

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.06.017

智能供水管网的内联闭式水力发电系统的研发

杨洪兴¹, 沈志成¹, 姚尧¹, 曹炳豪², 谢景耀², 李立楚²

(1. 香港理工大学 建筑环境及能源工程学系, 香港; 2. 香港特别行政区政府水务署, 香港)

摘要: 为更好地监测管道泄漏和控制水压,智能供水管网管理系统(简称“智管网”)正逐步应用于城市供水管网。传统的供水监测仪表和传感器多采用蓄电池供电,由于电池寿命与容量有限,使得在实时监测模式下需要经常更换电池,造成经济与人的耗费。通过数值模拟研究和实验研发了一种结构简单、安装方便的内联闭式水力发电系统,消耗有限的水头便可为“智管网”感应和监测设备及数据传输装置提供可靠的电力,通过提高站点之间的通信频次来保障实时监控,同时避免频繁地更换电池。此外,该管道水轮机通过管道内的喇叭口与挡块设计来实现双向流发电。介绍了该系统的工作设计原理和仿真实验研究结果,以及实测的内联闭式水力发电运行数据。实验结果表明,该系统能够可靠地运行,可为下一步的研发提供宝贵的理论和应用基础。

关键词: 智能供水管网; 蓄电池; 内联闭式水力发电; 双向流发电

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)06-0097-06

Development of Inline Hydropower Harnessing Device to Supply Power to the Water Intelligent Network

YANG Hong-xing¹, SHEN Zhi-cheng¹, YAO Yao¹, CHO P H², TSE K Y²,
LEE L C²

(1. Department of Building Environment and Energy Engineering, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 2. Water Supplies Department, the Government of the Hong Kong Special Administrative Region <HKSAR>, Hong Kong, China)

Abstract: Water Intelligent Network (WIN) is being progressively adopted for better pipe leakage detection and water pressure management in urban water distribution systems. Traditionally, all the data monitoring meters and sensors of the WIN system are powered by chemical batteries, and the limited life and capacity of the battery makes it necessary to replace the battery frequently in the real-time monitoring mode, resulting in economic and manpower cost consumption. An inline hydropower harnessing device (IHHD) with the simple structure and convenient installation was developed. The IHHD only consumes a small part of the hydraulic head in water pipes to independently provide power to the sensing and monitoring equipment and data transmission devices of WIN, so that the frequency of data transmission to the master station can be greatly increased to facilitate real-time monitoring of the water supply network without frequent change of batteries. In addition, the blocks and bidirectional bell mouth design inside the inline turbine system make it capable of operating under bidirectional flows. This paper presents the

通信作者: 姚尧 E-mail: yaoharry.yao@connect.polyu.hk

working principle of the IHHD system and the results of the simulations and experiments of the development, as well as data gathered from site trial of the IHHDs inside live fresh water supply pipelines. The results demonstrate that the system can operate reliably as well as provide a valuable theory and utilization basis for the next stage research and development.

Key words: water intelligent network; chemical battery; inline hydropower; bidirectional flow power generation

1 项目简介

本研究课题为香港特别行政区政府创新及科技局 (Innovation and Technology Bureau, 简称创科局) 于 2017 年根据科技统筹整体拨款 (Tech Connect Block Vote) 批准的一项创新科技项目, 旨在为香港特别行政区政府水务署的智能供水管网管理系统 (Water Intelligent Network, 简称“智管网”) 研发一套将地下输水管内的部分剩余压头转换为电能的可再生能源装置, 即直列式内联闭式水力发电装置 (Inline Hydropower Harnessing Device, 简称 IHHD)。

香港理工大学建筑环境及能源工程学系与香港特别行政区政府水务署在该项目下开展了一系列合作, 对 IHHD 进行设计和优化, 使其适用于香港供水网络内复杂而多变的水流环境, 最终成功开发并交付了多套 DN150、DN200 和 DN250 管径的 IHHD 系统, 供实际供水网络测试并最终应用。

