

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.08.016

倒置微带贴片谐振器测量汽轮机湿度的研究*

孙景芳 李永倩 张淑娥

(华北电力大学 电气与工程学院 保定 071003)

摘要:汽轮机蒸汽湿度的在线测量,对汽轮机的安全、经济运行具有重要的理论意义和实用价值。根据微扰法的基本理论,提出一种结构简单、灵敏度高的倒置微带贴片谐振器,实现汽轮机湿度的准确在线测量。湿蒸汽的湿度变化反应为谐振器介质层介电常数的变化,根据微带贴片谐振器的基本原理,仿真计算不同介电常数下的谐振频率,得到其变化关系曲线;讨论样本厚度、基质厚度和基质介电常数对频率偏移量的影响;设计微带贴片谐振器模型,并分别在 HFSS 和 CST 软件下进行仿真。研究及仿真结果表明,微带贴片谐振器模型适用于汽轮机蒸汽湿度的在线测量,蒸汽湿度每变化 1%,谐振器频偏约为 18 kHz,约为微带缝隙谐振器频偏的 3.6 倍,有利于蒸汽湿度的准确测量。

关键词: 汽轮机;湿蒸汽;湿度测量;倒置微带贴片;介电常数

中图分类号: TM931 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Study on turbine wetness measurement by inverted microstrip patch resonator

Sun Jingfang Li Yongqian Zhang Shue

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The on-line measurement of turbine wetness has great theoretical significance and practical value to the safety and economic operation of steam turbine. According to the basic theory of perturbation method, a method is proposed to realize the turbine wetness measurement by inverted microstrip patch resonator, which has a simple construction with high sensitivity. The dielectric constant changes with the steam wetness change. The resonant frequencies of different dielectric constant are simulated based on the principle of microstrip patch resonator with the wet steam as sample substrate of resonator. The effects of sample thickness, substrate thickness and dielectric permittivity on the frequency offset are discussed. The microstrip patch resonator model is designed and simulated on the HFSS and CST. The study and simulation results show that the model is suitable for the on-line measurement of steam wetness of steam turbine. When the steam wetness changes 1%, the resonator frequency offset is about 18 kHz, which is about 3.6 times of frequency offset of microstrip slot resonator. The model is conducive to the accurate measurement of the steam wetness.

Keywords: steam turbine; wet steam; wetness measurement; inverted microstrip patch; dielectric constant

0 引言

目前,国内外汽轮机内湿蒸汽的湿度测量方法主要包括热力学法、光学法、CCD 成像技术及微波微扰法^[1-3]。微波微扰法是基于微波谐振器的微扰,由于在一定的温度、压力下,湿蒸汽的介电常数只与其湿度有关,

当谐振器内的湿蒸汽湿度发生变化时,即谐振器内电介质的介电常数发生微扰,谐振腔的谐振频率也随之变化发生偏移,因此,可以通过测量湿蒸汽通过微带谐振器时产生的频率偏移量来间接实现蒸汽湿度的在线测量^[4]。文献[2,4-7]采用微波微扰法进行蒸汽湿度测量的研究,制作了金属圆柱型谐振腔湿度传感器,搭建了蒸汽湿度测量系统。但是,金属圆柱谐振腔湿度传感器存在体积

收稿日期:2017-02 Received Date: 2017-02

* 基金项目:中央高校基本科研业务费(2014MS103)资助

大,随温度变化腔体体积膨胀缩小,谐振频率漂移严重的问题。文献[8]提出一种双通道微带缝隙谐振器湿度传感方法。该方法通过测量湿蒸汽通过微带谐振器缝隙时产生的频率偏移量来实现蒸汽湿度的在线测量。采用微带线结构,可以解决汽轮机湿度传感器需要结构简单、体积小、质量轻,易于制作的实用化问题。普通微带线结构测量湿蒸汽的湿度是利用湿蒸汽通过微带缝隙时电容的变化引起频偏实现的,蒸汽湿度的变化引起的频偏小。本文提出一种测量湿蒸汽湿度的新方法,采用倒置微带贴片谐振器,湿蒸汽的湿度变化体现为介质层介电常数的变化,进而导致谐振频率发生偏移,通过测量谐振频率的偏移量实现湿度的间接测量。倒置微带贴片谐振器较普通微带线结构具有更高的品质因数,且湿度变化体现为整个介质层介电常数的变化,因此,对湿蒸汽湿度的变化反应灵敏度更高。

