

基于 WSN 的雨水发电系统设计与仿真



卫雅琪¹, 李晓骞^{2,*}, 张成雷^{1,*}, 杨晨¹, 周艳蓉¹, 谷守玉¹, 胡毅¹, 伏茂源¹

¹临沂大学机械与车辆工程学院, 山东临沂 276000

²临沂大学自动化与电气工程学院, 山东临沂 276000

摘要:为有效利用高层建筑雨水资源, 提出了一种基于 WSN (Wireless Sensor Network) 的雨水发电系统的设计方案, 通过 WSN 技术对雨水发电情况进行统计与分析。针对雨水回收及雨水发电进行设计与仿真, 本设计的智能控制雨水发电装置总体上由发电箱、蓄水箱以及智能显示控制器组成。本设计主要通过对智能控制雨水发电装置的机械结构进行设计与分析, 利用 Solid Works 软件进行动静力学分析和流体力学分析, 从而验证雨水发电装置结构的可行性和合理性。基于质量守恒定律及数学的奥高公式, 对储水部分的出水口及发电部分的进水口进行优化设计, 使雨水得到充分利用。本设计根据 WSN 及单片机的基本知识, 对水位传感器的电路进行设计, 使止水塞间歇放水以提高发电持续性。最后利用模型有限元划分、颜色渲染和维数变化等原理进行雨水发电系统的外观设计。

关键词:高层建筑; 雨水回收; 动静力学分析; 流体力学分析; 优化设计

DOI: [10.57237/j.mse.2023.04.002](https://doi.org/10.57237/j.mse.2023.04.002)

Design and Simulation of Rainwater Power Generation System Based on WSN

Wei Yaqi¹, Li Xiaoqian^{2,*}, Zhang Chenglei^{1,*}, Yang Chen¹, Zhou Yanrong¹, Gu Shouyu¹, Hu Yi¹, Fu Maoyuan¹

¹School of Mechanical and Vehicle Engineering, Linyi University, 276000 Linyi, China

²School of Automation and Electrical Engineering, Linyi University, 276000 Linyi, China

Abstract: In order to effectively utilize rainwater resources in high-rise buildings, a design scheme for a rainwater power generation system based on WSN (Wireless Sensor Network) is proposed, and the situation of rainwater power generation is statistically analyzed through WSN technology. Design and simulate rainwater recycling and rainwater power generation. The intelligent control rainwater power generation device in this design is generally composed of a power generation box, a storage tank, and an intelligent display controller. This design mainly designs and analyzes the mechanical structure of the intelligent control rainwater power generation device, and the dynamic and static mechanics analysis and fluid mechanics analysis to verify the feasibility and rationality of the rainwater power generation device structure is use by Solid Works software. Based on the law of conservation of mass and the mathematical Auger formula, the outlet of the water storage section and the inlet of the power generation section are optimized and designed to make the best use of rainwater. On the basic knowledge of WSN and microcontroller, this circuit of water level sensor is designed according to the basic knowledge of WSN and single chip microcomputer, so that the water stop plug releases

基金项目: 山东省大学生创新创业训练计划项目资助 (No. S202310452129);

国家级大学生创新创业训练计划项目资助 (No. 202110452013).

*通信作者: 李晓骞, 18863237789@163.com; 张成雷, zhangchenglei@lyu.edu.cn

收稿日期: 2023-10-20; 接受日期: 2023-11-22; 在线出版日期: 2023-12-09

<http://www.mechscieng.com>

water intermittently to improve the sustainability of power generation. Finally, the exterior design of the rainwater power generation system is carried out by using the principles of segmentation, such as model finite element partitioning, color rendering, and dimensional changes.

Keywords: High-rise Building; Rainwater Recycling; Dynamic and Static Mechanical Analysis; Hydrodynamic Analysis; Optimal Design

1 引言

随着科技的发展，出现了很多有关雨水发电相关的研究，先前的装置多为下水道发电机。这些发电机设计思路科学可行，却存在很多显而易见的缺点，由于现阶段的发电机多为简单的发电设备，在水量不足时无法进行有效发电，导致发电效率不高。为了提高雨水发电的工作效率，本设计与 WSN 相结合，对基于排水管道的发电系统的结构进行设计和优化[1]。

基于 WSN 的雨水发电系统指装备有智能水位的传感器能够实时获取储水箱水位参数，具有储存雨水和能源转化的发电系统。雨水资源作为可再生能源与化石燃料等非可再生能源相比有相当大的开发利用优势，高层建筑的雨水是一种清洁能源，利用雨水发电顺应绿色可持续发展的理念，该发电系统设计对雨水的控制利用提供新的思路[2]。通过对高楼雨水势能的调查与研究，表明了雨水发电的可行性[3, 4]。

本文中所提出了一种基于 WSN (Wireless Sensor Network) 的雨水发电系统的设计方案，通过对 WSN 技术对雨水发电情况进行统计与分析。本设计主要通过对智能控制雨水发电装置的机械结构进行设计与分析，利用 Solid Works 软件进行动静力学分析和流体力学分析，从而验证雨水发电装置结构的可行性和合理性。基于质量守恒定律及数学的奥高公式，对储水部分的出水口及发电部分的进水口进行优化设计，使雨水得到充分利用。

2 整体结构设计分析

本设计的发电系统包括排水管道、储水箱和发电箱。其中，储水箱内的无线水位传感器和自动止水阀以自动监测控制储水箱储水与自动放水功能的进行。本设计储水部分不需要浮球和干簧管，外部无机械动作，耐污耐用，受漂浮物影响小。

