

双离合器自动变速器控制系统软件架构设计

司建玉¹, 吴光强^{1,2}

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 东京大学 生产技术研究所, 东京 153-8505)

摘要: 从软件开发方式与架构设计的角度对双离合器自动变速器(dual clutch transmission, DCT)控制系统进行了深入剖析, 并以嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 内核为基础, 构建了 DCT 控制系统软件架构. 通过引入有限状态机(finite state machine, FSM)实现了 DCT 的复杂换挡过程控制, 以此为基础开发了 DCT 多任务控制系统. 基于 DCT 硬件在环仿真试验台对所设计开发的控制系统软件进行了功能及性能验证. 验证结果表明, 设计开发的 DCT 控制系统软件既满足了系统对实时性的要求, 又提高了系统的可靠性和扩展性.

关键词: 双离合器自动变速器; 嵌入式实时操作系统; $\mu\text{C}/\text{OS-II}$; 有限状态机; 软件架构

中图分类号: U 463.212

文献标识码: A

Software Architecture Design of Dual Clutch Transmission Control System

SI Jianyu¹, WU Guangqiang^{1,2}

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan)

Abstract: From the view of software development mode and architecture, the control system of dual clutch transmission (DCT) is analyzed. Based on the kernel of the embedded real time operating system $\mu\text{C}/\text{OS-II}$, the software architecture of DCT control system is established. The complicated control of DCT shifting process is implemented by using finite state machine (FSM), and DCT control system is developed according to the software architecture of control system. In the platform of DCT hardware-in-the-loop simulation, the function and performance of control system software are tested. The results show that the software can not only ensure the real-time requirements of DCT control system, but also enhance its stability and scalability.

Key words: dual clutch automatic transmission; embedded real-time operating system; $\mu\text{C}/\text{OS-II}$; finite state machine; software architecture

双离合器自动变速器(DCT)是一种新型自动变速器, 它将变速器挡位按奇、偶数分别布置在与两个离合器所联接的输入轴上, 通过离合器的交替切换完成换挡过程, 实现了动力换挡^[1-2].

DCT 由机械系统和控制系统组成. 机械系统中同步器、齿轮副等零部件的设计过程与手动变速器类似, 技术难度不大^[3]. 而控制系统需要根据车辆的行驶状态实时进行判断以完成挡位切换和换挡过程的自动控制, 实现驾驶员的驾驶意图. 这就对控制系统提出了较高的设计要求, 不但要满足严格的实时性, 而且还必须具有很高的可靠性. 传统的面向硬件前后台式的控制系统难以满足这样的要求^[4].

本文从软件开发方式与架构设计的角度对 DCT 控制系统进行了深入剖析, 并基于嵌入式操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 提供的多任务管理与调度功能, 通过引入有限状态机(FSM)实现了复杂的换挡过程控制. 在此基础上, 设计了 DCT 控制系统的软件架构, 并开发了多任务的控制系统软件. 验证结果表明, 所设计开发的控制系统软件不但保证了系统对实时性和可靠性的要求, 还大大提高了 DCT 控制系统的重用性和扩展性, 同时也降低了控制系统软件实现的难度, 缩短了开发周期.

1 FSM 概述

FSM 是表达系统状态及其转换过程的有力工

收稿日期: 2010-04-07

基金项目: 上海市科委项目(08DZ1150401)

第一作者: 司建玉(1978—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽车自动变速理论与控制技术. E-mail: sijianyu@gmail.com

通讯作者: 吴光强(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车自动变速理论与控制技术、混合动力传动系统控制技术与仿真. E-mail: wuguangqiang@tongji.edu.cn

具,由状态、事件、转换和活动组成.每个状态由1个进入动作和1个退出动作组成.每个转换包括1个源状态和1个目标状态,并且与1个事件相关联.当在源状态时,事件发生且触发转换的条件为真,则顺序执行下列动作:①源状态退出动作;②转换动作;③目标状态的进入动作^[5].

在FSM表示的事件驱动系统中,当某一特定条件被触发时,系统从一个状态进入另一个状态,所以可用以解决复杂的逻辑问题.图1为FSM的状态转换示意图.

