

文章编号: 1000-8055(2004) 06-0849-06

回流燃烧湍流流场激光 可视化实验

葛 冰, 臧述升, 周见广, 翁史烈
(上海交通大学 动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200030)

摘要: 实验测量了钝体后丙烷/空气湍流扩散燃烧流场及其对应的冷态流场, 分析了两种流场的异同点。利用粒子图像速度场测量(PIV)技术对4种不同工况的冷热态流场进行了测量, 得到了燃烧火焰内部的速度场和相应工况下的冷态速度场。结果表明, 冷热态流场的速度分布总体相似, 但与冷态流场相比, 燃烧状态下流场回流区的中心位置升高, 长度增加, 最大回流速度减小, 速度场变得相对紊乱。实验表明, 在对湍流扩散燃烧流场作深入研究时, 仅利用冷态实验来模拟燃烧状况是不能满足要求的。

关键词: 航空、航天推进系统; 湍流扩散燃烧; 激光燃烧诊断; PIV 测量; 钝体
中图分类号: V231.2 文献标识码: A

Experimental Study of Reverse Flow Combustion in A Turbulent Flow Field Using PIV

GE Bing, ZANG Shu-sheng, ZHOU Jian-guang, WENG Shi-lie
(Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 20030, China)

Abstract: Experiments have been performed to investigate the differences between the propane/air turbulent diffusion reactive flow past blunt-body and the cold airflow under the same condition. By (Particle Image Velocimetry) PIV technique, the reactive flow fields and the cold flow fields were measured for 4 different operating modes. The velocity fields have been acquired successfully. The results show that although in general the velocity distributions of reactive flow are similar to that of cold flow, compared to the cold flow, it was found that the center of the reverse-flow zone is higher; the dimension of the reverse-flow zone is bigger; the maximum reverse flow velocity decreases and the flow fields become more turbulent. It is suggested that it is unacceptable to use cold flow experiment to simulate the reactive flow field when turbulent diffusion flame is researched in-depth.

Key words: aerospace propulsion system; turbulent diffusion combustion;
combustion diagnosis with laser; (Particle Image Velocimetry) PIV measurement; blunt-body

在工业生产及发动机的燃烧中经常利用钝体 或旋流方式来稳定火焰。当燃气流过钝体后, 会在

收稿日期: 2004- 02- 16; 修订日期: 2004- 04- 06

基金项目: 国家重点基础研究“973”资助项目(G1999022303)

作者简介: 葛冰(1977-), 男, 江苏沭阳人, 上海交通大学动力机械及工程教育部重点实验室博士生, 主要从事燃烧研究。

钝体后缘产生回流区, 形成稳定的点火源, 使火焰驻定。为了研究回流区对火焰稳定的作用, 不少研究者对回流区作了大量的实验观察。由于实验设备的限制, 常规的火焰燃烧研究往往都是建立在冷态实验的基础上。随着对燃烧流场研究的不断深入, 利用冷态实验来模拟燃烧状况已不能满足研究的要求, 需要对燃烧流场直接进行测量。

目前, 燃烧火焰结构可视化技术成为解决这一问题的重要途径, 而 PIV 粒子成像测速技术的应用则成为这个研究领域中一个重要方面。由于 PIV 技术克服了以往单点测速技术的局限性, 实现了对流场的瞬态、全场、定量的测量, 因此, 它被越来越多的研究者所使用。Donghee Han 和 Mungal M G^[1,2] 将 PIV 技术和 PLIF 技术(激光诱导荧光法)相结合, 测量了湍流射流燃烧流场, 得出了流场的速度分布及 CH 分布。Widmann J F 等^[3,4] 采用三维 PIV 技术对一个旋流喷射火焰在喷嘴出口处的速度特性进行了研究, 比较了平行于喷嘴出口的不同截面上的速度。Jean-Michel^[5] 利用 PIV 研究了微重力情况下的火焰特性的情况。Kurosawa Y 等^[6] 采用 PIV 测试技术对燃气轮机燃烧室内部燃烧特性进行了研究, 对比了在预混燃烧和扩散燃烧两种情况下的火焰速度场。然而, 目前国内此领域的研究尚少, 本文利用 PIV 技术对带有钝体的燃烧器内回流区湍流扩散燃烧流场进行了测量, 考察了不同燃空混合下的冷态和热态流场, 并进行了比较、分析。

