基于 AUTOSAR 的电动汽车驱动电机 ECU 控制软件研究与设计

黄智宇，熊张良

（重庆邮电大学自动化学院，汽车电子嵌入式工程中心，重庆 400065）

摘要：传统汽车电子软件由于开发周期长、重用性低、移植性十分困难，已经不能满足现代汽车电子快速地发展。为解决这些问题，研究提出以汽车开放系统架构（automotive open system architecture，AUTOSAR）标准为架构的永磁同步电机电子控制单元（electronic control unit，ECU）。主要完成了对控制软件中的应用层软件组件和运行实体的设计、算法库层的设计以及基础软件层的设计。实验表明，参照 AUTOSAR 标准的电动汽车驱动电机 ECU 软件，实现了对电机的起动、加减速基本控制功能，为汽车 ECU 控制软件在不同平台上的开发、移植和功能扩展打下了良好的基础。

关键词：自动控制技术；永磁同步电机；汽车开放系统架构；电子控制单元；软件组件；运行实体

中图分类号：TP29 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-2850(2015)18-1934-09

Research and design of electric vehicle drivemotor ECU control software based on AUTOSAR

HUANG Zhiyu, XIONG Zhangliang

(*Embedded Engineering Center of Automotive Electronics*, *School of Automation*, *Chongqing University of Posts and Telecommunications*, *Chongqing* 400065, *China*)

Abstract: The development cycle of traditional automotive electronics software is long, the possibility of recycling is low and the portability is very difficult, which makes it unable to meet the current rapid development of automotive electronics. To solve these problems, the new approach based on automotive open system architecture (AUTOSAR) was applied to research and design the electronic control unit (ECU) software for permanent magnet synchronous motor. It mainly completed the design of the application layer software components, runnable entities，the algorithms library layer and basic software layer in the development of control software. Bench experiment results show that the motor ECU control software implemented the basic control function of the motor started, accelerated and decelerated according to the standard of AUTOSAR. It lays a good foundation for the development, transplantation and function expansion on different platforms for auto ECU control software.

Key words: automatic control technology; permanent magnet synchronous motor; automotive open system architecture; electronic control unit; software components; runnable entities

0 引言

汽车电子分为硬件和软件技术，汽车软件同硬件一样，同为汽车的关键技术，是它们把更多的新特性与功能赋予现代汽车。随着 ECU 的不断发展，其性能逐渐增强，价格不断降低，更多的 ECU 被应用到汽车嵌入式系统中，这也要求汽车电子软件实现更多的功能，但随之而来的是加大了软件的开发难度。

基金项目：重庆市科委重点项目（cstc2014yykfA400）

作者简介：黄智宇（1978—），男，副教授，主要研究方向：汽车电子控制、新能源汽车、嵌入式系统软硬件设计.

资料整理 火龙果软件 荐

随着汽车电子软件行业的迅速发展，各大汽车厂商和零部件供应商各自为战，由于电机 ECU 控制软件的开发平台各不一样，导致电机控制软件复用性差，难以维护。为解决这些问题，由世界各大汽车厂商、汽车零部件供应商及其半导体和软件开发公司联合推出了 AUTOSAR[1]，其目的是为了汽车电子软件开发提供标准化、模块化的软件架构。将基于 AUTOSAR 标准的软件开发方法就用于电动汽车驱动电机 ECU 控制软件研究与设计中，将成为未来电机驱动软件开发的趋势。

这里以电动汽车车用永磁同步电机作为控制对象，以英飞凌的 TC1767 处理器作为 ECU 软件开发平台，设计了基于 AUTOSAR 标准的电机 ECU 控制软件。实验结果表明，在电机启动、加速控制、减速控制工况下，设计的电机 ECU 软件能够很好的实现对永磁同步电机的控制。

1 研究背景

1.1 AUTOSAR

AUTOSAR 采用分层化、模块化的架构，其具体结构为应用层、运行时环境层（runtime environment，RTE）及基础软件层（basic software，BSW），如图 1 所示。为支持系统的集成，AUTOSAR 引入了虚拟功能总线（virtual function bus，VFB）[2]。AUTOSAR 应用层由通过 VFB 相互连接的软件组件（software component，SWC）组成。每个 SWC 包含一个或多个端口（port），SWC 间通过端口连接。运行实体（runnable entity，RE）是 SWC 功能实现中的最小控制单元，运行实体的执行由中断事件触发，通过中断的方式来运行。RTE 为 AUTOSAR 架构的核心，VFB 通过它实现其具体功能，以完成应用层 SWC 之间、应用层 SWC 与 BSW 之间的具体通信。

