

应用于低碳海绵城市排水系统的双模能量转化叶轮机

姚衡

北京航空航天大学能源与动力工程学院, 北京 102206

DOI: 10.61369/SSSD.2025120013

摘 要 : 本文聚焦于低碳海绵城市建设, 致力于开发一种双模能量转化系统。从速度三角形和流线角度剖析叶轮机工作模式切换原理。设计出双模能量转化系统, 涵盖叶轮机设计、模型仿真、完整实验装置搭建及城市应用方案。该系统核心为可切换工作模式的叶轮机, 旨在小降雨量时将雨水动能转化为电能存储, 暴雨时把电能转化为机械能加速排水, 缓解城市内涝, 实现城市排水系统的能量高效利用与功能提升, 极大减少二氧化碳的排放。

关 键 词 : 叶轮机; 海绵城市; 双模能量转换

Dual-Regime Operation of an Energy-Recycling Impeller in Sponge City Drainage Systems

Yao Heng

Beihang University School of Energy and Power Engineering, Beijing 102206

Abstract : This project focuses on the construction of low-carbon sponge city, and is committed to developing a dual-mode energy conversion system. Analyze the principle of impeller operation mode switching from the perspective of velocity triangle and streamline. The dual-mode energy conversion system is designed, covering the impeller design, model simulation, experimental device construction and urban application scheme. The core of the system is the impeller that can switch the working mode, which aims to convert the kinetic energy of rainwater into electric energy for storage during the small rainfall, and convert the electric energy into mechanical energy during the rainstorm to accelerate drainage, alleviate urban water-logging, and realize the efficient energy utilization and function improvement of the urban drainage system, greatly reduce carbon dioxide emissions.

Keywords : impeller; sponge city; dual-mode energy conversion

引言

随着全球气候变化加剧和城市化进程快速推进, 城市水系统面临着前所未有的挑战。极端降雨事件频发导致城市内涝灾害日益严重, 而传统的排水系统不仅能耗高昂, 且难以适应这种不确定性增强的环境^[1]。在此背景下, “海绵城市”作为一种创新性的城市水管埋理念被提出并得到广泛推广^[2]。

然而, 当前海绵城市建设仍面临着诸多技术挑战。一方面, 现有排水系统大多依赖电网电能驱动水泵等设备, 而中小雨期间则造成设备闲置; 另一方面, 尽管中小降雨事件中雨水径流蕴含可观的动能, 但这些能量极少被有效回收利用。近年来, 虽有研究探索将小型水力发电机植入排水管网中^[3], 但这些设备通常功能单一, 难以适应海绵城市系统流量波动大的特点, 在暴雨模式下还可能形成排水阻力, 增加内涝风险。

能量回收技术在排水系统中的潜在价值已引起学界关注。例如, 王旭等学者研发的双涡轮波浪能转换器, 证明了双涡轮结构在复杂流体环境下高效能量转换的潜力^[4], 而清洁能源正是海绵城市所需要的^[5]。在风力发电领域, 串联式双风轮机组“赛瑞号”成功实现了风能的梯次利用, 将单机效率提高15%以上, 为多级能量捕获系统提供了宝贵借鉴^[6-8]。这些技术创新表明, 能量转换装置可以同时兼顾高效能量捕获和流动适应性。然而, 这些技术大多针对相对稳定的自然流体环境(如海浪、风力), 难以直接应用于流量和流向变化剧烈的城市排水系统。

本文聚焦于低碳海绵城市建设需求, 开发了一种双模能量转化系统。该系统核心为可切换工作模式叶轮机, 其设计灵感来源于双模螺旋桨涡轮机的流体动力学优化和可逆多翼离心风机叶轮装置的创新理念^[9]。在小降雨量时, 系统将雨水动能转化为电能存储; 在暴雨事件中, 则利用电能转化为机械能加速排水, 从而同时实现内涝缓解与能量高效利用的双重目标。本文将从速度三角形和流线理论角度剖析叶轮机工作模式切换的流体力学原理^[10], 介绍叶轮机设计、模型仿真、实验装置搭建以及城市应用方案的全流程开发工作。

