

# 管道供水水轮发电机组运行工况分析研究

魏起波<sup>1</sup>, 周业友<sup>1</sup>, 王峰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>临沂市岸堤水库管理处, 山东 临沂

<sup>2</sup>山东诚山水利工程有限公司, 山东 临沂

Email: weiqibo19720126@126.com

收稿日期: 2021年2月1日; 录用日期: 2021年4月3日; 发布日期: 2021年4月30日

## 摘要

对管道供水水轮发电机组的运行工况进行测量实验, 然后对测量数据加以分析研究, 结果表明, 不同的导水叶及调流阀的开度, 机组净水头各不相同, 出力也不相同, 当导水叶及调流阀开度达到某一特定值即临界开度时, 管道供水水轮机净水头达到最大值, 机组的出力最大, 水能资源利用率最高。另外关闭供水管道顶部的通气阀, 能进一步增大水轮机的净水头, 能大幅度地增加机组出力。不同的管道供水流量及水库水位下, 管道供水机组临界开度是不同的, 根据测量实验数据, 用计算的方法来确定管道供水机组理论临界开度, 提高了供水机组进入最佳工况的速度。

## 关键词

测量实验, 临界开度, 富余水头, 虹吸作用, 净水头

# Operation Condition Analysis of Pipeline Water Supply Turbine Generator

Qibo Wei<sup>1</sup>, Yeyou Zhou<sup>1</sup>, Feng Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Management Office of Andi Reservoir in Linyi City, Linyi Shandong

<sup>2</sup>Shandong Water Conservancy Engineering Co., Ltd., Linyi Shandong

Email: weiqibo19720126@126.com

Received: Feb. 1<sup>st</sup>, 2021; accepted: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2021; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The measurement experiment is carried out on the operation condition of the pipeline water supply turbine generator set, and then the measurement data are analyzed and studied. The results show that the

作者简介: 魏起波, 男, 1972年1月出生, 普通职工, 高级工程师, 主要从事水利水电开发与应用研究工作。

文章引用: 魏起波, 周业友, 王峰. 管道供水水轮发电机组运行工况分析研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(2): 198-204.

DOI: 10.12677/jwrr.2021.102020

net head and output of the unit are different with opening guide vane and regulating valve. When the opening guide vane and regulating valve reach a certain value (*i.e.* the boundary opening), the net head of the pipeline water supply turbine and the unit output reaches the maximum, and the utilization rate of hydropower resources is the highest. In addition, closing the vent valve at the top of the water supply pipeline can further increase the net head of the turbine and greatly increase the unit output. The critical opening of pipeline water supply unit is different with different pipeline water supply flow and reservoir water level. According to the measured experimental data, the theoretical critical opening of pipeline water supply unit is determined, which improves the speed of water supply unit entering the optimal working condition.

## Keywords

Measurement Experiment, Critical Opening, Surplus Head, Siphon Action, Net Head

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

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

岸堤水电站 5 号机组为管道供水专用机组, 2017 年 9 月建成并投入运行, 由于对管道供水机组的认识较少, 又缺乏运行经验, 我们在管道供水专用机组运行管理上存在较大的盲目性, 很难把握机组最佳运行工况点, 也不知道最佳工况点在哪里, 致使机组出力较小, 当上游水库水位较低时, 机组几乎发不出电来, 即便是水库达到最高水位, 机组所带负荷只有 100 KW 左右, 与额定容量 320 KW 相比有较大的差距, 为此有必要对管道供水水轮发电机组运行工况进行深入分析与研究。

## 2. 管道供水水轮发电机组概况

岸堤水电站管道供水水轮发电机组, 由原岸堤水电站 5 号明尾水渠水轮发电机组改造而成, 2015 年临沂市供水管道上延至岸堤水库, 把引水口联接在了岸堤水电站的 5 号和 6 号水轮机的尾水管上, 改造 5 号机组为管道供水专用机组, 拆除 6 号机组改造为备用供水管, 如图 1、图 2、图 3 所示, 正常情况下管道供水由机组发电运行提供, 当机组检修或出现故障时由备用供水管供水。供水专用水轮机设计水头 22 m, 额定流量 1.8 m<sup>3</sup>/s, 水轮机安装高程 152.85 m, 发电机容量 320 KW [1]。上游水库兴利水位 176 m。供水管道为砼有压管道, 内直径 1.4 m, 设计流量 1.8 m<sup>3</sup>/s, 总长度为 48,210 m, 首端管顶高程 149.1 m, 与水电站的 5 号机组尾水管和备用供水管相联, 末端连接调流阀, 高程 97.1 m, 后经消力池进入水厂前的无压管道。趋于沿途地势, 整个供水管道在竖直方向呈 M 形状, 第一个管顶高程为 156.3 m, 在距机组下游 6780 m, 另一个管顶高程为 152.06 m, 在距机组 11,197 m, 在两个管顶部设有自动通气阀, 能够自动排、进气体。

