

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.016

活动导叶分布圆直径对混流式水轮机水力性能的影响

吴子娟¹ 梁武科¹ 董 玮² 陈帝伊²

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 对于混流式水轮机, 活动导叶与固定导叶以及转轮的相对位置直接影响导水机构和转轮内部流动, 对水轮机安全、稳定、高效运行起到重要作用。采用商业软件 ANSYS CFX 16.0 对某电站水轮机模型机全流道进行三维数值模拟计算, 提出了 5 种活动导叶分布圆直径方案, 分析不同方案下水轮机的外部能量特性与内部流场, 寻找活动导叶安放的最佳位置。结果表明: 适当增大活动导叶分布圆直径, 可以有效改善叶片吸力面的低压区, 降低活动导叶流域内水流的最大速度, 改善转轮进口水流角, 同时减小导水机构与转轮的水力损失。小流量工况下, D_0/D_1 增大 0.031, 水轮机效率提高了 5.28 个百分点; 设计工况与大流量工况下, 活动导叶分布圆的变化对水轮机效率的影响相对于小流量工况较小, 最高效率与最低效率的差值分别为 0.17% 与 0.48%。因此, 在一定范围内改变活动导叶的分布圆直径具有可实施性, 对水轮机的优化设计有一定参考价值。

关键词: 水轮机; 活动导叶; 分布圆直径; 数值模拟

中图分类号: TK733+.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)05-0140-08

Influence of Guide Vane Distribution Circle Diameter on Performance and Internal Flow Characteristics of Francis Turbine

WU Zijuan¹ LIANG Wuke¹ DONG Wei² CHEN Diyi²(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China
2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: For a Francis turbine, the movable guide vane is mainly used to regulate the flow rate and circulation, the relative positions of guide vane, stay vane and the runner directly affect the internal flow of water guiding mechanism and runner, which play an important role in the safe, stable and efficient operation of the turbine. The commercial software ANSYS CFX 16.0 was used to calculate the three-dimensional steady flow in the full flow channel of a hydraulic turbine model machine. Five guide vane distribution circle diameter schemes were proposed to be analyzed, aiming at obtaining the energy characteristics and internal flow fields of the turbine under different schemes. Then the best position of the active vane placement was determined, and the results showed that by appropriately increasing the circular diameter of the guide vane distribution, the low-pressure area at the suction surface of the blade could be improved, the maximum flow velocity around guide vanes could also be reduced, the flow angle at the inlet of the runner was more reasonable, and the hydraulic losses of the guide mechanism and the runner were decreased, and the turbine operating efficiency was improved. At low flow rates, D_0/D_1 (guide vane distribution circle diameter/runner diameter) was increased by 0.031, and the turbine corresponding efficiency was increased by 5.28 percentage points, at designing flow rate or high ones, the influence of change of guide vane distribution on the turbine efficiency was smaller than that at low flow rates. Compared with the different circle diameter schemes of guide vane, the difference between the highest efficiency and the lowest efficiency were 0.17% under the design condition and 0.48% at the high flow one, respectively. Therefore, changing the distribution circle diameter of the guide vane within a certain range had the engineering practicability in the capacity-increasing projects of the water-power station units, which can be applied in optimizing the Francis turbine.

Key words: hydro-turbine; guide vane; distribution circle diameter; numerical simulation

收稿日期: 2019-01-22 修回日期: 2019-03-19

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51622906)

作者简介: 吴子娟(1988—), 女, 博士生, 主要从事流体机械内部流场分析与优化设计研究, E-mail: wuzijuan.xa@qq.com

通信作者: 梁武科(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事水轮机设计、运行、改造及故障诊断研究, E-mail: liangwuke@vip.163.com

0 引言

在水电站增容改造的过程中,常存在过流部件相互匹配性差的问题,导致机组无法在最优状态下运行^[1-2]。活动导叶按水流流动方向布置在固定导叶之后,通常认为,水流经蜗壳与固定导叶后的出流角是固定不变的,水轮机通过改变活动导叶开度来调节流量及水流环量,从而达到调整水轮机输出功率的目的^[3-5]。

水轮机内部旋转湍流导致了流场的复杂性^[6-7],加之流体与结构的相互作用^[8-9],水力因素时常诱发机组工作效率的下降与运行的不稳定^[10-11]。尤其当机组在偏离设计工况运行时,流道中的空化、旋涡、死水、脱流等现象更加严重^[12-14]。文献[15]通过模拟流道内双列线性动静叶栅的绕流问题以及水轮机环列真实叶栅的动态绕流,得到了动静叶间非定常干涉流场内活动导叶后形成的振荡性绕流尾迹。文献[16-17]通过数值计算的方法捕捉到了活动导叶周围的独特流动形式和叶道涡的时空演化。活动导叶出流角直接影响水流撞击转轮叶片的冲角,进而影响转轮做功的效率^[18-21]。已有一些学者对活动导叶的结构进行优化。文献[22]基于 ANSYS 软件研究了不同活动导叶结构对其变形量的影响,并对导叶结构进行了优化分析。文献[23]在两相流条件下对水轮机的导叶进行优化设计,优化导叶安放位置以及固定导叶与活动导叶之间的匹配关系,改善导叶出口的环量分布,降低导叶水头损失,提高转轮的效率。文献[24]采用黄河原型沙,通过试验证实,在含沙量相同的条件下,水轮机材料磨蚀量随水流速度增大而增大。文献[25]以多淤泥河流为背景,通过分析空化与泥沙颗粒磨蚀对水轮机转轮联合作用的危害,证实可以通过导水机构与转轮的改型来降低空化与颗粒磨蚀对机组造成的损害。

