

# 三种空穴模型在可调汽蚀文氏管数值模拟中的对比研究

曹东刚, 何国强, 潘宏亮, 秦 飞

(西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 采用 Singhal et al, Zwart-Gerber-Belamri, Schnerr and Sauer 三种空穴模型, 结合 Mixture 多相流模型, 对不同开度下的可调汽蚀文氏管进行了数值模拟, 并将计算结果与试验数据进行了对比分析, 讨论了计算模型的适应性。研究表明三种数值模型均能模拟可调汽蚀文氏管的内部流场, 计算结果与试验结果具有较好的一致性且随着开度的增大计算精度提高。相比较而言, Zwart-Gerber-Belamri 空穴模型计算精度较高, 收敛速度较快, 而且能够捕捉到相变过程中的温度变化, 是一种较为实用的可调汽蚀文氏管的数值计算模型。

**关 键 词:** 可调汽蚀文氏管, 数值模拟, 流量调节, 多相流模型, 空穴模型

中图分类号: V431

文献标识码: A

文章编号: 1000-2758(2013)04-0596-06

可调汽蚀文氏管是一种重要的流量调节元件, 可以调节推进剂组元比, 实现推力控制<sup>[1]</sup>; 在发动机地面试验中可大范围连续调节推进剂流量, 提高试验效率, 对使用液体推进剂的发动机而言是一种有效的调节装置<sup>[2]</sup>。随着组合发动机推力调节比的提高, 可调汽蚀文氏管面临着增大流量调节范围, 提高压力恢复系数, 减小汽蚀过程中由于相变引起的热效应、机械效应和化学效应对管道的侵蚀作用等设计要求<sup>[3]</sup>。

结合试验研究, 通过数值模拟可以有效地揭示文氏管内部流动特征, 预示其性能并进行优化设计。文氏管内的流动情况十分复杂, 喉部附近的流场在汽蚀状态下是一个以剧烈相变为特征的两相流场<sup>[4]</sup>, 汽蚀现象的存在使得计算模型既要考虑气相的输运和相变过程, 又要考虑相变引起的流场急剧变化的情况<sup>[5]</sup>, 因此数值模拟结果强烈地依赖于计算模型的准确性。Singhal 模型<sup>[6]</sup>, Zwart-Gerber-Belamri 模型<sup>[7]</sup> 和 Schnerr and Sauer 模型<sup>[8]</sup> 是三种典型的空穴模型, 并已得到广泛的工程应用。Singhal 模型采用等温计算并考虑了相变, 气泡运动, 湍流压力波动和不可凝气体对气相生成率和凝结率的影响, 是一种较为全面的空穴模型; Zwart-Gerber-Bel-

amri 模型假定所有气泡大小相同, 认为相间的质量输运率由气泡数密度决定; Schnerr and Sauer 模型将气泡数密度与气相体积分数耦合在一起进而对输运方程进行求解。Xu<sup>[9]</sup> 等人研究指出由于相变潜热的作用, 汽蚀过程中存在着能量交换, 采用等温计算的空穴模型难以预示温度的变化, 特别是对用于调节低温推进剂的可调汽蚀文氏管而言会带来较大的计算误差, 而气泡数密度的确定又带有很强的经验性, 空穴模型需要通过试验数据进行修正。文献 [4, 10] 指出 RNG k- $\epsilon$  模型与空穴模型具有较好的相容性, 且计算精度较高, 具有较为理想的计算结果。空穴模型的发展促进了对汽蚀现象的认识, 但对用于计算可调汽蚀文氏管的模型仍需做进一步的对比分析。

本文以 ANSYS 为软件平台, 结合 Singhal、Zwart-Gerber-Belamri、Schnerr and Sauer 三种空穴模型, 采用 Mixture 两相流模型, 选用 RNG k- $\epsilon$  湍流模型, 对可调汽蚀文氏管进行了数值模拟, 揭示了其内部流动特征, 通过组合发动机推进剂供应系统冷流试验数据对计算结果进行了校验, 讨论了三种模型的适应性, 可支持进一步开展可调汽蚀文氏管的优化设计和推进剂供应系统的调节控制等研究。

