

# 机器人的动态特性试验研究<sup>\*</sup>

林瑞麟 郭新跃 蒋少茵

(华侨大学机械工程系, 泉州 362011)

**摘要** 提出对机器人的动态特性试验测量的一种实用方法, 包括测试原理, 测试系的组成. 通过对四关节机器人模型的测试, 给出测试的动态参数及物体柔性变形的动态响应.

**关键词** 机器人, 动态特性, 试验

**分类号** TP 24

现代工业生产, 要求机器人的工作必须达到高速运行和高的轨迹精度——一般运行速度在  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上, 重复定位精度为  $\pm 0.5 \text{ mm}$  以内. 但在实际工作中, 机器人的动态性能并不理想, 因为机器人手腕末端执行器的运动及其到位时, 会发生振荡而影响速度和定位精度的提高. 所以, 要提高机器人的运行速度和定位精度, 其动态特性是重要的衡量指标. 为此, 采用实验测试手段以探讨机器人的结构动态特性问题, 是一种有效地分析机器人动态的方法, 并为理论分析提供依据. 目前, 特性参数的测量有多种方法<sup>[1-2]</sup>, 其中激光自动跟踪测量和照相法测量, 其结构复杂, 费用昂贵. 本文通过自制的四关节机器人模型(图1), 运用激振技术测试动态特性, 则构造简单. 这是一种有效地分析和研究机器人动态特性的方法.

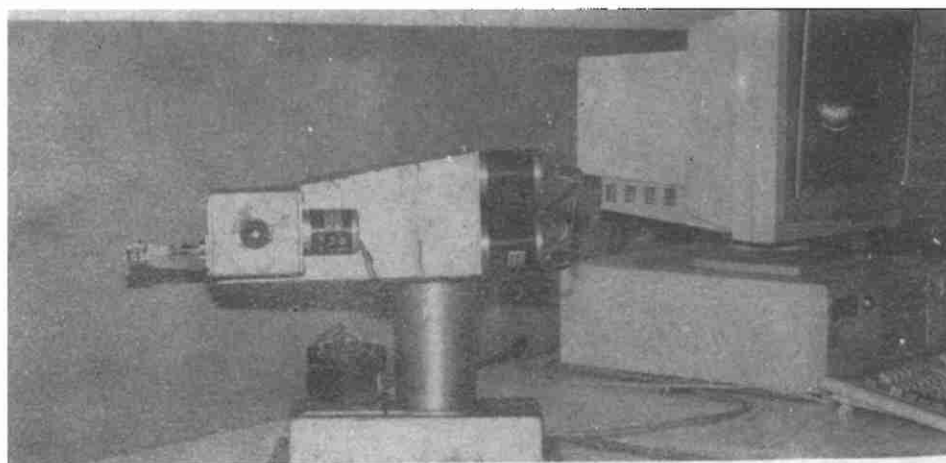


图1 四关节机器人模型

## 1 测振实验

测振点选择在立柱、大臂、小臂、终端手部等不同刚度的位置(图2), 测试不同频率下的振

<sup>\*</sup> 本文 1995-05-24 收到; 福建省自然科学基金资助项目

幅响应、加速度大小和模态特性。实验所用的主要设备：(1) CD-1 型磁电式传感器；(2) GZ-1 型晶体管测振仪；(3) SC-16 型光线示波器；(4) SC-4-120 型；振动子；(5) JU-3 型电位差计。动态实验系统框图如图 3 所示。

