排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2013 年 12 月 Dec. 2013 | 第 31 卷 第 12 期 Vol. 31 No. 12

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.12.004

基于损耗分析法的水泵轴功率近似计算与试验

席三忠[1,2]，张桐林[1,2]，萧崇仁[2]，侯永胜[2]，高江永[2]
（1. 中国农业机械化科学研究院现代农装科技股份有限公司，北京 100083；2. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室，北京 100083）


席三忠

泵理论与技术

摘要：为简化泵轴功率测量方法中损耗分析法的测量过程与数据处理，在对损耗分析法进行理论推导的基础上，结合多年从事水泵测试技术的经验，对损耗分析法的部分处理过程进行近似计算，得到较为简单的近似计算轴功率公式. 随机选用 3 台不同功率等级的潜水电泵进行试验，将近似计算方法的计算结果与理论计算结果进行对比. 结果表明，用近似公式计算的水泵轴功率与损耗分析法得到的结果非常接近，3 台泵在 2 种不同方法下泵轴功率（电动机实际输出功率）的偏差均不超过 0.15%，简化后的计算公式完全可以用于潜水电泵在出厂试验时计算电动机实际输出功率和泵效率.

关键词：轴功率；泵试验；损耗分析法；测量方法；近似处理
中图分类号：S277.9；TH311　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2013)12-1030-04
席三忠，张桐林，萧崇仁，等. 基于损耗分析法的水泵轴功率近似计算与试验[J]. 排灌机械工程学报，2013，31(12)：1030-1033.

Approximate calculation and experiment of water pump shaft power based on loss analysis

Xi Sanzhong[1,2], *Zhang Tonglin*[1,2], *Xiao Chongren*[2], *Hou Yongsheng*[2], *Gao Jiangyong*[2]
(1. Modern Agricultural Equipment Co. Ltd., Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China; 2. State Key laboratory of Soil-Plant-Machine System Technique, Beijing 100083, China)

Abstract: The loss analysis is one of the high precision methods for measurement of pump shaft power, and the procedures of measurement and data processing are very complex. Therefore, a discussion of an approximate calculation method was discussed in this paper. Based on theoretical derivation of loss analysis as well as the author's many years' experience in testing technology of water pumps, parts of the loss analysis process were simplified and simple measurement formulas were obtained. 3 submersible electric pumps with different power levels were randomly chosen to conduct a test in the national laboratory, and then the experimental results were compared with the theoretical calculation results. Comparison results show that the pump shaft power calculated by the approximate formula is very close to the result by loss analysis method; the average deviation between two methods for 3 pump shaft power (actual output power of motor) is not more than 0.15%. The loss analysis can be used for the calculation of actual output power and efficiency of the pump motor for electric submersible pump in factory test, and the accuracy of this approximate calculation method is verified.

Key words: shaft power; pump test; loss analysis; measurement methods; approximate processing

收稿日期：2013-08-05；**网络出版时间**：2013-12-17
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.2013.12.004.html
基金项目：国家 863 计划项目(2011AA100506)
作者简介：席三忠(1963—)，男，北京朝阳人，高级工程师(xisanzhong@163.com)，主要从事泵试验检测系统的开发和应用研究.
张桐林(1981—)，男，辽宁葫芦岛人，工程师(ztl_new@hotmail.com)，主要从事泵试验检测系统的开发和应用研究

轴功率是水泵性能的关键参数之一，也是重要的能耗指标之一[1-2]. 轴功率的测量方法通常可分为扭矩测功法和电测功法两类[3-4]. 扭矩测功法是通过测量原动机动力输出轴的转矩和转速得到原动机的输出功率即泵轴功率；而电测功法则是当电动机做原动机时，通过测量电动机的输入功率，间接得到电动机输出功率. 测量泵轴功率最精确的方法是扭矩测功法[5]. 而电测功法安装调试简单实用，尤其对潜水电泵和共轴泵只能采取电测功法.