2 研发背景

当前, 传统的经济发达城市区域, 特别是人口密集的老城区中心地带, 均受到水管渗漏以及爆管带来的社会影响和财产损失的困扰。供水网络日益老化是造成这一现象的主要原因^[1]。通过对香港历史供水与用水数据的统计, 约 15% 的供水从管网中渗漏。为了降低漏损率, 及时预防监测供水管网中的渗漏, 水务署逐步在香港供水管网中应用了“智管网”系统。该系统通过感应设备持续监测区域内用水流失的情况, 并分析从供水管网收集的数据, 可以有效地实现主动检测渗漏、智慧化管理水压、快速维修渗漏水管, 以及更换或修复水管等。按照水务署的计划, 整个“智管网”的建造将于 2024 年完成。

“智管网”的监控需要可靠、方便、经济高效的供电系统为在线监控仪器和远程监控网络供电。现时“智管网”的数字化信息采集系统使用蓄电池供电, 如要采用实时数据传输模式进行监控, 将大

幅增加耗电量。由于蓄电池寿命有限, 因此需要频繁地派人巡检和更换电池, 增加了经济和人力成本^[2]。由于供水管道系统庞大且大部分位于地下, 空间狭小, 使用市政电网供电也未必可行^[3], 因此一个高效可靠、成本可控、维护成本低的供电系统解决方案成为现代供水管网管理不可或缺的重要部分。

在该背景下, 确定研发新型内联闭式水电发电系统。该系统安装在供水管道中, 利用供水管道的过剩水头进行发电, 为“智管网”的监控设备与数据传输设备等供电。利用管道中的水力进行发电, 可靠稳定并可持续供电, 在避免频繁更换传统蓄电池的同时, 实现了供电系统的绿色能源化。该新型系统于 2012 年在第 40 届瑞士日内瓦国际发明展上荣获银奖^[4]。2017 年初, 该新型系统在香港供水管道的某区域进行了现场试验, 结果证明该系统可以实现设计目的, 对“智管网”等监测设备进行稳定供电^[5]。该系统的发展可为解决城市供水管网管理网络的能源问题提供借鉴。

3 系统组成和主要技术指标

一套 IHHD 发电系统主要包括涡轮发电机组、控制器、蓄电池和假负载四部分, 如图 1 所示。

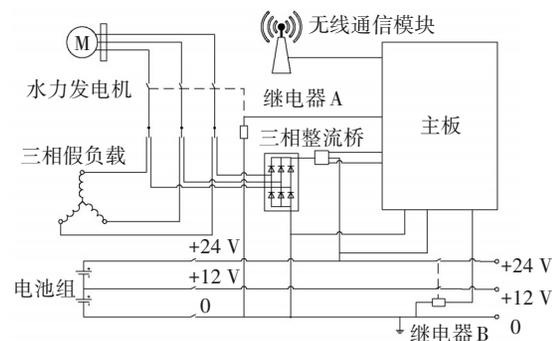


图 1 一套 IHHD 发电系统

Fig.1 An IHHD power generation system

涡轮发电机组 (见图 2) 核心部分是涡轮和 1 台内嵌式永磁体微型三相交流发电机, 通过 DN100 标准法兰与 T 形三通管连接固定。其基本工作原理是

利用高效的直列式涡轮机将输水管中部分剩余压头转化为电能储存在蓄电池组,为“智管网”供电和提供系统消耗。当水流过输水管道时,涡轮机驱动微型发电机产生电能,在平均水流速约1.5 m/s时可产生平均12 W以上的电力。该系统适用不同口径管道(如DN150、DN200或DN250等),在管道的主要流动方向布置有双向喇叭口,用于引导水流提高效率。喇叭口的末端导流管位置装有经过计算流体力学模拟优化的多曲面导流挡块,在主管道中间位置设置一个垂直于主管道方向的DN100三通法兰,用于插入和安装固定涡轮发电机组。

