**OpenHW2015**

**开源硬件与嵌入式计算大赛**

# **项目计划书**

**项目名称** **基于FPGA的汽车电子节气门ECU设计与实现**

**申请人 梅钦**

**指导教师 许芳、陈虹**

**联系邮箱** [**hgzxmeiqin123@126.com**](mailto:hgzxmeiqin123@126.com)

**联系电话 18744027022**

# 第一部分 团队及项目基本情况

## 一、团队基本信息

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 学校 | 专业 | 学历 |
| 梅钦 | 吉林大学 | 控制工程 | 硕士 |
| 季冬冬 | 吉林大学 | 控制工程 | 硕士 |
| 王严 | 吉林大学 | 控制理论与控制工程 | 硕士 |
|  |  |  |  |

## 二、项目概述

### 意义

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)是在工业过程控制中发展起来的一种新型计算机控制算法，具有显示处理约束问题、处理多输入多输出问题等系列优点，在工业过程控制中得到了广泛的应用，但MPC需在有限采样时间内反复在线求解优化问题，计算性能成为MPC在快速系统应用中的瓶颈；电子节气门是快速非线性系统，需要快速稳定地跟踪期望节气门开度，因此本设计基于FPGA实现MPC，提升MPC在线计算性能，对电子节气门控制具有重大意义。

### 目的

设计汽车电子节气门的电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)，其中控制算法采用约束MPC算法，将该算法用FPGA实现，并通过算法优化缩短其运行时间。最终将此FPGA控制器应用到电子节气门的跟踪控制上，使电子节气门能够快速准确地跟踪上给定的期望目标位置。

### 技术方法

本设计基于FPGA设计了硬件约束MPC控制器，并应用于电子节气门的实物控制。首先将电子节气门模型线性化，设计电子节气门的MPC算法，通过离线仿真建立电子节气门的定点数据模型，由于存在控制量、控制增量及状态量的约束，MPC需要在每个采样时间内在线求解线性二次规划（Quadratic Programming ,QP）问题，为提高求解速度，本设计采用粒子群优化求解算法（Particle Swarm Optimization ,PSO）作为优化求解器，并采用惩罚函数求解优化约束问题，本项目将该算法称为MPC-PSO算法；然后通过C语言设计定点MPC-PSO算法，并通过Xilinx的HLS工具将C代码转化为硬件描述语言，从而实现MPC-PSO算法的FPGA实现；对于实物控制中不可测的状态量，采用降维观测器进行状态估计；最后进行基于FPGA的MPC-PSO控制器与电子节气门的实物控制实验。

## 三、团队相关工作

调研的内容：

关于模型预测控制，前人做过不少研究，大部分人还是主要研究算法和离线模拟仿真；而在节气门的控制上，不少学者提出很多方法，最常见的就是PID控制，另外还有其他基于模型的算法；而在算法的原型实现上，有各种嵌入式方案，如单片机、DSP和FPGA的SOPC方案。

本团队开展过的相关工作：

在这个项目中，本团队已经在Matlab中实现了控制器的设计和被控对象的建模，其中控制器在Matlab中运用了Interpreted MATLAB Function来表示，通过调节控制器参数在Matlab中离线仿真达到预期要求的控制效果。

而在控制器的实现上，本团队用过dSPACE和FPGA两种平台，其中dSPACE 实时仿真系统是由德国dSPACE公司开发的一套基于MATLAB/Simulink的控制系统在实时环境下的开发及测试工作平台，其实现和MATLAB/Simulink的无缝连接。由于dSPACE的硬件资源有限，不能完全运行设计的控制算法，最后只能降低控制算法中的迭代次数，这样导致控制效果不太理想；而在FPGA作控制器的方案中，团队之前采用的是Altera公司的DE3 FPGA开发板，团队利用全硬件的方案，通过编写Verilog设计出MPC-PSO，且最终完成了硬件在环实验，即用FPGA控制器控制了虚拟的被控对象。