本文采用 CFD 数值计算的方法,针对某混流式水轮机模型机,提出 5 种活动导叶分布圆直径方案,通过分析数值计算结果,对比 5 种活动导叶分布圆直径下水轮机性能及内部流动参数的相对变化,寻求活动导叶在径向的最佳安放位置。

1 研究对象与计算方法

1.1 计算模型及设计参数

以国内某电站混流式水轮机模型为研究对象进行数值计算,该电站原型水轮机真机运行水头范围是 91~112 m,额定水头为 106 m,本文研究的水轮机模型机计算水头 $H = 30$ m,模型转轮进口直径

$D_1 = 360$ mm,活动导叶分布圆直径 $D_0 = 409.8$ mm,导叶高度为 $0.27D_1$ 。整个计算区域包括蜗壳、固定导叶(24 个)、活动导叶(24 个)、转轮(13 个叶片)、尾水管。采用 UG 软件进行几何建模,如图 1 所示。

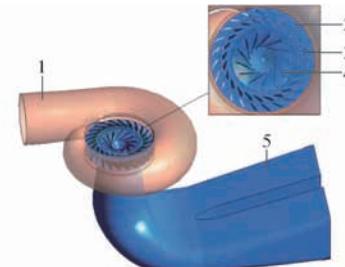


图 1 计算域三维实体图

Fig. 1 3-D whole computational mode of Francis turbine

1. 蜗壳 2. 固定导叶 3. 活动导叶 4. 转轮 5. 尾水管

1.2 数值计算方法

水轮机内部流动属于不可压缩湍流流动,流动规律遵循质量守恒定律和动量守恒定律。不同的湍流模型求解时的收敛速度、计算精度均不同。本文采用 CFD^[26]商业软件 ANSYS CFX 16.0 进行数值模拟,选用 $k-\omega$ 模型中的 SST(剪切应力运输)模型对方程进行封闭^[27-29]。

水轮机蜗壳进口采用质量流量进口边界条件,尾水管出口采用压力出口边界条件,压力给定平均静压,壁面边界采用水力光滑无滑移条件,转轮域进出口的动静交界面采用“Frozen – Rotor”,设置计算收敛标准为最大残差小于 10^{-4} 。

1.3 网格划分及无关性验证

采用 ICEM 软件对水轮机蜗壳、固定导叶、活动导叶、转轮、尾水管共 5 个过流部件进行高质量的结构化网格划分,并对导叶叶片表面、转轮叶片表面等重要的流场壁面处进行网格加密,以便于捕捉更加精细的流场信息,其中活动导叶与转轮计算域网格如图 2 所示。

为了保证计算结果的精度,对网格进行无关性验证^[30-31],如图 3 所示,以原始机组在设计工况时的效率与输出功率作为参考指标,当总网格数增加到 5.5×10^6 时,效率与输出功率基本趋于稳定,因此本文最终确定模型水轮机全流道数值计算总网格数为 5.5×10^6 。

1.4 计算工况

该模型机设计工况单位转速 $n_{11} = 69$ r/min,单位流量 $Q_{11} = 0.765$ m³/s,该单位流量记为 Q_d 。本文计算工况点选最优单位转速下,单位流量分别为 $0.6Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 Q_d 和 $1.2Q_d$,各流量工况下活动导叶分布圆直径改变,导叶转动角保持不变。

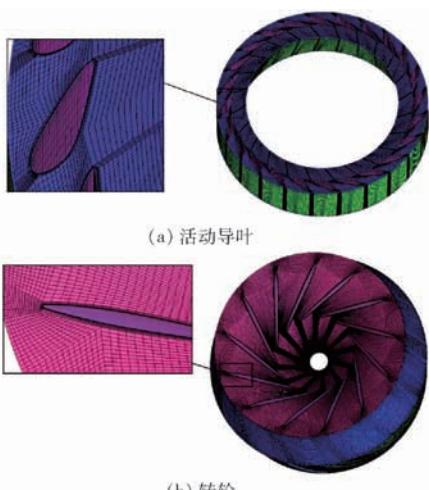


图2 活动导叶与转轮的网格

Fig. 2 Grid generations of guide vane and runner

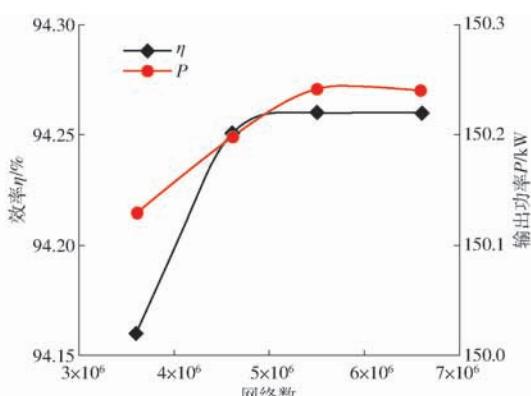


图3 网格无关性验证

Fig. 3 Grids independence test and verification

2 改型方案

混流式水轮机导叶及转轮轴面流道如图4所示。针对本文研究的水轮机,为了保证活动导叶在最大开度时与固定导叶、转轮无碰撞,活动导叶在闭合时合理搭接保证密封,活动导叶分布圆直径允许变化范围为402~415.8 mm。为了分析活动导叶分布圆直径对水轮机性能的影响,共提出了5种不同活动导叶分布圆直径的方案,在原机组活动导叶分布圆,即方案3的基础上,缩小分布圆直径得到方案1、方案2,在原始活动导叶分布圆基础上放大分布圆直径得到方案4、方案5,不同方案的参数见表1。

