

电动车用无刷直流电机控制系统的分析与仿真

Analysis and Simulation of Brushless DC Motor for Electric Vehicle Control System

西北工业大学 汪楚锐 谢利理

[摘要] 由于无刷直流电机其具有高效率、长寿命、低噪声以及较好的转速-转矩特性,在汽车中的应用比较广泛。针对电动汽车用无刷直流电机控制系统特性进行了方案设计,然后仿真验证控制策略,系统仿真分析主要是对系统的整体调节方案的预估计,分析控制策略的可行性。Matlab 仿真结果显示所实现功能可行,基本达到了预期效果。

关键词: 无刷直流电机 电动汽车 模型仿真

[ABSTRACT] Due to high efficiency, long life, low noise and good speed-torque characteristics of brushless DC motor, BLDCM is more extensive in auto application. A design, and simulation control strategy, system simulation analysis of the system for Brushless DC motor used in electric vehicle control system characteristics mainly are made for pre-estimation of the overall adjustment program to analyze the feasibility of control strategy. Simulation results show that the realization of functions is possible, and reaches the desired effect.

Keywords: BLDCM Electric vehicle Matlab

无刷直流电机(Brushless DC Motor, BLDCM)具有串励直流电机启动特性和并励直流电机的调速特性,其磁通分布为梯形波或者方波。无刷直流电机由于其结构简单、出力大和效率高等特点,已经在国防、航空航天、机器人、工业过程控制、精密机床、汽车电子、家用电器和办公自动化等领域得到了较好的应用。

电动汽车用电机的控制系统的运行性能决定了电动车的基本性能,控制策略的优劣直接影响整个系统的快速性和稳定性。本文提出一种变速积分分离法的数字 PI 控制算法,并将其应用于稀土 BLDCM,经 Matlab/simulink 仿真,结果表明算法快速性高,验证了系统控制策略的可行性,达到了电动汽车的要求^[1-3]。

1 控制系统工作原理

1.1 系统工作原理

稀土永磁无刷直流电动机的基本构成包括电动机本体、控制器和转子位置传感器 3 部分。直流无刷电动机电子开关线路是用来控制电动机定子上各相绕组通

电的顺序和时间,主要由功率逻辑开关单元和位置传感器信号处理单元两个部分组成^[4]。转子位置传感器是检测转子磁极相对于定子绕组轴线的位置,并向控制器提供位置信号的一种装置,根据工作原理的不同,常见的有磁敏式、磁电式、光电式、机电式、接近开关等。

1.2 无刷直流电机的数学模型

永磁无刷直流电动机的特征是各相反电势为梯形波,意味着定子与转子之间的互感是非正弦的,将 BLDCM 三相方程变换为 d、q 方程是比较困难的。而直接利用电动机原有的相变量来建立数学模型却比较方便,又可获得较准确的结果。如文献 [4-5] 所述简化分析,做一系列假设。

由电机学理论可知,交流电机的当前有效相的电压方程为如下所示的一阶微分方程:

$$U_x = R + \sum_{k=1}^n \frac{d\psi_{kx}(\theta, i_x)}{dt}, \quad (1)$$

其中, U_x 为当前有效相的电压, R 为该相电阻, i_x 为相电流, $\psi_{kx}(\theta, i_x)$ 为当前有效相的总磁通,包括自感和互感磁通; n 为绕组相数。

对稀土三相 BLDC 电机来说, A 相的总磁通可表示为:

$$\psi_A = L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c + \lambda_{ar} \quad (2)$$

合并式(1)和式(2),可得如下的永磁无刷直流电动机三相绕组电压平衡微分方程组:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & & \\ & r & \\ & & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, u_a, u_b, u_c 是定子相绕组电压; i_a, i_b, i_c 是定子相绕组电流; e_a, e_b, e_c 是定子相绕组电动势; L 每相绕组的自感; M 每两相绕组间的互感; P 是微分算子;

