

工业机器人手腕负载能力的研究

杨海斌 李 祥

成都卡诺普机器人技术股份有限公司 四川成都 610000

摘要: 工业机器人的主要性能指标: 负载能力, 为机器人手腕前端安装负荷在工作范围内任何位置所能承受的最大重量, 一般用质量、力矩、惯性矩表示, 与运行速度, 加速度大小, 方向有关。通过对六轴工业机器人的减速机容许力矩与伺服电机功率特性进行研究, 为国产机器人负载匹配的正向开发提供参考。以减速机的启停容许转矩与伺服电机的 NT 特性进行机器人的容许力矩匹配, 以伺服电机的控制性与平衡性进行惯量比因子的确认, 推导出机器人腕部负载的容许惯性力矩。对机器人按容许最大负载进行加载测试, 利用激光跟踪仪采集轨迹精度、重复定位精度; 同时, 测试减速机负载特性与伺服电机表面温度, 实验结果表明所推导的腕部负载能力确认方法符合实际应用特性及设计目标。

关键词: 工业机器人; 手腕负载能力; 手腕负载图; 精度

Research on wrist load capacity of industrial robot

Haibin Yang, Xiang Li

CRP Automatic Control Technology Co., Ltd. , Chengdu,Sichuan, 610000,China

Abstract: The main performance index of industrial robots: is load capacity, for the robot wrist front installation load in the working range of any position can bear the maximum weight, generally expressed by mass, moment, and moment of inertia. It depends on the speed, the magnitude of the acceleration, and the direction. By studying the allowable torque of the reducer and the power characteristics of the servo motor of the six-axis industrial robot, this paper provides a reference for the forward development of the load matching of the domestic robot. The allowable torque of the robot was matched by the allowable torque of the start and stop of the reducer and the NT characteristics of the servo motor. The inertia ratio factor was confirmed by the control and balance of the servo motor, and the allowable inertia moment of the robot wrist load was deduced. The loading test of the robot was carried out according to the maximum allowable load, and the trajectory accuracy and repeated positioning accuracy were collected by the laser tracker. At the same time, the load characteristics of the reducer and the surface temperature of the servo motor were tested. The experimental results show that the deduced wrist load capacity confirmation method conforms to the practical application characteristics and design objectives.

Keywords: Industrial robots; Wrist load capacity; Wrist load diagram; precision

我国是制造业大国, 制造业增加值已连续 11 年位居世界第一, 并且是全球唯一一个拥有联合国产业分类中所列全部工业门类 41 个工业大类、207 个中类、666 个小类的国家, 具有世界上最为健全的工业体系。

就工业机器人领域, 我国起步较晚, 相对四大家族工业机器人, 还存在不小的差距。在核心技术难以突破方面, 国产机器人目前仍面临着很多挑战。目前国产机器人对手腕负载能力的确定还没有一个准确的定义, 都参照进口机器人的参数指标进行标定。而负载能力作为机器人的关键性能指标, 超出承载能力使用时, 可能会导致机器人运动性能变坏, 并会缩短机器人的使用寿命

通过实例研究, 对工业机器人的容许力矩与容许惯性力矩进行匹配, 提供一种有效的方法, 更加准确地定义机器人负载能力。

以国产机器人先锋卡诺普的: CRP-RA22-80 进行说明, 通过样本手册, 可以得到机器人的主要性能参数包含: 自由度、关节、工作范围、运行速度、负载能力、精度。

表 1 工业机器人主要参数

手臂形式	垂直多关节
动作自由度	6 轴
最大负载	80KG

一、工业机器人的主要参数

运动范围和最大速度	JT	运动范围	最大速度
	1轴	-180° ~ 180°	150° /S
	2轴	-160° ~ 75°	160° /S
	3轴	-80° ~ 165°	165° /S
	4轴	-360° ~ 360°	255° /S
	5轴	-215° ~ 35°	255° /S
手腕负载能力	JT	力矩	惯性矩
	4轴	328N.m	35.06kg.m ²
	5轴	328N.m	35.06kg.m ²
	6轴	198N.m	15.38kg.m ²
重复定位精度		± 0.08mm	
最大覆盖范围		2200mm	
本体重量		713KG	
安装方式		落地式	
噪音等级		< 80dB(A)	

