

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.002

后锥角对串联空化腔室的空化特性的数值研究*

戴 勇, 叶见领, 葛 满, 楼飞燕

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对串联式空化腔室的空化强度和效率存在的问题, 展开了对其影响较大的后锥角 β 值的数值研究, 为今后的空化腔室设计提供理论依据。采用 Mixture 多相流模型, 以及 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型, 在 Fluent 软件中仿真模拟后锥角 β 值连续变化的多种串联空化腔室流体域模型, 抽取分析计算结果中的压力, 速度及空泡体积分数的云图, 进而研究后锥形角 β 值对空化流场的影响。研究表明: 在后锥形角 β 值取 15° 附近能够获得强度相对较高的空化现象; 产生空泡体积的大小、负压力的区域大小以及沿中轴线维持恒定速度的能力三者成正相关关系; 后锥角 β 值直接影响着空化流场的分布情况, 决定着最终喷射到工件表面的作用范围。

关键词: 串联空化腔室; 空化现象; 空泡体积; 后锥角

中图分类号: TH814⁺.51; O472.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1090-05

Numerical study of cavitating effects on posterior taper angles of tandem cavitation chamber

DAI Yong, YE Jian-ling, GE Man, LOU Fei-yan

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the existing problems of cavitation strength and efficiency of tandem cavitation chamber, a numerical study of the posterior taper angle β with large influence was put forward, which provided the theoretical basis for the future design of cavitation chamber. Based on the Mixture multiphase flow model and the $k-\varepsilon$ two-equation turbulence model, a series of cavitation chambers with continuous taper angle β values in the Fluent software were simulated. The concours of the pressure, velocity and vacuolar volume fraction in the calculated results were extracted to analyze and study the effect of the posterior taper angle β on the cavitation flow field. The results indicate that the cavitation phenomenon with relatively high strength can be obtained near the 15° of the posterior cone angle β , and the size of the vacuolar volume, the size of the negative pressure and the ability to maintain a constant velocity along the central axis are positively correlated relationship. The posterior taper angle β value directly affects the distribution of the cavitation flow field, which determines the range of the ultimate injection to the surface of the workpiece.

Key words: tandem cavitation chamber; cavitation phenomenon; vacuolar volume; posterior taper angle

0 引言

空化是指在一定温度条件下, 当流体的局部压强低于对应的饱和蒸汽压时, 流体内部会形成含有水蒸气或其它气体的明显气泡的过程^[1], 其间会经过空泡的初

生、膨胀、收缩及溃灭, 整个过程伴随着巨大的能量释放, 涉及力学、化学、电化学和热力学等多种作用。

而空化腔室是空化发生的初始场所, 其结构设计不仅对空化的发生强度有决定性作用, 而且很大程度上影响着后续空化发生的作用效果。目前国内外学者对空化

收稿日期: 2017-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51405422); 浙江省自然科学基金资助项目 (LQ13050011); 浙江省科学技术厅公益技术研究工业项目 (2014C31104)

作者简介: 戴 勇 (1963-), 男, 江苏如皋人, 教授, 主要从事精密、超精密加工技术及装备方面的研究。E-mail: 17764528656@163.com

腔室的研究与设计进行大量的研究探讨: Pandit 等人^[2]对孔板型的空化腔室展开了空泡的数值模拟, 得出了空泡在流动过程中与流体之间的相互作用对空泡的流型具有重要影响; Shin-Ichiro Uesawa 等^[3]着重研究了文丘里管型空化腔室内空泡的溃灭过程, 得出了在喉部和空泡溃灭点之间的流体属于超音速流动, 流经溃灭点之后则是亚音速流。付勇等^[4]对文丘里管型的空化腔室内空泡的动力学特性展开了数值模拟, 得出了流体的可压缩性对空泡溃灭的影响最大, 空化发生器结构参数以及操作参数均对空泡运动特性产生影响, 从而影响空化强度; 王海平等^[5]对基于湿蒸汽测量的文丘里管型的空化腔室进行了结构优化设计, 得到了最终的优化结构参数; 李根生、沈忠厚等^[6-8]利用瞬态流理论和水声学原理分析了风琴管自振空化射流喷嘴的工作原理, 得出了自振型空化腔室的基本结构设计模式。

