DOI: 10.3901/JME.2014.11.050

基于功能分析的新型装载机机构型综合研究*

蔡敢为¹ 潘宇晨^{1,2} 王红州¹ 戴建生^{3,4}

(1. 广西大学机械工程学院 南宁 530004;

2. 钦州学院物理与电子工程学院 钦州 535099;

3. 伦敦大学国王学院 伦敦 WC2R 2LS;

4. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室 天津 300072)

摘要: 传统的机械式工程机械采用单自由度机构, 所能完成的动作单一, 动作轨迹不能变化; 液压式工程机械可以灵活地执行各种工程动作, 但其液压系统零部件的精度要求和成本高、可靠性不理想、易漏油、传动效率低等不足。这个棘手问题长期未能有效解决。将变胞机构和多自由度可控机构应用于工程机械等领域, 可克服现在的机械式和液压式工程机械的各自不足, 既能像液压式工程机械那样变化运动轨迹、执行各种动作, 又没有液压系统的缺陷, 具有良好的应用前景。研究这类新型机构的型综合问题, 针对现有典型装载机产品的特点, 采用工作机理的动作表达方法, 将液压式装载机的工作机理作为依据和出发点, 将其转化为工艺动作过程。结合变胞机构、可控机构、及并联机构等有关研究成果, 综合应用构型演化法、基于螺旋理论的约束综合法等机构创新设计理论和方法, 在功能分析的基础上完成了装载机新型执行机构的概念设计。获得了一批新型多自由度可控机构式装载机机构型, 包括具有变胞功能的可控机构式装载机机构型, 并由试验验证了多自由度可控机构用于装载机等工程机械的可行性, 为这类机构的应用提供了一定的参考。

关键词: 装载机; 功能分析; 创新设计; 型综合; 可控机构; 变胞机构

中图分类号: TG156

Functional Analysis Based Type Synthesis of a Novel Type of Loading Mechanisms

CAI Ganwei¹ PAN Yuchen^{1,2} WANG Hongzhou¹ DAI Jiansheng^{3,4}

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004;

2. College of Physics and Electronic, Qinzhou University, Qinzhou 535099;

3. King's College London, University of London, London WC2R 2LS, UK;

4. Key Laboratory for Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: Traditional single degree-of-freedom (DOF) mechanical engineering machinery lacks flexibility because of its structural limitations. Hydraulic engineering machinery can achieve flexible output trajectories, but there still exists some problems such as high costs of manufacturing and maintaining, high accuracy requests, low transmission efficiency and reliability, hydraulic leaks. This is an unsolved thorny issue of long-term. Applying multi-DOF controllable mechanism and metamorphic mechanism to engineering machinery can overcome the deficiency of both traditional products respectively. This new type of construction machinery can obtain flexible output as hydraulic ones when overcome the problems they have, of which the application prospect may be promising. The type synthesis problem is studied. Working principle of traditional hydraulic loaders is analyzed first, based on which the technical action process is obtained using the behavior expression of working principles method. Then the conceptual design on the basis of functional analysis is introduced applying constraint synthesis methods based on screw theory and configuration evolution method combining the innovative design results of controllable mechanisms, metamorphic mechanisms and parallel mechanisms. Series of novel configurations of multi-DOF controllable mechanism type loaders, as well as the ones with

* 国家自然科学基金(51075077, 51365004)、广西制造系统与先进制造技术重点实验室主任课题和广西高校人才小高地建设创新团队资助项目。
20130911 收到初稿, 20140326 收到修改稿

metamorphic functions are obtained. Loading experiments are conducted, of which the results verified the feasibility that multi-DOF controllable mechanism can be applied in construction machineries such as loaders, which may also provide some references for the application of the mechanism

Key words: loader; functional analysis; innovative design; type synthesis; controllable mechanism; metamorphic mechanisms

0 前言

装载机是一种广泛用于建设工程的土石方施工机械,主要用于铲装土壤、石灰、砂石等散状物料,也可对硬土、煤炭等作轻度铲挖作业。现行装载机多为液压传动式,以液压油为传递动力的介质,其起动性较差,容易因内部元件磨损后产生泄漏,而且涉及的元件较多,泄漏的液压油会造成环境的污染,同时出现过热,工作无力等现象,不适合在高温或低温等极端恶劣的环境下工作。随着装载机功能要求的增加,其液压系统越来越复杂,会造成其故障出现更具有突发性、隐蔽性,加工装配要求高、寿命不长、漏油、维护保养成本高等问题愈加明显^[1-3]。

多自由度可控机构的输出运动由多个原动件共同决定,是多自变量的函数,通过适当的控制程序就可实现复杂的运动规律,改变控制程序即可改变机构的输出运动,亦输出的柔性化。且其电动机都可安装在机架上,避免了电动机安装在铰链处所产生的刚性差、惯量大的问题。国内外研究者对可控机构开展了许多研究^[4-7],但有关成果还是比较零散的,还多是针对某种可控机构的研究。可供工程界采用的机构构型还很少,且多为平面机构,尤其结合工程实际应用的研究还较少。

机构的构型综合,或称为型综合,是机构的概念设计的核心研究内容,其定义^[8-9]:在给定机构期望自由度数和性质的条件下,寻求其具体结构,包括各个构件和运动副的数量及其在空间中的布置。初期的型综合研究多针对平面机构,获得了如瓦特连杆和史蒂芬孙连杆等著名机构。在空间机构方面,人们研究了 6 自由度串、并联机器人机构,冗余自由度、少自由度机器人机构等,获得了著名的 Sarrus 机构、Bennett 机构、Delta 机构和 3-RPS 并联机构等。20 世纪 90 年代开始,人们开始探索通用性的方法进行机构综合,特别是借助某些数学工具进行的型综合研究,取得了很好的研究成果,特别是在并联机构的型综合方面:GAO 等^[10]给出了自由度 2 到 5 的各类并联机构构型;HUANG 等^[11-14]采用基于螺旋理论的约束综合法,获得了可实现连续运动的全对称 5 自由度并联机构以及一系列的全对称 4

