

动圈式大流量气体燃料 电控喷射装置研究

葛文庆 孙宾宾 李波 著



科学出版社

动圈式大流量气体燃料电控 喷射装置研究

葛文庆 孙宾宾 李 波 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从基本理论入手,系统地阐述了动圈式大流量气体燃料发动机电控喷射装置的结构特点、工作原理、特性参数、控制系统开发及其与整机的匹配试验研究。主要内容包括:喷射装置的结构和控制器设计、流量特性分析、整机布置方案及控制系统设计、混合气形成机理研究,以及整机台架试验。

本书内容深入浅出,思路清晰,理论与试验相结合,各个章节内容相互独立又相互联系。本书可供广大从事内燃机相关领域工程技术人员和科研人员参考,也可作为高等院校车辆工程、热能与动力工程专业研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

动圈式大流量气体燃料电控喷射装置研究 / 葛文庆, 孙宾宾, 李波著.

—北京: 科学出版社, 2014.12

ISBN 978-7-03-042934-6

I. ①动… II. ①葛… ②孙… ③李… III. ①机械学—高等学校—教材
IV. ①TH1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第120279号

责任编辑: 朱晓颖 / 责任校对: 韩 杨

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年12月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2014年12月第一次印刷 印张: 6 3/4

字数: 123 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

气体燃料发动机有着有害污染物和二氧化碳排放量相对少的优势，不仅在高效清洁利用能源，而且在有效利用工业可燃废气等方面均可以发挥重要作用，节能减排与环境保护推动着气体燃料发动机的技术进步与广泛应用。

气体燃料电控喷射装置的应用，可实现多点顺序间歇供气方式在发动机各缸进气道前顺序间歇（一般在进气过程中）供入气体燃料，可以有效解决发动机进气道及进气管内回火、扫气阶段气体燃料流失等问题，改善发动机性能，适用于各类气体燃料，所需气体燃料的压力较低，特别适用于需要大流量、低压力的供气场合。为了实现在气体燃料发动机经济性、动力性和排放指标等方面达到国外先进水平，同时对各类不同成分、热值的可燃气体具有良好适应性的目标，必须深入研究作为关键技术的气体燃料电控喷射装置。本书提出了一类应用动圈式电磁直线执行器和菌型阀结构的气体燃料电控喷射装置，并通过理论分析、仿真计算以及与试验研究相结合的方法对其结构设计、流量特性、控制技术等进行深入系统的研究，为其工程化应用和大功率气体燃料发动机性能提升打下了良好的基础。

本书的主要工作和研究成果包括以下几个方面：

（1）分析了气体燃料电控喷射装置的国内外研究现状，提出了一类应用动圈式电磁直线执行器和菌型阀结构的气体燃料电控喷射装置，对喷射装置的结构、主要设计参数和控制器设计等进行了深入研究，最终研制出了气体燃料电控喷射装置样件并进行了试验验证。测试结果表明，喷射装置的过渡时间为 5ms，最大气门升程可达 4mm，工作稳定可靠，满足大功率气体燃料发动机对喷射装置的大流量、高响应等要求。

（2）建立了气体燃料喷射装置的流动数值模拟计算模型，分析了稳态和非稳态工况下的流量特性并进行了试验验证。明确了电控喷射装置的流量特性随着气门升程、气门外径、压差和气门开启时间等主要设计及控制参数变化的规律，建立了可直接用于气体燃料喷射量调节控制的气体燃料喷射量 G 和气门总开启时间 Δt 的映射关系，为气体燃料电控喷射装置在发动机上的应用打下了良好的基础。

（3）确定了气体燃料喷射装置在发动机上的布置方案，并讨论了应用喷射装置后发动机性能改进的技术途径。设计了发动机整机控制器，提出了以发动机转速为目标的闭环控制以及模拟信号输入端口和 PWM 控制信号输出端口多路复用的技术方案。进一步研究了发动机控制器综合设计应实现的功能，对发

动机空燃比进行闭环控制，并给出了改进的发动机控制器方案。

(4) 建立了气体燃料发动机应用电控喷射装置后的非稳态 CFD 计算模型，并在此基础上研究了喷射装置不同的控制参数以及安装参数对气体燃料进气和混合气形成过程的影响。分析比较了不同的喷射装置安装位置下气体燃料进气过程的变化情况，并明确了喷射装置靠近燃烧室后对提高气体燃料进气充分程度的优势。确定了气体燃料电控喷射装置喷射脉宽的调节范围，探讨了通过增加气体燃料和进气空气的压力差值来增加喷射量的方法。

