

高压永磁电机在双向竖井贯流泵站的应用分析

张 鹏

(上海市堤防泵闸建设运行中心, 上海市 200080)

摘 要: 竖井贯流泵近年来因结构可靠、流道损失小、开挖深度小等特点而被广泛应用于多座大中型低扬程泵站。但因竖井内一般设置有高速电机、齿轮箱及轴承箱, 设备数量多, 空间局促, 噪声叠加, 特别是单泵 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右流量稍小的竖井贯流泵, 因竖井比例大而导致竖井侧进水口的宽高比大, 对水流流态不利。为使竖井贯流泵具有更好的适应性, 以南新泾泵闸竖井贯流泵为例, 在对比了电机能耗、泵房尺寸、双向调速、出口闸门速度、噪声方面的优劣后, 采用低速永磁电机配套变频器替代原高速电机配套齿轮箱减速。并通过分析水泵机组的运行过程和故障成因, 对高压永磁电机进行状态监测、故障诊断和状态趋势预测, 实现智慧化运维管理。

关键词: 竖井; 泵站; 永磁电机; 变频

中图分类号: TV675

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0225-04

Analysis on Application of High-Voltage Permanent Magnet Motor in Bidirectional Shaft Tubular Pumping Station

ZHANG Peng

(Shanghai Dike Pumping Station Construction and Operation Center, Shanghai 200080, China)

Abstract: Due to its reliable structure, small flow channel head loss and small excavation depth, the shaft tubular pumps have been widely used in many large-sized and medium-sized low-head pumping stations in recent years. There are generally high-speed motor, gear box and bearing box in the shaft. The number of equipment is large, the space is limited and the noise is superimposed, especially for the shaft tubular pumps with a single pump flow rate of around $10 \text{ m}^3/\text{s}$ and a slightly smaller flow rate. Due to the large proportion of the shaft, the width-to-height ratio of the water inlet on the side of the shaft is large, which is unfavorable for the flow pattern of the water. In order to make the shaft tubular pump have better adaptability, taking the shaft tubular pumps of Nanxinjing Pump Gate as an example, after the comparison of the advantages and disadvantages of motor energy consumption, pump room size, bidirectional speed regulation, outlet gate speed and noise, the low-speed permanent magnet motor with frequency converter is used to replace the high-speed motor with gear box for deceleration. By analyzing the operation process and fault causes of the pump unit, the condition monitoring, fault diagnosis and condition trend prediction for high-voltage permanent magnet motors are conducted to realize the intelligent operation and maintenance management.

Keywords: shaft; pumping station; permanent magnet motor; frequency conversion

0 引 言

竖井贯流泵组将轴系的支承结构、推力轴承和导轴承布置于开敞的竖井内, 采用干式电机, 因此电机运行安全可靠。电机及泵体可单独拆卸, 安装检修方便。竖井贯流泵的水流方向基本与泵轴方向一致, 流道水头损失小, 泵站开挖深度较小, 特别适用于低扬程、大流量泵站。由于该泵型优异的性能特点, 已大量成功应用于国内多座大中型低扬程排涝泵站^[1-6]。

竖井内一般设置异步电机、配套齿轮减速箱和推力组合径向轴承箱, 同时还需考虑运行维护人员通道的宽度, 故竖井贯流泵站设计对竖井的宽度和长度有一定的要求。当竖井贯流泵单泵流量稍小, 特别是流量接近 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 竖井外径较大, 竖井流道进出水口的宽高比大, 不利于水流流态。同时, 齿轮箱易磨损, 需定期更换润滑油, 维护工作量大, 维护成本高, 竖井内空间局促, 且因高速旋转及摩擦, 振动噪声加剧。而永磁电机因结构简单、运行可靠、体积小、质量轻、损耗少、效率高及功率因数高等特点^[7], 近年来在多个行业得到应用。本文结合上海南新泾泵闸双向竖井贯流泵站, 论述采用永磁电机来优化竖井内设备布置及水泵运行性能, 以及此举