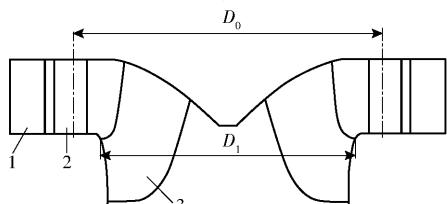


图4 活动导叶分布圆示意图

Fig. 4 Sketch of guide vane distribution circle

1. 固定导叶 2. 活动导叶 3. 转轮

表1 各方案的导叶分布圆直径参数

Tab. 1 Diameter parameters of guide vane of each scheme

参数	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
D_0/mm	403.0	406.0	409.8	412.0	414.0
D_0/D_1	1.119	1.128	1.138	1.144	1.150

3 计算结果与讨论

3.1 水轮机外特性分析

为了验证数值计算的可靠性,对本文所研究的水电站水轮机在冬季水流清澈的时间段进行真机效率试验,并与CFD计算结果进行对比。电站真机的运行水头范围为97~112 m,效率试验实测水头为101 m。蜗壳进口压力由PA-23型压力传感器测量,压力传感器精度为0.25%,机组流量由南瑞公司生产的UF-911型超声波流量计记录,流量计精度为±0.5%,并在现场校准仪器。试验工况点选取设计工况单位转速 $n_{11} = 69 \text{ r/min}$,单位流量取 $0.6Q_d \sim 1.2Q_d$ 共7个工况点。图5为数值计算结果与模型试验结果效率曲线对比图。由图5可以看出,计算值与试验值具有相同的变化规律,单位流量为 Q_d 时出现效率拐点,为效率最高点。由于数值计算未考虑流道内密封间隙所造成的泄漏损失,数值计算效率略高于试验效率。计算值与试验值最大误差为3.4%,发生在单位流量为 $0.6Q_d$ 的工况。整体来看,数值计算得到的模型水轮机水力效率与试验结果吻合较好,误差在可接受范围内。

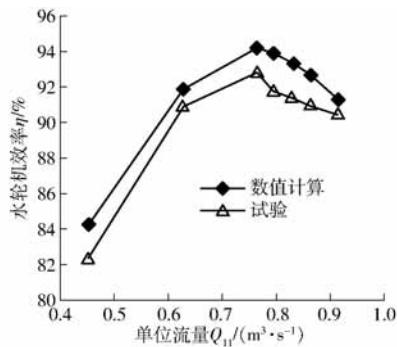


图5 效率试验与数值模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of numerical simulation and test result

水流经过固定导叶以一定的出流角流向活动导叶进口,活动导叶叶片的阻力使叶片进口和出口产生径向压差,从而产生水力损失。水流能量在导水机构中的损失将直接影响水轮机的效率。本文分别计算了5种改型方案在4个工况下的水轮机效率、活动导叶水头损失及转轮水头损失。

从图6可以看出,4种工况下水轮机效率在方案1中始终最低,而方案5最高,水轮机的效率随活

动导叶分布圆直径的增大呈单调递增趋势。文献[32]通过试验比较了A897型转轮在相同流道, D_0/D_1 分别为 1.16 和 1.18 时水轮机的效率, 试验结果显示 D_0/D_1 较大的方案水轮机效率更高, 与本文数值计算结果中水轮机效率随活动导叶分布圆直径增大而提高的结论相一致, 说明了本文计算结果的可靠性。

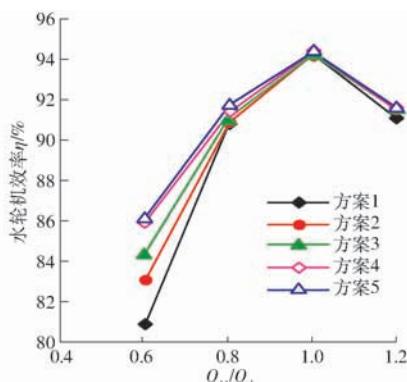


图 6 不同改型方案下的水轮机效率

Fig. 6 Turbine efficiency at different D_0 values

本文的计算结果显示:当水轮机组在小流量 $0.6Q_d$ 工况运行时,活动导叶分布圆直径对水轮机效率的影响最为明显,但效率递增的幅度随 D_0 的增大逐渐减小,其中方案 2 与方案 1 相比,水轮机的效率增加了 2.11 个百分点,而方案 5 与方案 4 相比,水轮机的效率增加了 0.32 个百分点,5 种方案最高效率与最低效率的差值为 5.28%。设计工况 Q_d 与大流量 $1.2Q_d$ 工况下,活动导叶分布圆的变化对水轮机效率的影响较小,最高效率与最低效率的差值分别为 0.17% 与 0.48%。

