

文章编号: 1002-0446(2000)01-0023-06

管内机器人移动载体机电动力学驱动特性的研究*

张永顺¹ 邓宗全¹ 姜生元¹ 蔡鹤皋¹ 侯人杰²

(1. 哈尔滨工业大学机械工程系 150001; 2. 哈尔滨电机有限责任公司控制设备事业部 150001)

摘 要: 本文首先分析了单电机、双电机、三电机驱动移动载体的应用背景环境及优缺点, 然后从机电动力学角度, 对多电机驱动管内移动载体的电机功率叠加性、移动载体越障时系统电机功率的负反馈特性及机电耦和特性进行了理论分析.

关键词: 管内移动机器人; 功率叠加性; 机电耦和

中图分类号: TP24

文献标识码: B

1 引言

管内移动机器人的可靠性及使用性能直接取决于移动载体, 因此移动载体是管道机器人最重要的部分之一. 近十几年来, 国内外许多学者进行了移动载体的研究, 结合我们开发的机器人实用产品, 归纳起来有以下几种, 单电机驱动移动载体; 双电机驱动移动载体; 三电机驱动移动载体. 以上三种驱动方式各有其应用背景环境及优缺点, 下面分别介绍如下.

1.1 单驱动管内移动载体

图 1 给出了单电机驱动移动载体的结构图, 其适用于大管径直管内移动机器人, 这是由

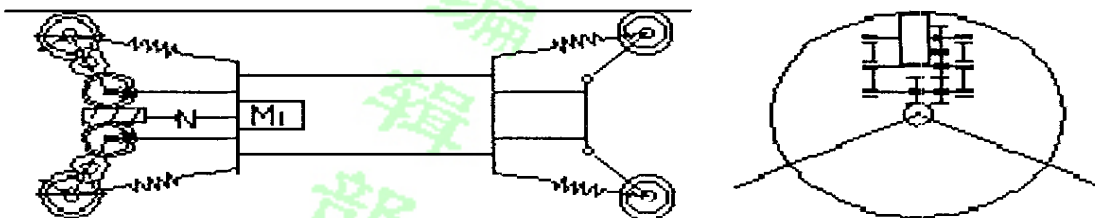


图 1 单驱动移动载体

于中间电机驱动蜗杆, 并由蜗杆并联驱动三个蜗轮, 在电机的驱动下, 圆周方向均布的三组驱动轮转速相同, 当管道发生弯曲时, 三个驱动轮走过的母线长度不再相等, 这种几何约束条件要求三个驱动轮按一定的转速关系旋转才能通过弯管, 这样由同一电机驱动的处于同一转速的三个驱动轮就会和弯管的几何约束条件发生干涉, 结果使“内耗”增大, 牵引力减小. 但由于在大口径管道中, 管道内部空间大, 电机容量的选择余地大, 单驱动牵引力已足够, 而且该驱动结构简单, 因此单电机驱动适合于大管径直管内应用条件. 另外, 因为封闭力由三根弹簧分别三个驱动臂而产生, 因此该结构的自定心性能不好, 在应用时要保证机器人的重心在中间处.

1.2 双驱动管内移动载体

图 2 给出了双电机驱动移动载体的结构图, 电机 M_1 和 M_2 分别驱动二个蜗杆, 蜗杆驱动

* 收稿日期: 1999-03-20

的结构与单驱动的结构相同,在此不再赘述.但封闭力由弹簧推动的同一圆柱滑块推动三个支撑臂同时张开,这样移动载体具有自定心性.满足了管内行走的基本条件.双电机驱动多用于中、小管道长距离作业,由于空间的限制,驱动电机容量的选择余地小,为了提高驱动力,可采用双电机驱动.电机 M_1 和 M_2 及其传动系统固在同一机架上,属于刚性连接,因此在同一电源的驱动下,整个载体的输出转矩为二台电机驱动转矩的叠加,即负载由二台电机共同承担;驱动轮的转速与输出力矩形成负反馈闭环,因而提高了越障能力及负载拖动能力.

