

摘要

电控喷油器是汽油机电控喷射系统中核心部件之一，其性能的好坏直接影响到发动机的经济性、动力性和排放性。电控喷油器的性能是决定电控系统设计的重要因素，直接影响燃油控制单元的精确性。为了进一步研究汽油机电控技术，也为了开发电控喷油器，就需要研究和开发能够评价和测试电控喷油器特性的装置和设备。

本文对喷油器喷射动态过程进行了分析，从理论上对喷油器工作原理、驱动电路的电流特性和芯管组件升程特性进行了分析和研究，为电控喷油器的流量测试开发提供了一定的理论依据。

设计并搭建了汽油机电控喷油器流量及喷雾特性测试台架。同时，完成了该测试系统电子控制单元的设计和开发，可以控制或检测测试系统的状态。并且设计了一套简便易操作的测试软件，为试验提供了方便的操作环境。

以高阻型喷油器为研究对象，在整个流量范围内对其流量特性进行测试并对测试结果加以分析总结，得出了该喷油器流量特性中静态流量曲线，动态流量曲线和流量拟合曲线等一些重要参数。同时，比较了不同电压和油压对流量特性的影响，得到了部分修正曲线，并提出了相应的补偿措施。通过试验也对喷油器的喷雾特性进行了测试和分析，本系统通过空心锥角喷雾测试方法计算出电控喷油器的雾化角，同时对于喷雾的均匀性分布进行了相应的测量。

试验结果表明，本测试系统具有良好的稳定性和可靠性，能够准确地测试汽油机电控喷油器的重要特性参数；同时电控系统的开发进一步提高了测试系统的自动操作性。本测试系统的研究成功，为汽油机喷油器的实际开发提供了一个良好的测试平台。

关键字：汽油机，电控喷油器，流量特性，喷雾特性

Abstract

Electronic controlled injector is the most important component in the gasoline electronic fuel injection system, which has great influences on the engine economic, dynamical and emission performance. The performance of injector is an important factor which can determine the electronic control system designing and affect the accuracy of fuel electronic unit directly. To further study the technology of gasoline electronic control and develop the injector, it is necessary to research and develop the equipment for evaluating and testing the characteristics of injector.

This paper analyzes the injection's dynamic process of injector and researches theoretically in the injector working elements. Electric current characteristics in driving circuit and core-pipe assemble motion characteristics are also analyzed. It offers some academic bases to the exploitation of flow characteristics test of gasoline injector.

It also designed and built flow and atomization characteristics test dais and electronic control unit which can detect the system test state. In addition, a convenient software is exploited for this test system, which provide a simple operation environment to the handler.

Taking a high resistance injector as an example, the test data gained in the whole flow range have been analyzed and summarized in order to educe some important flow characteristics parameters, such as the static and dynamic state flow curves. Besides, different voltages and fuel pressures working on flow characteristics are compared and compensating measures have been provided. It also gets some modificatory curves. During test, the atomization characteristics is also tested and analyzed. The spray angle and distribution have been analyzed and obtained by experimentation in this system. The spray angle is figured out through the design principle.

The test results show that this test system has good stability and reliability, which can test some important characteristic parameters. In the meanwhile, the

automatically operating ability is great advanced by the design of electronic control system. The exploitation and research of this test system supply a favorable test platform for the gasoline injectors.

Key words: gasoline engine, electronic injector, flow characteristics, atomization characteristics

此页若属实，请申请人及导师签名。

独创性声明

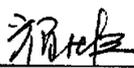
本人声明，所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的科研成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得武汉理工大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：_____日期_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

研究生签名：_____ 导师签名： 日期_____

注：请将此声明装订在论文的目录前。

第 1 章 概论

1.1 汽油机电控技术的发展和现状

自汽车诞生一百多年以来，为改善汽车的使用性能，其机械结构一直在不断发展和完善的过程中。在经历多年的发展后，汽车在机械结构方面已经非常完善，所以靠改变传统的机械结构和有关结构参数来提高汽车的性能已临近极限。这时候由于电子技术的发展，汽车工业开始变革。随着大规模集成电路的出现，满足汽车复杂控制问题所需的模拟电路不仅可做得体积小重量轻，且性能优良可靠性高，并首先在发动机燃油喷射系统的应用中取得成功。根据发动机的工况，把精确计量的燃油准时地喷入气缸是降低发动机排放、提高发动机工作效率的技术关键，通过传统的机械装置解决这一问题已非常困难，而电子控制装置为进一步提高发动机的性能提供了新的途径。

汽车工业的迅速发展，虽然一方面给人类带来了高度的物质文明，极大地促进了世界经济的发展，尤其给发达国家带来了一派经济繁荣的景象，但另一方面由于汽车保有量剧增，引发了全球性的能源危机、全球性的环境污染以及全球性的温室效应。迫于能源危机和环境污染的压力，世界许多国家都制定了严格的法规，力图降低汽车发动机的排放和提高燃油经济性。这些来自国家政府机构以及社会各个方面的压力，又反过来加速了电控燃油喷射系统、电控点火系统的迅速发展。为了满足节能与环保方面日益严格的要求，各汽车生产大国（美、日、德等）不断加强汽车发动机电控系统研究和开发，逐步开发出了各种形式的电控系统^[1]。电控系统的功能也在不断扩增，除了控制汽油喷射以外，还对点火定时、怠速、爆震、进气等进行控制并具有故障自诊断等功能，发展成为现今的发动机管理系统^[2]。1984 年福特公司在国内销售的汽车已全部装有电控系统。90 年代，美国采用电控系统发动机的轿车总量达 80% 以上，日本达 50% 以上，欧洲 35% 以上。90 年代末到新世纪初，美国、欧洲和日本汽车发动机几乎全部实现电控^[3]。今天已经实用化了的汽油机电子控制项目至少覆盖以下范围：燃油定量电子控制；点火正时电子控制；油箱蒸发排放电子控制；怠速转速电子控制；爆震电子控制；增压压力电子控制；排气再循环电子控制；

二次空气电子控制；可变气门正时电子控制；可变进气系统电子控制；冷却风扇电子控制；空调压缩机电子控制；稀薄燃烧电子控制等。由此可见，汽油机电子控制的内涵远比电子控制汽油喷射丰富。除燃油定量电子控制以外还兼有点火正时等其他电子控制项目的系统应称为发动机管理系统（Engine Management System，缩写为 EMS），又称为发动机电子控制系统^[4]。

我国发动机电子控制技术的研究与应用起步较晚，但改革开放以来尤其是近年来电控技术得到较快的发展，上个世纪 90 年代末，中国生产的桑塔纳 2000、捷达王、新型富康和小红旗等都已采用电控喷射系统。目前，国内的轿车主要从德国大众集团、法国雪铁龙集团、日本大发汽车公司和本田汽车公司以及美国通用汽车公司引进生产的，这些产品无一例外都是以汽油机为动力的。

为减少机动车排放污染，保护大气环境，2001 年 4 月 16 日国家环保总局和国家质量监督检验检疫总局联合发布了新的国家机动车排放标准。新标准的排放控制水平相当于欧洲 1992 年实施的 I 号排放法规的水平，控制的污染物包括氮氧化物、一氧化碳、碳氢化合物和颗粒物。标准规定：自 2001 年 9 月 1 日起，所有新生产的装用压燃式发动机的大于 3.5 吨的重型车辆及车用发动机（包括柴油车和柴油与天然气混烧的客车及货车）都必须满足 GB17691—2001《车用压燃式发动机排气污染物排放限值及测量方法》的要求；自 2001 年 10 月 1 日起，所有新生产的 3.5 吨以下的轻型车（包括客车和货车）都必须满足 GB18352.1—2001《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（1）》的要求。据了解，同旧标准相比，柴油机排放污染降低了 10%—30%，轻型汽油机排放污染降低了 80% 左右。因此，发动机的电控技术作为减少环境污染，达到国家排放标准的重要手段之一，它的研究和发展已成为国内外专家一个十分关注的问题，并且已进行了深入的研究。

1.2 汽油喷射系统的优点

（一）混合气生成的质量不受空气密度的影响

汽油喷射利用喷油器使汽油雾化。喷油器是一种按压力型雾化器原理工作的雾化装置，它主要依靠喷油器内外的压力差使燃油雾化。特别是在缸内喷射和进气口喷射的场合，可借助气缸内和进气口的高温使燃油雾化^[5]。所以，混合气生成的质量不受空气密度的影响。

（二）空燃比不受空气密度的影响

在汽油喷射的场合，因没有喉管，喷油器提供的喷油量不是由喉管的真空度决定的，所以混合气空燃比不再如同在化油器的场合那样与空气密度的平方根成反比。而且，汽油喷射场合空气密度对空燃比的影响可以利用各种手段进行比化油器更为精确的修正^[6]。

（三）多点喷射的场合不存在多缸机混合气分配不均匀的问题

多点喷射的场合，燃油或者喷入缸内^[7]，或者喷在进气门前，进气歧管中的气流不含燃油，进气歧管壁上没有燃油膜，故消除了化油器场合各缸混合气分配不均匀的根本原因。

（四）多点喷射的场合负荷变动不会造成附加油耗和排放恶化

如上所述，多点喷射的场合，进气歧管中流动的是纯空气，也就不会因为气流中含有燃油而在节气门开度减小、压力下降时引起附加的燃油从壁面油膜进入气流的问题。

（五）多点喷射的场合，过渡工况的性能得到改善

多点喷射的场合，摆脱了进气歧管管壁油膜对空燃比控制的干扰，所以过渡工况的性能得以改善^[8]。

（六）体积效率增大

首先是因为汽油喷射取消了化油器，因而取消了喉管，革除了进气系统的“瓶颈”。以第一代桑塔纳 2000 型汽油喷射发动机为例，在原机结构型式及参数未作重大变动的情况下，只是将化油器改为多点喷射，就使标定功率从原 66kW 提高到 72kW，使最大转矩从原 145N·m，提高到 155N·m。其次是因为进气歧管壁上不存在油膜了，故不必利用排气管加热进气管，而使进气温度得以降低；同时由于进、排气歧管可分置于机体两侧，形成所谓的“横流扫气”，因此改进了充量交换过程。结果，提高了体积效率，降低了爆震倾向。

此外，在化油器的场合，为了减少进气歧管壁上油膜的不利影响，对进气歧管的设计提出了一些特殊要求，例如要求尽可能小的截面、尽可能短的长度等。这会影体积效率。相反，在多点喷射的场合由于管壁没有油膜，上述设计要求也就随之消失，所以在进气歧管的设计中，一方面可以放手减少流动阻力，另一方面可以充分利用动力增压效应，使体积效率和转矩、功率大幅度上升。

（七）减少了混合气生成系统结冰的危险

特别是在多点喷射的场合，喷油器温度很高，不可能结冰。

汽油喷射系统的工作不受发动机姿势的影响。

汽油喷射系统的工作与重力无关，所以不受发动机姿势的影响^[9]。

（八）发动机断油方便

因为不是依靠吸入空气在喉管造成真空度来进行燃油定量的，所以即使发动机在运转、气缸在吸气，仍然可以切断燃油供应^[10]。这为超速断油和倒拖断油提供了方便，并为六缸及六缸以上发动机多点喷射场合下负荷不足时的部分停缸运行创造了可能。

（九）降低缸内温度

燃油直接喷入缸内，或虽然喷在进气门前但喷油时间与进气门开启时间部分重叠的场合，会有燃油在进入气缸后吸热汽化，导致缸内温度降低^[11]。如此，一方面有可能提高体积效率，因而提高转矩和功率；另一方面降低了爆震倾向，在燃油辛烷值保持不变的情况下可增大点火提前角或提高压缩比 0.5—1.5，因而降低油耗，或者在压缩比保持不变的情况下可放松对燃油辛烷值和沸腾范围的要求^[12]。

（十）可增大气门叠开角，实现纯空气扫气

燃油直接喷入气缸时，因吸入的空气充量中不含燃油，故可适当增大气门叠开角而不至于造成未燃燃油外溢，在二冲程发动机或四冲程增压发动机的场合有可能利用纯空气扫气，既提高充气效率，又降低油耗和排放。

（十一）便于实现分层充量、稀薄燃烧

稀薄燃烧（空燃比大于 22—23）可降低油耗、改善排放，为汽油机的重要发展方向之一。为了在稀薄燃烧发动机实现点火，必须一反常规，在汽油机中有意识地造成非均质混合气，这就是分层充量。仅仅依靠化油器或单点喷射是无法达到这一目标的。缸内喷射就很容易实现分层充量、稀薄燃烧。1991 年上海国际汽车展览会上展出的三菱公司 GDI 就是一例。奥地利的 AVL 公司在四气门发动机上利用进气口喷射也成功地实现了分层充量、稀薄燃烧。

（十二）燃油定量精确

化油器集燃油雾化、汽化、扩散和混合等加工过程与燃油定量控制于一身，控制精度难以保证。汽油喷射系统中，燃油加工由燃油泵和喷油器完成，燃油定量控制则另有装置专司，两者分开，为提高控制精度创造了条件。例如，汽油喷射系统的燃油定量可考虑冷却液温度、进气温度、进气压力等因素，而化油器不能。

（十三）降低油耗，延长寿命

有几个原因促使汽油喷射发动机的油耗可低于化油器发动机：

（1）多点喷射的场合，消除了进气歧管壁上的油膜，降低了过渡工况的油耗；

（2）汽油喷射的燃油定量控制精度较高；

（3）直接喷射的场合可降低扫气损失；

（4）便于实现倒拖断油；

（5）便于通过稀薄燃烧降低油耗。

在同等功率水平下，降低油耗意味着降低热负荷，有利于提高气门、气门座、气缸盖和活塞等零件的寿命。

（十四）稳定工作的转速范围大

汽油喷射发动机全负荷时可稳定地工作在整个转速范围，最高与最低的稳定转速可达 10: 1 至 12: 1。这就是说，发动机怠速转速下就可以加上全负荷了，不会产生转速波动或怠速粗暴。这是因为汽油喷射系统在任何转速下都能准确地控制发动机空燃比而化油器却做不到。

（十五）降低发动机高度

由于取消了化油器，发动机的总高度可以降低，因此，给发动机在汽车中的布置带来了方便。

（十六）燃油定量对燃油粘度不敏感

因此，使用粘度较高的汽油也无妨。

汽油喷射相对于化油器的缺点是：系统复杂、价格高昂、维修较难，对燃油的洁净度要求较高，而且要求控制燃油的凝胶含量，否则容易堵塞喷油器，在进气门背面形成积碳。特别是中国的汽油多采用热裂催化工艺生产，烯烃含量超过 30%，更有必要加入清净剂。但加入过多也会使燃烧室内形成沉积物。

1.3 汽油机电控系统喷油性能的要求

1.3.1 燃油喷射量的控制要求

ECU 对空燃比的控制是通过对燃油喷射量的控制来完成的。发动机工作时，ECU 从传感器得到空气流量的信息，通过若干计算之后，决定喷油量，从而使

混合气的空燃比达到预先设定的值。在整个过程中，ECU 输出的控制指令只是一个触发喷油器的控制信号，在这一个喷油信号中，ECU 控制了信号的脉宽以及时刻。

喷油信号的脉宽决定了喷油量的多少^[13]。这一脉宽是下列参数的函数：

- (1) ECU 通过计算确定的目标空燃比。
- (2) 空气流量。
- (3) 发动机的其它工况参数，如传感器 EGO、ECT、MAP 提供的信息。
- (4) 喷油器的流量特性。

ECU 在控制喷油脉宽时可采用两种方式：开环控制与闭环控制。在开环方式中，每一次喷油的脉宽都是由 ECU 计算出来的^[14]。在这一方式中，ECU 计算脉宽的目的是为了“配制”出一定空燃比的混合气，但对于喷油后实际形成的混合气到底是怎样的空燃比，并没有检查。在闭环方式中，ECU 并不只是计算喷油脉宽，而且要记录下当前的喷油脉宽，然后从排气氧传感器 EGO 信号检查这一脉宽形成的空燃比，并与目标空燃比相比较，从而决定下一次喷油的脉宽。

1.3.2 喷雾性能的要求

燃料喷雾是发动机燃烧的重要基础。无论是汽油机还是柴油机，燃料的喷射规律、燃料与空气的混合气形成都是关于发动机动力性、经济性和排放好坏的最重要的环节。混合气形成是一个燃料的空间分布特性问题，它取决于燃料的喷雾、缸内气流运动和燃烧室形状之间的密切配合，其中燃料的喷雾是至关重要的。燃料的喷雾特性：喷油率、喷油器喷出燃油油束的贯穿距离和锥角、油滴的尺寸和速度，以及分布特性等，对这些参数的测量就构成了喷雾测量。

在电子燃油喷射的汽油机中雾化过程是通过喷油器的压力喷射形成雾化并部分汽化，其中的液滴与空气接触且接触到热的物体表面（如进气门）进一步汽化而形成的。在理想情况下，混合气中的燃油在进气道中已大部分汽化并混合，当进气门打开后，混合气经进气门流入气缸，在缸内与残余废气混合，并在燃烧开始时完全汽化。

典型的进气道喷射情况见图 1-1。为了改善燃油汽化，需要使喷雾中液滴尺寸小，液滴的分布密度均匀。小尺寸的液滴容易与空气均匀混合，而且所需的汽化热也比较少。通常雾柱的喷射锥角越大，液滴尺寸越小。然而，过大的

