

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.07.009

# 汽封管路数值模拟计算及改进研究\*

吴宏霞<sup>1</sup>, 刘庆龙<sup>2</sup>, 顾磊<sup>1</sup>

(1. 杭州萧山技师学院, 浙江 杭州 311201; 2. 杭州中能汽轮动力有限公司, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对汽封的密封性问题,对汽封管道抽吸压力传播对汽封漏气量的影响、复杂通流结构对传递到汽封侧抽吸压力及汽封漏气量的影响、汽封流量理论计算与CFX模拟计算结果之间存在的误差等方面进行了研究。对汽封进行了三维实体建模及数值模拟,对汽封管道性能参数计算结果、汽封管道截面压力分布情况和截面速度分布情况进行了分析,提出了一种在现场改造中简单有效而又经济的改进型汽封管路结构。研究表明:通过加粗中间段平衡管道,该改进型结构可有效减少汽封管道压损,增大过渡段压力,减少高压段漏气,提升汽封效果,提高汽轮机运行效率和可靠性。

**关键词:**汽轮机;汽封效果;汽封管路;CFX模拟

中图分类号:TH122;TK263.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)07-0703-05

## Numerical simulation and improvement analysis of steam seal line

WU Hong-xia<sup>1</sup>, LIU Qing-long<sup>2</sup>, GU Lei<sup>1</sup>

(1. Hangzhou Xiaoshan Technician College, Hangzhou 311201, China;

2. Hangzhou Chinen Steam Turbine Power Co., Ltd., Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of steam sealing property, the suction pressure propagation of steam seal line's effect on steam seal leakage, the complex flow path structure's effect on the suction pressure delivered to steam seal side and on steam seal leakage, the difference between theoretical calculation and CFX simulation results of steam seal flow and so on were studied. Three dimensional solid modeling and numerical simulation of steam seal were done, the performance parameter calculation results of steam seal line, the cross section pressure distribution and the cross section velocity distribution of steam seal line were analyzed, and an improved structure of steam seal line was proposed, which is a simple, effective and economic structure used in site reconstruction. The results indicate that by the augmentation of middle segment balance pipe diameter, the improved structure can effectively decrease the pressure loss of steam seal line, increase the pressure of transition segment, decrease the leakage of high pressure segment, increase the effect of steam seal, increase the operation efficiency and reliability of steam turbine.

**Key words:** steam turbine; steam seal effect; steam seal line; CFX simulation

## 0 引言

汽轮机是一种利用蒸汽作为动力源的旋转驱动设备,动、静部件之间存在一定的间隙。为了减少汽轮机内部的高压高温气体向机组外泄漏,必须在汽轮机动静之间安装汽封。

汽封形式最为常见的是曲径式汽封,也称为迷宫式汽封或者齿形汽封<sup>[1]</sup>。也有其他形式的汽封,如蜂窝汽封、刷式汽封、接触式汽封,虽然汽封效果更好,但成本较高,一般在高参数、大容量机组中才有应用<sup>[2]</sup>。汽轮机中轴端汽封、隔板汽封和叶顶汽封大多采用曲径式汽封,分析和改造该种汽封具有普遍意义。汽封

收稿日期:2017-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61205121)

作者简介:吴宏霞(1968-),女,浙江杭州人,副教授,主要从事汽轮机系统理论及应用研究。E-mail:18089686@qq.com

如果密封性不好,将导致大量蒸汽从间隙中泄露,降低汽轮机效率,并且可能引起振动问题。

采用数值模拟的方法来分析汽封性能日趋成熟,本文将采用三维模拟软件 CFX 对现有曲径式汽封进行模拟计算分析<sup>[3]</sup>,以改进汽封管路结构,提升汽封效果。

## 1 汽封流量的两种计算方法

汽封流量一般可通过经验公式来计算。利用芬诺曲线推导得出试验参数修正的汽封漏气计算公式,具体如下<sup>[4]</sup>:

$$G = 0.990 \mu_0 F \sqrt{\frac{1 - \pi_z^2}{z}} \frac{P_0}{\sqrt{RT_0}} \quad (1)$$