经过数值模拟计算,活动导叶分布圆直径对蜗壳、固定导叶及尾水管能量特性影响较小,因此本文重点分析活动导叶分布圆直径对活动导叶流动损失与转轮能量特性的影响。图 7 为活动导叶的水头损失,从图中可以看出,当机组在 $0.6Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 Q_d 及 $1.2Q_d$ 工况运行时,活动导叶的水头损失随着 D_0 的增大呈递减趋势。水轮机在小流量 $0.6Q_d$ 工况下运行时, D_0 对活动导叶水头损失影响最明显,方案 1 的水头损失为 1.1 m,方案 5 的水头损失为 0.78 m,两者相差 0.32 m。当流量逐渐增大,活动导叶水头损失随着 D_0 的增大变化比较平缓。设计工况 Q_d 下,方案 5 与方案 1 相比,水头损失减小 0.02 m;大流量工况,方案 5 与方案 1 相比,水头损失减小 0.03 m。

转轮是水轮机做功的核心部件,通常转轮内的水头损失占总水头损失的比重最大。当转轮的进口水流角 β_1 (水流相对速度 w_1 与圆周速度 u_1 的夹角) 等于叶片进口安放角 β_{bl} 时,水流对叶片不发生脱

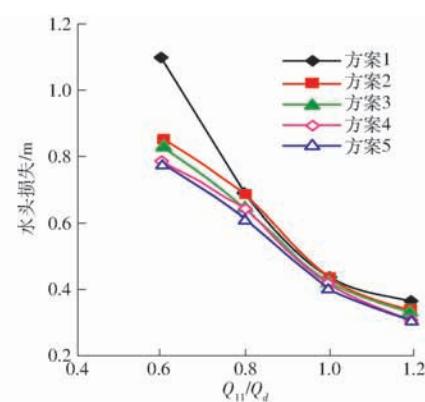


图 7 不同改型方案下的活动导叶水头损失

Fig. 7 Hydraulic loss of guide vane at different D_0 values

流,绕流平顺,水力损失最小。因此,水流冲角 α ($\alpha = \beta_1 - \beta_{bl}$) 越大,水力损失越大。图 8 为转轮叶片进口处的速度三角形示意图。在活动导叶转动角度不变的条件下,增大活动导叶分布圆直径,流速 v_1 减小, $\beta'_1 < \beta_1$, 冲角 α 减小, 转轮水力损失减小。依图 9 可见,随着流量的增大,转轮水头损失先减小后增大,设计工况 Q_d 为转轮水头损失的最低点。当机组在 $0.8Q_d$ 、 Q_d 以及 $1.2Q_d$ 工况运行时,随着 D_0 的增大,转轮的水头损失逐渐减小。5 种方案在 4 个工况下,方案 1 在小流量 $0.6Q_d$ 工况时转轮内的水头损失最大,为 2.66 m,比原始活动导叶分布圆直径的方案 3 高出 0.96 m;设计工况 Q_d 方案 5 水头损失最小,为 0.88 m。小流量 $0.6Q_d$ 工况下,方案 5 的水头损失比方案 1 的水头损失小 1.2 m;设计工况下,方案 5 转轮水头损失与方案 1 相比小 0.06 m;大流量 $1.2Q_d$ 工况下,方案 5 的水头损失比方案 1 小 0.09 m。

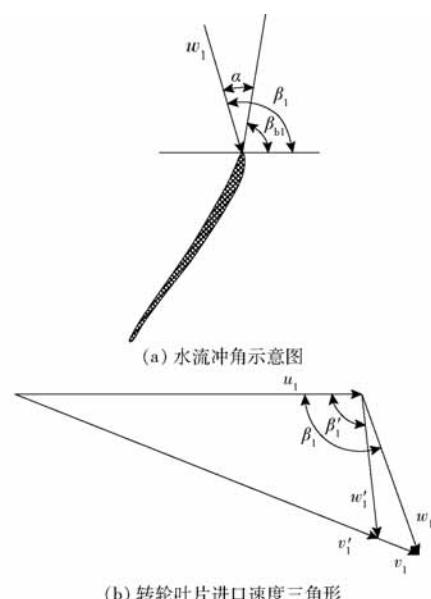


图 8 转轮叶片进口冲角与速度三角形

Fig. 8 Attack angle and velocity triangle at inlet of runner blade

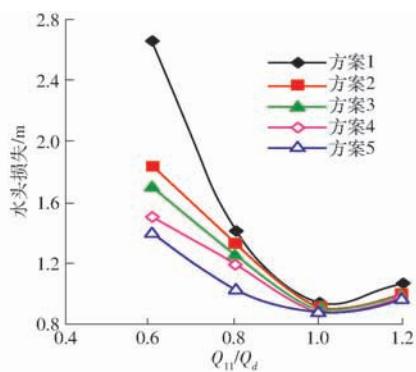


图9 不同改型方案下的转轮水头损失

Fig. 9 Hydraulic loss of runner at different D_0 values

3.2 活动导叶内部流动分析

图10给出了 $0.6Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 Q_d 、 $1.2Q_d$ 4种流量工况下活动导叶表面近顶盖处、导叶中部和近底环处

