

用于直流电机驱动的控制算法设计

吕浩 吕世公 钱焕裕 徐翔
(华中科技大学电子科学与技术系 武汉 430074)

摘要:以 ARM 微控制器为控制核心,IR2104 驱动的 MOSFET 全桥驱动电路和霍尔摇杆为平台,构建了大功率直流有刷电机的控制系统。结合脉宽调制技术的应用,设计了一套有效可行的电机控制算法。实验结果表明,系统控制起来简捷易行,算法设计上安全灵活人性化,并具有小角度大半径转弯、大角度小半径转弯和原地零半径转弯的性能。可直接应用于电动轮椅、电动车等领域。

关键词:全桥驱动电路;脉宽调制;灵活;控制算法

中图分类号: TM3 **文献标识码:** A

Design of DC motor control algorithm

Lv Hao Lv Shigong Qian Huanyu Xu Xiang

(Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Constructs a high-power DC brush motor control system, which takes ARM microcontroller as the control of the core, IR2104-driven MOSFET full-bridge driver circuit and Hall rocker as the platform. And we design a set of effective, feasible motor control algorithms, combined with the application of pulse width modulation technology. The results of the experiment show that the operation of the system is simple and easy, the design of algorithms is safe, flexible and humanized, and the system has the capabilities of turning at small-angle large radius, large-angle small radius and zero radius. The system can be directly applied to electric wheelchairs, electric cars and other fields.

Key words: full-bridge driver circuit; PWM; flexible; control algorithms

0 引言

面对当今日益凸显的能源问题和环境保护的巨大压力,电动车显示了巨大的优势和非常广阔的市场前景^[1]。混合动力电动汽车近年来发展迅速,是 21 世纪最具潜力的绿色清洁汽车^[2]。直流电动机具有非常优秀的线性机械特性,且调速范围宽、控制电路简单,长期以来一直广泛地应用在各种驱动装置和伺服系统中^[3-4]。

目前,有刷电机是直流电机的主流产品,广泛地应用于电动车等领域^[5-6]。电机驱动技术^[7]是电动车的核心部分,因此,灵活有效的电机控制算法具有非常重要的研究意义。然而少有文献论述直流电机在该领域应用的控制算法,并且现有的电动轮椅车均具有控制不够灵活和无法达到零转弯半径等缺点。本文就应用于电动轮椅系统的大功率有刷直流电机,设计了一套灵活、有效且较为人性化的电机控制策略。

1 硬件平台设计

1.1 霍尔摇杆

设计中采用了霍尔摇杆作为电机速度与方向控制的

终端,控制简单灵活,为人机交互提供了便利。霍尔摇杆具有精度高、可靠性高、使用寿命长等优点。

霍尔摇杆以垂直摇杆方向建立 X - Y 坐标平面,输出的两路模拟量分别表示在 X 方向和 Y 方向的偏移量。经 AD 转换后,可得到该平面上的 X 坐标和 Y 坐标,所得的坐标值均为正值,故组成了 90 度的直角坐标系。利用 X 和 Y 的坐标值,通过坐标变换和算法设计,就可得到霍尔摇杆移动量对应于操作者需要控制的两路电机转速和方向的关系。

1.2 电机控制电路设计

本系统采用了两个 24 V 直流供电的 500 W 大功率直流有刷电机,改变直流有刷电机速度的最有效方式是采用脉宽调制(PWM)技术,同时 PWM 控制也是永磁无刷方波电动机系统中最常用的控制方法。传统的 PWM 控制方法如上下桥臂调制、单上桥臂调制、单下桥臂调制、前 60° 调制和后 60° 调制等,广泛应用于电动机控制系统中^[8]。