1 实验装置及方法

本实验测量的是冷热态下燃烧器钝体后湍流流场, 冷态时, 测量的是流过燃烧器钝体后的空气速度场, 热态时测量的是钝体后丙烷/空气湍流扩散燃烧速度场, 所用的实验装置及其布置如图1所示。所用的钝体是一个中间有孔的圆台形钝体, 空气流过钝体后与喷嘴喷出的燃气在钝体上方区

域混合扩散燃烧。图2就是该钝体的结构图和 PIV 测量区域图。

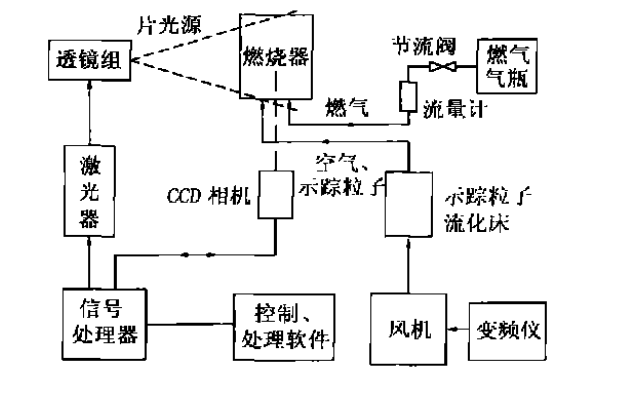


图1 PIV 流场测量实验系统
Fig. 1 Experimental setup for PIV measurements

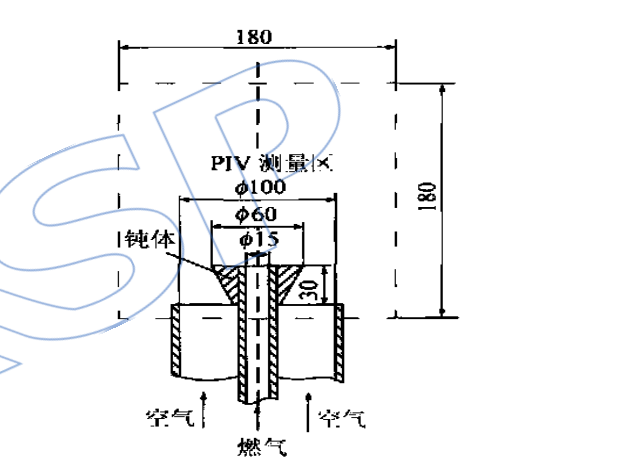


图2 燃烧器钝体及 PIV 测量区域图
Fig. 2 Dimensions of burner and measure area of PIV

本实验共进行了4种工况的冷热态实验, 具体参数如表1所示。

本实验使用了丹麦 Dantec 公司生产的 PIV 系统, 它主要由片光源系统, 图像拍摄系统, 信号处理器和控制处理软件(Flow Map) 四部分组成。激光片光源系统以双谐振脉冲式 Nd: YAG 激光器为光源, 工作频率为15 Hz, 每个脉冲能量为250 mJ, 输出激光波长为532 nm(绿光)。图像拍摄系统采用分辨率为1008×1018像素的 CCD 相机, 以256级灰度方式识别示踪粒子, 采集速度为30帧/s, 两帧最小时间间隔为0.6 μs。为了降低火焰发光对拍摄图像的影响, 在 CCD 镜头前安装了一块平均通频率为532 nm、带宽为10 nm 的80C41型滤光镜。根据文献[4, 7]的经验, 实验中使用两种示踪粒子, 其中冷态实验采用了5 μm 的烟雾粒

表1 实验工况参数表

Table 1 Operation conditions in experiment			
工 况	燃气流速 /(m/ s)	空气流速 /(m/ s)	出口空气 雷诺数
1	0. 38	3. 28	15 240
2	0. 57	6. 64	30 830
3	0. 75	9. 85	45 730
4	0. 94	12. 41	57 570

