国外水泵研究现状概述

严 敬，杨小林
（西华大学，四川 成都 610039）

摘 要：以丰富的材料为基础，概括性地评价了西方近年中在水泵技术各研究领域，如流场计算、汽蚀机理、振动、无泄漏密封等方面的研究现状及成果，这些资料将为国内水泵技术人员的产品开发、科研活动提供有益的启发和借鉴。

关键词：泵；研究；国外发展；概述
中图分类号：T-1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-6254(2003)05-0001-03

不久前，笔者以高级访问学者的身份赴美学习进修了一段时期。通过广泛查阅近期资料、访问有关网站、与国外同行专家座谈，对美国水泵技术的科研现状、成就及发展趋势有所了解。这里将自己的体会与认识整理成文，以期对国内同行把握国外技术动向能有点滴帮助。

在60年代，用户主要关心泵类产品的基本性能：效率、吸入特性、单调的 $H-Q$ 曲线等。市场发展趋势为现代水泵提出了新的要求，在泵产品实现了基本要求之后，产品成本和寿命成为决定产品市场占有份额的基本要素，这里成本指终身成本（life cycle cost），即泵的销售成本、运行成本和维护成本之和。在相当程度上，近数十年的研究活动都是为了实现这两个目标。

1 内流场计算及产品性能预测

大容量计算机的广泛应用使得精确预测给定几何参数水泵的扬程、效率已成为可能。在使用CFD技术计算叶轮内流场、相对速度分布时，西方较多使用称为TASSflow的软件。这一软件以有限体积法为基础，以流体压力为独立变量，通过求解雷诺应力时均Navier-Stokes方程，在多达11 600个节点上迭代计算速度场，并以标准 $k-\varepsilon$ 模型处理紊流特性，边界层中的速度则用对数速度分布定律计算。由于这一软件考虑了哥氏加速度和在叶片进口边或大曲率叶片表面引起较大的网格尺寸比引起的收敛性，因而特别适合于旋转流场的计算。对一台泵的计算结果表明，在最高效率流量的0.53～1.2倍范围内，实测的叶轮内轴面速度、相对速度实验值与计算值吻合程度很高。以内流场测试为基础，这一软件能可靠预测泵的 $H-Q$、$\eta-Q$ 曲线，从而避免了使用各种经验系数。还有研究人员使用Baldwin-Lomax紊流模型，在同时计算了泵内泄漏，圆盘机械损失后，较准确地预测了泵的轴功率。内流场测试技术目前已具有较高的适应性和普遍性。有研究人员对30台比转速从12～160的离心泵进行扬程、效率预测，发现计算值与实验值最大偏差不超过2.5%。

利用这一软件的计算结果修正泵的水力设计后，据报道，泵的效率最大能提高5%，使用寿命从6个月延长到4年，噪声水平降低，泵的 $H-Q$ 曲线单调下降。由于避免了反复试制和实验模型泵，新产品的研制周期和成本明显下降。

2 汽蚀机理

汽蚀现象领域中的一项重大研究成果是发现了过流部件的汽蚀破坏程度 dE/dt 与泵的汽泡长度 L 有如下指数关系：$dE/dt=KL^{2.83}$，且气泡长度 L 有了近似计算方法。这一发现直接导致了两项有较大应用价值的技术成果：第一，以计算方法确定泵在不同转速下的 $NPSH_r$ 值。研究人员曾引入一个比值 $R_{d\cdot f}=(\tau_{d\cdot f}-\tau_{3\%})/(\tau_i-\tau_{3\%})$，式中 τ 为无量纲化了的 $NPSH_r$ 值，即 $NPSHr/(Ue^2/2g)$，这里 Ue 为叶轮入口吸入眼处速度，下标 $d\cdot f$ 指可接受的 $NPSH_r$，i、3%分别指汽蚀初生及扬程下降3%处的对应汽蚀余量值。以此式为依据，可以导出 $R_{d\cdot f}\propto Ue^b$，指数 b 大约为2。为了计算一台给定泵可接受的 $NPSH_r$ 值，必须计

