

张振东 尹从勃 著

汽车电控喷油器 性能仿真与结构优化

Performance Simulation and Structure Optimization
of Automobile Electronic Fuel Injector



科学出版社

汽车电控喷油器性能仿真 与结构优化

张振东 尹从勃 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

汽车电控喷油器是汽车系统中的复杂机电部件,其工作过程涉及机械动力学、电磁学和流体力学等多个方面,而以性能仿真与试验为基础进行结构参数优化是提升电控喷油器性能的有效手段。本书针对低压进气道喷射喷油器和缸内直喷喷油器进行介绍,主要内容包括电控喷油器的动态工作过程机理分析、电控喷油器的电磁特性仿真与优化、电控喷油器的内部流场及喷雾过程分析、电控喷油器多参数耦合仿真及多目标优化、电控喷油器样品试制及性能检测技术、新型加热式 GDI 喷油器以及金属注射成形技术在电控喷油器上的应用等。

本书可作为车辆、动力和机械等专业研究生和高年级本科生的参考书,也可供相关专业的高校教师、工程技术人员和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车电控喷油器性能仿真与结构优化/张振东,尹从勃著. —北京:科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-055190-0

I. ①汽… II. ①张… ②尹… III. ①汽车-电子控制装置-喷油器-计算机仿真 IV. ①U464.136

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 270561 号

责任编辑:朱英彪 赵晓廷 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 1 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:332 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

开展汽车关键零部件的自主研发对于提升我国汽车工业的技术水平和国际竞争力具有重要的意义。电控喷油器是汽车发动机电喷系统中技术难度最大的关键部件，其工作性能直接影响发动机缸内混合气的形成质量和燃烧过程，进而对发动机的动力性、经济性和排放性能产生重要影响。汽车电控喷油器的工作过程涉及电磁学、机械动力学和流体动力学等多个学科，不同物理场的参数交叉耦合，使得汽车电控喷油器成为工作过程中十分复杂的一个机-电-液系统。许多汽车工业发达国家针对汽车电控喷油器开展了长期研究，在喷油器理论分析、性能仿真、结构设计、加工制造和性能评价等方面积累了丰富的经验，并对汽车电控喷油器的核心技术实现了垄断。近年来，我国一些汽车零部件企业也针对汽车电控喷油器开展了一些技术攻关工作，但由于缺乏系统的理论指导和必要的技术支撑，基本上处于对国外样品的仿制阶段，尚未形成汽车电控喷油器的自主研发能力。

本书的核心内容是作者近 20 年来在汽车电控喷油器性能仿真、结构设计与优化、产品开发以及性能检测等方面研究工作的成果结晶。本书的撰写基于 2010 年完成的浙江省重大科技专项基金项目“电控汽油喷射器 EAP06 产业化开发”（2007C11136）、2011 年完成的教育部高等学校博士学科点专项科研项目“电控汽油喷射器喷雾特性仿真与试验研究”（200802520001）以及 2016 年完成的国家自然科学基金项目“GDI 多孔汽油喷射器喷射过程多场参数分步耦合研究”（51275309）等的研究成果，并结合了与浙江冯仕特电喷技术有限公司、瑞安市正捷电喷技术有限公司等汽车电控喷油器生产企业开展的“汽车发动机电磁喷油器研制”、“高性能汽车电控喷油器研发”和“汽车 GDI 喷油器关键技术研究”等产学研合作项目的研究成果。本书也参考了国内外有关技术资料，比较全面地总结了有关电控喷油器的基本理论和设计方法，系统阐述电控喷油器系统建模、参数优化、特性试验以及样品加工中的关键理论和技术问题。

本书共 10 章，第 1 章主要介绍汽车电控喷油器的技术发展和研究概况。第 2 章以数字模型为基础分析汽车电控喷油器的动态工作过程机理。第 3 章针对低压电控喷油器进行二维、三维电磁场仿真及磁路结构优化。第 4 章从低压电控喷油器内部流道结构模型出发，通过仿真研究内部流动和喷雾过程的变化特性。第 5 章针对低压电控喷油器开发流量特性及动态响应特性测试系统。第 6 章建立 GDI 喷油器工作过程的数学模型，从电-磁、电-磁-热和热-流等多个方面对 GDI 喷油器

的工作过程参数进行耦合研究。第 7 章以 MOSA 算法和正交试验为核心对 GDI 喷油器的结构参数进行多目标优化。第 8 章对 GDI 喷油器进行样品试制,并从温度特性、动态响应、流量特性和喷雾特性方面进行测试评价。第 9 章分析加热型 GDI 喷油器的工作机理和性能特点。第 10 章分析 MIM 技术的特点及其在汽车电控喷油器磁路结构方面的实际应用。