## 3. 管道供水机组的流量及净水头分析

### 3.1. 管道供水水轮机的流量分析

管道供水水轮机的流量取决于下游水厂每天需水量, 基于有一定水量调节能力, 当前水厂每天用水量稳定在 12.96 万 m<sup>3</sup>, 即供水管道需保持 1.5 m<sup>3</sup>/s 流量才能满足水厂的用水需求, 所以水轮机的流量在一定时期内是相对固定因素, 无法用增加流量的方法来增加水轮机出力。

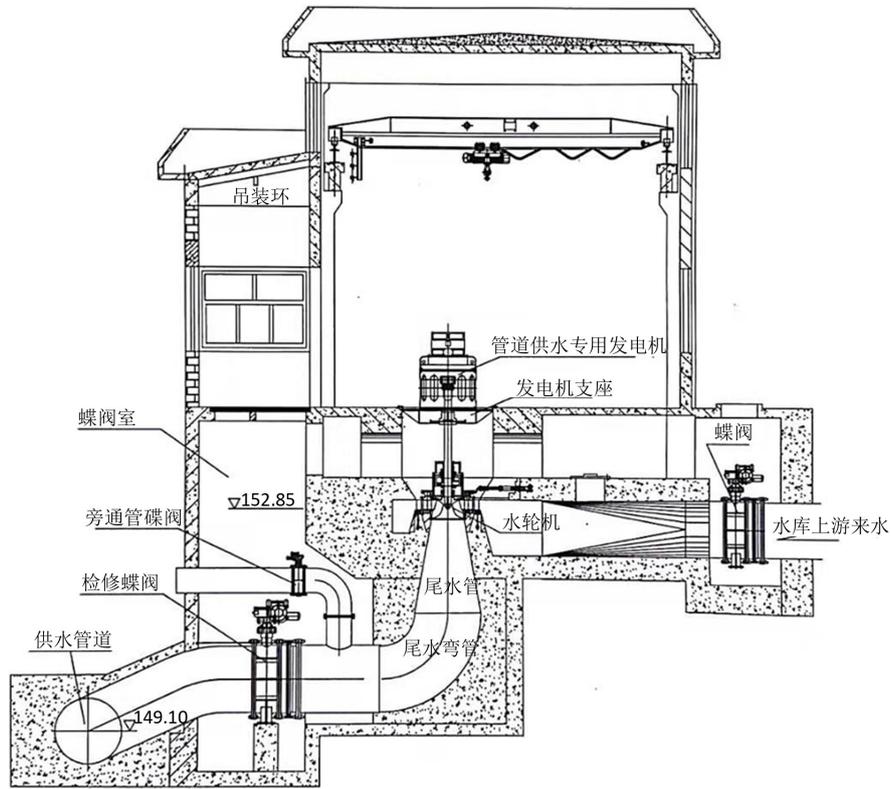


Figure 1. Longitudinal section of special unit for pipeline water supply  
图 1. 管道供水专用机组纵剖图