初始时自动止水塞关闭，随着雨水流入，无线水位传感器实时监测水位信息并将信息传递给单片机。当水位未达到指定低水位时，处于蓄水状态；当蓄水量达到指定低水位时，单片机收到传感器的水位信息，控制自动止水塞间歇性放水，被释放的雨水顺着排水管道流下，流经一段距离过后，冲击发电系统的叶轮部分，从而发电部分开始运作进行储能。

当水位下降到指定低水位时，单片机控制自动止水塞再次将出水口塞住，进行下一次的蓄水。为了预防堵塞引起雨水不能下落的情况，以及与雨量过大导致储水箱集满的情况，本设计另设安全管，保证雨水顺利下落。



图 1 雨水发电系统发电流程示意图

2.1 储水部分

如图 2 所示，为储水部分示意图。储水部分包括位于储水箱内壁的无线水位传感器、可拆卸杂质过滤网、安全管以及单片机控制的自动止水阀。无线水位

传感器实时监测传输水位信息, 是基于 WSN 的雨水发电系统的重要部件, 可任意角度安装, 竖向安装有一

定的防波浪功能, 能够长时间浸在水中[5]。储水箱内部各组件相互配合以维持储水系统高效持续运行。

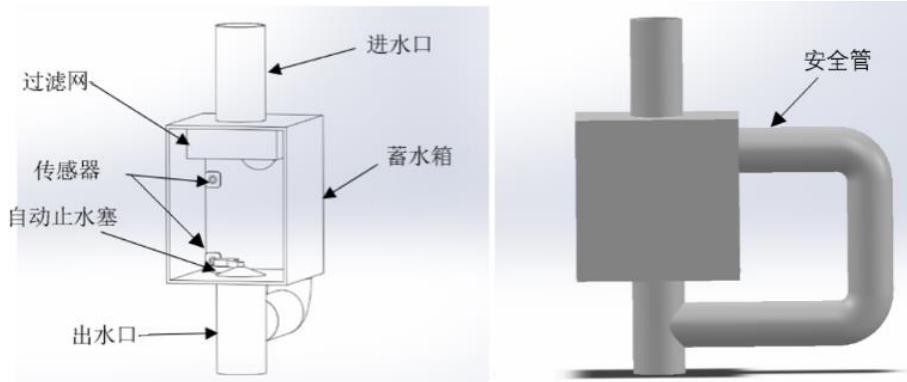


图 2 储水部分结构示意图

2.1.1 无线水位传感器

为解决雨水资源利用效率低的问题, 本设计引入基于 WSN 的水位传感器对雨水进行实时监测, 其结构上包括感知模块、处理控制模块、电源模块、无线通信模块等。其中感知模块负责感知监测水位信息, 处理控制模块用于数据处理融合, 电源模块用于水位传感器的自我供能, 无线通信模块用于水位信息数据传输[6]。集传感器技术、无线传输技术、网络通信技术、分布式信息处理技术与编程技术于一体而形成的无线传感器网络 (WSN), 是一种全新的信息获取和处理系统, 该系统与水位监测的结合提高了系统的精确性与智能化程度, 具有广阔的发展前景。

2.1.2 自动止水阀

自动止水阀由单片机控制, 选取合适的单片机控制芯片以及主要硬件元件, 基于 WSN 技术的水位传感器将水位数据传输至控制器, 当被测液体到达动作点时, 芯片输出高或低电平信号, 高低电平的信号通过 PLC 或其它控制电路板来读取, 并驱动排水阀等电器工作, 随后自动水阀被控制开启或关闭, 使蓄水箱发挥自动储水以及间歇性放水作用[7]。

2.1.3 可拆卸杂质过滤网

在开放环境中收集雨水不可避免存在很多杂质, 如头发、金属块等, 这些物体可能会限制叶轮的运动甚至损坏叶轮, 使装置无法正常运作, 因此在储水箱的入水口处添加可拆卸杂质过滤网, 定期进行杂质清理, 保证系统的正常运转。

2.1.4 安全管

安全管位于储水箱箱体右上角, 与排水管直接相通, 一方面可将储水箱中多余的雨水直接引流进入排水管道, 有效防止因雨量过大、雨水过多对储水箱产生的影响, 使系统更加安全可靠; 另一方面可以解决过滤网堵塞导致雨水堆积无法下落的问题。

2.2 发电部分

发电部分结构示意图如图 3 所示, 发电部分将雨水的下落势能转化为电能。本设计将传动部件与发电机相结合以达到能源转化效果。超越离合器一般具有超越和接合两种状态, 是实现传动系统工况转换的核心部件。作为传动部件之一, 合理放置能够提高能源转化效率[8]。