本书撰写过程中,博士生谢乃流、孔祥栋以及硕士生王双在内容整理和图片修正等方面给予了很大帮助,沈凯博士后也提出了很多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢。

由于本书涉及内容较多,限于作者水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评、指正。

作者

2017年9月

目 录

前言

| | |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 汽车电控喷油技术的发展状况 | 1 |
| 1.1 电控汽油喷射系统发展概况 | 1 |
| 1.2 汽油机电控喷油器的分类和研究概况 | 4 |
| 1.2.1 汽油机电控喷油器的分类 | 4 |
| 1.2.2 国内外研究现状 | 11 |
| 参考文献 | 16 |
| 第 2 章 PFI 喷油器动态工作过程机理 | 21 |
| 2.1 电控喷油器的典型结构 | 21 |
| 2.1.1 Bosch 电控喷油器 | 21 |
| 2.1.2 Delphi 电控喷油器 | 23 |
| 2.2 磁路结构材料配置 | 24 |
| 2.3 电控喷油器的性能要求 | 28 |
| 2.4 工作特性数学模型 | 28 |
| 2.5 动态响应过程分析 | 36 |
| 2.6 动态响应规律分析 | 40 |
| 2.7 磁性材料影响分析 | 47 |
| 2.8 本章小结 | 49 |
| 参考文献 | 50 |
| 第 3 章 PFI 喷油器电磁场分析与优化 | 52 |
| 3.1 电磁场有限元分析基础理论 | 52 |
| 3.2 二维模型的建立 | 54 |
| 3.3 电磁场仿真结果对比分析 | 55 |
| 3.4 三维电磁场仿真分析 | 57 |
| 3.5 电磁场单参数仿真分析 | 62 |
| 3.6 多参数优化 | 66 |
| 3.7 本章小结 | 73 |
| 参考文献 | 73 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 第 4 章 PFI 喷油器内部流场及喷雾过程分析 | 76 |
| 4.1 流体力学基本方程 | 76 |
| 4.2 几何模型与数值求解 | 80 |
| 4.3 内部流动计算结果与分析 | 81 |
| 4.4 喷射雾化的数学模型 | 92 |
| 4.5 模拟结果及分析 | 97 |
| 4.6 本章小结 | 106 |
| 参考文献 | 106 |
| 第 5 章 PFI 喷油器综合测试系统设计 | 108 |
| 5.1 测试系统方案 | 108 |
| 5.2 系统硬件 | 109 |
| 5.3 系统电路 | 111 |
| 5.4 信号处理 | 119 |
| 5.5 本章小结 | 120 |
| 参考文献 | 120 |
| 第 6 章 GDI 喷油器工作过程建模及耦合仿真 | 121 |
| 6.1 GDI 喷油器的结构模型及性能要求 | 121 |
| 6.2 GDI 喷油器子系统模型 | 123 |
| 6.2.1 机械运动子系统 | 123 |
| 6.2.2 电路子系统 | 123 |
| 6.2.3 磁路子系统 | 124 |
| 6.2.4 电磁损耗子系统 | 126 |
| 6.2.5 热力学子系统 | 127 |
| 6.2.6 内部流动子系统模型 | 128 |
| 6.2.7 喷雾子系统 | 130 |
| 6.3 电磁场耦合研究 | 133 |
| 6.3.1 电磁场有限元理论 | 133 |
| 6.3.2 电磁场有限元仿真分析 | 134 |
| 6.4 电-磁-热耦合研究 | 144 |
| 6.4.1 电-磁-热耦合理论 | 144 |
| 6.4.2 电-磁-热耦合仿真分析 | 145 |
| 6.5 热-流耦合研究 | 150 |
| 6.5.1 热-流耦合理论 | 150 |
| 6.5.2 喷孔流动分析 | 153 |

