

桂林地区小区屋顶雨水发电系统研究

李日发¹, 龙 鹏^{1,2,3*}, 何海龙⁴, 吴宁宁¹, 王薪理¹, 刘 飞^{1,2,3}

¹桂林航天工业学院能源与建筑环境学院, 广西 桂林

²广西高校清洁能源装备与节能技术重点实验室, 广西 桂林

³能源产业绿色转型关键技术广西高校工程研究中心, 广西 桂林

⁴桂林航天工业学院汽车工程学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年5月27日; 录用日期: 2025年6月20日; 发布日期: 2025年6月27日

摘 要

在桂林“双碳”目标背景下, 提出了“光水互补”的能源供应模式, 探讨了城市高楼雨水发电的可行性。根据桂林地区的气候以及降雨量特点, 分析了桂林城区雨水资源利用潜力。以桂林市典型小区建筑物为例设计了一套高楼雨水发电系统。根据建筑物特点完成了雨水过滤收集装置与雨水发电储电装置的设计及选型。探讨了系统的技术可行性、经济性和环境效益, 为桂林市实现绿色低碳发展提供了实践参考, 也为其他类似地区探索可再生能源综合利用提供新的思路和方法。

关键词

降雨量分析, 雨水发电, 新能源利用

Research on Rooftop Rainwater Power Generation System in Guilin Urban Areas

Rifa Li¹, Peng Long^{1,2,3*}, Hailong He⁴, Ningning Wu¹, Xinli Wang¹, Fei Liu^{1,2,3}

¹School of Energy and Building Environment, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin Guangxi

²Guangxi Key Laboratory of Clean Energy Equipment and Energy-Saving Technology, Guilin Guangxi

³Guangxi Higher Education Engineering Research Center for Key Technologies of Energy Industry Green Transformation, Guilin Guangxi

⁴School of Automotive Engineering, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin Guangxi

Received: May 27th, 2025; accepted: Jun. 20th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

Abstract

Against the backdrop of Guilin's dual-carbon goals, a “solar-hydro complementary” energy supply

*通讯作者。

文章引用: 李日发, 龙鹏, 何海龙, 吴宁宁, 王薪理, 刘飞. 桂林地区小区屋顶雨水发电系统研究[J]. 可持续能源, 2025, 15(3): 53-61. DOI: 10.12677/se.2025.153007

model is proposed to explore the feasibility of rainwater power generation in urban high-rise buildings. Based on the climate and rainfall characteristics of the Guilin area, the potential for rainwater resource utilization in the urban area of Guilin was analyzed. A high-rise rainwater power generation system was designed taking a typical residential building in Guilin City as an example. Rainwater filtration and collection devices, as well as rainwater power generation and storage devices, were designed and selected according to the characteristics of the building. The technical feasibility, economic viability, and environmental benefits of the system were discussed, providing a practical reference for Guilin City to achieve green and low-carbon development, and also offering new ideas and methods for other similar areas to explore the comprehensive use of renewable energy.

Keywords

Rainfall Analysis, Rainwater Power Generation, New Energy Utilization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球气候变化的严峻挑战下，中国提出了“双碳”目标，即 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和[1]，为经济社会的可持续发展指明了方向。桂林市作为中国重要的生态旅游城市，以其独特的自然景观和丰富的自然资源著称。然而，随着城市化进程的加速，桂林市在能源消耗和碳排放方面面临着新的挑战。如何在保护生态环境的同时实现低碳发展，成为桂林市在“双碳”背景下的重要课题。