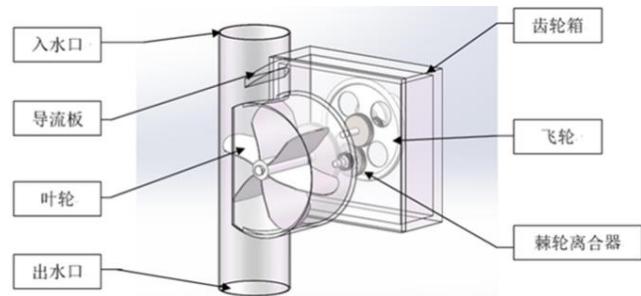


图 3 发电部分结构示意图

2.2.1 叶轮

叶轮是发电部分的主要部件之一, 也是雨水势能转化为电能的第一步, 本设计中, 叶轮首先受到雨水的冲击并转动, 然后带动齿轮组传动, 最后将动能传

递给发电机实现预期的发电效果[9]。

2.2.2 飞轮及超越离合器

飞轮储能利用机械能将电能进行存储，具有绿色环保、寿命长、安全可靠等优势[10]。本研究利用惯性飞轮的作用，使发电机转轴的速度衰减减慢，并使飞轮与超越离合器协调配合在一起，从而提高发电的可持续性[11]。

2.2.3 齿轮组

齿轮传动在机械设计过程中应用十分广泛，齿轮是关键部件之一，其平稳、可靠、安全运行是保证机组高效发电的重要条件。本设计的发电传动部分也离不开齿轮组的协调传动作用[12]。

3 感知水位自动排水设计

随着科技的发展，无线传感器在我们的生活中发挥着越来越重要的作用，本设计将无线水位传感器与单片机结合使用，提高了系统的智能性和先进性。

3.1 蓄水部分出水口管径大小的设计

根据蓄水箱尺寸大小及所设定的水位高低计算水的体积，通过设计管径大小来间接控制水流速度，使水流冲击力刚好可以带动叶轮实现发电，再通过多次惯性实验设计间歇性放水的间隔时间，利用单片机控制自动阀门间歇性放水，减少雨水的浪费并持续发电，从而提高发电效率。

在流场中，流体通过控制面 A1 流入控制体，同时也会通过另一部分控制面 A2 流出控制体，在这期间控制体内部的流体质量也会发生变化。按照质量守恒定律，流入的质量与流出的质量之差，应该等于控制体内部流体质量的增量，由此可导出流体流动连续性方程的积分形式为：

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dx dy dz + \iint_A \rho v \cdot n dA = 0 \quad (1)$$

式中，V 表示控制体；A 表示控制面。

等式左边第一项表示控制体 V 内部质量的增量；第二项表示通过控制表面流入控制体的净通量。

根据的奥高公式，在圆柱坐标系下可将其化为微分形式，即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho v_r}{r} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_\theta)}{r \partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

对于不可压缩均质流体，密度为常数，则有：

$$\frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_\theta}{r \partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

管径流速流量计算公式常量。（S 为截面面积，v 为水流速度）（流体力学上长用 Q=AV），单位是立方米每秒。经公式计算水流流量 Q=200m³/h，管道直径 D=150mm，流速 V=3.14m/s。

由动量守恒原理可知，其时间变化率的动量形态等于作用在它上的外力之和，其数学表达式如下：

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = \rho F_{bx} + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z} \\ \rho \frac{du}{dt} = \rho F_{by} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z} \\ \rho \frac{du}{dt} = \rho F_{bz} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (4)$$

式中， F_{bx} 、 F_{by} 、 F_{bz} 分别是单位质量流体上的质量力在三个方向上的分量； P_{yx} 是流体内应力张量的分量。

3.2 蓄水部分出水口管径水压径向载荷和轴向载荷的设计

随着应用环境的变化，作用在蓄水部分出水口外壳体水压也随之增强，当蓄水部分出水口管径耐压受力超过抗压标准，随之壳体形变造成密封失效。如图 4 所示，蓄水部分出水口壳体耐压受力示意图。根据蓄水部分出水口外壳体圆柱体水压径向载荷和轴向载荷计算公式，则计算出外壳线性屈曲分析：

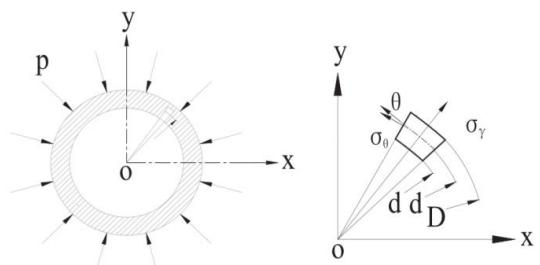


图 4 蓄水部分出水口壳体耐压受力示意图

根据中空圆柱体水压径向载荷计算公式：

$$\sigma_y = \frac{D^2}{D^2 - d^2} \times \frac{d^2 - d_x^2}{d_x^2} \times P \leq [\sigma] \quad (5)$$

根据中空圆柱体水压轴向载荷计算公式:

$$\sigma_\theta = \frac{D^2}{D^2 - d^2} \times \frac{d^2 + d_x^2}{d_x^2} \times P \leq [\sigma] \quad (6)$$

根据材料的许用应力计算公式:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_b}{n_b} \quad (7)$$

式中: σ_y : 水压径向载荷;

σ_θ : 水压轴向载荷;

p: 工作水深压力;

$[\sigma]$: 材料的许用应力;

σ_b : 材料的强度极限;

n_b : 材料安全系数;

D、d: 壳体外径和内径。

补偿系统装置外壳线性的屈曲分析是指在特定载荷下的稳定性以及确定结构失稳的临界载荷(分歧点)。ANSYS Workbench16.0 屈曲分析步骤与其他有限元分析步骤大同小异, 软件支持在模态分析中存在接触对, 但是由于屈曲分析是线性分析, 所以接触行为不同于非线性接触行为, 见表 1 所示。