| | |
|-------------------------------|------------|
| 6.5.3 喷雾特性分析 | 158 |
| 6.6 本章小结 | 161 |
| 参考文献 | 161 |
| 第7章 GDI 喷油器结构参数多目标分步优化 | 163 |
| 7.1 GDI 喷油器的优化目标及优化策略 | 163 |
| 7.2 磁路结构多目标优化模型 | 165 |
| 7.3 基于 MOSA 算法的磁路结构优化 | 170 |
| 7.3.1 MOSA 算法求解原理 | 170 |
| 7.3.2 MOSA 优化算法实现 | 172 |
| 7.4 磁路结构优化结果分析 | 176 |
| 7.4.1 动态响应特性分析 | 176 |
| 7.4.2 电磁特性分析 | 177 |
| 7.4.3 温度特性分析 | 179 |
| 7.5 基于正交试验法的喷孔结构优化 | 181 |
| 7.5.1 喷孔结构对孔内流动的影响 | 181 |
| 7.5.2 喷孔结构对喷雾特性的影响 | 185 |
| 7.6 正交试验设计 | 188 |
| 7.6.1 喷孔内部流动对比分析 | 193 |
| 7.6.2 喷雾特性对比分析 | 195 |
| 7.7 本章小结 | 199 |
| 参考文献 | 199 |
| 第8章 GDI 喷油器样品试制及试验研究 | 200 |
| 8.1 GDI 喷油器样品试制 | 200 |
| 8.1.1 关键材料选型 | 200 |
| 8.1.2 关键零部件加工 | 201 |
| 8.1.3 装配及焊接技术 | 203 |
| 8.2 温度特性 | 206 |
| 8.2.1 温度特性测试原理 | 206 |
| 8.2.2 GDI 喷油器温升影响因素分析 | 207 |
| 8.3 动态响应特性 | 211 |
| 8.3.1 测试装置及测试原理 | 212 |
| 8.3.2 动态响应特性测试结果分析 | 213 |
| 8.4 流量特性 | 215 |
| 8.4.1 流量特性测试系统 | 215 |

| | |
|------------------------------|------------|
| 8.4.2 流量特性测试结果分析 | 216 |
| 8.5 喷雾特性 | 218 |
| 8.5.1 喷雾形态测试系统及结果分析 | 218 |
| 8.5.2 喷雾贯穿距离分析 | 219 |
| 8.6 本章小结 | 224 |
| 参考文献 | 224 |
| 第9章 加热型 GDI 喷油器 | 225 |
| 9.1 加热型 GDI 喷油器的结构及驱动方法 | 226 |
| 9.1.1 加热型 GDI 喷油器的结构和工作原理 | 226 |
| 9.1.2 喷孔的几何形状和分布 | 226 |
| 9.1.3 驱动电路 | 227 |
| 9.2 热分析 | 228 |
| 9.2.1 能量损耗模型 | 228 |
| 9.2.2 热力学模型 | 229 |
| 9.2.3 热模拟 | 230 |
| 9.3 试验条件和燃料特性 | 234 |
| 9.4 喷雾可视化特性 | 236 |
| 9.4.1 试验系统 | 236 |
| 9.4.2 喷雾特性分析 | 237 |
| 9.5 本章小结 | 243 |
| 参考文献 | 244 |
| 第10章 金属注射成形技术在喷油器上的应用 | 246 |
| 10.1 MIM 技术 | 246 |
| 10.2 MIM 技术在电控汽油喷油器中的应用 | 247 |
| 10.3 汽油机电控喷油器零件性能分析 | 248 |
| 10.3.1 退火后的软磁特性分析 | 248 |
| 10.3.2 理化性能分析 | 249 |
| 10.4 电控汽油喷油器性能对比分析 | 249 |
| 10.4.1 材料特性测试 | 249 |
| 10.4.2 基本参数设定 | 250 |
| 10.4.3 电磁性能仿真验证 | 251 |
| 10.4.4 试验结果对比分析 | 253 |
| 10.5 本章小结 | 254 |
| 参考文献 | 255 |

第 1 章 汽车电控喷油技术的发展状况

1.1 电控汽油喷射系统发展概况

汽车工业的百年发展历程，其主要目标就是提高动力性、经济性，减少排放，降低噪声和提高舒适性。随着汽车数量的增加，汽车污染物的排放已经成为影响人类生活环境的重要因素，降低汽车污染物的排放已经成为世界各国汽车工业发展的主题^[1]。与此同时，石化资源的日益匮乏，导致石油价格持续飙升，这也要求新型的发动机具有更高的工作效率^[2]。

汽油发动机燃油喷射系统的发展主要分为三个阶段^[3,4]：机械化油器式、低压进气道喷射（port fuel injection, PFI）、缸内直接喷射（gasoline direct injection, GDI），如图 1-1 所示。