子, 热态实验采用了 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 粉末。

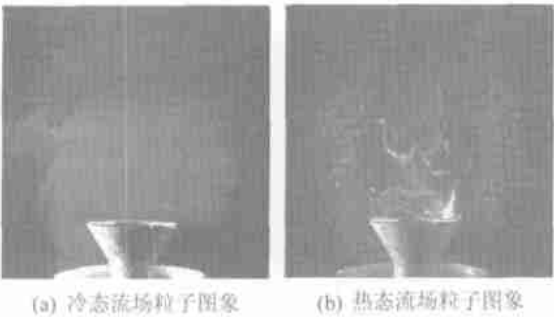


图3 冷态和扩散燃烧流场粒子图

Fig.3 Images of seeding particles of cold flow field and reactive flow field

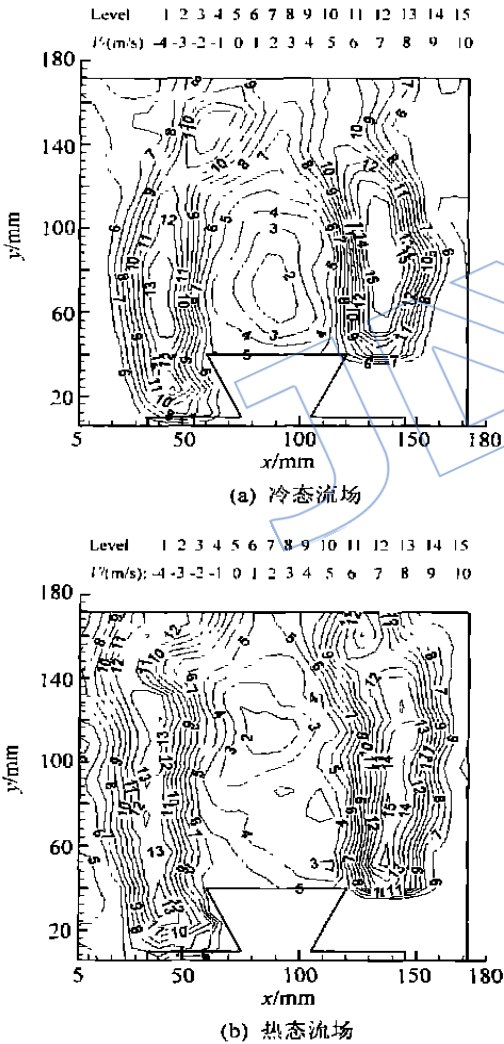


图4 冷热态轴向速度等值线图
($Re=45\,730$)

Fig.4 Axial velocity contour plots of cold flow field and reactive flow field ($Re=45\,730$)

2 实验结果与分析

本实验利用 PIV 技术得到了钝体后丙烷/ 空气湍流扩散燃烧速度场及相应工况下的冷态速度场。图3为图像拍摄系统采集的冷态和扩散燃烧流场粒子图像, 其中, 左图上显示的雾状体即为烟雾粒子, 右图中显示的小颗粒即为示踪粒子。由于片光源从钝体左侧进入, 因此在钝体背光区域会产生一块盲区, 在此区域内相机将无法拍到粒子信息。

利用软件 Flow Map 对实验结果进行处理, 得到了冷热态流场的速度场矢量图和轴向速度等值线图(钝体中轴线在 $x=90\text{ mm}$ 处), 如图4和图5所示。

