



申请同济大学工学硕士学位论文

电容式离子电流检测电路 的离子电流适用工况拓展

自然基金项目 (No.123456789) 重新写的

培养单位: 同济大学汽车学院
一级学科: Linux
二级学科: Linux
研究生: 邱君诚
指导教师: 吴志军教授

二〇一六年一月



**A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Science**

A Simple Sample of Tongji Thesis Using TONGJITHESIS

(Supported by the Natural Science Foundation of China for
Distinguished Young Scholars, Grant No.123456789)

School/Department : TONGJILUG
Discipline : TONGJILUG
Major : TONGJILUG
Candidate : Tongji Ren
Supervisor : Prof. Gang Pei
Associate Supervisor : Prof. Gang Wan

January, 2016

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定,同意如下各项内容:按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本;学校有权保存学位论文的印刷本和电子版,并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文;学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务;学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构递交论文的复印件和电子版;在不以盈利为目的的前提下,学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名:

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明:所呈交的学位论文,是本人在导师指导下,进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外,本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体,均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名:

年 月 日

摘要

这是摘要

关键词:T_EX, L^AT_EX, CJK

Abstract

An abstract of a dissertation is a summary and extraction of research work and contributions. Included in an abstract should be description of research topic and research objective, brief introduction to methodology and research process, and summarization of conclusion and contributions of the research. An abstract should be characterized by independence and clarity and carry identical information with the dissertation. It should be such that the general idea and major contributions of the dissertation are conveyed without reading the dissertation.

An abstract should be concise and to the point. It is a misunderstanding to make an abstract an outline of the dissertation and words “the first chapter”, “the second chapter” and the like should be avoided in the abstract.

Key words are terms used in a dissertation for indexing, reflecting core information of the dissertation. An abstract may contain a maximum of 5 key words, with semicolons used in between to separate one another.

Key words: T_EX, L_AT_EX, CJK, template, thesis

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 离子电流的形成机理研究	1
1.2.2 基于离子电流的检测应用研究	2
1.2.3 特征提取及参数估计算法	3
1.2.4 基于离子电流反馈的实时控制	3
1.2.5 国内研究现状	3
1.3 本课题的意义和主要研究内容	4
第 2 章 数值模型的建立和验证	6
2.1 离子电流模型	6
2.1.1 缸内燃烧化学反应式	6
2.1.2 离子电流产生的基本原理	8
2.1.3 带电粒子迁移速度的数学表达	8
2.1.4 火花塞离子电流的数学模型	9
2.2 电容式离子电流电路结构的简化模型	11
2.2.1 电容式离子电流电路结构	11
2.2.2 电容式离子电流曲线	11
2.2.3 火花塞动态电路模型	12
2.2.4 火花塞间隙间的火花电阻	13
2.2.5 离子电流检测电路等效电路模型	13

2.3 小波分析	15
2.3.1 小波分析理论基础	15
2.3.2 多分辨率分析	16
2.3.3 小波函数分析步骤	17
2.3.4 小波分析的特点	18
2.3.5 常见的可离散小波	18
2.3.6 离散小波之间的比较	19
2.4 高斯曲线拟合	20
2.4.1 高斯函数	20
2.4.2 离子电流拟合原理和方法	21
2.4.3 拟合方法优劣的评判标准	22
第 3 章 电容式离子电流检测电路实验台架	23
3.1 实验台架	23
3.1.1 发动机	24
3.1.2 发动机支架	25
3.1.3 测功机	26
3.1.4 发动机附件	28
3.2 实验设备及器材	31
3.2.1 缸压传感器	31
3.2.2 光电编码器	32
3.2.3 采集卡	33
3.2.4 采集程序	33
第 4 章 离子电流干扰去除分析方法	35
4.1 电容式离子电流检测电路的局限性	35
4.1.1 点火放电干扰的来源和性质	36

目录

4.1.2 断油情况下的点火干扰分析	37
4.1.3 断火情况下的离子电流分析	38
4.1.4 纯点火干扰的分析方法	38
4.2 四种小波基函数对点火干扰进行小波分析	40
4.2.1 db 小波族的阶数选择和分析	41
4.2.2 sym 小波族的阶数选择和分析	41
4.2.3 四种小波对去除点火干扰分析的比较	42
4.3 高斯曲线拟合估计离子电流特征参数	43
第 5 章 离子电流工况拓展的验证	45
5.1 离子电流淹没情况下对缸压相位的预测	45
5.1.1 30% 负荷下的缸压相位预测	45
5.1.2 50% 负荷下的缸压相位预测	45
5.1.3 80% 负荷下的缸压相位预测	45
5.2 离子电流淹没情况下对空燃比的预测	45
5.2.1 30% 负荷下的空燃比预测	45
5.2.2 50% 负荷下的空燃比预测	45
5.2.3 80% 负荷下的空燃比预测	45
参考文献	46

主要符号对照表

GNU	GNU's Not Unix /'gnu:/
GFDL	GNU Free Documentation License
GPL	GNU General Public License
FSF	Free Software Foundation
SMP	对称多处理
API	应用程序编程接口
E	能量
m	质量
c	光速
P	概率
T	时间
v	速度

第1章 绪论

1.1 前言

早在十九世纪,人们就观察到碳氢化合物在燃烧时会产生自由离子,使得火焰和燃烧产物具有导电能力。这一现象被注意到,并逐渐运用到燃烧过程研究工作。在火花塞点火式发动机中,当燃烧发生时,火花塞电极之间就产生大量的离子。如果在火花塞两极之间加上适当的直流偏置电压就会形成离子电流,通过该电流可以对发动机进行检测实现对发动机的实时监测。但是,由于以往对发动机控制技术要求不高,同时受发动机控制软、硬件系统的整体技术水平限制,该方法并未引起人们的广泛注意。近年来,随着对发动机效率及排放性能要求的逐渐提高,该方法逐渐引起重视。离子电流检测技术的最初应用主要是面向于失火现象的检测,在美国国家环保局(EPA)第II代车载诊断装置(OBDII)法规颁布后,要求在所有负荷和转速下实现100%失火检测^[1]。世界上许多厂家采用的是曲轴转速波动法,但这种方法在路况较差的情况下会产生干扰信号,影响检测结果,而采用离子电流法则可以避免上述问题,实现100%失火检测。由此,对离子电流检测技术的研究逐渐由对燃烧过程中的失火、爆震等现象的定性检测,逐渐向空燃比、燃烧相位及缸内燃烧压力状态等参数的定量检测上来。

1.2 国内外研究现状

目前,对离子电流检测技术的研究主要集中于离子电流的形成机理、应用途径、特征提取及参数估计方法以及实际控制应用等四个方面。

1.2.1 离子电流的形成机理研究

早在1953年Winch和Mayes^[2]就利用了偏置电压式的离子电流检测电路记录了离子电流信号,并以此分析了缸内燃烧状况。在20世纪50年代,出现了大量的研究火焰中化学离子平衡和火焰后燃区的研究成果。进入80年代,汽车领域的科技工作者致力于离子电流信号的研究,取得了很多重要的成果。1986至1997年Nick Collings^[3-5]发表了利用火花塞作为传感器检测爆震的三篇论文,介绍了离子电流法的基本原理和离子电流的发展历程,并完善了爆震检测的方

法。1996年Andre Saitzkoff^[6]发表了火花塞离子电流的平衡计算的论文,利用偏置电源式离子电流检测电路测量了离子电流信号,通过分析得到了火花塞离子电流的近似理论计算公式。2000年Wayne University的D.Schneider^[7]发表了离子电流与内燃机工作参数之间关系的博士论文。

在离子电流的形成机理研究方面,Saitzkoff和Reinmann等人^[6]率先对N₂,H₂O,CHO和NO四种基团在离子电流形成过程中所起的作用进行了对比分析。研究认为燃烧火焰电离后能够定向移动的自由离子只占极小部分,其原因在于移动能力上的差异。同时,研究表明占离子总浓度1%的NO基团产生离子电流的能力最强。Kessler等人^[8]在柴油机上采用光学方法对离子电流的研究表明,由于柴油和汽油在燃烧时产生自由离子的化学反应过程不同,二者产生的离子电流信号波形差异显著。在汽油机上形成的离子电流中,电子是负电荷的主要载体,而对于柴油机上的所形成的离子电流,带负电的离子也需考虑。A.Franke^[9]在对汽油机离子电流产生的物质来源的分析基础上,首次将离子电流的产生划分为火焰前锋期和火焰后期两个阶段,认为在火焰前锋期的离子电流主要是由火焰前锋面与火花塞电极接触时所产生的,而在火焰后期热电离过程是形成离子电流的主要原因。

除了离子电流产生的化学动力学机理外,气缸结构及火花塞位置等物理因素也是影响离子电流波形的重要成因。L.Peron等人^[10]对离子电流信号的局限性分析认为,离子电流生成机理并不是决定信号波形的唯一原因。

1.2.2 基于离子电流的检测应用研究

目前对离子电流的应用已经从初期对失火及爆震的定性研究转入对燃烧参数的定量研究。在空燃比检测方面,Reinmann^[11]利用离子电流公式理论和实验论证拟合了空燃比-离子电流公式。Kenneth Ratton和Ming C. Lai等人^[12]利用火花间隙电离检测研究了缸内空燃比的近似值,观察到了空燃比和离子电流特征之间的较强相互关系。其研究认为,从整体性能上看,离子电流检测无法取代缸压检测,二者信号质量和性质都完全不同。但通过具体工况下对离子电流波形的具体分析,该方法仍具备有对空燃比进行实时反馈的潜力。在对缸内燃烧压力状态的检测方面,Chao.F等人^[13]提出,部分负荷工况下,对离子电流信号进行了多循环平均处理,通过处理后信号的第二峰位置及幅值,实现了对缸内燃烧峰值压力及其位置的准确预测。

1.2.3 特征提取及参数估计算法

在基于离子电流的燃烧特征提取算法方面, J.Forster 等人^[14]率先基于离子电流的频域特征, 实现了对爆震及其强度的准确估计。该研究展示了爆震强度与离子电流频域信号高频区域内幅值的相关性。此后, 一系列针对产品发动机爆震检测的相关研究也相继出现。这些研究中普遍采用了离子电流的频域特征实现了较高质量的爆震检测。

此外, Gerard 等人^[15]针对不同燃烧边界条件下, 离子电流信号变化规律复杂的情况, 提出了基于信号时域特征, 采用主成分分析方法对离子电流信号进行了特征提取, 该方法可以有效的对离子电流信号观测窗内观测样本进行降维, 从而减小后续的参数估计算法的计算量。

在基于离子电流的参数估计方法方面, 由于离子电流信号的产生机理复杂, 信号波形变化规律多样, 在利用该信号进行燃烧特征检测时, 大多采用了数学模型来建立电流信号特征与被估参数之间的映射关系。在这方面, Gazis 等人^[16]通过双高斯曲线拟合的方法, 对电流信号的时域特征进行了提取, 并针对离子电流信号的非线性变化特征, 采用神经网络方法实现了对汽油机燃烧峰值压力位置的准确预测。

1.2.4 基于离子电流反馈的实时控制

Magnus 等人^[17]在研究柴油机 EGR 和颗粒污染对离子电流的影响时, 尝试了在稳态工况下, 通过多循环均值后的离子电流信特征值号对燃烧始点进行反馈和控制。先预定一个离子电流信号强度阈值, 当检测到的离子电流信号首次越过该阈值时, 该时刻被定义为燃烧始点。对燃烧始点检测成功后, 可以通过调整燃油十六烷值和空气、燃油以及发动机温度等相应方法, 对滞燃期加以调整。

1.2.5 国内研究现状

在国内许多科研院校和研究所针对离子电流也展开了大量的研究工作, 其中典型的诸如, 同济大学李理光课题组针对汽油机的点燃方式和均质压燃方式下离子电流的产生机理及信号特征变化规律进行了研究, 分析了两种燃烧模式下信号的产生机理及影响因素。在此基础上, 研究了基于该信号的特征提取及燃烧信息反馈方法。进而, 针对现有发动机传感及控制方法的不足, 提出了以离子电流信号为反馈量, 在发动机上实现基于循环的燃烧信息反馈及控制思想。西

安交通大学的吴筱敏^[18] 和天津大学的谢辉等课题组也基于离子电流检测手段进行汽油机爆震、空燃比检测和燃烧相位判断等相关研究。

1.3 本课题的意义和主要研究内容

常见的离子电流检测电路分为电容式和偏置电源式。偏置电源式检测电路可以将点火干扰屏蔽，获得的离子电流曲线便于分析计算^[19]，但是由于需要使用高压硅堆和外置电源成本太高。电容式检测电路结构简单，成本低廉，但是点火干扰阶段容易和火焰前锋期甚至包括焰后期重叠，导致离子电流的一些特征参数无法识别。如果能够提出一种较好的信号处理方法处理点火干扰阶段信号，将会使成本低廉、结构简单的电容式检测电路得到推广。

正常情况下，采用电容式离子电流检测电路得到的离子电流信号曲线可以分为三个时期；火花塞放电期，火焰前锋期，火焰后期。火花塞放电期间，由于次级线圈放电导致检测电路中产生了较大的电流。但如果火花塞附近发生早燃，则在点火信号之前或之后将产生一些峰值^[20]。如果火花塞点火放电时间过长，将会和火焰前锋期甚至是火焰后期的离子电流信号重叠，从而影响了离子电流信号的分析。

在重叠情况下，仍然可以预估甚至提取离子电流。由于点火干扰的根本原因是点火能量在点火线圈中的震荡，其频率是有一定规律的。火焰前锋期的电流信号主要和火焰传播过程相关，火焰后期的电流信号和缸内的热力学过程相关，这两个时期的电流信号频率和点火线圈中的能量震荡频率区分明显。这是离子电流被淹没而仍然可以预估甚至提取的基本原理。所以为了能够准确地提取离子电流信号，首先需要通过对电容式离子电流检测电路和纯点火干扰信号进行分析，以便了解点火干扰信号的频幅特性。而在失火情况下，由于燃烧没有发生，离子电流信号没有产生。所以失火是检测电路测定的信号就是纯点火干扰信号。除了信号提取的方法之外，Saitzkoff^[6] 做了很多研究，提出了近似的离子电流计算公式。通过将这些公式进行简化提出一些参数函数，也能够很好的预测离子电流的波形和特征参数，甚至可以达到预测空燃比的要求。