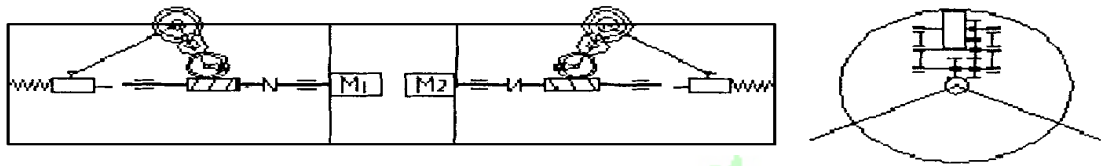


图 2 双驱动管内移动载体

1.3 三驱动管内移动载体

图 3 给出了三电机驱动移动载体的结构图,它的两端各由三个支撑臂在弹簧的支撑下产

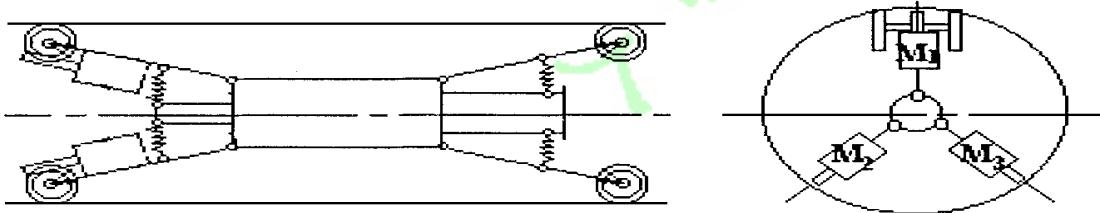


图 3 三电机驱动移动载体

生封闭力,因而具备了管内行走的基本条件.但与前二种移动载体不同的是电机没有固定在机器人本体上,而是三个电机 M_1 、 M_2 和 M_3 分别固定在三个支撑臂上,电机通过蜗杆-蜗轮直接驱动驱动轮,这种驱动方式有很多优点,首先三台电机分别驱动三个驱动轮,使之具有差动功能,在管道有一定曲率或出现凹凸不平的恶劣环境时,三个驱动轮不会产生转速相同的“内耗”现象,而是三个驱动轮随着各自的路径不同而调整转速以适应各种管内条件;另外三台电机输出力矩具有叠加性,即三台电机共同来承担负载.以上二个优点使移动载体行走平稳,驱动力大、均匀,适合在弯管和管内壁条件恶劣的环境下使用,另外由于三台电机占用空间,因此,这种驱动方式适合于大管径重载条件下使用,由于该驱动方式具有差动功能,因此偏心不会引起驱动轮内部的干涉.

2 多电机驱动特性的分析

为了不失一般意义,仅以三电机驱动时为例来分析多单机的驱动特性,双电机驱动时的分析方法相同,此时电机直接驱动蜗杆带动与蜗轮相联的驱动轮,该机电系统通过蜗轮蜗杆耦和传动,驱动方式简单,我们首先建立机电系统动力学方程,然后根据动力学方程进行驱动特性的分析.

2.1 机械系统分离图的建立

系统的分离体图如图 4 所示,然后由达兰贝尔原理,求得时域方程,即描述系统的微分方

程. 在分离体图中, B_0, B_1 分别为六个驱动轮和 3 个电机电枢的粘性摩擦系数, J_0, J_1 分别为六个驱动轮和 3 个电机电枢的转动惯量, 其中 3 个驱动轮和 3 个被动轮结构对称, 我们只画出一

