

学校编码：10384

密级_____

学号：19920071151161

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

提高 FSAE电喷发动机燃油经济性的研究

Research on improving fuel economy of electronic fuel injection engine for FSAE

罗树友

指导教师姓名：黄红武 教授

葛晓宏 副教授

专业名称：机械电子工程

论文提交日期：2010年 5月

论文答辩日期：2010年 6月

2010年 5月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文,并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版),允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索,将学位论文的标题和摘要汇编出版,采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于:

() 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文,于
年 月 日解密,解密后适用上述授权。

() 2.不保密,适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“ ”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文,未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的,默认为公开学位论文,均适用上述授权。)

声明人(签名):

年 月 日

摘要

FSAE 比赛要求在赛车发动机进气系统的节气门与进气门之间安装一个进气量限制器,并且规定所有气缸的进气都必须通过此限制器,其目的是为了限制赛车的最大输出功率,保证比赛安全进行。进气量限制器降低了发动机最大的进气量和燃料的燃烧速率,同时也造成了进气管内的压力损失。对于应用电喷系统的发动机,限制器引起的压力损失,使得进气压力传感器测量的信息反映的进气量大于实际的进气量,造成了一定程度的喷油“过量”,破坏了赛车燃油经济性,降低了空燃比控制的精度,同时赛车动力性也受到影响。

本文以单缸四冲程赛车发动机为研究对象,首先剖析了发动机电喷系统的构成,分析电喷系统传感器的结构和输出特性,并从混合气体空燃比控制、喷油量的控制和进气量的测量三个层次分析了电喷系统的控制功能;然后利用 AVL BOOST 分析软件对所建立的 FSAE 赛车发动机模型进行仿真,分析限制器造成的进气管内的压力损失以及对发动机功率、充气效率和燃油消耗的影响,根据分析结果结合电喷系统的特点建立了进气量修正方案,并在此基础进行了控制单元的硬件和软件的设计。最后通过对发动机喷油脉宽的检测,验证了进气量修正控制单元满足设计要求,达到了降低油耗,提高燃油经济性的目的。

本研究对提高 FSAE 赛车在燃油经济性和耐久性测试中的竞争力有一定的实际意义,也为改善电喷发动机的性能提供了一种途径。

关键词 : FSAE 燃油经济性 限制器 控制单元

Abstract

In order to limit the maximum output power of FSAE car's engine, a single circular restrictor is required to be deployed among the throttle and the engine in the intake system and all engine airflow should pass through this restrictor. Because the restrictor lower the air flow speed and fuel burning rate, the pressure of intake pipe decline. For EFI (Electronic Fuel Injection) system used in FSAE car, the pressure loss in air inlet pipe results in measured value of the intake quantity being much more than actual value. Due to inaccuracy of the intake measurement, the quantity of the fuel injected into engine is more than it demands, the precision of air-fuel ratio control as well as fuel economy decrease consequently, meanwhile, the dynamic performance of the FSAE car is also affected.

In this paper, the four-stroke engine of the FSAE car was investigated. We focus on the improvement of its fuel Economical Efficiency. The main contents are as follows: 1) Elaborates the composition of EFI system systematically, and researches on the principle of control of air-fuel ratio which is based on the measurement of intake quantity. 2) Analyzes the influence of intake restrictor on engine power, intake pipe's pressure, volumetric efficiency and fuel consumption. One-dimensional engine cycle will be simulated by using AVL BOOST. 3) Intake quantity correction was designed based on characteristics of EFI system and analysis results. The control unit has been designed by both hardware circuit and software way.

According to pulse width of driving signal for injecting fuel, the performance of FSAE car's engine was improved by intake quantity correction of the control unit .Fuel consumption decreases, and fuel Economical Efficiency is improved. This research has provided an alternative method in improving the competitiveness of FSAE car with practical significance.