锥角会使雾柱大于进气门头，可能引起湿壁现象（液滴凝聚在进气道的表面）而导致燃烧控制恶化。

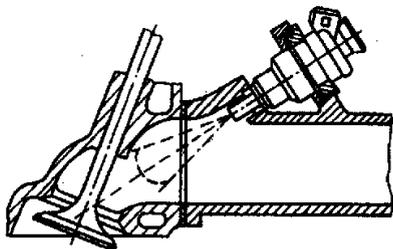


图 1-1 进气道喷射

1.3.2.1 喷雾的形成和作用

喷雾是传质、传热的重要基础。只有当燃料与空气充分接触，形成可燃混合气时，才有可能燃烧。当燃料以一定的高压和速度经喷油器喷射后，会形成如图 1-2 所示的喷注（或称为油束）。

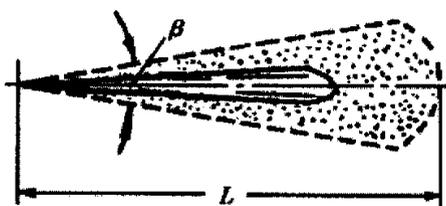


图 1-2 油束

由于周围空气的动力作用，液体喷注被撕裂成片、带、线、泡或大颗粒的油滴，此过程称为一级雾化。进一步，空气动力作用将这些液片、带、线、泡或大颗粒的油滴再粉碎成细小的油滴，空间分布的细小油滴由于表面张力的作用而成为球形，此过程称为二级雾化。油束中央的速度较大，但油滴密集，浓度较大；边上油粒分布松散，直径较小。外部细小油滴最先蒸发并与空气混合形成可燃混合气。这种燃料的雾化将大大增加燃料与空气接触的表面积，即蒸发表面积，增加燃料与助燃剂——氧气接触的机会。接触面积越大，可燃混合气越多，燃烧越完善。对于 1cm^3 油滴，若只有 1 个，则球形油滴的直径为 9.7mm ，表面积为 245mm^2 ；但如果通过高压喷雾，将其雾化成为 2.99×10^7 个，则雾化油滴的平均直径为 $40\mu\text{m}$ ，所有油滴的表面积之和将为 $1.5 \times 10^6\text{mm}^2$ ，燃烧反应机会大大增加。

1.3.3 电源电压修正

电源电压将影响到喷油器线圈产生的电磁提升力。当电源电压较低时，喷油器针阀延迟 t_1 和开启反应 t_2 均增加，从而使有效喷油时间缩短。另外，低电压还会使燃油泵转速降低。当燃油输出压力低于压力调节器可调节的工作范围时；供油系统的压力降低，进一步减少了喷油量。由于汽车上的电源电压一直在变动，当发电机接通时蓄电池电压可降至 11V，高速运转时发电机电压又可高达 14V。为了获得稳定的空燃比控制，对电源电压的校正是十分重要的。电源电压的校正通常采用加上一段脉宽进行补偿的方式。所补偿脉宽的长短与喷油器特性及其驱动器类型有关^[15]。

1.4 研究目标、研究内容和拟解决的关键问题

研究目标：设计并搭建电控喷油器测试台架。通过建立的测试台架完成对电控喷油器的性能测试和评估。

研究内容：主要包括测试台架供油系统、供气系统、供水系统的设计与布置、测试系统电控单元的设计、喷油器流量特性测试、喷雾特性测试以及用 Visual Basic 6.0 对测试系统操作软件的设计。同时在建立的测试系统上对汽油机喷油器进行大量特性参数测试试验，结合试验数据分析并研究喷油器的重要特性——流量特性与喷雾特性等参数。

研究成果：完成汽油机电控喷油器测试系统的台架设计与搭建，根据本系统完成了电控喷油器的流量特性和喷雾特性的测试试验，通过对试验数据的分析和研究，验证了测试系统的实用性、稳定性以及可靠性。通过电控系统和操作软件的设计使该台架达到全自动控制程度。

第 2 章 喷油器特性及其工作原理

2.1 喷油器的结构

电控喷油器是汽油机电控燃油喷射系统的一个关键的执行器。它接受 ECU 控制的喷油脉冲信号，精确地计算燃油喷射量。因此，它是一种加工精度非常高的精密器件，因此要求其动态流量范围大、抗堵塞和抗污染能力强以及雾化性能好。为了满足这些性能要求，则有各种不同结构型式的电控喷油器，主要有轴针式，球阀式和片阀式等。

2.1.1 轴针式电控喷油器

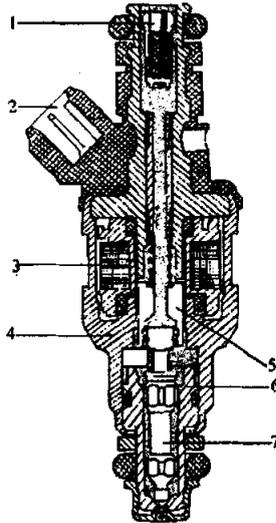


图 2-1 轴针式电磁喷油器

1—滤清器；2—插座；3—电磁线圈；
4—喷油器体；5—衔铁；6—挡块；7—针阀

图 2-1 为轴针式电控喷油器的结构图。它主要由喷油器体、喷油嘴、针阀、套在针阀上的衔铁以及根据喷油脉冲信号产生电磁吸力的电磁线圈组成。电磁

线圈无电流时，喷油器内的针阀被螺旋弹簧压在喷油器出口处的锥形密封阀座上。电磁线圈通电时，产生磁场吸引衔铁上移，衔铁带动针阀从其座面上升约0.1mm，燃油从精密环形间隙中流出。为使燃油充分雾化，针阀前端磨出一段喷油轴针。喷油器吸动及下降时间约为1~1.5ms。

喷油器用专门的支座安装。支座为橡胶成型件，从而形成隔热作用，防止喷油器中的燃油汽化产生气泡，有助于提高发动机的高温起动性能。另外，橡胶成型件可保护喷油器不受过高振动应力的作用。视发动机结构型式不同，喷油器或是经燃油管或经带保持夹的连接插座与燃油轨连接。

2.1.2 球阀式电控喷油器

现代轿车发动机具有较低的燃油消耗率和较高的功率，各种型号发动机的进气空气流量范围扩大，因此喷油器的动态流量范围必须随之增大。

减轻阀针质量并提高弹簧预紧力，对获得宽广的动态流量范围十分有效。同时，用球阀简化计量部分的结构，有助于提高喷油量精度。此外，喷油器体和盖用高导磁不锈钢制成，提高了耐蚀性。

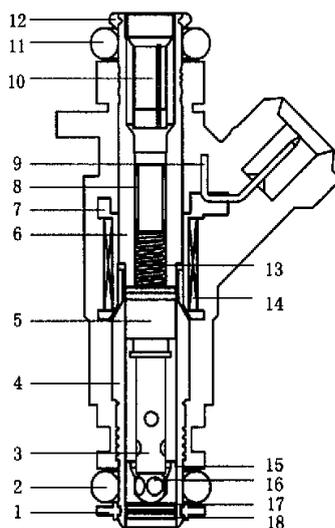


图 2-2 喷油器结构示意图

- 1—下垫圈；2—下密封圈；3—阀杆；4—下管套；5—衔铁；6—上管套；
7—线圈套；8—弹簧定位套；9—接线片；10—滤网组件；11—上密封圈；
12—上垫圈；13—弹簧；14—线圈；15—阀座；16—球阀；17—喷孔片；
18—挡圈

图 2-2 为球阀式喷油器的结构图。它与轴针式电控喷油器的主要区别在于阀针的结构。球阀式的阀针是由钢球、导杆和衔铁用激光束焊接成整体制成的，由于采用了短的空心导杆，其质量减轻到只有普通轴针式阀针的一半。为了保证燃油密封，轴针式阀针必须有较长的导向杆，而球阀具有自动定心作用，无需较长的导向杆。因此，球阀式的阀针质量轻，且具有较高的燃油密封能力，明显优于轴针式针阀。

当喷油脉冲输入电磁线圈时，产生电磁吸力，固定在阀针上的衔铁被向上吸起，阀针抬离阀座，燃油开始通过计量孔喷出。当喷油脉冲终止时，吸力消失，阀针在弹簧力作用下返回阀座，于是喷油结束。因此，每次脉冲的喷油量取决于输入电磁线圈的工作脉冲的宽度。

2.1.3 片阀式电控喷油器

片阀式电控喷油器最早是英国 Lucas(卢卡斯)公司研制开发的，其内部结构的主要特点是质量轻的阀片和孔式阀座。它们与磁性优化的喷油器总成结合起来，使喷油器不仅具有较大的动态流量范围，而且抗堵塞能力较强。电磁线圈可按任何特性值绕制，但典型的一种是低电阻型喷油器，阻值为 $2-3\ \Omega$ ，用于电流驱动系统。另一种是高电阻型喷油器，阻值为 $13-17\ \Omega$ ，用于电压驱动系统。燃油从喷油器顶部注入。

当喷油器处于未激励状态（针阀关闭）时，阀片被螺旋弹簧力和液压力压紧在阀座上。当来自微机控制装置的喷油脉冲通过喷油器线圈绕组时，即产生磁场；在电磁力足以克服弹簧力和液压力的合力之前，阀片仍将压紧在阀座上。一旦电磁力超过两者的合力，阀片即开始脱离：阀座上的密封环，被铁心吸住，于是具有压力的燃油进入阀座密封环中的计量孔。反之，一旦来自微机控制装置的喷油脉冲结束，电磁力开始衰减，但是阀片仍瞬时保持阀开启状态，直到喷油器弹簧力克服衰减的电磁力为止。当弹簧力大于衰减的电磁力时，阀片将脱离挡圈返回到阀座上，切断燃油喷射。

2.1.4 底部进油的喷油器

为了适应各种发动机的设计，一般喷油器产品均有上部进油与下部进油两种。前面给出的几种均是上部进油式的，图 2-3 给出了下部进油喷油器的一个例子。

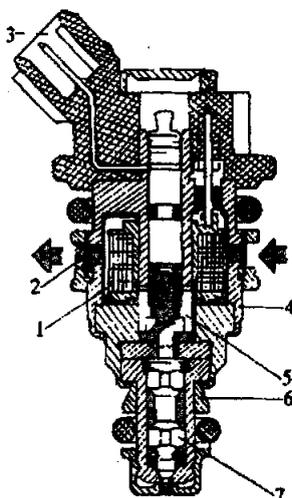


图 2-3 底部进油的喷油器

1—电磁线圈；2—滤网；3—电插头；
4—喷油器体；5—铁芯；6—阀体；7—针阀

底部供油式喷油器主要用于中央燃油喷射系统中，这个系统允许在节气门安装一个或多个的喷油器。这种设计允许在喷油器的燃油喷射部位进行包装，以便喷油器安装在节气门的正上方。底部供油式喷油器的一个优点就是可以消除蒸汽。通过与喷油器外部直接相联的通道，蒸汽更容易被消除。这个蒸汽消除通道只需要较低的燃油压力（100kPa），同时能保证燃油的正常供应。尽管底部供油式喷油器主要运用于中央燃油喷射系统，但已有用于进气道喷射的设计趋势。

2.2 驱动电路形式

汽车上的喷油器普遍使用的驱动电路是电流式驱动电路和电压式驱动电路。在一个给定的循环率下以精确的时间增量向喷油器供给电压脉冲。这些脉冲和循环精确度通常保持在一定误差范围内。图 2-4 和图 2-5 分别给出了两种驱动电路的原理性电路图。

2.2.1 电流式驱动电路

电流式驱动电路通过控制电路给出两种水平的电流来控制喷油器，电流曲线如图2-4所示。驱动电路以一定电压供给喷油器直到达到预先确定的电流峰值，以此来加速喷油器的开启，为了将喷油器完全打开的不稳定性降到最低，要对喷油器和驱动器特征进行匹配以确保在喷油器完全打开之后峰值转换才发生；而后电流下降并保持在一个较低值，以保证喷油脉宽持续时间；当喷油器接到断电信号后，电流下降到一个更低值，使喷油器内剩磁减少，以此来加速喷油器的关闭。

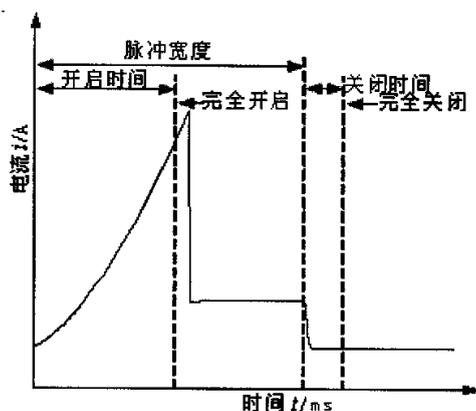


图 2-4 低阻型喷油器驱动电路电流曲线

电流驱动方式的回路中没有使用附加电阻。低电阻喷油器直接与电源连接，因而回路阻抗小，触发脉冲接通后，电磁线圈电流上升快，针阀能快速打开，从动态响应角度看是相当有利的，它可以缩短无效喷射时间。在电流驱动方式的回路中，增加了电流控制回路。当脉冲电流使电磁线圈电路接通后，它能控制回路中的工作电流。当控制回路根据微机输出的脉冲信号使功率三极管导通时，能及时接通喷油器电磁线圈电路。其电路是：电源正极——喷油器电磁线圈——三极管——电流检测电阻——接地——电源负极。由于在开始阶段，三极管处于饱和导通状态，回路阻抗小，喷油器电磁线圈的电流在极短的时间内就很快上升，保证了针阀以最快的速度升起。当针阀升到全开位置时，其电磁线圈的电流达到最大，一般称为峰值电流或提升电流。喷油器的结构不同，工作情况不同，其峰值电流也不同，一般为4—8A(电源电压为14V时)。在喷油器电磁线圈电流增大的同时，电流检测电阻的电压降也不断增大。电压达到设定

值时(此时恰好针阀升至全开位置), 电流控制回路使三极管在喷油期间以约20MHz的频率交替地导通和截止, 使针阀在全开位置时通过喷油器电磁线圈的电流降至较小的保持电流, 一般保持电流平均值在1—2A左右, 该电流足以维持针阀在全开位置。由于电流控制回路的作用, 限制了针阀全开时的电流值, 可以达到防止电磁线圈发热以及减小功耗等优点。由于电流驱动方式中电流的特点, 它又称为提升-保持式驱动器。

由于在功率管截止时喷油器电磁线圈存在电感, 在线圈两端可能产生很高的感应电动势, 此电动势与电源电压一起作用在功率管上, 可能将其击穿而损坏。为了保护功率管和缩短喷油器关阀时间, 在驱动回路中常设有消弧回路。

优点——能将喷油器的开启和关闭时间减少到最小, 也就是说能使喷油器动态流量的线性范围增加; 对喷油器内部磨损和摩擦的变化有较低的敏感性; 对最小工作电压以及工作电压的变化有较低的敏感性; 低电压时的性能好。

缺点——驱动电路热量不易散失, 与饱和式驱动器相比, 电路也较为复杂。

2.2.2 电压式驱动电路

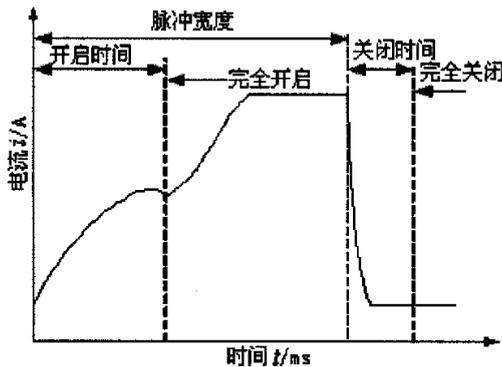


图 2-5 高阻型喷油器驱动电路电流曲线

电压式驱动电路在整个喷油脉宽范围内向喷油器供一稳定的电压, 其电流曲线如图2-5所示。这种驱动电路一般用在高电阻线圈(一般是12到16 Ω)的喷油器上。其优点是热量主要通过喷油器散失而不会留在驱动电路中, 电路也更加简单, 伴随的缺点则是动态响应较差, 降低了喷油器的可用流量范围。

优点——热量主要通过喷油器或整流电阻器散失而不会留在驱动器电路中。与峰值式驱动器相比, 电路更加简单。

缺点——该系统固有的慢速动态响应降低了喷油器的可用流量范围。由于

要考虑到热量的散失，使用这种电路的喷油器的动态喷油率对工作循环更敏感。这种驱动器的感应抑制，可能是电容的电阻或者齐纳击穿，由于电路中电流衰减率的变化，会明显的影响喷油器的单脉冲喷油量。这种衰减会造成喷油器关闭时间的变化。

喷油器驱动电路如图2-6所示。以2-6(a)电压驱动电路为例，该电路采用光电耦合器将控制信号输出电路与喷油器驱动电路相隔离，从而抑制喷油器驱动电路的高频干扰进入控制电路部分，以保证其正常工作。同时使用功率晶体管作为喷油器驱动器，为了保证喷油器脉宽的完整周期而保持完全开路，这种驱动器一般和具有高电阻线圈（一般是12到16Ω）的喷油器或者具有低电阻线圈和整流电阻器的喷油器同时使用。图中电阻R和二极管C在喷油器关闭时提供放电通路，以防止功率三极管损坏，它们和喷油器线圈组成了喷油器的消弧电路。