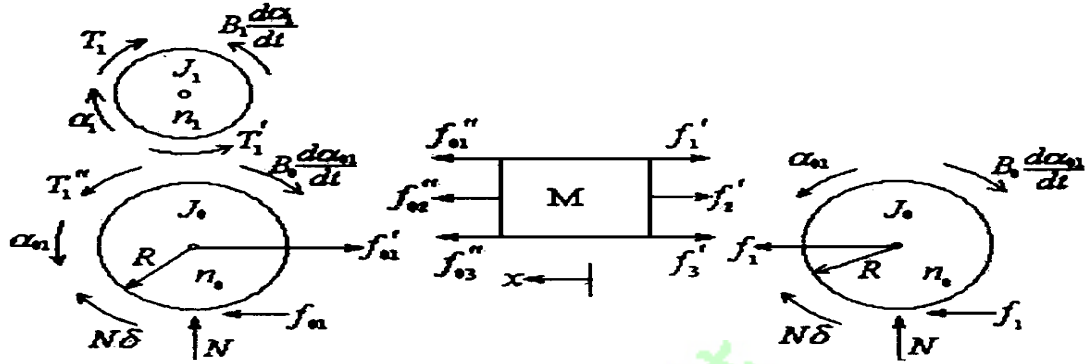


图 4 3 电机驱动机械系统的分离图

组驱动轮和被动轮的情况, 根据分离体图得系统微分方程如下:

$$T_i(t) = J_1 \frac{d^2\alpha_i}{dt^2} + B_2 \frac{d\alpha_i}{dt} + T_i'(t) \quad (1)$$

$$T_i'(t) = J_0 \frac{d^2\alpha_{0i}}{dt^2} + B_0 \frac{d\alpha_{0i}}{dt} + N\delta + f_{01}R \quad (2)$$

$$f_i R = J_0 \frac{d^2\alpha_{0i}}{dt^2} + B_0 \frac{d\alpha_{0i}}{dt} + N\delta \quad (3)$$

$$\frac{T_i'(t)}{T_i(t)} = \text{tg}\lambda \frac{n_1}{n_0} = \frac{\alpha_{0i}(t)}{\alpha_i(t)} \quad (4)$$

以上各式中 $i = 1, 2, 3$. λ 为蜗杆的螺旋升角, δ 为滚动摩擦系数, 化简以上各式得:

$$\begin{aligned} & \frac{n_0}{n_1 \text{tg}\lambda} (T_1 - J_1 \frac{d^2\alpha_1}{dt^2} - B_1 \frac{d\alpha_1}{dt}) + \frac{n_0}{n_2 \text{tg}\lambda} (T_2 - J_2 \frac{d^2\alpha_2}{dt^2} - B_1 \frac{d\alpha_2}{dt}) + \\ & \frac{n_0}{n_3 \text{tg}\lambda} (T_3 - J_1 \frac{d^2\alpha_3}{dt^2} - B_1 \frac{d\alpha_3}{dt}) = \\ & (J_0 \frac{d^2\alpha_{01}}{dt^2} + B_0 \frac{d\alpha_{01}}{dt} + N\delta) + (J_0 \frac{d^2\alpha_{02}}{dt^2} + B_0 \frac{d\alpha_{02}}{dt} + N\delta) + \\ & (J_0 \frac{d^2\alpha_{03}}{dt^2} + B_0 \frac{d\alpha_{03}}{dt} + N\delta) + \\ & R(f_{01} + f_{02} + f_{03}) \end{aligned} \quad (5)$$

由分离体的受力关系可得:

$$\begin{aligned} (f_{01} + f_{02} + f_{03})R = & (J_0 \frac{d^2\alpha_{01}}{dt^2} + B_0 \frac{d\alpha_{01}}{dt} + N\delta) + \\ & (J_0 \frac{d^2\alpha_{02}}{dt^2} + B_0 \frac{d\alpha_{02}}{dt} + N\delta) + (J_0 \frac{d^2\alpha_{03}}{dt^2} + B_0 \frac{d\alpha_{03}}{dt} + N\delta) + MR \frac{d^2x}{dt^2} \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)和(6)联立即为机械系统的动力学方程.

2.2 机械系统动力学方程的简化

当机器人转弯时, 假设管道的转弯半径很大, 因此两端的三个支撑轮仍在一个旋转平面内, 机器人转弯的情形如图 5 所示, 过弯曲管轴线的平面为 Φ_1 道, 包含弯曲管轴线并与 Φ_1 垂

直的平面为 Φ_2 , 假设机器人本体上有一个驱动轮, 驱动结构与其它三个驱动轮完全相同, 驱动电机为 M_0 , 它始终在平面 Φ_2 内, 其电机电枢和驱动轮的坐标分别为 α_0 和 α , 因此三个轮的转角与该虚拟驱动轮的转角存在以下关系:

$$\alpha_{01} = k_1 \alpha_0 \quad \alpha_{02} = k_2 \alpha_0 \quad \alpha_{03} = k_3 \alpha_0 \quad (7)$$