自由度和 3 自由度;KONG 等^[15-16]亦应用螺旋理论综合出了 3 三自由度平面、球面并联机构。HERVE^[17]通过位移子群研究了机构的结构特性,并给出了基于李群理论的研究刚体位移的方法;MENG 等^[18]建立了少自由度并联机构综合和分析的微分几何方法;沈惠平等^[19]综合出了一系列基于混合链的弱耦合三维平移并联机构;ZENG 等^[20]对一类 2 自由度的旋转解耦并联机构进行了型综合研究;LI 等^[21]基于邻接矩阵运算对柔性变胞机构进行了结构综合研究。

虽然国内外对机构型综合进行了很多研究,但面向任务的机构型综合研究较少,本文所研究的这类新型机构的型综合问题更是少有人涉及。以现有装载机执行机构为结合点展开构型综合研究,首先采用工作机理的动作表达方法,将液压式装载机的工作机理作为依据和出发点,将其转化为工艺动作过程。结合变胞机构、可控机构、及并联机构等有关研究成果,综合应用构型演化法、基于螺旋理论的约束综合法等机构创新设计理论和方法,在功能分析的基础上完成了装载机新型执行机构的概念设计。获得了一批新型多自由度可控机构式装载机构型,包括具有变胞功能的可控机构式装载机构构型。

1 传统液压装载机功能分析

概念设计^[22]是产品创新设计是根据产品工作要求,以市场需求分析为基础进行的产品功能创造、分解以及功能和子功能的结构设计,进一步满足功能及其结构要求的工作原理研究,最终实现工作原理的功能载体的构思和系统化设计。功能就是对能量流、物质流等进行传递和变换的程序、功效与能力的抽象化描述。基于图 1 所示的功能-效应-工艺动作过程-执行动作-机构(F-E-P-A-M)功能求解模型,首先对传统液压装载机进行功能分析。

1.1 液压装载机的功能

装载机主要在泥砂、石灰、煤炭等堆砌在工作面以上待运输物料的铲装作业中发挥作用。在其动臂根部加装不同的末端执行器,装载机还能应用到其他各种机械化施工场合。

图 1 F-E-P-A-M 功能求解模型

1.2 工作机理

如图 2a 所示, 液压式装载机工作装置由铲斗、动臂、连杆、摇臂及摇臂和动臂液压缸等组成。整个工作装置铰接在车架上。铲斗通过连杆和摇臂与摇臂液压缸铰接, 以装卸物料。动臂与车架、动臂液压缸铰接, 以升降铲斗。铲斗的翻转和动臂的升降分别由摇臂液压缸和动臂液压缸控制, 整个装载机机构能够实现平面 2 自由度的运动输出, 其机构简图如图 2b 所示。

图 2 液压装载机的工作机理

1.3 工艺动作过程

根据工作机理, 液压式装载机的工艺动作过程由如下组成。

- (1) 装载机行驶到待铲装物料处。
- (2) 通过行走装置、各液压缸的调整, 装载机处于适合预定装载任务的姿态。
- (3) 通过摇臂液压缸和动臂液压缸的配合运动, 动臂抬升, 铲斗翻转, 物料装斗。
- (4) 装载机行驶至预定地点将物料卸载。
- (5) 行驶回到待铲装物料处, 并将行走装置、各液压缸的调整, 装载机重新回到适合新的给定装载任务的姿态。

1.4 装载动作分解

进而可将现有装载机的工艺动作过程可分解为三个执行动作, 如图 3 所示。

图 3 液压装载机的工艺动作过程

2 构型演化法

2.1 平面可控机构式装载机

液压式装载机的工作装置由摇臂液压缸和动臂液压缸的联合控制驱动, 能实现铲斗平面 2 自由度的输出运动。所以可直接采用平面 2 自由度可控机构作为新型装载机的执行机构, 通过构型演化, 就能实现跟液压式装载机执行机构类似的输出轨迹^[23], 其结构示意图和机构简图分别如图 4a 和图 4b 所示。

图 4b 中, 传统五杆机构的一根连杆 3 演变成装载机的摇臂, 由新引入的一根连杆跟铲斗相连接; 跟摇臂连接的主动杆 4 变成了装载机的动臂; 动臂直接跟铲斗连接, 并由附加的二连杆直接驱动, 以改善机构受力状况。新的两根主动杆分别由独立的控制电动机驱动, 可由计算机控制实现现有液压式装载机动臂提升、铲斗翻转等动作。

图 4 平面可控机构式装载机

这类可控机构式装载机的特点如下。

(1) 由连杆传动，各零部件加工、装配等要求都不高，能克服液压式装载机液压元件加工精度要求高、维修保养困难、生产和维护成本都高并易发生漏油情况等缺点。

(2) 闭链传动的形式，机构刚性较好、承载能力较强、累积误差小。

(3) 所有驱动电动机均安装在机架上，相对于驱动电动机安装在关节处的串联式机器人机构，其动态性能更好。

2.2 具有变胞功能的可控机构式装载机

此外，研究设计的具有变胞功能的可控机构式新型装载机^[24]，还可按不同阶段的工作需求改变其执行机构的拓扑结构，因此不仅具有上述可控机构式装载机优点，而且只需要一台电动机驱动就能完成传统 2 自由度液压装载机铲装、翻转、抬升、卸料等工作任务，其结构示意图和机构简图分别如图 5a 和图 5b 所示。