(5) 完成了应用气体燃料喷射装置的大功率发动机的实机验证性试验。进行了包括发动机启动、怠速稳定性、各缸均匀性调整以及给定转速下增减不同负荷的试验，自行研制的电控喷射装置具备良好的控制特性、高响应速度和低落座速度等优势，能够将气体燃料定时、定量地喷射到发动机每一气缸靠近进气道的进气歧管内，实现多点顺序间歇的供气方式以及对各缸空燃比的实时、准确、独立地调节，验证了技术的可行性。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 9 月

主要符号说明

G	循环气体燃料喷射量 (kg)	h	气门升程 (mm)
D	阀盘直径 (mm)	Δt	总气门开启时间 (ms)
Δp	压差 (MPa)	τ_m	机电时间常数 (ms)
m	运动部件质量 (kg)	R	线圈电阻 (Ω)
k_m	电机常数 (N/A)	ρ	流体密度 (kg/m^3)
t	时间 (s)	u	速度矢量在 x 方向的分量 (m/s)
v	速度矢量在 y 方向的分量 (m/s)	w	速度矢量在 z 方向的分量 (m/s)
F_{bx}	单位质量流体上的质量力在 x 方向的分量 (N)	F_{by}	单位质量流体上的质量力在 y 方向的分量 (N)
F_{bz}	单位质量流体上的质量力在 z 方向的分量 (N)	p_{xx}	流体内应力张量的分量
T	流体温度 (K)	k	流体导热系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
C_p	比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	S_T	黏性耗散
G_k	平均速度梯度引起的湍动能产生项	G_b	浮力引起的湍动能产生项
Y_M	可压缩湍流脉动膨胀对耗散率的影响	μ_t	湍流黏性系数
D_H	水力直径 (mm)	A	燃气进口截面面积 (mm^2)
l	燃气进口截面周长 (mm)	Δt_1	气门开启过渡时间 (ms)
n	发动机转速 (r/min)	f	信号频率 (Hz)
z	齿圈齿数	$p_{\max}$	缸内峰值压力 (MPa)
N	燃烧循环个数	S	位移 (mm)
p_{mi}	平均指示压力 (MPa)	θ	曲轴转角 ($^\circ\text{CA}$)
F	电磁力 (N)	A	电流 (A)
p	缸内压力 (MPa)		

目 录

前言

主要符号说明

第 1 章	绪论	1
1.1	课题研究的背景及意义	1
1.2	气体发动机国内外研究现状	3
1.2.1	气体发动机的燃料供给方式	3
1.2.2	国外研究发展现状	5
1.2.3	国内研究发展现状	6
1.3	气体发动机电控喷射装置的研究进展	7
1.4	电磁直线执行器的研究进展	10
1.5	本课题的主要研究内容与结构	11
第 2 章	气体燃料电控喷射装置的设计研究	13
2.1	结构设计	13
2.1.1	执行部件的设计	13
2.1.2	驱动部件	13
2.1.3	设计方案	15
2.2	控制器的设计与实现	16
2.2.1	气体燃料电控喷射装置的控制器系统结构	16
2.2.2	控制器硬件设计与实现	17
2.2.3	控制器软件设计与实现	22
2.3	试验验证	24
2.3.1	样机研制与静态性能测试	24
2.3.2	动态性能测试	26
2.4	本章小结	27
第 3 章	气体燃料电控喷射装置流量特性的研究	28
3.1	CFD 数值计算的数学模型	28
3.1.1	CFD 数值计算的基本控制方程	29
3.1.2	CFD 数值计算的湍流模型	30
3.2	气体燃料电控喷射装置的三维模型	31
3.3	数值计算的边界条件和初始条件	32
3.4	数值计算的网格划分	33