一、设计原理

从速度三角形剖析水轮机工作模式切换原理。在速度三角形方面，以转速方向为切向正方向、流入方向为轴向正方向建立坐标系。其中， C 为流体绝对速度， W 为流体相对叶片速度， U 为叶片切线速度。下标 1、2 分别代表进出口速度。因流动不可压且进出口面积不变，进出口轴向速度相等，转速也不变。水泵模式下， ΔW 与转速 U 同向，水轮机对水流做功；水轮机模式下， ΔW 与 U 反向，水流对水轮机做功。从流线角度看，转速较低时，水流相对进气角小于叶片安装角，叶背为压力面，叶轮对外输出功；转速较高时，相对进气角大于安装角，叶盆为压力面，叶轮对水流加功。

二、研究方案及过程

（一）模型建立

首先进行叶轮基元流计算。无论是水泵模式还是水轮机模式，基元的速度三角形均可由 3 个无量纲参数——负荷系数 Ψ_T ，流量系数 Φ ，基元级反力度 Ω 来确定。同时，基元的气流角需要同时满足绝对进气角约束、迎角与落后角约束、转速约束、量纲参数的约束。所以本设计可以转化为数学模型如下。

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{1c} = 87 \\ \alpha_{1t} = 87 \\ |i_c| \leq 13 \\ |i_t| \leq 13 \\ |\delta_c| \leq 13 \\ |\delta_t| \leq 13 \\ \phi_c < \phi_t \end{array} \right.$$

利用遍历求解，选取合理参数。按照国家标准，取管道内径为 63mm，则选取叶轮的叶尖半径为 30mm。同时假设流量为 3.12L/s，带入

表 1 水轮机基元各截面参数

| Ψ_T | Φ | Ω | $\xi/^\circ$ | γ |
|----------|--------|----------|--------------|----------|
| 0.0524 | 0.5 | 1 | 157.94 | 0.03 |
| 0.1048 | 1 | 1 | 140.84 | 0.015 |
| 0.131 | 1.25 | 1 | 134.40 | 0.012 |

表 2 水泵基元各截面参数

| Ψ_T | Φ | Ω | $\xi/^\circ$ | γ |
|----------|--------|----------|--------------|----------|
| 0.3686 | 0.3 | 0.8 | 157.94 | 0.03 |
| 0.3371 | 0.6 | 0.8 | 140.84 | 0.015 |
| 0.3214 | 0.75 | 0.8 | 134.40 | 0.012 |

（二）数据仿真

依据设计计算数据建模，进行仿真。在旋转坐标系下，分别设定 637rpm 和 1500rpm（或 1061rpm）转速，速度进口边界为 1m/s，出口为自由边界。

当转速为 637rpm 时，叶轮的进口总压为 20000pa，出口总

压为 16000pa，此时叶轮为水轮机，对外输出功。而当转速为 1061rpm 时，叶轮进口总压为 32000pa，出口总压为 36000pa，此时叶轮为水泵，对水流加功。可以看出，当转速不同时，叶轮实现了水轮机和水泵两种模式，与理论相符。

（三）实验装置设计与制作

实验装置由水塔、透明水管、叶轮、齿轮箱、流量计、水泵、电动机和发电机组组成，各部件通过法兰连接，包含水循环组和动力组两个部分。叶轮和传动轴通过机匣固定在管道中心，与外界齿轮箱相连。齿轮箱采用切换齿轮啮合组实现水轮机工作模式转变，避免频繁更换连接轴。由水泵实现装置内部水循环。水泵工作模式引起的流量变化用流量计进行测量，水轮机工作模式所产生的电力用灯泡亮度进行验证。

在动力组中，因叶轮作为水轮机时，需要外接发电机，进行发电；而叶轮作为水泵时，需要外接电动机，带动叶轮进行旋转，实现对水流加功。为避免叶轮在切换模式时频繁更换联轴器连接的电机轴，因此采用齿轮啮合来实现模式的更换。当叶轮作为水泵时，发电机轴的齿轮与叶轮轴啮合，电机带动叶轮转动。而当叶轮作为水轮机时，叶轮轴的齿轮与发电机轴啮合，叶轮带动发电机旋转输出功率。因此，就可以通过不同齿轮的啮合来模态的转换。