作为电测功法中的损耗分析法，是以电动机的输入功率 P_1 与各项损耗之和 $\sum P$ 的差值作为泵轴功率 P_t[6]. 在泵试验时，与泵相连的电动机不仅起着驱动机的作用，而且又作为测功设备，所以采用损耗分析法测电动机输出功率时，应当确定电动机在实际工况条件下的各种损耗. 这些损耗可能会与电动机在规定条件下得到的损耗有所不同. 采用损耗分析法实测泵轴功率时，需首先对电动机进行空载试验，得到电动机空载特性曲线以及机械损耗（风摩耗）和在额定电压时的铁损耗，然后再用电动机带泵，进行泵的性能或汽蚀试验，同时也完成了电动机的负载试验. 试验全过程应在额定电压下进行，每一工况点除泵试验应测量的参数外，还应同时记下电动机的输入功率、三相电流、电压，试验结束停机后应立即测量电动机 3 个绕组出线端间的直流电阻. 按照 GB/T 12785 或 GB/T 1032 中的要求和计算公式求出每一工况点电动机的各种损耗（电动机铁损耗、机械损耗、杂散损耗以及定、转子损耗）. 实测的输入功率减去所有损耗即为实测的泵轴功率. 对机泵一体的产品如潜水电泵，在试验过程中要想准确区分电动机和水泵的效率，只能采用损耗分析法求取泵轴功率. 然而损耗分析法测量过程烦琐，数据处理复杂[7-9].

文中基于国标 GB/T 12785 中的损耗分析法计算泵轴功率，通过对损耗分析法中部分参数进行近似处理，得出适用于出厂和成套试验的简化近似计算公式（经验公式），使相关工程人员能够快速地进行水泵性能测试、数据处理并完成对泵产品的合格性判定.

1　泵轴功率近似公式

1.1　泵轴功率理论计算

在 GB/T 12785—2002《潜水电泵试验方法》[10] 中，对试验时电动机的实际输出功率（试验温度下）即泵轴功率 P_t 的计算[6] 为

$$P_t = P_1 - P_{cu1} - P_{cu2} - P_{Fe} - P_{fw} - P_s, \tag{1}$$

式中：P_t 为试验温度下泵轴功率；P_1 为电动机的输入功率；P_{cu1} 为试验温度下电动机定子实际的 I^2R 损耗；P_{cu2} 为试验温度下电动机转子实际的 I^2R 损耗；P_{Fe} 为电动机铁损耗；P_{fw} 为电动机机械损耗；P_s 为电动机负载试验时的杂散损耗值.

$$P_{cu1} = 1.5 I_1^2 R_t, \tag{2}$$

式中：I_1 为实测输入电流；R_t 为负载试验结束时实测的三相电动机定子绕组端电阻平均值.

$$P_{cu2} = s(P_1 - P_{cu1} - P_{Fe}) = \left(1 - \frac{n_t}{n_1}\right)(P_1 - P_{cu1} - P_{Fe}), \tag{3}$$

式中：s 为负载试验实测的转差率；P_{Fe} 为电动机铁损耗；n_t 为实测转速；n_1 为电动机同步转速.

$$P_s = K_{Ps} P_t, \tag{4}$$

式中：K_{Ps} 为电动机负载试验时的杂散损耗数.

1.2　泵轴功率近似计算

以三相交流异步电动机为例[11]，对基于损耗分析法的近似公式的推导如下：

将式(3)，(4)代入式(1)得

$$\begin{aligned}(1 + K_{Ps})P_t &= P_1 - P_{cu1} - P_{cu2} - P_{Fe} - P_{fw} = \\ &P_1 - P_{cu1} - \left(1 - \frac{n_t}{n_1}\right)(P_1 - \\ &P_{cu1} - P_{Fe}) - P_{Fe} - P_{fw} = \\ &\frac{n_t}{n_1}(P_1 - P_{cu1} - P_{Fe}) - P_{fw},\end{aligned} \tag{5}$$

而电动机的铁耗为

$$P_{Fe} = P_0 - P_{0cu1} - P_{fw}, \tag{6}$$

式中：P_0，P_{0cu1} 分别为空载输入功率和空载定子 I^2R 损耗，$P_{0cu1} = 1.5 I_0^2 R_0$. 将式(6)代入式(5) 后整理得

$$(1 + K_{Ps})P_t = \frac{n_t}{n_1}[P_1 - 1.5(I_1^2 R_t - I_0^2 R_0) - P_0] - \left(\frac{n_1 - n_t}{n_1}\right)P_{fw}, \tag{7}$$

根据实际测量值与理论分析结果可知：① R_t 接近 R_0；② 在空载试验中，n_t 接近 n_1，因此，对于式(7)，采用 R_t 代替 R_0，n_t 代替 n_1，则式(7)简化、整理后，可得泵到轴功率的近似计算公式：

$$P_t \approx \left\{\frac{n_t}{n_1}[P_1 - 1.5 R_t(I_1^2 - I_0^2)] - P_0\right\}\frac{1}{1 + K_{Ps}}, \tag{8}$$

式中：I_0 为额定电压下电动机空载电流；R_0 为额定电压下电动机空载电阻；P_0 为额定电压下电动机空载输入功率.