对于方波电动机,上式中三相方波电流和三相梯形波反电势互差 120° , 分别为近似方波和梯形波。由于转子磁阻不随转子位置变化而变化,因而定子绕组和互感为常数。

当三相绕组为星形连接,且没有中线,则有:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4)$$

并且,

$$Mi_a + Mi_b + Mi_c = C \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(3)得

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & & \\ & r & \\ & & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & & \\ & L & \\ & & L-M \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

下面电压方程式的状态方程形式,由此可以建立无刷电机的模型:

$$P \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & & \\ & \frac{1}{L-M} & \\ & & \frac{1}{L-M} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r & & \\ & r & \\ & & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r & & \\ & r & \\ & & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \right\}$$

2 双闭环控制结构

本文使用速度环和电流环串联的双闭环控制结构^[1-3]。当无刷直流电机处于自同步运行状态时,控制器根据测出的电机位置切换信息计算出当前转速,速度给定信号与当前转速在控制芯片中进行速度环PI计算,得到电流的参考值,电机绕组电流反馈信号由霍尔电流采样并经过 A/D 采样芯片口送入控制芯片, A/D 转换得到当前电流值,将当前电流值与电流参考值进行电流环PI计算,最终通过电流环的PID调节算法实现对电机驱动波形的脉宽调制(PWM),从而控制电机达到预定的转速。

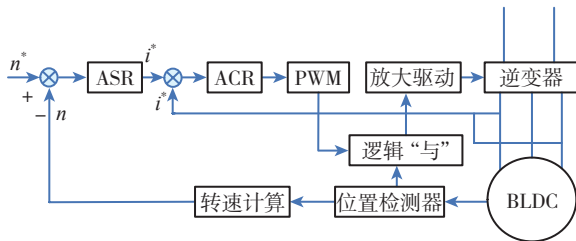


图1 无刷直流电机双闭环调速^[1]

Fig.1 Brushless DC motor based on double closed loop

在本设计中,先设计电流调节器(ACR),然后把整个电流环当作转速调节系统中的一个环节,再设计转速调节器(ASR),最终完成整个系统的调试。

3 控制策略

在PID算法中,比例可以快速响应控制作用,而

积分部分是偏差的积累,最终消除稳态误差。在数字PID,忽略D,可以将P和I分开,在偏差很大时,只让比例起作用,以快速减少误差;当偏差减少到一定程度时,再将积分作用加入,最终消除稳态误差,又能避免圈较大的退饱和超调。

积分算法表达式为:

$$\Delta u(k) = K_p[e(k) - e(k-1)] + C_I K_I e(k) \quad (6)$$

其中,

$$C_I = \begin{cases} 1 & |e(i)| \leq \delta \\ 0 & |e(i)| \geq \delta, e \text{ 为常值。} \end{cases}$$

积分分离法能有效地抑制振荡或减小超调,可用转速调节器。所以控制策略选择积分分离法的数字PI控制算法。

4 基于 MATLAB 的控制系统仿真分析

综上搭建 MATLAB 仿真图,且控制系统电气要求如表1所示。

表1 电动车控制系统电气要求

参数	数值	说明
供电电压	36V	
工作电压	56V	最高
工作电压	20V	最低
额定电流	120A	持续可输出电流
最大电流	200A	过流保护
控制器电压	15V, 5V, 3.3V, 1.5V	电源变换
控制最大电流	1A	电源最大允许电流

控制结构使用双闭环调速,调节方式使用变速积分分离法的数字PI控制算法,并带有限幅环节。

Current Measurement 模块用于测量流过功率电路中的电流。Controlled voltage Source 为可控电压源,用于将一数值信号转换为相同大小的电压源。图中的电阻电感是用 matlab 下 Power System 中的 Series RLC Branch 实现的,将电容值设为 inf(无穷大)即可。理想情况下,三相电阻电感完全一致,现实中可能有细小的差别,这里使用理想情况,认为3个电阻电感完全相同。电路搭建的依据是式(3)所建立。

