

表 1 连杆参数

杆号 i	质量 m_i (kg)	转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)		
		I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
1	228		7.719	
2	35	1.215	0.377	1.10
3	38	0.202	4.77	4.76
4	4.85	1.6×10^{-3}	2.0×10^{-3}	3.28×10^{-3}
5	0.302	2.6×10^{-4}	1.46×10^{-4}	1.46×10^{-4}
6	31.5	0.075	0.610	0.613
7	10.4	0.369	0.013	0.369

表 2 高速轴上的等效转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

关节	S	L	U	B	T
I_0	6.19×10^{-3}	7.32×10^{-3}	7.32×10^{-3}	5.43×10^{-4}	5.43×10^{-4}

2 仿真程序

5R 实验机器人动力学仿真程序框图如图 3 所示。

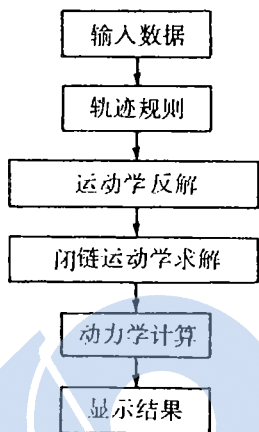


图 3 仿真程序框图

它由轨迹规划、运动学反解、闭链运动学求解、动力学计算等四部分组成。5R 实验机器人含有一个平行四边形闭链,这是最简单的闭链。为了使程序具有通用性,文献(1)对闭链机构进行了专门的研究,提出了一套适合闭链的运动学、动力学分析方法。凯恩方程在处理复杂机构的动力学问题时具有一定的优越性,仿真程序的动力学计算部分采用的正是凯恩方程方法⁽²⁾。

仿真程序采用 FORTRAN 语言编写,在 IBM PC-XT 微机上实现。最后的计算结果用数据文件输送给数据处理程序(用 BASIC 语言编写),数据处理程序将仿真结果用曲线的形式显示出来。

3 仿真结果分析

在实际工作中,焊接机器人最常见的工作轨迹为直线。本文选取位于机器人正前方的一条水平直线为对象进行仿真计算。直线起点为(800,600,-1000),终点为(800,600,1000),长度为 2 米。焊枪按加速—匀速—减速的运动规律运动。

3.1 低速运动仿真结果分析

机器人在连续电弧焊时,焊接速度一般为 $v < 50$ 毫米/秒。现在让焊枪在 50 秒的时间内走完直线全程,它在匀速运动时速度为 42.1 毫米/秒。图 4 为仿真结果。

