

DOI: 10.3901/JME.2016.13.001

混合驱动机构研究进展与发展趋势*

李瑞琴 王 英 王明亚 赵耀虹 宋 杰
(中北大学机械与动力工程学院 太原 030051)

摘要: 混合驱动机构是可控机构的一种,其适度柔性以及降低驱动与控制成本的特性与优势使其成为现代机构学的重要研究分支之一。随着对混合驱动机构研究的深入,混合驱动机构理论和应用也不断地发展和创新。对现有的研究成果加以分析和总结将有利于促进混合驱动机构理论和应用的进一步发展。分析混合驱动机构的内涵,分别论述双自由度和多自由度混合驱动机构的研究进展,主要包括:混合驱动机构的构型设计与可动性、混合驱动机构的轨迹特征、混合驱动机构的运动学、混合驱动机构的动力学及混合驱动机构的应用等方面的研究进展。提出混合驱动机构研究的关键问题,总结了混合驱动机构的未来发展趋势。研究成果对拓展混合驱动机构的设计空间、开辟混合驱动机构新的应用领域具有重要意义。

关键词: 混合驱动机构; 可控机构; 研究进展; 发展趋势

中图分类号: TH132

Research Progress and Development Trend of Hybrid-driven Mechanism

LI Ruiqin WANG Ying WANG Mingya ZHAO Yaohong SONG Jie
(School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051)

Abstract: Hybrid-driven mechanism is one kind of controllable mechanism. The characteristics and advantages of moderate flexibility and reducing the cost of driving and controlling of hybrid-driven mechanism make it become one of the important branches of modern mechanisms. The theory and application of hybrid-driven mechanism are constantly developing and innovating along with the further research of hybrid driving mechanism. Analyzing and summarizing the existing research results will be beneficial to promote the further development of the theory and application of hybrid-driven mechanism. The connotation of hybrid-driven mechanism is analyzed. The research progress of two-DOF and multi-DOF hybrid-driven mechanism is discussed, respectively. The main contents are follows: type synthesis and mobility of hybrid-driven mechanism, trajectory characteristics of hybrid-driven mechanism, kinematics and dynamics of hybrid-driven mechanism, applications of hybrid-driven mechanism, etc. The key issues of in the research of hybrid-driven mechanism are presented. The future development trend of hybrid-driven mechanism is summarized. The results have important significance to expand the design space of hybrid-driven mechanism, and to open up new application fields of hybrid-driven mechanism.

Key words: hybrid-driven mechanism; controllable mechanism; research progress; development trend

0 前言

混合驱动机构的概念于 20 世纪 90 年代初由英国学者 TOKUZ 首次提出^[1]。混合驱动机构利用不同性质的电动机(常速电动机和伺服电动机)来共同驱动二自由度闭链机构,以得到所需要的输出运动。在混合驱动机构中,期望常速电动机提供主体运动和主要功率,伺服电动机主要提供辅助运动,即对主运动进行修正、调控,实现运动柔性。从结构组

成上看,可以认为混合驱动机构是介于单自由度传统机构和多自由度全伺服驱动机器人机构之间的一类新型机构,是传统机构与现代机器人机构在性能与成本上的一个良好折中,以适应工作柔性特征将传统机构的高速度、低成本、大功率、高效节能等优势与机器人机构的灵活性特征有机结合起来,使得现代机器人从运动结构上具有引入计算机进行控制、实现机电一体化和智能化的可能,同时又可以实现高速度、高效节能、大功率、低成本等。

在现实生活中,应用最为广泛的、大量需要的往往都是只要求具有一定的工作柔性、能完成相类似的工作任务、可以进行适度调整的机器,如柔性

* 国家自然科学基金资助项目(51275486)。20150911 收到初稿,20160503 收到修改稿

自动生产线、包装、食品、纺织、冲压、塑性成形等众多自动化机械都有这种需求。很显然,混合驱动机构可以作为满足这类需求的一种很有潜力的解决方案,拥有巨大的发展空间和应用价值。

在混合驱动机构 20 多年的发展过程中,各国学者从功率匹配、轨迹规划、混合驱动存在条件等各个方面对其进行了深入的研究,取得了许多比较重要的研究成果。特别是对双自由度混合驱动的研究更为深入。

1 双自由度混合驱动机构的研究现状

1.1 混合驱动机构的构型设计与可动性研究

构型设计是混合驱动机构设计的基本问题之一,在考虑混合驱动机构特性的基础上进行的。可动性分析是分析机构在原动件按照某种运动规律运动时,机构应满足的最小尺寸条件。根据混合驱动机构的定义可知,在混合驱动机构中,主动件是由常速电动机提供驱动的,在对混合驱动机构进行构型设计时,要求主动件要能做整周转动。

郭为忠等^[2]分析了 4R1P 型平面五杆并联机构的可动性,给出了其可动性的特征图表示。特征图分析方法适合于 4R1P 型所有平面机构和 3R 型平面开链机构。张全明等^[3]揭示出“原动件与机架组”之外部副的极端特征条件和 RPR 等 4 种“Ⅱ级杆组”的适应性条件,推导出了其双曲柄存在的充分条件和必要条件。季建明等^[4]以九杆机构为对象,以机构不出现奇异性的条件来分析混合驱动压力机九杆机构的可动性。