表 1 接触设置的线性屈曲分析设置

接触类型	线性屈曲分析		
	初始接触设置	内部球状区域	外部球状区域
Bonded	Bonded	Bonded	Free
No Separation	No Separation	No Separation	Free
Rough	Bonded	Free	Free
Frictionless	No Separation	Free	Free

线性屈曲分析一般方程为:

$$[K] + \lambda_i [S] \{\psi_i\} = 0 \quad (8)$$

式中, $[K]$ 和 $[S]$ 是常量; λ_i 是屈曲载荷乘子; $\{\psi_i\}$ 是屈曲模态。

水位控制为例进行电路设计。产品用环氧树脂封灌, 密封防水, 可长期浸在液体中, 外部无机械活动部件, 寿命长。本设计将一个水位开关放在高水位 A 位置, 另一个水位开关放在低水位 B 位置。当水到达 B 位置时, 继电器闭合, 此时可控制水泵或电磁阀的启动, 开始进水; 当水上升到达高水位 A 位置时, 继电器断开, 水泵或电磁阀断电, 不断往复循环[13]。

3.3 传感器与单片机相结合的电路设计

如图 5 电子式水位控制电路图, 本设计以电子式

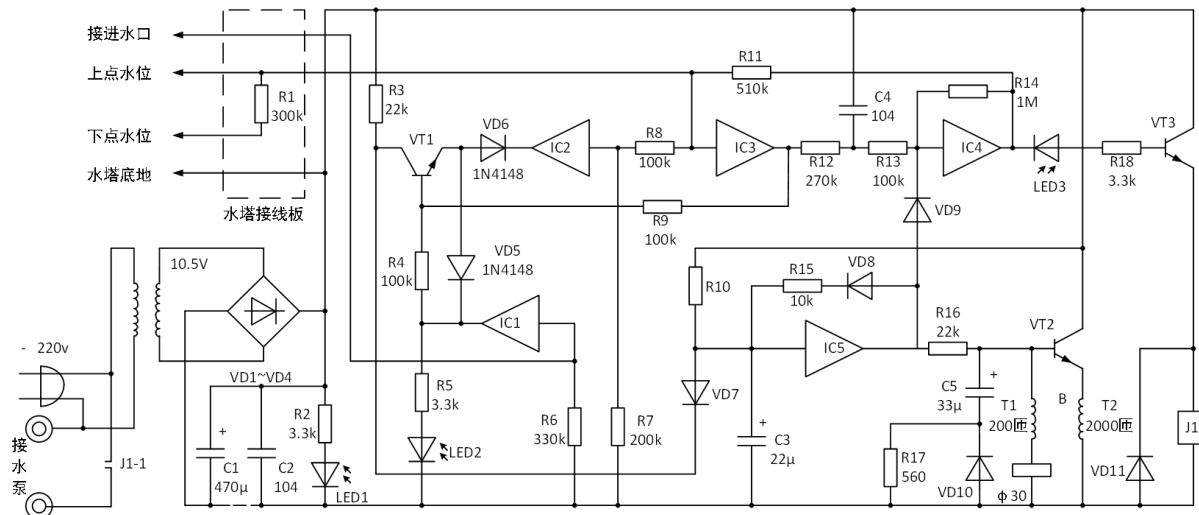


图 5 BZ2401 型电子式水位控制电路图

其中，通过内置电子探头对水位进行检测，再由芯片对检测到的信号进行处理，当判断到有水时，芯片输出高电平 24V 或 5V 等，当判断到无水时，芯片输出 0V。高低电平的信号通过 PLC 或其它控制电路板来读取，并驱动水泵等用电器工作。

4 最佳传动比和飞轮转动惯量设计

4.1 能量转化最大化和单向传递设计

由于现阶段的发电机多为简单的发电设备，在水量不足时无法进行有效发电，只是正常地流过叶轮，因此也有发电效率不高的特点。

当储水箱雨水达到指定水位时，由单片机控制自动止水阀间歇性放水。雨水流下后，带动叶轮、齿轮组转动，此时棘轮离合器处于传动状态，带动惯性飞轮转动，为发电机提供较为持久的动力。在短时间内雨水流经叶轮后，没有持续的雨水流过时，飞轮由于惯性保持转动，而此时叶轮已经停止转动，此时棘轮

离合器断开，使得飞轮存储的机械能只传递给发电机，极大的提升了发电效率。

4.2 叶轮理想转速计算

利用能量转化公式：

$$W = mgh = E_k_1 - E_k_2 = IRT \quad (9)$$

$$n = \frac{IRT}{mgh} \quad (10)$$

其中，W 为叶轮转化的功率；n 为叶轮可以达到的理想转速。

由此，将不同数值的安装高度和转化效率带入公式，计算得出叶轮的理想转速。

根据能量转化公式，初步确定了在不同安装高度和转化效率下叶轮可以达到的理想转速，具体如表 1 所示，为叶轮外圆转速理论数据表。

表 2 叶轮外圆转速理论数据

转化效率	安装高度 (m)	叶轮初速度 (m/s)								
		10	15	20	25	30	35	40	45	50
0.1		1.40	1.71	1.98	2.21	2.42	2.62	2.80	11.11	12.96
0.2		1.98	2.42	2.80	3.13	3.43	3.70	3.96	13.21	15.42
0.3		2.42	2.97	3.43	3.83	4.20	4.54	4.85	14.62	17.06
0.4		2.80	3.43	3.96	4.43	4.85	5.24	5.60	15.71	18.33
0.5		3.13	3.83	4.43	4.95	5.42	5.86	6.26	16.62	19.38
0.6		3.43	4.20	4.85	5.42	5.94	6.42	6.86	17.39	20.29
0.7		3.70	4.54	5.24	5.86	6.42	6.93	7.41	18.07	21.09
0.8		3.96	4.85	5.60	6.26	6.86	7.41	7.92	18.69	21.80
0.9		4.20	5.14	5.94	6.64	7.27	7.86	8.40	19.42	22.45

