

# Strength Calculation and Simulation of Steam Turbine Diaphragm Based on MATLAB

Xiong Liu Pengfei Zhang Junjie Zhao Fangsong Wu

Industrial Turbine Division of Dongfang Steam Turbine Co., Ltd., Deyang, Sichuan, 618000, China

## Abstract

The diaphragm in steam turbine units bears multiple crucial functions such as fixing the stationary blades and preventing leakage between stages, making it one of the key components ensuring the economy and safety of the unit. With the rapid development of the power industry, the requirements for the reliability of steam turbines have become increasingly stringent. This paper primarily selects the actual diaphragm model from a steam turbine factory as the research example. Firstly, we briefly introduce the usage conditions and calculation models of the traditional methods for calculating diaphragm strength and stiffness—the W-V method and the Wahl method. We then examine their strength and stiffness through changes in stress and deflection. Following that, we investigate the trends in which the strength and stiffness of the diaphragm vary with pressure difference under different methods. Subsequently, we examine whether the strength and stiffness of the diaphragm exhibit any trends with changes in the outer diameter of the diaphragm under different methods, while setting four pressure difference levels at  $p=0.15$  MPa,  $p=0.35$  MPa,  $p=0.55$  MPa, and  $p=0.75$  MPa to observe changes in stress and deflection. Finally, the results are compared with the actual design.

## Keywords

steam turbine diaphragm; stiffnesscharacteristic; W-V method; Wahl method; MATLAB

## 基于 MATLAB 的汽轮机隔板强度计算及仿真

刘雄 张鹏飞 赵俊杰 吴方松

东方汽轮机有限公司工业透平事业部, 中国·四川 德阳 618000

## 摘要

隔板在汽轮机中承载着固定静叶和阻止级间漏气等多种重要功能, 是保证机组经济性和安全性的关键部件之一。随着电力工业的快速发展, 对汽轮机的可靠性要求越来越高。论文主要选择以某汽轮机厂的实际隔板模型为研究实例。首先, 对传统隔板强度和刚度的计算方法——W—V法和Wahl法的使用条件、计算模型进行了简单介绍, 通过应力和挠度变化考察其强度和刚度。之后, 考察了隔板强度和刚度在不同的方法下随压差变化的趋势。然后, 考察了隔板强度和刚度在不同的方法下随隔板外径变化的趋势, 同时设定了 $p=0.15$ MPa、 $p=0.35$ MPa、 $p=0.55$ MPa、 $p=0.75$ MPa四个压差档位观察其应力和挠度的变化。最后, 结果与实际设计相对比, 满足设计需求。

## 关键词

汽轮机隔板; 刚度特性; W—V法; Wahl法; MATLAB

## 1 引言

随着科学技术的不断进步, 新技术、新材料在机械工程中得到广泛应用, 同时机械设备的工作条件也向高温、高压、高速方向迈进, 其结构也变得越来越大型、越来越复杂。同时, 随着时代的发展, 电力在人类生活中具有越来越重要的作用, 电力的需求只会越来越大。虽然目前各国主要在向清洁能源发展, 逐步降低温室气体的排放, 煤炭在全球发电组合中的占比也在逐年减少, 但是不可否认的是在未来的几十年以内, 燃煤电厂等火力发电厂仍将作为一种必不可少的

发电方式, 保障能源安全, 满足能源需求。隔板是汽轮机的重要部件之一, 用来固定静叶片和阻止级间漏汽, 将汽轮机内部分隔成若干个压力段, 使蒸汽通过静叶栅将势能转变成动能, 并使汽流按规定方向流入动叶<sup>[1]</sup>。随着汽轮机行业的发展, 提高汽轮机的效率和热经济性成为重中之重, 减小通流中动、静之间的间隙可以有效降低漏气量, 达到提高机组效率和热经济性的目的。但是由于隔板前后有压差存在, 隔板需具有足够的强度和刚度, 防止受力后产生过大的挠度, 造成汽轮机内动、静部分接触碰撞, 定量分析隔板的强度和挠度对精细化设计隔板具有十分重要的现实意义<sup>[2]</sup>。因此, 隔板设计中需要满足: 一是具备良好的汽封性能; 二是具有足够的强度和刚度。由于涡轮机在工作时要承受其两侧的压差, 所以必须保证在高温下有足够的强度。为了防止产

