

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.07.017

基于螺旋理论的大型矿用电铲构型综合研究^{*}

郭辰昊^{1,2}, 吴 娟^{1,2*}, 丰崑楠^{1,2}

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024;

2. 矿山流体控制国家地方联合工程实验室, 山西 太原 030024)

摘要:在大型矿用电铲的结构创新设计方面目前还没有较为系统的方法,同时在矿用电铲的构型综合方面也未见相关报道,针对这一问题,采用基于螺旋理论的约束综合法,对大型矿用电铲构型综合问题进行了研究。首先,根据螺旋理论对电铲推压和提升机构模型进行了自由度分析和计算,求出了电铲构型综合期望的运动;其次,采用基于螺旋理论的约束综合法,运用 2 种构型方案对矿用电铲进行了构型综合,通过优化筛选了支链结构,获得了 100 种三支链的电铲构型 I 和 14 种两支链的电铲构型 II;最后,通过 SolidWorks 软件建立了电铲三维模型,运用 ADAMS 软件对电铲的简化模型及综合出的一种新构型进行了挖掘轨迹仿真分析。研究表明:电铲新构型的运动仿真轨迹和理论挖掘轨迹基本吻合,证实了该构型方法的可行性,为多样化矿用电铲的结构创新设计提供了更多可选构型。

关键词:矿用电铲;电动机机械式挖掘机;螺旋理论;构型综合;挖掘轨迹仿真;运动螺旋;约束螺旋

中图分类号:TH112;TD422

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)07-0989-07

Configuration synthesis of large mining shovel based on screw theory

GUO Chen-hao^{1,2}, WU Juan^{1,2}, FENG Yin-nan^{1,2}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. National-local Joint Engineering Laboratory of Mining Fluid Control, Taiyuan 030024, China)

Abstract: At present, there was no systematic method for the structural innovation design of large mining shovel, and there was no relevant report on the configuration synthesis of mining shovel. Aiming at the problem, the constraint synthesis method based on screw theory was used to study the configuration synthesis of large mining shovel. First of all, according to the screw theory, the degree of freedom of the pushing and lifting mechanism model of the mining shovel was analyzed and calculated, and the comprehensive desired motion of the electric shovel configuration was obtained. Secondly, using the constraint synthesis method based on screw theory, two configuration schemes were used to synthesize the configuration of the mining shovel, and through the optimization and screening of the branched chain structure, 100 three-chain electric shovel configuration I and 14 two-branch electric shovel configuration II were obtained. Finally, the three-dimensional model was established by the modeling software SolidWorks, and ADAMS software was used to simulate and analyze the excavation trajectory of the simplified model of large mining shovel and a new synthesized configuration. The research results show that the motion simulation trajectory of the new configuration of the electric shovel is basically consistent with the theoretical excavation trajectory, which verifies the feasibility of the configuration method and provides more optional configurations for the structural innovation design of diversified mining electric shovels.

Key words: mining shovel; electro mechanical excavator; screw theory; configuration synthesis; mining trajectory simulation; moving screw; restraining screw

收稿日期:2022-01-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U21A20125);山西省基础研究计划面上项目(20210302124060)

作者简介:郭辰昊(1997-),男,山西长治人,硕士研究生,主要从事矿用电铲结构方面的研究。E-mail:809898046@qq.com

通信联系人:吴娟,女,教授,硕士生导师。E-mail:wujuanz@163.com

0 引 言

大型矿用电铲又称为电动机械式挖掘机、电动绳铲等,是露天矿山开采作业中最关键的设备之一。其主要由行走机构、回转机构、提升机构和推压机构 4 个部分组成。

大型矿用电铲需要协调各工作装置来完成挖掘任务,但主要依靠推压机构和提升机构的共同作用来完成挖掘工作^[1]。大型矿用电铲的挖掘范围大、工作能力强、维护成本低、环境适应性极强,因此被广泛应用于露天矿开采作业中。

随着大型矿用电铲的大量应用,业界对大型矿用电铲的机构设计和结构创新提出了更多的要求,因此,有必要对大型矿用电铲机构的构型综合问题进行研究,为电铲的结构创新设计提供更多可选构型。