收稿日期: 2012-11-12

作者简介: 曹东刚(1988—), 西北工业大学博士研究生, 主要从事航空宇航推进理论与工程的研究。

## 1 物理模型及试验系统

本文以煤油为工作流体,设计了以现有地面试验台的性能参数、发动机模态转换时的流量要求为基本约束的可调汽蚀文氏管,如图 1 所示  $H$  表示针锥的调节行程。结合组合发动机推进剂系统供应中的变流量调节要求,搭建了如图 2 所示的冷流试验系统,通过移动针锥改变喉部节流面积,从而对所设计的可调汽蚀文氏管的流量调节特性开展了研究,并结合试验数据对计算模型进行校验。

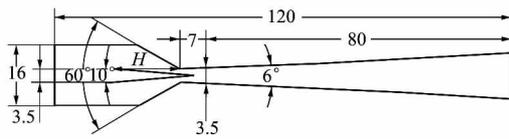


图 1 可调汽蚀文氏管结构图

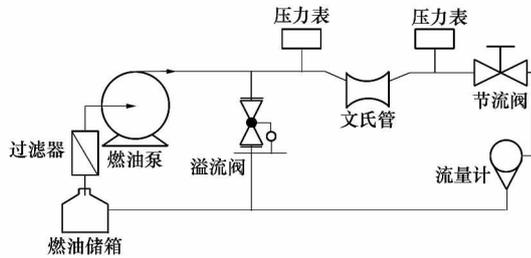


图 2 试验系统结构图

## 2 计算模型

### 2.1 控制方程

可调汽蚀文氏管可用如下方程描述其内部流动

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) \\ = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \\ \mathbf{F} + \nabla \cdot \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_{dr_i} \mathbf{v}_{dr_i} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i E_i \right) + \nabla \cdot \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i (E_i + P) \right) \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \mathbf{v}_v) = R_e - R_c \quad (4)$$

$$r \frac{d^2 r}{dt^2} + 3 \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{4\mu_l}{r} \frac{dr}{dt} = \frac{P_b - P}{\rho_l} - \frac{2\sigma}{\rho_l r} \quad (5)$$

该组方程依次为气、液混合介质的质量方程、动量方程、能量方程、气相输运方程和气泡动力学方程。式中  $\rho_m$  为混合密度且  $\rho_m = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l$ ,  $\alpha_v$  为气相体积分数  $\rho_v$  为气相密度  $\rho_l$  为液相密度,  $v_m$  为平均速度且  $v_m = (\alpha_v \rho_v v_v + (1 - \alpha_v) \rho_l v_l) / \rho_m$ ,  $n$  为相数  $F$  是体积力  $\mu_m$  为混合粘性且  $\mu_m = \alpha_v \mu_v + (1 - \alpha_v) \mu_l$ ,  $v_{dr_i}$  是第  $i$  相的漂移速度且  $v_{dr_i} = v_i - v_m$ ,  $k_{eff}$  为有效热传导率  $S_E$  为体积热源  $R_e$  为气相生成率  $R_c$  为气相凝结率  $R_e - R_c$  反映了气液两相之间的质量输运  $r$  表示气泡半径  $P_b$  表示气泡内的压力  $P$  为当地压力,  $\sigma$  表示气泡表面张力。不同空穴模型对于气相生成率  $R_e$  和气相凝结率  $R_c$  的处理不同。

#### 2.1.1 Singhal 模型

$$R_e = F_{vap} \frac{\max(1, \sqrt{k}) (1 - f_v - f_g)}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3\rho_l}} \quad (6)$$

$P \leq P_v$

$$R_c = F_{cond} \frac{\max(1, \sqrt{k}) f_v}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(P - P_v)}{3\rho_l}} \quad (7)$$

$P > P_v$

式中,  $F_{vap}$  为蒸发系数,  $F_{cond}$  为凝结系数  $k$  为湍动能  $f_v$  为气相质量分数  $f_g$  为不可凝气体质量分数。

#### 2.1.2 Zwart-Gerber-Belamri 模型

$$R_e = F_{vap} \frac{3\alpha_{nuc} (1 - \alpha_v) \rho_v}{r} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3\rho_l}} \quad (8)$$