【作者简介】刘雄(1986-), 男, 中国湖南益阳人, 硕士, 高级工程师, 从事汽轮机设计研究。

生大的挠度而引起静叶片与动叶片的碰撞,还必须保证有足够的刚度。对于隔板的强度分析,目前仍采用传统的计算方法——W—V法和Wahl法。M—V法是最早采用的横隔梁计算方法,最早在英国用于横隔梁强度计算。Wahl法是隔板强度的经典计算方法。

现代社会中大型精密且复杂的机械对于可靠性、抗疲劳等要求也在逐步发展,这要求设计人员能够计算和预测其在实际工作中产生的破裂和变形等问题。随着计算机技术的发展,越来越多的高校和汽轮机制造厂相继开发汽轮机相关的有限元计算程序,并在工程设计实践中逐步应用。吴谦等人<sup>[3]</sup>将弹性接触有限元法引入隔板的强度计算中,用以考虑隔板非线性支承边界,隔板内环的内径处装有汽封环,在运行时也受到两侧蒸汽压差的作用,对隔板产生力和力矩作用,可以利用经验公式将该压差力等效地转化为沿隔板内径圆弧上作用的均布载荷和作用力矩,加载在有限元模型上。杨光辉等人<sup>[4]</sup>对某亚临界状态机组隔板进行强度分析和对比;结果表明,隔板最大应力在靠近中分面叶片的进气叶根处,最大应变在中分面内径内环处,板体最大应力在垂直于中分面的内环内径处,其中有限元法和Wahl法误差较小,验证了有限元方法的可行性。盛德仁等人<sup>[5]</sup>对某汽轮机隔板进行了强度分析,并将结果和W—V法与Wahl法的计算结果进行了比较,但它在处理隔板位移边界条件时在隔板外环面上仅取沿环向一点作轴向约束。刘平等<sup>[6]</sup>采用MSC/NASTRAN有限元分析软件对某典型隔板进行线性分析并与经典算法—史密斯法的结果进行对比,有限元分析与经典计算结果相当吻合。文章<sup>[7]</sup>对某特殊结构的汽轮机隔板进行了三维模型的建立,在ANSYSWorkbench14.5中进行了有限元分析,得到了有限元分析结果。马俊等人<sup>[8]</sup>针对某汽轮机的中压第一级隔板,采用常规计算方法和有限元法分别进行了强度计算及分析且结果表明,有限元分析得到的结论与常规方法相同,从而印证了其在隔板设计上的工程实用性,具备替代常规方法的可能。董成龙等人<sup>[9]</sup>介绍了传统经验公式Wahl法和目前普遍采用的有限元数值计算方法,表明在处理隔板的支承情况时,采用接触分析有限元法能更准确地计算隔板体的挠度和应力。胡柳欣等人<sup>[10]</sup>用商用软件分析了隔板发生塑性变形的原因,运用有限元法的关键是首先要确定出准确的边界条件,隔板在实际结构中,隔板外缘被安置在汽缸或持环的隔板槽内,隔板和隔板槽壁间留有一定的间隙量,在实际运行时,由于隔板两侧的压差作用,隔板外缘被压向隔板槽的一侧,但在温度与压差的作用下,该侧隔板仍有径向外缘与径向弯曲的可能,所以,隔板在实际工作中的支承位置并不是在确定的某一个半径处。

上述研究主要探讨了前人在借助传统的W—V法、Wahl法的基础上与有限元相结合对隔板强度和刚度的校核进行了研究,而论文主要借助仿真软件MATLAB与传统计

算方法相结合,借用某汽轮机厂实际隔板模型参数,对比两种传统算法的差别,并且展示其中某些参数对隔板强度和刚度的影响情况,进而为隔板设计人员提供一定的参考。

论文首先对传统的隔板强度计算方法——W—V法和Wahl法进行简单的介绍并在MATLAB中建立相关的仿真模型。之后,通过MATLAB将不同的参数设置为自变量以考察其对隔板强度和刚度的影响,最后校核该汽轮机厂设计的通流条件下隔板的表现。由于论文主要研究在两种模型下隔板两侧压差和隔板外径对隔板强度和刚度的影响,为方便计算,对该级隔板进行一定的简化,将其分为隔板外环、静叶、隔板体和汽封弧段4部分。