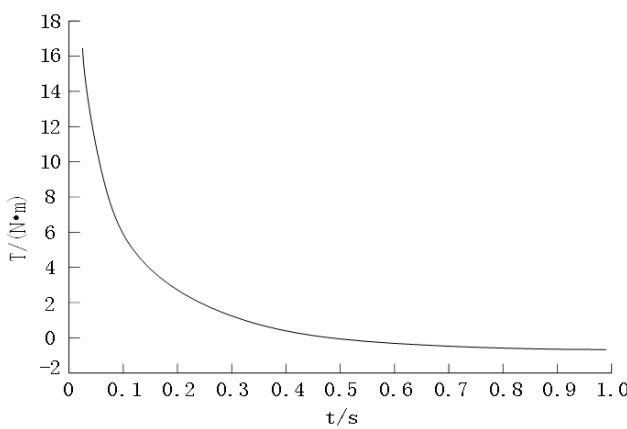


图 6 叶轮输出的转矩图

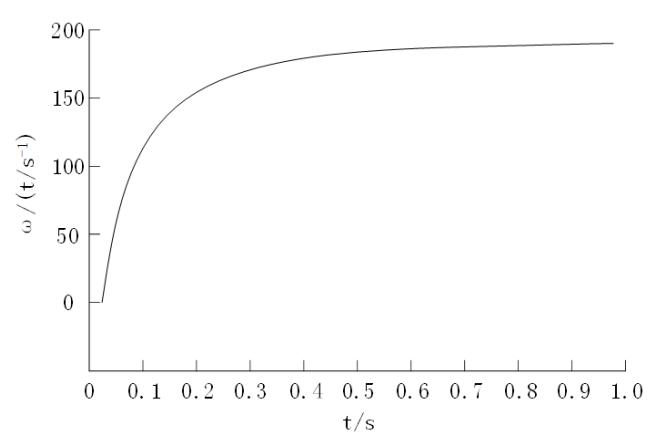


图 7 叶轮的角速度变化曲线图

如图 6 叶轮输出的转矩图、图 7 叶轮的角速度变化曲线图所示, 在旋转过程中, 叶轮旋转的角速度在不断增大, 而叶轮输出的转矩在不断减小。在启动阶段, 水流对叶轮形成很大的冲击作用, 此时输出转矩最大, 最大转矩为 $T=16.37\text{N}\cdot\text{m}$ 。

随着转速增大, 输出转矩在不断减小, 在时刻 0.001~0.1s 之间减小输出转矩下尤为明显, 当转速达到稳定后, 输出转矩接近为 0。当安装高度达到普通居民楼高度 30m 时, 在转化率为 50% 时, 叶轮转速即可达到 5.42m/s, 完全满足发电的需求。当叶轮角速度稳定在 184.46r/s 时达到叶轮的理想速度[14]。

通过观察图叶轮的角速度变化曲线图, 可以看出, 在时间 $t=0.01\text{s}$ 开始启动, 叶轮开始旋转, 旋转角速度。在起始阶段增速明显, 尤其在时刻 0.001~0.1s 之间增速最快之后角速度增速放缓, 在 $t=0.5\text{s}$ 时旋转角速度达到最大值, 此时旋转角速度 $w=184.46\text{r/s}$ 。

4.3 无刷发电机参数

本装置叶轮与发电机的传动比为 1:4, 在叶轮理想转速为 20r/s 时, 此时发电机转速即可达到每分钟 5000 转, 满足发电机的工作要求[15]。

表 3 无刷电机发电参数计算

驱动转速	输出线电压	桥式全波整流	桥式全波整流+滤波
600 rpm	5.5V	6.9V	7.8V
1500 rpm	13.8V	17.3V	19.2V
2400 rpm	22.1V	30.1V	31.5V
3500 rpm	32.4V	43.5V	45.7V

5 叶轮受水流冲击的静力学分析

本设计利用 Solid Works 软件对发电系统的叶轮部分在受水流冲击作用下的静力学特性。

对叶轮承受水压计算如下:

$$P = mgh \quad (11)$$

式中, P 为叶轮承受雨水冲击的压力, m 为叶轮的总质量, g 是指重力加速度, 常用参数为 $9.8\text{m}^2/\text{s}$ 。

如表 4 所示, 叶轮采用锻制不锈钢材料, 利用 Solid Works 软件对叶轮建立模型。在叶轮的某一叶片上施加 9980N 压力, 对其进行应力分析。

表 4 锻制不锈钢基本参数计算

属性	数值	单位
弹性模量	$2e+11$	N/m^2
泊松比	0.26	
抗剪模量	$7.9e+10$	N/m^2
质量密度	8000	kg/m^3
张力强度	517017000	N/m^2
压缩强度		N/m^2
屈服强度	206807000	N/m^2
热膨胀系数	$1.1e-05$	/K
热导率	19	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
比热	500	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