由无刷直流电机公式中的

$$I_a = \frac{U - 2\Delta U - E}{2r_a} \quad (7)$$

搭建反电势模型,电机反电势为梯形波。

速度环节PI调节模块采用变速积分分离法的数字PI控制算法,其中在差距比较大时,P参数使用0.05,I

不使用积分,在差距比较小时P使用0.03,而I使用0.01。在速度环节PI调节模块后面加入限幅模块,上限是7.5,下限为0。速度环节的速度较慢,积分时间常数可以大一些。

电流环节PI调节模块使用离散情况下的PI调节器,便于和实际工程中的系统可以相互参考。比例系数是1.4,积分在差距比较大时不使用积分环节,在差距较小的时候使用,系数为0.7。

本系统采用电流调节环和速度调节环的双闭环反馈调速。与电动机本体同轴连接的转子位置传感器输出磁极位置 Hall 信号,经控制电路进行逻辑变换后产生 PWM 信号,在经过驱动电路放大后送至逆变器,使功率开关管导通,控制电机的转动。图 2 为控制系统的总体模块。

仿真使用骊山电子的无刷直流电机 LS57BL3A100C 为模型做仿真,该电机的参数为电阻 0.36Ω ,电感

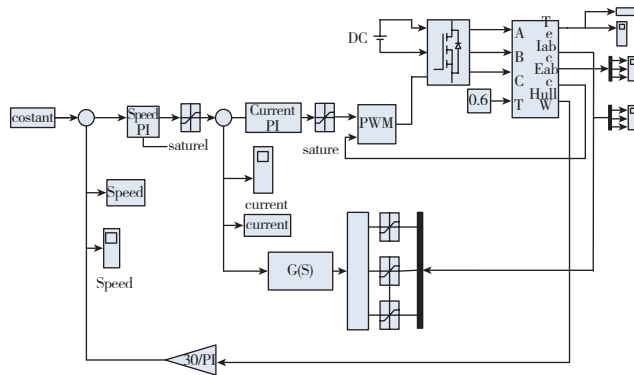
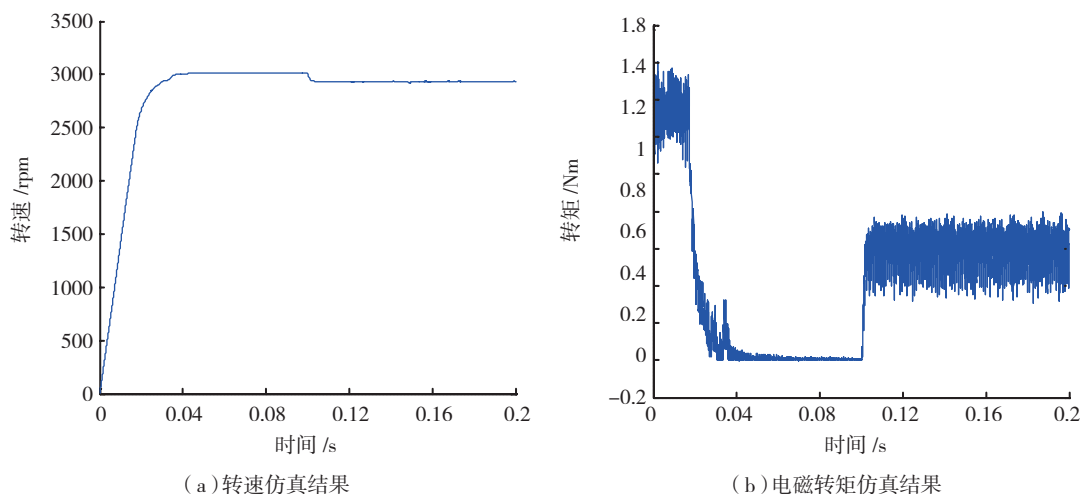


