(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2023 年 8 月 24 日 (24.08.2023)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2023/155504 A1

(51) 国际专利分类号:
B25J 15/08 (2006.01) *B25J 15/02* (2006.01)
B25J 15/00 (2006.01) *B25J 19/00* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2022/131817

(22) 国际申请日: 2022 年 11 月 15 日 (15.11.2022)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202210145247.7 2022年2月17日 (17.02.2022) CN

(71) 申请人: 江苏科技大学 (JIANGSU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国江苏省镇江市京口区梦溪路 2 号, Jiangsu 212003 (CN)。

(72) 发明人: 申燚 (SHEN, Yi); 中国江苏省镇江市京口区梦溪路2号, Jiangsu 212003 (CN)。 何淑婷 (HE, Shuting); 中国江苏省镇江市京口梦溪路2号, Jiangsu 212003 (CN)。 戴现令 (DAI, Xianling); 中国江苏省镇江市京口区梦溪路2号, Jiangsu 212003 (CN)。 袁明新 (YUAN, Mingxin); 中国江苏省镇江市京口区梦溪路2号, Jiangsu 212003 (CN)。 缪海鹏 (MIAO, Haipeng); 中国江苏省镇江市京口区梦溪路2号, Jiangsu 212003 (CN)。 邱贝贝 (QIU, Beibei); 中国江苏省镇江市京口区梦溪路2号, Jiangsu 212003 (CN)。 陶丽佳 (TAO, Lijia); 中国江苏省镇江市京口区梦溪路2号, Jiangsu 212003 (CN)。 印刚 (YIN, Gang); 中国江苏省镇江市京口区梦溪路2号, Jiangsu 212003 (CN)。 潘先锋 (PAN, Xianfeng); 中国江苏省镇江市京口区梦溪路2号, Jiangsu 212003 (CN)。 褚兴安 (CHU, Xingan); 中国江苏省镇江市京口区梦溪路2号, Jiangsu 212003 (CN)。

(74) 代理人: 南京经纬专利商标代理有限公司 (NANJING JINGWEI PATENT & TRADEMARK AGENCY CO., LTD); 中国江苏省南京市鼓楼区中山路179号12楼B座, Jiangsu 210005 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN,

(54) **Title:** SELF-LOCKING UNDERACTUATED GRIPPER AND STRUCTURE OPTIMIZATION METHOD THEREOF

(54) 发明名称: 一种自锁式欠驱动夹持器及其结构优化方法

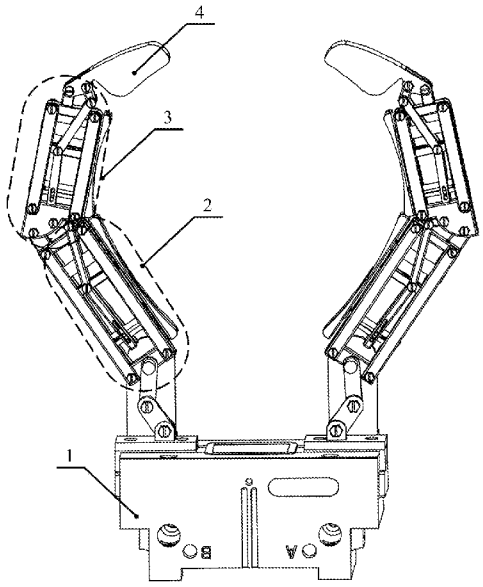


图 1

(57) **Abstract:** A self-locking underactuated gripper and a structure optimization method thereof. The self-locking underactuated gripper comprises a driving mechanism (1). First knuckle assemblies (2) which are symmetrical left and right and have the same structure are mounted on the upper part of the driving mechanism (1), a middle knuckle assembly (3) is mounted on the upper part of each first knuckle assembly (2), and a tail knuckle assembly (4) is mounted on the upper part of each middle knuckle assembly (3).

(57) 摘要: 一种自锁式欠驱动夹持器及其结构优化方法，自锁式欠驱动夹持器包括驱动机构（1），驱动机构（1）的上部安装着左右对称且结构相同的首指节组件（2），首指节组件（2）上部安装着中指节组件（3），中指节组件（3）上部安装着末指节组件（4）。

WO 2023/155504 A1

[见续页]

MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护)：ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种自锁式欠驱动夹持器及其结构优化方法

技术领域

[0001] 本发明属于工业机器人技术领域，尤其涉及到机器人的夹持器及其结构优化方法。

背景技术

[0002] 随着市场产品的配套类型增加，多品种、小批量工件在自动化生产线上不断涌现。工业机器人已经成为自动化生产线上的主角。为了应付生产中的工件搬运，机器人通常需要频繁更换夹具，降低了生产线效率。

[0003] 近年来一种基于欠秩原理的欠驱动机构开始兴起，因欠驱动机构具有自适应包络的优点，能满足生产线上“一对多”的夹持方式，得到了国内外学者关注并成为研究热点。因此基于欠秩机构原理设计新型夹持器有助于解决工件搬运过程中机器人对多外形、多尺寸工件的夹持需求。但由于欠驱动机构往往采用多关节指形机构，目前设计时多基于工程经验，因此机构在包络夹持时常会因各指节达不到力平衡而降低稳定性和精确性。此外，现有欠驱动机构大多不具有自锁功能，在抓取稍重型工件时会出现脱落导致发生危险工况。

[0004] 申请号为“202011408245.X”的发明专利，公开了一种机器人端拾器及其结构优化方法。该专利基于欠秩机构原理设计了具有自适应包络抓取的新型端拾器。但该端拾器主要依靠弹簧自身拉力来夹取工件，不具备自锁能力，只适用于轻型类工件，对于稍重型工件会存在有滑落的风险，导致安全事故发生。此外，由于夹紧力较小，工件可能出现摇晃、抖动的情况，牢靠性、稳定性和定位精度较差，甚者影响设备正常运行。

[0005] 因此在基于欠秩机构原理设计新型夹持器并完成自锁功能的基础上，针对其开展相应结构优化方法设计，有助于提高机器人夹持工件的有效性和稳定性。

发明内容

[0006] 本发明的目的是针对上述现有技术存在的问题和不足，将欠秩机构原理的自适应包络抓取多形状物件的技术结合到机器人夹持器上，提供一种夹持牢靠、稳定、定位精确且具备自锁能力的自锁式欠驱动夹持器。

[0007] 为了达到上述目的，本发明采取如下的技术方案予以实现：

[0008] 一种自锁式欠驱动夹持器，包括驱动机构1，所述驱动机构1的上端面安装着镜像对称设置的夹持机构，所述夹持机构自下而上由首指节组件2、中指节组件3和末指节组件4相连构成。

[0009] 所述的驱动机构1包括气缸体5，所述气缸体5上端面左右隔离安装有镜像对称的气动滑块6，所述气动滑块6上通过螺栓固定连接有传动滑块7，所述传动滑块7上方转动连接着驱动连杆8的下端，所述驱动连杆8的上端转动连接着首指节传动连杆9的下端，所述气缸体5的后端对应传动滑块(7)固定设置有镜像对称的支撑臂10，所述首指节传动连杆9的上端与支撑臂10上端的转轴转动连接；

[0010] 所述首指节组件2，包括首指节框架11，所述首指节框架11的左右竖边框各采用前

后对称相同的两根杆结构，所述首指节框架11的下边框的中间转动连接着支撑臂10上端的转轴，所述首指节框架11通过螺栓从下到上依次夹持固定着首指节下导向件12、首指节上导向件 13和首指节L型杆14，所述首指节L型杆14的上端旋转连接在中指节三角架15弧形处的左端，所述首指节下导向件12包括相互平行的第一工字件16和第二工字件17，所述第一工字件16和第二工字件17分别固定在首指节框架11的左边框间和右边框间，所述第一工字件 16和第二工字件17间夹持固定着左端口封闭右端口导通的第一导向管18，所述第一导向管 18内装有第一弹簧19，所述第一弹簧19的右端支撑在首指节下压簧杆20左端部，所述首指节下压簧杆20的左端上还固定着与其轴线垂直的第一销轴21，所述第一销轴21可以在第一导向管18沿轴向所开槽内左右移动，所述首指节下压簧杆20的右端固定在首指节夹持块22 的左下部，所述首指节上导向件13包括相互平行的第三工字件23和第四工字件24，所述第三工字件23和第四工字件24同样分别固定在首指节框架11的左边框间和右边框间，所述第三工字件23和第四工字件24间夹持固定着左端口封闭右端口导通的第二导向管25，所述第二导向管25内装有第二弹簧26，所述第二弹簧26的右端支撑在首指节上压簧杆27左端部，所述首指节上压簧杆27的右端固定在首指节夹持块22的左上部，所述首指节下压簧杆20和首指节上压簧杆27共同支撑着首指节夹持块22，所述首指节框架11中间横杆上与首指节曲杆28的转折处转动连接，所述首指节曲杆28下端槽口内嵌着且能沿槽滑动的第一销轴21，所述首指节曲杆28的上端转动连接着中指节传动连杆29的下端，从而将首指节夹持块22的左右移动转化成首指节曲杆28的转动，为下一级中指节组件3提供动力；

[0011] 所述中指节组件3，包括中指节框架30，所述中指节框架30的左右竖边框同样各采用前后对称相同的两根杆结构，所述中指节框架30通过螺栓从下到上依次夹持固定装有中指节三角架15、中指节下导向件31、中指节上导向件32和中指节T型杆33，所述中指节三角架15 弧形处的右端转动连接着中指节传动连杆29的上端，所述中指节下导向件31和首指节下导向件12结构一样，包括第五工字件34、第六工字件35、第三导向管36、第三弹簧37、中指节下压簧杆38和第二销轴39，所述中指节下压簧杆38的右端固定在中指节夹持块40的左下部，所述中指节上导向件32和首指节上导向件13结构一样，包括第七工字件41、第八工字件42、第四导向管43、第四弹簧44和中指节上压簧杆45，所述中指节上压簧杆45的右端固定在中指节夹持块40的左上部，所述中指节下压簧杆38和中指节上压簧杆45共同支撑着中指节夹持块40，所述中指节框架30中间横杆上与中指节曲杆46的转折处转动连接，所述中指节曲杆46下端槽口内嵌着且能沿槽滑动的第二销轴39，所述中指节曲杆46的上端转动连接着末指节传动连杆47的下端，从而将中指节夹持块40的左右移动转化成中指节曲杆 46的转动，为下一级末指节组件4提供动力；

[0012] 所述末指节组件4，包括末指节夹持块48，所述末指节夹持块48的左下端转动连接着中指节T型杆33的上端，所述末指节夹持块48的右下端转动连接着末指节传动连杆47的上端，通过末指节传动连杆47将中指节组件3的动力传递到末指节夹持块48上，使得末指节夹持块48绕中指节T型杆33上端转动；

[0013] 进一步，所述首指节夹持块22为包括安装面和夹持面的凹形结构件，且凹部内侧为弧形状。

[0014] 进一步，所述中指节夹持块40为包括安装面和夹持面的凹形结构件，且凹部内侧为弧形状。

[0015] 进一步，所述末指节夹持块48为包括安装端和夹持端的刀形结构件，用于安装的刀柄部设有两个连接孔，用于夹持的刀片部为凹形结构，且凹部内侧为弧形状。

[0016] 进一步，所述首指节夹持块22，所述中指节夹持块40和所述末指节夹持块48的夹持面上均设置有防冲击、防滑层。

[0017] 为了达到上述目的，本发明采取的另一个技术方案如下：

[0018] 一种自锁式欠驱动夹持器的结构优化方法，包括夹持器夹持接触力模型建立、夹持器结构参数优化方法和夹持器结构参数优化流程；

[0019] 一、夹持器夹持接触力模型建立，包括如下内容和步骤：

[0020] (1)根据夹持器结构建立几何模型和静力学模型；

[0021] 鉴于自锁式欠驱动夹持器呈左右对称结构，以左边三指节为例进行模型建立和结构优化。所述建立几何模型是将所述驱动机构1中的所述驱动连杆8等效为AB杆，将所述首指节传动连杆9等效为BC_2杆，将所述首指节框架11等效为$C_1C_3C_4E_1$四边形，将所述首指节曲杆28 等效为QD_2D_3折杆，将所述首指节框架11中间横杆的左端到首指节曲杆28转折处的部分等效为D_1D_2杆，将所述中指节传动连杆29等效为QP杆，将所述中指节框架30等效为$E_1E_2E_5G_1$四边形，将所述中指节曲杆46等效为RE_4E_3折杆，将所述中指节框架30中间横杆的左端到中指节曲杆46转折处的部分等效为E_6E_4杆，将所述末指节传动连杆47等效为RU，将所述末指节夹持块48等效为$G_1G_2G_3G_4$四边形，由于第一弹簧19和第二弹簧26同步拉伸和压缩，且变形量一样，在模型计算时将两者受力等效到弹簧D_4D_3上，且用s_1表示弹簧D_4D_3；同理将第三弹簧37和第四弹簧44受力等效到弹簧E_7E_3上，且用s_2表示弹簧E_7E_3；定义杆C_1C_3、D_1D_2、E_1E_2、G_1U和E_6E_4的长度分别为a_1、a_2、a_3、a_4和a_5；定义杆E_1B、G_1E_1、G_1G_4、D_1B 和E_1E_6的长度为d_1、d_2、d_3、d_4和d_5；定义杆D_2D_3、D_2Q、PQ、E_3E_4、E_4R和RU的长度为 l_1、l_2、l_3、l_4、l_5和l_6；

[0022] 所述建立静力学模型是定义所述驱动机构1的力矩为T_1，定义所述弹簧s_1和s_2的驱动力分别为T_2和T_3；定义所述首指节组件2、中指节组件3和末指节组件4夹持物体的接触力分别为F_1、F_2和F_3；定义C_1点距F_1力的距离为h_1，定义E_1点距F_2力的距离为h_2，定义G_1点距F_3力的距离为h_3；定义杆E_2P与杆QP的夹角，杆PQ与杆D_2Q的夹角，杆G_2U与杆 RU的夹角，杆UR与杆E_4R的夹角，杆C_4E_1与杆C_1E_1的夹角分别为α_1、α_2、α_3、α_4、α_5；定义杆E_1C_1与水平反向线的夹角，杆G_1E_1与杆C_1E_1反向延长线的夹角，杆G_4G_1与杆E_1G_1反向延长线的夹角分别为β_1、β_2、β_3；定义杆C_3C_1与水平线的夹角，杆PE_1与水平线的夹角，杆UG_1与水平线的夹角分别为φ_1、φ_2、φ_3；

[0023] (2)基于虚功原理建立夹持器各指节虚功方程：$\begin{cases} F_1 v_{F_1} = T_1 \omega_{\varphi 1} \\ F_2 v_{F_2} = (F_1 + T_2) v_{s1} \\ F_3 v_{F_3} = (F_2 + T_3) v_{s2} \end{cases}$。

[0024] 式中，$\omega_{\varphi 1}$为力矩T_1作用于首指节上的虚角速度，v_{s1}、v_{s2}分别为弹簧s_1和s_2上的虚速度；v_{F1}、v_{F2}、v_{F3}分别为接触力F_1、F_2、F_3在接触点处的虚速度。

[0025] 令$T=[T_1\ \ F_1+T_2\ \ F_2+T_3]^T$，$F=[F_1\ \ F_2\ \ F_3]^T$，$\boldsymbol{W}=[\omega_{\varphi 1}\ v_{s1}\ v_{s2}]^T$，$V_F=[v_{F1}\ \ v_{F2}\ \ v_{F3}]^T$，虚功方程可以简化为：$F^TV_F=T^TW$。

[0026] (3)基于刚体速度公式建立夹持器各指节虚速度$V_F=[v_{F1}\ \ v_{F2}\ \ v_{F3}]^T$为：

[0027] $$\begin{cases} v_{F1}=\delta_{\beta1}h_1 \\ v_{F2}=\delta_{\beta2}h_2+(h_2+d_0\cos(\beta_2))\delta_{\beta1} \\ v_{F3}=\delta_{\beta3}h_3+(h_3+d_2\cos(\beta_3))\delta_{\beta2}+(h_3+d_2\cos(\beta_3)+d_0\cos(\beta_2+\beta_3))\delta_{\beta1} \end{cases}。$$

[0028] 式中，$d_0=\sqrt{d_1-\frac{a_1\tan\beta_2}{2}}$，$\delta_{\beta1}$、$\delta_{\beta2}$、$\delta_{\beta3}$分别为转角$\beta_1$、$\beta_2$和$\beta_3$的角速度。

[0029] 将虚速度V_F写成矩阵形式：$V_F=J_v[\delta_{\beta1}\ \delta_{\beta2}\ \delta_{\beta3}]^T$。

[0030] 式中，$J_v=\begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 \\ h_2+d_0\cos(\beta_2) & h_2 & 0 \\ h_3+d_2\cos(\beta_3)+d_0\cos(\beta_2+\beta_3) & h_3+d_2\cos(\beta_3) & h_3\cos(\beta_3) \end{bmatrix}$。

[0031] (4)由于所述中指节传动连杆29(PQ)和末指节传动连杆47(UR)都对所在指节组件有直接作用力，计算两杆的虚速度v_{PQ}、v_{UR}：

[0032] $$\begin{cases} v_{PQ}=-(\dot{x}_P-\dot{x}_Q)\cos(\alpha_1-\varphi_2)+(\dot{y}_P-\dot{y}_Q)\sin(\alpha_1-\varphi_2) \\ v_{UR}=-(\dot{x}_U-\dot{x}_R)\cos(\alpha_3-\varphi_3)+(\dot{y}_U-\dot{y}_R)\sin(\alpha_3-\varphi_3) \end{cases}。$$

[0033] 因为，

[0034] $$\begin{cases} \dot{x}_Q=\frac{1}{2}a_1\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_4\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}-a_2\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}+l_2\sin(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2)\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2} \\ \dot{y}_Q=-\frac{1}{2}a_1\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_4\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}+a_2\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}-l_2\cos(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2)\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2} \end{cases},$$

