



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116579091 A

(43) 申请公布日 2023. 08. 11

(21) 申请号 202310299227.X

(22) 申请日 2023.03.24

(71) 申请人 扬州大学

地址 225009 江苏省扬州市大学南路88号

(72) 发明人 杨帆 林智康 丁平 刘金生

舒雪辉 周广新

(74) 专利代理机构 南京禹为知识产权代理事务

所(特殊普通合伙) 32272

专利代理师 王晓东

(51) Int. Cl.

G06F 30/17 (2020.01)

G06F 30/28 (2020.01)

G06F 111/10 (2020.01)

G06F 113/08 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

权利要求书2页 说明书7页 附图2页

## (54) 发明名称

一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法及系统

## (57) 摘要

本发明属于泵站工程的技术领域,公开了一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法及系统,通过CFD技术对贯流泵装置进行仿真计算,结合工程实际,综合考虑运行时间因素对不同水位工况的贯流泵装置的叶轮叶片空蚀面积进行综合评估,避免了物理模型试验耗时长,费用高且无法给出叶轮叶片空蚀面积的缺点。该方法考虑了泵站实际多水位运行的情况,结合CFD技术对不同水位工况条件下叶轮的叶片空蚀面积进行配比计算,结合不同水位工况时泵装置运行时间,对贯流泵装置叶轮空蚀面积进行评估,预测结果更贴合工程实际。该方法简单,操作方便,易于被工程设计管理人员所掌握,不受测试设备等硬件条件的限制。



1. 一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法,其特征在于,包括:  
对贯流泵装置进行三维定常空化数值计算;  
基于数值计算结果预估不同水位工况条件下贯流泵装置叶轮的空蚀面积;  
根据不同水位工况运行时间及空蚀面积进行配比计算,对贯流泵装置的叶轮空蚀进行综合评估。

2. 如权利要求1所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法,其特征在于:所述三维定常空化数值计算,包括:

运用计算流体力学技术对所述贯流泵装置进行的整个流体条件进行仿真模拟。

3. 如权利要求2所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法,其特征在于:当所述仿真模拟各物理量的残差收敛精度均低于 $1.0 \times 10^{-5}$ ,且检测扬程的变化趋于定值时,该水位工况运行条件下泵装置数值计算满足收敛要求。

4. 如权利要求3所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法,其特征在于:根据泵装置三维定常空化数值计算的结果,确定不同水位工况条件下叶轮的叶片表面气相体积分数,所述气相体积分数表示为:

$$C_v = \frac{V_a}{V_t}$$

其中, $C_v$ 为气相体积分数, $V_a$ 为气相单独存在时的体积, $V_t$ 为气相和液相体积的和。

5. 如权利要求4所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法,其特征在于:气相体积分数在0以上的区域为发生空化的区域,气相体积分数0.8以上的区域为发生空蚀的区域。

6. 如权利要求5所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法,其特征在于:计算不同水位工况下空蚀比例系数 $k_i$ ,表示为:

$$k_i = \frac{S_{ki}}{S}$$

其中, $i$ 表示第 $i$ 个运行时间超过22小时的水位工况, $1 \leq i \leq b$ 且 $i$ 为整数, $b$ 为运行时间超过22小时的水位工况总数量, $S_{ki}$ 为第 $i$ 个运行时间超过22小时的水位工况条件下叶轮叶片表面发生空蚀的区域面积, $S$ 为叶轮叶片表面积, $k_i$ 为第 $i$ 个运行时间超过22小时的水位工况条件下的空蚀比例系数。

7. 如权利要求6所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法,其特征在于:计算贯流泵装置叶轮空蚀面积,表示为:

$$S_{ks} = S \times \frac{\sum_i^b k_i t_i}{T}$$

其中, $S_{ks}$ 为贯流泵装置叶轮预估空蚀面积, $t_i$ 为第 $i$ 个运行时间超过22小时的水位工况的运行时间, $T$ 为贯流泵装置各运行时间超过22小时的水位工况运行时间之和,表示为:

$$T = \sum_i^b t_i$$

8. 一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估系统,其特征在于,包括:

计算模块(101),对贯流泵装置进行三维定常空化数值计算;

预估模块(201),基于数值计算结果预估不同水位工况条件下贯流泵装置叶轮的空蚀面积;

