

doi: 10.7690/bgzdh.2023.06.021

# 轮足混合式移动机器人动力转向系统

卫 伊<sup>1</sup>, 徐震宇<sup>2</sup>, 刘 勇<sup>2</sup>, 王会彬<sup>1</sup>, 黎铭康<sup>1</sup>, 高学山<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081; 2. 内蒙古第一机械集团股份有限公司科研院所, 内蒙古 包头 014000)

**摘要:** 为提高轮足混合式移动机器人的路面适应能力, 设计一种新的动力转向系统。分析传统动力转向装置无法应用于轮足混合式机器人的原因, 并做出问题描述; 给出新型动力转向系统的设计要求并提供一种新型动力转向系统的结构; 描述该系统可以实现的功能。结果表明: 该系统能解决传统动力转向系统不能使车轮大幅度升降的问题, 对未来转向系统的设计提供借鉴。

**关键词:** 移动机器人; 动力转向系统; 轮足混合; 优化设计

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A

## Design of Power Steering System for Wheel-foot Hybrid Mobile Robot

Wei Yi<sup>1</sup>, Xu Zhenyu<sup>2</sup>, Liu Yong<sup>2</sup>, Wang Huibin<sup>1</sup>, Li Mingkang<sup>1</sup>, Gao Xueshan<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Research Institute, Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., Baotou 014000, China)

**Abstract:** In order to improve the road adaptability of the wheel-foot hybrid mobile robot, a new power steering system is designed. The reason why the traditional power steering device can not be applied to the wheel-foot hybrid robot is analyzed, and the problem is described. The design requirements of the new power steering system are given, and the structure of a new power steering system is provided. The functions of the system are described. The results show that the system solves the problem that the traditional power steering system can not make the wheels rise and fall by a large margin, and provides a reference for the design of future steering system.

**Keywords:** mobile robot; power steering system; wheel-foot hybrid; optimized design

## 0 引言

随着现代科学的发展和进步, 机器人逐渐进入到生活的各个领域, 其中移动机器人在很多特殊领域得到了广泛的应用, 例如军事探测、工程探险、反恐防暴、抢险救灾等, 逐渐成为机器人研究领域的重点之一, 并得到迅速发展。移动机器人按照运动方式可以分为轮式、履带式和足式等, 其中: 轮式机器人移动速度快, 但越障能力较弱; 履带式机器人的越障能力相比于轮式机器人更好, 但结构较笨重, 移动速度慢, 并且不易转弯; 足式机器人对路面的适应能力更强, 但移动速度较慢。为同时提高移动机器人的运动速度和路面适应能力, 可以考虑将轮式与足式这 2 种移动方式混合使用<sup>[1]</sup>。在路面平整时, 使用轮式, 可以使移动机器人的移动速度提高; 当路面条件发生变化, 轮式无法适应时, 可以切换至足式, 使移动机器人可以向前移动, 提高移动机器人的路面适应能力。

在轮足混合式移动机器人中, 应重点解决的问题是在路面条件发生改变时, 如何将轮胎升起或下

降, 使机器人实现轮足切换。

传统的转向系统可以承受车辆在行驶过程中车轮的小幅度径向跳动, 但针对轮足混合式移动机器人, 该转向系统无法实现使车轮升起或下降的功能。设想该机器人在崎岖山地中移动时, 当车轮无法满足使用要求, 需要将车轮升起, 切换至足式移动, 此时车轮径向移动距离已远远超过传动转向机构能够承受的范围。笔者基于传统的电控转向系统, 对其结构进行优化和重新设计。

## 1 动力转向系统基本设计概述

### 1.1 问题描述

转向系统是指用来改变或保持车辆行驶或倒退方向的一系列装置, 可以帮助驾驶员控制车辆的行驶方向。传统的转向系统分为 2 大类: 机械转向系统和动力转向系统, 其中动力转向系统又包括液压助力转向系统和电控助力转向系统<sup>[2-3]</sup>。

机械转向系统以驾驶员的体力作为转向能源<sup>[4-5]</sup>, 其中所有传动件都是机械的。机械转向系统由转向操纵机构、转向器和转向传动机构 3 大部分

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-03-05

作者简介: 卫 伊(1999—), 女, 河北人, 硕士, 从事移动机器人领域研究。E-mail: 1565857364@qq.com。

组成<sup>[6]</sup>。当汽车转向时，驾驶员对转向盘施加一个转向力矩。该力矩通过转向轴、转向万向节和转向传动轴输入转向器<sup>[7]</sup>。经转向器放大后的力矩和减速后的运动传到转向摇臂，再经过转向直拉杆传给固定于左转向节上的转向节臂，使左转向节和它所支承的左转向轮偏转<sup>[8]</sup>。为使右转向节及其支承的右转向轮随之偏转相应角度，还设置了转向梯形。转向梯形由固定在左、右转向节上的梯形臂和两端与梯形臂作球铰链连接的转向横拉杆组成。

