

新型二冲程微型摆式 内燃机的设计方法

郭志平 张仕民 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

新型二冲程微型摆式 内燃机的设计方法

郭志平 张仕民 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

新型二冲程微型摆式内燃机的设计方法/郭志平, 张仕民著.

—北京: 国防工业出版社, 2013.9

ISBN 978-7-118-08780-2

I. ①新… II. ①郭… ②张… III. ①二冲程内燃机—设计
IV. ①TK402

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 146333 号

※
国防工业出版社 出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷责任有限公司
新华书店经售



开本 710×1000 1/16 印张 11¼ 字数 229 千字
2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 76.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

随着自主移动机器人、野外作业、微机电系统和军事等领域移动电子产品的快速发展,作为主要供电手段的化学储能电池,已经越来越不能满足这些产品对电源能量密度日益提高的要求。寻求高能量密度的供电方法,已经引起了学术界的广泛关注。鉴于液态碳氢燃料具有较高的能量密度($11500\text{W}\cdot\text{h/kg}$),如果仅将20%的化学能转换为电能,那么转换后的能量密度仍将是最好的化学储能电池的7倍多。研究具有高能量密度的微型发电系统、乃至到毫米、微米级,既可以用于军事目的也可以民用。这样一种微型发电系统不仅可以提高无线通信设备、便携式计算机以及便携式卫星传送站等现有产品的工作能力,更重要的是该技术将对实现诸如微型飞行器、完全的“数字化士兵”等诸多新技术做出重要贡献。研究新型二冲程微型摆式内燃机,目的是为具有高能量密度的微型便携式发电系统探求最佳动力源装置,这将会对我国国防建设起到积极作用。

本书阐述了现阶段新兴的微型内燃机发电系统研究领域中先进国家所取得的成果。以作者在该领域研究积累为主线,描述了一种具有自主知识产权的新型二冲程微型摆式内燃机的工作原理、结构特点。建立了该类内燃机设计和性能评价方法,建立了平面摆动式内燃机相位图图解方法;从结构设计、试制、各组成部分的理论计算、动力学、温度场、流场、应力场进行了全面描述,具有较强的理论基础和应用指导价值。本书内容充实,层次分明,特色鲜明,为推动微型内燃机的发展提出了新思路,可作为国防、动力、微机械学、能源等相关领域高年级大学生、研究生、科研技术人员和企业参考书目。

全书共分7章。郭志平教授撰写了第1章概述、第3章新型微型摆式内燃机的工作过程、第5章二冲程摆式内燃机动力学分析、第6章二冲程微型摆式内燃机热负荷及工质流动特性及结束语等。张仕民教授撰写了第2章新型二冲程微型摆式内燃机研制过程、第4章二冲程摆式内燃机气口参数的设计理论及第7章点火系统设计。

作者将近10年的研究总结成书,奉献给读者。由于作者水平有限,书中错误望广大读者斧正,并向所有读者表示谢意!

作 者

2013年6月

目 录

第 1 章 概述	1	第 3 章 新型二冲程微型摆式 内燃机的工作过程	22
1.1 引言	1	3.1 二冲程微型摆式内燃机的 基本结构	22
1.2 微型内燃机的发展动态	2	3.2 二冲程微型摆式内燃机稳 态工作循环模型的建立	23
1.2.1 微型内燃机发电系统 简介	3	3.2.1 二冲程微型摆式内燃机 系统力学模型	23
1.2.2 综合分析	5	3.2.2 二冲程微型摆式内燃机 的热力学模型	25
1.3 新设计方案的提出	6	3.2.3 质量燃烧率	27
第 2 章 新型二冲程微型摆式 内燃机研制过程	8	3.2.4 混合气性质	28
2.1 二冲程微型摆式内燃机的 研制过程和技术路线	8	3.3 二冲程微型摆式内燃机 工作循环阶段划分	29
2.2 二冲程微型摆式内燃机 燃料选择与燃料供给 系统设计	14	3.3.1 二冲程微型摆式内燃机 工作过程和配气相位	29
2.2.1 燃料选择	14	3.3.2 二冲程微型摆式内燃机 吸气过程的数学模型	31
2.2.2 燃料供给装置的选择	14	3.3.3 二冲程微型摆式内燃机 压缩过程的数学模型	31
2.3 进气系统的设计	15	3.3.4 二冲程微型摆式内燃 机燃烧做功过程的 数学模型	32
2.4 点火系统的设计与实现	16	3.3.5 二冲程微型摆式内燃机 换气过程的数学模型	32
2.4.1 自由活塞状态点火 系统的设计与实现	16	3.4 二冲程微型摆式内燃机的 工作过程分析	33
2.4.2 固定压缩比点火系 统的设计与实现	19	3.4.1 二冲程微型摆式内燃机 稳态工作循环模拟	34
2.5 二冲程微型摆式内燃机与 设计相关的其他问题	19	3.4.2 二冲程微型摆式内燃机	
2.6 直流发电机的研制与二冲程 微型摆式内燃机的测试	19		
2.6.1 永磁直流发电机的研制	19		
2.6.2 研制微型永磁发电机 性能评估	21		