图 5 具有变胞功能的可控机构式装载机

3 基于螺旋理论的约束综合法

现有装载机的执行机构均为平面机构，通过动臂液压缸的驱动实现动臂的抬升与下降，摇臂液压缸的驱动实现铲斗的翻转。因其结构限制，此类液压式装载机的动臂和铲斗皆仅能实现平面运动输出，一般还必须配合行走装置才能完成铲装、抬升、卸载等装载任务。在一些环境恶劣、空间狭小的施工场地及需要快速铲运、清障等突发事件现场，这种执行机构仅能实现平面运动的装载机难以满足在有限作业空间工作、动作灵活度要求更高、工作效率更高等要求。在对传统液压式装载机功能分析的基础上，运用基于螺旋理论的约束综合方法，研究空间可控机构式装载机执行机构型综合。

3.1 动臂结构形式

由于动臂承载了整个工作过程中大部分的载荷，结合工程实际，连接动臂的运动副只选用 R 副（转动副）、U 副（虎克铰）、S 副（球面副）三种，并设动臂沿 x 轴正向。可得动臂的八种结构形式，分别为 RS 型、RU 型、UR 型、UU 型、US 型、SR 型、SU 型、SS 型。

(1) 若动臂为 RS 型，对应的运动螺旋系有

${}^x\text{R-S}$:

$$\mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \quad \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0)$$

$$\mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \quad \mathcal{S}_{23}:(0,1,0;a_1,b_1,0)$$

${}^y\text{R-S}$:

$$\mathcal{S}_{11}:(0,1,0;0,0,0) \quad \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0)$$

$$\mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \quad \mathcal{S}_{23}:(0,1,0;a_1,b_1,0)$$

${}^z\text{R-S}$:

$$\mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \quad \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0)$$

$$\mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \quad \mathcal{S}_{23}:(0,1,0;a_1,b_1,0)$$

这三组螺旋系分别对应 R 副轴线沿笛卡尔坐标系三个方向的不同情况。以 ${}^x\text{R-S}$ 型动臂为例，其结构示意图和简图分别如图 6a、6b 所示。

图 6 R-S 型动臂的结构示意图

(2) 同理，若动臂结构形式为 RU 型，则对应的运动螺旋系可写成

${}^x\text{R-}{}^{zx}\text{U}$:

$$\mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \quad \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \quad \mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0)$$

${}^x\text{R-}{}^{zy}\text{U}$:

$$\mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \quad \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \quad \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0)$$

${}^x\text{R-}{}^{xy}\text{U}$:

$$\mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \quad \mathcal{S}_{21}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \quad \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0)$$

${}^y\text{R-}{}^{zx}\text{U}$:

$$\mathcal{S}_{11}:(0,1,0;0,0,0) \quad \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \quad \mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0)$$

${}^y\text{R-}{}^{zy}\text{U}$:

$$\mathcal{S}_{11}:(0,1,0;0,0,0) \quad \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \quad \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0)$$

$$\begin{aligned}
{}^yR-{}^{xy}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,1,0;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^zR-{}^{zx}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \\
{}^zR-{}^{zy}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^zR-{}^{xy}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0)
\end{aligned}$$

(3) UR 型动臂各结构形式对应的运动螺旋系为

$$\begin{aligned}
{}^{zx}U-{}^zR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \\
{}^{zy}U-{}^zR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \\
{}^{xy}U-{}^zR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \\
{}^{zx}U-{}^yR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{zy}U-{}^yR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{xy}U-{}^yR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{zx}U-{}^zR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{zy}U-{}^zR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{xy}U-{}^zR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \mathcal{S}_{21}:(1,0,0;a_1,b_1,0)
\end{aligned}$$

(4) UU 型动臂各结构形式对应的运动螺旋系为

$$\begin{aligned}
{}^{zx}U-{}^{zx}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{zx}U-{}^{zy}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{zx}U-{}^{xy}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{zy}U-{}^{zx}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{zy}U-{}^{zy}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{zy}U-{}^{xy}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \mathcal{S}_{21}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{xy}U-{}^{zx}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{xy}U-{}^{zy}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{xy}U-{}^{xy}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0)
\end{aligned}$$

(5) US 型动臂各结构形式对应的运动螺旋系为

$$\begin{aligned}
{}^{zx}U-S : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{23}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{zy}U-S : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{23}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
{}^{xy}U-S : \\
& \mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{23}:(0,1,0;a_1,b_1,0)
\end{aligned}$$

(6) SR 型动臂各结构形式对应的运动螺旋系为

$$\begin{aligned}
S-{}^xR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{13}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \\
S-{}^yR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{13}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
S-{}^zR : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{13}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0)
\end{aligned}$$

(7) SU 型动臂各结构形式对应的运动螺旋系为

$$\begin{aligned}
S-{}^{zx}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{13}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \\
S-{}^{zy}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{13}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0) \\
S-{}^{xy}U : \\
& \mathcal{S}_{11}:(0,0,1;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{13}:(0,1,0;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(0,1,0;a_1,b_1,0)
\end{aligned}$$

(8) 若动臂为 SS 型, 其对应的运动螺旋系可写成

$$\begin{aligned}
S-S : \\
& \mathcal{S}_{11}:(1,0,0;0,0,0) \mathcal{S}_{12}:(0,1,0;0,0,0) \mathcal{S}_{13}:(0,0,1;0,0,0) \\
& \mathcal{S}_{21}:(0,0,1;a_1,b_1,0) \mathcal{S}_{22}:(1,0,0;a_1,b_1,0) \\
& \mathcal{S}_{23}:(0,1,0;a_1,b_1,0)
\end{aligned}$$