[0035] $$\begin{cases} \dot{x}_P=\frac{1}{2}a_3\sin(\varphi_2)\delta_{\varphi2}+\frac{1}{2}a_1\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_1\sin(\beta_1)\delta_{\beta1} \\ \dot{y}_P=-\frac{1}{2}a_3\cos(\varphi_2)\delta_{\varphi2}-\frac{1}{2}a_1\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_1\cos(\beta_1)\delta_{\beta1} \end{cases},$$

[0036] $$\begin{cases} \dot{x}_R=\frac{1}{2}a_1\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_1\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_2\sin(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha6+\varphi2}+a_4\sin(\varphi_3)\delta_{\varphi3} \\ \dot{y}_R=-\frac{1}{2}a_1\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_1\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}-d_2\cos(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha6+\varphi2}-a_4\cos(\varphi_3)\delta_{\varphi3} \end{cases},$$

[0037] $$\begin{cases} \dot{x}_U=\frac{1}{2}a_1\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_1\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_5\sin(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha6+\varphi2} \\ \quad +a_5\cos(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha6+\varphi2}+l_5\sin(\alpha_4-\alpha_3+\varphi_3)\delta_{\alpha4-\alpha3+\varphi3} \\ \dot{y}_U=-\frac{1}{2}a_1\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_1\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}-d_5\cos(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha6+\varphi2} \\ \quad +a_5\sin(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha_6+\varphi_2}-l_5\cos(\alpha_4-\alpha_3+\varphi_3)\delta_{\alpha4-\alpha3+\varphi3} \end{cases},$$

[0038] 所以，所述中指节传动连杆29(PQ)和末指节传动连杆47(UR)的虚速度v_{PQ}、v_{UR}为：

$$\begin{cases} v_{PQ}=(d_4-d_1)\sin(\beta_1-\alpha_1+\varphi_2)\delta_{\beta1}-a_2\cos(\beta_1-\alpha_1+\varphi_2)\delta_{\beta1} \\ \quad -\dfrac{1}{2}a_3\sin(\alpha_1)\delta_{\varphi2}+l_2\sin(\alpha_2)\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2} \\ v_{UR}=(d_5-d_2)\sin(\alpha_6+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)\delta_{\alpha6+\varphi2}-a_4\cos(\alpha_3)\delta_{\varphi3} \\ \quad -a_5\cos(\alpha_6+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)\delta_{\alpha6+\varphi2}+l_5\sin(\alpha_4)\delta_{\alpha4-\alpha3+\varphi3} \end{cases}。$$

[0039] 针对五连杆机构$E_1PQD_2D_1$，以E_1 D_1为x轴正方向，指向圆盘工件方向为y轴正方向，列出其矢量封闭方程：$\overrightarrow{E_1P}+\overrightarrow{PQ}=\overrightarrow{QD_2}+\overrightarrow{D_2D_1}+\overrightarrow{D_1E_1}$。

[0040] 将其分解为x、y方向：$\begin{cases} -\dfrac{1}{2}a_3\cos(\alpha_6+\beta_2)+l_3\sin(\alpha_1+\varphi_1-\varphi_2) \\ \qquad =-l_2\sin(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)+d_1-d_4 \\ \dfrac{1}{2}a_3\sin(\alpha_6+\beta_2)+l_3\cos(\alpha_1+\varphi_1-\varphi_2) \\ \qquad =l_2\cos(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)+a_2 \end{cases}。$

[0041] 对$\alpha_6+\beta_2$、$\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1$求导：

[0042] $$\frac{\delta_{\alpha6+\beta2}}{\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2-\varphi1}}$$

$$=\frac{a_3[l_2\sin(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1+\alpha_6+\beta_2)-(d_1-d_4)\cos(\alpha_6+\beta_2)+a_2\sin(\alpha_6+\beta_2)]}{l_2(a_3\sin(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1+\alpha_6+\beta_2)+2l_3\cos(2(\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)-\alpha_2))}。$$

[0043] 因为α_6为固定角，所以$\delta_{\alpha6}=0$。根据同一构件角速度关系可得：$\delta_{\varphi2}=-\delta_{\beta2}-\delta_{\beta1}$。令上式等号右边项为m，则上式整理可得：$\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2}=\dfrac{\delta_{\beta2}}{m}-\delta_{\beta1}$。

[0044] 同样针对五连杆机构$G_1URE_4E_6$，列出其矢量封闭方程：$\overrightarrow{G_1U}+\overrightarrow{UR}=\overrightarrow{RE_4}+\overrightarrow{E_4E_6}+\overrightarrow{E_6G_1}$。

[0045] 即：$\begin{cases} -a_4\cos(\alpha_7+\beta_3)+l_6\cos(\varphi_3-\varphi_2-\alpha_3-\alpha_6) \\ \qquad =-l_5\cos(\alpha_6-\alpha_4+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)+d_2-d_5 \\ a_4\sin(\alpha_7+\beta_3)+l_6\sin(\varphi_3-\varphi_2-\alpha_3-\alpha_6) \\ \qquad =l_5\sin(\alpha_6-\alpha_4+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)+\alpha_5 \end{cases}。$

[0046] 对$\alpha_7+\beta_3$、$\alpha_6-\alpha_4+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3$求导，并整理可得：

$$\frac{\delta_{\alpha7+\beta3}}{\delta_{\alpha6-\alpha4+\alpha3+\varphi2-\varphi3}}$$

[0047]

$$=\frac{a_4[l_5\sin(\alpha_7+\beta_3-\alpha_4+\alpha_3+\alpha_6+\varphi_2-\varphi_3)-(d_2-d_5)\cos(\alpha_7+\beta_3)+a_5\sin(\alpha_7+\beta_3)]}{l_5(a_4\sin(\alpha_7+\beta_3-\alpha_4+\alpha_3+\alpha_6+\varphi_2-\varphi_3)+l_6\cos(2(\varphi_3-\varphi_2-\alpha_3-\alpha_6)+\alpha_4))}。$$

[0048] 由于α_7为固定角，则$\delta_{\alpha7}=0$，根据同一构件角速度关系可得：$\delta_{\varphi3}=-\delta_{\beta3}-\delta_{\beta2}-\delta_{\beta1}$。令上式的等号右边项为n，则其可整理得：$\delta_{\alpha4-\alpha3+\varphi3}=-\dfrac{\delta_{\beta3}}{n}-\delta_{\beta2}-\delta_{\beta1}$。

[0049] 由于$\delta_{\varphi2}=-\delta_{\beta2}-\delta_{\beta1}$，$\delta_{\varphi3}=-\delta_{\beta3}-\delta_{\beta2}-\delta_{\beta1}$，将$\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2}$和$\delta_{\alpha4-\alpha3+\varphi3}$代入虚速度$v_{PQ}$、$v_{UR}$中，并整

理可得：$\begin{cases} v_{PQ} = \Psi \cdot \delta_{\beta 1} + \Gamma \cdot \delta_{\beta 2} \\ v_{UR} = \Pi \cdot \delta_{\beta 1} + \Pi \cdot \delta_{\beta 2} + \Upsilon \cdot \delta_{\beta 3} \end{cases}$。式中，

$$\Psi = (d_4 - d_1)\sin(\beta_1 - \alpha_1 + \varphi_2) - a_2\cos(\beta_1 - \alpha_1 + \varphi_2) - l_2\sin(\alpha_2) + \frac{1}{2}a_3\sin(\alpha_1)，$$

$$\Gamma = \frac{1}{2}a_3\sin(\alpha_1) + \frac{1}{m}l_2\sin(\alpha_2) \quad ， \quad \Upsilon = a_4\cos(\alpha_3) - \frac{l_5}{n}\sin(\alpha_4)，$$

$$\Pi = (d_2 - d_5)\sin(\alpha_6 + \alpha_3 + \varphi_2 - \varphi_3) + a_4\cos(\alpha_3) - l_5\sin(\alpha_4) + a_5\cos(\alpha_6 + \alpha_3 + \varphi_2 - \varphi_3)。$$

[0050] (5)计算弹簧s_1和s_2上的虚速度v_{s1}、v_{s2}。

[0051] 根据夹持器的所述几何模型和静力学模型中结构件间几何关系，可以得出：

$$\begin{cases} v_{PQ} = -v_{D2D3}\cos(\alpha_2) = -v_{QD2}\cos(\alpha_2) \\ v_{D2D3} = v_{s1}\cos(\alpha_2 - \alpha_1 + \varphi_2 - \varphi_1) \end{cases} ， \begin{cases} v_{UR} = -v_{E3E4}\cos(\alpha_4) = -v_{RE4}\cos(\alpha_4) \\ v_{E3E4} = v_{s2}\sin(\alpha_4 - \alpha_3 - \alpha_6 + \varphi_3 - \varphi_2) \end{cases}。$$

[0052] 所以弹簧s_1和s_2上的虚速度：$\begin{cases} v_{s1} = \mu \cdot \delta_{\beta 1} + \lambda \cdot \delta_{\beta 2} \\ v_{s2} = \sigma \cdot \delta_{\beta 1} + \sigma \cdot \delta_{\beta 2} + \tau \cdot \delta_{\beta 3} \end{cases}$。式中，

$$\mu = -\frac{\Psi}{\cos(\alpha_2)\cos(\alpha_2 - \alpha_1 + \varphi_2 - \varphi_1)} \quad ， \quad \lambda = -\frac{\Gamma}{\cos(\alpha_2)\cos(\alpha_2 - \alpha_1 + \varphi_2 - \varphi_1)} \quad ，$$

$$\sigma = \frac{\Pi}{\cos(\alpha_4)\sin(\alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_6 + \varphi_3 - \varphi_2)} \quad ， \quad \tau = \frac{\Upsilon}{\cos(\alpha_4)\sin(\alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_6 + \varphi_3 - \varphi_2)}。 \quad (6)$$

计算夹持器接触力$F=[F_1\ F_2\ F_3]^T$。

[0053] 根据同一构件角速度关系可得：$\delta_{\varphi 1}=-\delta_{\beta 1}$，再结合弹簧$s_1$和$s_2$上虚速度$v_{s1}$和$v_{s2}$，可以将上面的W写为矩阵相乘形式：$W=J_\omega[\delta_{\beta 1}\ \delta_{\beta 2}\ \delta_{\beta 3}]^T$。

[0054] 式中，$J_\omega = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ \mu & \lambda & 0 \\ \sigma & \sigma & \tau \end{bmatrix}$。

[0055] 将虚速度V_F、W代入简化的虚功方程，可得：$F^TJ_v=T^TJ_\omega$。

[0056] 则接触力为：$\boldsymbol{F}^T = J_v^{-1}J_\omega\boldsymbol{T}^T$

[0057] 式中，$Jv^{-1} = \begin{bmatrix} J & 0 & 0 \\ K & L & 0 \\ M & N & O \end{bmatrix}$，且$J = \frac{1}{h_1}$，$K = -\frac{h_2h_3 + d_0h_3\cos(\beta_2)}{h_1h_2h_3}$，$L = \frac{1}{h_2}$，

$$M = \frac{h_2d_3\cos(\beta_3) + d_0h_3\cos(\beta_2) - d_0h_2\cos(\beta_2 + \beta_3) - h_2d_2\cos(\beta_2) + d_0d_2\cos(\beta_2)\cos(\beta_3)}{h_1h_2h_3}，$$

$$N = \frac{h_1h_2 + h_1d_2\cos(\beta_2)}{h_1h_2h_3}， \quad O = \frac{1}{h_3}。$$

[0058] 鉴于弹簧s_1和s_2的驱动力T_2和T_3远小于夹持力F，所以将其忽略并获得夹持力F：

$$\begin{cases} F_1 = -JT_1 + (J\mu + K\lambda)F_1 + (J\sigma + K\sigma + M\tau)F_2 \\ F_2 = L\lambda F_1 + (L\sigma + N\tau)F_2 \\ F_3 = \tau OF_2 \end{cases}。$$

[0059] 进一步化简可得F：$\begin{cases} F_1 = -\dfrac{J(1-L\sigma-N\tau)}{(1-LK-N\tau)(1-J\mu-K\lambda)-L\lambda(J\sigma+K\sigma+M\tau)}T_1 \\ F_2 = -\dfrac{JL\lambda}{(1-LK-N\tau)(1-J\mu-K\lambda)-L\lambda(J\sigma+K\sigma+M\tau)}T_1 \\ F_3 = -\dfrac{JL\lambda\tau O}{(1-LK-N\tau)(1-J\mu-K\lambda)-L\lambda(J\sigma+K\sigma+M\tau)}T_1 \end{cases}$。

[0060] 上式给出了接触力$F=[F_1\ F_2\ F_3]^T$与T_1之间的关系。由式可以看出，接触力F受β_1～β_3、φ_1~φ_3等角度以及手指机构尺寸的影响。

[0061] 二、夹持器结构参数优化方法，包括基于群体效应的免疫优化算法，所述基于群体效应的免疫进化算法是在基本免疫优化算法的算子（包括免疫选择算子0_s、免疫交叉算子0_c和免疫变异算子0_m）基础上，根据群体效应设计了新的免疫集聚算子0_g和免疫扩散算子0_d进行算法优化提升。

[0062] 已知第k代含有n个个体的种群$A(k)=[a_1(k),a_2(k),\cdots,a_n(k)]$，则免疫选择算子$0_s$可以描述为：

[0063] $A'(k)\leftarrow O_s(A(k))=[a_1'(k),a_2'(k),\cdots,a_n'(k)]$， $\forall\ i\in[1,\ n]$， $a_i'(k)\in A(k)$。

[0064] 免疫交叉算子0_c可以描述为：$A''(k)\leftarrow O_c(A'(k))=[a_1''(k),a_2''(k),\cdots,a_n''(k)]$， $\forall\ i\in[1,\ n]$，$a_i''(k)\in A''(k)$。

[0065] 免疫变异算子0_m可以描述为：$A'''(k)\leftarrow O_m(A''(k))=[a_1'''(k),a_2'''(k),\cdots,a_n'''(k)]$， $\forall\ i\in[1,\ n]$，$a_i'''(k)\in A'''(k)$。

[0066] 所述免疫集聚算子0_g，主要是让种群中优势个体组成集聚种群对适应度差的劣势个体形成号召影响，进而提高劣势个体的性能。

[0067] 设集聚数为m，集聚距离为l（l<n），适应度差的劣势个体数为n，免疫集聚算子流程为：

[0068] （1）从免疫变异后种群A''' (k)中选择适应度最好的个体a*(k)；

[0069] （2）根据a*(k)生成与其集聚距离小于l的m个优势个体，并组成集聚种群$G(k)=[g_1(k),g_2(k),\ldots,g_m(k)]$， $\forall\ i\in[1,m]$，$|a^*-g_i(k)|\leqslant 1$，$|\cdot|$表示汉明距离；

[0070] （3）从种群A''' (k)中选择z个适应度最差的个体，并组成劣势种群$W(k)=[w_1(k),w_2(k),\cdots,w_z(k)]$；

[0071] （4）从W(k)中提取个体$w_i(k)$（$i\in[1,z]$），将其与G(k)中个体分别进行异或操作，并得到 $G'(k)=[g'_1(k),g'_2(k),\cdots,g'_m(k)]$；

[0072] （5）提取$G'(k)=[g'_1(k),g'_2(k),\cdots,g'_m(k)]$中最优个体与$w_i(k)$比较，若前者优于后者则替换后者，否则保留后者；

[0073] （6）判断W(k)中所有个体是否都与G(k)中个体完成异或操作？若否，则转步骤（4），否则退出。

[0074] 免疫集聚算子0_g可以描述为：

[0075] $A^{IV}(k)\leftarrow O_g(A'''(k))=[a_1^{IV}(k),a_2^{IV}(k),\cdots,a_n^{IV}(k)]$， $\forall\ i\in[1,\ n]$， $a_i^{IV}(k)\in A^{IV}(k)$。

[0076] 所述免疫扩散算子0_d，主要是让种群中高浓度个体进行扩散，以防止个体陷入局

部极小。

[0077] 设扩散距离为r(r<n),扩散数为s,免疫扩散算子流程为:

[0078] (1)从免疫集聚后种群$A^{IV}(k)$中选取浓度最高的s个抗体,并组成扩散种群D(k)=[$d_1(k)$, $d_2(k)$,…,$d_s(k)$];

[0079] (2)随机产生1个初始个体$a^0(k)$,且其元素为1的数量大于r并小于等于n;

[0080] (3)从D(k)中取出个体$d_i(k)$ (i∈[1,s])与个体$a^0(k)$进行异或操作,并得到新个体$d_i'(k)$;

[0081] (4)将个体$d_i(k)$与$d_i'(k)$进行对比,若后者优于前者则替换前者,否则保留前者;

[0082] (5)判断D(k)中所有抗体是否都与$a^0(k)$完成异或操作?若否,则转步骤(3),否则退出。

[0083] 免疫扩散算子O_d可以描述为:

[0084] $\boldsymbol{A}^V(k) \leftarrow \boldsymbol{O}_d(\boldsymbol{A}^{IV}(k)) = [a_1^V(k), a_2^V(k), \cdots, a_n^V(k)]$, $\forall\ i \in [1,\ n]$, $a_i^V(k) \in \boldsymbol{A}^V(k)$。

[0085] 三、夹持器结构参数优化流程,包括以下内容与步骤:

[0086] (1)基于夹持器夹持力F,并以夹持时接触力尽可能分布均匀且相等为目标,建立夹持器稳定夹持状态下参数优化的目标函数:

[0087] $\min f(X) = \min((F_1-F_2)^2+(F_1-F_3)^2+(F_2-F_3)^2)$。

[0088] 式中,X为夹持器结构参数变量集且$\boldsymbol{X}=[x_1\ x_2\ x_3\ x_4\ x_5\ x_6\ x_7\ x_8\ x_9\ x_{10}\ x_{11}\ x_{12}\ x_{13}\ x_{14}\ x_{15}]=[a_2\ a_5\ h_1\ h_2\ h_3\ l_2\ l_3\ l_5\ l_6\ \beta_1\ \beta_2\ \beta_3\ \varphi_1\ \varphi_2\ \varphi_3]$;

