

动力学解析的四轮全向移动机器人电机解耦控制

王建彬¹, 陈建平², 杨宜民¹

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090; 2. 肇庆学院 计算机学院, 广东 肇庆 526061)

摘要: 四轮全向移动机器人是一个复杂的非线性、强耦合的机械系统, 各轮驱动电机间存在强耦合现象, 很难取得理想的控制效果。针对这一问题, 提出一种基于动力学解析的多电机控制系统解耦方法。通过对四轮机器人的动力学解析推导出四轮转速与其驱动力矩间的状态方程, 获得各电机输入输出量之间的耦合关系, 在此基础上依据控制量一致思想设计解耦控制器, 解决了传统参考模型解耦方法不能兼顾控制性能和解耦性能的问题, 实现了四路电机的独立控制。仿真结果显示, 该方法能够有效地减小控制系统各变量间的相互耦合作用, 每路电机均很好地跟踪了各自的输入, 解耦效果好。

关键词: 全向移动机器人; 动力学解析; 解耦控制; 电机控制; 运动控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2014)05-0569-08

中文引用格式: 王建彬, 陈建平, 杨宜民. 动力学解析的四轮全向移动机器人电机解耦控制[J]. 智能系统学报, 2014, 9(5): 569-576.

英文引用格式: WANG Jianbin, CHEN Jianping, YANG Yimin. Motor decoupling control for four-wheel omni-directional mobile robot based on dynamic analysis[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(5): 569-576.

Motor decoupling control for four-wheel omni-directional mobile robot based on dynamic analysis

WANG Jianbin¹, CHEN Jianping², YANG Yimin¹

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China; 2. School of Computer Science, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China)

Abstract: An four-wheel omni-directional mobile robot is a complicated nonlinear strong coupling mechanical system. Since the strong coupling phenomena exist between wheel driven motors, it is difficult to obtain ideal control effect. In order to solve this problem, a decoupling method for multi-motor control based on dynamic analysis is raised in this paper. Through dynamic analysis of the four-wheel robot, the state equation between the four wheels' speed and the driving moment is derived, and the coupling relations between input and output variables of motors are obtained. Furthermore, the decoupling controller is designed according to the consistency idea of controlled variables. Compared with decoupling control of the traditional reference model, the new controller meets both controlling and decoupling performance, achieving independent control of four motors. Simulation results showed that the method can effectively reduce the coupling interaction between the control variables. Each motor can also track its own input, showing good tracking decoupling effect.

Keywords: omni-directional mobile robots; dynamic analysis; decoupling control; motor control; motion control

收稿日期: 2013-04-01.

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(S2011010004006); 广东省教育
部产学研结合资助项目(2012B091100423); 肇庆市科技计划
资助项目(2010F006); 肇庆学院科研启动基金资助项目
(2012BS01).

通信作者: 陈建平. E-mail: jpchen@zqu.edu.cn.

全向移动机器人运动灵活, 凭借着不改变位姿
就可以向任意方向移动的独特运动优势, 已经被广
泛应用于人类的生产、生活实践中^[1]。由于四轮全
向移动机器人是一个结构复杂、强耦合、非线性的机

械系统,各个轮子驱动电机间存在耦合现象,对其中任一电机的控制都会引起其他 3 个电机状态的变化,因此对各个电机进行解耦控制是十分迫切和必要的^[2],目前国内外关于四轮全向移动机器人的电机解耦控制方面的研究报告仍比较少见^[3-5]。

四轮全向移动机器人电机控制系统是一个典型的 MIMO 系统,对于多变量系统的解耦问题,通常均采用参考模型控制的方法进行,而关于这类解耦方法的研究目前已经有很多^[6]。文献[7]对具有 4 个操作轮的小车控制系统,通过测量反馈和动力学模型,提出一种基于状态反馈的参考模型解耦控制方法;文献[8]针对具有参数跳变的多变量系统,提出一种基于分层递阶结构的多模型自适应前馈解耦控制器;R. Suzuki 等把模型参考与内模原理结合,构造了一种基于内模的参考模型解耦控制方法^[9];文献[10]通过将滑模变结构理论与模型参考方法融合,设计了一种滑模模型参考控制方法;文献[11]把神经网络理论与模型参考方法结合,提出基于多标量模型的感应电机神经网络逆控制结构,实现感应电机系统的自适应解耦线性化;文献[12]将模糊控制引入感应电动机解耦变结构系统可以有效地抑制抖振,从而提出了采用模糊控制的感应电动机模型参考解耦控制系统。这些方法都是通过设计参考模型对控制器的参数进行调整,控制和解耦功能均由同一个控制器实现,难以同时兼顾控制与解耦的性能,而且设计原理和方法都较复杂,因此在工程实践中,寻求简单易行的有效解耦方法是目前普遍关注的问题。文献[13]提出了一种基于控制量一致思想的参考模型解耦方法,通过设计合理的解耦控制器,实现了耦合关系已知的双通道耦合模型的动静态解耦。然而却没有考虑更加复杂的多通道耦合系统及耦合关系不确定或未知的情况。