3.2 调整支链结构形式

对于调整支链，以阶数为 6 的无约束铲斗调整支链为例，可先给出其运动螺旋系的标准基

$$\mathcal{S}_1:(1,0,0;0,0,0) \quad \mathcal{S}_2:(0,1,0;0,0,0) \quad \mathcal{S}_3:(0,0,1;0,0,0)$$

$$\mathcal{S}_4:(0,0,0;1,0,0) \quad \mathcal{S}_5:(0,0,0;0,1,0) \quad \mathcal{S}_6:(0,0,0;0,0,1)$$

对其进行线性变换，即可得到一系列适用的结构形式。考虑到工程实际，只给出带 R 副（转动副）、P 副（移动副）、U 副（虎克铰）和 S 副（球面副），且每条支链仅含三个运动副的部分无约束支链的结构形式。

若调整支链为 RSS 型，其运动螺旋系可写成

$$\mathcal{S}_{11}:(l_1, m_1, n_1; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{21}:(1, 0, 0; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{22}:(0, 1, 0; a_2, b_2, c_2) \quad \mathcal{S}_{23}:(0, 0, 1; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{31}:(1, 0, 0; a_3, b_3, c_3) \quad \mathcal{S}_{32}:(0, 1, 0; a_3, b_3, c_3)$$

$$\mathcal{S}_{33}:(0, 0, 1; a_3, b_3, c_3)$$

其结构形式如图 7 所示。

图 7 RSS 型调整支链的结构示意图

同理，还有 SRS 型支链

$$\mathcal{S}_{11}:(1, 0, 0; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{12}:(0, 1, 0; a_1, b_1, c_1)$$

$$\mathcal{S}_{13}:(0, 0, 1; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{21}:(l_2, m_2, n_2; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{31}:(1, 0, 0; a_3, b_3, c_3) \quad \mathcal{S}_{32}:(0, 1, 0; a_3, b_3, c_3)$$

$$\mathcal{S}_{33}:(0, 0, 1; a_3, b_3, c_3)$$

SSR 型支链

$$\mathcal{S}_{11}:(1, 0, 0; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{12}:(0, 1, 0; a_1, b_1, c_1)$$

$$\mathcal{S}_{13}:(0, 0, 1; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{21}:(1, 0, 0; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{22}:(0, 1, 0; a_2, b_2, c_2) \quad \mathcal{S}_{23}:(0, 0, 1; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{31}:(l_3, m_3, n_3; a_3, b_3, c_3)$$

PSS 型支链

$$\mathcal{S}_{11}:(0, 0, 0; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{21}:(0, 1, 0; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{22}:(0, 0, 1; a_2, b_2, c_2) \quad \mathcal{S}_{23}:(1, 0, 0; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{31}:(0, 1, 0; a_3, b_3, c_3) \quad \mathcal{S}_{32}:(0, 0, 1; a_3, b_3, c_3)$$

$$\mathcal{S}_{33}:(1, 0, 0; a_3, b_3, c_3)$$

SPS 型支链

$$\mathcal{S}_{11}:(1, 0, 0; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{12}:(0, 1, 0; a_1, b_1, c_1)$$

$$\mathcal{S}_{13}:(0, 0, 1; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{21}:(0, 0, 0; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{31}:(1, 0, 0; a_3, b_3, c_3) \quad \mathcal{S}_{32}:(0, 1, 0; a_3, b_3, c_3)$$

$$\mathcal{S}_{33}:(0, 0, 1; a_3, b_3, c_3)$$

SSP 型支链

$$\mathcal{S}_{11}:(1, 0, 0; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{12}:(0, 1, 0; a_1, b_1, c_1)$$

$$\mathcal{S}_{13}:(0, 0, 1; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{21}:(1, 0, 0; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{22}:(0, 1, 0; a_2, b_2, c_2) \quad \mathcal{S}_{23}:(0, 0, 1; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{31}:(0, 0, 0; a_3, b_3, c_3)$$

RUS 型支链

$$\mathcal{S}_{11}:(l_{11}, m_{11}, n_{11}; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{21}:(l_{21}, m_{21}, n_{21}; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{22}:(l_{22}, m_{22}, n_{22}; a_2, b_2, c_2) \quad \mathcal{S}_{31}:(1, 0, 0; a_3, b_3, c_3)$$

$$\mathcal{S}_{32}:(0, 1, 0; a_3, b_3, c_3) \quad \mathcal{S}_{33}:(0, 0, 1; a_3, b_3, c_3)$$

PUS 型支链

$$\mathcal{S}_{11}:(0, 0, 0; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{21}:(l_{21}, m_{21}, n_{21}; a_2, b_2, c_2)$$

$$\mathcal{S}_{22}:(l_{22}, m_{22}, n_{22}; a_2, b_2, c_2) \quad \mathcal{S}_{31}:(1, 0, 0; a_3, b_3, c_3)$$

$$\mathcal{S}_{32}:(0, 1, 0; a_3, b_3, c_3) \quad \mathcal{S}_{33}:(0, 0, 1; a_3, b_3, c_3)$$

UPS 型支链

$$\mathcal{S}_{11}:(l_{11}, m_{11}, n_{11}; a_1, b_1, c_1) \quad \mathcal{S}_{11}:(l_{12}, m_{12}, n_{12}; a_1, b_1, c_1)$$

$$\mathcal{S}_{21}:(0, 0, 0; a_2, b_2, c_2) \quad \mathcal{S}_{31}:(1, 0, 0; a_3, b_3, c_3)$$

$$\mathcal{S}_{32}:(0, 1, 0; a_3, b_3, c_3) \quad \mathcal{S}_{33}:(0, 0, 1; a_3, b_3, c_3)$$