电机速度 V 、电枢平均电压 U_a 与输入电压 U_d 、占空比 D 的关系如下:

$$U_a = U_d \times D \quad (\text{其中 } 0 < D < 1) \quad (1)$$

$$V = A \times U_a \quad (\text{其中 } A \text{ 为比例系数}) \quad (2)$$

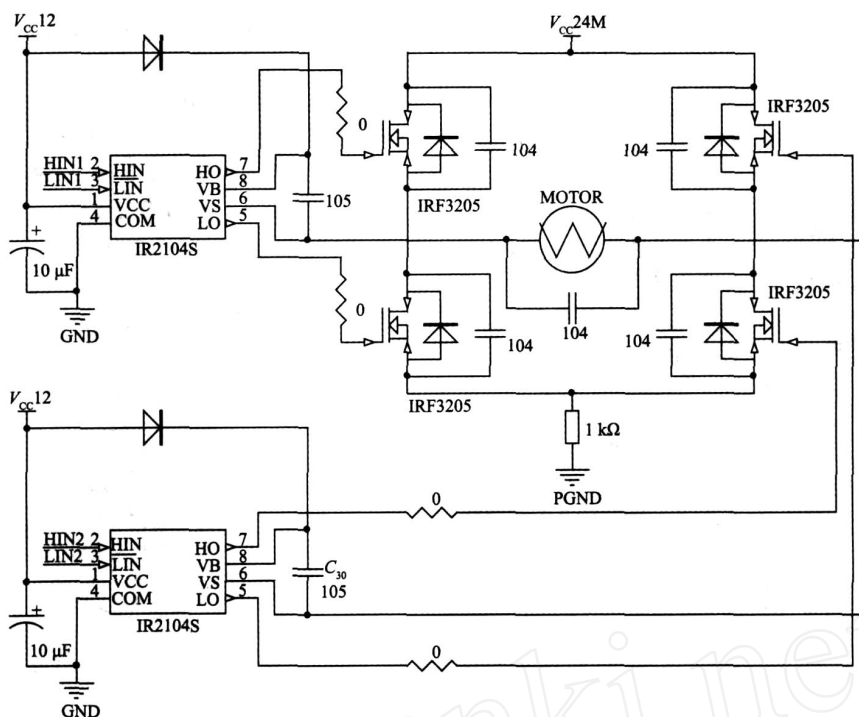


图1 H桥电路原理

直流有刷电机的控制电路为H桥电路,如图1所示,由4个耐高压的MOSFET IRF3205和两个半桥驱动芯片IR2104S组成。ARM微控制器LPC2103的IO口输出3.3V PWM经过两片IR2104S产生4路15V PWM,驱动4个MOSFET,形成全桥驱动电路。

IR2104S中LIN设置为1时,HO输出与HIN同相,LO输出与HIN反相。在图1中,当设置LIN1为1、HIN1为PWM输入且LIN2为1、HIN2为1时,H桥右下MOSFET导通,右上MOSFET截止,左上MOSFET按PWM规律通断,左下MOSFET的通断与左上相反,由此可实现PWM控制的电机正转;反之,设置LIN1为1、HIN1为PWM输入且LIN2为1、HIN2为0时,可实现PWM控制的电机反转。

2 算法设计

就应用于智能电动轮椅等领域,关键在于电机的控制必须灵活、实用、安全。因此,在H桥电路和PWM的基础上,针对两路电机设计了一套相应的算法策略,实现了良好的控制效果。

2.1 缓冲算法

利用递归式^[9]的思想,设计了缓启动算法、缓制动算法和缓变向算法3种缓冲算法。在程序设计中,其应用可按两电机的转向是否突变分为4种情况:1)两电机转向不变,此时两电机可应用缓启动或缓制动算法(加速或减速时,下同);2)左电机转向突变、右电机转向不变,此时左电

机应用缓变向算法,右电机可应用缓启动或缓制动算法;3)右电机转向突变、左电机转向不变,此时右电机应用缓变向算法,左电机可应用缓启动或缓制动算法;4)两电机转向均突变,此时两电机均应用缓变向算法。以左电机为例,介绍缓冲算法如下。

2.1.1 缓启动和缓制动算法

根据霍尔摇杆得到的本次的PWM值 $P(N+1)$ 、上一次的PWM值 $P(N)$ 和由算法得到的PWM值 P_t (即实际驱动电机的PWM值)之间的计算公式如下:

$$D = P(N+1) - P(N) \quad (3)$$

$$P_t = P(N) + m \times D / M, m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