$P \leq P_v$

$$R_c = F_{cond} \frac{3\alpha_v \rho_v}{r} \sqrt{\frac{2(P - P_v)}{3\rho_l}} \quad (9)$$

$P > P_v$

式中,  $\alpha_{nuc}$  表示气核体积分数。

#### 2.1.3 Schnerr and Sauer 模型

$$R_e = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{r} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3\rho_l}} \quad (10)$$

$P \leq P_v$

$$R_c = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{r} \sqrt{\frac{2(P - P_v)}{3\rho_l}} \quad (11)$$

$P > P_v$

式中,  $\rho = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l$  表示混合密度。

### 2.2 网格划分及边界条件

由于可调汽蚀文氏管具有典型的轴对称特征,

本文采用轴对称构型,使用三种计算模型对其内部流场进行了数值模拟。为了便于分析,将所用计算模型进行标识,分别记为 M-S 模型, M-ZGB 模型和 M-SS 模型。计算区域如图 3 所示,采用四边形网格,并对喉部区域和边界处的网格进行局部加密,网格总数为 100 000。入口边界和入口边界设定为压力入口和压力出口,管壁和锥壁均采用标准壁面函数,壁面采用绝热、无滑移边界条件。

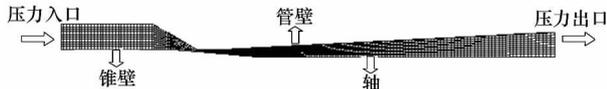


图 3 计算网格及边界条件

### 3 结果讨论

#### 3.1 汽蚀特征

保持可调汽蚀文氏管进出口压力比  $\phi = 2$ , 调节行程  $H = 6.5 \text{ mm}$ , 分别采用三种计算模型对其进行数值模拟, 图 4、图 5 分别给出了流道内静压分布曲线和气相成分体积分数分布云图。

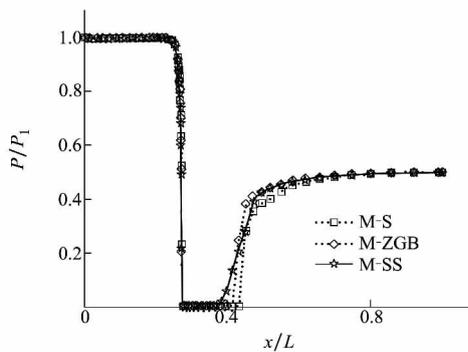


图 4 静压分布曲线

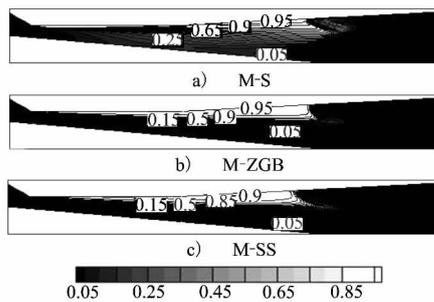


图 5 气相成分体积分数分布图

计算结果表明文氏管工作在汽蚀状态, 流体经过上游收敛段到达喉部时, 速度增大, 压力突降至饱和蒸汽压, 在喉部区域会有气相成分逸出, 发生汽蚀, 形成气液两相流。汽蚀区紧贴于壁面, 靠近壁面处气相成分的浓度较大。由于在收敛段与喉部的转折处发生流动分离, 汽蚀区的初始形成点位于收敛段与喉部的拐点处。在喉部流体的压力势能转化为动能, 液体中的气核出现不稳定生长的现象, 此时能量较高的分子克服分子间的引力而逸出液面, 向着作为核的气泡中进行蒸发, 大量的气泡汇聚成群并向下游逐步发展, 汽蚀区厚度逐渐增加。气液两相存在分界面, 界面处发生剧烈的相变反应。汽蚀区犹如一道屏障, 来流液体不能穿过气液两相的分界面而进入汽蚀区, 维持汽蚀的机理主要是汽蚀区表面的分子扩散过程, 液面上一部分高能分子逸出液面成为蒸汽分子, 而蒸汽分子在液面上的空间不断运动时, 某些蒸汽分子可能碰到液面又进入液体中, 即在界面处同时发生着蒸发和凝聚两种物理过程, 气液两相通过界面交换质量、动量和能量。在下游扩张段流体减速增压, 经过一定距离的恢复段后, 压力超过液体的饱和蒸汽压, 气相燃料凝结后恢复液态形式, 压力恢复到出口压力水平。三种计算模型均符合汽蚀文氏管的工作原理, 相比较而言, 图 4 中 M-SS 模型静压曲线上升较早, 饱和蒸汽压段的长度小于 M-ZGB 模型和 M-S 模型的计算结果, 这表明 M-SS 模型计算的汽蚀区长度小于 M-ZGB 模型和 M-S 模型计算的长度, 与图 5 中的分布规律相吻合。