离子电流的火焰前锋期信号是由于燃烧的火焰前锋造成的，所以该时期的离子电流能够很好的用于分析缸内的燃烧状况，比如计算燃烧锋面的速度。而离子电流的火焰后期是由于火焰前锋面已经离开火花塞电极，但是缸内燃烧仍在继续，导致的缸内热力学变化引起的热电离而形成的，所以能够很好的反应内

燃机的负荷,缸内压力变化等。

所以正确地获得离子电流两个时期的信号曲线对于分析缸内的燃烧情况是非常重要的。但是这两个时期的信号很容易被点火干扰信号淹没,导致无法得到准确的离子电流信号。通过上述的一些方法去除干扰信号,就可以帮助更好的认识离子电流信号,为后续的研究扫清障碍。即使无法完整准确地消除点火放电干扰信号,仍然能够通过上述方法统一处理每个循环的离子电流信号,得到该处理方法下的某个稳定的特征变量,从而指导反馈控制发动机的运行参数。

第2章 数值模型的建立和验证

数值模拟已经成为内燃机设计开发和优化过程中的一个重要研究手段。由于内燃机工作过程中缸内形成高温和高压的环境 现有的测试方法很难直接将传感器安装在缸内进行测量，因此数值模拟在内燃机工作过程的研究上得到了广泛应用。

2.1 离子电流模型

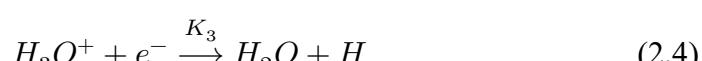
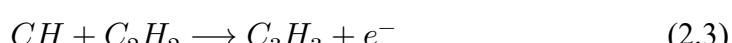
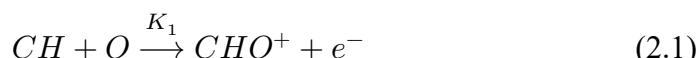
点燃式发动机缸内混合气在火花点火、火核形成、火焰传播等燃烧过程中会产生大量的自由电子、正负离子和自由基等带电粒子，使燃气具有一定的电导性。如果在火花塞两级施加一个稳定的直偏电压，由于有外加电场存在，带电粒子发生定向迁移，从而形成了火花塞离子电流。

以下的离子电流模型是基于以下的几个假设而成立的：

- 火花塞间隙中的燃气完全燃烧
- 燃烧过程满足绝热过程
- 燃气满足热力学平衡
- 火花塞间隙近似成圆柱模型

2.1.1 缸内燃烧化学反应式

离子电流根据火焰的传播过程主要分为火焰前锋期和火焰后期。点火开始后，火焰前锋面从火花塞点火处开始燃烧，此时形成离子电流的火焰 前锋期；当火焰前锋面离开火花塞两端时为离子电流的火焰后期。其中火焰前锋期的主要化学反应如下：



其中 $K_i (i = 1, 2, 3)$ 表示反应常数, 大小分别为:

$$K_1 = 5 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{s} \quad (2.5)$$

$$K_2 = 7 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s} \quad (2.6)$$

$$K_3 = 2.3 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s} \quad (2.7)$$

由式可以看出, K_2 大于 K_1 , 也就是说火焰前锋中的离子大部分转化为 H_3O^+ , K_3 虽然也较大, 但是由于反应不剧烈, 因此在后火焰区 H_3O^+ 还会存在。

在后火焰期, 导致 H_3O^+ 的快速放热反应基本完成, H_3O^+ 基本上消失。此时的燃气温度可能在 1500°C 以上, 高温下的热电离决定了离子电流的变化。焰后区内产生电离过程的主要物质是一氧化氮, 研究表明^[11], 95% 的有效的自由电子是由于 NO 的热电离产生的。 NO 起主导作用的原因见表2.1, NO 的电离能在燃气内主要物质中是最小的, 这样, NO 的电离率比其他物质的要大很多。大部

表 2.1 燃气中主要物质的电离参数

物质	电离能 / eV	浓度 (在 15°CA ATDC 时)	电离率
NO	9.264 05	1.48×10^{-2}	2.44×10^{-8}
H_2O_2	10.540 00	1.60×10^{-6}	1.73×10^{-9}
CO	14.013 90	4.85×10^{-2}	1.30×10^{-12}
CO_2	13.777 00	7.17×10^{-2}	2.10×10^{-12}
H_2O	12.618 80	1.16×10^{-1}	2.33×10^{-11}
N_2	15.580 80	6.99×10^{-1}	5.03×10^{-14}
H_2	15.425 89	9.72×10^{-3}	6.87×10^{-14}

分 NO 在 1000°C 以上的温度根据 Thermal 或 Zeldovich^[21] 机理形成, 其后火焰期的主要化学反应为:



由于在高温高压的环境下 NO^+ 浓度增加; 当压力最大时, NO^+ 浓度达到最大, 而对应的离子电流也达到峰值。所以火焰后期的离子电流和缸内压力有很明确的关系。

总的来说, 火焰前锋期的离子电流主要是化学电离产生的 H_3O^+ 导致的; 火焰后期的离子电流主要是 NO 热电离产生的电子导致的。

2.1.2 离子电流产生的基本原理

当火花塞两级加上偏置电压 U 时,火花塞间隙内会形成一个电场,如果此间燃气为等离子体状态,即存在带电粒子,那么这些带电粒子的运动为自身的无规则热运动和电场方向迁移运动的叠加。如果他们在 dt 时间内分别移动了 dx_i 和 dy_i 距离,并使电极上产生的面电荷密度的变化量为 q_i 和 q_e ,既有

$$q = q_i + q_e = en_i dx_i + en_e dx_e \quad (2.11)$$

式中: n_i 、 n_e 是正负带电粒子的浓度; e 为元电荷的电量即一个电子所带的电荷。那么,在离阴极 x 距离处的电流密度为

$$j_e(x) = \frac{dq}{dt} = en_i v_{di} + en_e v_{de} \quad (2.12)$$

式中 v_{di} 、 v_{de} 为正负带电粒子的迁移速度。

对外电路而言,形成的火花塞离子电流为

$$I_{on} = \int_A j_e dA = j_e \pi r^2 = (en_i v_{di} + en_e v_{de}) \pi r^2 \quad (2.13)$$

式中 r 为火花塞中心电极的半径。

2.1.3 带电粒子迁移速度的数学表达

离子的迁移率 μ_i

Langevin 根据气体动力学,分析推导出离子的迁移率为

$$\mu_i = 0.815 \frac{e\bar{\lambda}}{M\ddot{v}} \left(\frac{M + M_a}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

式中: M 和 M_a 分别为离子和气体原子的质量; \ddot{v} 为离子的均方根速度; $\bar{\lambda}$ 为离子在气体中的平均自由程。

从上式可以看, μ_i 与电场强度 E 无关,这是由于上式推导是在 E/p 比较低的情况下进行的。实际上当 E/p 增大时, μ_i 将于电场强度 E 有关。可以用一个经验公式表达,即

$$\mu_i = \mu_0 [1 + \alpha(\frac{E}{p})]^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

式中: μ_0 为单位压强下离子的迁移率; α 为迁移常数,数值由实验测得; E 为电场强度; p 为气体压强。

电子的迁移率 μ_e

电子和离子的迁移运动由于本身的特性差异很大,如下表2.2所示。所以在处理电子迁移运动时,不能完全按照离子迁移运动的方式来处理,经过公式推导,可以得到电子的迁移率为:

$$\mu_e = \frac{1}{3}e\bar{\lambda}\left(\frac{2}{\kappa T m}\right)^{1/2} \quad (2.16)$$

在燃气等离子体中,带电粒子在电场作用下会产生扩散和迁移运动;其根本原因是它们之间交换着能量和变更着位置。带电粒子的扩散和迁移反映出火花塞离子电流的基本特性。

表 2.2 离子和电子的比较

	电子	离子
质量	小	大
平均热运动	大	小
能量积累	可以	不可以
碰撞面积	小	大
刚体碰撞	否	是

2.1.4 火花塞离子电流的数学模型

火焰前期离子电流模型

根据火焰前锋期的化学反应方程式可以得到各反应物和生成物的生成率。下式是 H_3O^+ 在反应过程中满足的公式

$$\frac{d[H_3O^+]}{dt} = k_2[CHO^+][H_2O] - k_3[H_3O^+][e] \quad (2.17)$$

当上式右边为零时,即为燃起的化学反应达到了平衡状态。同理,其他的反应物和生成物也满足类似的公式。于是可以得到:

$$[H_3O^+] = [e] = \left(\frac{k_1[CH][O]}{k_3}\right)^{1/2} \quad (2.18)$$

$[CH]$ 和 $[O]$ 的平衡浓度主要取决于被点燃燃油混合气的空燃比。Reinman 等人^[11]的研究表明,在空燃比 ϕ_{at} 大于 0.8 的稀混合气条件下, $[H_3O^+]$ 可表示为

$$[H_3O^+] = \frac{c}{\sqrt{\phi_{at}}} \quad (2.19)$$

式中 c 为常数。

现在已经求得了离子浓度,火花塞离子电流可以得到为

$$I_{on} = en_e \pi r^2 E \mu \quad (2.20)$$

式中: n_e 为相应于离子浓度的自由电子浓度; v_d 为迁移速度; E 为电场强度; μ 为迁移速率; e 为单位电荷。这里将反应区看成一个简单的圆柱体,所以截面半径为 r 。

火焰后期的离子电流模型

火焰后期离子电流主要受到 NO 的热电离的影响,而不是化学电离。首先计算出燃烧产物中的 NO 的浓度,然后可利用沙哈 (Saha) 方程求解 NO 在特定条件下发生热电离生成 NO^+ 和自由电子的电离率,并结合自由电子和离子的在外加电场作用下的迁移速率,就可以推导出火焰后期火花塞离子电流的数学模型。

沙哈方程的公式如下:

$$\frac{\chi^2}{1 - \chi^2} p = \frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h^3} (\kappa T)^{5/2} \exp(-\frac{E_i}{\kappa T}) \quad (2.21)$$

其中: m_e 为电子质量; h 为普朗克质量; κ 为波尔兹曼常数; T 为气体的绝对温度; E_i 为电离能; p 为缸内压力; χ 为电离率。

如果将火花塞间隙局部看成一个圆柱形的等离子体,那么有

$$I_{on} = e N_a \chi \mu E \pi r^2 \quad (2.22)$$

其中 N_a 为离子浓度。离子浓度满足公式

$$\frac{dN_a}{dt} = 6 \times 10^{16} T_{eq}^{-1/2} \exp[-\frac{69090}{T_{eq}}] (O_2)_{eq}^{1/2} (N_2)_{eq} \quad (2.23)$$

于是可以得到火花塞离子电流公式为

$$I_{on} = e^{3/2} N_a \pi r^2 \left(\frac{\kappa}{2}\right)^{1/4} \sqrt{\frac{3.2 \times 10^{-2}}{pm_e \bar{\lambda}}} ET^{5/2} \exp(-\frac{E_i}{\kappa T}) \quad (2.24)$$

其中 p 为缸内压力; E 为外加电场强度; r 为火花塞中心电极半径; $\bar{\lambda}$ 为电子平均自由程; T 为气体的绝对温度; E_i 为电离能; m_e 为电子质量; κ 为波尔兹曼常数。

2.2 电容式离子电流电路结构的简化模型

2.2.1 电容式离子电流电路结构

如下图2.1所示的是电容式离子电流检测电路结构

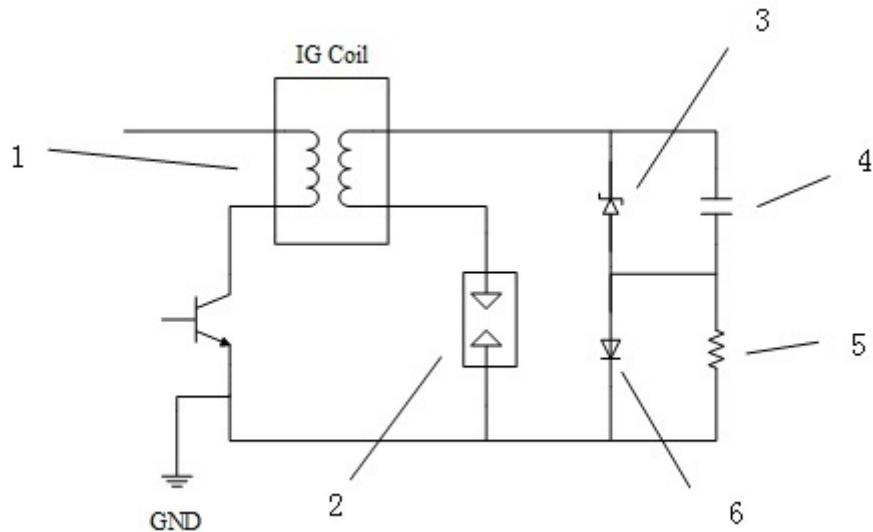


图 2.1 电容式离子电流检测电路结构

1 表示点火线圈

2 表示火花塞电极两段

3 表示瞬态抑制二极管,防止电压过高使电路失效

4 是电容,作为次级电路电源

5 是检测电阻

6 是普通二极管,用于限定检测电阻两端最大电压

2.2.2 电容式离子电流曲线

电容式离子电流分为三个时期:点火干扰期,火焰前锋期和火焰后期。如下图2.2所示是离子电流的三个时期。其中点火干扰期是由点火干扰造成的。火焰前锋期由火焰锋面经过电极附近的化学电离导致的;火焰后期由火焰锋面离开电极附近后的 NO 的热电离导致的。由于点火干扰的持续时间和点火线圈的内部结构有关系,而火焰前锋期和火焰后期和燃烧有关系,所以点火干扰期可能会和火焰前锋期甚至是火焰后期相重合。但是点火干扰的曲线和火焰前锋或火焰