在此背景下，开发利用清洁能源具有重要意义。小区屋顶作为城市中未被充分利用的空间，具有广阔的应用前景。通常通过在小区屋顶安装太阳能光伏发电装置提供电能[2][3]，但是在阴雨天气，太阳能不能有效工作。根据降雨量数据统计，桂林地区近五年年降雨量达到 2000 mm 以上[4]。因此在下雨天时，可以利用高楼屋顶雨水来进行发电，实现“光水互补”的能源供应模式。针对雨水发电，国内外研究者开启了一系列的研究。皮梁等[5]以上海市高楼为例设计了屋顶雨水发电系统，计算了雨水收集量、发电量以及储水池容积，论文提出了系统设计的整体框架，但在一些关键技术细节上，如发电机的具体选型、过滤设备的详细设计等，缺乏更深入的探讨。夏正付等[6]设计了高楼雨水收集利用系统，研究了不同初始势能的发电效率，未曾考虑设备的具体选型设计。高展等[7]通过数值模拟对微型水轮机进行了优化设计，以提高发电效率。李传祥等[8]提出了一种光雨互补发电节能路灯，集成了太阳能板和集水箱。于佳鑫等[9]设计了基于排雨管道的雨水分段蓄能发电系统，利用虹吸原理蓄水排气。韦洋洋等[10]研究了南方农村地区屋檐的雨水自动发电装置，设计了水流自动循环装置。Zamora-Juárez 等[11]通过数值模拟和实验对雨水收集发电系统进行了研究，优化了水轮机的几何尺寸，提高了系统发电效率，但对系统装置的其他部件的选型设计未有提及。Carter 等[12]研究了两层建筑雨水发电系统，分析了不同降雨强度下的潜在发电功率及供电的可行性。Rahman 等[13]设计了微型水轮机，实现排水管雨水势能转化为电能。Abd Aziz 等[14]对雨水发电系统中微型发电机的定子进行了设计，通过优化铜线尺寸和圈数来提高发电机的效率。此外，还有针对风雨复合储能以及风光雨混合发电系统的相关研究[15][16]。

已有的研究对高楼雨水发电系统进行了探索性的设计，并就系统中关键设备的结构进行了优化分析，研究以某单一部件分析为主，而与装置相关的选型设计计算及可行性分析仍有所欠缺，本研究聚焦于桂林地区小区屋顶雨水发电系统，旨在探讨其在桂林“双碳”目标背景下的技术可行性、经济性和环境效

益，为桂林市实现绿色低碳发展提供实践参考，也为其他类似地区探索可再生能源综合利用提供新的思路和方法。

2. 桂林地区雨水资源利用潜力

桂林地处中国南方，属于典型的亚热带季风气候，降雨量充沛，雨水最多的季节为四月至九月，降雨量占全年的 70% 以上。这种降水分布容易导致旱涝并存的问题，丰水期水资源充裕，但枯水期仍可能面临短暂的缺水现象。此外，桂林地区为典型的喀斯特地貌，地表水涵养能力较弱，部分降雨易流失至地下溶洞，不易直接利用。桂林市近五年的年降雨量见表 1，除了 2023 年之外，其余年份的降雨量都在 2000 毫米以上，近 5 年的平均年降雨量为 2141.2 mm。

Table 1. Rainfall data of Guilin city in the past five years

表 1. 桂林市近五年降雨量数据

年份	2019	2020	2021	2022	2023
降雨量/mm	2533.6	2341.7	2136.7	2168.0	1525.9

根据桂林市人民政府网站，桂林市主城区面积 140 km² [17]，按照国标 GBJ137-90《城市用地分类与规划建设用地标准》，居住用地占比取 30%，则建筑物的总面积为 42 km²，根据公式计算建筑可回收利用的雨水资源量 W ：

$$W = \alpha \psi P A \quad (1)$$

式中： α 为综合径流系数，取 0.90； ψ 为季节折减系数，取 1.00； P 为多年平均降雨量，根据表 1 数据取平均值 2141.2 mm； A 为汇水面积，42 km²。则年均可利用雨水资源量 W 为 $8.09 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

所蕴含的势能 E_p ：

$$E_p = mgh \quad (2)$$

式中： m 为雨水的质量，kg； g 为重力加速度，取 9.81 m/s²； h 为桂林市城区的建筑平均高度，按照桂林市城市规划管理技术规定，取 25 m。因此雨水所具有的势能 E_p 为 $1.98 \times 10^{13} \text{ J}$ 。