为此,提出一种基于动力学解析的四轮驱动机器人电机解耦控制方法。首先,通过动力学解析获得各轮驱动电机输入输出量之间的耦合关系式,然后基于控制量一致思想,设计了四轮机器人电机控制系统的解耦控制器,实现了控制功能与解耦功能的分离,且控制器结构简单,便于实际应用。仿真结果表明,针对不同的输入情况,四路电机都能够很好地跟踪各自的控制目标,实现了控制系统的动静态解耦。

1 各电机输入输出量间的耦合关系

1.1 四轮全向移动机器人的动力学模型

目前,在全向移动机器人轮系分布系统设计中,主要有三轮均衡分布及四轮均衡分布 2 种类型。由于本实验室所用比赛足球机器人的射门机构的增加,导致 4 个全向轮不是对称分布,而是如图 1 所示^[14],前两轮夹角为 120°,后两轮为 90°。

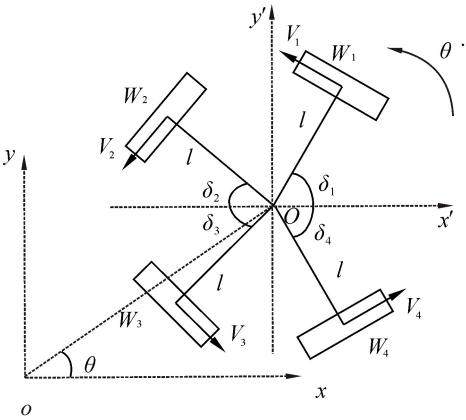


图 1 四轮全向机器人的结构

Fig.1 Structure of the robot

设机器人任一时刻质心的位姿为 $[x \ y \ \theta]^T$, φ_1 、 φ_2 、 φ_3 、 φ_4 为 4 个车轮的角位移,取机器人广义位姿 $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta \ \varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3 \ \varphi_4]^T$,各轮转速为 $\mathbf{v} = [\dot{\varphi}_1 \ \dot{\varphi}_2 \ \dot{\varphi}_3 \ \dot{\varphi}_4]^T$,则有机器人运动学方程:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{S}(\mathbf{q})\mathbf{v} \tag{1}$$

式中: $\mathbf{S}(\mathbf{q})$ 为转换矩阵,其表达式为

$$\mathbf{S}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} -r\sin(\theta + \delta_1) & r\sin(\theta - \delta_2) & r\sin(\theta + \delta_3) & -r\sin(\theta - \delta_4) \\ r\cos(\theta + \delta_1) & -r\cos(\theta - \delta_2) & -r\cos(\theta + \delta_3) & r\cos(\theta - \delta_4) \\ r/l & r/l & r/l & r/l \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中, θ 为机器人的运动方向, l 为机器人质心到各轮子的距离, r 为轮子的半径。

取机器人的质量为 m ,绕质心的转动惯量为 J ,机器人 4 个轮子受到的阻力分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 ,各个轮子的输出力矩为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 ,各个轮子的转动惯量分别为 J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 ,由牛顿第二定律可

得动力学方程如下:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + F_1\sin(\theta + \delta_1) - F_2\sin(\theta - \delta_2) \\ - F_3\sin(\theta + \delta_3) + F_4\sin(\theta - \delta_4) = 0 \\ m\ddot{y} - F_1\cos(\theta + \delta_1) + F_2\cos(\theta - \delta_2) + \\ F_3\cos(\theta + \delta_3) - F_4\cos(\theta - \delta_4) = 0 \\ J\ddot{\theta} - F_1l_1 - F_2l_2 - F_3l_3 - F_4l_4 = 0 \quad (3) \\ J_1\ddot{\varphi}_1 + F_1r = T_1 \\ J_2\ddot{\varphi}_2 + F_2r = T_2 \\ J_3\ddot{\varphi}_3 + F_3r = T_3 \\ J_4\ddot{\varphi}_4 + F_4r = T_4 \end{aligned}$$

进一步整理为拉格朗日标准形式有

$$M\ddot{q} = E\tau - H^T(q)\lambda \quad (4)$$

式中:

$$\begin{aligned} H(q) = & \begin{bmatrix} \cos(\theta + \delta_1) & \sin(\theta + \delta_1) & -l & r & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\theta - \delta_2) & \sin(\theta - \delta_2) & -l & 0 & r & 0 & 0 \\ \cos(\theta + \delta_3) & \sin(\theta + \delta_3) & -l & 0 & 0 & r & 0 \\ \cos(\theta - \delta_4) & \sin(\theta - \delta_4) & -l & 0 & 0 & 0 & r \end{bmatrix} \\ M = \text{diag}(m, m, J, J_1, J_2, J_3, J_4), I = & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I'_{4 \times 4} \end{bmatrix} \\ I' \text{ 为单位对角方阵}, \lambda = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4]^T, \tau = & [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4]^T. \end{aligned}$$