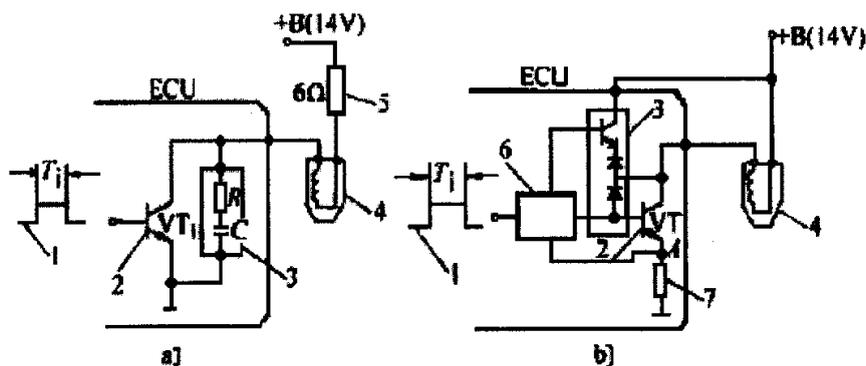


图 2-6 喷油器驱动器的原理性电路

a) 电压驱动电路

b) 电流驱动电路

1—输入脉冲；2—功率三极管；3—消弧回路；4—喷油器；

5—附加电阻（高电阻喷油器除外）；6—电流控制回路；7—电流检测电阻

2.2.3 附加电阻

低电阻喷油器与电压驱动方式配合使用时，应在驱动回路中加入附加电阻。这是因为在低电阻喷油器中减小了电磁线圈的电阻，减少了匝数以及减小了电感。其优点是喷油器本身响应特性好，但由于电磁线圈电阻的减小会使电流增

加，会加速电磁线圈因发热而导致的损坏，为此在回路中要设置附加电阻。附加电阻与喷油器的连接方式如图2-7所示。电压驱动方式的回路较简单，但由于在回路中加入了附加电阻，回路阻抗大，导致经过喷油器的电流减小，喷油器产生的电磁力降低，从动态响应角度看，稍有不和。

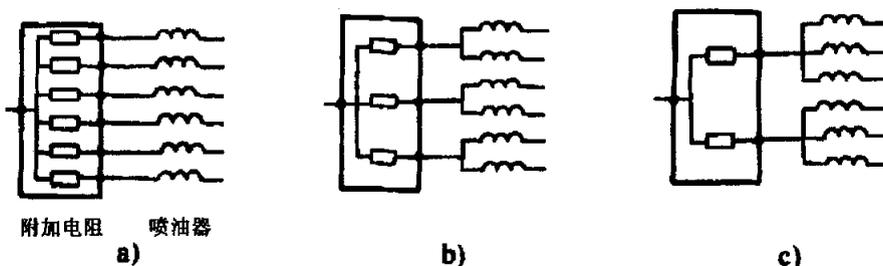


图 2-7 附加电阻与喷油器的连接方式

2.3 喷油器工作特性

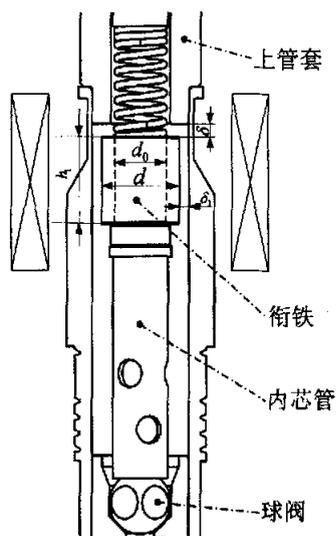


图 2-8 喷油器机构示意图

在电控汽油喷射装置中，喷油器作为一个关键部件，它必须精确地计量燃油并形成喷雾，当发动机作高速运转时，在一个喷油周期内从开启、喷油到回

位仅几个毫秒，为了使喷油器在如此短的过程中有足够的喷油量，就要求其具有很高的频响特性^[16]。另外，它的流量特性对汽油机与电控系统的匹配有很大影响。因此，通过建立数学模型研究其喷射过程具有重要实用意义，有助于了解各种参数对喷油器性能的影响程度，可为喷油器的开发设计和改进提供一条新的有效手段。由于电控喷油器在工作时，其中的燃油流动、电路和磁路都达不到稳定的工作状态，几乎大部分时间都工作在过渡过程中，这一特点决定了电控喷油器喷射过程建模的复杂性^[17]。

喷油器的喷射过程可分为针阀开启、全开和关闭三个主要过程：

- (1) 开启过程是指从接通驱动脉冲起到针阀全开的过程^[18]。
- (2) 全开过程是指针阀升程为最大值的过程^[19]。
- (3) 关闭过程是指从切断驱动脉冲起到针阀由弹簧推回而落座的过程。

由电控喷油器的喷射过程可知：在针阀开启和关闭时，喷油器处于动态工作状态。由于针阀的位移，使磁路磁阻发生变化，造成电路中的电感发生改变，引起电磁吸力变化从而又影响到针阀的运动^[20]。针阀的位移也使喷油器内的燃油流动产生压力波动，导致针阀所受液体伴随之发生变化，也反过来影响针阀的运动。另外针阀与阀座间相碰撞而产生的振动也会影响喷油器的工作特性^[21]。可以认为电控喷油器是一个由电路、磁路、流体运动和机械运动四个子系统构成的复杂系统^[22]，各个系统是相互作用、相互影响的，四个子系统相互关系如图2-9所示。

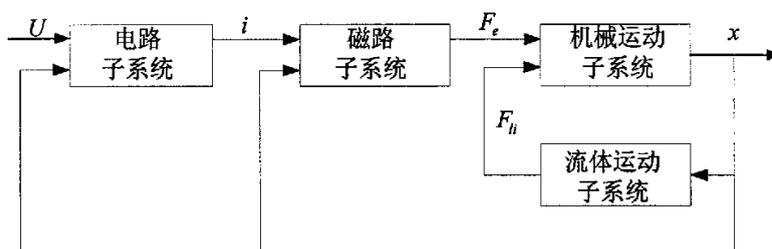


图 2-9 喷油器的系统结构图

2.3.1 磁路子系统

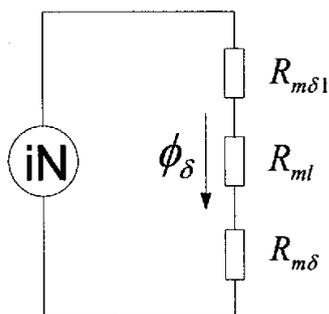


图 2-10 等效磁路

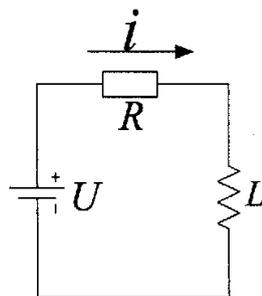


图 2-11 等效电路

图 2-10 和图 2-11 是电磁线圈的电磁模型，其中图 2-10 是等效磁路，图 2-11 是等效电路。根据图 2-10 由磁路欧姆定律可知

$$i \cdot N = \phi \cdot R_m \quad (2-1)$$

在计算模型中采用漏磁系数法^[23]，因此磁路磁阻 R_m 便由三部分组成：工作气隙磁阻 $R_{m\delta}$ 和滑动气隙磁阻 $R_{m\delta 1}$ 和导磁体磁阻 R_{ml} 。即：

$$R_m = R_{m\delta} + R_{m\delta 1} + e_l R_{ml} \quad (2-2)$$

其中，

$$R_{m\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S} = \frac{4 \cdot \delta}{\mu_0 \pi (d^2 - d_0^2)} \quad (2-3)$$

式中， S 为气隙截面积， d 为衔铁外径， d_0 为衔铁内径， μ_0 为真空磁导率 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}^2$)， δ 为工作气隙。

$$R_{m\delta 1} = \frac{1}{2\pi\mu_0 h_1} \ln \frac{d + 2\delta_1}{d} \quad (2-4)$$

式中， δ_1 为滑动气隙， h_1 为滑动气隙的长度。

$$R_{ml} = \frac{l}{\mu S} \quad (2-5)$$

式中， l 为导磁体的磁路长度， μ 为导磁体的磁导率。

e_l 为导磁体的磁阻系数, 球阀在非全开时, 导磁体的磁阻相对于气隙磁阻可以忽略不计, 此时取 $e_l = 0$; 球阀全开时, 导磁体中的磁通密度很容易达到饱和, 此时导磁体的磁导率就变得很小, 导磁体的磁阻不可忽略, 取 $e_l = 1$ 。

由麦克斯韦尔定理可知, 工作气隙为 δ 时芯管组件所受的电磁力为:

$$F_e = \frac{\phi_\delta^2}{2\mu_0 S} \quad (2-6)$$

2.3.2 电路子系统

由图2-11可知, 电感为常量时的线圈电压平衡方程为:

$$U = i \cdot R + L \frac{di}{dt} \quad (2-7)$$

电感不为常量时的线圈电压平衡方程为:

$$U = i \cdot R + \frac{d(Li)}{dt} = i \cdot R + \sigma N \frac{d\phi_\delta}{dt} \quad (2-8)$$

式中, R 为线圈电阻, 电感为:

$$L = \frac{\sigma \cdot N^2}{R_m} = \frac{\sigma \cdot N^2}{R_{m\delta} + R_{m\delta 1} + R_{m2}} \quad (2-9)$$

其中 N 为线圈匝数, σ 为漏磁系数。

2.3.3 流体运动子系统

燃油在喷油器中的流动是可压缩非稳定流动, 其流动较为复杂, 芯管组件在沿流线方向的各个截面处所受的力各不相同^[24]。流体对芯管组件的合力 F_h 由燃油压力 F_p 和芯管组件运动时所受的剪切力 F_s 组成。即:

$$F_h = F_p + eF_s \quad (2-10)$$

本文中, 由于芯管组件外形上的不规则性, 为简化计算过程, 假设 F_p 、 F_s 均为常数, 阻力系数 e 可表示为: 开启迟滞阶段时, 取 $e = 0$; 球阀处于全开状

态时, $e=1$; 球阀升起过程中燃油速率较小, 此时 e 可取一接近 0 的较小值; 球阀回位时, 喷油速率与球阀处于全开状态时差不多, 因此 e 可近似取 1。

2.3.4 机械运动子系统

在一个喷油周期内, 喷油器的针阀受到弹簧力、电磁吸力和液体力的作用, 这些力的大小决定了针阀的运动特性。由于针阀行程只有 0.1mm 左右, 弹簧压缩变化量大大低于弹簧的预压缩量, 因而在针阀运动过程中, 弹簧压缩力可近似视为不变。在计算针阀运动过程中受到的液体力时, 只计算液体压力, 液体剪切力可认为是针阀运动速度成正比的量。芯管组件上所受力的平衡方程为:

$$F_e - F_{sp} - F_{li} - mg = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2-11)$$

式中, F_e 为电磁力, F_{sp} 为弹簧预紧力, F_{li} 为液体合力, g 为重力加速度。

2.4 喷油器动态过程分析

喷油器动态过程可分为: 电磁线圈中加控制电压开始到球阀达到最大行程时的开启过程、球阀持续保持开启的全开过程以及控制电压中断到球阀完全回落的关闭过程。为了及时了解喷油器的电流特性, 在此基础上, 又将整个喷射过程细分为 6 个阶段。

2.4.1 开启迟滞 (OA 阶段)

在 O 点线圈收到电压控制信号, 线圈内磁通量逐渐增大, 芯管组件所受磁力增大并克服弹簧预紧力、燃油压力和自重。由于此阶段芯管组件未动, 即工作气隙不变, 由 (2-9) 式可知此阶段电感 L 为一常量。因此, 由微分方程 (2-7) 及初始条件 ($t_1 = 0, i = 0$) 解得

$$i(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L\sigma\mu}t}) \quad (2-12)$$

在A点, 联立方程(2-1)、(2-6)、(2-11)解得 $I_A = \frac{R_{mA} \sqrt{(F_{sp} + F_p + mg) \cdot 2\mu_0 S}}{N}$,

将 I_A 代入(2-12)式, 便可求出OA阶段的持续时间 t_1

$$t_1 = -\frac{L_{OA}}{R} \ln\left(1 - \frac{R \cdot I_A}{U}\right) \quad (2-13)$$

2.4.2 球阀开启向上运动 (AB 阶段)

芯管组件迅速离开阀座, 工作气隙变小, 引起电感发生变化, 从而电流也发生微变, 并引起管内流体不稳定流动, 直到碰到上管套下端面, 为求解方便假设电流 I 不变 ($I_A = I_B$), 衔铁上端面与上管套下端面碰撞后不再弹起。由微分方程(2-8)及初始条件 ($t_2 = 0, \phi_s = \phi_A$) 解得

$$\phi_s = \phi_A + \frac{1}{\sigma N} \cdot (U - I_A R)t \quad (2-14)$$

联立方程(2-1)、(2-6)、(2-11)、(2-14) 得出芯管组件的运动微分方程

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{2\mu_0 S} \left[\phi_A + \frac{1}{\sigma N} \cdot (U - I_A R)t \right]^2 - (F_{sp} + F_{Li} + mg) \quad (2-15)$$

由方程(2-8)及初始条件 ($t_2 = 0$ 时, $\frac{dx}{dt} = 0$ 及 $x = 0$) 解之得

$$x = \frac{(U - I_A R)^2}{24\mu_0 \sigma^2 m N^2 S} t^4 + \frac{(U - I_A R)\phi_A}{6\mu_0 \sigma m N S} t^3 + \left(\frac{\phi_A^2}{4m\mu_0 S} - \frac{F_{sp} + F_{Li} + mg}{2m} \right) t^2 \quad (2-16)$$

将芯管组件的最大升程量 h 代入(2-16)式, 通过解多项式方程便可求出 t_2 , 即AB阶段的持续时间。

2.4.3 线圈电流增至最大 (BC 阶段)

此阶段球阀全开持续喷油, 线圈电流逐渐增大并达到最大, 由于电感 L 不变, 由微分方程(2-7)及初始条件 ($t_3 = 0, i = I_B$) 解得

$$i(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L_{BC}} t} \right) + I_B \quad (2-17)$$

设经过 t_3 后, 电流达到饱和并达到最大值 $I_C = U/R$, 由 (2-17) 式便可求出

$$t_3 = -\frac{L_{BC}}{R} \ln \frac{R \cdot I_B}{U} \quad (2-18)$$

2.4.4 球阀继续保持全开至电压中断 (CD 阶段)

此阶段为喷油器喷油主要阶段, 所经历的时间 t_4 与给定喷油脉冲 t 关,

$$t_4 = t - t_1 - t_2 - t_3, \quad I_C = I_D = \frac{U}{R}$$

2.4.5 关闭迟滞 (DE 阶段)

在D点, 控制电压降为0, 由于电感的存在, 使得电流逐渐减小, 芯管组件受电磁力也减小, 在E点, 电磁力减小到不能克服外力, 芯管组件开始向下运动, 由式 (2-7) 可知

$$i \cdot R + L_{DE} \frac{di}{dt} = 0 \quad (2-19)$$

对式 (2-19) 积分, 求出

$$t_5 = \frac{L_{DE}}{R} (\ln I_D - \ln I_E) \quad (2-20)$$

联立方程 (2-1)、(2-6)、(2-11), 解得

$$I_E = \frac{\sqrt{2\mu_0 S (F_{SP} + F_h + mg)}}{N} \cdot R_{mE} \quad (2-21)$$

2.4.6 球阀回位向下运动 (EF 阶段)

此阶段电流迅速降为零, 电磁吸力也下降很快, 其对芯管组件的作用力可以忽略不计, 芯管组件在弹簧预紧力、液体力和自重的作用下, 很快回到阀座上。为计算方便, 同样假设球阀与阀座碰撞后不再弹起。因此, 其运动方程可简化为

$$-(F_{sp} + F_h + mg) = m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2-22)$$

由初始条件($t_6 = 0, x = h, \frac{dx}{dt} = 0$)解微分方程(2-22)可求出

$$x = -\frac{(F_{sp} + F_{li} + mg)}{2m} \cdot t^2 + h \quad (2-23)$$

由此解出

$$t_6 = \sqrt{\frac{2mh}{(F_{sp} + F_{li} + mg)}} \quad (2-24)$$

2.4.7 模拟计算结果

通过上述分析,对某一型号喷油器特征参数进行模型赋初值,如图2-12所示,得到计算中间参数。然后通过matlab得到该喷油器芯管组件升程特性曲线图和驱动电路电流特性曲线图,图2-13、图2-14表示出了理论计算值和所参考的实验值的对比结果,两者基本吻合。

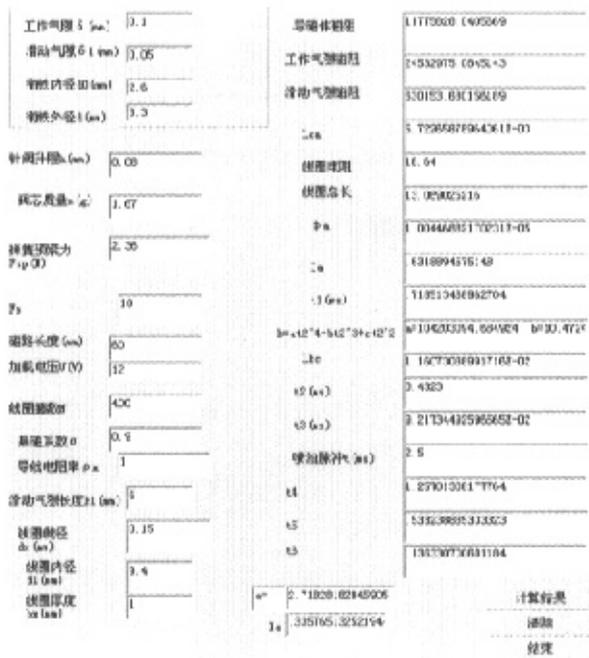


图 2-12 中间参数计算显示

在芯管组件的升程曲线中,针阀抬起时由于嘴端压力下降比较多导致在针阀抬起过程中油速率较小,而在针阀回落过程中却恰好相反,其喷油速度与针阀处于稳态时差不多,这说明针阀关闭滞后时间相对于针阀开启滞后时间对流量的影响要大。在不增加针阀开启滞后时间的前提下,缩短针阀关闭时间可有效地提高流量特性在大、小流量处的线性度。但是当衔铁到达上管套端面后以及球阀回落到阀座后,其计算曲线与实验曲线有较大差异,这主要是由于衔铁与上管套端面近似弹性碰撞且伴以一定的碰撞损失,因此,实际上芯管组件是经一系列的反复碰撞后,逐渐损失其动能的。同理,球阀与阀座的碰撞也是如此。