Keywords: FSAE ; Fuel Economic ; Restrictor ; Control Unit

目录

第一章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.1.1 FSAE 赛事简介.....	1
1.1.2 燃油经济性与 FSAE 赛事.....	2
1.1.3 进气量限制器.....	3
1.2 本文的研究内容与研究意义	5
1.2.1 本文研究内容.....	5
1.2.2 本文研究意义.....	6
第二章 赛车电喷系统的构成与功能分析	7
2.1 赛车发动机电控系统组成	8
2.2 赛车电喷系统传感器的结构以及输出特性	10
2.3 赛车电喷系统空燃比控制策略分析	16
2.3.1 空燃比对发动机性能的影响.....	16
2.3.2 空燃比的控制要求.....	17
2.3.3 空燃比控制方式.....	18
2.3.4 赛车电喷系统空燃比控制流程图.....	19
2.4 喷油器控制原理及驱动信号分析	20
2.4.1 喷油器的控制原理.....	20
2.4.2 喷油控制信号.....	22
2.4.3 喷油脉冲宽度与燃油消耗.....	22
2.5 赛车电喷系统进气的测量	23
2.6 本章小结	24
第三章 限制器对发动机影响循环模拟分析	25
3.1 AVL BOOST模拟分析软件简介	25
3.1.1 BOOST 缸内工作的计算模型.....	25
3.1.2 管道内工作过程计算模型.....	27
3.2 赛车发动机分析模型的建立	29
3.2.1 模型的建立.....	29
3.2.2 参数输入.....	30
3.3 仿真结果分析	37

3.3.1 限制器对发动机功率输出的影响.....	37
3.3.2 进气压力损失与充气效率的变化.....	38
3.3.3 限制器对燃油消耗影响.....	39
3.4 本章小结.....	41
第四章 进气量修正方案的建立及控制单元的实现.....	42
4.1 进气量修正控制单元设计方案.....	42
4.1.1 发动机电喷系统调整的途径.....	42
4.1.2 进气量修正方案建立.....	43
4.1.3 进气量修正控制单元设计框图.....	44
4.2 控制单元硬件电路设计.....	45
4.2.1 微控制器选型以及系统电路硬件设计.....	45
4.2.2 输入级转速信号处理电路设计.....	49
4.2.3 输出级驱动电路设计.....	50
4.2.4 硬件抗干扰措施.....	51
4.3 控制单元软件设计.....	52
4.3.1 软件开发环境简介.....	52
4.3.2 控制软件的设计.....	53
4.3.3 软件抗干扰措施.....	55
4.4 本章小结.....	56
第五章 试验与测试.....	57
5.1 试验设备.....	57
5.2 试验结果.....	58
第六章 结论与展望.....	60
6.1 结论.....	60
6.2 未来工作的展望.....	60
参考文献.....	62
研究生阶段发表论文及参与科研项目.....	66
致谢.....	67
附录.....	68

Table of Contents

Chapter	Introduction	1
1.1	Background of subject	1
1.1.1	Introduction of FSAE	1
1.1.2	FSAE and fuel economy	2
1.1.3	Intake restrictor	3
1.2	Research contents and significance	5
Chapter	Analysis on EFI system of FSAE car	7
2.1	Composition and model of EFI system	8
2.2	Characteristics of sensors	10
2.3	Analysis on air-fuel ratio control of EFI system	16
2.3.1	Influence of air-fuel ratio on the performance of engine	16
2.3.2	Control requirements for air-fuel ratio	17
2.3.3	Control mode of air-fuel ratio	18
2.3.4	Fowchart of air-fuel ratio control	19
2.4	Control principles of injector and driving signal analysis	20
2.4.1	Control principles of injector	20
2.4.2	Characteristics of driving signal	22
2.4.3	Relationship between pulse width and fuel consumption	22
2.5	Measurement of intake quantity	23
2.6	Summary	24
Chapter	Analysis on the Influence of intake restrictor on EFI system	25
3.1	Introduction of BOOST	25
3.1.1	calculation model of cylinder	25
3.1.2	calculation mode of pipe in working cycle	27
3.2	One-dimensional engine modeling and validation	29
3.2.1	Establishment of the model of engine	29
3.2.2	Parameter inputing	30
3.3	Result and analysis	37
3.3.1	Influence of intake restrictor on engine power	37