式中: $G$ —流量; $\mu_0$ —流量修正系数; $F$ —汽封最小截面积; $\pi_z$ —压比; $z$ —汽封齿数; $P_0$ —前汽封压力; $R$ —水蒸气气体常数; $T_0$ —绝对温度。

此外,计算流体动力学(CFD)是汽封流量计算的另一种方法。本文采用英国 AEA 公司开发的实用流体工程分析工具 CFX 这一商业 CFD 软件,来对汽封漏气进行模拟计算。

为验证 CFX 模拟计算结果的准确性与网格无关性,本研究先对较为简单的汽封进行计算,并同理论计算结果进行比较。模型为 1/12 环状模型,轴向侧是循环对称边界。

单组汽封尺寸示意图如图 1 所示。

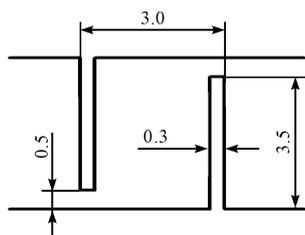


图 1 单组汽封尺寸示意图/mm

图 1 中,汽封齿轴径为 195 mm,一共使用了 6 组交替齿汽封,6 组汽封齿前后各有一段空间作为流体流动区域,以减小边界对内部流动的影响。汽封齿结构上下齿高度和宽度均完全一致,多组汽封齿间间隙均为 3.0 mm。考虑到实际运行过程中汽封有所磨损,取汽封间隙为 0.5 mm,大于一般设计尺寸<sup>[5]</sup>。

数值模拟采用有限体积法离散控制方程及标准  $k - \varepsilon$  两方程湍流模型,数值求解方法采用 SIMPLE 算法,离散格式取二阶迎风格式<sup>[6]</sup>。网格经过无关性验证,采用结构化网格。

单组汽封流量计算参数选取如下:流量修正系数

为 0.71,汽封最小截面积为  $3.063 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ,压比为 0.225 3,汽封齿数 12 组,进口压力 1.489 6 MPa,出口压力 0.335 7 MPa,工质为 IF97 规定的过热蒸汽,蒸汽温度为 320 °C。按照该条件,汽封齿间平均  $Re$  数约为  $1 \times 10^5$ ,处于湍流状态。

单组汽封流量计算结果比较如表 1 所示。

表 1 单组汽封流量计算结果比较

流量	CFX 模拟计算结果/ 理论计算结果/ 误差率/		
	( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	(%)
单组汽封流量	0.184 7	0.172 3	-6.72

由表 1 可以看出:虽然使用了不同的计算方法,但是计算结果较为接近,误差为 6.72%。理论公式计算方法由于结合了试验参数修正,其误差修正仅通过较早的汽封结构和加工装配工艺进行修正,并不能真实反映有机组的漏气情况,在工程快速计算和汽轮机热力计算中采用,但是精度较差。而 CFD 方法通过计算机模拟得到更加精确的计算结果,但计算较为复杂、耗时较长,在理论研究和工程研究中被广泛采用。