3.4.1	稳态工况的网格划分	33
3.4.2	非稳态工况的网格划分	34
3.5	数值计算求解器参数的设定	36
3.6	计算结果分析	37
3.6.1	稳态工况计算结果分析	37
3.6.2	非稳态工况计算结果分析	39
3.7	试验验证	44
3.8	本章小结	46
第4章	应用气体燃料电控喷射装置的方案研究	47
4.1	气体燃料电控喷射装置的布置	47
4.1.1	单点/双点喷射布置方案	48
4.1.2	多点喷射布置方案	49
4.2	整机控制器设计	50
4.2.1	以转速为目标的发动机控制	50
4.2.2	发动机转速和曲轴位置的检测	51
4.2.3	控制器端口的多路复用技术	53
4.3	进一步的改进方案	58
4.4	本章小结	59
第5章	应用气体燃料电控喷射装置的大功率发动机混合气形成研究	60
5.1	CFD 计算模型	60
5.1.1	技术方案	60
5.1.2	计算区域的确定	61
5.1.3	计算区域网格的划分	62
5.1.4	特殊事件的处理	64
5.1.5	边界条件、初始条件和求解器的设定	64
5.2	基本工况计算结果分析	65
5.3	不同方案的计算结果及分析	69
5.3.1	不同的气体燃料与进气空气压力差值	69
5.3.2	不同的喷射装置安装位置	72
5.4	本章小结	76
第6章	应用气体燃料电控喷射装置的发动机试验研究	77
6.1	试验装置	77
6.2	试验结果及分析	80
6.2.1	发动机启动及怠速试验	80
6.2.2	各缸均匀性调节	82

6.2.3 增减负荷时的发动机转速控制	82
6.2.4 发动机示功图测试结果与分析	84
6.3 本章小结	86
第 7 章 总结与展望	87
7.1 本书主要工作与结论	87
7.2 本书的创新点	88
7.3 研究与展望	89
参考文献	90

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究的背景及意义

随着社会经济的高速发展,能源和环境问题已成为全球关注的热点问题。如何降低 CO_2 和有害气体的排放,实现社会经济的可持续发展,将成为全人类共同面临的巨大挑战。同时,石油资源属于不可再生能源,对国家发展战略有着重要的影响。根据英国石油公司 2010 年的能源统计报告显示,截至 2009 年底,世界石油探明储量约为 13331 亿桶,中国石油探明储量约为 148 亿桶,占世界探明储量的 1.1%,居世界第 14 位。世界石油资源的储产比为 46 年左右,中国的储产比为 11 年,意味着现今世界石油的储量可以维持 46 年左右的开采时间,而中国的石油资源仅能维持 11 年的开采时间^[1]。伴随着中国经济的飞速发展,我国已经成为世界第二大经济体,对能源的需求也与日俱增。自从 1993 年以来,我国就已经成为石油纯进口国,2009 年中国的石油消耗量更是占到世界石油总消耗量的 10.4%,成为仅次于美国的第二大石油消费国。预计到 2020 年我国的石油对外依存度将超过 60%^[2],到 2030 年中国将超过美国成为世界最大的石油消费国^[3],石油短缺现象将严重制约着中国经济的发展。

伴随着我国工业化发展的进程,发动机总产量日益增加,2010 年我国产量高达 7300 万台。发动机在推动社会发展的同时,造成我国能源严重短缺和环境严重污染的问题已经突显出来。据世界资源研究所和中国环境检测总站测算,全球 10 个大气污染最严重的城市中,我国就占了 7 个。其中,机动车排放的污染物对中国城市的多项大气污染指标的“贡献率”已达到 60%以上。探索开发替代石油燃料的新型洁净燃料,开发高效低污染的发动机是当今各国关注的重大问题。

目前应用于发动机上的替代燃料主要为醇类燃料、二甲基醚、生物燃料和气体燃料等。气体燃料是可用能源的重要组成部分,被称为继煤炭和石油之后的第三大能源,除了压缩天然气和液化石油气外,还包括沼气、煤层气^[4-6]、高炉煤气等。天然气作为一种气体燃料,其主要成分是甲烷(CH_4)。由于天然气资源丰富、成本低,而且以压缩天然气(CNG)和液化天然气(LNG)的形式在发动机上应用时,具有对内燃机结构改动小、工作指标变化不大等优势,已经成为一种重要的替代燃料,在内燃机领域得到了广泛应用。除了高品质的天然气以外,甲烷含量为 40%~70%的品质较低气体替代燃料,目前也受到越来越多的关注。这种气体燃料通常被称为低热值气体燃料,其主要来源有生产生活中产生的油田气、高炉煤