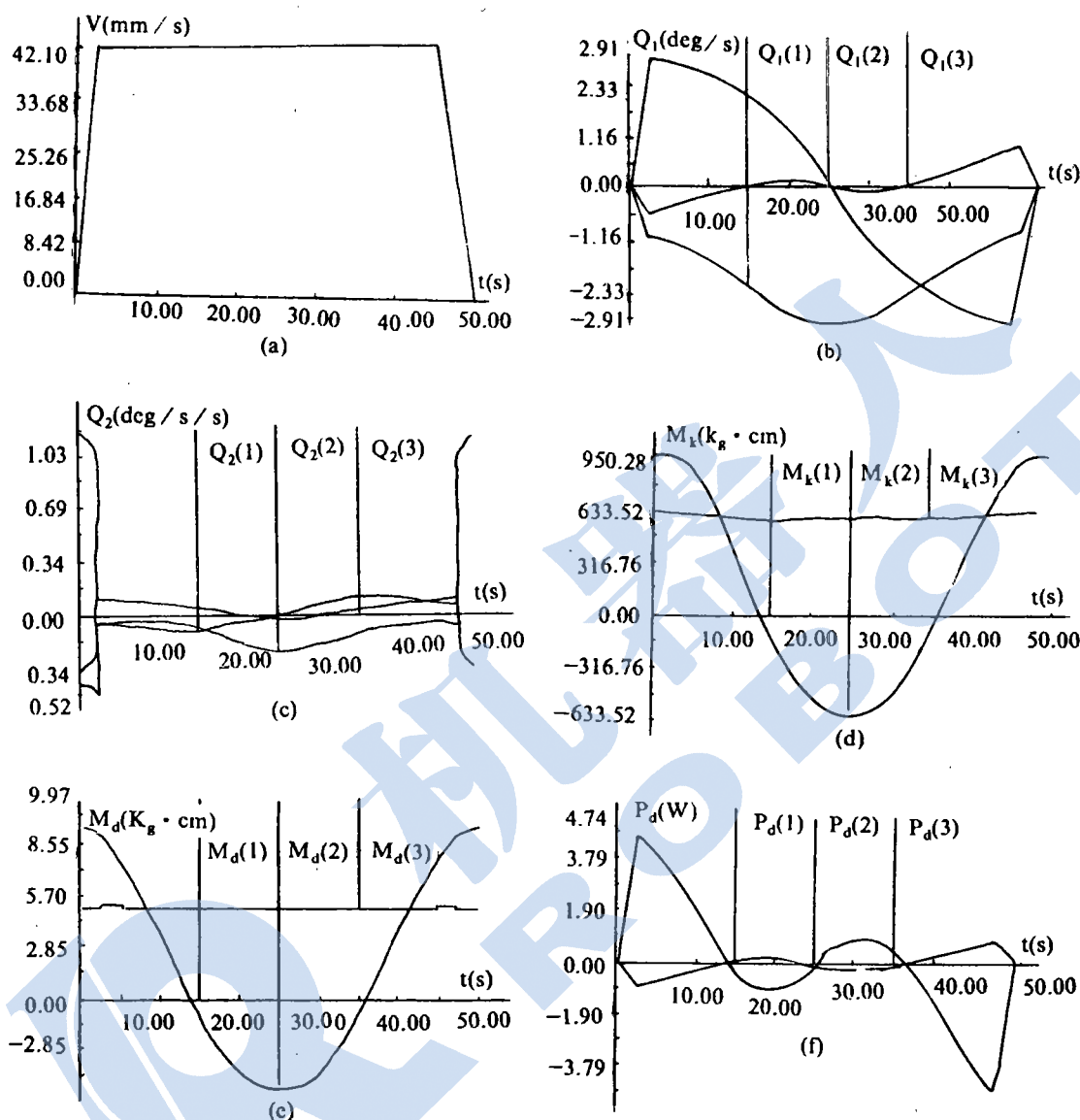
从图 4 可以看到:

(1) 在加速和减速阶段,关节加速度比较大, $t = 2.5$ 秒和 $t = 47.5$ 秒时,加速度有很大的跳跃,但在匀速运动阶段,幅值大大下降(图 4c);

(2) 尽管关节加速度曲线 Q_2 不很规则(图 4c),但关节力矩曲线 M_k 却十分光滑,几乎不受关节加速度 Q_2 的影响(图 4d)。这说明低速运动时,由于加速度所引起的动力矩是很小的,动力矩在关节力矩中所占的比例远远小于静力矩所占的比例,因而,关节力矩曲线的形状主要由静力矩决定;

(3) S 轴的关节力矩 $M_k(1)$ 为零(实际上是近似等于零)(图 4d),这说明动力矩是很小的,因为 S 轴不承受静力矩,它的关节力矩就是动力矩;

(4) U 轴力矩曲线 $M_k(3)$ 在 600 公斤·厘米处几乎成水平直线(图 4d),这说明重锤的平衡效果并不十分令人满意,上臂的重力矩并没有完全平衡掉,大约还有 600 公斤·厘米的重力矩存在。如果要平衡掉这



(a) 焊枪速度曲线 (b) 关节速度曲线 (c) 关节加速度曲线
(d) 关节力矩曲线 (e) 电动力矩曲线 (f) 电机功率曲线

图 4 弧焊运动仿真结果

个重力矩,重锤的重量要加大,加大部分的重量为

$$\frac{600 \times 10}{440} = 13.6 \text{ 公斤}$$

(重锤重心到 L 轴距离为 440 毫米)

(5) 电动力矩曲线 M_d 只有相似的形状(图 4d,c)。这一点可通过下面的推导来说明。设从时间 t_0 到 t , 电机轴角度由 θ_{a0} 变为 θ_a , 关节轴角度由 φ_0 变化到 φ , 根据功能原理,

$$\int_{\theta_{a0}}^{\theta_a} M_d(\theta_a) d\theta_a = \frac{1}{2} I_a (\dot{\theta}_a^2 - \dot{\theta}_{a0}^2) + \int_{\varphi_0}^{\varphi} M_k(\varphi) d\varphi$$