自振型空化腔室与文丘里管空化型腔室结构均较为容易控制上下游的压力差, 具有结构设计相对简单、易于加工、坚固耐用等优点。结合二者结构优点, 将其进行串行连接, 流体先后经过自振型空化腔室和文丘里管型的空化腔室会有连续两次的体积收缩, 不仅会大大提高流体整体的湍动能, 而且更有利于增强空化效率。

本文利用 ANSYS 仿真软件中的 ICEM CFD 和 Fluent 板块模拟探究后锥形角 β 对该串联式空化腔室模型下的空化强度影响, 旨在能够得到一个相对较优的空化腔室。

1 空化腔室的设计

串联式空化腔室 ($D-d-\alpha-d'-\beta$ 型) 的结构简图如图 1 所示。

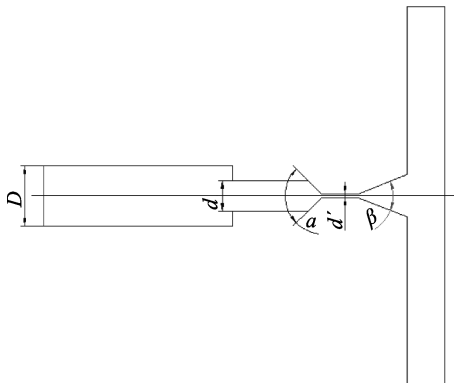


图 1 串联式空化腔室结构简图

图 1 中前一部分为自振型的空化腔室, 中间一部分为文丘里管型的空化腔室, 最后一部分为假定的流体喷射外域范围。本研究拟对该串联式空化腔室的后锥角 β 部分进行讨论, 观测其压力分布、速度分布、空泡体积

分数分布, 并进行比较性的分析, 得出在该种结构下的空化强度最大化的模型结构。为了便于研究, 初步设定了结构初始尺寸参数: $D=16\text{ mm}$, $d=8\text{ mm}$, $\alpha=60^\circ$, $d'=1\text{ mm}$, $\beta=20^\circ$ 。

2 数值模拟的设置

由于所研究的射流装置及所涉及的计算区域为旋转体结构, 其几何模型较为规则, 可使用较好的结构网格对研究对象进行划分, 另一方面, 规则的结构网格在计算中的应用有利于计算结果精度的提高。最终综合考虑选择结构网格划分, 虽然工程人员工作量加大, 但是计算机生成网格计算量小, 能够较好地控制网格生成质量, 同时保证边界层网格, 计算导入 Fluent 求解器中更容易收敛^[9]。而网格的疏密程度对于数值研究的结构具有很大的影响。