在驱动电路电流特性中,当电流上升自最大值时,计算值与实验值有较大的误差,这主要是因为导磁体的磁路长度、导磁体的磁导率以及漏磁系数与实际数据有一定的误差,这同时也说明通过对磁路进行优化设计也是提高喷油器性能的一条途径。

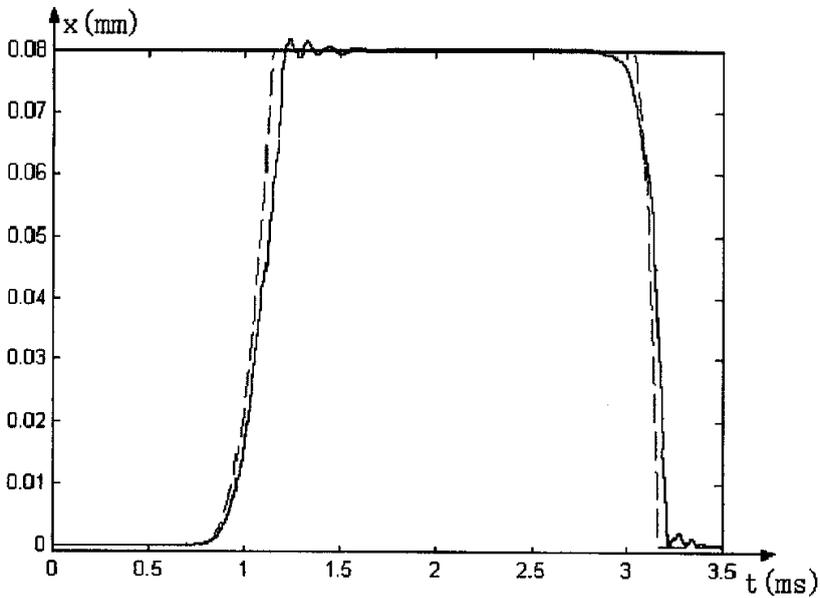


图 2-13 芯管组件升程特型曲线
 ----计算值 ——实验值

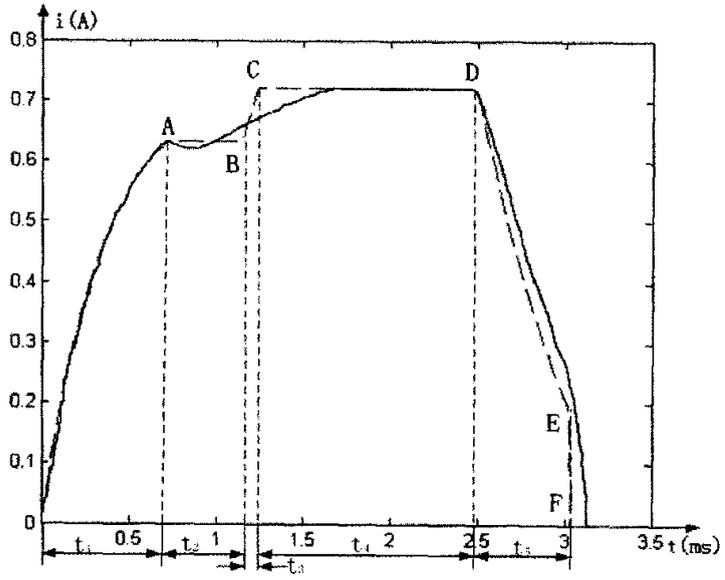


图 2-14 驱动电路电流特性曲线
---计算值 —实验值

第 3 章 喷油器测试系统的设计

3.1 系统机械部份的设计

本文所设计的系统原理图如图 3-1 所示。

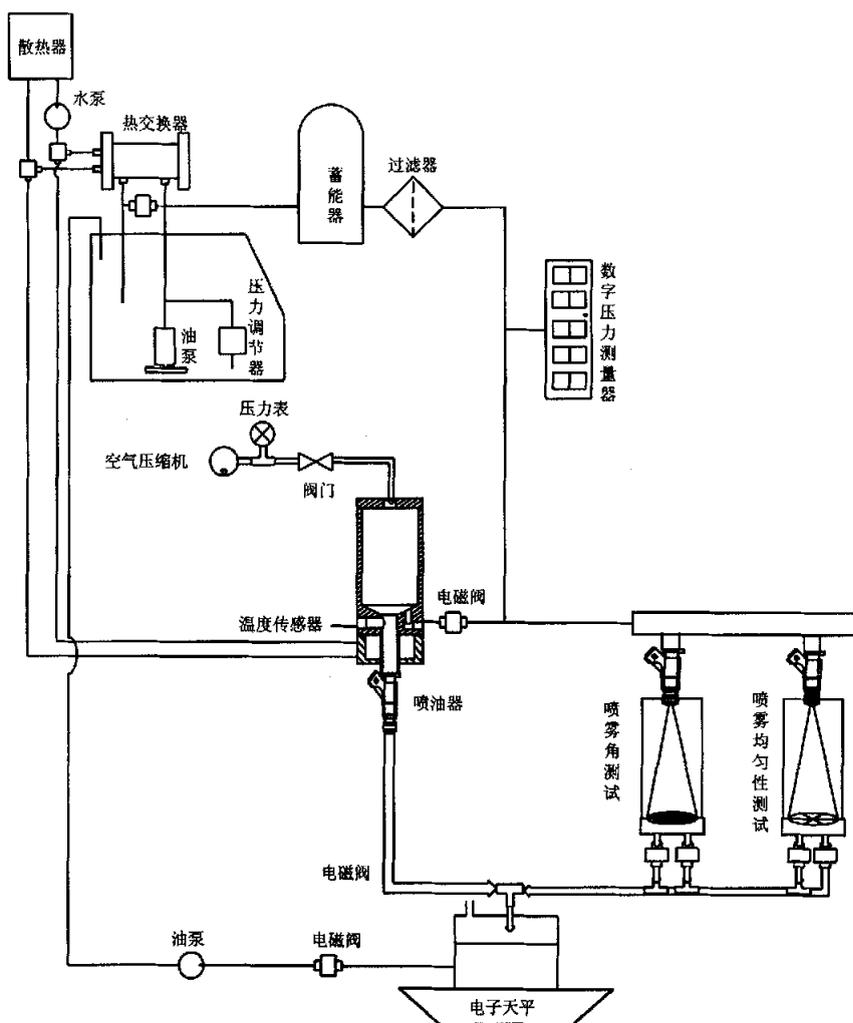


图 3-1 喷油器测试系统油路示意图

整个测试系统包括油路系统、水循环系统、气路系统及电控系统四部份组成。图 3-2 为台架部份装置的实物图。测试液经电动燃油泵、燃油滤清器、热交换器、空气减震器、燃油分配管然后到喷油器，喷油器喷出的测试液经集油槽收集后流入油箱。热交换器用于确保测试液的温度在测试过程中变化范围始终为正负 1 摄氏度；同时为了把油泵产生的液压波动的影响减小到最低，本测试台架用了自行设计的空气减震器，使其上部维持最小为 30cc 空气量，试验证明：测试过程中，能使喷油器进口压力始终稳定在 $\pm 1\text{Kpa}$ 以内，对压力波动起到有效的缓冲作用。在空气减震器的下部连接有压力和温度传感器，用以监测油压和油温。

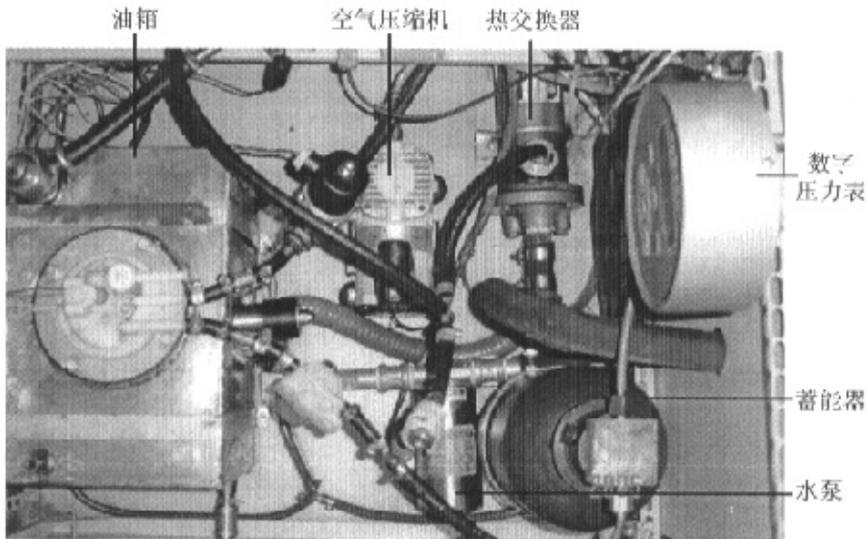


图 3-2 台架部份装置实物图

3.1.1 供油系统

油路系统主要由油箱、电动燃油泵、压力调节器、蓄能器、热交换器、过滤器、数字压力测量器、燃油分配室、电控喷油器、电磁阀（若干）、电子天平、喷雾角测试装置及喷雾均匀性测试装置组成。

(1) 电动燃油泵

电动燃油泵置于燃油箱之内，并与滤网、吸油盘、油气分离器及支架等做

成一个总成^[24]，如图 3-3。图中的减振器是为了产生阻尼，消除或降低油管和泵体的机械振动。在某些特殊场合，也可采用串接在输油管路上的燃油泵，不过其性能会因燃油蒸气不易消除而受限，一般需与燃油箱内的低压燃油泵结合使用。由于汽油极易挥发，加上燃油泵工作时温度升高和吸油时产生局部真空，更助长了燃油的汽化。如油泵吸油腔内产生气泡，将使泵油量与充量系数明显减少，并导致输油压力的波动。因此，一般采用了两级泵的形式。低压级与高压级均采用涡轮泵，两级泵同时由一个电动机驱动。工作时，低压级将燃油吸入，并能分离吸油时产生的蒸气，通过蒸气道送回油箱。燃油通过低压级后产生一定压力进入高压级，再由高压级加压后以工作压力输出。这种两级泵既可改善高温时的燃油输送性能，又可产生较高的工作压力并降低所消耗的电功率。以 700kPa 的固定压力以每秒传递 20 克燃油到供油管路。

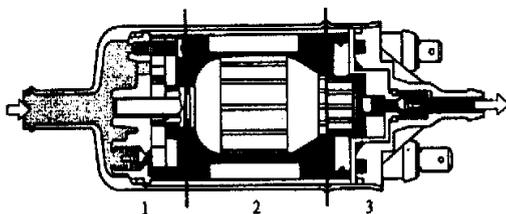


图 3-3 电动燃油泵

1—泵；2—电动机；3—泵盖

(2) 蓄能器

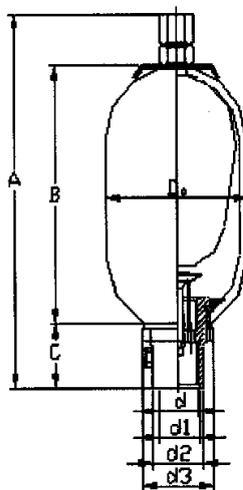


图 3-4 蓄能器结构图

流体实际上是不可压缩的，不能储存能量，因而液压蓄能器利用气体（氮气）可压缩性来储存流体。蓄能器就是利用这个原理而设计的，用氮气作为可压缩介质。蓄能器实质上是一个储存压力流体的腔室，靠气体的可压缩性将不可压缩的流体能量得以储存，以备做有用功。上述的流体与液压回路相联结，当系统压力升高，流体压缩气体而进入蓄能器；当系统压力降低，压缩气体膨胀，并迫使流体流回液压回路。表 3-1 给出了测试系统中所采用的蓄能器相关参数。

表 3-1 蓄能器相关参数

型号	容积 (L)	几何尺寸 (mm)								重量 (Kg)
		A	B	C	D	d	d ₁	d ₂	d ₃	
NXQ-0.63-L-A	0.63	305	190	50	Φ89	M27×2-6H	Φ32h9 (32×1.9)	Φ37	Φ58	3.65

蓄能器的典型应用：

- 流体储存
- 容积补偿
- 紧急能源
- 压力补偿
- 吸收脉动
- 渗漏补偿
- 涌流控制
- 热胀吸收
- 噪声衰减
- 力学平衡
- 车辆减震
- 增加流量

(3) 燃油压力调节器

压力调节器的原理就是用调节燃油回油量多少的办法，使燃油轨中的压力随进气管压力而变化，从而保持压差为定值。其结构如图 3-5 所示。在金属外壳内有一片涂有橡胶的纤维膜片，它将壳体内腔分为上下两个室。上室与进气管联接，并有一弹簧作用在膜片上；下室则与油道联接，内部充满燃油。膜片上方受力与进气管绝对压力与弹簧力，下方则为燃油压力。当燃油压力超过预设值时，膜片上移，与膜片联动的回油阀开启，燃油压力下降；当进气管绝对压力变化时，膜片同样会带动回油阀上下移动，开、关回油通道或变化回油通道的大小，从而保持燃油压力与一个随进气管绝对压力变化的值^[25]。

在本系统中，燃油压力调节器用于保持油路中的初级压力稳定，经其稳压后的压力为 $350 \pm 1 \text{ kPa}$ ，并把多余的燃油送回油箱。

(4) 燃油滤清器

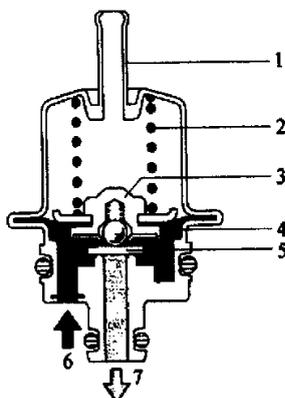


图 3-5 燃油压力调节器

1—进气管接头；2—弹簧；3—支撑架；4—膜片；5—阀；6—进油；7—回油

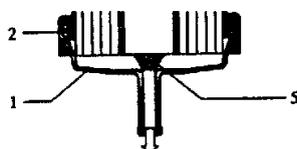


图 3-6 燃油滤清器

1—滤清器盖；2—密封圈；3—滤清器外壳；
4—塞头；5—支承肋板；6—纸质滤芯；7—纸管

汽油喷射与化油器对燃油供给系统的要求有很大的差别。因为喷油器是一个高度精密的部件，容不得燃油中的一点杂质。燃油中的固体微粒会引起磨损，水分会导致锈蚀和膨胀，因此必须用专门的滤清器去除之。图 3-6 为燃油滤清器的结构图。

滤清器通过一系列效应去除固体微粒，诸如过滤、扩压、撞击和阻塞。这些单独作用的过程的过滤或阻留效率与微粒尺寸和通流速度有关。滤清器的厚度（因微粒在滤清器材料中逗留的时间）是与这些因素相关的。当受污染的液体流过滤清器时，杂质微粒沉积在滤清器表面，累积起来形成一层结构极细的“滤泥”，且随着时间的推移而增厚。这层滤泥具有阻留特性，如同实际的过滤材料一样。所以，只有在形成滤泥之后才能达到最大过滤效率。

与毛毡滤清器和流线式（又称盘式）滤清器相比，纸是滤清器的最佳材料。从纸纤维中加工出纸纤毛，并且浸透树脂类物质。纸纤毛以一种特别的方式与燃油通路溶合成一体，使得燃油尽可能以相同的速度流过滤清器的每一个表面。定期更换燃油滤清器可确保汽油喷射系统有效地防止燃油污染和磨损。

3.1.2 水循环系统

水循环系统能在整个系统中保持油温温度控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 变化范围。主要由散热器、水泵热交换器等组成。

(1) 散热器

本系统中直接采用了汽车散热器作为水循环系统的设备。散热器由上水室、下水室、散热器芯等组成，如图 3—7。散热器上水室顶部有加水口，冷却水由此注入整个冷却系并用散热器盖盖住。在上水室和下水室分别装有进水管和出水管，进水管和出水管分别用橡胶软管和气缸盖的出水管和水泵的进水管相连，