对双自由度混合驱动机构构型设计与可动性的研究,目前已经从全铰链的转动副向含有移动副的机构发展,而机构的构件数也从原来的五杆、七杆发展到了九杆。

1.2 混合驱动机构的轨迹特性研究现状

轨迹规划是机构学研究中的一个重要方面。一般说来,特别是多自由度机构,机构要完成所规定的任务要进行轨迹规划。对于混合驱动机构来说,由于其一个主动件是由不可控的常速电动机提供驱动的,在其可达工作空间内并非任意的轨迹曲线都能实现,所以对混合驱动机构进行轨迹特性研究是非常必要的。关于混合驱动机构实现轨迹特性的研究成果较多。

魏宏等^[5]基于 DE 优化方法,研究了混合驱动平面五杆机构再现给定轨迹曲线的问题。杨金堂等^[6]基于遗传算法,对实现“任意给定轨迹”的

RPRPR 五杆机构建立了优化模型,并进行了分析。李鹏飞等^[7]、陈正洪等^[8]分别对二自由度五杆混合驱动机构的轨迹特性作了较为深入的研究。其中李鹏飞等对机构复杂轨迹的生成及其影响因素进行了分析。陈正洪等得出了机构在实现给定轨迹时电动机功率分配的规律。

张彦斌等^[9]分析了一类齿轮五杆曲柄滑块机构的尺寸约束条件,利用复矢量理论和 Fourier 级数理论建立了机构连杆轨迹的数学模型。李仁军等^[10]针对混合输入机构中恒速电动机不可控的特点,提出了伺服电动机实时跟踪恒速电动机转速的控制策略,并设计了伺服电动机对恒速电动机转速实时跟踪的模糊控制器,以保证精确实现给定轨迹。王汝慧等^[11]在混合驱动六杆机构逆运动学分析的基础上,以机构输出轨迹偏差最小建立目标函数,建立了实现给定轨迹的优化设计数学模型,对混合驱动六杆机构的轨迹特性及优化设计进行了分析。

褚金奎等^[12]基于傅里叶级数理论,给出平面和空间连杆机构连杆曲线的统一数学表达式,建立由平面机构到空间机构在形式上和内容上统一的连杆机构轨迹综合理论。CHENG 等^[13]提出了轨迹跟踪的自适应控制律,通过对一个二自由度闭链混合驱动五杆机构进行仿真证明了该方法的有效性。

从上述内容可以看出,对混合驱动机构轨迹特性的研究,已经从单纯的实现给定轨迹曲线的机构设计,发展到采用一些优化算法,在机构实现给定轨迹的条件下,对机构的功率分配、控制策略等问题的研究,其呈现从平面机构向空间机构发展的趋势。

1.3 混合驱动机构的运动学研究现状

运动学分析是混合驱动机构设计的基本问题之一,它包括工作空间、奇异性、特性分析、参数偏差与补偿、运动学设计等研究内容。现阶段对混合驱动机构运动学的分析呈现与动力学分析相结合的趋势。

于红英等^[14]推导了五杆机构的运动学正解和运动学逆解方程,借助 Kane 动力学方程,对五杆机构进行了动力学分析。王喆等^[15]提出基于逆运动学理论的混合驱动压力机运动控制实时在线误差补偿的运动控制方法。王进戈等^[16]基于球坐标,推导出具有二自由度特征的球面五杆机构的速度方程和雅可比矩阵的解析表达,研究球面五杆机构的奇异位形和灵活度。彭利平等^[17]对混合驱动并联机构进行了研究,分析了混合驱动平面五杆并联机构的工作空间。邓嘉鸣等^[18]研究了一种双滑块驱动的平面

五杆机构和其运动特征,并分析了机构末端操作点行走不同轨迹时两滑块驱动的运动规律及特性。LI等^[19]对混合驱动七杆机构的运动规律进行了研究和仿真建模,分析了混合驱动七杆机构的工作空间。

1.4 混合驱动机构的动力学研究现状

对混合驱动机构的动力学研究是机构学领域关注的热点之一。

OUYANG 等^[20]针对混合输入五杆机构进行了研究。直接采用恒速电动机和伺服电动机的驱动方式,并依据滑模控制技术建立控制器,分析得出控制器具有渐进稳定性。张珂等^[21]对混合驱动连杆机构的控制系统进行了研究,并基于功率键合图对混合驱动平面可控七杆机构的主辅驱动力进行了动力学分析。李辉等^[22]应用拉格朗日方程建立了二自由度七杆混合驱动压力机的动力学模型。刘华国等^[23]基于运动分析、Kane 动力学方程、数字-符号方法和并行计算,建立了平面可调五杆机构的动力学解析模型,求解机构驱动力矩。李仁军等^[24]在考虑耗散的情况下,对混合输入机构进行了动力学研究。

王汝贵等^[25]以混合输入五杆机构为研究对象,研究了五杆机构及常速电动机对伺服电动机轴扭振固有频率的影响,以及五杆机构和伺服电动机对常速电动机轴扭振固有频率的影响。戎保等^[26]应用多体系统离散时间传递矩阵法和 Lagrange 方法对某闭链平面刚柔五杆机构进行了动力学分析。罗维等^[27]在研究混合驱动机构和柔性四杆、五杆机构的基础上,利用虚功原理建立二自由度柔性铰链六杆机构的伪刚体模型和拟柔性模型,对机构进行了仿真分析。