给定后锥角取值 15° 时划分的不同数目的网格量如图 2 所示。

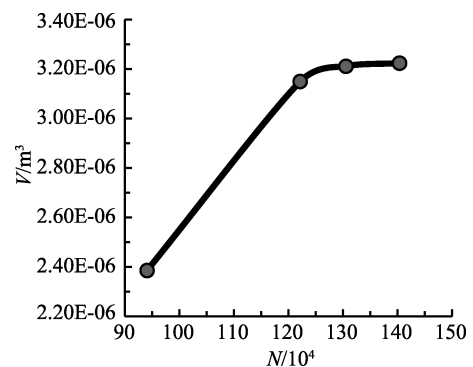


图 2 网格无关性验证曲线

由图 2 可知: 后 3 个算例结果相差不超过 3%, 而本文选用的网格量是 1.404×10^6 个, 显然网格数的增加对计算结果影响不大。

为充分探究该串联式空化腔室模型下的后锥角 β 的影响, 连续变化空化腔室的后锥角 β 值, 因此对多组不同模型进行结构网格划分, 这些网格大致如图 3 所示。

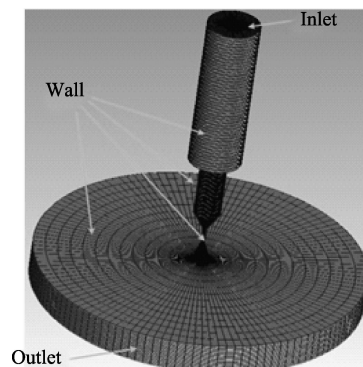


图 3 串联式空化腔室网格划分

该串联式空化腔室的数值研究涉及到气液两相混合，则在多相流模型的选择上，VOF 模型多适用于各相不相容的界面间的表面追踪方法，欧拉模型虽然计算精度高，但稳定性较差，混合模型是一个简化的多相流模型，基于 N-S 方程进行求解^[10-11]，而空化模型是基于各相之间相互贯穿的连续性假设，因此选取 Mixture 混合模型不仅利于空化射流模型的计算，而且占用计算机算资源少，计算速度也是比较快。空化流动是一种比较复杂的湍流运动，期间空泡会不断地重复从生成到溃灭

的过程，会引起湍动能产生项和弥散相的不均衡，因此选用 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型较为合适。在 Fluent 中相关参数设置：调出 Fluent 中的 Schnerr-Sauer 空化模型；压力入口为 1.4 MPa，压力出口为 0；设置进出口湍流强度 5%，其他为默认设置。

3 仿真结果分析

不同后锥形角 β 的串联式空化腔室的体积分数云图如图 4 所示。

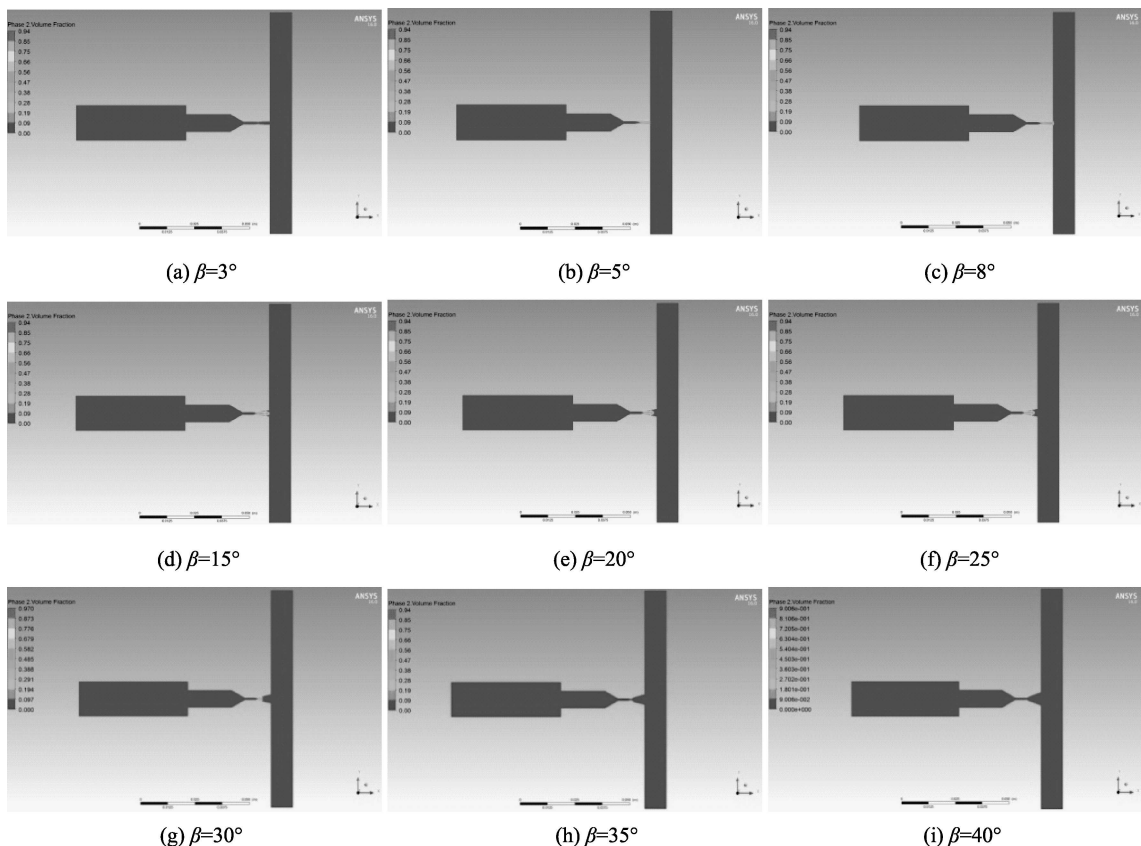


图 4 不同后锥形角 β 的空泡体积分数分布图

纵观全图发生空化的部分明显集中在后锥形角内，这也说明了 β 对空化腔室的流场空化强度的重要影响。为了进一步突出 β 对此类串联式空化腔室影响的分析，取串联式空化腔室的中心横截面上气相体积值之和，作为判断空化强度及空化效率的依据。