评估模块(301),根据不同水位工况运行时间及空蚀面积进行配比计算,对贯流泵装置的叶轮空蚀进行综合评估。

9.一种计算设备,包括:

存储器和处理器;

所述存储器用于存储计算机可执行指令,所述处理器用于执行所述计算机可执行指令,该计算机可执行指令被处理器执行时实现权利要求1至7任意一项所述贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的步骤。

10.一种计算机可读存储介质,其存储有计算机可执行指令,该计算机可执行指令被处理器执行时实现权利要求1至7任意一项所述贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的步骤。

## 一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及泵站工程的技术领域,尤其涉及一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法及系统。

### 背景技术

[0002] 贯流泵装置因其特低扬程,大流量的特点被广泛的应用于平原地区的贯流泵站中。空蚀,又称汽蚀,是由于液流流道中的局部低压(低于该处温度下液体的饱和蒸汽压)使液体在该处汽化而引起大量微汽泡爆发性生长,微汽泡急剧生长成大气泡后随液流至压力高处突然溃灭,对流道壁面产生高达几百个大气压的冲击,造成壁面材料剥蚀的现象。贯流泵装置一般由进水流道、叶轮、导叶体和出水流道四个过流部件组成,叶轮部件易发生空蚀现象对叶轮造成损伤导致贯流泵装置水力性能的下降,甚至对贯流泵装置安全稳定运行造成威胁。对泵装置叶轮空化的评估方法主要有模型试验以及数值模拟两种,模型试验存在试验耗时长和费用高的缺点且无法满足泵装置叶轮空蚀面积评估的长时间不同水位运行的要求;当前采用数值模拟对叶轮空化进行数值计算并预测空化面积,但并未给出叶轮空蚀面积的预估方法,叶轮发生空化且需一定时间后发生空蚀,且往往忽略泵装置实际在不同水位工况条件运行的情况。

[0003] 为了有效地解决上述问题,本发明提出一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法,该方法结合数值模拟与工程实际,综合考虑泵装置在不同水位工况下运行的实际情况,能够合理有效地对叶轮空蚀损坏的面积进行评估,并且该方法简单可行,便于工程设计人员与泵站管理单位所掌握。

### 发明内容

[0004] 本部分的目的在于概述本发明的实施例的一些方面以及简要介绍一些较佳实施例。在本部分以及本申请的说明书摘要和发明名称中可能会做些简化或省略以避免使本部分、说明书摘要和发明名称的目的模糊,而这种简化或省略不能用于限制本发明的范围。

[0005] 鉴于上述现有存在的问题,提出了本发明。

[0006] 因此,本发明解决的技术问题是:现有技术无法考虑多水位运行的外界条件因素,以及存在操作复杂、耗时长以及受测试设备硬件条件限制的问题。

[0007] 为解决上述技术问题,本发明提供如下技术方案:

[0008] 第一方面,本发明实施例提供了一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法,包括:

[0009] 对贯流泵装置进行三维定常空化数值计算;

[0010] 基于数值计算结果预估不同水位工况条件下贯流泵装置叶轮的空蚀面积;

[0011] 根据不同水位工况运行时间及空蚀面积进行配比计算,对贯流泵装置的叶轮空蚀进行综合评估。

[0012] 作为本发明所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的一种优选方案,其中:所述三维定常空化数值计算,包括:

[0013] 运用计算流体力学技术对所述贯流泵装置进行的整个流体条件进行仿真模拟。

[0014] 作为本发明所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的一种优选方案,其中:当所述仿真模拟各物理量的残差收敛精度均低于 $1.0 \times 10^{-5}$ ,且检测扬程的变化趋于定值时,该水位工况运行条件下泵装置数值计算满足收敛要求。

[0015] 作为本发明所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的一种优选方案,其中:根据泵装置三维定常空化数值计算的结果,确定不同水位工况条件下叶轮的叶片表面气相体积分数,所述气相体积分数表示为:

$$[0016] \quad C_v = \frac{V_a}{V_t}$$

[0017] 其中, $C_v$ 为气相体积分数, $V_a$ 为气相单独存在时的体积, $V_t$ 为气相和液相体积的和。

[0018] 作为本发明所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的一种优选方案,其中:气相体积分数在0以上的区域为发生空化的区域,气相体积分数0.8以上的区域为发生空蚀的区域。