动力转向系统是兼用驾驶员体力和发动机动力为转向能源的转向系统<sup>[9]</sup>。在正常情况下，汽车转向所需能量，只有一小部分由驾驶员提供，而大部分是由发动机通过动力转向装置提供的<sup>[10]</sup>。在动力转向装置失效时，一般还应当能由驾驶员独立承担汽车转向任务；因此，动力转向系统是在机械转向系统的基础上加设一套动力转向装置而形成的，其中电控转向系统具有很多优点，例如系统中只增加电动机和减速机，可以组成一个整体，系统结构轻量化并且易于装车<sup>[11]</sup>，这种转向系统更适用于大型车辆，可以减小驾驶员控制车辆转向时所施加在转向盘上的力。

普通的轮式移动机器人在山地路面上行驶时，车轮常常会发生比较大的颠簸，在这种颠簸下，车辆的悬挂机构会起到一定的减震作用，但这种径向跳动会对悬挂系统和转向系统造成非常大的影响，一旦径向跳动的幅度超过悬挂系统的减震能力范围，就会发生车辆转向系统、悬挂系统和底盘结构的损坏。另外，如果普通的轮式移动机器人在行驶过程中遇到一个超过底盘高度的障碍时，该移动机器人就无法实现越障，只能返回并寻找其他路线。这对于需要参加军事探测、工程探险、反恐防爆、抢险救灾等任务来说，是非常不利的。

为使移动机器人能够在特殊路况下顺利地完成任务，需要一种特殊的轮足混合式移动机器人。该移动机器人可以实现在平整路面上以轮式移动，提高移动速度，快速到达任务地点，当遇到山地等不平整路面时，该移动机器人可以将车轮升起，将运动足放下，使用足式跨越障碍。

这种轮足混合式移动机器人中，最重要的功能就是切换轮足 2 种移动方式，当使用足式移动时，需要将车轮上升，为运动足的下降提供空间，当使用轮式移动时，需要将车轮下降至初始位置，切换至轮式移动。以上这些功能都涉及到移动机器人的动力转向系统，传统的动力转向系统并不能实现使

车轮自由地大幅度升降的功能；因此，需要设计一种全新的动力转向系统，以实现上述功能。

## 1.2 动力转向系统设计要求

将笔者设计的动力转向系统应用于一种轮足混合式移动机器人，在崎岖山地上移动时，该机器人可以切换轮式与足式 2 种移动方式。当路面较平缓时，该机器人使用轮式移动方式，可以提高移动速度；当路面非常崎岖，轮式无法正常越过障碍时，将通过动力转向系统控制车轮上升，并使运动足下降，使用足式移动方式继续前行。因此，该动力转向系统应满足以下设计要求：

- 1) 移动机器人在较平缓路面使用轮式移动方式，出现转弯需求时，方向盘能通过转向系统控制车轮进行转向；
- 2) 当路面有大型障碍，轮式无法实现越障时，移动机器人需要切换足式移动方式，此时转向系统应控制车轮进行大幅度的上升，为运动足的下降提供空间；
- 3) 当路面恢复平整时，需要切换为轮式移动方式，提高移动速度，此时转向系统应控制车轮进行大幅下降。

## 2 动力转向系统设计

### 2.1 基本原理

动力转向系统通常是用在车辆上，车辆在转向时，转向侧的车轮为内轮，另一侧的车轮为外轮，例如当车辆向右转动时，前右轮为转向内轮，前左轮为转向外轮<sup>[12]</sup>。如图 1 所示，车辆低速行驶时，转向内轮与转向外轮的转角应满足阿克曼转角几何关系：