结合不同的后锥角 β 的串联式空化腔室的 Fluent 空化流场仿真结果，得出的曲线如图 5 所示。

从图 5 中发现：该类串联式空化腔室的流场空化强度并不是随着后锥形角 β 值增大而单调变化，在一定范围内增大后锥形角 β 值能够促进空化的发生，而图中显然在 β 取 15°与 20°存在一个极值，即该类结构的空化强度较为剧烈，继续增大后锥形角 β 值，反而抑制了串联式空化腔室的空化发生。

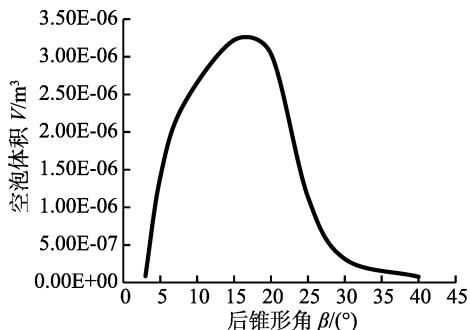


图 5 空泡体积随后锥形角 β 变化曲线图

为了更好地验证上述结论，本文抽取了几个比较典型空化腔室的局部放大的体积分数分布云图。压力云图以及速度云图如图 6 所示。

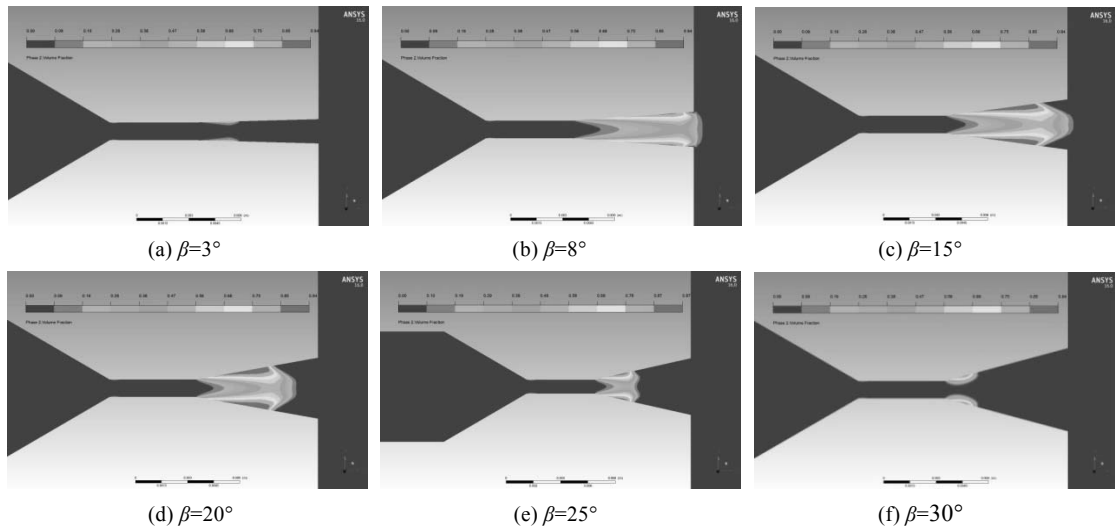


图 6 空化腔室的局部体积分数分布云图

由图 6 可知: 串联式空化腔室的空泡集中在细圆柱段与后锥形角, 在后锥形角靠近壁面处, 产生的空泡体积分数较高; 另外, β 取值为 3° 时, 串联式空化腔室的空泡体积分数相当低, 仅在细圆柱段和后锥形角交界处有微量的空泡产生, 随着后锥形角的增大, 串联式空化腔室的流场空泡体积分数增加, 空化流场的区域也逐渐向后锥形角的后部延伸, 继续增大 β 值时, 发生空化的区域在逐渐缩小, 空泡的体积分数逐渐减小, 整个空化腔室的流场空化强度降低。

