

## 汽车与交通工程学院 2022 届研究生培养成果展



### 人物简介：

杜聪聪（1996-），男，山西临汾人，中共党员，汽车与交通工程学院 2019 级机械工程（新能源汽车动力测控系统方向）专业研究生，导师是工学博士吴华伟教授。科研方面：研究生期间主要从事特种车辆装备及非标设备研发设计，参与项目 7 项，发表 SCI 论文 2 篇，申请发明专利 19 项，授权 7 项，受审 12 项，授权实用新型专利 11 项。学业获奖：2019 年学业奖学金二等；2020 年学业奖学金二等；2021 年学业奖学金二等；湖北文理学院 2022 届优秀毕业研究生。目前已签约中国兵器集团襄阳 525 泵业有限公司。

### 发表论文：

[1] Du, C, Nguyen, Q, Malekhamdi, O, et al. Thermal conductivity enhancement of nanofluid by adding multiwalled carbon nanotubes: Characterization and numerical modeling patterns. Math Meth Appl Sci. 2020; 1– 22. <https://doi.org/10.1002/mma.6466>.

[2] Li Z , Du C , Ahmadi D , et al. Numerical modeling of a hybrid

PCM-based wall for energy usage reduction in the warmest and coldest months[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020(2).<https://doi.org/10.1007/s10973-020-09861-y>.

授权专利:

- [1] 轮毂螺栓力矩检测装置, 发明专利授权, ZL202010891618. 7.
- [2] 履带式无人救援车的转向方法、系统及存储介质, 发明专利授权, ZL201911075109. 0.
- [3] 一种具有自动泊车功能的智能驾驶系统及方法, 发明专利授权, ZL201910623393. 4.
- [4] 自动驾驶车辆诱导系统及方法, 发明专利授权, ZL 201910733326. 8.
- [5] 电池的加速因子值计算方法、装置、设备及存储介质, 发明专利授权, ZL 201910619080. 1
- [6] 一种链传动结构以及履带车, 发明专利授权, ZL 201910915538. 8.
- [7] 弹簧减震结构以及履带车, 发明专利授权, ZL2019110344465.
- [8] 薄壁件加工装置, 实用新型专利授权, ZL 202020261395. 1.
- [9] 对中安装装置, 实用新型专利授权, ZL 202022509638. 1.
- [10] 深孔检测装置, 实用新型专利授权, ZL 202022161183. 9.
- [11] 隧道清理机械臂试验台架, 实用新型专利授权, ZL 202022485947. X.
- [12] 载运货车刹车制动冷却系统, 实用新型专利授权, ZL 202020271324. X.

[13] 一种发动机气缸端盖去冒口装置, 实用新型专利授权, ZL

201911389749.9

发表论文截图

Received: 29 March 2020  
DOI: 10.1002/jama.6466



**SPECIAL ISSUE PAPER**

WILEY

## Thermal conductivity enhancement of nanofluid by adding multiwalled carbon nanotubes: Characterization and numerical modeling patterns

Congcong Du<sup>1</sup> | Quyen Nguyen<sup>2</sup> | Omid Malekahmadi<sup>3</sup> | Ali Mardani<sup>4</sup> |  
Zahra Jokar<sup>5</sup> | Elmira Babadi<sup>6</sup> | Annunziata D'Orazio<sup>7</sup> |  
Arash Karimpour<sup>8</sup> | Zhixiong Li<sup>9,10</sup> | Quang-Vu Bach<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang, China

<sup>2</sup>Institute of Research and Development, Duy Tan University, Danang, Vietnam

<sup>3</sup>Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

<sup>4</sup>New Sciences and Technologies Faculty (FNST), University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>5</sup>Engineering Department, Payam Noor University, Shiraz, Iran

<sup>6</sup>Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

<sup>7</sup>Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, Roma, Italy

<sup>8</sup>Sustainable Management of Natural Resources and Environment Research Group, Faculty of Environment and Labour Safety, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam

<sup>9</sup>MJU-BNUT Department-Joint Research Center on Renewable Energy and Sustainable Marine Platforms, Engineering Research Center of Fujian University for Marine Intelligent Ship Equipment, Minjiang University, Fuzhou, China

<sup>10</sup>School of Mechanical, Materials, Mechatronic and Biomedical Engineering, University of Wollongong, Wollongong, New South Wales, Australia

### Correspondence

Arash Karimpour, Sustainable Management of Natural Resources and Environment Research Group, Faculty of Environment and Labour Safety, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam.  
Email: arashkarimpour@tdtu.edu.vn

Nanofluid is divided in two major section, mono nanofluid (MN) and hybrid nanofluid (HN). MN is created when a solid nanoparticle disperses in a fluid, whereas HN has more than one solid nanomaterial. In this research, iron (III) oxide ( $Fe_3O_4$ ) is MN, and  $Fe_3O_4$  plus multiwalled carbon nanotube (MWCNT) is HN, whereas both are mixed and dispersed into the water basefluid. Thermal conductivity (TC) of  $Fe_3O_4$ /water and MWCNT/ $Fe_3O_4$ /water was measured after preparation and numerical model performed on the resulted data. After that, field emission scanning electron microscope (FESEM) was studied for microstructural observation of nanoparticles. MN and HN TC were studied at temperature ranges of 25 to 50°C and volume fractions of 0.2% to 1.0%. For MN and HN, thermal conductivity enhancement (TCE) of 32.76% and 33.23% was measured at 50°C temperature—1.0% volume fraction, individually. Different correlations have been calculated for numerical modeling, with  $R^2 = 0.9$ . Deviation of 0.6007% and 0.6096% was calculated for given correlations for MN and HN individually. Deviation of 0.5862% and 0.6057% was calculated for trained models, for MN and HN individually. Thus, by adding MWCNT to



# Numerical modeling of a hybrid PCM-based wall for energy usage reduction in the warmest and coldest months

Zhixiong Li<sup>1</sup> · Congcong Du<sup>1</sup> · Danial Ahmadi<sup>2</sup> · Rasool Kalbasi<sup>2</sup> · Sara Rostami<sup>3,4</sup>

Received: 6 March 2020 / Accepted: 16 May 2020  
© Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary 2020

## Abstract

In this study, the effects of using hybrid PCM inside the wall on reducing heat transfer have been examined during the hottest (July) and coldest months (January) in three climate zones. The base wall thickness was 20 cm, and PCM-based wall thickness was considered to be 22 cm. The PCM was placed in two separate layers of 1 cm within the wall. The objective function was to diminish the heat transfer from the PCM-base wall, as compared to the base wall. In all three climatic zones, in warm and cold months, PCM loading into the wall leads to heat transfer reduction. Based on numerical results, in climate zones A (hot summer and mild winter), B (mild summer and very cold winter) and C (warm summer and cold winter) owing to using hybrid PCM layers, heat transfer diminished by 26.9%, 29.65% and 30.5%, respectively.