式(4)两端乘以 $S^T(q)$, 且由式(1)、(3)可得图 1 所示的移动机器人动力学模型:

$$\tau = S^T(q)M\ddot{q} \quad (5)$$

1.2 各电机输入输出量间耦合关系的推导

对式(1)两端求导,并将式(5)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{v} = - (S^T(q)MS(q)) - 1S^T(q)M\dot{S}(q)v + \\ (S^T(q)MS(q)) - 1\tau \quad (6) \end{aligned}$$

取 4×4 的方阵 Z 和 M 分别为

$$Z = S^T(q)MS(q) = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ z_2 & z_5 & z_6 & z_3 \\ z_3 & z_6 & z_5 & z_2 \\ z_4 & z_3 & z_2 & z_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$W = S^T(q)M\dot{S}(q) = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 & w_4 \\ -w_2 & w_1 & w_5 & w_3 \\ -w_3 & w_5 & w_1 & w_2 \\ -w_4 & -w_3 & -w_2 & w_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中矩阵 Z 中各元素的表达式为

$$\begin{aligned} z_1 = \hat{J}_1 + \frac{J_1}{n^2} + \frac{r^2}{n^2} \left[\frac{m}{16 \cos^2 \delta_1} + \rho^2 \left(m + \frac{\cos^2 \delta_2}{L^2} J \right) \right] \\ z_2 = \frac{r^2}{n^2} \left[\frac{m}{16 \cos \delta_1 \sin \delta_2} + \rho^2 \left(-m + \frac{\sin \delta_1 \cos \delta_2}{L^2} J \right) \right] \\ z_3 = \frac{r^2}{n^2} \left[-\frac{m}{16 \cos \delta_1 \sin \delta_2} + \rho^2 \left(-m + \frac{\sin \delta_1 \cos \delta_2}{L^2} J \right) \right] \\ z_4 = \frac{r^2}{n^2} \left[-\frac{m}{16 \cos^2 \delta_1} + \rho^2 \left(m + \frac{\cos^2 \delta_2}{L^2} J \right) \right] \\ \dots \end{aligned}$$

矩阵 W 中各元素的表达式为

$$\begin{aligned} w_1 = c_m + \frac{c_w}{n^2} \\ w_2 = \frac{\rho m r^2}{4 n^2} \left(\frac{1}{\sin \delta_2} + \frac{1}{\cos \delta_1} \right) \dot{\theta} \\ w_3 = \frac{\rho m r^2}{4 n^2} \left(-\frac{1}{\sin \delta_2} + \frac{1}{\cos \delta_1} \right) \dot{\theta} \\ w_4 = -\frac{\rho m r^2}{2 n^2} \cdot \frac{1}{\cos \delta_1} \dot{\theta} \\ \dots \end{aligned}$$

限于篇幅,其他系数未列出,其中 J_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 为折算到各个驱动电机的转动惯量, c_m 和 c_w 分别为各个驱动电机和对应轮子的阻尼系数, n 为电机齿轮减速比, $\rho = \frac{1}{2(\cos \delta_1 + \sin \delta_2)}$ 。

令 $\omega = v$, 则式(6)进一步化简得到机器人四轮速度与其驱动力矩间的状态方程:

$$\dot{\omega} = \tilde{A}\omega + B\tau \quad (9)$$

式中:状态矩阵 \tilde{A} 和 B 为 4×4 的方阵,且

$$\tilde{A} = Z^{-1}W, B = Z^{-1} \quad (10)$$

由式(8)和(10)可知,系统状态矩阵 \tilde{A} 是关于各轮转速的非线性矩阵,因此本文在实际计算中,用其在平衡点附近的近似线性化矩阵 A 来代替,从而有

$$\dot{\omega} = A\omega + B\tau \quad (11)$$

由式(11)可知,四轮驱动机器人的电机控制系统是一个 4 输入 4 输出的耦合系统,需要进行解耦以达到对 4 个电机的独立控制。假设系统的输出方程为 $Y = C\omega$, 则由线性系统理论知识可得系统的传递函数矩阵为

$$G = C(sI - A)^{-1}B = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过式(12)就可求得各个电机输入量和输出量之间的耦合关系。