空化腔室的局部压力分布云图如图 7 所示。

由图 7 可知, 流体经过前锥形角后再次发生结构的收缩, 致使其速度增大, 根据伯努利方程知, 该过程中的压力会急剧下降, 当局部流体的压强低于对应的饱和蒸汽压时, 流体会如“沸腾”般冒出许多空泡, 由压力云图可以看到, 显然在细圆柱段可以看到出现了负压力, 创造了空化发生的可能性, 随着后锥形角 β 的增加, 负压力区域逐渐向后锥形角的后部延伸, 极大地促进了空化现象的发生, 此处与图 6 的空泡体积分数云图相互佐证。

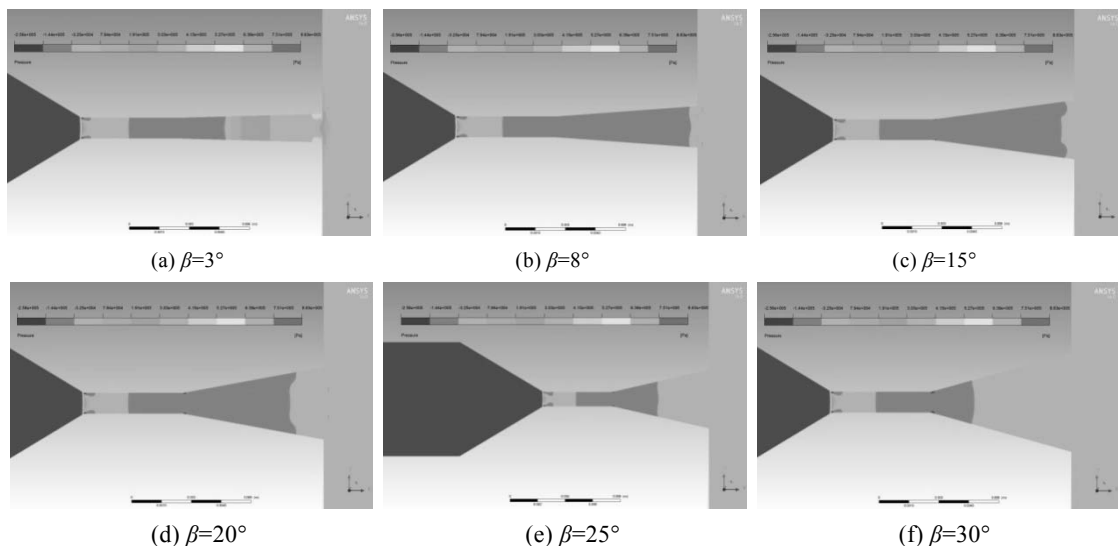


图 7 空化腔室的局部压力分布云图

空化腔室的局部速度分布云图如图 8 所示。

由图 8 可知: 沿着中轴线流体能够较好保持着恒定的速度, 并且随着后锥形角 β 的增大, 在未达到最大空化强度前, 串联式空化腔室的中轴线上维持恒定速度的能力越强; 流体以中轴线为界逐渐向外扩展至壁面, 速度