[0089] (2)设定夹持器参数变量集X的约束范围;

[0090] (3)初始化基于群体效应的免疫优化算法参数,及初始种群A(k)=[$a_1(k)$,$a_2(k)$,…,$a_n(k)$], k←0;

[0091] (4)免疫选择:$A'(k) \leftarrow O_s(A(k)) = [a'_1(k), a'_2(k), \cdots, a'_n(k)]$;

[0092] (5)免疫交叉:$A''(k) \leftarrow O_c(A'(k)) = [a''_1(k), a''_2(k), \cdots, a''_n(k)]$;

[0093] (6)免疫变异:$A'''(k) \leftarrow O_m(A''(k)) = [a'''_1(k), a'''_2(k), \cdots, a'''_n(k)]$;

[0094] (7)免疫集聚:$\boldsymbol{A}^{IV}(k) \leftarrow \boldsymbol{O}_g(\boldsymbol{A}'''(k)) = [a_1^{IV}(k), a_2^{IV}(k), \cdots, a_n^{IV}(k)]$;

[0095] (8)免疫扩散:$\boldsymbol{A}^V(k) \leftarrow \boldsymbol{O}_d(\boldsymbol{A}^{IV}(k)) = [a_1^V(k), a_2^V(k), \cdots, a_n^V(k)]$;

[0096] (9)终止条件判定。进化代数k是否达到最大代数?若是,则算法终止,并输出最优变量 X^*;否则k←k+1,并返回步骤(4)。

[0097] 本发明具有以下优点和有益效果:

[0098] 1.与现有形式单一的机器人专用夹具相比,本发明基于欠秩原理而设计的新型夹持器,能够实现对不同尺径的圆盘工件自适应包络夹持,大大改善了因工件尺寸发生变化而更换专用夹具造成劳动量大、生产效率低的问题。

[0099] 2.该夹持器能够自下而上地限制工件自由度,夹紧力大,并具备自锁能力,有效避免了因工件自身较重而发生滑落的风险,大大提高了夹持的稳定性、牢靠性和定位精度,有效降低了安全事故的发生。

[0100] 3、该夹持器是基于欠驱动原理设计的,只存在一个动力源,大大降低了控制任务的难度,缩短了产品的整个设计周期。

[0101] 4、提出了一种新的基于群体效应的免疫优化算法。基于群体效应中集聚行为设计

了免疫集聚算子，通过群体优秀个体对劣势个体的号召来提高算法的局部搜索能力；基于群体效应中的扩散行为设计了免疫扩散算子，通过对高浓度个体扩散来有效避免算法陷入局部极小。

[0102] 5、自锁式欠驱动夹持器的工件夹持稳定性取决于夹持器本身的结构参数，但其是一个多参数结构，且参数存在多约束。若基于人工经验进行试凑设计，不仅费时费力而且无法获得最佳结构参数。在建立夹持器接触力模型基础上，利用基于群体效应的免疫优化算法可以实现夹持器参数的全局优化，提高了优化效率和优化精度。

附图说明

[0103] 图1：本发明实施例中夹持器的总体结构图；

[0104] 图2：本发明实施例中夹持器的驱动机构结构图；

[0105] 图3：本发明实施例中夹持器的首指节组件整体结构图；

[0106] 图4：本发明实施例中夹持器的首指节组件局部结构图；

[0107] 图5：本发明实施例中夹持器的首指节导向件和夹持块组合体结构图；

[0108] 图6：本发明实施例中夹持器的首指节L型杆；

[0109] 图7：本发明实施例中夹持器的首指节曲杆；

[0110] 图8：本发明实施例中夹持器的中指节三角架；

[0111] 图9：本发明实施例中夹持器的中指节组件和末指节组件结构图；

[0112] 图10：本发明实施例中夹持器的中指节导向件和夹持块组合体结构图；

[0113] 图11：本发明实施例中夹持器的末指节夹持块结构图；

[0114] 图12：本发明实施例中夹持器抓取圆盘工件前示意图；

[0115] 图13：本发明实施例中夹持器包络抓取圆盘工件后示意图；

[0116] 图14：本发明实施例中自锁式欠驱动夹持器的几何模型图；

[0117] 图15：本发明实施例中自锁式欠驱动夹持器的静力学模型图；

[0118] 图中的附图标记为：1.驱动机构；2.首指节组件；3.中指节组件；4.末指节组件；5.气缸体；6.气动滑块；7.传动滑块；8.驱动连杆；9.首指节传动连杆；10.支撑臂；11.首指节框架； 12.首指节下导向件；13.首指节上导向件；14.首指节L型杆；15.中指节三角架；16.第一工字件；17.第二工字件；18.第一导向管；19.第一弹簧；20.首指节下压簧杆；21.第一销轴；22. 首指节夹持块；23.第三工字件；24.第四工字件；25.第二导向管；26.第二弹簧；27.首指节上压簧杆；28.首指节曲杆；29.中指节传动连杆；30.中指节框架；31.中指节下导向件；32.中指节上导向件；33.中指节T型杆；34.第五工字件；35.第六工字件；36.第三导向管；37.第三弹簧；38.中指节下压簧杆；39.第二销轴；40.中指节夹持块；41.第七工字件；42.第八工字件； 43.第四导向管；44.第四弹簧；45.中指节上压簧杆；46.中指节曲杆；47.末指节传动连杆；48. 末指节夹持块；49.圆盘工件。

具体实施方式

[0119] 为使本发明的目的和技术方案更加清楚，下面将结合本发明实施例的附图，对本发明实施例的技术方案进行清楚、完整地描述。显然，所描述的实施例是本发明的一部分实施例，而不是全部的实施例。基于所描述的本发明的实施例，本领域普通技术人员在无需创

造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0120] 本发明所述的“前、后”的含义指的是阅读者正对附图时，由视图纸面指向阅读者为前，指向纸面里为后，而非对本发明的夹持器装置的特定限定。

[0121] 本发明所述的“左、右”的含义指的是阅读者正对附图时，由视图纸面的左边为左，纸面的右边为右，而非对本发明的夹持器装置的特定限定。

[0122] 本发明所述的“上、下”的含义指的是阅读者正对附图时，由视图纸面的上边为上，纸面的右边为右，为而非对本发明的夹持器装置的特定限定。

[0123] 如图1所示，本发明的一种自锁式欠驱动夹持器，包括驱动机构1，所述驱动机构1的上部连接着左右对称且结构相同的首指节组件2，所述首指节组件2上部连接着左右对称且结构相同的中指节组件3，所述中指节组件3上部连接着左右对称且结构相同的末指节组件4。

[0124] 如图1和2所示，本发明的一种自锁式欠驱动夹持器的驱动机构1，包括气缸体5，所述气缸体5上端安装着左右对称且结构完全相同的气动滑块6，所述气动滑块6上端部通过螺栓固定连接着传动滑块7，所述传动滑块7上转动连接着驱动连杆8的下端，所述驱动连杆8 的上端转动连接着首指节传动连杆9的下端，所述气缸体5的后端对应传动滑块7固定设置有左右对称且结构完全相同的支撑臂10，所述首指节传动连杆9的上端转动连接着支撑臂10 上端的转轴。通过驱动气动滑块6的左右移动，就可实现首指节传动连杆9绕支撑臂10上端转轴进行逆时针或顺时针转动，从而带动首指节组件2的转动。

[0125] 如图1，3，4，5，6和7所示，本发明的一种自锁式欠驱动夹持器的首指节组件2，包括首指节框架11，所述首指节框架11的左右竖边框各采用前后对称相同的两根杆结构，所述首指节框架11的下边框的中间转动连接着支撑臂10上端的转轴，所述首指节框架11通过螺栓从下到上依次夹持固定着首指节下导向件12、首指节上导向件13和首指节L型杆14，所述首指节L型杆14的上端旋转连接在中指节三角架15弧形处的左端，所述首指节下导向件12包括相互平行的第一工字件16和第二工字件17，所述第一工字件16和第二工字件17 分别固定在首指节框架11的左边框间和右边框间，所述第一工字件16和第二工字件17间夹持固定着左端口封闭右端口导通的第一导向管18，所述第一导向管18内装有第一弹簧19，所述第一弹簧19的右端支撑在首指节下压簧杆20左端部，所述首指节下压簧杆20的左端上还固定着与其轴线垂直的第一销轴21，所述第一销轴21可以在第一导向管18沿轴向所开槽内左右移动，所述首指节下压簧杆20的右端固定在首指节夹持块22的左下部，所述首指节上导向件13包括相互平行的第三工字件23和第四工字件24，所述第三工字件23和第四工字件24同样分别固定在首指节框架11的左边框间和右边框间，所述第三工字件23和第四工字件24间夹持固定着左端口封闭右端口导通的第二导向管25，所述第二导向管25内装有第二弹簧26，所述第二弹簧26的右端支撑在首指节上压簧杆27左端部，所述首指节上压簧杆 27的右端固定在首指节夹持块22的左上部，所述首指节下压簧杆20和首指节上压簧杆27 共同支撑着首指节夹持块22，所述首指节夹持块22为包括安装面和夹持面的凹形结构件，且凹部内侧为弧形状，以便更好地贴合工件的轮廓，所述首指节框架11中间横杆上与首指节曲杆28的转折处转动连接，所述首指节曲杆28下端槽口内嵌着且能沿槽滑动的第一销轴21，所述首指节曲杆28的上端转动连接着中指节传动连杆29的下端，从而将首指节夹持块22的左右移动转化成首指节曲杆28的转动，为下一级中指节组件3提供动力。在夹持工件前，在第

一弹簧19和第二弹簧26的自身弹力作用下，一方面首指节夹持块22被推动向右移动，另一方面随着首指节下压簧杆20向右带动第一销轴21向右移动，进而推动首指节曲杆28绕着中间转折处逆时针旋转，并通过与首指节曲杆28的上端转动连接的中指节传动连杆29将动力传递给中指节组件3上。当开始夹持工件时，随着与工件接触，首指节夹持块22被压，从而推动首指节下压簧杆20和首指节上压簧杆27左移，同时首指节曲杆28在第一销轴21左移带动下实现绕转折处顺时针转动，并通过中指节传动连杆29带动中指节组件3转动。

[0126] 如图1，5，8，9，10和11所示，本发明的一种自锁式欠驱动夹持器的中指节组件3，包括中指节框架30，所述中指节框架30的左右竖边框同样各采用前后对称相同的两根杆结构，所述中指节框架30通过螺栓从下到上依次夹持固定装有中指节三角架15、中指节下导向件31、中指节上导向件32和中指节T型杆33，所述中指节三角架15弧形处的右端转动连接着中指节传动连杆29的上端，所述中指节下导向件31和首指节下导向件12结构一样，包括第五工字件34、第六工字件35、第三导向管36、第三弹簧37、中指节下压簧杆38和第二销轴39，所述中指节下压簧杆38的右端固定在中指节夹持块40的左下部，所述中指节上导向件32和首指节上导向件13结构一样，包括第七工字件41、第八工字件42、第四导向管 43、第四弹簧44和中指节上压簧杆45，所述中指节上压簧杆45的右端固定在中指节夹持块 40的左上部，所述中指节下压簧杆38和中指节上压簧杆45共同支撑着中指节夹持块40，所述中指节夹持块40为包括安装面和夹持面的凹形结构件，且凹部内侧为弧形状，以便更好地贴合工件的轮廓，所述中指节框架30中间横杆上与中指节曲杆46的转折处转动连接，所述中指节曲杆46下端槽口内嵌着且能沿槽滑动的第二销轴39，所述中指节曲杆46的上端转动连接着末指节传动连杆47的下端，从而将中指节夹持块40的左右移动转化成中指节曲杆46 的转动，为下一级末指节组件4提供动力。与首指节组件2工作类似，在夹持工件前，在第三弹簧37和第四弹簧44的自身弹力作用下，一方面中指节夹持块40被推动向右移动，另一方面中指节曲杆46被中指节下压簧杆38上的第二销轴39带动而绕其中间转折处逆时针旋转，并通过与中指节曲杆46的上端转动连接的末指节传动连杆47将动力传递给末指节组件 4上。当开始夹持工件时，随着与工件接触，中指节夹持块40被压，从而推动中指节下压簧杆38和中指节上压簧杆45左移，同时中指节曲杆46在第二销轴39左移带动下实现绕转折处顺时针转动，并通过末指节传动连杆47带动末指节组件4转动。

[0127] 本发明的一种自锁式欠驱动夹持器的末指节组件4，包括末指节夹持块48，所述末指节夹持块48的左下端转动连接着中指节T型杆33的上端，所述末指节夹持块48的右下端转动连接着末指节传动连杆47的上端，通过末指节传动连杆47将中指节组件3的动力传递到末指节夹持块48上，使得末指节夹持块48绕中指节T型杆33上端转动。夹持工件前，逆时针转动远离工件，夹持工件时，顺时针转动靠近工件。所述末指节夹持块48为包括安装端和夹持端的刀形结构件，用于安装的刀柄部设有两个连接孔，用于夹持的刀片部为凹形结构，且凹部内侧为弧形状，以便更好的贴合工件的轮廓。

[0128] 本发明的一种自锁式欠驱动夹持器的末指节组件4，包括末指节夹持块48，所述末指节夹持块48的右下端转动连接着末指节传动连杆47的上端，所述末指节夹持块48的左下端转动连接着中指节T型杆33的上端，通过末指节传动连杆47将中指节组件3的动力传递到末指节夹持块48上，使得末指节夹持块48绕中指节T型杆33上端转动，夹持工件前，末指节夹持块48逆时针转动远离工件，夹持工件时，末指节夹持块48顺时针转动靠近工件，所述末

指节夹持块48为包括安装端和夹持端的刀形结构件，用于安装的刀柄部设有两个连接孔，用于夹持的刀片部为凹形结构，且凹部内侧为弧形状，以便更好地贴合工件的轮廓。

[0129] 如图1、2、4、5、9、10、12和13所示，夹持圆盘工件49前，依靠首指节组件2中的第一弹簧19和第二弹簧26，以及中指节组件3中的第三弹簧37和第四弹簧44的自身弹力，使得首指节组件2、中指节组件3和末指节组件4处于张开状态；当夹持圆盘工件49时，驱动气动滑块6来带动首指节组件2运动，首指节夹持块22接触圆盘工件49，首指节下压簧杆20向左移动，通过第一销轴21带动首指节曲杆28绕转折处顺时针转动，通过中指节传动连杆29带动中指节组件3绕首指节L型杆14的上端顺时针转动，使得中指节夹持块40接触圆盘工件49，中指节下压簧杆38向左移动，通过第二销轴39带动中指节曲杆46绕转折处顺时针转动，通过末指节传动连杆47带动末指节组件4绕中指节T型杆33上端顺时针转动，使得末指节夹持块48接触圆盘工件49，实现了夹持器的自适应包络抓取工件。而此时首指节夹持块22、中指节夹持块40及末指节夹持块48与圆盘工件49紧密接触，使得第一弹簧 19、第二弹簧26、第三弹簧37和第四弹簧44不受外力停止压缩且伸长受工件阻碍不会继续产生形变，实现了夹持器的自锁。通过一个动力源气动滑块6驱动首指节组件2、中指节组件3和末指节组件4的连动，实现了基于欠秩机构原理的欠驱动。图12给出了气动滑块6位于气缸外侧时，首指节组件2、中指节组件3和末指节组件4全张开的状态。图13给出了气动滑块6位于气缸内侧时，首指节组件2、中指节组件3和末指节组件4完全自适应包络抓取圆盘工件49的状态。

[0130] 如图14和图15所示，为本发明的一种自锁式欠驱动夹持器的结构优化方法，包括夹持器夹持接触力模型建立、夹持器结构参数优化方法和夹持器结构参数优化流程；

[0131] 一、夹持器夹持接触力模型建立，包括如下内容和步骤：

[0132] (1)根据夹持器结构建立几何模型和静力学模型；

[0133] 鉴于自锁式欠驱动夹持器呈左右对称结构，以左边三指节为例进行模型建立和结构优化。所述几何模型主要是将所述驱动机构1中的所述驱动连杆8等效为AB杆，将所述首指节传动连杆9等效为BC_2杆，将所述首指节框架11等效为$C_1C_3C_4E_1$四边形，将所述首指节曲杆28 等效为QD_2D_3折杆，将所述首指节框架11中间横杆的左端到首指节曲杆28转折处的部分等效为D_1D_2杆，将所述中指节传动连杆29等效为QP杆，将所述中指节框架30等效为$E_1E_2E_5G_1$四边形，将所述中指节曲杆46等效为RE_4E_3折杆，将所述中指节框架30中间横杆的左端到中指节曲杆46转折处的部分等效为E_6E_4杆，将所述末指节传动连杆47等效为RU，将所述末指节夹持块48等效为$G_1G_2G_3G_4$四边形，由于第一弹簧19和第二弹簧26同步拉伸和压缩，且变形量一样，在模型计算时将两者受力等效到弹簧D_4D_3上，且用s_1表示弹簧D_4D_3；同理将第三弹簧37和第四弹簧44受力等效到弹簧E_7E_3上，且用s_2表示弹簧E_7E_3；定义杆C_1C_3、D_1D_2、E_1E_2、G_1U和E_6E_4的长度分别为a_1、a_2、a_3、a_4和a_5；定义杆E_1B、G_1E_1、G_1G_4、D_1B 和E_1E_6的长度为d_1、d_2、d_3、d_4和d_5；定义杆D_2D_3、D_2Q、PQ、E_3E_4、E_4R和RU的长度为 l_1、l_2、l_3、l_4、l_5和l_6；