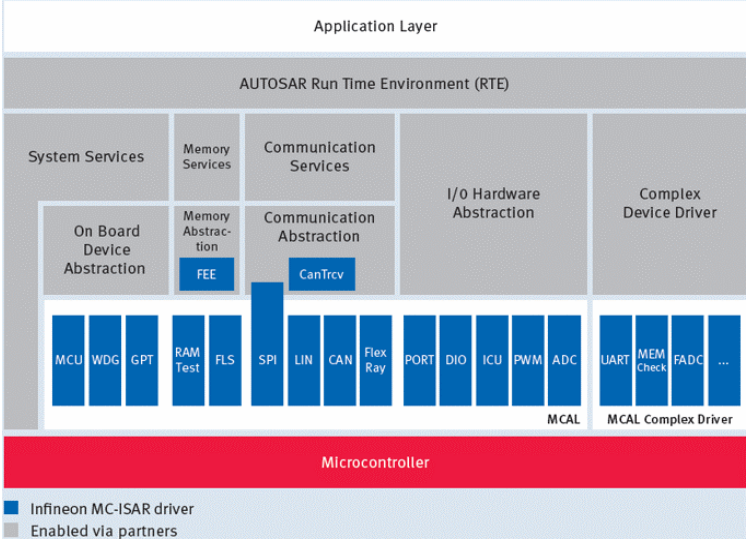

图 1 AUTOSAR 体系结构

Fig. 1 AUTOSAR software architecture

1.2 永磁同步电机控制原理

电动汽车驱动电机采用的是永磁同步电机，由于其效率高、惯性小、扭矩密度高及易于控制，在电动汽车领域得到了广泛的应用。电动汽车驱动电机的控制算法采用磁场矢量定向控制（field oriented control，FOC）[3]。FOC 控制方法通过对坐标系的变换，将永磁同步电机的定子电流分解到转子同步旋转坐标系中，分别为励磁电流分量（i_d，直轴电流分量）和转矩电流分量（i_q，交轴电流分量），再对其分别加以控制，从而获得理想的解耦特性，FOC 控制框图如图 2 所示。

由图 2 可知，FOC 采用双闭环控制方法：通过电流传感器采集电机的三相电流（i_a, i_b, i_c），将三相静止坐标系变换到两相静止坐标系中（Clarke 变换），并通过旋转变换将两相静止坐标系变换成两相旋转坐标系（Park 变换），通过 2 次变换将三相静止定子交流电流矢量分解成按转子磁场定向旋转的直流分量 i_q, i_d，为达到与直流电机相同的控制效果，采用 $i_d^* = 0$ 控制，通过 i^* 控制电机电磁扭矩大小；电机转子位置和速度检测通过速度外环的位置传感器来实现，这里采用旋转变压器获取电机转子位置和转速；

资料整理 火龙果软件 荐

PI 控制器用于速度环和电流环的误差调节，电流环 PI 控制器输出，u_d, u_q 经旋转变换（Park 逆变换）得到 u_α, u_β，作为电压空间矢量（space vector pulse width modulation，SVPWM）模块的输入，经 SVPWM 模块产生 6 路 PWM 波形，驱动逆变器产生用于驱动电机的三相正弦电流波形。

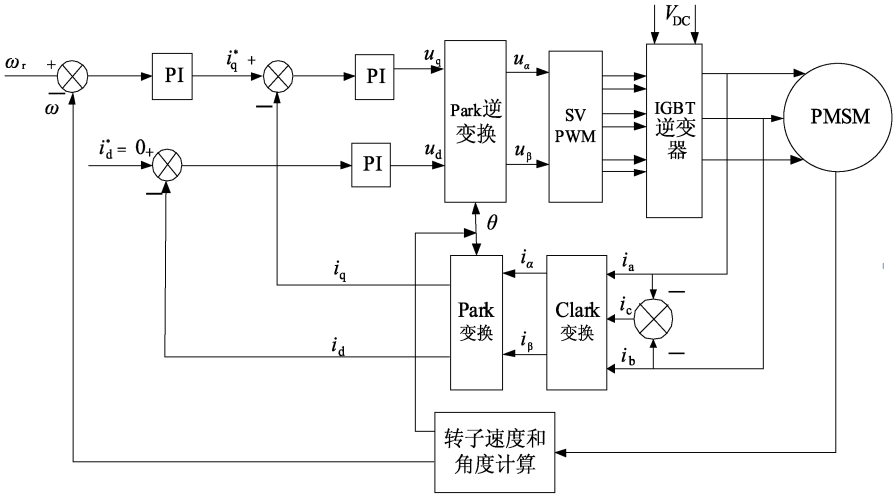

图 2　永磁同步电机 FOC 控制框图

Fig. 2　FOC control block diagram of permanent magnet synchronous motor

2　基于 AUTOSAR 的永磁同步电机控制软件总体设计

根据 AUTOSAR 的开发流程[4]，第一步为系统输入配置，应包括软件组件、系统约束和 ECU 资源。但在设计中，主要针对电动汽车驱动电机 ECU 软件，使用的 ECU 硬件为 TC1767，其 ECU 资源和系统约束已经确定，可忽略系统配置和提取特定 ECU 描述过程。设计的电动汽车电机 ECU 控制软件中，将其设计为四层，分别为应用层、算法库层、ECU 抽象层及微控制器抽象层，具体的电动汽车驱动电机 ECU 软件分层结构如图 3 所示。