[0019] 作为本发明所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的一种优选方案,其中:计算不同水位工况下空蚀比例系数 $k_i$ ,表示为:

$$[0020] \quad k_i = \frac{S_{ki}}{S}$$

[0021] 其中, $i$ 表示第 $i$ 个运行时间超过22小时的水位工况, $1 \leq i \leq b$ 且 $i$ 为整数, $b$ 为运行时间超过22小时的水位工况总数量, $S_{ki}$ 为第 $i$ 个运行时间超过22小时的水位工况条件下叶轮叶片表面发生空蚀的区域面积, $S$ 为叶轮叶片表面积, $k_i$ 为第 $i$ 个运行时间超过22小时的水位工况条件下的空蚀比例系数。

[0022] 作为本发明所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的一种优选方案,其中:计算贯流泵装置叶轮空蚀面积,表示为:

$$[0023] \quad S_{ks} = S \times \frac{\sum_i^b k_i t_i}{T}$$

[0024] 其中, $S_{ks}$ 为贯流泵装置叶轮预估空蚀面积, $t_i$ 为第 $i$ 个运行时间超过22小时的水位工况的运行时间, $T$ 为贯流泵装置各运行时间超过22小时的水位工况运行时间之和,表示为:

$$[0025] \quad T = \sum_i^b t_i$$

[0026] 第二方面,本发明实施例提供了一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估系统,包括:

[0027] 计算模块,对贯流泵装置进行三维定常空化数值计算;

[0028] 预估模块,基于数值计算结果预估不同水位工况条件下贯流泵装置叶轮的面积;

[0029] 评估模块,根据不同水位工况运行时间及空蚀面积进行配比计算,对贯流泵装置的叶轮空蚀进行综合评估。

[0030] 第三方面,本发明实施例提供了一种计算设备,包括:

[0031] 存储器和处理器；

[0032] 所述存储器用于存储计算机可执行指令，所述处理器用于执行所述计算机可执行指令，当所述一个或多个程序被所述一个或多个处理器执行，使得所述一个或多个处理器实现如本发明任一实施例所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法。

[0033] 第四方面，本发明实施例提供了一种计算机可读存储介质，其存储有计算机可执行指令，该计算机可执行指令被处理器执行时实现所述贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法。

[0034] 本发明的有益效果：本发明提供的一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法及系统，通过CFD技术对贯流泵装置进行仿真计算，结合工程实际，综合考虑运行时间因素对不同水位工况的贯流泵装置的叶轮叶片空蚀面积进行综合评估，避免了物理模型试验耗时长，费用高且无法给出叶轮叶片空蚀面积的缺点。该方法考虑了泵站实际多水位运行的情况，结合CFD技术对不同水位工况条件下叶轮的叶片空蚀面积进行配比计算，结合不同水位工况时泵装置运行时间，对贯流泵装置叶轮空蚀面积进行评估，预测结果更贴合工程实际。该方法简单，操作方便，易于被工程设计管理人员所掌握，不受测试设备等硬件条件的限制。

## 附图说明

[0035] 为了更清楚地说明本发明实施例的技术方案，下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获得其它的附图。其中：

[0036] 图1为本发明一个实施例所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的整体流程图；

[0037] 图2为本发明一个实施例所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的系统架构图；

[0038] 图3为本发明一个实施例所述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的贯流泵装置叶轮叶片表面气相图。

## 具体实施方式

[0039] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂，下面结合说明书附图对本发明的具体实施方式做详细的说明，显然所描述的实施例是本发明的一部分实施例，而不是全部实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都应当属于本发明的保护的范畴。

[0040] 在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本发明，但是本发明还可以采用其他不同于在此描述的其它方式来实施，本领域技术人员可以在不违背本发明内涵的情况下做类似推广，因此本发明不受下面公开的具体实施例的限制。

[0041] 其次，此处所称的“一个实施例”或“实施例”是指可包含于本发明至少一个实现方式中的特定特征、结构或特性。在本说明书中不同地方出现的“在一个实施例中”并非均指同一个实施例，也不是单独的或选择性的与其他实施例互相排斥的实施例。