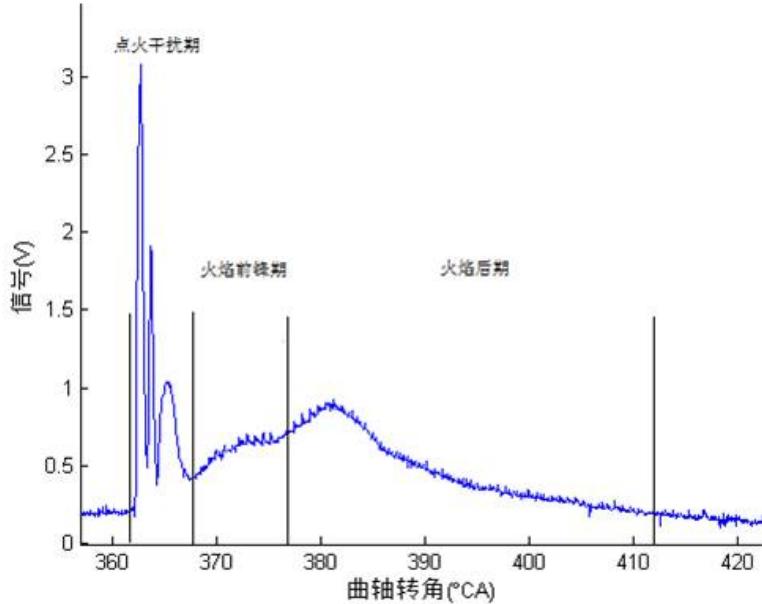


图 2.2 电容式离子电流的三个时期

后期的区别在于,点火干扰期的曲线存在稳定的震荡信号,而化学电离或热电离导致的电流频率较低。通常来说火焰后期持续到整个燃烧阶段结束。

2.2.3 火花塞动态电路模型

火花塞结构复杂,但针对电磁干扰问题,主要考虑点火过程的放电通路,因此对其作适当的简化后的结果如图2.3所示,其中金属外壳接地,具有耐高温、耐高压的氧化铝陶瓷作为绝缘体,内置电阻由导电碳粉制成,中心电极为镍铜合金^[22]。其中 R_r 为火花塞内置电阻,其阻值可通过万用表测得或由生产商提供,

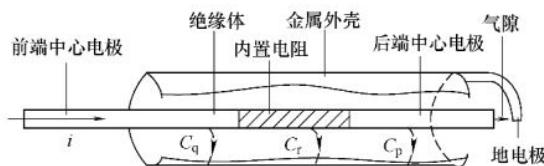


图 2.3 火花塞内部放电通路

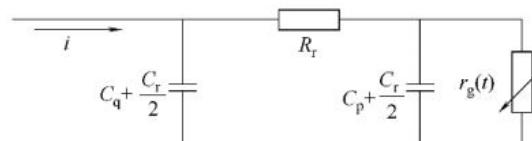


图 2.4 火花塞动态电路模型

通常为几千欧; r_g 为火花塞气隙电阻, 其阻值随火花塞的放电状态而发生变化, 表征火花塞的非线性特性; C_q 、 C_r 、 C_p 分别表示前端中心电极、内置电阻、后端中心电极对火花塞金属外壳的寄生电容。火花塞内部可以看作静电场, 因此火花塞动态模型可以如图2.4所示。

2.2.4 火花塞间隙间的火花电阻

图2.4中的火花塞内置电阻 r_g , 前段中心电极对火花塞金属外壳的寄生电容 C_q , 内置电阻对火花塞金属外壳的寄生电容 C_r , 后端中心电极对火花塞金属外壳的寄生电容 C_p 都可以通过有限元的方法进行计算^[22]。而火花塞间隙间的火花电阻 R_g 需要另外的方法进行计算。

由 Rompe-Weizel 理论可知, 火花电阻 r_g 是一个随时间变化的量, 当火花间隙被击穿后, 其随时间变化的关系为:

$$r_g = l_g \left(\frac{2\alpha}{p \int_{\infty} i_g^2 dt} \right)^{-0.5} \quad (2.25)$$

式中, l_g 为间隙宽度; α 为火花系数; p 为混合燃气压力; i_g 为流过间隙的火花电流。

间隙击穿后, 火花电阻 $r_g \leq 5\Omega$, 而火花塞电阻的阻值 $5k\Omega \leq R_r \leq 20k\Omega$, 所以 $r_g \leq R_r$ 。考虑到高压点火导线的电阻 R_w , 火花电流 i_g 主要有电容放电引起, 根据电路理论可以得到:

$$C = C_p + \frac{C_r}{2} \quad (2.26)$$

$$\frac{du_g(t)}{dt} = -\frac{1}{C} i_g(t) \quad (2.27)$$

$$\frac{di_g(t)}{dt} = \frac{\alpha}{l_g^2 p} u_g^2(t) i_g(t) - \frac{1}{C} \frac{i_g^2(t)}{u_g(t)} \quad (2.28)$$

设 $t = t_1$ 时刻为电极产生电晕瞬间, $i_g(t_1) = 0$, $u_g(t_1) = V_{br}$, V_{br} 为火花塞气隙的击穿电压。利用数值算法, 可以计算得到气隙电流 $i_g(t)$ 及电压 $u_g(t)$ 。再代入式2.25中即可求得 r_g 。

2.2.5 离子电流检测电路等效电路模型

根据火花塞的动态电路模型以及火花塞间隙间的火花电阻的计算公式, 我们可以得到离子电流检测电路的等效电路模型如下:

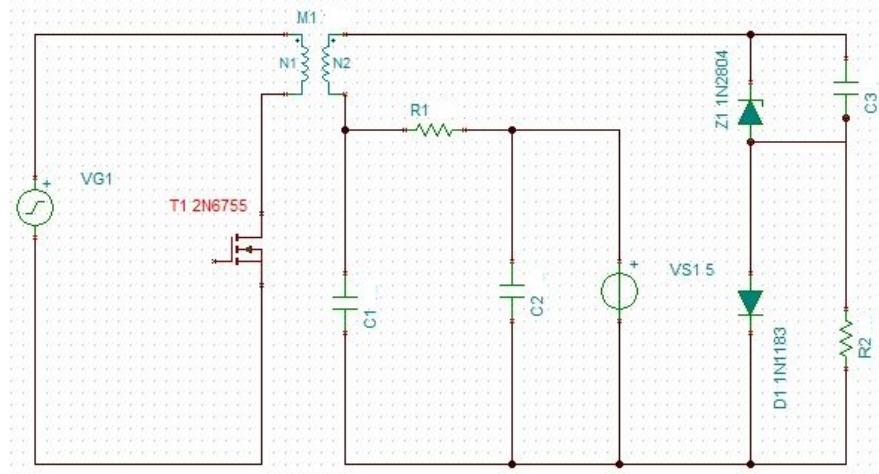


图 2.5 电路等效电路模型

其中 $C_1 = C_q + C_r/2$, $C_2 = C_p + C_r/2$ 。由于火花塞间隙间的火花电阻 r_g 在不同时间的阻值不同, 可以将该电路分为三种情况。

气隙断开的电路模型

当 MOSFET 被点火控制信号触发后, 在其导通时间内, 一次线圈有电流通过, 二次线圈出现感应电动势。但此时火花塞两极间的电压达不到击穿电压, 此时火花塞气隙处于断开状态, 此时在 MOSFET 导通阶段有

$$0 \leq t \leq t_1 \quad (2.29)$$

$$r_g(t) = \infty \quad (2.30)$$

$$i_g(t) = 0 \quad (2.31)$$

时间 t_1 的计算即是计算火花塞气隙两段电压达到击穿电压 V_{br} 的时间。

气隙击穿瞬间的电路模型

设火花塞气隙在 $t = t_1$ 时开始产生电晕, $t = t_2$ 时被击穿, 此过程火花塞由高阻抗特性变为低阻抗特性, 即有

$$t_1 \leq t \leq t_2 \quad (2.32)$$

$$r_g = l_g \left(\frac{2\alpha}{p \int_{\infty}^t i_g^2 dt} \right)^{-0.5} \quad (2.33)$$

气隙自持放电时的电路模型

火花塞气隙击穿时出现电离现象，使得混合气被电离，从而形成了等离子通道，火花塞气隙进入自持放电阶段。此时火花塞两级电极间的电压维持稳定值^[23,24]，即有

$$t_2 \leq t \leq t_3 \quad (2.34)$$

$$u_g = U_0 \quad (2.35)$$

2.3 小波分析

2.3.1 小波分析理论基础

自从 1822 年傅里叶发表“热传导解析理论”以来，傅里叶变换一直是传统信号处理的基本方法。傅里叶变换能够满足大多数应用的需求，但是由于在进行傅里叶变换的时候丢掉了时间信息，因此无法同时知道频域和时域情况下的信息。傅里叶变换在分析非平稳信号时表现出了严重的性能不足。然而实际中的信号均包含大量的非平稳成分，比如突变、偏移等，然而这些非平稳信号往往反映了信号的重要特征。

为了研究信号在局部时间段的频域特征，1946 年 Gabor 提出了著名 Gabor 变换，之后发展成为了短时傅里叶变换 (STFT)，其基本思想是对信号加窗，然后对窗内的信号进行傅里叶变换，因此它可以反映出信号的局部特性。但由于 STFT 的定义决定了其窗函数的大小和形状与时间和频率无关，因此对低频信号采用大时间窗进行分析，而对于高频信号用小时间窗进行分析。小波变换继承了 STFT 的思想，它的窗口大小不变，但窗口形状可以改变，是一种时间窗和频率窗都可变的时频分析方法，即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率，在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率，因此在时频都具有很强的表征信号局部特征的能力。

在实际应用中，尤其是在计算机实现时，连续小波变换必须加以离散化，因此有必要讨论连续小波序列 $\psi_{a,b}(t)$ 和连续小波变换 $W_f(a,b)$ 的离散化。在连续小波中，考虑小波函数

$$\psi_{a,b} = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.36)$$

这里 $b \in R, a \in R_+$, 且 $a \neq 0, \phi$ 是容许的, 为方便起见, 在离散化中, 总限制 a 只取正值, 这样相容性条件就变为

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\widehat{\psi}(\bar{\omega})|}{|\bar{\omega}|} d\bar{\omega} < \infty \quad (2.37)$$

通常, 把连续小波变换中尺度参数 a 和平移参数 b 的离散化公式分别取作 $a = a_0^j, b = k a_0^j b_0$, 这里 $j \in Z$, 扩展步长 $a_0 \neq 1$ 是固定值, 为方便起见, 总是假定 $a_0 > 1$ (由于 m 可以取正也可以取负, 因此这个假定无关紧要)。所以对应的离散小波变换函数 $\psi_{j,k}(t)$ 即可写作

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi\left(\frac{t - k a_0^j b_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-\frac{j}{2}} t - k b_0) \quad (2.38)$$

而离散化小波系数则可表示为

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \quad (2.39)$$

其重构公式为

$$f(t) = C \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} C_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (2.40)$$

其中 C 是一个与信号无关的常数。由此可以看到信号序列 $f(t)$ 可以由信号无关量 C 和小波函数 ψ 组成。

2.3.2 多分辨率分析

多分辨率分析是由一个尺度函数 ϕ 建立起来的, 因此多分辨率分析的建立等价于寻找尺度函数在多分辨率分析的框架下的性质。通过多分辨率分析可以从尺度函数 ϕ 获得小波函数 ψ , 从而可以对已知的信号进行分析和处理。

Mallat 在 1989 年给出了计算小波函数 ψ 的理论方法:

设 $(\{V_m; m \in Z\}; \phi(t))$ 是一个正交多分辨率分析, 则存在 $\{h_k\} \in l^2$ 使得下面的双尺度方程

$$\phi(x) = \sum_k h_k \phi(2x - k) \quad (2.41)$$

成立, 并且利用尺度函数 $\phi(x)$ 构造小波函数

$$\psi(x) = \sum_{ki} g_k \phi(2x - k) \quad (2.42)$$

其中 $h_k = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) \overline{\phi(2x - k)} dx, g_k = (-1)^k \overline{h_{1-k}}$ 。

根据上述理论多分辨率分析可以得到离散化的尺度函数和小波函数的获得方法。

2.3.3 小波函数分析步骤

第一步是采样。如果待分解的是模拟信号 $f(t)$, 选择 $N = 2^n$, 得到采样信号值 $a_k^n = f(\frac{k}{2^n})$, 其中 k 的取值保证 $\frac{k}{N}$ 位于信号 $f(t)$ 发生的时间范围之内, 并在每个不小于 $\frac{1}{N}$ 的时间段内都能取到采样信号 $a_k^n = f(\frac{k}{2^n})$, 于是可以用信号

$$f_n(x) = \sum_{k \in Z} a_k^n \phi(2^n x - k) \quad (2.43)$$

对连续信号 $f(t)$ 进行高精度的近似。

第二步是分解。设信号 $f_n(x)$ 逐级分解为

$$\begin{aligned} f_n(x) &= W_{n-1}(x) + W_{n-2}(x) + \dots + W_{l-1}(x) + f_{l-1}(x) \\ &= W_{n-1}(x) + W_{n-2}(x) + \dots + W_0(x) + f_0(x) \end{aligned} \quad (2.44)$$

其中

$$\begin{aligned} W_{l-1}(x) &= \sum_{k \in Z} b_k^{l-1} \psi(2^{l-1}x - k) \\ f_{l-1}(x) &= \sum_{k \in Z} a_k^{l-1} \psi(2^{l-1}x - k) \end{aligned}$$

系数 a_k^{l-1} 与 b_k^{l-1} 按照上标从大到小的顺序从 $l = n$ 开始直到 $l = 0$ 结束, 满足

$$b_k^{l-1} = \frac{a_{2k}^l - a_{2k+1}^l}{2} \quad (2.45)$$

$$a_k^{l-1} = \frac{a_{2k}^l + a_{2k+1}^l}{2} \quad (2.46)$$

第三步是信号处理。将分解后的信号表示成下面的形式

$$\begin{aligned} f_n(x) &= \sum_{l=0}^{n-1} W_l(x) + f_0(x) \\ &= \sum_{l=0}^{n-1} \left(\sum_{k \in Z} b_k^l \psi(2^l x - k) \right) + \sum_{k \in Z} a_k^0 \phi(x - k) \end{aligned} \quad (2.47)$$

信号处理的过程就是根据实际情况对 b_k^l 作适当的修正。例如信号处理的目的是去噪,那么可以将不可能存在的频率范围对应的系数 b_k^l 设置为 0;如果信号处理用于压缩,则可以根据压缩比的大小及小波系数的取值范围设置适当的阈值,当小波系数绝对值小于阈值时,设置 b_k^l 为零。