$$\cot \alpha - \cot \beta = B / L \quad (1)$$

式中： $\alpha$  为转向外轮转角； $\beta$  为转向内轮转角； $B$  为转向内外轮主销中心线延长线与地面交点间的距离； $L$  为轴距。

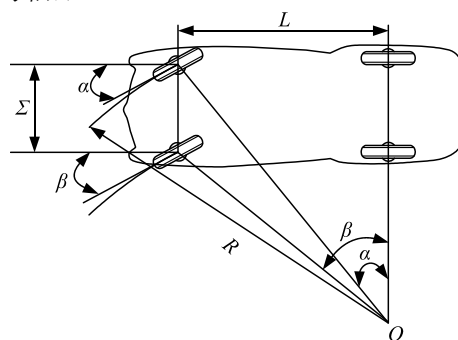


图 1 阿克曼转角几何原理模型

### 2.2 结构设计

针对以上设计要求和基本要求，笔者提供了如图 2 和 3 所示的动力转向系统结构设计。由于前视图是从转向机构的前方指向后方，图中标注的所有右侧和左侧均指代实际驾驶位的右侧和左侧。

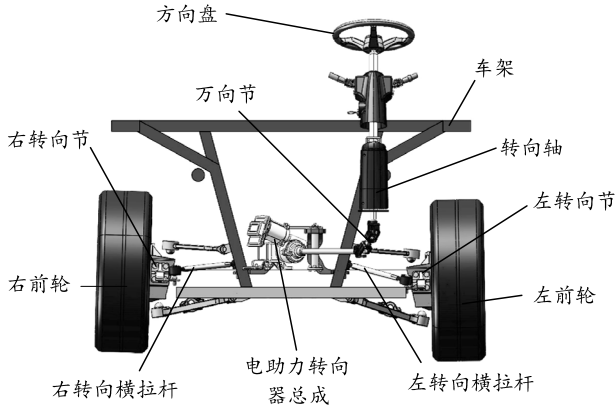


图 2 动力转向系统正视图

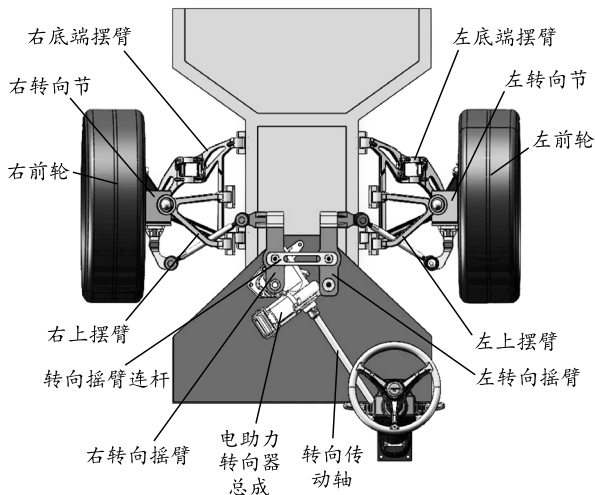


图 3 动力转向系统俯视图

图 2 为总体系统结构的正视图，图中的车架仅作为示意，不表示具体机器人的结构；图 3 为动力转向系统俯视图。为清晰起见，隐藏了图 2 中可见的车架部分。如图 2 和 3 所示，该动力转向系统的结构主要包括机械转向装置、电动转向器和转向传动装置。其中机械转向装置包括方向盘、转向轴和连接机构等，电动转向器在本结构中是指电动力转向器总成，转向传动装置主要包括内拉杆、外拉杆、转向节等。

图 4 为转向传动部分细节侧视图，为清晰起见，隐藏了车轮部分。图中，方向盘的输出端通过转向轴连接 4 个万向节，通过 4 个万向节将方向盘输出的力和运动的传动方向转变为向后侧传动，实现控制位于方向盘后侧的转向轮的功能。万向节通过转

向传动轴与电动力转向器总成相连，电动力转向器总成是一个整体，内部包含了传感器、控制器和电机等电子装置，将方向盘的转向扭矩信号转化为电流信号，并将电流信号传送至电机，电动力转向器内置电机的输出端通过转动齿轮与右动力转向摇臂连接，控制转向摇臂的转动。