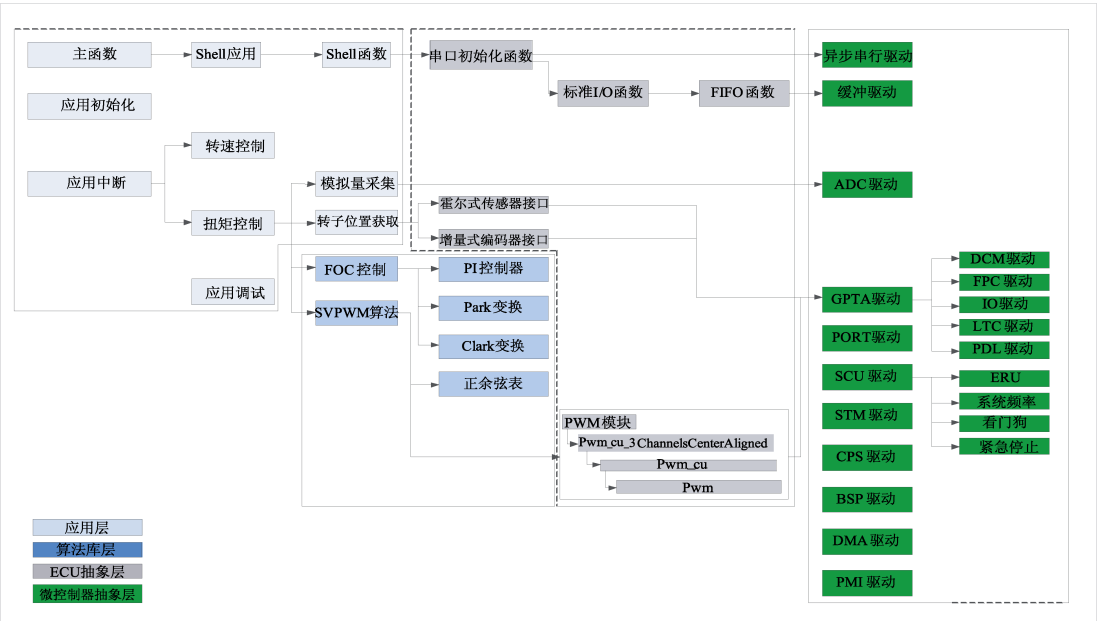

图 3　电动汽车驱动电机 ECU 软件分层结构

Fig. 3　Electric vehicle drive motor ECU software hierarchical structure

资料整理 火龙果软件 荐

2.1 电机 ECU 应用层软件设计

应用层是电机 ECU 控制软件的主要功能体现，基于 AUTOSAR 标准来设计应用层。在 AUTOSAR 中，SWC 间用端口连接，端口包括供给型端口（P-Port）和需求型端口（R-Port）。前者为其他软件组件提供数据和操作，后者从其他软件组件获取所需数据或者请求的操作。将一个软件组件 P-Port 口和另外一个软件组件的 R-Port 口连接，即能实现 2 个软件组件的直接通信[5]。通过对电机 ECU 功能的分析，确立了应用层的软件组件。设计中应用层软件主要完成数据采集（三相电流、转子位置、定子温度等）、工况处理、命令行等功能。确定应用层软件由 6 个 SWC 构成，由于所有的事件都通过中断来进行处理，因此设计一个中断事件软件组件，共 7 个 SWC，即数据采集、工况处理、位置获取、速度控制、扭矩控制、上位机指令、中断事件。应用层软件组件划分如图 4 所示。