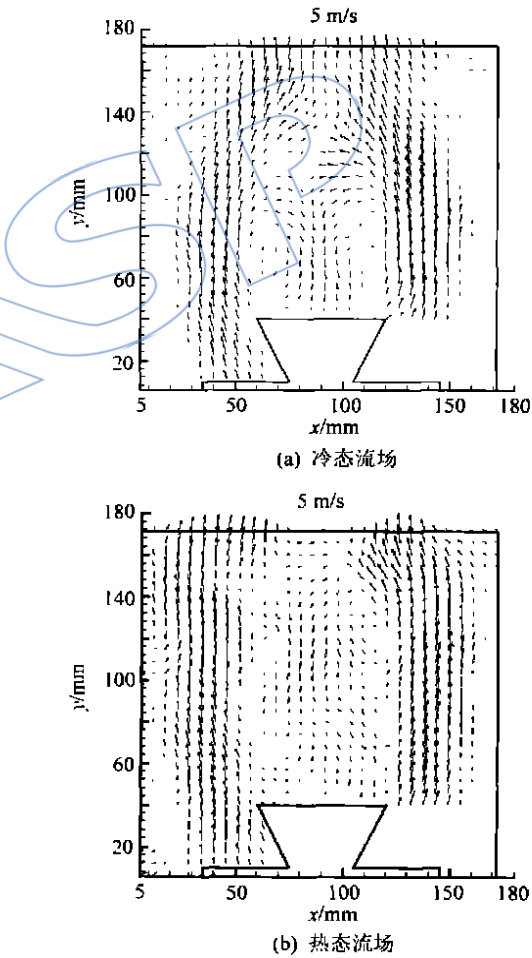
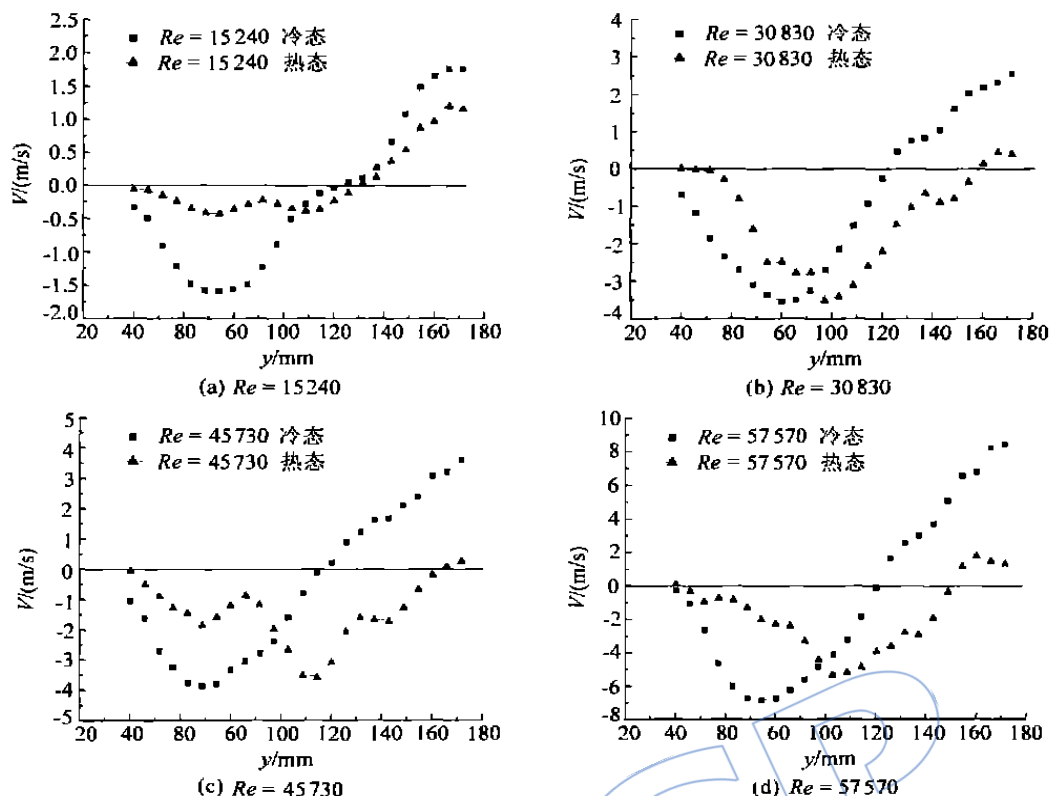


图5 冷热态下速度场矢量图 ($Re=45\,730$)

Fig.5 Velocity vector plots of cold flow field and reactive flow field ($Re=45\,730$)

从上面结果可以看出, 通过 PIV 测得的速度场较好地反应了燃烧器钝体回流区的速度信息。如图4和图5所示, 由于钝体的影响, 冷热流场在

图6 冷热态轴向速度等值线图 ($Re = 45\ 730$)Fig. 6 Axial velocity contour plots of cold flow field and reactive flow field ($Re = 45\ 730$)

钝体后部形成了一个明显的回流区, 整个速度场沿回流中心轴线基本成对称分布。对比冷热态流场的轴向速度等值线图 and 矢量图, 可以看出两种流场存在以下不同点:

(1) 与冷态流场相比, 燃烧状况下的流场变得相对紊乱, 速度场的不规则性也大大增加。如图4, 图5所示, 冷态流场中钝体后方只有一个回流区, 速度分布也比较规则, 然而在燃烧状态下, 流场变得相对紊乱, 除了一个主回流区外, 有时还会产生些小回流区。

(2) 与冷态流场相比, 燃烧状态下流场回流区中心的位置升高, 回流区长度增加。由图4(a)和图4(b)可以看出, 冷态流场的回流中心在 $y = 72\text{ mm}$ 附近, 而热态流场的回流中心却在 $y = 112\text{ mm}$ 附近。对比两图还可以看出, 热态流场的回流区明显要比冷态流场的回流区长。

根据实验测得的结果, 本文对四种不同工况下回流中心轴线方向及径向方向上的轴向速度分布进行了比较和分析:

(1) 冷热态下回流中心轴线方向上的轴向速度比较: 由图6可以看出, 冷热流场在钝体后方形成了一个稳定的回流中心, 中心轴线上的最大

回流速度都随着进气速度的增加而增加。然而由于燃烧反应的影响, 两种流场的速度场具有以下的不同点:

① 与冷态流场相比, 燃烧状态下流场回流区中心的位置升高, 回流区长度增加, 最大回流速度略有降低, 具体如图6所示。这一现象与燃烧的特点是相符合的。当燃气和空气燃烧时会产生大量的热, 火焰周围气体的温度将迅速上升, 而密度会迅速下降, 这就导致了回流区气体体积膨胀, 从而使得回流区长度增加, 中心位置上移。

② 不同工况下, 冷态流场的回流区长度基本保持不变, 而热态流场却无此性质。如图6所示, 不同工况下, 冷态流场回流区长度保持在 120 mm 左右, 而燃烧状态流场的回流区长度在 130 mm 到 165 mm 之间波动。

③ 燃烧状况下, 流场速度分布的不规则性大大增加。由图6可以看出: 冷态时回流中心附近, 轴向流速对称分布, 基本成抛物型。然而燃烧状态下, 回流中心附近的轴向流速分布不一定完全对称。对比图4可知, 这种不完全对称是由于受钝体后方小回流区的影响而产生的。

(2) 冷热态回流中心截面上的轴向速度的比

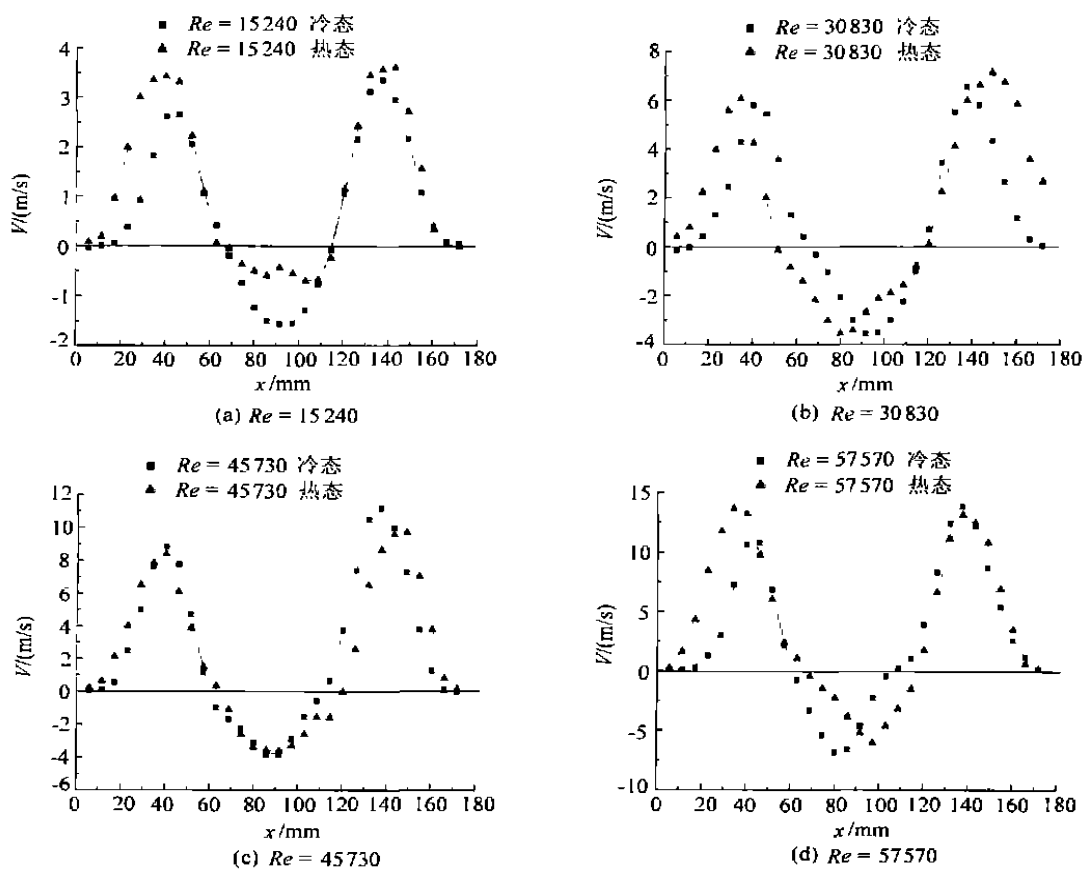


图7 冷热态回流中心截面上轴向速度对比 ($Re=45730$)