## 2 隔板强度计算

### 2.1 M—V法

M—V法又称Smith法,是最早采用的隔板计算方法,被英国MV透平制造厂用于计算隔板强度。它对于隔板计算作了如下假定:

- ①隔板外缘固定在完全刚性的支座上;
- ②隔板上承受均匀分布的蒸汽载荷;
- ③支反力沿支承周边的分布按正弦曲线规律(与实际情况很不符合);
- ④在计算隔板本身的应力和挠度时,假定静叶绝对刚性;在计算静叶应力和挠度时,假设隔板外缘和板体是绝对刚性的;
- ⑤隔板受力后隔板的径向截面形状保持不变;
- ⑥不考虑隔板本身的曲率,即计算时对于力和变形的关系利用直梁公式。

隔板体最大应力,在垂直于隔板中分面的内径处,其值为:

$$\sigma_{max} = K_{\sigma} \frac{\Delta p (0.1D)^3 S}{I} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{max}$ ——最大应力,MPa;

$K_{\sigma}$ ——应力计算系数;

$\Delta p$ ——隔板两侧压差,MPa;

$D$ ——气缸内径,m;

$S$ ——隔板最大厚度,m;

$I$ ——隔板的计算惯性矩, $m^4$ 。

隔板体最大挠度,在隔板中分面内径处,其值为:

$$f_{max} = K_{\Delta} \frac{\Delta p (0.1D)^5}{E_t I} \quad (2)$$

式中: $f_{max}$ ——最大挠度,m;

$K_{\Delta}$ ——挠度计算系数;

$E_t$ ——工作温度下隔板材料的弹性模量,MPa。

此时假定板体为绝对刚性,通过该方法计算得到叶片的最大挠度为:

$$f'_{max} = K_{\Delta} \frac{0.2\Delta p D_m (D_m - D_g) l^3}{EIZ} \quad (3)$$

式中： $f'_{max}$ ——叶片最大挠度，m；  
 $D_m$ ——叶片中径，m；  
 $D_g$ ——汽封处内径，m；  
 $l$ ——叶高，m；  
 $Z$ ——叶片数；  
 $E$ ——叶片材料工作温度时的弹性模量，MPa。

则在靠近隔板中分面汽封内径处的最大挠度计算公式为：

$$f = f_{max} + f'_{max} \quad (4)$$

### 2.2 Wahl 法

Wahl 法把隔板当作一个整块半圆环，在其上作用均布载荷，周边支承、中分面直径自由的情况来处理。即把隔板当作周边支承、承受均布载荷的曲梁，并认为隔板受力后其径向截面不变形这样应用曲梁受力和变形的关系，并考虑以下三点因素的影响：一是隔板不是支承在外圆上，而是支承在比外圆小一定数值的圆周上；二是在隔板内径处没有考虑汽封环的存在，该汽封环不仅不增加隔板的刚度，反而增加了隔板的载荷；三是隔板按整块半圆环考虑，即不考虑静叶的存在。在计算隔板体截面惯性矩时，应扣除这部分静叶带来的惯性矩<sup>[11]</sup>。

因此，隔板的最大应力为：

$$\sigma_{max} = K_{\sigma} \frac{z(0.1D_0)^3 S}{I_t + I_0} \quad (5)$$

式中： $z$ ——和压差及隔板尺寸有关的数值；

$D_0$ ——隔板外径，m；  
 $I_t$ ——隔板体相对 I-I 轴的惯性矩，m<sup>4</sup>；  
 $I_0$ ——隔板外环相对 I-I 轴的惯性矩，m<sup>4</sup>。

隔板的最大挠度为：

$$f_{max} = K_{\Delta} \frac{z(0.1D_0)^5 t_2}{E_t(I_t + I_0) 1 + t_1} \quad (6)$$