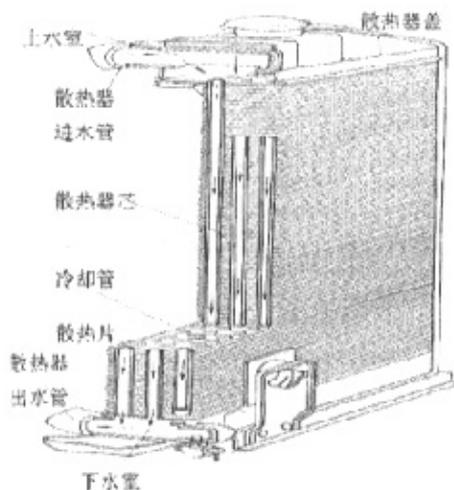


图 3—7 散热器原理图

这样，既便于安装，而且不会漏水。

由于风扇的强力抽吸，空气从前向后高速流过散热器，不断地将流经散热器的水的热量带走。冷却了的水由水泵从散热器底部重新泵入水路。水在水循环系统中不断循环。

(2) 水泵

本系统采用了一个小型水泵给水循环系统循环，用水泵把本系统的冷却液体加压，使之在水路中流动，进而冷却热交换器中的燃油。图 3-8 给出了水泵的基本原理图。

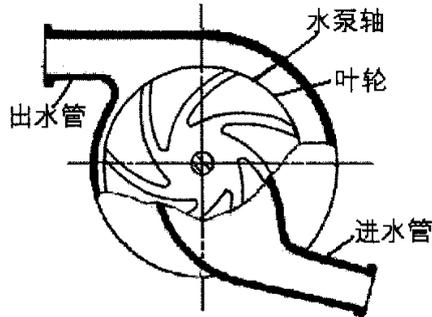


图 3-8 水泵原理图

(3) 热交换器

热交换器内部结构分为两个部分，分别为水路循环中冷却液流经部分和供油系统中燃油流经部分。燃油流经热交换器，被其内部的冷却液冷却后再流出。在该测试系统中用于确保燃油的温度在测试过程中变化范围始终在正负 1 摄氏度。

3.1.3 气路系统

为了满足测试要求，在燃油分配室中通入一定量和压力的空气。主要由空气压缩机、压力表、控制阀等组成。

3.1.4 流量特性测试装置

由于本测试系统采用的是喷油器顶部供油，为了达到测试精度的要求，特自行设计了一个顶部供油的燃油分配室，如图 3-9。该分配室用于给流量测试喷油器提高稳定的测试燃油。顶部供油喷油器则通过固定卡环与燃油分配室装配。

在燃油分配室中，始终通过气路系统保持上方有一定压力的空气。该目的则是为了在喷油器喷射时，对于分配室中的燃油压力泄压的补偿和保证喷射过

程中燃油压力的稳定。

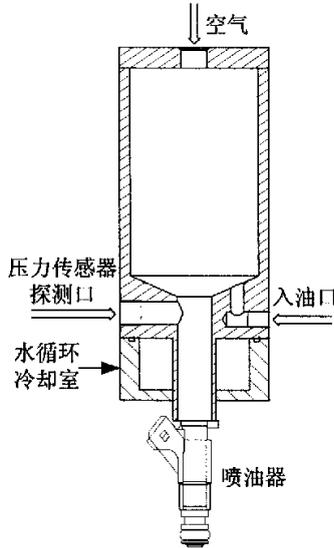


图 3-9 顶部供油分配室

虽然燃油温度在之前的供油系统中已经经过了冷却，但是为了更好的保证和稳定燃油温度在一定误差范围内，特在燃油分配室的设计上，在下方设计了一个水循环冷却室，两者不相通。该冷却室通过进出管路的设计与水循环系统链接。流经燃油分配室的燃油会被冷却室中的冷却液进一步冷却。

为了消除在喷油器入口压力作用下导致的液压差的影响，压力测试装置应该和喷油器入口安装在同一水平平面上。

3.1.5 喷雾特性测试装置

喷雾角和喷雾均匀性测试装置分别用于测试喷雾特性的两个重要参数——喷雾的雾化角度和喷雾的均匀性分布。喷雾特性测试装置根据不同的测试目的设计了两个测试装置。同心圆盘测试装置用于测试喷雾角参数；扇型圆盘测试装置用于测试喷雾分布参数。

3.1.5.1 喷雾角测试原理

本测试系统采用的是空心锥角喷雾测试方法，其定义的喷雾角为所覆盖的喷雾角度中最大喷油量对应的角度。图 3-10 描述了喷雾角测试装置的原理。

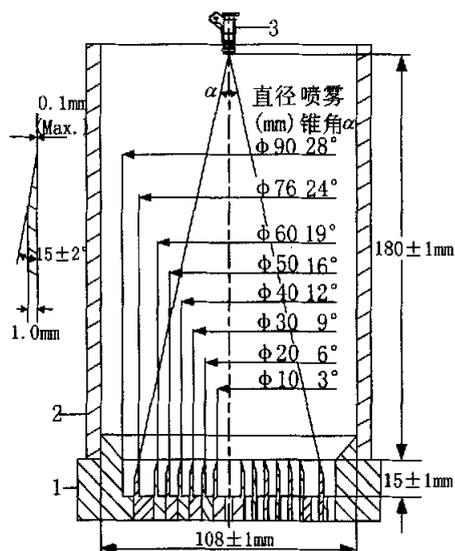


图 3-10 喷雾角测试装置原理图

1—同心圆盘；2—有机玻璃罩；3—电控喷油器

该装置由同心圆盘和有机玻璃罩组成。其中，同心圆盘收集器由八个同心圆腔构成，在加工时采用线切割。每个腔壁的高度为 15 毫米，并且前缘逐渐变小，这样设计的优点是可以把燃油的反弹降低到最低。每个圆腔都有一个小孔与连接管相连，用于计算其所收集的油量大小。运用几何原理可以得出每个同心圆腔对应的喷雾角 α 的计算公式为：

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} &= \frac{d/2}{h}; \\ \alpha &= 2 \arctan \frac{d}{2h} \end{aligned} \quad (3-1)$$

式中 d 为每个同心圆腔的直径, h 为喷油器顶端的喷孔片到收集圆盘腔壁前缘的垂直高度。表 3-2 分别列出了不同的同心圆腔环数所对应的直径, 以及在不同的喷油器安装高度下每个同心圆腔所对应的喷雾角。在作者设计的测试系统中, $h=180\pm 1\text{mm}$ 。

表 3-2 喷油器的安装高度和相应的喷雾锥角

环数	1	2	3	4
直径 (mm)	10	20	30	40
高度 (mm)	喷雾锥角			
180.0	3.2	6.4	9.5	12.7
142.0	4.0	8.1	12.1	16.0
91.7	6.2	12.4	18.6	24.6
65.8	8.7	17.3	17.3	33.8
38.0	15.0	29.5	29.5	55.5
环数	5	6	7	8
直径 (mm)	50	60	76	90
高度 (mm)	喷雾锥角			
180.0	15.8	18.9	23.8	>24
142.0	20.0	23.9	30.0	>30
91.7	30.5	36.2	45.0	>45
65.8	41.6	49.0	60.0	>60
38.0	66.7	76.6	90.0	>90

该测试系统适用于喷雾锥角范围在 3 度到 28 度之间的喷油器, 大部分汽油机喷油器均被涵盖在这个角度范围内。如果喷雾锥角太小, 则流量仅喷入同心圆盘较中心的 1、2 圆腔, 而外圆腔所收集的流量非常有限, 从而无法准确地分析喷雾角的分布。反之如果喷雾锥角过大, 则大部分流量被第 8 圆腔所收集, 也无法分析。

3.1.5.2 喷雾均匀性测试原理

喷雾均匀性测试装置主要由等分扇形圆盘, 有机玻璃罩、耐油密封圈和喷油器等组成, 主要用于单束喷油器的测试。为了与喷雾锥角测试装置安装相匹配, 喷油器的定位高度选定 180mm。等分扇形收集盘由六个面积相等, 分布均匀的扇形区域组成, 如图 3-11。其中, 分割挡板厚度设计为 1mm, 顶端逐渐变小, 同样减小油束的反弹。每个扇形区都有一个小孔与连接管相连, 来计算其所收集的油量的多少。当喷油器在给定的脉宽下连续喷射一段时间后, 通过比较每个扇形区收集的油量大小来分析油束的分布情况。同时亦可以通过透明的有机玻璃罩来观察喷雾的雾化形状。

由于双油束喷油器的喷雾形状为二个圆锥形油束，其喷雾的分布也不是等分发散的，所以可依据本测试装置另设计一个划分数个等分单元的方形收集盘来收集其油束分布流量。

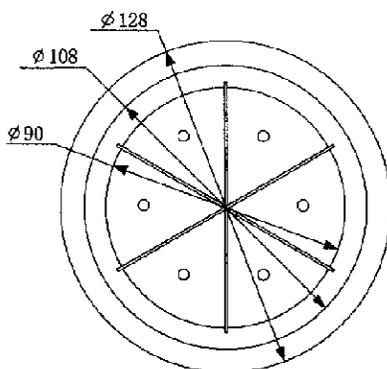


图 3—11 等分扇形圆盘

3.2 系统控制部份的设计

图 3—12 为电控系统实物图。图 3—13 为测试系统控制示意图。电控系统主要由工控机、单片机控制模块、电磁阀驱动模块、监控参数采集模块构成。主要由工控机、单片机控制模块、电磁阀驱动模块、监控参数采集模块构成。

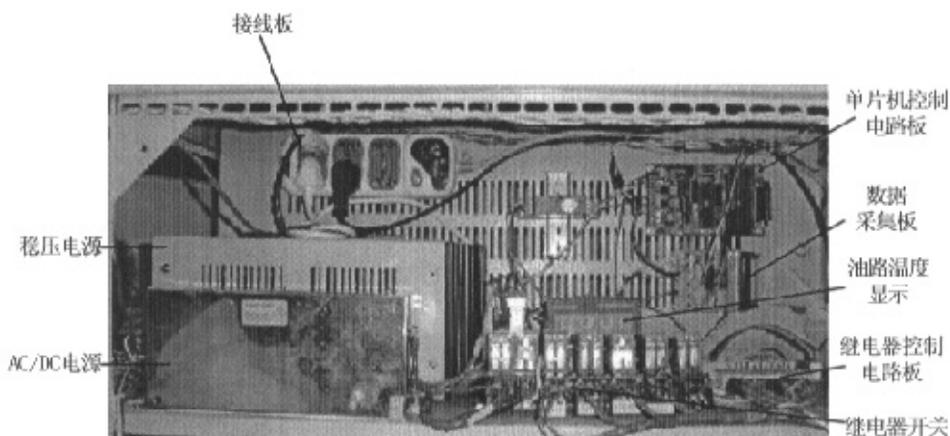


图 3—12 喷油器测试系统电路部份图解

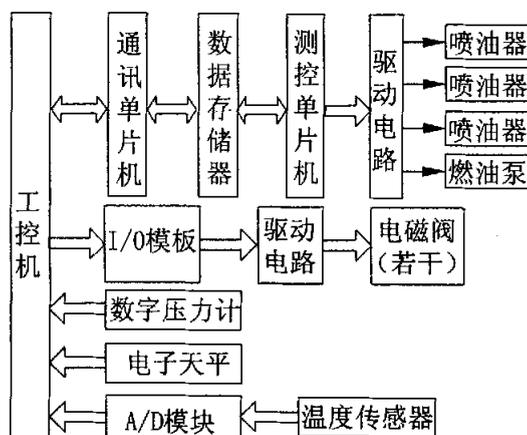


图 3-13 喷油器测试系统电子控制部分示意图

3.2.1 喷油器驱动电路

本测试装置中使用的控制电路是电压式驱动电路，相应使用的喷油器为高阻型喷油器，其线圈阻值为 16Ω 。通过单片机内部脉冲计数来定时，通过预设计数初值的计数方法，使其计数满后自动溢出中断，以此达到单片机给驱动电路发出通电和断电信号，从而实施对喷油器喷油脉宽和周期的精确控制。驱动电路如图 3-14 所示。该电路采用光电耦合器将控制信号输出电路与喷油器驱

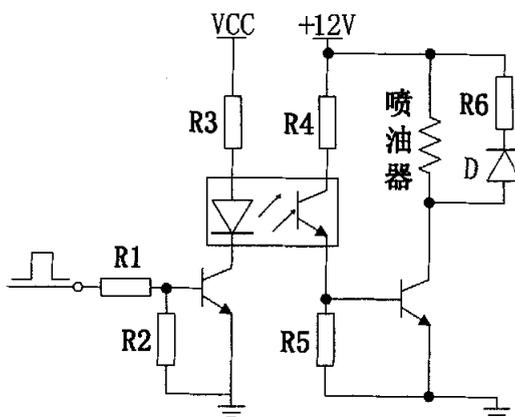


图 3-14 喷油器驱动电路

动电路相隔离，从而抑制喷油器驱动电路的高频干扰进入控制电路部分，以保证其正常工作。图中电阻 $R6$ 和二极管 D 在喷油器关闭时提供放电通路，以防止功率三极管损坏，它们和喷油器线圈组成了喷油器的消弧电路^[26]。

3.2.2 电磁阀控制电路

通过控制 I/O 开关量模块对继电器控制电路进行选择通过，从而控制电磁阀的开启与关闭。本系统中采用的继电器特性如表 3-3 所示。

表 3-3 继电器相关参数

型号	HRS2H-S-DV12V
线圈电压	12V
电阻	700欧
动作电压	8.4V
释放电压	1.2V
功率	200mW

PC-6407 光隔离开关量输出接口卡适用于具有 ISA 总线的 PC 系列微机，具有很好的兼容性，CPU 从目前广泛使用的 64 位处理器直到早期的 16 位处理器均可适用，操作系统可选用经典的 MS-DOS，目前流行的 Windows 系列，高稳定性的 Unix 等多种操作系统以及专业数据采集分析系统 LabVIEW 等软件环境。在硬件的安装上也非常简单，使用时只需将接口卡插入机内任何一个 ISA 总线插槽中，信号电缆从机箱外部直接接入。

本卡适用于各种开关信号的自动控制以及计算机同数字仪器的接口。考虑到在开关量的输出中“开/关”瞬态对计算机干扰十分强烈及现场强电的干扰，本卡采用了光电隔离技术，使计算机与现场信号之间全部隔离，提高了计算机与本卡在工作中的抗干扰能力和抗损毁能力。

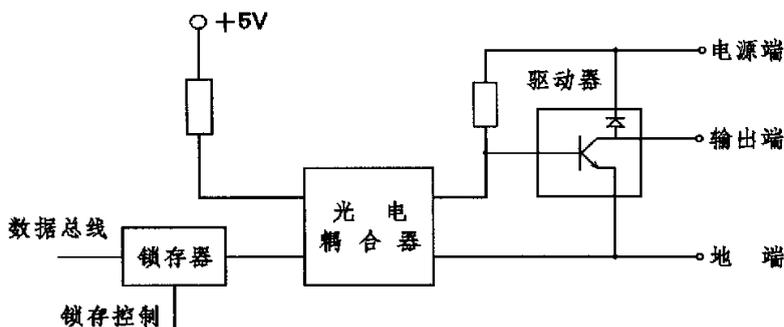


图 3-15 开关量输出部分工作原理

图 3-15 给出了开关量输出部分的工作原理。本卡上的开关量输出为 32 路共地方式，具有上电和主机复位后自动清零功能。每块 PC-6407 光隔离开关量接口卡可配接两块 PS-002 继电器接口板。本卡工作时，计算机送“1”使驱动器三极管导通，计算机送“0”使驱动器三极管截止^[27]。本卡上的输出驱动器内部带有吸收二极管，可有效地吸收感性负载启动时产生的达 600mA 的峰值电流。所有的开关量输出信号均带有锁存功能。当 CPU 对设定的一个 I/O 地址执行一次写操作，就送出了一组（8 路）输出信号。当主机加电启动或使用 RESET 开关使主机硬复位时，本卡上的复位清零电路使各组输出均为零，即驱动器三极管截止^[28]。

3.2.3 单片机控制模块

单片机控制模块主要集成有驱动电路、放大电路、测控单片机、12 位 A/D 转换器，数据存储器和通讯单片机，其中测控单片机和通讯单片机的型号均为 89C52，采用的晶振频率均为 11.0592MHz。软件部分由控制界面、单片机控制程序和串口通讯程序组成，前者由 VB 完成开发，后面两个程序用汇编语言完成编译。

测控单片机使用内部脉冲计数来定时，通过预设计数初值的计数方法，使其计数满后自动溢出中断^[29]，以此达到单片机给驱动电路发出通电和断电信号，从而实施对喷油器喷油脉宽和周期的精确控制^[30]。除此以外测控单片机还接受来自经放大电路和 A/D 转换器转化后的油压和油温数字信号。

通讯单片机主要实现计算机和控制单元的数据传输，通过串口通讯传输的数据主要包括计算机发给控制单元的测试参数及测试命令^[28]，测控单片机传输给计算机的油压和油温信息。

数据存储是一个双口 RAM，通讯单片机和测控单片机都可以对它进行读写，因此通过双口 RAM 实现了通讯单片机和测控单片机的资料共享，实现了通讯单片机和测控单片机的连接。这样测控单片机可以通过通讯单片机得到计算机指定的测试数据、测试命令，计算机也可以通过通讯单片机得到测控单片机接收的传感器数据^[31]。

3.2.4 监控参数的采集

(1) 数字压力计

通过串口 RS232 直接将油路压力数据输入工控机。数字压力测量器用于监测和显示油路的压力大小，其显示位数为 5 位，单位为 kPa，可显示到小数点后二位，既 0.01kPa。同时也可以通过数据传输在电脑界面上显示。

HDPI-2000A2 智能型数字压力计，采用进口高精度压力传感器，24 位高分辨率 A/D 转换器，以单片机为核心的高精度压力测量和校验仪器^[32]。压力计能存储检定数据，连接微机即可打印检定结果。减少人为误差提高检定效率，使计量检定工作迈入自动化。

数字压力计主要用于普通压力表、精密压力表和压力变送器的校验和检定，也可作为压力基准在实验室及压力仪器生产过程中使用。

(2) 电子天平

电子天平用于测试燃油的质量流量，通过串口 RS232 直接将质量流量数据输入工控机^[33]。该测试系统中所采用的电子天平具有以下特点：称量迅速；稳定性高；液晶显示；交直流两用；具有计件、单位制转换(克、盎司、克拉、千克、磅)和百分比称重等。表 3-4 给出了该电子天平的一些相关参数。

