

风力发电机自循环蒸发内冷系统稳定性的研究

王海峰 李旺 顾国彪 沈俊 滕启治

Static bifurcation analysis of natural circulation inner evaporative cooling system in wind turbine

Wang Hai-Feng Li Wang Gu Guo-Biao Shen Jun Teng Qi-Zhi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 030501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.030501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于新曝光冲突性消息的网络舆论逆转研究

Newly exposed conflicting news based network opinion reversal

物理学报.2016, 65(3): 030502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030502>

考虑谣言清除过程的网络谣言传播与抑制

Propagation and inhibition of online rumor with considering rumor elimination process

物理学报.2015, 64(24): 240501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.240501>

一种基于用户相对权重的在线社交网络信息传播模型

An information spreading model based on relative weight in social network

物理学报.2015, 64(5): 050501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050501>

推荐重要节点部署防御策略的优化模型

Recommendation of important nodes in deployment optimization model of defense strategy

物理学报.2015, 64(5): 050502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050502>

基于平均场理论的微博传播网络模型

Microblog propagation network model based on mean-field theory

物理学报.2014, 63(24): 240501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240501>

风力发电机自循环蒸发内冷系统稳定性的研究*

王海峰^{1)†} 李旺¹⁾ 顾国彪¹⁾ 沈俊²⁾ 滕启治³⁾

1)(中国科学院电工研究所, 北京 100190)

2)(中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

3)(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

(2015年8月17日收到; 2015年11月17日收到修改稿)

自循环蒸发内冷系统的冷却效率高, 可以实现无泵自循环, 运行安全可靠, 基本免维护, 因此适合在大型风力发电机中使用. 蒸发内冷系统的稳定性对风力发电机的安全运行十分重要, 本文基于非线性分岔理论及其数值延拓法, 对自循环蒸发内冷系统应用于风力发电机的静态稳定性进行了深入研究. 获得了系统静态分岔解图, 分析了系统演化特性, 同时分析了系统分岔现象的参数效应. 搭建了实验平台, 通过实验观测到了自循环蒸发内冷系统的静态分岔现象, 验证了理论计算的正确性.

关键词: 风力发电, 蒸发冷却, 自然循环, 稳定性

PACS: 05.10.-a, 05.45.-a, 05.45.Pq

DOI: 10.7498/aps.65.030501

1 引言

电力系统是国家经济的命脉, 大型发电机是电力系统的“心脏”. 大型发电机(汽轮发电机、水轮发电机)功率巨大(最大到百万千瓦), 发热量巨大, 热负荷集中, 其冷却技术一直是影响其安全性、稳定性的关键. 目前, 主要冷却技术为空气冷却(空冷)和高压去离子水冷却(水冷). 空冷冷却效率较差, 均匀性较差; 水冷附加设备多, 工作压力大, 存在泄漏和堵塞隐患, 这些都影响了大型发电机的进一步发展. 我国自主创新的蒸发冷却技术, 采用高绝缘性的液体介质, 利用相变传热的原理, 对大型发电机冷却, 具有无泵自循环、冷却效率高、运行安全可靠、基本免维护的优点^[1], 大大提高了大型发电机的运行安全性和稳定性, 已在我国青海李家峡、陕西火石岩等水电站成功应用近二十年, 并于2012年在世界最大的水轮发电机—三峡700 MW水轮发电机上成功应用, 投入商业运行.

自循环蒸发内冷系统同样适用于风力发电机.

大型风力发电机由于塔架安装高度高, 并且安装地点较为分散, 安装维护较为困难. 这就要求发电机自身体积重量小, 维护量小. 蒸发内冷发电机的特点能够满足风力发电的特殊要求, 并且利用风力发电机与水平方向 3° — 5° 的夹角实现冷却系统的自循环^[2]. 由于两相自然循环系统中两相阻力与浮升力具有非线性的关系, 当回路系统工况、几何拓扑结构、运行环境等发生变化时, 有可能出现系统运行不稳定, 引发系统参数的剧烈波动. 冷却系统的不稳定会导致局部过热甚至烧毁, 对系统带来巨大的安全隐患. 因此, 自循环蒸发内冷系统应用于风力发电机时, 需要对其稳定性进行研究.

目前, 在反应堆热工设计方面的两相流动稳定性研究较多. 1973年, Boure等^[3]将其分为静态不稳定和动态流动不稳定; 1985年, Ramos等^[4]指出了静态分岔现象; 王建军等^[5]在试验中观测到了低干度条件下的自然循环流量飘移现象; Knaani和Zvirin^[6]得到了系统的多静态解; 姚伟等^[7]基于非线性动力学理论对两相自然循环系统的不稳定现象进行了理论和试验探索; 匡波等^[8]研究了高干度

* 国家自然科学基金(批准号: 51177157)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wanghf@mail.iee.ac.cn

下自然循环系统的静态分岔特性; 闫静^[2]初步研究了风力发电机自循环蒸发内冷系统中的稳定问题. 现有文献尚无采用非线性分析的方法对风力发电机的自循环蒸发内冷系统的稳定性进行研究. 本文基于非线性分岔理论^[9,10]及其数值延拓法, 采用均相模型^[11,12], 深入研究了风力发电机自循环蒸发内冷系统的静态稳定性, 获得了该系统的两相自然循环静态分岔图, 分析了系统演化特性, 同时分析了系统分岔现象的参数效应. 搭建了实验平台, 通过实验验证了小倾角自然循环系统的静态分岔现象. 本文的研究工作可为风力发电机蒸发内冷系统的优化设计和安全运行提供理论基础.