#### 3.2 流量特性

在入口压力  $P_1 = 3.0 \text{ MPa}$  的条件下, 通过改变针锥位置调节可调汽蚀文氏管的开度, 测量在汽蚀工作状态下, 不同调节行程所对应的质量流量, 并对相应工况进行了数值模拟, 图 6 给出了三种模型计算所得的质量流量和试验测得的数据, 表 1 列出了三种模型计算结果与试验数据的相对误差。

表 1 不同调节行程下三种模型计算结果与试验数据的相对误差

数值模型	调节行程 $H/\text{mm}$		
	6.0	6.5	8.5
M-S	7.5%	5.5%	5.3%
M-ZGB	8.0%	5.8%	5.5%
M-SS	12.0%	9.5%	9.4%

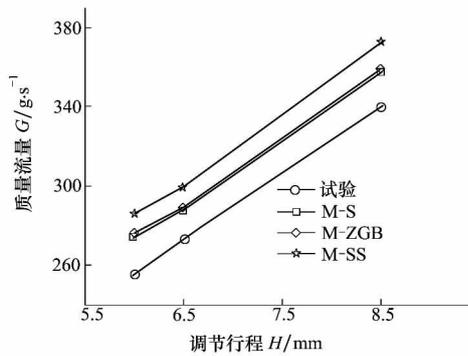


图6 试验测量及三种模型计算所得的质量流量曲线

图6表明,当可调汽蚀文氏管工作在汽蚀状态时在6.0~8.5mm的针锥移动范围内能够获得0.25~0.34 kg/s的流量调节范围,试验数据与计算结果具有相同的变化趋势,推进剂的流量随着调节行程的增大而增大,通过改变针锥位置能够实现流量的动态控制。由表1可见,数值模型的计算结果与试验测得的质量流量具有比较好的一致性,并且随着调节行程的增大,由于节流损失降低,测量精度提高,计算结果与试验数据的相对误差逐渐减小。三种数值模型的计算精度略有差异,与试验结果相比,M-SS模型的计算误差不超过12%,调节行程大于6.5mm后计算误差在9.5%以内,M-S模型和M-ZGB模型的计算精度较高,误差在8.0%以内,调节行程大于6.5mm后计算误差约为5.5%,计算结果与试验数据吻合较好,能够较好地预示可调汽蚀文氏管的流量调节特性。

### 3.3 汽蚀热效应

Singhal空穴模型忽略了汽蚀过程中的相变潜热,采用等温计算,无法反映汽蚀过程中的热效应,但Zwart-Gerber-Belamri和Schnerr and Sauer两种空穴模型能够捕捉到的流场中的温度变化,预示汽蚀过程中由于相变而引起的热效应。M-ZGB模型和M-SS模型的计算结果都表明在汽蚀区内,随着气泡的生长、破裂,相变过程中的潜热作用使得汽蚀区的温度升高,如图7所示。在汽蚀区的下游,压力升高,由于周围液体静压的变化,气泡被压缩后急剧破裂,已破裂的气泡在未破裂的气泡周围产生一个强化压力场,并将一部分能量以冲击波的形式传递给未破裂的气泡,使这些气泡储存了更多的能量,从而使这些气泡在破裂后形成更强烈的冲击波,最终以热的形式将能量耗散掉<sup>[11]</sup>。在气泡群溃灭的过程