1 微带贴片谐振器湿度测量原理

湿蒸汽可以认为是由于饱和水蒸汽和很小的饱和水滴组成的,这种混合物的尺寸非常小,大部分水滴直径小于 $2\ \mu\text{m}$,最大的尺寸也只有 $200\ \mu\text{m}$,远远小于微波的波长,所以,湿蒸汽混合物的等效介电常数只和液相的体积份数有关系,而与水滴的尺寸无关。由于气态水和液态水的介电常数不同,在微波频率范围内,常温下水蒸汽的介电常数接近于 1,而液态水的介电常数约为 80。湿蒸汽的湿度不同时,汽液两相所占比例不同,不同湿度蒸汽的介电常数也就不同。因此,湿蒸汽介电常数的大小反映了蒸汽湿度大小,可以通过测量湿蒸汽的介电常数来间接测量蒸汽的湿度。

文献[9]研究表明,当在厘米波波段,湿蒸汽的复介电常数实部不随频率变化,只是温度的函数,等于其静介电常数;虚部很小,损耗非常低。当微波波长大于 $1\ \text{cm}$ 时,湿蒸汽的复介电常数实部与湿度变化近似成线性关系。湿度在 $5\% \sim 15\%$ 时,湿度平均每增加 1% ,其复介电常数的实部增加值为 $30\ \text{℃}$ 时,增加 1.16×10^{-6} ; $60\ \text{℃}$ 时,增加 5.05×10^{-6} ; $100\ \text{℃}$ 时,增加 2.00×10^{-5} 。当压力为 $0.007\ \text{MPa}$ 的条件下,湿蒸汽的湿度与介电常数之间的对应关系,如表 1 所示^[8]。

由表 1 可得,湿蒸汽的介电常数与湿度近似成线性关系,湿度每增加 1% ,介电常数增加 1.5×10^{-5} 。而根据微扰理论,样本基质介电常数的微小变化,会引起谐振器谐振频率的偏移,通过测量谐振频率可以确定湿蒸汽的复介电常数实部,进而得到对应的湿度值。因此,本文提出采用一种以湿蒸汽为样本基质的倒置微带贴片谐振器,通过测量谐振器的谐振频率,间接得到湿蒸汽的湿度值。

表 1 湿蒸汽湿度与介电常数的关系
Table 1 The relationship between steam wetness and dielectric constant

湿蒸汽湿度/%	介电常数
0	1.006 000
1	1.006 015
3	1.006 045
5	1.006 076
7	1.006 108
9	1.006 141
11	1.006 176
13	1.006 213
15	1.006 251
17	1.006 291
21	1.006 356

2 微带贴片谐振器的原理

倒置微带贴片谐振器由矩形贴片、介质层和接地板构成,介质层包含基质层和样本层,矩形贴片印刷在基质层上,结构如图 1 所示。基质层的厚度和介电常数是已知参数。样本层的介电常数未知,厚度已知。样本层由空腔构成,测量时,湿蒸汽充满样本层,当湿蒸汽的湿度发生变化时,即介电常数发生改变,谐振频率也随之变化。因此通过测量样本层的谐振频率,就可以得到相应的介电常数,从而实现湿度的测量。

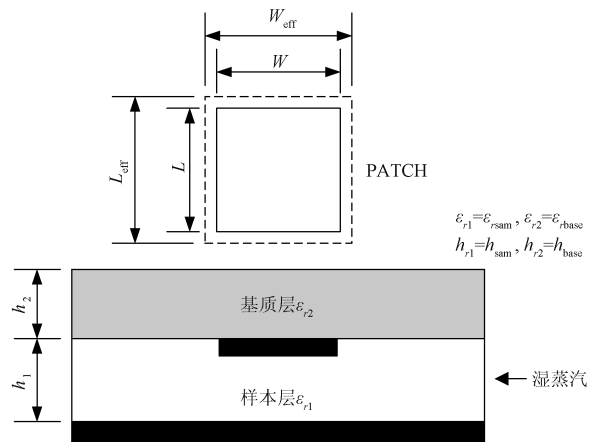


图 1 倒置微带贴片谐振器截面结构
Fig. 1 Cross-section structure of inverted patch resonator

倒置微带贴片谐振器的谐振频率为^[10-12]:

