

离心泵自吸过程的气液两相流非稳态数值模拟

黄思¹, 岳乐¹, 郭京¹, 王立²

1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640
2. 广州市昕恒泵业制造有限公司, 广州 510520

摘要 选取一种常用的立式外混式自吸离心泵作为研究对象, 运用非稳态数值模拟手段, 探索自吸离心泵启动后气液两相流动的瞬态过程。研究采用了接近真实自吸情形的设置, 选取一段吸入管路充满空气作为模拟计算的初始条件。计算得到了自吸泵内气液两相分布、压力分布和速度分布与时间的关系, 叶轮入口和泵出口处气液相流量随时间的变化规律, 由此可估算自吸时间。计算发现泵吸入和排出气量的时间主要集中在泵起动的初期, 叶轮入口和泵出口处的瞬时含气率分别可达到 30.9% 和 20.2%。此外, 蜗壳开孔起到分流排气的显著作用, 孔口排气量占整个蜗壳排气量的 20%~25%。本文所采用的模拟方法和结果对于研究自吸泵自吸过程和自吸性能, 具有一定的理论和工程价值。

关键词 自吸泵; 自吸过程; 气液两相流; 非稳态数值模拟

中图分类号 TQ051.7

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.14.005

Unsteady Numerical Simulation for Gas-liquid Two-phase Flow in the Self-priming Process of Centrifugal Pump

HUANG Si¹, YUE Le¹, GUO Jing¹, WANG Li²

1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China
2. Guangzhou Xinheng Pump Manufacturing Co., Ltd., Guangzhou 510520, China

Abstract A common vertical self-priming centrifugal pump was selected as the research object. By using unsteady numerical simulation, the transient gas-liquid two-phase flow in the self-priming centrifugal pump during the self-priming process is explored. The main innovation in the simulation is that a section of the suction pipe filled with air is chosen as the initial condition, consisting with the actual self-priming conditions. The gas-liquid two-phase distribution as well as the pressure and velocity in relation to the time are computed and analyzed. The flow rates of both phases with time at the pump inlet and outlet are obtained based on the simulation, which could be used to estimate the self-priming time and other performance parameters. It is found that most of the gas are inhaled into and exhausted out of the pump during the early stage of the self-priming process. The air void fraction could reach at 30.9% and 20.2%, respectively at the impeller inlet and the pump outlet at some moments. The hole on the volute plays a significant role for gas exhaustion during the self-priming process. The air flow rate of the orifice accounts for 20%~25% of the entire air flow rate. The simulation method and results proposed have certain theoretical and engineering values for analyzing self-priming process and performance of self-priming pump.

Keywords self-priming pump; self-priming process; gas-liquid two-phase flow; unsteady numerical simulation

0 引言

自吸离心泵以其特有的自吸功能, 具有使用方便、操作简单、工作可靠等特点, 广泛应用于石油、石化、化工、电力、

冶金、城建等部门^[1]。

自吸泵按自吸原理可分为外混式和内混式两种。内混式是指从叶轮入口直到叶轮出口水和空气都在进行混合, 外混

收稿日期: 2013-01-25; 修回日期: 2013-02-20

作者简介: 黄思, 教授, 研究方向为流体机械, 电子信箱: huangsi@scut.edu.cn

式则是指水和空气只在叶轮出口进行混合,结构较为简单,被国内外普遍采用。自吸泵启动后先是作为真空泵工作,当吸水管中的空气排出后就变成一般水泵工作。因此自吸泵的性能分为自吸性能和水泵性能两部分。自吸性能一般以泵的自吸时间(或抽气率)和泵的最大自吸高度(或极限真空度)衡量,通常都通过试验手段确定。

随着计算技术的快速发展,近年来一些学者相继开展了自吸泵气液两相流数值模拟的研究^[2-5],在一定程度上了解了自吸泵内的流动状态和水力性能。这些模拟计算基本上是采用自吸泵入口含气率按某个固定值作为边界条件的处理办法,但现实中自吸泵启动前,一部分吸入管路充满气体;泵启动后在一段很短的时间内,泵入口的含气率随时间和空间的变化都非常显著,因此上述的模拟计算与实际情况会有较大偏差。基于以上考虑,本文中采用泵启动前一部分吸入管路充满气体作为初始条件,运用非稳态数值模拟手段,探索自吸离心泵启动后气液两相流动过程。