[0042] 本发明结合示意图进行详细描述,在详述本发明实施例时,为便于说明,表示器件结构的剖面图会不依一般比例作局部放大,而且所述示意图只是示例,其在此不应限制本发明保护的范围。此外,在实际制作中应包含长度、宽度及深度的三维空间尺寸。

[0043] 同时在本发明的描述中,需要说明的是,术语中的“上、下、内和外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。此外,术语“第一、第二或第三”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0044] 本发明中除非另有明确的规定和限定,术语“安装、相连、连接”应做广义理解,例如:可以是固定连接、可拆卸连接或一体式连接;同样可以是机械连接、电连接或直接连接,也可以通过中间媒介间接相连,也可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言,可以具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0045] 实施例1

[0046] 参照图1—2,为本发明的一个实施例,该实施例提供了一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法,其特征在于,包括:

[0047] S100:对贯流泵装置进行三维定常空化数值计算;

[0048] 更进一步的,三维定常空化数值计算,包括:

[0049] 运用计算流体力学技术对所述贯流泵装置进行的整个流体条件进行仿真模拟。

[0050] 当所述仿真模拟各物理量的残差收敛精度均低于 $1.0 \times 10^{-5}$ ,且检测扬程的变化趋于定值时,该水位工况运行条件下泵装置数值计算满足收敛要求。

[0051] S200:基于数值计算结果预估不同水位工况条件下贯流泵装置叶轮的空蚀面积;

[0052] 更进一步的,根据泵装置三维定常空化数值计算的结果,确定不同水位工况条件下叶轮的叶片表面气相体积分数,所述气相体积分数表示为:

$$[0053] \quad C_v = \frac{V_a}{V_t}$$

[0054] 其中, $C_v$ 为气相体积分数, $V_a$ 为气相单独存在时的体积, $V_t$ 为气相和液相体积的和。

[0055] 叶轮叶片表面气相体积分数在0以上的区域为发生空化的区域,依据在超声波空蚀试验中,叶轮常用材料(如:碳素结构钢、合金结构钢、不锈钢等)在承受22小时高强度空泡冲击后空蚀率基本趋于稳定,则将叶轮叶片表面气相体积分数0.8以上的区域为发生空蚀的区域。

[0056] S300:根据不同水位工况运行时间及空蚀面积进行配比计算,对贯流泵装置的叶轮空蚀进行综合评估。

[0057] 更进一步的,计算不同水位工况下空蚀比例系数 $k_i$ ,表示为:

$$[0058] \quad k_i = \frac{S_{ki}}{S}$$

[0059] 其中, $i$ 表示第 $i$ 个运行时间超过22小时的水位工况, $1 \leq i \leq b$ 且 $i$ 为整数, $b$ 为运行时间超过22小时的水位工况总数量, $S_{ki}$ 为第 $i$ 个运行时间超过22小时的水位工况条件下叶轮叶片表面发生空蚀的区域面积, $S$ 为叶轮叶片表面积, $k_i$ 为第 $i$ 个运行时间超过22小时的

水位工况条件下的空蚀比例系数。

[0060] 更进一步的,计算贯流泵装置叶轮空蚀面积,表示为:

$$[0061] \quad S_{ks} = S \times \frac{\sum_i^b k_i t_i}{T}$$

[0062] 其中, $S_{ks}$ 为贯流泵装置叶轮预估空蚀面积, $t_i$ 为第*i*个运行时间超过22小时的水位工况的运行时间, $T$ 为贯流泵装置各运行时间超过22小时的水位工况运行时间之和,表示为:

$$[0063] \quad T = \sum_i^b t_i$$

[0064] 上述为本实施例的一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的示意性方案。需要说明的是,该贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估系统的技术方案与上述的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的技术方案属于同一构思,本实施例中贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估系统的技术方案未详细描述的细节内容,均可以参见上述应用于贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的技术方案的描述。

[0065] 图2是本发明提供的一种贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估系统的结构示意图,本实施例可适用于贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的情况。

[0066] 参见图2,本实施例中贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估系统,包括:

[0067] 计算模块101,对贯流泵装置进行三维定常空化数值计算;

[0068] 预估模块201,基于数值计算结果预估不同水位工况条件下贯流泵装置叶轮的蚀面积;

[0069] 评估模块301,根据不同水位工况运行时间及空蚀面积进行配比计算,对贯流泵装置的叶轮空蚀进行综合评估。

[0070] 本实施例还提供一种计算设备,适用于贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法的情况,包括:

[0071] 存储器和处理器;存储器用于存储计算机可执行指令,处理器用于执行计算机可执行指令,实现如上述实施例提出的贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法。

[0072] 该计算机设备可以是终端,该计算机设备包括通过系统总线连接的处理器、存储器、通信接口、显示屏和输入装置。其中,该计算机设备的处理器用于提供计算和控制能力。该计算机设备的存储器包括非易失性存储介质、内存储器。该非易失性存储介质存储有操作系统和计算机程序。该内存储器为非易失性存储介质中的操作系统和计算机程序的运行提供环境。该计算机设备的通信接口用于与外部的终端进行有线或无线方式的通信,无线方式可通过WIFI、运营商网络、NFC(近场通信)或其他技术实现。该计算机设备的显示屏可以是液晶显示屏或者电子墨水显示屏,该计算机设备的输入装置可以是显示屏上覆盖的触摸层,也可以是计算机设备外壳上设置的按键、轨迹球或触控板,还可以是外接的键盘、触控板或鼠标等。

[0073] 本实施例还提供一种存储介质,其上存储有计算机程序,该程序被处理器执行时实现如上述实施例提出的实现贯流泵装置叶轮空蚀面积的评估方法。

[0074] 本实施例提出的存储介质与上述实施例提出的数据存储方法属于同一发明构思，未在本实施例中详尽描述的技术细节可参见上述实施例，并且本实施例与上述实施例具有相同的有益效果。

[0075] 实施例2

[0076] 参照图3，为本发明的一个实施例，该实施例提供了，为了验证本发明的有益效果，通过具体的实施方式以及实施效果进行科学论证。

[0077] 本实施例以采用ZM25模型的竖井贯流泵装置为例，采用三维建模软件对贯流泵装置进行三维数学模型的构建，然后采用CFD(Computational Fluid Dynamics)技术对该竖井贯流泵装置进行空化计算，湍流模型为SST  $k-\omega$ 。空化流动计算中液、气两相分别设置为常温25℃的水和水蒸气，选用Rayleigh Plesset空化模型，模型中饱和压力设置为3167.6Pa。对三种水位工况条件进行CFD计算，计算均满足各物理量的残差收敛精度均低于 $1.0 \times 10^{-5}$ 的要求，且扬程变化趋于稳定。根据如表1所示的3种水位工况空化计算结果，得到贯流泵装置叶轮叶片表面气相如图3所示。

[0078] 表1不同水位工况信息表

水位工况	扬程(m)	流量(L/s)	设计运行时间(小时/月)
工况1	0.88	260	56
工况2	1.59	217	224
工况3	2.14	174	28

[0080] 将叶轮叶片表面气相体积分数大于0.8的区域确定为发生空蚀的区域并确定其面积，通过空蚀比例系数计算得到空蚀比例系数，最后通过空蚀面积公式计算得到贯流泵装置叶轮预估空蚀面积，计算结果见表2

[0081] 表2不同水位工况空蚀比例系数与叶轮预估空蚀面积

水位工况	$k_i$	$t_i$	$S$	$S_{ks}$
工况1	0.308	56	267.4 mm <sup>2</sup>	81 mm <sup>2</sup>
工况2	0.302	224		
工况3	0.301	28		

[0083] 本实施例中，贯流泵装置叶轮单个叶片表面积为267.4mm<sup>2</sup>，按照设计运行时间运行1个月后最终预估贯流泵装置叶轮空蚀面积为81mm<sup>2</sup>。本实施例中不同水位工况运行时间皆大于22小时，若在计算过程中存在运行时间不足22小时的水位工况，则认为该水位工况虽发生空化但未产生空蚀现象，忽略此水位工况进行计算得出泵装置叶轮空蚀面积，以供工程设计人员与泵站管理单位参考，保证贯流泵装置安全稳定高效运行。

[0084] 本实施例中CFD数值模拟中各种参数如湍流模型、空化模型、饱和压力等的选择与设置仅用以对本发明作阐述说明，具体设置应根据工程实际确定合适的参数进行计算。

[0085] 应说明的是，以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制，尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明，本领域的普通技术人员应当理解，可以对本发明的技术

方案进行修改或者等同替换,而不脱离本发明技术方案的精神和范围,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