## 2 汽封建模及数值模拟

本研究对某机组的汽封部分进行三维实体建模,汽封间隙为 0.5 mm,汽封平衡管道直径为 50 mm,汽封模型参数与上述单组汽封模型参数一致。

汽封整体模型示意图如图 2 所示。

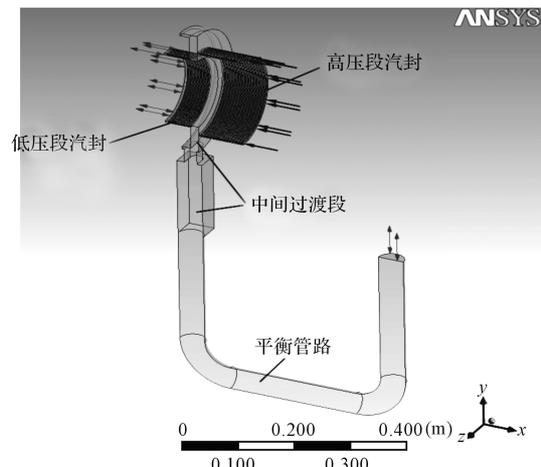


图 2 汽封整体模型示意图

图 2 中,模型为竖直对称模型,包括高压段汽封、中间过渡段、平衡管路、低压段汽封四部分,其中高压段汽封作为入口。考虑到汽封漏气和平衡管路的抽吸能力不足,及环形空间气流不均匀,因而对低压段汽封出口和平衡管路出口均采用开放性边界。整体模型从宏观上看,蒸汽从高压段汽封进入并穿过迷宫式的高压段汽封齿,进入中间过渡段。中间过渡段分为数段,

在两段汽封中间成环状的是汽封主体过渡段,其下方是平衡管抽吸口及抽吸通道。该通道的腰圆孔连接环状过渡段,腰圆孔下方是一段方形腔室,起稳压作用,称之为稳压段。蒸汽流入该腔室后压力上升,流速降低。最下方连接的是汽轮机平衡管路。

模型的网格划分示意图如图3所示。

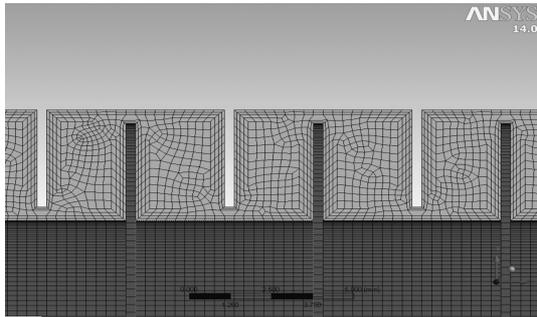


图3 汽封网格划分示意图

图3中,为了计算边界效应,本研究给定模型边界层第一层厚度为0.08 mm,其余部分为自由网格,网格尺寸为2 mm。

汽封管道截面压力分布云图如图4所示。

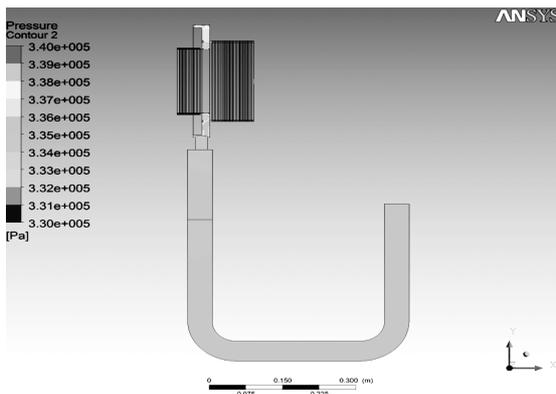


图4 汽封管道截面压力分布云图/Pa

由图4可以看出:过渡段和汽封管道压力跨度较小,颜色差别不大,而中间环状过渡段,顶部压力与底部抽吸口附近压力相差2 kPa左右,在整体通道中较为明显。这是由于平衡管道的抽吸口在下方,抽吸压力经过下方汽封漏气的补充,其负压被填补了一部分,传递到上方顶部的压力就相对变大。当抽吸压力较小(相对负压较小)或汽封管道管径较小时,传递到上方的负压就会变得很小。极端情况下,负压消失,即上方压力不受抽吸压力影响,此时中间过渡段汽封抽吸力不足,将导致低压段汽封漏气量明显增加。因此,保持一定的抽吸压力尤为重要。此外,稳压段之后的平衡管内流动压力损失较小,压力损失不足1 000 Pa。