2 控制量一致解耦控制器设计

2.1 控制量一致解耦控制系统设计

控制量一致解耦控制器设计如图2所示。

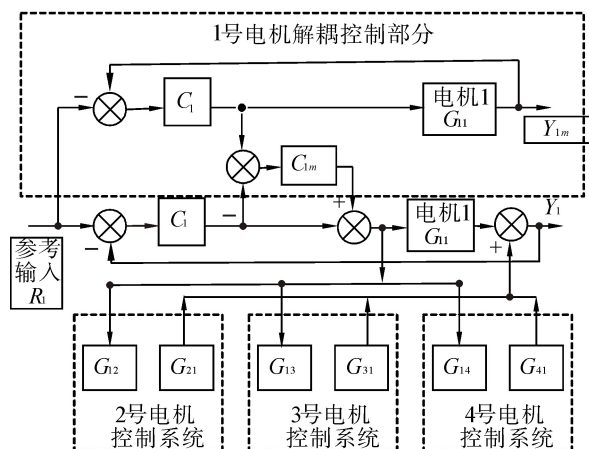


图2 控制量一致解耦控制系统结构

Fig.2 Structure of control system based on consistency controller outputs decoupling

图2中,1号电机控制系统虚线内部分即为其解耦控制部分。主回路控制器 C_1 ,是在不考虑耦合作用的条件下,由要求的控制性能指标根据被控对象设计得到。在主回路控制器 C_1 设计好后,以系统实际输出 Y_1 逼近参考模型输出 Y_{1m} 为目的,设计解耦控制器 C_{1m} ,实现解耦控制。而由于基于控制量一致的原理进行解耦设计,使得解耦控制器只需调节一个增益系数就能实现系统解耦功能,因此大大简化了解耦控制器的设计。

从图2中可知,解耦回路与相应的主回路的控制器参数及传递函数完全相同,这样当解耦控制实现解耦时,就不再需要调节主控制器的参数,从而实现了控制和解耦功能的分离。

2.2 理论分析

取1号电机在无耦合,单独独立控制时的输出为 Y_{1m} , G_{12} 、 G_{13} 、 G_{14} 分别为1号电机对其他3个电机的耦合作用, G_{21} 、 G_{31} 、 G_{41} 分别为其他3个电

机对1号电机的耦合作用,这些量可由式(12)计算得到。取各个电机的传递函数分别为 G_{11} 、 G_{22} 、 G_{33} 和 G_{44} ,由图2分析,列出系统的输出方程组得

$$Y = QX \quad (13)$$

式中:

$$Y = [Y_1 \ Y_2 \ Y_3 \ Y_4]^T$$

$$X = [(X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4)^T$$

$$X_k = (R_k - Y_k)C_k + (Y_{km} - Y_k)C_{km}, k = 1, 2, 3, 4$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{bmatrix}$$

$$\text{令 } |Q| = \begin{vmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{vmatrix}, Q_{ik} \text{ 为 } q_{ik} \text{ 的代数余子式,}$$

则对1号电机回路有

$$[(R_1 - Y_1) + C_{1m}(Y_{1m} - Y_1)]|Q| = Y_1 Q_{11} + \sum_{i=2}^4 Y_i Q_{1i} \quad (14)$$

整理得

$$Y_1 = \frac{|Q|(R_1 + Y_{1m}C_{1m})C_1 - \sum_{i=2}^4 Y_i Q_{1i}}{|Q|(1 + C_{1m})C_1 + Q_{11}} \quad (15)$$

又有 $Y_{1m} = \frac{R_1 C_1 G_{11}}{1 + C_1 G_{11}}$,代入式(15)消去 R_1 整理得

$$Y_1 = Y_{1m} + Y_{1m} \frac{|Q| - Q_{11} G_{11}}{G_{11} [|Q|(1 + C_{1m})C_1 + Q_{11}]} - \frac{G_{11} (\sum_{i=1}^4 Y_i Q_{1i} - Y_1 Q_{11})}{|Q| G_{11} (1 + C_{1m})C_1 + G_{11} Q_{11}} \quad (16)$$

由式(16)可知,如果传递函数矩阵行列式 $|Q| = 0$,

则有 $Y_1 = -(\sum_{i=2}^4 Y_i Q_{1i})/Q_{11}$,系统不能实现解耦。

但是由上一节的分析知,实际机器人电机控制系统中这个条件很难满足。当 $|Q| \neq 0$ 时,若要保证完全解耦,则需要 $Y_1 = Y_{1m}$,此时只需式(16)后两项在响应过程中趋近于零。因此只要保证控制器 $(1 + C_{1m})C_1$ 的动态和静态增益远大于被控对象 G_{11} 即可,而这一点在实际设计中很容易满足。