机器人的承载能力（包括工具的质量），随机器人的机型而定。均遵守下列对机器人的绕各腕关节（JT4，JT5，JT6）的负载力矩和负载惯性力矩的限制。

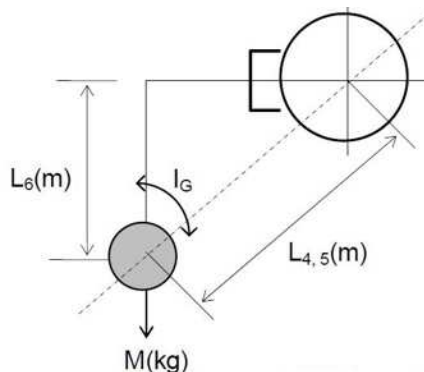


图1 负载关系图

负载质量（包含工件）： $M \leq M_{max}(\text{kg})$

负载力矩表示：

公式 1: $T = M * 9.8 * L$

负载惯性力矩表示：

公式 2: $I = M * L^2 + I_G$

式中，L: 旋转轴中心到负载质心间的离，L4（5），J4（5）旋转轴中心到负载质心间的距离，L6: J6 旋转轴中心到负载间的距离；IG: 绕重心的惯性力矩

二、手腕容许负载能力匹配

要准确地确认手腕负载能力，须掌握减速机的型号，电机参数及传动件的物理信息。就 CRP-RA22-80 机器人已知配置参数：

表 2 CRP-RA22-80 已知参数

关节		J4	J5	J6
减速机	型号	RV50C	RV42N	RV35E
	启停容许转矩 N.m	1225	1029	595
	额定转矩 N.m	490	412	238
	速比	32.54	80	105
电机	功率 kw	1.5	1.5	1
	最高转速 rpm	295	295	233
	最高转速下转矩 N.m	4	4	2.8
	惯量 kg.mm ²	295	295	233
综合速比		133.59	157.33	105
本体自重稳定扭矩 N.m		45.53	14.46	0.01
本体自重惯量 kg.m ²		1.089	0.234	0.011
传动总效率		69.8%	72.2%	75%

2.1 容许力矩的匹配

所谓容许力矩，就是以保证减速机，电机额定使用寿命下正常工作特性。如果在减速机输出侧还有二级传动机构，需要考虑传动效率，电机作为动力源输出，在核定容许力矩时，需要考虑传动效率。根据 6 轴机器人传动特性，J4、J5 轴的容许力矩取小者。

根据减速机的特性匹配，所容许的力矩 T_v ：

公式 3: $T_v = T_s / 3$

式中， T_s 为减速机的启停容许转矩

根据电机特性匹配，所容许力矩 T_M ：

公式 4: $T_M = T_n * N * \eta$

式中， T_n 为电机最高转速下的转矩；N 为传动的总速比； η 为传动总效率（与减速机，轴承，同步带等传动因素相关）；

由减速机与电机特性所容许的力矩包含了关节输出端的本体自身重量特性，要得出实际的负载容许力矩 T_j ：

公式 5: $T_j = \min(T_v, T_M) - T$

式中，T 为关节输出端本体自重下产生的稳定扭矩
将已知数据供代入计算如下：

关节	J4	J5	J6
减速机容许力矩 T_v	408	343	198
电机容许力矩 T_M	373	454	221
负载容许力矩 T_j	328	329	198
注: J4,J5 轴容许力矩取小者			

2.2 容许惯性矩的匹配

负载惯性矩可以超过限制使用，一定要实施负载的设定（为优化加减速速度，运动有可能变慢）。在错误设定下运行机器人时，可能会导致运动性能变坏，损坏机器人的传动部件及机械构件。所以，通常以惯量比来计算负载的容许惯性力矩。