发电总效率量取 70% 时 [6]，桂林市利用雨水发电可产生的电能 W 为：

$$W = \frac{0.7 E_p}{3.6 \times 10^6} = 3.85 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (3)$$

按照桂林市的平均电费收取标准 0.6 元/度进行计算，预估可产生的经济效益为 231 万元，减少相应 CO₂ 的排放可达 3838.45 t。

3. 典型小区屋顶雨水发电系统

如图 1 所示，为桂林市临桂区的某小区，建筑物为 32 层，高约 95 m，建筑面积约 960 m²，屋顶为平顶式钢筋混凝土结构，具有 1°~2° 的倾角以便雨水流入两侧的排水渠。

根据小区建筑特点，设计了屋顶雨水发电系统，其主要原理为利用屋顶的雨水的重力势能冲击水轮机进行发电。如图 2 所示，系统由雨水过滤收集装置、雨水发电储电装置以及用电装置三大部分组成。当下雨时，雨水沿着屋顶排水渠先进入弃流装置，然后经旁通管再过滤流入设计的集水箱，当雨水在集水箱中上涨达到高液位感应装置以后，继电器控制阀门打开，水箱中的雨水通过 PVC 管道向下流动，其所具有的势能带动水轮机转动切割磁感线后产生电流，电流通过逆变器进行稳压整流以后储存在蓄电池当中，再在需要时，通过逆变器为负载供电。当雨水在集水箱中水位低于低液位控制器时，则关闭下水