作者简介：严敬（1947-），男，江苏苏州人，教授，硕士，主要从事流体机械的研究与教学。

万方数据

算泵的$\tau_{3\%}$和τ_i。后者可以利用热力学平衡条件的势流分析获得，比如，有研究人员通过求解一系列奇点方程，以二维方法得到的汽蚀初生条件与实验值十分接近。$\tau_{3\%}$则要以实验确定。有了这些数据后，即可计算泵的不出现破坏的$NPSH_r$值。第二，提出了一些有效的提高泵抗汽蚀性能的措施，比如，为防止轮毂处汽蚀初生，将叶片进口边做成凹向；使用特殊的叶片加厚规律以扩大无汽蚀区域的过流能力；以椭圆叶片进口边减低此处压力降，等等。这些措施对延长泵的使用寿命起到了积极的保证作用。

3 泵的振动特性

泵运行中的振动对泵的寿命有较大的影响。为避免泵出现共振，必须认识泵体的固有频率。过去十余年中，国外从两个方向对此开展探讨与研究。一个方向为频率测算，即在三个互相垂直的方向上设置振动源，然后在多个测点上测量泵对振源的响应，并将各测点上标准化了的响应值输入计算机，由此产生各个频率的响应函数，最终计算泵体的共振频率。另一个方法是以基于有限元法的软件直接计算泵的共振频率，由于目前还必须对泵的螺栓、地基的刚性条件做出一些假设，因而计算结果尚有改进余地。

泵产生共振的另一个原因是泵或系统的固有频率等于某个共振源的频率，比如，当叶轮叶片以某一特定频率扫过隔舌时，泵内会出现严重的压力脉动。据报道，泵的零部件的振动与叶轮和压水室之间间隙处的力现象有关。一个转速为5 082 r/m的七级多级泵的计算表明，在考虑和不考虑间隙处流动的条件下，两次计算所得泵的临界转速相去较远。

4 叶轮外力特性

实验证实，泵的转子部件的动力特征与转子受力有关，这种力并不取决于由转子侧向位移引起的间隙处流动的不对称性。转子受力的几个主要频率与叶轮转速和叶片扫过隔舌的周期有关，前者由叶片流道的制造非对称性引起。使用一种逆向函数传递法（inverse transfer function method）可以测量一组泵的振动值后，间接获得这些外力。有研究人员在几台多级泵中测量了这些振动特征，然后反算这种不平衡外力。由于叶轮做过平衡试验，这种力显然是由于水力不平衡引起的。可以看到，如果叶轮流道分布不均匀，再精密的机械平衡也不能抑制叶轮所受力。另一种叶轮受力频率与叶片扫过隔舌或导叶入口周期有关。

过流部件上的这种作用力很难预测。设计人员应采取一些措施尽量减少这种力，如控制叶轮和压水室之间的间隙，降低轴的偏移程度，提高叶轮流道制造精度，等等。

5 设计新理念

近年中对叶轮的动力特性和汽蚀现象深入研究的结果，是允许提高转速，由此在不降低泵可靠性的条件下，减小泵的尺寸和降低成本。

过去十余年里，随着人们环保意识的普遍提高和环保法令的强化，水泵技术领域出现了一项重大技术突破，即磁性轴承的应用。这种轴承完全避免了固体表面的相互接触，不仅提高了泵的效率，而且实现了泵的无限长的理论寿命，最重要的是，这种泵能完全无泄漏化运行。这类泵在以下一些领域中应用最广泛：抽送的介质易燃易爆或有损人体健康，系统为高压或高真空，介质温度过高过低，等等。

另一类价格较低的无泄漏泵为屏蔽泵。据报道，这类泵在西方的性能参数水平为：系统压力为12 000 kPa，温度120~450 ℃，功率为250 kW。屏蔽泵的水泵部分效率正常，但电机部分的效率要下降10%~15%。这类泵比机械密封水泵贵、但检修少，可靠性高。由于屏蔽泵抽送介质的温度、压力易于测定，因而能比较准确地计算机组失效周期。

6 锅炉给水泵的发展

50年代，随着水泵输出功率的提高，水泵内部的侵蚀可能性增大。把叶轮、导叶等部件材料改为合金后，泵在运行时元件之间胶合的可能性也增大了。因此，这一时期研究重点为合金的抗侵蚀、抗胶合能力。在60年代，发电机单机容量达到150 MW，系统压力提高到65 000 kPa，转速6 000 r/m，泵的高扬程引起叶轮轴向力增加，振动严重，这一时期研究集中于叶轮轴向力，径向力的平衡。60年代末，发电机容量达到300 MW。在高压多级泵中，美国主要使用桶式结构，欧洲则使用成本较低的节段式结构。这时，由高转速引起的首级叶轮汽蚀成为研究重点。在90年代，发电机容量增长不大，达到700~800 MW，单泵功