当 $P(N+1)$ 比 $P(N)$ 增大较多时,把差值 D 分为 M 份, P_t 在 $P(N)$ 基础上缓慢累加 M 次从而得到 $P(N+1)$,这样就得到较平缓的电机加速曲线。

与缓启动算法原理类似,缓制动算法计算公式如下:

$$D = P(N) - P(N+1) \quad (5)$$

$$P_t = P(N) - m \times D / M, m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

P_t 从 $P(N)$ 缓慢累减 M 次得到 $P(N+1)$,从而得到了较平缓的电机减速曲线。

缓启动缓制动的的设计使得轮椅车在突然加速或减速时行进更为平稳自然。考虑到电机在加速和减速过程中的灵敏度与平缓度,实验中采用折衷方案取 $M=5$ 时得到的测试效果较好。

2.1.2 缓变向算法

考虑到电机突然转向时要保证其平稳的转向过渡,结

含缓启动和缓制动算法思想,设计了相应的缓转向算法。计算公式如下:

$$P_t = P(N) - m \times P(N) / M, m = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

$$P_t = m \times P(N + 1) / M, m = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

当 $P(N + 1)$ 与 $P(N)$ 异号时,即由霍尔摇杆得到的电机转向与上一次得到的转向相反时,应用式(7)使电机 PWM 缓减回零,并在 PWM 减为零后再等待一段时间以保证实际电机速度为 0,使得转向过渡更加平缓。此后改变电机转向,再缓慢增加 PWM。这样设计可以使轮椅车在霍尔摇杆突然变向不会有太大的颠簸震动,保证了舒适性。实验测试的结果曲线如图 2 所示。

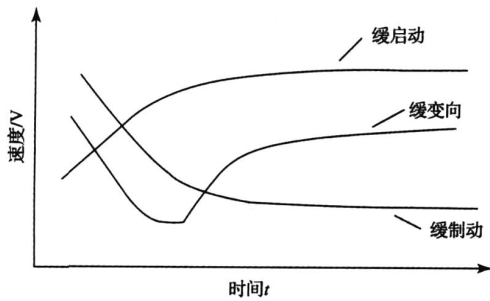


图 2 缓冲算法曲线

2.2 区间转向算法设计

为实现轮椅在各种地段条件下的灵活转弯控制,改进了传统的霍尔摇杆控制方法,设计了新式的区间算法逻辑。

2.2.1 挡位设计和坐标变换

根据不同的路段和个人的需要,硬件上设计 2 个开关将挡位划分为 4 挡,即散步挡、步行挡、行进挡和快速挡,便于操作者进行切换。

对霍尔摇杆 AD 值的 90° 直角坐标系,进行适当的变换,可建立 360° 的直角坐标系。以 X 坐标为例,计算公式如下:(Y 坐标变换与 X 坐标变换相同。)

$$\text{归一化: } X = X / 2^{10} \quad (9)$$

$$\text{挡位设计: } X = X \times C \quad (10)$$

$$\text{坐标转换: } X''' = X - C / 2 \quad (11)$$

取 $C = 80$ 则为行进模式,其他三挡位则分别为 $C = 40$ (散步模式), 60 (步行模式) 和 100 (快速模式)。经坐标变换得到的 360° 直角坐标系对辨别方向提供了便利,将霍尔摇杆的偏移量经 AD 转换和坐标变换后根据 X 和 Y 坐标值判断所处的区间,就可以很直观的得知霍尔摇杆对电机的控制信息,如前进、后退、左转、右转等,同时也为区间转向算法奠定了基础。