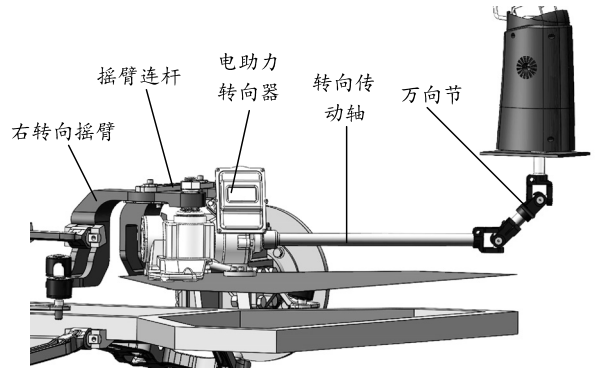


图 4 转向传动部分细节侧视图

图 5 和 6 分别是右侧和左侧拉杆部分的细节正视图。

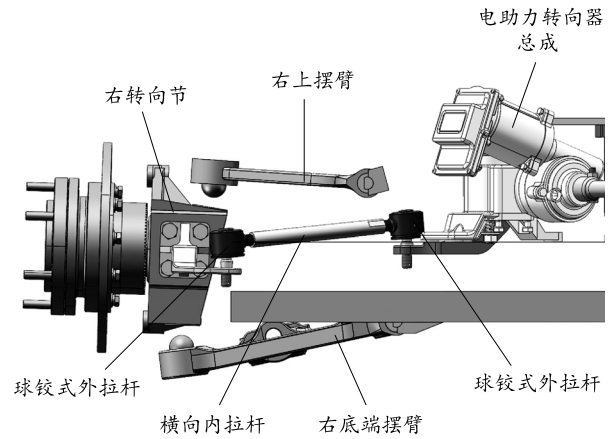


图 5 右拉杆部分细节

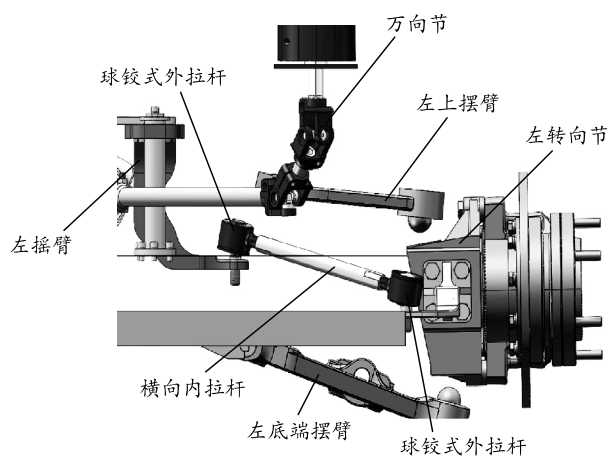


图 6 左拉杆部分细节

图 5 中，右动力转向摇臂右输出端向右连接球铰式外拉杆、横向内拉杆和另一个球铰式外拉杆，

内拉杆和外拉杆被摇臂输出的力带动，靠近车轮一侧外拉杆的输出端连接右转向节等车轮结构，并通过转向节带动车轮实现转向运动。

图 6 中，右动力转向摇臂前输出端向左通过转动轴承与摇臂连杆相连，摇臂连杆向左通过转动轴承与左动力转向摇臂相连，左动力转向摇臂前输出端通过顶轴固定在孔位板上，使其与右动力转向摇臂形成一个平行四边形转动的形式，当右转向摇臂转动时，便会带动左转向摇臂向相同的方向转动，保证车轮转动方向一致。左动力转向摇臂的左输出端连接球铰式外拉杆、横向内拉杆和另一个球铰式外拉杆，球铰式外拉杆与左转向节相连，将左转向摇臂的力和运动输出至左轮。

### 2.3 转向系统机构

转向器的机构如图 7 所示。图中有 A、B、C、D 4 个固定铰支点。以 A、B 铰支点的中点为坐标原点，建立平面直角坐标系。铰支点 C、D 关于 Y 轴分别以铰支点 A、B 为中心关于 Y 轴对称。

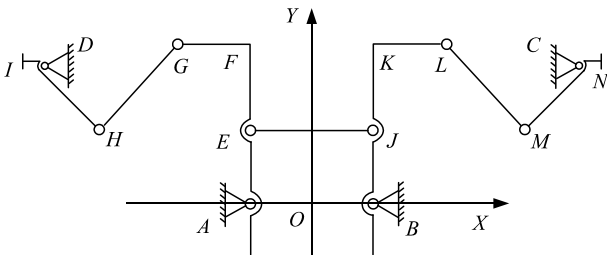


图 7 转向器机构

转向器机构共有 7 个杆件，10 个低副，则自由度个数为：

$$F=3n-2P_L-P_H=3\times 7-2\times 10=1。 \quad (2)$$

方向盘的转动带动杆件 A E F G 的转动，最终实现车轮末端 I 和车轮末端 N 的转动。定义图 7 中 A、B、C、D 各点的坐标为  $(x_A, y_A)$ ,  $(x_B, y_B)$ ,  $(x_C, y_C)$ ,  $(x_D, y_D)$ 。图 6 中各个杆件的各个端点之间的距离如表 1 所示。