惯量比越小，精度越高，控制性越灵敏，惯量比越大，稳定性越高，控制性越差，在保证精度与稳定性的平衡点，根据企业经验，将J4,J5轴惯量比取值为：3.5 ~ 6；J6轴惯量比值为：5 ~ 10；此处的惯量比指的：低速端 / 高速端。

高速端的惯量由电机、减速机与传动件组成，通过机械结构已知高速端惯量值，求出容许惯性力矩 I_j ：

$$\text{公式 4: } I_j = I_r * n * N^2 - I_g$$

式中， I_r 为高速端的惯量； n 为惯量比因子， N 为速比； I_g 为本身自身惯量；

将已知数据供代入计算如下：

关节	J4	J5	J6
高速端惯量 kg.m^2	579	608	279
容许惯性力矩 kg.m^2	35.06	52.45	15.38
	60.87	90.07	30.77
注：J4,J5 轴容许惯性力矩取小者			

2.3 负载允许范围

根据绕腕关节（J4,J5,J6）的负载力矩与负载惯性力矩值，以满足下图的允许范围。

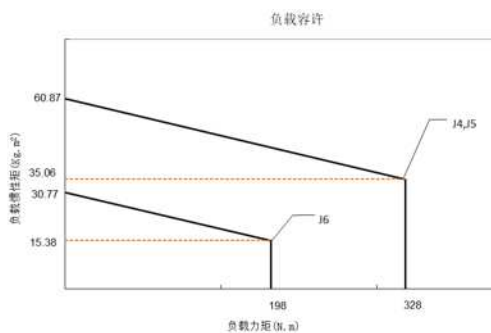


图2 负载限制图

三、工具负载容许

手腕负载图根据实际负载重量进行校准，使其负载均在符合图2的负载限制，规范的负载图是机器人整机企业与客户最直接交流的可视化图表，用户使用有最精准的参考。机器人的负载工具如图3坐标关系：

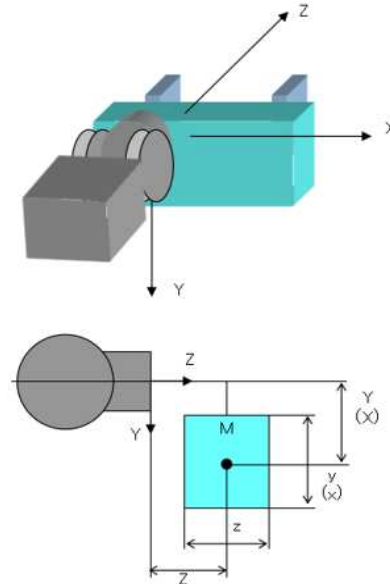


图3 负载工具坐标图

3.1 负载力矩图

作为机器人允许偏置通常以腕部末端的径向偏置与轴向偏置进行表示，径向偏置以 J6 轴减速机容许力矩进行计算，轴向偏置以 J4J5 轴减速机容许力矩进行计算，此处以 80kg 负载为例。

容许径向偏置距离 L_j ；容许轴向偏置距离 L_z ；分别如下公式：

$$\text{公式 5: } L_z = T_{j45} / (M * 9.8) - L_0$$

公式 6:

$$L_{zj} = \sqrt[3]{(T_{j45} / (M * 9.8))^2 - L_j^2} - L_0$$

式中， M 为负载的质量； T_{j6} 为 J6 轴负载容许力矩； T_{j45} 为 J4J5 轴负载容许力矩最小值； L_0 为腕末端到 J5 轴旋转中心距离， L_{zj} 为最大径向偏置时的容许轴偏距离。

以额定负载 80kg， $T_{j6} = 198\text{N.m}$ ； $T_{j45} = 328\text{N.m}$ ，腕部末端到 J5 中心距离 $L_0 = 169$ ，代入计算如下：

$$L_j = 198 / (80 * 9.8) = 252.96\text{mm}$$

$$T_{j6} - (328 / (80 * 9.8))^2 - 169 = 8\text{mm}$$

$$L_{zj} = \sqrt[3]{(328 / (80 * 9.8))^2 - 252.96^2 - 169} = 163.54\text{mm}$$

同理，以不同负载代入，便可计算出相应的偏置距离，以 J5 轴旋转中心，轴向偏置距离 L_z 为半径，圆弧交于径向偏置距离 L_{zj} ，为负载范围，利用绘图工具或 EXCEL 公式，进行负载能力图绘制如下：