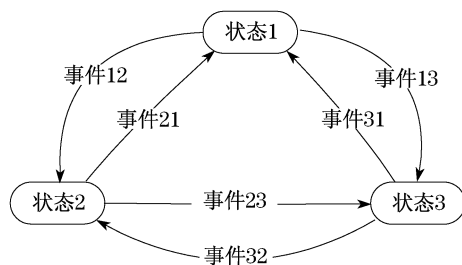


图1 FSM状态转换示意图

Fig.1 FSM state transition schematic diagram

2 DCT 控制系统软件功能分析与设计

2.1 基于FSM的DCT换挡过程分析

DCT控制系统通过采集油门开度、车速等输入信号,获知车辆的当前运行状态,并根据制定的换挡规律判断换挡时刻,向作动器(电机,电磁阀等)输出控制信号,从而使离合器、同步器等执行相应的动作,实现自动变速的综合控制.

根据DCT工作原理可知,双离合结构使得其能实现动力换挡,显然换挡过程控制是整个控制系统实现的关键和难点.通常以车速和油门开度为控制参数,按照设计的换挡规律进行升、降挡判断,根据判断结果控制执行器动作,完成换挡操作,这些都是串行控制.通过深入分析可知换挡过程可以划分成有限个状态(如稳定状态、升挡状态和降挡状态等),并且可通过控制状态间的转换实现换挡过程控制.

从FSM的表述能力和使用范畴可知,使用FSM可以清楚地表达DCT的换挡过程,这样既简单清晰地表达了控制系统的换挡过程,又降低了程序实现的难度.以5挡DCT为例说明换挡过程的状态划分和转换,如图2所示.

车辆启动时,默认设置为1挡(根据需要也可设置成其他挡位),根据车速和油门开度的变化,通过

图2所示FSM的状态转换图,实现DCT换挡过程控制.

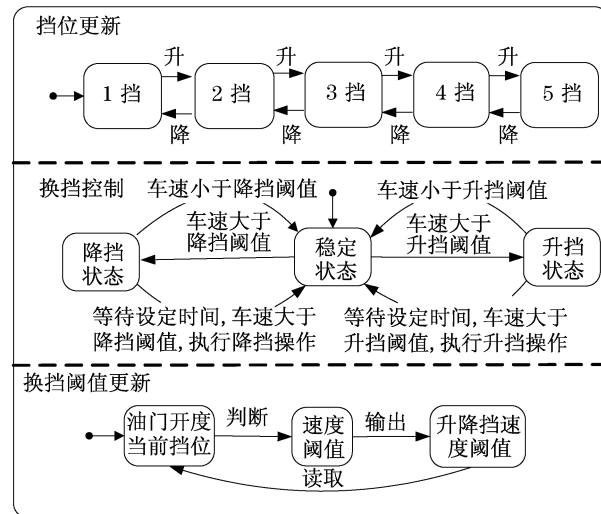


图2 DCT换挡过程状态转换图

Fig.2 State transition diagram of DCT Shifting

2.2 DCT 控制系统软件架构设计

传统的嵌入式控制系统软件开发基本上都是采用面向硬件的前后台开发方式,这样实现的控制系统各模块间耦合性高,内聚性低,程序的重用性较差,不但程序的稳定性很难保证,而且不利于进行程序修改与功能扩展,即使是简单的缺陷修正往往也会关联到其他模块,同时维护起来也较困难.

为此,需要把控制系统硬件与软件隔离,让软件实现独立于硬件控制.面向硬件前后台式的软件开发方式已难以满足上述要求,而基于操作系统的开发方式却能提供较好的解决方案,即通过引入操作系统并利用其提供的多任务管理与调度功能可以降低所开发应用程序的耦合性,提高其内聚性,从而增加系统的稳定性、重用性和扩展性.表1给出了面向硬件与基于操作系统软件开发方式的对比分析结果.本文涉及的DCT控制系统软件是基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 内核设计开发的,其特点是^[6]:

(1) $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 是一个具有可剥夺实时内核的操作系统,而且源代码公开、结构小巧.

(2) 其内核提供任务调度与管理、时间管理、任务间同步与通信、内存管理和中断服务等功能.

(3) 执行效率高、占用空间小、实时性能优良和可扩展性强.

(4) 仅与CPU硬件相关部分用汇编语言编写,其他代码采用C语言编写,具有很好的可移植性.

基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 设计的DCT控制系统软件架构如图3所示.

同时,为了支撑 DCT 控制系统软件的后续功能开发与验证,基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 内核,添加了文件系统和设备驱动程序,这样不但扩充了系统能够提供的功能,而且还为更多的理论验证提供了软件系统的底层支持.