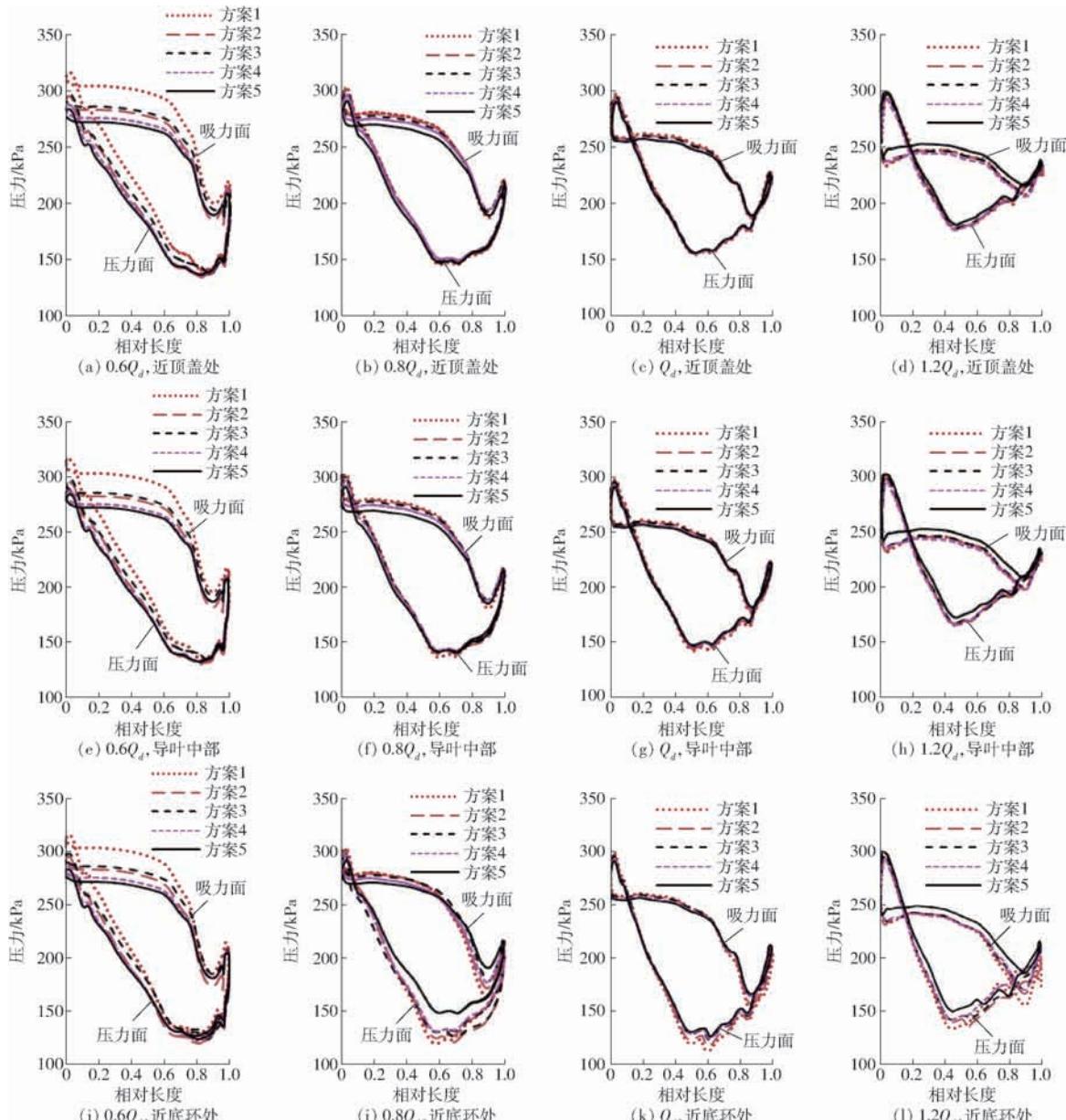


图10 活动导叶表面的压力分布

Fig. 10 Pressure distributions at different blade heights

处截面的压力分布曲线。可以看出,导叶片前缘吸力面压力大于压力面压力,活动导叶进口为负冲角入流,流体从吸力面一侧开始绕流,并且随着流量的增大,活动导叶片绕流速度增大,叶片吸力面压力大于压力面压力的区域增大。这是因为固定导叶的出流角与活动导叶安放位置并不匹配。增大 D_0 ,4种工况下压力面与吸力面的压差都有所减小。小流量工况时, D_0 由403 mm增大到414 mm,叶片压力面与吸力面压力减小幅度相较于设计工况与大流量工况较大,且压力面减小的幅度比吸力面减小的幅度大,活动导叶表面压力分布得到改善。

图11为 $0.6Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 Q_d 、 $1.2Q_d$ 4个流量工况下,5种活动导叶分布圆直径方案的活动导叶片 $1/2$ 高度截面的压力云图。进入活动导叶流域的水