2 风力发电机蒸发内冷系统建模

2.1 风力发电机蒸发内冷系统工作原理

与水轮发电机的立式冷却系统、汽轮发电机的水平冷却系统不同, 风力发电机的冷却系统与水平方向成 $3^\circ-5^\circ$ 的倾斜角. 因为在风力发电机组运行过程中, 当风轮叶片旋转至支撑塔筒前方时, 由于风力的作用, 叶片会向塔筒弯曲, 假如叶片与塔筒之间的距离过小, 就会造成刮蹭, 损坏叶片, 这种现象称为“塔筒效应”. 为了避免“塔筒效应”, 将机舱设计成水平上仰 $3^\circ-5^\circ$ 角, 如图1所示. 由于这个小倾斜角的存在, 为汽化介质提供了相对畅通的上升通道, 不易出现水平管路中的严重分层现象, 从而使得实现自循环成为可能.

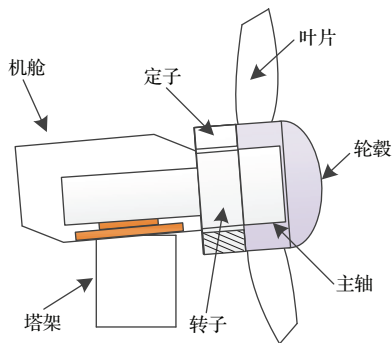


图1 直驱式风力发电机结构示意图

Fig. 1. Direct-driven wind power generator.

风力发电机蒸发内冷系统与水平面成一个小倾斜角度 θ 布置, 如图2所示, 整个冷却系统由冷凝器、回液管、空心铜导体和集气管等部件组成. 系统的工作原理: 当风力发电机负载运行时, 定子绕组中流过电流, 产生铜损耗发热. 定子绕组由空心

和实心铜导线按一定比例组成, 空心导体内灌满冷却介质, 冷却介质吸收热量, 温度逐渐地升高. 当冷却介质的温度上升到介质所处位置的饱和温度时发生相变汽化, 利用较高的潜热带走热量. 冷却介质主流发生相变的点称为蒸发起始点, 蒸发起始点之前介质为液相, 之后介质为气液两相. 由于介质在液相时的密度大于气液两相, 在重力的作用下密度差形成了流动压头, 流动压头能够克服循环回路中的阻力, 从而维持系统循环. 空心导体中的气液两相混合物进入到冷凝器中, 被二次冷却的冷却水冷凝成液态, 回流到回液管中, 又开始下一次的循环.

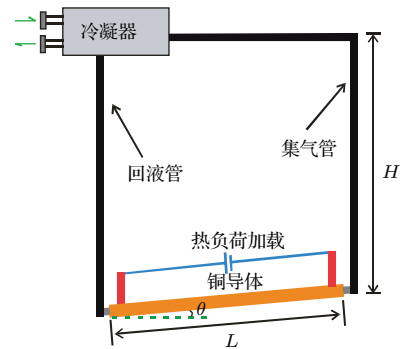


图2 风力发电机倾斜自循环蒸发内冷系统结构示意图

Fig. 2. Structure of natural circulation inner evaporative cooling system in wind turbine.

2.2 小倾角自循环蒸发内冷系统建模

当系统处于平衡状态时, 介质在流动通道的各个截面的质量流量均相等, 将其记为 m , 单位 kg/s . 在自然循环系统中, 质量流量 m 并不是独立变量(这一点与强迫循环系统不同), 必须通过系统动阻力平衡方程组的求解来给出. 系统动阻力平衡方程组如下^[12]:

$$F(m, Q) = F_{\text{drive}}(m, Q) - F_{\text{resis}}(m, Q) = 0, \quad (1)$$

式中, Q 为导体的热负荷, 单位 W ; $F_{\text{drive}}(m, Q)$ 为系统驱动力; $F_{\text{resis}}(m, Q)$ 为系统阻力.