表 1 面向硬件与基于操作系统软件开发方式对比分析
Tab.1 Comparative analysis of hardware-oriented mode and operating system-based mode

软件开发方式	优点	缺点	适用范围
面向硬件前后台方式	1. 直接面向硬件,编写的程序代码较为紧凑,效率较高 2. 易于从底层硬件的角度对程序进行优化 3. 因为不需要操作系统支持,所以与多任务方式相比,程序代码量较少 4. 对硬件系统的配置要求较低	1. 对开发人员能力的要求较高 2. 各模块间的耦合性高,内聚性低,使得程序修改困难,不利于功能扩展 3. 程序的重用性和稳定性差 4. 系统可靠性低且维护困难	适用于功能简单且对扩展性要求不高的系统
基于操作系统开发方式	1. 直接面向应用,开发人员不必考虑底层硬件的实现细节,易于实现较复杂的系统功能 2. 各模块间的耦合性低,内聚性高,程序修改容易,有利于功能扩展 3. 程序的重用性和稳定性较好 4. 系统可靠性高且维护容易	1. 与面向硬件的前后台方式相比,程序的代码量较大 2. 多任务调度会使系统性能略有降低 3. 控制系统整体性能受制于所选操作系统 4. 对硬件系统的配置要求较高	适用于功能较为复杂且对稳定性、扩展性和重用性要求较高的系统

3 DCT 控制系统任务划分及时序设计

根据 DCT 控制系统功能和性能要求,基于图 3 所示 DCT 控制系统软件架构,并综合考虑嵌入式控制系统设计开发时的时序问题及性能要求,进行了应用程序多任务的划分,同时,设定了每个任务的优先级,如表 2 所示.

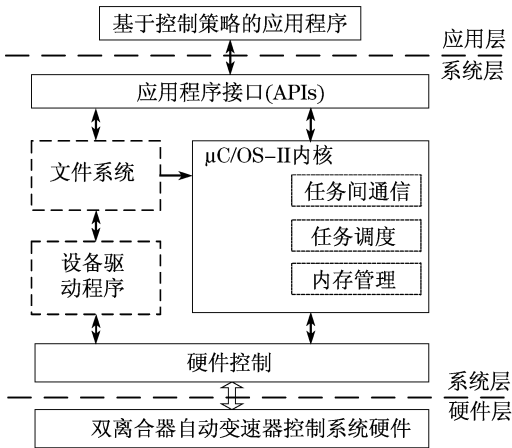


图 3 DCT 控制系统软件架构图
Fig.3 Software architecture diagram of DCT control system

Tasks_Start 是硬件及 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 内核初始化后最先运行的任务,用于建立 DCT 控制系统其他用户任务;TCU_Post 执行控制系统上电后硬件及系统自检;Vehicle_Signal 负责信号采集,包括采集油门开度、车速、发动机转速等信息;TCU_Shifting 实现换

挡判断与控制功能;TCU_Clutch2 根据换挡信号控制双离合器的作动;TCU_PreMesh 则实现对同步器预接合控制管理;TCU_OutControl 则根据换挡判断对相关执行器进行控制.它们相互协作通过对输入信号的采集、计算、判断和分析,依据适当的控制策略,向各执行机构发出实时控制指令.

表 2 DCT 控制系统任务划分
Tab.2 Task partition of DCT control system

任务名	任务说明	优先级
Tasks_Start	用户多任务创建	3
TCU_Post	控制器自检	5
Vehicle_Signal	车辆信号采集	7
TCU_Shifting	换挡判断与控制	9
TCU_Clutch2	双离合器控制	11
TCU_PreMesh	同步器预接合控制	13
TCU_OutControl	换挡执行机构控制	15

在 DCT 控制系统任务划分时,分别采用保留最高的 3 个优先级 0,1,2 和任务优先级划分时预留间隔(此处预留 1 个优先级间隔)的措施,以改善系统扩展性.

对 DCT 控制系统进行多任务划分后,为了使各个任务能协调一致地实现预期的功能,在表 2 多任务划分的基础上,结合 DCT 控制系统的功能要求,设计了多任务的动作时序,详见图 4.

4 DCT 控制系统功能验证

基于设计的 DCT 控制系统软件架构,开发了

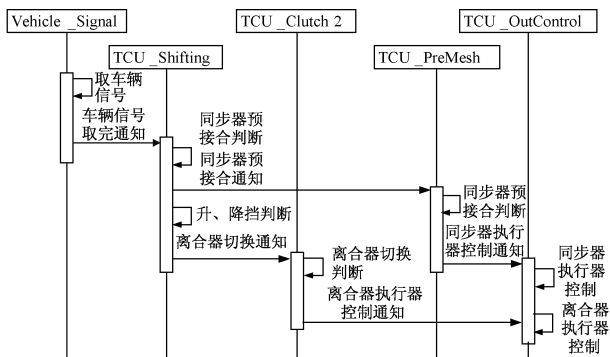


图 4 DCT 控制系统时序图

Fig.4 Sequence diagram of DCT control system

DCT 控制系统软件程序,并在图 5 所示的 DCT 硬件在环仿真试验台上,验证了相关功能的执行流程和用时情况.