**Keywords** PCM-based wall · Building · Heat reduction · Climate zone

## Introduction

Energy usage in residential and commercial buildings accounts for 20% of the world's total consumption, and forecasts affirm that this energy consumption rate will increase by 0.6–2.1%/year by 2040 [1]. The share of energy consumption in industry and transportation sectors is estimated at 54% and 26%, respectively. The growth rate of energy consumption in these sectors is 1.2 and 1.4%, respectively [1]. The storage of thermal energy through utilizing phase change materials (PCMs) has attracted the attention of many researchers around the world owing to its capability

to decrease energy usage [2, 3], or thermal energy storage [4], electronic cooling management [5]. While the number of articles published in the field PCM in 1996 was less than 100 papers per year, in 2018 it reached about 700 articles per year, which reveals that using PCM capabilities has received much attention [6]. PCM in buildings can be used in the various sections such as wall, floor, ceiling and glazed [3]. Statistical results [6] show that the use of these materials in the wall of the building has the largest share. PCM is incorporated into the wall through mixing or combining with building materials such as mortars, concrete, gypsum boards, blocks, bricks or using as a separate panel. Electricity consumption in buildings varies greatly over time. In many cases, the peak of electricity consumption coincides with the peak of heat exchange between the building and the surrounding, thus exacerbating electricity consumption. Considering the higher price of electricity during the peak load time, it is necessary to shift the heat exchange peak. Using PCMs as a passive methodology is very efficient from this perspective [7].

Li et al. [3] investigated the efficacy of PCM loading inside the wall on the heat transfer. The input variables included the PCM type, installation location, and its thickness. The objective variable was defined as the decrease in the heat transfer rate. The authors revealed that adding PCM (thirteen different PCMs type) to the wall diminished the heat transfer rate. In addition, a sensitivity analysis was

A1 Sara Rostami  
A2 sara.rostami@jhu.edu.vn  
A3 Zhixiong Li  
A4 zhixiong.li@knights.ucf.edu

A5 <sup>1</sup> Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test  
A6 for Electrical Vehicle, Hubei University of Arts and Science,  
A7 Xiangyang 441053, China

A8 <sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch,  
A9 Islamic Azad University, Najafabad, Iran

A10 <sup>3</sup> Laboratory of Magnetism and Magnetic Materials, Advanced  
A11 Institute of Materials Science, Ton Duc Thang University,  
A12 Ho Chi Minh City, Vietnam

A13 <sup>4</sup> Faculty of Applied Sciences, Ton Duc Thang University,  
A14 Ho Chi Minh City, Vietnam

授权专利部分截图



证书号第 4384417 号



# 发明专利证书

发明名称：一种具有自动泊车功能的智能驾驶系统及方法

发明人：吴华伟;杜聪聪;刘祯;薛君尧;张远进;叶从进;聂金泉

专利号：ZL 2019 1 0623393.4

专利申请日：2019 年 07 月 11 日

专利权人：湖北文理学院

地址：441053 湖北省襄阳市隆中路 296 号

授权公告日：2021 年 04 月 27 日

授权公告号：CN 110329246 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况，专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

证书号第 4275607 号



# 发明专利证书

发明名称：履带式无人救援车的转向方法、系统及存储介质

发明人：吴华伟;杜聪聪;刘祯;薛君尧;丁华锋;万锐;梅雪晴  
石大排

专利号：ZL 2019 1 1075109.0

专利申请日：2019 年 11 月 05 日

专利权人：湖北文理学院

地址：441000 湖北省襄阳市隆中路 7 号

授权公告日：2021 年 02 月 26 日

授权公告号：CN 110733568 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

证书号第4018123号



## 发明专利证书

发明名称：自动驾驶车辆诱导系统及方法

发明人：吴华伟;刘志罡;杜聪聪;刘静;曹林涛

专利号：ZL 2019 1 0733326.8

专利申请日：2019年08月08日

专利权人：湖北文理学院

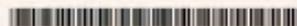
地址：441000 湖北省襄阳市隆中路7号

授权公告日：2020年10月02日

授权公告号：CN 110427031 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况，专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



第1页(共2页)

其他事项参见续页

证书号第 4216618 号



# 发明专利证书

发明名称：电池的加速因子值计算方法、装置、设备及存储介质

发明人：吴华伟;叶从进;张远进;刘楨;梅雪晴;杜聪聪

专利号：ZL 2019 1 0619080.1

专利申请日：2019 年 07 月 09 日

专利权人：湖北文理学院

地址：441000 湖北省襄阳市隆中路 7 号

授权公告日：2021 年 01 月 22 日

授权公告号：CN 110399658 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况，专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

证书号第4447801号



# 发明专利证书

发明名称：弹簧减震结构以及履带车

发明人：吴华伟; 寇加增; 刘航; 蒋君尧; 杜聪聪; 陈雷; 丁华伟; 万锐

专利号：ZL 2019 1 1034446.5

专利申请日：2019年10月28日

专利权人：湖北文理学院

地址：441090 湖北省襄阳市隆中路7号

授权公告日：2021年05月28日

授权公告号：CN 110723227 B

国家知识产权局依据中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效，专利期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况，专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或者名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



证书号第 13439386 号



## 实用新型专利证书

实用新型名称：对中安装装置

发 明 人：杜聪聪;吴华伟;王华良;程清思;万锐;刘祯

专 利 号：ZL 2020 2 2509638.1

专利申请日：2020 年 11 月 03 日

专 利 权 人：湖北文理学院;襄阳忠良工程机械有限责任公司

地 址：441053 湖北省襄阳市襄城区隆中路 296 号湖北文理学院

授权公告日：2021 年 06 月 15 日

授权公告号：CN 213450386 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查，决定授予专利权，颁发实用新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十年，自申请日起算。

专利书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

证书号第 13338805 号



## 实用新型专利证书

实用新型名称：深孔检测装置

发 明 人：杜聪聪;薛君尧;吴华伟;刘祯;程清思

专 利 号：ZL 2020 2 2161183.9

专利申请日：2020 年 09 月 27 日

专 利 权 人：湖北文理学院

地 址：441053 湖北省襄阳市襄城区隆中路 296 号湖北文理学院

授权公告日：2021 年 06 月 04 日

授权公告号：CN 213364600 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查，决定授予专利权，颁发实用新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