国外对混合驱动可控机构的研究主要是以功率需求最小为研究目标,随着对控制理论的发展,现阶段国外对混合驱动可控机构的研究较少。国内对混合驱动可控机构动力学的研究还不够深入,主要集中在对机构进行动力学建模,而对混合驱动机构的驱动特性和动力特性的分析较少。混合驱动机构动力学的发展方向是结合机构的运动特性、功率匹配等问题进行机构的优化设计。

1.5 混合驱动机构的应用研究现状分析

国内外的很多学者对混合驱动机构在工程机械中的应用做了一些研究。DU 等^[28-33]将二自由度混合驱动机构的理论研究应用到压力机的设计、工艺改进等实践活动,并且对不同结构形式的压力机的优点和缺陷有了更深入的认识。

于洪波等^[34]将混合驱动用于合模机构,分析了其可行性。蔡敢为等^[35]在二自由度混合驱动五杆机

构应用研究的基础上,用两个五杆机构并联的混合驱动机构来提供铲斗的输出,发明了一种三自由度混合驱动可控挖掘机构。宋胜涛等^[36-37]将混合驱动七杆机构应用到采煤机器人中,并对其机构进行了仿真分析。将混合驱动五杆机构应用到挖掘机中,对其动臂-斗杆机构进行了轨迹分析。陈文等^[38]将混合驱动机构应用到冲压机构中,并对其进行了运动学分析及参数优化设计。訾斌等^[39]将混合驱动五杆机构应用到柔索并联机器人中,并对机构进行了设计与分析。杨家军等^[40]将混合驱动五杆机构应用到月球车中,并分析了其动力学。另外,少数学者对混合驱动五杆机构的打结器^[41]、混合驱动桥式起重机^[42]的运行系统等应用做了一些研究。

从应用角度看,其试验及应用研究大多局限于压力机这类直线输出机构领域,应用范围窄。近几年对混合驱动机构的应用研究才向着多元化的方向发展。但由于对多自由度混合驱动机构缺乏理论研究,阻碍了混合驱动机构向空间等领域的应用,拓展混合驱动机构应用领域,充分发挥混合驱动机构的优势是目前迫切需要解决的问题。

2 多自由度混合驱动机构的研究现状

随着对混合驱动机构的进一步研究,近几年对混合驱动机构的研究,向着多自由度机构方向发展。目前对混合驱动多自由度机构的研究较少,仅从传统机构学的角度对多自由度机构的运动学和动力学分析、机构参数的优化、机构的奇异性分析以及在机器人等领域的应用做了一些研究工作。

BRIOT 等^[43]对一种三自由度平面并联机器人的精度进行了分析。KAROUIA 等^[44]对一种非对称的三自由度球形并联机构进行了研究,并将其应用到机器人,并与四自由度机构做了比较,提出该机构所具备的优点。

岑豫皖等^[45]提出了基于并联结构的三自由度姿态测量机构。该测量机构克服了并联机构运动学正解的困难,得到运动平台姿态坐标参数的显式解,实现机构运动学参数的优化设计。WU 等^[46]对具有 4-RRR、3-RRR 和 2-RRR 结构的三种平面三自由度并联机器人做了性能比较。提出了在不同工况、速度、载荷和刚度条件下各种结构的平面三自由度并联机器人所存在的缺陷和优势。ZHANG 等^[47-49]用不同的方法对不同构型的三自由度机构建立了运动学方程,进行了运动学分析,得出了各机构的性能特点,有的学者还将运动学分析结果运用到机械手、

机械臂等实体模型的研究。

李树军等^[50]分析了 3-RRR 并联机构的刚度特性, 导出了并联机构刚度与机构构型的函数关系, 并给出了其刚度与机构参数关系的分配图谱。史巧硕等^[51]给出了基于 G_F 集的三自由度移动并联机构构型方法。刘善增^[52]以三自由度空间柔性并联机器人为研究对象, 研究其动力学建模与分析求解等方面的问题, 提出了适用于空间柔性并联机器人的建模分析方法, 为进一步分析和提高空间柔性并联机器人的运动学和动力学性能等奠定了基础。鲁开讲等^[53]采用 Kane 方法建立平面三自由度并联机构的动力学方程, 给出机构加速性能评价指标、高速性能指标和综合性能指标, 进而研究三种指标在设计空间的分布情况, 得到它们在设计空间的变化规律。罗文豹等^[54]在三自由度平台机构特点的基础上, 对一种带防扭臂的三自由度平台的机构参数进行了优化, 并将优化结果运用到平台的设计中。刘延斌等^[55]提出了一种能实现沿 y 、 z 轴平移和绕 x 轴转动的 3-RPR 三自由度并联机构, 并进行了奇异性分析。