机构的构型综合又被称为型综合,是机构设计和创新的重要方法,其定义为^[2]:在满足机构的期望自由度数和性质的要求下,探索其具体结构。通过合理配置各个分支链的构件和运动副数目及空间位置等,综合出机构的新构型。矿用电铲完成挖掘任务的推压机构和提升机构是一种并联机构。

关于并联机构的构型综合方法,已经有很多专家展开了相关的研究。李秦川^[3]在 HERVÉ J M^[4]的研究基础上,基于位移子群分析法,对多种 3 平移并联机构新构型进行了综合。杨廷力等人^[5,6]首创了一种基于单开链单元的机构构型综合方法,并采用该方法综合了多种新机构。宫金良等人^[7]以运动单元间运算法则为基础,提出了一种构型综合新方法,并对该构型综合新方法进行了验证。GOGU G^[8]基于线性变换思想,提出了一种适用于各向同性并联机构的构型综合方法。黄真等人^[9-11]提出了一种基于螺旋理论的构型综合方法,并对其进行了完善,还用该方法进行了少自由度对称并联机构构型综合,得到了大量新构型。

目前,很多专家对并联机器人和机床的构型综合做了大量研究,但在矿用电铲的构型综合方面尚未见相关报道。相比于其他构型综合方法,基于螺旋理论的约束综合法具有物理意义明确、数学表达和代数运算简单等优点。

基于上述原因,笔者采用基于螺旋理论的约束综合法,对矿用电铲进行构型综合研究,为电铲的机构设计和结构创新提供参考。

1 螺旋理论概述

1.1 螺旋基础

螺旋又称为旋量,可用于表示矢量的位置和方向^[12-14]。空间中任意一个螺旋都能表示为 1 个矢量,其表达式如下:

$$\$ = \begin{bmatrix} S \\ S_0 + hS \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ r \times S + hS \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \$—螺旋; S—螺旋轴线方向的单位矢量; S₀—直线的线矩; r—螺旋轴线上任意一点相对参考坐标原点的位置矢量; h—螺旋的节距。

当螺旋的节距 $h=0$ 时,螺旋可用于表示空间中转动副(R)的运动螺旋;当螺旋的节距 $h \rightarrow \infty$ 时,螺旋可用于表示空间中移动副(P)的运动螺旋。

机构中的移动副(P)和转动副(R)均为单自由度运动副,圆柱副(C)、万向铰(U)、球副(S)等复合副均可看作是单自由度运动副的组合。

1.2 互易螺旋理论

针对空间中任意两个给定的螺旋 $\$ = (S, S_0)$ 和 $\$_r = (S^r, S_0^r)$,其互易积^[15]方程为:

$$\$ \circ \$_r = S \cdot S_0^r + S_0 \cdot S^r \quad (2)$$

式中: °—互易积运算符。

若方程的结果为 0,则螺旋 \$ 和 \$\\$_r 互为反螺旋。由反螺旋理论^[16]可知,若螺旋 \$\\$_1, \\$_2, \\$_3, \dots, \\$_m\$ 表示机构分支链的运动螺旋,则其反螺旋 \$\\$_r\$ 代表该分支链的约束螺旋。

1.3 约束综合法

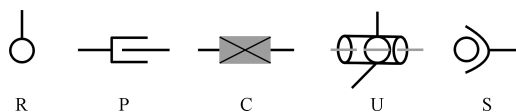
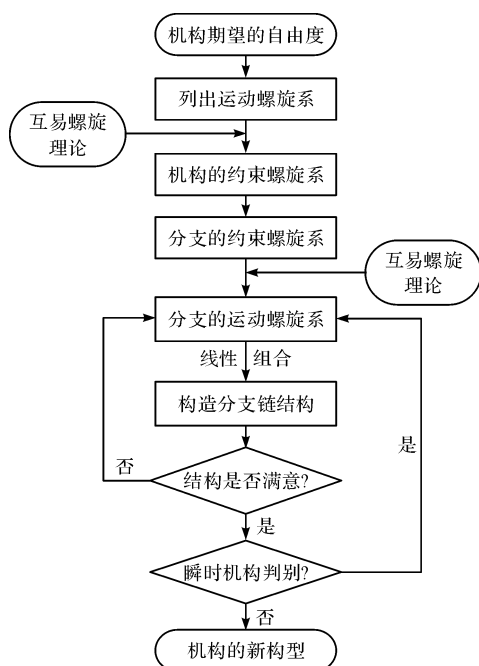
笔者先根据机构期望的自由度,列出其运动螺旋系,再基于互易螺旋理论求出其约束螺旋系,然后依据分支的约束螺旋系求与其相逆的运动螺旋系,构造分支链结构,优化配置支链结构,得到机构的新构型。

