

DOI:10. 3969/j. issn. 1674 - 1951. 2019. 01. 004

# 大型轴流转桨式水轮机桨叶操作机构有限元联合分析

Finite element conjoint analysis of the blade operating mechanism for large Kaplan turbine

任尚洁,刘思靓  
REN Shangjie, LIU Siliang

(浙江富春江水电设备有限公司,杭州 311121)  
(Zhejiang Fuchunjiang Hydropower Equipment Company Limited, Hangzhou 311121, China)

**摘要:**桨叶操作机构是轴流转桨式水轮机转轮中的重要构件,用于传递活塞操作力,实现桨叶角度的调整。一般的计算只单独对操作机构中某一部件进行分析,忽略了各部件间的变形协调,应力计算结果与实际值相比偏大。采取联合分析的方法,利用有限元手段,对桨叶操作机构进行整体计算,能准确得到各部件的应力分布,更好地指导结构设计,提高设计方案的经济性。

**关键词:**轴流转桨式水轮机;桨叶操作机构;枢轴;拐臂;应力;联合分析

**中图分类号:**TK 730.2      **文献标志码:**A      **文章编号:**1674 - 1951(2019)01 - 0017 - 04

**Abstract:** The blade operating mechanism is an important assembly of Kaplan turbine, which is used to transfer the force from piston and adjust the angle of blade. In general calculation, a single component of the operating mechanism is analyzed separately, while deformation coordination between the components is ignored, which result in the calculated stress is larger than the fact. By means of conjoint analysis, the finite element method is used to calculate the overall blade operating mechanism, and the stress distribution of each component can be obtained accurately. It can be a better guide for structural design and improve the economy of the design.

**Keywords:** Kaplan turbine; blade operating mechanism; pivot; connecting lever; stress; conjoint analysis

## 0 引言

轴流转桨式水轮机的转轮叶片和导叶能随着工况变化形成最优的协联关系,从而提高水轮机平均效率,扩大运行范围,获得稳定特性<sup>[1]</sup>。

转轮桨叶操作机构连接着水轮机叶片,传递活塞的操作力,是实现桨叶角度变化的重要装置,包含活塞、操作架、耳柄螺栓、连板以及枢轴和拐臂等一系列部件<sup>[2]</sup>。

为保证机组的安全运行,要对操作机构设计方案进行计算分析,通常做法是单独对操作机构的某零件进行计算,但该做法忽略了机构零件间的协调变形,得到的应力会大于实际应力。在该结果的指导下,设计安全裕量会过大,对大型机组而言,会极大提高材料成本。

本文采用通用有限元分析软件 ANSYS 对某轴流转桨式水轮机组的桨叶操作机构进行整体联合计算。该机组装机容量高于 200 MW,转轮直径大于 10 m,是目前国内装机容量最大的轴流转桨式水轮机组。对桨叶操作机构进行整体分析,能更准确地得到各部件的应力分布和位移情况,在确保结构安全的前提下,更好地指导设计,控制成本。

## 1 联合分析的计算原理

使用有限单元法进行结构应力计算的基本思路是:对结构进行单元离散后,选择适当的位移函数来表达各离散单元节点的位移。

$$\{f\} = [N] \{\delta\}^e,$$

式中: $\{f\}$  为单元内任一点的位移列阵; $\{\delta\}^e$  为单元的节点位移列阵; $[N]$  为形函数矩阵,表征位置坐标。

接着利用几何方程得到单元内任一点应变 $\{\varepsilon\}$

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}^e,$$

式中:  $[B]$  为单元应变矩阵。

然后,利用本构方程得到单元内任一点的应力列阵  $\{\sigma\}$

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^e,$$

式中:  $[D]$  为应力 - 应变矩阵。

再利用变分原理建立单元节点力和节点位移的关系式,即可得到每个离散单元的平衡方程

$$\{F\}^e = [k]^e\{\delta\}^e,$$

式中:  $\{F\}^e$  为单元的等效节点力列阵;  $[k]^e$  为单元刚度矩阵。

最后,集合所有离散单元,建立整个结构的平衡方程

$$\{F\} = [k]\{\delta\}。$$

代入结构的刚度、载荷及边界,求解以上方程可得结构的节点位移列阵  $\{\delta\}$ ,再利用本构方程即可求得每个节点应力。

因此,利用有限元法求解应力分布的关键,是准确地得到结构各位置的位移<sup>[3-4]</sup>。

## 2 结构简介

桨叶操作机构靠活塞驱动,活塞杆带动操作架上下移动,操作架上的耳柄螺栓通过连杆带动拐臂转动,进而通过与拐臂把合的枢轴实现叶片角度的调节。转轮轮毂及其中的桨叶操作机构基本结构如图 1 所示。