证书号第13508679号



## 实用新型专利证书

实用新型名称：隧道清理机械臂试验台架

发明人：杜聪聪;程清思;万锐;吴华伟

专利号：ZL 2020 2 2485947.X

专利申请日：2020年10月30日

专利权人：湖北文理学院

地址：441053 湖北省襄阳市襄城区隆中路296号湖北文理学院

授权公告日：2021年06月25日

授权公告号：CN 213532684 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查，决定授予专利权，颁发实用新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



第1页(共2页)

其他事项参见续页



### 人物简介：

薛君尧（1997-），男，湖北襄阳人，共青团员，汽车与交通工程学院 2019 级机械工程（新能源汽车动力测控系统方向）专业研究生，导师是工学博士吴华伟教授。科研方面：研究生期间主要从事研究方向为新能源汽车动力系统测控研究，跟随导师参与项目 4 项，其中已完结项目 3 项，正在近行的项目 1 项；授权实用新型专利 6 项，受理发明专利 4 项，2020、2021 连续两年获得学校专业二等奖学金。现已成功考取武汉科技大学博士。

### 发表论文：

[1] Xue J , Dehkordi M , Abdelahi A , et al. Experimental investigation of temperature field, defects, and mechanical strength in dissimilar laser bonding of Ti6Al4V and polyethylene terephthalate[J]. Journal of Laser Applications, 2021, 33(1):012038.

### 专利情况：

#### 发明专利受理：

- [1] 一种定向装配装置，ZL201911050869.6，发明专利在审。
- [2] 步进式定位装置及移动式深孔检测设备，ZL202011036518.2，发

明专利在审.

[3] 载运货车刹车制动冷却系统, ZL202010154955.8, 发明专利在审.

[4] 一种汽车转向节及其加工工艺, ZL201910623391.5, 发明专利在  
审

授权实用新型专利:

[1] 深孔加工及检测装置, ZL202020261379.2.

[2] 通行智能安全检测消毒装置, ZL202020388652.8.

[3] 载运货车刹车制动冷却系统, ZL202020271790.8.

[4] 深孔检测装置, ZL202022161183.9.

[5] 一种定向装配装置, ZL201921862675.1.

[6] 一种车库自动泊车牵引装置, ZL201922493608.3.

# Experimental investigation of temperature field, defects, and mechanical strength in dissimilar laser bonding of Ti6Al4V and polyethylene terephthalate

Cite as: J. Laser Appl. 33, 012038 (2021); doi: 10.2351/7.0000275  
Submitted: 9 November 2020 · Accepted: 15 December 2020 ·  
Published Online: 6 January 2021



Junyao Xue,<sup>1</sup> Mohammad Hossein Razavi Dehkordi,<sup>2</sup> Ali Abdelahi,<sup>2</sup> Adel Abdelahi,<sup>2</sup> Ehsan Rasti,<sup>3,a)</sup> and Zhixiong Li<sup>1</sup>

## AFFILIATIONS

<sup>1</sup>Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Sarvestan Branch, Islamic Azad University, Sarvestan, Iran

<sup>a)</sup>Author to whom correspondence should be addressed; electronic addresses: [rasti@iausarvac.ir](mailto:rasti@iausarvac.ir). Telephone: 989173870805

## ABSTRACT

Laser welding is one of the most common technologies with various applications in different industries. In this paper, laser joining of the Ti6Al4V alloy and polyethylene terephthalate (PET) as a means of two common materials is discussed. According to the experimental results, the focal length is a very important parameter in this dissimilar laser welding, and because of the low melting point of PET, it is not possible to create welding at low focal lengths. Furthermore, changing the welding parameters such as welding speed and pulse duration changes the temperature field of the molten pool and its surrounding points, as well as the number, distribution, and the shape deformation of the bubbles formed in PET, which plays an important role in welding quality and mechanical strength. The number of bubbles clearly has a significant influence on the surface contact area and the resultant shear load test values. Generally, reducing the surface contact area between PET and the Ti6Al4V alloy evidently reduces the tensile shear load of the joints. The shear load of the joints has had about 40% variation upon changing the focal length. Additionally, the shear load changed only about 10% by changing the pulse duration from 6 to 10 ms. Seemingly, changing the energy density through a variation of focal length has had a higher influence of about 30% than the incident time of laser beam through increasing the pulse duration. Apart from selecting different laser parameters, the measured temperature in ranges between 100 and 120 °C can produce acceptable joints with lower defects.

Key words: laser welding, titanium alloy, polyethylene terephthalate (PET), shear load, mechanical strength

Published under license by Laser Institute of America. <https://doi.org/10.2351/7.0000275>

## I. INTRODUCTION

Applications of lasers have enhanced in various industries. Gu *et al.*<sup>1</sup> investigated the effects of laser scanning strategies on selective laser melting of pure tungsten. Their results showed that pores and cracks were the main defects in selective laser melting (SLM)-processed tungsten parts. Also, compared with other scanning strategies, a compressive strength of 923 MPa with an elongation of 7.7% was obtained. Djogo *et al.*<sup>2</sup> presented techniques

to demonstrate the potential for 3D writing of high-density optical packaging components, for efficiently connecting optical fibers to silicon photonic (SiP) processors for use in telecom and data centers. Their finding illustrated that a 3D waveguide fan-out design provided an attractive balancing of low losses, high channel density, modematching, low cross talk, and compact footprint. The 3D additive and subtractive processes, thus, demonstrated the potential for higher scale integration and rapid photonic assembly

授权部分实用新型专利截图



证书号第11708073号



## 实用新型专利证书

实用新型名称：一种车库自动泊车牵引装置

发明人：吴华伟;薛君尧;刘祯;万锐;程清思

专利号：ZL 2019 2 2493608.3

专利申请日：2019年12月31日

专利权人：湖北文理学院

地址：441053 湖北省襄阳市襄城区隆中路296号

授权公告日：2020年10月23日

授权公告号：CN 211736580 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查，决定授予专利权，颁发实用新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨

2020年10月23日

第1页(共2页)

其他事项参见续页

证书号第 11729574 号



## 实用新型专利证书

实用新型名称：载运货车刹车制动冷却系统

发 明 人：薛君尧;吴华伟;梅雪晴;刘祯;辛红敏;张远进;叶从进  
万锐

专 利 号：ZL 2020 2 0271790.8

专利申请日：2020 年 03 月 06 日

专 利 权 人：湖北文理学院

地 址：441053 湖北省襄阳市襄城区隆中路 296 号

授权公告日：2020 年 10 月 23 日

授权公告号：CN 211731345 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查，决定授予专利权，颁发实用新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨

2020 年 10 月 23 日

第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

证书号第 11622326 号



## 实用新型专利证书

实用新型名称：深孔加工及检测装置

发明人：薛君尧;吴华伟;辛红敏;刘祯;万锐

专利号：ZL 2020 2 0261379.2

专利申请日：2020年03月05日

专利权人：湖北文理学院

地址：441053 湖北省襄阳市襄城区隆中路 296 号

授权公告日：2020年10月09日

授权公告号：CN 211638410 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查，决定授予专利权，颁发实用新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨

2020年10月09日

第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页



### 人物简介：

陈前（1996-），男，湖北襄阳人，团员，汽车与交通工程学院 2019 级机械工程（新能源汽车动力测控系统方向）专业研究生，导师是工学博士吴华伟教授。科研方面：研究生期间主要从事新能源汽车动力系统测控相关研究，参与省级课题一项，市级课题三项，申请发明专利七项，其中授权三项（其中一项为国际专利），实审四项，申请实用新型专利两项，授权两项。学业获奖：2019 年学业奖学金三等；2020 年学业奖学金三等；2021 年学业奖学金二等；第四届全国大学生创新体验竞赛“日新月异”三等奖。目前已签约东风电驱动系统有限公司。

### 申请及授权专利：

[1] MULTIFUNCTIONAL TRANSFER TROLLEY LU102360 ，  
PCT/CN202010156377.1 ， 国际发明专利授权。

[2] 无人驾驶用道路识别装置，发明专利授权，ZL201911151257.6.

[3] 轮毂螺栓力矩检测装置，发明专利授权，ZL202010891618.7.

[4] 一种车库自动泊车方法及终端、存储介质，发明专利授权，  
ZL201911218958.7.

- [5] 智能井盖，发明专利实审，ZL202010149089.3.
- [6] 多功能转运小车，发明专利实审，ZL202010156377.
- [7] 无人驾驶用深度识别装置，发明专利实审，ZL201911424833.X.
- [8] 多功能转运小车，实用新型专利授权，ZL202020271556.5.
- [9] 无人驾驶用深度识别装置，实用新型专利授权，ZL201922490466.5.

# 授权国际发明专利截图

19



LE GOUVERNEMENT  
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG  
Ministère de l'Économie

11 N° de publication :

LU102360

12

## BREVET D'INVENTION

B1

21 N° de dépôt: LU102360

51 Int. Cl.:  
B62B 3/00, B62B 3/04, B62B 5/00, G01G 19/08

22 Date de dépôt: 26/11/2020

30 Priorité:  
06/03/2020 CN 202010156377.1

72 Inventeur(s):  
WU Huawei – 441053 Xiangyang City, Hubei Province, (Chine), CHEN Qian – 441053 Xiangyang City, Hubei Province, (Chine), LIU Zhen – 441053 Xiangyang City, Hubei Province, (Chine), XIN Hongmin – 441053 Xiangyang City, Hubei Province, (Chine), ZHANG Yuanjin – 441053 Xiangyang City, Hubei Province, (Chine), YE Congjin – 441053 Xiangyang City, Hubei Province, (Chine), WAN Rui – 441053 Xiangyang City, Hubei Province, (Chine)

43 Date de mise à disposition du public: 09/06/2021

47 Date de délivrance: 09/06/2021

73 Titulaire(s):  
HUBEI UNIVERSITY OF ARTS AND SCIENCE – 441053 Xiangyang City, Hubei Province (Chine)

74 Mandataire(s):  
KIRKPATRICK SA / NV – 1310 LA HULPE (Belgique)

### 64 MULTIFUNCTIONAL TRANSFER TROLLEY.

57 Disclosed is a multifunctional transfer trolley. The multifunctional transfer trolley includes a trolley plate being movable horizontally; a weighing assembly including a weighing sensor having a pressure-bearing end and a mounting end, the mounting end being mounted to an upper end of the trolley plate; a bearing assembly including a bearing plate, the bearing plate being located above the pressure-bearing end, an upper end of the bearing plate being configured to carry cargo to be transferred; and a lifting assembly including a lifting plate movably installed on the trolley plate in the up and down direction, the lifting plate being located between the bearing plate and the trolley plate.

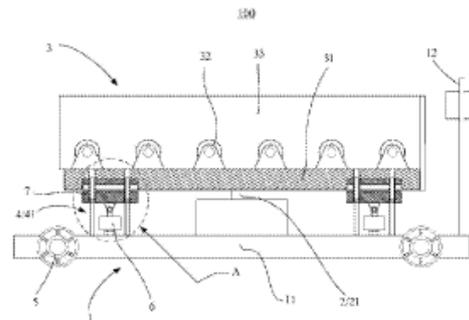


FIG. 1

荣获的荣誉奖励截图





### 人物简介：

王晓东（1995-），男，河北张家口人，中共预备党员，汽车与交通工程学院 2019 级机械工程（新能源汽车动力测控系统方向）专业研究生，指导老师为汪云教授、马强副教授。研究方向：新能源汽车动力系统测控（驱动电机控制）。科研情况：参与项目 3 项，发表或录用论文 3 篇，申请发明专利 1 项，参与发表论文 3 篇。获奖情况：2019 年优秀生源奖学金三等；2019 年学业奖学金二等；优秀共青团干部；优秀党校学员；襄阳市自然科学论文评选二等奖；上海新能源汽车学科创新人才培养研究生暑期学校优秀学术奖；学术之星二等奖。现已成功考取武汉科技大学博士。

### 发表论文：

- [1] 王晓东,马强,冯占雄,温云.永磁同步电机的分数阶协同控制器设计 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(10):97-100.DOI:10.13462/j.cnki.mmtamt.2021.10.022.
- [2] 王晓东,马强,钱思琪,杨桃桃.基于协同观测器的永磁同步电机无传感控制[J].电机与控制应用,2021,48(11):1-5.
- [3] 基于离散时间协同观测器的船舶永磁同步电机无传感控制[J].科

技进步与对策, 2021,38: 166-169.