2.2.2 区间转向算法

传统的霍尔摇杆区间划分方式是由 X 轴和 Y 轴将平面划分为 4 个区间,即直角坐标系的四个象限,实现基本的前进、后退、左转和右转。但是,这种区间划分方式会带

来很多问题,比如轮椅转弯时会显得很笨拙,而且无法保证零半径转弯等。

将 X、Y 轴逆时针旋转角度再与原 X、Y 轴相交,即得到了基于区间转向算法的霍尔摇杆区间划分方式。若取 $\theta = 45^\circ$,则新的区间划分由 X 轴、Y 轴、 $X + Y = 0$ 直线和 $X - Y = 0$ 直线在平面内相交形成的四大区域共 8 个区间组成,如图 3 所示。这样的划分方式可实现轮椅转向时的小角度大半径转弯、大角度小半径转弯和原地零半径转弯,从而提高了轮椅控制的灵活性和舒适性。具体原理分析如下。

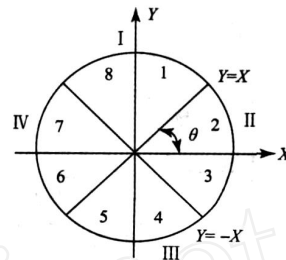


图 3 区间转向算法的区间划分

1) 方向的确定

在 $X + Y = 0$ 上方 ($X + Y > 0$) 左电机正转,在 $X + Y = 0$ 下方 ($X + Y < 0$) 左电机反转,在 $X + Y = 0$ 上 ($X + Y = 0$) 左电机停止转动,为变向的转折点;在 $Y - X = 0$ 曲线上方 ($Y - X > 0$) 右电机正转,在 $Y - X = 0$ 曲线下方 ($Y - X < 0$) 右电机反转,在 $Y - X = 0$ 曲线上 ($Y - X = 0$) 右电机停止转动,为变向的转折点。故:在区域 (包括区间 1、8) 内,两电机正转,轮椅处于前进状态;在区域 (包括区间 2、3) 内,左电机正转右电机反转,轮椅处于右转状态;在区域 (包括区间 4、5) 内,两电机反转,轮椅处于后退状态;在区域 (包括区间 6、7) 内左电机正转右电机反转,轮椅处于左转状态。

设计如下:($DIR_{L(R)}$ 表示左(右)电机转向,0 表示反转,1 表示正转。)

$$(DIR_L, DIR_R) = \begin{cases} \text{区域} & : (1, 1), \text{前进} \\ \text{区域} & : (0, 1), \text{左转} \\ \text{区域} & : (1, 0), \text{右转} \\ \text{区域} & : (0, 0), \text{后退} \end{cases} \quad (12)$$

2) 速度的确定

两路电机的 PWM 值是基于 8 个区间得到的,每个区间有相对应的左右电机 PWM 值,第 1、3、5、7 区间计算方法如下所示。($P_{X(Y)}$ 即为经坐标变换后的 $X'''(Y''')$, $P_{L(R)}$ 为左(右)电机的 PWM 值, P_{\max} 为当前挡位的最大允许 PWM 值。)

$$\text{区间 1: } P_L = \begin{cases} (P_y + P_x) \times 2, & P_L < P_{\max} \\ P_{\max}, & P_L > P_{\max} \end{cases}, \quad P_R = (P_y - P_x) \times 2 \quad (13)$$

区间 3: $P_L = (P_x + P_y) \times 2,$

$$P_R = \begin{cases} (P_x - P_y) \times 2, P_R < P_{max} \\ P_{max}, P_R > P_{max} \end{cases} \quad (14)$$

区间 5: $P_L = \begin{cases} (P_x + P_y) \times (-2), P_L < P_{max} \\ P_{max}, P_L > P_{max} \end{cases},$

$$P_R = (P_x - P_y) \times 2 \quad (15)$$

区间 7: $P_L = (P_y + P_x) \times (-2),$

$$P_R = \begin{cases} (P_y - P_x) \times 2, P_R < P_{max} \\ P_{max}, P_R > P_{max} \end{cases} \quad (16)$$