中,气相成分凝结成为液相,释放出大量的热量,形成所谓的热点(hot spot)<sup>[12]</sup>。在汽蚀区的尾部发生着强烈的气泡群溃灭过程,溃灭过程中的热效应使得该区域形成一个局部高温区,而高温区的形成又对管道的侵蚀具有显著的影响,从而影响可调汽蚀文氏管的工作寿命和可靠性,因此需要对汽蚀过程中的热效应给予足够的重视。

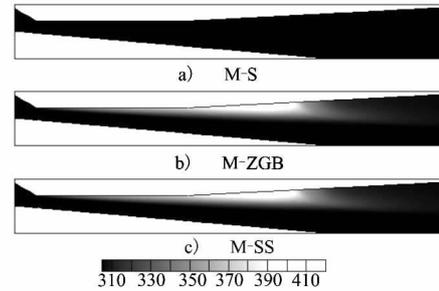


图7 三种模型计算所得的温度分布图(K)

### 3.4 模型适应性

本文采用的三种计算模型均能用于可调汽蚀文氏管的数值模拟,预示流量调节特性,表征内部流场特征。表2从计算精度、流场信息和收敛速度三个方面对三种模型进行了适应性比较。Singhal模型考虑了相变、气泡运动、湍流压力波动和不可凝气体对气相生成率和凝结率的影响,Zwart-Gerber-Belamri模型从气泡数密度出发对气相生成率和凝结率进行了描述,Schnerr and Sauer模型将气泡数密度与气相体积分数耦合在一起进而对输运方程进行求解。Singhal模型和Zwart-Gerber-Belamri模型均通过蒸发系数和凝结系数对气相生成率和凝结率进行了修正,计算所得的汽蚀区长度略长于Schnerr and Sauer模型的计算结果,并且计算精度高于Schnerr and Sauer模型,但Zwart-Gerber-Belamri模型和Schnerr and Sauer模型考虑了相变潜热的影响,能够反映汽蚀过程中的热效应,避免了Singhal模型采用等温计算的不足。综合而言,M-ZGB模型考虑了气泡数密度和相变潜热的影响,计算精度较高,能够捕捉到汽蚀过程中由于相变而引起的温度变化,提供更细致的流场信息,并且收敛速度较快,因此M-ZGB模型是一种较为实用的可调汽蚀文氏管数值计算模型。

表 2 3 种模型的适应性

数值模型	计算精度	流场信息	收敛速度
M-S	+	-	-
M-ZGB	+	+	+
M-SS	-	+	-

## 4 结 论

针对组合发动机推进剂供应系统流量调节范围宽,压力恢复系数高,工作可靠性高等要求,本文对可调汽蚀文氏管进行了试验及数值模拟研究,对三种计算模型的适应性进行了对比研究,得到如下主

要结论:

1) 可调汽蚀文氏管的内部流场是一个以相变为主要特征的复杂两相流场,汽蚀区贴于壁面,呈片状,其分布具有明显的梯度特征。随着气泡的生长、破裂,由于相变过程中潜热的作用,汽蚀区温度显著升高,形成局部高温区,强化了汽蚀对管道的侵蚀作用。

2) 三种计算模型均能用于可调汽蚀文氏管数值模拟,计算结果与试验数据具有较好的一致性,能够满足工程应用的需要。整体而言,M-ZGB 模型的计算精度较高,能够反映汽蚀过程中的热效应,提供的流场信息更细致,并且收敛速度较快,是一种较为实用的可调汽蚀文氏管的数值计算模型。