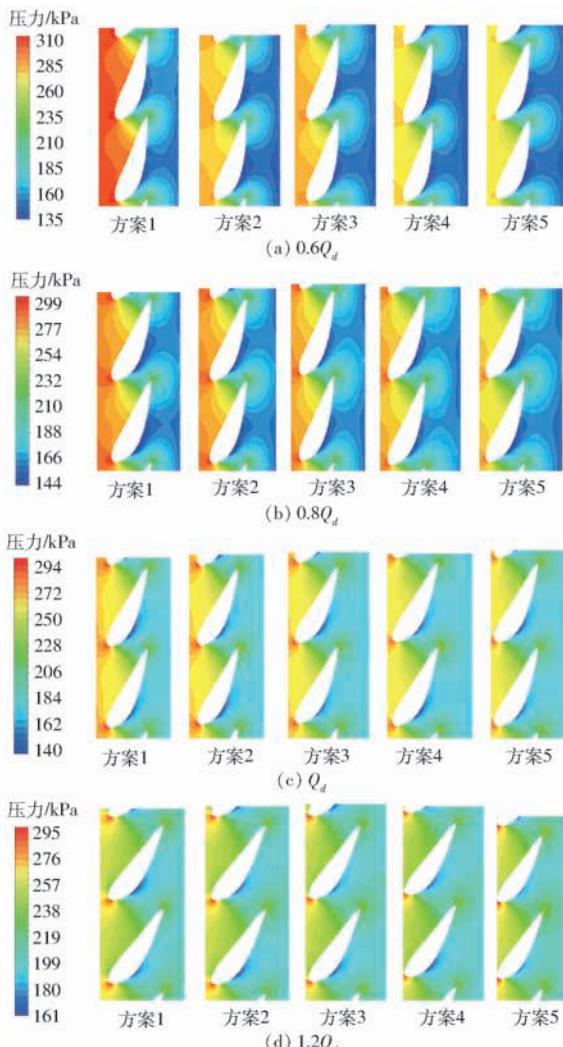


图 11 活动导叶 1/2 高度截面压力分布云图

Fig. 11 Pressure distribution at 1/2 height of active guide vane
流以一定冲角入流,于导叶附近产生边界层分离,在叶片吸力面沿导叶前缘至尾缘 $1/3 \sim 1/2$ 弦长处附近产生较为明显的低压区。由图 11 可以看出,从活动导叶流域进口到出口,水流压力逐渐减小,随着活动导叶分布圆的增大,活动导叶流域内水流的平均压力呈递减的趋势,活动导叶内的压力梯度明显降低。在 $0.8Q_d$ 、 Q_d 、 $1.2Q_d$ 流量工况时, D_0 增大,活动导叶吸力面附近的低压区面积逐渐缩小。小流量 $0.6Q_d$ 工况时, D_0 增大,活动导叶流域进口至叶片前缘区域的高压区面积逐渐减小,当 D_0 由 403 mm 增大至 414 mm,该区域的最大压力也由 310 kPa 降低至 294 kPa。

图 12 给出了 5 种 D_0 方案下活动导叶流域内水

流的最大速度 v 。由图可知,随着 D_0 的增大,水流的最大速度呈递减趋势,4 种工况下,活动导叶流域内水流的最大速度均在方案 1 时最大,在方案 5 时最小,其中 $0.6Q_d$ 工况时活动导叶流域内水流的最大速度降幅最大。当 D_0 从 403 mm 增大到 414 mm,小流量 $0.6Q_d$ 工况下,导叶流域内水流的最大流速从 19.5 m/s 降低至 17.5 m/s,降低了 10.3%; $0.8Q_d$ 工况下,导叶内水流的最大速度从 19.3 m/s 降低至 18.0 m/s,降低了 6.8%;设计工况下,导叶内水流的最大速度从 19.0 m/s 降低至 17.6 m/s,降低了 6.8%;大流量 $1.2Q_d$ 工况下,最高流速从 18.3 m/s 降低至 16.9 m/s,降低了 7.3%。对于多泥沙河流上的水轮机来说,适当增大 D_0 ,可以降低活动导叶流域内水流速度,从而减轻活动导叶受泥沙颗粒的磨损程度。

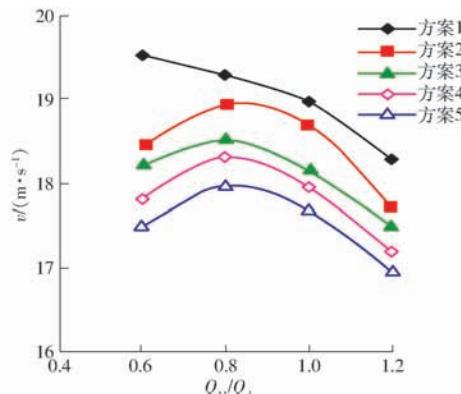


图 12 活动导叶流域水流最大速度

Fig. 12 Maximum flow velocity in guide vane area

4 结论

(1) 当机组在 $0.6Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 Q_d 、 $1.2Q_d$ 4 种流量工况下运行, D_0/D_1 变化范围为 1.119 ~ 1.15 时,水轮机的效率随活动导叶分布圆直径的增大呈单调递增趋势,活动导叶与转轮内的能量损失随活动导叶分布圆直径增大而减小。

(2) 当机组在小流量 $0.6Q_d$ 工况下运行时,相较于在 $0.8Q_d$ 、 Q_d 、 $1.2Q_d$ 流量工况,随着活动导叶分布圆直径的增大,水轮机效率提高幅度最大, D_0/D_1 增大 0.031,水轮机效率提高了 5.28 个百分点。

(3) 当 D_0/D_1 由 1.119 增大至 1.15,活动导叶流域内水流的最大速度减小,活动导叶叶片压力面与吸力面压差减小,活动导叶流域内压力分布得到改善。

参 考 文 献

- [1] 韩凤琴,黄乐平,杨栗晶,等.可调节活动导叶的形状解析[J].工程热物理学报,2010,31(2):263~266.
HAN Fengqin, HUANG Leping, YANG Lijing, et al. Geometrical analysis of adjustable guide vanes for bulb turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(2): 263~266. (in Chinese)
- [2] MALIPEDDI A R, CHATTERJEE D. Influence of duct geometry on the performance of Darrieus hydroturbine[J]. Renewable Energy, 2008, 33(10): 2122~2127.