表 3-4 电子天平相关参数

称量范围(g)	可读性(g)	重复性(≤g)	线性(≤g)
500	0.01	±0.01	±0.02

数据通讯协议：

天平使用 8051 单片机串行方式 1：一位起始位，一位停止位；

单个字节：

D7 位 检验位

D6~D0 位 ASCII 码

首先根据所接外设（串行打印机或台式计算机）设置好 RS232C 输出方式、波特率、奇偶检验位

一个字符串的输出格式：

1
2
3 4 5 6 7 8 9 10
11 12
13 14
15
16
 士号 空码 称重区 空码 单位区 回车 换行

13~14 是单位区，与天平显示有可能不一致。具体代码表示如下表 3-5 所示：

表 3-5 电子天平单位具体代码

天平显示	输出	
	13	14
g	g (小写)	空码
k	o (小写)	z (小写)
ct	c (小写)	t (小写)
pcs	p (小写)	空码
%	%	空码

(3) 温度传感器数据采集

本系统采用了快速响应特性的负温度系数（NTC）热敏电阻作为其温度传感元件。负温度系数特性的半导体热敏电阻的输出特性为热敏电阻阻值高低与温度冷热的变化成反比关系：即当温度升高时，热敏电阻的输出阻值下降；当温度降低时，热敏电阻的输出阻值增加。

3.3 测试系统软件开发

本测试系统运用 Visual Basic 6.0 软件开发而成。具有界面直观，操作简便等特点。本系统包括喷油器特性测试、喷油器电压测试、喷油器喷射分布测试以及手动测试四种测试项目。

3.3.1 喷油器特性测试

系统进入的默认界面为喷油器特性测试中的时间特性测试项目（如图 3-16），如需要进入其它的测试项目，可选择菜单中对应的相关测试项目。同时也可选择喷油器特性测试下拉菜单中的测试项目进入相关特性的测试。

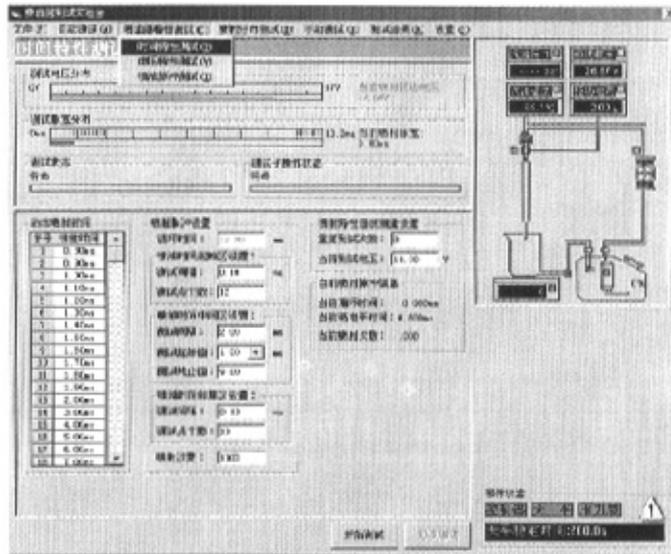


图 3-16 测试系统主界面

3.3.2 时间特性测试

3.3.2.1 主要参数设定

- ◇ 循环时间：为 10ms，不能被改动。
- ◇ 喷油时间起始区设置：设定喷油初始的喷油脉宽。推荐设定 12 个测试点，每个间隔为 0.10ms，即 0.8—1.9ms。
- ◇ 喷油时间中间区设置：设定喷油线性段需测试的范围和喷油脉宽。推荐设定范围 2.0ms—9.0ms 之间，时间间隔 0.1ms。
- ◇ 喷油时间结尾区设置：设定喷油结束段的测试间隔和测试点个数。从喷油中区的终止值开始到循环时间的结束值。推荐测试间隔 0.1ms，测试个数 10。

- ◇ 测试次数：多次循环可增加喷油量，方便计量。推荐 1000 次。
- ◇ 喷油特性曲线测试设置：设定需要重复测试的次数和测试电压。推荐重复测试 3 次，电压 14V。

3.3.3 电压特性测试

图 3-17 为电压特性测试界面。电压特性的测试主要是分析喷油器开启的最小电压和稳定的驱动电压大小（图 3-18），以及对于电压的喷油量修正曲线（图 3-19）。

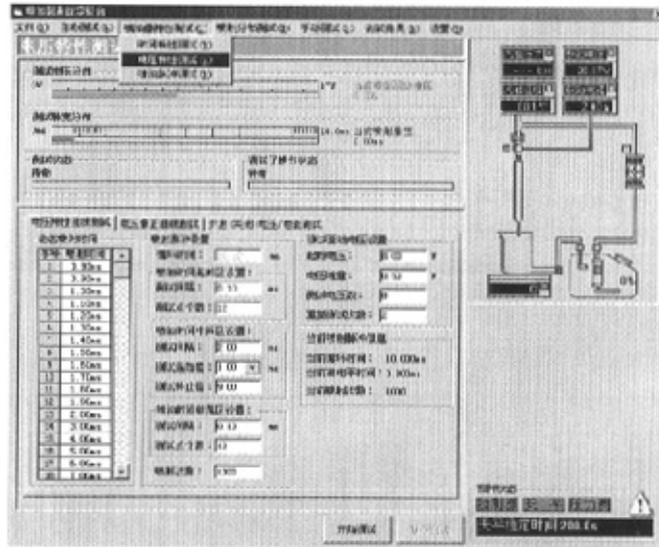


图 3-17 电压特性测试界面

3.3.3.1 电压特性曲线测试参数的设定

- ◇ 测试驱动电压设置：给出测试的电压范围、电压间隔增量以及测试点的个数。推荐起始电压 8V，电压增量 0.5V，测试电压数 9。
- ◇ 说明：便于测试曲线的相关比较，电压特性测试的喷油脉冲设置不能修改，沿用之前时间特性测试的设置量。

3.3.3.2 喷油器开启电压（电流）特性测试

- ◇ 起始电压：测试开启电压的起始值，推荐 3V。

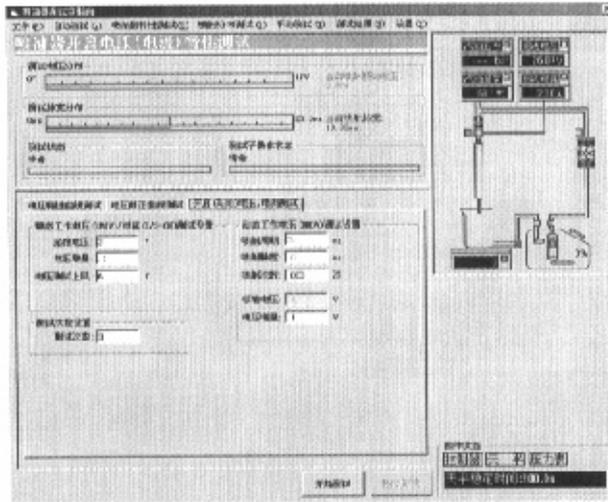


图 3-18 喷油器开启电压（电流）特性测试

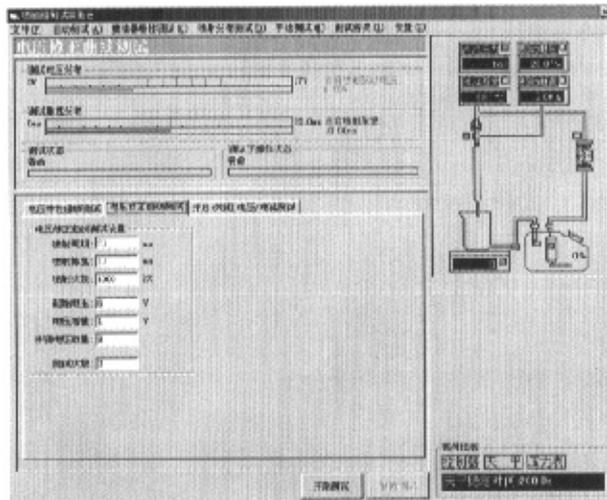


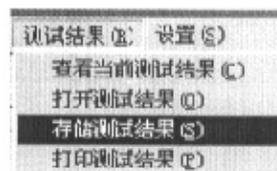
图 3-19 电压修正曲线测试界面

- ◇ 电压增量：从起始电压开始，增量的间隔值。推荐 0.1V。
- ◇ 电压测试上限：测试的电压终值。推荐 6V。
- ◇ 动态工作电压测试设置：喷油周期、喷油脉宽、标准电压为默认值。

3.3.3.3 电压修正曲线测试

- ◇ 喷油周期、喷油脉宽默认，不能设置。

- ◇ 喷油次数：推荐 1000 次。
- ◇ 起始电压、电压增量、测试次数同 3.3.3.2。
- ◇ 待测电压数量：测试参数点，推荐 9。



3.3.4 测试结果显示

图 3-20 测试结果下拉菜单

点击测试结果菜单（如图 3-20），“查看当前测试结果”则进入目前测试项目的测试结果显示界面；“打开测试结果”则可在界面显示以前测试所存储的结果；“存储测试结果”则对当前测试结果进行存储；“打印测试结果”则对所选测试结果进行打印。

3.3.4.1 喷射过程测试

图 3-21 为喷射过程测试结果显示界面。在该界面图表中可显示出喷油器喷射量的测试曲线。

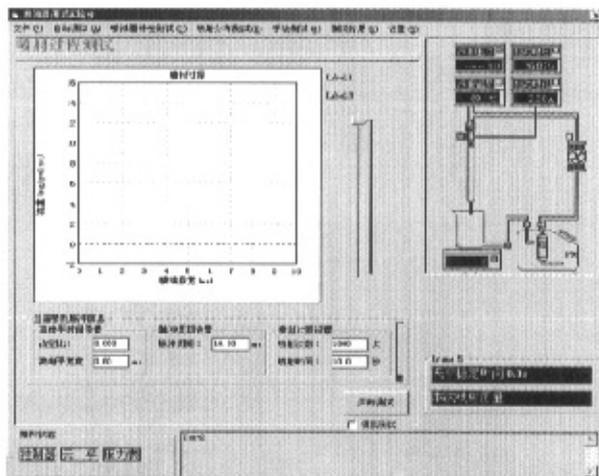


图 3-21 喷射过程测试结果显示

3.3.4.2 喷射特性测试结果

图 3-22 为喷射特性测试结果显示界面。在该界面上，可以显示出喷油特征流量曲线、平均喷射量偏差曲线、线性偏差曲线、动态流量曲线，以及在下方看到相关特性参数的计算结果。同时可以通过菜单的选择切换到不同的测试结果显示界面。

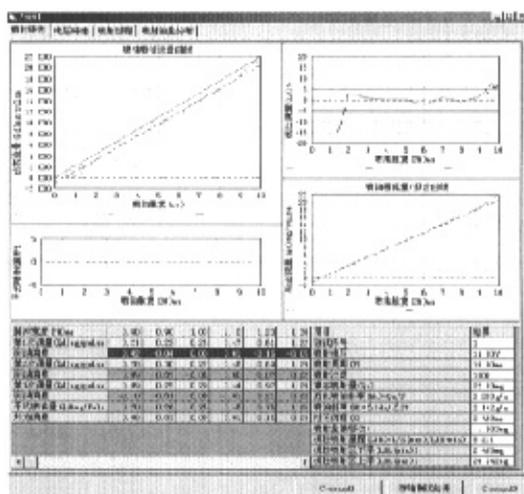


图 3-22 喷射特性测试结果显示界面

3.3.5 喷射分布测试

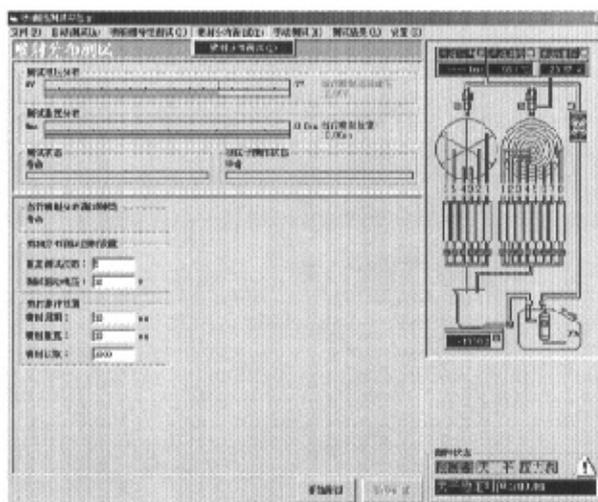


图 3-23 喷射分布测试

图 3-23 为喷射分布测试界面。部分参数设置如下：

- ◇ 重复测试次数：推荐重复测试次数 5 次。
- ◇ 测试驱动电压：设定为 12V。
- ◇ 喷射循环时间：喷射周期，设定 10ms。
- ◇ 喷射高电平时间：喷油脉宽，设定 10ms，即喷油器在喷射周期全开。
- ◇ 喷射次数：推荐 1000 次。

3.3.5.1 喷射油量分布测试结果

图 3-24 为喷射油量分布测试结果显示界面。在该界面中，分别给出了反映喷雾分布均匀性、喷雾测试角分布的显示。在界面上方可以看到目前测试的基本状况，下方则表示出了每个测试量的数据。

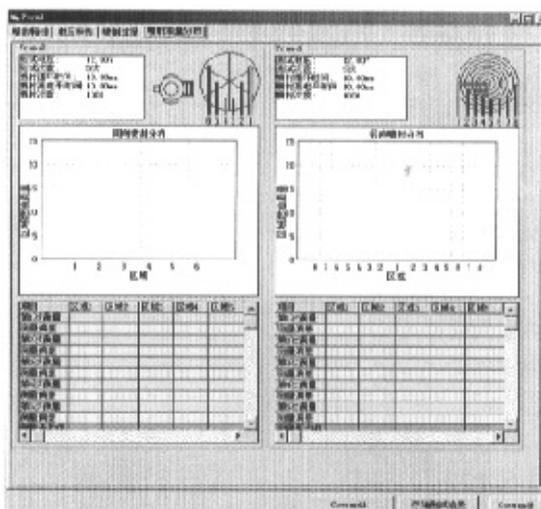


图 3-24 喷射油量分布测试结果显示界面

3.3.6 手动测试

方便使用者操作，本测试系统同时也提供手动操作，在该模式下，使用者可以自行控制各个测试仪器的状态。图 3-25 为手动测试操作界面。具体说明如下：

- ◇ 当前喷射脉冲信息：设定相关喷射周期，喷油脉宽，喷射次数以及驱动电压等参数。
- ◇ 喷油器选择：选择需要测试项目对应的喷油器。

- ◇ 轴向喷射阀门：当选择周向分布喷油器时，该项可选择。1-6 对应各个扇型区流量通道中电磁阀的开启和关闭（选中为开启），也可选择全开。
- ◇ 径向喷射阀门：当选择径向分布喷油器时，该项可选择。1-8 对应同心圆各个腔流量通道中电磁阀限额开启和关闭（选中为开启），也可选择全开。
- ◇ 其它控制：可对其它测试仪器的状态进行选择，一般选中为开启。其中包括卸油阀、气泵、油泵、冷却器、卸压阀、气路阀、油路阀等。
- ◇ 天平控制：在自动控制中天平的去皮、归零、卸油（收集容器中油量过多时）都会在相应的时间控制中根据实际情况自行完成。在手动操作时，操作者需要根据界面相关参数的实时显示对其进行选择。

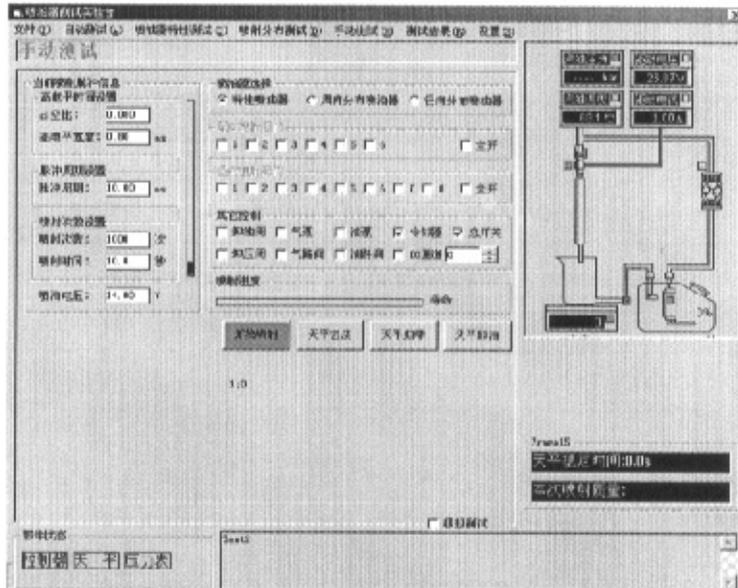


图 3-25 手动测试操作界面

第 4 章 流量及喷雾特性试验和分析

4.1 流量特性测试

4.1.1 标准测试条件及预处理

(1) 测试液

由于试验条件的原因，在所设计的测试系统中，直接采用了发动机燃烧液体——汽油为测试液。因此对于试验环境的要求，以及操作人员的使用都有一定的安全性规范^[34]。

(2) 环境温度

在测试前，应保证环境温度为 $20\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 。测试过程中，在喷油器燃油入口处测定的测试液温度稳定在 $20\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 测试油压