气、煤田气、瓦斯气以及由有机物质在厌氧条件下发酵而制取出来的沼气。这类低热值气体燃料的组分中甲烷含量通常为 40%~70%，其余 30%~60%的组分为 CO_2 、 N_2 及其他非烃烷气体成分，低热值气体的热值仅为天然气 50%左右。低热值气体作为生产及生活方面的副产品，其来源丰富，但是由于其热值低，过去往往没有加以利用，直接排放到大气中，这不仅浪费了宝贵的能源，而且低热值气体本身也会带来大气污染、温室效应等环境问题。另外，由于低热值气体易燃易爆，极易对生产过程带来危害^[7-11]。因此，如何充分利用资源丰富的低热值气体燃料已经成为目前研究的热点问题之一。

随着世界范围内发动机保有量的快速增长、全球石油资源的过度开发，燃油矛盾日益加剧，而且随着人们环保意识的加强，越来越意识到使用清洁燃料的重要性，所以开发出新型清洁能源已经迫在眉睫。可燃性气体如天然气、煤层气、瓦斯气、水煤气和石油炼化尾气，是目前被世界公认为清洁、价廉、丰富、便于使用的发动机代用燃料。气体燃料在发动机领域的应用已成为发动机研究中的一个重要方向^[12-16]。

气体发动机气体燃料供给方式以及空燃比控制方法在很大程度上影响发动机的动力性、经济性、安全可靠性和排放性^[17]。随着电控技术的发展，供气控制逐渐由低精度的机械调节向高精度的电子控制调节方向发展。气体发动机技术是以电控喷射为特征，并匹配闭环控制，排放达到法规要求或更高的标准。电控系统中采用顺序多点喷射、稀薄燃烧技术以及闭环控制等先进技术，是气体燃料发动机电控技术的发展方向^[18-21]。气体发动机绝大多数是由现有发动机改装而成的，在气体燃料供给方式上目前国内产品仍主要采用相对落后的单点连续供气方式^[22]。国外进口的一些气体燃料喷射装置虽然有性能上的优势，但价格昂贵。国内仅见到贵州红林机械有限公司生产的高速开关阀应用于小排量气体燃料发动机后有关燃料喷射装置的研究^[23]，不过并未见其应用于实际发动机产品。在一种电磁直线执行器创新性的设计（已获国家发明专利授权）的良好研究基础上，开展大功率发动机气体燃料电控喷射装置技术研究，具有十分重要的理论意义与工程应用价值，以自主创新来打破国外的技术垄断，推进相关产业实现重大技术突破^[24-26]。

气体燃料电控喷射装置对各类不同成分、热值的可燃气体应具有良好的适应性，可应用下列多种气体燃料：

（1）常规的气体燃料，如天然气、沼气等。与现有的气体燃料发动机产品相比较，采用连续供气方式的气体燃料发动机，由于应用了电控喷射装置可以至少提高热效率 5%，具有明显的竞争优势。

（2）高炉煤气、焦炉尾气、炭黑尾气以及其他化工等各种行业中产生的工业废气。应用研发的气体燃料发动机产品发电能避免直接放空所产生严重的环境污

染与能源浪费。此类工业废气具有成分、热值各异且不稳定等特点,有着有效合理地进行资源化利用的迫切需求。

(3) 煤层气、煤矿低浓度瓦斯气、页岩气(Shale Gas)等一类作为替代能源的气体燃料。近日国务院发布的《找矿突破战略行动纲要(2011—2020年)》特别强调了勘查开发以页岩气、煤层气为重点的非常规油气资源,无论从寻找替代能源,还是从碳排放控制的角度,其高效利用都是十分重要的。

1.2 气体发动机国内外研究现状

在发展和应用气体发动机的过程中,进气控制和燃烧是气体燃料发动机的关键技术。能够根据工况的变化调节燃气和空气的供给,满足混合气量和空燃比的控制是对燃气供给系统的基本要求,也是发动机稳定可靠运行的前提^[27-33]。

1.2.1 气体发动机的燃料供给方式

气体发动机的供气方式根据技术的发展可分为以下几种^[34-40]:

(1) 进气管混合器供气方式,发动机供气系统包含一个与化油器类似的部件混合器,气体燃料在进气管或进气阀口以固定比例与空气混合,靠缸内负压被吸入混合器混合后进入气缸燃烧^[41],其供气方式示意图如图 1.1 所示。

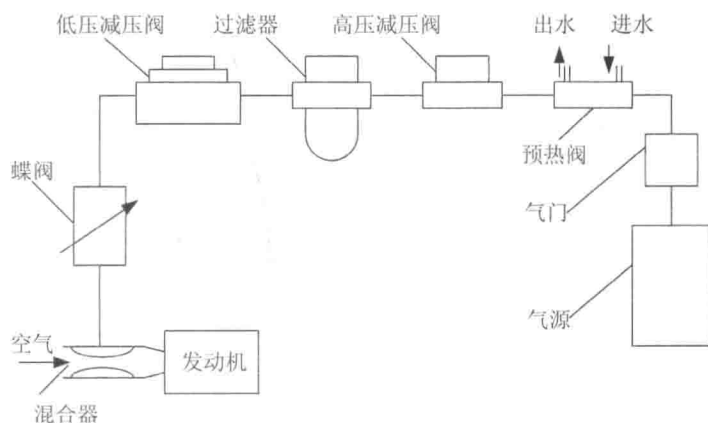


图 1.1 进气管混合器供气方式

图 1.2 给出了常见的文丘里管混合器。进气管混合器供气方式的气体发动机优点是:结构较简单,控制方便,价格较低,便于对现有的化油器式汽油机进行改造^[42]。但是由于不能精确地控制燃料供给量,而且无法进行闭环控制,难以精确地控制发动机的空燃比,满足较高的排放标准,不能充分发挥天然气改善发动机排放性能的潜力。因此这种供气方式目前主要应用在化油器式汽油车改装的“天

然气—汽油”两用燃料汽车上^[43]。

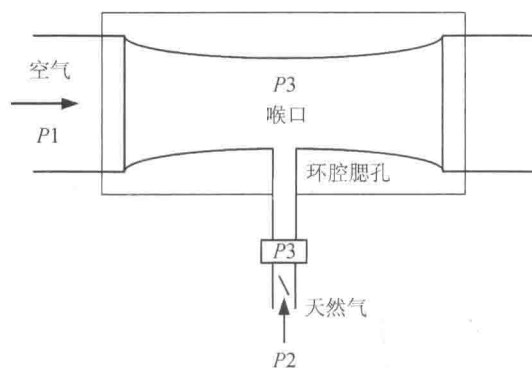


图 1.2 文丘里管

(2) 电控单点连续供气方式^[44,45]，即应用单一混合器将气体燃料喷入进气总管并与空气混合，然后通过进气歧管分配到各个气缸中进行燃烧。该类系统可以通过计算机控制来实现气体燃料的喷射，燃料供应准确、均衡、稳定性较好，而且该种喷气系统结构简单、工作可靠、成本低廉。但燃料在吸入各个气缸前要经过各个进气歧管，存在各缸混合气空燃比控制精度低、响应慢、不利于发动机性能提升等不足，技术相对落后，目前已应用渐少。

(3) 电控多点连续供气方式^[46-50]，即在每个气缸进气歧管或进气道处安装一个气体燃料喷射装置，并通过 ECU 按照一定的模式分别对各个气缸的喷射装置进行专门控制。该种喷射方式由于具有燃料进气行程短的优势，具有良好的响应性，并可以实现对空燃比按周期和按缸进行控制，所以燃料供应准确度、均衡性、稳定性和排放性都优于单点电喷。但与单点喷射系统相比，此类喷射系统存在结构复杂、成本较高的问题，而且不能充分扫气，甚至可能有回火等问题^[51,52]。

(4) 电控多点顺序间歇供气方式^[53-55]，即在发动机各缸进气道前顺序间歇（一般在进气过程中）供入气体燃料，可以有效解决发动机进气道及进气管内回火、扫气阶段气体燃料流失等问题，改善发动机性能。该类供气方式所需的气体燃料压力较低，但对气体燃料电控喷射装置有较高的要求，而且存在由于电磁铁特性而使工作行程较小，不利于大流量的气体燃料喷射，特别是在一些低热值气体燃料的应用需要加大容积流量的场合；同时存在控制特性差、落座速度大等影响装置工作可靠性的问题，并且对产生相互撞击部件的材料、制造工艺等要求较高。其改进方案是在运动部件的一端装配“抗冲击的高硬度止动销”，但另一端（针阀密封锥面）却无法同样处理，仍难以克服高落座速度冲击带来的工作可靠性和寿命等问题。