由于系统的控制器 C_1 已经提前设计好,因此解

耦控制器 C_{lm} 只需要设计为一个大的增益比例系数就能满足系统控制要求,从而大大简化解耦控制的设计,易于应用和实现。当系统完全解耦时, $Y_1 =$

$$Y_{1m} = \frac{R_1 C_1 G_{11}}{1 + C_1 G_{11}}, \text{ 此时由式 (16) 可得}$$
$$\frac{R_1 C_1 (|\mathbf{Q}| - G_{11} \sum_{i=1}^4 Q_{li})}{(1 + C_1 G_{11}) [|\mathbf{Q}| (1 + C_{lm}) C_1 + Q_{11}]} = 0 \quad (17)$$

因为 C_1 、 G_{11} 、 \mathbf{Q} 、 R_1 等均已知或者已经设计好,因此可以依据式 (17),按照解耦性能指标,采用时域或者频域法,进行设计解耦控制器 C_{1m} 。

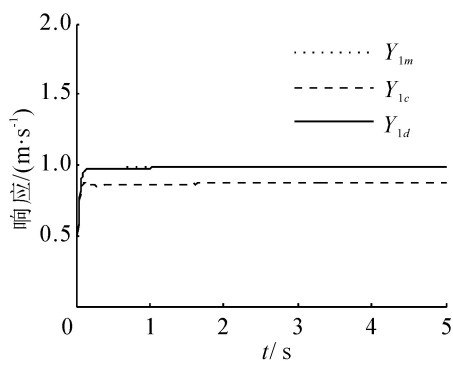
3 仿真实验及分析

为验证本文提出的控制方法的有效性,对机器人各个电机的速度响应进行仿真实验。所用到的机器人的具体参数与文献 [14] 相同,则由式 (9) 和 (10) 计算得到式 (11) 中 2 个状态矩阵及输出矩阵分别为

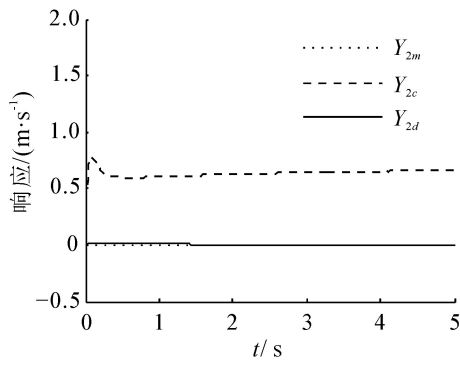
$$A = \begin{bmatrix} 0.7689 & 0.0639 & -0.1471 & 0.0592 \\ 0.0639 & 0.7276 & 0.0592 & -0.1471 \\ -0.1471 & 0.0592 & 0.7276 & 0.0934 \\ 0.0592 & -0.1471 & 0.0934 & 0.7689 \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} 6.8984 & -1.9066 & 4.3907 & -1.7678 \\ -1.9066 & 8.1280 & -1.7678 & 4.3907 \\ 4.3907 & -1.7678 & 8.1280 & -2.7889 \\ -1.7678 & 4.3907 & -2.7889 & 6.8984 \end{bmatrix}$$
$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

仿真实验中 C_1 为 PID 控制器,其 3 个参数分别取为 10、0.01、0.5;解耦控制器 C_{1m} 为一个比例增益系数,其值取为 60。仿真实验分以下 4 种情况进行,仿真时间为 5 s,因为 4 个电机情况相似,文中只给出 1 号电机和 2 号电机的响应曲线。图中, Y_{1m} 、 Y_{2m} 分别表示没有耦合作用下 1 号电机和 2 号电机的理想输出, Y_{1c} 、 Y_{2c} 分别表示未解耦时 2 个电机的输出响应曲线, Y_{1d} 、 Y_{2d} 分别表示解耦以后两个电机的输出响应曲线。

