

文章编号: 1000-8055(2003)01-0092-05

微涡喷发动机离心电油盘环形折流燃烧室的设计与实验研究

曾 川, 王洪铭, 单 鹏

(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 微涡喷发动机是低成本的结构简单的燃气涡轮动力装置, 特别适合于推动巡航导弹、(雷达)假目标、轻型直升机、无人侦察机和航空靶机。离心电油盘环形折流燃烧室由于具有燃油雾化质量好, 轴向长度短, 高空性能好等优点, 很适合作为微涡喷发动机动力装置的燃烧室。本文主要研究了离心电油盘环形折流燃烧室的气动热力学参数和几何参数的设计, 并通过实验研究验证参数设计的合理性。

关键词: 航空、航天推进系统; 微涡喷发动机; 离心电油盘; 环形燃烧室

中图分类号: V 235. 111

文献标识码: A

The Design and Study of the Annular Combustion Chamber with Centrifugal Fuel Injection

ZEN G Chuan, WANG Hong-ming, SHAN Peng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: For most micro-turbojet layouts, the annular combustion chamber shows itself as one of the best combustion system arrangements. It can usually be shown to be the lightest, least expensive to manufacture, and most efficient combustion system arrangement in terms of utilization of the specified engine volume. In this paper, the design and study of the annular combustion chamber with centrifugal fuel injection are presented.

Key words: aerospace propulsion; micro-turbojet; centrifugal fuel injection wheel; annular combustion chamber

1 前 言

各国目前在相继研制大型先进武器的同时, 也在研制小型武器。美国 1998 年研制有陆军投资的翼展 150 mm 小型无人机(简称 MAV)的微涡喷, 其核心机直径为 $d = 10$ mm, 转速 1, 000, 000 r/min, 这种小涡喷正在美国麻省理工学院研制。在两次海湾战争中使用的微型空中诱饵机(简称 MALD)用的小涡喷 TJ50, TJ90 等, 其中 TJ50 发

动机直径仅为 102 mm, 仅有网球那么大, 转速达 100, 000 r/min。这种微涡喷在德国、英国、法国、日本正在相继起步。国内也正开展微涡喷发动机的研究。此次研究主要为推力 98 N 的微涡喷发动机提供合理的离心电油盘环形折流燃烧室的参数设计。其基本过程是: 通过资料的研究提出较为合理的参数, 根据参数设计并加工制造燃烧室实验件, 通过实验验证参数设计的可行性。

收稿日期: 2002- 01- 14; **修订日期:** 2002- 03- 27

作者简介: 曾川(1977-), 重庆人, 男, 北京航空航天大学动力系硕士生

2 油盘环形燃烧室的优点

2.1 良好的雾化性能

微发动机的转速一般都很高, 此次设计的发动机转速就达到了 $100,000\text{ r/m in}$ 。燃油沿电油盘壁在哥氏力的作用下呈螺旋线从电油盘的小孔喷出, 并且一般燃油流量不足以充满整个电油盘小孔, 因此喷出的燃油呈空心管簇, 据参考文献[1]介绍, 空心管簇的油膜厚度只有 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。在高转速下, 燃油具有很高的切向速度, 因此当油膜与速度很小的空气掺混时, 摩擦力远远大于了油膜的表面张力, 油膜破碎, 燃油雾化, 其油滴的索太尔平均直径在高转速下远远小于 $100\text{ }\mu\text{m}$, 具有良好的雾化效果。

2.2 高空性能好

可以在很宽的大气条件下工作, 发动机在高空时空气流量下降, 燃油流量也减少, 从电油盘小孔喷出的空心管束油膜厚度减小, 这样有利于离心电油盘环形折流燃烧室的雾化。如果忽略燃油中的水分在低温时结冰产生堵塞这种情况, 则外界气温气压的变化对雾化质量几乎没有影响。因此, 这类发动机可在高空低温低压等很宽的大气条件下工作, 其高空燃烧效率很好。而一般的离心喷嘴, 由于在高空飞行时, 因空气压力下降而使燃油雾化质量恶化。

2.3 发动机轴向尺寸短

离心式压气机一级的压比远远超过轴流压气机, 因此采用离心式压气机比采用轴流压气机要大大缩短轴向尺寸, 但其缺点是迎风面积太大, 及相同迎风面积比轴流压气机进气量小得多。可是, 如果将离心压气机配上 1 个离心电油燃烧室, 就可以充分利用空间, 既完成离心电油所必须的雾化掺混燃烧全过程, 又缩短了发动机的长度, 提高了喷油雾化性能。这样将离心电油燃烧室与离心压气机匹配, 大大缩短了发动机的轴向尺寸, 减轻了发动机的重量, 解决了转子的刚性等问题。