这些平面三自由度可控机构的研究, 对多自由度混合驱动可控机构的研究打下了坚实的基础, 并对理论向实际应用的转化起到了推动作用。

关于更多自由度机构, 也有不少文献对其各种性能进行了研究。KIM 等^[56]对六自由度并联机构进行了研究, 提出了鲁棒非线性任务空间控制方案, 并通过试验与对比的方法展示了其优点。GALLARDO-ALVARADO 等^[57]应用螺旋理论, 对四自由度并联机器人进行了运动学分析和奇异性分析。贺利乐等^[58]对一种六自由度混合驱动并联机构的位置正解问题进行了研究, 并基于位置正解对该类并联机构存在的实际装配构型进行了分析。SUN 等^[59]提出了一种新型 5 轴混合可重构机器人, 包括一个混合驱动的四自由度动力模块和一个二自由度末端效应, 并对其工作空间进行了研究。李彬等^[60]研究了一种新型的五自由度混联机械手, 该机械手由一个三自由度并联机构和一个二自由度旋转头串接而成, 通过单调性分析得到机构尺度参数对全局条件数、速度、精度等性能指标的影响规律图谱, 获得其优化设计区域。

虽然上述学者从传统机构学的角度对多自由度机构有一定的研究, 但很少从可控的角度研究多自由度机构所具有的一些特性。李瑞琴等在国家自然科学基金支持下对多自由度混合驱动机构的性能进行了研究。

LI 等^[61]基于图论法和一般连杆类配方案, 对平面三自由度的机构进行了构型设计, 得到了 5 种实用的平面八杆三自由度机构的基本构型, 对得出的每一种基本构型分析了其结构特点。采用 Grashof 扩展性推论, 研究了平面并联 3-RRR 型机构的曲柄条件及转动能力, 为进一步研究平面三自由度并联机构的混合驱动特性提供了几何结构关系。吴凡等^[62]通过 Assur 杆组法和图论法对平面三自由度机构进行构件的分类和组合, 得到三条支链的最基本的运动链结构。运用插点法画出机构构型的拓扑胚图, 对其进行支链分类后, 再插入到构型的拓扑图中, 经过构型的同构分析得到六种运动链。最后, 运用构件关系图论法推导出一种 3-RRR 平面机构的混联构型。

王俊卿等^[63]通过对 3-RRR 机构奇异位形的分析, 基于平面单闭环连杆机构的可装配性, 提出该机构避免正向奇异位形的几何条件。结合曲柄条件建立了运动学模型, 通过 ADAMS 的仿真证实了该几何条件的有效性。

宋杰^[64]运用运动副替代法对平面三自由度六杆机构的构型进行分析, 得到三自由度六杆机构的运动链图和相应的机构图。根据混合驱动机构运动链的选择原则和机构自身的特点, 提出了一种平面三自由度 PRR-RRP 型六杆机构, 对 PRR-RRP 型六杆机构建立了运动学正、逆解数学模型, 并对该机构各构件的尺寸进行优化。运用拉格朗日法建立了 PRR-RRP 型六杆机构的动力学数学模型, 通过质量平衡法对六杆机构动力学特性进行了优化。

何水琴^[65]基于可装配性原理和可动性准则, 分析了 3-RRR 平面混联机构的曲柄存在条件, 总结出曲柄条件与杆长关系表, 能迅速从各构件间的杆长关系算出机构中曲柄的存在情况和具体数目。使用混沌粒子群算法求解位置正解。通过求解机构的 Jacobian 矩阵, 分析了机构的奇异性, 提出了避免机构奇异性的条件。建立了机构的 Kane 动力学方程, 对机构进行了运动学和动力学仿真。

3 混合驱动机构研究的关键问题

混合驱动机构的研究目前仍以混合驱动二自由度的五杆机构、七杆机构为研究对象的居多, 但国内外对这两类混合驱动机构的研究仍不够深入。需要进一步研究的内容包括: 混合输入机构的型分类、柔性空间分析、运动学与动力学分析、机电耦合的模型、实现精确的轨迹、函数和运动的综合等。

多自由度混合驱动机构研究的关键科学问题主要有下面三点。

(1) 对平面多自由度机构的复杂构型进行可转动能力分析, 探求驱动件整周转动的几何关系及规律。因为混合驱动机构需要有一个驱动件在常速电动机的驱动下做整周转动, 所以驱动件的可转动能力是系统研究可控机构的混合驱动特性的基础。

(2) 对多自由度混合驱动机构的功率分配进行研究, 探索多驱动下主动电动机与伺服电动机最适合的功率分配以及不同功率分配下对轨迹特性的影响。

(3) 对多驱动件类型的混合驱动机构的动力学研究, 由于驱动类型的多样化及设计空间的扩大化, 如何使可控机构具有良好的混合驱动特性和动力特性。

4 混合驱动机构研究的发展趋势

对混合驱动可控机构的研究已从传统的平面机构逐渐扩展到了空间机构领域。从解决关键问题出发, 多自由度混合驱动机构的研究发展趋势有以下几个方面。

(1) 多自由度混合驱动机构的构型创新性设计, 分析已有的平面机构的拓扑构型, 应用现有的变拓扑机构创新设计理论与方法, 研究适于多自由度混合驱动机构的构型创新。混合驱动可控机构的拓扑构型设计研究将是可控机构学的一个新型研究领域。

(2) 多自由度混合驱动机构驱动能力的研究, 探求驱动件能整周转动的几何关系及规律。驱动件的可转动能力是系统研究可控机构的混合驱动特性的基础。对于驱动件为转动件的多自由度机构采用 Grashof 扩展性推论进行平面机构的可转动能力分析。目的是得出各驱动件能够整周转动与机构中各构件长度及构型配置的关系, 以便对驱动件进行转动驱动控制。