汽封管道截面速度分布云图如图5所示。

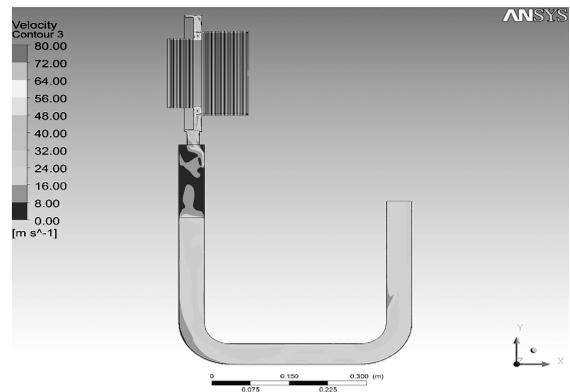


图5 汽封管道截面速度分布云图/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

由图5可以看出:中间环状过渡段上方速度大于下方,中间稳压段内部蒸汽流速很低,流速在16 m/s以下,稳压作用较为明显。当流体进入下方平衡管道后,速度提升上去,平衡管道的主体流速范围为20 m/s~30 m/s,管道内部蒸汽流速固定。

汽封流量计算参数选取如下:高压段进口压力1.489 6 MPa,高压段汽封齿数15组,汽封平衡管出口压力0.335 7 MPa,低压段出口压力0.13 MPa,低压段汽封齿数8组,模拟介质为IF97规定的过热蒸汽,蒸汽温度为320  $^{\circ}\text{C}$ ,壁面边界绝热,湍流模型为 $K-\varepsilon$ 模型,进口湍流度为5%,其他参数选取与上述单组汽封相同。

汽封流量计算结果比较如表2所示。

表2 汽封流量计算结果比较

流量	CFX 模拟计算	理论计算结果	误差率
	结果/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	/(%)
高压段进口流量	0.102 2	0.109 0	6.59
低压段出口流量	0.029 6	0.026 1	-11.68
汽封平衡管出口流量	0.072 5	0.082 9	14.35

由表2可以看出:CFX模拟计算结果与理论计算结果误差不大。由于抽吸压力传播无法覆盖整个环状过渡段,无法保证汽封出口压力恒定,汽封流量也不均衡。高压段汽封压力比理论值低,导致CFX模拟计算出的流量比理论计算出的流量小。而低压段汽封压力比理论值高,故CFX模拟计算出的流量比理论计算出的流量大。

### 3 汽封结构改进及仿真结果分析

为增加汽封密封效果,错对现有机组的汽封结构进行改进<sup>[7]</sup>。考虑到现实情况,特别是现场机组漏气问题处理时,汽封改造较为困难且成本较高,本文采用了一种较为简易的办法即加粗中间段平衡管。由于平衡管一半位于机组下方,现场管道和基础布置错综复杂,因此平衡管径增加只能在现有基础上进行。

两种平衡管路示意图如图6所示。

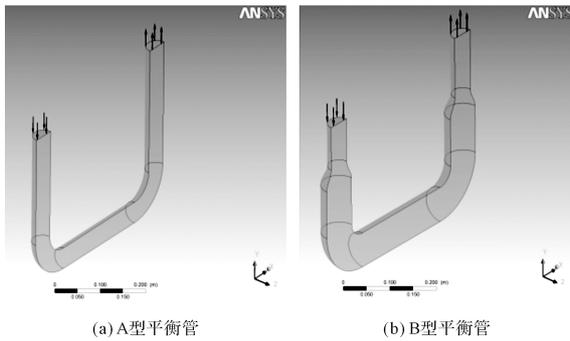


图 6 两种平衡管路示意图

图 6 中,A 型平衡管为常规平衡管,管道直径 50 mm; B 型平衡管为加粗平衡管,中间加粗部分管道直径 80 mm,中间用标准缩节连接;管道总长 1 100 mm,中间段 400 mm,两头各 350 mm。

平衡管模型参数如表 3 所示。

表 3 中,平衡管网格和热力参数选取与上述相同,入口设置进口流速,保证两管道流量一致。

改造前后平衡管性能参数计算结果比较如表 4 所示。

表 3 平衡管模型参数

管道进口流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	平衡管出口压力/ Pa	进口湍流度/ (%)	A 型管径/ ( $^{\circ}\text{C}$ )	蒸汽温度	壁面边界	湍流模型	B 型加粗管径/ mm
30	335 700	5	50	320	绝热	$k-\varepsilon$ 模型	80