$$f_r = \frac{v_0}{2 \sqrt{\epsilon_{\text{dyn}}}} \left[\left(\frac{n}{L_{\text{eff}}} \right)^2 + \left(\frac{m}{W_{\text{eff}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: ϵ_{dyn} 是结构的动态等效相对介电常数, v_0 是光速度, m, n 为谐振模式序号, L_{eff} 和 W_{eff} 分别为矩形贴片的等效长度和等效宽度。由于边缘场的影响,等效长度和等

效宽度比物理长度 L 和物理宽度 W 稍大,如图1所示。

1) 动态等效相对介电常数

动态等效相对介电常数是 Wolff 等人^[13] 提出的,它是媒质参数和贴片尺寸的函数,定义为:

$$\epsilon_{r,dyn} = \frac{C_{dyn}(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2})}{C_{dyn}(\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 1)} \quad (2)$$

其中: $C_{dyn}(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2})$ 和 $C_{dyn}(\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 1)$ 分别为介质填充和空气填充倒置微带贴片谐振器的总动态电容。

介质填充的贴片总动态电容为:

$$C_{dyn}(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}) = C_{o,dyn}(\epsilon_{r1}) + 2C_{e1,dyn}(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}) + 2C_{e2,dyn}(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}) \quad (3)$$

式中: $C_{o,dyn}$ 是贴片的中心动态电容,取决于贴片和接地板间介质层的介电常数和厚度; $C_{e1,dyn}$ 和 $C_{e2,dyn}$ 分别是沿长度 L 和宽度 W 的边缘电容。

贴片的中心动态电容是由分布在贴片下的电场产生的,可由式(4)计算得到 $C_{o,dyn}$ 。

$$C_{o,dyn}(\epsilon_{r1}) = \frac{C_{o,sta}(\epsilon_{r1})}{\gamma_n \gamma_m} \quad (4)$$

其中,

$$C_{o,sta}(\epsilon_{r1}) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} LW}{h_1} \quad (5)$$

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & i = 0 \\ 2, & i \neq 0 \end{cases} \quad i = m, n$$

贴片的沿长度 L 和宽度 W 的动态边缘电容可分别由式(6)、(7)计算得到。

$$C_{e1,dyn}(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}) = \frac{C_{e1,sta}(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2})}{\gamma_n} \quad (6)$$

$$C_{e2,dyn}(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}) = \frac{C_{e2,sta}(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2})}{\gamma_m} \quad (7)$$

静态边缘电容可以由总电容减去静态中心电容,为:

$$C_{e1,sta}(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}) = \frac{1}{2} [CL - C_{o,sta}(\epsilon_{r1})] \quad (8)$$

式中: $C = \frac{Z_0}{v_0 Z^2}$, Z 为导体带条宽度为 W 的两层介质传输线的特性阻抗, Z_0 为导体带条宽度为 W 、填充介质为空气的传输线的特性阻抗, v_0 为光速, C 为单位长度的总电容。

Z 和 Z_0 可以由保角映射法进行求解^[14]。同样地, $C_{e2,sta}(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2})$ 可以将式(8)中的 L 替换成 W 计算得到。

2) 有效长度和有效宽度

根据文献[15-16]有效长度 L_{eff} 可以由下式得到:

$$L_{eff} = L + \left(\frac{W_{eq} - W}{2} \right) \frac{\epsilon_{reff}(W) + 0.3}{\epsilon_{reff}(W) - 0.258} \quad (9)$$