图2 控制系统总体模块

Fig.2 Overall module of control system

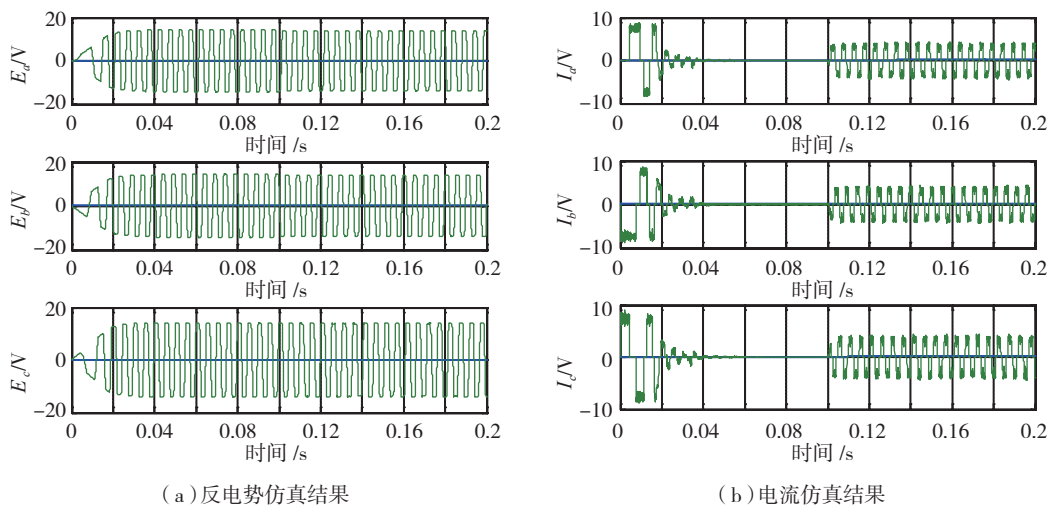


(a) 转速仿真结果

(b) 电磁转矩仿真结果

图3 仿真曲线

Fig.3 Simulation curve



(a) 反电势仿真结果

(b) 电流仿真结果

图4 仿真结果

Fig.4 Results of simulation

(下转第 83 页)

导轨实际安装方向与理论方向的夹角,如图8所示(为了明示各部分几何关系,图中夹角 γ 取值较大)。

最后,对偏置曲面 S_2 在虚拟平面 S_3 上生成的 S_2' 绕虚拟平面坐标系 C_3 的原点旋转 $-\gamma$ 角后,便可直接在计算机辅助制造软件(如Master CAM)中生成群孔钻削路径。此路径上的点位信息,即是待加工面 S_1 在设备运行面为 S_4 上的投影,按其进行加工,即可补偿因导轨高度引起的 X 轴方向弧长误差,同时也可补偿导轨在工件表面粗略定位的偏角误差。

实际工程应用中,可以遵循以下流程实现三维数模中点位信息生成设备加工代码,如图9所示。首先在一种三维CAD软件(如CATIA)中将飞机蒙皮表面上的点位信息映射到两维工程图上;之后利用设备本身的检测功能测量实际蒙皮上两个工艺 K 孔的设备坐标,计算得到安装误差角 γ ;最后在一种CAM软件(如Master CAM)中导入之前生成的两维工程图,并补偿 γ 角,设置好参数后便可生成加工代码。

5 结束语

研究开发了一套针对于柔性轨道自动制孔设备的专用数控系统。该系统是以PMAC运动控制器为核心,结合上位机、执行元件、检测元件等构建起来的。同时开发的数控系统软件提供了一个人机交互的平台,便于操作。探讨了三维数模上的点位信息不能直接生成设备加工代码的问题,并提出了一种有效、便捷的解决方法。整套数控系统已经很好的应用到了开发的柔性轨道自动制孔设备之上,能够实现设计使用要求,完成自动制孔加工。