[0134] 所述静力学模型主要是定义所述驱动机构1的力矩为T_1，定义所述弹簧s_1和s_2的驱动力分别为T_2和T_3；定义所述首指节组件2、中指节组件3和末指节组件4夹持物体的接触力分别为F_1、F_2和F_3；定义C_1点距F_1力的距离为h_1，定义E_1点距F_2力的距离为h_2，定义G_1点距F_3力的距离为h_3；定义杆E_2P与杆QP的夹角，杆PQ与杆D_2Q的夹角，杆G_2U与杆 RU的夹角，杆UR与杆E_4R的夹角，杆C_4E_1与杆C_1E_1的夹角分别为α_1、α_2、α_3、α_4、α_5；定义杆E_1C_1与水平反向线的夹角，杆G_1E_1与杆C_1E_1反向延长线的夹角，杆G_4G_1与杆E_1G_1反向延长线的夹角分别为β_1、β_2、β_3；定义

杆C_3C_1与水平线的夹角，杆PE_1与水平线的夹角，杆UG_1与水平线的夹角分别为φ_1、φ_2、φ_3；

[0135] (2)基于虚功原理建立夹持器各指节虚功方程：$\begin{cases} F_1 v_{F_1} = T_1 \omega_{\varphi 1} \\ F_2 v_{F_2} = (F_1 + T_2) v_{s1} \\ F_3 v_{F_3} = (F_2 + T_3) v_{s2} \end{cases}$。

[0136] 式中，$\omega_{\varphi 1}$为力矩T_1作用于首指节上的虚角速度，v_{s1}、v_{s2}分别为弹簧s_1和s_2上的虚速度；v_{F1}、v_{F2}、v_{F3}分别为接触力F_1、F_2、F_3在接触点处的虚速度。

[0137] 令$T=[T_1 \ F_1+T_2 \ F_2+T_3]^T$，$F=[F_1 \ F_2 \ F_3]^T$，$\boldsymbol{W}=[\omega_{\varphi 1} v_{s1} v_{s2}]^T$，$V_F=[v_{F1} \ v_{F2} \ v_{F3}]^T$，虚功方程可以简化为：$F^T V_F = T^T W$。

[0138] (3)基于刚体速度公式建立夹持器各指节虚速度$V_F=[v_{F1} \ v_{F2} \ v_{F3}]^T$为：

[0139] $\begin{cases} v_{F1} = \delta_{\beta 1} h_1 \\ v_{F2} = \delta_{\beta 2} h_2 + (h_2 + d_0 \cos(\beta_2)) \delta_{\beta 1} \\ v_{F3} = \delta_{\beta 3} h_3 + (h_3 + d_2 \cos(\beta_3)) \delta_{\beta 2} + (h_3 + d_2 \cos(\beta_3) + d_0 \cos(\beta_2 + \beta_3)) \delta_{\beta 1} \end{cases}$。

[0140] 式中，$d_0 = \sqrt{d_1 - \frac{a_1 \tan \beta_2}{2}}$，$\delta_{\beta 1}$、$\delta_{\beta 2}$、$\delta_{\beta 3}$分别为转角$\beta_1$、$\beta_2$和$\beta_3$的角速度。

[0141] 将虚速度V_F写成矩阵形式：$V_F = J_v [\delta_{\beta 1} \delta_{\beta 2} \delta_{\beta 3}]^T$。

[0142] 式中，$J_v = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 \\ h_2 + d_0 \cos(\beta_2) & h_2 & 0 \\ h_3 + d_2 \cos(\beta_3) + d_0 \cos(\beta_2 + \beta_3) & h_3 + d_2 \cos(\beta_3) & h_3 \cos(\beta_3) \end{bmatrix}$。

[0143] (4)由于所述中指节传动连杆29(PQ)和末指节传动连杆47(UR)都对所在指节组件有直接作用力，计算两杆的虚速度v_{PQ}、v_{UR}：

[0144] $\begin{cases} v_{PQ} = -(\dot{x}_P - \dot{x}_Q) \cos(\alpha_1 - \varphi_2) + (\dot{y}_P - \dot{y}_Q) \sin(\alpha_1 - \varphi_2) \\ v_{UR} = -(\dot{x}_U - \dot{x}_R) \cos(\alpha_3 - \varphi_3) + (\dot{y}_U - \dot{y}_R) \sin(\alpha_3 - \varphi_3) \end{cases}$。

[0145] 因为，

[0146] $\begin{cases} \dot{x}_Q = \frac{1}{2} a_1 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_4 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} - a_2 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} + l_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1 + \varphi_2) \delta_{\alpha 2-\alpha 1+\varphi 2} \\ \dot{y}_Q = -\frac{1}{2} a_1 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_4 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} + a_2 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} - l_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1 + \varphi_2) \delta_{\alpha 2-\alpha 1+\varphi 2} \end{cases}$，

[0147] $\begin{cases} \dot{x}_P = \frac{1}{2} a_3 \sin(\varphi_2) \delta_{\varphi 2} + \frac{1}{2} a_1 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_1 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} \\ \dot{y}_P = -\frac{1}{2} a_3 \cos(\varphi_2) \delta_{\varphi 2} - \frac{1}{2} a_1 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_1 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} \end{cases}$，

[0148] $\begin{cases} \dot{x}_R = \frac{1}{2} a_1 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_1 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_2 \sin(\alpha_6 + \varphi_2) \delta_{\alpha 6+\varphi 2} + a_4 \sin(\varphi_3) \delta_{\varphi 3} \\ \dot{y}_R = -\frac{1}{2} a_1 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_1 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} - d_2 \cos(\alpha_6 + \varphi_2) \delta_{\alpha 6+\varphi 2} - a_4 \cos(\varphi_3) \delta_{\varphi 3} \end{cases}$，

[0149] $$\begin{cases}\dot{x}_U=\frac{1}{2}a_1\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_1\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_5\sin(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha6+\varphi2}\\ \quad+a_5\cos(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha6+\varphi2}+l_5\sin(\alpha_4-\alpha_3+\varphi_3)\delta_{\alpha4-\alpha3+\varphi3}\\ \dot{y}_U=-\frac{1}{2}a_1\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_1\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}-d_5\cos(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha6+\varphi2}\\ \quad+a_5\sin(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha_6+\varphi_2}-l_5\cos(\alpha_4-\alpha_3+\varphi_3)\delta_{\alpha4-\alpha3+\varphi3}\end{cases},$$

[0150] 所以，所述中指节传动连杆29 (PQ) 和末指节传动连杆47 (UR) 的虚速度v_{PQ}、v_{UR}为：

[0151] $$\begin{cases}v_{PQ}=(d_4-d_1)\sin(\beta_1-\alpha_1+\varphi_2)\delta_{\beta1}-a_2\cos(\beta_1-\alpha_1+\varphi_2)\delta_{\beta1}\\ \quad-\frac{1}{2}a_3\sin(\alpha_1)\delta_{\varphi2}+l_2\sin(\alpha_2)\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2}\\ v_{UR}=(d_5-d_2)\sin(\alpha_6+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)\delta_{\alpha6+\varphi2}-a_4\cos(\alpha_3)\delta_{\varphi3}\\ \quad-a_5\cos(\alpha_6+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)\delta_{\alpha6+\varphi2}+l_5\sin(\alpha_4)\delta_{\alpha4-\alpha3+\varphi3}\end{cases}。$$

[0152] 针对五连杆机构$E_1PQD_2D_1$，以E_1 D_1为x轴正方向，指向圆盘工件方向为y轴正方向，列出其矢量封闭方程：$\overrightarrow{E_1P}+\overrightarrow{PQ}=\overrightarrow{QD_2}+\overrightarrow{D_2D_1}+\overrightarrow{D_1E_1}$。

[0153] 将其分解为x、y方向：$$\begin{cases}-\frac{1}{2}a_3\cos(\alpha_6+\beta_2)+l_3\sin(\alpha_1+\varphi_1-\varphi_2)\\ \qquad=-l_2\sin(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)+d_1-d_4\\ \frac{1}{2}a_3\sin(\alpha_6+\beta_2)+l_3\cos(\alpha_1+\varphi_1-\varphi_2)\\ \qquad=l_2\cos(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)+a_2\end{cases}。$$

[0154] 对$\alpha_6+\beta_2$、$\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1$求导：

[0155] $$\frac{\delta_{\alpha6+\beta2}}{\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2-\varphi1}}$$
$$=\frac{a_3[l_2\sin(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1+\alpha_6+\beta_2)-(d_1-d_4)\cos(\alpha_6+\beta_2)+a_2\sin(\alpha_6+\beta_2)]}{l_2(a_3\sin(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1+\alpha_6+\beta_2)+2l_3\cos(2(\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)-\alpha_2))}。$$

[0156] 因为α_6为固定角，所以$\delta_{\alpha6}=0$。根据同一构件角速度关系可得：$\delta_{\varphi2}=-\delta_{\beta2}-\delta_{\beta1}$。令上式等号右边项为m，则上式整理可得：$\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2}=\frac{\delta_{\beta2}}{m}-\delta_{\beta1}$。

[0157] 同样针对五连杆机构$G_1URE_4E_6$，列出其矢量封闭方程：$\overrightarrow{G_1U}+\overrightarrow{UR}=\overrightarrow{RE_4}+\overrightarrow{E_4E_6}+\overrightarrow{E_6G_1}$。

[0158] 即：$$\begin{cases}-a_4\cos(\alpha_7+\beta_3)+l_6\cos(\varphi_3-\varphi_2-\alpha_3-\alpha_6)\\ \qquad=-l_5\cos(\alpha_6-\alpha_4+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)+d_2-d_5\\ a_4\sin(\alpha_7+\beta_3)+l_6\sin(\varphi_3-\varphi_2-\alpha_3-\alpha_6)\\ \qquad=l_5\sin(\alpha_6-\alpha_4+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)+\alpha_5\end{cases}。$$

[0159] 对$\alpha_7+\beta_3$、$\alpha_6-\alpha_4+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3$求导，并整理可得：

$$\frac{\delta_{\alpha 7+\beta 3}}{\delta_{\alpha 6-\alpha 4+\alpha 3+\varphi 2-\varphi 3}}$$

[0160]

$$=\frac{a_4[l_5\sin(\alpha_7+\beta_3-\alpha_4+\alpha_3+\alpha_6+\varphi_2-\varphi_3)-(d_2-d_5)\cos(\alpha_7+\beta_3)+a_5\sin(\alpha_7+\beta_3)]}{l_5(a_4\sin(\alpha_7+\beta_3-\alpha_4+\alpha_3+\alpha_6+\varphi_2-\varphi_3)+l_6\cos(2(\varphi_3-\varphi_2-\alpha_3-\alpha_6)+\alpha_4))}$$。

[0161] 由于α_7为固定角，则$\delta_{\alpha 7}=0$，根据同一构件角速度关系可得：$\delta_{\varphi 3}=-\delta_{\beta 3}-\delta_{\beta 2}-\delta_{\beta 1}$。令上式的等号右边项为n，则其可整理得：$\delta_{\alpha 4-\alpha 3+\varphi 3}=-\frac{\delta_{\beta 3}}{n}-\delta_{\beta 2}-\delta_{\beta 1}$。

[0162] 由于$\delta_{\varphi 2}=-\delta_{\beta 2}-\delta_{\beta 1}$，$\delta_{\varphi 3}=-\delta_{\beta 3}-\delta_{\beta 2}-\delta_{\beta 1}$，将$\delta_{\alpha 2-\alpha 1+\varphi 2}$和$\delta_{\alpha 4-\alpha 3+\varphi 3}$代入虚速度$v_{PQ}$、$v_{UR}$中，并整理可得：$\begin{cases} v_{PQ}=\Psi\cdot\delta_{\beta 1}+\Gamma\cdot\delta_{\beta 2} \\ v_{UR}=\Pi\cdot\delta_{\beta 1}+\Pi\cdot\delta_{\beta 2}+\Upsilon\cdot\delta_{\beta 3} \end{cases}$。式中，

$$\Psi=(d_4-d_1)\sin(\beta_1-\alpha_1+\varphi_2)-a_2\cos(\beta_1-\alpha_1+\varphi_2)-l_2\sin(\alpha_2)+\frac{1}{2}a_3\sin(\alpha_1)$$，

$$\Gamma=\frac{1}{2}a_3\sin(\alpha_1)+\frac{1}{m}l_2\sin(\alpha_2)$$ ，$$\Upsilon=a_4\cos(\alpha_3)-\frac{l_5}{n}\sin(\alpha_4)$$，

[0163] $\Pi=(d_2-d_5)\sin(\alpha_6+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)+a_4\cos(\alpha_3)-l_5\sin(\alpha_4)+a_5\cos(\alpha_6+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)$。

[0164] (5)计算弹簧s_1和s_2上的虚速度v_{s1}、v_{s2}。

[0165] 根据夹持器的所述几何模型和静力学模型中结构件间几何关系，可以得出：

$$\begin{cases} v_{PQ}=-v_{D2D3}\cos(\alpha_2)=-v_{QD2}\cos(\alpha_2) \\ v_{D2D3}=v_{s1}\cos(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1) \end{cases}$$，$$\begin{cases} v_{UR}=-v_{E3E4}\cos(\alpha_4)=-v_{RE4}\cos(\alpha_4) \\ v_{E3E4}=v_{s2}\sin(\alpha_4-\alpha_3-\alpha_6+\varphi_3-\varphi_2) \end{cases}$$。

[0166] 所以弹簧s_1和s_2上的虚速度：$\begin{cases} v_{s1}=\mu\cdot\delta_{\beta 1}+\lambda\cdot\delta_{\beta 2} \\ v_{s2}=\sigma\cdot\delta_{\beta 1}+\sigma\cdot\delta_{\beta 2}+\tau\cdot\delta_{\beta 3} \end{cases}$。式中，

$$\mu=-\frac{\Psi}{\cos(\alpha_2)\cos(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)}$$ ，$$\lambda=-\frac{\Gamma}{\cos(\alpha_2)\cos(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)}$$ ，

$$\sigma=\frac{\Pi}{\cos(\alpha_4)\sin(\alpha_2-\alpha_3-\alpha_6+\varphi_3-\varphi_2)}$$ ，$$\tau=\frac{\Upsilon}{\cos(\alpha_4)\sin(\alpha_2-\alpha_3-\alpha_6+\varphi_3-\varphi_2)}$$。

[0167] (6)计算夹持器接触力$F=[F_1\ F_2\ F_3]^T$。

[0168] 根据同一构件角速度关系可得：$\delta_{\varphi 1}=-\delta_{\beta 1}$，再结合弹簧$s_1$和$s_2$上虚速度$v_{s1}$和$v_{s2}$，可以将上面的W写为矩阵相乘形式：$W=J_\omega[\delta_{\beta 1}\ \delta_{\beta 2}\ \delta_{\beta 3}]^T$。

[0169] 式中，$J_\omega=\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ \mu & \lambda & 0 \\ \sigma & \sigma & \tau \end{bmatrix}$。

[0170] 将虚速度V_F、W代入简化的虚功方程，可得：$F^TJ_v=T^TJ_\omega$。

[0171] 则接触力为：$\boldsymbol{F}^T=J_v^{-1}J_\omega\boldsymbol{T}^T$

[0172] 式中，$Jv^{-1}=\begin{bmatrix} J & 0 & 0 \\ K & L & 0 \\ M & N & O \end{bmatrix}$，且$J=\frac{1}{h_1}$，$K=-\frac{h_2h_3+d_0h_3\cos(\beta_2)}{h_1h_2h_3}$，$L=\frac{1}{h_2}$，

[0173] $M=\frac{h_2d_3\cos(\beta_3)+d_0h_3\cos(\beta_2)-d_0h_2\cos(\beta_2+\beta_3)-h_2d_2\cos(\beta_2)+d_0d_2\cos(\beta_2)\cos(\beta_3)}{h_1h_2h_3}$，

[0174] $N=\frac{h_1h_2+h_1d_2\cos(\beta_2)}{h_1h_2h_3}$，$O=\frac{1}{h_3}$。

[0175] 鉴于弹簧s_1和s_2的驱动力T_2和T_3远小于夹持力F，所以将其忽略并获得夹持力F：

$$\begin{cases} F_1=-JT_1+(J\mu+K\lambda)F_1+(J\sigma+K\sigma+M\tau)F_2 \\ F_2=L\lambda F_1+(L\sigma+N\tau)F_2 \\ F_3=\tau OF_2 \end{cases}$$。

[0176] 进一步化简可得F：$\begin{cases} F_1=-\frac{J(1-L\sigma-N\tau)}{(1-LK-N\tau)(1-J\mu-K\lambda)-L\lambda(J\sigma+K\sigma+M\tau)}T_1 \\ F_2=-\frac{JL\lambda}{(1-LK-N\tau)(1-J\mu-K\lambda)-L\lambda(J\sigma+K\sigma+M\tau)}T_1 \\ F_3=-\frac{JL\lambda\tau O}{(1-LK-N\tau)(1-J\mu-K\lambda)-L\lambda(J\sigma+K\sigma+M\tau)}T_1 \end{cases}$。

[0177] 上式给出了接触力$F=[F_1\ F_2\ F_3]^T$与T_1之间的关系。由式可以看出，接触力F受β_1～β_3、φ_1~φ_3等角度以及手指机构尺寸的影响。

[0178] 二、夹持器结构参数优化方法，包括基于群体效应的免疫优化算法，所述基于群体效应的免疫进化算法是在基本免疫优化算法的算子（包括免疫选择算子0_s、免疫交叉算子0_c和免疫变异算子0_m）基础上，根据群体效应设计了新的免疫集聚算子0_g和免疫扩散算子0_d进行算法优化提升。

[0179] 基本免疫算法虽然具有分布式、全局优化能力，但是在面向多变量优化时也存在局部搜索能力有效，以及容易陷入局部的不足。由上述夹持器的接触力模型可以看出，该结构待优化变量会有10个左右，因此对算法的优化能力提出了更高的要求。为此，本发明借鉴了社会发展中的群体效应，即个体在面向群体时，其行为会在群体影响下发生变化，比如基于向心力的集聚行为和基于竞争的扩散行为。