管道阀门，进行储水。若瞬时下雨量太大，通过阀门可以将部分雨水由弃流装置直接排出。

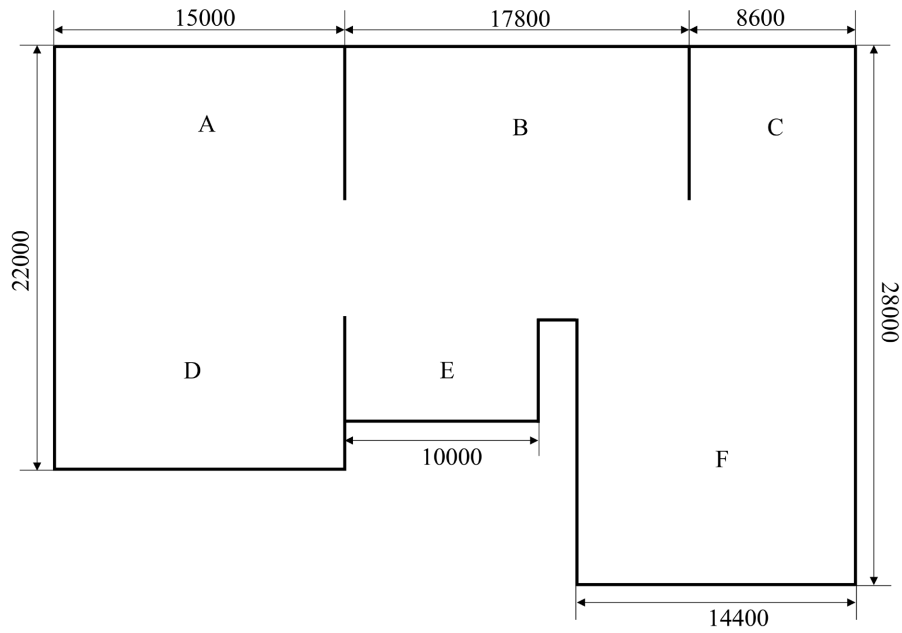


Figure 1. Plan schematic of a residential community in Guilin
图 1. 桂林某小区平面示意图

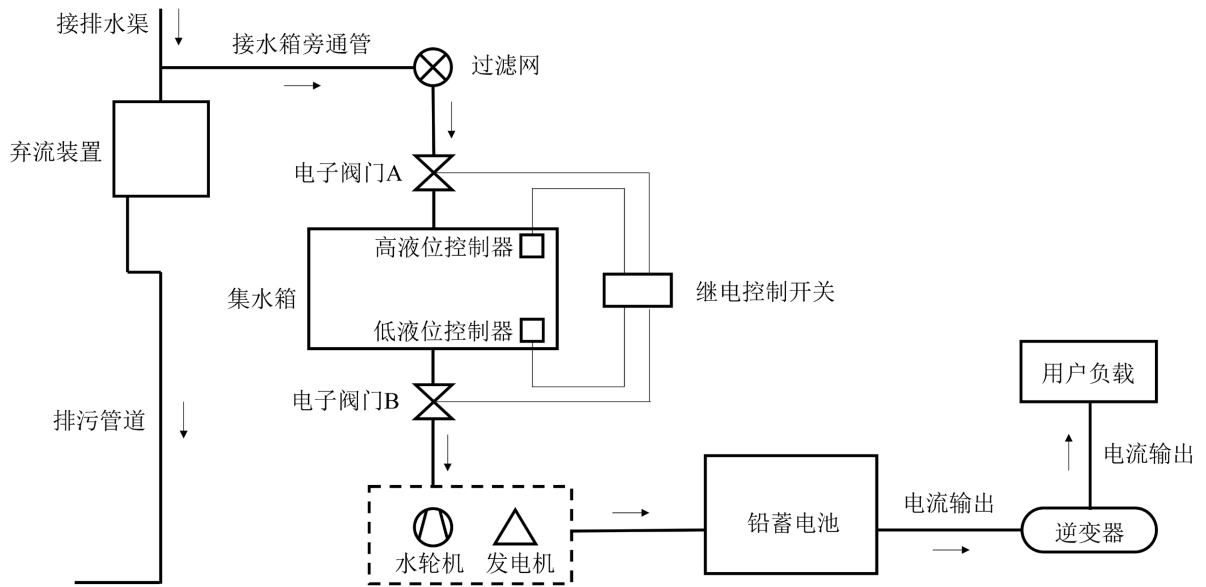


Figure 2. Schematic diagram of building rainwater power generation system
图 2. 建筑雨水发电系统原理图

3.1. 雨水过滤收集装置

根据《建筑屋面雨水排水系统技术规程》，雨水汇集设计流量 Q_s 为：

$$Q_s = k\psi_m qF \quad (4)$$

其中, Q_s 为雨水设计流量, L/s; k 为汇水系数, 取 1.0; ψ_m 为径流系数, 取 1.0; q 为设计暴雨强度, L/s·hm²; F 是屋顶汇水面面积, 0.096 hm²。

而桂林市五城区暴雨强度 q 为:

$$q = \frac{2276.830(1 + 0.581 \times \lg P)}{(t + 10.268)^{0.686}} \quad (5)$$

式中 P 为重现期, 取 3; t 为降雨历时, min, 取 5 min。则暴雨强度为 448.25 L/(s·hm²)。雨水汇集设计流量 Q_s 为 43.03 L/s。5 分钟汇集的雨水体积为 12.91 m³。则集水箱的容积应不小于 12.91 m³。

结合建筑物主体, 且不影响楼体重心, 以及遮挡居民住房阳台, 窗户等情况考虑, 将水箱安装于如图 2 中的 E 区域。设计容积约为 12.91 m³ 的集水箱尺寸如下:

$$V_{\text{箱}} = L \times D \times H = 3.6 \times 1.8 \times 2 = 12.96 \text{ m}^3 \quad (6)$$