## 参考文献:

- [1] Harvey D W. Throttling Venturi Valves for Liquid Rocket Engines. AIAA-1970-0703
- [2] 张育林. 变推力液体火箭发动机及其控制技术. 北京: 国防工业出版社, 2001  
Zhang Yulin. Variable Thrust Liquid Propellant Rocket Engine and Its Control Techniques. Beijing: National Defence Industry Press, 2001 ( in Chinese)
- [3] 付 勇. 文丘里管内空泡动力学特性研究 [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2007  
Fu Yong. Research on Characteristics of Bubble Dynamics in Venturi. Master Degree Dissertation, Dalian: Dalian University of Technology, 2007 ( in Chinese)
- [4] 韩泉东. 空间变推力液体火箭发动机流量调节及燃烧过程仿真研究 [硕士学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 2006  
Han Quandong. Numerical Study on Flow Control and Combustion Process of Variable Thrust Liquid Propellant Space Rocket Engine. Master Degree Dessertation, Changsha: National University of Defense Technology, 2006 ( in Chinese)
- [5] Maria Grazia De Giorgi, Antonio Ficarella, et al. Modeling Nucleation Phenomena in Cavitating Flow. AIAA-2007-4459
- [6] Singhal A K, Athavale M M, Huiying L and Jiang L. Mathematical Bases and Validation of the Full Cavitation Model. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124: 617-624
- [7] Zwart P J, Gerber A G, Belamri T. A Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics. ICMF 2004, Yokohama, Japan, 2004
- [8] Schnerr G H, Sauer J. Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics. ICMF 2001, New Orleans, USA, 2001
- [9] Xu Changhai, Heister S D. Cavitating Flow Modeling Including Energy Interchange Effects. AIAA-2003-4915
- [10] 钱忠东, 黄社华. 四种湍流模型对空化流动模拟的比较. 水科学进展, 2006, 17: 203-208  
Qian Zhongdong, Huang Shehua. Comparison and Analysis of Computed Results for Caviating Flow with Four Turbulence Models. Advances in Water Science, 2006, 17: 203-208 ( in Chinese)
- [11] Morch K A. Energy Considerations on the Collapse of Cavity Cluster. Applied Scientific Research. 1982, 38: 313-321
- [12] Suslick K S. Sonochemistry. Science, 1990, 247: 1439-1445

## Comparative Investigation among Three Cavitation Models for Simulating Cavitating Venturi

Cao Donggang , He Guoqiang , Pan Hongliang , Qin Fei  
( College of Astronautics , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710072 , China)

**Abstract:** Numerical models based on the mixture multiphase model and three different cavitation models ( Singhal model , Zwart-Gerber-Belamri model , and Schnerr and Sauer model) were investigated to simulate cavitating venturi with different throttle distances. Meanwhile , the adaptability of each of three models was discussed in terms of accuracy and efficiency. Results show that the three numerical models are suitable for simulating the cavitating venturi. In addition , calculated results agree with test data and the relative error decreases with increasing throttle distance. Compared with the other two cavitation models , the Zwart-Gerber-Belamri model relatively has higher precision , consumes less running time , and indicates the temperature distribution in the flow field; thus ZGB model is best for simulating cavitating venturi.

**Key words:** cavitation , computer simulation , computer software , errors , experiments , flow fields , multiphase flow , rocket engines , turbulence models; cavitating venturi , cavitation model , flow regulation , multiphase model

### 季文美教授的 8 位在航空航天及其它领域卓有建树的学生

本简讯摘自张庆恩写的校学报参考资料 2013 - 07 期( 总 1144 期) 。摘录的内容如下:

季先生从 20 世纪 40 年代初就执教于交通大学 , 是当时教授会主要成员之一 , 被赞誉为交大英才、名师。许多在航空、航天和其它领域卓有建树的著名专家、学者都曾是他的学生。如:

1. 飞机设计专家、中国工程院院士、歼七飞机总设计师屠基达;
2. 飞机动力学专家、中国科学院院士、中国工程院院士、中航一集团科技委副主任、歼八飞机总设计师顾诵芬;
3. 中国科学院院士、航天工业部总工程师庄逢甘;
4. 美国工程院院士、中国科学院外籍院士、台湾科学院院士、流体力学家吴耀祖;
5. 力学家、中国科学院院士、浙江大学教授朱位秋( 季先生指导的博士) ;
6. 南京大学副校长、教授、博士生导师程崇庆( 季先生指导的博士) ;
7. 中国航天八院副院长、长江学者、教授、博士生导师孟光( 季先生指导的博士) ;
8. 中国工程院院士、原西工大副校长、教授、博士生导师徐德民( 季先生创办的研究生班学生) 。

胡沛泉  
2013 年 8 月