1) 系统驱动力

当系统运行时, 冷却介质在空心导体中被加热至饱和温度, 从而汽化产生气体在蒸发点之后形成气液两相混合物. 由于液态介质的密度大于气液两相混合介质的密度, 因此在重力的作用下形成了系统的驱动力, 驱动系统实现自循环. 系统驱动力的计算式如下^[2,12]:

$$F_{\text{drive}}(m, Q) = \rho_{\text{in}}g(H + L \sin \theta) - \bar{\rho}_l g L_1 \sin \theta - \bar{\rho}_{\text{tp}}gH - \bar{\rho}_{\text{tp}}g L_{\text{th}} \sin \theta, \quad (2)$$

式中, θ 为空心导体与水平方向的夹角; H 为冷凝器高度; L 为空心导体的总长度; L_1 为空心导体中单相段的长度, $L_1 = m(H_{\text{sat}} - H_{\text{in}}) L/Q$, L_{th} 为两相段长度且有 $L = L_{\text{th}} + L_1$; H_{in} 为介质在入口温度下的实际焓; H_{sat} 为介质在出口温度下的饱和液相焓。

2) 系统阻力

系统循环回路中的阻力包括: 回液管中单相流动阻力; 空心导体中单相段的单相流动阻力、两相段的两相流动阻力; 集气管中的两相流动阻力; 加速压降. 系统自循环回路阻力计算公式如下 [2,12]:

$$F_{\text{resis}}(m, Q) = \frac{2fm^2}{DA^2\rho_{\text{in}}}(H + L \sin \theta) + \frac{2\bar{f}_1m^2}{DA^2\bar{\rho}_1}L_1 + \frac{2\bar{f}_{\text{tp}}m^2}{DA^2\bar{\rho}_{\text{tp}}}L_{\text{th}} + \frac{2\bar{f}_{\text{tp}}m^2}{DA^2\bar{\rho}_{\text{tp}}}H + \frac{m^2}{A^2}\left(\frac{1}{\rho_g} - \frac{1}{\rho_l}\right)xe, \quad (3)$$

式中, f 为回液管内介质的流动摩擦系数; \bar{f}_1 为空心导体单相段内介质的流动摩擦系数; \bar{f}_{tp} 为空心导体两相段内介质的流动摩擦系数; \bar{f}_{tp} 为集气管内介质的流动摩擦系数; ρ_l 为介质的液相密度; ρ_g 为介质的气相密度; D 为空心铜导体的水力直径; A 为空心截面面积, 且 $A = \pi(D/2)^2$. xe 为出口含气率(干度), 其计算式为

$$xe = \frac{Q}{mR_{\text{out}}} - \frac{H_{\text{sat}} - H_{\text{in}}}{Q}, \quad (4)$$

式中, $R_{\text{out}}(\text{J/kg})$ 为出口处介质的汽化潜热. 而系统出口空泡率 α 与干度 xe 的关系为

$$\alpha = \frac{\rho_l xe}{\rho_l xe + \rho_g(1 - xe)}. \quad (5)$$

介质的流动摩擦系数 f 的计算方法: 若管内流动为层流 ($Re < 2000$), $f = 16/Re$; 若管内流动为湍流 ($Re \geq 2000$), $f = 0.079Re^{-0.25}$.

3 系统的稳定性分析

3.1 系统的分岔图解与稳定性

分岔图是研究两相自然循环系统非线性现象的有效手段, 其构造方法是以系统的某个状态变量作为分岔图的一维坐标, 另一维坐标则对应分岔参数的变化. 通过分岔图可以清楚地观测到系统随分岔参数的变化而发生的动态特性的改变.

自循环系统的基本参数: 空心导体长度 $L = 2 \text{ m}$, 冷凝器高度 $H = 2 \text{ m}$, 水力直径 $D =$

4.43 mm, 入口欠热度为 15 K, 倾斜角 $\theta = 5^\circ$, 以系统质量流量 m 为状态变量, 加热负荷 Q 为分岔参数, 采用非线性数值延拓法, 计算出系统的分岔图解, 如图 3 所示.

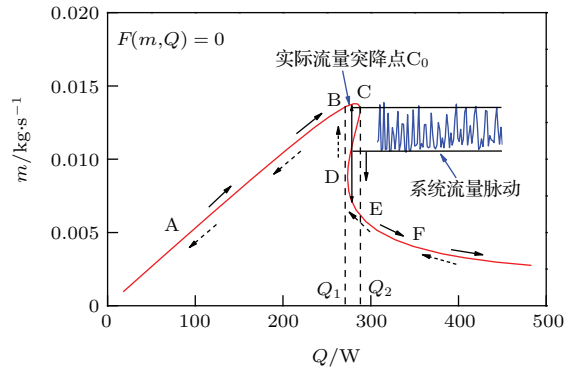


图 3 风力发电机自循环蒸发内冷系统静态分岔曲线
Fig. 3. Static bifurcation diagram of natural circulation inner evaporative cooling system in wind turbine.

图 3 中, C 点和 D 点为分岔点, 对应的热负荷分别为 Q_2 和 Q_1 . 在这两点上, 当系统热负荷 Q 有一微小的变化时, 解的拓扑结构(平衡解个数和位置)将发生改变. 在 $Q < Q_1$ 和 $Q > Q_2$ 负荷区间内, 系统存在唯一的平衡解, 存在于曲线的 AB 和 EF 段上, 此时系统的动力和阻力曲线只有一个交点. 而在 $Q_1 < Q < Q_2$ 区间内, 系统存在多个平衡解. 参考 Ledinegg 稳定性判别准则 [8], 在 $Q_1 < Q < Q_2$ 区间内, BC 和 DE 段上解稳定, CD 段上则为亚稳态(过渡状态). 给定一个 Q , 系统有可能运行于 BC 段或 DE 段上, 而具体在何种状态下运行则取决于它的历史运行状况和外部扰动情况.