集水箱长 3.6 m, 宽 1.8 m, 高 2 m, 总容积为 12.96 m³ > 12.91 m³, 满足暴雨强度下的集水量。并且水箱的顶部位置设计有溢流水管, 水管的直径为 120 mm。防止水箱排水不及时导致的水箱过满情况的出现。在水箱顶部开设直径 90 cm 的水箱入口, 设有圆弧人孔板以及直梯, 方便工作人员不定期对水箱进行检查和内部污物清理。水箱底部开设直径 200 mm 的排水口, 用于下水管的连接。

在集水箱内部装设液位传感器控制阀门的进水与出水(图 3), 在水箱的高液位(离顶部 10 cm)以及低液位(离底部 10 cm)处分别装设液位传感器 A、B, 在水箱的进水口以及出水口分别装设电子控制阀门 1、2, 使用继电器进行连接控制, 当雨水流入集水箱, 并且水位达到高液位传感器 A 的时候, 继电器控制打开开关 2 进行雨水排放发电; 当集水箱的雨水排出至低液位 B 时, 继电器控制开关 2 关闭, 进行雨水收集, 如此循环进行雨水发电, 有效避免了流量不稳定的问题。

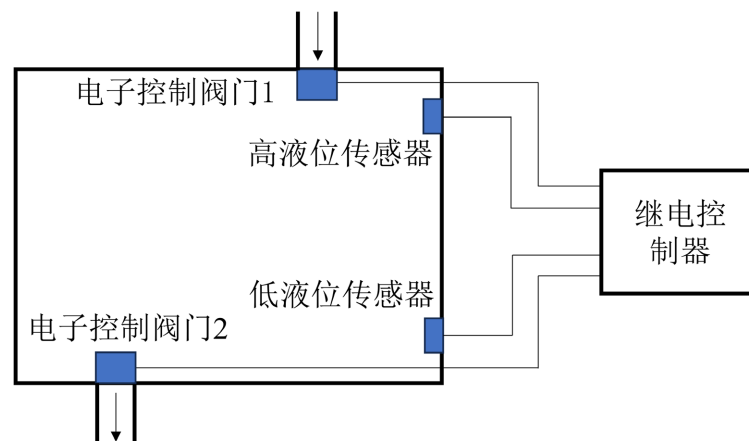


Figure 3. Control system diagram for water tank inlet and outlet
图 3. 水箱进出水控制系统图

当下雨时, 雨水会将部分楼顶的枯叶、碎石块、砂砾等污染物带入排水渠进入到集水箱, 其中所夹带的泥沙等颗粒物容易击穿和损坏水轮机的叶片。对此, 需要考虑去除初期的雨水, 以提高雨水的纯度。如图 4 所示, 雨水通过排水渠流入集水箱之前, 先通过管道流入旁边的弃流装置。弃流装置里设置有浮球阀, 随着水位上升而逐渐关闭入口, 当弃水装置入口完全关闭时, 雨水则从旁通管流入集水箱, 旁通管里面有二次过滤的滤网等过滤装置, 最后雨水经过滤网后进入到集水箱(图 5)。