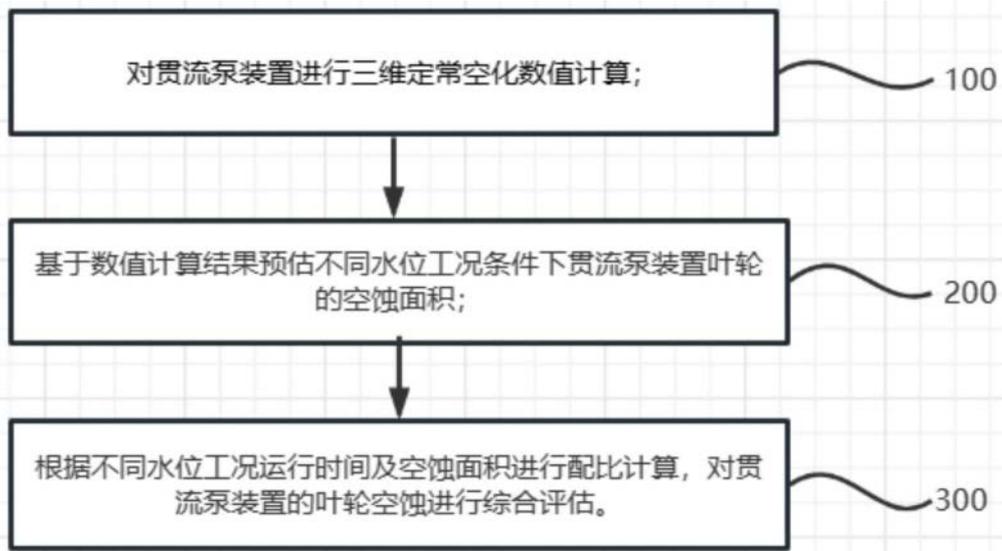


图1

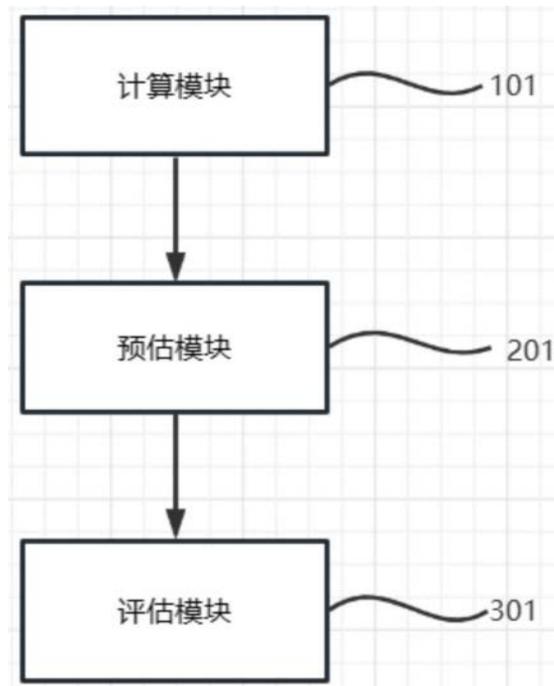


图2

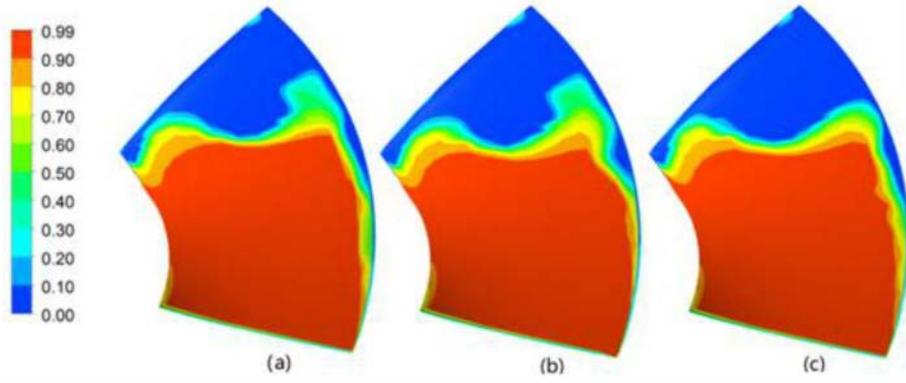


图3