1 计算方法

1.1 自吸离心泵主要结构参数

选取一种常用的立式外混式自吸离心泵作为研究对象,该自吸泵的结构特点是设有储液室与气液分离室。自吸泵的主要零部件有管路(直径 100mm,进气段长度 495mm)、储液室(直径 380mm,高度 250mm)、气液分离室(直径 380mm,高度 180mm)、叶轮(转速 2900r/min,出口宽度 35mm,出口直径 185mm,入口直径 110mm,吸入安装高度 200mm,叶片数 6片)和蜗壳(出口尺寸 65mm×70mm)。其中,蜗壳设有开孔(直径 22mm)使气体逸出,气液分离室内设有挡板(挡板尺寸 65mm×100mm×10mm)使气体向上运动从泵出口排出。

1.2 计算域及计算网格

应用 Pro/E 对自吸泵流动域进行三维实体造型,如图 1 所示。图 1(a)为泵的总图,泵的储液室与进口管相连,叶轮和蜗壳位于储液室上方的气液分离室内。图 1(b)显示了气液分离室的局部情况,从中可见蜗壳开孔、蜗壳出口和挡板的位置。

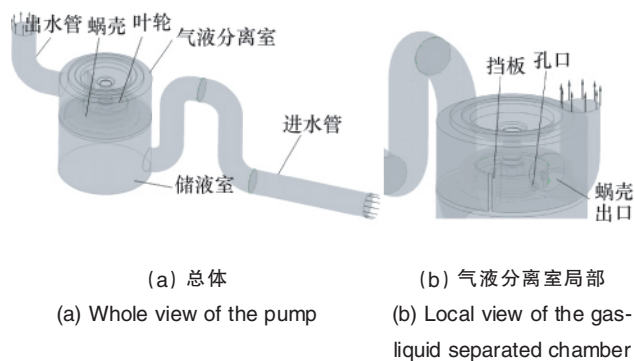


图 1 泵三维造型

Fig. 1 3D modeling of the pump

将计算域三维实体导入 ICEM 进行结构/非结构网格单元划分,按照既保证计算精度,又避免计算过于耗时的原则确定网格数,共计 1468659 个单元和 429568 个节点,其中叶轮域、蜗壳域和其余计算域的网格单元分别占总数的 32%、35%和 33%。上述网格单元经过了网格无关性验证,增加新网格后计算得到的水泵稳态扬程误差在 1%以内。采用滑移网格进行非稳态计算,设置泵体与叶轮接触的交界面为滑移界面,叶轮域设在转动坐标系,其余区域设在固定坐标系。

1.3 边界条件及初始条件

本文的主要创新点在于采用了接近真实自吸情形的设置,即选取一段吸入管路充满空气作为计算的初始条件。此外,文献[6]也提到离心泵需要一定时间才能从静止启动到恒定的工作转速。为避免计算过于复杂耗时,计算采取以下简化措施:(1)自吸泵以恒定的工作转速运行;(2)选取较短的叶轮吸入安装高度和空气吸入段;(3)当绝大部分空气排出泵体时计算终止。

选取水和 25℃空气分别作为液相和气相,自吸过程视为等温过程。边界条件中进口按封闭入口(inlet,表压为 0)设置,出口按开口(opening,环境为大气压)设置。控制方程采用多相流 VOF 方法和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,计算方法为非定常三维有限体积 SIMPLE 的隐式算法,两相流动、湍动能及湍流耗散率的离散格式均取二阶迎风格式。时间步长取 $\Delta t=T/10Z$,其中 Z 为叶片数, T 为叶轮旋转一周的周期,可由转速计算得到。任意时间步的计算迭代次数上限取默认值 20,由于计算的 Courant 数 $C=|v|\Delta t/\Delta x$ (其中 v 为局部流速, Δx 为局部网格尺寸)一直控制在 5 以下的合理范围,因此所有时间步的迭代计算都能正常收敛。