(5) 缸内供气方式^[56-59]，将气体燃料在发动机压缩过程中直接喷入缸内。缸

内气体喷射完全实现了燃料供给的质调节,有利于提高发动机升功率、有效效率等性能。但由于在相对高温高压环境供气,必须首先消耗一定能量将气体燃料压缩到较高压力,同时对气体燃料电控喷射装置要求更高,目前仅在小功率发动机中有极少量应用。

1.2.2 国外研究发展现状

以天然气等可燃气体作为发动机燃料,在世界上已有 100 多年的历史。与其他燃料相比,可燃气体具有资源丰富、燃烧清洁、技术成熟、安全可靠、经济可行等优点,在世界上得以迅速发展。美国、德国、奥地利、日本和芬兰是世界上应用气体燃料发动机技术水平较发达的国家,它们主要以天然气、沼气、垃圾气等为燃料的气体燃料发动机为研发对象,并且拥有先进的技术和产品,特别是关于大功率、大缸径机型技术非常成熟^[60-65]。

20 世纪 90 年代初,国外推出的双燃料发动机开始采用先进的电子控制技术。这一时期的双燃料发动机的共同特点是采用在进气总管安装电控混合器或天然气喷射阀的天然气电控供给系统,即电控混合器式或天然气单点喷射式双燃料发动机。比较典型的是荷兰 DELTA 公司的双燃料发动机和美国 Caterpillar 公司的 Caterpillar3208 柴油/天然气双燃料发动机^[66,67]。随着电控燃油技术的发展,美国 SPI 公司为奔驰公司改装的 OM352 双燃料发动机是采用电控多点喷射的典型代表^[68-71]。

图 1.3 为 Caterpillar3208 自然吸气式双燃料发动机电控系统示意图,整个系统由天然气供给系统、引燃油供给系统和电子控制单元(ECU)三个部分构成。电控单元通过传感器测定发动机的一系列参数,确定发动机的运行工况,并控制油泵调节齿杆和天然气流量控制阀的位置,根据发动机不同工况下性能和排放的需求,灵活地调整天然气、引燃柴油的喷射时刻和喷射量。但这种改装方式仍不能精确控制进入各气缸的天然气的量^[72]。

美国康明斯公司研制的 B5.9-195G 型天然气发动机采用的是电控混合器供气方式,并进行分组式点火,同时还采用了稀燃及闭环空燃比控制技术,降低了燃烧温度,提高了发动机的热效率,满足了美国的 LEV (Low Emission Vehicles) 汽车低排放标准。

随着机械与电子行业的发展,电控气体喷射系统的出现使得天然气发动机技术得到进一步的发展,它可根据不同的工况控制气体喷射脉宽以获得需要的空燃比,并可通过闭环控制更精确地控制天然气喷射量^[73,74]。日本本田公司的天然气发动机 Civic 电控喷气系统为顺序多点喷射,气体喷射器安装在发动机进气歧管上。在此基础上,为了改善天然气发动机的相关性能,减少功率损失,还对发动机排气门、排气系统等均进行了改造,并将原机压缩比提高到 12.5,使发动机的排放值明显降低,其排放指标仅为超低排放汽车标准的 1/10。