情况 1 1 号电机的参考输入为单位阶跃信号,其他电机无输入信号时,所得的响应曲线如图 3。



(a) 1 号电机的阶跃响应



(b) 2 号电机的阶跃响应

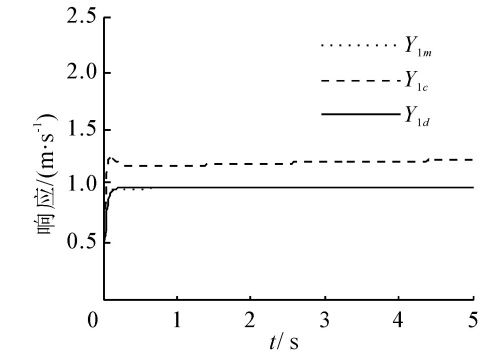
图 3 情况 1 时的响应曲线

Fig.3 Response curves of case 1

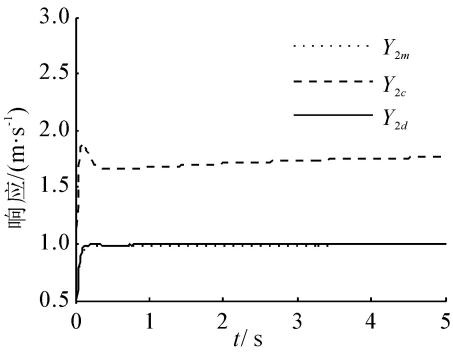
由图 3 可以看出,未进行解耦控制时,由于其他电机耦合作用的影响,使得 2 号电机的输出不为 0,而是一个幅值小于 1 m/s 的响应值,同时由于其他电机对 1 号电机的耦合作用,导致 1 号电机的输出响应的幅值也小于 1 m/s,且存在一定的超调;当对各个电机的控制回路进行解耦以后,其他电机对 2 号电机的耦合作用被大大减小,2 号电机的输出基本为 0,同样其他电机对 1 号的耦合作用也被大大减小,1 号电机能够很好地跟踪给定的阶跃输入。从而说明情况 1 时,本文方法能够很好地实现各个电机的解耦控制。

情况 2 4 个电机的输入信号均为单位阶跃信号时,所得的响应曲线如图 4 所示,从图 4 可以看出,未进行解耦控制时,由于其他电机对 2 号电机耦合作用的影响,使得 2 号电机的输出幅值大于 1 m/s,同时由于耦合作用,导致 1 号电机的输出响应也不为 1 m/s;进行解耦以后,各个电机间的相互耦合作用被大大削弱,各个电机均能很好地跟踪给定的阶跃输入,但是存在一定的静态误差。因此情况 2 时,本文方法能够很好地完成对整个电机控制

系统的解耦控制。



(a) 1 号电机的阶跃响应

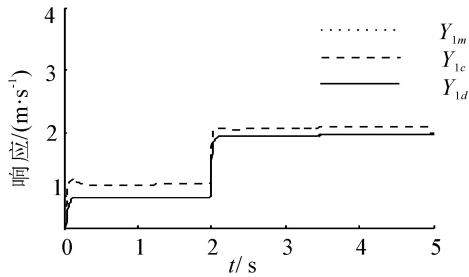


(b) 2 号电机的阶跃响应

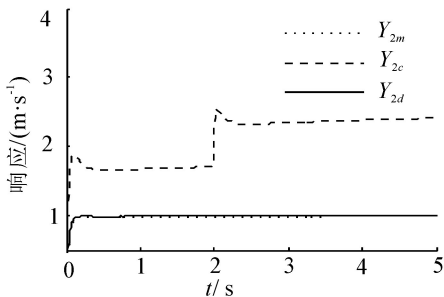
图 4 情况 2 时的响应曲线

Fig.4 Response curves of case 2

情况 3 情况 2 中 1 号电机阶跃输入信号幅值在 2 s 时由 1 m/s 突变为 2 m/s ,响应曲线如图 5。



(a) 1 号电机的阶跃响应



(b) 2 号电机的阶跃响应

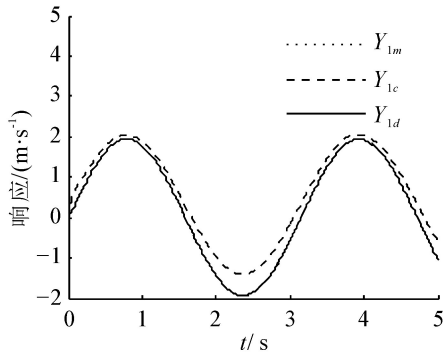
图 5 情况 3 时的响应曲线

Fig.5 Response curves of case 3

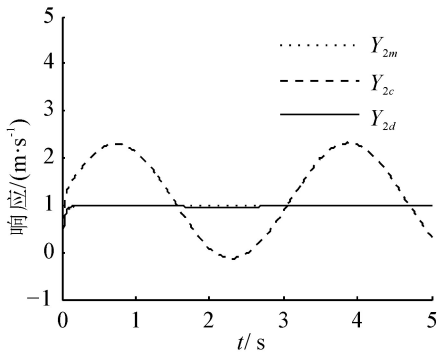
由图 5 可以看出,未进行解耦控制时,在 $t = 2\text{ s}$

1 号电机的输入发生了变化,从而导致 2 号电机的输出也在该时刻产生了跳变,由于耦合作用影响,使得各个电机均不能跟踪指定的输入;进行解耦以后,1 号电机和 2 号电机均能很好地跟踪既定输入,同时 1 号电机在 $t = 2\text{ s}$ 的响应非常平稳,整个响应过程具有良好的动态性能。从而说明情况 3 时,当输入信号存在一定的变化时,本文方法也能够很好地实现各个电机的解耦控制。