$K_{\sigma}$  根据  $d/D_0$  和  $t_1$  按《透平零件结构和强度计算》<sup>[12]</sup> 图 6-13 选取 (P260)； $K_{\Delta}$  根据  $d/D_0$  和  $t_1$  按《透平零件结构和强度计算》图 6-14 选取 (P260)； $t_1$ ——比值， $t_1=a_1/a$ ； $t_2$ ——比值， $t_2=a_2/a$ ； $z$ ——和压差及隔板尺寸有关的数值。

$$z = \frac{B-A}{D_0^2} \quad (7)$$

其中：

$$A = \frac{2\Delta p e^3}{3 a_1} - 2\Delta p \left(\frac{d}{2} + e\right) \frac{e(a-e)}{a_1} - \frac{q_1 d a}{2 a_1} - m_1 \frac{d}{2 a_1} \quad (8)$$

$$B = 2\Delta p e \left(\frac{d}{2} + e\right) + \frac{q_1 d}{2} \quad (9)$$

上式中：

$$e = \frac{1}{4}(D-d) \quad (10)$$

$$a = \frac{1}{4}(D_0-d) \quad (11)$$

$$a_1 = 2e - a \quad (12)$$

$$a_2 = \frac{1}{2}(D-D_g) \quad (13)$$

$$q_1 = \frac{1}{4}\Delta p d \left(1 - \frac{D_g^2}{d^2}\right) \quad (14)$$

$$m_1 = \frac{1}{8}\Delta p d^2 \left(1 - \frac{D_g}{d}\right)^2 \quad (15)$$

式中： $d$ ——隔板内径，m。

### 3 仿真计算

通过上节的强度计算模型，我们可以在 MATLAB 中建立相应的仿真模型，研究相关参数对隔板强度的影响情况。隔板的数据选取某汽轮机厂的现有产品的某一级进行研究。该机组是 60WM 级的中温、中压、凝气式汽轮机。

#### 3.1 压差的影响

本节主要研究隔板前后压差对隔板强度的影响，相应参数的数值见表 1。应力计算系数和挠度计算系数，两种方法所选取的值有所不同见表 2。其中隔板的材料为 Q235-B，叶片的此材料为 12Cr13。

表 1 隔板参数

参数	值	参数	值
$D$	1.662	$S$	0.96
$E_t$	$197 \times 10^3$	$E$	$204.11 \times 10^3$
$D_m$	1.3035	$D_g$	0.580
$l$	0.0535	$Z$	80
$D_0$	1.722	$d$	0.611
$I_t$	$2.3046 \times 10^{-5}$	$I_0$	$5.3593 \times 10^{-5}$
$I$	$15.5016 \times 10^{-5}$		

表 2 常数值

W-V 法		Wahl 法	
$K_{\sigma}$	14.867	$K_{\sigma}$	72.9
$K_{\Delta}$	197.28	$K_{\Delta}$	998.8

通过 MATLAB 仿真软件，得到了所示的仿真结果。该图显示随着隔板两侧压差的变化所引起的隔板强度的变化以及两种不同的计算方法所显示的不同的影响效果。图 1 展示了隔板最大应力随着压差变化的关系；图 2 展示了隔板最大挠度随压差变化的关系。