上式对时间求导,得

$$M_d(\theta_a) \dot{\theta}_a = I_a \ddot{\theta}_a + M_k(\varphi) \dot{\varphi}$$

根据传动比

$$i = \dot{\theta}_d(\varphi) / \dot{\varphi}$$

得到

$$M_d(\varphi) = I_a [i^2(\varphi) \ddot{\varphi}^2 + i(\varphi) \ddot{\varphi}] + M_k(\varphi) / i(\varphi) \quad (1)$$

(1)式说明:电机力矩一部分用来平衡关节力矩,另一部分用来使高速轴产生加速度。

低速运动时, $\dot{\varphi}$ 和 $\ddot{\varphi}$ 都很小,式(1)中第一项与第二项比较起来要小得多,电机力矩主要用来平衡关节力矩,它们之间相差一个比例因子 $i(\varphi)$ 。而在焊枪沿直线运动过程中, $i(\varphi)$ 的变化范围很小。所以, M_d 与 M_k 只有相似的形状;

(6) 电机功率 P_d 很小,出现负功现象(图 6b)。在低速运动的情况下,电机主要是克服重力做功,因而功率很小。其计算式为

$$P_d = k \cdot M_d \cdot Q1 \cdot i$$

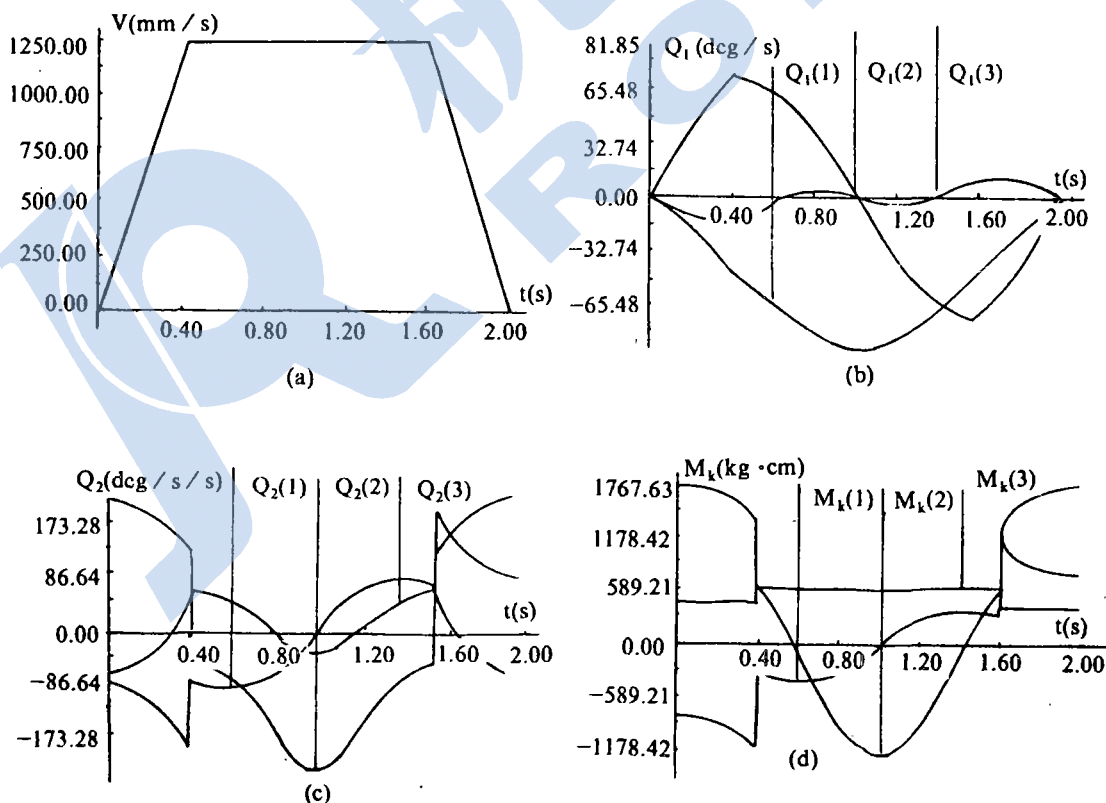
式中, k 为系数。当 M_d 和 $Q1$ 符号相同时 P_d 为正值,电机克服重力矩做功;当 M_d 和 $Q1$ 符号相反时, P_d 为负值,重力矩带动电机做功。