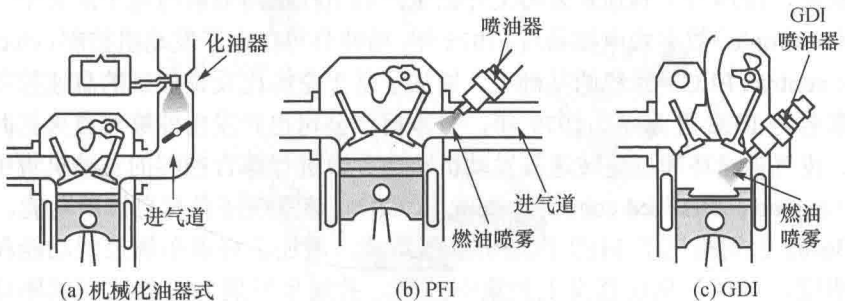


图 1-1 不同燃油喷射系统混合气形成方式

机械化油器式喷射系统在汽油机不同的工况下无法精确控制空燃比，三元催化转化器无法在该类型的发动机上应用，因此这种发动机的效率低、污染物排放量大，到 20 世纪 80 年代逐渐被低压电控燃油喷射系统所取代。低压电控燃油喷射系统可以根据不同工况下进气量的大小调整喷油量，并且可以通过氧传感器对喷油量进行闭环控制，使空燃比保持在 14.7（理论空燃比）附近，从而满足三元催化器最高转化效率的要求，因此可在使发动机具备较高燃烧效率的同时，有效降低污染物的排放。

低压进气道喷射技术最早可追溯到 20 世纪 30 年代，1934 年莱特兄弟在飞机发动机的进气管内安装了机械式汽油喷射系统。20 世纪 50 年代，机械式汽油喷

射系统开始用于梅赛德斯-奔驰公司生产的 300SL 轿车发动机上。美国 Bendix 公司在 1957 年提出了电控汽油喷射的最初设想,并开始试制。这个系统不同于机械式汽油喷射系统,主要由电动燃料泵、电控喷油器、进气压力传感器和电子控制装置组成。该系统通过改变电控喷油器的喷射时间控制和调整混合气的浓度,先将电子控制单元的传感器信号转换成一个相应的燃料喷射脉冲宽度,然后将脉冲信号放大以驱动电控喷油器的电磁线圈,在线圈等电磁部件产生的电磁力作用下,喷油器的针阀开启,燃料喷入进气道中。由于当时的电子技术仍然比较落后,锗晶体管的价格高、可靠性差等,这套系统并未付诸实用^[5-7]。

20 世纪 50 年代以后,随着汽车的日益增多,汽车的排放问题越来越受到重视。德国博世(Bosch)公司在购得 Bendix 公司电控汽油喷射系统的专利后,经过努力于 1967 年推出了 D 型(D-Jetronic,为速度-密度型)电控汽油喷射系统,并装配在大众公司的轿车上向美国出口。其燃油经济性、废气净化率及动力性等均优于化油器式发动机,但其缺点是由于采用进气管压力信号作为控制喷油量的主要输入参数,在汽车紧急制动、下坡节气门关闭以及大气状态有较大变化时,会出现加速不良的现象。1973 年后经改进,以吸入的空气质量作为控制喷油量的主要依据,开发出后来广泛使用的 L 型(L-Jetronic,为质量-流量型)电控汽油喷射系统。1979 年, Bosch 公司又开始生产集电控汽油喷射与电子点火于一体的 M 型(Motronic)数字式电控系统。1978 年,福特公司在电子发动机控制(electronic engine control, EEC)系统的基础上,增加了基于空燃比反馈控制的怠速控制等技术,取名为 EEC-II 系统。1979 年,日本日产公司也开发出能够对点火正时、空燃比、废气再循环和怠速转速等发动机状态参数进行综合控制的发动机集中控制系统(engine centralized control system, ECCS),该系统还具有自诊断功能。90 年代, Bosch 公司推出了 ME7 汽油机管理系统,增加了许多车辆控制功能和系统的透明度,实现了真正意义上的集中控制,并逐步发展为目前比较成熟且得到广泛应用的汽油机电子控制系统^[8-10]。

尽管低压电控燃油喷射系统与传统的机械化油器式喷射系统相比具有很多优势,但还是无法很好满足人们对汽车性能、排放和燃油经济性等方面的更高要求^[11],因此催生了对于缸内直喷技术的广泛研究。20 世纪 90 年代,电控缸内直喷系统逐渐在汽车发动机上得到应用。进气道喷射式电控汽油喷射系统结构和缸内直喷系统主要部件分别如图 1-2 和图 1-3 所示。国内外研究发现,缸内直喷系统具备进一步改善发动机的动力性、经济性和排放性的潜力。汽油缸内直喷系统在实际应用中的后处理技术复杂且成本非常高,使得汽油缸内直喷的优势一度没有得到充分发挥。但随着全球排放法规日趋严格、缸内直喷技术日益成熟及汽车发动机小型化、高速化和高效化的要求日益提高,高压缸内直接喷射方式成为目前研究的重点,并在逐渐取代低压电控燃油喷射技术^[12]。

