

基于数值模拟核主泵水力优化设计平台开发

王鹏飞, 阮晓东, 邹俊, 傅新

Development of hydraulic optimal design platform for reactor coolant pump based on numerical simulation

WANG Peng-fei, RUAN Xiao-dong, ZOU Jun, FU Xin

(浙江大学, 浙江 杭州 310027)

摘要:核主泵是压水堆核电站核岛内唯一长期高速旋转的装备,是核电站的“心脏”。该文针对第三代核主泵 AP1000 的水力要求,开发基于数值模拟的混流式核主泵优化设计平台。利用该平台开展了球形压水室直径及导叶包角和导叶数对球形压水室内水力损失影响的研究。研究表明这三者对球形压水室的水力损失有着较明显的影响。实践表明该平台可用性好,效率高。

关键词:核主泵;水力优化设计平台;球形压水室

中图分类号:TH313 文献标识码:B 文章编号:1000-4858(2010)12-0075-04

前言

随着中国经济的高速发展,资源的过度消耗,能源问题越来越突出^[1-2]。为保障国家能源安全,改善大气环境,提高重大装备制造业水平,国家制订了《核电中长期发展规划(2005~2020年)》,实现核电发展战略由“适当发展”向“积极发展”的转变。

我国已部分掌握百万千瓦级压水堆核电站的设计,基本具备加工、制造百万千瓦级压水堆核电机组的大部分核岛设备和常规岛主设备的条件。但仍不能自主制造大型核电站的关键装备,特别是反应堆冷却剂泵(Reactor coolant pump,简称核主泵)。这方面的技术被国外垄断,国内现役核主泵都依赖进口,核主泵是核电装备国产化必须解决的技术瓶颈。

核主泵是核岛内唯一长期高速旋转的装备,是核电站的“心脏”,推动裂变能的载体——冷却剂在核岛内循环。核主泵工作在高温高压强辐射下,为核一级安全部件;第三代核主泵的设计寿命为60年,需要在较宽的工况范围内安全、高效、稳定地运行。核主泵设计制造的难度极大。

核主泵流量大、扬程高、高效范围广,国外已掌握其过流部件高效水力模型设计方法,国内还在这方面努力。

目前国内针对第三代核主泵 AP1000 的介绍较

多。文献[3]对 AP1000 的结构、运行等方面进行了介绍;文献[4]对 AP1000 屏蔽套的制造工艺进行了简要分析;文献[5-7]对 AP1000 进行了事故及安全分析。

在其它类型核主泵的研究上,文献[8-9]对某主泵进行了相关的地震及模态分析;文献[10]研究了某主泵的流固耦合传热。

在核主泵内部流场研究上,文献[11]通过数值模拟研究了某主泵的内部流场;文献[12]分析了混流式主泵非定常流动的压力脉动特性。

在核主泵的水力特性上,文献[13]研究了模型泵导叶进口边相对位置对泵性能的影响。

在核主泵水力模型的研究上,国外可公开的文献很少,国内在这方面的研究也很有限,而这方面的研究对全面掌握新一代核主泵的设计必不可少。

本文针对第三代核主泵 AP1000 的水力要求(设计流量为 17700 m³/h,扬程 111 m,转速 1800 rpm。其比转速为 426,属混流泵),尝试建立混流式核主泵水

收稿日期:2010-05-27

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009QN4001);国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724300)

作者简介:王鹏飞(1985—),男,河南省正阳县人,硕士研究生,主要从事水力机械方面的研究工作。

力优化设计平台,期望在该平台上对混流式核主泵的水力模型进行更深入的研究。

1 混流式核主泵水力优化设计平台

泵水力模型的开发周期一般较长,为能够高效地寻找混流式核主泵优异的水力模型,我们开发了相应的水力优化设计平台。该平台的设计目标是能够高效且有针对性地自动完成核主泵过流部件水力设计、造型、建模和数值模拟、优化等任务,最终获得核主泵水力模型方案并预测其性能,各部分关系如图1所示。