3.3.2 intake pressure decrease and volumetric efficiency drop.....	38
3.3.3 Influence of intake restrictor on fuel consumption	39
3.4 Summary	41
Chapter Intake correction program proposed and control unit design	42
4.1 Development Intake correction program	42
4.1.1 approaches of modification EFI system	42
4.1.2 Intake correction program design.....	43
4.1.3 Fowchart of control unit	44
4.2 Hardware circuit design of control unit	45
4.2.1 microcontroller selection system circuit design.....	45
4.2.2 speed signal processing circuit design.....	49
4.2.3 driving circuit design.....	50
4.2.4 hardware design for anti-interference.....	51
4.3 software design of control unit	52
4.3.1 Introduction of integrated development environment.....	52
4.3.2 programming for control unit	53
4.3.3 software design for anti-interference.....	55
4.4 Summary	56
Chapter Test and measuring	57
5.1 Equipments for test	57
5.2 Test result	58
Chapter Conclusion and prospect	59
Reference	61
Publication and Project	65
Acknowledge	66
Appendix	67

第一章 绪论

1.1 课题背景

1.1.1 FSAE 赛事简介

SAE 方程式赛车(Formula SAE)在国际上被视为“学术界的 F1 方程式赛车”，它是由美国汽车工程师协会于 1979 年创办，目的在于挑战世界各国大学生和研究生创新、设计和制造小型赛车的能力。赛事给了车队与来自世界各地的大学代表队交流与切磋机会，同时展示其创造力和工程技术能力。整个比赛规范严谨而且非常注重安全，不仅深受汽车行业的关注，而且广受高校学生的欢迎。

目前举办 FSAE 赛事的国家有美国、澳大利亚、英国、意大利、日本、德国和巴西等。然而该赛事在我国起步比较晚，目前国内仅有湖南大学、上海交通大学、同济大学和厦门理工学院拥有车队和车辆，而其中只有湖南大学、上海交通大学与厦门理工学院参加过国际比赛。吉林大学、北京理工大学、清华大学和天津大学等车队在筹建中。厦门理工学院 Amoy 车队于 2009 年 6 月参加了在美国加利福尼亚举行的 Formula SAE 西部赛，最终获得“燃油经济性”、“新秀奖”两个单项亚军，综合成绩排名第 23 名，在除美国本土参赛队以外报名参赛的 20 支国际队伍中排名第 4，这也是目前国内高校参加此项赛事取得的最好成绩。



图 1.1 厦门理工学院 28 号 FSAE 赛车

FSAE 赛事给予车队较高的设计弹性和自我表达创意与想象力的空间，在整车设计方面作较小的限制，但赛事对赛车各系统的材料、结构提出了一些赛事要求。在赛车设计制造过程中，车队可以假设某一个汽车制造公司聘请为其设计、制造和论证一辆样车，用来评估该公司某一量产项目，预期的销售市场是用于周末业余汽车比赛。因此，该车必须在加速、制动和操控性能方面表现出色，同时必须成本低廉、易于维修、可靠性好。此外，考虑到市场销售因素，该车需要提高其车身的美观性、乘坐的舒适性和零件的通用性。赛事最后通过一系列的静态和动态项目来判断赛车的优劣。这些项目包括：技术检验、成本分析、市场陈述、工程设计、单项性能测试、耐久性测试、燃油经济性测试等^[1]。赛事评价项目及分值分配如表 1.1 所示。

表 1.1 FSAE 赛事评价项目及分值

静态项目	分数	动态项目	分数
商业陈述	75	加速性	75
工程设计	150	弯道性能	50
成本分析	100	操控稳定性	150
		燃油经济性	100
		耐久性	300
静态项目分数总计	325	动态项目分数合计	675

1.1.2 燃油经济性与 FSAE 赛事

燃油经济性是赛车的一个重要指标，一般用燃油消耗量或油里程表示。FSAE 赛车的燃油经济性测试是与耐久性测试结合评价的。在赛事各项评价项目中，燃油经济性和耐久性测试分值比重占 40%，它是比赛取得好成绩的关键，一些车队在耐久赛中因故障中途退出，或者由于赛车油耗过大，导致最终成绩较差。