2 计算结果与分析

2.1 气液两相分布

图 2 为计算得到的 4 个代表性时刻计算域中心截面的气液两相分布云图,其中 $\alpha=1$ 表示气体, $\alpha=0$ 表示液体。

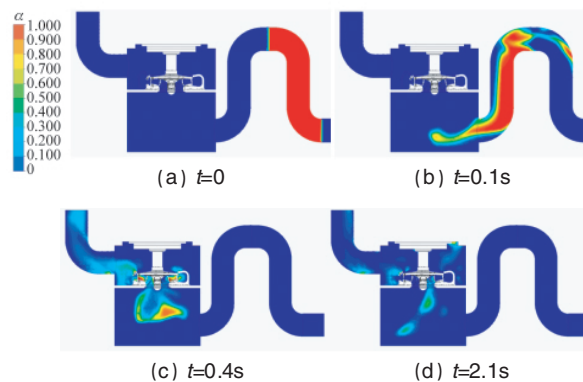


图 2 泵内中心截面气液两相分布

Fig. 2 Distribution of gas-liquid two-phase on the central sections inside of the pump

图 2(a)为自吸过程的初始状态,即一段吸入管充满气体而其余部分充满液体。图 2(b)显示泵启动后吸入管气体进入储液室时的情形。图 2(c)显示叶轮吸入、泵体排出大量气体时的情形,此时吸入管路中的所有气体都全部进入储液室与之后的液体陆续被吸入叶轮。图 2(d)显示泵内大部分气体已排出,自吸过程基本完成,水泵进入正常工作状态。

图 3 为吸入管、叶轮和泵出口等位置水平截面上的气液两相分布。由图可知:(1) 气相较集中在叶轮叶片的吸力面;(2) 离心力的作用使密度较大的液相向蜗壳壁面,密度较小的气相则聚集在叶轮周围;(3) 气液分离室的挡板起到了阻止气体旋转并使其向上排出的作用。

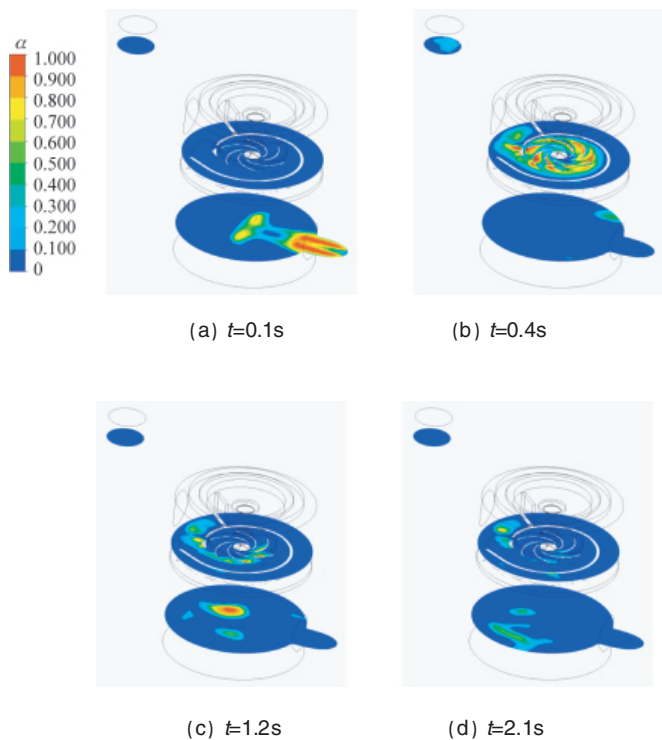


图 3 泵内水平截面上气液两相分布
Fig. 3 Distribution of gas-liquid two-phase on horizontal sections inside of the pump

图 4 和图 5 分别是由计算后处理得到的叶轮入口和泵出口处液体和气体流量随时间的变化曲线。由图可知,泵吸入和排出气的时间主要集中在泵启动的初期阶段(0.2~0.6s),其中以叶轮吸入气量 Q_g 最为明显。理论上讲,泵的自吸时间应等于吸入管中所有气体排出泵的时间,但因此会耗费较长的计算时间。作为近似,可采用图 6 中泵启动前吸入管内的气体体积($V \approx 4.12L$)与泵出口排气量对时间累加值延长线的交点来估算自吸时间($t \approx 3.0s$)。如前所述,本计算采取恒定工作转速的简化假设,如要精确计算自吸泵的自吸时间,还需考虑离心泵从静止启动到恒定工作转速所需的时间。

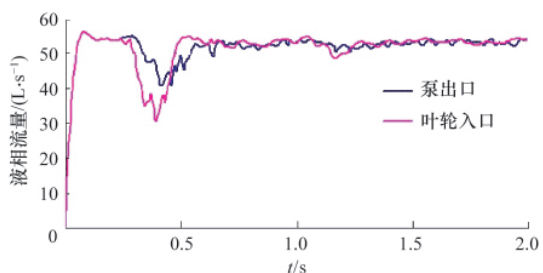


图 4 叶轮入口和泵出口处液相流量
Fig. 4 Liquid-phase flow rates at the inlet of the impeller and the outlet of the pump