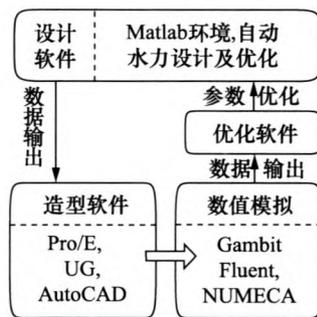


图1 核主泵水力优化设计平台

该平台集水力设计、全流场的数值模拟、优化于一身,能自动实现三者之间的衔接,因而设计效率较高,且能够自动寻找约束条件下最优的水力模型。传统的设计通常将三者割裂开来,周期长;不能实现泵的参数化设计及建模,模型修改的工作量大;很难实现泵设计的最优化。所以泵水力优化设计平台的开发是很有必要的。

设计平台的核心是开发参数化水力设计软件,并能够将设计数据通过多种接口输出到其他软件,以完成全流道的自动建模和网格划分。图2显示的是全流道造型,图3显示的是 Gambit 中全流道网格的自动划分。网格划分好后需在 CFD 软件中进行主泵全流场的数值模拟,如图4所示。数值模拟结束后,流场数据将在优化软件中得以分析,以确定新的水力设计参数,再根据新的设计参数重新进行泵的设计,从而优化主泵的水力设计。目前,平台的优化功能正在开发。

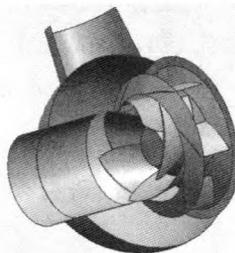


图2 全流道造型

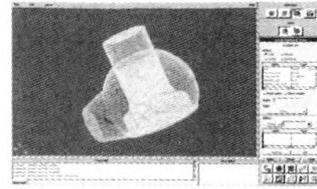


图3 Gambit 中网格自动划分

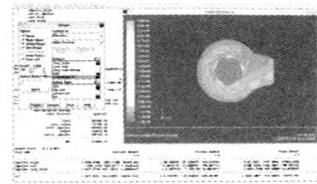


图4 Fluent 中数值模拟及结果显示

2 在平台上开展的一些工作

虽然平台的优化功能还在开发,但平台的水力参数化设计,流场的自动建模、数值模拟,以及数据的自动传递,这些功能已基本实现,可用来开展核主泵水力模型的一些研究。通过对主泵全流场的数值模拟,发现球形压水室内的水力损失通常占总损失的一半以上,因此我们开展了球壳直径、导叶数、导叶包角对球形压水室内水力损失影响的研究。

2.1 球形压水室直径对球形压水室水力损失的影响

一般泵的压水室均为螺旋形,而核主泵的压水室却为准球形,这是因为核主泵的泵壳是主系统承压边界的一部分,不仅要承受设计点处极高的工作压力,还要承受事故工况下由接管传递的各种载荷,为核一级安全部件;其力学、加工和检测特性是设计时优先考虑的因素;准球形的泵壳强度高、加工工艺简单、易于探伤和质量检查^[14]。

球形泵壳使压水室不再是有利于水力特性的螺旋形,因而带来的问题是水力效率较低。螺旋形压水室各断面面积与流量成正比,各断面流速均相等,且在设计工况下等于流入压水室的速度,因而无撞击损失。而球形压水室各断面面积相等但流量不等,因而各断面的流速不等,在任何工况下都有较明显的撞击损失。

如何在球形泵壳的限制下对压水室进行设计,使其具有较优良的水力特性,是核主泵水力设计的一大问题。而这方面的经验还十分有限,尤其在國內。这方面的设计可参照传统的环形压水室设计,而环形压水室的设计理论目前尚不完备^[15]。所以需深入开展等截面压水室的设计研究。

利用所开发的设计平台,我们首先基于一种特定的设计模型,在设计流量下,考查球壳直径对球壳内水

力损失的影响。数值模拟结果如图5所示。从中可看出:

- (1) 球壳直径小于一定值时,球形压水室内的水力损失会急剧增加;
- (2) 球壳直径大到一定程度时,球形压水室内水力损失将随着球壳直径的增大而增大;
- (3) 球壳直径存在一最优值,在该值上球形压水室内水力损失将最小。

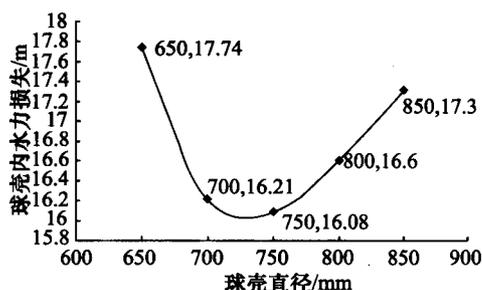


图5 球形压水室内水力损失随球壳直径的变化曲线

2.2 导叶包角对球形压水室水力损失的影响

为减小直接从叶轮流入到球形压水室的流动损失,需在两者之间增加导叶。混流泵的导叶通常采用空间导叶^[16],空间导叶轴向尺寸大,径向尺寸小,能实现降速增压和消除旋转分量的效果,但其最终流动方向为轴向,不符合球形压水室切向旋转的方向性要求,故在核主泵中不适合采用空间导叶。

一般泵内导叶通常采用径向导叶或流道式导叶^[17],两者都有类似的正导叶和反导叶部分,也能实现降速增压和消除环量的效果。但核主泵采用的是球形压水室,压水室内的流体应保持旋转,即有一定的旋转分量,所以若采用类似正-反导叶的设计,则反导叶部分不应把旋转分量完全消除。旋转分量消除到多少是合理的,值得深入研究。

在前期的设计中,我们仅采用正导叶,且按传统正导叶的设计进行设计。在设计平台上,我们研究了导叶包角对球形压水室水力损失的影响。

研究中,我们选取了一种设计模型,其中导叶数定为18,然后改变导叶包角,以考查导叶包角的改变对球壳内水力损失的影响。数值模拟结果如表1所示。可见:导叶包角小时球壳内水力损失较大,随着导叶包角的增大,球壳水力损失迅速减小。

2.3 导叶数对球形压水室内水力损失的影响

在设计平台上,我们选取一种设计模型,设定导叶的包角为20度,然后改变导叶数,以考查导叶数对球

表1 球壳内水力损失随导叶包角的变化

导叶包角:度	球壳内水力损失:m
8	17.48
14	17.34
20	16.60

壳内水力损失的影响。数值模拟结果如表2所示,从中可见:随着导叶数的增大,球壳内水力呈递减趋势,这是因为导叶数越多,从导叶流入到球壳内的流体速度越均匀,球壳内水力损失便越小。

表2 球壳内水力损失随导叶数的变化

导叶数	球壳内水力损失:m
6	17.41
11	17.03
20	16.60

3 总结和展望

我们针对第三代核主泵 AP1000 的水力要求,开发混流式核主泵水力优化设计平台,该平台预期目标是将水力设计、全流场的数值模拟、优化集成起来,最终实现混流式核主泵水力模型的高效和优化设计。

该平台的优化功能目前正在开发,利用该平台现有功能开展的一些研究表明该平台具有良好的可用性。

我们针对核主泵水力模型的特殊性,对球形压水室直径及导叶数和导叶包角开展了一些研究。初步研究表明:

- (1) 球形压水室直径存在一最优值;
- (2) 在考查的范围内,随着导叶包角的增大,球形压水室内的水力损失逐渐减小;
- (3) 随着导叶数的增多,球形压水室内水力损失逐渐减小。

因缺少球形压水室的设计理论及经验,初步建立的核主泵全流道水力模型一般会很理想,需经过“参数化水力设计——数值模拟——优化参数——参数化水力设计”的多次循环才能得到优良的核主泵水力模型。