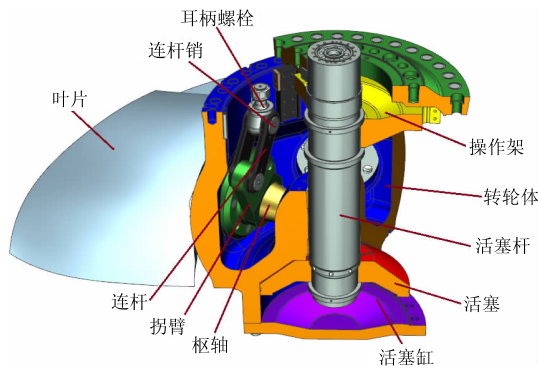


图 1 桨叶操作机构基本结构

Fig.1 Basic structure of the blade operating mechanism

## 3 整体联合分析

### 3.1 有限元模型

建立操作机构联合模型,并对其进行合理简化,忽略小销孔等细节。选用带中节点的实体单元建立操作机构的整体三维有限元网格模型<sup>[5]</sup>。根据结构的对称性,建立 1/5 模型,共计 2 553 080 个单元,5 143 366 个节点。模型包含操作架、耳柄螺栓、连杆、连杆销、拐臂和枢轴,转轮轮毂作为边界条件的一部

分也包含在内。操作机构计算模型如图 2 所示。

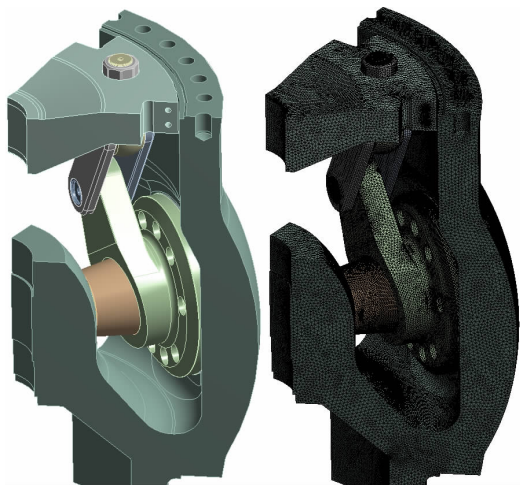


图 2 桨叶操作机构计算模型

Fig.2 Calculation model of blade operating mechanism

计算桨叶全关且还具有关闭趋势时,即活塞杆运动趋势向上时各部件的刚强度。

各部件之间设置摩擦接触,剖切面设置循环对称。约束相应位置的平动或转动,施加叶片离心力和活塞杆传递操作力。耳柄螺栓预紧应力为 250 MPa,操作机构加载如图 3 所示。

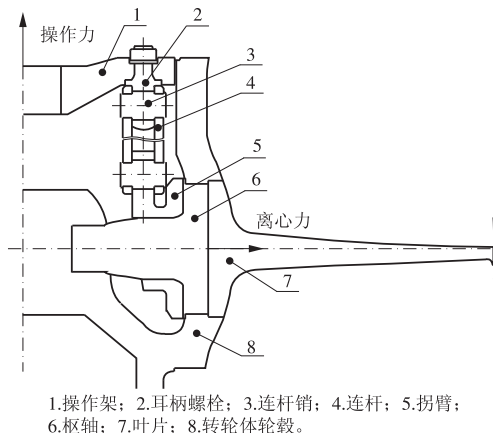


图 3 桨叶操作机构加载示意

Fig.3 Loading schematic of blade operating mechanism

### 3.2 联合计算结果

对该大型轴流转桨式水轮机组的桨叶操作机构进行联合分析,其整体应力分布如图 4 所示。

特别关注连杆和拐臂,其计算结果如图 5 ~ 图 8 所示:连杆最大位移在耳柄端,为 3.94 mm,最大拉伸变形为 2.82 mm;连杆销孔内应力集中处的最大应力为 526.0 MPa,连杆中间应力为 45.7 MPa;拐臂最大位移在拐臂端部,为 1.60 mm,不仅有转动位移约 1.29 mm,还有转轮径向方向的位移;除叶片把合销孔内的应力奇异外,拐臂过渡倒圆应力集中处的最大应力为 165.0 MPa,拐臂的连杆销孔应力集中