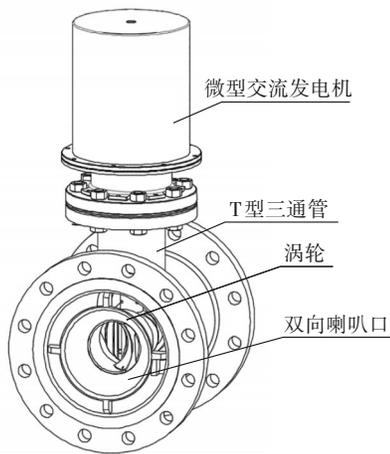


图2 一套涡轮发电机组

Fig.2 A turbine generator device

考虑到自来水检查井中通常高温潮湿,而且在暴雨季节有被积水淹没风险,故将所有的电气设备分装在4个IP67防水标准的防水箱内,包括1个自动控制单元(ACU)、2组24 V17 Ah蓄电池组和1个用于电池充满时耗散多余功率的负载分流电阻器。

IHHD的主要技术指标如表1所示。

表1 IHHD的主要技术指标

Tab.1 Technical indicator of IHHD

类型	描述
水的类型	自来水
管道类型	低碳钢自来水管
管道直径	DN150, DN200, DN250
适用流速	平均最低为1.5 m/s
最大压降(水头损失)	以3.3 m/s的流速穿过IHHD的涡轮单元时,水头损耗不超过8.5 m
负载设备	用于实时远程监控的直流供电设备,平均功耗<10 W

4 IHHD测试平台(室内)

为对IHHD系统进行性能测试,在香港理工大

学实验室建立了一个完整的测试平台(见图3)。



图3 香港理工大学的IHHD测试平台(室内)

Fig.3 IHHD test rig at the Hong Kong Polytechnic University (indoor)

该平台包含1个3 m³蓄水箱和2台30 kW DN150立式离心泵,通过一个变频控制柜实现流速的控制,最大循环水量为480 m³/h,在DN200管道中最大等效流速为4.25 m/s。水箱的出口和回水口位置分别安装2个DN150闸阀和1个DN250球阀,用于更换实验管道和安装IHHD时截断水流。在主测试管段上安装1个DN250电磁流量计,用于测量管内流速,IHHD测试装置上下游各设有1个压差变送器,用于测试压头损失。IHHD内的永磁三相发电机输出的交流电经过三相整流桥整流为脉冲直流电,可为24 V17 Ah的蓄电池组充电,通过仪表记录电池电压和充电电流,推算发电机的输出功率。图4、5分别为3台不同管径的IHHD的测试结果,输出功率和压头损失都能满足设计要求。

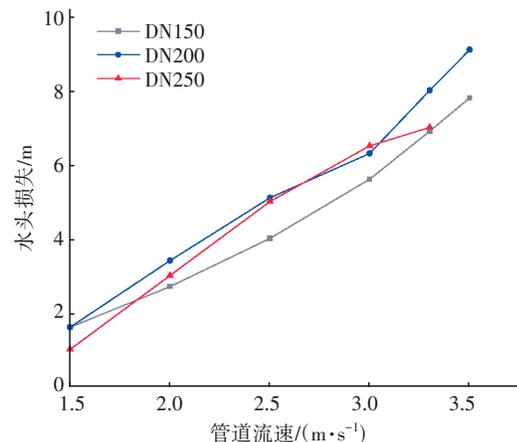


图4 IHHD的水头损失特性

Fig.4 Characteristics of water head loss of IHHD

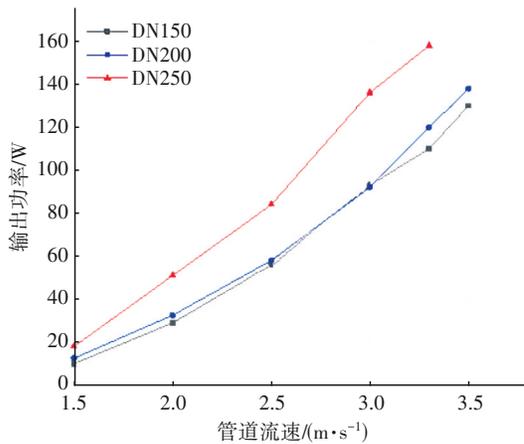


图5 IHHD的功率输出特性

Fig.5 Characteristics of power output of IHHD

5 水务署IHHD测试平台(室外)