3 燃烧室的气动热力学参数和结构参数的设计

3.1 已知的实验参数

通过发动机的总体设计, 得到了燃烧室设计所需要的基本参数见表 1。

3.2 燃烧室的参数设计

根据燃烧室的气动热力学公式, 可以计算得

到此次设计的燃烧室基本参数值: 燃烧室的进口总温 T_0^* 为 416.16 K , 在燃烧效率 η 为 0.95 时, 燃烧室余气系数 α 为 2.658 , 燃油流量 m_f° 为 0.004 kg/s 。主燃区要保证充分燃烧, 取主燃区余气系数为 1.0 , 计算得到主燃区的空气流量占总空气流量的百分比为 37.62% 。根据参考文献[1]介绍, 在离心电油盘环形折流燃烧室中, 前旋流板和后旋流板的空气流量之和应占总空气流量的约 25% , 进气斗中空气流量的 $1/4$ 进入主燃区进行燃烧, 其余的空气作为冷却气体。参考 W P-11 (见参考文献[2]) 前旋流板和后旋流板的空气流量分别为 15.5% 和 18.7% , 而且由于面积法忽略流量系数 μ 的不同, 使得计算结果大孔的进气量偏小, 小孔进气量偏大, 所以在设计中取前后旋流板的进气总量占总流量的 30% 。从前面的计算得知, 主燃区的空气流量应占总空气流量的 37.62% , 它主要有前后旋流板中的空气和进气斗中空气流量的 $1/4$ 组成。设计燃烧室中, 前旋流板设计成一圈搓板状缝隙, 燃烧室后旋流板采用打孔的方式使空气进入主燃区, 火焰筒外环装有 18 个进气斗, 计算流量分配所得结果见表 2。

表 1 燃烧室设计的相关参数

Table 1 Related parameters of the combustion chamber design

符 号	名 称	数 值
T_0^*/K	发动机进口总温	288.15
P_0^*/Pa	发动机进口总压	101325
η_k	压气机效率	0.83
π_k	压气机增压比	3.0
T_4^*/K	涡轮前总温	1300
$m_a^\circ/(\text{kg/s})$	空气流量	0.1566
$n/(\text{r/m in})$	发动机转速	100,000

表 2 燃烧室的流量分配

Table 2 Distribution of the combustion chamber air flow

流量百分比	前旋流板	后旋流板	外环
$\frac{m_i^\circ}{\sum m_i^\circ}/\%$	13.75	16.30	69.95

在燃烧室的设计中, 燃油油滴的索太尔平均

直径 SMD 是判定燃油雾化效果的重要物理参数。国外资料介绍电油喷射产生的燃油油滴索太尔平均直径 SMD 几乎完全取决于电油盘的切向速度 v , 其值公式:

$$SMD = \frac{115000}{n\pi r} \quad (\mu\text{m})$$

确定。式中: n 为发动机转速 (r/min), r 为电油盘油孔出口处半径 (m)。在燃烧室设计中, 电油盘直径设计为 0.02 m 时, SMD 值约为 $18 \mu\text{m}$, 即使转速只有设计状态的 $1/5$, 油滴直径也能满足雾化要求 (一般可燃烧的油滴直径小于 $100 \mu\text{m}$)。

燃油流经电油盘小孔喷射而出, 参考文献[2]经过实验观察得到油孔射出的油束是空心管状油膜, 并且由射流速度 v 可以估算油膜厚度 δ , 其值按公式:

$$m_f = \gamma_r \cdot v \cdot Z \cdot \pi \cdot [r^2 - (r' - \delta)^2]$$

计算。式中: m_f 为燃油流量, γ_r 为燃油密度, v 为射流速度, 在转速上万转时, 离心力影响较大, 近似取 $v \approx n\pi r$, Z 为电油盘上的油孔数目, r 为油孔半径。在实验件设计中, 转速 $n = 20,000 \text{ r/min}$, 油膜厚度 δ 为 $2.17 \mu\text{m}$ 。根据参考文献[1]所介绍, 小涡喷发动机的离心电油折流燃烧室的油膜一般为 $3 \mu\text{m}$, 如果提高转速, 油膜厚度更薄, 则会更加有利于燃油雾化和燃烧。