万方数据

率达到30 MW，泵的尺寸增长较大，但效率并无明显提高，这段时间的研究集中在泵内热变形。大型热电厂的单机容量近期达到了900 MW，甚至1 200 MW。在大型电厂中，对泵装置的主要要求是：末级叶轮后使用效率较高的蜗壳式压水室；提高首级叶轮的抗汽蚀能力；提高泵的制造精度和表面质量，以数控机床加工叶轮内流道；用锻件制造泵体，以钛合金代替不锈钢制造叶轮；采用磁性轴承，省略某些辅助性设备以降低制造、维护成本。

7 实型成型技术

以计算机技术为基础，国外近年快速发展起了一项机械零件实型成型技术。将一台成型机与计算机相连接，成型机在几小时之内即可根据输入电脑的零件图以树胶等材料制作1:1尺寸的零件，如叶轮、泵盖等。这些零件有一定的刚度和强度，据说还可用于试验。这一技术使得设计人员能及时直观地考察设计结果，修正设计，对提高设计水平有较明显的意义。

8 国外泵类产品科研动向

“冷战”结束后，另一场战争，即经济领域内的竞争迅速达到全球规模。发达国家为保持其全球经济一体化中的领先地位，都强化了其科学研究的投入和驱动机制。水泵作为经济各部门的基础性产品，其产值和产量近年都呈上升趋势。比如，产泵大国日本在过去数年中，泵的销售额的年增长率都超过了国民经济产值增长率。日本近年中关于泵的研究集中在以下一些领域，这些研究方向是有代表性的，也能给国内科技人员以重要启迪。

1）过流部件，如叶轮、导叶中的稳定及非稳定流动现象；

2）泵的外特性分析及预测；

3）作用于叶轮以及叶片的稳定或不稳定外力；

4）涉及流动机理及材料破坏的汽蚀研究，如气泡初生，气泡动力特性，含泡水流在直列、环列叶栅（linear and circular cascade）中的流动特点，对汽蚀破坏的预测；

5）泵内的多相流动，泵在输送液—固、液—气流动时的特性；

6）流体动力计算在内流场分析中的应用及内流场测试；

7）管路系统中的不稳定现象；

8）非旋转泵，例如往复泵、射流泵、水锤泵、气动泵的研发。

参考文献：

[1] S Gopalakrishnan. Pump Research and Development: Past, Present and Future-An American Perspective. Journal of Fluids Engineering, Vol. 121, No.2: 237~247.

[2] Peter H Hergt. Pump Research and Development: Past, Present and Future. Journal of Fluids Engineering, Vol 121, No.2: 248~253.

[3] Hideo Ohasha, Yoshinobu Tsujimoto. Pump Research and Development: Past, Present and Future-Japanese Perspective. Journal of Fluids Engineering, Vol 121, No.2: 255~258.

[4] Valenti. CFD Software Improves Pump Design. Mechanical Engineering, 1996.11.

[5] Goto A. Prediction of Diffuser Pump Performance Using 3-D Viscous Stage Calculation. 3rd ASME Pumping Machinery Symposium. Canada: Vancouver, 1997.

[6] Hirschi R. Centrifugal Pump Performance Drop Due to Leading Edge Cavitations. 3rd ASME Pumping Machinery Symposium. Canada: Vancouver, 1997.

[7] Lobanoff V S, Ross R R. Centrifugal Pumps Design & Application. 2rd. U. S. A: Gulf Publishing Company, 1992: 39~44, 45~49, 56~58, 28~37, 29~30.

A Sam of Current Research on Pumps in Foreign Countries

YAN Jin, YANG Xiao-lin

(Xihua University, Chengdou, Sichuan 610039, China)

Abstract: Based on a variety of materials, the authors summarily introduced the current situation and latest achievements in western countries on pump research, some important areas being flow field calculation, cavitation phenomena, vibration, sealing without package. The information presented in this paper will be helpful for domestic pump technicians in new product design and research.

Key Words: Pump; Research; Overseas development; Sum

万方数据