

文章编号: 1002-0446(2005)04-0313-06

一种新型 6-PUS 并联机构雕刻机

张世辉, 孔令富

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 对一种新型 6-PUS 并联机构雕刻机进行了研究. 在机构型式选定的基础上, 以一、二阶影响系数矩阵为依据对机构性能进行了分析, 由此可确定出运动学和动力学各项性能指标都较好的机构尺寸, 突破了以往仅以一阶影响系数矩阵为依据进行性能分析的局限性, 为设计性能优良的雕刻机机构尺寸提供了理论依据.

关键词: 并联机构; 雕刻机; 影响系数; 性能指标

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

A Novel 6-PUS Parallel Engraving Machine

ZHANG Shi-hui, KONG Ling-fu

(College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A novel 6-PUS parallel engraving machine is presented. Based on the selected mechanism type, the mechanism performances are analyzed in terms of the first and the second order influence coefficient matrixes. So the sizes of the mechanism, which are better for all the performance indexes of both kinematics and dynamics, can be determined and the restriction due to considering only the first order influence coefficient matrix in the past is broken through. Therefore, the theory basis for designing the mechanism size of novel engraving machine with better performances is provided.

Keywords: parallel mechanism; engraving machine; influence coefficient; performance index

1 引言 (Introduction)

传统的电脑雕刻机在机械加工、印染、娱乐等行业发挥了重大作用, 但存在刀具只能沿固定导轨进给、设备加工灵活性和机动性不够等缺陷. 由于并联机构具有刚度大、精度高、动力性能好等优点^[1], 将并联机构应用于雕刻领域, 可充分发挥其固有优势, 克服或弥补传统雕刻机的缺陷. 鉴于此, 本文提出了一种新型 6-PUS 并联机构雕刻机.

2 机构型式和坐标系 (Mechanism type and coordinate system)

机构型式的选择是设计新型雕刻机的第一步, 我们选用新型 6-PUS 并联机构的理由如下: 该机构与传统的并联机构相比, 采用基座平台和三立柱布局、高刚性铸件框架结构, 具有模块化程度高、精度高、造价低等优点. 具体模型如图 1 所示.

1. 第一丝杠
2. 第二丝杠
3. 定长连杆
4. 动平台
5. 基座上平面
6. 基座立柱
7. 基座下平台

图 1 6-PUS 并联机构模型图

Fig. 1 The model of 6-PUS parallel mechanism

由图1可见, 6-PUS 并联机构由基座、动平台和 6 个相同结构的支链组成. 支链和基座通过移动副 (P) 连接, 移动副滑块通过虎克铰 (U) 与定长连杆的上端连接, 定长连杆下端通过球铰 (S) 与动平台连接, 故称为 6-PUS 并联机构.

6-PUS 并联雕刻机机构坐标系如图 2 所示.

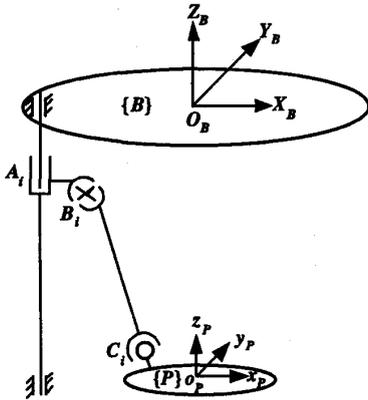


图2 6-PUS 并联雕刻机机构坐标系示意图

Fig. 2 Coordinate system of 6-PUS parallel engraving machine mechanism

基座上平面和动平台平面的几何中心分别设为 O_B 和 o_p , 各分支中移动副、虎克铰和球铰中心分别标记字母 A_i 、 B_i 和 C_i ($i = 1, 2, \dots, 6$). 定坐标系 $O_B-X_B Y_B Z_B$ 固联于基座上, 简记为 $\{B\}$, 坐标系原点位于基座上平面几何中心, Z_B 轴垂直于基座上平面且指向朝上, Y_B 轴沿第一分支丝杠中心线与第二分支丝杠中心线的角平分线方向且指向向外, X_B 轴可由右手定则来确定. 设与动平台固联的坐标系为