机构构型综合的具体流程如图 1 所示^[17]。

2 结构分析

在电铲实际的挖掘过程中,其动臂和回转机构几乎不动,故可把动臂看成“机架”,把电铲构型综合看作电铲提升推压机构的构型综合。因此,对大型矿用电铲机构进行构型综合研究,其实可以转化为对电铲推压机构和提升机构的构型综合研究。

此处笔者用到的转动副、移动副、圆柱副、万向铰、球副的运动副符号,如图 2 所示。



笔者将推压机构中的齿轮齿条机构简化为 1 个转动副和 1 个移动副,提升机构中的绳子、天轮机构简化为 2 个转动副和 1 个移动副,以动臂为机架,斗杆和铲斗为动平台,得到其机构简图,如图 3 所示^[18-20]。

在图 3 中,以点 A 为坐标原点,建立坐标系 $OXYZ$ 。其中, Z 和 Y 表示垂直和水平方向, X 垂直纸面向外。基于螺旋理论建立各支链的运动螺旋,再由互易积方程即可求得各个支链的约束螺旋。

由图 3 可知,支链一的运动螺旋系为:

$$\begin{aligned} \$_{11} &= (1, 0, 0, 0, 0, 0) \\ \$_{12} &= (0, 0, 0, 0, a_1, b_1)_\circ \end{aligned}$$

根据互易积方程可求出支链一的约束螺旋系为:

$$\$_{11}^r = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$\$_{12}^r = (0, 0, 0, 0, 1, 0)$$

$$\$_{13}^r = (0, 0, 0, 0, 0, 1)$$

$$\$_{14}^r = (0, b_1, -a_1, 0, 0, 0)_o$$

同理,可求出支链二的运动螺旋系及其约束螺旋系,如表1所示。

表 1 支链的运动螺旋及约束螺旋

	运动螺旋	约束螺旋
支链 1	$\$_{11} = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$	$\$_{11}^r = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$
	$\$_{12} = (0, 0, 0, 0, a_1, b_1)$	$\$_{12}^r = (0, 0, 0, 0, 1, 0)$
		$\$_{13}^r = (0, 0, 0, 0, 0, 1)$
		$\$_{14}^r = (0, b_1, -a_1, 0, 0, 0)$
支链 2	$\$_{21} = (1, 0, 0, 0, a_2, b_2)$	$\$_{21}^r = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$
	$\$_{22} = (0, 0, 0, 0, a_3, b_3)$	$\$_{22}^r = (0, 0, 0, 0, 1, 0)$
	$\$_{23} = (1, 0, 0, 0, a_4, b_4)$	$\$_{23}^r = (0, 0, 0, 0, 0, 1)$

由表 1 可知,该机构的动平台共有 4 个约束螺旋,其约束螺旋系为:

$$\mathcal{S}_1^r = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$\mathcal{S}_2^r = (0, 0, 0, 0, 1, 0)$$

$$\mathcal{S}_3^r = (0, 0, 0, 0, 0, 1)$$

$$\$_4^r = (0, b_1, -a_1, 0, 0, 0)_o$$

该机构的公共约束 λ 有 3 个, 分别为 $\r_1 、 $\r_2 、 $\r_3 。

修正的 G-K 公式^[21]为:

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + \nu - \xi \quad (3)$$

式中: M —机构自由度; d —机构的阶数, $d=6-\lambda$; n —含机架在内的机构构件数; g —运动副的个数; f_i —第 i 个运动副的自由度; ν —冗余约束的数目; ξ —机构中存在的局部自由度。

根据式(3)计算机构的自由度:

$$M = 3 \times (5 - 5 - 1) + 5 = 2。$$

结合动平台的约束螺旋系可知,动平台受到 4 个独立的约束,即 2 个约束力和 2 个约束力偶。因此,对电铲机构进行构型综合,获得的新构型需要满足 1 个转动自由度和 1 个移动自由度。