Fig.7 The axial velocity contrasts on the sectional plane of the reversed-flow fields and reactive flow fields

较: 从图7可以看出, 回流中心截面上冷热流场的速度分布比较相似: 在中心附近都会形成一个稳定的回流区; 速度场沿回流中心基本成对称分布; 最大回流速度都出现在回流中心处; 随着进气速度的增加最大回流速度也随之增加。但是相比冷态流场, 热态流场的最大回流速度一般要小一些, 回流区内速度分布的对称性要差一些。

3 结 论

实验结果表明, 虽然冷热态流场的速度分布总体相似, 但是, 与冷态流场相比, 燃烧状态下流场回流区的中心位置升高, 长度增大, 最大回流速度降低, 速度场变得相对紊乱。可见, 在对湍流扩散燃烧流场作深入研究时, 仅利用冷态实验模拟燃烧状况是难以满足要求的。目前, 发动机燃烧室设计所用的许多数据都是通过冷态实验模拟所得, 因此, 在生产设计过程中, 必须充分考虑冷热态流场的这些不同点, 根据燃烧流场的具体特性来调整燃烧室的结构, 以利于燃烧室设计的优化。

参考文献:

[1] Han D, Mungal M G. Simultaneous Measurements of Velocity and CH Distributions. Part I: Jet Flames in Co-Flow [J]. *Combustion and Flame*, 2003, 132: 565– 590.

[2] Han D, Mungal M G. Simultaneous Measurements of Velocity and CH Distributions. Part II: Deflected Jet Flames [J]. *Combustion and Flame*, 2003, 133: 1– 17.

[3] Widmann J F, Presser C, Papadopoulos G. Benchmark Database for Input and Validation of Spray Combustion Models: Inlet Air Characterization [R]. *39th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Paper AIAA 2001– 1116*, Reno, NV, Jan. 8– 11, 2001.

[4] Widmann J F, Presser C. A Benchmark Experimental Database for Multiphase Combustion Model Input and Validation [J]. *Combustion and Flame*, 2002, 129: 47– 86.

[5] Jean-Michel MOST, Aurélien MOST, Arnaud SUSSET, Jacques BAILLARGEAT, Pierre JOULAIN. Flame Characterization by PIV in Microgravity Conditions [R]. *10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, July 10– 13, 2000.

[6] Kurosawa Y, Yoshida S, Yamamoto T, Suzuki K. Structure of

Swirler Flame in Gas Turbine Combustor[R]. *Fifteenth International Symposium on Air Breathing Engines* (XV ISABE), 2001.

[7] 姚斌,王汉封,曾汉才,等. PIV 技术在双通道燃烧器出口流场研究中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(9): 6- 8.

中国航空工业第一集团公司科技期刊 编辑出版工作会议召开

中国航空工业第一集团科技发展部于2004年11月18日~2004年20日,在海南三亚组织召开了“中国航空工业第一集团公司科技期刊编辑出版工作会议”。航空工业第一集团公司主管的40多种科技期刊的主编、副主编、编辑部主任及各期刊的负责人共50多人参加了会议。

会议由航空工业第一集团公司科技发展部主管科技期刊工作的领导王湘念同志主持。王湘念对2004年航空工业第一集团的期刊工作进行了总结,对今后各期刊的发展提出了要求,并代表第一集团科技发展部向在集团公司科技期刊奖评选中获一等奖、二等奖、三等奖及优秀奖的期刊代表颁发了证书。《航空动力学报》被评为三等奖。

会议期间,第一集团科技部领导组织有关在社会效益和经济效益取得良好成绩的期刊作了经验交流。《国际航空》主编徐德康、《航空制造技术》主编刘柱、《测控技术》主编金钢、《航空维修与工程》主编朱丹、《航空计算技术》常务副主编鱼卫华、《航空科学技术》主编何晓红等在会上作了经验交流。他们就在目前的市场经济条件下,如何坚持为中国航空业服务的基本办刊方针,坚持为社会主义建设服务、为我国航空事业发展服务;如何提高办刊质量,创办一流刊物;如何在提高刊物内在质量的同时实施科技期刊产业化,创办社会效益和经济效益双效期刊等问题进行了交流。

参加会议的代表针对各自的期刊经验和存在的问题也进行了交流,代表们一致认为参加了工作会议收获较大,建议这样的工作交流会应定期举办,会后要把交流会的经验带回去,结合各自的期刊的特点,把科技期刊办得更好。