（四）城市方案设计

依据数值仿真的结果，下面以郑州为例对城市排水系统进行建模，进一步验证叶轮在城市排水发电面的巨大潜力。

对于城市的排水系统，可以采用雨水管道设计模型来对其流量进行估计。对于雨水管道设计流量的计算，采用如下公式。

$$Q = \Psi F q$$

以 2021 年郑州 720 特大暴雨为例，进行计算。

可查郑州的暴雨强度为：

$$q = \frac{2631.92(1 + 0.7511lgP)}{(t + 14.2)^{0.779}}$$

其中 P 为重现期，考虑城市属于重要地区，因此取 $P=4$ 。 t 为设计降雨历时，由地面集水时间 t_1 ，雨水在管道内流动时间 t_2 以及折减系数 m 确定，即 $t=t_1+mt_2$ 。考虑城市建筑密度大，则取 $t=8min$ 。且城市排水要求高，取 $m=1$ 。同时，考虑到城市排水系统较长，则可取 $t_2=2min$ 。因此 $t=10min$ ，。由此计算得： $q = \frac{319.37L}{s} / h \ a$

考虑郑州城市化程度高，取汇水面积 $t=0.6$ 。

汇水面积应当根据地形图进行确定，考虑只需要进行估算，因此采用市区雨水井的平均汇水面积替代 F 。以郑州为例，郑州雨水井大概为 50 万个，而郑州市区的面积大概为 83097ha，则可取 $F=0.178ha$ 。

按照以上数据进行计算可求得雨水管道的设计流量 $Q=34.10L/s$ 。

当水轮机处于与仿真时的相似流动状态，且管道处于设计流量状态，以叶尖转速作为整个叶轮特征转速，则 $\Phi=0.50$ ， $\Psi_T=0.1$ 。假设排水所用的管道为 200mm，则流速及发电功率为

$C_m = \frac{Q}{S} = 1.09m/s$, $P=PQu^2\psi_T=13.6W$ 。按照五十万个雨水管道估算,可得城市发电量为6800KW。若稳定发电,该发电功率可为约15000户家庭提供用电。稳定工作一小时,可以减少6779.6kg二氧化碳排放。

当叶轮机处于水泵模式工作时,则 $\Phi=0.30$, $\Psi_T=0.356$ 。管道同样为200mm,则 $u = \frac{C_m}{\phi} = 3.63m/s$ 。由此可计算叶轮水泵模式对单位质量的水加功为 $l_u = u^2\psi_T = 4.69J/kg$, 则抽吸量为 $367.56m^3/h$ 。

三、结论

本项目通过对叶轮机工作模式切换原理的深入剖析,基于速

度三角形和流线角度建立数学模型,选取合理参数完成叶轮设计,进行仿真计算,验证了叶轮机在不同转速下实现两种工作模式的可行性。通过搭建实验装置,使用齿轮箱切换齿轮啮合组实现工作模式转变,实现了预期功能,为理论研究提供了实践支撑。

城市应用方案以郑州为例,利用雨水管道设计模型计算流量,估算出在不同工况下叶轮机的发电功率、抽吸量等关键数据。结果表明,该系统在城市排水发电和排水功能提升方面潜力巨大。若广泛应用,一方面可在暴雨时加速排水,有效缓解城市内涝;另一方面,在小降雨量时将雨水动能转化为电能存储,提高能源利用效率,减少二氧化碳排放,为低碳海绵城市建设提供创新解决方案。

参考文献

[1] 张伟,王璇,孙慧超,等.基于多重精度降雨数据的北京市极端降雨事件研究[J].水资源保护.2025,41(02):123-132.
[2] 肖湘乾,余敦先,夏军,等.基于全生命周期的深圳市海绵示范区碳排放核算[J].水资源保护,2025,41(03):222-231.
[3] 章胡中,程迎松,何思涵,等.基于抽水蓄能的井下给排水两用能量回收系统[J].机械.2024,51(09):22-27.
[4] Wang X. X H E A. Study of a novel rotational speed amplified dual turbine wheel wave energy converter[J]. Applied Energy. 2021.
[5] 冯婧,张丽珠,韩畅,等.基于系统动力学的北京城市交通碳排放模拟与减排路径研究[J].沈阳工业大学学报(社会科学版),2025,18(04):407-418.
[6] 胡阳,王浩楠,房方,等.串列式双风轮风电机组气动特性建模及仿真[J].动力工程学报.2023,43(10):1308-1315.
[7] 中国华能自主研发的世界首台串列式双风轮风机成功吊装[J].电世界.2023,64(03):62.
[8] 刘阳,许子倩,张义云,等.S型仿生叶片对可逆多翼离心风机气动性能的影响[J].工程热物理学报.2021,42(11):2841-2848.
[9] R. E J, P. L, S T. Hydrodynamic Development and Optimisation of a Retrofittable Dual-Mode Propeller Turbine[J]. Energies.
[10] 金东海,桂幸民.航空叶轮机原理及设计基础[G].2022.