但值得注意的是, BC 段和 DE 段的稳定是有条件的, 小扰动下系统的流量能够恢复原始状态, 保持稳定运行, 当扰动足够大时, 流量将发生突变. 假设初始时刻系统运行在 BC 段上, 此时系统的流量维持在一个较高的水平. 假设外部突然产生一个扰动, 使得系统流量从 BC 段下降到 CD 段, 则系统不能自行返回 BC 段的运行状态, 而是流量继续陡降到 DE 段的低质量流量状态, 反之亦然. 系统这种流量跃变的现象称为热虹吸流量突变不稳定性. 因此, 我们定义 BC 与 CD 和 DE 与 CD 的距离为系统的稳定裕度, 用以表征系统的稳定程度.

系统在 BC 上运行时, 质量流量 m 随 Q 的增大而增大, 系统散热能力随之增强, 但稳定裕度不断降低. 而当系统运行到 C 点时, 系统的稳定裕度变

为0, 即任意小的 Q 的增加都将导致 m 陡降到E点, 此时系统的流量非常低. 这种循环流量陡降在自循环蒸发内冷系统中是十分危险的, 很可能导致沸腾危机, 造成发电机绕组温度急剧升高, 甚至烧毁. 因此, 将C点对应的热负荷 Q 为自循环蒸发内冷系统的散热极限 Q_{\max} . 但是, 实际系统运行中C点是不可能到达的, 在C点之前存在 C_0 点, 当系统流量的脉动幅值超过 C_0 的稳定裕度时, 将发生流量的突变, 如图3所示.

3.2 系统的非线性本质

图4和图5分别是系统出口空泡率 α 和出口干度 xe 的静态分岔曲线. 从图中可以看到, 在A-B-C段系统的出口干度非常小, 几乎为零, 而其出口空泡率的增长却十分迅速, 到分岔点C处, α 的值约为0.7, 而 xe 几乎为零.

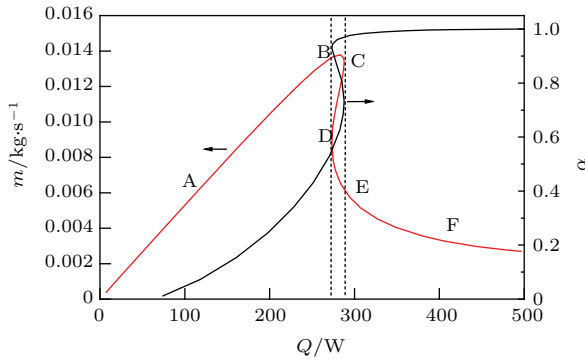


图4 出口空泡率的静态分岔曲线

Fig. 4. Bifurcation curve of outlet void fraction.

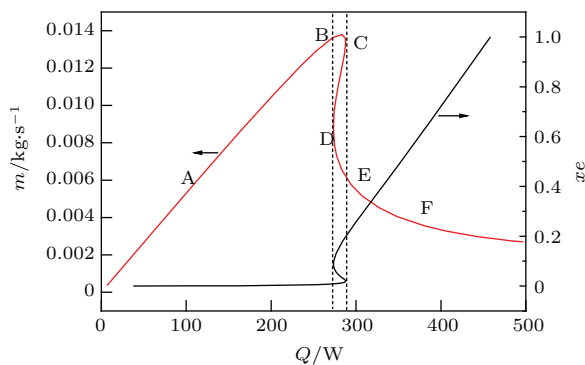


图5 出口含气率的静态分岔曲线

Fig. 5. Bifurcation curve of outlet quality.

出现上述情况是由于 α 与 xe 具有强非线性关系, 由图5可以看到, 当出口含气率 xe 处于很低水平的时候, α 迅速增大并接近于1. α 与 xe 的关系受介质液气密度比影响较大, 系统实际运行时, 出

口处介质的液态和汽态的密度比 $k = \rho_l/\rho_g \approx 142$, 此时 α - xe 非线性关系较强. 当介质的液气密度比 k 缩小(压力增大)时, α 随 xe 变化的曲线明显变得缓和, α - xe 的非线性关系减弱, 如图6所示.

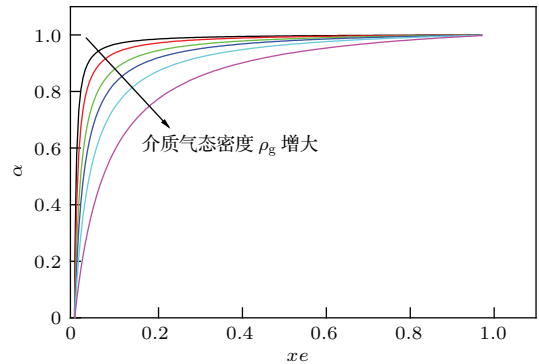


图6 (网刊彩色) 介质液气密度比 k 变化时, α - xe 的关系
Fig. 6. (color online) α - xe relationship at different density ratio k .