越来越小, 此处与自由紊动射流流动的一般特性^[12]相似。

4 结束语

本研究运用 Fluent 16.0 流体力学计算分析软件, 采用串联式的空化腔室, 结合 Mixture, $k-\epsilon$ 两方程湍

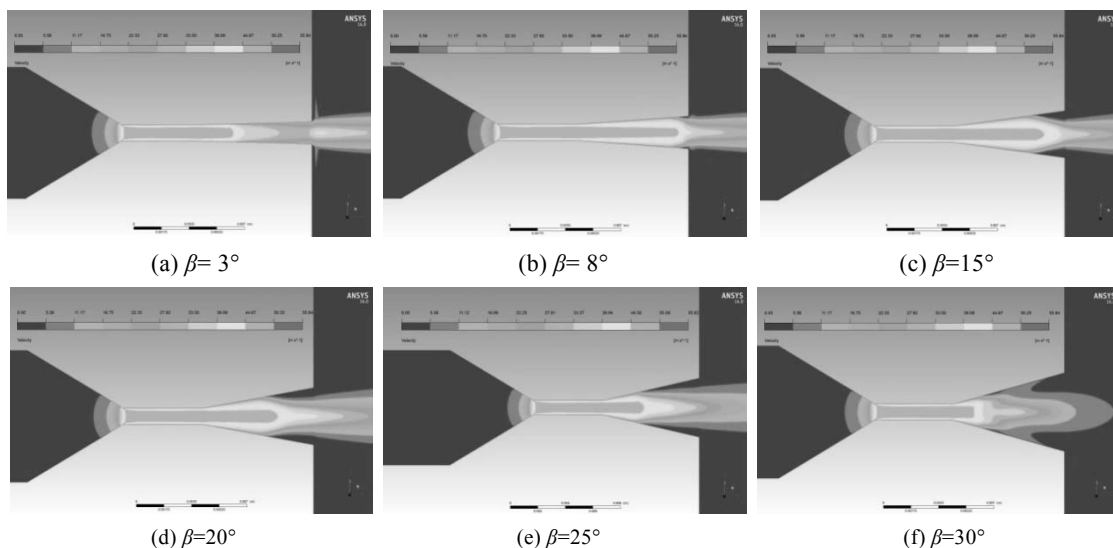


图 8 空化腔室的局部速度分布的放大云图

流模型, 研究后锥角 β 变化对空化流场的空化强度及空化效率的影响, 依据观测其空泡体积分数分布、压力分布、速度分布, 得出: 后锥形角 β 的大小对于串联式空化腔室的空化强度影响很大, 但并非一致性地呈现单调关系变化, 在该类串联式空化腔室 β 取 15° 附近时空化的剧烈程度较高; 后锥形角 β 取值的改变显然影响着负压区域大小, 空泡产生的体积大小, 以及沿中轴线流体维持恒定速度的能力, 而三者在后锥形角 β 取值连续改变的作用下成正相关关系。

参考文献(References):

[1] 黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
 [2] GOGATE P R, PANDIT A B. Engineering design methods for capitation reactors II : hydrodynamic cavitation[J]. *AICHE Journal*, 2000, 46(8): 1641-1649.
 [3] UESAWA S, KANEKO A, NOMURA Y, et al. Study on bubble breakup behavior in a venture tube[J]. *Multiphase Science and Technology*, 2012, 24(3): 257-277.
 [4] 付 勇, 张晓冬. 文丘里管空化器内空泡动力学特性的

数值模拟[J]. *化学工程与装备*, 2007(2): 4-7.
 [5] 王海平, 袁德文, 何灿阳, 等. 基于湿蒸汽测量的文丘里管结构优化设计方法[J]. *核动力工程*, 2013, 34(3): 137-139.
 [6] 李根生, 沈忠厚. 风琴管自振空化喷嘴的设计原理[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 1992, 16(5): 25-29.
 [7] 李敬彬, 李根生, 黄中伟, 等. 新型旋转射流多孔喷嘴流场的分析[J]. *流体机械*, 2014, 43(7): 32-36, 41.
 [8] 李根生, 沈忠厚, 周长山, 等. 自振空化射流研究与应用进展[J]. *中国工程科学*, 2005, 7(1): 27-32.
 [9] 纪兵兵, 陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
 [10] 孔繁余, 张洪利, 张旭锋, 等. 基于空化流动数值模拟的变螺距诱导轮设计[J]. *排灌机械工程学报*, 2010, 29(1): 12-17.
 [11] 刘丹丹, 刘朝霞, 邵万珍. 基于CFD的YOTCGP650型液力耦合器流场仿真分析[J]. *液压气动与密封*, 2015(7): 22-25.
 [12] 董志勇. 射流力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

戴 勇, 叶见领, 葛 满, 等. 后锥角对串联空化腔室的空化特性的数值研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(10): 1090-1094.
 DAI Yong, YE Jian-ling, GE Man, et al. Numerical study of cavitating effects on posterior taper angles of tandem cavitation chamber[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(10): 1090-1094.
 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>