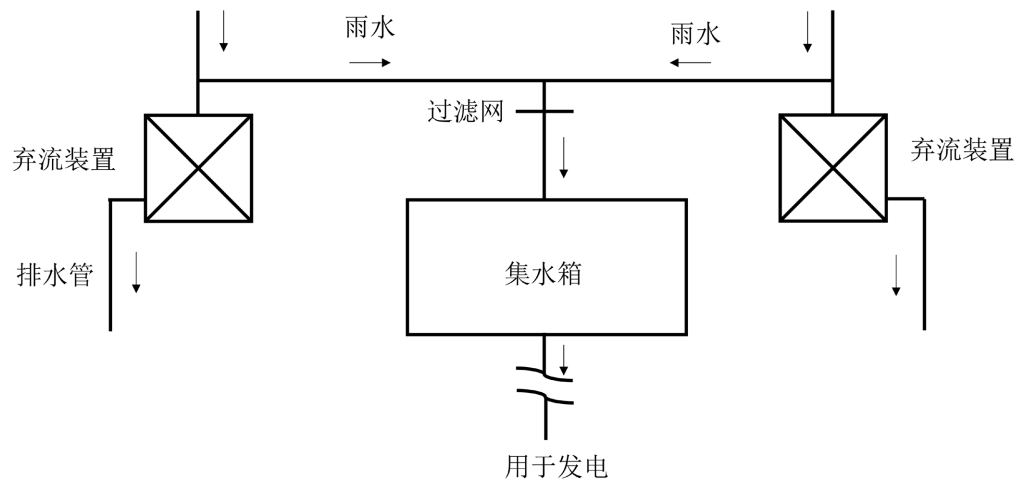


Figure 4. Schematic diagram of the abandoned water collection system
图 4. 弃流集水系统原理图

弃流装置的体积按照 2 mm 的降雨量考虑，前期需要舍弃约 1.6 m³ 的雨水，则两个弃流装置各自舍弃 0.8 m³ 的雨水，根据建筑物的特点以及材料，弃流装置长 1 米，宽 0.9 米，高 0.9 米，底板可拆卸用于泥沙清理。弃流装置与排水渠之间的连接采用直径为 250 mm 的 PVC 水管进行连接，连接集水箱管段采用直径 250 mm 的 PVC 管；排污管选择直径 150 mm 的 PVC 水管连接下水道口。

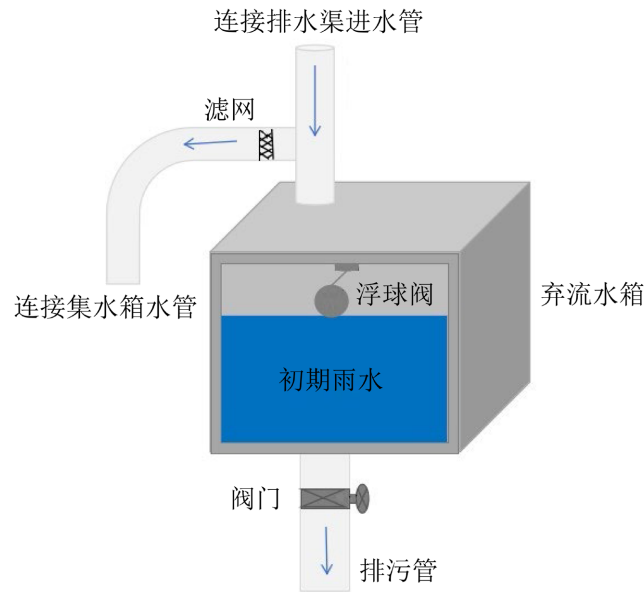


Figure 5. 3D schematic diagram of the abandoned water device
图 5. 弃流装置三维示意图

3.2. 雨水发电储电装置

雨水发电装置的关键是将雨水的重力势能有效转化为电能。水轮机是其中的关键设备，通过水的流动推动其内部的叶片旋转，进而带动与之相连的发电机发电，实现水能到电能的转换。小区典型建筑高度为 95 m，扣减水箱高度以及水轮机安装高度，雨水下降高度约为 92 m。按照水头推荐范围，选择混流

式水轮机。

按照型谱中推荐的设计比转速 n_s 与设计水头 H 的关系为:

$$n_s = \frac{2000}{\sqrt{H}} - 20 \quad (7)$$

式中 H 为设计水头, 92 m; 因此 n_s 比转速的值为 188.51 r/min。在水轮机型谱中, 转轮中比转速与之接近的为 HL180, 因此选择 HL180 转轮。其结构模型相关数据如表 2 所示:

Table 2. Main parameters of the model runner for HL180 Francis Turbine

表 2. HL180 混流式水轮机的模型转轮主要参数表

名称		数据	单位
推荐使用水头范围		90~125	m
模型转轮	实验水头 H	4.0	m
	直径 D_1	460	mm
	叶片数 z	14	片
导叶相对高度 b_0		0.20	
最优工况	单位转速	67.0	r/min
	单位流量	720	L/s
	效率	92.0	%
	汽蚀系数	0.075	
	比转速	207	
限制工况	单位流量	860	L/s
	效率	89.5	%
	汽蚀系数	0.083	