PerformanceAnalysis 算法如下描述:

PerformanceAnalysis

Begin

For $L = 45$ To 55 //定长连杆变化范围

For $R = 10$ To 20 //动平台半径变化范围

SamplePointNumber = 0; //初始化每个机构采样点个数为 0

For $x =$ 沿 X 轴负向最大位移 To 沿 X 轴正向最大位移 Step 4cm

For $y =$ 沿 Y 轴负向最大位移 To 沿 Y 轴正向最大位移 Step 4cm

For $z =$ 沿 Z 轴负向最大位移 To 沿 Z 轴正向最大位移 Step 4cm

For $\alpha =$ 绕 X 轴顺时针最大转角 To 绕 X 轴逆时针最大转角 Step 12°

For $\beta =$ 绕 Y 轴顺时针最大转角 To 绕 Y 轴逆时针最大转角 Step 12°

For $\gamma =$ 绕 Z 轴顺时针最大转角 To 绕 Z 轴逆时针最大转角 Step 12°

If 采样点 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \in$ 机构可达工作空间中的点

求机构在该点的一阶影响系数矩阵及其 Frobenius 范数;

If 一阶影响系数矩阵非奇异

SamplePointNumber = SamplePointNumber + 1;

$o_p-x_p y_p z_p$, 简记为 $\{P\}$, 原点位于动平台几何中心, 动平台坐标系在初始状态下与基座坐标系方位完全相同. 设动平台几何中心 o_p 在 $\{B\}$ 中的坐标为 $(0, 0, Z)$ 且没有相对于各轴的转动时的位形作为机构的初始位形, 其中 Z 随机构尺寸变化而变化. 以此坐标系为基础, 可求出各支链不同位形时的一、二阶影响系数矩阵, 进而求出该机构不同位形时的一、二阶影响系数矩阵 $[G_q^H]_{6 \times 6}$ 和 $[H_q^H]_{6 \times 6 \times 6}$, 关于影响系数的意义和详细求解方法可参考文献 [1].

3 雕刻机性能分析和尺寸的确定 (Performance analysis and confirmation of size for engraving machine)

3.1 性能分析算法描述

机构性能随机构尺寸变化而不同, 为了使雕刻机尺寸有较好的运动学和动力学性能指标, 在保持机构其它参数固定不变的情况下, 以定长连杆长度 L 在 $45\text{cm} \sim 55\text{cm}$ (步长 1cm)、动平台半径 R 在 $10\text{cm} \sim 20\text{cm}$ (步长 1cm) 之间变化时所得到的 121 个机构为研究对象. 每个机构在其工作空间内用算法 PerformanceAnalysis 确定其位形采样点, 然后计算相应的一、二阶影响系数矩阵, 进而计算机构在该采样点的各项性能指标并最终画出该组机构所对应的各项全域性能图谱. 为描述方便, 把一、二阶影响系数矩阵 $[G_q^H]_{6 \times 6}$ 和 $[H_q^H]_{6 \times 6 \times 6}$ 分别简记为 G 和 H , 并用 G_ω 、 H_ω 和 G_v 、 H_v 分别表示一、二阶影响系数矩阵中角速度和线速度的子矩阵部分, 即 $G = \begin{pmatrix} G_\omega \\ G_v \end{pmatrix}$ 和 $H =$

$$\begin{pmatrix} H_\omega \\ H_v \end{pmatrix}$$

```

求二阶影响系数矩阵及其 Frobenius 范数；
据公式求该点条件数并求性能度量指标累加和；
//具体公式将在性能分析中部分给出
Endif
Endif
Endfor
Endfor
Endfor
Endfor
Endfor
Endfor
Endfor
Endfor
求当前尺寸下机构所对应的各项性能指标并把结果追加进相应的性能指标数据文件；
//机构性能指标 = 各采样点性能度量指标累加和 / SamplePointNumber
//共有 6 个性能指标数据文件：角速度、线速度、角加速度、线加速度、力与力矩、惯性力
Endfor
Endfor
根据各性能指标数据文件（均包含 121 个机构的信息）画出 6-PUS 机构的各项全域性能图谱；
//共有 6 个性能图谱：角速度、线速度、角加速度、线加速度、力与力矩、惯性力
End
    
```