在 1、8 区间中,两电机均正转。当霍尔摇杆在区间 1 中顺时针偏转,则右电机转速减小,轮椅前进并有轻微的转向(由速度差引起),在 $Y - X = 0$ 直线上 $P_R = 0$,右电机转速为 0;当霍尔摇杆进入 2、3 区间时,左电机正转右电机反转,轮椅处于右转状态,其中:在区间 2 中, P_L 较大而 P_R 较小,实现了小角度大半径的右转弯,在区间 3 中, P_L 较小而 P_R 较大,实现了大角度小半径的右转弯,在 X 轴上, $P_L = P_R = P_x \times 2$,即左电机与右电机的 PWM 值大小相同,而两电机转速相反,实现了零半径的右转弯;同理,在 4、5 区间中,两电机反转,轮椅倒退行进并有轻微的转向,在 $X + Y = 0$ 直线上 $P_L = 0$,左电机转速为 0;在 6、7 区间中,左电机反转右电机正转,轮椅处于左转状态,其中:在区间 6 中, P_L 较大而 P_R 较小,实现了小角度大半径的左转弯,在区间 7 中, P_L 较小而 P_R 较大,实现了大角度小半径的左转弯,在 X 轴上, $P_L = P_R = P_x \times (-2)$,同样考虑转速相反,实现了零半径的左转弯。这样的 PWM 设计方法具有非常好的转弯效果,系统运行起来更加灵活平稳自然。将霍尔摇杆沿一半径为 r 的圆顺时针旋转,两路电机的 PWM 值与旋转角的关系曲线如图 4 所示。

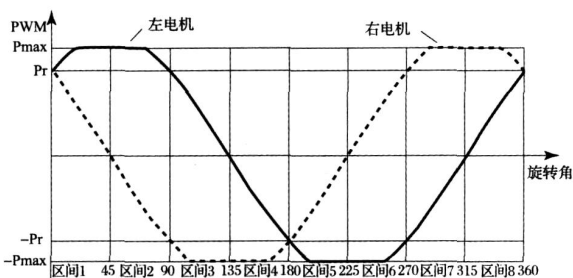


图 4 PWM 值与旋转角关系曲线

3) 算法的进一步优化

为保证轮椅的直线行走性能和稳定性,在图 3 中增加了两条直线 $Y = 10X, Y = -10X$ 和一个以原点为中心的小圆得到图 5,并在此基础上进行了模糊设计和回零设计。

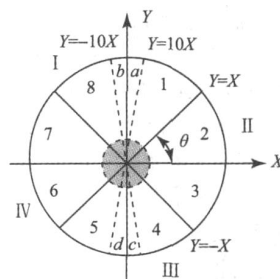


图 5 区间转向算法的区间划分优化

模糊设计。 $Y = 10X, Y = -10X$ 与 Y 轴形成了 4 个区间 a、b、c、d,在 a、b 区间中设计 PWM 值为: $P_L = P_R = P_y \times 2$,在 c、d 区间中设计 PWM 值为: $P_L = P_R = P_y \times (-2)$,即在这 4 区间中两电机 PWM 值保持相等,从而保证了一定的直线前进和直线后退的性能。同样,为保证一定的零半径转弯性能也可进行类似的设计。

回零设计。在原点附近的区域内,即 $P_L^2 + P_R^2 < R_{PWM}^2$,令 $P_L = P_R = 0$ 。这样可以消除小的震动,得到较好的平稳性。