将方程(7)代入方程(5)和(6)并化简为以 α 为变量的机械系统动力学方程得:

$$\frac{n_0}{n_1 \operatorname{tg} \lambda} (T_1 + T_2 + T_3) = \left[\left(J_1 \frac{n_0}{n_1 \operatorname{tg} \lambda} + \frac{2N_1}{N_0} J_0 \right) (k_1 + k_2 + k_3) + \frac{n_1}{n_0} MR^2 \right] \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \left[\frac{n_0}{n_1 \operatorname{tg} \lambda} B_1 + \frac{2n_1}{n_0} B_0 \right] (k_1 + k_2 + k_3) \frac{d\alpha}{dt} + 6N \delta \quad (8)$$

上式中, 当 $k_1 = k_2 = k_3$ 时, 即为在直管内行走的情况.

$$\text{令: } J_{eq} = \left[\left(J_1 \frac{n_0}{n_1 \operatorname{tg} \lambda} + \frac{2N_1}{N_0} J_0 \right) (k_1 + k_2 + k_3) + \frac{n_1}{n_0} MR^2 \right] \quad T_L = 6N \delta$$

$$B_{eq} = \left[\frac{n_0}{n_1 \operatorname{tg} \lambda} B_1 + \frac{2n_1}{n_0} B_0 \right] (k_1 + k_2 + k_3)$$

式(8)变为:

$$\frac{n_0}{n_1 \operatorname{tg} \lambda} (T_1 + T_2 + T_3) = J_{eq} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + B_{eq} \frac{d\alpha}{dt} + T_L \quad (9)$$

2.3 机电系统驱动特性的分析

当三个电机并联时, 电枢的电压方程和驱动力矩方程为:

$$U_{ai}(s) = (R_{ai} + sL_{ai}) i_{ai}(s) + k_{bi} \omega_i(s) \quad (10)$$

$$T_i = k_{bi} i_{ai}(s) \quad \omega_i(s) = k_i \omega(s) \quad (11)$$

上式中 $i = 1, 2, 3$. 并将式(9), (10)和(11)称为机器人移动载体的机电动力学方程, 当 $k_1 = k_2 = k_3$ 时, 即为在直管内移动时的情形, 因此该移动载体机电动力学方程不失一般性, 具有普遍意义. 对一定的管内约束条件和移动载体的姿态, $k_1 + k_2 + k_3 = C$, 即不同的管内条件和机器人姿态, C 的取值是不同的, 因此 J_{eq} 和 B_{eq} 的值是不同的. 将式(9)取拉氏变换, 并结合(10)和(11)可得控制方框图6. 图6总体来讲, 阻力矩 T_L 增加, $\omega(s)$ 减小, 因此通过三台电机的负反馈使 $T_1 + T_2 + T_3$ 增加, 从而 $\omega(s)$ 增加, 总体上这种驱动力矩的负反馈特性, 使三台电机的输出功率相互叠加, 增加了越障的能力, 并有恒

