

大型核电汽轮机末级长叶片开发中若干问题讨论

刘云锋¹, 杨晓辉², 李宇峰², 王洪鹏²

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨汽轮机厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150046)

摘要: 结合大功率核电汽轮机末级叶片的开发经验, 介绍了核电汽轮机长叶片开发的一般流程, 包括转速、根径、叶高等关键参数确定的基本原则和需要考虑的因素。结合核电机组排汽湿度大、末级叶片高度长的特点, 从工程设计角度对结构、叶型、防水蚀、转子叶片耦合振动等一些关键问题进行了探讨分析。

关键词: 核电汽轮机; 末级长叶片; 工程问题研究

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.03.012

[引用本文格式] 刘云锋, 杨晓辉, 李宇峰, 等. 大型核电汽轮机末级长叶片开发中若干问题讨论[J]. 热能动力工程, 2022, 37(3): 81-85. LIU Yun-feng, YANG Xiao-hui, LI Yu-feng, et al. Discussion on several issues in the development of last stage long blades of large-scale nuclear power turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 81-85.

Discussion on Several Issues in the Development of Last Stage Long Blades of Large-scale Nuclear Power Turbines

LIU Yun-feng¹, YANG Xiao-hui², LI Yu-feng², WANG Hong-peng²

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001;

2. Harbin Turbine Company Limited, Harbin, China, Post Code: 150046)

Abstract: In combination with the development experience of low pressure last stage blades of high-power nuclear power turbine, the general process of development of last stage long blades of nuclear power turbine is introduced, including the fundamental principle and considered factors determined by rotation speed, root diameter, blade height and other key parameters. Combined with the characteristics of high exhaust humidity and long height of last stage blades of nuclear power unit, some key issues such as structure, blade profile, water erosion resistance and coupled vibration of rotor blades, etc. are discussed and analyzed.

Key words: nuclear power turbine, last stage long blade, engineering problem research

引言

《中国核能发展报告(2019)》指出, 到2030年我国核电发电量有望超过美国和其他国家, 到2035年发电量占比将从目前的4.22%上升到10%。核电的发展无法避开末级长叶片开发。末级长叶片对

大容量机组至关重要, 较长的叶片可以增加机组容量、提高效率、缩短机组长度^[1], 因此是制约核电机组单机功率、安全性和经济性的关键因素之一。

开发长叶片是核电机组的核心技术之一, 国内从引进西屋公司高度为977 mm叶片发展到自主开发高度为1 800 mm^[2-3]及1 900 mm等级叶片^[4]。目前, 依托CAP1700项目, 正在开发2 000 mm核电

收稿日期: 2021-03-19; 修订日期: 2021-05-15

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项之“华龙一号核电汽轮机关键设备研制”(2020ZX01A01)

Fund-supported Project: Development of Key Equipment of Hualong No. 1 Nuclear Power Turbine Unit for Science and Technology Major Project of “Hundred-Thousand-Ten Thousand” Project of Heilongjiang Province(2020ZX01A01)

作者简介: 刘云锋(1981-), 男, 河北威县人, 哈尔滨工业大学博士研究生。

叶片。核电机组末级叶片的开发思路与传统火电机组末级叶片基本相同。不过核电机组大都采用半转速,尤其大功率核电机组,相较于常规火电机组核电机组的末级长叶片长得多。比如,目前常规全转速火电机组末级长叶片长度可达1 500 mm等级,而核电末级叶片的长度可达2 000 mm等级。随着叶片长度的增加,一些常规火电机组末级长叶片开发中不曾出现的问题逐渐变得突出。本文结合核电长叶片设计的经验,针对核电机组长叶片的特点,对一些典型问题进行探讨,以为核电机组长叶片的开发提供参考。

1 核电汽轮机末级长叶片开发流程

核电汽轮机末级长叶片的开发与其他长叶片类似,只是由于核电汽轮机安全性要求更高,需要大量实验验证。所以从安全性和成本方面考虑,一般在有大量安全运行业绩的火电机组长叶片的基础上进行有针对性的改进。末级长叶片开发的基本步骤为:

(1) 机组选型。根据机组的堆型、容量、背压等边界参数,以及设备供应商的现有技术确定机组的转速、汽缸数量等关键参数。文献[5]对于全转速和半转速核电汽轮机的优缺点进行了详细论述。结合公开发表的文献,学界普遍认为大功率、低背压机组应该采用半转速设计,这样可以采用更长的末级叶片、减少低压缸数量。图1是典型的转速选择图,在混合区要详细分析成本、技术等因素综合考虑确定。

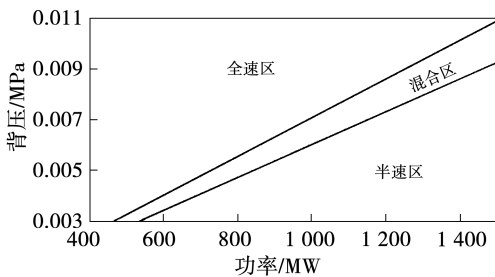


图1 全速机与半速机的应用范围^[6]

Fig.1 Application range of full speed and half speed turbines^[6]

图2是典型的背压、功率与转速关系图。整体看,单机功率大则采用半转速。但空冷机组背压较高,低压缸容积流量较小,在更大的功率下采用半转

速。而海水直冷背压较低,在较小的功率下就应该采用半转速。此外,不同设备供应商还要考虑本身的技术和加工设备,例如阿尔斯通的核电既有全转速又有半转速,而俄罗斯的核电全部为全转速。

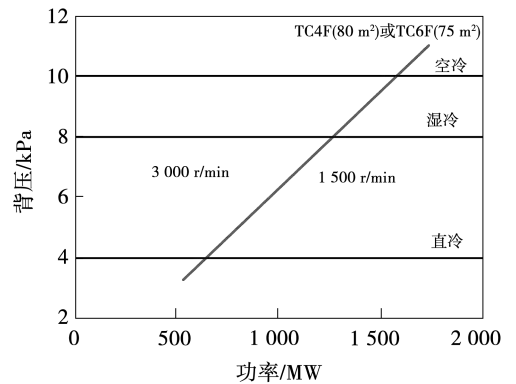


图2 转速与功率、背压的关系^[6]

Fig.2 Relationship of speed,power and back pressure^[6]

(2) 末级叶片根径、叶高确定。核电末级叶片安全性要求较高,一般选择成熟的全转速叶片,按相似理论模化为半转速叶片,适当调整根径^[2-3,7]。若采用整段转子,需要考虑转子毛坯制造问题,而焊接转子需要考虑设备的最大外径。综合这两个关键因素后,确定最终结果。

(3) 叶片开发设计。在上述参数确定后,才真正进入叶片设计。叶片设计需要考虑气动、结构和防水蚀3个互相制约的方面。其中,结构是核心,关乎叶片安全。可以根据母型具体情况,有选择地进行试验验证。比如运行业绩良好的叶片可以只优化静叶^[7],在保证安全的前提下提升效率。而运行业绩较少或改动较大的叶片,则需要进行较多的试验^[3]。

图3是核电长叶片开发的一般流程。

2 核电末级长叶片开发中的几个关键问题

2.1 叶片结构选择

大型核电机组采用半转速末级叶片,不仅长而且重,如1 800 mm等级叶片的重量超过了100 kg,这种大型叶片的装配需要专门的设备,因此叶根和转子的连接多采用有间隙的松装配结构。从振动角度考虑,长叶片需要调整2阶甚至3阶频率,所以多采用围带加拉筋的结构,通过围带调整一阶频率,通过拉筋调整2阶频率。