电载荷系数为 0.004 工 作循环模拟	38	5.1.3 二冲程微型摆式内燃机 动力学仿真分析	62
3.4.3 二冲程微型摆式内燃机 电载荷系数为 0.006 工 作循环模拟	41	5.2 微型摆式内燃机惯性力系 分析	66
3.5 二冲程微型摆式内燃机 负荷特性分析	45	5.2.1 内燃机角速度和角加 速度的确定	66
3.6 外部载荷对二冲程微型 摆式内燃机性能的影响	50	5.2.2 绕固定轴转动刚体 惯性力系	66
3.7 虚拟匀速圆周运动投影 假设的验证	52	5.2.3 微型摆式内燃机惯性 力系的简化	67
第 4 章 二冲程微型摆式内燃机气 口参数的设计理论	54	5.2.4 微型摆式内燃机惯性力 系的仿真分析	68
4.1 二冲程微型摆式内燃机的 配气正时	54	5.3 二冲程微型摆式内燃机的 振动分析	69
4.2 二冲程微型摆式内燃机气 口参数设计的数学模型	55	5.3.1 二冲程微型摆式内燃 机的自由振动	69
4.2.1 二冲程微型摆式内燃机 气口比时面值的数学 模型	55	5.3.2 二冲程微型摆式内燃 机的强迫振动	73
4.2.2 二冲程内燃机的平均有 效压力与气口比时面 值的统计规律	57	第 6 章 二冲程微型摆式内燃机 热负荷及工质流动特性	77
4.3 二冲程内燃机气口参数 设计算例	57	6.1 二冲程微型摆式内燃机 热负荷	77
4.4 二冲程微型摆式内燃机 压缩比对气口比时面 值的影响	59	6.1.1 热传导数学模型	77
第 5 章 二冲程微型摆式内燃机的 动力学分析	61	6.1.2 缸体热力学分析	78
5.1 系统动力学分析	61	6.1.3 中心摆热力学分析	86
5.1.1 二冲程微型摆式内燃机 系统动力学方程的建立	61	6.2 二冲程微型摆式内燃机的 应变干涉分析	90
5.1.2 ADAMS 中动力学 方程的求解算法	62	6.2.1 二冲程微型摆式内燃 机密封要求	90
		6.2.2 第 1 载荷步应变场	90
		6.2.3 第 8 载荷步应变场	93
		6.2.4 二冲程微型摆式内燃 机的结构改进	96
		6.3 二冲程微型摆式内燃机 流场分析	97
		6.3.1 燃烧室工作过程相位图	97

6.3.2	几何参数 (图 6-45、 图 6-46、表 6-4)	99
6.3.3	CFD 和 FLUENT 简介	99
6.3.4	基本控制方程、计算模 型以及数值离散方法	101
6.3.5	计算模型	102
6.3.6	基于有限体积法的控 制方程离散	107
6.3.7	二冲程微型摆式内燃 机预压缩过程的流场 分析	107
6.3.8	预压缩室结构改变后的 流场数值模拟计算	113
6.3.9	扫排气过程的流场 分析	114
6.3.10	扫排气过程改进结 构的流场分析	131

第 7 章 点火系统的设计139

7.1	点火系统的理论分析与 仿真	139
7.1.1	二冲程微型摆式内燃 机对点火系统的要求	139
7.1.2	点火系统工作过程的 理论分析	139
7.1.3	点火系统的数学模型	143
7.1.4	点火过程的仿真	144
7.2	二冲程微型摆式内燃机 点火系统的实现	146
7.2.1	点火系统的总体设计	146
7.2.2	点火系统的硬件设计	150
7.2.3	软件设计	158
7.2.4	抗干扰设计	164

参考文献167

第1章 概述

1.1 引言

目前, 无线电话、笔记本计算机、自主移动机器人以及便携式卫星传送站等产品的发展速度很快, 但是为其供电的电源系统却远远落后于这些产品对电源能量密度以及补充能量时间的要求。现在便携式电器电源绝大部分是化学储能电池, 其主要缺点是能量密度低, 持续运行时间短, 充电时间长。显然, 如果能研制一种能量密度高, 持续运行时间长, 补充能量时间短的便携式电源系统将会拥有广阔的市场前景^[4]。

美国巴特勒研究所在一项研究报告中就列出了 10 个 2020 年最具战略意义的技术趋势, 这些趋势将决定着未来一个时期的社会发展特征。其中, 位居第二位的战略趋势为大功率能源装置: “研制高度先进电池、廉价燃料电池和微型发电机等, 将使许多电子产品和器具高度可移。分散的电源将是广泛分布的、成本不高的、环境上清洁的。这些高功率分散的新能源系统将为家具、家庭和汽车提高后备能源。在向燃料电池过渡中, 电池也将得到改进, 也将出现燃烧天然气等小型发电机”。^[2]

事实上, 在军事科技领域, 随着战场技术的不断发展, 越来越多用于办公用途的电子产品已经演化成为便携式装备。并且, 装备的功能和复杂性不断增加, 以及用于这些装备的高能电源需求也在持续增长^[7]。这一切使得常规便携式电源(如电池)几乎发挥到了它们潜在的极限。通常情况下, 选择电池作为动力源是不得已而为之。例如, 在一台便携式计算机和手机中, 电池的重量和体积占了很大比重。对于便携式装备, 电源块体积是制约其增加电源容量的根本。所以, 化学电池的有限能量密度已经成为将来这些技术发展的主要障碍和难题之一。