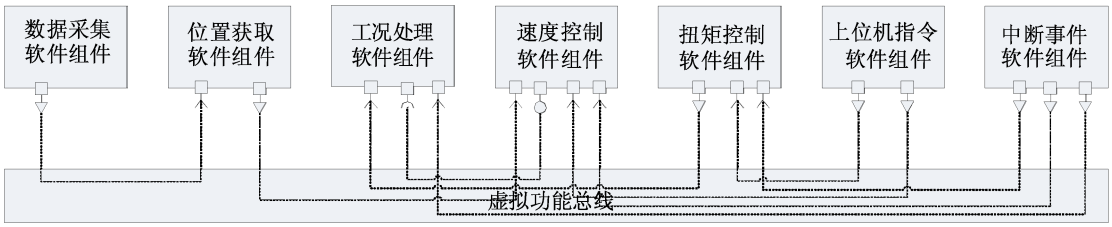

图 4 应用层软件组件

Fig. 4 Application layer software components

数据采集 SWC 通过调用 AUTOSAR 微控制器抽象层（micro controller abstract layer）标准接口访问底层硬件，通过 R-Port 口获得各种传感器采集到的信息，并通过 P-Port 口将转化好的参数信息提供给其他 SWC 使用。转化好的信息将传给工况处理 SWC，根据工况执行相关的控制策略。电机控制策略是 ECU 软件的核心，与电机控制策略相关的 SWC 是位置获取、速度控制、扭矩控制，采用的是在 MATLAB/Simulink R2011b 环境建模[6]，并使用 RTW 对 SWC 接口进行配置，生成 SWC 代码和描述文件。上位机指令 SWC 完成对电机的控制指令，包括电机的启动、调速、制动、控制模式设置等。图 5 给出电机控制策略相关的 SWC（位置取得、速度控制、扭矩控制）结构框图。

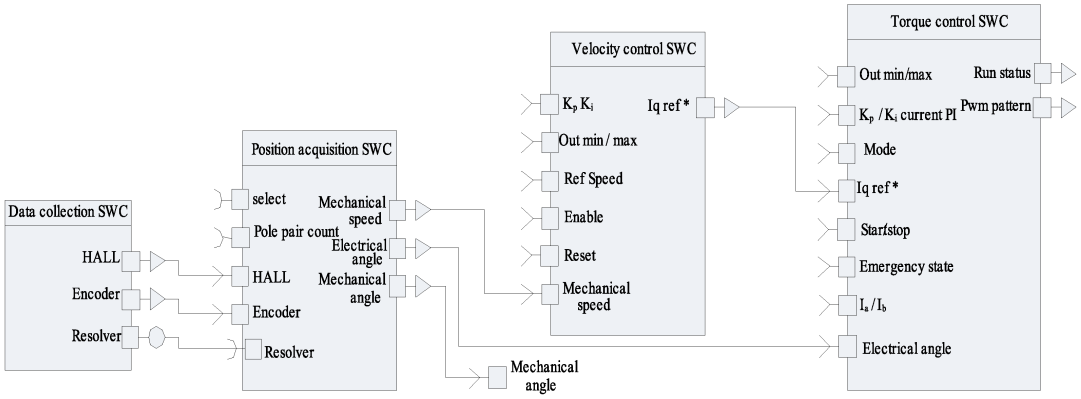

图 5 电机控制策略相关的 SWC 结构框图

Fig. 5 Motor control strategy relevant SWC structure diagram

完成 SWC 后设计其中的 RE. 这里仅给出速度控制 SWC 和扭矩控制 SWC 中负责速度控制和电流控制的 RE. 如图 6～图 7 所示，速度控制的 RE 采用 PI 控制，实现电机转速的闭环控制。输入为转速给定值 n_r 和转速反馈值 n_f，它们之间的误差值作为 PI 控制器的输入，通过设置 K_p（比例参数），K_i（积分

资料整理 火龙果软件 荐

参数）并加入扭矩限幅器得到扭矩值 T_e. 扭矩控制 SWC 实际上为双闭环的电流内环，其 RE 也是采用 PI 控制，实现电机三相电流的坐标变换。输入为转矩控制的电流 q 轴参考量 i_{qref} 和电流反馈量 i_q.

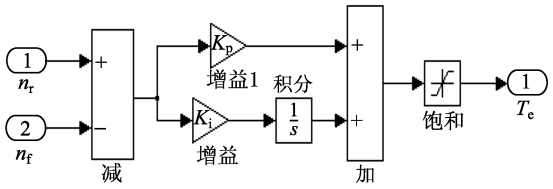

图 6　速度控制 RE 的设计
Fig. 6　RE design for the speed control

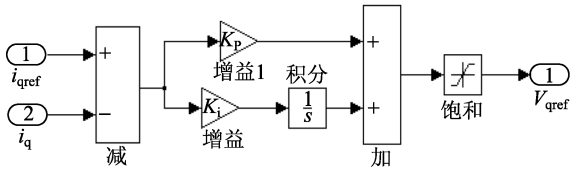

图 7　电流控制 RE 的设计
Fig. 7　RE design for the current control

当完成应用层各 SWC 功能设计之后，可以生成相关的目标代码，其中与电机控制策略相关的目标代码通过 Simulink 进行一键式自动生成，并通过配置窗口对 AUTOSAR 接口规范进行相应的设置，具体的配置说明在文献[6]有详细说明。经配置生成与 AUTOSAR 兼容的 SWC 代码和描述文件，如图 8 所示。