(3) 多自由度混合驱动可控机构的混合驱动特性的研究。分别针对混合驱动多自由度平面并联机构、含移动驱动件的混合驱动多自由度平面连杆机构、多自由度的凸轮连杆组合机构和齿轮连杆组合机构, 研究运动学耦合性、动力学特性、成组轨迹与任意点轨迹综合、控制系统设计等。

(4) 新型混合驱动下的多自由度可控机构的轨迹特性、运动学特性。由一个常速电动机和两个伺服电动机或两个常速电动机和一个伺服电动机驱动

下的三自由度可控机构, 改变其中的任何一个或多个电动机的运行参数, 研究其轨迹特性和运动学特性。对三自由度多类型驱动件可控机构进行混合驱动特性的仿真研究, 如实现柔性输出运动特性、运动学规律和动力学响应特性及其他运动学参数和动力学参数的动态仿真。在进行平面机构运动学分析时, 采用 Groebner 基方法, 该方法在求解非线性方程组时, 既不增根, 亦不失根, 是十分有效的。然后对其进行动力特性的研究, 包括输入的动力、系统的参数等, 以求得在满足运动规律的同时得到受力特性最合理的机构类型。

(5) 混合驱动可控机构优化设计。研究多自由度混合驱动机构的功率匹配问题, 探索多驱动下主动电动机与伺服电动机最适合的功率分配以及不同功率分配下对轨迹特性的影响, 研究驱动特性、工作空间等参数的优化设计问题。集成多自由度驱动类型与拓扑构型设计问题, 拓展多自由度混合驱动机构的设计空间。

多自由度混合驱动机构的研究, 应从多自由度混合驱动可控机构的系统化设计理论与方法的研究出发, 充分发挥多自由度混合驱动机构的性能优势, 拓展混合驱动机构的设计空间, 优化设计目标, 以更好地满足人们对其功能的需求。开辟新的应用研究领域, 进行实际应用。为混合驱动机构由平面向空间发展奠定基础, 丰富和发展现代机构学设计理论。

5 结论

混合驱动机构的研究已从双自由度的平面混合驱动机构拓展为多自由度的空间混合驱动机构。多自由度混合驱动可控机构的系统化设计理论与方法, 对充分发挥多自由度混合驱动机构的性能优势, 拓展混合驱动机构的设计空间, 优化设计目标, 以更好地满足人们对其功能的需求, 必将发挥重要作用。对开辟新的应用研究领域, 进行实际应用, 丰富和发展现代机构学设计理论具有重要理论意义。

参 考 文 献

- [1] TOKUZ L C. Hybrid machine modeling and control[D]. Liverpool: Liverpool Polytechnic University, 1992.
- [2] 郭为忠, 黄其高, 邹慧君, 等. 4R1P 型平面五杆并联机构的可动性与特征图表示[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 42-49.
- GUO Weizhong, HUANG Qigao, ZOU Huijun, et al. Mobility and characteristics chart or 4R1P-type five-bar