通过改变算法 PerformanceAnalysis 中机构参数的选取和调整各变量的步长可满足不同实际分析的需要。该算法编程实现后可得到 6-PUS 机构的各项全域性能图谱（图 3 到图 8），根据图谱可对其性能进行分析。表 1 给出了运行过程中 121 个机构分别

搜索到位形采样点的数量，序号为 1 的机构对应的定长连杆长度为 45cm，动平台半径为 10cm；序号为 121 的机构对应的定长连杆长度和半径分别为 55cm 和 20cm，其它依次类推。

表 1 实验中 121 个机构对应的采样点数
Table 1 The sample point numbers of 121 mechanisms in experiment

序号	采样点数	序号	采样点数												
1	30962	15	26874	29	20492	43	13852	57	52794	71	41040	85	27942	99	17136
2	28074	16	23906	30	17530	44	11516	58	47350	72	35562	86	23204	100	81766
3	25848	17	21026	31	14848	45	52222	59	42390	73	30592	87	19196	101	74616
4	23252	18	18252	32	12466	46	47554	60	37410	74	25994	88	15858	102	66882
5	20816	19	15784	33	10422	47	43064	61	32446	75	21628	89	75848	103	59488
6	18368	20	13376	34	46608	48	38090	62	27818	76	17898	90	68936	104	52150
7	16168	21	11304	35	42654	49	33780	63	23586	77	14718	91	62052	105	45198
8	13824	22	9464	36	38406	50	29516	64	19902	78	69740	92	55164	106	38610
9	11936	23	41324	37	34386	51	25254	65	16442	79	63616	93	48462	107	32468
10	10106	24	37446	38	30214	52	21500	66	13696	80	57254	94	41880	108	27122
11	8490	25	34194	39	26674	53	18098	67	63950	81	50898	95	35792	109	22328
12	35554	26	30464	40	22830	54	15154	68	58034	82	44428	96	30158	110	18462
13	32872	27	27038	41	19510	55	12570	69	52506	83	38696	97	25188	111	88256
14	29628	28	23648	42	16410	56	58068	70	46696	84	33070	98	20736	112	79990

另外，表 2 仅给出了部分机构各项性能指标的具体值，其中，“序号”的含义同表 1。

表2 部分机构的各项性能指标
Table 2 Six performance indices of some mechanisms

序号	采样点数	角速度指标	线速度指标	角加速度指标	线加速度指标	力与力矩指标	惯性力指标
1	30962	0.17276	0.17442	0.06236	0.11315	0.01521	0.37454
2	28074	0.18248	0.18171	0.08075	0.13276	0.01456	0.40421
3	25848	0.19128	0.18836	0.09932	0.15184	0.01396	0.43136
4	23252	0.20087	0.19545	0.11897	0.17225	0.01348	0.46030
...
59	42390	0.21105	0.18995	0.10050	0.15604	0.01304	0.40233
60	37410	0.21915	0.19537	0.11308	0.17355	0.01257	0.42606
61	32446	0.22717	0.20041	0.12312	0.19230	0.01216	0.44929
...
119	28942	0.25779	0.20680	0.12265	0.22596	0.01064	0.47030
120	23998	0.26786	0.21185	0.12116	0.24139	0.01041	0.49500
121	19828	0.27714	0.21610	0.11399	0.25527	0.01017	0.51745

3.2 运动学性能分析

3.2.1 角速度和线速度性能分析

由于雕刻机机构的一阶影响系数矩阵 G 不是常数矩阵, 导致并联机构基于影响系数矩阵的角速度和线速度的合理度量指标也不是常数, 从而无法用一个量来度量某一并联机构性能的好坏, 并联机构角速度和线速度的全域性能度量指标可分别定义为^[2]:

$$\eta_{c_{\omega}} = \frac{\int_W \frac{1}{K_{c_{\omega}}} dW}{\int_W dW} \text{ 和 } \eta_{c_v} = \frac{\int_W \frac{1}{K_{c_v}} dW}{\int_W dW} \quad (1)$$