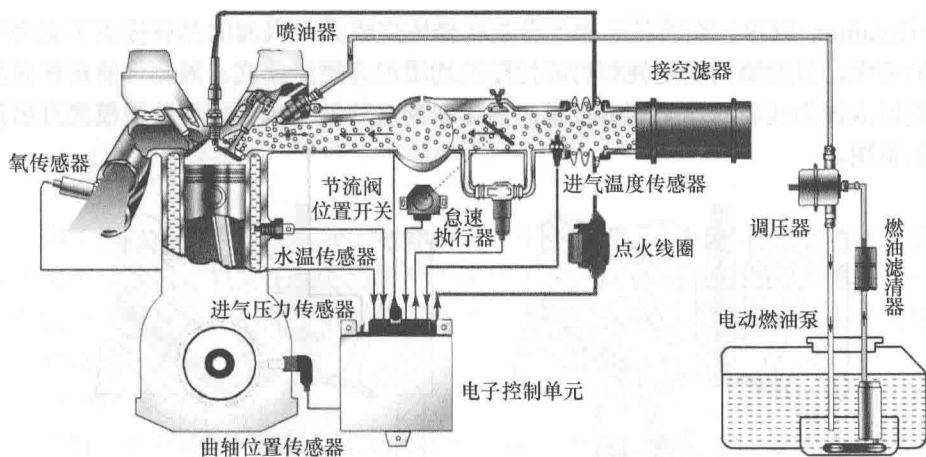


图 1-2 进气道喷射式电控汽油喷射系统结构简图

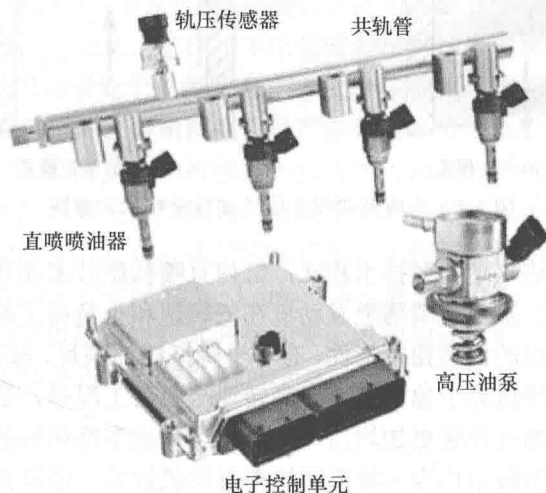


图 1-3 汽油缸内直喷系统的主要部件

汽油缸内直喷技术已成为目前最具代表性的三大汽油机技术之一^[13,14]，配备缸内直喷系统的汽油机具有转速高、质量轻、部分负荷特性高、燃油经济性好的优点。GDI 发动机燃油喷射控制策略主要分为两种模式：第一种是以日本为代表的分层稀薄燃烧模式，该模式可以降低发动机部分负荷工况的泵气损失，燃油在压缩行程喷入气缸，可以有效提高燃油经济性，但由于采用非理论空燃比燃烧，降低了三元催化器的转化效率，使排放的废气中氮氧化物含量较高^[15]；第二种是以欧美为代表的均质混合燃烧模式，该模式采用接近理论空燃比的混合气进行均质燃烧，燃油在进气行程喷入气缸，汽油的蒸发作用能够降低混合气温度，压缩行程能够减少热损失，且有利于提高燃烧稳定性和废气再循环 (exhaust gas

recirculation, EGR) 率^[16-18]。由于分层稀薄燃烧模式对汽油的品质提出了更为严格的要求,且燃烧的稳定性和可靠性不及均质混合燃烧模式,因此目前正在兴起的是以欧洲为代表的均质直喷技术。图 1-4 为发动机均质模式和分层模式直喷技术示意图。