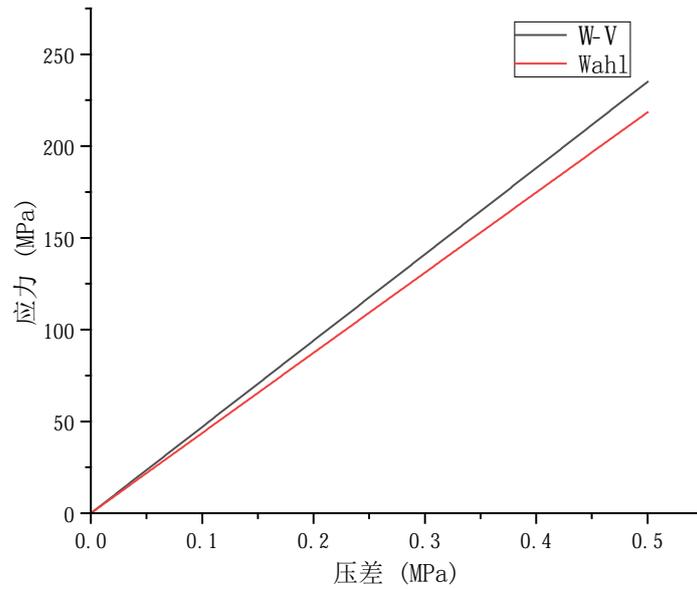


图 1 应力与压差的关系

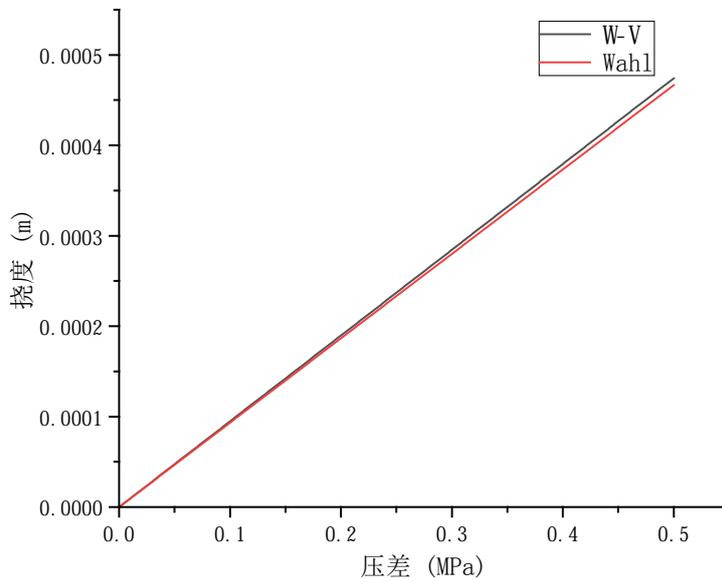


图 2 挠度与压差的关系

### 3.2 隔板外径的影响

上一节主要研究隔板前后压差对隔板强度的影响，本节探讨隔板外径对于隔板强度和刚度的影响。同时，除了改变隔板外径，将设定不同的压差下以考察隔板强度和刚度的变化。压差主要设置为  $p=0.15$ 、 $p=0.35$ 、 $p=0.55$ 、 $p=0.75$  四个档位。其余参数不改变。图 3、图 4 展示了不同压强下 W—V 模型中应力和挠度的变化；图 5、图 6 展示了不同压强下 Wahl 模型中应力和挠度的变化。从图中可以看出，无论哪种模型下，应力和挠度的变化趋势均相近，压差越大，应力和挠度就越大。当  $p=0.15$  左右时，随直径的变化应力和压

差的变化较缓。

除上述外，我们设定  $p=0.35$ ，考察不同模型下应力和挠度的变化。

从图 7 和图 8 中，可以得到：当外径小于 1.5 时，Wahl 法对于外径的变化更加敏感；当外径大于 1.5 时，W—V 法对于外径的变化更加敏感。

同时，我们根据该汽轮机厂的实际通流得到其所设计的隔板两侧是实际压差， $p=0.201$ 。通过计算我们可以得到两种方法下的隔板强度和挠度变化，见表 3，其结果也证实了上述研究。该汽轮机厂该机组此级的许用应力为 110MPa，符合设计需要。