3.3 执行机构结构形式

结合功能分析结果，将动臂和铲斗调整支链组合并进一步演化，即可得到此类新型空间可控机构式装载机执行机构的构型。以 RS 型动臂和 RSS 型铲斗调整支链为例，由于 RS 动臂是通过转动副直接铰接到机架上，如图 6a 所示，为改善其受力情况，可将此条支链演化成如图 8 所示的结构形式。又因为铲斗是通过 S 副与动臂连接，可知在无约束支链驱动的情况下，需要三条 RSS 支链。则可得到机构的结构形式为 3-RSS & RS(RRR)。演化后得到的这种铲斗能够实现三维转动输出的空间可控装载机构如图 9 所示。若将铲斗视为动平台，从结构学上看，该机构是一种支链中含闭环子链的非对称结构并联机构，共四条支链，其中三条 RSS 支链，第四条为包含 RRR 子链的 RS 动臂支链。

图 8 RS 型动臂的结构示意图

运用上述方法，继续通过构型演化，就能得到新型空间可控机构式装载机执行机构的其他各种结构形式，分别有以下几种。

图9 铲斗可实现三维转动输出的空间可控装载机构

RSS 型:

RRR&SR(3-RSS); RSS& $^{zx}U^xR$ (2-RSS);
RSS& $^{zy}U^xR$ (2-RSS); RSS& $^{xy}U^xR$ (2-RSS);
2-RSS& $^xR^{zx}U$ (RRR); 2-RSS& $^xR^{zy}U$ (RRR);
2-RSS& $^xR^{xy}U$ (RRR); 2-RSS& $^{zx}U^{zx}U$ (2-RSS);
2-RSS& $^{zx}U^{zy}U$ (2-RSS); 2-RSS& $^{zx}U^{xy}U$ (2-RSS);
2-RSS& $^{zy}U^{zx}U$ (2-RSS); 2-RSS& $^{zy}U^{zy}U$ (2-RSS);
2-RSS& $^{zy}U^{xy}U$ (2-RSS); 2-RSS& $^{xy}U^{zx}U$ (2-RSS);
2-RSS& $^{xy}U^{zy}U$ (2-RSS); 2-RSS& $^{xy}U^{xy}U$ (2-RSS);
2-RSS& $S^{zx}U$ (3-RSS); 2-RSS& $S^{zy}U$ (3-RSS);
2-RSS& $S^{xy}U$ (3-RSS); 3-RSS& ^{zx}US (2-RSS);
3-RSS& ^{zx}US (2-RSS); 3-RSS& ^{zx}US (2-RSS)。

SRS 型:

SRS&SR(3-SRS); 3-SRS&RS(SRS);
SRS& $^{zx}U^xR$ (2-SRS); SRS& $^{zy}U^xR$ (2-SRS);
SRS& $^{xy}U^xR$ (2-SRS); 2-SRS& $^xR^{zx}U$ (RRR);
2-SRS& $^xR^{zy}U$ (RRR); 2-SRS& $^xR^{xy}U$ (RRR);
2-SRS& $^{zx}U^{zx}U$ (2-SRS); 2-SRS& $^{zx}U^{zy}U$ (2-SRS);
2-SRS& $^{zx}U^{xy}U$ (2-SRS); 2-SRS& $^{zy}U^{zx}U$ (2-SRS);
2-SRS& $^{zy}U^{zy}U$ (2-SRS); 2-SRS& $^{zy}U^{xy}U$ (2-SRS);
2-SRS& $^{xy}U^{zx}U$ (2-SRS); 2-SRS& $^{xy}U^{zy}U$ (2-SRS);
2-SRS& $^{xy}U^{xy}U$ (2-SRS); 2-SRS& $S^{zx}U$ (3-SRS);
2-SRS& $S^{zy}U$ (3-SRS); 2-SRS& $S^{xy}U$ (3-SRS);
3-SRS& ^{zx}US (2-SRS); 3-SRS& ^{zx}US (2-SRS)。

SSR 型:

SSR&SR(3-SSR); 3-SSR&RS(SSR);

SSR& $^{zx}U^xR$ (2-SSR); SSR& $^{zy}U^xR$ (2-SSR);
SSR& $^{xy}U^xR$ (2-SSR); 2-SSR& $^xR^{zx}U$ (RRR);
2-SSR& $^xR^{zy}U$ (RRR); 2-SSR& $^xR^{xy}U$ (RRR);
2-SSR& $^{zx}U^{zx}U$ (2-SSR); 2-SSR& $^{zx}U^{zy}U$ (2-SSR);
2-SSR& $^{zx}U^{xy}U$ (2-SSR); 2-SSR& $^{zy}U^{zx}U$ (2-SSR);
2-SSR& $^{zy}U^{zy}U$ (2-SSR); 2-SSR& $^{zy}U^{xy}U$ (2-SSR);
2-SSR& $^{xy}U^{zx}U$ (2-SSR); 2-SSR& $^{xy}U^{zy}U$ (2-SSR);
2-SSR& $^{xy}U^{xy}U$ (2-SSR); 2-SSR& $S^{zx}U$ (3-SSR);
2-SSR& $S^{zy}U$ (3-SSR); 2-SSR& $S^{xy}U$ (3-SSR);
3-SSR& ^{zx}US (3-SSR); 3-SSR& ^{zx}US (2-SSR);
3-SSR& ^{zx}US (2-SSR)。