耐久性测试的目的是为了评价赛车的总体表现，并测试赛车的耐久性和可靠性。耐久性测试全长约 22 公里，赛道包括直道、连续弯道、发夹道、障碍和负荷赛道等。在比赛过程中，赛车平均速度应为 48km/h 到 57km/h，最高车速约为 105km/h。比赛过程中不允许对赛车做任何修改，更不允许重新加油。耐久

性测试分数由以下等式计算：

若 $T_{your} < T_{max}$

$$\text{耐久性测试成绩} = 250 \times \frac{(T_{max}/T_{your})-1}{(T_{max}/T_{min})-1} + 50 \quad (1.1)$$

若 $T_{your} \geq T_{max}$,耐久性测试分数 =0

其中, T_{min} 是最快车队时间；

T_{your} 是测试车队时间；

T_{max} 是 T_{min} 的 1.333 倍。

赛车的燃油经济性成绩是基于耐久性测试赛道上行驶的距离的出来的。燃油经济性分数根据以下等式计算：

若 $V_{your} < V_{max}$,

$$\text{燃油经济性测试成绩} = 100 \times \frac{(V_{max}/V_{your})-1}{(V_{max}/V_{min})-1} \quad (1.2)$$

若 $V_{max} \leq V_{your} < 1.33V_{max}$

$$\text{燃油经济性测试成绩} = 100 \times \left\{ \frac{(V_{max}/V_{your})-1}{0.33} \right\}^{1.5} \quad (1.3)$$

其中, V_{max} 是按照 100km 消耗 26L 燃油计算, 耐久性测试的距离为 22 公里, 所以 V_{max} 为 5.72L；

V_{min} 为所有车队成绩中消耗最少的燃油体积；

V_{your} 测试车队所消耗的燃油体积。

如果 V_{your} 大于 1.33 倍的 V_{max} , 燃油经济性测试成绩为-100, 燃油经济性与耐久性测试总分最低成绩为 0 分。

燃油经济性与耐久性测试对赛车油耗提出了较高的要求, 任何影响发动机油耗的可能因素都值得关注。因而降低赛车燃油消耗也成为必要的研究课题。

1.1.3 进气量限制器

出于比赛安全性考虑, FSAE 赛事要求在进气系统的节气门与发动机之间安装一个单独的圆形的限制器, 并且规定所有发动机的进气都必须通过此限制器, 目的是为了限制发动机最大输出功率。比赛规定汽油燃料和 E-85 燃料赛车限制

器最大直径分别为 20mm、19mm。在任何情况下圆形限制器界面不可移动，如果使用了多缸发动机，所有气缸的进气都必须流经这个限制器。另外，对于具有增压器的发动机，限制器必须安装在增压器上游。

本赛车选用了单缸四冲程汽油机作为发动机，在安装 20mm限制器后，发动机的最大进气量低于0.12kg/s，在理论空燃比下，燃料的最大燃烧速率低于8.3g/s，发动机的性能受到很大的限制^[2]。目前针对赛车进气量限制器的研究主要集中在如何增加发动机的进气量，降低进气限制器造成的进气管内压力损失。Hiroshi Enomoto和Hiroyuki Motoi^[3]等研究利用涡流增压器以提高进气压力，进而提高发动机扭矩的输出。许建民和刘金武^[4]等分析了限制器安装的位置对发动机动力能的影响，并利用CFD分析软件改进了进气系统的设计。Dan Cordon和 Charles Dean等利用WAVE分析软件对赛车发动机进行一维循环模拟仿真，分析了进气量限制器对发动机性能的影响并优化了进气系统设计^[5]。Mark Claywell 和 Donald Orkheimer 通过1D&3D耦合分析的方法，对进气限制器改进设计^[6]。Dalhousie大学研究利用文丘里管连接进气管与发动机，其中文丘里管中心部分为圆形进气限制器，该结构一定程度上降低了限制器造成的压力损失。

然而目前研究大多没有考虑限制器对赛车燃油消耗的影响，特别是应用发动机电喷系统的赛车的影响。事实上限制器引起的进气管内压力损失，降低了发动机电喷系统对进气量测量的准确度，破坏了喷油和空燃比的控制精度，使得赛车实际油耗相对增加，从而降低了赛车燃油经济性和耐久性比赛项目中的竞争力。