表 1 各杆件端点之间的距离

端点	距离	端点	距离
EJ	$L_1$	GH	$L_5$
AE	$L_2$	HI	$L_6$
EF	$L_3$	DI	$L_7$
FG	$L_4$		

I 点与 N 点的位置可表示为：

$$\begin{aligned} (x_I - x_D)^2 + (y_I - y_D)^2 &= L_7^2; \\ (x_N - x_C)^2 + (y_N - y_C)^2 &= L_7^2. \end{aligned} \quad (3)$$

转向器顺时针旋转后各杆件的角度关系如图 8 所示。

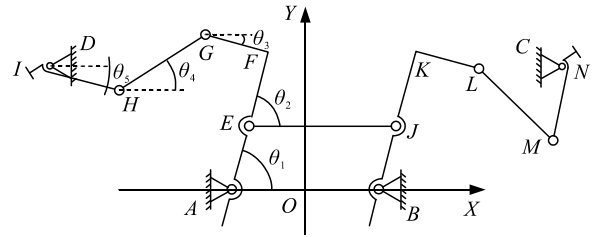


图 8 顺时针转向的机构

由几何关系可以得到  $\theta_1 = \theta_2$ ,  $\theta_2 = \theta_3 = 90^\circ$ 。铰支点 A 与铰支点 D 之间的坐标关系可表示为：

$$\left. \begin{aligned} x_A - x_D &= -L_2 \cos \theta_1 - L_3 \cos \theta_2 + L_4 \cos \theta_3 + \\ &L_5 \cos \theta_4 + L_6 \cos \theta_5 = -(L_2 + L_3) \cos \theta_1 + \\ &L_4 \sin \theta_1 + L_5 \cos \theta_4 + L_6 \cos \theta_5 \\ y_A - y_D &= -L_2 \sin \theta_1 - L_3 \sin \theta_2 - L_4 \sin \theta_3 + \\ &L_5 \sin \theta_4 - L_6 \sin \theta_5 = -(L_2 + L_3) \sin \theta_1 - \\ &L_4 \sin \theta_1 + L_5 \sin \theta_4 - L_6 \sin \theta_5 \end{aligned} \right\}。 \quad (4)$$

消去  $\theta_4$  可得：

$$\left. \begin{aligned} X_1^2 + X_2^2 + L_6^2 - L_5^2 - 2X_1 L_6 \cos \theta_5 + 2X_2 L_6 \sin \theta_5 &= 0 \\ X_1 &= x_A - x_D + (L_2 + L_3) \cos \theta_1 - L_4 \sin \theta_1 \\ X_2 &= y_A - y_D + (L_2 + L_3) \sin \theta_1 + L_4 \cos \theta_1 \end{aligned} \right\}。 \quad (5)$$

最终可以求解得：

$$\left. \begin{aligned} \theta_5 &= \arcsin \left( \frac{-2Y_1 Y_3 + 2\sqrt{Y_2^4 + Y_2^2 Y_3^2 - Y_1^2 Y_2^2}}{2(Y_3^2 + Y_2^2)} \right) \\ Y_1 &= X_1^2 + X_2^2 + L_6^2 - L_5^2 \\ Y_2 &= 2X_1 L_6 \\ Y_3 &= 2X_2 L_6 \end{aligned} \right\}。 \quad (6)$$

以上计算说明， $\theta_1$  与  $\theta_5$  是一一对应的关系。当方向盘转动时，会改变  $\theta_1$  的值， $\theta_1$  可以独立控制左轮转角  $\theta_5$ 。同理，可以推导出  $\theta_1$  独立控制右轮转角的解析式。

### 3 动力转向系统功能实现

1) 首先需要实现的是转向功能，当方向盘发生转动时，万向节和转向传动轴将方向盘的转动形式和转矩输出至电动力转向器，电动力转向器发生转动，带动左右 2 个动力转向摇臂发生转动，左右动力转向摇臂通过内拉杆与球铰式外拉杆结构将转动输出至车轮，从而使车轮发生左右转动。

2) 由于此结构用于一种特殊的轮足混合式移动机器人，当遇到大型障碍或非常崎岖的山路，使用车轮已无法正常移动时，需将车轮大幅度地升起，此时，上摆臂和底端摆臂内置的驱动装置带动其向上旋转，进而带动车轮有上升趋势；同时，车轮带