3 构型综合

由于动平台受到 4 个独立约束,即 2 个约束力和 2 个约束力偶。其机构型综合有两种思路^[22]:(1)使用 3 条支链结构,即由 2 条无约束的主动支链和提供完整约束的被动支链组成,采用被动支链提供约束,主动支链提供驱动的方式;(2)由 2 条少自由度的主动

支链组成,2 条主动支链共同施加约束。

其中,前一种构型综合的思路比较容易,但是支链数目较多,使综合出的机构更加复杂;后者需要考虑各分支的约束螺旋间空间位置关系,故构型综合的难度较大。

3.1 构型综合 I

笔者通过使用 2 条 6 自由度的主动支链,一条 1R1T 二自由度的被动支链来综合新构型。6 自由度的主动支链只用于提供驱动,不提供约束,为了简化结构,一般采用 2 杆配置的 6 自由度支链结构来综合新构型。

常见的 6 自由度的主动支链结构,如表 2 所示^[23]。

表 2 6 自由度主动支链结构

结构类型	支链结构
I	RUS、RSU、PUS、PSU、 SPU、UPS、SRU、SUR、 URS、USR、SUP、USP
II	RSS、PSS、SPS SRS、SSR、SSP
III	CRS、CPS、UCU、CUU CUS、CSU、UCS、SCU CSS、SCS、RCS、SCR PCS、SCH、CSR、CSP

表 2 中,支链结构从左到右分别为与机架相连的运动副、中间运动副、与动平台相连的运动副。类型 I 使用转动副、移动副、万向铰和球副来作为支链的关节,类型 II 中采用球副来代替万向铰,使用了 2 个球副,类型 III 使用了圆柱副作为关节。

根据支链的筛选条件,此处需要注意的地方如下:

(1) 考虑到需要施加合理的驱动关节,故与机架相连的运动副尽量选择移动副或转动副,或者支链结构的中间运动副选择移动副;

(2) 需要考虑局部自由度、消极自由度、重复的约束等影响因素;

(3) 与动平台相连的运动副要尽量使用球副。

笔者通过优化综合的支链结构,再考虑结构的可实现性,获得满足条件的六自由度主动支链,如表 3 所示。

表 3 支链优化选型

结构类型	支链结构
I	RUS、PUS、UPS URS、USR、USP
II	RSS、PSS
III	CUS、SCS

由于被动支链需要提供该机构的约束螺旋系为:

$$\$_1^r = (1, 0, 0, 0, 0, 0);$$

$$\$_2^r = (0, 0, 0, 0, 1, 0);$$

$$\$_3^r = (0, 0, 0, 0, 0, 1);$$

$$\$_4^r = (0, b_1, -a_1, 0, 0, 0)。$$

所以该支链的运动螺旋系为:

$$\$_1 = (1, 0, 0, 0, 0, 0);$$

$$\$_2 = (0, 0, 0, 0, a_1, b_1)。$$

故该支链应该由一个移动副和一个转动副构成,可以选取 RP 支链结构。

综上所述,笔者从表 3 中任意选取 2 条 6 自由度的主动支链,再加上 RP 被动支链,即可构成多种电铲新构型 RUS-RSS-RP、SCS-RSS-RP、SCS-URS-RP 等。

其中,综合的 5 种电铲新构型如表 4 所示。

表 4 电铲新构型 I

机构简图	机构模型图
SCS-RSS-RP 	
SCS-PSS-RP 	
SCS-URS-RP 	
RSS-RSS-RP 	
RUS-RSS-RP 	

3.2 构型综合 II

笔者采用2条少自由度主动支链来综合新构型,考虑约束螺旋 $\$4^r = (0, b_1, -a_1, 0, 0, 0)$ 的特殊性,以及电铲结构特性及运动轨迹。

为简化构型的难度,笔者使支链一选取 RP 或者 SP 结构,支链二的结构提供支链一没有考虑到的 $\$1^r$ 、 $\$2^r$ 、 $\$3^r$ 等约束螺旋。