式中: W_{eq} 是由平面波导模型得到的等效宽度。

$$W_{eq} = \frac{120\pi h_1}{Z(W) \sqrt{\epsilon_{reff}(W)}} \quad (10)$$

式中: $Z(W)$ 和 $\epsilon_{reff}(W)$ 是带条宽度为 W 的倒置微带线的特性阻抗和有效介电常数。 $\epsilon_{reff}(W)$ 可以由下式求得:

$$\epsilon_{reff}(W) = \left[\frac{Z_0(W, h_1, h_2, \epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 1)}{Z(W, h_1, h_2, \epsilon_{r1}, \epsilon_{r2})} \right]^2 \quad (11)$$

有效宽度 W_{eff} 可以将式(9) ~ (11) 中的 W 替换成 L 计算得到。

3 微带贴片谐振器设计

当参数一定时,改变样本空间的介电常数,即湿蒸汽的湿度发生变化,谐振频率也随之改变,根据式(1) ~ (11),通过 MATLAB 进行计算得到谐振频率的计算值,并将计算结果进行数据拟合,得到如图2所示结果。由图2可知,当参数一定时,谐振频率随样本空间即湿蒸汽介电常数的增大线性减小。

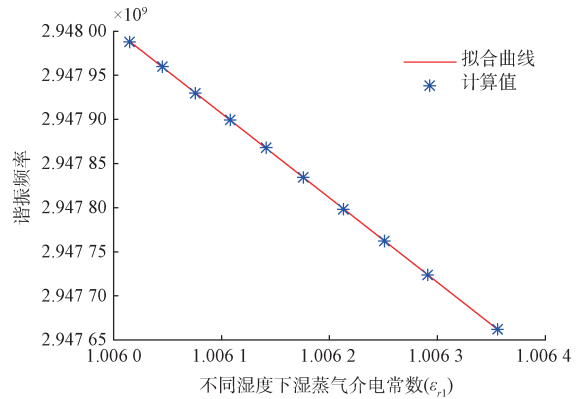


图2 谐振频率与湿蒸汽介电常数关系曲线

Fig.2 Relationship curve between resonance frequency and dielectric constant of wet steam

为了确定谐振器的结构参数,通过 MATLAB 计算分别讨论样本厚度、基质厚度和基质介电常数对谐振频偏的影响。湿度每变化1%的频率偏移量越大,说明谐振器对湿度变化更灵敏,测量的准确度越高,得到的湿度精度也越高。贴片尺寸是由工作频率确定的。由于当工作波长大于8 cm时,在一定温度下,复介电常数实部不随频率变化^[9],因此,选择工作频率为3 GHz。根据文献[15,17],当工作频率为3 GHz时,计算得到微带贴片的尺寸为 $W = 50$ mm, $L = 44$ mm。

3.1 样本厚度 h_{sam} 的设计

选定参数:基质厚度 $h_{base} = 1$ mm,贴片的长度 $L = 44$ mm,宽度为 $W = 50$ mm,基质的介电常数 $\epsilon_{r2} = 2.2$ 。在不同的样本厚度 h_{sam} 下,当湿蒸汽湿度发生变化即样本的介电常数 ϵ_{r1} 发生改变时,分别进行计算,得到相应的谐振频率,并对数据进行拟合,得到湿度每变化1%,谐振频率的偏移量如图3所示。

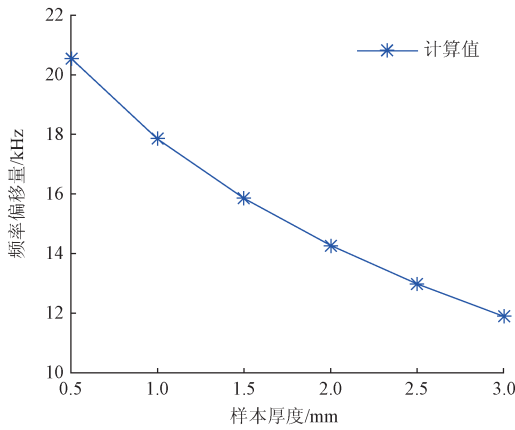


图3 不同样本厚度下湿度变化引起的频率偏移量
Fig. 3 Frequency offset caused by wetness variation under different sample thickness