**发明专利申请:**

[1] 基于 LCL 滤波的电压型 PWM 整流器的协同控制系统及方法 (第一作者) 实审;

## 永磁同步电机的分数阶协同控制器设计\*

王晓东, 马 强, 冯占雄, 温 云

(湖北文理学院纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室, 湖北 襄阳 441053)

**摘要:**为改进永磁同步电机控制性能,设计了一种基于分数阶的协同控制器。首先,将分数阶微积分与协同控制相结合,设计了分数阶速度控制器;其次,设计了协同负载转矩观测器,将观测值反馈至分数阶速度控制器,以降低负载转矩对系统的干扰;最后,设计了离散时间协同观测器,实现转子位置和转速的精确估计,提高系统的稳定性及速度估计性能。仿真结果表明,所提出的控制方案能够改善系统的瞬态响应和鲁棒性,对抖振抑制具有良好的效果。

**关键词:**永磁同步电机;分数阶协同控制器;负载转矩;抖振

**中图分类号:**TH16;TG506 **文献标识码:**A

## Design of Fractional Order Synergetic Controller for Permanent Magnet Synchronous Motor

WANG Xiao-dong, MA Qiang, FENG Zhan-xiong, WEN Yun

(Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang Hubei 441053, China)

**Abstract:** In order to improve the control performance of permanent magnet synchronous motors, a synergetic controller based on fractional order was designed. Firstly, a fractional order speed controller was designed by combining fractional calculus with synergetic control. Secondly, a synergetic load torque observer was designed to feed back the observations to the fractional order speed controller to reduce the disturbance of load torque on the system. Finally, a discrete time synergetic observer was designed, which can realize the accurate estimation of the rotor position and speed and improve the stability of the system and speed estimation performance. The simulation results show that the proposed control scheme can improve the transient response and robustness of the system, and has a good effect on chattering suppression.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; fractional order synergetic controller; load torque; chattering

## 0 引言

滑模控制具有对参数变化不敏感、抗干扰性强、鲁棒性好等特点,能较好地应用于永磁同步电机控制系统中,但是高频控制下换向会引起抖振问题。文献[1]提出一种新型变趋近律构建新的滑模观测器,系统的抖振降低、转子位置及转速估算准确性提高。文献[2]通过选择饱和函数替代传统开关函数,有效的降低了滑模观测器的抖振。文献[3]设计一种引入多次趋近律的分段函数替代传统开关函数,抑制系统的高频抖振。另外,本文提到的协同控制可认为是滑模控制的线性逼近,可以消除抖振问题<sup>[4]</sup>,主要包括两个步骤<sup>[5]</sup>:首先,根据系统约束条件设计流形,即系统状态变量的线性或非线函数;其次,设计协同控制律,将轨迹系统引入具有特定参数的流形。文献[6-7]将

协同控制和永磁同步电机(Permanent magnet synchronous motor, PMSM)速度闭环控制相结合,设计了新型控制策略,并提出了一种滑模负载转矩观测器估计负载转矩,补偿强扰动。借鉴滑模控制的应用成果,如分数阶滑模控制器<sup>[8]</sup>、滑模负载转矩观测器<sup>[9]</sup>、滑模观测器<sup>[10]</sup>等,有效拓展了协同控制在PMSM控制系统中的应用。

本文主要贡献如下:①在文献[6-7]提出的协同控制器(Synergetic controller, SGC)基础上,结合分数阶微积分理论设计了分数阶速度控制器。②设计协同负载转矩观测器将观测值反馈给分数阶速度控制器,降低负载转矩对系统的影响。③设计离散时间协同观测器精确观测转子位置和速度,保证系统的稳定性及速度估计性能,抑制系统抖振。

收稿日期:2021-05-23;修回日期:2021-06-25

\* 基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51307047);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201815);中央引导地方科技发展专项项目(2020ZYD0001)

作者简介:王晓东(1995-),男,河北张家口人,湖北文理学院硕士研究生,研究方向为新能源汽车动力系统测控,(E-mail)wxd163@163.com;通讯作者:马强(1981-),男,河北定州人,湖北文理学院副教授,硕士生导师,博士,研究方向为控制理论及其在电机驱动中的应用,(E-mail)richan@163.com

# 基于协同观测器的永磁同步电机无传感控制\*

王晓东<sup>1</sup>, 马 强<sup>1</sup>, 钱思琪<sup>1</sup>, 杨桃桃<sup>2</sup>

(1.湖北文理学院 纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室,湖北 襄阳 441053;

2.中克骆驼新能源科技有限公司,湖北 襄阳 441116)

**摘 要:** 针对传统滑模观测器使用符号函数引起的抖振问题,提出了一种基于连续函数的协同观测器方法,实现永磁同步电机(PMSM)的无传感控制。首先,研究 PMSM 的离散数学模型。其次,建立  $k+1$  时刻的电流偏差和  $k$  时刻的电流偏差之间的函数关系。最后,利用反正切函数计算转子位置并加入角度补偿,提高观测精度。仿真结果表明,所设计的协同观测器不仅无抖振现象,还具有更高的估算精度及良好的抗干扰性能,比传统滑模观测器可以更好地实现 PMSM 的无传感控制。

**关键词:** 永磁同步电机; 无传感控制; 协同观测器; 抖振

**中图分类号:** TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)11-0001-05

**doi:** 10.12177/emea2021106

## Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Synergetic Observer\*

WANG Xiaodong<sup>1</sup>, MA Qiang<sup>1</sup>, QIAN Siqi<sup>1</sup>, YANG Taotao<sup>2</sup>

(1.Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle,

Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China;

2.Camel & Rimac New Energy Technology Co., Ltd., Xiangyang 441116, China)

**Abstract:** The chattering caused by using symbolic functions exists in the traditional sliding mode observer. In order to solve the problem, a synergetic observer method based on continuous function is proposed to realize the sensorless control of permanent magnet synchronous motor (PMSM). The discrete mathematical model of the PMSM is studied. The functional relationship between the current deviation at time  $k+1$  and that at time  $k$  is established. The arctangent function calculates the rotor position and adds angle compensation to improve the observation accuracy. The simulation results show that the designed synergetic observer has no chattering and has higher estimation accuracy and good anti-interference performance. It can better realize the sensorless control of the PMSM than the traditional sliding mode observer.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); sensorless control; synergetic observer; chattering

## 0 引 言

永磁同步电机(PMSM)无传感器控制技术通

过实时检测电机绕组中的电信号,利用反电动势实现电机转子位置及速度的估算,常用的基于反电动势的模型方法有滑模观测器<sup>[1]</sup>、模型参考自

收稿日期: 2021-08-02; 收到修改稿日期: 2021-09-18

\* 基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51307047),湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(Y201815),中央引导地方科技发展专项项目(2020ZYD001)