[0180] 已知第k代含有n个个体的种群$A(k)=[a_1(k),a_2(k),\cdots,a_n(k)]$，则免疫选择算子$0_s$可以描述为：

[0181] $\boldsymbol{A'}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_s(\boldsymbol{A}(k))=[a_1'(k),a_2'(k),\cdots,a_n'(k)]$，$\forall\ i\in[1,\ n]$，$a_i'(k)\in\boldsymbol{A}(k)$。

[0182] 免疫交叉算子0_c可以描述为：$\boldsymbol{A''}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_c(\boldsymbol{A'}(k))=[a_1''(k),a_2''(k),\cdots,a_n''(k)]$，$\forall\ i\in[1,\ n]$，$a_i''(k)\in\boldsymbol{A''}(k)$。

[0183] 免疫变异算子0_m可以描述为：$\boldsymbol{A'''}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_m(\boldsymbol{A''}(k))=[a_1'''(k),a_2'''(k),\cdots,a_n'''(k)]$，$\forall\ i\in[1,\ n]$，$a_i'''(k)\in\boldsymbol{A'''}(k)$。

[0184] 所述免疫集聚算子0_g，主要是让种群中优势个体组成集聚种群对适应度差的劣势个体形成号召影响，进而提高劣势个体的性能。

[0185] 设集聚数为m，集聚距离为l（l<n），适应度差的劣势个体数为n，免疫集聚算子流程为：

[0186] （1）从免疫变异后种群A″′（k）中选择适应度最好的个体a*（k）；

[0187] （2）根据a*（k）生成与其集聚距离小于l的m个优势个体，并组成集聚种群$\boldsymbol{G}(k)=[g_1(k), g_2(k), \ldots, g_m(k)]$，$\forall\ i\in[1,m]$，$|a^*-g_i(k)|\leqslant l$，$|\bullet|$表示汉明距离；

[0188] （3）从种群A″′（k）中选择z个适应度最差的个体，并组成劣势种群W（k）=[w_1（k），w_2（k），…，w_z（k）]；

[0189] （4）从W（k）中提取个体w_i（k）（i∈[1，z]），将其与G（k）中个体分别进行异或操作，并得到 G’（k）=[g'_1（k），g'_2（k），…，g'_m（k）]；

[0190] （5）提取G’（k）=[g'_1（k），g'_2（k），…，g'_m（k）]中最优个体与w_i（k）比较，若前者优于后者则替换后者，否则保留后者；

[0191] （6）判断W（k）中所有个体是否都与G（k）中个体完成异或操作？若否，则转步骤（4），否则退出。

[0192] 免疫集聚算子O_g可以描述为：

[0193] $\boldsymbol{A}^{IV}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_g(\boldsymbol{A}'''(k))=[a_1^{IV}(k),a_2^{IV}(k),\cdots,a_n^{IV}(k)]$，$\forall\ i\in[1,\ n]$，$a_i^{IV}(k)\in\boldsymbol{A}^{IV}(k)$。

[0194] 所述免疫扩散算子O_d，主要是让种群中高浓度个体进行扩散，以防止个体陷入局部极小。

[0195] 设扩散距离为r（r<n），扩散数为s，免疫扩散算子流程为：

[0196] （1）从免疫集聚后种群A^{IV}（k）中选取浓度最高的s个抗体，并组成扩散种群D（k）=[d_1（k），d_2（k），…，d_s（k）]；

[0197] （2）随机产生1个初始个体a^0（k），且其元素为1的数量大于r并小于等于n；

[0198] （3）从D（k）中取出个体d_i（k）（i∈[1，s]）与个体a^0（k）进行异或操作，并得到新个体d_i’（k）；

[0199] （4）将个体d_i（k）与d_i’（k）进行对比，若后者优于前者则替换前者，否则保留前者；

[0200] （5）判断D（k）中所有抗体是否都与a^0（k）完成异或操作？若否，则转步骤（3），否则退出。

[0201] 免疫扩散算子O_d可以描述为：

[0202] $\boldsymbol{A}^{V}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_d(\boldsymbol{A}^{IV}(k))=[a_1^{V}(k),a_2^{V}(k),\cdots,a_n^{V}(k)]$，$\forall\ i\in[1,\ n]$，$a_i^{V}(k)\in\boldsymbol{A}^{V}(k)$。

[0203] 三、夹持器结构参数优化流程，包括以下内容与步骤：

[0204] （1）基于夹持器夹持力F，并以夹持时接触力尽可能分布均匀且相等为目标，建立夹持器稳定夹持状态下参数优化的目标函数：

[0205] $\min f(X)=\min((F_1-F_2)^2+(F_1-F_3)^2+(F_2-F_3)^2)$。

[0206] 式中，X为夹持器结构参数变量集且$\boldsymbol{X}=[x_1\ x_2\ x_3\ x_4\ x_5\ x_6\ x_7\ x_8\ x_9\ x_{10}\ x_{11}\ x_{12}\ x_{13}\ x_{14}\ x_{15}]=[a_2\ a_5\ h_1\ h_2\ h_3\ l_2\ l_3\ l_5\ l_6\ \beta_1\ \beta_2\ \beta_3\ \varphi_1\ \varphi_2\ \varphi_3]$；

[0207] （2）设定夹持器参数变量集X的约束范围；

[0208] （3）初始化基于群体效应的免疫优化算法参数，及初始种群A（k）=[a_1（k），a_2（k），…，a_n（k）]，k←0；

[0209] （4）免疫选择：A′（k）←O_s（A（k））=[a'_1（k），a'_2（k），…，a'_n（k）]；

[0210] (5)免疫交叉:$A''(k)\leftarrow O_c(A'(k))=[a''_1(k),a''_2(k),\cdots,a''_n(k)]$;

[0211] (6)免疫变异:$A'''(k)\leftarrow O_m(A''(k))=[a'''_1(k),a'''_2(k),\cdots,a'''_n(k)]$;

[0212] (7)免疫集聚:$\boldsymbol{A}^{IV}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_g(\boldsymbol{A}'''(k))=[a_1^{IV}(k),a_2^{IV}(k),\cdots,a_n^{IV}(k)]$;

[0213] (8)免疫扩散:$\boldsymbol{A}^{V}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_d(\boldsymbol{A}^{IV}(k))=[a_1^{V}(k),a_2^{V}(k),\cdots,a_n^{V}(k)]$;

[0214] (9)终止条件判定。进化代数k是否达到最大代数?若是,则算法终止,并输出最优变量 X^*;否则k←k+1,并返回步骤(4)。

[0215] 以抓取最小直径70mm的圆形工件为例,针对自锁式欠驱动夹持器结构,分别采用经验法、Fmincon法、遗传算法(Genetic Algorithm,GA)和本发明中基于群体效应的免疫优化算法 (Immune Optimization Algorithm Based on Population Effect,IOABOPE)进行了设计。表一给出了设计数据,由表可以看出,相比起经验法,三种优化方法(Fmincon、GA和IOABOPE)的目标函数值要远小于经验法,三种算法的各自三个接触力的差异性也比经验法小,体现了优化方法在多变量结构设计中的重要性。在三种优化方法中,具有分布式和全局优化能力的GA 和IOABOPE,无论是目标函数值还是接触力的差异性方面都优于Fmincon,这主要是Fmincon 是一种局部优化方法,对于多变量优化不具有优势。与GA相比,本发明的IOABOPE无疑是最优的,不仅目标函数值最小,且三个接触力比较接近,这主要得益于免疫集聚算子提高了算法的局部优化能力,而免疫扩散算子避免了算法过早陷入局部极小,切实提高了算法的优化效果,从而也验证了本发明所提出优化方法的有效性和优越性。

[0216] 表一:

[0217]

目标函数及夹持力 / 方法	$\min f(\boldsymbol{X})$	F_1/N	F_2/N	F_3/N
经验法	7.0e-6	10.51	7.22	9.47
Fmincon	5.6e-6	7.98	9.73	8.15
GA	2.1e-6	8.45	8.68	8.31
IOABOPE	1.6e-6	8.35	8.43	8.38

[0218] 上述仅为本发明的优选实施例而已,并不对本发明起到任何限制作用。任何所属技术领域的技术人员,在不脱离本发明的技术方案的范围内,对本发明揭露的技术方案和技术内容做任何形式的等同替换或修改等变动,均属未脱离本发明的技术方案的内容,仍属于本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1.一种自锁式欠驱动夹持器，包括驱动机构(1)，其特征在于，所述驱动机构(1)的上端面安装着镜像对称设置的夹持机构，所述夹持机构自下而上由首指节组件(2)、中指节组件(3)和末指节组件(4)相连构成；其中，

所述的驱动机构(1)包括气缸体(5)，所述气缸体(5)上端面左右隔离安装有镜像对称的气动滑块(6)，所述气动滑块(6)上通过螺栓固定连接有传动滑块(7)，所述传动滑块(7)上方转动连接着驱动连杆(8)的下端，所述驱动连杆(8)的上端转动连接着首指节传动连杆(9)的下端，所述气缸体(5)的后端对应传动滑块(7)固定设置有镜像对称的支撑臂(10)，所述首指节传动连杆(9)的上端与支撑臂(10)上端的转轴转动连接；

所述首指节组件(2)包括首指节框架(11)，所述首指节框架(11)的下边框的中间转动连接着支撑臂(10)上端的转轴，所述首指节框架(11)通过螺栓从下到上依次夹持固定着首指节下导向件(12)、首指节上导向件(13)和首指节L型杆(14)，所述首指节L型杆(14)的上端旋转连接在中指节三角架(15)弧形处的左端，所述首指节下导向件(12)包括相互平行的第一工字件(16)和第二工字件(17)，所述第一工字件(16)和第二工字件(17)分别固定在首指节框架(11)的左边框间和右边框间，所述第一工字件(16)和第二工字件(17)间夹持固定着左端口封闭右端口导通的第一导向管(18)，所述第一导向管(18)内装有第一弹簧(19)，所述第一弹簧(19)的右端支撑在首指节下压簧杆(20)左端部，所述首指节下压簧杆(20)的左端上还固定着与其轴线垂直的第一销轴(21)，所述第一销轴(21)在第一导向管(18)沿轴向所开槽内左右移动，所述首指节下压簧杆(20)的右端固定在首指节夹持块(22)的左下部，所述首指节上导向件(13)包括相互平行的第三工字件(23)和第四工字件(24)，所述第三工字件(23)和第四工字件(24)同样分别固定在首指节框架(11)的左边框间和右边框间，所述第三工字件(23)和第四工字件(24)间夹持固定着左端口封闭右端口导通的第二导向管(25)，所述第二导向管(25)内装有第二弹簧(26)，所述第二弹簧(26)的右端支撑在首指节上压簧杆(27)左端部，所述首指节上压簧杆(27)的右端固定在首指节夹持块(22)的左上部，所述首指节下压簧杆(20)和首指节上压簧杆(27)共同支撑着首指节夹持块(22)，所述首指节框架(11)中间横杆上与首指节曲杆(28)的转折处转动连接，所述首指节曲杆(28)下端槽口内嵌着且能沿槽滑动的第一销轴(21)，所述首指节曲杆(28)的上端转动连接着中指节传动连杆(29)的下端；

所述中指节组件(3)包括中指节框架(30)，所述中指节框架(30)通过螺栓从下到上依次夹持固定装有中指节三角架(15)、中指节下导向件(31)、中指节上导向件(32)和中指节T型杆(33)，所述中指节三角架(15)弧形处的右端转动连接着中指节传动连杆(29)的上端，所述中指节下导向件(31)和首指节下导向件(12)结构一样，包括第五工字件(34)、第六工字件(35)、第三导向管(36)、第三弹簧(37)、中指节下压簧杆(38)和第二销轴(39)，所述中指节下压簧杆(38)的右端固定在中指节夹持块(40)的左下部，所述中指节上导向件(32)和首指节上导向件(13)结构一样，包括第七工字件(41)、第八工字件(42)、第四导向管(43)、第四弹簧(44)和中指节上压簧杆(45)，所述中指节上压簧杆(45)的右端固定在中指节夹持块(40)的左上部，所述中指节下压簧杆(38)和中指节上压簧杆(45)共同支撑着中指节夹持块(40)，所述中指节框架(30)中间横杆上与中指节曲杆(46)的转折处转动连接，所述中指节曲杆(46)下端槽口内嵌着且能沿槽滑动的第二销轴(39)，所述中指节曲杆(46)的上端转动连接着末指节传动连杆(47)的下端；

所述末指节组件(4)包括末指节夹持块(48),所述末指节夹持块(48)的右下端转动连接着末指节传动连杆(47)的上端,所述末指节夹持块(48)的左下端转动连接着中指节T型杆(33)的上端;

所述末指节组件(4),包括末指节夹持块(48),所述末指节夹持块(48)的左下端转动连接着中指节T型杆(33)的上端,所述末指节夹持块(48)的右下端转动连接着末指节传动连杆(47)的上端。

2.如权利要求1所述的一种自锁式欠驱动夹持器,其特征在于:所述首指节夹持块(22)为包括安装面和夹持面的凹形结构件,且凹部内侧为弧形状。

3.如权利要求1所述的一种自锁式欠驱动夹持器,其特征在于:所述中指节夹持块(40)为包括安装面和夹持面的凹形结构件,且凹部内侧为弧形状。

4.如权利要求1所述的一种自锁式欠驱动夹持器,其特征在于:所述末指节夹持块(48)为包括安装端和夹持端的刀形结构件,用于安装的刀柄部设有两个连接孔,用于夹持的刀片部为凹形结构,且凹部内侧为弧形状。

5.如权利要求1所述的一种自锁式欠驱动夹持器,其特征在于:所述首指节夹持块(22),所述中指节夹持块(40)和所述末指节夹持块(48)的夹持面上均设置有防冲击、防滑层。

6.一种如权利要求1至5任意一项所速的一种自锁式欠驱动夹持器的结构优化方法,其特征在于:包括夹持器夹持接触力模型建立、夹持器结构参数优化方法和夹持器结构参数优化流程,

一、所述夹持器夹持接触力模型建立,包括以下内容和步骤:

(1)根据夹持器结构建立几何模型和静力学模型;

鉴于自锁式欠驱动夹持器呈左右对称结构,以左边三指节为例进行模型建立和结构优化;所述建立几何模型是将所述驱动机构(1)中的所述驱动连杆(8)等效为AB杆,将所述首指节传动连杆(9)等效为BC_2杆,将所述首指节框架(11)等效为$C_1C_3C_4E_1$四边形,将所述首指节曲杆(28)等效为QD_2D_3折杆,将所述首指节框架(11)中间横杆的左端到首指节曲杆(28)转折处的部分等效为D_1D_2杆,将所述中指节传动连杆(29)等效为QP杆,将所述中指节框架(30)等效为$E_1E_2E_5G_1$四边形,将所述中指节曲杆(46)等效为RE_4E_3折杆,将所述中指节框架(30)中间横杆的左端到中指节曲杆(46)转折处的部分等效为E_6E_4杆,将所述末指节传动连杆(47)等效为RU,将所述末指节夹持块(48)等效为$G_1G_2G_3G_4$四边形,由于第一弹簧(19)和第二弹簧(26)同步拉伸和压缩,且变形量一样,在模型计算时将两者受力等效到弹簧D_4D_3上,且用s_1表示弹簧D_4D_3;同理将第三弹簧(37)和第四弹簧(44)受力等效到弹簧E_7E_3上,且用s_2表示弹簧E_7E_3;定义杆C_1C_3、D_1D_2、E_1E_2、G_1U和E_6E_4的长度分别为a_1、a_2、a_3、a_4和a_5;定义杆E_1B、G_1E_1、G_1G_4、D_1B和E_1E_6的长度为d_1、d_2、d_3、d_4和d_5;定义杆D_2D_3、D_2Q、PQ、E_3E_4、E_4R和RU的长度为l_1、l_2、l_3、l_4、l_5和l_6;

所述建立静力学模型是定义所述驱动机构(1)的力矩为T_1,定义所述弹簧s_1和s_2的驱动力分别为T_2和T_3;定义所述首指节组件(2)、中指节组件(3)和末指节组件(4)夹持物体的接触力分别为F_1、F_2和F_3;定义C_1点距F_1力的距离为h_1,定义E_1点距F_2力的距离为h_2,定义G_1点距F_3力的距离为h_3;定义杆E_2P与杆QP的夹角,杆PQ与杆D_2Q的夹角,杆G_2U与杆RU的夹角,杆UR与杆E_4R的夹角,杆C_4E_1与杆C_1E_1的夹角分别为α_1、α_2、α_3、α_4、α_5;定义杆E_1C_1与水平反向线的夹

角，杆G_1E_1与杆C_1E_1反向延长线的夹角，杆G_4G_1与杆E_1G_1反向延长线的夹角分别为β_1、β_2、β_3；定义杆C_3C_1与水平线的夹角，杆PE_1与水平线的夹角，杆UG_1与水平线的夹角分别为φ_1、φ_2、φ_3；

(2) 基于虚功原理建立夹持器各指节虚功方程：$\begin{cases} F_1 v_{F_1} = T_1 \omega_{\varphi 1} \\ F_2 v_{F_2} = (F_1 + T_2) v_{s1} \\ F_3 v_{F_3} = (F_2 + T_3) v_{s2} \end{cases}$；

式中，$\omega_{\varphi 1}$为力矩T_1作用于首指节上的虚角速度，v_{s1}、v_{s2}分别为弹簧s_1和s_2上的虚速度；v_{F1}、v_{F2}、v_{F3}分别为接触力F_1、F_2、F_3在接触点处的虚速度；

令$T=[T_1 \ \ F_1+T_2 \ \ F_2+T_3]^T$，$F=[F_1 \ \ F_2 \ \ F_3]^T$，$\boldsymbol{W}=[\omega_{\varphi 1} \ v_{s1} \ v_{s2}]^T$，$V_F=[v_{F1} \ \ v_{F2} \ \ v_{F3}]^T$，虚功方程可以简化为：$F^T V_F = T^T W$；