第四步是信号重构。设重构后的信号值满足

$$\tilde{f}_n(x) = \sum_{k \in Z} a_k^n \phi(2^n x - k) \quad (2.48)$$

则上述信号值可以通过下面的递推过程得到

$$\tilde{a}^l = \tilde{L}U\tilde{a}^{l-1} + \tilde{H}U\tilde{b}^{l-1}, l = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.49)$$

其中 \tilde{a}^l 和 $\tilde{b}^l, l = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ 是根据第二、第三步得到的修正系数。

2.3.4 小波分析的特点

- 1) **灵活性** 由于小波基函数 $\phi(x)$ 不是唯一的,只需要满足构造小波函数的条件即可,因而就有许多构造小波的方法。不同的小波函数有不同的特性,可以用来逼近不同的信号以便得到最佳结果。而傅里叶变换只用正弦信号逼近任意信号,没有选择的余地,逼近效果不能理想化。
- 2) **快速性** 由于有了多分辨率分析,可以提高小波分析的效率。通过尺度函数和两尺度关系推导小波系数,在未知小波函数的解析表达式情况下也可以得到分析的结果。并且在频带细分下可以起到显微镜的作用,这是傅里叶分析无法比拟的。
- 3) **双域性** 小波分析是时频分析,可以时域和频域同时揭示信号的特征。而傅里叶变换只能在单域中显示信号特性。
- 4) **深刻性** 小波理论是建立实变函数、复变函数、泛函分析、调和分析等近代数学理论基础上的,具有深刻的理论基础。

2.3.5 常见的可离散小波

db 小波的全称是 Daubechies 小波。Daubechies 小波是由世界著名的数学家 Ingrid Daubechies 构造的小波函数,我们一般简写成 dbN,N 是小波的阶数。小波函数 $\psi(t)$ 和尺度函数 $\phi(t)$ 中的支撑区为 $2N-1$, $\psi(t)$ 的消失矩为 N。dbN 小波具有较好的正则性,即该小波作为稀疏基所引入的光滑误差不容易被察觉,

使得信号重构过程比较光滑。 db_N 小波的特点是随着阶次(序列 N)的增大消失矩阶数越大, 其中消失矩越高光滑性就越好, 频域的局部化能力就越强, 频带的划分效果越好, 但是会使时域紧支撑性减弱, 同时计算量大大增加, 实时性变差。另外, 除 $N=1$ 外, db_N 小波不具有对称性(即非线性相位), 即在对信号进行分析和重构时会产生一定的相位失真。 db_N 没有明确的表达式(除了 $N=1$ 外, $N=1$ 时即为 Haar 小波)。

symlet 小波函数是 Ingrid Daubechies 提出的近似对称的小波函数, 它是对 db 函数的一种改进。Symlet 小波系通常表示为 sym_N ($N=2,3,\cdots,8$)。 sym_N 小波的支撑范围为 $2N-1$, 消失矩为 N , 同时也具备较好的正则性。该小波与 db_N 小波相比, 在连续性、支集长度、滤波器长度等方面与 db_N 小波一致, 但 sym_N 小波具有更好的对称性, 即一定程度上能够减少对信号进行分析和重构时的相位失真。

coiflet 小波是根据 R.Coifman 的要求, 由 Daubechies 构造的, 它具有 coif_N ($N=1,2,3,4,5$) 这一系列。Coiflet 的小波函数 $\psi(t)$ 的 $2N$ 阶矩为零, 尺度函数 $\phi(t)$ 的 $2N-1$ 阶矩为零。 $\psi(t)$ 和 $\phi(t)$ 的支撑长度为 $6N-1$ 。Coiflet 的 $\psi(t)$ 和 $\phi(t)$ 具有比 db_N 更好的对称性。

dmey 小波全称是 discrete meyer 小波, 也就是离散 meyer 小波。meyer 小波由法国数学家 Yves Meyer 于 1990 年提出。

2.3.6 离散小波之间的比较

在不同的应用领域, 小波基的选取标准不同, 一般的选择原则如下:

(1) 正交性。正交性源于数学分析的简单和工程应用中便于理解操作, 表现为小波基的可微性。

(2) 紧支性。紧支集保证有优良的时频局部特性, 也利于算法的实现。若小波函数 $\psi(t)$ 有紧支集, 则称小波基函数是紧支的。紧支集小波满足空间局部性的要求, 特别在为了得到有限长度的滤波器组 $h(n), g(n)$; 避免滤波过程中的截断误差, 要求小波基为紧支的。

(3) 对称性。对称小波基具有线性相位特性, 对图像边缘作对称边界扩展时, 重构图像边缘部分失真较小, 有利于复杂特性的分析。对称和反对称的尺度函数和小波函数是非常重要的, 因为可以构造紧支的正则小波基, 而且具有线性相位。Daubechies 已经证明, 除了 Haar 小波基, 不存在对称的紧支正交小波基。而对于双正交小波基, 可以合成具有对称或反对称的紧支小波基。

(4) 正则性。正则性是函数光滑程度的一种描述, 函数频域能量的一种度量。正则性越高, 小波分析效果越好。

(5) 消失矩问题。为了提高衰减程度, 要求所用的基函数具有一定的消失矩。消失矩的阶数越大, 精细尺度下高频部分数据值就越有可能存在许多小至可以忽略的点。下表2.3所示的是所有的可以进行离散小波变换的小波比较^[25]。基本

表 2.3 可离散变换的小波函数比较

小波名称	正交性	双正交性	紧支撑性	支撑长度
db	是	是	是	2N-1
sym	是	是	是	2N-1
dmeay	是	是	是	有限长度
coif	是	是	是	6N-1

小波名称	滤波器长度	对称性	小波函数消失矩阶数	尺度函数消失矩阵数
db	2N	对称	N	-
sym	2N	近似对称	N	-
dmeay	[-8,8]	对称	-	-
coif	6N	近似对称	2N	2N-1

小波类型的选择较难总结成一般原则, 只能针对具体问题提出具体原则。例如对于分段多项式结构组成的信号, db 小波比较适用; 如果信号含正弦分量或高频振荡, 则局部三角函数基比较合适。如何根据分析信号的特点, 结合任务来优化设计小波函数一直是值得探讨的问题, 迄今为止还没有系统完整的总结。且对于一些特定的离散问题, 还可以通过利用多分辨率分析的方法自己构造离散的尺度函数和 小波函数。

2.4 高斯曲线拟合

2.4.1 高斯函数

高斯函数的应用范围很广, 在自然科学、社会科学、数学以及工程学等领域都能看到它的身影。高斯函数的形式为:

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{c^2}} \quad (2.50)$$

其中 a, b, c 为实常数, 且 $a > 0$ 。

$c^2 = 2$ 的高斯函数是傅里叶变换的特征函数。这就意味着高斯函数的傅里叶变换不仅仅是另一个高斯函数，而且是进行傅里叶变换的函数的标量倍。高斯函数的不定积分是误差函数。在自然科学、社会科学、数学以及工程学等领域都有高斯函数的身影，比如在统计学与机率论中，高斯函数是正态分布的密度函数，根据中心极限定理，它是复杂总和的有限几率分布。

2.4.2 离子电流拟合原理和方法

Saitzkoff^[6] 在缸内气体完全燃烧并且达到热化学平衡情况下推导了火焰后期的离子电流的理论公式。

$$\frac{I}{I_m} = \frac{1}{\frac{p}{p_m}}^{1/2 - \frac{3}{4}\frac{\gamma-1}{\gamma}} e^{-\frac{E_i}{2\kappa T_m} \left[\frac{1}{(\frac{p}{p_m})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} - 1 \right]} \quad (2.51)$$

其中各物理量含义如下所示

I	离子电流
I_m	离子电流最大值
p	缸压
p_m	缸压最大值
T_m	最大温度
γ	热力学系数
κ	波尔兹曼常数
E_i	离子电流能量

该公式与高斯函数相近。所以整个离子电流的计算公式可以写成

$$I(\theta) = f(\theta) + \alpha_1 e^{-\frac{1}{\alpha_2}(\theta-\alpha_3)^2} \quad (2.52)$$

其中 $f(\theta)$ 是火焰前锋期的模型。为了简化整个模型的计算，我们可以将火焰前锋期的模型也有高斯函数替代。于是整个离子电流的计算公式写成

$$I(\theta) = \alpha_1 e^{-\frac{1}{\alpha_2}(\theta-\alpha_3)^2} + \beta_1 e^{-\frac{1}{\beta_2}(\theta-\beta_3)^2} \quad (2.53)$$

L.Eriksson 和 L.Nielsen^[20,26,27] 采用该方法能够准确地估计缸压最值对应相位，从而可以自适应调整点火提前角，提高了发动机的燃烧效率。

2.4.3 拟合方法优劣的评判标准

来自马里兰大学的 T. C. O'Haver 给出了曲线拟合的方法^[28] 能够有效的对数据进行拟合。根据拟合公式2.52和2.53可以知道,我们可以用两个高斯函数来对小波分析处理后的离子电流信号曲线进行拟合,从而得到离子电流的关键特征参数。采集到的离子电流曲线有很多杂乱信号,而且整个信号也有部分波动,有较多的峰值。只有通过函数拟合的方式,才能够较好的获得离子电流特征参数。

拟合方法优劣的评判标准主要是误差分析。一个是绝对误差分析,也就是拟合曲线和真实曲线之间的绝对误差

$$err_{abs} = \min(|sim - real|); \quad (2.54)$$

另一个是相对误差

$$err_{rel} = \frac{(sim - real)^2}{\max(real)} \quad (2.55)$$

误差越小说明方法越是精确。除此之外,拟合曲线应该包含原有曲线的部分特征,比如特征点的相位对应等。

第3章 电容式离子电流检测电路实验台架

3.1 实验台架

本实验台架由发动机,发动机支架,发动机附加和其他测试设备组成。其台架系统示意图如3.1图所示。其中发动机是搭载于长安睿骋 1.8T 的涡轮增压多

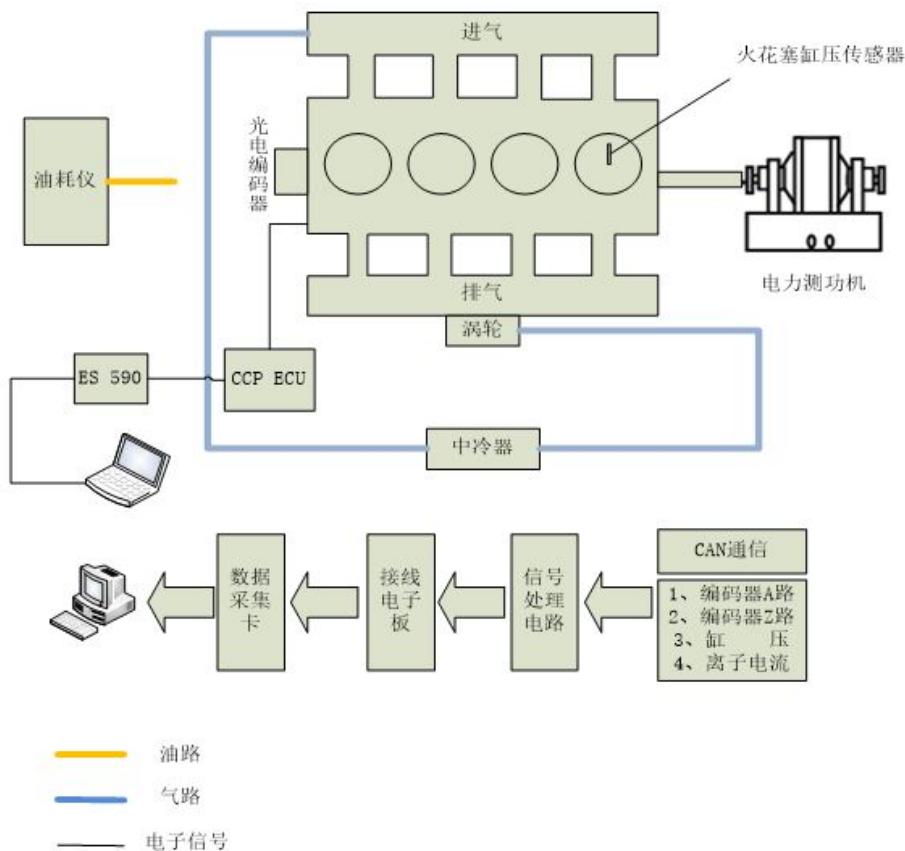


图 3.1 台架系统示意图

点进气道喷射发动机, 电力测功机为南丰测功机, 油耗仪为 AVL 油耗仪, 通过 Kistler 火花塞式缸压传感器来测量缸压, 用光电编码器 来同步信号并确定曲轴上止点位置。通过改造普通的点火线圈将二级线圈高压点和接地点接入离子电流采集电路中来采集离子电流信号。其实物图如图3.2所示。

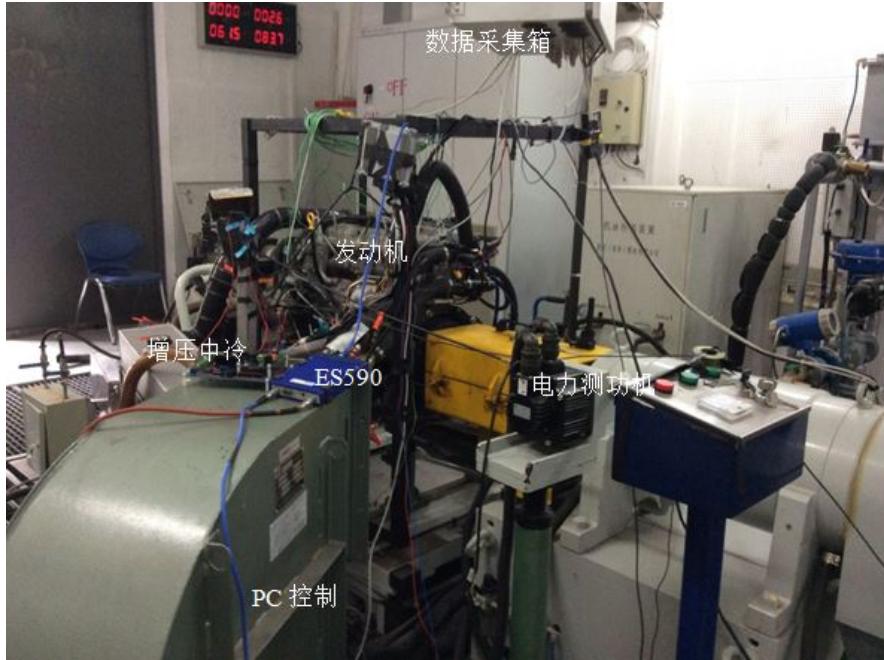


图 3.2 台架系统实物图

3.1.1 发动机

发动机为搭载于长安睿骋 1.8T 上的涡轮增压 PFI 发动机, 其实物图如3.3所示, 其具体参数如表3.1所示。其 ECU 为联合汽车电子有限公司提供的基于 ME788 控制系统的 ECU, 实物图如图3.4所示。