3.2.1 支链一分析

若支链一选取 RP 结构,由上文可知,该支链可以提供动平台所需的全部约束螺旋,故支链二提供1个、2个或者3个约束螺旋都满足要求。

若支链一选取 SP 结构,则该支链的运动螺旋系为:

$$\$11 = (1, 0, 0, 0, 0, 0);$$

$$\$12 = (0, 1, 0, 0, 0, 0);$$

$$\$13 = (0, 0, 1, 0, 0, 0);$$

$$\$14 = (0, 0, 0, 0, a_1, b_1)。$$

由互易积方程可知,其约束螺旋系为:

$$\$11^r = (1, 0, 0, 0, 0, 0);$$

$$\$12^r = (0, b_1, -a_1, 0, 0, 0)。$$

故支链二需要提供2个约束力偶 $\$2^r$ 、 $\$3^r$ 或者3个约束螺旋 $\$1^r$ 、 $\$2^r$ 、 $\$3^r$ 。

3.2.2 支链二分析

若支链二提供1个约束力,则满足条件的典型约束支链结构有 RSR, RPS, PPS 等^[24]。

此处以 RPS 支链结构为例,如图4所示。

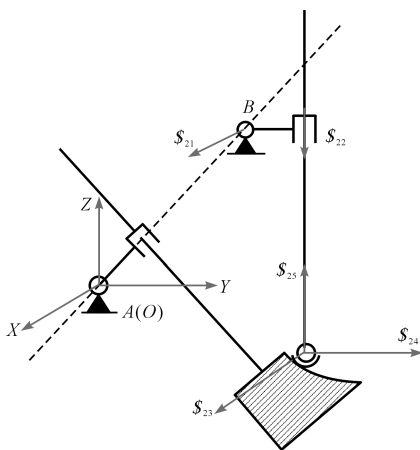


图4 RPS 结构分析

该支链的运动螺旋系为:

$$\$21 = (1, 0, 0, 0, a_1, b_1);$$

$$\$22 = (0, 0, 0, 0, a_2, b_2);$$

$$\$23 = (1, 0, 0, 0, c_3, -b_3);$$

$$\$24 = (0, 1, 0, -c_3, 0, a_3);$$

$$\$25 = (0, 0, 1, b_3, -a_3, 0)。$$

其约束螺旋系为:

$$\$1^r = (1, 0, 0, 0, c_2, -b_2)。$$

显然,该支链结构可以提供1个约束力,满足支链二的构型要求。

若支链二提供1个约束力偶,则该支链的结构可选 CRU、PCU、RUC、PUC、RCC 等支链结构。因为采用 R 副或 S 副与动平台连接的方式更为常见,故笔者不考虑此种支链结构类型。

若支链二提供1个约束力和1个约束力偶,则该支链的结构可选取 PPU 支链结构。由于 U 副与动平台连接的方式不常见,故笔者不考虑此种支链结构类型。

若支链二提供2个约束力偶 $\$2^r$ 、 $\$3^r$,该约束支链可以选取 RCR、PCR 等支链结构。

若支链二提供 $\$1^r$ 、 $\$2^r$ 、 $\$3^r$ 3个约束螺旋,则支链的运动螺旋系为:

$$\$21 = (1, 0, 0, 0, 0, 0);$$

$$\$22 = (0, 0, 0, 0, 1, 0);$$

$$\$23 = (0, 0, 0, 0, 0, 1)。$$

显然,该支链的组成中无法存在圆柱副、球副和万向铰,应该由转动副和移动副组成。

满足条件的支链结构如表5所示。

表5 支链结构

结构类型	支链结构
无移动副	RRR
1个移动副	RRP、RPR、PRR
2个移动副	RPP、PRP、PPR

考虑到2个移动副的支链结构紧凑型不强,故此处笔者优先使用 RRR、RRP、RPR、PRR 等支链结构。

综上所述,笔者通过采用2条少自由度主动支链来综合的新构型方案,如表6所示。

表6 电铲新构型 II

	支链一	支链二
I	RP	RSR、RPS、PPS
		RCR、PCR
		RRR、RRP、PRR
II	SP	RCR、PCR
		RRR、RRP、RPR、PRR

4 仿真实验

为验证电铲简化模型的正确性及电铲新构型的可行性,笔者对杆件进行了初步设计^[25,26](其中,主要杆件参数为:AB = 325 mm, AC = 55 mm, BE = 159 mm,

$DF = 137$ mm), 利用 SolidWorks 软件对电铲简化模型和表 6 中 RP-RRR 型电铲新构型进行三维建模, 并将三维模型导入 ADAMS 软件中。