收稿日期: 2025-06-30

作者简介: 张鹏(1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水利工程全过程建设管理工作。

对泵站前期工程投资、水泵运行稳定性及后期运行维护带来的效益。

1 永磁电机在水利泵站中的应用现状

永磁电机是由永磁体建立励磁磁场,利用磁引国内永磁电机在水利泵站的应用见表1。

表1 国内永磁电机在水利泵站的应用

泵站名称	泵型	单泵流量/ (m³·s ⁻¹)	电机/ 台	功率/ kW	电压等 级/kV	外形尺寸/(mm×mm)	建设时间
西大盈泵站	双向潜水贯流泵	5	3	250	0.4	φ850×1 290(长)	2016年
淀东杨树浦泵闸	潜水贯流泵	5	4	185	0.4	φ990×700(长)	2017年
外环西河泵闸	双向潜水贯流泵	5	4	280	0.4	φ990×700(长)	2019年改造
金泽水库取水泵站	立式轴流泵	10	2	450	6	φ1300×2 180(高)	2021年
南新泾泵闸	双向竖井贯流泵	13.3	3	710	10	φ1160×2 500(长)	2022年
航塘港南延伸整治工程排涝泵站	斜式轴流泵	20	3	900	10	φ1160×2 500(长)	2022年
南水北调韩庄泵站	灯泡贯流泵	25	5	1 800	6	φ3060×2 500(长)	2011年

2 上海南新泾泵闸应用案例分析

应用竖井贯流泵的国内已建和在建泵站已达50多座^[1],其中单泵流量最小为8 m³/s,最大达50 m³/s。陈加琦等^[2]统计分析了20余座水泵装置最优效率大于75%的竖井贯流泵尺寸后,对竖井贯流泵的竖井进水流道、出水流道的主要控制尺寸提出了与叶轮直径的比例设计范围,建议竖井外径*b*/叶轮直径*D*=1.32~1.6,竖井内长度*L*/叶轮直径*D*=2.69~3.32。

竖井贯流泵一般采用6级或8级的异步电机配套齿轮减速箱来实现驱动,轴向长度大。齿轮箱精度要求较高,多采用进口产品,需定期更换润滑油,竖井内各设备对其周围空间有一定要求。

含齿轮箱的竖井贯流泵竖井内布置图见图1。

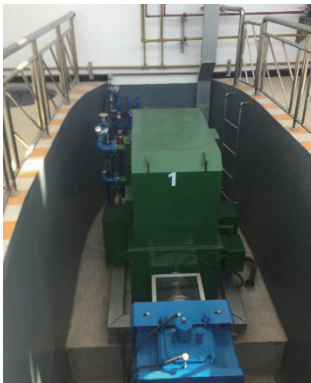


图1 含齿轮箱的竖井贯流泵竖井内布置图

上海南新泾泵闸双向竖井贯流泵站,单泵设计流量约13.3 m³/s,叶轮直径2.4 m,竖井外径4 m,竖井内长度8.4 m,则竖井外径*b*/叶轮直径*D*=1.67,竖井内长度*L*/叶轮直径*D*=3.5,竖井比例超过了文献[2]推

力拉动转子旋转,永磁转子跟随定子产生的旋转磁场同步旋转,从而实现机电能量转换的装置。目前已在国内特别是上海多个大中型高低压泵站^[7-8]得到应用。

国内永磁电机在水利泵站的应用见表1。

荐的竖井主要控制尺寸设计范围。当单泵设计流量稍小,接近10 m³/s时,上述缺点尤为明显。这主要是因为泵站竖井流道尺寸除与叶轮直径有一定比例关系外,还需考虑竖井内设备的布置及人员检修通道。

采用低速永磁电机配套变频器直驱水泵,可取消齿轮减速箱的设置,从而优化竖井内设备布置,提高水泵运行性能,降低配套金属结构设备运行要求。

不含齿轮箱的竖井贯流泵竖井内布置图见图2。



图2 不含齿轮箱的竖井贯流泵竖井内布置图

以上海南新泾泵站竖井贯流泵组配套的710 kW电机为例,对齿轮箱传动高速异步电机方案和采用低速永磁电机直驱方案进行对比。

2.1 泵站概况

南新泾泵闸选址位于新泾港与淀浦河交汇处,北起南新泾套闸内闸首防冲槽处。水闸单孔净宽12.0 m,泵站流量40 m³/s。主要功能是淀北片防洪除涝,兼顾水资源调度和水生态环境改善。机电投资约1.3千万元,工程费用2.5亿元。

南新泾泵闸原规划设计为单向排涝泵站,装设3台竖井贯流泵组,配套功率710 kW的永磁电机,直联传动;开工建设前提出增加反向调水运行功能,以满足区域水资源调度的需要。为此,利用永磁电机的变频调速控制系统进行了泵站的双向改造设计。