为了解决这一难题, 对可以替代现有电池并具备高能量密度的微型便携式电源的研究无论是在工业界还是学术界都引起了广泛关注。这意味着, 一种高鲁棒性和高可靠性电源的内涵将是及其广博的。一般而言, 它将极大地扩展便携式电器的工作能力。从学术角度看, 它将带来许多难题、挑战和难得的研究机会, 并且能进一步将现在宏观层次的知识扩展到微观水平。

为了开发高能量密度电源, 许多不同方案已经或正在被实施。目前, 开发这种电源的努力已经发展成为 3 种不同的研究趋势。第一种研究趋势是逐步改进传统化学储能电池, 然而, 在过去几十年中, 化学储能电池的能量密度只增加了 2 倍, 远远低于同期对高密度电源需求的增长。第二种研究趋势是研发极具前景的燃料电池。随着化石能源的逐渐枯竭, 燃料电池最终将成为绝大多数移动设备获取能量的主要

手段。运行在宏观状态下的燃料电池能量转换效率高、排放污染极低^[103]。但是研究表明,在微型化情况下,微型燃料电池的一些关键技术,如微型燃料重整器、安全性以及氢存储等^[104],都是目前科学家们正在努力解决的技术难题。只有解决了这些难题之后,微型燃料电池才能够与现在广泛应用的化学储能电池竞争市场。事实上,燃料电池微型化后,同样也失去了能量转化效率高的优势。例如,西北太平洋国家实验室(Pacific Northwest National Labs, PNNL)使用甲醇和丁烷产生 100W 电能的微型燃料电池的效率也仅有 4.8%^[12]。同时,燃料重整器的研究仍然是一个难题,可见完全商业化的微型燃料电池仍然需要时间。第三种研究趋势是利用相对复杂的内燃(IC)系统产生电能。这种选择的优点:①液态碳氢燃料具有很高的能量密度(以 J/L 计量)。例如,汽油的能量密度是现行商用电池的 50 倍以上^[4]。高能量密度是电力供给系统的重要特性,尤其是对于那些需要长时间运转的设备;②液态燃料与同等能量电池相比具有容易运输、存储和处理的特性^[4];③补充液态燃料比电池充电要简单、快捷;④内燃过程的能量转换效率较高,最高可达 40%。

对于第三种趋势,目前主要研究方法是将宏观发电机缩小为微型发电机,希望用更先进的制造技术,如微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)来达到最终目的。然而,这些用于发电机动力的具体燃烧系统本身并不适合于在微型化条件下运转,主要原因是为了使缩微系统的功能正常,这些系统大部分零部件必须保留在缩小的系统中。很显然,适合于微小级别的内燃系统和宏观级的系统存在着很大区别。更有甚者,受到制造工艺的限制,在研究这种整体系统之前,这一努力要花费大量时间和精力去制造缩小的零部件。众多与微型发动机相关的研究不得不在脱离设备的条件下或者在实验室模型中进行,但是实际工作过程可能与正在开发的设备完全不同。宏观世界原始系统的复杂性在很大程度上降低了制造微观复制版本的机会。

在发展了 100 多年的常规内燃机技术基础上,研究结构简单,平面化的微型动力源装置,不断积累设计理论、推动微型动力系统的 MEMS 化,对发展微型内燃机发电系统将具有重要的理论意义。

1.2 微型内燃机的发展动态

微型内燃机发电系统这一研究领域刚刚起步,许多研究项目还处于可行性研究阶段。然而,考虑到这是一个新兴的前沿技术,加之只有少数几个研究项目受到资助,所以相对而言已经取得了很大进展。现在,科学家们一致认同的是(至少在这个研究领域内是这样):如果有效地组织燃烧过程和控制热损失,微燃烧是可行的^[13]。几个关于微型内燃机的研究项目正在进行中,其中有一些已经能够发出电能。到目前为止,制约微型内燃机发电系统发展的主要矛盾仍然集中在其动力源本体(微型内燃机)上。内燃机微型化后,燃烧室内流场的弱化,热传导面容比的增加,以及气密性问题,将会使燃烧组织更为困难,导致整机热效率仍然

很低^[95]。目前，研究人员在探讨微型化内燃机燃烧机理的同时，不断通过改变内部结构的方式，试图提高内燃机燃烧效率，改善微型内燃机性能^[9]。

1.2.1 微型内燃机发电系统简介

麻省理工学院，加州大学伯克利分校、佐治亚理工大学、霍尼韦尔技术中心的几个研究小组一直在研究以微型内燃机为动力源的供电装置，这一方法是将宏观的发动机如燃气轮机、转子发动机缩小到微观尺寸^[8]。将宏观发动机缩小到微观尺寸的动机来源于如下考虑：①内燃机的能量密度远远高于电池，一辆以汽油为动力的汽车的能量密度超过电池能量密度 5 倍以上。②从热力学循环的角度来分析，增加热量将增加效率。对于宏观热力发动机，效率部分受到燃烧室材料工作温度的限制。这一限制要求对发动机燃烧室壁进行冷却，这将进一步减少发动机的热效率和增加设计的复杂性。但是，因为硅基材料能够承受比现存发动机燃烧室材料更高的热负荷，所以高温在微型制造的热力发动机上是允许的。