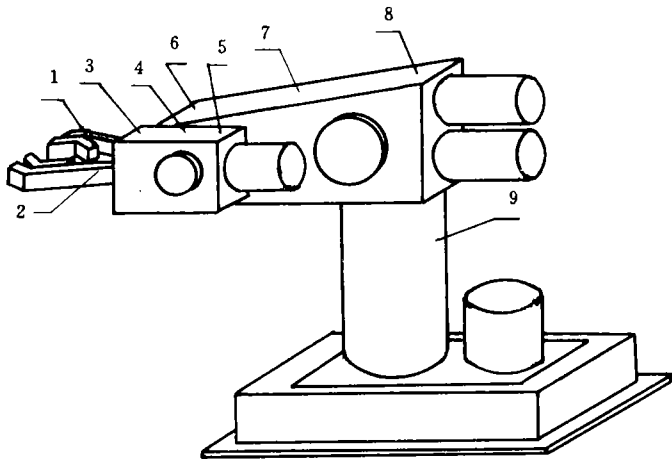


图 2 测试点分布图

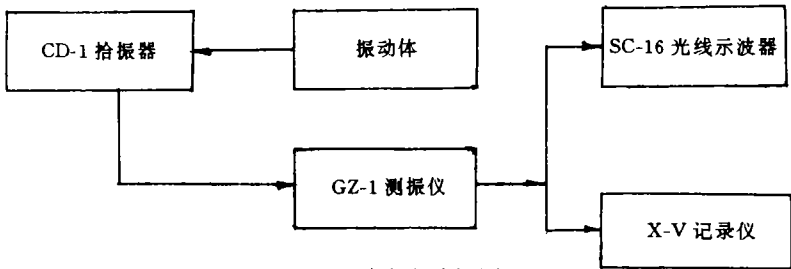


图 3 动态实验框图

CD-1 磁电式传感器是绝对速度传感器,它被固定在振动体上。当振动体振动时,CD-1 发出与振动体振动速度成正比的电势,并由 GZ-1 测振仪放大,再经积分电路可得位移量和加速度  $a$ 。

测试前对测试仪器进行标定,使各项指标符合出厂标定值,以保证测量精度。各测试点每一频率下的振幅重复测试 5 次,由光线示波器感光带记录,测得数据进行线性平均。

2 实验结果

2.1 模态参数

在各测试点中取第 4 点加以说明,该点刚性较好,变形小,靠近终端腕部,数据分散性小,波形失真小,较符合实际工况。图 4 所示的  $z$  向频率( $f$ )振幅响应曲线具有代表性。附表为该点频率响应曲线拟合所得的模

附表 模态参数表

$m$	$W_n/\text{Hz}$	$\xi/(\%)$	$B/\mu\text{m}$
1	42	4.93	$24.2\times10^{-3}$
2	76	7.94	$38.2\times10^{-3}$
3	103	2.2	$18.4\times10^{-3}$

态参数,其中  $m$  为模态数,  $W_n$  为固有频率,  $\xi$  为阻尼比,  $B$  为振幅.

系统 3 个模态固有频率中,前两阶模态为主要模态. 其中,1 阶模态振动主要表现为小臂轴关节的扭振;2 阶模态振动表现为主轴回转扭振,以及大臂弯曲振动而牵动的整机振动. 2 阶模态各测试点位移响应的振型,如图 5 所示. 3 阶振型较为复杂,是沿各关节轴的扭转振动,它属于大、小臂弯曲变形与各部件联接处变形的综合.