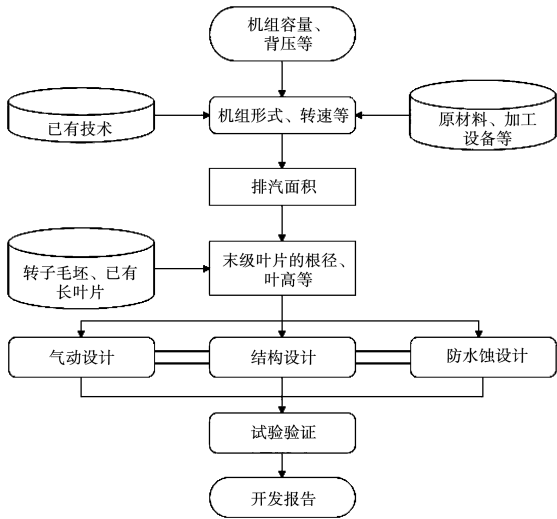


图3 核电末级长叶片开发流程

Fig. 3 Development process of last stage long blades of nuclear power turbine

对于围带结构需要特别注意,由于核电叶片水蚀较重,围带结构要使顶部叶型外露,如图4所示。动水水蚀最严重的部位就是叶片顶部进汽边背弧位置,如果围带包围叶型,撞击在该位置的水滴在离心力作用下甩出时会对围带根部造成冲蚀,严重时引起围带脱落。采用叶型外露的结构,可以将司太立合金片直接镶嵌到围带外缘,增加抗水蚀能力。也可以采用不带冠结构彻底消除水蚀带来的围带脱落风险,如阿尔斯通的LP75型核电末级叶片采用的就是只有拉筋、无围带的结构。

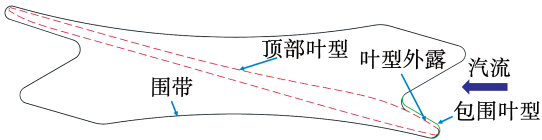


图4 叶片顶部围带结构图对比

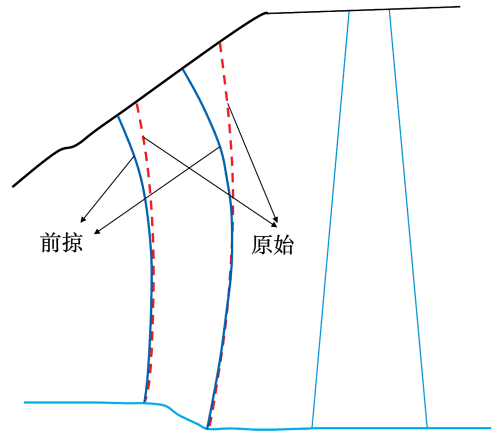
Fig. 4 Structural diagram comparison of shroud at the top of blade

半转速核电末级叶片大部分采用全转速叶片模化而来,但是对于叶根一般不模化,而是选择成熟叶根。对于静应力,目前的分析手段完全可以保证选择的叶根不存在安全问题;而对于无法精确分析的振动问题,大量计算和实验表明,叶根更换不会对原有叶片的振动产生大的影响,如枫树型叶根长叶片的振动发生在第1齿以上。而末级叶片的叶根比较复杂,且精度要求较高,需要专门刀具和工装加工,选择成熟的叶根可以保证加工精度、降低成本,而又

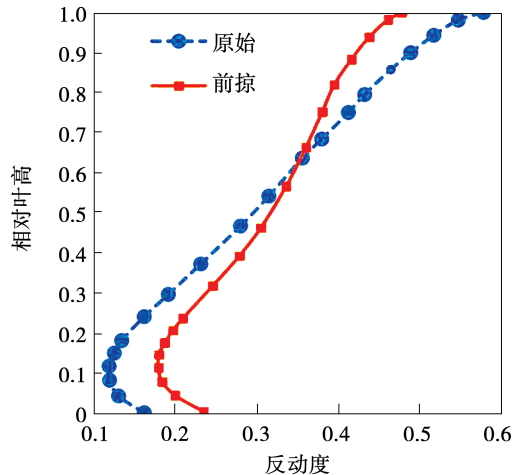
不会影响叶片的安全性。此外,对于常用的枫树型叶根,优先选择三齿,其次选择四齿,这是由于枫树叶根为松装配,叶根和轮槽之间的间隙要求较严格,四齿加工成本高、不易保证精度。

2.2 叶型设计

随着单机容量的增大,核电机组末级叶片长度越来越大,而根径受加工工艺和设备的影响,无法相应增大。如整锻转子受毛坯重量和尺寸限制不能过大,焊接转子受设备影响外径也不能过大,这就导致末级叶片的径高比较小,末级气动参数沿径向变化剧烈,需要进行详细的三维优化。对此,除了采用传统的全三维弯扭叶片外,还需要静叶顶部前掠。静叶顶部前掠不仅可以降低参数沿径向的变化(如图5所示,根部反动度提高,顶部反动度降低),且由于前掠,顶部动静间隙变大,可以减轻末级动叶片顶部水蚀^[7]。



(a) 外形配置对比



(b) 反动度对比

图5 典型末级静叶前掠外形与反动度对比
Fig. 5 Comparison of sweepforward profile and reaction degree of typical last stage stationary blade