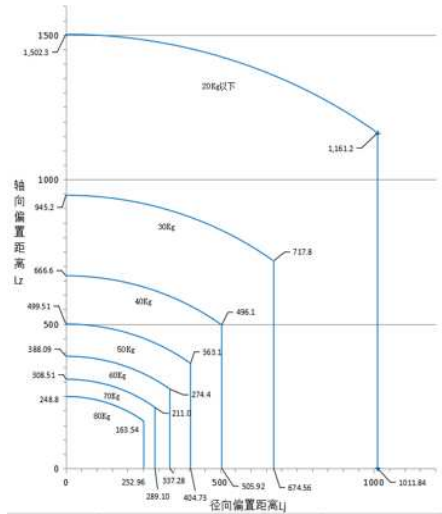


图4 负载能力图

3.2 工具负载自身容许惯性矩

在已知工具负载质量与坐标下，对工具负载的自身容许惯性矩进行判断。以工具质量为 80kg，坐标为 [X, Y, Z][0, 252.96, 163.54]，根据公式 2 得：

$$I_z = I_b - (M * (X^2 + Y^2))$$

$$= 15.38 - (80 * (0^2 + 252.96^2)) = 10.26 \text{ kg.m}^2$$

$$I_x = I_y = I_{j45} - (M * (X^2 + Y^2 + (Z + L_0)^2))$$

$$= 35.06 - (80 * (0^2 + 252.96^2 + (163.54 + 169)^2))$$

$$= 21.094 \text{ kg.m}^2$$

工具负载的容许惯量：

$$[I_x, I_y, I_z], [21.094, 21.094, 10.26]$$

四、实验测试

在额定负载下，根据 GBT12642 对机器人进行精度测试。

4.1 以立方体长宽边 1000mm，高 800mm，速度 100mm/s，所测试轨迹精度 AVG=0.7864mm；

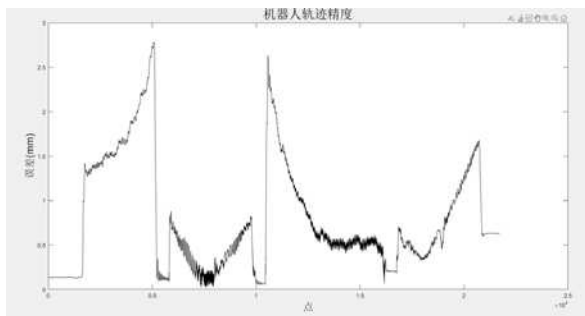


图5 立方体轨迹精度测试

4.2 以半径为 R40 的圆，速度 100MM/S，所测试轨迹精度：AVG = 0.4551；

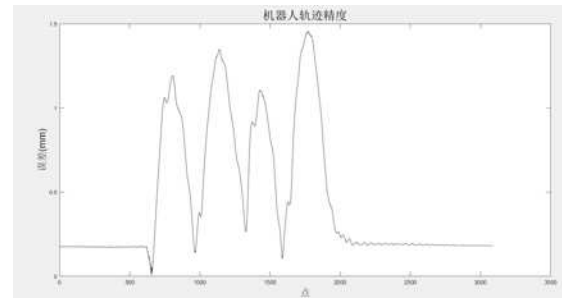


图6 圆形轨迹精度测试

4.3 以机器人工作空间最大包容下方体对棱斜平面上的 5 个点为作指令设定位姿点，重复 30 次，测出实际到次点的数据。

表3 重复定位精度测试数据

点	P1	P2	P3	P4	P5	平均
误差	0.015	0.029	0.036	0.033	0.035	0.0296

4.4 以额定负载对机器人进行动态负载能力进行测试如下：

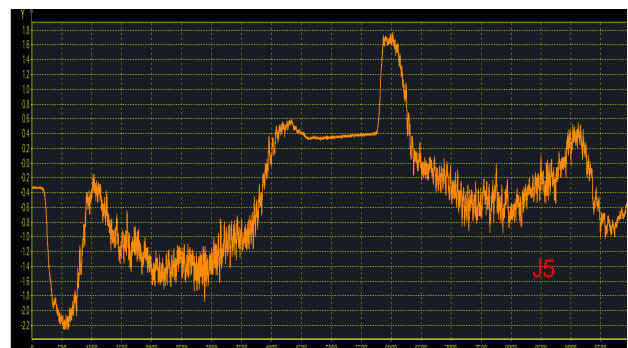
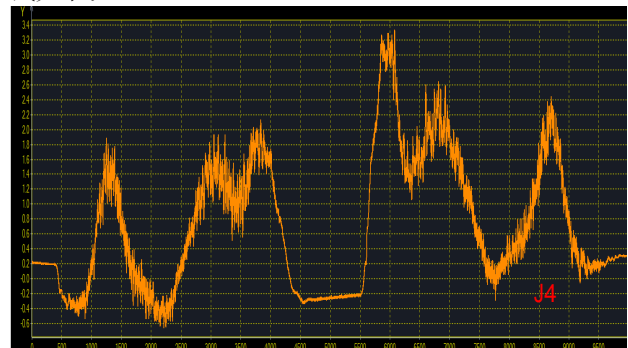