在轴向扩压器的出口处, 空气流量公式:

$$m_a = \frac{P_3}{RT_3} A v$$

参考 J69 和 J402 发动机里的相关参数, 空气在轴向扩压器出口的速度应相应的减小, 以保证火焰筒中空气流速的减小, 从而使燃油在火焰筒有足够的停留时间, 假定为 10 ms 以上, 这样燃油能够充分燃烧。这里取经验值轴向扩压器出口处空气流速为 20 m/s 。计算得到出口出面积为 3077.2 mm^2 , 设计中轴向扩压器的外径为 65 mm , 内径为 57 mm 。

据参考文献[1]介绍, 小型发动机中燃油在火焰筒的停留时间在 $5 \sim 10 \text{ ms}$, 这样能保证燃烧充分。设计燃烧室燃油停留时间是 10 ms , 火焰筒的最大面积处外径为 56 mm , 内径为 35 mm , 最大面积 $A_{\max}$ 为 6003.6 mm^2 , 通常按冷态计算主燃区的空气流速: 即用轴向扩压器出口的总温、总压和总流量来计算火焰筒最大面积处的空气流速, 作为火焰筒内燃油的平均流速, 再根据停留时间, 计算出火焰筒的中心线长度, 从而确定折流燃烧室的径向和轴向长度。故得到公式:

$$m_a = \frac{P_3}{RT_3} A_{\max} V_{av}$$

计算得到 $V_{av} = 7.85 \text{ m/s}$, 火焰筒中心线长度为 78.5 mm 。容热强度:

$$Q_{v_c} = \frac{3600 \xi m_c H_u}{P_3 V_c}$$

式中: V_c 是燃烧室容积, ξ 是燃烧完全系数, 计算得出 Q_{v_c} 为 $2215.3 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \text{ hPa})$ 。通过查阅参考文献[3], 计算出 WR 24-6 燃烧室的容热强度约为 $2549.2 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \text{ hPa})$, 根据参考文献[1], 计算出 J69-T-41(A) 燃烧室的容热强度约为 $2678.3 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \text{ hPa})$, 它们都是小发动机容热强度的典型, 说明小发动机燃烧室的容热强度一般为 $2000 \sim 2800 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \text{ hPa})$ 。故此次设计的燃烧室是比较合理的。并且由于容热强度较大, 说明燃烧室尺寸和重量都得到了减小。

4 实验研究

4.1 实验设计分析

(1) 由于燃烧室最终的目的是要应用到能够飞上天的微发动机上, 所以尺寸有一定的限制, 另外考虑到实验件需要有自制的涡轮带动轴旋转, 而涡轮所需的高压空气是由空气压缩机提供, 与理论设计有变化, 因此对理论设计值进行了修正, 实验件的径向尺寸为 140 mm , 实验件总图参看图 1。

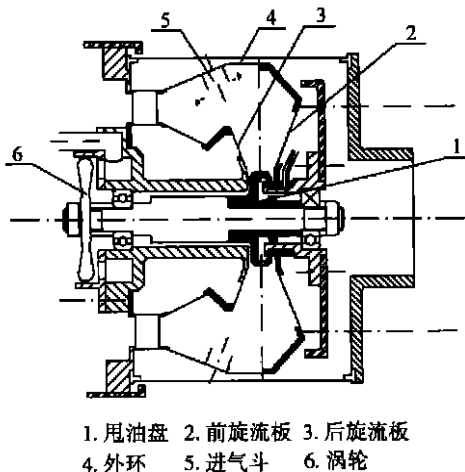


图 1 离心电油盘环形折流燃烧室实验件总图

Fig 1 The annular combustion chamber with centrifugal fuel injection

(2) 涡轮要带动电油盘, 对燃油进行雾化。所以, 涡轮的设计应该保证能够达到设计要求的转

速。实验中用空压机产生的高压气体吹动自制的简易涡轮转动。实验前,要用光电转速仪标定涡轮转速。实验时只要控制高压气体的压力即可获得所需的转速。实验系统图参看图 2。