式中, W 为机构的可达工作空间, $K_{c_{\omega}} = \|G_{\omega}^+\| \cdot \|G_{\omega}^+\|$ 和 $K_{c_v} = \|G_v^+\| \cdot \|G_v^+\|$ 分别表示角速度和线速度的条件数(其中, $\|\cdot\|$ 表示矩阵的 Frobenius 范数, 上标“+”表示矩阵的广义逆矩阵, 下同)。根据每一机构工作空间中大量位形采样点的条件数由式(1)可分别得到每一机构角速度和线速度性能指标的具体值, 用式(1)中的两个公式分别取代算法 PerformanceAnalysis 中的下划线部分后, 由所有 121 个机构的角速度和线速度性能指标的具体值, 可分别得到如图 3 和图 4 所示的角速度和线速度性能图谱。

根据 $\eta_j (j \in \{G_{\omega}, G_v\})$ 越大, 机构灵巧度和控制精度越高的原则, 由图 3 可看出机构角速度的性能指标在动平台半径 R 变化范围不大时, 基本不随连杆长度 L 的变化而变化, 但有 R 越大角速度的性能指标也越好的趋势, 且在 $L = 46.5\text{cm} \sim 49.5\text{cm}$ 和 $R = 19.5\text{cm}$ 附近, 机构角速度指标较好, 即角速度

输出误差较小。同理, 由图 4 可知机构在 $L = 45\text{cm} \sim 48\text{cm}$ 和 $R = 19\text{cm}$ 附近, 机构线速度指标较好, 即线速度输出误差较小。

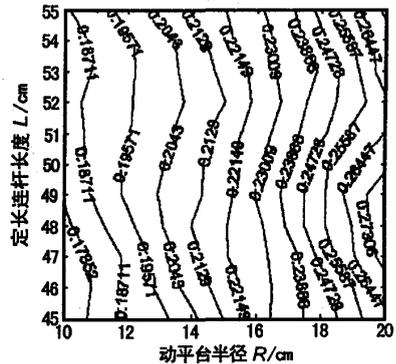


图3 角速度全域性能图谱

Fig. 3 Atlas of global performance of angular velocity

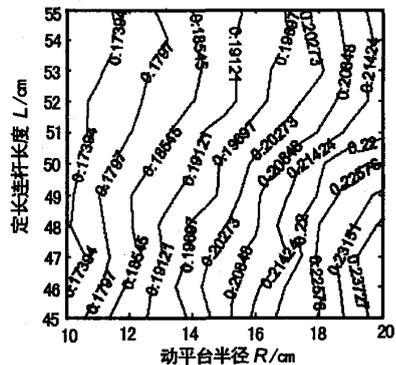


图4 线速度全域性能图谱

Fig. 4 Atlas of global performance of linear velocity

3.3.2 惯性力性能分析

综合考虑一阶、二阶影响系数矩阵时6自由度并联机构的惯性力条件数为^[2]:

$$K_{G+H} = \sqrt{6} (\|G\| + \|H\| + (\| [G_w]_1 \| + \| [G_w]_2 \| + \| [G_w]_3 \|) \|G_w\|) \quad (7)$$

式中, $[G_w]_i$ 表示矩阵 G_w 的第 i 行, $i=1,2,3$.

则雕刻机惯性力全域性能指标定义为:

$$\eta_{G+H} = \frac{\int_W \frac{1}{K_{G+H}} dW}{\int_W dW} \quad (8)$$

显然, 此时 η_{G+H} 的值越大, 机构的惯性力越小, 控制精度越高. 用式(8)取代算法 Performance Analysis 中的下划线部分可得到 6-PUS 并联机器人机构的惯性力全域性能图谱如图 8 所示. 仔细观察图 8 可知, 该机构的惯性力性能指标有随连杆长度增长和动平台半径的增大而变得更好的趋势, 且在 $L = 45\text{cm} \sim 48\text{cm}$ 和 $R = 19.5\text{cm}$ 附近, 机构的惯性力性能指标较好, 即机构的惯性力性能较好, 惯性力最小, 灵敏性最好, 灵巧度最高.