首先,就多任务控制系统中的关键部分,如启动流程、软硬件初始化、各任务时序执行情况及由 FSM 实现的换挡过程控制等方面分别设计了测试流程、

测试手段,并给出了应有的正确现象.详细的验证内容及结果见表 3.

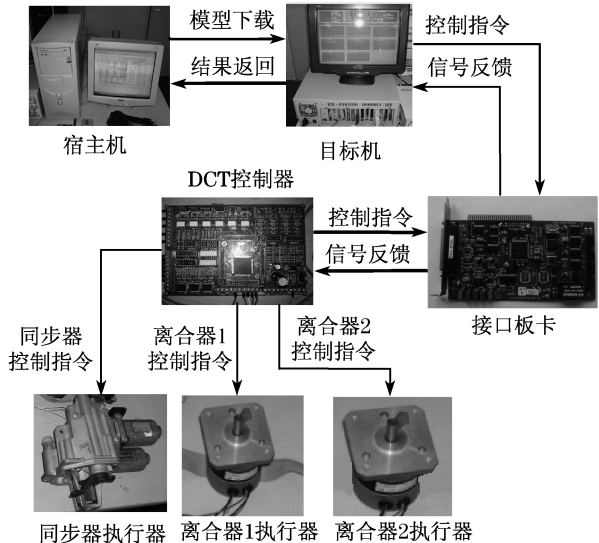


图 5 DCT 硬件在环仿真试验台

Fig.5 DCT hardware on loop simulation platform

表 3 DCT 控制系统功能流程验证

Tab.3 Flow verification of DCT control system functions

序号	测试项	测试结果
1	测试内容:多任务控制系统是否按照正确流程启动,并进行了软、硬件初始化. 测试手段:在 DCT 控制系统硬件平台上,进行代码调试,查看系统启动流程及软、硬件初始化情况. 正确现象:跟踪程序启动过程,软硬件按照预期进行了初始化.	正确
2	测试内容:验证开发的多任务控制系统是否按照预期设计的动作时序执行. 测试手段:在 DCT 控制系统硬件平台上进行代码调试,根据图 4 动作时序图,查看启动后的控制系统是否按照预期时序进行了数据输入输出、功能调度及系统控制. 正确现象:正确的动作时序执行过程见图 4.	正确
3	测试内容:基于 DCT 硬件在环仿真试验台(见图 5),测试 DCT 控制系统中设计开发的有限状态机(FSM)是否正确完成了挡位更新及换挡过程控制. 测试手段:由 DCT 控制器通过接口板卡读取控制输入量(车速、油门开度等),由调试器动态实时地查看有限状态机程序模块实现的换挡执行过程情况. 正确现象:正确读取了车速、油门开度等车辆信号,并完成挡位更新及换挡过程控制.	正确

由表 3 可知,以嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 内核为基础,引入 FSM 开发的 DCT 多任务控制系统软件,不但实现了设计开发过程中的各项功能及预定的系统控制时序,而且还验证了设计的 DCT 控制系统软件架构的可行性和正确性.

为了进一步验证所开发控制系统的性能,针对系统功能的用时情况设计了相关的测试用例,并进行了分项测试.测试项包括多任务启动、任务调度、车辆信号采集、换挡判断与控制、离合器切换判断、同步器预接合判断、双离合切换控制及同步器预接合控制.测试过程中,先基于代码指令执行周期计算各项功能用时,作为系统分项测试的参考,然后,在控制系统运行过程中借助示波器等相关硬件测试

各项功能的用时情况.在图 5 所示的硬件在环仿真试验台上,对所开发控制系统各项功能的用时情况进行了测试,所得结果见表 4.