处的最大应力为 191.3 MPa。

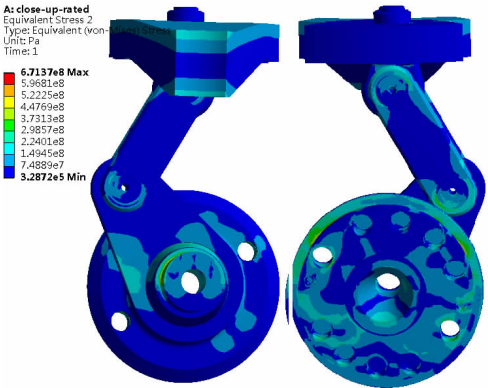


图 4 桨叶操作机构联合计算应力结果  
Fig.4 Conjoint analysis results of blade operating mechanism

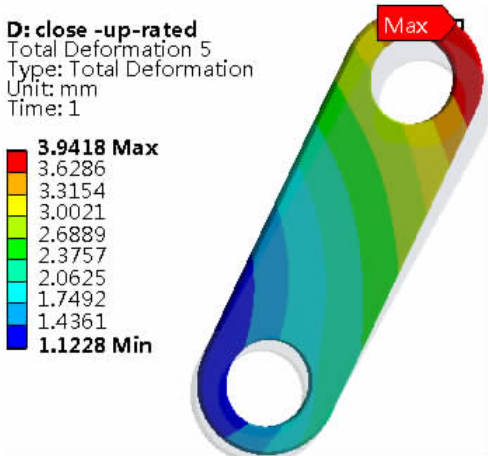


图 5 联合分析时连杆合位移  
Fig.5 Connecting rod resultant displacement in conjoint analysis

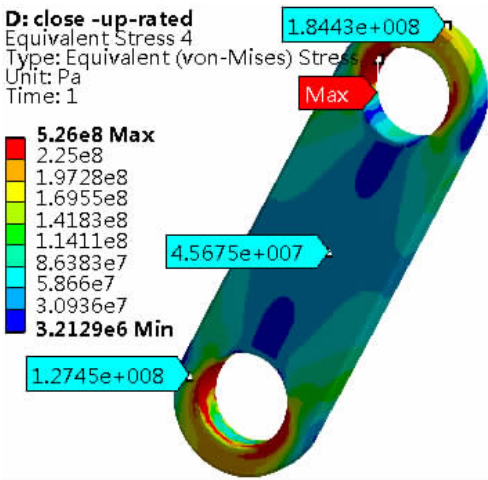


图 6 联合分析时连杆等效应力  
Fig.6 Equivalent stress of connecting rod in conjoint analysis

4 部件单独分析

4.1 有限元模型

以连杆和拐臂为例,单独提取部件有限元模型,

如图 9、图 10 所示。

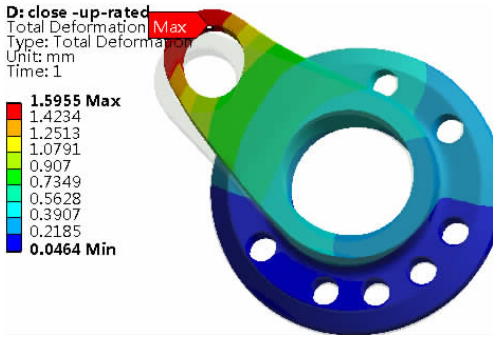


图 7 联合分析时拐臂合位移  
Fig.7 Connecting lever resultant displacement in conjoint analysis

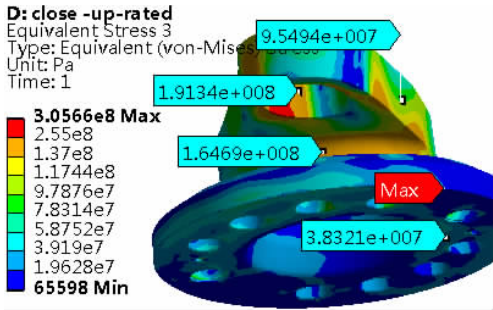


图 8 联合分析时拐臂等效应力  
Fig.8 Equivalent stress of the connecting lever in conjoint analysis



图 9 连杆有限元网格  
Fig.9 Finite element grid of connecting rod



图 10 拐臂有限元网格  
Fig.10 Finite element grid of connecting lever

根据连杆的二力杆受力特征,约束连杆的一端销孔,另一端销孔施加拉力;拐臂与枢轴把合处约束转动位移,限制拐臂与轮毂贴合面的径向位移,限制枢轴孔的变形,在拐臂销孔处施加连杆传递的力。根据角度换算连杆和拐臂上的力,保证与联合计算时受力大小一致。