参考文献

- [1] 卜泳,许国康,肖庆东.飞机结构件的自动化精密制孔技术.航空制造技术,2009(24):61-64.
- [2] 郭洪杰.大型飞机柔性装配技术.航空制造技术,2010(18):40-41.
- [3] 林美安,陈文亮,王珉,等.柔性轨道自动化制孔系统的仿真研究.机械制造,2010(04):14-17.
- [4] 西奥多·M·博伊尔-戴维斯,小詹姆斯·N·巴特里克,罗杰·A·盖奇,等.柔性轨道多轴工具机及方法.中国:B23Q9/00.CN1993204[P],2007-07-04.
- [5] 林美安.飞机机身装配工艺及仿真技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2010.
- [6] 侯志霞,刘建东,薛贵军,等.柔性导轨自动制孔设备控制技术.航空制造技术,2009(24):58-60,64.
- [7] 孟璇,邢玉生,王春.基于PMAC的并行双CPU开放式数控系统的研究与开发.组合机床与自动化加工技术,2000(10):28-30,37.
- [8] 白海清,彭玉海,何宁.基于PMAC的数控系统软件开发研究.机床与液压,2007(02):59-61.

(责编 深蓝)

(上接第77页)

0.4mH,转动惯量是 $0.9\text{kg}\cdot\text{m}^2$,极对数为4,额定电压是36V,额定电流6.5A,额定转矩 $0.6\text{N}\cdot\text{m}$,额定功率185W。在仿真时,开始转矩为0,在0.1s时加上额定转矩。将电压初加于电机上,给定转速和实际的转速之间相差较大,即ASR的输入很大,其输出很快达到限幅值,电流也很快上升,接近最大值。ASR达到饱和,转速环相当于开环状态。经过双闭环的调节作用,系统表现为恒值电流给定下的电流调节系统,电流急速下降,转速线性增长。当转速达到给定值后,转速调节器的给定与反馈电压平衡,输入偏差为零,最终系统在0.04s内达到了稳定。

无刷直流电机转速仿真结果如图3(a)所示,转速单位 r/min ,时间单位是s。在空载时,转速稳定上升,在0.03s时转速达到额定转速。在0.1s时加上额定转矩后,转速下降后达到稳定。

无刷直流电机电磁转矩仿真结果如图3(b)所示,转矩单位 $\text{N}\cdot\text{m}$,时间单位是s。刚开始转矩有过冲,这是由于在刚启动时,反电势很小,电流加在电机内阻上,造成电流很大,因而转矩也很大。电磁转矩在0.05s时回复到0,这是因为空载转矩接近于0。0.1s时加外部转矩,电磁转矩迅速反应在额定转矩附近。

无刷直流电机反电势仿真结果如图4(a)所示,反电势在0.03s时反电势建立。在0.1s时由于加负载,电动势下降。

无刷直流电机电流仿真结果如图4(b)所示,电机启动时电流有过冲,在0.4s时接近0值。在0.1s时由于加负载,电机有电流出现,波形相差 120° 。

5 结论

仿真结果图证明变速积分分离法的数字PI控制算法在电动汽车中方案可行,并且具有相当的快速性。电动控制系统的仿真可以提前了解系统的内部性能,减少生产周期。

参考文献

- [1] 黄智.电动汽车控制器的设计与实现[D].成都:电子科技大学,2007.
- [2] 袁飞雄.多相永磁无刷直流电机控制系统研究[D].武汉:华中科技大学,2004.
- [3] 唐任远.现代永磁电机:理论与设计.北京:机械工业出版社,1997.
- [4] 陈伯时.电力拖动自动控制系统:运动控制系统(第三版).北京:机械工业出版社,2003.
- [5] Bose B K. Modern Power Electronics and AC Drives.北京:机械工业出版社,2003.

(责编 小城)