表 4 改造前后平衡管性能参数计算结果比较

平衡管性能参数	A 型平衡管	B 型平衡管
平衡管流量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	0.050 3	0.050 3
平衡管入口压力/Pa	336 073	336 039
平衡管总压降/Pa	373	339
平衡管总压损失系数	0.671 1	0.609 9

由表 4 可以看出:由于给定的是流速条件,因此 A 型、B 型平衡管流量一致,但平衡管入口压力不同,且 B 型平衡管的总压降比 A 型平衡管小 10%。此外,B 型平衡管总压损失较小,更有利于蒸汽流动。

具体分析 A 型和 B 型平衡管的流动情况。两种平衡管截面压力分布云图如图 7 所示。

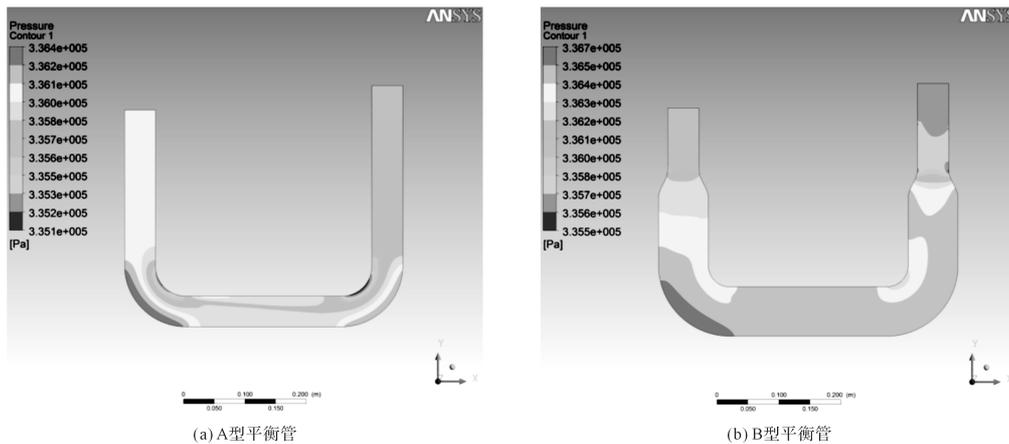


图 7 两种平衡管截面压力分布云图/Pa

图 7 中,A 型平衡管是简单弯管流动,在弯头内侧产生低压,外侧出现高压;B 型平衡管加粗段压力升高,加粗段主体部分压力在 336 500 Pa 左右,比 A 型

管道内压力高近 1 000 Pa。

进一步说明 A 型和 B 型平衡管内流动状况,两种平衡管截面速度分布云图如图 8 所示。

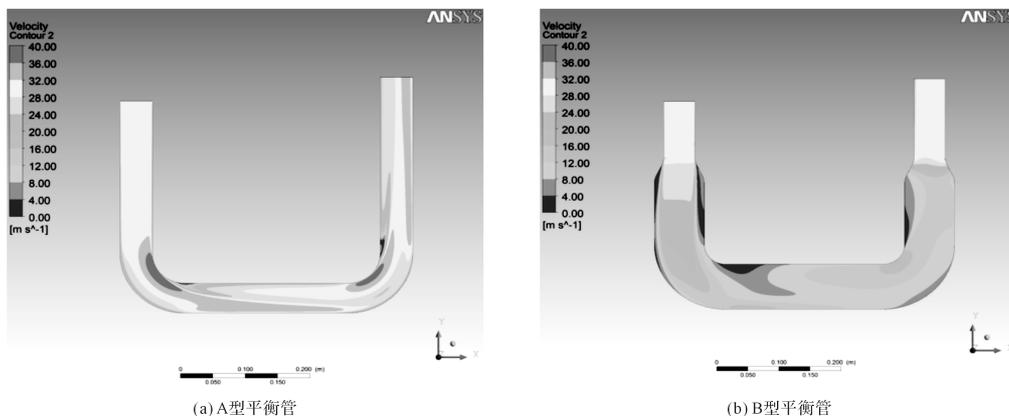


图 8 两种平衡管截面速度分布云图/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$

图8中,B型平衡管截面速度在15 m/s甚至10 m/s以下,而A型管内流速为28 m/s,与入口速度相差不大;B型管内蒸汽在加粗段速度下降很快,压力升高,但在离开加粗段之后,其速度与A型较为接近。