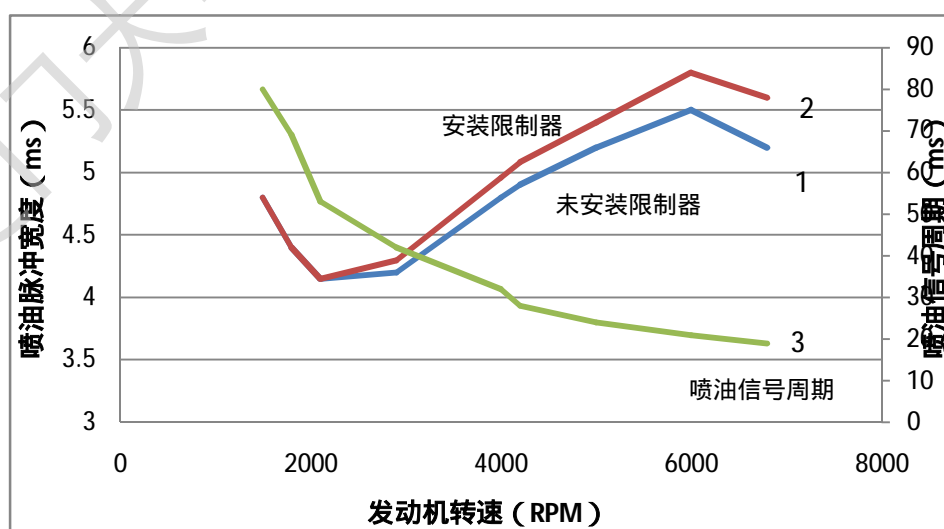


图 1.2 限制器对喷油控制信号的影响

喷油脉冲宽度直接反映了喷油量的变化，与燃油消耗量有密切的关系。本文 2.3.2 节详细分析了喷油脉宽与燃油消耗量的关系。图 1.2 为试验测得安装进气量限制器前后喷油脉冲宽度和喷油周期的变化。喷油信号周期（图中曲线 3）只与发动机转速相关，不受限制器的影响。同一转速下，安装限制器后的喷油脉冲宽度（图中曲线 2）大于安装前的喷油脉冲宽度（图中曲线 1），实际的喷油量增加，这与实际的发动机的进气量变化时不一致。由于电喷发动机喷油量的控制是建立在进气量测量的基础上的，因此有必要对电喷系统进气量测量进行适当修正，进而降低限制器对电喷发动机的影响，提高赛车的燃油经济性。

1.2 本文的研究内容与研究意义

1.2.1 本文研究内容

本文主要针对进气量限制器引起的进气管内的压力损失，造成电喷系统进气量测量不准确，进而影响了空燃比控制精度和赛车燃油经济性的问题，设计进气量修正控制单元，对电喷系统进气量的测量进行适当修正。本文的主要工作包括：

（1）分析赛车发动机电喷系统构成及控制功能。通过查阅资料、信号采集与测试等途径，逐一分析电控系统中传感器输出信号和执行部件驱动信号的特征。并从空燃比控制、喷油量控制及进气量测量三个层次分析了发动机电喷系统控制功能，为设计控制单元提供基础。

（2）赛车发动机循环模拟分析。根据赛车发动机的结构参数，利用 AVL BOOST 软件建立发动机一维循环模拟的模型，仿真并分析进气限制器对发动机性能的影响，特别对进气管内压力、充气效率以及燃油消耗的影响，为进一步建立电喷系统进气量修正方案提供基础。

（3）建立进气量测量修正方案和设计控制单元。基于仿真分析结果和赛车电喷系统的特点，建立通过改变温度传感器信号修正进气量测量的方案，并在此基础上进行控制单元的硬件电路设计和控制软件设计。