作者简介: 王晓东(1995—),男,硕士研究生,研究方向为新能源汽车动力系统测控。

马 强(1981—),男,博士,副教授,研究方向为控制理论及其在电机驱动中的应用。

— 1 —

# 基于离散时间协同观测器的船舶 永磁同步电机无传感控制

王晓东,汪云,马强,叶从进,钱思琪

(湖北文理学院 机电汽车动力系统设计及测试湖北省重点实验室,湖北 襄阳 441003)

**摘要:**针对传统滑模观测器(sliding mode observer, SMO)在船舶永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)无传感控制系统中的抖振问题,提出一种用于船舶 PMSM 无传感控制的离散时间协同观测器(discrete time synergetic observer, DTSO)方法。首先,对推进电机的数学模型进行时间离散化处理;其次,以不同时刻电流观测误差作为流形,选择合适的系数矩阵 $T$ 和 $G$ ,使 $k+1$ 和 $k$ 时刻的流形之差收敛,设计DTSO模型。仿真结果表明,提出的DTSO有效抑制了系统抖振,提高了转子位置及速度跟踪精度,增强了系统抗扰性能。

**关键词:**离散时间协同观测器;永磁同步电机;无传感控制

**中图分类号:**TM341

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-7348(2021)09-0166-04

## 0 引言

目前,船舶电力推进是船舶行业绿色发展的重要方向<sup>[1-4]</sup>,推进电机类型及控制方式是船舶电力推进的关键。永磁同步电机(PMSM)具备高功率密度、大力矩惯量比、体积小、可靠性好等优势,在船舶高性能推进运行中得到广泛应用<sup>[5-7]</sup>。PMSM 高性能运行要求获取准确转子位置及速度信号,传统方法通过机械传感器测量获得。然而,船舶运行过程中常处于高湿度、高盐度等恶劣海洋环境中,极易引发传感器故障,造成船舶安全稳定性能降低,且传感器安装维修困难。

无传感器控制技术的出现促进船舶电力推进发展,通过对推进电机转子位置及转速信息的准确观测,弥补了机械传感器在船舶的高性能运行控制中的不足。滑模观测器<sup>[8-9]</sup>是 PMSM 高性能无传感控制中常用的方法,因鲁棒性好、抗干扰性强和不依赖参数变化等优势而成为研究热点。但是,滑模观测器通过开关函数控制,其控制律的不连续项造成固有抖振问题。申永钢等<sup>[10]</sup>将扩展反电势估算值反馈至定子电流观测环节设计扩展滑模观测器,采用饱和函数代替开关控制函数,有效改善了扩展滑模观测器抖振问题;张强

等<sup>[11]</sup>扩展滑模电流观测器方程引入变趋近律,重构新型滑模观测器进行 PMSM 转子位置及转速估算,提高了动态响应能力并有效抑制了系统抖振;周贝贝等<sup>[12]</sup>设计一种基于幂次趋近律引入滑模观测器观测无刷直流电机的反电势,通过选取合适的幂次趋近律指数实现对抖振的抑制效果。

协同理论和滑模理论以相同原理驱动系统向流形运动,克服了滑模理论固有的抖振现象<sup>[13]</sup>,本质上属于一种非线性控制方法。协同理论包括两个步骤:①根据系统约束条件设计流形,即系统状态变量线性或非线性函数;②设计协同控制律,将轨迹系统引入具有特定参数的流形<sup>[14-16]</sup>。