下面将分别介绍几个研究机构的研究情况。

麻省理工学院的研究人员正在研制一台集成了发电机的微型燃气轮机。发明专利号为 US5932940。第一台样机是用 SiC 制造的，采取了圆盘形状。它具有 1cm 直径和 3mm 厚度，并且可以在消耗 10g/h 氢气的情况下产生 10~20W 的电^[6]。他们的最新样机预计可以用碳氢燃料产生 100W 的电^[1]。图 1-1 所示为这种微型燃气轮机的剖视图，微型燃气轮机由压缩器、燃烧室和叶轮组成^[1]。气态氢气燃料从压缩器的出口喷入，当它径向向外流经燃烧保持器时与空气混合。燃烧室径向向内排气到叶片并转 90° 后到发动机喷嘴。微型燃烧室和微型涡轮已经制造出来并能够演示其工作过程。

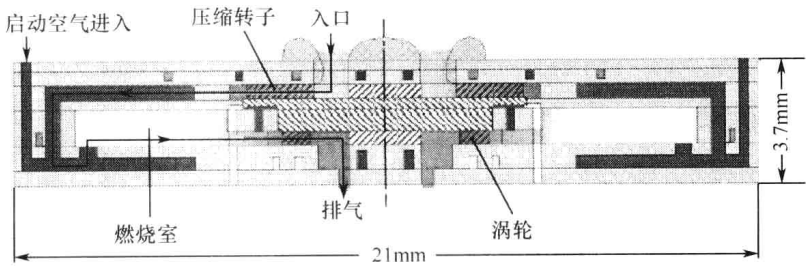


图 1-1 微型燃气轮机原理图

加州大学伯克利分校的研究人员正在研究一种基于 Wankel 转子发动机的微型转子内燃机，与其他结构的发动机相比，Wankel 转子发动机的结构简单，不需要进排气阀门^[10]。或许，相对简单的结构正是加州大学伯克利分校研究人员考虑的主要因素。其结构如图 1-2 所示。

这种发动机是用常规硬质钢和常规加工方法制造的。它的半径为 5.5mm，厚度为 3.6mm。主要用来研究设计、制造、以及在微机电系统级运行时潜在的问题和缺陷^[11]。他们最终的目标是制造半径为 0.5mm、厚度为 0.1mm 的 Wankel 发动机，这种微型发动机将在硅或碳化硅片上进行制造。同时，这种发动机的初始版

本将燃烧气态燃料，如氢气、甲烷、丙烷，以后的版本将燃用液态碳氢燃料，并且希望在此基础上能够发出瓦级功率。

佐治亚理工大学的研究人员正在研究一种用脉动燃烧驱动磁性自由活塞式的热力发动机。该发动机包括一个直角磁性活塞、一个带有埋入传导线圈的直角沟槽、两个在沟槽两边的燃烧室。如图 1-3 所示，当两边的燃烧室周期性的做功时，气体推动磁性活塞在埋入线圈的沟槽内往复运动，从而在线圈内感应生成电流^[12]。

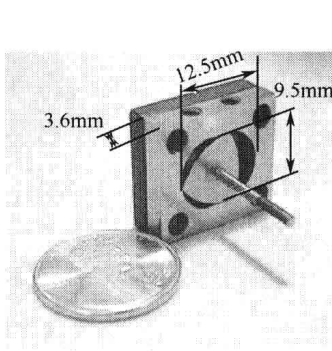


图 1-2 微型转子发动机

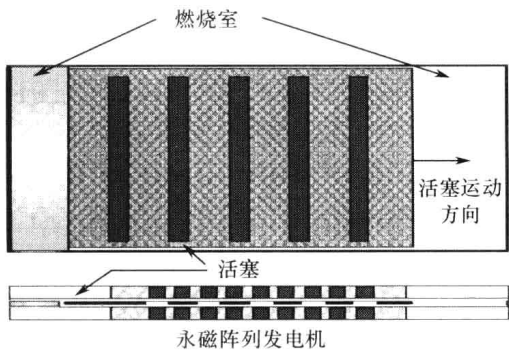


图 1-3 佐治亚理工大学的微型热力发动机^[3]

佐治亚霍尼韦尔技术中心和美国空军研究实验室（AFRL）的研究人员正在研究一种微机电系统级的对置自由活塞发动机（MEMS Free-piston Knock Engine）（图 1-4），他们的目标是在微观级演示使用碳氢燃料的内燃机和发电机，如丙烷、丁烷或柴油，并且可以供给士兵使用或代替其他电池应用的 5~10W 输出功率的发电装置。^[14]