自循环系统的动力方程(2)中, $\bar{\rho}_l = (\rho_{in} + \rho_l)/2$, $\rho_{tp} = \alpha\rho_g + (1 - \alpha)\rho_l$, $\bar{\rho}_{tp} = (\rho_{tp} + \rho_l)/2$, $\bar{\rho}_{tpr} = \rho_{tp}$ 其中 ρ_l 为蒸发点处介质的液相密度, 将其全部代入, 有

$$F_{drive}(m, Q) = \rho_{in}g(H + L \sin \theta) - (\rho_{in} + \rho_l)gL_1 \sin \theta/2 - [\alpha\rho_g + (1 - \alpha)\rho_l]gH - \{\rho_l + [\alpha\rho_g + (1 - \alpha)\rho_l]\}gL_{th} \sin \theta/2. \quad (6)$$

由于 θ 角非常小, 认为 $\sin \theta \approx 0$ 忽略(6)式中含有 $\sin \theta$ 的项, 则有

$$F_{drive}(m, Q) = (\rho_{in} - \rho_l)gH + \alpha(\rho_l - \rho_g)gH. \quad (7)$$

ρ_{in} 与 ρ_l 的差值非常小, 则进一步有

$$F_{drive}(m, Q) = \alpha(\rho_l - \rho_g)gH. \quad (8)$$

由此可知, 系统驱动力与出口空泡率基本呈线性关系, 而由于 α - xe 的强非线性关系, 系统驱动力在低含气率条件下, 随加热功率产生剧烈的变化, 进而引发系统的静态分岔现象.

3.3 局部阻力系数对系统的影响

小倾角两相自然循环系统的运行特性受其运行参数、几何拓扑结构的影响. 本文着重分析单相以及两相局部阻力系数对系统分岔现象的影响.

系统的循环回路中, 不可避免地会产生局部阻力, 阻碍冷却介质的流动. 造成局部阻力的原因多种多样, 且十分复杂. 蒸发内冷系统中常见局部阻力为: 1) 突然扩张的管道; 2) 突然缩小的管道; 3)

弧形弯道. 文献 [1] 中给出了上述局部阻力阻力系数的计算方法.

图 7 所示是单相阻力系数对质量流量的静态分岔曲线的影响. 图中曲线变化趋势表明, 随着单相阻力系数的增大, 小倾角两相自然循环冷却系统的最大散热能力和最大质量流量显著减小. 另一点值得注意的是, 随着单相阻力系数的增加, 质量流量的分岔曲线变得平缓, 当单相阻力系数到达一定值后分岔曲线变为单值曲线, 流量突变消失. 也就是说, 增大系统的单相阻力, 可以改善其稳定性. 但值得注意的是, 单相阻力增加会降低系统的散热能力, 这在冷却系统设计时必须考虑. 因此, 单相阻力系数的选择, 需要综合考虑系统稳定性和散热能力.

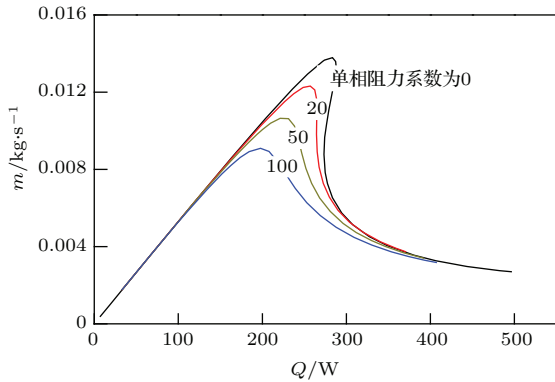


图 7 (网刊彩色) 单相阻力系数对质量流量的静态分岔曲线的影响

Fig. 7. (color online) Effect of local loss of single phase on the bifurcation diagram of mass flow rate.

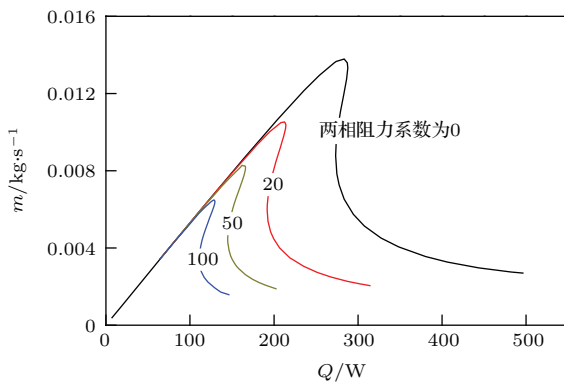


图 8 (网刊彩色) 两相阻力系数对质量流量的静态分岔曲线的影响

Fig. 8. (color online) Effect of local loss of two-phase on the bifurcation diagram of mass flow rate.