PSS 型:

PSS&SR(3-PSS); 3-PSS&RS(PSS);
PSS& $^{zx}U^xR$ (2-PSS); PSS& $^{zy}U^xR$ (2-PSS);
PSS& $^{xy}U^xR$ (2-PSS); 2-PSS& $^xR^{zx}U$ (RRR);
2-PSS& $^xR^{zy}U$ (RRR); 2-PSS& $^xR^{xy}U$ (RRR);
2-PSS& $^{zx}U^{zx}U$ (2-PSS); 2-PSS& $^{zx}U^{zy}U$ (2-PSS);
2-PSS& $^{zx}U^{xy}U$ (2-PSS); 2-PSS& $^{zy}U^{zx}U$ (2-PSS);
2-PSS& $^{zy}U^{zy}U$ (2-PSS); 2-PSS& $^{zy}U^{xy}U$ (2-PSS);
2-PSS& $^{xy}U^{zx}U$ (2-PSS); 2-PSS& $^{xy}U^{zy}U$ (2-PSS);
2-PSS& $^{xy}U^{xy}U$ (2-PSS); 2-PSS& $S^{zx}U$ (3-PSS);
2-PSS& $S^{zy}U$ (3-PSS); 2-PSS& $S^{xy}U$ (3-PSS);
3-PSS& ^{zx}US (2-PSS); 3-PSS& ^{zx}US (2-PSS);
3-PSS& ^{zx}US (2-PSS)。

SPS 型:

SPS&SR(3-SPS); 3-SPS&RS(SPS);
SPS& $^{zx}U^xR$ (2-SPS); SPS& $^{zy}U^xR$ (2-SPS);
SPS& $^{xy}U^xR$ (2-SPS); 2-SPS& $^xR^{zx}U$ (RRR);
2-SPS& $^xR^{zy}U$ (RRR); 2-SPS& $^xR^{xy}U$ (RRR);
2-SPS& $^{zx}U^{zx}U$ (2-SPS); 2-SPS& $^{zx}U^{zy}U$ (2-SPS);
2-SPS& $^{zx}U^{xy}U$ (2-SPS); 2-SPS& $^{zy}U^{zx}U$ (2-SPS);
2-SPS& $^{zy}U^{zy}U$ (2-SPS); 2-SPS& $^{zy}U^{xy}U$ (2-SPS);
2-SPS& $^{xy}U^{zx}U$ (2-SPS); 2-SPS& $^{xy}U^{zy}U$ (2-SPS);
2-SPS& $^{xy}U^{xy}U$ (2-SPS); 2-SPS& $S^{zx}U$ (3-SPS);
2-SPS& $S^{zy}U$ (3-SPS); 2-SPS& $S^{xy}U$ (3-SPS);
3-SPS& ^{zx}US (2-SPS); 3-SPS& ^{zx}US (2-SPS);
3-SPS& ^{zx}US (2-SPS)。

SSP 型:

SSP&SR(3-SSP); 3-SSP&RS(SSP);
SSP& $^{zx}U^xR$ (2-SSP); SSP& $^{zy}U^xR$ (2-SSP);
SSP& $^{xy}U^xR$ (2-SSP); 2-SSP& $^xR^{zx}U$ (RRR);
2-SSP& $^xR^{zy}U$ (RRR); 2-SSP& $^xR^{xy}U$ (RRR);
2-SSP& $^{zx}R^{zx}U$ (2-SSP); 2-SSP& $^{zx}R^{zy}U$ (2-SSP);

2-SSP& $^{zx}R^{xy}U(2-SSP)$; 2-SSP& $^{zy}R^{zx}U(2-SSP)$;
 2-SSP& $^{zy}R^{zy}U(2-SSP)$; 2-SSP& $^{zy}R^{xy}U(2-SSP)$;
 2-SSP& $^{xy}R^{zx}U(2-SSP)$; 2-SSP& $^{xy}R^{zy}U(2-SSP)$;
 2-SSP& $^{xy}U^{xy}U(2-SSP)$; 2-SSP& $S^{zx}U(3-SSP)$;
 2-SSP& $S^{zy}U(3-SSP)$; 2-SSP& $S^{xy}U(3-SSP)$;
 3-SSP& $^{zx}US(2-SSP)$; 3-SSP& $^{zx}US(2-SSP)$
 3-SSP& $^{zx}US(2-SSP)$

RUS 型:

RUS&SR(3-RUS); 3-RUS&RS(RUS);
 RUS& $^{zx}U^xR(2-RUS)$; RUS& $^{zy}U^xR(2-RUS)$;
 RUS& $^{xy}U^xR(2-RUS)$; 2-RUS& $^xR^{zx}U(RRR)$;
 2-RUS& $^xR^{zy}U(RRR)$; 2-RUS& $^xR^{xy}U(RRR)$;
 2-RUS& $^{zx}U^{zx}U(2-RUS)$; 2-RUS& $^{zx}U^{zy}U(2-RUS)$;
 2-RUS& $^{zx}U^{xy}U(2-RUS)$; 2-RUS& $^{zy}U^{zx}U(2-RUS)$;
 2-RUS& $^{zy}U^{zy}U(2-RUS)$; 2-RUS& $^{zy}U^{xy}U(2-RUS)$;
 2-RUS& $^{xy}U^{zx}U(2-RUS)$; 2-RUS& $^{xy}U^{zy}U(2-RUS)$;
 2-RUS& $^{xy}U^{xy}U(2-RUS)$; 2-RUS& $S^{zx}U(3-RUS)$;
 2-RUS& $S^{zy}U(3-RUS)$; 2-RUS& $S^{xy}U(3-RUS)$;
 3-RUS& $^{zx}US(2-RUS)$; 3-RUS& $^{zx}US(2-RUS)$;
 3-RUS& $^{zx}US(2-RUS)$ 。