对于采用全转速叶片模化而来的半转速核电叶片,要注意以下几点:

(1) 有些参数可以直接放大两倍,而有些参数需要仔细斟酌,相应调整。例如,出汽边厚度,直接放大后,可能略显偏厚。出汽边偏厚,一方面会引起尾迹损失增大,尤其对于静叶根部和动叶顶部超音速区,尾缘激波损失会急剧增大;另一方面,静叶出汽边偏厚,水膜被撕裂后形成的二次水滴尺寸较大,会引起动叶水蚀加剧。而出汽边太薄,又无法满足加工和强度要求。

(2) 核电机组末级静叶一般采用空心导叶结构来降低动叶水蚀,而全转速火电机组一般无需采用该措施。图6是典型的空心导叶结构,该结构在叶片内背弧设有抽吸槽,壁厚一般在4~8 mm,内部设有肋板,用来提高静叶片抗弯曲强度和分割内背弧的抽吸槽,防止串腔,提高除湿效果。从结构角度考虑,希望叶型的最大厚度与弦长的比值较大,即叶型“窄胖”,这样内弧的抽吸槽可以靠近出汽边,除湿效果好的同时根部比较窄的截面也便于布置肋板。但是从气动角度考虑,厚度较小的叶型(“宽瘦”叶型),易于控制流道,流动损失小,尤其在马赫数较高的根部。所以,火电机组的末级静叶一般“宽瘦”。静叶如果直接模化,可能对除湿的设计不利,需要重点考虑。

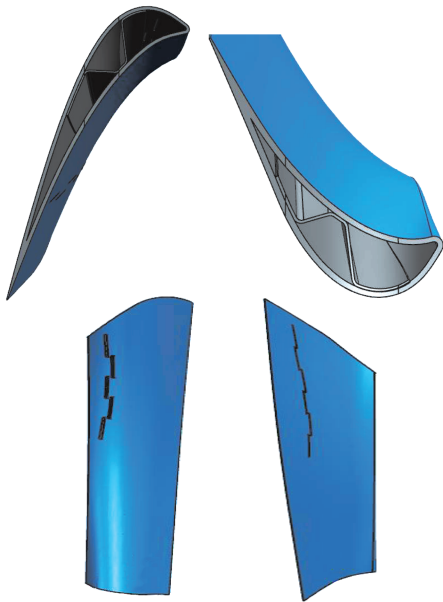


图6 典型末级空心静叶结构

Fig. 6 Typical last stage hollow stationary blade structure

(3) 按相似规律,采用全转速叶片模化而来的半转速叶片要求几何相似、出口马赫数相等,这一点

在工程设计上很难实现。受设备和工艺制约,根径不能按几何相似模化,而马赫数受背压影响很难保持不变。所以,动叶采用模化设计后,为了满足根部最低反动度等要求,实现良好的气动性能需要对静叶进行三维优化^[7]。这是全转速动叶模化设计半转速核电末级叶片最大的难点,甚至超过全新气动设计。静叶需要按模化好的动叶来“照配”,需要反向设计三维弯扭静叶片,静叶优化难度极大。

2.3 叶片与转子耦合振动

早期汽轮机设计中,可以忽略叶片和转子的耦合振动,因为叶片较短,1阶频率远高于2倍电网频率。半转速核电末级叶片径高比较小,必须考虑叶片与转子的耦合振动。根据文献[8],径高比较小的叶片,柔度系数(叶片转动惯量与轴的转动惯量之比)较大,传统的简化方法会带来较大的误差。而且,随着末级叶片长度的增加,末级叶片对转子的影响增大,不仅影响转子的振动,更有可能影响叶片的振动。例如,根据表1中ALSTOM的半转速叶片,1450 mm叶片的径高比为2.85,而1900 mm叶片的径高比降到2.55,后者对转子动力学特性影响大于前者。同时,核电机组一般没有中压缸,轴系结构与常规火电机组不同,这也需要重新耦合叶片,进行转子动力学特性计算。