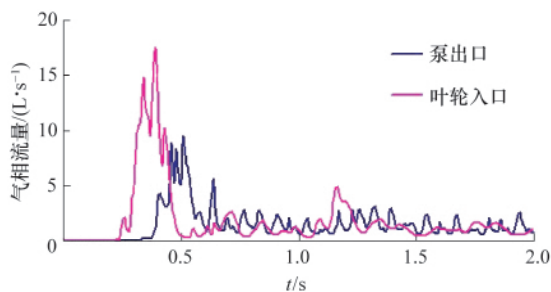


图 5 叶轮入口和泵出口处气相流量
Fig. 5 Gas-phase flow rates at the inlet of the impeller and the outlet of the pump

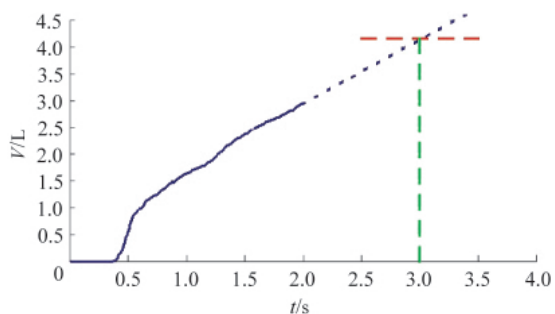


图 6 泵出口气体体积对时间的累加值
Fig. 6 Cumulative gas volume at pump outlet whit the time

图 7 为叶轮入口和泵出口处含气率随时间的变化曲线。

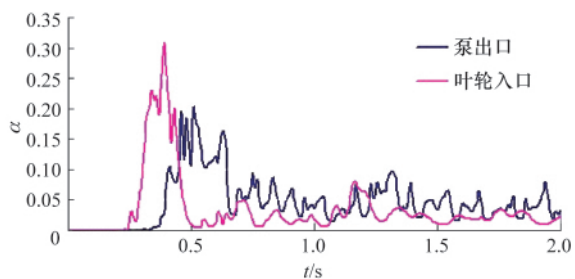


图 7 叶轮入口和泵出口处含气率
Fig. 7 Air void fractions at the inlet of the impeller and the outlet of the pump

由图可见,叶轮入口处含气率 α 随时间变化比较明显。尤其在泵起动初期, α 一度可达 30.9%, 之后基本在 7% 以下波动。泵出口处 α 随时间变化相对平稳一些, 起动初期 α 可达 20.2%, 之后基本在 10% 以下变化。

为考查蜗壳开孔的效果, 图 8 和图 9 分别给出蜗壳孔口和蜗壳出口液体和气体流量随时间的变化曲线。由图可见, 在整个自吸过程中, 蜗壳开孔起到了分流排气的显著作用, 孔口平均排气流量 Q_g 占了整个蜗壳平均排气流量的 20%~25%, 而孔口的平均排液流量 Q_l 仅占整个蜗壳平均排液流量的 5%~10%。

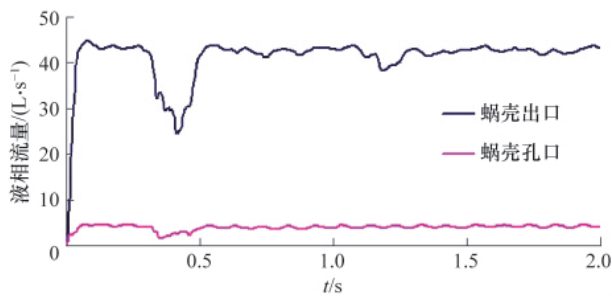


图 8 蜗壳孔口和出口处液相流量
Fig. 8 Liquid-phase flow rates at the orifice and the outlet of the volute