考虑到在实验室长时间开启高功率水泵带来的震动、噪声和有限的水量长时间循环带来的水温升高等问题,为顺利完成IHHD的耐用性测试,在水务署马鞍山滤水厂设立了IHHD室外测试平台(见图6)。

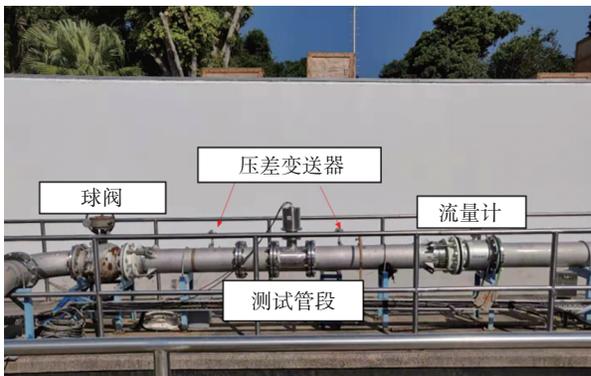


图6 水务署IHHD测试平台(室外)

Fig.6 IHHD test rig at Water Supplies Department's facility(outdoor)

测试平台中2台高功率潜水泵由水池抽水,先经过电磁流量计,再通过IHHD测试管段之后重新注入水池。水泵工作频率恒定,可以独立启闭,在测试管段下游通过球阀控制管道内的流速。IHHD在此处完成每天8h、连续30d运转的耐久性测试以及连续3d的24h运转测试。上述测试充分证明了IHHD的设计可靠性、结构坚固性和设备耐用性。

6 IHHD的技术优势

① 目前市面上大部分微型水力发电机的设计初衷在于最大限度地利用水流压头发电,因此当

安装在供水管道使用时,会导致阻力损失增大。与之相比,本设备中的涡轮和挡块经过了CFD模拟设计和优化(见图7),只需利用少量输水管网中的剩余压头即可转化电能,为管网的地下监测和数据传输设备供电,有助于减少碳排放。以理想情况全日平均输出功率为12W计算,可节电105kW·h/a或减少二氧化碳排放73.8kg/a,并减少了化学电池的使用量、环境污染和更换运输电池引发的碳排放,因此具有低碳环保的特性。

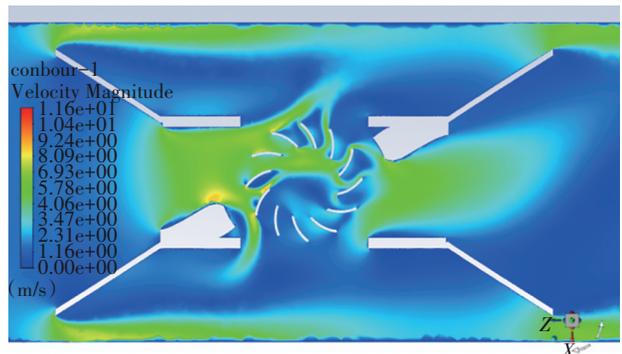


图7 CFD模拟水流

Fig.7 CFD simulation chart of water flow

② 传统的水力发电机因为结构不匹配等因素通常需要改变管道流向,但自来水地下检查井通常为已有设施,尺寸狭窄,因此没有足够的空间改变管道流向。发电机在下雨时还可能被雨水淹没而损坏,且水管中不时发生的瞬间浪涌也可能导致发电机过载损坏。相比之下,本设备结构紧凑,并采用直线型结构设计,无需改变管道流向,所有部件均达到国际标准IP67防水等级,易于安装在密闭潮湿的自来水地下检查井内。此外,T型管坚固耐用的喇叭口结构设计使其可承受管道中间歇性发生的水流速度的波动,其最大耐冲击流速为短时3.3m/s。