(3) 基于刚体速度公式建立夹持器各指节虚速度$V_F=[v_{F1} \ \ v_{F2} \ \ v_{F3}]^T$为：

$$\begin{cases} v_{F1} = \delta_{\beta 1} h_1 \\ v_{F2} = \delta_{\beta 2} h_2 + (h_2 + d_0 \cos(\beta_2)) \delta_{\beta 1} \\ v_{F3} = \delta_{\beta 3} h_3 + (h_3 + d_2 \cos(\beta_3)) \delta_{\beta 2} + (h_3 + d_2 \cos(\beta_3) + d_0 \cos(\beta_2 + \beta_3)) \delta_{\beta 1} \end{cases};$$

式中，$d_0 = \sqrt{d_1 - \frac{a_1 \tan \beta_2}{2}}$，$\delta_{\beta 1}$、$\delta_{\beta 2}$、$\delta_{\beta 3}$分别为转角$\beta_1$、$\beta_2$和$\beta_3$的角速度；

将虚速度V_F写成矩阵形式：$V_F = J_v[\delta_{\beta 1} \ \ \delta_{\beta 2} \ \ \delta_{\beta 3}]^T$；

式中，$J_v = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 \\ h_2 + d_0 \cos(\beta_2) & h_2 & 0 \\ h_3 + d_2 \cos(\beta_3) + d_0 \cos(\beta_2 + \beta_3) & h_3 + d_2 \cos(\beta_3) & h_3 \cos(\beta_3) \end{bmatrix}$；

(4) 由于所述中指节传动连杆 (29) (PQ) 和末指节传动连杆 (47) (UR) 都对所在指节组件有直接作用力，计算两杆的虚速度v_{PQ}、v_{UR}：

$$\begin{cases} v_{PQ} = -(\dot{x}_P - \dot{x}_Q)\cos(\alpha_1 - \varphi_2) + (\dot{y}_P - \dot{y}_Q)\sin(\alpha_1 - \varphi_2) \\ v_{UR} = -(\dot{x}_U - \dot{x}_R)\cos(\alpha_3 - \varphi_3) + (\dot{y}_U - \dot{y}_R)\sin(\alpha_3 - \varphi_3) \end{cases};$$

因为，

$$\begin{cases} \dot{x}_Q = \frac{1}{2} a_1 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_4 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} - a_2 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} + l_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1 + \varphi_2) \delta_{\alpha 2 - \alpha 1 + \varphi 2} \\ \dot{y}_Q = -\frac{1}{2} a_1 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_4 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} + a_2 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} - l_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1 + \varphi_2) \delta_{\alpha 2 - \alpha 1 + \varphi 2} \end{cases},$$

$$\begin{cases} \dot{x}_P = \frac{1}{2} a_3 \sin(\varphi_2) \delta_{\varphi 2} + \frac{1}{2} a_1 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_1 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} \\ \dot{y}_P = -\frac{1}{2} a_3 \cos(\varphi_2) \delta_{\varphi 2} - \frac{1}{2} a_1 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_1 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} \end{cases},$$

$$\begin{cases} \dot{x}_R = \frac{1}{2} a_1 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_1 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_2 \sin(\alpha_6 + \varphi_2) \delta_{\alpha 6 + \varphi 2} + a_4 \sin(\varphi_3) \delta_{\varphi 3} \\ \dot{y}_R = -\frac{1}{2} a_1 \sin(\beta_1) \delta_{\beta 1} + d_1 \cos(\beta_1) \delta_{\beta 1} - d_2 \cos(\alpha_6 + \varphi_2) \delta_{\alpha 6 + \varphi 2} - a_4 \cos(\varphi_3) \delta_{\varphi 3} \end{cases},$$

$$\begin{cases}\dot{x}_U=\dfrac{1}{2}a_1\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_1\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_5\sin(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha6+\varphi2}\\ \quad+a_5\cos(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha6+\varphi2}+l_5\sin(\alpha_4-\alpha_3+\varphi_3)\delta_{\alpha4-\alpha3+\varphi3}\\ \dot{y}_U=-\dfrac{1}{2}a_1\sin(\beta_1)\delta_{\beta1}+d_1\cos(\beta_1)\delta_{\beta1}-d_5\cos(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha6+\varphi2}\\ \quad+a_5\sin(\alpha_6+\varphi_2)\delta_{\alpha_6+\varphi_2}-l_5\cos(\alpha_4-\alpha_3+\varphi_3)\delta_{\alpha4-\alpha3+\varphi3}\end{cases},$$

所以，所述中指节传动连杆(29)(PQ)和末指节传动连杆(47)(UR)的虚速度v_{PQ}、v_{UR}为：

$$\begin{cases}v_{PQ}=(d_4-d_1)\sin(\beta_1-\alpha_1+\varphi_2)\delta_{\beta1}-a_2\cos(\beta_1-\alpha_1+\varphi_2)\delta_{\beta1}\\ \quad-\dfrac{1}{2}a_3\sin(\alpha_1)\delta_{\varphi2}+l_2\sin(\alpha_2)\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2}\\ v_{UR}=(d_5-d_2)\sin(\alpha_6+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)\delta_{\alpha6+\varphi2}-a_4\cos(\alpha_3)\delta_{\varphi3}\\ \quad-a_5\cos(\alpha_6+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)\delta_{\alpha6+\varphi2}+l_5\sin(\alpha_4)\delta_{\alpha4-\alpha3+\varphi3}\end{cases};$$

针对五连杆机构$E_1PQD_2D_1$，以E_1 D_1为x轴正方向，指向圆盘工件方向为y轴正方向，列出其矢量封闭方程：$\overrightarrow{E_1P}+\overrightarrow{PQ}=\overrightarrow{QD_2}+\overrightarrow{D_2D_1}+\overrightarrow{D_1E_1}$；

将其分解为x、y方向：$\begin{cases}-\dfrac{1}{2}a_3\cos(\alpha_6+\beta_2)+l_3\sin(\alpha_1+\varphi_1-\varphi_2)\\ \qquad=-l_2\sin(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)+d_1-d_4\\ \dfrac{1}{2}a_3\sin(\alpha_6+\beta_2)+l_3\cos(\alpha_1+\varphi_1-\varphi_2)\\ \qquad=l_2\cos(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)+a_2\end{cases}$；

对$\alpha_6+\beta_2$、$\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1$求导：

$$\frac{\delta_{\alpha6+\beta2}}{\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2-\varphi1}}$$

$$=\frac{a_3[l_2\sin(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1+\alpha_6+\beta_2)-(d_1-d_4)\cos(\alpha_6+\beta_2)+a_2\sin(\alpha_6+\beta_2)]}{l_2(a_3\sin(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1+\alpha_6+\beta_2)+2l_3\cos(2(\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)-\alpha_2))};$$

因为α_6为固定角，所以$\delta_{\alpha6}=0$，根据同一构件角速度关系可得：$\delta_{\varphi2}=-\delta_{\beta2}-\delta_{\beta1}$；令上式等号右边项为m，则上式整理可得：$\delta_{\alpha2-\alpha1+\varphi2}=\dfrac{\delta_{\beta2}}{m}-\delta_{\beta1}$；

同样针对五连杆机构$G_1URE_4E_6$，列出其矢量封闭方程：$\overrightarrow{G_1U}+\overrightarrow{UR}=\overrightarrow{RE_4}+\overrightarrow{E_4E_6}+\overrightarrow{E_6G_1}$；

即：$\begin{cases}-a_4\cos(\alpha_7+\beta_3)+l_6\cos(\varphi_3-\varphi_2-\alpha_3-\alpha_6)\\ \qquad=-l_5\cos(\alpha_6-\alpha_4+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)+d_2-d_5\\ a_4\sin(\alpha_7+\beta_3)+l_6\sin(\varphi_3-\varphi_2-\alpha_3-\alpha_6)\\ \qquad=l_5\sin(\alpha_6-\alpha_4+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)+\alpha_5\end{cases}$；

对$\alpha_7+\beta_3$、$\alpha_6-\alpha_4+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3$求导，并整理可得：

$$\frac{\delta_{\alpha 7+\beta 3}}{\delta_{\alpha 6-\alpha 4+\alpha 3+\varphi 2-\varphi 3}}$$

$$=\frac{a_4[l_5\sin(\alpha_7+\beta_3-\alpha_4+\alpha_3+\alpha_6+\varphi_2-\varphi_3)-(d_2-d_5)\cos(\alpha_7+\beta_3)+a_5\sin(\alpha_7+\beta_3)]}{l_5(a_4\sin(\alpha_7+\beta_3-\alpha_4+\alpha_3+\alpha_6+\varphi_2-\varphi_3)+l_6\cos(2(\varphi_3-\varphi_2-\alpha_3-\alpha_6)+\alpha_4))};$$

由于α_7为固定角，则$\delta_{\alpha 7}=0$，根据同一构件角速度关系可得：$\delta_{\varphi 3}=-\delta_{\beta 3}-\delta_{\beta 2}-\delta_{\beta 1}$；令上式的等号右边项为n，则其可整理得：$\delta_{\alpha 4-\alpha 3+\varphi 3}=-\frac{\delta_{\beta 3}}{n}-\delta_{\beta 2}-\delta_{\beta 1}$；

由于$\delta_{\varphi 2}=-\delta_{\beta 2}-\delta_{\beta 1}$，$\delta_{\varphi 3}=-\delta_{\beta 3}-\delta_{\beta 2}-\delta_{\beta 1}$，将$\delta_{\alpha 2-\alpha 1+\varphi 2}$和$\delta_{\alpha 4-\alpha 3+\varphi 3}$代入虚速度$v_{PQ}$、$v_{UR}$中，并整理可得：$\begin{cases} v_{PQ}=\Psi\cdot\delta_{\beta 1}+\Gamma\cdot\delta_{\beta 2} \\ v_{UR}=\Pi\cdot\delta_{\beta 1}+\Pi\cdot\delta_{\beta 2}+\Upsilon\cdot\delta_{\beta 3} \end{cases}$；

式中，$\Psi=(d_4-d_1)\sin(\beta_1-\alpha_1+\varphi_2)-a_2\cos(\beta_1-\alpha_1+\varphi_2)-l_2\sin(\alpha_2)+\frac{1}{2}a_3\sin(\alpha_1)$，

$\Gamma=\frac{1}{2}a_3\sin(\alpha_1)+\frac{1}{m}l_2\sin(\alpha_2)$，$\Upsilon=a_4\cos(\alpha_3)-\frac{l_5}{n}\sin(\alpha_4)$，

$\Pi=(d_2-d_5)\sin(\alpha_6+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)+a_4\cos(\alpha_3)-l_5\sin(\alpha_4)+a_5\cos(\alpha_6+\alpha_3+\varphi_2-\varphi_3)$；

(5) 计算弹簧s_1和s_2上的虚速度v_{s1}、v_{s2}；

根据夹持器的所述几何模型和静力学模型中结构件间几何关系，可以得出：

$\begin{cases} v_{PQ}=-v_{D2D3}\cos(\alpha_2)=-v_{QD2}\cos(\alpha_2) \\ v_{D2D3}=v_{s1}\cos(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1) \end{cases}$，$\begin{cases} v_{UR}=-v_{E3E4}\cos(\alpha_4)=-v_{RE4}\cos(\alpha_4) \\ v_{E3E4}=v_{s2}\sin(\alpha_4-\alpha_3-\alpha_6+\varphi_3-\varphi_2) \end{cases}$；

所以弹簧s_1和s_2上的虚速度：$\begin{cases} v_{s1}=\mu\cdot\delta_{\beta 1}+\lambda\cdot\delta_{\beta 2} \\ v_{s2}=\sigma\cdot\delta_{\beta 1}+\sigma\cdot\delta_{\beta 2}+\tau\cdot\delta_{\beta 3} \end{cases}$；

式中，$\mu=-\frac{\Psi}{\cos(\alpha_2)\cos(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)}$，$\lambda=-\frac{\Gamma}{\cos(\alpha_2)\cos(\alpha_2-\alpha_1+\varphi_2-\varphi_1)}$，

$\sigma=\frac{\Pi}{\cos(\alpha_4)\sin(\alpha_2-\alpha_3-\alpha_6+\varphi_3-\varphi_2)}$，$\tau=\frac{\Upsilon}{\cos(\alpha_4)\sin(\alpha_2-\alpha_3-\alpha_6+\varphi_3-\varphi_2)}$；

(6) 计算夹持器接触力$F=[F_1\ F_2\ F_3]^T$；

根据同一构件角速度关系可得：$\delta_{\varphi 1}=-\delta_{\beta 1}$，再结合弹簧$s_1$和$s_2$上虚速度$v_{s1}$和$v_{s2}$，可以将上面的W写为矩阵相乘形式：$W=J_\omega[\delta_{\beta 1}\ \delta_{\beta 2}\ \delta_{\beta 3}]^T$；

式中，$J_\omega=\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ \mu & \lambda & 0 \\ \sigma & \sigma & \tau \end{bmatrix}$，

将虚速度V_F、W代入简化的虚功方程，可得：$F^TJ_v=T^TJ_\omega$，

则接触力为：$\boldsymbol{F}^T=J_v^{-1}J_\omega\boldsymbol{T}^T$

式中，$Jv^{-1}=\begin{bmatrix} J & 0 & 0 \\ K & L & 0 \\ M & N & O \end{bmatrix}$，且$J=\frac{1}{h_1}$，$K=-\frac{h_2h_3+d_0h_3\cos(\beta_2)}{h_1h_2h_3}$，$L=\frac{1}{h_2}$，

$M=\frac{h_2d_3\cos(\beta_3)+d_0h_3\cos(\beta_2)-d_0h_2\cos(\beta_2+\beta_3)-h_2d_2\cos(\beta_2)+d_0d_2\cos(\beta_2)\cos(\beta_3)}{h_1h_2h_3}$，

$N=\frac{h_1h_2+h_1d_2\cos(\beta_2)}{h_1h_2h_3}$，$O=\frac{1}{h_3}$；

鉴于弹簧s_1和s_2的驱动力T_2和T_3远小于夹持力F，所以将其忽略并获得夹持力F：

$$\begin{cases} F_1=-JT_1+(J\mu+K\lambda)F_1+(J\sigma+K\sigma+M\tau)F_2 \\ F_2=L\lambda F_1+(L\sigma+N\tau)F_2 \\ F_3=\tau OF_2 \end{cases}$$；

进一步化简可得F：$\begin{cases} F_1=-\frac{J(1-L\sigma-N\tau)}{(1-LK-N\tau)(1-J\mu-K\lambda)-L\lambda(J\sigma+K\sigma+M\tau)}T_1 \\ F_2=-\frac{JL\lambda}{(1-LK-N\tau)(1-J\mu-K\lambda)-L\lambda(J\sigma+K\sigma+M\tau)}T_1 \\ F_3=-\frac{JL\lambda\tau O}{(1-LK-N\tau)(1-J\mu-K\lambda)-L\lambda(J\sigma+K\sigma+M\tau)}T_1 \end{cases}$；

上式给出了接触力$F=[F_1\ F_2\ F_3]^T$与T_1之间的关系，由式可以看出，接触力F受$\beta_1\sim\beta_3$、$\varphi_1\sim\varphi_3$等角度以及手指机构尺寸的影响；

二、夹持器结构参数优化方法，包括基于群体效应的免疫优化算法，所述基于群体效应的免疫进化算法是在基本免疫优化算法的算子（包括免疫选择算子0_s、免疫交叉算子0_c和免疫变异算子0_m）基础上，根据群体效应设计了新的免疫集聚算子0_g和免疫扩散算子0_d进行算法优化提升；

已知第k代含有n个个体的种群$A(k)=[a_1(k),a_2(k),\cdots,a_n(k)]$，则免疫选择算子$0_s$可以描述为：

$\boldsymbol{A'}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_s(\boldsymbol{A}(k))=[a_1'(k),a_2'(k),\cdots,a_n'(k)]$，$\forall\ i\in[1,\ n]$，$a_i'(k)\in\boldsymbol{A}(k)$，

免疫交叉算子0_c可以描述为：$\boldsymbol{A''}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_c(\boldsymbol{A'}(k))=[a_1''(k),a_2''(k),\cdots,a_n''(k)]$，$\forall\ i\in[1,\ n]$，$a_i''(k)\in\boldsymbol{A''}(k)$，

免疫变异算子0_m可以描述为：$\boldsymbol{A'''}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_m(\boldsymbol{A''}(k))=[a_1'''(k),a_2'''(k),\cdots,a_n'''(k)]$，$\forall\ i\in[1,\ n]$，$a_i'''(k)\in\boldsymbol{A'''}(k)$；

所述免疫集聚算子0_g，主要是让种群中优势个体组成集聚种群对适应度差的劣势个体形成号召影响，进而提高劣势个体的性能；

设集聚数为m，集聚距离为l（l<n），适应度差的劣势个体数为n，免疫集聚算子流程为：

（1）从免疫变异后种群A''（k）中选择适应度最好的个体a*（k）；

（2）根据a*（k）生成与其集聚距离小于l的m个优势个体，并组成集聚种群$\boldsymbol{G}(k)=[g_1(k),g_2(k),\ldots,g_m(k)]$，$\forall\ i\in[1,m]$，$|a^*-g_i(k)|\le l$，$|\bullet|$表示汉明距离；

(3)从种群A″′(k)中选择z个适应度最差的个体，并组成劣势种群W(k)＝[w_1(k)，w_2(k)，…，w_z(k)]；

(4)从W(k)中提取个体w_i(k)(i∈[1,z])，将其与G(k)中个体分别进行异或操作，并得到G’(k)＝[g’$_1$(k)，g’$_2$(k)，…，g’$_m$(k)]；

(5)提取G’(k)＝[g’$_1$(k)，g’$_2$(k)，…，g’$_m$(k)]中最优个体与w_i(k)比较，若前者优于后者则替换后者，否则保留后者；

(6)判断W(k)中所有个体是否都与G(k)中个体完成异或操作?若否，则转步骤(4)，否则退出；

免疫集聚算子O_g可以描述为：

$$\boldsymbol{A}^{IV}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_g(\boldsymbol{A}'''(k))=[a_1^{IV}(k),a_2^{IV}(k),\cdots,a_n^{IV}(k)],\ \forall\ i\in[1,\ n],\ a_i^{IV}(k)\in\boldsymbol{A}^{IV}(k)$$