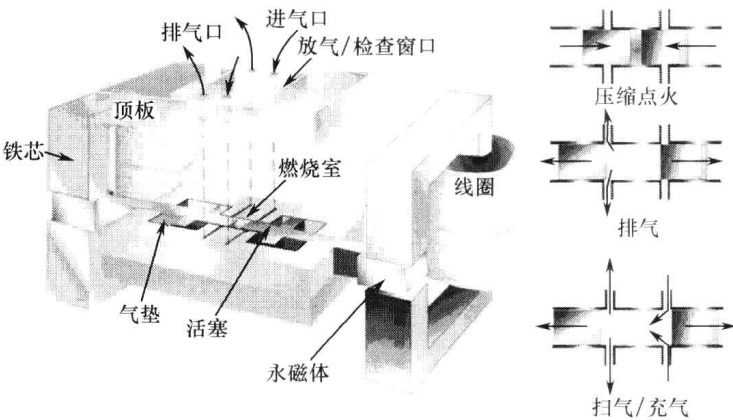


图 1-4 微型对置发动机^[14]

密歇根大学为了设计微型发电机，创造性地提出了微型内燃摆式发动机（Micro Internal Combustion Swing Engine, MICSE）的新概念发动机，它是第一次特别为发电而设计的内燃机^[15]。图 1-5 所示为 MICSE 的工作原理，结构中几何对称的摆将两个扇形腔分隔成 4 个容积可以变化的燃烧室 A、B、C、D。在 4 个行程的工作过程中始终有一个燃烧室在做功，如果现在 A 燃烧室正在做功，则 B、C、D 燃烧室

分别处于压缩、吸气、排气过程，也就是说其点火顺序为 A、B、C、D。显然，这种发动机的最大优点是结构简单，只有一个运动部件；结构的简单化已经解决了前面提到的比例化难题，其设计的可制造性不再像传统系统那样难以解决；即便是常规的制造技术，仍然有许多方法可以制造出 MICSE 的机械部件。MICSE 优越的可比例化特性将使人们能够寻求发动机物理原理的极限，并且能够设计出最大性价比的装置；除此之外，基于 MICSE 的发电机将有下列明显的优势：①MICSE 的整体设计尤其简单，大大增加了系统的可靠性；②MICSE 单元的振动很小，原因是它的摆动部件是几何对称的；③作为摆动输出的结果，MICSE 在外载荷波动时，将有很好的外载荷特性，这是因为随着外载荷的增加，发动机的压缩比也在增加，结果会产生更大的输出功率；④不需要独立的启动单元；⑤MICSE 的主要元件几乎都是可二维平面设计的简单几何形状，所以整个系统可以按着最佳性价比和功率需求进行平面设计，并且可以用很多方法制造^[31, 32]。

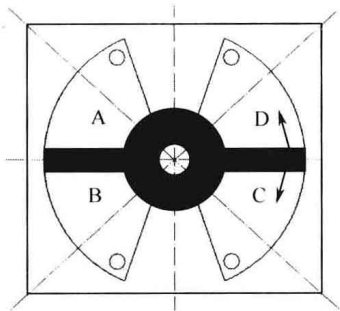


图 1-5 MICSE 的结构原理^[5]

根据 MICSE 研究人员的研究和测试，MICSE 的能量密度为 $1.2\text{MW} \cdot \text{h/kg}$ ，而最好的电池的能量密度为 $400\text{W} \cdot \text{h/kg}$ ，MICSE 的能量密度是电池的 3000 倍。最好的便携式电池的能量密度为 $260\text{W} \cdot \text{h/kg}$ ，MICSE 是便携式电池的 4600 倍。

1.2.2 综合分析

由上述可知，如果仅靠提高化学电池的能量密度来满足日益增长的便携式装备对电能的需求是不可能的。燃料电池以其清洁、无噪声、高效而具有广阔的发展前景^[98]，并且完全可能最终取代绝大多数电池，而成为便携式装备主要电能供给手段。与燃料电池相比，微型内燃机除了能够为微型发电机提供动力源之外，还可以广泛地应用于直接需要机械功的领域，例如，微型间谍飞行器等。所以，不能把燃料电池和微型热力发动机的发展对立起来，它们各自都有存在的价值和理由。

热力发动机自诞生以来，一直受到燃烧噪声高、机械振动难以避免以及发热量大等问题的困扰，这些问题在微型内燃机中仍然存在。作者认为，在当前的微型热力发动机的研究中，这些尚不属主要矛盾。如何设计、制造一种结构简单、可以按比例缩放、效率高而且不受现存加工方法限制的微型热力发动机，是目前研究人员首先要解决的问题。

上述描述的每一种微型内燃机，设计者的出发点都是从常规的大型内燃机出发，然后将其缩小到微观级^[100]。其实，在这一类的研究中既有缩小的难题又有制造的难题：①正如前面介绍的那样，传统内燃机在缩小到微观版本时，为了保证其功能不得不保留原系统的零部件，而这些结构又多为三维结构，这给微观制造带来了极大的困难，甚至有些不可能用现存的微机械制造方法制造。②流体在小装置内的流动和宏观机械中的流动不同[Gad-el-Hak, 1998]。基于微电子机械结构的沟槽、喷嘴、阀、轴承、涡轮等流体模型与常规的诸如 Navier-Stokes 方程所描