（4）控制单元的试验与测试。通过对应用进气量修正控制单元的发动机喷油脉宽的检测，验证了控制单元是否满足设计要求，达到较低油耗，提高燃油经济性的目的。

1.2.2 本文研究意义

本文应用了发动机循环模拟软件 AVL BOOST，分析进气量限制器对发动机性能的影响，根据发动机电喷控制理论设计控制单元，对发动机的进气量测量进行修正，这对提升赛车燃油经济性有一定的实际意义。

另外，本文为修改电喷系统，改善发动机的性能提供了一个途径，同时为今后 FSAE 赛车的设计、改进提供经验，为推动我国赛车开发水平的提高做出了一些有实际意义的工作。

第二章 赛车电喷系统的构成与功能分析

发动机电喷系统 (Electronic Fuel Injection System, 简称 EFI) 以其低排放、低油耗、高功率的特点日益得到普及。发动机电喷系统主要由传感器、电控单元 (Electronic Control Unit, 简称 ECU) 及执行机构三部分组成^[7]。发动机工作状态的参数传给电控单元, ECU 根据接收传感器的信号和内部的控制策略及控制参数, 对执行机构做出相应的指令, 而执行机构按照指令进行动作, 从而保证发动机正常运行的状态^[8]。图 2.1 是发动机电喷系统基本构成框图。

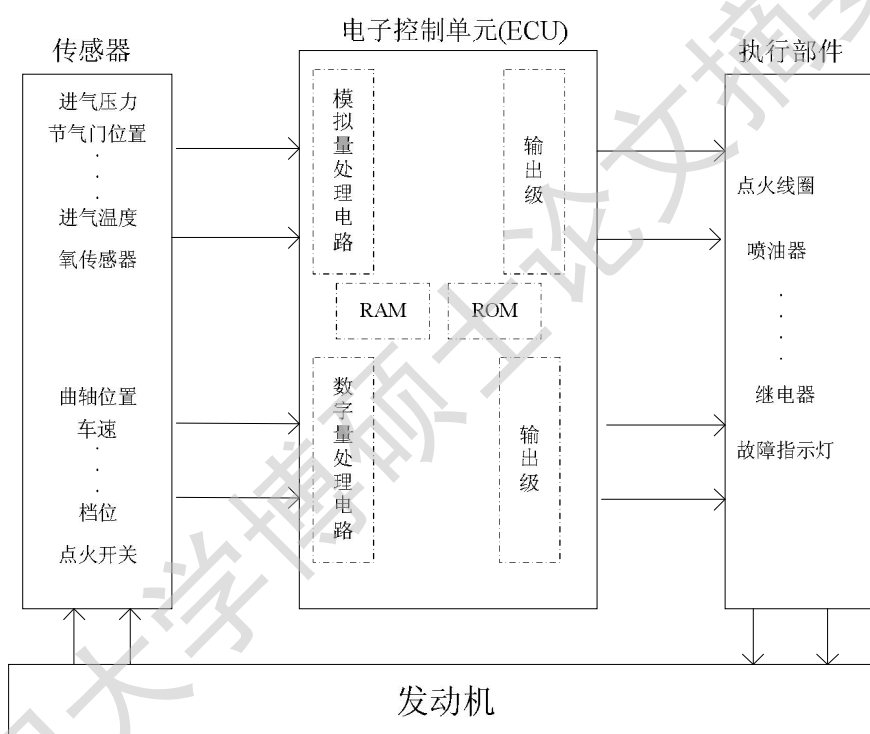


图 2.1 发动机电喷系统基本构成框图

传感器输入电控单元信号分为模拟信号和数字信号。模拟量信号主要包括进气压力、节气门位置、进气温度和氧传感器等信号, 它们由集成在电控单元的模拟信号处理电路处理, 经过信号的过滤、放大和 A/D 转换变为数字信号^[9]。数字信号主要包括曲轴位置传感器、车速传感器、档位以及点火开关信号等, 它们由数字量处理电路处理^[10]。电控单元作为整个发动机电喷系统的“计算机和控制中心”, 它将已经预处理过的信号进行运算, 并将处理后的数据送至输出电路。输出电路将数字信号放大, 有些还要还原为模拟信号, 以驱动执行元件工作, 从而实现发动机的控制^[11]。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库