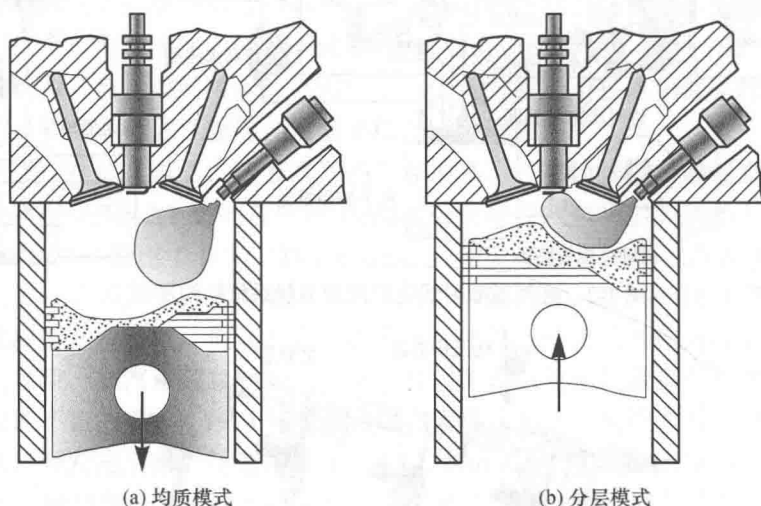


图 1-4 均质模式和分层模式直喷技术示意图

与传统的多点进气道喷射技术相比,缸内直喷稀燃技术在理论上具有许多独特的优点^[19]。首先,缸内直喷稀燃发动机在低转速和小负荷工况可以只消耗很少的燃油就能达到良好的低速扭矩特性,有利于降低燃油消耗,减少碳氢化合物 HC 排放;其次,在发动机处于急加速或者高转速全负荷工况时,缸内直喷可以提高燃油喷射速率,使油气混合更加均匀,容易实现大功率高扭矩的均质加浓燃烧。综上所述,缸内直喷技术作为一种新的汽车发动机技术,在降低污染物排放、提高燃油经济性、改善汽车动力性方面有着广阔的发展前景,对于缓解能源危机和环境污染问题能起到很大的作用。

1.2 汽油机电控喷油器的分类和研究概况

1.2.1 汽油机电控喷油器的分类

电控喷油器是发动机电控汽油喷射系统中的最终执行元件,其性能直接影响发动机的性能。电控喷油器由于其特殊的结构,能够精确控制燃油喷射量并形成良好的喷雾状态,可为气缸中混合气的充分燃烧做好准备,有利于提高发动机的经济性、动力性和排放性能。电控喷油器工作环境极其恶劣、工作强度高、工况复杂,因此

需要具有较大的动态流量范围、优良的抗堵塞和抗污染能力,以及良好的雾化性能。电控喷油器所应具备的工作性能,决定了它是精度非常高的精密耦件。目前,常用的电控喷油器有低压喷油器和 GDI 喷油器,下面详细进行介绍。

1. 低压电控喷油器

为了满足汽油机燃油喷射的特殊要求,不少国外公司先后开发了多种类型的低压电控喷油器,按其结构特点可分为轴针式、片阀式和球阀式等;按其线圈电阻的大小又可分为低电阻型喷油器(阻值为 $2\sim 3\Omega$)和高电阻型喷油器(阻值为 $13\sim 17\Omega$)。

1) 轴针式电控喷油器

轴针式电控喷油器是最早出现并投入使用的电控喷油器。如图 1-5 所示,它主要由电磁线圈、衔铁、轴针、喷孔和密封锥面等组成,其中衔铁与轴针焊接成一体。当电子控制单元(electronic control unit, ECU)没有发出喷油脉冲时,电磁线圈上没有电流,在弹簧力的作用下喷油器的轴针被压在喷油器出口处的密封锥面阀座上,此时喷油器处于关闭状态。当 ECU 发出喷油脉冲时,电磁线圈迅速通电,线圈上产生电感,进而由涡流电场产生磁场,喷油器中的衔铁在电磁力的作用下克服弹簧力、自身重力和液压力的作用向上抬起,轴针离开锥面阀座,燃油喷出。为了使汽油得到更好的雾化,通常将喷油口加工成锥形孔,从而扩大燃油的雾化角。喷油器必须具有较快的响应速度,才能精确控制燃油喷射量,一般情况下电控喷油器的开启时间为 $1\sim 1.5\text{ms}$,落座时间为 $0.3\sim 0.8\text{ms}$ 。轴针式电控喷油器由于轴针自身重量较大,其开启和关闭时的加速度要小于片阀式和球阀式电控喷油器,因此其动态响应特性相对较差。