(3) 燃烧所用的空气,由鼓风机提供。实验前需要确定节流流量计进气口的面积,用 U 形管测量节流流量计孔极前后的压差,以保证燃烧室所需的空气流量。

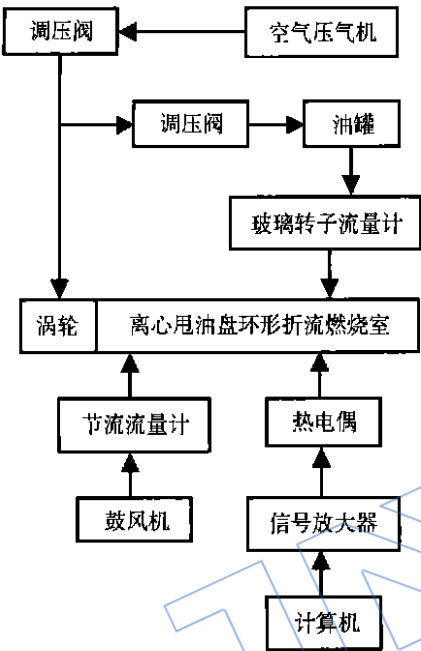


图 2 实验系统图

Fig 2 Flow diagram of the experiment system

(4) 燃油通过引入空气压缩机的部分高压气体从储油罐中压出,经由玻璃转子流量计测量出燃油流量,然后由内径为 2 mm 的细油管导入油腔,再从油腔喷到电油盘,在哥氏力作用下从电油盘小孔喷出。

4 2 实验数据

(1) 实验中空气流量由节流流量计测得,燃油流量由玻璃转子流量计测得,经过计算稳定在理论设计值下(即空气流量 $\dot{m}_a$ 为 0.1566 kg/s 和燃油流量 $\dot{m}_f$ 为 0.004 kg/s,误差范围不超过 5%)进行点火实验。

(2) 点火之前,通过调压阀调节通向涡轮的高压空气,从而得到压力—转速的关系,当高压空气稳定在 3.24×10^5 Pa 时,转速稳定在 19,000~20,000 r/min 之间,持续时间约 25 s。

(3) 在打开调压阀后的 2~3 s 内点火成功,点火成功率约为 85% 以上。

(4) 燃烧火焰拖出燃烧室的现象很少,其中 1 次实验照片见图 3。说明燃烧室的油气比比较合适,燃烧室结构较为合理,每次燃烧后基本没有剩余燃油积留在燃烧室出口。

(5) 多次点火实验,测量燃烧室出口在周向内的温度变化,平均温度达到 950 K 以上,取其中典型的温度分布如图 4 所示,从图中可以看到,周

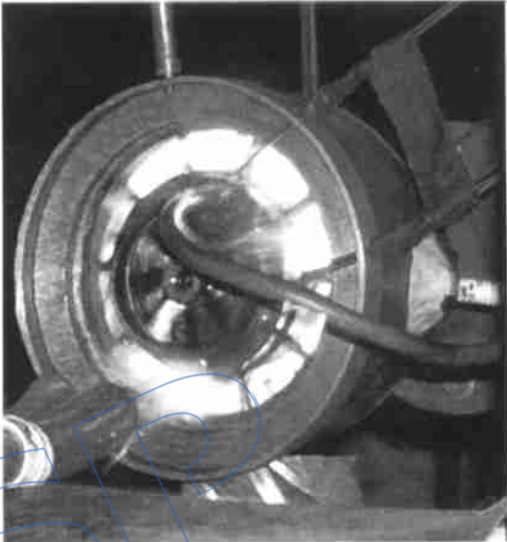


图 3 点火实验

Fig 3 The picture of the experiment

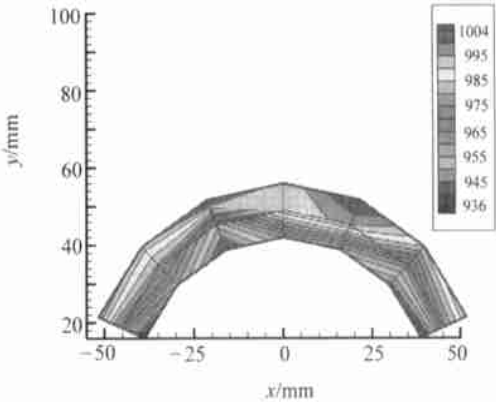


图 4 燃烧室出口温度分布图

Fig 4 Combustor outlet temperature distribution

向温度分布基本均匀,说明燃油周向雾化分布较为均匀,径向温度变化不大,主要是由于径向尺寸太小。

5 结 论

实验件经过反复加工改进后,实验取得了很好的效果,得出结论如下:

(1) 通过对微涡喷发动机离心电油盘环形折流燃烧室理论的设计和实验零件的详细设计, 取得了燃烧室内部工作原理和构造特点的深入认识, 特别是对供油系统、电油盘的结构特征、轴承的选择、空气流量的分配、实验件涡轮的结构特征等都有了较详细的掌握, 为今后进一步研究提供了参考。

(2) 成功的进行了点火实验研究。

(3) 燃烧室出口温度周向分布基本均匀, 说明电油盘周向电油较均匀, 燃油雾化效果较好, 达到了设计电油盘折流燃烧室的目的。

参考文献

- [1] Maskey H C, Marsh F X. The Annular Combustion Chamber with Centrifugal Fuel Injection[R]. SAE- 444C, 1964
- [2] 王洪铭 WP-11 发动机燃烧室吹风实验[R]. 北京: 北京航空航天大学, BH-F53, 1976
- [3] 侯志兴 世界航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1987.
- [4] 李长林, 胡逸安, 唐明 离心电油燃烧室计算方法研究[R]. 北京: 中国航空学会第二届动力年会, N Z900756, 1989
- [5] Mandle R J. Twenty Year Evolution of the WR2/WR24 Series of Small Turbojet Engines[R]. SAE 770998, 1977.

规范论文关键词与提高英文摘要写作质量

最近, 中国科协学会学术部为了规范学术论文, 深化学术文献的研究和统计, 多层次提高中文文献检索水平, 使更多的学术论文进入科技工作者的引用范畴, 达到促进我国科学技术研究的目的; 以及针对目前学术期刊中的英文摘要绝大多数比较粗糙, 离参与国际交流的要求相距甚远的问题。向全国性学会、协会、研究会及各有关期刊编辑部下发了《关于在中国科协系统科技期刊中规范关键词选择的决定》(简称《决定》)和《关于进一步提高期刊论文英文摘要写作质量以及在有关期刊编辑部开展英文摘要达标荐优活动的通知》(简称《通知》)。我刊为贯彻执行《决定》和《通知》, 特摘要其中主要内容告知作者, 供作者在写论文时进行参考。

1 关键词

《决定》对学术期刊学术论文的关键词选择和排序, 做出如下规定: (1) 发表在中国科协系统学术期刊所有学术论文, 必须在摘要后列出不少于 4 个关键词; (2) 关键词按以下顺序选择:

第一个关键词: 列出该文主要工作或内容所属二级学科名称。学科体系采用国家技术监督局发布的《学科分类与代码》(国标 GB/13745- 92)。

第二个关键词: 列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称。

第三个关键词: 列出该文在得到成果或结论时采用的学科研究方法的具体名称。对于综述和评述性学术论文等, 此位置分别写“综述”或“评论”等。对科学研究方法的研究论文, 此处不写被研究的方法名称, 而写所应用的方法名称。前者出现于第二个关键词的位置。

第四个关键词: 列出在前三个关键词中没有出现的, 但被该文作为主要研究对象的事物或物质的名称, 或者在题目中出现的作者认为重要的名词。

如有需要, 第五、第六个关键词等列出作者认为有利于检索和文献利用的其他关键词。

2 英文摘要

《通知》对提高学术期刊学术论文英文摘要的质量做出如下规定:

(1) 英文摘要是应用符合英文语法的文字语言, 以提供文献内容梗概为目的, 不加评论和补充解释, 简明、确切地论述文献重要内容的短文。

(2) 英文摘要必须符合“拥有与论文同等量的主要信息”的原则。为此, 英文摘要应重点包括 4 个要素, 即研究目的、方法、结果和结论。在这 4 个要素中, 后 2 个是最重要的。在执行上述原则时, 在有些情况下, 英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围, 以及具有情报价值的其他重要的信息。当前学术期刊上英文摘要的主要问题是要素不全, 繁简失当。

(3) 英文摘要的句型力求简单, 通常应有 10 个左右意义完整、语句顺畅的句子。

(4) 英文摘要不应有引言中出现的内容, 也不要对论文内容作诠释和评论, 不得简单重复题名中已有的信息; 不用非公知公用的符号和术语, 不用引文, 除非该论文证实或否定了他人已发表的论文, 缩略语、略称、代号, 除了相邻专业的读者也能清楚理解的以外, 在首次出现时必须加以说明; 科技论文写作时应注意的其他事项, 如采用法定计量单位, 正确使用语言文字和标点符号等, 也同样适用于英文摘要的编写。