③ 因为本系统采用自供电设计,因此在城市人口密集区布设时,无需额外申请开挖道路铺设线缆和建设路边配电箱等附属设施,减少了升级管网时对市民生产生活造成的影响。此外,本系统无需频繁巡检并更换电池,即可实现长时间持续的远程实时监控,对市政电网无法覆盖的城郊偏远地区、山区等地方非常适用。

④ 香港特别行政区对自来水的水质有极其严格的要求,任何潜在的污染源都需要被控制。本设备表面所有与水接触的部件均采用药品工业级

别316L不锈钢制造,传动轴采用机械密封设计,不会污染自来水水质。一台安装在自来水检查井的IHHD见图8。

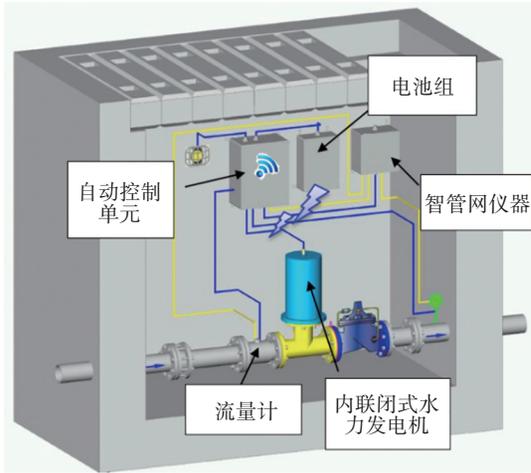


图8 一台安装在自来水检查井的IHHD

Fig.8 An IHHD device installed in a typical water main equipment chamber

7 现场试验性能测试

经过室内性能测试与室外耐久性测试后,在水务署的供水管道中选取了4个具有合适水流速度与水头的安装地点, IHHD系统开始进行实际工况的长期试验。图9为IHHD的安装现场。根据“智管网”监测系统测量的流速与压力,表2列出了4台IHHD运行数据的记录结果。



图9 IHHD安装站点

Fig.9 An IHHD trial site

港岛区柴湾泰民街站点典型日的数据监测情况如图10、11所示。长期测试结果表明, IHHD可在城市供水管道中提供稳定可靠的电力供给。鉴于城市住宅区日常用水模式(2峰1谷)的高度波动性,

IHHD在日间用水高峰期,电池蓄电采用分流电阻卸载的方式有效地存储电能,并保护电气组件不过载、机械部件不损坏。在凌晨至第二天清早的用水低谷时期,电池利用储存的电能持续地为远程数据传输设备供电,从而实现全日无间断的电力供给。在现场试验中,除港岛区香港仔渔光道站点的日均水流流速(约为0.8 m/s)未达到设计流速指标导致发电量略低之外,所有IHHD均能够在1.5 m/s的水流速度下产生12 W以上的电力。

表2 IHHD运行数据

Tab.2 Operating data of IHHD

安装日期	安装地点	管径	平均流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	平均输出功率/W
2020年11月23日	港岛区柴湾泰民街	DN200	1.9	19
2020年11月25日	港岛区香港仔渔光道	DN200	0.8	6
2020年11月26日	新界区元朗加州花园	DN200	1.75	14
2020年12月8日	港岛区大潭郊游径	DN150	2	16

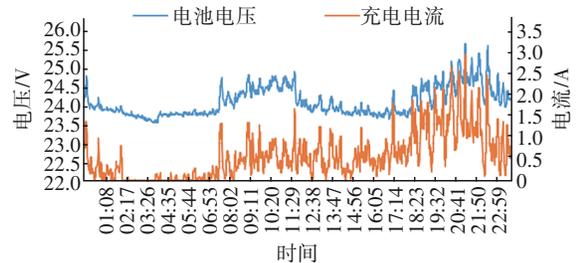


图10 港岛区柴湾泰民街站点典型日电压与电流曲线

Fig.10 Typical daily voltage and current curves from the system at Tai Man Street, Hong Kong Island