- planar parallel mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 42-49.
- [3] 张全明, 梁文贤, 常勇. 关于 2-DOF 平面五杆机构的双曲柄存在条件的再研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(1): 78-82.
- ZHANG Quanming, LIANG Wenxian, CHANG Yong. Further study of conditions for double-crank of 2-DOF planar five-link linkage[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(1): 78-82.
- [4] 季建明, 戴国洪, 王隆太. 混合驱动压力机九杆机构的可动性分析[J]. 机械设计与制造, 2012(8): 223-225.
- JI Jianming, DAI Guohong, WANG Longtai. Mobility analysis for nine-bar mechanism of a hybrid-driven press[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(8): 223-225.
- [5] 魏宏, 谢进, 陈永. 基于 DE 优化方法的混合驱动平面五杆机构实现点位对应综合[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(2): 159-161.
- WEI Hong, XIE Jin, CHEN Yong. Synthesis of planar five-bar path generating mechanisms using differential evolution algorithms[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2005, 24(2): 159-161.
- [6] 杨金堂, 孔建益, 熊禾根, 等. 基于遗传算法的 RPRPR 五杆机构实现轨迹综合与分析[J]. 机械传动, 2006, 30(2): 56-59.
- YANG Jintang, KONG Jianyi, XIONG Hegen, et al. Synthesis and analysis of realizing track by RPRPR five-bar mechanism based on genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2006, 30(2): 56-59.
- [7] 李鹏飞, 李仁军, 王昭, 等. 混合驱动五杆机构轨迹生成及其影响因素研究[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(3): 225-229.
- LI Pengfei, LI Renjun, WANG Zhao, et al. Research on curve generation and its influence factors of hybrid driven five-bar linkage[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2007, 23(3): 225-229.
- [8] 陈正洪, 张卧波, 王勇, 等. 混合输入五杆机构实现给定轨迹的功率分配[J]. 山东大学学报, 2008, 38(1): 9-12.
- CHEN Zhenghong, ZHANG Wobo, WANG Yong, et al. Power distribution of a given trajectory generation for a hybrid-driven five-bar mechanism[J]. Journal of Shandong University, 2008, 38(1): 9-12.
- [9] 张彦斌, 吴鑫, 刘宏昭, 等. 齿轮五杆曲柄滑块机构的轨迹综合[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 195-198, 208.
- ZHANG Yanbin, WU Xin, LIU Hongzhao, et al. Path synthesis of geared five-bar crank-slider mechanisms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 195-198, 208.
- [10] 李仁军, 刘宏昭, 李鹏飞. 混合输入机构实现给定轨迹的模糊控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 199-202.
- LI Renjun, LIU Hongzhao, LI Pengfei. Hybrid machine for implementing given trajectory by fuzzy controller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 199-202.
- [11] 王汝慧, 李瑞琴. 混合驱动六杆机构的轨迹特性及优化设计[J]. 机械设计与研究, 2009, 25(2): 40-43, 51.
- WANG Ruhui, LI Ruiqin. Path-properties and optimal design of hybrid-driven six-bar mechanism[J]. Machine Design and Research, 2009, 25(2): 40-43, 51.
- [12] 褚金奎, 孙建伟. 基于傅里叶级数理论的连杆机构轨迹综合方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 31-41.
- CHU Jinkui, SUN Jianwei. Unified approach to synthesis of coupler curves of linkage by Fourier series[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 31-41.
- [13] CHENG Long, LIN Yingzi, HOU Zengguang, et al. Adaptive tracking control of hybrid machines: A closed-chain five-bar mechanism case[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(6): 1155-1163.
- [14] 于红英, 唐德威, 王建宇. 平面五杆机构运动学和动力学特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(6): 940-943.
- YU Hongying, TANG Dewei, WANG Jianyu. Analysis of the kinematic and dynamic characteristics of a planar five-bar mechanism[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(6): 940-943.
- [15] 王喆, 张策. 2 自由度混合驱动机器实时在线误差补偿方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 177-181.
- WANG Ze, ZHANG Ce. Method of real-time error compensation for 2-DOF hybrid machine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 177-181.
- [16] 王进戈, 张均富, 王强, 等. 球面五杆机构的运动学与性能分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 33-39.
- WANG Jinge, ZHANG Junfu, WANG Qiang, et al. Kinematics and performance analysis of spherical five-bar mechanisms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 33-39.
- [17] 彭利平, 警斌. 混合驱动平面五杆并联机构的工作空间研究[J]. 机械传动, 2010, 34(4): 20-23, 37.
- PENG Liping, ZI Bin. Study on workplace of the hybrid-driven planar five-bar parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(4): 20-23, 37.
- [18] 邓嘉鸣, 丁磊, 沈惠平, 等. 双滑块驱动 2 自由度五杆机构的运动特性分析[J]. 机械设计, 2011, 28(8): 38-42.
- DENG Jiaming, DING Lei, SHEN Huiping, et al. Kinematic behavior analysis of 2-DOF five-bar mechanism with two sliders driving[J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(8): 38-42.
- [19] LI Ruiqin, DAI Jiansheng. Workspace atlas and stroke analysis of seven-bar mechanisms with the translation-output[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 47(1): 117-134.