雨水下降高度为 92 m, 在不考虑阻力损失的情况下, 雨水下落到水轮机附近时的理论速度约为 42.46 m/s, 下水道管道直径为 200 mm, 对应的满管雨水流量为 1.35 m³/s。

由此确定 HL180 混流式水轮机的额定出力 p_r :

$$p_r = \eta Q H g \quad (8)$$

式中: η 为水轮机效率, 取 92%; Q 为水轮机通过的水流量, 1.35 m³/s; H 为水轮机的水头高度, 92 m; g 为重力速度, 9.81 m/s。水轮机的额定出力 p_r 为 1120.93 kw。

故可求得转轮标称直径 D_1 :

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{P_r}{9.81 \eta Q_{11r} H_r^2}} \quad (9)$$

式中 Q_{11r} 为额定工况下的单位流量, 860 L/s; 根据上式计算出的转轮标称直径 40.48 cm, 查水轮机转轮标称直径系列, 选用相近标称直径 40 cm。

水轮机效率:

$$\eta_{p0} = 1 - (1 - \eta_{M0})^5 \sqrt{\frac{D_{1M}}{D_1}} \quad (10)$$

式中: η_{M0} 为模型效率, 92%; D_{1M} 为模型直径, 46 cm; 计算得到水轮机效率 η_{p0} 效率修正值约等于 0.92,

与原型水轮机基本保持一致。

水轮机的转速 n 为：

$$n = \frac{n_1 \sqrt{H}}{D_1} \quad (11)$$

式中： n_1 为原型水轮机最优单位转速，67 r/min；则计算的水轮机转速为 1607 r/min。由额定转速系列查得相近的转速为 1500 r/min。

水轮机的额定流量 Q_r ：

$$Q_r = Q_{11r} D_1^2 \sqrt{H} \quad (12)$$

计算得到额定流量为 1.32 m³/s。而雨水满流状态下水管的流量可达 1.35 m³/s，因而选型设计符合要求。

由于降雨量分布不均匀，按照桂林市暴雨强度公式(5)计算可知，24 小时最大的降雨量约为 170 mm，则雨水体积为 163.57 m³。按照公式(2)~(3)计算可得单日最大发电量为 28.68 kW·h。年降雨量平均值 2141.2 mm，则全年可发电量为 360.36 kW·h，减少约 359.27 kg 的 CO₂ 的排放。然而，在实际降雨过程中，由于降雨在时间和空间上的不均匀性，尽管设计的装置具备一定的储水能力，但无法保证雨水在下水管中持续满流运行，这会导致发电效率有所降低。因此，发电效率的实际表现需要通过进一步的实验来深入探究。

由于铅酸蓄电池工作输出电压稳定、价格相对便宜，因此储能电池选择铅酸蓄电池，单块电池电压 24 V，300 Ah，共 4 块并联。由于桂林地区降雨在时空上的分布不均匀，丰水期能充分利用蓄电池蓄电，枯水期时需搭配光伏发电等其他方式补充才能满足需求。

发电机根据单日发电量及额定功率等选择小型水轮直流发电机，其型号为 ZFHW 250-7.14，额定电压为 250 V，额定功率为 8.5 KW，额定转速最大为 1500 r/min。

逆变器选择型号为 6 LY-gpj 智能调节逆变器，额定功率为 8000 W，电池电压为 48 V 至 72 V，输出电压为 110 V~240 V。

4. 结论

(1) 桂林地区雨水利用潜能较大，年均降雨量在 2141.2 mm，城区雨水发电理论最大效益可达 231 万元/年，减少 CO₂ 的排放可达 3838.45 t/年。