ADAMS 三维模型如图 5 所示。

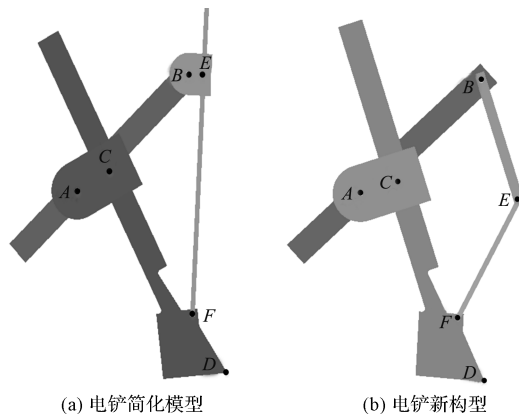


图 5 ADAMS 三维模型

因为电铲的理论挖掘轨迹可近似为等切削角的对数螺旋线, 所以根据三维模型的结构尺寸参数, 可以运用 MATLAB 软件进行计算, 并绘制出电铲铲斗齿尖的理论挖掘轨迹, 如图 6 所示。

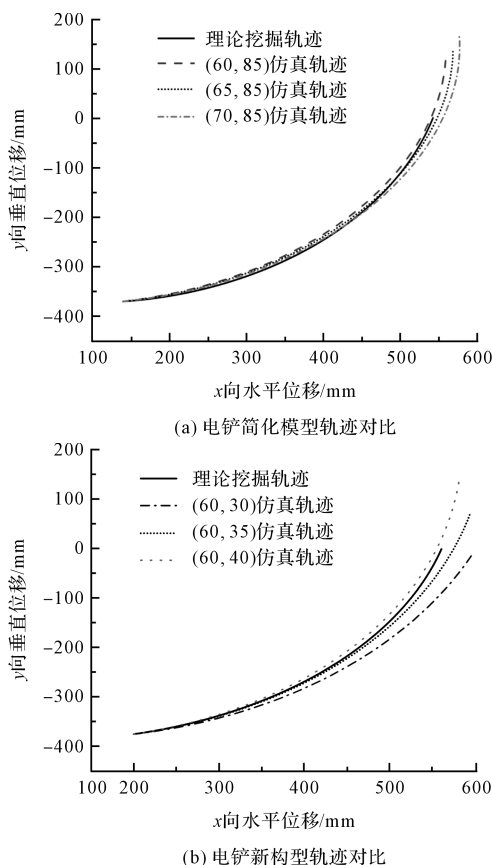


图 6 电铲齿尖运动轨迹

由图 6(a)可知: 设置电铲简化模型中杆件 CD 和杆件 EF 不同的驱动速度, 最大比例为 70 : 85, 最小比例为 60 : 85, 速度单位为 mm/s, 得到多种电铲仿真挖

掘轨迹, 其铲斗齿尖 D 点的运动轨迹和理论挖掘轨迹基本吻合;

由图 6(b)可知: 设置电铲新构型中杆件 CD 的移动速度为 60 mm/s, 杆件 BE 的转动速度为 30 rad/s、35 rad/s 和 40 rad/s, 其 D 点的运动仿真轨迹也和理论挖掘轨迹基本吻合。

该结果验证了电铲简化模型的正确性及电铲新构型的可行性。

5 结束语

在大型矿用电铲的结构创新设计方面目前还没有较为系统的方法, 同时在矿用电铲的构型综合方面也未见相关报道, 为此, 笔者采用基于螺旋理论的约束综合法, 对大型矿用电铲进行了构型综合的研究。首先, 建立了电铲工作机构简图, 并对电铲结构进行了自由度分析和计算, 求出了机构期望的运动; 然后, 基于螺旋理论的约束综合法, 得到了多种电铲新构型方案 I 和方案 II; 最后, 利用 ADAMS 软件对电铲简化模型的正确性及电铲新构型的可行性进行了验证。

研究结果如下:

(1) 基于螺旋理论, 提供了 100 种实现难度小、可靠性高的电铲新构型方案 I, 以及 14 种工作空间大、成本较低的新构型方案 II, 为多样化矿用电铲提供了更多可选构型;

(2) 基于螺旋理论的约束综合法, 对大型矿用电铲构型综合是可行且有效的, 为电铲机构创新和结构设计提供了一种新方法。

在接下来的工作中, 笔者将深入研究各类电铲新构型, 优选出最佳的新构型, 并搭建相应的实验平台对新构型进行现场测试。

参考文献 (References):