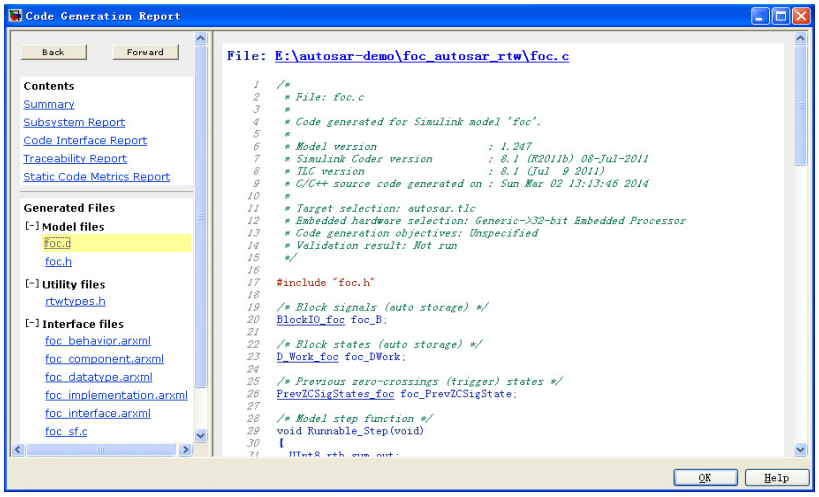

图 8　电机控制策略相关的 SWC 代码生成
Fig. 8　Code generation of motor control strategy relevant SWC

2.2　算法库层设计

电机控制算法是矢量控制，所以将电机相关的数学算法放在独立的算法库中。FOC 算法难点在于 SVPWM 模块的设计。其参照电机定子理想磁链圆为标准，对三相逆变器的开关状态做不同切换，产生 PWM 波形，最终通过合成的磁链矢量来追踪理想的磁链圆。

具体的 SVPWM 实现方式可分为：确定合成空间电压矢量 $\boldsymbol{u}_{ref}$ 所处扇区和计算基本电压矢量作用时间。第一部分内容在文献[7]有详细的说明，这里重点介绍基本电压矢量作用时间的计算。以第 I 扇区空间电压矢量 $\boldsymbol{u}_{ref}$ 为例，设定其相邻基本电压作用时间分别为 T_1，T_3，零矢量的作用时间分别为 T_0，T_7，PWM 周期为 T_s，θ 为 $\boldsymbol{u}_{ref}$ 与 $\boldsymbol{v}_1$ 间的夹角，对电机的定子线圈列写伏秒平衡方程为

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} T_s = \boldsymbol{u}_{ref} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} T_s = \frac{2}{3} V_{dc} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} T_1 + \begin{bmatrix} \cos\frac{\pi}{3} \\ \sin\frac{\pi}{3} \end{bmatrix} T_3 \right),$$

解得 $T_1 = \dfrac{\sqrt{3} U_\beta T_s}{V_{dc}}$，$T_3 = \dfrac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left(\dfrac{\sqrt{3} U_\alpha}{2} - \dfrac{U_\beta}{2} \right)$，$T_7 = T_0 = \dfrac{T_s - T_4 - T_6}{2}$.

同理可得 $\boldsymbol{u}_{ref}$ 在其他扇区中各基本电压矢量的作用时间，相邻基本电压矢量作用时间计算流程图如图 9 所示，T_k，T_{k+1} 分别为相邻电压矢量的作用时间。

资料整理 火龙果软件 荐

2.3 电机 ECU 基础软件层设计

基础软件层是标准化的软件层，向应用软件层中的 SWC 提供必要的服务，包括硬件驱动、网络通信及实时任务调度等底层服务，基础软件包含了标准化和 ECU 特定的组件，向下又分为三层：服务层、ECU 抽象层及微控制器抽象层[8]。另外，在 AUTOSAR 软件架构中还有复杂驱动。这里主要设计了基于 AUTOSAR 标准的 PWM 驱动。

2.4 PWM 驱动模块设计

永磁同步电机需要在三相对称的正旋交流电流的驱动下运行，而要产生周期可调的三相对称正弦交流电流，需要 PWM 驱动逆变器产生，这就要对 PWM 进行驱动设计。在这里，利用 TC1767 处理器的通用定时器组（GPTA）中的本地定时单元（LTC）产生三相六路中心对称式并能够连续更新的 PWM 波形，控制三相全桥上下桥臂 IGBT 管的导通和关断。PWM 模块提供的主要应用程序编程接口（application programming interface，API）接口函数如表 1 所示。图 10 给出了 PWM 设置占空比工作流程。