使用自由划分网格, 有限元模型结果一共包括



图 8 有限元网格划分参数

如图 9 所示, 为有限元分析中对模型进行网格划分结果。

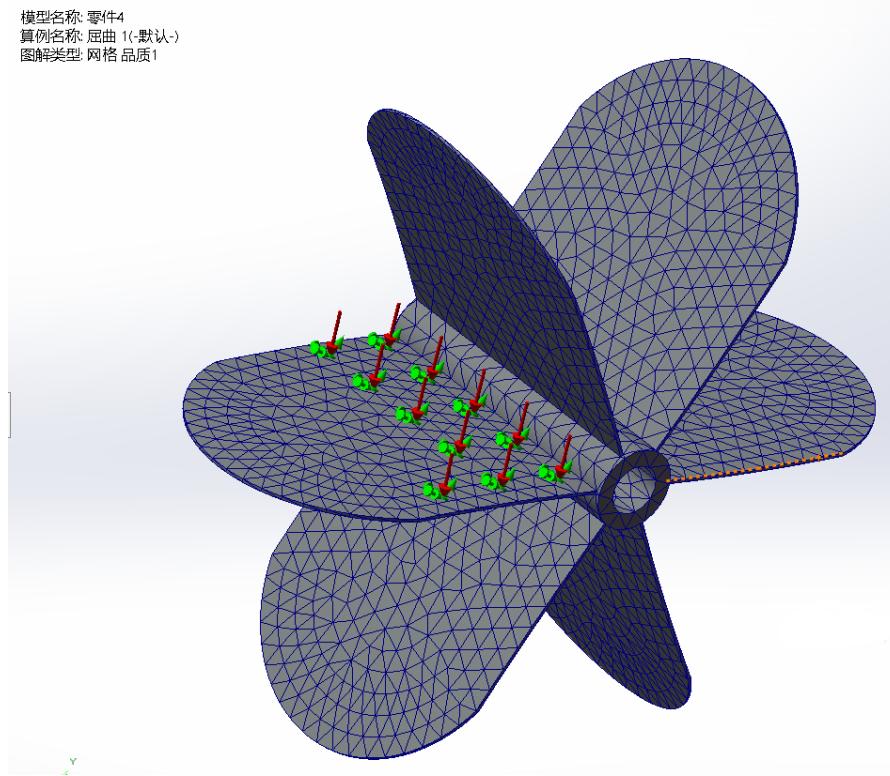


图 9 叶轮模型有限元网格划分

通过对材料力学性能的研究及水流压力的分析，基于叶轮的锻制不锈钢合金材料得到叶轮工作时的力学数据，并以此为基础对所设计的叶轮进行静力学仿

真模拟，如图 10、图 11 和图 12 分别为叶轮应力分布图、叶轮应变分布图和叶轮位移分布图所示。

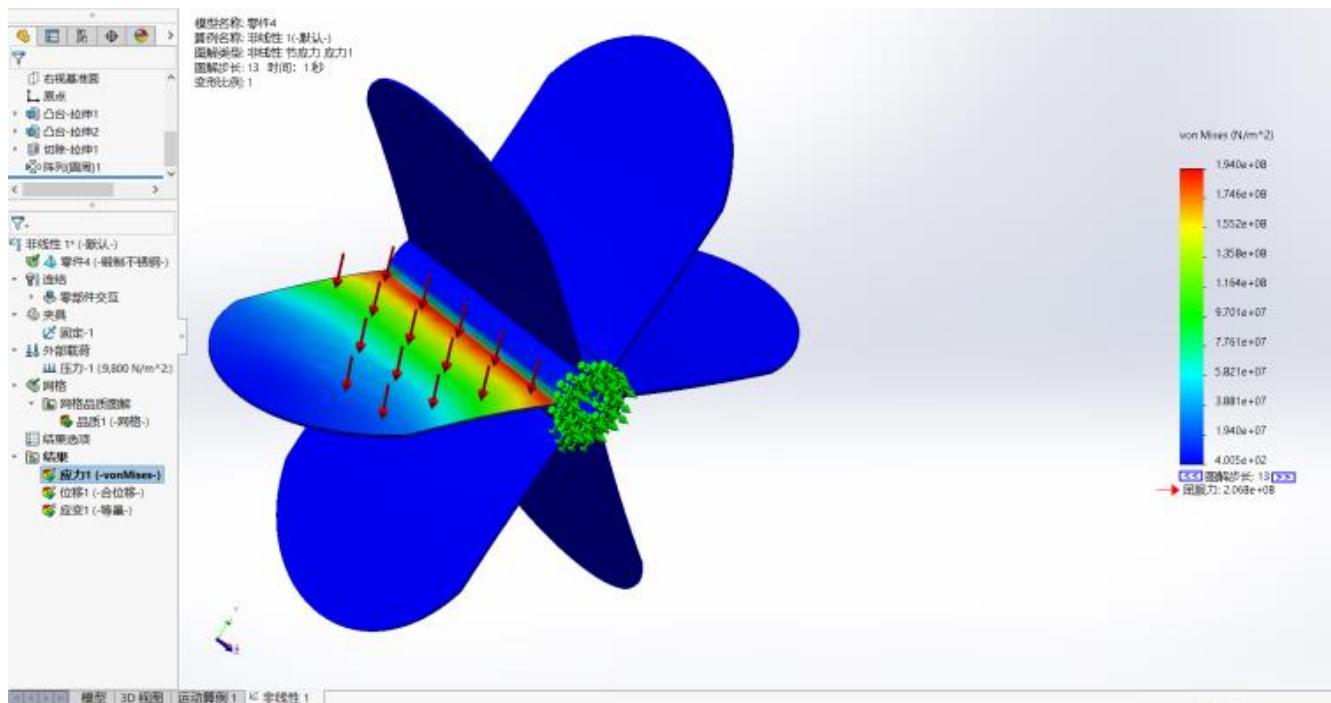


图 10 叶轮应力分布图

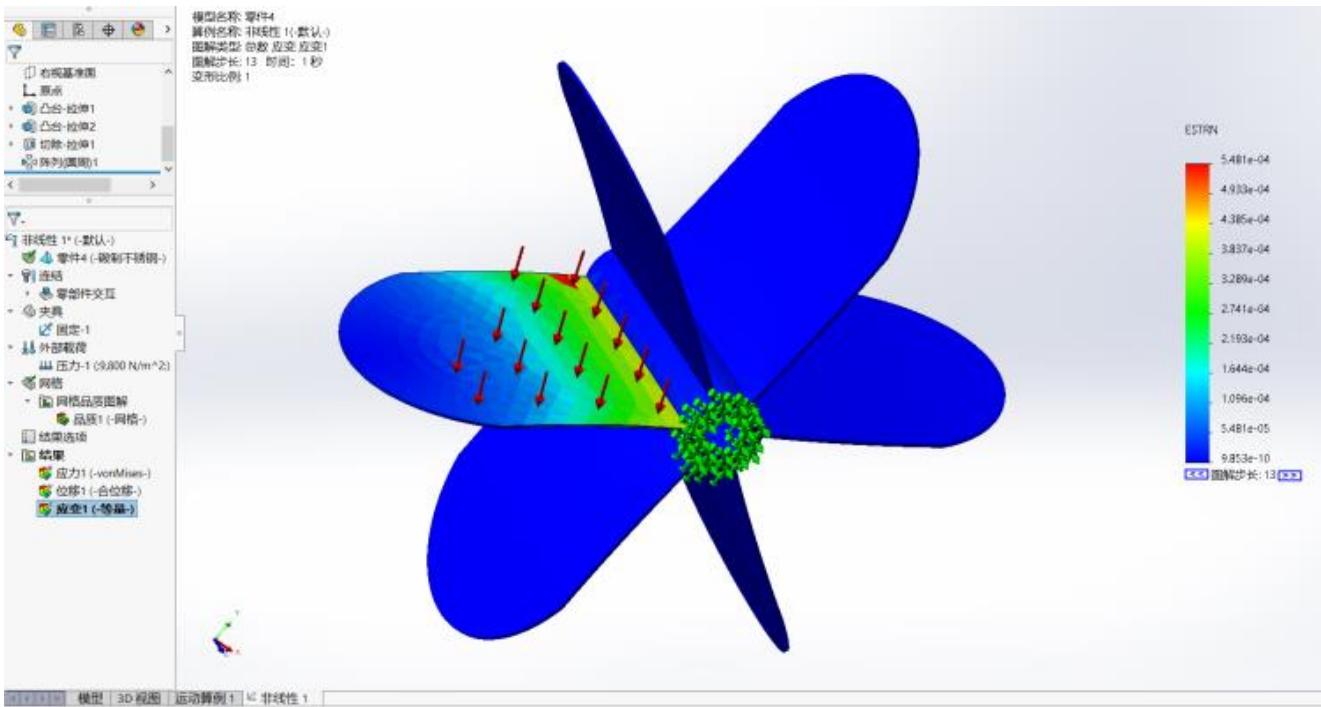


图 11 叶轮应变分布图

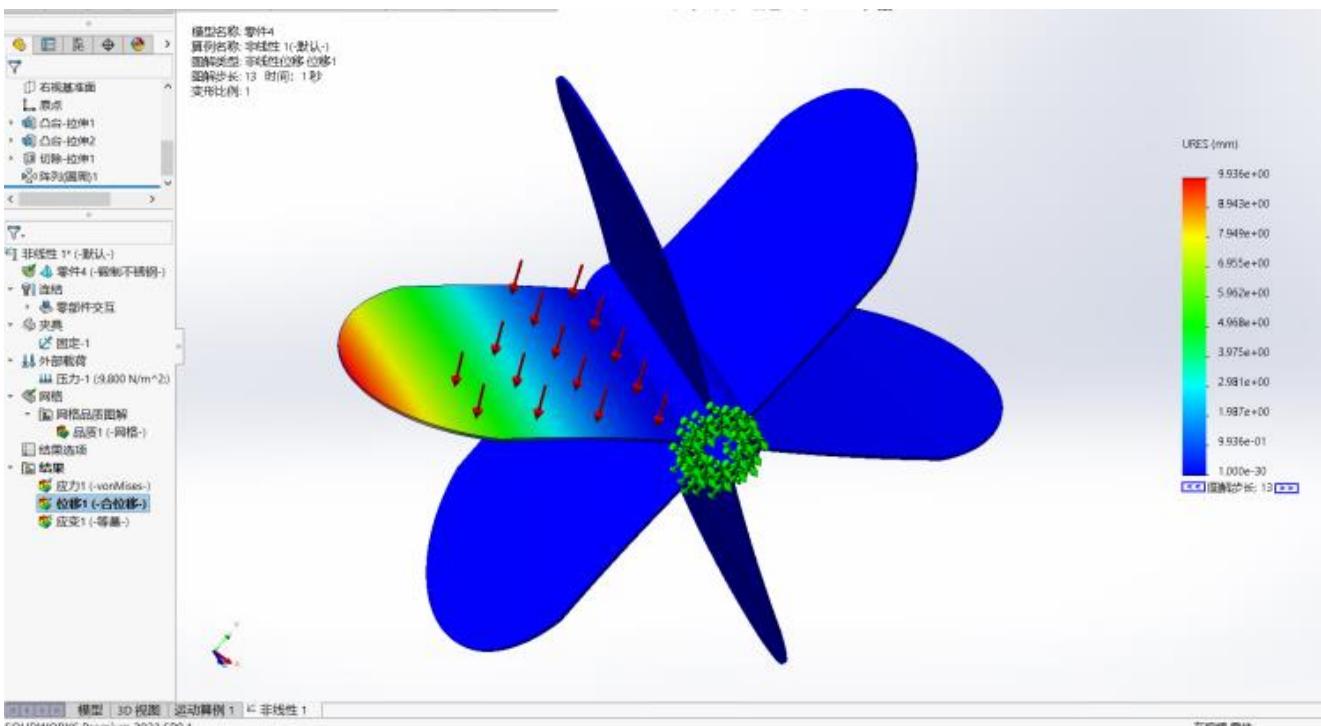


图 12 叶轮位移分布图

仿真结果如下: 施加的压力 9800N 时, 静态应变受力最大的部位为叶轮部位; 此时, von Mises (N/m^2) 为 $4.005\text{e}+02\sim1.940\text{e}+08$ 。屈服力: $2.068\text{e}+08$ 。

叶轮应变参数: ESTRN: 等效应力 (mm) 对等应

变的范围为 $5.4781\text{e}-4\sim9.853\text{e}-10$ 。

叶轮位移参数: URS (mm) 对等位移的范围为 $9.936\text{e}+00\sim1.000\text{e}-30$ 。

6 结语