# 第二部分 项目技术方案

## 一、系统架构

### 项目设计流程



图1 汽车电子ECU开发平台V型模式

如图1所示，本次项目设计就是按典型的汽车电子ECU开发V型模式进行的，前期已经做了相关工作包括“系统测试”、“目标系统模型”、“控制器的功能设计”、“软件在环”等，在本次比赛中需要做的是“控制器原型设计”、 “目标代码生成”、“硬件在环测试”，在完成硬件在环测试后，本项目组决定进行电子节气门的ECU实现，在电子节气门的ECU设计中包括核心的MPC-PSO控制器算法、状态估计器，PWM信号产生程序、电子节气门和FPGA之间的数据传输接口等。

### 软硬件开发



图2 电子节气门控制框图

如图2所示，可以看到本次的软件开发主要包括数据处理模块，其中包括对节气门反馈位置信号进行软件滤波，和不可测的状态变量估计器的设计；然后就是MPC-PSO的控制算法的实现，其是一个5输入1输出的控制算法，这部分包含大量的乘法和循环，对FPGA的资源有很大的占用，这部分也是拉低了整个ECU运行的最高运行频率，所以对这部分程序的优化是很重要的，其算法总体流程图和微架构如图3、图4所示；接着就是PWM信号发生器，其主要用来驱动后面连接的电子节气门实物；最后就是针对特定的高速A/D芯片编写A/D数据读取程序用来读取电子节气门反馈的位置模拟信号，最终形成了一个闭环控制。



图3-1 控制器微架构 图3-2 PSO算法微架构

图3 MPC-PSO微架构

至于硬件部分，首先就是直流电机PWM驱动器的设计，本次用的是高功率MOSFET和IGBT驱动芯片IR2104，采用H桥设计驱动本次项目中的电子节气门；而在数据处理和数据传输方面，本次计划使用的是ADI公司推出的12位，最大采样率65MSPS的AD9226芯片转换芯片。

## 二、资源评估

### 芯片资源占用

这是之前Verilog全硬件方案在Altera Stratix III EP3SL150F1152C2平台上资源占用情况报告，其中完成一次运算需要9450个时钟周期，在这里可以看到占用资源还是很多的，而在ZYBO开发板资源表中可以看到如果按照之前的设计方法，其资源并不满足项目开发。故在此次项目中适当缩小程序的迭代次数，在面积和性能上做出妥协，在此，只要程序完成一次运算在1ms内就算满足要求。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Logic utilization | Combinational ALUTs | Dedicated logic register | DSP block 18-bit elements | Total PLLs |
| 56 % | 47,668 / 113,600 ( 42 % ) | 16,878 / 113,600 ( 15 % ) | 380 / 384 ( 99 % ) | 1 / 8 ( 13 % ) |

在HLS挑战赛中，通过降低迭代次数，循环部分展开，在面积达到要求的情况下，ZYBO开发板基本能完成控制器的性能要求。

### 板卡接口

本次主要需要的接口就是数据通信接口，AD/DA板卡、RS232串口板卡(供调试用)。

### 外设需求

dSPACE实时仿真系统、汽车电子节气门等。外设资金来源：国家自然科学重点基金资助项目(61034001)；“973”国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2012CB821202)。

## 三、预期结果

### 本次项目对他人的意义

了解模型预测控制、针对约束的QP问题求解方法、电子节气门控制方法。

### 具体的指标值

节气门跟踪给定的上升时间不超过100ms，调节稳定时间小于40ms，且为控制零超调，控制稳态误差在±2%之内。

### 创新的内容

完全按照汽车电子ECU开发流程进行电子节气门ECU的设计，创新点在：

1. 将MPC应用到快速动态系统中，扩展MPC在机电一体化控制领域中的应用；
2. 基于FPGA实现了MPC-PSO控制器，提高控制器的计算性能；
3. 相对于前人的研究更进一步，将控制器应用于电子节气门的实物控制，充分验证该方案的有效性。