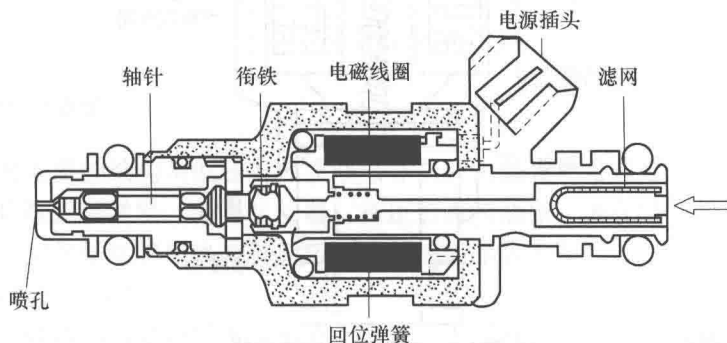


图 1-5 轴针式电控喷油嘴的结构形式

2) 片阀式电控喷油器

片阀式电控喷油器的主要特点是质量轻、结构简单、抗阻塞能力强,最早由英国

卢卡斯 (Lucas) 电气公司研制开发, 结构如图1-6所示。片阀式电控喷油器主要由质量较轻的弹性阀片和孔式阀座等组成, 故具有较强的抗阻塞能力和较大的动态流动范围。当ECU没有发出喷油脉冲时, 喷油器处于关闭状态, 阀片在螺旋弹簧力和液压力的作用下被压紧在阀座上。当ECU发出喷油脉冲时, 电流通过喷油器电磁线圈, 产生磁场, 阀片在电磁力的作用下克服弹簧力和液压力离开孔式阀座, 此时喷油器开始喷油。当喷油脉冲结束时, 线圈中的电流迅速减小, 电磁力不断衰减; 当弹簧力与衔铁重力之和大于电磁力时, 阀片在弹簧力的作用下逐渐与孔式阀座贴合, 燃油喷射结束。片阀式电控喷油器与轴针式电控喷油器在结构上的差异导致二者的喷油特性存在较大不同。由于阀片相对于轴针其质量较小, 片阀式电控喷油器的动态响应速度更快; 相对于轴针式电控喷油器, 片阀式电控喷油器的衔铁端面面积更大, 在阀片开启和落座期间受到不断变化的液压力作用, 喷油量波动较大, 不利于喷油器精确计量燃油喷射量。

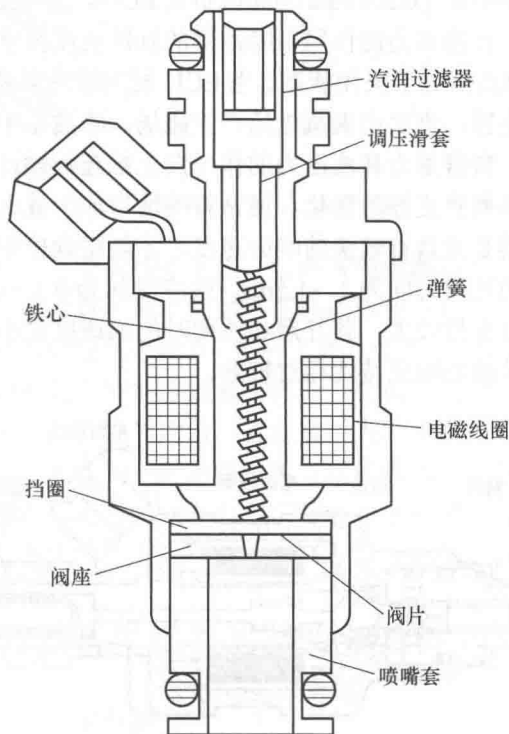


图 1-6 片阀式电控喷油器

3) 球阀式电控喷油器

球阀式电控喷油器与轴针式电控喷油器的结构原理基本相同, 主要区别在于球阀式电控喷油器采用钢球与阀座锥面配合形成密封面, 而轴针式电控喷油器采用轴

针锥面与阀座锥面配合，从而形成密封面。球阀式电控喷油器如图 1-7 所示，主要由钢球、衔铁、阀座和铁心等部件组成，钢球和衔铁采用激光焊接的方式结合成一体构成衔铁组件，由于衔铁组件内部一般为空心导杆结构，其质量通常只有轴针式电控喷油器阀针质量的一半左右，有利于提高喷油器的动态响应速度。另外，相对于轴针式电控喷油器，球阀式电控喷油器中的钢球与阀座锥面结合具有自动定心作用，可更好地保证其密封性。球阀式电控喷油器具有结构简单、控制精确、密封性好、性能稳定等优点，在进气道喷射电喷汽油机上得到广泛应用。