图 8 所示是两相阻力系数对质量流量的静态分岔曲线的影响. 图中曲线变化趋势表明, 随着两相阻力系数的增大, 小倾角两相自然循环冷却系统

的最大散热能力和最大质量流量显著减小, 同时稳定裕度也随之降低. 由此可见, 两相段局部阻力的增加, 不管是对冷却系统的散热能力还是运行稳定性, 都是极为不利的. 因此, 在小倾角两相自然循环冷却系统的设计和运行时, 应当尽量地减小两相段的局部阻力.

4 实验研究

图 9 所示为本文所采用的实验装置, 实验回路中主要包括: 外尺寸为 $11.2 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ (内孔尺寸 $7.7 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$), 长度为 2 m 的矩形空心铜导体、冷凝器、压力传感器、质量流量计、热电偶、常闭电磁阀等装置. 为了验证小倾角两相自然循环静态分岔的理论预测, 本文在该装置上进行了实验研究.

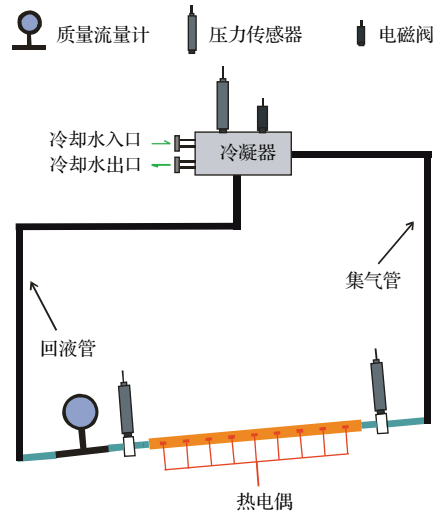


图 9 实验装置示意图

Fig. 9. Schematic diagram of experimental set-up.

自循环系统的循环流量 (m_V 为体积流量) 及铜导体表面温度 (选取测量点中温度最高的一点) 随加载负荷的变化情况, 如图 10 (a) — (f) 所示.

当加热功率较低时, 系统的循环流量存在大幅度的振荡现象, 空心铜导体作为被冷却对象, 其壁面温度也随循环流量的振荡而小幅地波动. 这是因为低加热功率所产生的热量不足以维持系统的持续大流量循环. 当循环流量低的时候, 系统的吸热能力不足以带走电流产生的全部热量, 因而铜导体的温度上升, 热量积蓄在铜导体内, 当温度上升到一定程度时介质开始大量蒸发, 空心导体中段时间内产生大量蒸汽, 从而形成大幅的流量增加. 此时,

由于冷却介质的瞬间汽化带走大量的热量, 铜导体的温度降低, 循环流量再次变小, 如此循环往复, 如图 10(a) 和图 10(b) 所示.

随着加热功率的增大, 系统逐渐维持较为稳定的循环, 此时冷却介质的循环流量有小幅的脉动, 而铜导体壁面温度较为平稳, 只有微小波动, 如图 10(c)–(e) 所示.

当加热功率进一步增大, 系统循环流量出现了较大幅度的下降, 空心铜导体内的传热出现了恶化, 出口干度迅速增大, 铜导体温度逐渐升高, 当加载电流达到 550 A 时, 铜导体的壁面温度达到了 110 多度, 而且还在继续升高, 如图 10(f) 所示, 为了避免实验设备的烧毁不得不停止负荷的加载.

图 10 显示了实验中质量流量随加热功率变化的趋势, 从图中可以看到, 随着加热功率 Q 的增大, 系统的质量流量 m 也逐渐增大, 当 Q 增大到一定值时, 流量出现陡降. 图中所示条件下, 流量突降点的加热功率约为 229 W. 这一现象验证了上文中的理论计算结果, 小倾角自然循环两相流中确实存在静态分岔现象.

图 11 显示了根据实验系统尺寸及运行工况计算的系统分岔曲线, 系统质量流量变化曲线的理论计算值与实验值对比, 二者的趋势符合较好. 从图中看到, 由于系统流量的脉动, 实际的流量突变并没有发生在理论的负荷极限点 C, 而是位于 B, C 点间的 C_0 点. 系统极限散热能力计算值 $Q_{\max} = 247$ W, 实验值为 229 W, 误差为 7.9%.