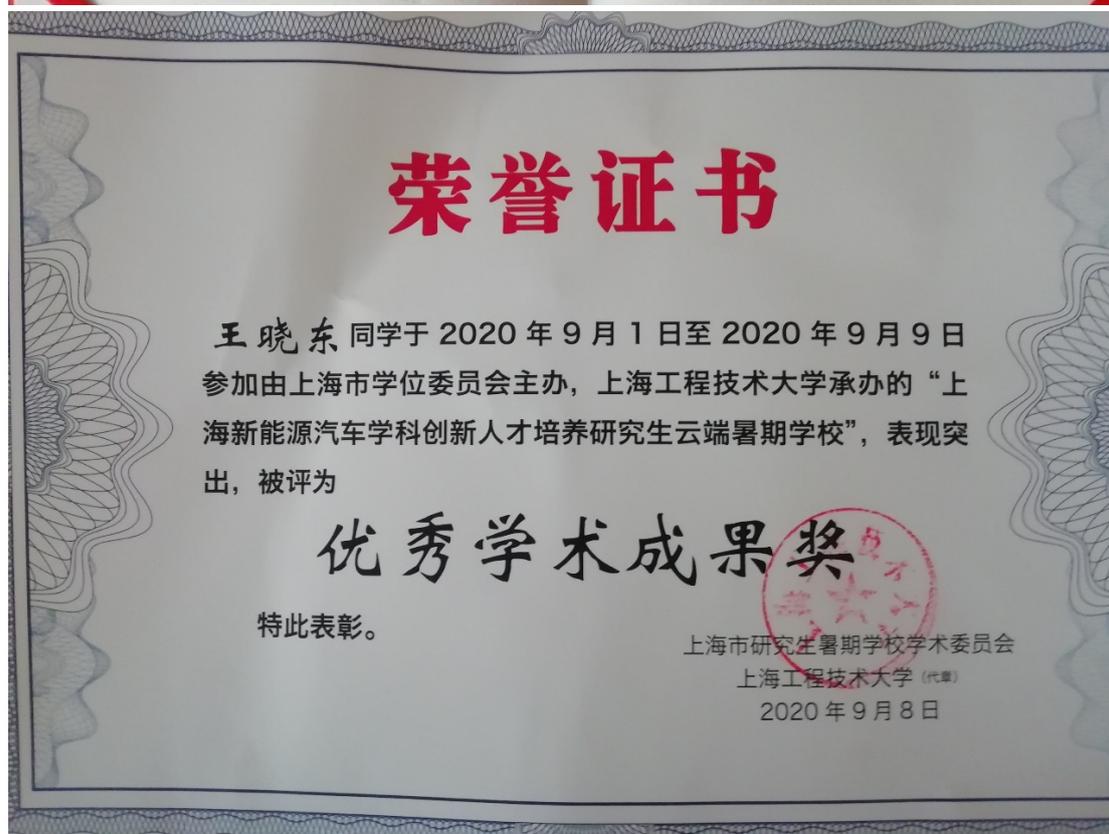
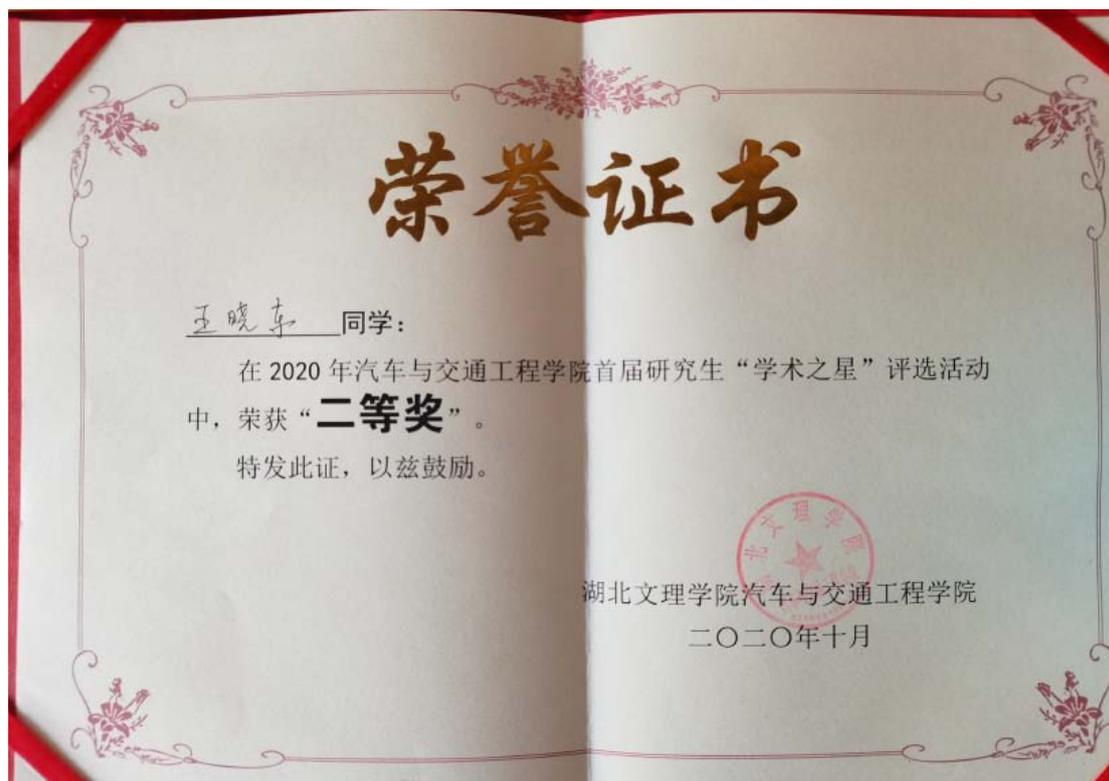
本文提出基于协同理论<sup>[14]</sup>的 PMSM 无传感控制 DTSO 方法解决传统 SMO 抖振问题。协同理论的核心是函数关系式 $S_k = -TS_k - S_k$ 为流形。设置 $y_k$ 为 $k$ 时刻的电流观测误差并将其定义为流形,则DTSO设计的关键是选择合适的系数矩阵 $T$ 和 $G$ ,使 $k+1$ 和 $k$ 时刻的流形之差收敛,保证系统稳定性及速度估计的良好动态性能。最后,在 Matlab/Simulink 中进行仿真实验,验证提出的DTSO方法能否有效抑制抖振,以及能否提高系统观测精度和抗扰性能。

**收稿日期:**2021-07-15

**基金项目:**国家自然科学基金青年基金项目(51307047),湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2018103),中央引导地方科技发展专项项目(2020ZYDD001)

**作者简介:**王晓东(1995—),男,河北张家口人,湖北文理学院机电汽车动力系统设计及测试湖北省重点实验室硕士研究生,研究方向为新能源汽车动力系统控制;马强(1981—),男,河北定州人,博士,湖北文理学院机电汽车动力系统设计及测试湖北省重点实验室副教授,硕士生导师,研究方向为控制理论及混合动力驱动中的控制。

荣获的荣誉奖励部分截图





# 荣誉证书

王晓东同学：

在 2019 年度被评为

## 优秀共青团干部

特发此证，以资鼓励。

共青团湖北文理学院委员会

2020年5月1日



# 荣誉证书

王晓东 同学：

在机械工程学院第四十二期党校组织中，成绩显著，表现突出，  
被评为“优秀党校学员”。

特发此证，以资鼓励！

中共湖北文理学院机械工程学院委员会

二零一九年十一月



# 荣誉证书

HONORARY CREDENTIAL

王晓东，汪云，马强，叶从进，钱思琪 同志撰写的基于离散时间协同观测器的船舶永磁同步电机无传感控制论文被评为襄阳市第二十二届自然科学优秀学术论文成果二等奖。

襄阳市科学技术协会

襄阳市人力资源和社会保障局

襄阳市科技局

二〇二一年八月



### 人物简介：

宛加雄（1996-），男，湖北黄冈人，中共预备党员，汽车与交通工程学院 2019 级机械工程（新能源汽车动力测控系统方向）专业研究生，导师是工学博士丁华锋老师。科研方面：研究生期间主要从事结构设计及 CAE 分析，参与省级课题 1 项，校企合作项目 1 项，发表核心会议论文 1 篇，参与发表论文 1 篇，申请发明专利 6 项，其中授权 2 项，实审 4 项。参与学科竞赛 3 项：2020 中国大学生方程式汽车大赛二等奖；2020 年第十三届全国三维数字化创新大赛国家级三等奖；2020 年湖北省第十一届“挑战杯”大学生创业计划竞赛银奖；学业获奖：2019 年学业奖学金三等；2020 年学业奖学金三等；2021 年学业奖学金三等；目前已签约华域视觉科技（武汉）有限公司。

### 发表论文：

- [1] 宛加雄,丁华锋,谷雨原,金先志,潘俊杰.汽车转向节臂端部冷精整的回弹量预测及仿真[J].塑性工程学报（已录用）
- [2] 丁华锋,潘俊杰,宛加雄,谷雨原,金先志.GTN 损伤参数对 DP780 钢板成形极限曲线的影响[J].塑性工程学报,2022,29(04):151-157.