- Energy, 2012, 43: 292–300.
- [3] TIMOSHEVSKIY M V, CHURKIN S A, KRAVTSOVA A Y, et al. Cavitating flow around a scaled-down model of guide vanes of a high-pressure turbine[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 78(1): 75–87.
- [4] HAN Wei, WANG Jie, KANG Jingbo, et al. Erosion characteristics of hydraulic turbine guide-vane end clearance in sediment water flow: a simplified model analysis [J]. Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 2017, 5(10): 111–126.
- [5] KRZEMIANOWSKI Z, PUZYREWSKI R. 3D computations of flow field in a guide vane blading designed by means of 2D model for a low head hydraulic turbine[C]//Journal of Physics: Conference Series, 2014.
- [6] GAVRILOV A A, SENTYABOV A V, DEKTEREV A A, et al. Vortical structures and pressure pulsations in draft tube of a Francis-99 turbine at part load: RANS and hybrid RANS/LES analysis[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2017, 63(6): 158–171.
- [7] ROMERO-GOMEZ P, HARDING S F, RICHMOND M C. The effects of sampling location and turbulence on discharge estimates in short converging turbine intakes[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2017, 11(1): 513–525.
- [8] MUIS A, SUTIKNO P, SOEWONO A, et al. Design optimization of axial hydraulic turbine for very low head application[C]//2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA, Energy Procedia, 2015: 263–273.
- [9] KOIRALA R, THAPA B, NEOPANE H P, et al. A review on flow and sediment erosion in guide vanes of Francis turbines[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 75(8): 1054–1065.
- [10] NEGRU R, MUNTEAN S, MARSAVINA L, et al. Computation of stress distribution in a Francis turbine runner induced by fluid flow[J]. Computational Materials Science, 2012, 64(11): 253–259.
- [11] SILVA P A S F, DE OLIVEIRA T F, BRASIL A C P, et al. Numerical study of wake characteristics in a horizontal-axis hydrokinetic turbine[J]. Anais da Academia Brasileira de Ciencias, 2016, 88(4): 2441–2456.
- [12] 高忠信, 唐澍, 梁贺志. 水轮机固定导叶和活动导叶后的卡门涡频率研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005, 20(6): 729–735.
- GAO Zhongxin, TANG Shu, LIANG Hezhi. Study on Karman vortices after stay vane and guide vane for hydropower station [J]. Journal of Hydrodynamics(A), 2005, 20(6): 729–735. (in Chinese)
- [13] LI S C. Tiny bubbles challenge giant turbines: three Gorges puzzle[J/OL]. Interface Focus, 2015, 5(5). <https://doi.org/10.1098/rsfs.2015.0020>.
- [14] ANUP K C, LEE Y H, THAPA B. CFD study on prediction of vortex shedding in draft tube of Francis turbine and vortex control techniques[J]. Renewable Energy, 2016, 86(2): 1406–1421.
- [15] 黄剑峰, 张立翔, 杨松, 等. 水轮机活动导叶关闭过程中导水机构内动态流场数值模拟研究[J]. 水利学报, 2017, 48(3): 299–307.
- HUANG Jianfeng, ZHANG Lixiang, YANG Song, et al. Numerical simulation of dynamic flow around wicket gate in hydro turbine with guide vane closure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(3): 299–307. (in Chinese)
- [16] 郭涛, 张立翔. 混流式水轮机小开度下导水机构内湍流特性和叶道涡结构研究[J]. 工程力学, 2015, 32(6): 222–230.
- GUO Tao, ZHANG Lixiang. Numerical study on turbulence characteristics in Francis turbine under small opening condition [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(6): 222–230. (in Chinese)
- [17] LI Qifei, QUAN Hui, LI Rennian, et al. Influences of guide vanes airfoil on hydraulic turbine runner performance[C]//2012 International Conference on Modern Hydraulic Engineering, 2012: 703–708.
- [18] PEREIRAS B, VALDEZ P, CASTRO F. Numerical analysis of a unidirectional axial turbine for twin turbine configuration[J]. Applied Ocean Research, 2014, 47(8): 1–8.
- [19] THAPA B S, TRIVEDI C, DAHLHAUG O G. Design and development of guide vane cascade for a low speed number Francis turbine[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2016, 28(4): 676–689.
- [20] 朱国俊, 罗兴锜, 冯建军, 等. 混流式水轮机转轮设计变量耦合强度分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 36–45.
- ZHU Guojun, LUO Xingqi, FENG Jianjun, et al. Variable coupling strength analysis of Francis turbine runner design[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 36–45. (in Chinese)
- [21] TYAGI R K. The effect of an angle on the impact and flow quantity on output power of an impulse water wheel model[J]. Journal of Energy in Southern Africa, 2015, 26(3): 100–104.
- [22] 刘晶石, 吕桂萍, 钟苏, 等. 基于 ANSYS 的轴流式水轮机空心活动导叶结构优化分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(6): 215–219.
- LIU Jingshi, LÜ Guiiping, ZHONG Su, et al. Optimization of hollow wicket gate of Kaplan turbine based on ANSYS[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(6): 215–219. (in Chinese)
- [23] LI Qifei, LI Rennian, QUAN Hui, et al. Solid-liquid two-phase flow numerical simulation around guide vanes of mixed-flow water turbine[C]//International Conference on Advances in Computational Modeling and Simulation, 2012: 87–91.
- [24] 任岩, 张兰金, 李延频, 等. 水轮机的磨蚀失效特性[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 188–191.
- REN Yan, ZHANG Lanjin, LI Yantpin, et al. Sand abrasion characteristics of materials for hydro-turbines [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 188–191. (in Chinese)
- [25] CHITRAKAR S, NEOPANE H P, DAHLHAUG O G. Study of the simultaneous effects of secondary flow and sediment erosion in Francis turbines[J]. Renewable Energy, 2016, 97(11): 881–891.
- [26] CHOI H J, ZULLAH M A, ROH H W, et al. CFD validation of performance improvement of a 500 kW Francis turbine[J]. Renewable Energy, 2013, 54(6): 111–123.
- [27] 冯建军, 李文峰, 席强, 等. 混流式水轮机主轴中心孔补水对尾水管性能的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3):