所述免疫扩散算子O_d，主要是让种群中高浓度个体进行扩散，以防止个体陷入局部极小；

设扩散距离为r(r<n)，扩散数为s，免疫扩散算子流程为：

(1)从免疫集聚后种群A^{IV}(k)中选取浓度最高的s个抗体，并组成扩散种群D(k)＝[d_1(k)，d_2(k)，…，d_s(k)]；

(2)随机产生1个初始个体a^0(k)，且其元素为1的数量大于r并小于等于n；

(3)从D(k)中取出个体d_i(k)(i∈[1,s])与个体a^0(k)进行异或操作，并得到新个体d_i’(k)；

(4)将个体d_i(k)与d_i’(k)进行对比，若后者优于前者则替换前者，否则保留前者；

(5)判断D(k)中所有抗体是否都与a^0(k)完成异或操作?若否，则转步骤(3)，否则退出；

免疫扩散算子O_d可以描述为：

$$\boldsymbol{A}^{V}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_d(\boldsymbol{A}^{IV}(k))=[a_1^{V}(k),a_2^{V}(k),\cdots,a_n^{V}(k)],\ \forall\ i\in[1,\ n],\ a_i^{V}(k)\in\boldsymbol{A}^{V}(k)$$

三、夹持器结构参数优化流程，包括以下内容与步骤：

(1)基于夹持器夹持力F，并以夹持时接触力尽可能分布均匀且相等为目标，建立夹持器稳定夹持状态下参数优化的目标函数：

$$\min f(X)=\min((F_1-F_2)^2+(F_1-F_3)^2+(F_2-F_3)^2)$$

式中，X为夹持器结构参数变量集且$\boldsymbol{X}=[x_1\ x_2\ x_3\ x_4\ x_5\ x_6\ x_7\ x_8\ x_9\ x_{10}\ x_{11}\ x_{12}\ x_{13}\ x_{14}\ x_{15}]=[a_2\ a_5\ h_1\ h_2\ h_3\ l_2\ l_3\ l_5\ l_6\ \beta_1\ \beta_2\ \beta_3\ \varphi_1\ \varphi_2\ \varphi_3]$；

(2)设定夹持器参数变量集X的约束范围；

(3)初始化基于群体效应的免疫优化算法参数，及初始种群A(k)＝[a_1(k)，a_2(k)，…，a_n(k)]，k←0；

(4)免疫选择：A′(k)←O_s(A(k))＝[a′$_1$(k)，a′$_2$(k)，…，a′$_n$(k)]；

(5)免疫交叉：A″(k)←O_c(A′(k))＝[a″$_1$(k)，a″$_2$(k)，…，a″$_n$(k)]；

(6)免疫变异：A″′(k)←O_m(A″(k))＝[a″′$_1$(k)，a″′$_2$(k)，…，a″′$_n$(k)]；

(7)免疫集聚：$\boldsymbol{A}^{IV}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_g(\boldsymbol{A}'''(k))=[a_1^{IV}(k),a_2^{IV}(k),\cdots,a_n^{IV}(k)]$；

(8)免疫扩散：$\boldsymbol{A}^{V}(k)\leftarrow \boldsymbol{O}_d(\boldsymbol{A}^{IV}(k))=[a_1^{V}(k),a_2^{V}(k),\cdots,a_n^{V}(k)]$；

