, the basic principle of Lorentz force detection and the process of generating Lorentz force by controlling electric and magnetic signals are studied, and the plane model of the detection method is analyzed and simulated. The results show that the current density distribution, Lorentz force distribution and Lorentz force dispersion distribution in the steering knuckle can reflect the conductivity distribution of the steering knuckle in the coupled imaging detection method with Lorentz force being the sound source. The research work provides a foundation for application of the new method, which is beneficial to development of new detection technologies and applications of new detection methods in the automotive safety inspection industry.

**Key words** steering knuckle, defect detection, Lorentz force

Received 1 August 2020, revised 16 September 2020

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (61601265, 51505258)

† Corresponding author E-mail: 64813187@qq.com