由图3可知,随着样本厚度的增大,频率随湿度变化产生的频偏减小,因此样本厚度越小越好。但当厚度减小到 $h_{sam} = 0.5$ mm 时,加工制造困难,若取 $h_{sam} = 1$ 和 1.5 mm 时,由于待测样本的空间变小导致测量结果误差偏大。基于以上考虑,待测基质厚度 h_{sam} 选取为 2 mm,这样一方面易于加工制造,另一方面也可以为待测样本提供足够的空间从而保证结果的准确性。

3.2 基质厚度 h_{base} 的设计

当选定参数:样本空厚度 $h_{sam} = 2$ mm,贴片的长度 $L = 44$ mm,宽度为 $W = 50$ mm,基质的介电常数 $\epsilon_r = 2.2$ 时,不同的基质层厚度, h_{base} 湿度每变化 1%,谐振频率的偏移量,如图4所示。

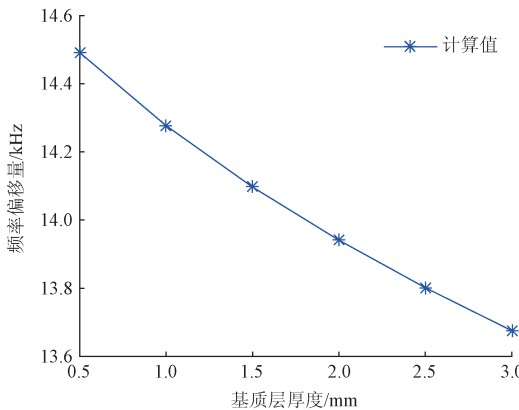


图4 不同基质厚度下湿度变化引起的频率偏移量
Fig. 4 Frequency offset caused by wetness variation under different base thickness

由图4可知,当基质厚度 h_{base} 增大时,谐振频率随介电常数变化产生的频偏减小,因此,应选取较小的基质厚度。同样,基于加工制造的考虑,基质厚度 h_{base} 应大于 0.5 mm。

3.3 基质材料的选择

当选定参数:样本厚度 $h_{sam} = 2$ mm,基质厚度 $h_{base} = 1$ mm,贴片的长度 $L = 44$ mm,宽度为 $W = 50$ mm,当改变基质的相对介电常数 ϵ_r ,湿度每变化 1%,谐振频率的偏移量如图5所示。

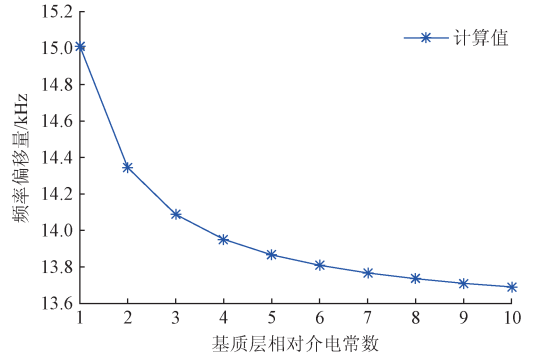


图5 不同基质介电常数下湿度变化引起的频率偏移量
Fig. 5 Frequency offset caused by wetness variation under different dielectric constant of base

由图5可得,基质层相对介电常数 ϵ_r 在 1 ~ 10 的变化,相对介电常数越小,谐振器对湿度的变化反应更灵敏,频偏量越大,因此应选用低介电常数的介质。在实际中,由于基板与湿蒸汽相接触,因此,基板应该选择具有低吸水性特点的材料,以保证在不同湿度的湿蒸汽环境中,避免基质介电常数的变化对谐振器谐振频率产生影响。基板采用 Rogers RT/duroid 5880,它具有非常低的吸水特性,适用于高湿度环境,并且具有低介电损耗,相对介电常数为 2.2。