目前，雨水发电装置在中国还未得到普及推广，雨水发电的课题虽然很早就开始研究，但之前的装置多为下水道发电机。这些发电机设计思路科学可行，但存在很多显而易见的缺点：在正常工作时，由于雨量大小难以控制，雨量过小，雨水产生的冲击力不足，难以带动叶轮转动；雨量过大，又会导致发电设备的寿命大大减短。本设计的为雨水发电提供了新的思路和方法，发电系统和 WSN 技术的巧妙结合具有广阔的发展前景。雨水发电可以弥补地面太阳能站的不足之处，使人类巧妙地受益于雨能带来的经济效益和社会效益。响应国家节能减排的号召，开发雨水新能源，助力绿色可持续发展[16]。

参考文献

- [1] 于佳鑫, 杨昊晟, 王文娥等. 基于排雨管道的雨水分段蓄能发电系统 [J]. 水力发电学报, 2018, 37(12): 102-111.
- [2] 王文亮, 李俊奇, 车伍, et al. 城市低影响开发雨水控制利用系统设计方法研究 [J]. 中国给水排水, 2014, 30(24): 12-17.
- [3] 徐苏容, 周科, 王学超. 超高层楼房雨水资源水力发电系统设计研究 [J]. 水电能源科学, 2018, 36(03): 168-171.
- [4] 苏元蒼, 孙欣, 严启军. 关于高楼收集雨水发电的研究[J]. 儿童故事画报, 2017(18): 39-41.
- [5] 王刘利, 陈芳宇, 王亚军. 基于 WSN 的实时水位监测及预警系统设计与实现 [J]. 山西科技, 2014, 29(04): 150-152.
- [6] 夏少波, 许娥. 无线传感器网络 WSN 探究 [J]. 通信技术, 2010, 43(08): 18-20+23.
- [7] 汤燕. 单片机控制系统在阀门定位器中的应用 [J]. 造纸装备及材料, 2022, 51(09): 10-12.