述的流体模型不可能总是一致^[115]。当微机械的试验结果用常规的流体理论不能解释时，需要构造许多新的流体方程。在狭长的微沟槽内的压力梯度已经被证实不再是常量，测量到的流速也高于由常规连续流体模型预测的速度。③在微机械系统中，微型轴承的承载能力会减弱并且驱动微型电动机的电流将极其高。运行于大气压力下的微型加速度计的动态响应出现了过阻尼现象已经证实了这些缺点的存在。

密歇根大学设计的 MICSE 成功地实现了可按比例放大、缩小的发电系统。由于这种微型内燃机是典型的平面机构，所以它不受现存制造技术的限制^[101]。但是，设计者在设计过程中仍然没有摆脱常规发动机复杂的进、排气机构。在原型样机中，由于使用了排气门而不得不增加控制电磁阀，如图 1-6 所示，使得系统的控制及结构变得复杂化^[44]。

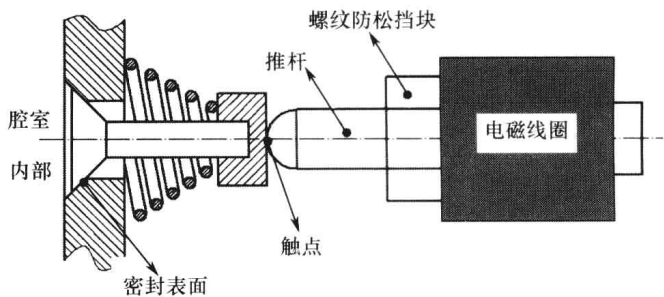


图 1-6 MICSE 的排气阀门机构^[5]

1.3 新设计方案的提出

基于 MICSE 基本设计思路，作者设计了一种新型的微型摆式二冲程内燃机，如图 1-7 所示。

该微型内燃机装置摒弃了原 MICSE 内燃机四冲程的工作方式，以二冲程方式做功，并以簧片阀取代了复杂的进排气门机构^[97]。

在图 1-7 所示的结构中，安装在输出轴上的中心摆将机体上的两个扇形空腔分割成 4 个容积可变的扇形空腔，分别称为燃烧室 A、燃烧室 B、扫气室 C 和扫气室 D。C、D 两个扫气室，分别为燃烧室 A、B 提供具有一定预压力的新鲜混合气。当 A 处于做功行程时，在可燃混合气爆炸燃烧压力的作用下，摆自左向右做顺时针摆动，同时压缩已经进入 B 和 C 的可燃混合气，D 处于从外部吸入可燃混合气的工况；当摆动到打开排气口时，由于排气口的背景压力大大低于 A 燃烧室内的压力，A 的排气行程开始，此时其他各缸的工况继续进行；当排气口打开到 1/2 时，A 的进气口打开，也就是 A 和 C 连通，具有一定压力的新鲜混合气强行进入燃烧室 A，并对 A 内的残留气体进行扫气；接下来燃烧室 B 进行同样的过程，只是摆动方向相反。周而复始的往复摆动达到了微型摆式二冲程内燃机输出摆动动力的设计目的^[18]。

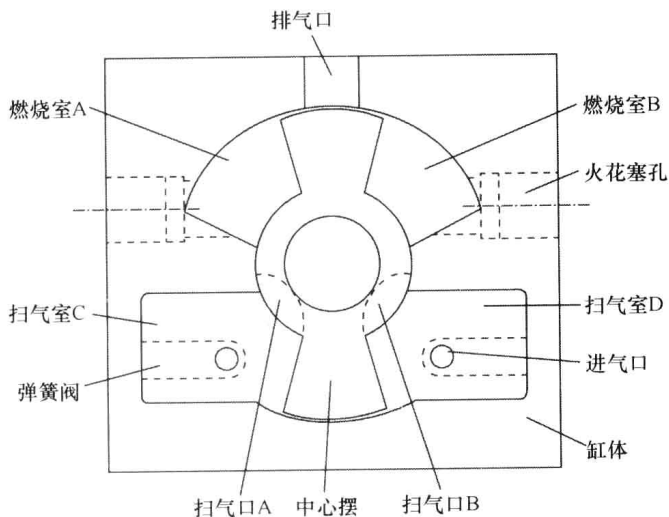


图 1-7 微型摆式二冲程内燃机

在这个设计方案中，简化了进排气阀门机构，大大减小了整个系统的体积和重量，同时也简化了控制系统。

从上述可以看出，在微型内燃机发电系统这个新兴的研究领域中，都摒弃了传统往复活塞式内燃机。因为其结构复杂，以现有的制造技术难以实现其微型化，所以已经失去了其技术成熟的优势。科研人员都在追求结构简单、平面化的微型内燃机，期望能够在未来实现 MEMS 化。代表性结构有微型转子内燃机、微型水平对置活塞式内燃机、微型摆动式内燃机等。

这类微型内燃机的共性如下：

- (1) 内燃机尺度都在厘米级范围，功率为 10~100W。
- (2) 结构都具有平面化特征^[114]，无论线性往复运动还是摆动，其活塞都具有直角特征。

这类内燃机的研究趋势如下：

- (1) 探求微型化后燃烧腔内的流场特征、燃烧形态，从而建立微型内燃机的燃烧模型及理论。
- (2) 不断改进结构，通过改善燃烧组织、提高压缩比和气密性来提高能量转化效率，从而提高内燃机整体性能。
- (3) 发展制造技术，为内燃机的微型化提供低成本的加工手段。