由表4、图(7,8)可以看出:平衡管加粗后,即使增加了两端缩节损失,但汽封效果仍明显提升,管内流速下降,压力升高,管内总压损失较小,平衡管出口压力更容易传递到平衡管进口。实际改造时受到周围设备布置的影响,管道加粗措施有所限制。对于上述管径为50 mm的平衡管路,由于平衡管本身较短,现场布置大于100 mm管径的平衡管较为不易,而且一般缩节跨度为三档管径,变化太大缩节不容易采购安装。这些问题在改造时应引起注意。

## 4 结束语

针对汽封的密封性问题,本文采用三维模拟软件CFX对现有曲径式汽封进行模拟计算分析,并进一步改进了汽封管路结构,提升了汽封效果。

结论如下:汽封管道抽吸压力的传播对汽封漏气量影响很大;复杂的通流结构会减小传递到汽封侧的抽吸压力,导致后段汽封入口压力增大,引起汽封系统漏气量增加;汽封流量的理论计算与CFX模拟计算结果有一定误差,主要由理论计算的修正系数引起。

当平衡管径足够大时,抽吸压力能够传递到汽封各个部分,汽封效果和漏气量与理论较为接近。但是,当中间过渡段结构较为复杂时,抽吸压力无法传递到汽封所有出口,汽封总体漏气量增加,汽封效果变差。

而加粗平衡管道,会使汽封管道压损减少,过渡段压力增大,高压段漏气减少,汽封效果提高。

对比其他一些汽封改造措施<sup>[8-10]</sup>,根据分析结果可知:增大平衡管路是一种简单有效而又经济的提升现有机组汽封效果的方法。

## 参考文献(References):

- [1] 蔡颐年. 蒸汽轮机[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
- [2] 王学栋,郝玉振,董洋. 汽轮机汽封改造的节能效果分析[J]. 山东电力技术,2014,41(6):31-35,46.
- [3] 李庆,刘云峰. 迷宫式静叶隔板汽封的数值模拟分析[J]. 汽轮机技术,2012,54(1):24-25,44.
- [4] 王仲奇,秦仁. 透平机械原理[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [5] 李军,邓清华,丰镇平. 蜂窝汽封和迷宫式汽封流动性能比较的数值研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(16):108-111,131.
- [6] 韩中合,康乐嘉. 汽轮机直齿与斜齿汽封内部流场的数值计算与结构优化[J]. 动力工程,2007,27(4):473-476.
- [7] 倪定,沈国平. 汽轮机各部位新型汽封选型方案研究[J]. 热力透平,2010,39(4):243-247.
- [8] 刘传玲,马保会,张学民. 汽轮机汽封改造节能效果的追踪检测与分析[J]. 发电与空调,2016,37(3):43-45.
- [9] 戴立阳. 液压管路系统可靠性设计与研究[J]. 液压气动与密封,2017(1):42-45.
- [10] 余帆,亢凯. 汽轮机汽封系统节能改造分析[J]. 低碳世界,2016(35):44-45.
- [11] 丁常富,李尊平,刘志博. 汽轮机汽封改造经济性分析[J]. 热力发电,2016,45(10):6-9,22.

[编辑:李辉]

### 本文引用格式:

吴宏霞,刘庆龙,顾磊. 汽封管路数值模拟计算及改进研究[J]. 机电工程,2018,35(7):703-707.

WU Hong-xia, LIU Qing-long, GU Lei. Numerical simulation and improvement analysis of steam seal line[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(7):703-707.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>