图 3.3 ECU 实物图



图 3.4 发动机实物图

通过 INCA 等软件将该 ECU 的数据显示并保存出来, 用 MDA 对保存的数据进行简单的数据分析。

表 3.1 发动机具体参数

发动机类型	4 冲程 PFI 涡轮增压发动机
排量 (cc)	1798
最大功率 (kW)	130
最大扭矩 (Nm)	230
缸径 (mm)	86
行程 (mm)	77.4

3.1.2 发动机支架

发动机支架主要由发动机安装活动平台和可调螺旋支架两部分组成。该发动机安装活动平台由框架、耐磨导轨、高精度定位装置、导向装置、锁紧机构、耐磨承重车轮及集污盘等组成, 实物见图3.5。该活动安装平台通过高精度定位销来保证平台的横向和纵向距离, 保证了固定在该活动平台上的发动机可以和测功机的飞轮衔接处的精度, 同时提高了该活动平台的复用性, 从而有效地减少了发动机安装和调试所占用的时间。发动机支架由转接工装、ZJ 系列可调支架、横梁等组成, 可满足 30 至 800KW 发动机的支撑要求。同时, 此活动平台有很高的兼容性, 对于多种发动机都适用, 可以实现发动机的三位调整。



图 3.5 发动机安装活动平台



图 3.6 可调螺旋支架

可调螺旋支架由活动的减震杆和 T 型底座两部分组成, 实物见图3.6两个部分之间通过螺纹孔连接。T 型底座可以在发动机安装活动平台的耐磨导轨上沿小车纵向运动, 通过两个螺栓可以固定其横向位置。减震杆采用较为柔软的金属制作而成, 且通常在安装过程中在其上垫入一些金属片提高减震效果。减震杆顶部有螺纹孔, 方便发动机支架与之固定。

基于以上的两种基本结构, 设计了改款发动机的支架结构。选择发动机气缸体上表面作为测量基准水平平面, 选择飞轮端平面为基准垂直面, 利用水平尺、

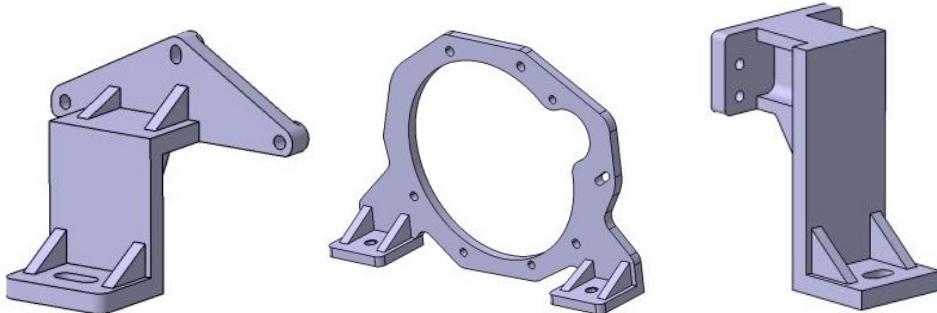


图 3.7 发动机支架部件图

直角尺和游标卡尺等量具测量固定发动机的螺栓孔与基准面间的空间距离。使用 CATIA 三维机械设计软件搭建了发动机支架的三维模型，并将其装配到虚拟发动机模型上。飞轮端支架采用龙门式结构，足够承受径向和轴系的交变载荷；通过焊接加强肋与安装固定销的方式，保证在正时链条端的两个支架结构紧凑，同时充分考虑扰度和抗变形能力。经过反复测量并制作放样模型修正支架参数，完成支架设计。整体支架焊接采用拼接工艺，每个部件均使用销定位直角面，并加工卡槽阶梯面减少支架在焊接后产生的形变。如图3.7所示。

3.1.3 测功机

交流电力测功机是目前市场上最先进的动力加载测试设备，其可兼顾各动力机械低速及高速的加载测功实验，在性能、可靠性及维护难易程度等方面都有比较明显的优势。本次实验采用的交流电力测功机系统来自凯迈(洛阳)机电有限公司，该测功机系统基于先进变频技术平台开发，其具有低惯性、高精度、高稳定性、结构简单、维护方便、自成系列并适用于操作控制自动化等优点。如图3.8是测功机安装布线的示意图。

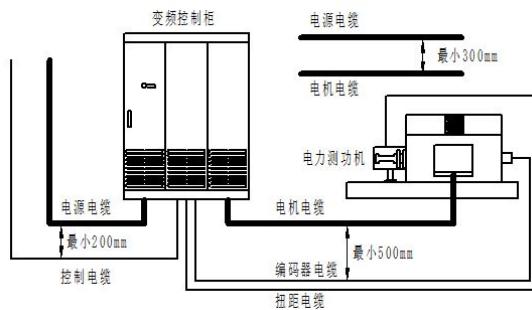


图 3.8 DCW 系列交流电力测功机系统安装布线示意图

该交流电力测功机主要由一台三相异步交流电机(含高精度转速编码器、精密扭矩法兰)、一套可四象限运行的交流调速柜、控制系统、采集系统组成。交流变频调速柜分为整流单元和逆变单元两部分组成。整流单元的可控硅将用户输入的380V交流电转换为内部之流点,该直流电再逆变为电压及频率可变的交流电输出到三相异步电机。



图 3.9 测功机控制界面

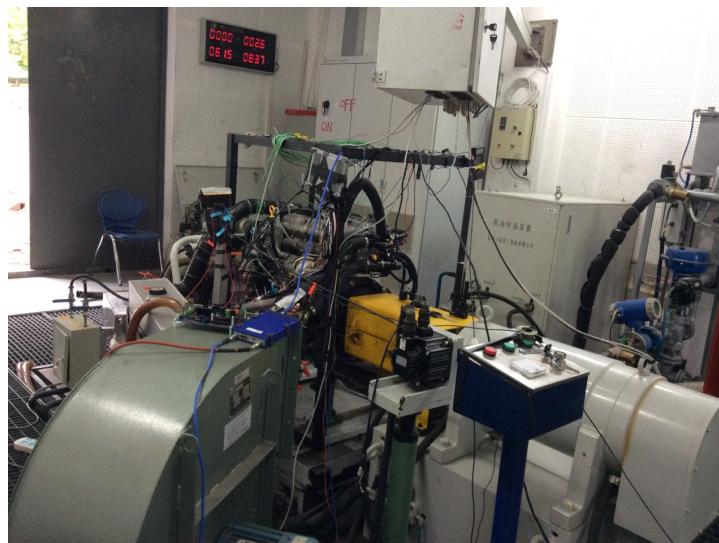


图 3.10 电力测功机实物图

测功机的实物图如3.10所示,其具体参数如表3.2所示。在拖动状态时,通过调整交流电的频率及电压以改变转速,达到拖动负载的目的;在发电状态时,通

过电机的四象限转换,将电机产生的交流电转变为直流电再经过整流单元转换为符合上网要求的交流电,传到电网,以达到加载转矩的目的。测功机控制界面如图3.9所示,该界面实时显示台架试验过程中转速、水温、扭矩等状态参数,并具有急停功能。

表 3.2 电力测功机具体参数

测量参数	测量范围	精度
转速	0 ~ 10000r/min	±1r/min
扭矩	0 ~ 500N·m	±0.4%FS
燃油消耗	0 ~ 100Kg/h	±0.12%FS
环境温度	0 ~ 50°C	±0.5%FS
环境湿度	0 ~ 100%	±2%RH
冷却水进温	0 ~ 150°C	±0.5°C
冷却水出温	0 ~ 150°C	±0.5°C
机油温度	0 ~ 150°C	±0.5°C
燃油温度	0 ~ 150°C	±0.5°C
中冷前温度	0 ~ 150°C	±0.5°C
中冷后温度	0 ~ 250°C	±0.5°C
排气温度	0 ~ 150°C	±0.5°C
机油压力	0 ~ 1000KPa	±0.5%FS
燃油压力	0 ~ 1000KPa	±0.5%FS
进水压力	0 ~ 600KPa	±0.5%FS
出水压力	0 ~ 600KPa	±0.5%FS
曲轴箱压力	-20 ~ 20KPa	±0.25%FS
排气背压	0 ~ 50KPa	±0.5%FS
中冷前压力	0 ~ 300KPa	±0.5%FS
中冷后压力	0 ~ 300KPa	±0.5%FS
大气压力	80 ~ 110KPa	±0.25%FS

3.1.4 发动机附件

发动机附件包括增压中冷系统、冷却系统、进排气系统等。

增压中冷系统

增压中冷系统由中冷器、进气、出气、进水、出水、增压压力温度传感器等部分组成,实物图如图3.11所示。



图 3.11 发动机增压中冷系统

冷却系统

冷却系统分为水冷和风冷两部分，水冷由外接的冷却循环系统构成，如图3.12所示。风冷则主要是使用大功率的风机吹排气管，实现快速降温，使温度在需要范围之内，如图3.13所示。

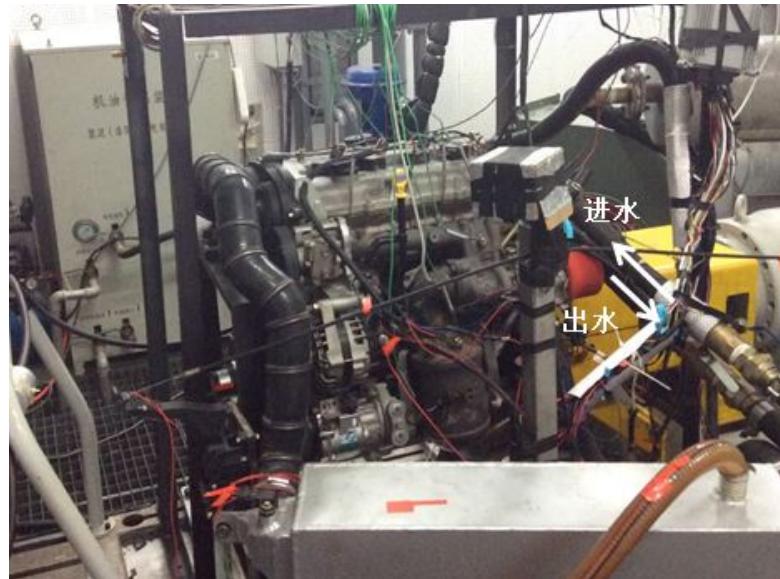


图 3.12 发动机外接水冷系统

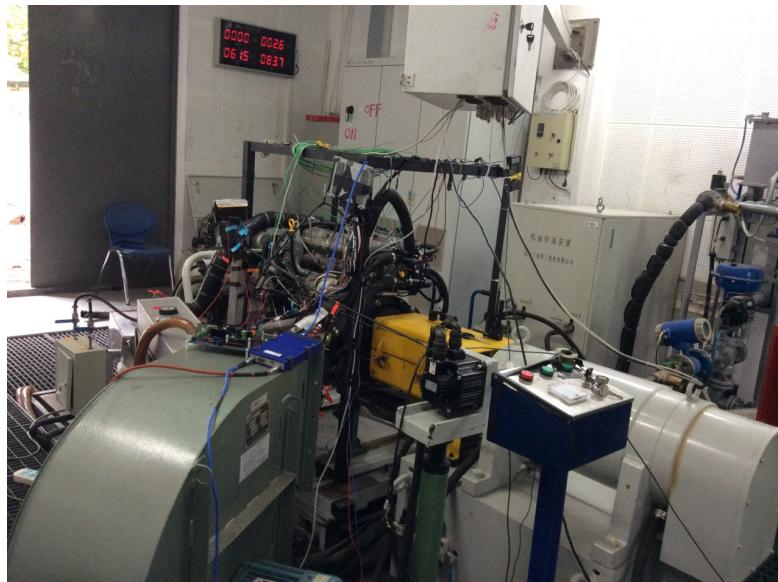


图 3.13 发动机外接风冷系统

进排气系统

进气系统由自制空气滤清器和原机进气管组成, 排气系统由原机排气歧管、排气管加上自制一段排气管通往实验室排气系统中, 其中, 排气管上装有排气温度传感器, 排气系统如图3.14所示。



图 3.14 发动机进排气系统

3.2 实验设备及器材

3.2.1 缸压传感器

缸压传感器采用的是 KISTLER 提供的 6118B 型火花塞缸压传感器, 具有完整的 3mm 缸压传感器和可换电缆, 无需另外打孔即可实现缸压的测量。

表 3.3 缸压传感器具体参数

物理量	单位	数值
重量	g	50
压力范围	bar	0 ~ 200
标定区间 (在 200°C)	bar	0 ~ 150
过载	bar	250
灵敏度 (200°C)	pC/bar	≈ 10
固有频率	kHz	> 100
室温线性度	%FSO	≤ ± 0.5
加速的灵敏度(轴向和径向)	bar/g	< 0.005
传感器工作温度范围	°C	-20 ~ 350
电缆工作温度范围	°C	-20 ~ 200
灵敏度变化 (200 ± 50°C)	%	≤ ± 1
短期飘移 Δp	bar	≤ ± 0.6
Δp_{min}	%	≤ ± 3
Δp_{max}	%	≤ ± 1.5
20°C 时传感器绝缘阻抗	Ω	> 1013
200°C 时传感器绝缘阻抗	Ω	> 1011
火花塞阻抗 (1000V, 室温下)	Ω	> 100
绝缘强度	kV	< 35
传感器电容	pF/m	110