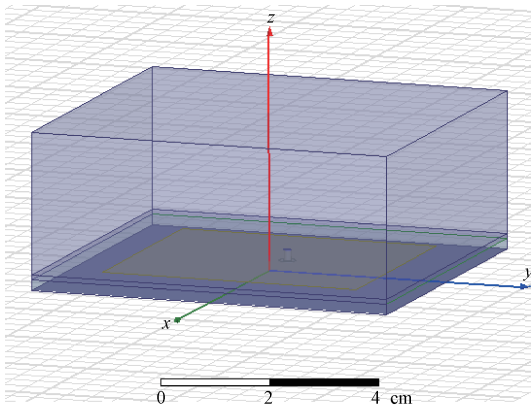
4 微带贴片谐振器仿真

基板选用 Rogers RT/duroid 5880,相对介电常数为 2.2,贴片材料为铜,设计参数如表2所示,分别在 HFSS 和 CST 软件下进行仿真。图6所示为 HFSS 电磁仿真模

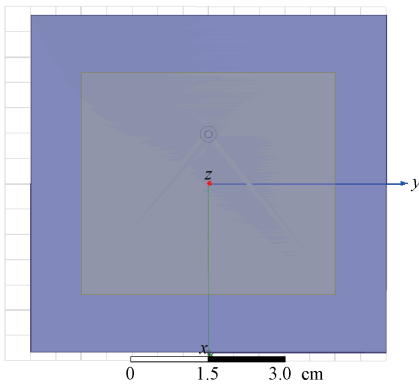
表2 倒置微带贴片谐振器的设计参数

Table 2 Design parameters of inverted microstrip patch resonator (mm)

参数	数值
贴片长度 L	44
贴片长度 W	50
贴片厚度 t	0.035
接地板长度 L_g	66.8
接地板长度 W_g	69.9
样本层厚度 h_1	2
基质层厚度 h_2	0.787
同轴馈电内导体半径 d_1	0.7
同轴馈电外导体内半径 d_2	1.6



(a) 立体图
(a) Stereogram

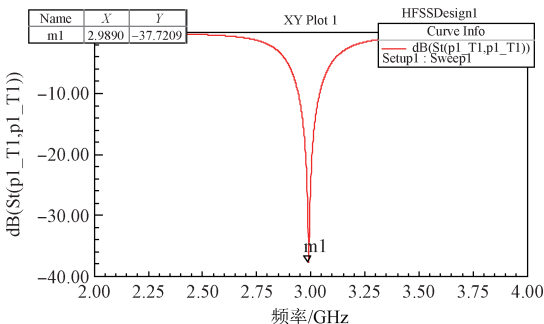


(b) 俯视图
(b) Top view

图6 微带贴片谐振器 HFSS 模型

Fig.6 HFSS model of microstrip patch resonator

型,谐振器采用同轴馈电,在如图所示的坐标系下,通过 HFSS 优化设计,确定了馈点所在位置(-9.74 mm, 0 mm, 0 mm),使谐振器的输入阻抗等于 50 Ω,实现 50 Ω 馈电线的匹配。S 参数仿真结果如图 7(a) 所示。当湿蒸汽的介电常数发生变化时,相应的谐振频率如表 3 所示。采用相同结构参数,在 CST 软件进行建模仿真, S 参数仿真结果如图 7(b) 所示,不同湿度蒸汽下测量的谐振频率如表 3 所示。



(a) HFSS

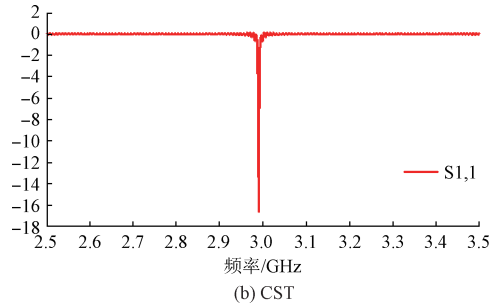


图7 S 参数仿真结果

Fig.7 Simulation results of S parameters

表3 不同介电常数下的谐振频率

Table 3 Resonant frequency under different dielectric constant

ϵ_{r1}	谐振频率 f_r /GHz	
	HFSS 仿真结果	CST 仿真结果
1.006 015	2.989 790	2.990267
1.006 045	2.989 753	2.990 231
1.006 076	2.989 716	2.990 195
1.006 108	2.989 676	2.990 155
1.006 141	2.989 636	2.990 115
1.006 176	2.989 593	2.990 075
1.006 213	2.989 548	2.990 030
1.006 251	2.989 502	2.989 985
1.006 291	2.989 453	2.989 935
1.006 356	2.989 373	2.989 860
拟合曲线方程	$f_r = -1.221 8\epsilon_{r1} + 4.219 0$	$f_r = -1.196 5\epsilon_{r1} + 4.193 9$