授权专利:

- [1] 吴华伟, 宛加雄, 刘祯, 薛君尧, 杜聪聪, 陈前, 丁华锋. 弹簧减震结构以及履带车. 授权发明专利, 专利号: 201911034446.5.
- [2] 吴华伟, 宛加雄, 刘祯, 杜聪聪. 一种链传动结构以及履带车. 授权发明专利, 专利号: 201910915538.8.
- [3] 丁华锋, 宛加雄, 苏文杭, 谷雨原. 方程式悬架及赛车. 受理发明专利, 专利号: 202010855357.3.
- [4] 丁华锋, 宛加雄, 梁德民, 谷雨原, 潘俊杰, 金先志. 一种自动喷洒的消毒防疫履带车. 受理发明专利, 专利号: 202011124122.3
- [5] 丁华锋, 宛加雄, 谷雨原, 潘俊杰, 金先志. 一种裁剪装置及纸桶卷桶机. 受理发明专利, 专利号: 202011578722.7
- [6] 丁华锋, 宛加雄, 谷雨原, 潘俊杰, 金先志. 一种用于纸桶生产的全自动压板机. 受理发明专利, 专利号: 202011426138.X

# 授权发明专利截图



证书号第 4447001 号



# 发明专利证书

发明名称：弹簧减震结构以及履带车

发明人：吴华伟;宛加雄;刘祯;薛君尧;杜聪聪;陈前;丁华锋;万锐

专利号：ZL 2019 1 1034446.5

专利申请日：2019 年 10 月 28 日

专利权人：湖北文理学院

地址：441000 湖北省襄阳市隆中路 7 号

授权公告日：2021 年 05 月 28 日

授权公告号：CN 110723227 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

荣获竞赛证书截图





No. 20204807010101

# 全国三维数字化创新设计大赛

National 3D Innovative Design Competition

## 龙鼎奖

(全国总决赛)

获得奖项：三等奖

参赛院校：湖北文理学院

参赛团队：面达人

指导教师：秦涛 杨沫

团队成员：魏超 温景阳 邱金星 马渊明 宛加雄

参赛作品：多功能自动煮面一体机

参赛板块：开放自主命题

参赛方向：数字工业设计大赛



科学技术部 教育部 工业和信息化部 中国科学技术协会 指导  
大赛官网：<https://3DDS.3DDL.net>

# 获奖证书

张林 马玉龙 宛加雄 同学：

你（们）的作品《面向个性化需求的（智能）形迹管理器具研发》  
在2020年湖北省第十一届“挑战杯”大学生创业计划竞赛中，荣获

## 银 奖

学校：湖北文理学院

指导老师：陈国华

特发此证。



2020年9月



#### 人物简介:

刘梦迪, 女, 湖北襄阳人, 中共党员, 汽车与交通工程学院 2019 级机械工程(新能源汽车动力测控系统方向)专业研究生, 导师是吴钊教授。科研方面研究生期间主要从事刚柔耦合输流管的振动稳定性研究, 发表 SCI 论文 1 篇, 授权实用新型专利 1 项。目前已签约大力电工股份有限公司。

#### 发表论文:

[1] Liu Mengdi, Wang Yikun, Qin Tao, Zhao Jing, Du Yujin, Nonlinear Dynamics of Cross-Flow Tubes Subjected to Initial Axial Load and Distributed Impacting Constraints, Shock and Vibration, vol. 2021, Article ID 2359090, 15 pages, 2021.  
<https://doi.org/10.1155/2021/2359090>.

#### 授权专利:

[1] 刘梦迪;钱伟;吴钊;吴华伟;李正;雷宇.载车平台及立体停车库.授权实用新型专利,专利号: ZL20202828379.9

Research Article

## Nonlinear Dynamics of Cross-Flow Tubes Subjected to Initial Axial Load and Distributed Impacting Constraints

Mengdi Liu, Yikun Wang , Tao Qin, Jing Zhao, and Yujin Du

School of Mechanical Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China

Correspondence should be addressed to Yikun Wang; wangyikun18@hbuaas.edu.cn

Received 3 June 2021; Accepted 26 August 2021; Published 7 September 2021

Academic Editor: Said Elias

Copyright © 2021 Mengdi Liu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The dynamics of cross-flow tubes were studied in consideration of initial axial load and distributed impacting constraints, modeled as cubic and trilinear spring constraints. The tubes were modeled as Euler-Bernoulli beams and supported at both ends, including the simply supported tube and clamped-clamped tube. The analytical model involves a time-delayed displacement term induced by the cross flow based on the quasi-steady theory. For simplicity, a single flexible supported beam in a rigid square array of cylinders was studied by using the damping-controlled mechanism. The mean extension of the tube was considered, and thus, it added another nonlinear term in the equation of motion. Results show that the tube loses stability by buckling and fluttering at various initial pressure loads and cross-flow velocities. An increase was observed for critical velocities and initial pressure loads. Chaotic oscillations were observed for the trilinear spring model. The distribution of the impacting forces was also calculated. Some of the fresh results obtained in the impact system are expected to be helpful in understanding and controlling the dynamic responses of fluid-conveying pipes.

### 1. Introduction

Cross-flow heat exchanger tubes are found in many power generating industries, such as in steam generators, boilers, and nuclear reactors [1–4]. For the past 50 years, the cross-flow-induced dynamics of tube arrays has become an important topic worldwide. Studies on heat exchanger tube failures related to flow induced vibration began in the 1950s and have greatly progressed since the 1970s [5–7]. Tube arrays exhibit fluid elastic instabilities at sufficiently high cross-flow velocities. These instabilities are related to negative fluid damping caused by the flow-induced dynamic forces acting on the tubes. With negative damping, the surrounding fluid on the tubes exerts a positive input of work [3, 8–10]. These flow-induced instabilities may severely damage the tubes. For example, the resultant large displacement may cause the tube to impact onto the loose supports and always wear with loose supports [11]; the axial pressure from manufacturing may cause the tube to lose stability either by fluttering or buckling [12–14].

Many studies have focused on the dynamics of cross-flow induced vibrations of heat exchanger tubes by using single degree of freedom models and complicated continuous models of flexible beams. Price [1] classified the fluid-elastic instability models into seven groups: “jet-switch,” “quasi-static,” “inviscid flow,” “quasi-steady,” “semi-analytical,” “unsteady,” and “computational fluid dynamic.” In [15] and [16], the fluid force coefficients for a tube array and critical cross-flow velocities were determined through experiment observations and numerical results. Rzentkowski and Lever [17] conducted the stability analysis of tube arrays subjected to turbulence. Results showed that a nonlinear flexible tube moves in the transverse direction perpendicular to the direction of the cross flow. In their study, the other tubes surrounding the flexible tube were assumed to be rigid. The results showed that cross-flow turbulence may reduce the fluid-elastic instability. The displacement of the tube may become large when the cross-flow velocity increases after the onset of fluid-elastic instability. In this case, the nonlinear effects become important to some extent.

# 授权实用新型专利截图