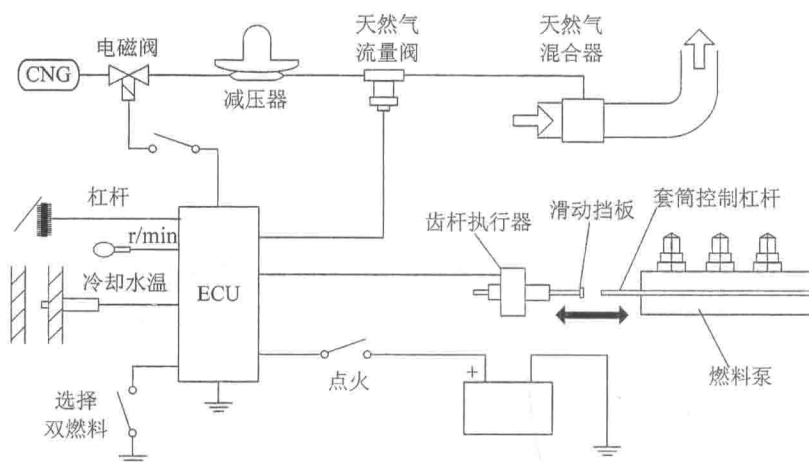


图 1.3 Caterpillar 双燃料发动机电控系统示意图

IVECO 公司开发的 6 缸 9.5 升功率为 162kW(采用涡轮增压)的 846OTCCNG 型号发动机采用了电控多点顺序喷射系统，并将该款发动机广泛应用于公交车和垃圾车；日本的 4BEI 型、美国卡特彼勒的 3306 型和福特 380 型、底特律柴油机公司的 50G 系列等单燃料 CNG 发动机也都具有上述喷射技术。美国底特律柴油机公司 (DDC) 在 DDC6V-92TA 柴油机上改装的双燃料发动机都应用了天然气电控缸内直喷 GDI 系统，并采用专用喷气装置，通过电子控制实现天然气的缸内直接喷射、稀薄燃烧，最后结合催化技术实现发动机超低排放^[75-77]。

进入 20 世纪 90 年代后，国外天然气汽车发展呈现出专业化、规模化的趋势。许多国外汽车生产厂纷纷推出装配大功率电控 CNG 发动机的天然气汽车 (NGV)，其发动机采用先进的电控技术，具有强劲的动力和优良的排放性能^[78-85]。

1.2.3 国内研究发展现状

我国对燃气发动机及其电控技术的研究起步较晚，无论在理论基础研究方面还是技术应用水平上与国外相比都有很大的差距，目前还处于自主开发电控喷气技术的发展阶段。

1998 年初北京石油勘探设计院改装了国内首辆柴油/天然气双燃料汽-JN362 黄河自卸车。从 1998 年以来，上海柴油机股份有限公司在天然气发动机新产品的研发上取得了丰硕的成果，2006 年开发的 T6114ZLQ3B 型 CNG 发动机，采用了电控单点喷射系统，可根据发动机工况变化对燃气实现精确控制。中国科学院广州能源研究所进行了深入研究，先后与重庆红岩机械厂、广州宇联机电公司、瑞士 ABB 公司、淄博柴油机厂合作，进行了柴油机改装燃气内燃机用于生物质秸秆气发电的研发工作，先后研发出 250kW、300kW、450kW 生物质气体内燃机，

并成功应用于低热值、高焦油、高焦油含量的生物质气化发电过程^[86]。胜利油田动力机械集团股份有限公司生产的瓦斯气、焦化尾气、沼气、高炉煤气 300kW、400kW、500kW、600kW 等系列低热值气体燃料发电机组在国内外得到广泛应用,初步实现了产业化^[87,88]。根据不同机型和不同使用场合,分别采用机械控制混合和闭环电控混合进气系统,其特点:一是燃气进气压力为常压,不需要单独对气体进行加压;二是能够适应各种可燃性气体,如沼气、水煤气、发生炉煤气和化工生产中施放的以一氧化碳、甲烷、乙炔或氢气等为主的可燃性气体。

能源的短缺,环境保护意识的加强,国家对气体燃料发动机研究投入的加大,促进了国内气体燃料发动机电控技术研究的开展。在国家自然科学基金的资助下,吉林工业大学率先开展天然气发动机缸内喷气技术的研究工作,并已实现点燃式内燃机机型的天然气电控缸外进气阀处喷射和电控缸内喷气;合肥工业大学在国家自然科学基金资助下开展的点燃式煤层气发动机系统建模及空燃比控制研究,采用电控双阀式气体燃料混合器方案,并对控制系统模型以及其中的数个关键传感器做了较深入的研究;天津大学、长安大学等院校在天然气稀燃技术方面均做了大量研究工作,处于国内领先水平。