表1 部分半转速核电长叶片参数

Tab. 1 Parameters of long blades of partial half speed nuclear power turbines

公司名称	叶高/mm	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	根径/mm
SIMENS	1 396	1 500	2 912
	1 830	1 500	3 380
ALSTOM	1 450	1 500	2 680
	1 750	1 500	2 980
	1 900	1 500	2 960
	1 375	1 500	2 750
MHPS	1 880	1 500	2 744
	1 500	1 500/1 800	-
TSB	1 321	1 500	2 700
HTC	1 460	1 500	2 750
	1 651	1 500	3 000
DTC	1 828	1 500	3 000
	2 082	1 500	-
STC	1 710	1 500	2 912
	1 905	1 500	-
JM3(LMZ)	1 500	1 500	-
	1 760	1 500	-
GE	1 321	1 800	-

3 结 论

大功率核电汽轮机的末级叶片与火电机组的末级叶片相比,安全性要求更高、水蚀问题更为突出。目前大功率核电机组大都采用半转速设计,而末级叶片则采用成熟的全转速长叶片等比模化的方法开发而成。结合多年的核电长叶片设计经验,有针对性地提出开发模式中需要重点关注的问题。

(1) 结构方面,宜采用松装配结构,方便加工装配;围带应使得叶型外露,或无围带,以降低水蚀引起的围带脱落风险;叶根优先采用易于保证加工精度的三齿枞树型叶根。

(2) 叶型方面,不能简单放大,对于出汽边厚度,要适当调整,降低损失和水蚀;静叶宜设计成顶部前掠;静叶叶型宜采用“窄胖”叶型,方便空心除湿结构实现。

(3) 动叶模化后,要对静叶进行全三维气动优化,以适应新的工作环境,在保证动叶安全性的前提下,尽量提高效率。

(4) 母型叶片的机型与模化后机型的轴系结构不同,而且径高比发生变化,需要重新核算轴系动力学特性,在核算时必须考虑与叶片耦合。

参考文献:

- [1] SENOO S, ONO H, SHIBATA T, et al. Development of titanium 3 600 rpm - 50 inch and 3 000 rpm - 60 inch last stage blades for steam turbines[J]. International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, 2014, 6(2): 9 - 16.
- [2] 范志飞, 范小平, 等. 半速核电 1 828 mm 末级长叶片开发[J]. 东方汽轮机, 2018(1): 1 - 4.

FAN Zhi-fei, FAN Xiao-ping, et al. Development of 1 828 mm last stage blade of half speed nuclear turbine[J]. Dongfang Turbine, 2018(1): 1 - 4.

- [3] 管继伟, 张秋鸿, 等. 1 500 r/min 核电汽轮机 71 英寸末级叶片的研发[J]. 汽轮机技术, 2016, 58(1): 17 - 19, 22.
- GUAN Ji-wei, ZHANG Qiu-hong, et al. Development of 1 500 r/min 71 inch low pressure end blade[J]. Turbine Technology, 2016, 58(1): 17 - 19, 22.
- [4] 李文福, 陆伟, 周英. 1 905 mm 超长末级长叶片强度振动分析[J]. 热力透平, 2015, 44(2): 114 - 116.
- LI Wen-fu, LU Wei, ZHOU Ying. Structural and dynamics analysis of the 1 905 mm super-long LP last blade[J]. Thermal Turbine, 2015, 44(2): 114 - 116.
- [5] 崔宏博, 王小宁. 全、半转速核电汽轮机的比较[J]. 东方电气评论, 2006(2): 58 - 63.
- CUI Hong-bo, WANG Xiao-ming. Comparison between full and half speed nuclear power steam turbine[J]. Dongfang Electric Review, 2006(2): 58 - 63.
- [6] 陈娟, 徐大懋. 核电汽轮机的特点及选型[J]. 热能动力工程, 2010, 25(4): 459 - 462, 472.
- CHEN Juan, XU Da-mao. Features and type selection of steam turbines in nuclear power plants[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(4): 459 - 462, 472.
- [7] 刘云锋, 李宇峰. 半转速核电汽轮机 1 460 mm 末级叶片开发[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(6): 417 - 420.
- LIU Yun-feng, LI Yu-feng. Development of 1 460 mm last stage blade of half speed nuclear turbine[J]. Turbine Technology, 2019, 61(6): 417 - 420.
- [8] 乔鹏. 核电汽轮机叶栅—轴系统振动特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- QIAO Peng. Research on vibration characteristics of cascade-shaft system in nuclear steam turbines [D]. Jinan: Shandong University, 2017.

(丛敏编辑)