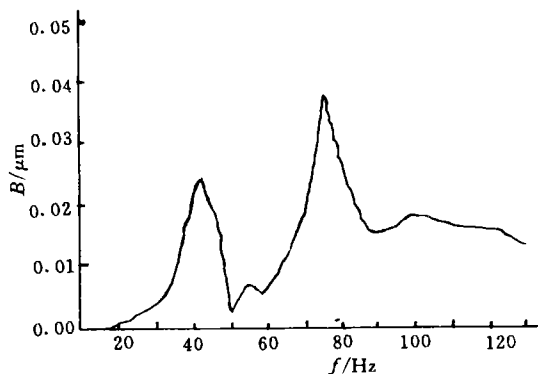


图 4 第 4 点  $z$  向频率响应曲线

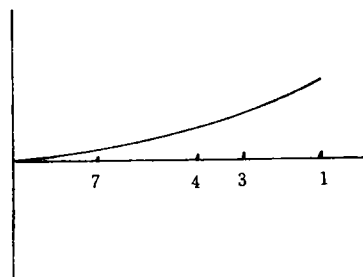


图 5 2 阶模态振型

从不同测试点对振幅改变的敏感部位,可确定机器结构的薄弱环节. 根据各振型下的动态特性,通过修改模态参数(刚度,质量等)可达到改善薄弱环节的目的. 机器人在  $m$  阶模态下,由于某些部位刚度参数变化,对结构中第  $P$  点影响的灵敏度分析式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{m,iL}}{\partial K} = & [S_{m,iL} \cdot \frac{1}{\lambda_m - \lambda_m} \cdot \frac{\partial K_u}{\partial K} \cdot \bar{S}_{m,iL} \\ & + \bar{S}_{m,iL} \cdot \frac{1}{\lambda_m - \lambda_m} \cdot \frac{\partial K_u}{\partial K} \cdot S_{m,iL}] \\ & - [\sum_{\substack{\epsilon=1 \\ \epsilon \neq m}}^n (\frac{S_{\epsilon,iL}}{\lambda_m - \lambda_\epsilon} \cdot \frac{\partial K_u}{\partial K} S_{m,iL} + \frac{S_{\epsilon,iL}}{\lambda_m - \lambda_\epsilon} \cdot \frac{\partial K_u}{\partial K} \cdot S_{m,Lj}) \\ & + \sum_{\substack{\epsilon=1 \\ \epsilon \neq m}}^n (\frac{S_{m,iL}}{\lambda_m - \lambda_\epsilon} \cdot \frac{\partial K_u}{\partial K} + \frac{S_{\epsilon,iL}}{\lambda_m - \lambda_\epsilon} \cdot \frac{\partial K_u}{\partial K} \cdot S_{\epsilon,Lj})], \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $S_{m,iL}$  为  $m$  阶柔度矩阵  $S_m$  中第  $i$  行参数变动范围  $L$  的行阵;  $S_{m,Lj}$  为  $m$  阶柔度矩阵  $S_m$  中第  $j$  列参数变动范围  $L$  的列阵;  $\bar{S}_{m,iL}$  为  $S_{m,iL}$  的共轭阵;  $K_u$  为刚度参数改变涉及到的结构物理刚度矩阵;  $\lambda$  为  $K$  阶特征量,  $\lambda_k = \delta_k + j\gamma_k$  ( $\delta_k$  为  $K$  阶指数衰减率;  $\gamma_k$  为  $K$  阶有阻尼固有频率);  $j$  为测振点;  $L$  为结构中改变刚度参数的位置范围.

## 2.2 柔性变形体的振动响应

由 Jourdain 变分原理导出柔性多体系统动力学变分方程为

$$\delta \dot{X}^T (A \dot{X} - B) = 0. \quad (2)$$

在式(2)中,

$$A = \sum_{i=1}^n \bar{m}^{(i)}, B = \sum_{i=1}^n \bar{Q}^{(i)},$$

其中  $\bar{m}^{(i)}$ ,  $\bar{Q}^{(i)}$  为物体  $B_i$  对系统广义质量阵及广义力阵  $m^{(i)}$ ,  $Q^{(i)}$  的扩充<sup>(3)</sup>. 即

$$\bar{m}^{(i)} = \begin{bmatrix} m^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{Q}^{(i)} = \begin{bmatrix} Q^{(i)} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$X^T = [q^T \ a^T],$$

$q$  为系统铰相对坐标列阵,  $a$  为系统模态坐标列阵.

计入柔性变形弹性振动的动力学响应如图 6, 图中 I 表示刚体模型响应, II 为变形体模型响应, 其中表达了弹性振动的高频成分.

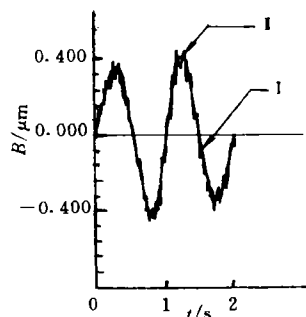


图 6 柔体动力学响应

### 3 结论

- (1) 四关节机器人模型的模态, 主要集中在低、中频段.
- (2) 为提高 2 阶固有频率, 应提高主轴立柱传动的扭转刚度和精度.
- (3) 为改善 1 阶振型频率, 应提高大臂及小臂关节的扭转刚度和稳定性.
- (4) 由各点测试综合, 应提高终端腕部和手爪的刚度, 以改善其抗弯强度.

### 参 考 文 献

- 1 阵明濂, Schiele G. 工业机器人精度参数的一种测量方法. 机器人, 1988, 6(2): 46~48
- 2 袁要武, 郑时雄. 应用 DDS 方法辨别机器人振动的模态参数. 机器人, 1993, 15(2): 19~23
- 3 洪嘉振. 多体系统动力学. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 10~11

## Experimental Study of Dynamic Properties of a Robot

Lin Ruilin Guo Xinyue Jiang Shaoyin

(Dept. of Prec. Mech. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** For testing and measuring dynamic properties of a robot, the authors propose a practical method including principle of test and composition of test system. By way of the test conducted on a model of robot with four joints, the authors give dynamic parameters of test and dynamic response of flexible deformation of a body.

**Keywords** robot, dynamic properties, test