- [8] 侯祥颖, 张钰哲, 张红等. 超越离合器研究现状及发展趋势分析 [J]. 机械传动, 2021, 45(12): 162-169.
- [9] 王晓阳. 对转式潮流能水轮机叶轮设计与流动特性研究 [D]. 山东大学, 2022.
- [10] 卢山, 傅笑晨. 飞轮储能技术及其应用场景探讨 [J]. 中国重型装备, 2022(04): 22-26.
- [11] Hao C, Lingji K, Minfeng T, et al. An electromagnetic energy harvester for applications in a high-speed rail pavement system [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 243: 21-26.
- [12] 李佳明. 基于齿形优化的风电机组齿轮箱减振降载研究 [D]. 华北电力大学(北京), 2022.
- [13] 邱尚磊, 王金泰. 基于电子式水位开关的轿车涉水应急系统的设计 [J]. 汽车实用技术, 2017(12): 108-110.
- [14] 蔡文娟, 蒋旭平, 王海民等. 叶片缝隙对叶片式波力发电叶轮转矩的影响 [J]. 水电能源科学, 2010, 28(05): 120-122.
- [15] Afanasyev. A. A. Magnetic Gearbox with the Function of a Low-Speed Brushless Motor [J]. Russian Electrical Engineering, 2023, 94(5): 51-55.
- [16] 周喜. 新能源发电在电力系统中的应用研究 [J]. 电气技术与经济, 2023(06): 180-182.