它装有世界上最小的压电式高温缸压传感器。安装时, 前端与燃烧室内部平齐, 固有频率高于 100kHz。因此, 也可用于高速发动机和爆震控制测试。其实物图和技术参数见图3.15和表3.3。其还配备了装有数字式双通道电荷放大器模块的信号调理平台, 信号放大范围为 ±100 ~ 10000pc/V, 通过将放大后的气缸压力信号传给工控机采集卡记录缸内燃烧压力数据。

这种电荷放大器可以用于实验室通过压电测力仪测量力和扭矩。通过负载作用在压电传感器上产生一个正比例变化的电荷。这个电荷信号放大器转换成比例的输出电压。电荷放大器的实物图如图3.16所示。

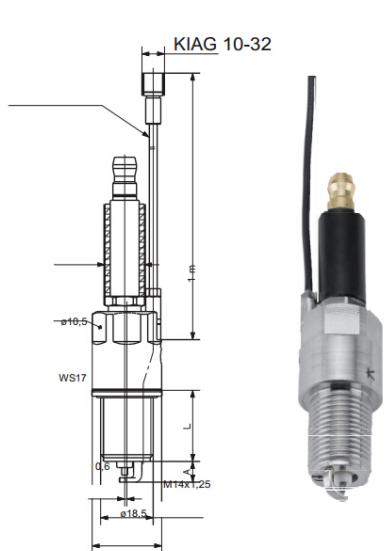


图 3.15 火花塞式缸压传感器



图 3.16 缸压传感器电荷放大器

3.2.2 光电编码器

发动机正时链条侧曲轴端安装 HGAIN 公司的 F5809 型增量式光电编码器，曲轴信号测量范围 720 pulse/r，测量精度 $0.5^{\circ}CA$ ，如图3.17所示。该编码器内部采用 ASIC 器件，具有寿命长，可靠性高，信号分辨率高，抗干扰能力较强，信号传输距离较长等优点，为采集卡提供采样中断保证。其 A 路与 Z 路信号用于高速采集系统触发源以及作为后期数据处理的曲轴时刻参考依据。



图 3.17 光电编码器

3.2.3 采集卡

数据采集系统是用来实时采样及保存发动机运行过程中各瞬态参数的。本试验采用 NI 公司出品的 PCI 6250 高速采集卡, 其具备 16 路模拟信号输入, 16 位转换精度, 多通道采样频率 1MHz, 单通道模式下 1.25MHz, 最大采集幅值范围为 $\pm 10V$ 等强大功能。

研究爆震工况下的离子电流特性需要采集的参数分为两大类: 第一类是反映气缸内部燃烧状态及排放的信号, 如缸内燃烧压力信号、离子电流信号及用于判断曲轴相位的 A 路和 Z 路信号等; 二是发动机 ECU 通过 CAN 总线发送出来的运行状态参数信号, 如发动机转速、发动机负荷、爆震积分值、进气温度、进气压力、冷却水温度以及机油压力等等。该采集卡能够满足以上两类需求。采集卡实物图如图3.18所示, 吊在空中是为了隔离干扰。

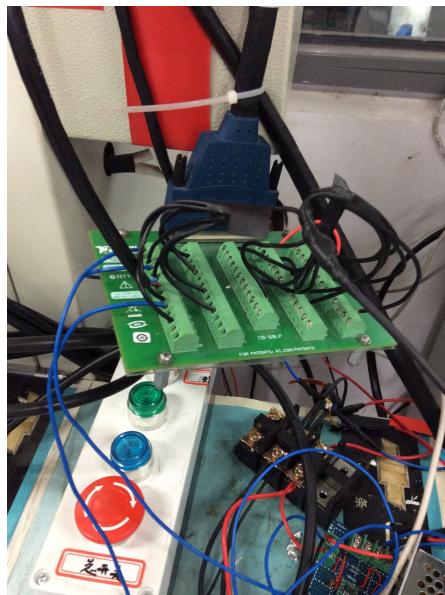


图 3.18 NI 公司提供的采集卡

3.2.4 采集程序

采集程序是由 Labview 所编写, 主要分为手动采集和触发采集两种类型, 可通过记录模式进行切换。其中手动采集模式通过点击“开始”进行数据采集, 而触发采集可以设置触发条件, 本文设置的是缸压值 $>$ 阈值, 采集程序会将超过该阈值的前后一段时间的数据采集下来, 图3.19是采集程序的界面。

该采集程序主要由定时设置, 采集卡记录设置, CAN 监控, 数据实时显示和

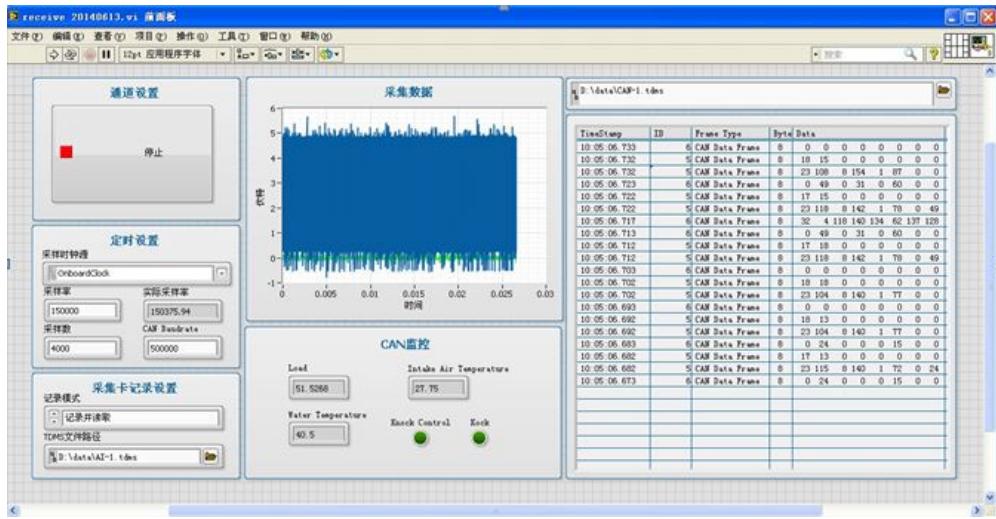


图 3.19 采集程序界面

通道开关几个部分组成。定时设置可以设置采样时钟、采样数、采样率等关键参数；采集卡记录设置可以设置文件保存的路径，CAN 监控可以实时监测采集过程是否有异常，同时也可以通过数据实时显示监控面板来查看数据采集过程是否有异常。

第4章 离子电流干扰去除分析方法

4.1 电容式离子电流检测电路的局限性

如下图所示的是 1250r/min, 2000r/min, 3000r/min 下在 30%, 40%, 50% 时的缸压和离子电流曲线。

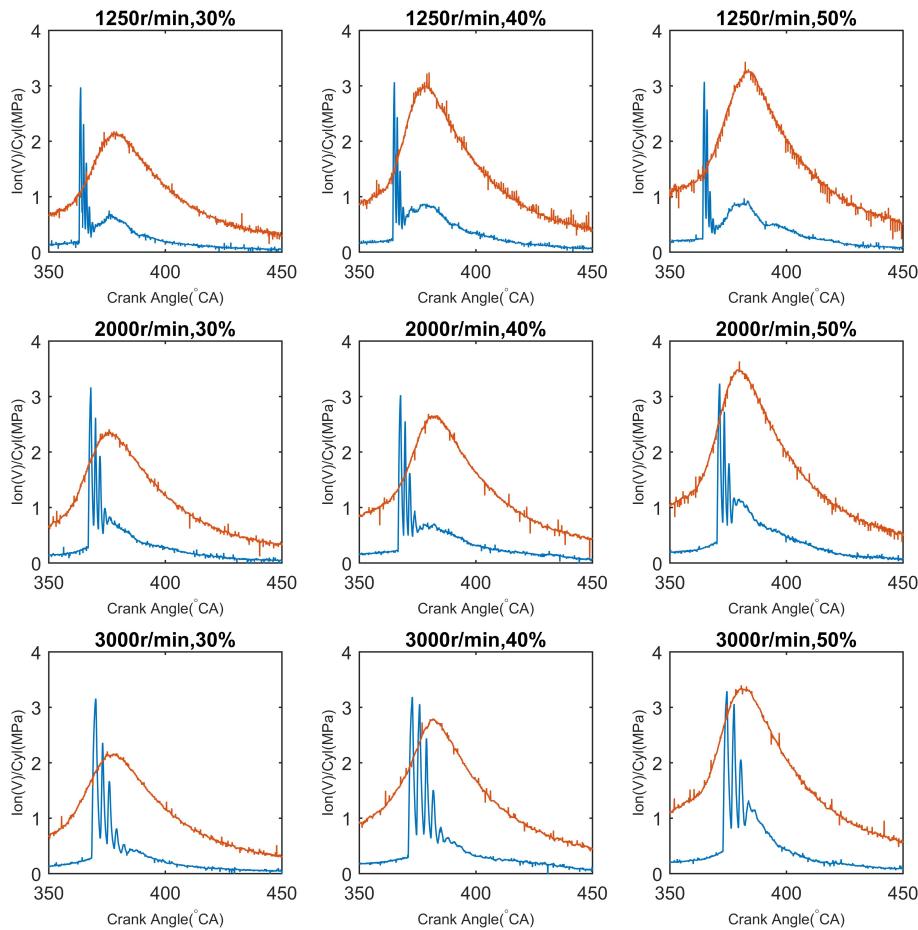


图 4.1 不同转速、不同负荷下的缸压和离子电流

从图4.1中可以看到从上到下看是同一负荷下，随着转速增加的离子电流曲线；从左向右是同一转速下，随着负荷增大的离子电流曲线。随着转速的增加，火焰后期的离子电流是逐渐被淹没的。也就是说点火干扰期将离子电流的性质淹

没了,无法获得离子电流的特征值。

4.1.1 点火放电干扰的来源和性质

由于点火干扰期将离子电流的性质淹没,因此我们需要了解点火放电干扰的来源及其稳定的性质。如图4.2所示,通过检测次级电压来和离子电流进行对比可以发现,次级电压 点火放电过程的放电干扰期和离子电流的点火干扰期重合。

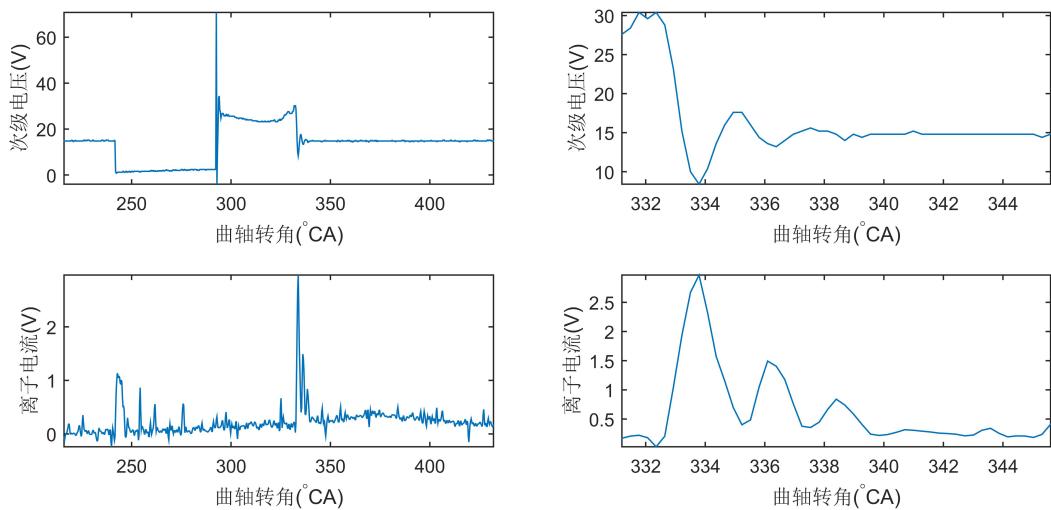


图 4.2 次级电压和离子电流对比

我们将重叠的部分进行放大,可以看到两者的频率也是相同的。经过计算可以得到该放电周期为 $0.12ms$,时长为 $1ms$ 。由以上两张图的分析结果可以知道,离子电流的点火干扰期是由次级线圈的点火放电信号导致的,会产生一个特定频率的震荡信号。我们将不同转速下的离子电流 曲线放在一起比较,可以看到如图4.3所示的图形。

左列的三张图从上到下为随着转速增加,离子电流按照曲轴转角进行对比,曲轴转角窗口长度为 100 度,可以发现点火震荡信号在不断淹没火焰前锋期和火焰后期。右列的三张图从上到下为随着转速增加,离子电流按时间进行对比,时间窗口长度为 5 毫秒时间,可以发现震荡信号的频率和长度不变。左右两列曲线分别对应了该工况下的同一个循环,由此可以知道该震荡信号具有稳定的时间长度,稳定的频率特性。