- [20] OUYANG P R, LI Q, ZHANG W J. Design, modeling and control of a hybrid machine system[J]. *Mechatronics*, 2004, 14(10): 1197-1217.
- [21] 张珂, 王生泽. 平面可控七杆机构的键合图动力学分析[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(4): 367-371.
ZHANG Ke, WANG Shengze. Dynamics analysis of a planar controllable mechanism based on bond graph[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(4): 367-371.
- [22] 李辉, 张策, 宋轶民, 等. 可控压力机的动力学建模和仿真[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(3): 180-184.
LI Hui, ZHANG Ce, SONG Yimin, et al. Dynamic formulation and simulation of the programmable press[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(3): 180-184.
- [23] 刘华国, 林光春, 倪亚辉, 等. 基于并行计算的平面可调五杆机构动力学解析模型与仿真[J]. *机械设计与制造*, 2010(2): 1-3.
LIU Huaguo, LIN Guangchun, NI Yahui, et al. Analytical dynamic model and simulation for planar adjustable five-bar mechanisms based on parallel calculation[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010(2): 1-3.
- [24] 李仁军, 刘宏昭, 李鹏飞. 考虑关节耗散的平面两自由度五杆机构动力学建模[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(12): 157-161.
LI Renjun, LIU Hongzhao, LI Pengfei. Dynamics modeling of 2DOF five-bar mechanism in considering dissipation of joint[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(12): 157-161.
- [25] 王汝贵, 蔡敢为. 混合输入五杆机构双电机轴扭振固有频率分析[J]. *机械设计与制造*, 2008(8): 67-69.
WANG Rugui, CAI Ganwei. Torsional vibration natural frequency analysis of the two motors shaft of hybrid five-bar linkage mechanism[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2008(8): 67-69.
- [26] 戎保, 芮筱亭, 朱利刚. 闭链刚柔五杆机构动力学建模与仿真研究[J]. *振动工程学报*, 2011, 24(2): 146-150.
RONG Bao, RUI Xiaoting, ZHU Ligang. Dynamic modeling and simulation of close chain flexible five-bar mechanisms[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2011, 24(2): 146-150.
- [27] 罗维, 李瑞琴, 刘伟杰. 二自由度柔性铰链六杆机构的设计与分析[J]. *机械传动*, 2012, 36(3): 35-39.
LUO Wei, LI Ruiqin, LIU Weijie. Design and analysis for 2-DOF flexible hinge six-bar mechanism[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2012, 36(3): 35-39.
- [28] DU R, GUO W Z. The design of a new metal forming press with controllable mechanism[J]. *Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design*, 2003, 125(9): 582-592.
- [29] LI Hui, ZHANG Ce, MENG Caifang. A hybrid-driven nine-bar press for precision drawing [C]// *Proceedings of the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*, April 1-4, 2004, Tianjin, China, 1141-1145.
- [30] GUO W Z, HE K, YEUNG K, et al. A new type of controllable mechanical press: Motion control and experiment validation[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2005, 127(4): 731-742.
- [31] LI C H, TSO P L. Experimental study on a hybrid-driven servo press using iterative learning control[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(2): 209-219.
- [32] TSO P L. Optimal design of a hybrid-driven servo press and experimental verification[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2010, 132(3): 1-4.
- [33] 李竞洋, 葛正浩, 苏鹏刚. 混合驱动凸轮连杆机械压力机的分析与仿真[J]. *机械传动*, 2010, 34(1): 50-54.
LI Jingyang, GE Zhenghao, SU Penggang. Analysis and simulation of hybrid cam-linkage mechanical press[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2010, 34(1): 50-54.
- [34] 于洪波, 张美麟. 混合驱动用于合模机构的可行性分析[J]. *机械传动*, 2008, 32(4): 79-81.
YU Hongbo, ZHANG Meilin. Research on hybrid-driven injection molding machine's clamping unit[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2008, 32(4): 79-81.
- [35] 蔡敢为, 潘宇晨, 王红州, 等. 一种混合驱动可控挖掘机构: 中国, 201010582771.8[P]. 2012-02-08.
CAI Ganwei, PAN Yuchen, WANG Hongzhou, et al. A hybrid-driven and controlled excavator mechanism: China, 201010582771.8[P]. 2012-02-08.
- [36] 宋胜涛, 张浩, 李瑞琴, 等. 远程控制采煤机器人采煤机构的研究[J]. *中北大学学报*, 2010, 31(6): 592-595.
SONG Shengtao, ZHANG Hao, LI Ruiqin, et al. Study on the coal mining mechanisms of coal mining robot of remote control[J]. *Journal of North University of China*, 2010, 31(6): 592-595.
- [37] 宋胜涛, 李瑞琴, 高燕, 等. 混合驱动 4R1P 机构实现动臂-斗杆机构轨迹[J]. *机械设计与研究*, 2011, 27(4): 20-22.
SONG Shengtao, LI Ruiqin, GAO Yan, et al. Study on generation of the trajectory in boom-bucket mechanism with hybrid-driven 4R1P mechanism[J]. *Machine Design and Research*, 2011, 27(4): 20-22.
- [38] 陈文, 傅蔡安. 混合驱动冲压机构的运动学分析及参数优化[J]. *机床与液压*, 2011, 39(7): 111-113.
CHEN Wen, FU Caian. Kinematics analysis and parameter optimization of a hybrid input mechanical press[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2011, 39(7): 111-113.
- [39] 瞿斌, 朱真才, 曹建斌. 混合驱动柔索并联机器人的设计与分析[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(17): 1-8.
ZI Bin, ZHU Zhencai, CAO Jianbin. Design and analysis of hybrid-driven-based cable parallel mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(17): 1-8.
- [40] 杨家军, 奚斌. 混合驱动五杆月球车动力学分析[J]. *机械设计与制造*, 2012(5): 223-224.
YANG Jiajun, XI Bin. Dynamics analysis of