对于近似公式(8)存在 2 项偏差，一是由 R_t 代

替 R_0 产生的偏差，偏差量为

$$\Delta P_{cu} = (R_t - R_0) I_0^2; \tag{9}$$

二是由 n_t 代替 n_1 产生的偏差，偏差量为

$$\Delta P_0 = \left(1 - \frac{n_t}{n_1}\right)(P_0 + P_{fw}), \tag{10}$$

因此采用式(8)进行轴功率近似计算产生的偏差是由式(9)，(10)2 项偏差综合所致. 简化后的近似计算公式中所有数据均可从潜水电泵出厂试验中得出，即在潜水电动机额定电压下的空载和水泵性能试验中实测得到，因而大大减少了试验的时间和试验数据计算处理的繁杂过程.

2 公式的验证与偏差分析

2.1 计算参数

为验证文中推导的轴功率的近似计算公式能否用于实际产品性能测试与验收中，并考核 2 项偏差对轴功率的实际影响大小，随机选取了 3 台不同功率等级的水泵，采用 2 种计算公式进行对比计算. 所选潜水电泵包括 200QJ63 - 36 井用泵 1 台、250QJ140 - 90 污水潜水泵 1 台、900ZQB - 125 轴流泵 1 台. 这 3 台试验泵的性能参数如表 1 所示.

表 1 试验水泵及其参数

Tab. 1 Typical test pump and parameters

样机型号	Q/(m³·h⁻¹)	H/m	P/kW
200QJ63 - 36	63	36	11
250QJ140 - 90	140	90	55
900ZQB - 125	11 520	4.64	185

2.2 计算结果

对 3 台试验泵进行性能试验，试验地点是中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点试验室，具体试验方法依据相关国家标准规定. 将试验数据分别采用损耗分析法理论计算方法和文中近似计算方法计算，获得 3 台试验水泵的轴功率 - 流量曲线图，如图 1 - 3 所示.

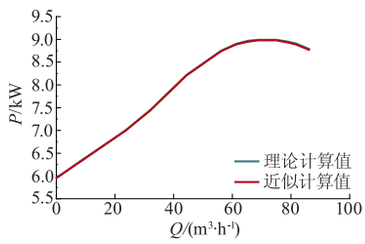


图 1 200QJ63 - 36 轴功率曲线

Fig. 1 200QJ63 - 36 shaft power curve

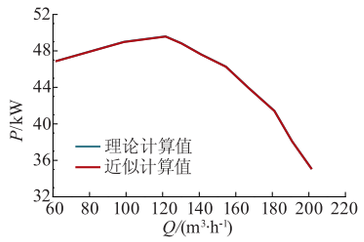


图 2 250QJ140 - 90 轴功率曲线

Fig. 2 250QJ140 - 90 shaft power curve

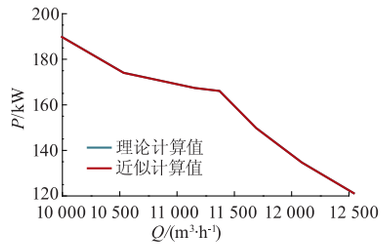


图 3 900ZQB - 125 轴功率曲线

Fig. 3 900 ZQB - 125 shaft power curve

从图 1 - 3 可知，在不同运行工况下，采用近似计算方法计算所获得的轴功率值与损耗分析法理论计算方法获得的轴功率值非常接近，且随工况变化趋势吻合良好. 图 1 - 3 也间接说明，文中推导的轴功率近似计算方法适合多种类型的水泵和运行工况.

2.3 分析与讨论

为了进一步考察文中提出的轴功率近似计算方法的简化精度，对试验数据进行对比分析.

采用的偏差计算公式为

$$\Delta P = (P_f - P)/P \times 100\%, \tag{11}$$

式中：ΔP 为轴功率偏差值；P_f 为轴功率近似方法值；P 为轴功率理论方法值. 对 2 种方法处理后的试验数据进行偏差计算，获得轴功率的偏差分析，在此仅列出 3 台泵的部分试验结果，如表 2 所示，表中 Q 为流量，H 为扬程.