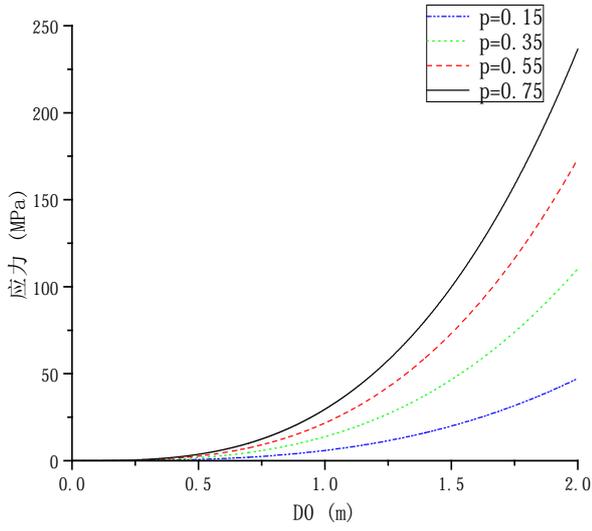


图 3 W—V 法应力变化

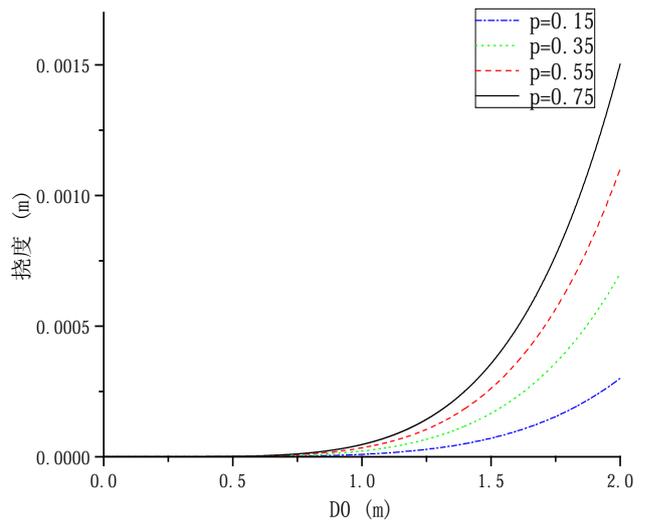


图 4 W—V 法挠度变化

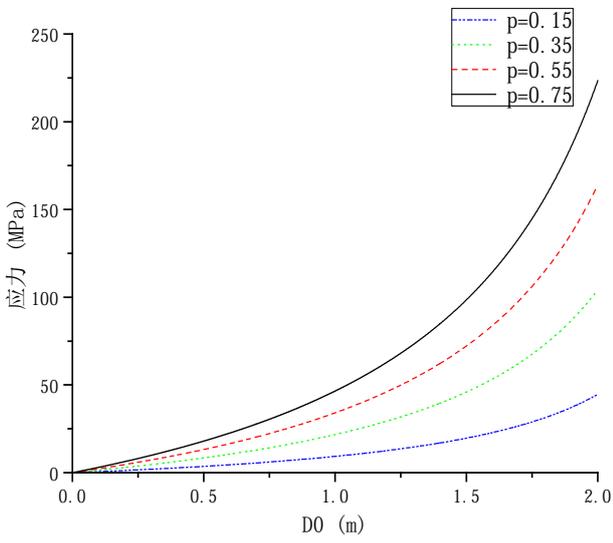


图 5 Wahl 法应力变化

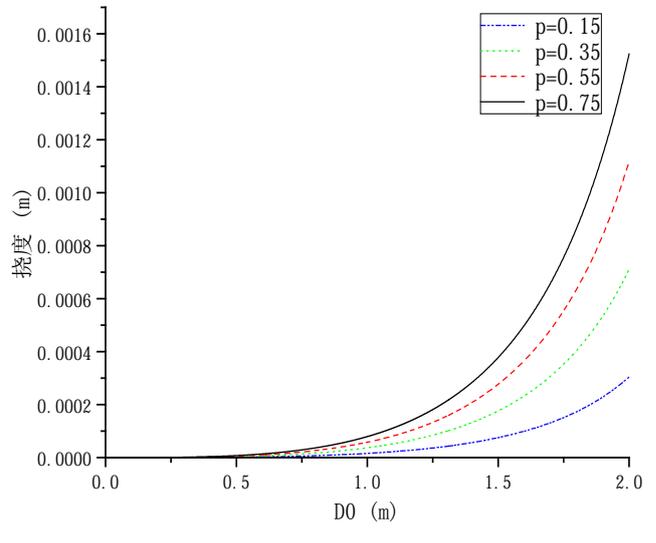


图 6 Wahl 法挠度变化

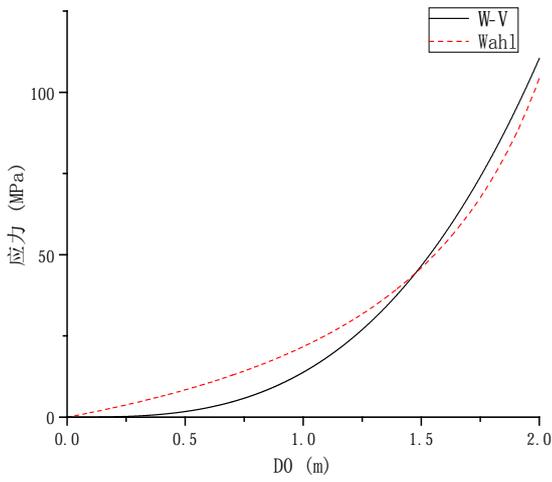


图 7 同一压差下应力变化

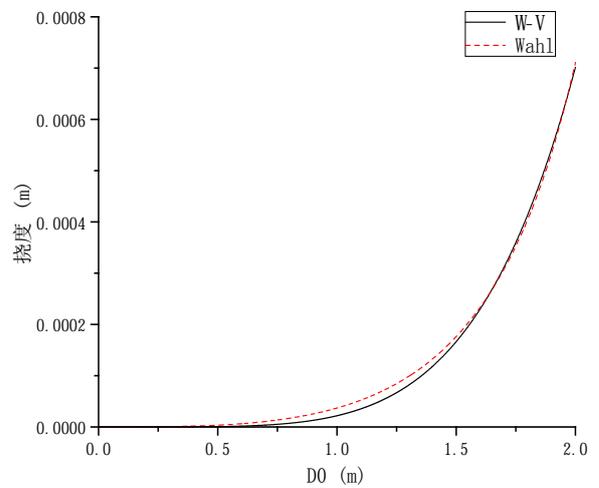


图 8 同一压差下挠度变化

表3 隔板强度仿真结果

	$\sigma_{max}$	$f_{max}$
W-V 法	94.5	$1.91 \times 10^{-4}$
Wahl 法	87.8	$1.88 \times 10^{-4}$

## 4 结论

通过上述对传统隔板强度计算方法的介绍，并引入 MATLAB 软件根据实际工业制品验证了设计的正确。论文主要完成了一下几方面的工作：阐述了隔板的作用以及其重要性，介绍了隔板强度计算常见的两种方法——W—V 法和 Wahl 法，建立隔板的强度计算方程；参考了某汽轮机厂的实际隔板设计建立了相关的强度计算模型；在 MATLAB 中进行了仿真，研究了两种模型下其隔板两侧压差对隔板强度产生的影响。同时也考察了不同模型对于隔板外径变化的敏感度，且提供了未来研究其他参数对隔板强度的影响的方向。通过研究可以发现，W—V 法对于隔板两侧压差的变化更加敏感，而对于隔板外径，仅当其增大到一定范围时，变化才更加明显；借助该汽轮机厂的实际设计验证了其强度设计是否符合强度准则，并比较了两种计算方法的可用性。