(9)终止条件判定，进化代数k是否达到最大代数?若是，则算法终止，并输出最优变量X*；否则k←k+1，并返回步骤(4)。

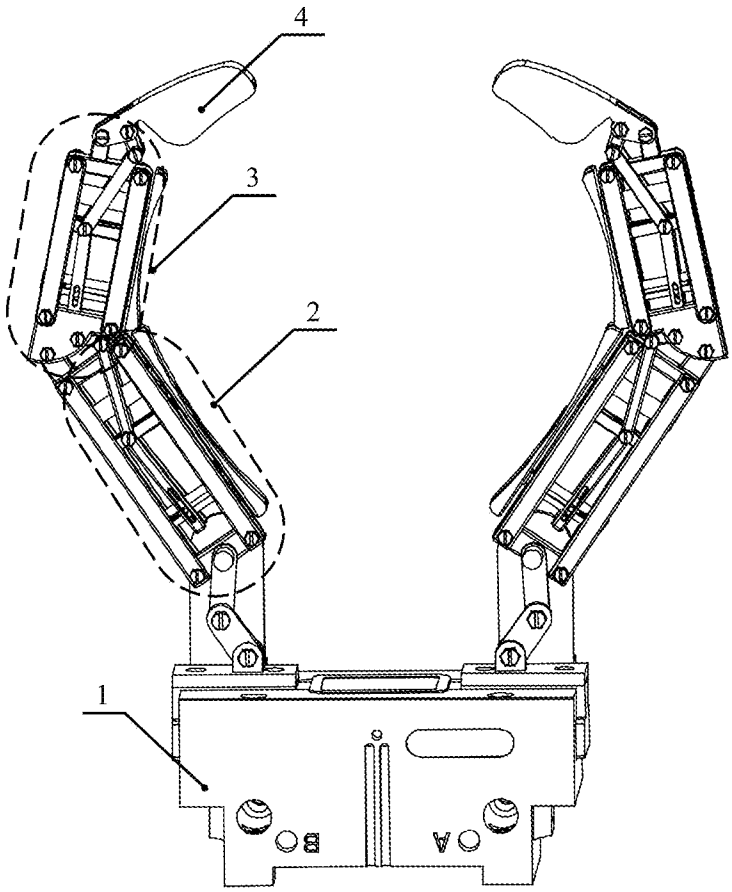


图 1

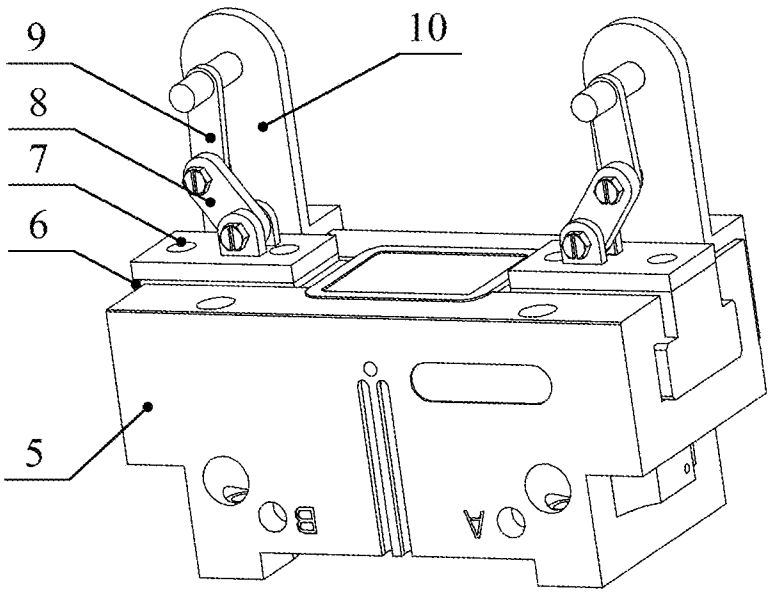


图 2

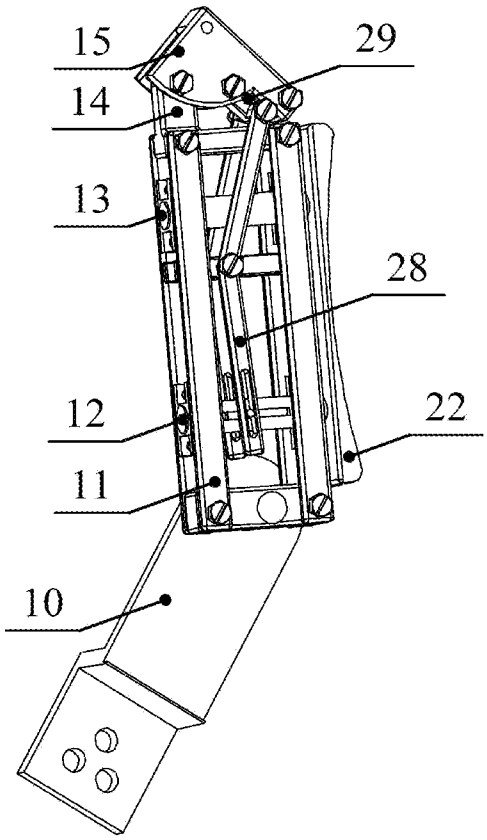


图 3

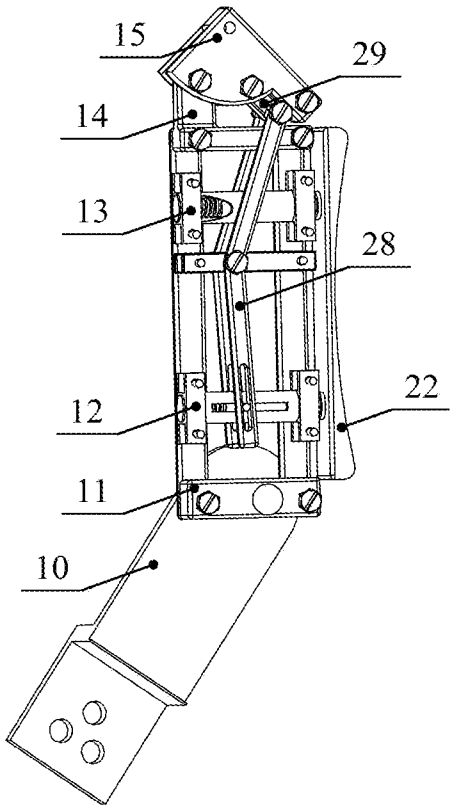


图 4

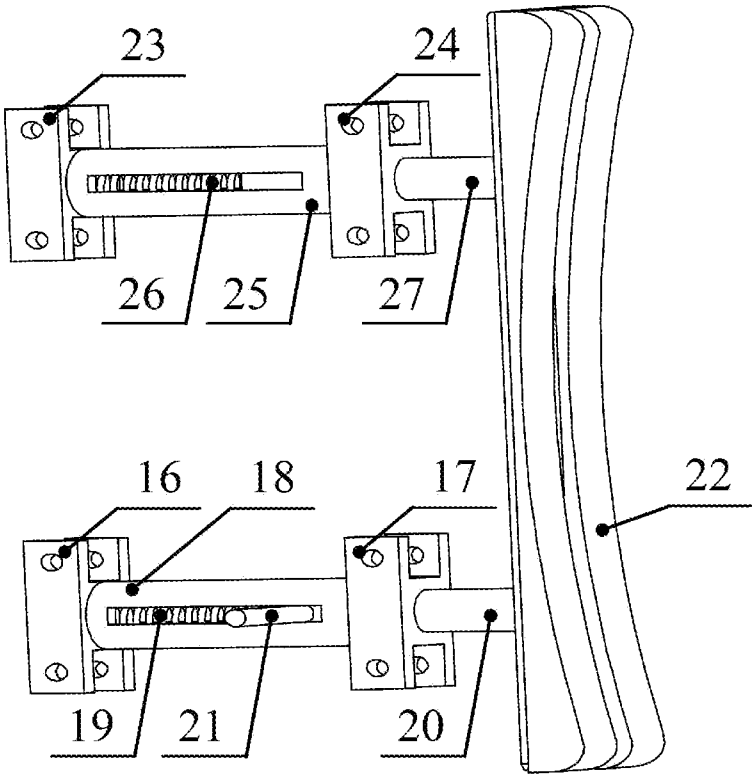


图 5

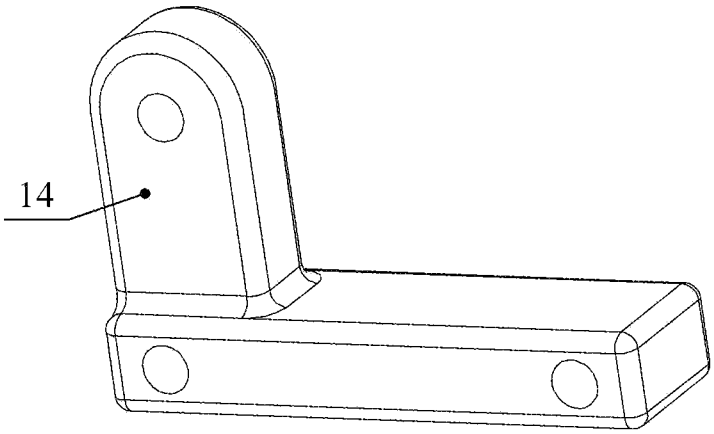


图 6

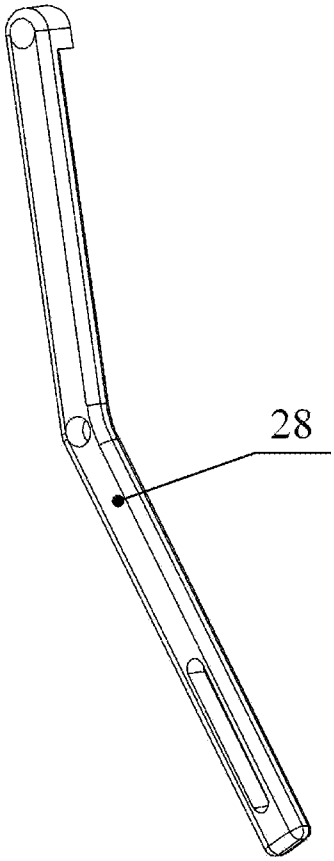


图 7

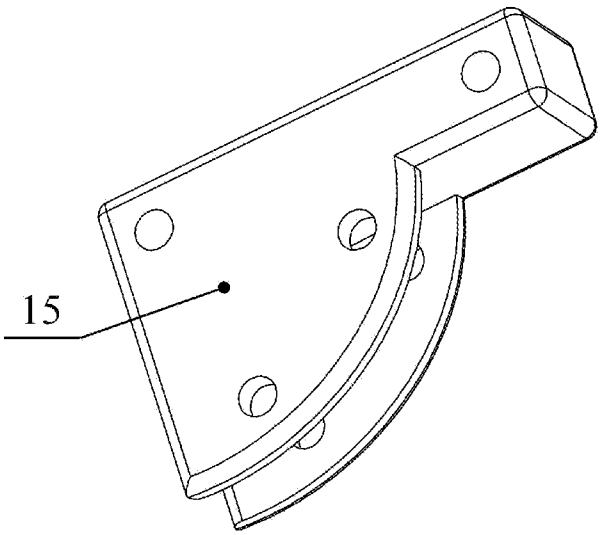


图 8

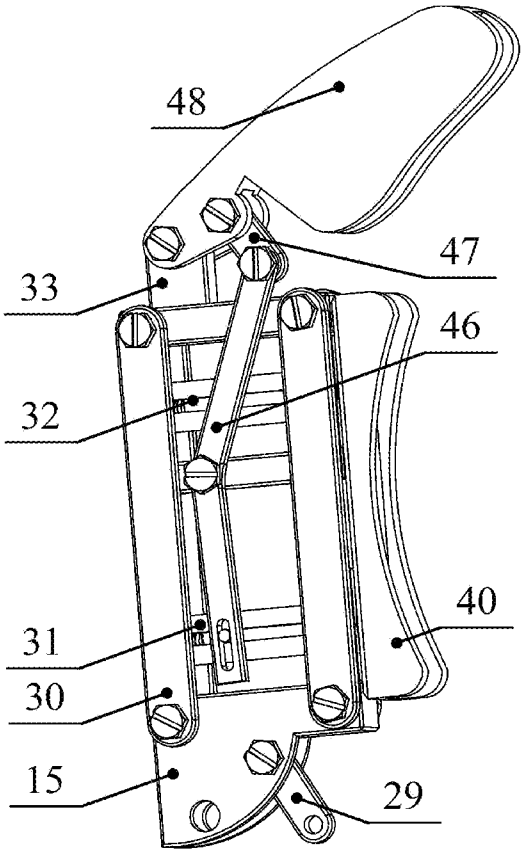


图 9

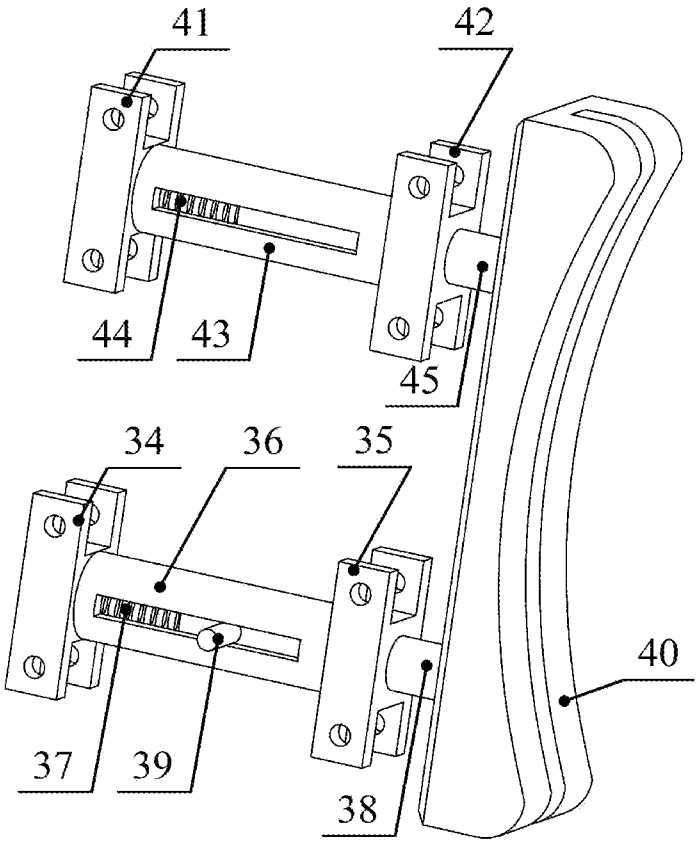


图 10

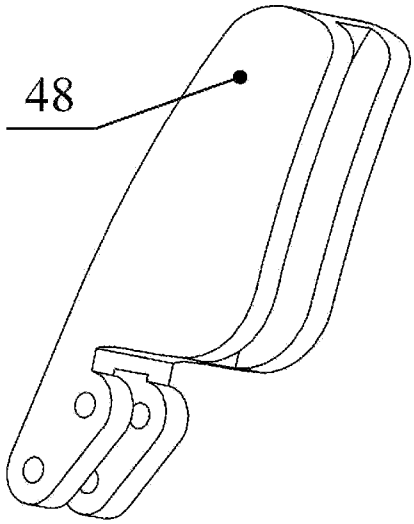


图 11

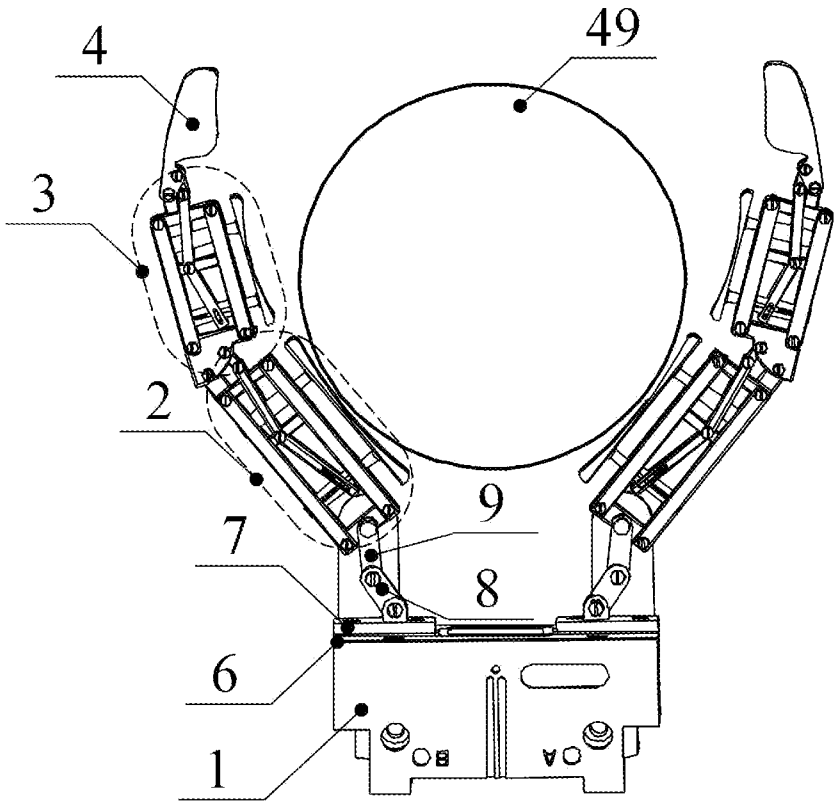


图 12

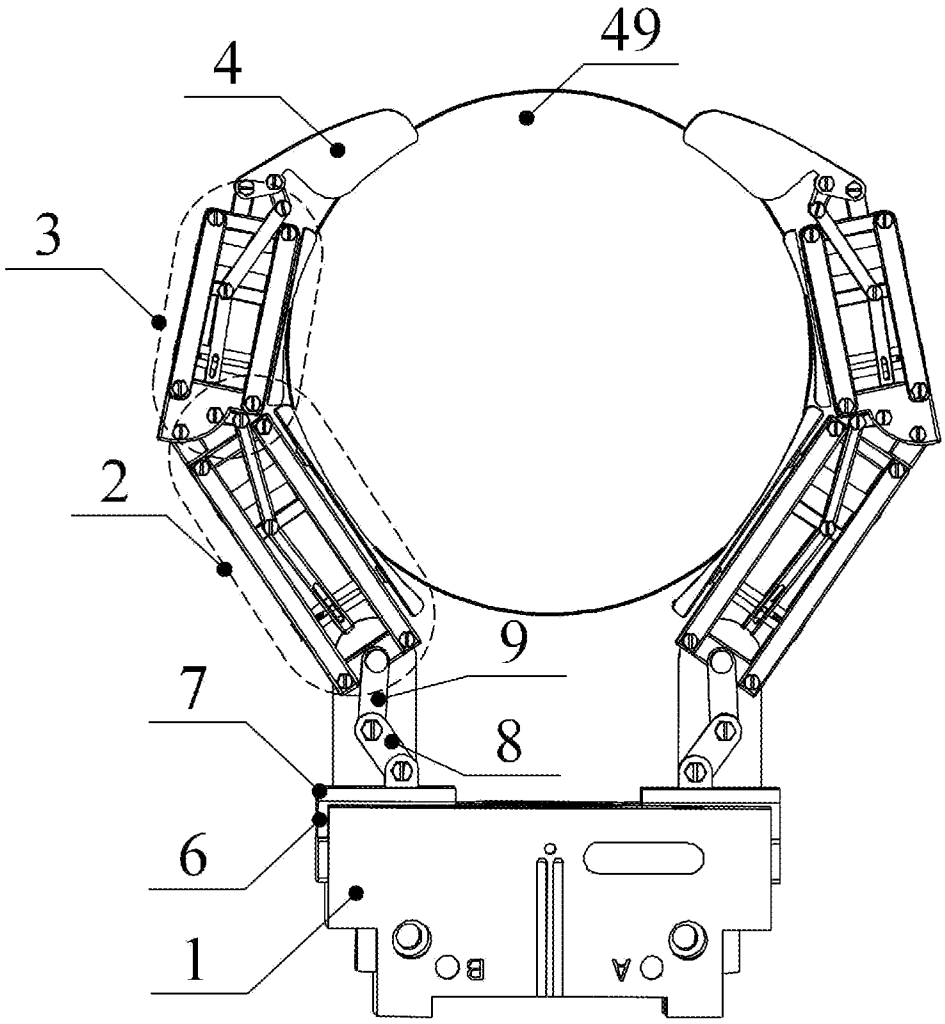


图 13

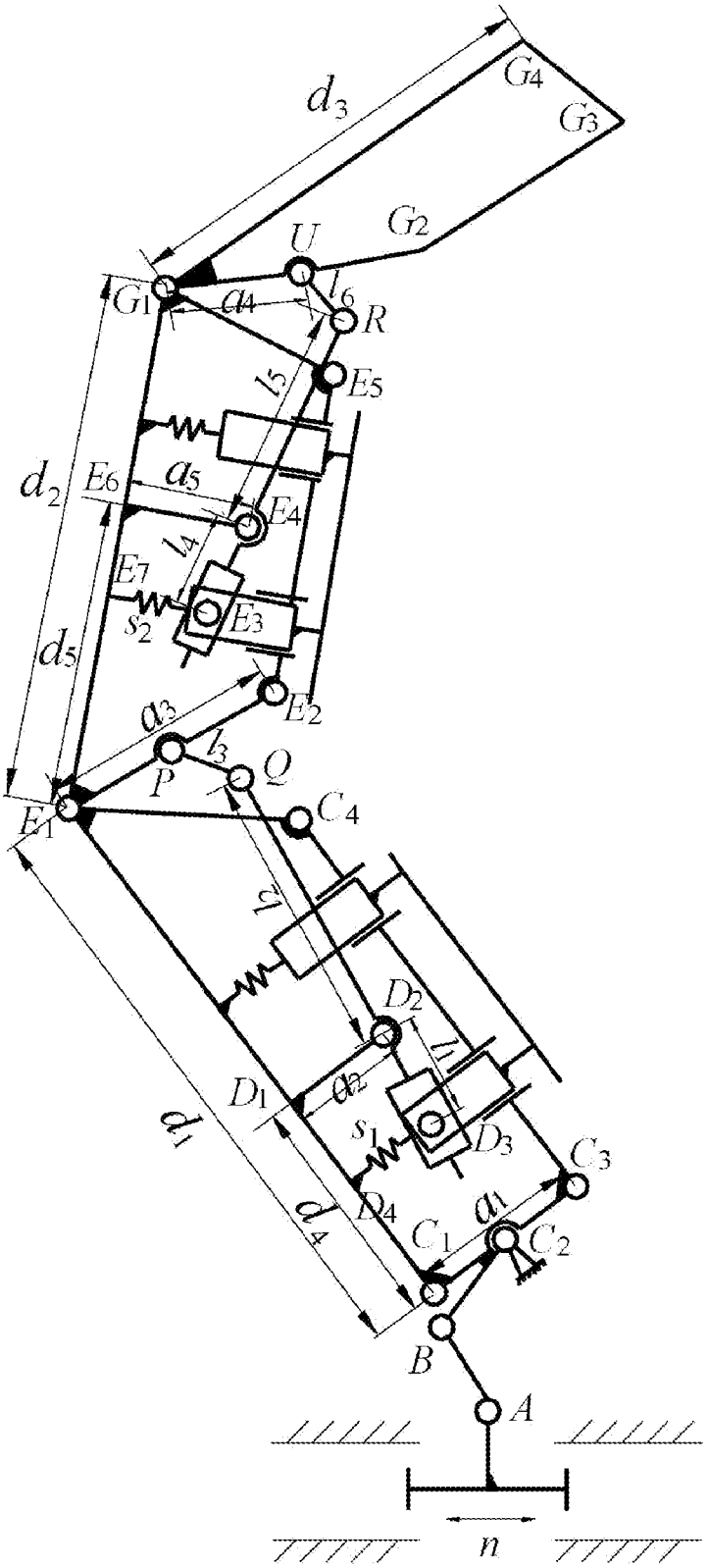

d_3
G_4
G_3
G_2
U
G_1
a_4
l_6
R
l_5
E_5
d_2
E_6
a_5
E_4
l_4
E_7
s_2
E_3
d_5
a_3
E_2
l_3
P
Q
E_1
C_4
l_2
D_2
l_1
D_1
a_2
d_1
s_1
D_3
C_3
D_4
a_1
d_4
C_1
C_2
B
A
n

图 14

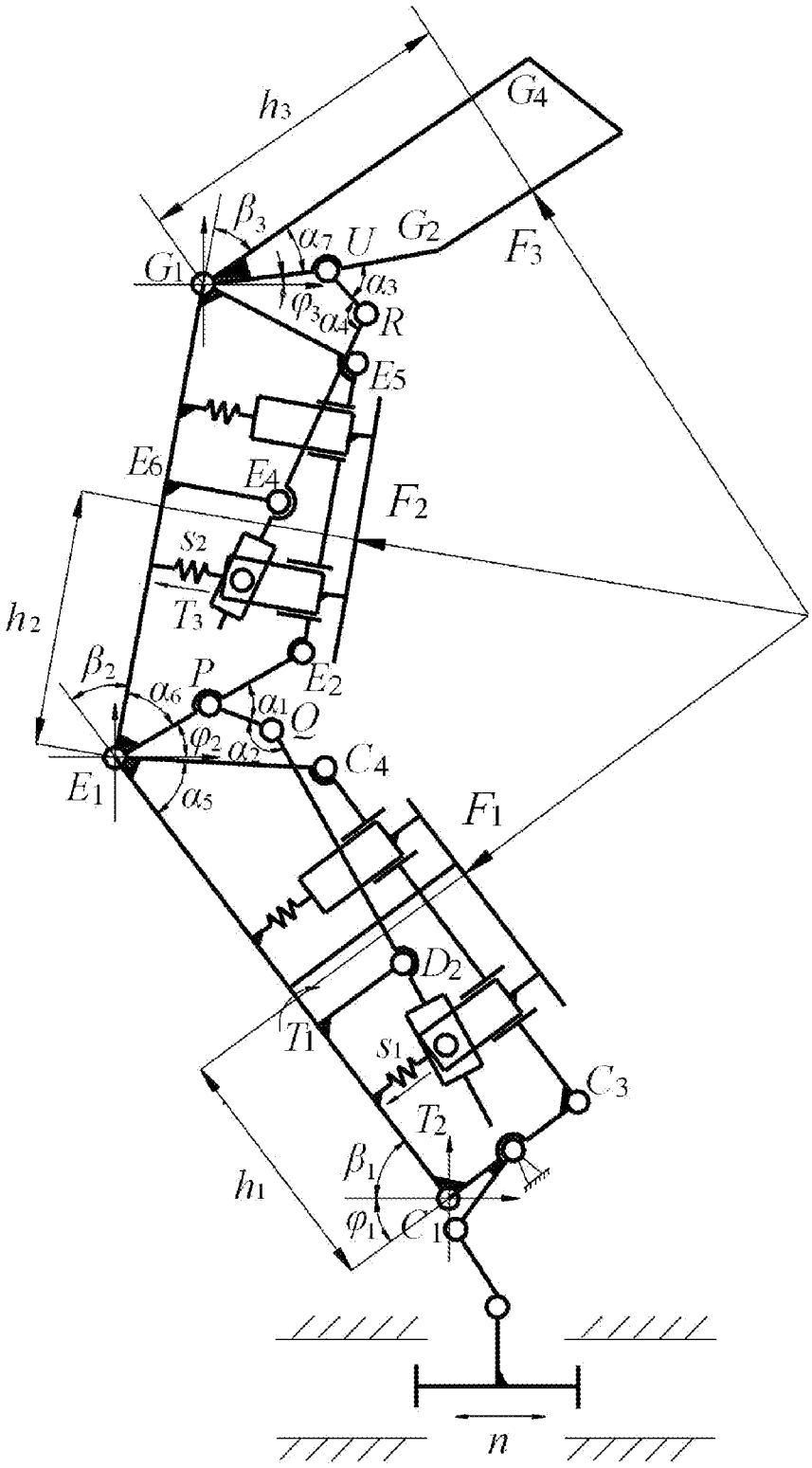

h3
G4
β3
α7
U
G2
F3
G1
α3
φ3
α4
R
E5
E6
E4
F2
s2
T3
h2
β2
α6
P
E2
α1
Q
φ2
α2
C4
E1
α5
F1
D2
T1
s1
C3
T2
β1
h1
φ1
C1
n

图 15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2022/131817

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B25J 15/08(2006.01)i; B25J 15/00(2006.01)i; B25J 15/02(2006.01)i; B25J 19/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B25J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNTXT; VEN; CNABS; CNKI; WOTXT; EPTXT; USTXT: 江苏科技大学, 申燚, 何淑婷, 手指, 指节, 中指, 拇指, 小指, 欠驱动, 自锁, 弹簧, 连杆, 杆件, 接触力, 夹持力, 免疫, 适应度, 算子, 交叉, 变异, finger, lock, spring, lever, rod, force, immune, algorithm

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 114851237 A (JIANGSU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 05 August 2022 (2022-08-05) claims 1-6, description, paragraphs [0123]-[0217], and figures 1-15	1-6
Y	CN 112621802 A (JIANGSU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 09 April 2021 (2021-04-09) description, paragraphs [0080]-[0149], and figures 1-12	1-6
Y	CN 107838934 A (BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 27 March 2018 (2018-03-27) description, paragraphs [0036]-[0051], and figures 1-6	1-6
Y	王敏 等 (WANG, Min et al.). "改进的免疫遗传算法在优化问题中的应用 (An Improved Immune Genetic Algorithm and Its Application)" *长沙大学学报 (Journal of Changsha University)*, Vol. 21, No. 5, 30 September 2007 (2007-09-30), ISSN: 1008-4681, pages 83-86	6
A	CN 101518903 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 02 September 2009 (2009-09-02) entire document	1-6

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
01 December 2022	**15 December 2022**

Name and mailing address of the ISA/CN	Authorized officer
China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088, China**	
Facsimile No. **(86-10)62019451**	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2022/131817

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KR 101989949 B1 (ROBOTNMORE CO., LTD.) 14 June 2019 (2019-06-14) entire document	1-6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2022/131817

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 114851237 A	05 August 2022	None	
CN 112621802 A	09 April 2021	CN 112621802 B	11 March 2022
		WO 2022116788 A1	09 June 2022
CN 107838934 A	27 March 2018	None	
CN 101518903 A	02 September 2009	CN 101518903 B	05 January 2011
KR 101989949 B1	14 June 2019	None	

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2022/131817

A. 主题的分类

B25J 15/08(2006.01)i; B25J 15/00(2006.01)i; B25J 15/02(2006.01)i; B25J 19/00(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

B25J

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNTXT;VEN;CNABS;CNKI;WOTXT;EPTXT;USTXT：江苏科技大学，申燚，何淑婷，手指，指节，中指，拇指，小指，欠驱动，自锁，弹簧，连杆，杆件，接触力，夹持力，免疫，适应度，算子，交叉，变异，finger，lock，spring，lever，rod，force，immune，algorithm

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 114851237 A (江苏科技大学) 2022年8月5日 (2022-08-05) 权利要求1-6，说明书第[0123]-[0217]段，附图1-15	1-6
Y	CN 112621802 A (江苏科技大学) 2021年4月9日 (2021-04-09) 说明书第[0080]-[0149]段，附图1-12	1-6
Y	CN 107838934 A (北京理工大学) 2018年3月27日 (2018-03-27) 说明书第[0036]-[0051]段，附图1-6	1-6
Y	王敏 等. "改进的免疫遗传算法在优化问题中的应用" 长沙大学学报，第21卷，第5期，2007年9月30日 (2007-09-30)， ISSN：1008-4681， 第83-86页	6
A	CN 101518903 A (清华大学) 2009年9月2日 (2009-09-02) 全文	1-6
A	KR 101989949 B1 (ROBOTNMORE CO LTD) 2019年6月14日 (2019-06-14) 全文	1-6

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

"T" 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

"X" 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

"Y" 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

"&" 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2022年12月1日	2022年12月15日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451	受权官员 朱哲 电话号码 (86-512) 88995589

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2022/131817

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	114851237	A	2022年8月5日	无			
CN	112621802	A	2021年4月9日	CN	112621802	B	2022年3月11日
				WO	2022116788	A1	2022年6月9日
CN	107838934	A	2018年3月27日	无			
CN	101518903	A	2009年9月2日	CN	101518903	B	2011年1月5日
KR	101989949	B1	2019年6月14日	无			