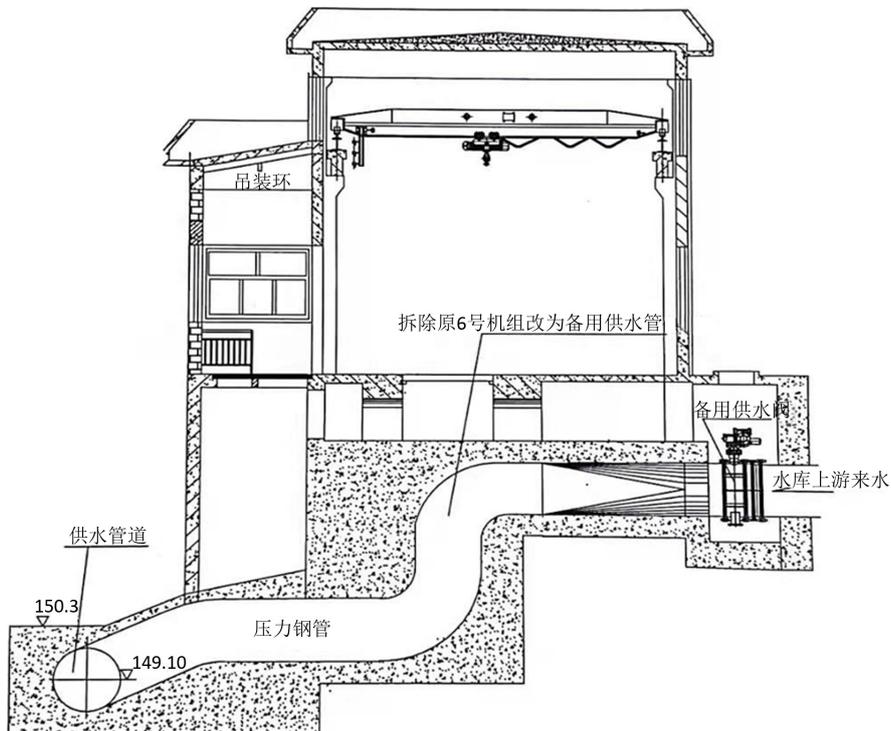


Figure 2. Longitudinal section of straight pipe  
图 2. 直通管纵剖图

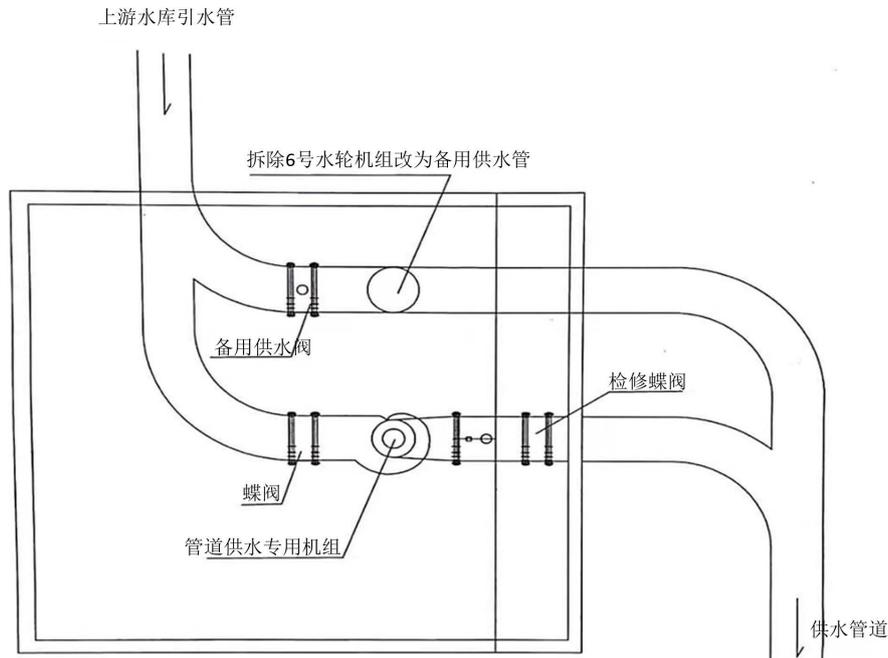


Figure 3. Plan of special water supply unit and straight pipe  
图 3. 供水专用机组及直通管平面图

### 3.2. 管道供水水轮机的净水头分析

水轮机的净水头是影响水轮机出力的关键因素，对于明尾水渠水轮机来说，净水头与水库和下游尾水水位有关，而管道供水水轮机，尾水管是个封闭的有压管道，其净水头应当等于蜗壳压强与转轮下压强之差，那么这个差值大小与哪些因素有关呢？会不会与导水叶以及调流阀的开度有关呢？为了探明这个问题，我们决定做个不同导水叶开度下管道供水水轮发电机并网发电运行的工况监测实验。