通过喷油器的压力因实际应用不同而有差异，测试过程中其波动范围应控制在 $\pm 1\text{kPa}$ 内，测量位置在喷油器燃油入口处^[35]。

(4) 驱动电压

测试系统中采用的驱动电压为 12.0 ± 0.05 伏直流电。

(5) 预处理

测试前用测试液清洗喷油器和测试装置，以除去系统中的空气、蒸汽和杂质；以 5ms 为喷油脉宽，10ms 为一喷油周期，让喷油器持续喷射 1000 次；用以清洗的测试液一次性通过喷油器，不回收使用。

4.1.2 基本特征参数及定义

(1) 喷油周期 (P) ——喷射频率的倒数，即：一次喷油开始时刻与下次喷油开始时刻之间的时间间隔，单位为 ms/pulse。

(2) 喷油脉宽 (PW) ——喷油器一次喷油的时间 (ms)。

(3) 静态喷射率 (Q_s) ——当喷油器处于全开位置时流经喷油器的燃油量随时

间的变化。它是喷油器的最大喷射率^[36]。可近似用做喷油器流量曲线的喷油斜率 (m_a)。

(4) 动态喷射量 (Q_d) ——在给定喷油脉宽后, 喷油器在单位脉宽下所供给的燃油量 (mg/pulse)。也就是在动态工作过程中实际供给的燃油量。

(5) 动态喷射率 (Q) ——在给定的喷油脉宽 (PW) 和脉冲周期 (T) 下, 喷油器单位时间的喷油量。这一术语用来指明喷油器的喷油率 (单位 g/s)。

$$Q = Q_d/P \quad (4-1)$$

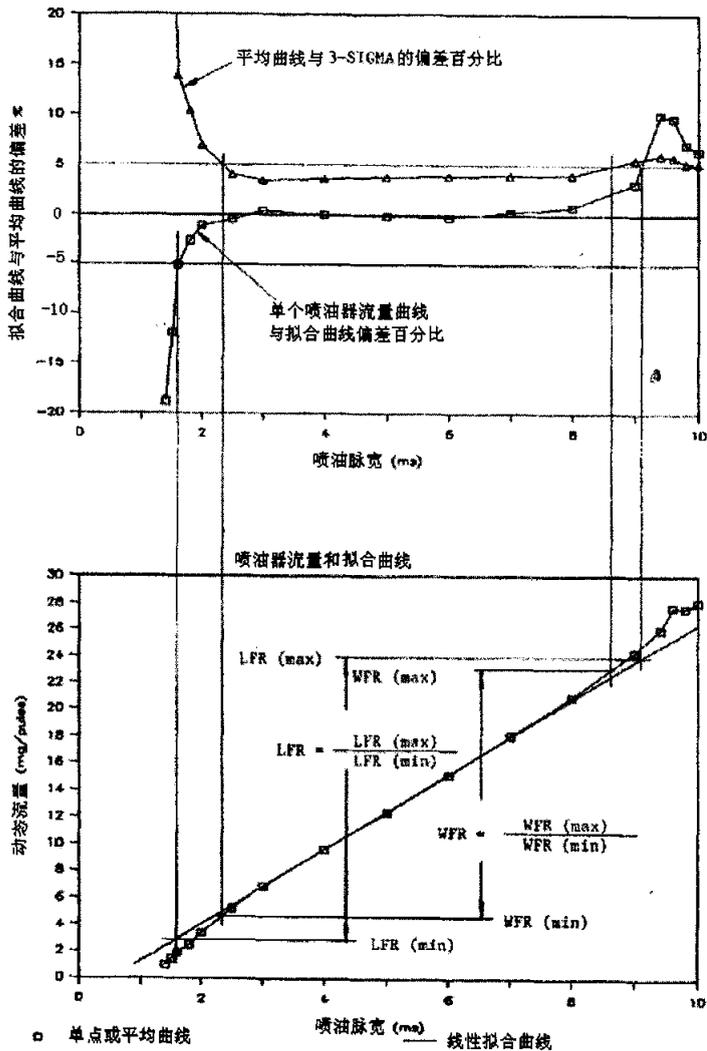


图 4-1 流量范围计算

(6) 动态流量计算值 (Q_{dc}) ——根据计算 (线性) 流量曲线 (mg/pulse), 在给定的喷油脉宽下, 喷油器单位脉宽的计算燃油供给量。

$$Q_{dc}=m(PW)-Y=m(PW-X) \quad (4-2)$$

(7) 动态定点 (PWXX) ——喷油脉宽 (单位 ms), 在该喷油脉宽下, 所给定的燃油供给在喷油器的制造过程中就进行了设定。它确定了定点喷油量 Q_{SP} 、喷油器动态性能以及偏移特性。它体现了单脉冲喷油量 Q_d 点或喷油脉宽, 并在该喷油脉宽下使得一组喷油器的流量偏差达到最小。

(8) 动态定点喷油量 (Q_{SP}) ——喷油器在定点脉宽启动时, 喷油器单位脉宽下的燃油测定量 (mg/pulse)。这个流量用做即将进行的检查和质量控制。

(9) 线性偏差 (LD) ——理论上, 在喷油器的全程流量范围内, 喷油器流量应该是线性的, 且与喷油脉宽成正比。但是实际上并不如此, 因为在流量曲线 (图 4-1) 的末端发生了重大线性偏差。为了测量线性偏差, 至少要在 3, 4, 5, 6, 7ms/pulse (周期为 10ms) 这五个中间流量点进行平方回归分析。单脉冲喷油量 Q_d 和喷油脉宽 PW 分别是从属变量和独立变量。分析结果曲线称为线性化流量曲线。那么线性偏差就定义为在给定喷油脉宽下测量流量或实际流量 (Q_d) 和计算流量 (计算流量除以喷油脉宽) 之差与计算流量的百分比。

$$LD = \frac{Q_d - Q_{dc}}{Q_{dc}} \times 100\% \quad (4-3)$$

(10) 喷油斜率 (M) ——根据计算线性回归流量曲线 (mg/ms), 定义为单位脉宽下喷油量的变化。

$$m = \frac{\Delta Q_{dc}}{\Delta PW} \quad (4-4)$$

(11) 近似喷油斜率 (M_a) ——当喷油周期与喷油脉宽相等时, 用以表示喷油器流量曲线斜率 m 的近似值, 单位为 mg/pulse (见图 4-1)。

$$m_a = \frac{Q_s}{P} \quad (4-5)$$

其中: $Q_s = (\text{mg/pulse})$, $P = PW (\text{ms})$

(12) 时间偏移 (X) ——计算线性回归流量曲线沿喷油脉宽轴方向上离原点的位移量 (图 4-1)。

(13) 喷油量偏移 (Y) ——线性回归计算流量曲线在 Q_d 轴方向上离原点的位移量 (图 4-1)。

(14) 流量范围 (LFR 和 WFR) ——喷油器的一个比较重要的特性是它的最大和最小燃油流量, 并由流量范围来衡量, 流量范围定义为最大动态喷油量和最小

动态喷油量之比。计算流量范围有两种方法：线性流量范围（LFR）和工作流量范围（WFR）。

（15）线性流量范围（LFR）——这一数值是根据单个喷油器线性流量曲线得出，并用它来比较不同设计或制造的喷油器之间的线性流量范围。这一数值定义为：线性曲线上，在各自脉宽下最大流量点和最小流量点对应的流量之比。在各自的喷油脉宽下，测量流量与线性流量曲线有 $\pm 5.0\%$ 的偏差（图4-1）。

$$LFR = \frac{LFR(\max)}{LFR(\min)} \quad (4-6)$$

（16）工作流量范围（WFR）——这一概念是基于一组喷油器（至少24支）的，它反映了这组喷油器产品的正态分布。工程师们对这一比值很感兴趣，因为它提供了不同喷油器之间差异的相对程度，即：这一组喷油器的流量范围在一定的误差范围之内。它定义为：最大工作流量点对应的流量与最小流量点对应的流量的比值，所有的喷油器对应的平均流量曲线在这两点之间，其波动在 $\pm 5.0\%$ 以内，如图4-1所示。

$$WFR = \frac{WFR(\max)}{WFR(\min)} \quad (4-7)$$

4.1.2 重要参数测试及分析

4.1.2.1 静态喷射率（ Q_s ）

在试验中对于所用的喷油器，在标准测试条件下，让其喷射20秒，得到质量流量为37.74g算得其静态喷射率为1.887g/s。图4-2给出了相应参数的曲线。

4.1.2.2 动态喷射量（ Q_d ）

在保证测试时油压、油温和驱动电压不变的情况下，给定喷油器周期 $T=10\text{ms}$ ，喷油脉宽从1.2ms逐渐增加到10ms。其中，小流量脉宽范围（1.2-2.0ms）步长为0.1ms，线性流量脉宽范围（2.0-9.0ms）步长为0.5ms，大流量脉宽范围（9.0ms-9.5ms）步长为0.1ms，9.5-10ms步长为0.5ms，共29个测试点，在每个测试点上进行1000次喷射，即可求出单位脉宽下1000次的喷射量，其单位为ml/1000次，通过密度转换后即可求出相应的动态流量点，作出Q-t图（图5）。试验表明小于1.2ms的脉宽不足以开启喷油器，9.5-10ms范围内喷油器保持全开，其流量也保持不变，数值上，喷油器动态流量曲线线性段的斜率大小就是静态流量值，静态流量的单位为g/s。

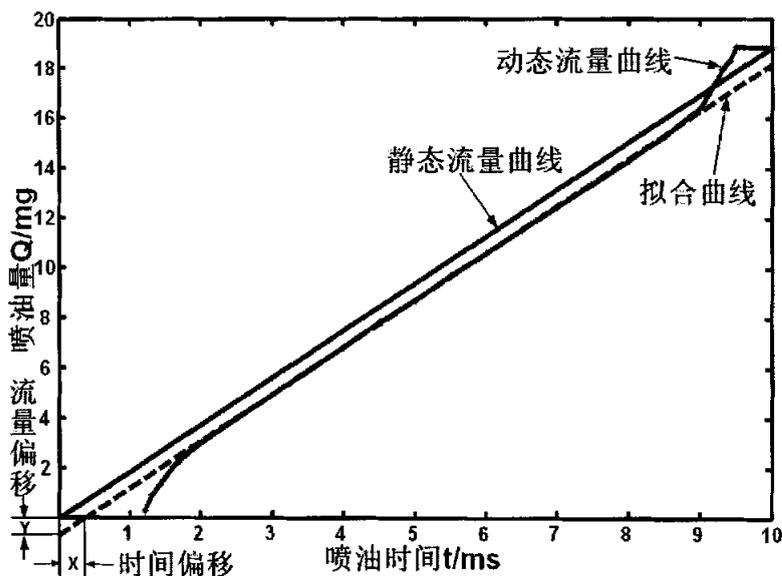


图 4-2 喷油器流量曲线

理论上，在喷油器的全程流量范围内，喷油器的流量应该是线性的，且与喷油脉宽成正比，但实际上并非如此：在动态流量曲线的始端即喷油器开启阶段，由于脉宽太小加之开启延迟，球阀刚刚开启（或还没有到达全开位置）就收到断电信号，阀杆组件由向上加速运动转为减速运动，速度为零后向下加速运动直到与阀座紧密贴合，因此在小脉宽范围流量随脉宽的增加而成非线性增长；在动态流量曲线的末端，由于关闭延迟，喷油器在收到断油脉冲信号后，阀杆组件不能及时下落，等到刚刚下落不久（或还未与阀座贴合）喷油器就收到供油脉冲信号，使其再次被衔铁吸合，所以在脉宽阶段随脉宽的增加，流量有所增加并逐渐趋于平缓，到最后随脉宽增加流量已不再变化，阀杆组件始终处于全开位置。

4.1.2.3 喷油斜率 m

用最小二乘法对测得的动态流量曲线线性段（在本计算中取的是 2.5—8.5ms，间隔 0.5ms）的动态流量点进行求解便得出流量拟合曲线，从而求出 m （即该直线的斜率）， m 定义为单位脉宽下的喷油量的变化，通过公式 4-4 计算后的流量拟合曲线的斜率 $m=1.879\text{mg/ms}$ ，与前面测得的静态流量值在数值上两者几乎相等。

4.1.2.4 计算喷油量 Q_{dc}

根据流量拟合曲线可以计算出喷油器在任一脉宽下的计算喷油量 Q_{dc} ，通过公式4-2计算出本试验中的时间偏移量 $X=0.369ms$ ，流量偏移量 $Y=-0.696mg$ 。

4.1.2.5 线性偏差 (LD)

图6是由试验数据得到的喷油器动态流量曲线与流量拟合曲线的偏差百分比的曲线示意图。

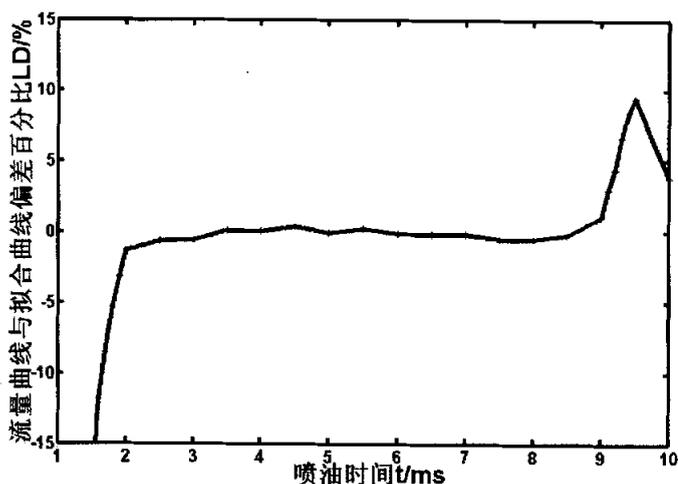


图 4-3 动态流量曲线与拟合曲线偏差

4.1.2.6 线性流量范围 (LFR)

由图 4-2、图 4-3 可以得出喷油器的线性流量范围，它是用线性流量偏差的 5% 处的实际流量的最大值 Q_{max} 与最小值 Q_{min} 的比值来表示出来的，即通过公式 4-6 可计算得到。

本测试中，喷油脉宽为 1.8ms 时对应的流量 $Q_{min}=2.96g$ ，9.2ms 时对应的流量 $Q_{max}=17.71g$ ，算得 $LFR=5.98$ ，通过此数值可以比较不同喷油器之间的动态流量范围。

4.1.2.7 重复性测试

理论上是喷油器脉冲之间喷油率变动的量度。从发动机排放控制角度来说它是一个重要因素。精确决定一次喷射脉冲的质量流量所要求的设备相当昂贵，精度也受到限制。因此，可采取以下办法来确定：

喷油器应在流量曲线中的两点进行标准状态测试：

- (1) 静态喷油率 Q_s ；

(2) 2.5 毫秒单脉冲喷油量 Q_d 点。

在每个测试点至少要进行 30 次测量。那么以百分比形式给出的重复性定义如下：

$$\text{静态重复性} = \frac{Q_s(\max) - Q_s(\min)}{Q_s(\text{avg})} \times 100\% \quad (4-8)$$

$$\text{动态重复性} = \frac{Q_s(\max) - Q_s(\min)}{Q_s(\text{avg})} \times 100\% \quad (4-9)$$

4.2 喷雾特性参数测试

4.2.1 油束的特征参数

(1) 贯穿距离 L

贯穿距离又称为油束射程，它主要取决于喷油压力。其大小对燃料在燃烧室中的分布有很大影响，并不一定越大越好，这要根据混合气形成的机理与燃烧室形状具体分析。如果燃烧尺寸小而贯穿距离过大就会有较多的燃料喷到燃烧室壁面上，造成空间混合气太稀。反之如果贯穿距离过小，则燃料分布集中，混合气分布不均匀，空气利用率下降。

(2) 喷雾锥角 α

喷雾锥角与喷油器的结构有很大关系。它反映了油束的紧密程度，喷雾锥角大，说明油束松散，一般雾化油滴的颗粒较细；喷雾锥角小，则说明油束紧密，油滴颗粒一般也较粗^[37]。

(3) 雾化质量

(a) 油滴的平均直径

发动机的各种燃料喷射系统喷雾的质量是有差别的，这种差别将直接导致发动机各项性能的好坏，其影响是巨大的。评价一个燃料喷射系统雾化的质量，最为有效的方法是研究本系统雾化油滴的细微度^[38]。

(b) 油滴的尺寸和速度分布

通常，雾化油滴的尺寸范围很广。平均直径并不能反映不同粒径油滴的数量和质量，这样就有了油滴尺寸的概率密度分布函数^[39]。油滴尺寸分布对于评

估雾化质量，以及油滴与环境气体之间的质量和热量传输的计算十分有益。

4.2.2 喷雾测试条件及准备措施

(1) 等分扇形圆盘收集器一定要在喷油器的喷油锥角顶点的正下方。

(2) 在设计时，通过加工精度和装配精度保证喷油器的安装基准和同心圆盘收集器的中心线之间的误差控制在 0.025mm 以内。

(3) 测试前用测试液清洗喷油器和测试装置^[40]，以除去系统中的空气、蒸汽和杂质；以 5ms 为喷油脉宽，10ms 为一喷油周期，让喷油器持续喷射 1500 次；用以清洗的测试液一次性通过喷油器，不能回收使用。

4.2.3 喷雾角测试结果

以某一型号喷油器为例，测试其喷雾角分布。通过计算机操作界面输入喷油器的喷射周期以及连续喷射次数（多组试验中设定为一恒值），喷油量可以通过质量法直接从电子天平上读出。运用几何原理可以得出每个同心圆腔对应的喷雾角 α 的计算公式为：

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} &= \frac{d/2}{h} \\ \alpha &= 2 \arctan \frac{d}{2h} \end{aligned} \quad (4-10)$$