通过对现有微型内燃机研究方案的分析，作者提出了新型微型摆式二冲程内燃机的设计方案。这种方案没有超越传统内燃机的燃烧理论，所以这种方案是完全可行的。但是这种创新结构，是否能够按照传统内燃机的工作序列高效地完成做功过程，需要仔细设计和深入研究。研究内容涉及内燃机原理、燃烧学、流体力学、工程热力学、传热学、耐高温材料、机械设计以及控制工程等多门学科，如工作过程数学模型的建立、模拟计算、力场和热力场的工程分析、优化设计等。因此，作者将多年的研究积累奉献给读者，期望起到抛砖引玉的作用，推动该研究领域不断深入发展下去。

第2章 新型二冲程微型摆式 内燃机研制过程

2.1 二冲程微型摆式内燃机的研制过程和技术路线

从理论分析的角度已经证实这种新概念内燃机的运动方式可行，并能够应用到微型发电系统中。下面从原理样机的材料选择、制造工艺、密封方式、配合间隙等相关制造问题出发，介绍二冲程微型摆式内燃机的研制过程的经验^[18]。

1. 第一轮原理样机

第一轮原理样机的研制目的是证实二冲程微型摆式内燃机能够实现点火运转，以便从实践的角度检验这种新结构内燃机的可行性。

材料：全部采用耐高温弥散化粉末冶金。

制造厂家：洛阳空空导弹研究院。

加工工艺：线切割加工型腔，电火花成型加工扫气口。

零件表面耐磨处理：无。

密封方式：无密封措施，单边间隙为 $10\mu\text{m}$ 。

结果：失败。

本轮原理样机外观和轮廓尺寸如图 2-1 所示，主要零件如图 2-2 所示，试验台布置如图 2-3 所示。

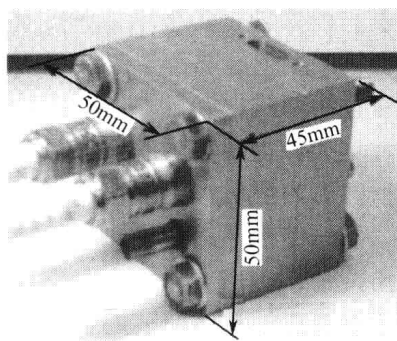


图 2-1 第一轮原理样机外观及轮廓尺寸

该原理样机设计配合间隙为 $20\mu\text{m}$ ，但是由于加工形位误差较大，如中心摆的两个圆柱面以及轴孔柱面母线与端面垂直度严重超差，致使样机装配后出现难以转动的现象。尽管未能达到研制目的，但是却为下一轮样机的研制积累了制造工艺方面的经验。