动球铰式外拉杆结构发生转动，从而使内拉杆向上转动，逐渐完成车轮向上升起动作，如图 9 所示。

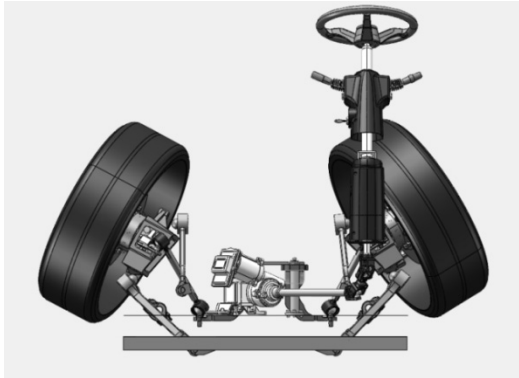


图 9 车轮升起状态

3) 当机器人通过运动足已经越过大型障碍或通过非常崎岖的山路，恢复到平整路面上移动时，使用运动足的移动过于缓慢，需提高移动速度，快速到达任务地点，需将车轮大幅度地下降，此时，上摆臂和底端摆臂内置的驱动装置带动其向下旋转，进而带动车轮有下降趋势；同时，车轮带动球铰式外拉杆结构发生转动，从而使内拉杆向下转动，逐渐完成车轮向下降落的动作。

### 4 结束语

笔者设计一种新型的动力转向系统，其结构主要包括机械转向装置、电动转向器和转向传动装置。其中：机械转向装置包括方向盘、转向轴和连接机构等；电动转向器在本结构中是指电助力转向器总成；转向传动装置主要包括内拉杆、外拉杆、转向节等。这种动力转向系统可以实现使车轮转向和大

幅度升降的功能，能够使机器人在遇到车轮无法越过的障碍时，将车轮升起，切换为足式运动，顺利越过障碍。

### 参考文献：

[1] 王鹏飞, 孙立宁, 黄博. 地面移动机器人系统的研究现状与关键技术[J]. 机械设计, 2006(7): 1-4.

[2] 王倩, 蔺毅. 汽车动力转向系统的发展[J]. 农业装备与车辆工程, 2009(3): 45-46.

[3] 王波. 助力转向系统的发展探析[J]. 时代农机, 2018, 45(3): 84.

[4] 杨树岭, 汪贵行, 汪学慧. 电动汽车转向系统的结构[J]. 汽车维修与保养, 2014(11): 99-101.

[5] 闫戛. 重载汽车双轴转向系统的设计与优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.

[6] 高文华, 李阳. 汽车转向系统摩擦学技术与应用[J]. 中国设备工程, 2017(16): 101-103, 106.

[7] 王军. 重型汽车转向系统的结构分析与设计方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.

[8] 王玉梅, 刘亚梅, 王立威, 等. 微型汽车循环球式转向器齿扇设计参数分析[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2005(2): 145-147.

[9] 韩振. 汽车电动转向系统优化设计及仿真分析[D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2020.

[10] 杨康. 重型卡车液压助力转向系统设计及转向特性匹配研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.

[11] 陈满. R 型电动助力转向器的结构设计与参数优化[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2015.

[12] 沈志煌. 汽车的转向[M]. 北京: 人民交通出版社, 1956: 3-5.

\*\*\*\*\*

(上接第 91 页)

### 参考文献：

[1] BAO G Q, XIONG S S, IEEE M. Vision-based miniature aircraft flight control horizon extraction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2005, 54(3): 1067-1072.

[2] 丛杨, 唐延东, 李小毛, 等. 基于天际线识别的无人机实时姿态角估计[J]. 仪器仪表学报, 2009(5): 938-943.

[3] 刘松涛, 周晓东, 王成刚. 复杂海空背景下鲁棒的天际线检测算法研究[J]. 光电工程, 2006(8): 5-10.

[4] 吕俊伟, 王成刚, 周晓东, 等. 基于分形特征和 Hough

变换的海天线检测算法[J]. 海军航空工程学院学报, 2006, 21(5): 545-548.

[5] 张春友, 龙长江, 吴伟, 等. 小型无人机姿态解算方法研究[J]. 测控技术, 2018(2): 47-50.

[6] 李小毛, 王智峰, 唐延东. 基于形状保持主动轮廓模型长直线的检测[J]. 计算机工程, 2008, 34(1): 53-55, 58.

[7] VAHRAM S Y. Vision based guidance and flight control in problems of aerial tracking[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.

[8] BRADLEY D, ROTH G. Adaptive Thresholding using the IntegrallImage[J]. Journal of graphics tools, 2007, 12(2): 13-21.