式中 d 为每个同心圆腔的直径， h 为喷油器顶端的喷孔片到收集圆盘腔壁前缘的垂直高度。表 1 分别列出了不同的同心圆腔环数所对应的直径，以及在不同的喷油器安装高度下每个同心圆腔所对应的喷雾角。在测试系统中， $h = 180 \pm 1 \text{mm}$ 。

通过多组试验，分别记录下各个同心圆腔所收集的喷油量，并计算出其平均值占总喷油量平均值的百分比，如图 4-4 所示，编号 1-8 分别对应由内到外分布的各个同心圆腔。由图可以看出，从中心到外圈，收集流量先增加后减少，最大值出现在第 4 个同心圆腔。由此可以得知该喷油器的最大锥角分布在圆腔 4，在本装置系统中，第 4 个同心圆腔的直径 $d_4 = 40 \text{mm}$ ，由公式 (1) 可求出喷雾角 $\alpha = 12.731^\circ$ 。这个值也与汽油机喷油器的雾化角较小的实际情况相吻合。表 4-1 给出了喷雾角测试数据。

表 4-1 喷雾角测试数据

次数	各个试管对应喷油量 (g)								喷油总量
	1	2	3	5	4	6	7	8	
1	1.01	1.81	3.25	15.69	6.87	4.95	3.62	1.95	39.14
2	0.87	1.81	3.47	15.29	6.87	5.21	3.25	2.31	39.08
3	0.94	1.67	3.54	15.47	6.36	4.79	3.40	2.3859	38.55
4	0.87	1.59	3.62	15.04	6.51	5.13	3.25	2.53	38.54
平均值	0.92	1.72	3.47	15.38	6.65	4.70	3.38	2.30	38.83
百分比	2.37%	4.42%	8.94%	39.59%	17.13%	12.10%	8.71%	5.91%	

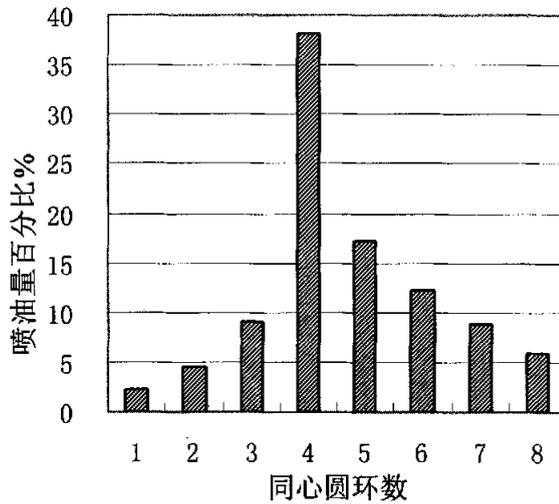


图 4-4 各同心圆腔对应的油量百分比

4.2.4 喷雾均匀性测试结果

记录试验中各个扇形区对应的收集喷油量并计算其平均值占总喷油量平均值的百分比，如图 4-5 所示，编号 1-6 分别代表 6 个均匀分布的扇形区。

通过试验数据可以看出，6 个等分扇形区域对应的喷油量百分比分布在

16.52%到 16.83%之间，由此可得出每个扇形区的喷油量基本相等，这就反映出该喷油器的喷雾分布非常均匀的^[41]。表 4-2 给出了扇型圆盘收集的流量数据。

表 4-2 扇型圆盘收集的流量数据

次数	各个试管对应喷油量 (g)						喷油总量
	1	2	3	4	5	6	
1	7.25	7.25	7.25	7.25	7.26	7.26	43.52
2	7.48	7.48	7.49	7.49	7.48	7.48	44.91
3	7.57	7.57	7.56	7.56	7.56	7.58	45.40
4	7.45	7.45	7.46	7.44	7.45	7.43	44.68
平均值	7.438	7.437	7.439	7.438	7.440	7.438	44.63
百分比	16.667%	16.665%	16.667%	16.665%	16.670%	16.666%	

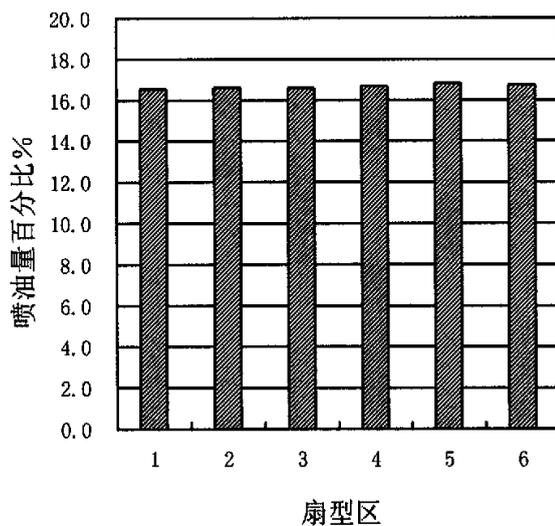


图 4-5 各扇形区对应的油量百分比

4.3 相关修正曲线

4.3.1 不同电压下的 Q-t 图

汽车运行时，蓄电池直接将电压供给喷油器，蓄电池的电压是有波动的，其必将影响喷油器的流量特性^[42]。因此需要通过蓄电池电压与流量特性曲线的关系对电压波动进行补偿。表 4-3 给出了不同电压下的流量特性数据。

表 4-3 不同电压下的流量特性数据

喷油周期 (ms)	质量流量 (mg)				喷油周期 (ms)	质量流量 (mg)			
	14V	12V	10V	8V		14V	12V	10V	8V
0.80	0.28	0.00	0.00	0.00	4.50	9.71	8.01	6.12	3.40
0.90	0.90	0.00	0.00	0.00	5.00	10.62	8.99	7.05	4.27
1.02	1.30	0.00	0.00	0.00	5.50	11.56	9.89	7.96	5.20
1.30	1.70	0.28	0.00	0.00	6.00	12.50	10.87	8.90	6.11
1.40	2.05	1.05	0.00	0.00	6.50	13.40	11.81	9.87	7.05
1.50	2.35	1.72	0.00	0.00	7.00	14.34	12.71	10.81	8.02
1.60	2.66	2.18	0.00	0.00	7.50	15.32	13.65	11.79	8.96
1.70	2.90	2.40	0.00	0.00	8.00	16.47	14.63	12.69	9.94
1.80	3.17	2.75	0.28	0.00	8.50	16.98	15.61	13.67	10.84
1.90	4.00	3.04	1.00	0.00	9.00	17.41	16.47	14.61	13.20
2.00	4.94	3.50	1.74	0.00	9.10	17.99	16.98	15.48	14.84
2.50	5.92	4.33	2.50	0.00	9.20	18.32	16.98	15.89	15.48
3.00	6.86	5.16	3.40	0.00	9.30	18.57	18.57	16.45	16.21
3.50	7.83	6.10	4.31	1.55	9.40	18.57	18.57	17.00	17.00
4.00	8.74	7.07	5.25	2.46	9.50	18.57	18.57	17.43	17.10
4.50	9.71	8.01	6.12	3.40	10.00	18.57	18.57	18.57	18.57

试验中通过调整加载在喷油器两端的输入电压，以此得出不同电压下的 $Q-t$ 图，见图 4-6。由图可知，随电压的减小，喷油器开启时间逐渐增大，同一喷油脉宽下对应的喷油量不断减小，在大流量范围，这种减小的趋势明显缩小。由此，喷油器在实际工作时，若蓄电池的电压较低，适当增加喷油时间，而当电压较高时相应减少喷油时间，混合气的空燃比就可得到精确控制。

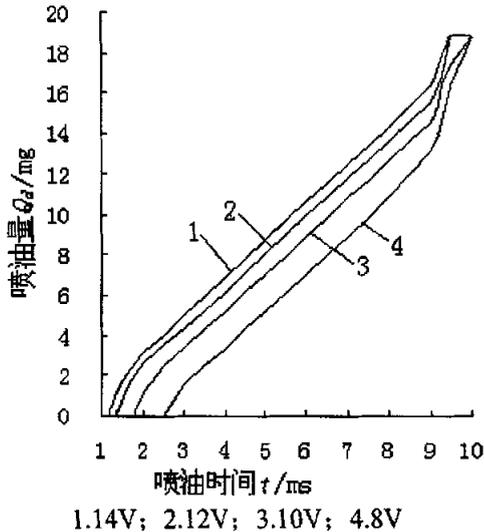
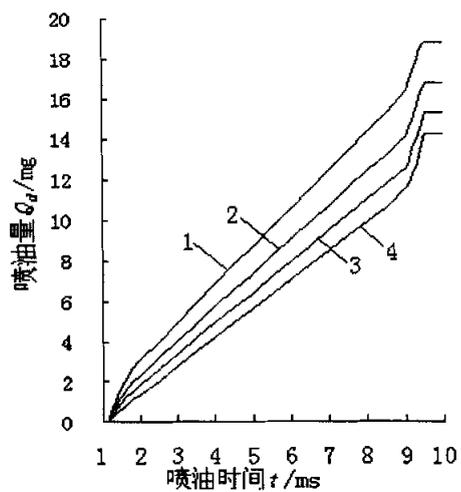


图 4-6 不同电压下的动态喷油量曲线

4.3.2 不同油压下的 $Q-t$ 图

与电压类似，供油压力也将影响喷油器的流量特性。通过在测试系统中安装一个泄压阀，调整泄压阀的开度进行油压调整，作出不同油压下的 $Q-t$ 图，得出油压对喷油器流量特性的影响，如图 4-7 所示。随喷射压力的减小，对应的流量曲线线性段的斜率也不断变小，即喷油量也明显减小，因此，其喷油量也应随喷射压力的不同作出相应调整。



1.300kPa; 2.280kPa; 3.260kPa; 4.245kPa

图 4-7 不同油压下的动态喷油量曲线

第 5 章 总结

本文通过对喷油器喷射动态过程进行分析,从理论上对于喷油器工作原理进行了研究,设计开发了电控喷油器性能测试台架,通过大量试验,得到了喷油器相关的流量和喷雾性能曲线和参数。通过电控系统和计算机操作界面的设计使该台架达到全自动控制程度。下面对主要工作作如下总结:

(1) 喷油器动态过程模拟分析

从理论上对喷油器喷射动态过程进行了模拟分析,建立了一套计算模型,通过此模型来建立驱动电路的电流特性和芯管组件升程特性。喷油器的运动过程较为复杂,分别对其四个子系统——电路子系统、磁路子系统、机械运动子系统、流体运动子系统作了相应的分析和理论研究。

(2) 测试系统设计

通过设计,搭建了汽油机电控喷油器流量及喷雾特性测试台架,并完成了本系统电子控制单元的设计,以及测试软件的编辑。通过该测试平台,能够对于喷油器相关特性进行测试。

(3) 流量特性和喷雾特性的测试

以高阻型喷油器为例,在整个流量范围内对其进行大量试验测试并对测试数据加以分析总结,得出了该喷油器流量特性中静态流量曲线,动态流量曲线和流量拟合曲线等一些重要参数。分析曲线,得到了该喷油器的开启补偿量,线性流量范围等重要参数。同时,比较了不同电压和油压对流量特性的影响,得到了部分修正曲线。

由于各种原因,本文的工作还需要进一步的完善。主要包括:测试系统在大量的设计中得到了一定的稳定性,但是对于更高的精度要求,还需要提高系统油压的稳定性;除此之外,对于喷油器开启升程的变化,还需要在理论基础上通过试验给出进一步的分析。

参考文献

- [1] 倪计民. 汽油喷射技术的发展概况. 小型内燃机, 1996.2
- [2] 周龙保等. 内燃机学. 机械工业出版社, 1999.6
- [3] 钱耀义. 汽车发动机汽油喷射系统. 人民交通出版社, 1995.4
- [4] 卓斌等. 车用汽油机燃料喷射与电子控制. 机械工业出版社, 1999
- [5] Jonathan W. Fox. Aggregate vehicle emission estimates for evaluating control strategies. SAE 940303, 1994
- [6] Kazunari Kuwahara. Mixing control strategy for engine performance improvement in a gasoline direct-injection engine. SAE 980158, 1998
- [7] 孙勇等. 缸内直喷式汽油机的研究进展及技术难点. 内燃机, 2002.1
- [8] 钱耀义. 汽车发动机电子控制系统结构与原理. 机械工业出版社, 1999,1
- [9] Richard K. Stobart. The demands of cylinder event control. SAE 970617, 1997
- [10] Daniel Blomqvist. Different strategies for transient control of the air-fuel ratio in a SI engine. SAE 2000-01-2835
- [11] 钱人一. 现代汽车发动机电子控制. 山海交通大学出版社, 1999.12
- [12] 吴森等译. 汽油机管理系统. 北京理工大学出版社, 2002.9
- [13] 向丽康等. 汽油喷射发动机喷油器选用原则. 小型内燃机, 1997.4
- [14] Shinji Ueda and Yukio Mori. Development of a new injector in gasoline direct injection system. Mark Archer, Greg Bell. SAE 2000-01-1046
- [15] 翟宏建等. 关于喷油器选用的初步探讨. 内燃机车, 2003.5
- [16] 林宝军. 电磁式燃油喷嘴开启特性分析. 内燃机工程, 1990.2
- [17] 马忠杰等. 电控喷油器喷射过程的计算模型. 内燃机学报, 1997.2
- [18] J. L. Chen and Darren DeVriese. Influence of needle lift on gasoline injector static flows. SAE 961121
- [19] 安士杰等. 电控喷油器控制电磁阀理论与试验研究. 内燃机学报, 2003.5
- [20] Jian-hong Li. A study of microcomputer-controlled variable valve-timing system. SAE 950976, 1995
- [21] 关兵等. 电控喷油器的标定与试验. 吉林工业大学学报, 1996.4

- [22] 姜水生等. 电控喷油器喷射过程的计算模拟. 南昌大学学报, 2002.6
- [23] 安士杰, 欧阳光耀等. 电控喷油器仿真模块化研究. 车用发动机, 2002.8
- [24] 姜水生等. 电控喷油器微机测试系统的研制. 汽车研究与开发, 2002.1
- [25] 赵日寿等. 电子燃油喷射供油系统试验台的设计. 华南农业大学学报, 1996.4
- [26] 潘新民等. 微型计算机控制技术. 人民出版社, 1999.4
- [27] 康光华. 模拟电子技术基础. 高等教育出版社, 1995.4
- [28] 阎石. 数字电子技术基础. 高等教育出版社, 1995.4
- [29] 陈光东. 单片机微型计算机原理与接口技术(第二版) 华中理工大学出版社
- [30] 李华等. MCS-51 系列单片机实用接口技术. 北京航空航天大学出版社, 1999.4
- [31] 王幸之等. 单片机应用系统抗干扰技术. 北京航空航天大学出版社, 2000.2
- [32] 张福学. 传感器应用及其电路精选. 电子工业出版社, 1991.4
- [33] 和希才等. 传感器应用接口电路. 机械工业出版社, 1996.4
- [34] 张付军等. 电控喷油器流量特性的试验研究. 汽车工程, 1996.2
- [35] W. M. Ren and J. Shen. Geometrical effects on flow characteristics of a gasoline high-pressure swirl injector. Pierre Duret and Andre Ecomard. SAE 971641
- [36] 张振东等. 电控喷油系统控制参数特性曲面的测量装置. 农业机械学报, 1999.5
- [37] 宗永平等. 喷油器各喷孔流量影响因素的分析. 洛阳工学院学报, 1999.4
- [38] S. C. Li and K. Gebert. Spray characterization of high-pressure gasoline fuel injectors with swirl and nonswirl nozzles. SAE 981935
- [39] Ming-Chia Lai and Fu-Quan Zhao. An experimental and analytical investigation of the spray structure from automotive port injectors. SAE 941873
- [40] 张振东等. 电控喷油器喷油雾化特性测量装置的研究. 计量学报, 2004.1
- [41] Fu-Quan Zhao and Amer Ahmad Amer. The effect of fuel-line pressure perturbation on the spray atomization characteristics of automotive port fuel injectors. SAE 952486
- [42] David C. Arters and Malcolm J. Macduff. The effect on vehicle performance of injector deposits in a direct injection gasoline engine. SAE 2000-01-2021

致谢

本研究是在导师颜伏伍教授的悉心关怀与精心指导下完成的。三年的研究生学习过程中，导师在专业上对我谆谆的教导，在生活上给我无微不至的关怀，使我得以顺利地完成学业。值此论文完成之际，谨向颜伏伍教授致以衷心的感谢和崇高的敬意。

在此我还要感谢发动机系杜传进教授、侯献军老师、邹斌老师、彭辅明老师、袁守利老师等。谢谢各位老师在过去的三年里给予我的帮助和关心。

同时感谢实验室的全体同学，他们为我的学习工作提供了很大的帮助。这是一个非常有凝聚力的集体，无论以后我走到哪里，永远都会怀念这样一个优秀的团队。

最后要衷心感谢我的父母，他们以自身的人品和性格教会我做人，培养了我的善良和勤奋，我每向前迈出哪怕一小步，那都包含了他们许多的辛劳与付出。

师长、家人与亲友的关怀和鼓励，促使我完成了硕士学位阶段的学习和论文；武汉理工大学的人文氛围及奋发向上的精神，将激励我为社会做出自己更大的贡献，为母校增光。

攻读硕士期间发表的学术论文

- 1、肖琼，颜伏伍等，电控喷油器流量特性试验台的开发与试验分析，中国机械工程，2005，16：1419~1422，ISSN 1004-132X，EI 收录。
- 2、肖琼，颜伏伍等，电控喷油器喷雾测试系统开发及应用，汽车工程，2006，3：235~237，ISSN1000-680X。

附图：电控喷油器综合性能试验台实物图