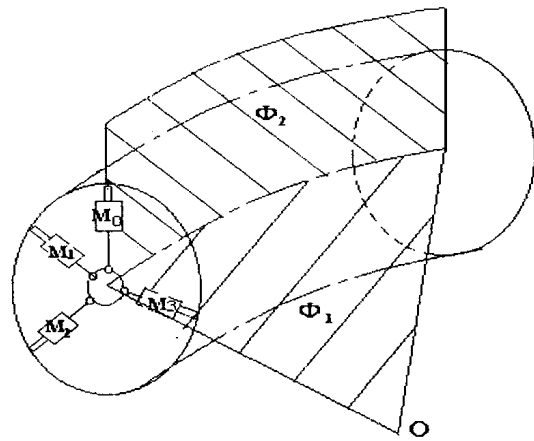


图5 驱动轮在弯管内的情形

速的功能. 对某一电机 $\omega(s) = k_i \cdot \omega(s)$ 而言, 由于管内障碍约束条件使 $\omega(s)$ 减小, 由于电机 M_1 的负反馈特性使 i_{a1} 增加, 从而电机 M_1 的驱动力矩 T_1 增加, 即受阻的驱动轮驱动力矩增加, 而其它二个驱动轮的驱动力矩不变, 受阻驱动轮驱动力矩增加比另外二个驱动轮力矩增加要有利, 因此受阻驱动轮驱动力矩的自身负反馈调整对越障是有利的. 这也是对三电机驱动采用并联的理由. 另外三电机驱动时可以在管道的约束下, 以不同的转速移动, 减少了驱动轮之间的能量“内耗”, 对整体驱动的协调是有利的.

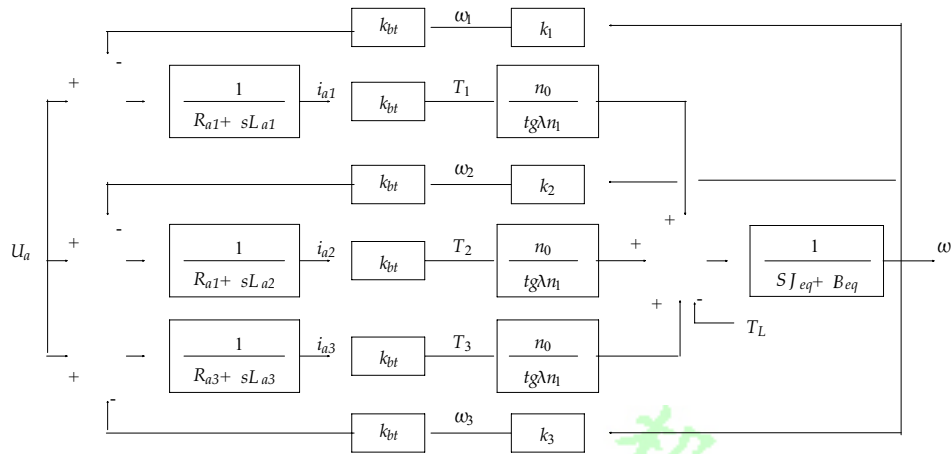


图6 三电机并联机电系统控制框图

3 结论

通过对单电机、双电机和三电机驱动移动载体的分析比较,可知单电机驱动适合于大管径直管的应用条件;双电机驱动适合于中小管径长距离的应用条件;三电机驱动适合于大管径重载和管道直线度状况不良及管内凸凹不平条件下使用.对多电机的机电动力学研究表明:多电机驱动移动载体的驱动力矩叠加性有利地提高了移动载体的驱动性能,从而提高了机器人作业的可靠性.实验和应用中证明多电机驱动是提高越障能力和稳定性的有效途径,从整体上来看,机电系统的闭环结果使移动载体具有恒速的功能;对某一驱动轮的驱动电机而言,由于管内障碍约束,该受阻驱动轮驱动力矩的自身负反馈调整作用使该驱动轮驱动力矩增加,提高了机器人的越障能力和可靠性.

参 考 文 献

- 1 邓宗全, 陈明. 直进轮式全驱动管内行走机构的研究. 机器人, 1995, 17(2): 121- 122
- 2 张永顺, 邓宗全. 一种可越过管内凹形障碍的双驱动多轮移动载体的研究. 机器人, 1998, 20(5): 352- 355

A STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMECHANICAL DYNAMIC DRIVE OF IN-PIPE MOBILE CARRIER

ZHANG Yong-shun¹ DENG Zhong-quan¹ JIANG Sheng-yuan¹ CAI He-gao¹ HOU Ren-jie²

(1. Dept. Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001;

2. Harbin electrical Machinery Limited Liability Company)

Abstract: This paper firstly analyzes the application environment and advantage of in-pipe mobile carrier with single motor drive, double motor drive and triple motor drive. Then their motor superposition feature and power negative feedback characteristics while traversing barriers and their electromechanical coupling characteristics are analyzed theoretically.

Keywords: In-pipe mobile robot; power superposition feature; electromechanical characteristics

作者简介:

张永顺 (1964-), 男, 研究领域: 管内移动机器人, 电动力学等.