4.2 部件单独计算结果

部件单独计算时:连杆耳柄端最大位移为 2.95 mm,为拉伸变形;连杆销孔内应力集中处的最大应力为 555.0 MPa,连杆中间应力为 47.4 MPa;拐臂最大位移在拐臂端部,为 1.38 mm,仅为转动位移;除应力奇异外,拐臂过渡倒圆应力集中处的最大应力为 180.0 MPa,拐臂的销孔应力集中处的最大应力



为 263.0 MPa。计算结果如图 11 ~ 图 14 所示。



图 11 单独分析时连杆合位移

Fig. 11 Connecting rod resultant displacement during independent analysis

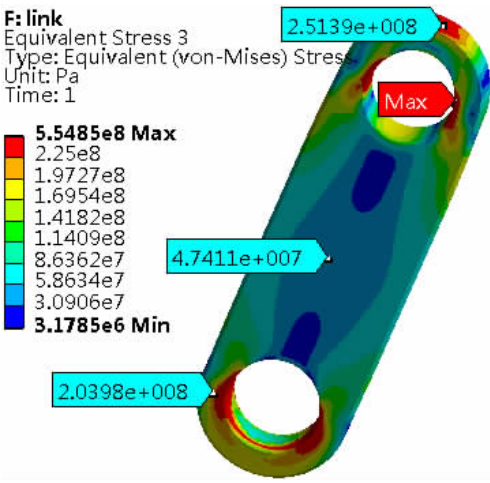


图 12 单独分析时连杆等效应力

Fig. 12 Equivalent stress of connecting rod during independent analysis

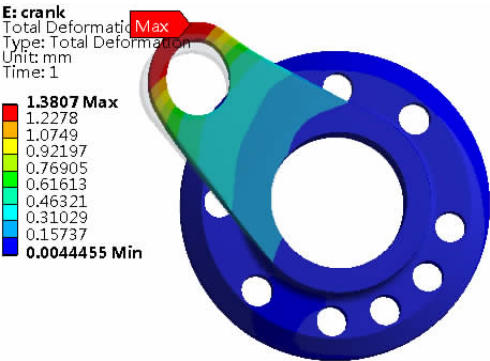


图 13 单独分析时拐臂合位移

Fig. 13 Connecting lever resultant displacement during independent analysis

5 两种分析方法对比

对桨叶操作机构进行联合分析和对部件进行单独分析,得到的各部件具体刚强度计算结果见表 1。

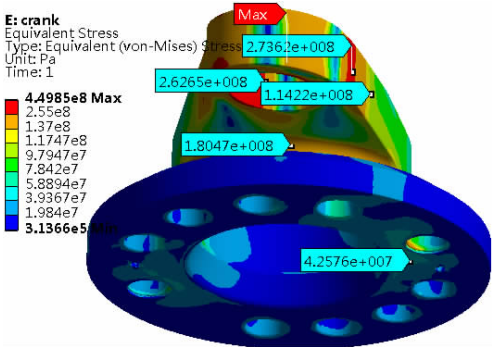


图 14 单独分析时拐臂等效应力

Fig. 14 Equivalent stress of the connecting lever during independent analysis

通过对比可知,较部件单独分析而言,联合分析充分考虑了刚性位移的影响,其位移虽然更大,但变形和应力更小,更符合实际情况。如连杆计算,联合分析能准确捕捉操作机构各部件间的联动,同时体现耳柄螺栓和拐臂的变形,计算结果更接近真实情况的拉伸变形,从而得到更为准确的应力结果。

表 1 某大型轴流转机桨叶操作机构各部件刚强度计算结果

刚强度		分析方式	
		联合分析	单独分析
连杆	最大合位移/mm	3.94	2.95
	最大变形/mm	2.82	2.95
	销孔最大应力/MPa	526.0	555.0
	连杆中间应力/MPa	45.7	47.4
拐臂	最大合位移/mm	1.60	1.38
	最大转动位移/mm	1.29	1.38
	拐臂根部最大应力/MPa	165.0	180.0
	销孔内最大应力/MPa	191.0	262.0

6 结束语

对某大型轴流转机组的桨叶操作结构进行有限元联合分析,能充分考虑各部件间的协调变形,真实地体现刚性位移边界,符合实际情况,从而得到准确的应力计算结果。而精确的应力结果是确保设计方案安全经济的前提,是产品具备更高市场竞争力的有力保证。对操作结构各部件进行单独分析,虽然简单快速,但因边界限制,使应力值趋于保守,容易导致结构设计安全裕量过大,造成不必要的成本上升,特别是对容量较大的大型机组,会造成材料的极大浪费。