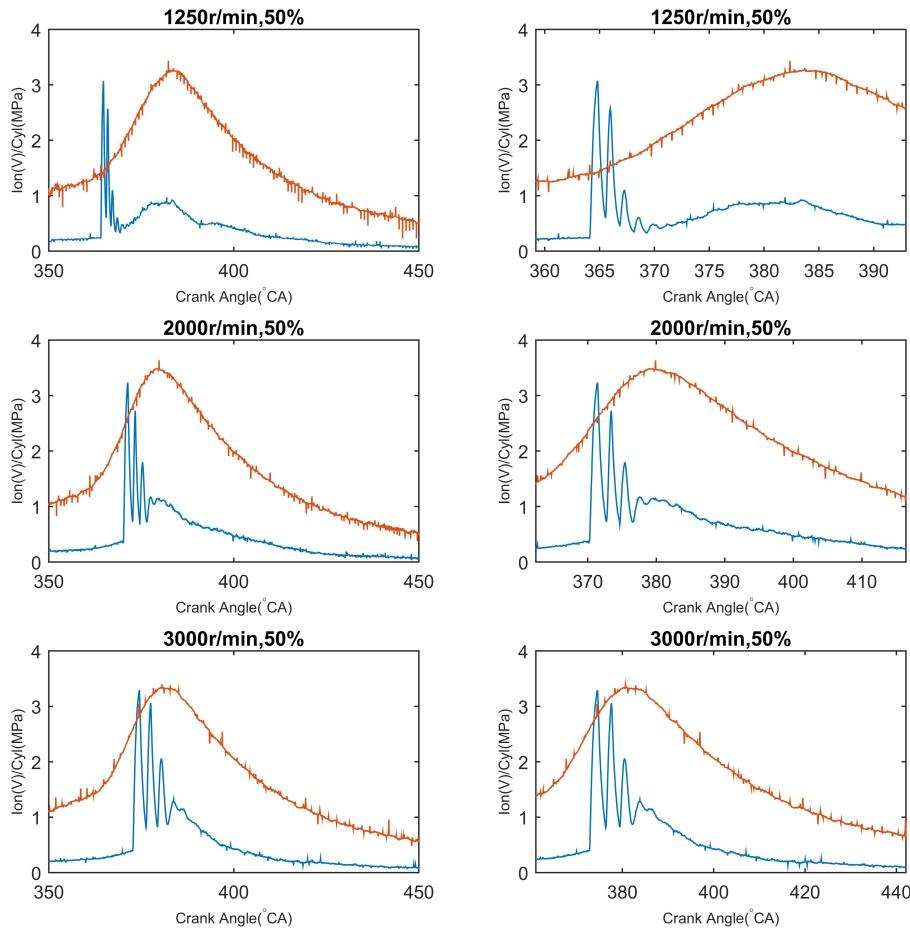


图 4.3 不同转速下的离子电流按曲轴转角对比和按时间对比

4.1.2 断油情况下的点火干扰分析

当发动机断油情况下,点火线圈仍然进行点火过程,但是缸内由于没有燃气,无法形成化学电离过程的离子电流信号,所以断油情况下的点火干扰具有稳定而且清晰的特征。如图4.4所示是一个断油情况下的电容式检测电路检测到的电压曲线。

从图中可以看到缸压曲线峰值相位在上止点 360 度位置,说明该循环处于纯压缩循环。可以看到此时的离子电流信号的峰值位置也是上止点位置,此时的离子电流信号是热电离导致的,没有化学电离产生的离子电流信号。

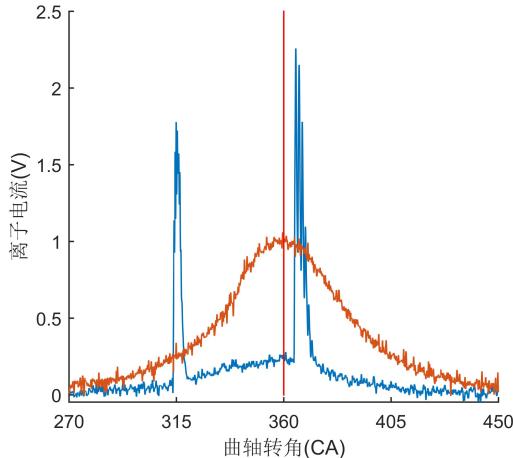


图 4.4 断油情况下的电压信号

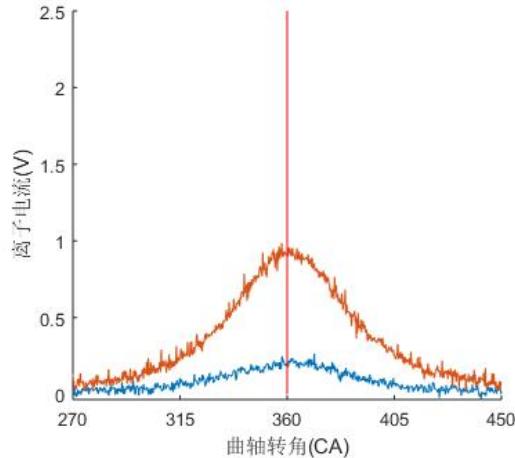


图 4.5 断火情况下的电压信号

4.1.3 断火情况下的离子电流分析

当发动机断火情况下,点火线圈不进行点火过程,导致缸内混合气不能进行燃烧过程,无法形成化学电离过程的离子电流信号如图4.5所示是一个断火情况下的电容式检测电路检测到的电压信号。

从图4.5中可以看到缸压曲线峰值相位在上止点 360 度位置,说明该循环处于纯压缩循环。可以看到此时的离子电流信号的峰值相位也是上止点位置,此时的离子电流信号是热电离导致的,没有化学电离产生的离子电流信号。

4.1.4 纯点火干扰的分析方法

对比图4.4和图4.5,可以看到无论断油还是断火,都会导致缸内的混合气体无法燃烧,不能够产生化学电离,两者的循环都是纯压缩循环。同时热电离曲线的形状和峰值大小都类似。所以可以将同一转速和负荷下的离子电流信号相减,即可得到近似的纯点火干扰信号。如图4.6所示可以得到近似的纯点火干扰信号。可以看到两者的缸压曲线也是近似的,说明在同一个工况下的断油和断火循环,造成的缸内情况是类似的,因此两者相减得到的离子电流信号在一定程度上是可以表征纯电火干扰信号的。

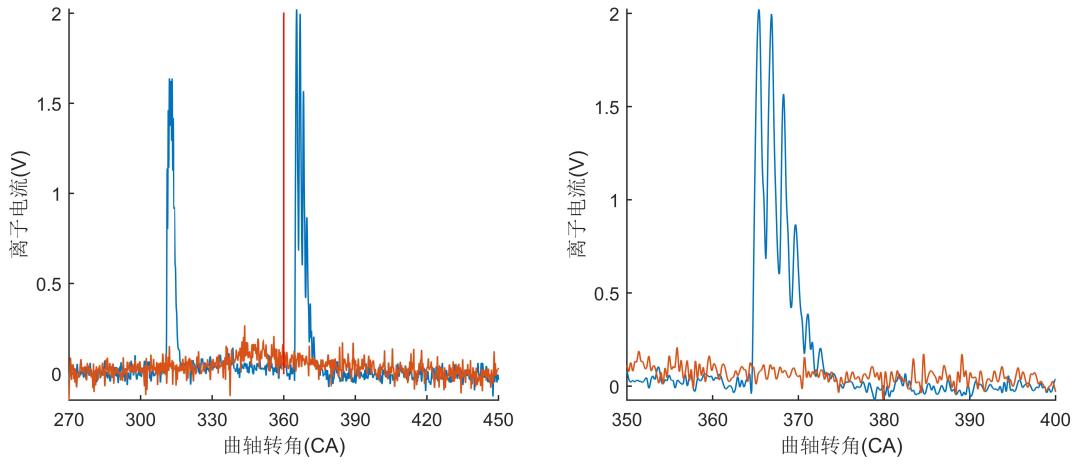


图 4.6 断油离子电流信号与断火离子电流信号差值

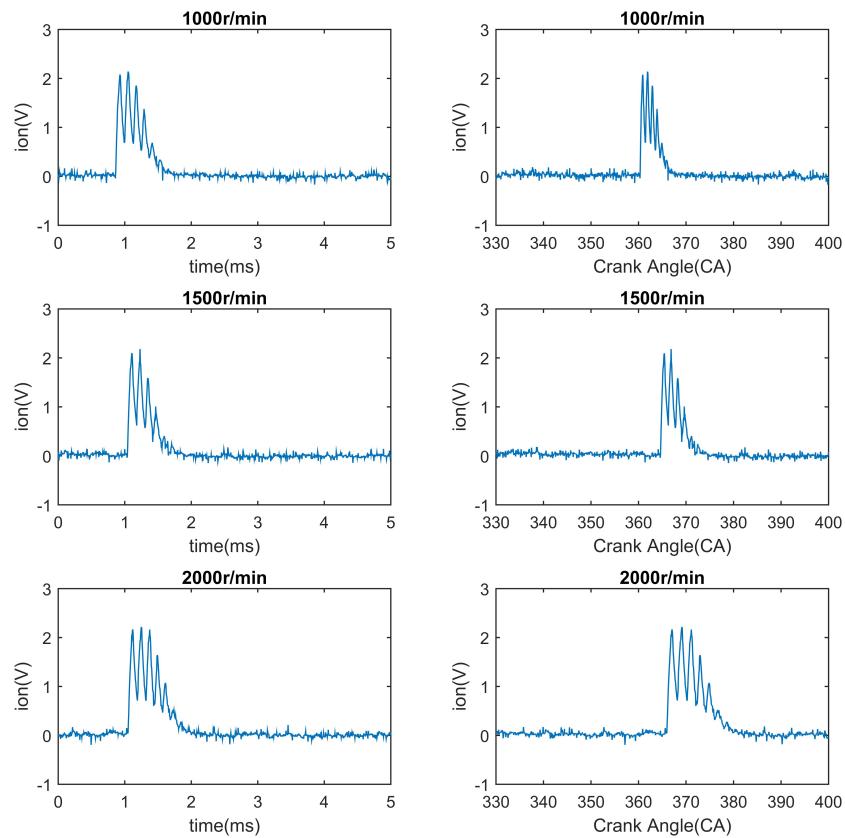


图 4.7 三种转速下的纯点火干扰的时间窗口对比和曲轴转角窗口对比

为了验证该信号的偶然性, 我们选取了 $1250\text{r}/\text{min}$, $1500\text{r}/\text{min}$, $2000\text{r}/\text{min}$

三种转速下 50% 负荷情况下的同一次实验中同时进行断油和断火操作, 得到三个纯点火干扰信号。从图4.7中可以看到纯点火干扰在时间窗口上具有很相近的形状, 但是仍然有细节上的差异, 如果用正常信号直接减去该纯点火干扰信号并不能非常完美的呈现出离子电流信号。有必要通过其他的信号分析手段来将该点火干扰信号剔除。

4.2 四种小波基函数对点火干扰进行小波分析

小波分析的方法可以很好的将高频信号和低频信号进行分离, 我们采用 db, sym, coif, dmey 四种离散小波基函数对纯电火干扰信号进行分析, 将纯点火干扰信号中的震荡信号去除。

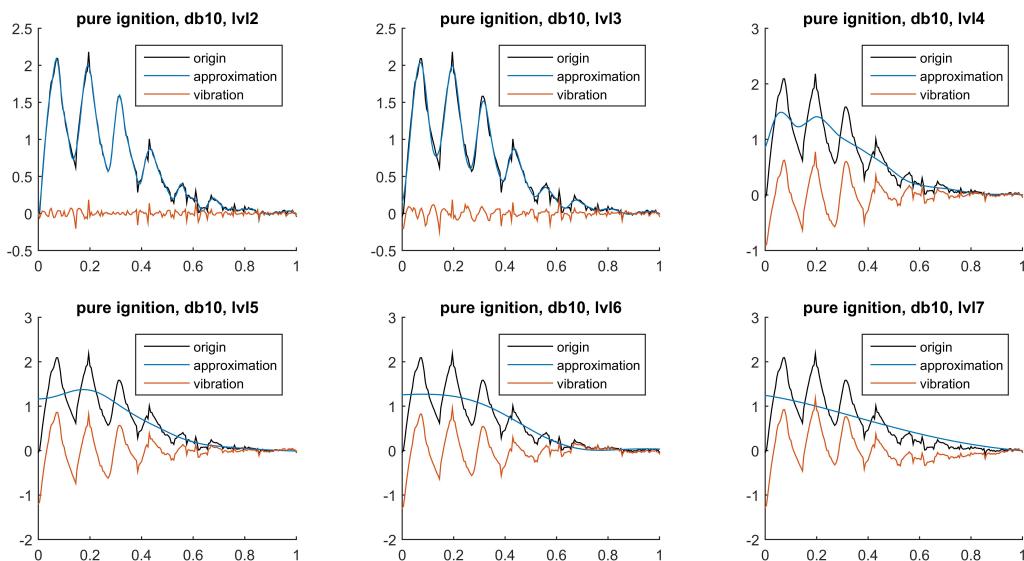


图 4.8 db10 小波对纯点火干扰信号进行 10 层分解

先用 db10 小波对纯点火干扰信号进行 10 层分解, 观察第二层到第七层的分解情况, 如图4.8所示, 可以看到第二层和第三层并没有将震荡信号分解开来, 而第六层和第七层分解出来的平滑信号过于硬直, 且分解的震荡信号不具有很好的衰减特性。而第四层分解相对于第五层分解来说, 效果没有那么理想。所以本文以下的小波分析都是基于第五层分解来进行的。由于 dmey 没有阶数问题, 而 coif 小波 的最高阶数为 5。所以只讨论 db 小波和 sym 小波的阶数问题。