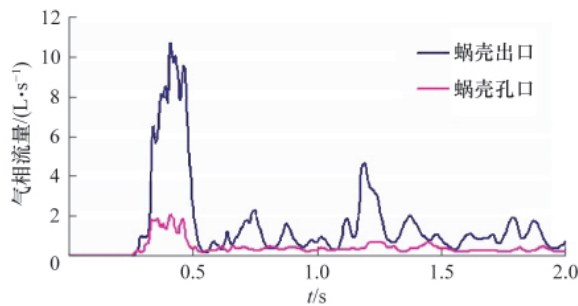


图 9 蜗壳孔口和出口处气相流量
Fig. 9 Gas-phase flow rates at the orifice and the outlet of the volute

2.2 气液两相流场

作为示例, 图 10 和图 11 分别显示排气相对稳定时 ($t=1.2s$) 泵内气液两相流速矢量图, 此时两相流速基本在 35m/s 以内, 流速最大值一般出现在叶轮出口附近, 这是因为叶轮旋转速度在此位置达到最大值。流体进入蜗壳后, 因动能逐渐转为压能使流速降低。

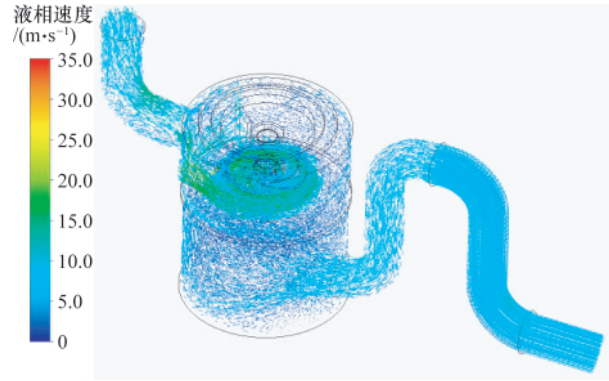


图 10 液相表观速度矢量 ($t=1.2s$)
Fig. 10 Superficial velocity vector of liquid-phase ($t=1.2s$)

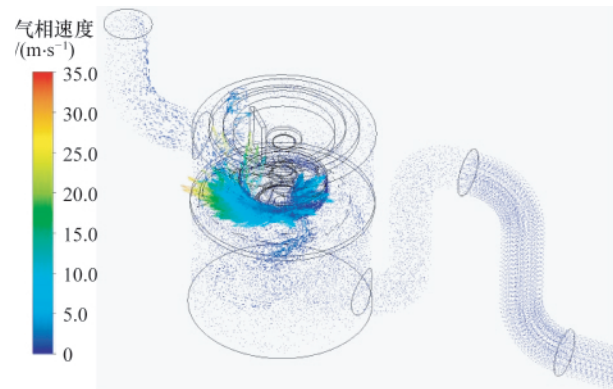


图 11 气相表观速度矢量 ($t=1.2s$)
Fig. 11 Superficial velocity vector of gas-phase ($t=1.2s$)

2.3 压力场分布

图 12 为自吸过程中两个代表时刻的泵内压力分布。在叶轮吸入大量气体时 ($t=0.4s$), 泵内的压力普遍较低, 最高压力约为 0.1MPa; 在排气相对稳定后 ($t=1.2s$), 叶轮蜗壳内气量相对较少, 泵内压力明显上升, 最高压力可达到 0.15MPa。

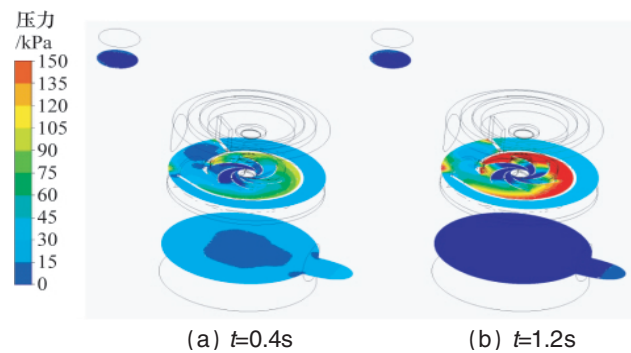


图 12 泵内水平截面上压力分布
Fig. 12 Pressure distribution on horizontal sections inside of pump

图 13 为泵出口静压随时间变化的曲线。从图中可以看出,泵出口静压随时间有明显的脉动现象。为便于了解泵出口静压的脉动特性,在图 13 中加入了图 7 的泵出口含气率曲线进行对比。可以看出,气流对泵出口静压有较大的影响,在排气相对稳定后,泵出口压力的脉动频率与泵出口含气率的脉动频率基本相同。