在后续的研究中一方面要建立恰当描述球形压水室内流动和损失的理论模型,建立其设计理论;另一方面继续完善混流式核主泵水力优化设计平台,实现设计的自动优化。

65 t 水平定向钻液压系统设计

郁林聪¹, 宋建安², 魏立基²

Design of hydraulic system for 65 t horizontally directional drilling machine

YU Lin-cong¹, SONG Jian-an², WEI Li-ji²

(1. 国营山西柴油机厂, 山西 大同 037004;

2. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:该文设计非开挖钻机的液压系统, 主要针对水平定向钻动力头旋转、动力头进给/回拖和履带行走等三大主要部件工作原理、要点做了详尽分析。动力头旋转、动力头进给/回拖采用闭式系统, 提高系统效率。而对于较少使用的履带行走应用开式系统, 负载敏感泵和负载敏感阀系统, 注重节能技术。并解决液压系统冷却问题。该文为工程技术人员提供一种大型水平定向设备液压系统设计思路。

关键词:非开挖技术; 水平定向钻; 负载敏感; 液压系统; 冷却

中图分类号: TH137 文献标识码: B 文章编号: 1000-4858(2010)12-0078-03

近年来, 随着城市现代化的发展和工程技术上需求, 非开挖产品水平定向钻的国产自行设计显得尤为重要。水平定向钻机是在不开挖地表面的条件下, 铺设多种地下公用设施(管道、电缆等)的一种施工机械, 它广泛应用于供水、电力、电讯、天然气、煤气、石油

等管线铺设施工中, 多应用于闹市区、古迹保护区、农

收稿日期: 2010-11-01

作者简介: 郁林聪(1962-), 男, 江苏启东人, 工程师, 大专, 主要从事液压技术方面科研工作。

参考文献:

- [1] 俞军. 提高核能战略地位 确保能源安全和可持续发展[J]. 全球科技经济瞭望, 2008, (1): 5-8.
- [2] 顾忠茂, 刘长欣, 傅满昌. 加快开发我国核能产业实现能源结构多样化[J]. 中国能源, 2003, (12): 7-12.
- [3] 张明乾, 刘昱, 李承亮. 浅谈压水堆核电站 AP1000 屏蔽式电动主泵[J]. 水泵技术, 2008, (4): 1-5.
- [4] 关锐, 高永军. AP1000 反应堆主泵屏蔽套制造工艺浅析[J]. 中国核电, 2008, (1): 49-53.
- [5] 郭春秋. AP1000 严重事故分析[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2009, (1): 217-218.
- [6] 郭春秋, 刘兴民. AP1000 典型事故简要分析[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2009, (1): 218-219.
- [7] 郭春秋, 刘兴民. AP1000 热工安全程序分析报告[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2009, (1): 219-220.
- [8] 周文建, 陈宏, 闻邦椿. 核电站反应堆冷却剂泵的地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2006, (1): 32-35.
- [9] 马辉, 周文建, 闻邦椿. 核电站反应堆冷却剂泵的模式分析[J]. 机械制造, 2006, (10): 14-17.
- [10] 陈向阳, 袁丹青, 杨敏官, 袁寿其. 300MWe 级核电站主泵流固耦合传热研究[J]. 流体机械, 2010, (1): 19-22.
- [11] 袁丹青, 陈向阳, 杨敏官, 袁寿其. 基于 CFX 的国内某 300MWe 级核电站主泵内部流场数值研究[J]. 流体机械, 2009, (8): 17-20.
- [12] 王春林, 易同祥, 吴志旺, 刘红光, 梁俊. 混流式核主泵非定常流场的压力脉动特性分析[J]. 动力工程, 2009, (11): 1036-1040.
- [13] 王春林, 彭娜, 赵佰通, 司艳雷. 核主泵模型泵导叶进口边相对位置对泵性能的影响[J]. 排灌机械, 2008, (5): 38-41.
- [14] 薛汉俊, 杜圣华. 核能动力装置[M]. 北京: 原子能出版社, 1990. 12.
- [15] 查森. 叶片泵原理及水力设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 6.
- [16] 关醒凡. 轴流泵和斜流泵[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009. 1.
- [17] 关醒凡. 泵的理论设计与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 2.