实验前先在水轮机蜗壳和转轮下以及其它有关点设置相应的监测仪器，然后开启管道供水机组并网运行，关闭备用供水管。为不影响正常供水，实验先从导水叶最大开度开始，将导水叶开度缓慢打至 100%，与此同时，操作调流阀的开度，待管道内的流量到达  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  并且长时间(一个小时以上)不变后，记录各监测点数值。然后按同样的操作方法，将导叶开度下调至 90% 进行第二组实验，以此类推。实验过程中为了测定供水管道内最高点压强首次显示 0 值时的工况，当此处压强下降接近 0 值时，在操作调流阀开度的同时也要操作导水叶开度，二者相互配合，多次调整，让此处压强慢慢降到 0 上，然后记录一组测量数据。当实验进行到导水叶开度 70% 组别时，发现增大调流阀开度时，管道流量不再增加了，调流阀开度即便增大到 100%，管道流量不能到达  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，说明此时的导水叶开度已不能满流量要求了，实验到此结束。统计整理测量数据如表 1 所示。

Table 1. Measured values under different opening of guide vane of pipeline unit

表 1. 管道机组导水叶不同开度下的运行工况测量值

导水叶开度	调流阀开度	蜗壳压强(MP)	转轮下压强(MP)	6780 m 管顶压强(MP)	11,197 m 管顶压强(MP)	管道末端调流阀前压强(MP)	管道末端流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )	发电机输出功率(KW)
100%	58%	0.206	0.178	0.089	0.099	0.381	1.5	14.1
90%	60%	0.206	0.156	0.067	0.077	0.359	1.5	33.1
80%	63%	0.206	0.126	0.037	0.047	0.329	1.5	76.5
72%	66%	0.206	0.091	0	0.012	0.294	1.5	126.9
70%	100%	0.206	0.086	0	0	0.120	1.48	120.4

从表 1 数据看出,当导水叶从大到小变化时,调流阀开度不断增加,蜗壳压强保持不变,转轮下和 6780 m 处管顶压强逐渐变小,直到导叶开度降到 72%时才趋于稳定,11,197 m 处管顶压强及调流阀前压强一直在逐渐变小,发电机功率逐渐变大,导叶开度在 72%时达到最大值。

根据水轮机的设计参数可知,当导水叶开度大于 72%时,管道水轮机过流能力大于  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,超过下游水厂的需水流量,供水流量主要由调流阀开度大小控制,此时整个供水管道总体处于有压状态(从上表数据也是如此)。根据管道流体理论,降低导水叶开度减少上游进水量和增大调流阀开度加大下游出水量,都会引起管道内的压强的降低。当导水叶及调流阀开度分别等于 72%和 66%时,6780 米处管顶压强恰好降到 0,说明供水管最高点前半段的过流能力与后半段的过流能力相同均为  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,此时再继续降低导叶开度至 70%,管顶前半段的供水流量会小于后半段的出流能力,管道内的流量转为由导水叶开度主控,6780 m 处管顶外气压大于管内水压强,外界气体开始通过通气阀进入管内,管道内出现自游水面。转轮下压强大小由供水管顶前半段自游水面的高程与水轮机的安装高程差所决定,所以此后的转轮下压强下降幅度甚微。增大调流阀的开度直至 100%,并不能增加管道的流量,反而导致后半段管内压强继续下降,管道最高点出现断流,11,197 m 处的管顶压强也降到了 0,有相当一部分气体进入供水管内,不利于管道平稳运行。因此 72%是导水叶的临界开度,66%是调流阀的临界开度,此时的水轮机净水头是满足下游流量要求的最大净水头,机组出力最大。

实验数据中,机组即便在临界开度下运行,发电机功率也只有 126.9 KW,与实验前相比虽然有较大的提高,但距其额定功率 320 KW 仍有较大的差距。我们对上表数据进一步分析发现,机组在临界开度下运行时,转轮下有 0.091 MP 的压强,说明水轮机转轮下有较大的背压,而供水管道出口端还有 0.294 MP 的富余压强,查阅本水轮机资料,转轮下允许最低压强为-0.0015 MP,这些数据表明,水轮机净水头还存在较大提升潜力,有待于进一步的挖掘。