2.2 电机能耗

齿轮箱传动高速异步电机方案和采用低速永磁电机直驱方案的配套电机能耗对比见表2。由表2可见,永磁电机直驱方案具有效率高、功率因数高的特点,输入总有功功率较小,可在一定程度上降低能耗。

表2 配套电机方案能耗(预期值)对比

参数	驱动系统					
	异步电机+ 齿轮箱			永磁电机直驱+ 变频器		
实际负荷率/%	100	75	50	100	75	50
实际负荷点电机功率/kW	710	533	355	710	533	355
实际负荷点电机效率/%	93.9	91.0	83.0	95.8	95.3	94.8
变频器效率/%				97	97	97
系统总效率/%	86.5	83.9	76.5	93.0	92.0	92.0
输入总有功功率/kW	821	635	464	764	576	386

2.3 泵房尺寸

采用低速永磁电机配套变频器直驱水泵,取消齿轮减速箱后,竖井内仅设置有轴承箱和电动机。由图3可见,优化方案竖井内空间较为宽敞。

考虑到水泵轴的检修长度和竖井内楼梯的设置,原竖井顺水流方向的长度可至少减小1 m,竖井宽度可由原3.2 m减小至2.6 m。设备尺寸的减小,可减小竖井流道的尺寸,调整流道进口宽高比,优化流态,减小泵房尺寸,降低工程造价;也给增大运维通道的尺寸提供了可能,极大地改善了运维的便利性。

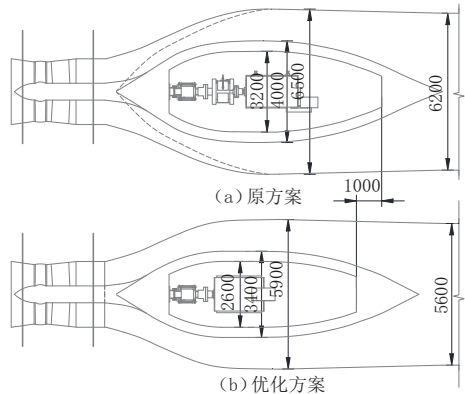


图3 不同电机竖井尺寸对比图(单位:mm)

2.4 双向调速

受潮汐影响,泵站排涝扬程较高,引水扬程较

低,导致2个方向工况难以兼顾。结合永磁电机设有变频器,具备变频运行的条件,泵组正、反向转速可分别设定,使泵组正反向工况均运行在高效区,更好地适应了泵站双向运行工况的变化需求,提高了双向竖井贯流泵机组的装置效率。根据内外河水位实时工况,通过改变频率来调节水泵转速,可使其达到较好的水泵性能,如正向额定转速设置为156 r/min、反向设置为130 r/min。

2.5 闸门设置

常规泵站在出水侧设置有1道带小拍门的工作闸门和1道快速事故兼检修闸门。电机启动至额定转速一般历时8~10 s^[9],水泵机组启动时,若闸门开启太慢,会增加水泵的启动扬程,从而导致电机过载和机组振动。故为配合水泵机组启动,工作闸门的门页上设置有小拍门,且提门速度要求较高。

采用永磁电机配备变频器后,水泵机组变频启动,可大幅降低闸门起门的速度要求,从而降低闸门配套启闭机的电机功率。

2.6 噪声

电动机是泵站第一噪声源,主要包括电磁噪声、机械噪声和通风噪声^[10]。齿轮啮合接触运转时,会产生振动和噪声^[11]。竖井贯流泵竖井内设置有电动机、齿轮箱和轴承箱,狭窄空间和钢板内壁对噪声反射明显^[11]。

齿轮减速箱即使采用进口产品,运行噪声一般也控制在80 dB(A)左右^[10],取消齿轮箱可减掉竖井内的一项噪声源。

电磁振动是电机振动噪声的主要振动源,永磁低速电机选择合适的绕组结构、极槽配合、优化绕组接线、优化结构设计、控制各零部件的噪声,从源头降低力波的幅值,消除某些频率的振源,将电机噪声控制在75 dB(A)以下。

该泵站紧邻居民区,与隔壁小区距离不到10 m。试运行期间,最高净扬程达到1.5~1.7 m,为设计工况(2.5 m净扬程)的60%~68%,对应功率为470~520 kW,为额定功率(710 kW)的66%~73%;实测各部主件的振动幅度均在2.3 mm/s以下,单台泵组的运行噪声为60~70 dB,远小于高速电机配套齿轮箱方案。