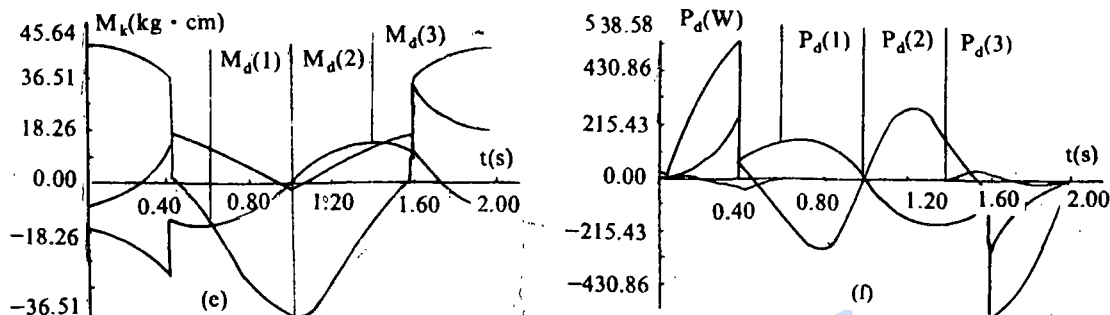
3.2 高速运动仿真结果分析

机器人在作点位运动时,速度可达 1.0—1.6 米/秒,这个速度是比较高的,动力矩不可忽视。让机器人终端在 2 秒内按图 5a 的运动规律走完直线全程,匀速运动时的速度为 1.25 米/秒。图 5 为仿真结果。与低速运动(弧焊)比较,高速运动(点位运动)具有如下特点:

(1) 关节速度 $Q1$ 和加速度 $Q2$ 在数值上有很大提高,即使是在匀速运动阶段,关节加速度也很大(图 5b,c);

(2) 关节力矩 M_k 中,动力矩所占比例增大,关节力矩明显受到关节加速度的影响(从 M_k 与 $Q2$ 的曲线上即可看出这一点,图 5d);





(a) 焊枪速度曲线 (b) 关节速度曲线 (c) 关节速度曲线
(d) 关节力矩曲线 (e) 电机力矩曲线 (f) 电机功率曲线

图 5 点位运动仿真结果

(3) L 轴和 U 轴关节力矩由静力矩和动力矩两部分组成,它们的关节力矩曲线 $M_k(2)$ 和 $M_k(3)$ 既保持有静力矩曲线(图 4d)的基本形状,同时又要受到加速度曲线 $Q2(2)$ 和 $Q2(3)$ (图 5c)的影响。在低速运动时,L 轴具有最大的静力矩 $M_k(2)=980$ 公斤·厘米(图 4d);在高速运动时,L 轴的关节力矩最大值为 $M'_k(2)=1768$ 公斤·厘米(图 5d),其中动力矩所占比例为

$$\frac{M'_k(2) - M_k(2)}{M'_k(2)} = \frac{1768 - 980}{1768} = 44.6\%$$

(4) M_d 曲线(图 5c)、 M_k 曲线(图 5d)和 $Q2$ 曲线(图 5c)三者有相似的形状,但 M_d 曲线与 $Q2$ 曲线相似程度更高。这说明,在(1)式中,关节加速度 $\ddot{\phi}$ (即 $Q2$)项所占比例更大,电机力矩主要用于使高速轴产生加速度;

(5) 高速运行时, M_d 和 $Q1$ 都很大,电机功率迅速增加,S 轴电机功率的尖峰值已达到 0.54 瓦;

(6) 在 $t=0.4$ 秒和 $t=1.6$ 秒时,焊枪运动加速度不连续,从而引起 $Q2$ 、 M_k 、 M_d 和 P_d 也不连续,出现很大的跳跃,这对机械系统和控制系统的工作都将产生不利的影响。