我们知道,供水管道在竖直方向上是个总体呈 M 形状的管道,实际上是由两个巨大的虹管串联而成,但是由于两相虹管顶部的通气阀与外界大气相联,使的虹管顶不能出现负压,虹管的虹吸作用失效,下游的富余水头不但得不到利用,虹管顶部反而还抬高了水轮机的尾水位,限制了水轮机的净水头的提高。当时在管顶设计通气阀的主要作用是管道在初始注水时排出管内气体,管道充满水后,排气阀的作用也就完成了,此后如果关闭此排气阀,不但不会影响管道正常运行,而且虹管的虹吸作用能得到恢复,管道水轮机的净水头应当能够再度的提高,为了证实这一推测,我们继续进行测量实验。

按照以上思路,关闭两处虹管顶端的排气阀后,重复以上实验,当实验进行到导水叶开度 72%时,先保持导水叶开度在 72%位置不动,慢慢加大调流阀的开度,观察各处压强值继续下降,6780 m 处管顶压强变为负值,转轮下压强也进一步的大幅下降,管道流量也在增加,此时减小导水叶开度,校正流量至  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,继续增大调流阀的开度,当转轮下压强接近 0 值时,在增大调流阀开度操作的同时减小导水叶开度操作,二者相互配合,既能使管道流量校正到  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,又能使转轮下压强恰好达到 0,待数值稳定后,记录测量数据如表 2。

**Table 2.** The measured values of unit guide vane under different opening after closing the inlet valve at the top of siphon

**表 2.** 关闭虹吸管顶端的进气阀后机组导水叶不同开度下的运行工况测量值

导水叶开度	调流阀开度	蜗壳压强(MP)	转轮下压强(MP)	6780 m 处管顶压强(MP)	11,197 m 处管顶压强(MP)	管道出口调流阀前压强(MP)	管道末端流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )	发电机输出功率(KW)
100%	58%	0.206	0.178	0.089	0.099	0.381	1.5	14.1
90%	60%	0.206	0.156	0.067	0.077	0.359	1.5	33.1
80%	63%	0.206	0.126	0.037	0.047	0.329	1.5	76.5
72%	66%	0.206	0.091	0	0.012	0.294	1.5	126.9
56%	80%	0.206	0	-0.089	-0.076	0.2027	1.5	257.6

对比两个表发现,导水叶开度在 72%之前的数据相同,当导水叶开度从 72%下调到 56%,调流阀开度由 66%增加到 80%时,各处的压强数值均都进一步的大幅下降,转轮下压强降为 0,6780 米处管顶出现了负值,调压阀前压下降了到 0.2027 MP,富余水头得到利用,水轮机净水头增加了 9.1 m,增幅 79%,发电机功率达到 257.6 KW。转轮下压强降到 0,接近转轮的允许最低压强,且而且 6780 m 处及 11,197 m 两管顶处的压强也接近真空,压强降幅有限了,如果再继续增大调流阀的开度,转轮下压强会低于 0 甚至低于转轮的允许压强,考虑到转轮汽蚀安全余量,不宜再继续进行实验,实验到此结束,此时的导水叶和调流阀开度是关闭两虹管顶处的通气阀后的新的临界开度。

通过以上实验数据分析得出结论,管道水轮发电机组净水头大小与导水叶及调流阀开度有关,当水轮机的过流能力大于下游供水管道的过流能力时,降低导水叶开度或增大调流阀开度,能增加管道供水水轮机的净水头,当导水叶和调流阀在临近开度时,转轮下水压强为 0,水轮机净水头最大,机组出力效果最佳。因此,满足流量需求而且转轮下压强为 0,是管道供水机组最佳出力点的重要标志,也是管道供水机组调整的目标和方向。另外关闭供水管道顶端的通气阀,能够大幅度地增大水轮机的净水头,是提高供水管道水轮机出力的有效的方法。

#### 4. 管道水轮机临界开度的确定方法

以上水轮机测量实验是在水库水位 174.55 m 进行的,测定出了管道供水流量为 1.5 m<sup>3</sup>/s 时,机组出力达到最大时的导水叶及调流阀的开度(临界开度),这个开度不是一成不变的,水库水位在 176 m 至 160 m 之间变化,而水厂需水量有时也会增大到 1.8 米<sup>3</sup>/秒,当流量及水库水位变化时,这个临界开度也应当有所不同,如果再用实验的方法去寻找新的临界开度过于麻烦,我们借助前面的实验数据,可以用计算的方法确定导水叶及调流阀理论临界开度值,然后有目标地对机组进行调节,能加快机组调整速度,使机组较快地进入最佳出力状态。