- hybrid-driven five-bar lunar rover[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012(5): 223-224.
- [41] 尹志光. 基于混合驱动五杆机构的打结器优化设计与控制仿真[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- YIN Zhiguang. Optimization and control simulation of hybrid driven tying mechanism[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [42] 梁义维, 张纪平, 王然风. 混合驱动桥式起重机运行系统[J]. *机械工程与自动化*, 2008(3): 102-103.
- LIANG Yiwei, ZHANG Jiping, WANG Ranfeng. Dual driver system for bridge crane running[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2008(3): 102-103.
- [43] BRIOT S, BONEV I A. Accuracy analysis of 3-DOF planar parallel robots[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43(4): 445-458.
- [44] KAROUIA M, HERVÉ J M. Asymmetrical 3-DOF spherical parallel mechanisms[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2005, 24(1): 47-57.
- [45] 岑豫皖, 余晓流, 储刘火, 等. 三自由度并联姿态测量机构及其运动学参数最优化设计[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(3): 189-191.
- CEN Yuwan, YU Xiaoliu, CHU Liuhuo, et al. Optimal kinematic parameters of a 3-DOF parallel mechanism for orientation measurement[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(3): 189-191.
- [46] WU Jun, WANG Jinsong, WANG Liping, et al. Performance comparison of three planar 3-DOF parallel manipulators with 4-RRR, 3-RRR and 2-RRR structures[J]. *Mechatronics*, 2010, 20(4): 510-517.
- [47] ZHANG Dan, LEI Jianhe. Kinematic analysis of a novel 3-DOF actuation redundant parallel manipulator using artificial intelligence approach[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(1): 157-163.
- [48] 李研彪, 金振林, 计时鸣. 一种新型 3-DOF 串并混联拟人机械臂的研制[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39(12): 1983-1991.
- LI Yanbiao, JIN Zhenlin, JI Shiming. Design of a novel 3-DOF hybrid mechanical arm[J]. *Science China Technological Sciences*, 2009, 39(12): 1983-1991.
- [49] 李秦川, 陈欢欢, 李昶, 等. 3-PC(RR)N 球面三自由度并联机构的运动学分析[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(11): 1280-1285.
- LI Qinchuan, CHEN Huanhuan, LI Yi, et al. Kinematics analysis of a 3-DOF 3-PC(RR)N spherical parallel manipulator[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(11): 1280-1285.
- [50] 李树军, GOSSELIN C M. 3-RRR 平面并联机构的刚度特性分析[J]. *东北大学学报*, 2007, 28(1): 91-94.
- LI Shujun, GOSSELIN C M. Stiffness analysis and stiffness mapping of 3-RRR planar mechanism based on CCT stiffness matrix[J]. *Journal of Northeastern University*, 2007, 28(1): 91-94.
- [51] 史巧硕, 高峰, 余发国. 基于 GF 集的自由度移动并联机构构型研究[J]. *上海交通大学学报*, 2008, 42(7): 1109-1115.
- SHI Qiashuo, GAO Feng, YU Faguo. Type synthesis of 3-DOF translational parallel mechanisms based on GF set[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2008, 42(7): 1109-1115.
- [52] 刘善增. 三自由度空间柔性并联机器人动力学研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- LIU Shanzeng. Dynamics of 3-DOF spatial flexible parallel robots[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
- [53] 鲁开讲, 师俊平, 张锋涛. 平面三自由度并联机构动力学优化设计[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(16): 1926-1931.
- LU Kaijiang, SHI Junping, ZHANG Fengtao. Dynamics optimization design of planar 3-DOF parallel mechanism[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(16): 1926-1931.
- [54] 罗文豹, 李维嘉, 汪潇, 等. 一种三自由度运动平台机构的优化设计[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(14): 1728-1731.
- LUO Wenbao, LI Weijia, WANG Xiao, et al. Mechanism optimization design for 3-DOF motion platform[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(14): 1728-1731.
- [55] 刘延斌, 韩秀英, 郭志佳, 等. 一种新型 3-RPR 并联机构及其运动学分析[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(19): 2307-2311.
- LIU Yanbin, HAN Xiuying, GUO Zhijia, et al. Structure and kinematics analysis of a novel 3-RPR parallel mechanism[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(19): 2307-2311.
- [56] KIM H S, CHO Y M, LEE K. Robust nonlinear task space control for 6 DOF parallel manipulator[J]. *Automatica*, 2005, 41(9): 1591-1600.
- [57] GALLARDO-ALVARADO J, RICO-MARTÍNEZ J M, ALICI G. Kinematics and singularity analyses of a 4-DOF parallel manipulator using screw theory[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41(9): 1048-1061.
- [58] 贺利乐, 刘宏昭. 一种六自由度混合驱动并联机构的位置正解分析研究[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(8): 920-923, 970.
- HE Lile, LIU Hongzhao. Research on forward solution of position of 6-DOF hybrid driven parallel mechanism[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(8): 920-923, 970.
- [59] SUN Tao, SONG Yimin, LI Yonggang, et al. Workspace decomposition based dimensional synthesis of a novel hybrid reconfigurable robot[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2010, 2(3): 1-8.
- [60] 李彬, 黄田, 张利敏, 等. 一种新型五自由度混联机械手的概念设计及尺度综合[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(16): 1900-1905.

- LI Bin, HUANG Tian, ZHANG Limin, et al. Conceptual design and dimensional synthesis of a novel 5-DOF hybrid manipulator[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(16): 1900-1905.
- [61] LI Ruiqin, DAI Jiansheng. Crank conditions and rotatability of 3-RRR planar parallel mechanisms[J]. Science China Technological Sciences, 2009, 52(12): 3601-3612.
- [62] 吴凡, 李瑞琴. 平面 3-DOF 混联机构构型综合及其同构分析[J]. 机械传动, 2013, 37(1): 43-46.
- WU Fan, LI Ruiqin. The type synthesis and isomorphism analysis of the planar hybrid 3-DOF mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2013, 37(1): 43-46.
- [63] 王俊卿, 王爱玲, 宋胜涛, 等. 混合驱动平面 3-RRR 机构的免奇异分析及仿真[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(5): 36-39.
- WANG Junqin, WANG Ailing, SONG Shengtao, et al. Analysis on avoiding singularity and simulation for hybrid-driven planar 3-RRR mechanisms[J]. Machine Design and Research, 2010, 26(5): 36-39.
- [64] 宋杰. 混合驱动平面三自由度 PRR-RRP 型六杆机构的研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- SONG Jie. Research of hybrid-driven planar 3-DOF PRR-RRP six-bar mechanism[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
- [65] 何水琴. 混合驱动 3-RRR 平面混联机构的研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- HE Shuiqin. Research on hybrid-driven 3-RRR planar hybrid mechanism[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
-
- 作者简介: 李瑞琴(通信作者), 女, 1964 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构理论与复杂机械系统。
- E-mail: liruiqin@nuc.edu.cn