表 4 DCT 控制系统功能用时验证

Tab.4 Verification of time consumption of DCT control system

序号	验证项	用时/ms
1	多任务启动	7.00
2	任务调度	0.05
3	信号采集	0.04
4	换挡判断与控制	0.10
5	离合器切换判断	0.04
6	同步器预接合判断	0.03
7	离合器执行器控制	0.30
8	同步器执行器控制	0.40

由表 4 可知,开发的 DCT 多任务控制系统软件很好地满足了变速器控制系统对实时性的要求。

5 结论

(1) 针对 DCT 复杂的换挡过程控制,通过引入有限状态机降低了其设计开发的难度,并以嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 内核为支撑,构建了 DCT 控制系统的软件架构,以此为基础实现了多任务的 DCT 控制系统。同时,在软件架构的系统层添加了文件系统和设备驱动程序,扩充了系统提供的功能,为更多的理论验证提供了软件系统的底层支持。

(2) 在 DCT 控制系统硬件平台上分别对相关功能的执行流程和用时情况进行了验证。结果表明,所设计开发的多任务控制系统软件不但能保证系统的实时性要求,而且还降低了控制系统软件实现的难度,缩短了开发周期。

(3) 由软件开发方式的对比分析及控制系统软件功能验证结果可知,以嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 为基础开发的 DCT 控制系统软件既提高了系统的稳定性、重用性和扩展性,又为进一步的理论研究和实践提供了强有力的支撑平台。

参考文献:

- [1] Zhang Y, Chen X, Jiang H, et al. Dynamic modeling and simulation of a dual-clutch automated lay-shaft transmission[J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME 2005, 127(2):302.
 - [2] Manish Kulkarni, Taehyun Shim. Shift dynamics and control of dual-clutch transmissions[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42:168.
 - [3] 吴光强,杨伟斌,秦大同. 双离合式自动变速器控制系统的关键技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(2):13.
WU Guangqiang, YANG Weibin, QIN Datong. Key technique of dual clutch transmission control system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2):13.
 - [4] 杨庆,鞠丽娟,吴光强,等. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的双离合器自动变速器控制系统[J]. 测控技术, 2007, 26(8):40.
YANG Qing, JU Lijuan, WU Guangqiang, et al. Control system for dual-clutch automatic transmission based on $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ [J]. Measurement & Control Technology, 2007, 26(8):40.
 - [5] 徐小良,汪乐宇,周泓. 有限状态机的一种实现框架[J]. 工程设计学报, 2003, 10(5):251.
XU Xiaoliang, WANG Leyu, ZHOU Hong. Implementation framework of finite state machines[J]. Journal of Engineering Design, 2003, 10(5):251.
 - [6] Jean J Labrosse. MicroC/OS- II : the real-time kernel[M]. 2nd ed. Lawrence: CMP Books, 2002.
-
- (上接第 1039 页)
- [3] Morteza Montazeri Gh, Amir Poursamad, Babak Ghalichi. Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles[J]. Journal of the Franklin Institute, 2006(343):420.
 - [4] Piccolo A, Ippolito L, Galdi V, et al. Optimization of energy flow management in hybrid electric vehicles via genetic algorithms [C]//Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Edinburgh: ASME, 2001: 434-439.
 - [5] Huang B, Wang Z, Xu Y. Multi-objective genetic algorithm for hybrid electric vehicle parameter optimization [C] // Proceeding IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Washington: IEEE, 2006:5177-5182.
 - [6] HU Xiaolin, WANG Zhongfan, LIAO Lianying. Multi-objective optimization of HEV fuel economy and emissions using evolutionary computation[J]. SAE Paper, 2004(1):1153.
 - [7] ZHANG Bingzhan, CHEN Zhihang, MI Chris, et al. Multi-objective parameter optimization of a series hybrid electric vehicle using evolutionary algorithms [C] // The 5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Washington: IEEE, 2009:921-925.
 - [8] 吴光强,陈慧勇. 基于遗传算法的混合动力汽车参数多目标优化[J]. 汽车工程, 2009, 31(1):60.
WU Guangqiang, CHEN Huiyong. Multi-objective optimization of HEV parameters based on genetic algorithm[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(1):60.
 - [9] Wu J, Zhang C H, Cui N X. PSO algorithm-based parameter optimization for HEV powertrain and its control strategy[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(1):53.
 - [10] TAN Kaychen, LEE Tongheng, KHOR Eikfun. Evolutionary algorithms for multi-objective optimization: performance assessments and comparisons [J]. Artificial Intelligence Review, 2002, 17(4):251.
 - [11] 任子武,伞冶. 实数遗传算法的改进及性能研究[J]. 电子学报, 2007, 35(2):269.
REN Ziwu, SAN Ye. Improvement of real-valued genetic algorithm and performance study[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(2):269.