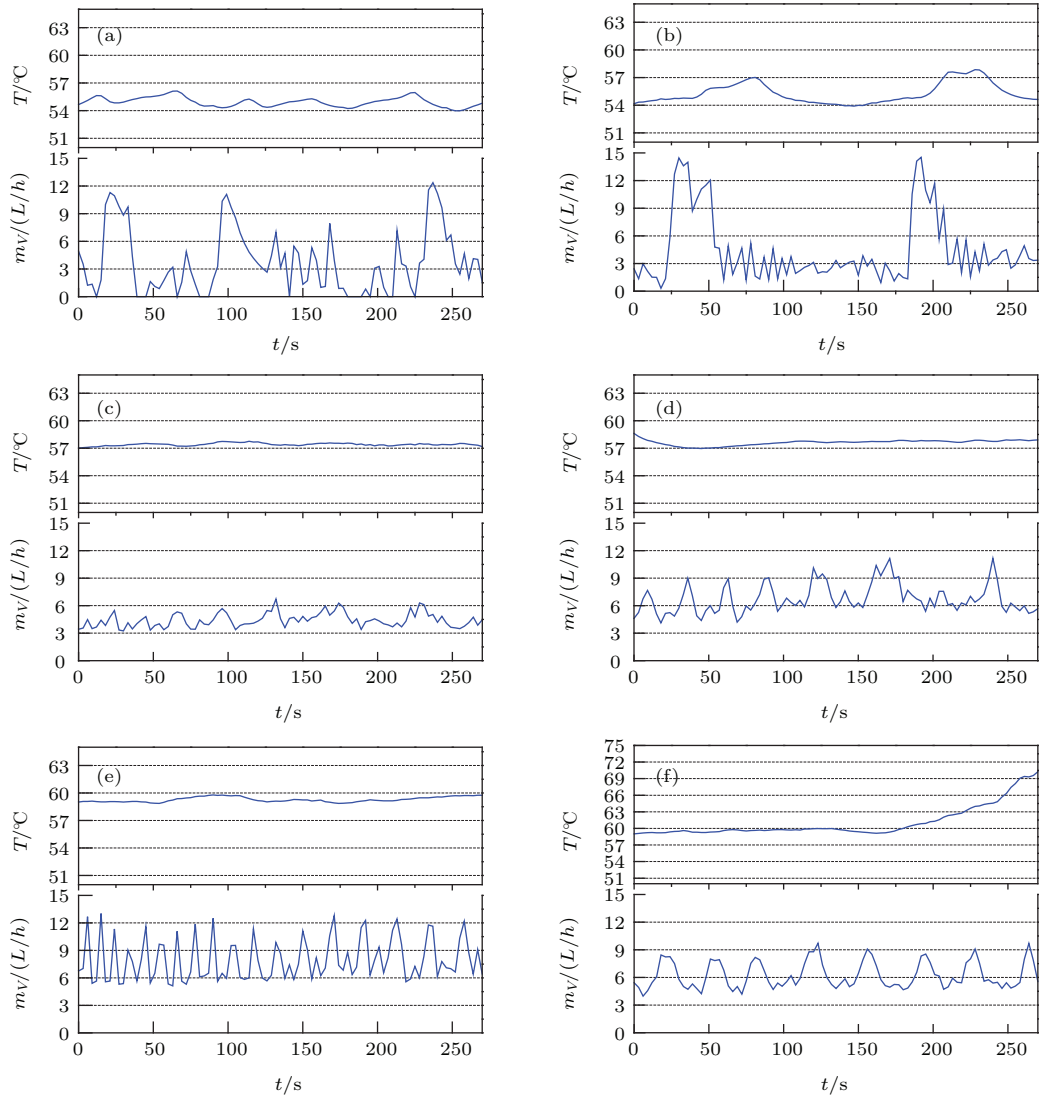


图 10 系统的循环流量及铜导体表面温度随热负荷的变化 (a) $Q = 55$ W; (b) $Q = 79$ W; (c) $Q = 141$ W; (d) $Q = 178$ W; (e) $Q = 229$ W; (f) $Q = 266$ W

Fig. 10. System circulation flow and copper conductor surface temperature according to the heat load: (a) $Q = 55$ W; (b) $Q = 79$ W; (c) $Q = 141$ W; (d) $Q = 178$ W; (e) $Q = 229$ W; (f) $Q = 266$ W.

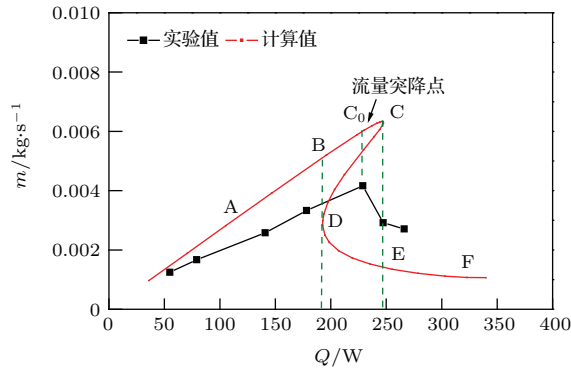


图 11 质量流量随加热功率变化计算值与实验值对比
 Fig. 11. Compare the change of calculated value with the experimental value according to heat load.