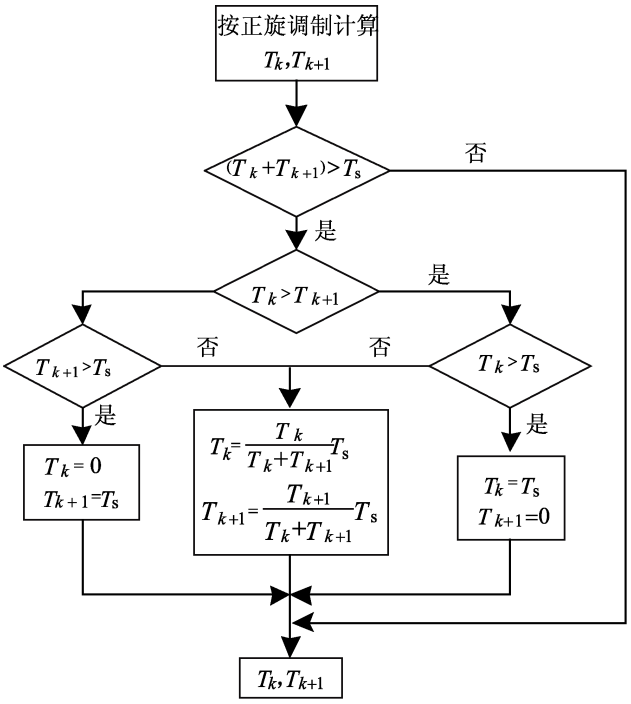

图 9 基本电压矢量作用时间计算流程图

Fig. 9 Basic voltage vector duration calculation flow chart

表 1 PWM 模块主要 API 接口函数

Tab. 1 Main API interface function of PWM module

API	功能
Pwm_Timer_Init()	初始化 PWM 定时器和使能 PWM 定时器中断
Pwm_Timer_Update()	完成 PWM 定时器函数跟新
Pwm_Cu_3ChannelsCenterAligned_Init()	初始化三通道中心对称 PWM 并使能 PWM 中断
Pwm_Cu_3ChannelsCenterAligned_Update()	完成对三个通道上、下桥臂 PWM 占空比的更新
Pwm_Cu_3ChannelsCenterAligned_SetPeriodAndUpdate()	设置 PWM 的周期和更新 PWM 通道的占空比
Pwm_cu_3ChannelsCenterAligned_SetDeadTime()	设置上桥臂和下桥臂 PWM 死区时间

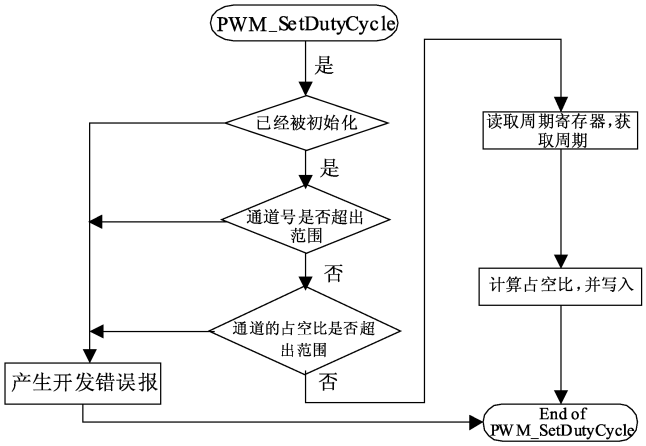

图 10 PWM 占空比设置流程图

Fig. 10 Flow chart of PWM duty cycle set

资料整理 火龙果软件 荐

3 实验与结果分析

为验证基于 AUTOASR 的 ECU 控制软件的可行性，对永磁同步电机的控制进行台架实验。实验所用到的永磁同步电机控制系统测试平台结构如图 11 所示。该台架包括供电系统、被测电机控制器、永磁同步电机、散热系统、计算机五部分。

在实验室环境下，为保证永磁同步电机控制系统的稳定运行，用直流稳压电源代替车载动力电池作为电机的动力电源。实验平台采用基于 TC1767[9]为主控芯片的 HP2 电机控制器，主要由逻辑电路、驱动电路、IGBT 单元（作为功率逆变器）、母线电容和水冷槽组成。控制器采用水冷槽与循环水箱连接进行散热，电机采用油冷系统进行散热。电机定子电流的检测和转子位置的检测需要使用另外的采集电路。采用 2 个 LEM HC6F300 电流传感器采集三相定子电流（第三相可利用前两心电流计算所得），转子速度和位置信号的检测采用旋转变压器配合旋转编码器完成。被测电机选用美国 REMY 公司的 HVH250 永磁同步电机作为驱动电机。该电机极对数为 6 对，额定电压为 109～190 V，最大输出功率为 80 kW，最大输出扭矩为 310 N·m. 永磁同步电机控制系统实物图如图 12 所示。