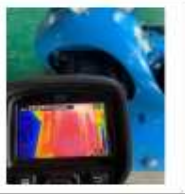

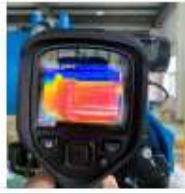

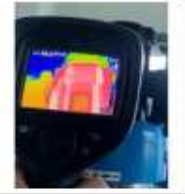


图7 J4J5J6 力矩测试

4.5 在额定负载机器人以老化程序姿态运行 24H, 检测电机温度:

表 5 伺服电机表面温度测试数据

关节	J1	J2	J3	J4	J5	J6
温度 $^{\circ}\text{C}$	81	81.8	58	53.2	47.5	49.8
注: 电机容许温度: 100°C						
						
J1	J2	J3				
						
J4	J5	J6				

五、结束语

通过机器人的配置, 正向推导出手腕容许负载能力, 再根据所容许的负载能力, 推导出工具负载的容许偏置距离并绘制负载能力图, 同时, 比较直观的计算出工具负载自身所容许的惯量矩。

以额定负载的容许力矩特性进行实验, 验证了精度指标与减速机、伺服电机的发热数据, 为国产工业机器人的高速、高精度、高可靠性方向发展提供了参考, 方便了用户更好地用好机器人。

参考文献:

- [1] 李慧, 马正先, 马辰硕. 工业机器人集成系统与模块化. 化学工业出版社, 2018.
- [2] 吴伟国. 工业机器人, 闫建新. 焊接机器人技术. 化学工业出版社, 2019.
- [3] 陈茂爱, 任文建军, 闫建新. 焊接机器人技术. 化学工业出版社, 2019.
- [4] 张铁, 覃彬彬, 邹焱飏. 机器人负载的动力学参数辨识. 工程科学学报. 2017.
- [5] 刘本德, 曲兴华, 张姝颖, 林德欣. 负载对工业机器人末端定位精度影响的分析. 机械设计与研究. 2015.
- [6] 陈柏, 谢本华, 丁力, 吴洪涛, 丁亚东. 一种带负载工业机器人动力学模型辨识方法. 京航空航天大学学报. 2016.
- [7] 王殿君, 彭文祥, 高锦宏, 等. 六自由度轻载搬运机器人控制系统设计 [J]. 机器与液压. 2017.
- [8] 管贻生, 邓休, 李怀珠, 等. 工业机器人的结构分析与优化 [J]. 华南理工大学学报, 2013.
- [9] 朱奕锟, 六轴工业机器人的运动学分析, 科技创新与应用, 2021.