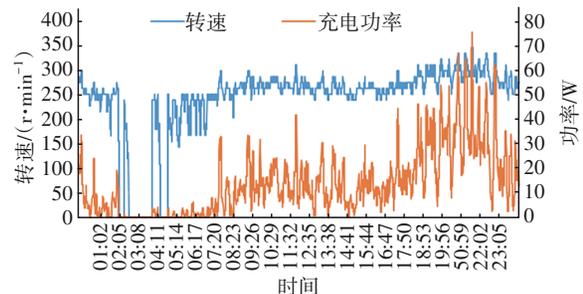


图11 港岛区柴湾泰民街站点典型日转速与充电功率曲线

Fig.11 Typical daily rotation speed and charging power from the system at Tai Man Street, Hong Kong Island

图12为泰民街站点2021年6月—8月的部分日均功率数据记录。可见,在长达一个半月以上的时

间中, IHHD 都能稳定地全日持续输出 12 W 以上的电能为电池充电。考虑到“智管网”远程设备的最大功率约 12 W 且为间歇性工作, 因此 IHHD 装置完全有能力给“智管网”设备提供持续稳定的电能供给。

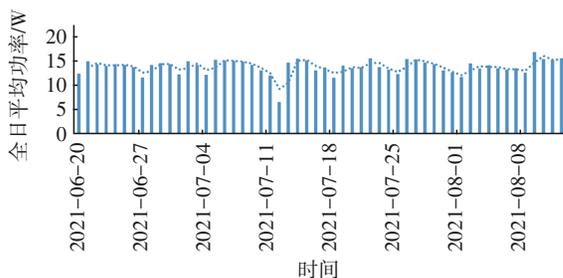


图12 港岛区柴湾泰民街站点日均功率数据记录

Fig.12 Daily average power data record at Tai Man Street, Chai Wan, Hong Kong Island

8 结论

新型内联闭式水力发电系统可以安装在空间受限的供水管道网络, 并为“智管网”的监测与数据传输设备等提供可靠稳定清洁的能源供应。根据长期实验结果, 新型内联闭式水力发电系统适用于城市供水管道的水流变化情况, 在管道流量的峰值与低谷可通过主板控制系统进行调节, 保证设备供电的稳定性, 在 1.5 m/s 的管道流速下可以产生 12 W 以上的输出功率。该技术已被香港水务署纳入“智管网”项目的实施中, 将在“智管网”的合适站点进行安装。该技术研究为城市供水管网管理网络的能源使用提供了一个新选择, 具有一定的借鉴

意义。

参考文献:

- [1] BROTHERS K. A practical approach to water loss reduction[J]. *Water* 21, 2003: 54-55.
- [2] VALERA A C, SOH W S, TAN H P. Enabling sustainable bulk transfer in environmentally-powered wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2017, 54: 85-98.
- [3] ZARCHI D A, VAHIDI B. Multi objective self adaptive optimization method to maximize ampacity and minimize cost of underground cables[J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2018, 5(4): 401-408.
- [4] CHEN J, YANG H X, LIU C P, *et al.* A novel vertical axis water turbine for power generation from water pipelines[J]. *Energy*, 2013, 54: 184-193.
- [5] DU J Y, YANG H X, SHEN Z C, *et al.* Development of an inline vertical cross-flow turbine for hydropower harvesting in urban water supply pipes[J]. *Renewable Energy*, 2018, 127: 386-397.

作者简介: 杨洪兴(1960-), 男, 河北邯郸人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事管道微水电、风能开发技术、风光互补蓄能技术等可再生能源利用和建筑节能的前沿课题研发工作。

E-mail: hong-xing.yang@polyu.edu.hk

收稿日期: 2021-12-18

修回日期: 2022-01-29

(编辑: 衣春敏)

科学防御水旱灾害, 有效促进人水和谐