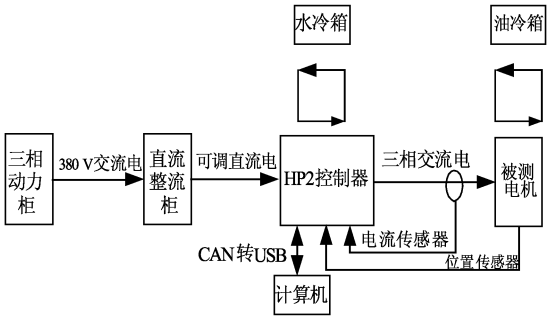

图 11 永磁同步电机控制系统测试平台结构图

Fig. 11 Test platform structure diagram of permanent magnet syhchronous motor control system

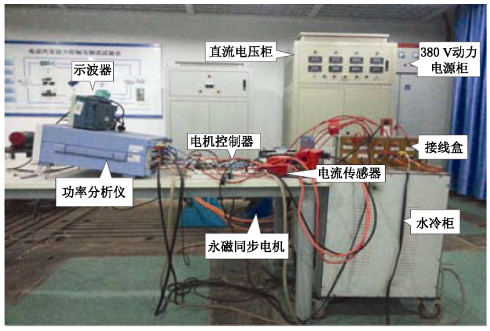

图 12 驱动电机控制系统实物图

Fig. 12 Real figure of drive motor control system

电动机控制系统的调速性能首先取决于其低速起动性能，包括快速响应性和稳定性。在永磁同步电动机低速启动实验中，电机在空载情况下进行启动，给定转速为 350 r/min，采集到的转速实测曲线如图 13 所示。由图 13 可以看到，电机速度曲线的上升时间为 10 s，调节时间为 18 s，超调量是 2.8%，由各指标看出，电机的动态性能很好，静态误差小。

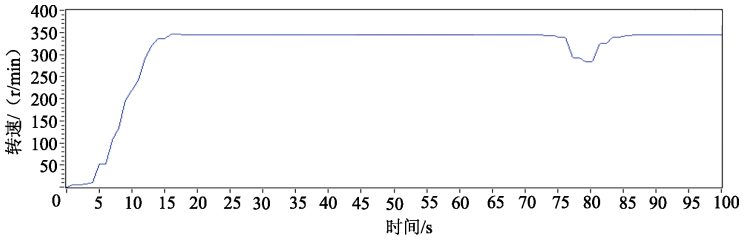

图 13 电机启动至 350 r/min 实测曲线

Fig. 13 Measured curve of the motor from start to 350 r/min

待电机启动稳定后，进行 640～850 r/min 的加速实验。采集到的速度波形如图 14 所示。由图 14 可以看出，在速度经过稳定后，给电机加速，电机上升时间为 6 s，与电机启动时上升一致，电机的调节时间为 10 s，超调量是 4.3%. 由上述指标可以看到，加速后的电机动态性能依然很好，静态误差也很小。

资料整理 火龙果软件 荐

转速波形表明，永磁同步电机控制软件使电机具有良好的加速性能。

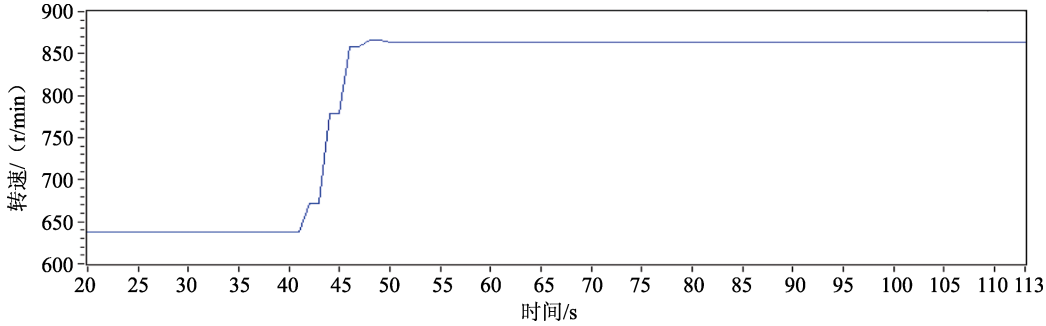

图 14 640 r/min 加速至 850 r/min 实测曲线

Fig. 14 Measuring cure with rotate speed from 640 r/min increasing to 850 r/min

待电机加速到目标转速后，进行 840 r/min 至 460 r/min 的减速实验。采集得到的速度波形如图 15 所示。由图 15 可以看到，电机减速时，速度曲线响应迅速，在 4 s 内可以降至目标转速，减速过程速度曲线有很小的反超调出现。转速波形表明，永磁同步电机控制软件使电机具有良好的减速性能。