### 演示效果示意

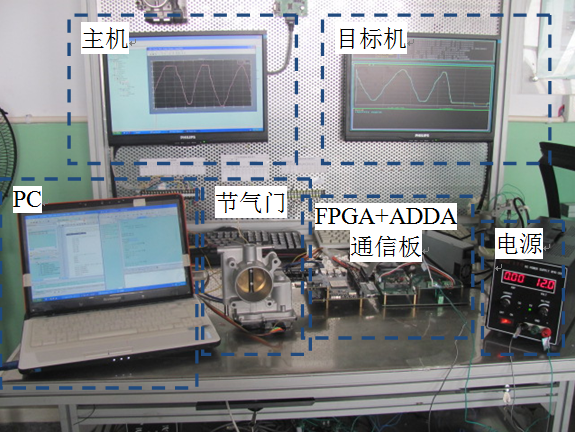


图4 项目效果演示示意图

## 四、项目实施评估

在本次项目中，按照图1的V型开发流程，首先是电子节气门的准确建模，然后就是控制器的功能设计，在软件在环中，验证控制器和被控对象的正确性，这三部分是在Matlab/Simulink中完成的，也是目前本次项目已经完成的工作。接下来需要做的是控制器的原型设计了，也是本次设计的难点，针对本次项目，首先需要将MPC-PSO算法用浮点型C语言描述出来，然后将浮点型C语言算法转为定点的C语言，方便使用Xilinx 的Vivado HLS工具进行设计；在控制器的原型设计中，接口设计也是一个难点，如果接口传输速率过慢或者不稳定，会拖慢整个控制器的运行速度，降低系统运行的稳定性。在完成控制器的原型设计后，需要做的就是硬件在环仿真实验(Hardware in the Loop, HiL)，硬件在环实验就是实际控制器+虚拟对象，它是系统的一种半实物仿真，本设计中将节气门模型下载到dSPACE中，当作本次设计的虚拟被控对象，FPGA和dSPACE用RS232或AD/DA进行通信。在完成硬件在环仿真实验后，就可以进行实物控制。在实物控制上，首先的难点就需要解决数学模型和实物之间的偏差，此时需要在线调整MPC-PSO算法中的参数，然后就是一些不可测的状态量的获取，在本设计中主要运用降维状态观测器来估计一些状态量。

## 五、相似项目说明

本项目在Altera平台上进行到了硬件在环阶段，在Altera平台上，MPC-PSO算法使用的是全硬件Verilog语言编写，这种实现方法需要消耗大量的时间，且程序过长不利于他人理解和调试，移植到Xilinx平台上主要是为了利用Xilinx平台中的Vivado HLS工具，利用C语言进行FPGA开发，且自有平台的C/C++转向硬件语言兼容性更好，而且更方便优化，提升系统的运行速度。

# 第三部分 补充说明

## 指导老师介绍

许芳，吉林大学控制科学与工程系讲师，博士研究生，研究方向为预测控制、优化算法、FPGA硬件实现。

陈虹，吉林大学唐敖庆特聘教授，博士生导师，国家杰出青年科学基金获得者，多年来一直从事预测控制、优化和鲁棒控制、非线性控制以及在机电一体化系统的应用研究，近五年来主要致力于汽车控制方面的研究。

## 成员小组人员介绍

梅钦，男，1992.10，湖北黄冈人，2010年考入吉林大学通信工程学院自动化专业，于2014年保送至本校攻读控制工程硕士学位，研究方向为FPGA技术及预测控制的快速实现研究。热爱电子设计，掌握单片机和FPGA的嵌入式开发，熟悉C语言开发和matlab软件，有一定的数学算法基础。2012、2013年参加吉林大学电子设计大赛，分别获得一等奖和二等奖，并于2012年参加吉林省电子设计大赛，获得二等奖；在2012-2013完成“大学生创新创业训练计划”国家级项目和“挑战杯”大学生课外学术科技作品竞赛项目（科技发明类）三等奖，并获得两项专利。并于2014年4月参加中国一汽技术中心汽车电子部单元测试项目至今。

季冬冬，男，1989.12，山东潍坊人，2009年考入吉林大学通信工程学院自动化专业，于2013年保送至本校攻读控制工程硕士学位，研究方向为FPGA技术及预测控制的快速实现。熟悉硬件描述语言与Xilinx硬件开发技术，并发表有FPGA等相关方向的文章。

王严，女，1988.12，吉林蛟河人，2009年考入长春理工大学电子信息工程专业，2014年考入吉林大学通信工程学院攻读控制理论与控制工程硕士学位。

## 项目背景

此次项目依附于国家重点研究发展“973计划”分课题：跨尺度微重力补偿实现的基座控制。

## 时间安排表