2. 第二轮原理样机

第二轮原理样机的研制目的仍然是证实二冲程微型摆式内燃机能够实现点火运转。

材料：15H-P（特种不锈钢）。

制造厂家：洛阳空空导弹研究院，北京机械自动化研究所。

零件耐磨处理：固熔，50HRC。

加工工艺：线切割加工型腔，电火花成型加工扫气口。

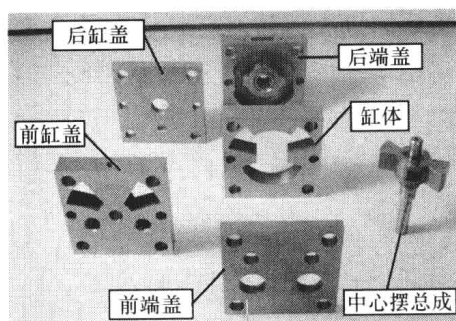


图 2-2 第一轮原理样机零件

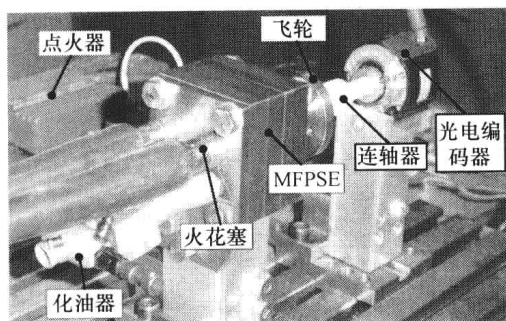


图 2-3 第一轮原理样机试验台布置

密封方式：无密封措施，轴向和径向单边配合间隙为 $7\sim 8\mu\text{m}$ 。

结果：实现点火运转，但持续运转时间约 5s。

本轮原理样机外观和轮廓尺寸如图 2-4 所示，主要零件如图 2-5 所示，试验台布置如图 2-6 所示。

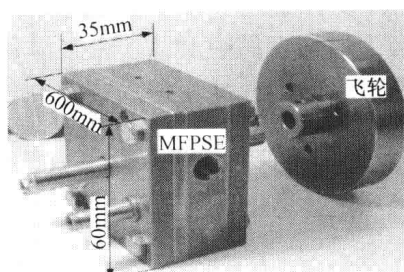


图 2-4 第二轮原理样机及轮廓尺寸

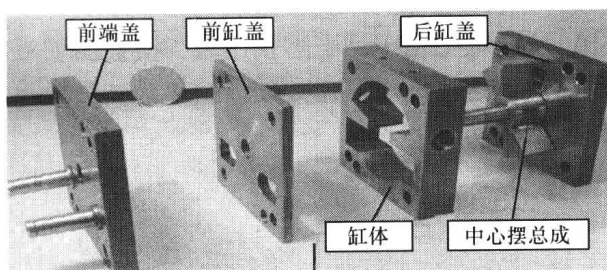


图 2-5 第二轮原理样机零件

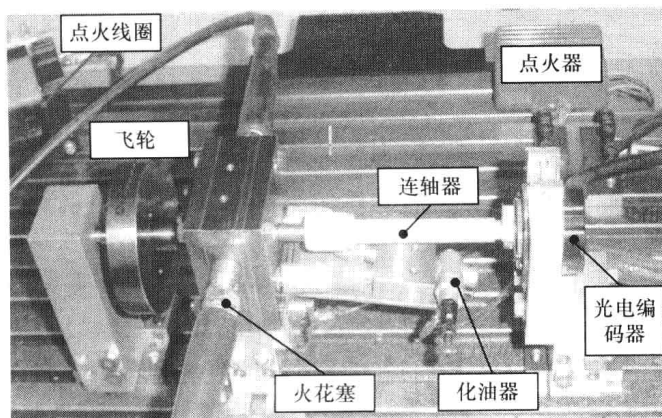


图 2-6 第二轮原理样机试验台

本轮原理样机以汽油为燃料，能够实现点火运转，持续时间 5s 左右。经常出现卡死现象。拆解内燃机后发现摩擦表面存在多处粘着磨损擦痕，并在擦痕终止处聚集凸起状小点。主要原因是构成摩擦副的两个零件均为奥氏体，而且是同一种材料。另外，在装配过程中还发现，尽管在缸体的对角位置设有两个定位销，但是因为加工误差的存在，致使定位销无法发挥其定位作用，使得中心摆的两个圆柱面与缸体内腔的两个圆柱面之间的径向配合间隙出现不均匀，这一点可以由

两个燃烧室的压缩压力明显不同判断出来。成功的点火运转已经从实践的角度验证了二冲程微型摆式内燃机的可行性。

3. 第三轮原理样机

第三轮原理样机的研制目的是通过采取径向密封措施，期望改善径向密封效果，并减少摩擦阻力。

材料：中心摆选用 ZL109（汽车发动机活塞用材料），缸体及前后缸盖等选用 QT250。

制造厂家：中国航天科工集团第二研究院，北京机械自动化研究所。

热处理：ZL109 铸成圆饼状毛坯后固熔处理。

加工工艺：线切割加工型腔，电火花成型加工扫气口。

密封方式：径向增加密封条；轴向仍然采用小间隙配合，单边配合间隙为 7~8 μm 。

结果：能够点火运转，持续运转时间约 10s，最长持续时间可达 20s 左右。

本轮原理样机外观和轮廓尺寸如图 2-7 所示，中心摆如图 2-8 所示。在工作中，中心摆上由于粘着磨损出现了明显的划痕。为了增加表面耐磨性，将缸体和前后缸盖进行离子氮化处理，结果缸体变形，内腔圆柱面圆柱度变差，致使中心摆无法摆动。

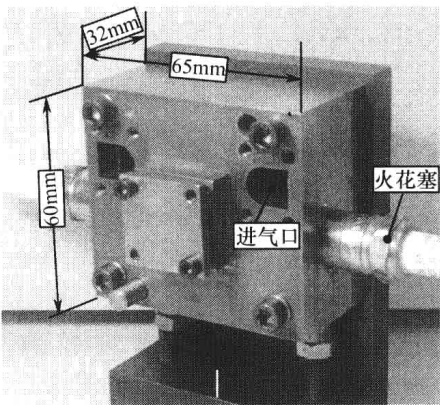


图 2-7 第三轮原理样机及其轮廓尺寸

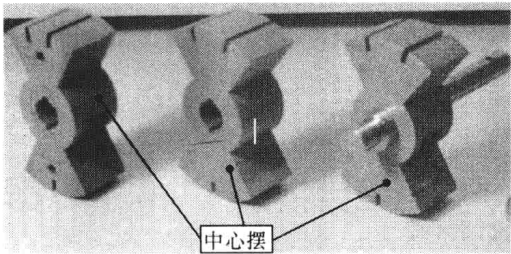


图 2-8 第三轮原理样机中心摆

4. 第四轮原理样机

第四轮原理样机研制目的是通过采取轴向和径向密封措施，期望进一步改善密封效果并减少摩擦阻力。

材料：中心摆选取 2Cr13，缸体及前后缸盖选取 38CrMoAl^[54]。

制造厂家：中国航天科工集团第二研究院，北京机械自动化研究所。

表面耐磨处理：离子氮化，表面硬度可达 65HRC。

加工工艺：线切割加工型腔，电火花成型加工扫气口。

密封方式：轴向和径向增加密封条；中心摆和缸体及前后缸盖的配合间隙为 30 μm 。

结果：只能点火运转几个工作循环。