## 参考文献

[1] 董成龙.大型汽轮机的隔板刚度特性研究[D].大连:大连理工大

学,2013.

- [2] 宋杏林.600MW汽轮机隔板挠度特性研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [3] 吴谦,余峰.汽轮机隔板强度有限元法及其应用[J].西安交通大学学报,1997,31(10):31.
- [4] 杨光辉,陈庆波.基于M-V法、Wahl法和有限元法的汽轮机隔板的强度对比分析[J].图学学报,2016,37(4):5.
- [5] 盛德仁,陈坚红,李蔚,等.600MW汽轮机隔板的强度分析[J].电站系统工程,2003,19(2):3.
- [6] 刘平.典型隔板的强度刚度有限元分析[J].热力透平,2004(6).
- [7] 尹华劫,尹刚,吴方松,等.某特殊结构汽轮机隔板强度计算研究[J].东方汽轮机,2015(4):4.
- [8] 马骏,赵海峰,孙伟,等.汽轮机隔板强度计算方法的比较[J].东方电气评论,2015,29(2):4.
- [9] 董成龙,孙涛,王晓放,等.接触分析在汽轮机隔板强度计算中的应用[J].汽轮机技术,2014,56(1):4.
- [10] 胡柳欣,忻建华,葛诵,etal.汽轮机隔板高温蠕变寿命评估方法的研究[J].动力工程学报,2009(3):232-235.
- [11] 丁有宇.汽轮机强度计算手册[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [12] 吴厚钰.透平零件结构和强度计算[M].北京:机械工业出版社,1982.