4.2.1 db 小波族的阶数选择和分析

取阶数分别为 5、10、15、20、25 和 30 的 db 小波对纯干扰信号进行分析。从

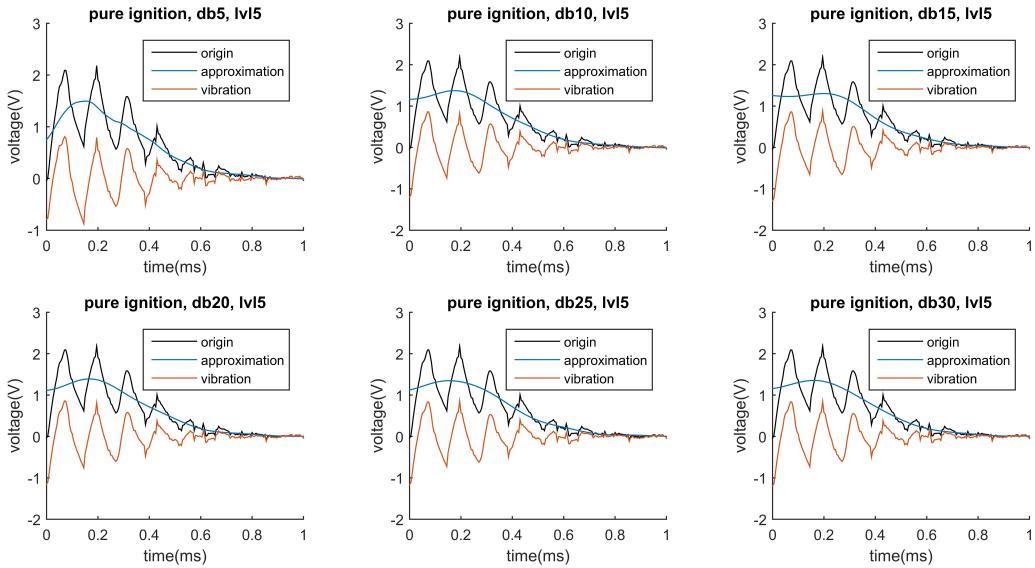


图 4.9 不同阶数下的 db 小波第五层分解

图4.9中可以看到当阶数增加后,小波第五层分解的结果不变,考虑到分解阶数越多计算越加复杂。则取 db20 作为 db 小波分解的小波函数。

4.2.2 sym 小波族的阶数选择和分析

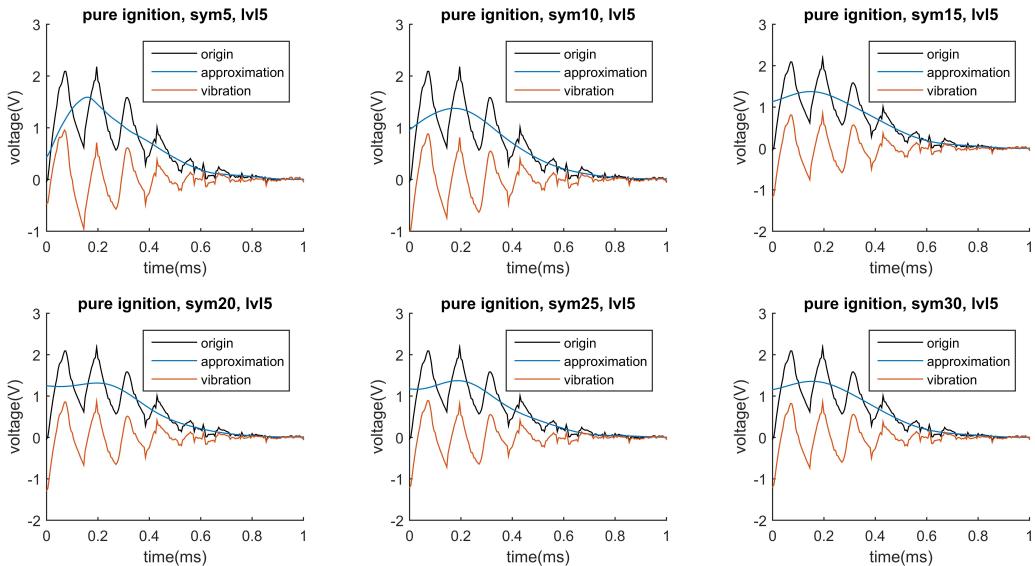


图 4.10 不同阶数下的 sym 小波第五层分解

从图4.10中可以看到当阶数增加到 20 以后, 小波分析第五层分解的结果已经基本不变了, 而且随着阶数的增加, sym 小波分解的时间增加很快。则取 sym20 作为 sym 小波分解的小波函数。

4.2.3 四种小波对去除点火干扰分析的比较

去除点火干扰的方法为用同一个小波基函数对离子电流信号和纯点火干扰信号进行分析, 然后两者做差值得出理想的离子电流信号。

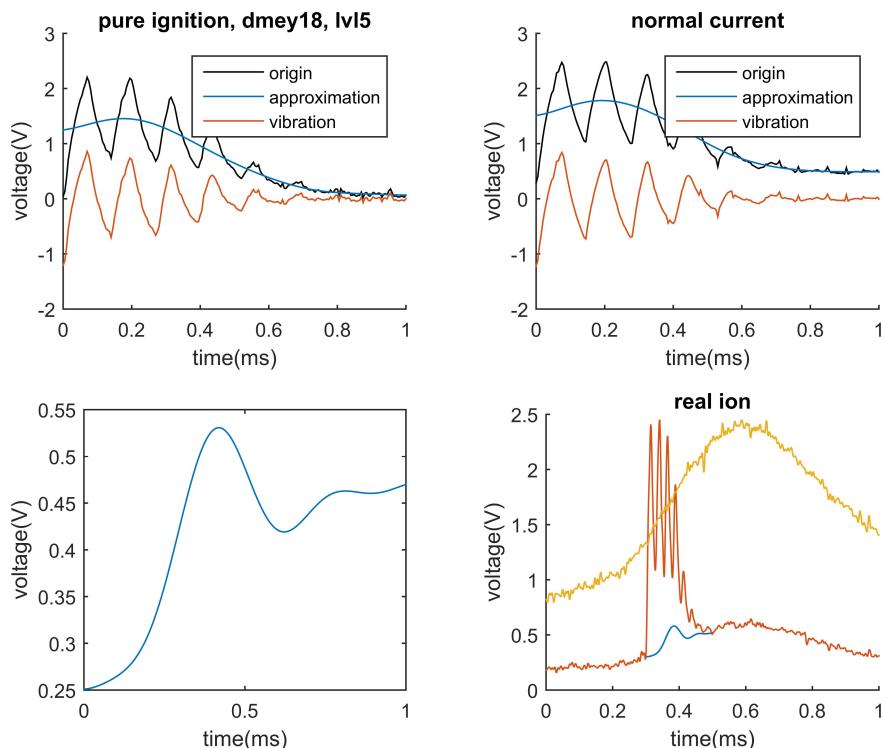


图 4.11 dmey 小波分解的真实离子电流信号

如图4.11所示的用 dmey 小波基函数进行小波分析得到的纯点火干扰、离子电流的分解、真实离子电流以及原信号和提取信号比较图。此时的工况为 $1000r/min$ 、40% 负荷, 在此工况下热电离产生的波峰不会被点火干扰淹没。从图中可以看到提取信号可以很好的和原离子电流的其他信号部分进行衔接。从左下角的差值信号中可以看到, 该信号存在一个凸起的小峰, 此峰即是火焰前锋期造成的离子电流峰, 是火焰锋面从电极一端向另一端扩散过程中化学电离产生的离子电流。

下图4.12所示是四种小波对真实离子电流进行处理后的信号比较。从图中可

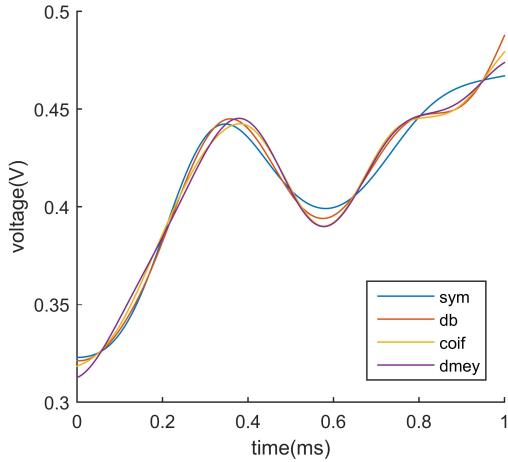


图 4.12 四种小波对真实离子电流进行去干扰处理

以看到曲线的尖锐程度依次为 $dmey > coif > db > sym$, 但是差异不大, 都能够明显的显示出火焰前锋期的形状。

从相位角度来衡量, 四种小波基函数分析结果在关键点的相位上是一样的, 能够确定火焰前锋期的开始和结束相位。在曲线的尾段有不同的曲线效果, 这是不同的小波基函数分析结果的最大不同。

4.3 高斯曲线拟合估计离子电流特征参数

给定在 $1000r/min$ 、 40% 负荷时的经过小波分析去除干扰的离子电流, 经过双高斯曲线拟合方法得到如图所示的曲线。

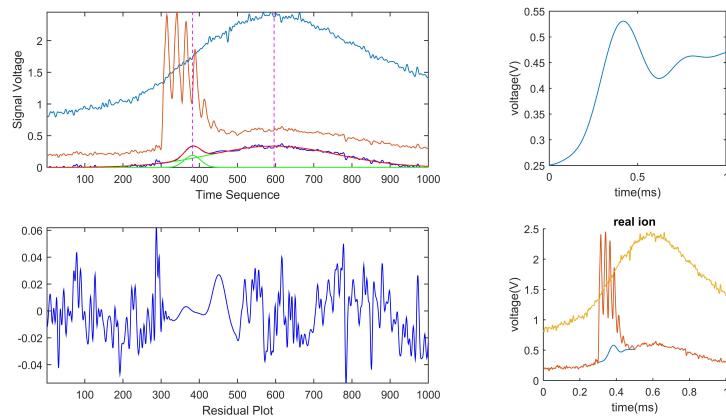


图 4.13 双高斯曲线拟合处理

从图中可以看到, 拟合曲线第一峰对应了离子电流火焰前锋期, 拟合曲线的

第二峰对应了离子电流火焰后期。除此之外，拟合曲线的两峰的相位也能够很好的和离子电流的特征相位对应。经过计算的相对误差率为 4%，且从图中的第二图可以看到绝对误差最大值为 0.05，相比于离子电流大于 2 的信号最大值来说是微不足道的，从而很好的说明了高斯曲线拟合估计离子电流特征参数是一种很有效的手段。

第 5 章 离子电流工况拓展的验证

在上一章中主要探讨的是离子电流未被淹没情况下的离子电流信号分析手段,主要包括小波分析去除干扰,高斯曲线拟合提取离子电流特征参数。这些手段同样也可以用于淹没情况下的离子电流信号处理,且由于淹没情况下的离子电流信号无法直接提取特征参数,利用上述方法对离子电流信号进行处理成为了非常有效的手段。本章就这些方法对离子电流工况拓展的可行性进行验证。

5.1 离子电流淹没情况下对缸压相位的预测

5.1.1 30% 负荷下的缸压相位预测

5.1.2 50% 负荷下的缸压相位预测

5.1.3 80% 负荷下的缸压相位预测

5.2 离子电流淹没情况下对空燃比的预测

5.2.1 30% 负荷下的空燃比预测

5.2.2 50% 负荷下的空燃比预测

5.2.3 80% 负荷下的空燃比预测

参考文献

- [1] 戈锐, 张煜盛. 光纤传感器在发动机燃烧研究中的应用与发展. 车用发动机, 2006, (1):1–5.
- [2] Winch R, Mayes F. A method for identifying preignition. Technical report, SAE Technical Paper, 1953.
- [3] Collings N, Dinsdale S, Eade D. Knock detection by means of the spark plug. Technical report, SAE Technical Paper, 1986.
- [4] Collings N, Dinsdale S, Hands T. Plug fouling investigations on a running engine—an application of a novel multi-purpose diagnostic system based on the spark plug. Technical report, SAE Technical Paper, 1991.
- [5] Collings N, Ma T. Knock detection alternatives for production vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 1985, 199(4):301–307.
- [6] Saitzkoff A, Reinmann R, Berglind T, et al. An ionization equilibrium analysis of the spark plug as an ionization sensor. Technical report, SAE Technical Paper, 1996.
- [7] Schneider D. An experimental study of correlations between ionic current and operating parameters in SI engines. 2000.
- [8] Kessler M. Ionenstromsensorik im Dieselmotor. Fortschritt-Berichte VDI, 2002..
- [9] Franke A, Einewall P, Reinmann R, et al. Analysis of the ionization equilibrium in the post-flame zone. Technical report, SAE Technical Paper, 2003.
- [10] Peron L, Charlet A, Higelin P, et al. Limitations of ionization current sensors and comparison with cylinder pressure sensors. Technical report, SAE Technical Paper, 2000.
- [11] Reinmann R, Saitzkoff A, Mauss F. Local airfuel ratio measurements using the spark plug as an ionization sensor, Technical paper 970856. Society of Automotive Engineers (SAE), 1997..
- [12] Balles E N, VanDyne E A, Wahl A M, et al. In-cylinder air/fuel ratio approximation using spark gap ionization sensing. Technical report, SAE Technical Paper, 1998.
- [13] Zhu G G, Daniels C F, Winkelman J. MBT timing detection and its closed-loop control using in-cylinder pressure signal. Technical report, SAE Technical Paper, 2003.
- [14] Förster J, Günther A, Ketterer M, et al. Ion current sensing for spark ignition engines. Technical report, SAE Technical Paper, 1999.
- [15] Malaczynski G W, Baker M E. Real-time digital signal processing of ionization current for engine diagnostic and control. Technical report, SAE Technical Paper, 2003.
- [16] Panousakis D, Gazis A, Paterson J, et al. Ion current signal interpretation via artificial neural networks for gasoline HCCI control. Technical report, SAE Technical Paper, 2006.
- [17] Glavmo M, Spadafora P, Bosch R. Closed loop start of combustion control utilizing ionization sensing in a diesel engine. Technical report, SAE Technical Paper, 1999.
- [18] 高辉, 吴筱敏, 高忠权, 等. 盲源分离法在火花塞离子电流信号分离中的应用. 西安交通大学学报, 2010, (1):22–26.
- [19] 曹银波, 张志永, 沈康, 等. 离子电流检测系统的抗干扰设计. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(9):1369–1375.
- [20] Eriksson L, Nielsen L, Glavenius M. Closed loop ignition control by ionization current interpretation. Technical report, SAE Technical Paper, 1997.
- [21] Zeldovich Y B. The oxidation of nitrogen in combustion and explosions. Acta Physicochim. URSS, 1946, 21(4):577–628.

参考文献

- [22] 郑亚利, 俞集辉, 汪泉弟, 等. 面向点火系统电磁兼容预测的火花塞动态电路模型. 电工技术学报, 2011, 26(2):8–13.
- [23] Sincero G C, Cros J, Viarouge P. Arc models for simulation of brush motor commutations. Magnetics, IEEE Transactions on, 2008, 44(6):1518–1521.
- [24] Tseng K J, Wang Y, Vilathgamuwa D M. An experimentally verified hybrid Cassie-Mayr electric arc model for power electronics simulations. Power Electronics, IEEE Transactions on, 1997, 12(3):429–436.
- [25] 汪新凡. 小波基选择及其优化. 株洲工学院学报, 2003, 17(5):33–35.
- [26] Eriksson L, Nielsen L, Nytomt J. Ignition control by ionization current interpretation. Technical report, SAE Technical Paper, 1996.
- [27] Eriksson L, Nielsen L. Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines. Control Engineering Practice, 1997, 5(8):1107–1113.
- [28] O'Haver T C. Curve fitting C: Non-linear Iterative Curve Fitting. <http://terpconnect.umd.edu/~toh/spectrum/CurveFittingC.html>. Accessed January 07, 2016.