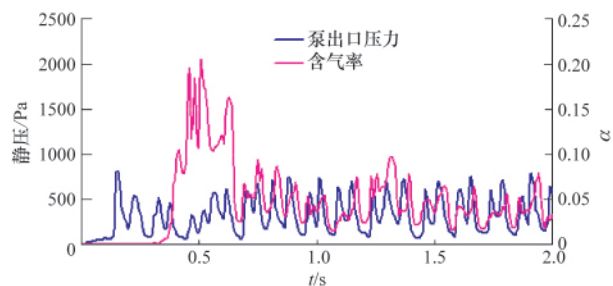


图 13 泵出口静压

Fig. 13 Static pressure at the pump outlet

3 结论

(1) 采用接近真实自吸情形作为初始条件,计算得到离心泵自吸过程的瞬态气液两相流场,得到吸入和排出气液两相流量随时间的关系,由此可估算自吸时间等自吸性能参数。

(2) 泵吸入和排出气量的时间主要集中在泵起动的初期,叶轮入口的含气率最高可达到 30.9%,泵出口的含气率最高可达 20.2%,之后叶轮入口的含气率基本在 7% 以下变化,泵出口的含气率在 10% 以下变化。

(3) 泵自吸过程中,蜗壳开孔起到了分流排气的显著作用,孔口排气量占整个蜗壳排气量的 20%~25%,而孔口排液量仅占整个蜗壳排液量的 5%~10%。

(4) 泵出口静压随时间有明显的脉动,当排气相对稳定时,其脉动频率与泵出口含气率的脉动频率基本相同。

参考文献 (References)

- [1] 吕智君, 兰才有, 王福军. 自吸泵研究现状及发展趋势[J]. 排灌机械, 2005, 23(3): 1-5.
Lü Zhijun, Lan Caiyou, Wang Fujun. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(3): 1-5.
- [2] 王春林, 吴志旺, 司艳雷, 等. 旋流自吸泵气液两相流数值模拟 [J]. 排灌机械, 2009, 27(3): 163-167.
Wang Chunlin, Wu Zhiwang, Si Yanlei, et al. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(3): 163-167.
- [3] 刘建瑞, 苏起钦. 自吸泵气液两相流数值模拟分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 73-76.
Liu Jianrui, Su Qiqin. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 73-76.
- [4] 王涛, 李红, 冯世峰, 等. 基于 Mixture 模型对自吸喷灌泵自吸过程的气液两相流模拟 [C]//现代节水高效农业与生态灌区建设会议论文集(上). 北京: 中国农业工程学会, 2010: 826-833.
Wang Tao, Li Hong, Feng Shifeng, et al. Gas-liquid two-phase flow simulation based on mixture model in a self-priming irrigation pump during self-priming process[C]//Proceeding of the National Conference on Construction of Modern Water-saving Agriculture and Ecological Irrigation District. Beijing: Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010: 826-833.
- [5] 刘红光. 导叶立式自吸泵设计、数值模拟及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
Liu Hongguang. Design, numerical simulation and experimental study on vane self-priming vertical pump[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011.
- [6] 陈颂英, 李春峰, 曲延鹏, 等. 离心泵在启动阶段的水力特性研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(5): 781-783.
Chen Songying, Li Chunfeng, Qu Yanpeng, et al. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(5): 781-783.

(责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·



中国公众科技网

中国公众科技网由中国科学技术协会主办,于 1999 年 6 月 30 日正式开通,是中国大陆第一家开通的综合专业科普网站。

中国公众科技网依托于中国科协系统遍及全国城乡和覆盖科学技术各学科领域的基层组织和专业科普工作队伍,由中国科协系统共同建设,面向中国不同地域、不同生活状况、不同年龄段、不同知识水平的人群普及科学知识。

中国公众科技网推出的“科普网站导航系统”,筛选收录了国内 348 个科普网站和具规模的科普栏目,使网民能够便捷、直观地了解各科普网站的特点,从中选择内容规范、可靠,符合自己需求的站点浏览查询。

从 2002 年开始,中国公众科技网在国内科普网站中浏览量始终名列前茅,受到了公众和业界的认可,已成为中国网络科普领域具有重要影响的网站。2005 年,在中国互联网协会网络科普联盟举办的“第一届全国优秀科普网站及栏目评选活动”中,中国公众科技网被评为“优秀科普网站”;2006 年,中国公众科技网获得中国互联网协会颁发的“中国互联网行业自律贡献奖”。