由表3 结果可知,无论采用 HFSS 仿真还是 CST 仿真,当湿蒸汽通过谐振器的样本层时,谐振频率约为 3 GHz。谐振频率随湿蒸汽不同湿度时对应的介电常数成负线性变化,当湿度变化 1% 时,即介电常数变化 1.5×10^{-5} ,谐振频率的偏移量分别为 18.3 和 17.9 kHz,约为 18 kHz,而微带缝隙谐振器频偏约为 5 kHz^[8],倒置微带贴片谐振器的频偏约为微带缝隙谐振器频偏的 3.6 倍。因此,采用倒置微带贴片谐振器,能够增大湿蒸汽对谐振器谐振频率的影响,增加了谐振器的灵敏性,使汽轮机蒸汽湿度测量更准确。HFSS 仿真结果通过数据拟合,得到介电常数与谐振频率之间的关系式:

$$\epsilon_{r1} = -0.818 4 f_r + 3.453 0 \quad (12)$$

通过测量湿蒸汽通过谐振器样本空间时的谐振频率,再由式(12)可以计算出对应的介电常数,从而实现湿蒸汽湿度值的间接测量。

5 结论

蒸汽湿度的变化导致介电常数的变化,介质层介电常

数的变化使谐振器的谐振频率产生变化。因此,本文提出采用一种倒置微带贴片谐振器,将蒸汽湿度的变化反应为样本基质介电常数的变化,通过测量微带贴片谐振器的谐振频率,实现了汽轮机湿蒸汽湿度的准确在线测量。

1)通过微带贴片谐振器的原理分析,采用 MATLAB 进行了数值计算,讨论了样本厚度、基质厚度和基质介电常数对谐振器由于湿度变化产生频偏的影响,确定了倒置微带贴片谐振器的结构参数。

2)分别在 CST 和 HFSS 软件中对倒置微带贴片谐振器进行了仿真,仿真结果表明,谐振频率与湿蒸汽的介电常数存在负线性关系,蒸汽湿度每变化 1%,谐振器频偏约为 18 kHz。

3)通过曲线拟合,给出了湿蒸汽介电常数与谐振频率之间的关系式,验证了微带贴片谐振器在线测量汽轮机湿度方法的可行性,对汽轮机湿度测量系统的小型化设计有着很好的借鉴和参考价值。