3 智慧化运维管理

永磁电机适用于运行工况变化大、调节要求高、效率要求高的泵站。永磁电机对运行环境要求高,退磁影响较大,故最重要的是退磁监测。

退磁主要有几种情况:高频振动、极端温度、大电流、锈蚀、充磁问题或几种综合作用。退磁后表现为:工作点漂移,转矩、性能下降,振动噪声剧增,运行不稳定,异常温升等,因此,退磁监测除了变频器上的电气参数外,还需要在电机上进行监测。

电机上的监测,一方面可通过测量振动来诊断出电机的故障。采用振动传感器对电机的位移、速度和加速度等振动状态信息进行监测,分析电机的振动频谱,分离出故障的有关信息,如区分由定子异常产生的电磁振动、气隙静态偏心引起的电磁振动、气隙动态偏心引起的电磁振动、转子绕组故障引起的电磁振动等,以及因转子不平衡产生的机械振动、加工和装配不良产生的机械振动、轴线安装不对中引起的机械振动、机械松动引起的振动等,以准确判断电机振动的故障状态和部位。

另一方面,还可采用磁通计测量转子磁通量、磁场强度计测量转子表面的磁场强度分布等,依此判断永磁电机的退磁情况。

对水泵机组实施在线振动监测与故障分析诊断等智慧化运维管理手段,能够及早发现设备的潜在隐患,遏制故障发展,保障设备安全、稳定、长期、满载、优质运行,为工程安全生产、增效节能、质量控制和科学检修提供技术保障。

4 结 语

(1)竖井贯流泵采用低速永磁电机直驱取代高速电机配套齿轮箱可提高泵组效率,降低能耗;减小竖井长、宽,优化流道进口宽高比,改善流态,减小泵房尺寸,降低工程造价。

(2)齿轮减速箱的取消及永磁电机低噪可大幅降低竖井贯流泵站竖井内的噪声,同时配套变频器可使水泵变频运行,在一定程度上降低水泵噪声。

(3)采用永磁电机配套的变频器,可较好地兼顾双向竖井贯流泵站引排扬程差距大的工况,并大幅降低对出口闸门开启速度的要求。

(4)永磁电机管理要求高,通过对水泵机组运行过程和故障成因的分析,可采用状态监测、故障诊断和状态趋势预测,对高压永磁电机进行智慧化运维管理。

参考文献:

- [1] 张仁田,刘雪琴,梁云辉,等.贯流泵装置设计关键技术研究与应用[M].镇江:江苏大学出版社,2023.
- [2] 陈加琦,朱泉荣,苏志敏,等.基于特征尺寸规则化的竖井贯流泵装置研究[J].水力发电学报,2019,38(2):101-111.
- [3] 杨建峰,王铁力,张一祁,等.通吕运河水利枢纽工程贯流泵装置模型试验分析[J].中国农村水利水电,2020(12):167-171.
- [4] 翟作卫,蒋启华,陶光辉,等.杏林湾排涝泵站竖井贯流泵装置进出水流道流态的数值分析[J].水电能源科学,2020,38(7):165-168.
- [5] 汤泳,游孟陶.化子闸泵站机组选型分析[J].城市道桥与防洪,2019(2):132-134.
- [6] 袁尧,胡文竹,邓彬彬,等.锡澄运河整治工程双向竖井贯流泵站流道优化及分析[J].中国农村水利水电,2021(1):36-41;47.
- [7] 王祥来,高林钢.低速大扭矩永磁电机在低速泵上的应用[J].人民黄河,2020,42(10):166-169.
- [8] 孙水英,于国安,夏泉,等.大型永磁电动机在南水北调东线一期工程山东段韩庄泵站中的应用[J].水利规划与设计,2014(1):48-50.
- [9] 朱庆华.低扬程贯流式泵站启动扬程的计算[J].水利水电科技进展,2008(5):58-60.
- [10] 董建源,潘志军.杭州三堡排涝泵站噪声控制方案研究[J].浙江水利水电专科学校学报,2011,23(2):5-8.
- [11] 于孝民,吕梁,胡德义,等.大型泵站噪声与治理[J].排灌机械工程学报,2014,32(4):308-311.