近几年来,我国在单一天然气发动机电控技术上进行了初步尝试和研究。潍坊柴油机厂成功地试制了国内首台用柴油机改造的大型公交车用单燃料 CNG 电控发动机,采用了电控混合器方式。北京理工大学进行了由汽油机改造的多点顺序间歇喷射天然气发动机的研究^[89],吉林工业大学在 175E 汽油机基础上进行了电控缸内直喷技术方案的研究,通过提高发动机压缩比和利用缸内喷射技术可大幅度地提高天然气发动机的功率^[90,91]。北京交通大学以潍坊柴油机厂 WD615 系列柴油机中的 WD615.67 增压柴油机为原型机,开发了单燃料 CNG 电喷发动机控制系统,采用电控天然气多点顺序喷射、电控高能直接点火、空燃比闭环控制等技术,集成为单燃料天然气发动机集中控制系统。

国内对气体燃料发动机的产业化开发才刚刚开始,发动机多数是在现有柴油机或汽油机上简单改装而成的,大部分改装的发动机采用控制精度不高的机械式控制系统,性能较好的电控系统需要从国外进口,价格很高,使天然气发动机不存在价格上的优势,未能形成批量生产能力,限制了我国气体发动机的推广应用。国内市场迫切需要大功率、低排放的气体燃料发动机,特别是满足排放法规要求的大功率气体燃料发动机。

1.3 气体发动机电控喷射装置的研究进展

通过前面的研究可知,气体发动机采用电控喷射系统,尤其是采用电控多点顺序间歇喷射供给方式,可以实现根据发动机工况对喷射阀的运动规律进行实时、

准确、独立的控制,进而实现对气体燃料喷射量的精确控制,并可以有效地解决扫气期间由于混合气扫气所引起的相关问题,是气体燃料发动机的主要发展方向之一。而在电控喷射整个供气系统中,气体燃料电控喷射装置是最终的执行元件,其控制特性、响应速度、落座速度和流量特性等对整个电控喷射供气系统以及气体发动机的相关性能有着很大的影响,是整个电控喷射供气系统中最关键的部件之一,近年来一直受到国内外相关研究机构的关注。

目前研究的气体发动机电控喷射装置在驱动部件上都采用电磁铁方式,在执行部件方面大都采用球形阀、孔阀或针阀的形式。其主要结构原理大都如图 1.4 所示,该喷射装置是由我国贵州红林机械公司和美国 CAP 公司联合开发的^[92]。当喷射阀不工作时,电磁线圈不通电,此时在回位弹簧的作用下,球阀处于关闭状态;当需要喷射阀工作时,电子控制单元发出驱动电流,极靴与衔铁之间产生的电磁力使衔铁克服回位弹簧力及燃气压力带动衔铁向右运动,使球阀打开,将气体燃料喷射入发动机进气道内。

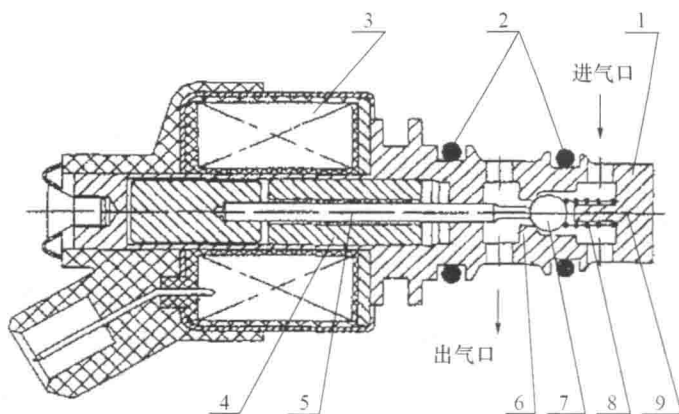


图 1.4 典型的球阀气体燃料喷射装置

1—球阀；2—O 型圈；3—电磁线圈；4—极靴；5—衔铁组件；

6—阀座；7—钢球；8—回位弹簧；9—弹簧座

此外,具有类似结构和工作原理的气体燃料电控喷射装置还有德国 Bosch 公司生产的用于单点喷射的 Y280 K40 485 型号喷射装置、美国 CAP 公司生产的用于多点喷射的 Servo-Jet 型号喷射装置、荷兰 VIALLE 公司的多点喷射装置以及德国 Hoerbiger 公司生产的 GV22^[93](图 1.5)。此类气体燃料喷射装置虽然体积比较小、便于安装,但由于喷射装置的气体进口和出口截面积较小,无法实现大流量喷射,限制了大功率气体发动机的负荷调节范围,特别是在应用低压、低热值气体燃料需要加大气体体积流量的场合。