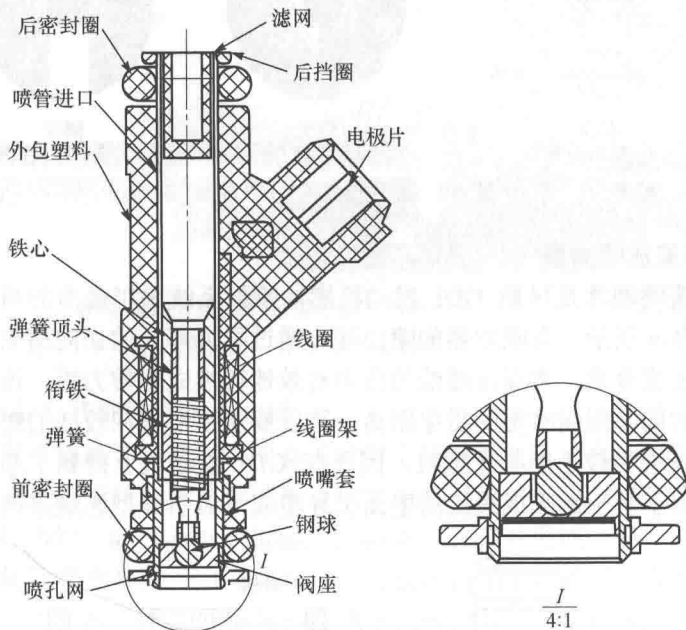


图 1-7 球阀式电控喷油器

2. GDI 喷油器

GDI 喷油器的结构与低压电控喷油器存在较大差异，目前缸内直喷喷油器大致可分为狭缝式喷油器、异形喷油器、高压旋流喷油器、多孔喷油器、外开轴针式喷油器、空气辅助雾化喷油器和压电陶瓷喷油器等类型^[20]。

1) 狭缝式喷油器

狭缝式喷油器最早由日本丰田公司开发，主要在第二代 D-4 发动机上应用。异形喷油器由日本日立公司开发，其特点是能够形成非对称喷雾形状，适用于喷油器燃烧室周边斜置的场合。随着发动机技术的发展，这些喷油器的雾化效果、燃油喷射精度及安装的灵活性都不及高压旋流喷油器和多孔喷油器，因此逐渐被淘汰，部分传统 GDI 喷油器如图 1-8 所示。

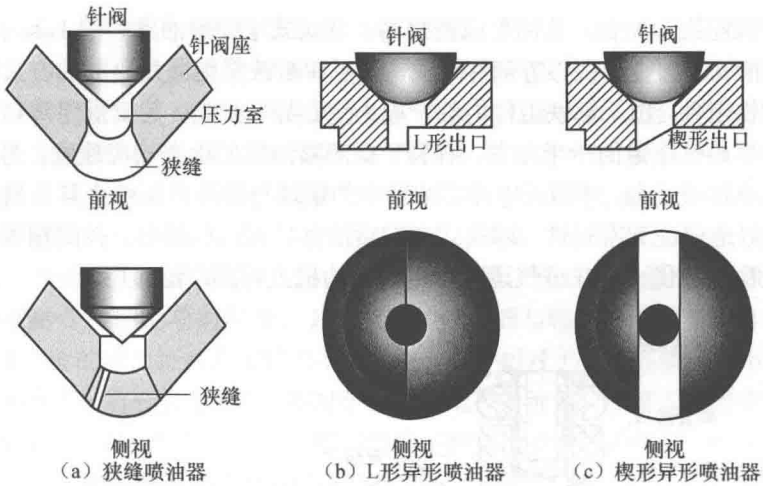


图 1-8 部分传统 GDI 喷油器

2) 高压旋流喷油器

高压旋流喷油器是早期 GDI 发动机燃油喷射系统采用最多的喷油器形式之一^[21]。如图 1-9 所示，在喷油器的喷口端，通过导流环上的切向槽来形成喷孔出口燃油切向速度分量，将高压燃油的压力有效地转换成旋转力矩，该方法能在促进燃油雾化的同时限制喷雾的贯穿距离。高压旋流喷油器在较低的燃油压力下就可以形成液滴直径较小的雾化颗粒，因此在 GDI 发动机上得到了非常广泛的应用，主要适用于基于涡流或滚流的壁面引导型或气流引导型燃烧系统。

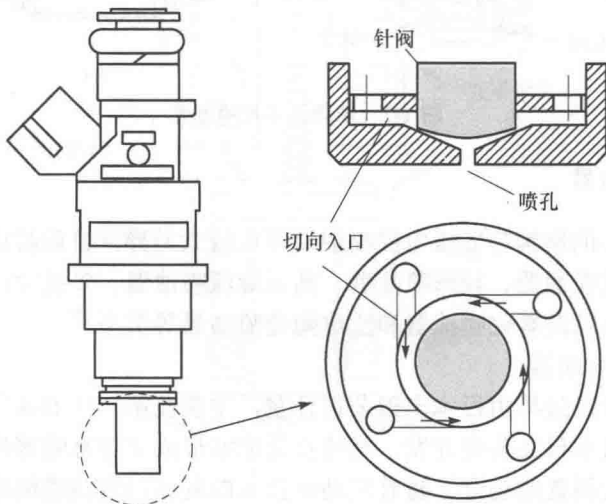


图 1-9 高压旋流喷油器