PUS 型:

PUS&SR(3-PUS); 3-PUS&RS(PUS);
 PUS& $^{zx}U^xR(2-PUS)$; PUS& $^{zy}U^xR(2-PUS)$;
 PUS& $^{xy}U^xR(2-PUS)$; 2-PUS& $^xR^{zx}U(RRR)$;
 2-PUS& $^xR^{zy}U(RRR)$; 2-PUS& $^xR^{xy}U(RRR)$;
 2-PUS& $^{zx}U^{zx}U(2-PUS)$; 2-PUS& $^{zx}U^{zy}U(2-PUS)$;
 2-PUS& $^{zx}U^{xy}U(2-PUS)$; 2-PUS& $^{zy}U^{zx}U(2-PUS)$;
 2-PUS& $^{zy}U^{zy}U(2-PUS)$; 2-PUS& $^{zy}U^{xy}U(2-PUS)$;
 2-PUS& $^{xy}U^{zx}U(2-PUS)$; 2-PUS& $^{xy}U^{zy}U(2-PUS)$;
 2-PUS& $^{xy}U^{xy}U(2-PUS)$; 2-PUS& $S^{zx}U(3-PUS)$;
 2-PUS& $S^{zy}U(3-PUS)$; 2-PUS& $S^{xy}U(3-PUS)$;
 3-PUS& $^{zx}US(2-PUS)$; 2-PUS& $^{zx}US(2-PUS)$;
 3-PUS& $^{zx}US(2-PUS)$ 。

UPS 型:

UPS&SR(3-UPS); 3-UPS&RS(UPS);
 UPS& $^{zx}U^xR(2-UPS)$; UPS& $^{zy}U^xR(2-UPS)$;
 UPS& $^{xy}U^xR(2-UPS)$; 2-UPS& $^xR^{zx}U(RRR)$;
 2-UPS& $^xR^{zy}U(RRR)$; 2-UPS& $^xR^{xy}U(RRR)$;
 2-UPS& $^{zx}U^{zx}U(2-UPS)$; 2-UPS& $^{zx}U^{zy}U(2-UPS)$;
 2-UPS& $^{zx}U^{xy}U(2-UPS)$; 2-UPS& $^{zy}U^{zx}U(2-UPS)$;
 2-UPS& $^{zy}U^{zy}U(2-UPS)$; 2-UPS& $^{zy}U^{xy}U(2-UPS)$;
 2-UPS& $^{xy}U^{zx}U(2-UPS)$; 2-UPS& $^{xy}U^{zy}U(2-UPS)$;

2-UPS& $^{xy}U^{xy}U(2-UPS)$; 2-UPS& $S^{zx}U(3-UPS)$;
 2-UPS& $S^{zy}U(3-UPS)$; 2-UPS& $S^{xy}U(3-UPS)$;
 3-UPS& $^{zx}US(2-UPS)$; 3-UPS& $^{zx}US(2-UPS)$;
 3-UPS& $^{zx}US(2-UPS)$ 。

得到上述构型后, 结合之前功能分析的结果, 考虑机构整体的受力情况和各个构件、运动副的布置以及原动件的选取等因素, 对其进行优选。

以 SRS 型调整支链为例, 由于是直接通过 S 副(球面副)与机架和铲斗连接, 且需要通过电动机驱动转动副实现传动, 导致电动机不得不安装在中间的关节处, 会引起手臂转动惯量大, 关节误差累计, 动力学性能较差等问题; 而 RSS 型调整支链由于是通过 R 副(转动副)与机架连接, 恰好能有效克服上述问题, 多个控制电动机均可安装在机架上, 在保证柔性化输出的同时, 手臂还能做成轻杆, 转动惯量小, 动态性能较好。

部分演化优选出来的构型如图 10 所示。这类空间可控机构式装载机能实现空间多自由度的运动输出, 且均由可控电动机驱动, 连杆传动, 各零部件加工装配要求低, 不仅能有效克服液压装载机液压元件加工精度要求高、维修保养成本高、可靠度难保证、容易漏油等缺点, 还能较好解决平面装载机只能实现平面内的轨迹输出, 导致的动作不够灵活、工作空间有限、工作效率低等问题。

4 样机与试验

装载机等工程机械载荷较大, 受力情况复杂, 为验证多自由度可控机构式装载机能否像液压式装载机一样完成装载工作, 研制了一台小型平面 2 自由度可控机构式装载机进行相关试验, 如图 11a、11b 所示。试验表明, 该样机在编程控制或者人工手动控制操作下, 能顺利完成承载条件下的各种铲装、抬升、卸料等任务, 实现相关装载功能, 并且工作平顺流畅, 噪声很小, 承载能力较强。

5 结论

(1) 以传统液压装载机的工作原理为依据和出发点, 运用工作机理的行为表达方法, 将工作机理由工艺动作过程表达。

(2) 结合可控机构、变胞机构以及并联机构等相关研究成果, 经功能分析, 通过构型演化, 完成

图 10 空间可控机构式装载机

装载机新型执行机构的概念设计, 获得了平面可控机构式装载机和具有变胞功能的可控机构式装载机等构型。

(3) 综合运用基于螺旋理论的约束综合法和获得了一批新型空间多自由度可控机构式装载机的构型。

(4) 为验证多自由度可控机构可应用于装载机等工程机械产品, 研制了一台平面 2 自由度可控机构式装载机的样机并进行了相关试验。试验结果表明, 这种可控机构式装载机样机在编程控制或者人工手动控制操作下, 能顺利完成承载条件下的各种铲装、抬升、卸料等任务, 为这类机构的工程应用提供了一定的参考。