情况 4 1 号电机的输入为正弦信号 $R_1 = 2\sin(4\pi t)$,其他电机为单位阶跃信号时,所得的响应曲线如图 6 所示。



(a) 1 号电机的阶跃响应



(b) 2 号电机的阶跃响应

图 6 情况 4 时的响应曲线

Fig.6 Response curves of case 4

由图 6 可以看出,未进行解耦控制时,1 号电机的输入由于时刻在变化,从而导致 2 号电机的输出不是恒值而是正弦曲线,同时由于耦合作用的影响,1 号电机也不能很好地跟踪指定的输入,存在很大的偏差;进行解耦以后,1 号电机和 2 号电机均能很好地跟踪各自的既定输入,同时整个响应过程具有良好的动态性能。从而说明情况 4 时,即使输入信号在时刻变化,本文方法依然能够很好地实现各个电机的解耦控制。

同时为了进一步说明解耦的性能,定义 \bar{e}_c 和 \bar{e}_d 分别为系统解耦前和解耦后的实际输出与理想输出之间偏差的平均值,表示为

$$\bar{e}_{ci} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n (y_{mi}(k) - y_{ci}(k))$$
$$\bar{e}_{di} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n (y_{mi}(k) - y_{di}(k)), i = 1, 2 \quad (18)$$

式中: n 为总的采样数, i 为电机的编号。

表 1 为 4 种不同情况下的 \bar{e}_c 和 \bar{e}_d 比较。

表 1 两电机响应的平均偏差

Table 1 Response average errors of two motors

仿真情况	电机 1 \bar{e}_c / \bar{e}_d	电机 2 \bar{e}_c / \bar{e}_d
情况 1	0.106 2/0.001 3	0.612 9/0.005 5
情况 2	0.214 6/0.001 9	0.711 8/0.006 4
情况 3	0.161 3/0.001 3	1.061 5/0.010 3
情况 4	0.272 9/0.002 4	0.328 4/0.003 0

由图 3~6 以及表 1 可知,在各电机控制系统相互耦合的情况下,解耦控制器可以保证各个电机在一定的误差范围内,完成对期望输入的跟踪,解耦以后的误差约为解耦前的 10^{-2} ,从而跟踪精度大大增加。但是这个静态误差却不能消除,这是因为受系统稳定性和实际条件的限制,解耦控制器的增益不能达到无限大值。尽管如此,解耦控制器仍能有效减小耦合因素的影响,基本实现了系统的动态和静态解耦。

由以上分析可知,若要达到满意的解耦效果,需要保证控制器 $(1 + C_{1m})C_1$ 的动态和静态增益远大于被控对象 G_{11} , 因此为了进一步降低静态误差,可在满足系统稳定性的前提下,适当提高原回路控制 C_1 的动态和静态增益;同时对于 C_{1m} 的设计,可通过引入积分环节修正为 PI 或者 PID 控制,而不是本文采用的较大比例系数的 P 控制。

4 结束语

针对四轮全向移动机器人电机控制系统中存在的强耦合问题,通过动力学解析方法推导获得各个电机输入量和输出量之间的耦合关系,在此基础上,采用控制量一致思想设计了解耦控制器,实现了控制器的控制功能和解耦功能的有效分离,解决了传统参考模型解耦方法中控制器不能同时兼顾控制性能和解耦性能的问题,在一定误差允许范围内,实现

了系统的动态和静态解耦。同时该控制器只需调整一个增益系数即可完成控制系统的解耦,结构简单,易于设计,便于实现和应用。

参考文献:

[1]JEFRI E M S, MOHAMED R, SAZALI Y. Designing omni-directional mobile robot with mecanum wheel[J]. American Journal of Applied Sciences, 2006, 3(5): 1831-1835.

[2]KIM C H, KIM B K. Minimum-energy translational trajectory generation for differential-driven wheeled mobile robots [J]. Intelligent and Robotic Systems, 2007, 49(4): 367-383.

[3]熊蓉,张翮,褚健,等.四轮全方位移动机器人的建模和最优控制[J].控制理论与应用, 2006, 23(1): 96 -98.
XIONG Rong, ZHANG He, CHU Jian, et al. Modeling and optimal control of omni-directional mobile robots[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(1): 96-98.

[4]刘开周,董再励,孙茂相.一类全方位移动机器人的不确定扰动数学模型[J].机器人, 2003, 25(5): 399-403.
LIU Kaizhou, DONG Zaili, SUN Maoxiang. Mathematical model with uncertainty for a class of omni-direction mobile robot[J].Robot, 2003, 25(5): 399-403.

[5]宋海涛,张国良,王仕成,等.全向移动机器人最短时间控制[J].电机与控制学报, 2008, 12(3): 337-342.
SONG Haitao, ZHANG Guoliang, WANG Shicheng, et al. Minimum time control for omni-directional mobile robot[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(3): 337-342.