参考文献

- [1] 宁德亮,高雷,刘新全. 流动蒸汽湿度测量方法的研究与比较[J]. 热能动力工程,2009,24(2):149-153.
NING D L, GAO L, LIU X Q. Study and comparison of flowing-steam wetness measurement methods[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(2): 149-153.
- [2] 张淑娥,赵君超,李永倩,等. 空气湿度微波谐振腔测量方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(2):27-32.
ZHANG SH E, ZHAO J CH, LI Y Q, et al. Method for air humidity measurement based on microwave resonant cavity[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 27-32.
- [3] 黄竹青,曹小玲,杨继明,等. 基于 CCD 的蒸汽湿度及水滴直径测量[J]. 光电工程,2010,37(4):39-43.
HUANG ZH Q, CAO X L, YANG J M, et al. Application of CCD in measuring steam moisture and droplet size [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(4): 39-43.
- [4] 张淑娥,熊华. 谐振腔测量蒸汽湿度不确定性分析改进[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2007,34(3):22-26.
ZHANG SH E, XIONG H. Error analysis and improvement of microwave resonant cavity method in steam turbine exhaust wetness measurement[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(3): 22-26.
- [5] ZHANG SH E, XIA Q Y, XIONG H, et al. Wetness measurement theory based on microwave differential technique [C]. 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), IEEE, 2009:579-584.
- [6] 韩中合,钱江波,田松峰. 在线测量汽轮机排汽湿度的微波谐振腔结构优化[J]. 中国电机工程学报,2009,29(26):1-6.
HAN ZH H, QIAN J B, TIAN S F. Structure optimizing of microwave resonator for steam wetness online measuring [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26): 1-6.
- [7] 钱江波,韩中合. 谐振腔微扰技术测量湿蒸汽两相流的理论分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(26):79-85.
QIAN J B, HAN ZH H. Theoretical analysis of cavity perturbation techniques for measuring wet steam two-phase flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(26): 79-85.
- [8] 张淑娥,成雪松,孙景芳. 微带缝隙实现汽轮机蒸汽湿度测量的研究[J]. 华北电力大学学报,2016,43(1):99-103,110.
ZHANG SH E, CHENG X S, SUN J F. Study on turbine wetness measurement implementation by microstrip slot[J]. Journal of North China Electric Power University, 2016, 43(1): 99-103, 110.
- [9] 钱江波,韩中合,张美凤. 汽轮机内湿蒸汽两相流介电性质研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(32):100-106.
QIAN J B, HAN ZH H, ZHANG M F. Study on dielectric properties of wet steam in turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(32): 100-106.
- [10] VERMA A K, NASIMUDDIN, OMAR A S. Microstrip resonator sensors for determination of complex permittivity of materials in sheet, liquid and paste forms[J]. IEEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation, 2005, 152(1): 47-54.
- [11] 何存富,闫天婷,宋国荣,等. 微带贴片天线应变传感器优化设计研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(2):361-367.
HE C F, YAN T T, SONG G R, et al. Design and optimization of a strain sensor based on rectangular microstrip patch antenna [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 361-367.
- [12] TATA U, HUANG H, CARTER R L, et al. Exploiting a patch antenna for strain measurements[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(1):1-7.
- [13] WOLFF I, KNOPPIK N. Rectangular and circular microstrip disk capacitors and resonators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1974, 10(22): 857-864.
- [14] WAN CH H, HOORFAR A. Improved design equations

for multilayer microstrip lines[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 2000, 10(6): 223-224.

[15] 邱玲,姚振东,刘语嫣. 宽带微带天线阵的研究与设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(9): 26-30.

QIU L, YAO ZH D, LIU Y Y. Research and design of broadband micro-strip antenna array [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(9): 26-30.

[16] 王燕燕,姜弢,李迎松. 基于缺陷微带线结构的三阻带滤波器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 645-652.

WANG Y Y, JIANG T, LI Y S. Research on a triple stop-band filter based on defected micro-strip structure[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(4): 645-652.

[17] 张宁,张霞. 基于通信卫星的非对称圆环毫米波微带天线[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(5): 79-82.

ZHANG N, ZHANG X. Asymmetric ring millimeter-wave microstrip antenna based on communications satellite[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(5): 79-82.

作者简介



孙景芳, 1982 年出生, 2004 年于华北电力大学获得学士学位, 2006 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为华北电力大学讲师, 主要研究方向为微波测量与传感技术。

E-mail: sunjingfang19@126.com

Sun Jingfang was born in 1982, received

B. Sc. from North China Electric Power University in 2004, and M. Sc. from Harbin Institute of Technology in 2006, respectively. Now she is lecturer in North China Electric Power University. Her main research interest includes microwave measurement and sensing technique.



李永倩, 1958 年出生, 分别在 1982 年、1988 年于天津大学获得学士学位和硕士学位, 2003 年于日本群馬大学获得博士学位, 现为华北电力大学教授, 主要研究方向为光纤通信与传感、微波工程与传感。

Li Yongqian was born in 1958, received B. Sc. M. Sc. from Tianjin University in 1982 and 1988, and Ph. D. from Gunma University, Japan, in 2003, respectively. Now he is professor in North China Electric Power University. His main research interest includes optical fiber communication and sensing, microwave engineering and sensing.



张淑娥, 1964 年出生, 分别在 1985 年、1988 年于西安电子科技大学获得学士学位和硕士学位, 现为华北电力大学副教授, 主要研究方向为光纤通信与传感、微波工程与传感。

Zhang Shue was born in 1964, received B. Sc. and M. Sc. from Xidian University in 1985 and 1988, respectively. Now she is associate professor in North China Electric Power University. Her main research interest includes microwave measurement and sensing technique.