表 2 结果表明，采用推导得出的近似公式计算水泵轴功率与损耗分析实测法的计算结果偏差非常小，3 台泵的泵轴功率(电动机实际输出功率)在 2 种方法下的偏差均不超过 0.15%. 从偏差计算结果可知，近似轴功率计算法完全可以应用于潜水电泵在出厂时机组成套试验，且对数据处理结果影响较小. 此外，该计算公式已在潜水电泵和潜油电泵的测试软件中广泛应用近十年，这些测试软件在许多潜水泵厂中的多年应用也进一步验证了文中近似计算法的工程普适性.

表 2　试验参数偏差分析

Tab. 2　Error analysis of test parameters

型号	Q(m^3 · h^{-1})	H/m	ΔP/%
200QJ63 – 36	56. 15	41. 78	– 0. 15
	65. 35	37. 51	– 0. 15
	86. 11	22. 48	– 0. 15
250QJ140 – 90	98. 84	121. 11	– 0. 04
	141. 13	96. 61	– 0. 04
	181. 18	64. 92	– 0. 03
900ZQB – 125	12 541. 80	2. 72	– 0. 02
	11 690. 20	3. 73	– 0. 02
	9 995. 70	5. 56	– 0. 01

3　结　论

1）针对采用损耗分析方法计算水泵轴功率的过程繁杂的问题,充分考虑电动机实际损耗情况,通过简化损耗分析计算中部分内容,获得一种轴功率近似计算方法.

2）为了考察所提出的轴功率近似计算方法精确性,选用 3 种不同泵进行试验,采用损耗分析法和近似计算方法进行轴功率计算. 对比 2 种轴功率计算方法的计算结果可知,所考察的 3 台泵的轴功率在 2 种计算方法下偏差不超过 0. 15%. 同时也表明近似计算方法具有较好的适用性和精度,完全适用于企业的实际生产.

参考文献(References)

[1] 沈日迈. 江都排灌站[M]. 北京:水利电力出版社,1986:417.

[2] Qiu Baoyun, Huang Jiyan, Yuan Shouqi. Study on power spare coefficient of electrical motor in large pump station based on reliability [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2004, 17(4): 498 – 501.

[3] 谢锐,马铁华,武耀艳,等. 嵌入式容栅传感技术及轴功率测试研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(4):844 – 849.
Xie Rui, Ma Tiehua, Wu Yaoyan, et al. Study on embedded capacitive grating sensing technology and shaft power testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(4): 844 – 849. (in Chinese)

[4] 吴振宇, 苏永生, 明廷涛. 基于电阻应变式和无线遥测的喷水推进泵轴功率测量方法[J]. 机械与电子, 2012,243(12):46 – 48.
Wu Zhenyu, Su Yongsheng, Ming Tingtao. Shaft power measurement method of waterjet based on the type of resistance strain and wireless remote measuring [J]. Machinery & Electronics, 2012, 243(12): 46 – 48. (in Chinese)

[5] O B 亚列缅科. 泵试验[M]. 姚兆生,译. 北京:机械工业出版社,1980:118.

[6] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社,1995:158 – 161.

[7] 杨军虎,郭斌,王玥,等. 无过载离心泵设计参数与性能关系研究[J]. 农业机械学报,2012,43(11):119 – 122,128.
Yang Junhu, Guo Bin, Wang Yue, et al. Relationship of performances and design parameters for non-overload centrifugal pumps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 119 – 122, 128. (in Chinese)

[8] 周岭,施卫东,陆伟刚,等. 深井离心泵数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(3):69 – 73.
Zhou Ling, Shi Weidong, Lu Weigang, et al. Numerical simulation and experiment on deep-well centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 69 – 73. (in Chinese)

[9] 李明思,蓝明菊,吕廷波. 叶片泵相对性能曲线与比转数的理论关系研究[J]. 农业机械学报,2013,44(9):46 – 50.
Li Mingsi, Lan Mingju, Lü Tingbo. Theoretical relations between relative characteristics of impeller pumps and specific speed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 46 – 50. (in Chinese)

[10] 国家技术监督局. GB/T 12785—2002 潜水电泵试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

[11] 国家质量监督检查检疫总局. GB/T 1032—2005 三相异步电动机试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

(责任编辑　盛杰)