本文的研究,可为多零件构造的组件有限元分析提供参考,对分析工作精度的提高和设计方案的经济性具有积极意义。(下转第 26 页)

表 8 投资收益率测算结果  
Tab. 8 Investment income calculation result

项目	单位	数值	项目	单位	数值
建设规模(峰值功率)	kW	34. 29	建设投资	元	182 304
峰值日照小时数		1 412. 5	固定资产形成率	%	60
系统发电效率	%	80	形成固定资产	元	109 382. 4
首年衰减比例	%	2. 50	可抵扣固定资产进项税	元	14 310. 6
逐年衰减率	%	0. 70	折旧年限	年	20
上网电价(含税)	元/(kW·h)	1	固定资产残值率	%	5
售电增值税	%	17	运维成本	元/W	0. 01
城建和教育附加税	%	7	投资内部收益率(税后)	%	17
所得税	%	25	投资回收期(税后)	a	6

益率(IRR)为 17.0%,大大超过了预期的基准收益率 8.5%,因此总体上收益率是非常高的。

4 结论

箱变是大型光伏电站重要的高压设备,在运维层面,保障设备稳定安全运行,提升发电量是重中之重,针对大型地面光伏电站传统箱变在运行中遇到的发热问题,结合设备的运行特点及现有光伏容量不足的现状,在不超过备案装机容量的前提下,提出了将光伏电池组件布置在箱变顶上进行集成发电的方案,在满足遮阳降温需求的同时,利用光伏组件实现发电增收。

以某 20 MW 山地电站为例,在箱变顶安装光伏电池板后,低压侧绕组温度可降低 20℃左右,平均系统效率为 82.3%,达到了较高的发电水平。

文中选择了晴天、多云和雨天等比较典型的天气,对出力进行了分析,结果表明光伏出力具有间歇性、波动性等特征,晴天出力可达到额定功率的 84%,雨天仅达到额定功率的 8%。基于实际运行数据,对箱变顶增加光伏板项目的投资收益进行了保守测算,预计 6 a 左右就可收回成本。

综上所述,该方案可降低箱变温度,保障箱变的稳定运行,在一定程度上提高了电站的发电量,可为光伏电站的生产管理提供参考。

参考文献:

[1]吕贝,邱河梅,张宇. 太阳能光伏发电产业现状及发展

(上接第 20 页)

参考文献:

[1]曹鹏,姚志民. 水轮机原理及水力设计[M]. 北京:清华大学出版社,1991.  
[2]李中杰,郑源,易伟. 巨型轴流转桨式水轮机转轮组装工艺研究[J]. 中国农村水利水电,2016(1):145-148.  
[3]丁皓江,何福保,谢贻权,等. 弹性和塑性力学中的有限单元法[M]. 北京:机械工业出版社,1992.

[J]. 华电技术,2010,32(1):73-76.  
[2]马宏忠,李峥. 电力变压器过热故障及其综合诊断[J]. 高电压技术,2005,31(4):9-11.  
[3]徐康健. 一台 110 kV 变压器内部过热性故障的分析与判断[J]. 变压器,2007,44(12):48-49.  
[4]王淑娟,薛满宇,刘松民. 光伏组件超配的经济性分析[J]. 中国电力,2016,49(6):181-184.  
[5]牟娟,范忠瑶,易金印. 基于辐射条件的光伏系统容配比优化设计方法研究[J]. 太阳能,2018(5):19-24.  
[6]陈建国,张金剑,虞立涛. 基于温度修正的光伏电站发电性能评价指标对比分析[J]. 华电技术,2016,38(5):73-76.  
[7]黄湘,葛文刚,禹超. 太阳能光伏电站设计影响因素分析[J]. 华电技术,2013,35(2):79-82.  
[8]党锁刚,高富春,汉鹏武,等. 太阳能发电技术特性研究[J]. 华电技术,2010,32(6):76-80.  
[9]国家计划委员会. 建设项目经济评价方法与参数[M]. 3 版. 北京:中国计划出版社,1987.  
[10]肖黎明. 设备衰减率对太阳能光伏发电利用小时数的影响分析[J]. 华电技术,2017,39(12):67-69.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

陈建国(1983—),男,浙江台州人,工程师,工学硕士,从事光伏电站设计、施工及电站运维等工作(E-mail: jian-guo1217@ 163. com)。

[4]王勛成,邵敏. 有限元单元基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社,1997.  
[5]陈洪军,吴志俊,余伟炜,等. ANSYS 工程分析进阶实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

任尚洁(1985—),女,四川泸州人,工程师,从事水轮发电机设计和研究工作(E-mail: ren\_shangjie@ zhefu. com)。