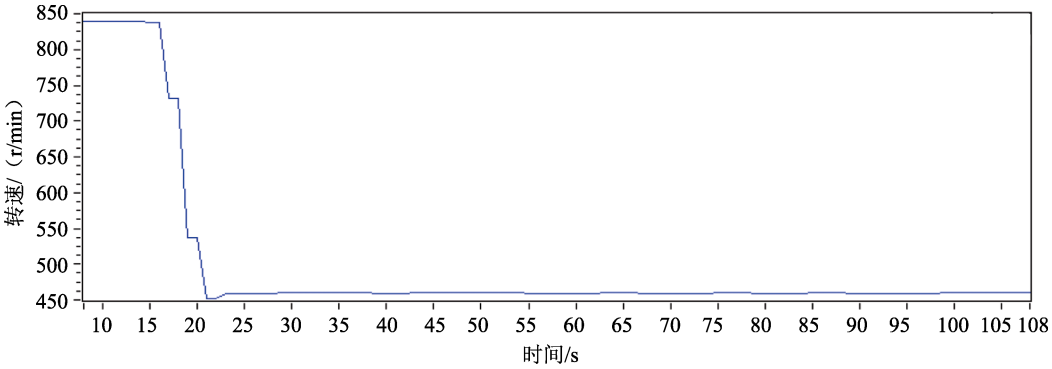

图 15 840 r/min 减速至 640 r/min 实测曲线

Fig. 15 Measuring cure with rotate speed from 840 r/min reducing to 640 r/min

4 结论

采用模块化的思想来设计电机 ECU 控制软件，包括电机 ECU 应用层，算法层和基础软件层的设计。实验台架表明，参考了 AUTOSAR 标准的 ECU 控制软件可实现对永磁同步电机启动和加、减速的控制。同时，由各种实测曲线可以看出，系统具有良好的加、减速调节能力。参考 AUTOSAR 标准的开发方法提高了系统的灵活性、可配置性和代码的可重用性，利用这些特性提高了电动车用驱动电机控制软件的开发效率。

[参考文献]（References）

[1] 英飞凌 AUTOSAR 软件[OL]. [2009-03-25]. http://www.infineon.com/cms/cn/product/microcontroller/development-tools-software-and-kits/embedded-software-solutions/infineon-autosar-software/channel.html?channel=db3a30431b3e89eb011b4aac01f07b7d

AUTOSAR software of Infineon[OL]. [2009-03-25]. http://www.infineon.com/cms/cn/product/microcontroller/development-tools-software-and-kits/embedded-software-solutions/infineon-autosar-software/channel.html?channel=db3a30431b3e89eb011b4aac01f07b7d. (in Chinese)

资料整理 火龙果软件 荐

[2] 胡琦，李红，赵民德，等. 基于 AUTOSAR 的电控汽油机 ECU 软件设计与实现[J]. 浙江大学学报：工学版，2011，45（6）：1119-1123.
HU Q, LI H, ZHAO M D, et al. Design and implementation of ECU software for electronic gasoline engine based on AUTOSAR[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(6): 1119-1123. (in Chinese)

[3] 黄智宇，张晓雷，郑太雄. 电动车用永磁同步电机 FOC 控制系统实现[J]. 电气传动，2013，43（12）：7-11.
HUANG Z Y, ZHANG X L, ZHENG T X. Realization of permanent magnet synchronous motor control system based on FOC for electric vehicle drive[J]. Electric Drive, 2013, 43(12): 7-11. (in Chinese)

[4] AUTOSAR methodology R3.0. [OL]. [2008-05-10]. http://www.autosar.org.

[5] 张培锋. 参照 AUTOSAR 的汽油发动机 ECU 软件设计[D]. 杭州：浙江大学，2010.
ZHANG P F. Design of ECU software for gasoline engine based on AUTOSAR[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)

[6] 冯江波，刘亚军. 与 AUTOSAR 兼容的 Matlab/Simulink 自动代码生成技术[J]. 佳木斯大学学报：自然科学版，2012，29（6）：833-837.
FENG J B, LIU Y J. Code generation technology with Matlab/Simulink compliant with AUTOSAR[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2012, 29(6): 833-837. (in Chinese)

[7] 隋峻，王晶，樊键，等. SVPWM 在永磁同步电机系统中的应用与仿真[J]. 兵工自动化，2011，30（3）：55-58.
SUI J, WANG J, FAN J, et al. Application and simulation of SVPWM in permanent magnet synchronous motor system[J]. Ordnance Industry Automaton, 2011, 30(3): 55-58. (in Chinese)

[8] WON W J, SON J, PARK G, et al. Design and implementation procedure of the AUTOSAR I/O drive cluster[C]//ICROS-SICE International Joint Conference. Fukuoka: IEEE, 2009: 5618-5623.

[9] TC1767 32-bit single-chip microcontroller user’s manual_V1.1[OL]. [2009-05]. http://www.infineon.com/cms/cn/product/microcontroller/32-bit-tricore-tm-microcontroller/audo-family/tc1767-audo-future/channel.html?channel=db3a3043156fd5730115b88f60190e86#ispnTab3.

资料整理
火龙果软件
荐