3 测试结果

为检测控制算法的可靠性和性能,以电动轮椅样机作为测试平台,融入算法设计了两路电机的控制软件,其流程图如图 6 所示。

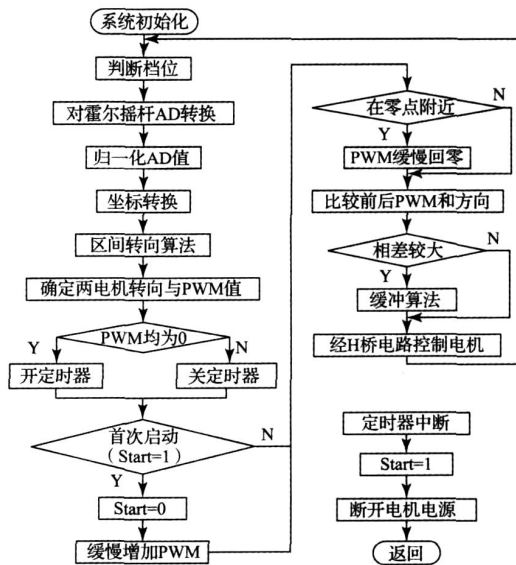


图 6 算法软件流程

针对轮椅运行中的加速、减速、变向等过程,进行相应的测试并观察两电机的变化情况以及乘坐的效果,设计测试方案如下。

1) 平稳和舒适性测试:当摇杆在区间 1 或 4 中突然增加偏移幅度或切换到更高档位时,两路电机速度并没有立

即上升,而是逐步加快速度最终达到最高速;当摇杆在区间 1 或 4 中突然减小偏移幅度或切换成更低挡位时,两路电机速度也是逐步减小速度最终达到最低速;当摇杆从第 1 区间突然旋转到第 4 区间时,两电机速度均先缓慢减小到 0 然后再缓慢上升到设定值。同时乘坐时非常平稳舒适,验证了缓冲算法设计的良好效果。

2) 转向性能测试:将摇杆旋转到第 2 区间时,左电机正转且速度较大,右电机反转且速度较小,轮椅在转弯时角度小半径大;将摇杆继续旋转,到达第 2、3 区间相交处时,两电机转向相反转速基本相同,轮椅接近零半径转弯;将摇杆旋转到第 3 区间时左电机正转且速度较小,右电机反转且速度较大,轮椅在转弯时角度大半径小。从而说明了区间转向算法的成功。

4 结 论

本文研究了基于脉宽调制技术的大功率直流有刷电机的控制算法,以 ARM 微控制器及硬件电路为平台,应用了缓冲策略如缓启动算法、缓变向算法和缓制动算法,来消除速度突变引起的抖动和电机线圈感应电压对电源与电路的伤害;设计了区间转向算法,具有变向过渡自然、零转弯半径等优点;并进行了挡位设计,以适应不同环境下的速度需要。实验结果表明,系统操作简单方便,控制灵活自然,具有优秀的变向变速性能。

致谢

感谢华中科技大学电子科学与技术系计算材料科学与测量模拟中心 (CCMS) 江建军老师、缪灵老师给予的指导。

参 考 文 献

[1] 段建民,贺彦峰,吴斌,等. 辅助混合动力电动汽车技

术研究 (II) - 驱动电机控制系统及关键技术 [J]. 北京工业大学学报, 2006, 32 (4) : 311-314.

- [2] 胡庆波. 混合动力汽车驱动的电功率管理研究 [D]. 杭州:浙江大学电气工程学院, 2007:1-6.
- [3] 陈洁清,江春燕. 直流电机速度控制系统的设计 [J]. 机床与液压, 2007, 35 (7) :187-192.
- [4] 洪嫣,林华,雷国伟. 基于 DSP 的直流伺服电机调速 [J]. 国外电子测量技术, 2009, 28 (5) :75-77.
- [5] 朱华. 我国电动汽车产业发展模式及湖北省电动汽车产业发展对策研究 [D]. 武汉:武汉理工大学汽车学院, 2004:6-12.
- [6] 刘彦超. 基于直流电动机的风力机模拟器研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学信息工程学院, 2009:1-10.
- [7] 高扬. 电气传动自动控制系统优化设计方法研究 [D]. 西安:西北工业大学自动化学院, 2006:1-6.
- [8] 汤平华,廖志辉,李铁才. 方波无刷电动机的倍频 PWM 控制方法 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13 (3) :389-392.
- [9] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R L, et al. 算法导论 (第二版) [M]. 北京:机械工业出版社, 2006:38-50.

作 者 简 介

吕浩,男,1989 年 7 月出生,在读本科,华中科技大学电子科学与技术系,主要研究方向为数字集成电路设计,信号处理与算法设计。

E-mail:lvhao2007@smail.hust.edu.cn