- [1] 于海旭, 何 适, 辛昊天, 等. 露天煤矿电铲智能化技术应用及其发展趋势 [J]. 工矿自动化, 2021, 47 (S1): 103-105.
- [2] 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.
- [3] 李秦川, 黄 真. 基于位移子群分析的 3 自由度移动并联机构型综合 [J]. 机械工程学报, 2003, 39 (6): 18-21.
- [4] HERVÉ J M. The Lie group of rigid body displacements, a fundamental tool for mechanism design [J]. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34 (5): 719-730.
- [5] 杨廷力, 金 琼, 刘安心, 等. 基于单开链单元的欠秩并联机器人机构型综合的一般方法 [J]. 机械科学与技术, 2001, 20 (3): 321-325.

- [6] 杨廷力,金 琼,刘安心,等. 基于单开链单元的三平移并联机器人机构型综合及其分类[J]. 机械工程学报,2002,38(8):31-36.
- [7] 宫金良,张彦斐,高 峰. 一种五自由度并联卧式机床构型设计[J]. 机械科学与技术,2007,26(8):1067-1070.
- [8] GOGU G. Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations[J]. **Euro-pean Journal of Mechanics-A/Solids**, 2004, 23 (6): 1021-1039.
- [9] 黄 真,李秦川. 少自由度并联机器人机构的型综合原理[J]. 中国科学 E 辑,2003,33(9):813-819.
- [10] HUANG Zhen, LI Qin-chuan. General methodology for type synthesis of symmetrical lower-mobility parallel manipulators and several novel manipulators [J]. **International Journal of Robotics Research**, 2002, 21 (2): 131-145.
- [11] HUANG Zhen, LI Qin-chuan. Type synthesis of symmetrical lower-mobility parallel mechanisms using the constraint-synthesis method [J]. **International Journal of Robotics Research**, 2003, 22(1):59-79.
- [12] BALL R. A Treatise on the Theory of Screws [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1900.
- [13] HUNT K H. Kinematics Geometry of Mechanisms [M]. London: Oxford University Press, 1978.
- [14] HAN B, XU Y, YAO J, et al. Configuration synthesis of hoop truss deployable mechanisms for space antenna based on screw theory[J]. **AIP Advances**, 2019, 9(8):1-13.
- [15] 曹文熬. 空间多环耦合机构数字化构型综合理论[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2014.
- [16] 许允斗,姚建涛,赵永生. 基于螺旋理论的锻造操作机构型综合[J]. 中国机械工程,2011,22(13):1540-1545.
- [17] 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,2006.
- [18] 申军立. 机械式挖掘机工作装置机构性能研究与优化设计平台研发[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院,2013:11-31.
- [19] LI Y, FRIMPONG S. Hybrid virtual prototype for analyzing cable shovel component stress [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2008, 37(5-6):423-430.
- [20] LAGUNOVA Y A, KOMISSAROV A P, LUKASHUK O A. Determination of functions of controlling drives of main executive mechanisms of mining excavators[J]. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 2018, 327(5):1-6.
- [21] 黄 真,曾达幸. 机构自由度计算原理和方法[M]. 北京:高等教育出版社,2016.
- [22] 李秦川,柴馨雪,陈巧红. 两转一移三自由度并联机构研究进展[J]. 科学通报,2017(14):1507-1519.
- [23] 陈 峰,费燕琼,赵锡芳. 六自由度并联机器人的支链选取[J]. 机器人,2005,27(5):396-399.
- [24] 韩 博,许允斗,韩媛媛,等. 基于螺旋理论的环形桁架式可展天线构型综合[J]. 宇航学报,2019,40(7):831-841.
- [25] 毕秋实,王国强,陈立军,等. 基于离散元-多体动力学联合仿真的机械式挖掘机挖掘阻力仿真与试验[J]. 吉林大学学报:工学版,2019,49(1):106-116.
- [26] 赵晓燕,郭 鑫,姜 勇,等. 地下铲运机铲装轨迹数学建模与[J]. 机械制造,2021,59(6):14-18.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

郭辰昊,吴 娟,丰崑楠. 基于螺旋理论的大型矿用电铲构型综合研究[J]. 机电工程,2022,39(7):989-995.

GUO Chen-hao, WU Juan, FENG Yin-nan. Configuration synthesis of large mining shovel based on screw theory[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(7):989-995.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>