5 结 论

在系统动阻力平衡方程的基础上, 通过数值延拓法, 得到了基于均相模型描述的小倾角两相自然循环系统的静态分岔图解, 并以此为基础, 分析小倾角两相自然循环系统的演化特性. 对小倾角两相自然循环系统静态分岔现象的参数效应进行了研究, 分析了单相段和两相段局部阻力对系统静态分岔的影响, 为风力发电机蒸发内冷系统的优化设计和安全运行提供理论参考. 实验结果表明, 小倾角自然循环两相流动中确实存在静态分岔现象, 且 $m-Q$ 分岔曲线的理论预测曲线与实验曲线的趋势符合较好, 验证了理论分析的正确性.

参考文献

[1] Ruan L 2004 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences) (in

Chinese) [阮琳 2004 博士学位论文 (北京: 中国科学院电工研究所)]
 [2] Yan J 2013 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [闫静 2013 博士学位论文 (北京: 中国科学院电工研究所)]
 [3] Bouer J A, Bergles A E, Tong L S 1973 *Nucl. Engineer. Design* **25** 165
 [4] Ramos E, Sen M, Trevino C 1985 *Int. J. Heat Mass* **28** 1711
 [5] Wang J J, Yang X T, Jiang S Y 2007 *Acta Atom. Energy Sci. Technol.* **41** 180 (in Chinese) [王建军, 杨星团, 姜胜耀 2007 原子能科学技术 **41** 180]
 [6] Knaani A, Zvirin Y 1993 *Int. J. Multiphase Flow* **19** 1129
 [7] Yao W 2000 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University) (in Chinese) [姚伟 2000 博士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
 [8] Kuang B, Chen H, Hu Z H, Lu L L, Xu J J 2005 *J. Engineer. Thermophys.* **26** 967 (in Chinese) [匡波, 陈宏, 胡志华, 路柳柳, 徐继鋈 2005 工程热物理学报 **26** 967]
 [9] Liu H C, Wang Y, Su Z X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 240506 (in Chinese) [刘洪臣, 王云, 苏振霞 2013 物理学报 **62** 240506]
 [10] Wu J K, Zhou L W, Lu W G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 210202 (in Chinese) [吴科军, 周维维, 卢伟国 2012 物理学报 **61** 210202]
 [11] Lu Z Q 2002 *Two-phase Flow and Boiling Heat Transfer* (Beijing: Tsinghua University Press) p23 (in Chinese) [鲁钟琪 2002 两相流与沸腾传热 (北京: 清华大学出版社) 第 23 页]
 [12] Xu J A, Lu Z Q 2001 *Boiling Heat Transfer and Gas-Liquid Two-Phase Flow* (Beijing: Atomic Energy Press) p103 (in Chinese) [徐济鋈, 鲁钟琪 2001 沸腾传热和气液两相流 (北京: 原子能出版社) 第 103 页]

Static bifurcation analysis of natural circulation inner evaporative cooling system in wind turbine*

Wang Hai-Feng^{1)†} Li Wang¹⁾ Gu Guo-Biao¹⁾ Shen Jun²⁾ Teng Qi-Zhi³⁾

1) (Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

3) (School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 17 August 2015; revised manuscript received 17 November 2015)

Abstract

Wind power is one of the most attractive renewable clean energies under development at present. On a global scale, wind power generation development was very rapid in recent years. As the wind power generation tends to develop toward large-scale and offshore, the traditional cooling methods gradually expose their own shortcomings. As the large wind turbine installation tower is high, and the installation site is dispersed, the installation and maintenance of wind turbine generator are difficult. So, the generator is required to have a small weight and less maintenance. Self-circulation inner evaporative cooling system (SCIECS) has the following advantages: self-circulation without pump, high cooling efficiency, safe and reliable operation, and basically maintain-free, etc. The self-circulation of cooling system can be realized by the 3° – 5° between wind turbine generator and the horizontal direction, and it is very suitable for being used in a large-scale wind power generator. Owing to the intrinsic nonlinearity of two-phase self-circulation system, changes of operation condition and circuit topology in a large range may lead to an instability of the cooling system, causing the system parameters to severely change. The instability of the cooling system can cause the local overheating and even burning of the generator, which provides a huge security risk for the cooling system, thus threatening the safe and stable operation of the generator. The stability of SCIECS is very important for the safe operation of wind turbine. In this paper, static stability of the SCIECS in wind power generator is studied based on the nonlinear bifurcation analysis theory and its numerical continuation method. System static bifurcation diagram is obtained to analyze the evolution characteristics of the SCIECS. Parameter effect of the system static bifurcation is analyzed at the same time. In order to verify the theoretical prediction of the static bifurcation of the small-angle two-phase natural circulation, an experimental platform is built. Static bifurcation of the SCIECS is observed experimentally. The experimental results show that the static bifurcation phenomenon exists in the natural circulation two-phase flow of small angle, and the theoretically predicted m - Q bifurcation curves are in good agreement with the experimental curves, which verifies the correctness of the theoretical analysis.

Keywords: wind power, evaporative cooling, self-circulation, stability

PACS: 05.10.-a, 05.45.-a, 05.45.Pq

DOI: 10.7498/aps.65.030501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51177157).

† Corresponding author. E-mail: wanghf@mail.iee.ac.cn