- 58–64.
- FENG Jianjun, LI Wenfeng, XI Qiang, et al. Influence of water admission through main shaft central hole on performance of Francis turbine draft tube [J]. Transactions of CSAE, 2017, 33(3): 58–64. (in Chinese)
- [28] CAMPOBASSO M S, YAN M, BONFIGLIOLI A, et al. Low-speed preconditioning for strongly coupled integration of Reynolds-averaged Navier–Stokes equations and two-equation turbulence models [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 77(6): 286–298.
- [29] 毛秀丽,李春华,屈波,等. 蜗壳轴向出流式低比转数水轮机设计与数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 204–211.
- MAO Xiuli, LI Chunhua, QU Bo, et al. Design and numerical simulation of volute axial outflow hydraulic turbine with low specific speed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 204–211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180523&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.023. (in Chinese)
- [30] 冯静安,唐小琦,王卫兵,等. 基于网格无关性与时间独立性的数值模拟可靠性的验证方法[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2017, 35(1): 52–56.
- FENG Jing'an, TANG Xiaoqi, WANG Weibing, et al. Reliability verification method of numerical simulation based on grid independence and time independence [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2017, 35(1): 52–56. (in Chinese)
- [31] 张金凤,黄茜,袁寿其,等. 基于PIV的低比转数离心泵网格无关性[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(7): 567–572, 583.
- ZHANG Jinfeng, HUANG Xi, YUAN Shouqi, et al. Grid-independence in low specific speed centrifugal pump based on PIV [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(7): 567–572, 583. (in Chinese)
- [32] 刘万江,魏显著,韩秀丽,等. 高水头混流式水轮机导叶位置关系对水力性能的影响[J]. 大电机技术, 2013(6): 46–48, 51.
- LIU Wanjiang, WEI Xianzhu, HAN Xiuli, et al. Influence of the relational position of guide vanes on the hydraulic performance in high-head Francis turbine [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2013(6): 46–48, 51. (in Chinese)

(上接第139页)

- [14] 王学林,肖永飞,毕淑慧,等. 机器人柔性抓取试验平台的设计与抓持力跟踪阻抗控制[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 58–63.
- WANG Xuelin, XIAO Yongfei, BI Shuhui, et al. Design of test platform for robot flexible grasping and grasping force tracking impedance control [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 58–63. (in Chinese)
- [15] 姬长英,张纯,顾宝兴,等. 梳割气吸一体式贡菊采摘机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 137–145.
- JI Changying, ZHANG Chun, GU Baoxing, et al. Design and experiment of shear-sucting mountain chrysanthemum picking machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 137–145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171117&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.017. (in Chinese)
- [16] 傅隆生,张发年,槐岛芳德,等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 1–8.
- FU Longsheng, ZHANG Fanian, GEJIMA Y, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 1–8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150301&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.001. (in Chinese)
- [17] 高自成,李立君,李昕,等. 齿梳式油茶果采摘执行机构的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 19–25.
- GAO Zicheng, LI Lijun, LI Xin, et al. Development and test of picking actor in oil-tea camellia fruit picking machine of tooth comb type [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 19–25. (in Chinese)
- [18] 叶霜,李立君,高自成,等. 基于Pro/E振动油茶果采摘机的运动仿真及分析[J]. 中南林业科技大学报, 2013, 33(11): 166–169.
- YE Shuang, LI Lijun, GAO Zicheng, et al. Movement simulation and analysis of vibratory camellia fruit-harvesting machine based on Pro/E [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(11): 166–169. (in Chinese)
- [19] 饶洪辉,张立勇,黄登昇,等. 电动胶辊旋转式油茶果采摘执行器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 115–121.
- RAO Honghui, ZHANG Liyong, HUANG Dengsheng, et al. Design and test of motor-driven picking actuator of camellia fruit with rotate rubber roller [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 115–121. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180913&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.013. (in Chinese)
- [20] 饶洪辉,罗时挺,余佳佳,等. 基于ANSYS Workbench的齿梳拨刀式油茶果采摘机拨果及花苞损伤仿真研究[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(12): 2134–2141.
- RAO Honghui, LUO Shiting, YU Jiajia, et al. A simulation study on fruit picking and bud damage of toothed comb-and-poke type camellia fruit harvester based on ANSYS Workbench [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(12): 2134–2141. (in Chinese)