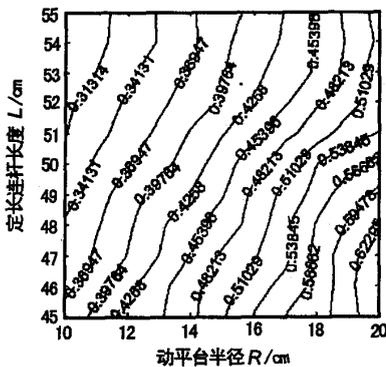


图 8 惯性力全域性能图谱

Fig. 8 Atlas of global performance of inertia force

3.4 雕刻机尺寸设计结果

综合上述理论分析结果可知, 在 $L = 45\text{cm} \sim 47\text{cm}$ 和 $R = 19\text{cm}$ 附近, 6-PUS 雕刻机机构除力与力矩性能指标不太好外, 其它5项性能指标相对都较

好. 同理, 当机构其它参数发生变化时, 性能指标分析方法与上述类似. 据此, 我们最终设计的新型 6-PUS 并联机构雕刻机的尺寸如下:

定长连杆长度 $L = 46\text{cm}$, 动平台半径 $R = 19\text{cm}$, 底座平台半径 38cm , $\{\varphi_{P1}, \varphi_{P2}, \varphi_{P3}, \varphi_{P4}, \varphi_{P5}, \varphi_{P6}\} = \{45^\circ, 135^\circ, 165^\circ, 255^\circ, 285^\circ, 15^\circ\}$, $\{\phi_{B1}, \phi_{B2}, \phi_{B3}, \phi_{B4}, \phi_{B5}, \phi_{B6}\} = \{82^\circ, 97^\circ, 202^\circ, 217^\circ, 322^\circ, 337^\circ\}$, $\varphi_C = 30^\circ$, $\phi_A = 15^\circ$. 其中, $\varphi_{Pi} (i=1, 2, \dots, 6)$ 是动平台中心 o_p 到铰链点 C_i 的连线与动平台坐标系 x_p 轴正向的夹角, $\phi_{Bi} (i=1, 2, \dots, 6)$ 是定平台中心 O_B 到铰链点 A_i 的连线和底座坐标系 X_B 轴正向的夹角. φ_C 和 ϕ_A 分别是连杆 6 个下铰链点 C_i 和 6 个上铰链点 A_i 各自组成的六边形较小的中心角.

实际运行考察和仿真实验结果验证了上述设计结果的正确性, 并得到了如下结论: 在一般情况下, 不存在运动学和动力学各项性能指标同时都较好的雕刻机尺寸, 只能根据实际情况选择出对各项指标相对都较好的机构尺寸.

4 结论 (Conclusion)

在机构型式选定的基础上, 通过改变雕刻机机构的尺寸得到了一组机构, 并对其性能进行了分析, 由此可通过性能指标随机构尺寸的变化趋势来确定机构尺寸的选取原则, 为更快、更好地设计性能优良的 6-PUS 并联机构雕刻机尺寸提供了依据. 此外, 文中方法也可适用于其它型式的并联机构, 从而为未来新型雕刻机的进一步研制做了有益的探索.

参考文献 (References)

[1] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
 [2] 郭希娟. 并联机器人机构动力学基础理论的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2002.
 [3] 郭希娟, 黄真. 并联机器人机构加速度的性能指标分析[J]. 中国机械工程, 2002, 13(24): 2087-2091.

作者简介:

张世辉 (1973-), 男, 讲师, 博士研究生. 研究领域: 并联机器人, 智能信息处理.

孔令富 (1957-), 男, 教授, 博导. 研究领域: 并联机器人, 智能信息处理, 并行/分布式计算机系统, 计算机视觉等.