4 结语

通过对 5R 实验机器人低速直线运动和高速直线运动的比较,我们可得到如下几个主要结论:

(1) 5R 实验机器人用于连续电弧焊时,其速度和加速度都很低,动力矩很小,可不予考虑,电机力矩主要用来平衡各关节的重力矩;

(2) 采用梯形速度的控制规律,在加速和减速阶段,速度变化很大,这会引起机体的振动,影响机器人工作的平稳性。速度越高,影响越显著。但在连续电弧焊时,由于速度低,影响不大;

(3) 重锤应加重 13.6 公斤才能平衡掉上臂的重量,这样一来,转动惯量将增大,不利于机器人的高速度运动,但对于连续电弧焊接机器人来说,静力平衡效果是主要的;

(4) 5R 实验机器人采用 45#钢为材料,重量和转动惯量都很大,不能适用于更高的运动,建议改用轻合金材料。

5R 实验机器人是一种典型结构的机器人,本文对它的动力学进行了仿真研究,通过分析仿真结果,对它的动力学特性作了评价,提出了改进结构设计的措施。本文的工作对于提高 5R 实验机器人的工作性能,对于它的控制系统和机械系统的进一步设计和改进具有重要的实际意义。

参 考 文 献

- 1 李德高,马香峰. 闭链机构机器人运动分析和动力分析. 北京钢铁学院学报, 1987;(1): 64-72
- 2 李德高. 机器人操作手动力学仿真研究. 北京钢铁学院硕士学位论文, 1986

ANALYSIS OF THE DYNAMIC SIMULATION RESULTS OF AN EXPERIMENTAL ROBOT

LI Degao MA Xiangfeng

(Beijing Univ of Iron and Steel Technology)

Abstract

This paper presents a research on dynamic simulation of an experimental robot, type 5R, with a typical structure, usually used for continuous path arc-welding. The simulation results of the first three joints are obtained when its hand moves along a straight line, 2 meters long, within 50 seconds for arc-welding movement, and 2 seconds for point-to-point movement. Based on the analysis of the simulation results with some comparison, this paper makes quantitative investigation on the relation of dynamic moments. Finally, the robot performance is evaluated, and measures are taken to improve its structure design.

Keywords: robot, dynamic simulation of robot, robot structure design, robot performance, arc-welding

新书介绍

机器人学的教育培训 = Education and Training in Robotics (著, 英) / Husband T.M. -UK: IFS(Publications)Ltd., 1986.-315p. (北京图书馆索书号: 2-88 / TP242.1 / E24)

全书共分五个部分。管理思考的问题是: 面对新技术, 培训的必要性; 机器人时代操作者的技能; 人不是机器人等问题。工业培训课程的内容有: 选择设计和实施内部机器人学教育; 培训是使用机器人成功的关键; 机器人和控制系统操作与维修新技术的培训; 技术行业的计算机基础教育等。在大学和学院课程专题中, 介绍了二年制机器人学技术培训学院; 维修工程人员的机器人教育等问题。然后又介绍了美国与国际性的教育策略, 其中提到世界机器人工业的教育作用及内涵; 在发展中国家的可调加工系统教育等。最后有附录部分, 作者的机构和地址, 资料出处。

(何冰)

Pascal 语言机器人 = Pasro: Pascal and C for Robots (著, 英) / Blume c., Jakob W., Favaro J., -Belin Heidelberg: Springer Verlag.-1987.-239p. (北京图书馆索书号: 2-88 / TP242 / B65P1987)

PasRo 就是机器人用的 Pascal 语言。本书分别介绍了机器人用的 Pascal 语言与 C 语言的基本概念及其应用。全书分为三大部分。前两部份分别论述了 Pascal 语言机器人与 C 语言机器人的定义, 程序的基本功能, 数据概念, 操作原理, 程序结构, 输入输出过程, 综合性研究会, 技术实际应用, 怎样使用 PasRo 与 PasRo/c 系统, 以及 PasRo 与 PasRo 实际应用的例子。第三部分是附录, 有 PasRo 与 PasRo/c 的生产概况, Pascal 与 PasRo, PasRo/c 与 c 标识符的预先说明, 预定的 PasRo 与 PasRo/c 数据类型, Pascal 与 c 语言语法图。书后还附有参考文献及索引。

(何冰)