(2) 面积为 960 m²，高 95 m 的小区建筑年均雨水发电可实现 360.36 kW·h，减少约 359.27 kg 的 CO₂ 的排放。水箱尺寸为 3.6 m × 1.8 m × 2 m，弃流装置为 1 m × 0.9 m × 0.9 m，水轮机选用型号为 HL180 混流式水轮机，叶轮直径为 40 cm，转速为 1500 r/min，配套对应的发电机及逆变器，蓄电池采用单块电池电压为 24 V，容量为 300 Ah 的铅蓄电池，共 4 块并联。研究结果对于后续的系统设计可以提供借鉴，可推广至高降雨量的地区。

基金项目

国家大学生创新项目“一种太阳能与雨水复合储能系统”(202311825018)。

参考文献

- [1] 李慧明, 李思齐. 全球碳中和潮流下中国“双碳”行动的战略意涵与双重价值[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2025, 24(1): 27-39, 125.
- [2] 邵琪珺. 在安置房小区屋顶安装光伏发电系统的前景分析[J]. 内江科技, 2017, 38(6): 130, 147.

-
- [3] 龚贺. 住宅小区屋顶光伏发电系统的应用研究[J]. 浙江建筑, 2015, 32(9): 51-55.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- [5] 皮梁, 郑伟. 屋顶雨水发电系统设计[C]. 智能信息技术应用协会农业与自然资源工程国际会议. 昆明: 昆明理工大学现代农业工程学院, 2011: 5.
- [6] 夏正付, 张凯, 龚俊. 高楼雨水收集利用系统分析[J]. 中国高新技术企业, 2013(14): 66-67.
- [7] 高展, 陈梅洁, 安成, 等. 微型水轮机复合雨水发电装置的流场数值模拟研究[J]. 节能技术, 2013, 31(6): 495-498.
- [8] 李传祥, 袁磊, 史善冉, 等. 光雨互补发电节能路灯[J]. 物联网技术, 2014, 4(9): 8-9.
- [9] 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.
- [10] 韦洋洋, 蒋传富, 殷飞. 屋檐雨水自动发电循环收集一体化装置设计[J]. 现代农村科技, 2024(1): 150-151.
- [11] Zamora-Juárez, M.Á., Fonseca Ortiz, C.R., Guerra-Cobián, V.H., López-Rebollar, B.M., Gallego Alarcón, I. and García-Pulido, D. (2023) Parametric Assessment of a Pelton Turbine within a Rainwater Harvesting System for Micro Hydro-Power Generation in Urban Zones. *Energy for Sustainable Development*, **73**, 101-115.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.01.015>
- [12] Carter, J., Rahmani, A., Dibaj, M. and Akrami, M. (2023) Rainwater Energy Harvesting Using Micro-Turbines in Down-pipes. *Energies*, **16**, Article 1660. <https://doi.org/10.3390/en16041660>
- [13] Rahman, M.A.A., Mohamad, E., Azwan, A., et al. (2019) Regenerating Energy through the Rainwater Down Piping System. *International Conference on Design and Concurrent Engineering* 2019, Sendai, 23-24 September 2019, 1-10.
- [14] Dewi Abd Aziz, P., Yunus, N.H.M., Shariffuddin, N.S., Saleh, N., Zakaria, S., Mohamad, N., et al. (2015) A Study of Micro Hydro Generator Performance Using Rainwater for Domestic Energy Harvesting Stator Design (Part 1). 2015 *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*, Bandung, 5-7 October 2015, 71-75.
<https://doi.org/10.1109/icseea.2015.7380748>
- [15] 郝中甲, 何隆英, 申路民. 风光雨储混合发电系统研究[J]. 绿色科技, 2018(4): 171-174.
- [16] 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(3): 168-171.
- [17] 桂林市人民政府门户网站. 区划概览[EB/OL]. 2020-06-02.
https://www.guilin.gov.cn/glyx/glgk/xzqh/202006/t20200602_1821762.shtml, 2025-05-30.