[6]刘成,赵福宇,侯素霞,等.一种新的多变量参考模型解耦控制的方法[J].控制工程, 2009, 16(1): 12-15.
LIU Cheng, ZHAO Fuyu, HOU Suxia, et al. A reference model decoupling method for multivariable systems [J]. Control Engineering of China, 2009, 16(1): 12-15.

[7]MARINO R, CINILI F. Input-output decoupling control by measurement feedback in four-wheel-active-steering vehicles [C]//Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, USA, 2006: 1715-1720.

[8]王昕,李少远.多模型分层递阶自适应前馈解耦控制器[J].控制与决策, 2005, 20(1): 17-22.
WANG Xin, LI Shaoyuan. Hierarchical multiple model adaptive feedforward decoupling controller [J]. Control and Decision, 2005, 20(1): 17-22.

[9]SUZUKI R, TORITA T, KOBAYASHI N, et al. Internal model control scheme for sensorless force control and its application to rubbing machines [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Industrial Electronic and Applications,

Singapore, 2006: 1-6.

[10] EL-SOUSY F F M. An intelligent model-following sliding-mode position controller for PMSM servo drives[C]//Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Mechatronics. Kumamoto, Japan, 2007: 1-6.

[11] 王新. 基于多标量模型的感应电机神经网络逆控制[J]. 电气传动, 2010, 40(12): 43-47.

WANG Xin. Neural network inverse control of induction motor based on multiscalar model [J]. Electric Drive, 2010, 40(12): 43-47.

[12] 邱焕耀, 毛宗源. 采用模糊控制的感应电动机解耦变结构控制系统的研究[J]. 自动化学报, 1998, 24(3): 391-394.

QIU Huanyao, MAO Zongyuan. The study of decoupling-variable structure system with fuzzy control [J]. Acta Automatica Sinica, 1998, 24(3): 391-394.

[13] 刘成, 赵福宇, 侯素霞, 等. 一种基于控制量一致的参考模型解耦方法[J]. 控制工程, 2009, 16(5): 571-574.

LIU Cheng, ZHAO Fuyu, HOU Suxia, et al. A reference model decoupling method based on consistency controller outputs[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(5): 571-574.

[14] CHEN J P, WANG J B, YANG Y M. A motion control

method of four-wheel drive omni-directional mobile robots based on multi points preview control[J]. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2012, 45(1): 278-284.

作者简介:



王建彬, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要研究方向为智能机器人与智能控制, 发表学术论文 10 余篇, 其中被 EI、ISTP 检索 8 篇。



陈建平, 男, 1975 年生, 教授, 博士, 主要研究方向为人工智能与智能机器人, 主持省市厅级项目 6 项, 获国家实用新型专利 1 项, 发表学术论文 30 余篇, 出版著作 1 部。



杨宜民, 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能机器人、自动控制、机器视觉等, 先后承担并完成国家自然科学基金、国家“863”计划、省自然科学基金等项目 10 余项, 获国家专利 5 项, 发表学术论文 100 余篇, 出版著作 6 部。

2015 年中国计算机学会人工智能会议

2015 CCF Conference on Artificial Intelligence

中国计算机学会人工智能会议是由中国计算机学会主办, 中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会协办的人工智能领域盛会。该系列会议每两年举行一次, 现已成为国内人工智能领域最主要的学术活动, 为广的人工智能研究人员提供了一个交流、合作的平台, 使得研究人员分享人工智能领域的研究成果、创新思想、最新研究进展。

2015 年中国计算机学会人工智能会议将于 2015 年 8 月 21-23 日在山西省太原市举行, 由山西大学计算机与信息技术学院、山西大学计算智能与中文信息处理教育部重点实验室联合承办。本次会议将汇聚从事人工智能理论与应用研究的人员, 广泛开展学术交流, 研讨发展战略, 共同促进人工智能相关理论、技术及应用的发展。

征文范围 (包括但不限于): (1) 人工智能理论基础; (2) 人工智能应用; (3) 智能机器人; (4) Agent 理论及应用; (5) 智能控制与智能管理; (6) 机器感知与虚拟现实; (7) 生物信息学与人工生命; (8) 机器学习; (9) 数据挖掘; (10) 时空知识表示、推理与挖掘; (11) 社会网络分析及应用; (12) 神经网络与计算智能; (13) 人工免疫; (14) 粗糙集与软计算; (15) 图像和语音处理; (16) 模式识别; (17) 知识科学与知识工程; (18) 自然语言处理和机器翻译。

征文截止日期: 2015 年 3 月 1 日

录用通知日期: 2015 年 5 月 10 日

会议召开日期: 2015 年 8 月 21~23 日

会议网站: <http://ccfai2015.sxu.edu.cn/>