(a)

(b)

图 11 平面 2 自由度可控机构式装载机

参 考 文 献

- [1] FRIMPONG S, LI Y. Stress loading of the cable shovel boom under in-situ digging conditions[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14: 702-715.
- [2] 朱齐平. 进口工程机械使用维修手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001.
ZHU Qiping. Construction machinery maintenance manual[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2001.
- [3] 李新德, 王丽. 工程机械液压系统常见故障的原因分析及对策[J]. 机床与液压, 2008, 36(7): 164-167.
LI Dexin, WANG Li. Analysis of common faults of construction machinery hydraulic systems and the countermeasures[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(7): 164-167.
- [4] 邹慧君, 李瑞琴, 郭为忠, 等. 机构学 10 年来主要研究成果和发展展望[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12): 22-30.
ZOU Huijun, LI Ruiqin, GUO Weizhong, et al. Research trends and prospects of mechanisms in china in the past decade[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(12): 22-30.
- [5] DU R, GUO W Z. The design of a new metal forming press with controllable mechanism[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2003, 125(3): 582-592.
- [6] 李辉. 混合驱动可控压力机的基础理论研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
LI Hui. Fundamental study on the hybrid-driven

- programmable mechanical press[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.
- [7] 张珂. 混合驱动连杆机构系统动力学建模、优化与控制研究[D]. 上海: 东华大学, 2005.
- ZHANG Ke. The research on dynamic modeling, optimal design and control for hybrid linkage mechanism system[D]. Shanghai: East China University, 2005.
- [8] 于靖军, 刘辛军, 丁希仑, 等. 机器人机构学的数学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- YU Jingjun, LIU Xinjun, DING Xilun, et al. Mechanism of foundations of mathematics[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [9] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- HUANG Zhen, ZHAO Yongsheng, ZHAO Tieshi. Advanced spatial mechanism[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [10] GAO Feng, LI Weimin, ZHAO Xianchao. New kinematic structure for 2-, 3-, 4-, and 5-dof parallel manipulator design[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37: 1359-1411.
- [11] HUANG Zhen, LI Qinchuan. Type synthesis principle of minor-mobility parallel manipulators[J]. Science in China, 2002, 45(3): 241-248.
- [12] ZHAO Tieshi, DAI Jiansheng, HUANG Zhen. Geometric synthesis of spatial parallel manipulators with fewer than six degree of freedom[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2002, 216: 1175-1185.
- [13] HUANG Zhen, LI Qinchuan. General methodology for type synthesis of lower-mobility symmetrical parallel manipulators and several novel manipulators[J]. International Journal of Robotics Research, 2002, 21(2): 131-145.
- [14] ZHAO Tieshi, DAI Jiansheng, HUANG Zhen. Geometric analysis of overconstrained parallel manipulators with three and four degree-of-freedom[J]. JSME International Journal Series C, 2002, 45(3): 1-11.
- [15] KONG Xianwen, GOSSELIN C M. Type synthesis of 3T1R 4-DOF parallel manipulators based on Screw Theory[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 181-190.
- [16] KONG Xianwen, GOSSELIN C M. Type synthesis of 3-DOF spherical parallel manipulators based on Screw Theory[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2004, 126: 101-108.
- [17] HERVÉ J M. The Lie group of rigid body displacement, a fundamental tool for mechanism design[J]. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34(5): 719-730.
- [18] MENG Jian, LIU Guanfang, LI Zexiang. A geometric theory for synthesis and analysis of sub 6-DOF parallel manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(4): 625-649.
- [19] 沈惠平, 马履中, 杨廷力. 基于混合链的弱耦合三维平移并联机构型综合[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 22-27.
- SHEN Huiping, MA Luzhong, YANG Tingli. Kinematic structural synthesis of 3-translational weakly-coupled parallel mechanisms based on hybrid chains[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 22-27.
- [20] ZENG Daxing, HOU Yulei, HUANG Zhen. Type synthesis and characteristic analysis of a family of 2-dof rotational decoupled parallel mechanisms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(6): 833-840.
- [21] LI Duanling, ZHANG Zhonghai, CHEN Guimin. Structural synthesis of compliant metamorphic mechanisms based on adjacency matrix operations[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(4): 1-7.
- [22] 邹慧君, 颜鸿森. 机械创新设计理论与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- ZOU Huijun, YAN Hongsen. Theory and method of mechanical innovative design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [23] 蔡敢为, 徐细勇, 潘宇晨. 一种平面多自由度可控装载机构: 中国, ZL201010244837.2[P]. 2011-12-07.
- CAI Ganwei, XU Xiyong, PAN Yuchen. A planar multi-DOF controllable loading mechanism: China, ZL201010244837.2[P]. 2011-12-07.
- [24] 蔡敢为, 王红州, 潘宇晨. 一种具有变胞功能的装载机构及其实现方法: 中国, ZL201010582790.0[P]. 2012-03-19.
- CAI Ganwei, WANG Hongzhou, PAN Yuchen. A loading mechanism with metamorphic functions and its implementation method: China, ZL201010582790.0[P]. 2012-03-19.

作者简介: 蔡敢为(通信作者), 男, 1961 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构学和机械动力学, 在国内外发表论文 130 多篇。
E-mail: caiganwei@163.com

潘宇晨, 男, 1983 年出生, 博士。主要研究方向为变胞机构、可控机构、并联机构的设计理论和方法及其在工程中的应用。
E-mail: panyuchenn@163.com