##### 4.1. 管道供水机组的临界导水叶开度的确定

通过实验得知,管道水轮机的临界导水叶开度,可以类比为转轮下吸出高程为 0 的明尾水渠水轮机组,在特定的净水头下满足下游水厂需水流量时的水轮机导水叶开度,忽略机组上游的水头损失,水轮机的净水头等于水库水位与转轮安装高程差,用这个净水头数值,从水轮机厂家提供的水轮机水头特性曲线图上,查出水轮机流量等于水厂需水流量的导水叶开度,这个开度值就近似等于临界导水叶开度。

##### 4.2. 供水管道流量变化时调流阀临界开度的确定

###### 4.2.1. 调流阀前压强计算

实验数据表明,管道流量在 1.5 m<sup>3</sup>/s 流量时,水轮机的转轮下高程为 152.3 m,压强为 0,管道末端的高程为 97.1 m,压强为 0.2027 MP。

计算沿程水头损失  $h_f$ :

$$h_f = 152.3 - 97.1 - 0.027 \times 100 = 34.93 \text{ (m)}$$

根据哈森 - 威廉斯公式:

$$h_f = \frac{1.13 \times 10^9 \times L \times Q^{1.852}}{d^{4.871} \times C^{1.852}} \quad [2]$$

可知,沿程水头损失与流量  $Q^{1.852}$  成正比,当流量流变化到  $Q_1$  时,水头损失  $h'_f$ :

$$h'_f = \frac{34.93 \times Q_1^{1.852}}{1.5^{1.852}}$$

则调流阀前压强  $H$ :

$$H = \frac{152.3 - 97.1 - h'_f}{100} \text{ (MP)}$$

#### 4.2.2. 调流阀临界开度的计算

我们通过实验知道,调流阀前压强为 0.2027 MP,调流阀的临界开度为 80%时,过流流量为 1.5 米<sup>3</sup>/秒流量,调流阀是个单孔自由孔口阀,根据孔口出流计算公式:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH} \quad [3]$$

推出:

$$\omega = \frac{Q}{\mu\sqrt{2gH}}$$

调流阀过水面积  $\omega$  与开度  $a$  成正比,那么调流阀开度  $a$  与  $Q/\sqrt{H}$  成正比,对比于测量实验运行工况值,调流阀临界开度  $a$  的理论计算式:

$$a = \frac{80\% \times Q \times \sqrt{0.2027}}{1.5 \times \sqrt{H}}$$

将管道流量  $Q$  值和计算出来的调流阀前压强  $H$  值代入上式,计算出  $a$  值,即为调流阀的临界开度理论值。

导水叶和调流阀的临界开度计算出来以后,按照计算值对导水叶和调流阀有目标地进行操作,待两者都达到计算值时,稳定 1 小时后,观察转轮下压强是否为 0,流量是否符合要求,如果有偏差,二者相互配合再进行微调,直至二者都达到要求为止。

如果下游水厂需水流量较大,转轮下压强为 0 时,即便调流阀开度达到 100%后,管道出口流量仍然达不到要求,应适当增加导水叶开度,直到管道流量符合要求为止,此时水轮机转轮下压强会增大,水轮机净水头也相应地有所下降,但是满足流量需求优先。

## 5. 结语

通过对岸堤水电站管道机组运行工况的分析与研究,加深了对管道供水机组的认识,理清了管道供水机组运行的内在规律,找到了提高管道供水轮机出力的方法和措施,使管道供水水轮发电机组的运行管理从盲目走向科学,在相同的供水流量下即提高了水轮机发电机组发电功率,又减小了下游管道的压强,每年增加了发电量 140 多万度电,增加收入 53 多万元,收到了良好的效果。

## 参考文献

- [1] 魏起波. 水轮发电机组在水库供水中的应用[J]. 小水电, 2018(6): 19-21.  
WEI Qibo. Application of water turbine generator set in reservoir water supply. Small Hydropower, 2018(6): 19-21. (in Chinese)
- [2] 单文培. 水轮发电机组及辅助设备运行与维修[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.  
DAN Wenpei. Operation and maintenance of water turbine generator set and auxiliary equipment. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 桂家章. 低压水轮发电机组运行与维修[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.  
GUI Jiazhang. Operation and maintenance of low pressure water turbine generator set. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2006. (in Chinese)