

文章编号: 0258-0926(2021)03-0115-06; doi:10.13832/j.jnpe.2021.03.0115

# 华龙一号小幅功率提升研究

向美琼, 朱加良, 刘艳阳, 青先国, 何正熙, 吴茜, 朱毖微, 吕鑫

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

**摘要:** 对华龙一号热功率精度进行了分析, 计算了蒸汽发生器出口压力测量精度、给水温度测量精度和给水流量测量精度对华龙一号热功率精度的贡献度, 通过量化的数据证明了主给水流量测量精度对热功率计算精度的影响最大。基于目前孔板流量计精度低, 长期使用精度劣化的问题, 提出采用高精度(0.3%)的超声波流量计来测量主给水流量, 计算结果表明, 采用超声波流量计可以获得 0.97% 的功率提升。

**关键词:** 华龙一号; 热功率精度; 小幅功率提升; 主给水流量; 超声波流量计  
**中图分类号:** TL363 **文献标志码:** A

## Study on Small Power Improving of HPR1000

Xiang Meiqiong, Zhu Jialiang, Liu Yanyang, Qing Xianguo,  
He Zhengxi, Wu Qian, Zhu Biwei, Lyu Xin

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** The thermal power accuracy of HPR1000 was analyzed, and the contribution of steam generator outlet pressure measurement accuracy, feed water temperature measurement accuracy and feed water flow measurement accuracy to HPR1000 thermal power accuracy was calculated. The quantitative data proves that the main feedwater flow measurement accuracy has the greatest influence on the thermal power calculation accuracy. Considering the current problem of low accuracy and the deterioration of the orifice flowmeter due to long-term use, a high-precision (0.3%) ultrasonic flowmeter is proposed to measure the main feed water flow. The calculation shows that the ultrasonic flowmeter can achieve a power increase of 0.97%.

**Key words:** HPR1000, Thermal power accuracy, Small power improving, Main feed water flow, Ultrasonic flowmeter

## 0 引言

核电厂小幅功率提升是从堆芯热功率精度提升入手的。目前, 通过蒸汽发生器热平衡法计算堆芯热功率是工程上最有效的方法, 但该方法计算出的热功率精度受众多参数测量精度的影响, 针对各个参数精度对热功率精度的影响问题, 现有文献只做了定性描述<sup>[1-6]</sup>, 还没有准确地定量分析。因此, 本文利用华龙一号各参数的设计值, 从源头上对影响堆芯热功率精度的各个分量进行了全面的分析和定量计算, 找出影响最大的参数, 提出热功率精度提升的有效方法, 从而获得小幅

度功率提升。

## 1 核电厂热功率提升方法

根据功率提升的幅度不同, 可将功率提升方法分为 3 类。

扩展功率提升 (EPU) 通过更换重大设备或采用关键技术对部分重大设备进行改造, 挖掘原设计不必要的保守裕度, 达到最大限度提高机组装机容量的目的, 机组功率可以提高 7%~20%。但该方法需要更改燃料设计, 并需要更换或改造蒸汽发生器、化容控制系统上充泵水力部件等,

收稿日期: 2020-04-26; 修回日期: 2020-12-20

作者简介: 向美琼 (1990—), 女, 硕士研究生, 现从事反应堆过程测量工作, E-mail: jjmc210210@163.com

涉及的改造范围广泛,需要进行全面的安全分析,改造费用高昂。

伸展功率提升(SPU)通过挖掘机组原设计多余的保守裕度提升功率。采用确定论或概率安全分析方法,对核电厂在特定运行工况下的响应进行预测,根据预测结果改造部分非重要设备,可提高功率2%~7%。该方法不涉及核电厂重大设备的改造,燃料不需要重新设计,但仍然需要对反应堆材料、机械、电气设备、仪表控制以及辐射源和辐射后果进行分析。

测量不确定度再俘获功率提升(MUR)通过提升用于堆芯热功率计算的参数精度来实现,可提升功率2%。10CFR50 Appendix K 规定核电厂运行的热功率上限为102%FP(FP为满功率),当热功率精度为2%时,电厂最高可以运行在100%FP,而当热功率精度提高到1%时,电厂最高可以运行在101%FP,表明热功率精度提升1%,核电厂运行功率就能提升1%,即提升热功率精度就能提升功率。该方法只需对仪表系统进行适当修改,不需对电厂主要设备进行改造,也不需改变燃料设计,是实现反应堆小幅功率提升最经济实用的办法,因此本文采用MUR方法对华龙一号进行小幅功率提升研究。

在核电厂中热功率不是测量出来的,是通过其他测量参数(温度、压力、流量等)计算出来的,这些参数的测量精度将影响热功率的精度,而每一个参数的测量精度对热功率精度的影响有多大是本文将开展的分析,找到对热功率精度影响最大的参数,采取措施提高该参数的测量精度就能提高热功率精度,从而小幅提升功率。

## 2 华龙一号堆芯热功率计算

华龙一号堆芯热功率采用蒸汽发生器热平衡法计算,通过测量蒸汽发生器中二回路工质温度、压力、流量等数据,可计算出二回路工质通过蒸汽发生器时产生的焓升,这也是反应堆一回路传给二回路的能量,而一回路能量包括堆芯热量和其他热源传给冷却剂的热量,因此通过热平衡原理可求出堆芯热功率。

如图1所示,蒸汽发生器入口焓升和出口焓升相等,可得到能量平衡方程:

$$W + \dot{W} + h_e Q_e = h_v Q_v + h_p Q_p \quad (1)$$

式中, $W$ 为堆芯热功率,kJ/s; $\dot{W}$ 为除堆芯外其

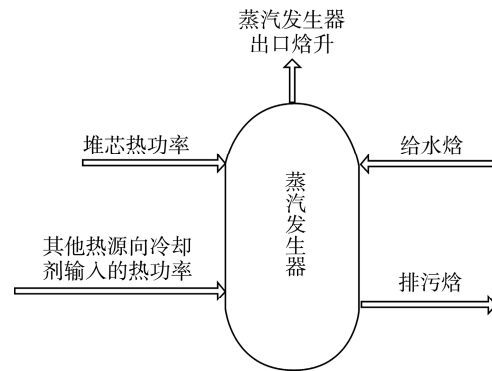


图1 热平衡法原理

Fig. 1 Principle of Thermal Balance Method

他热源向冷却剂输入的功率,是热输入和热输出之间的差值,热输入来自主泵、上充泵和稳压器加热器,热输出来自非再生热交换器、主泵轴密封水热交换器、主泵热屏蔽和系统热损失,kJ/s; $h_e$ 为给水比焓,kJ/kg; $h_v$ 为蒸汽发生器出口湿蒸汽比焓,kJ/kg; $h_p$ 为排污水比焓,kJ/kg; $Q_e$ 为给水流量,kg/s; $Q_v$ 为蒸汽发生器出口蒸汽流量,kg/s; $Q_p$ 为排污水流量,kg/s。

对式(1)移项得到:

$$W + \dot{W} = h_v Q_v + h_p Q_p - h_e Q_e \quad (2)$$

在式(2)中,等式左边项为堆芯热功率 $W$ 和其他热源向冷却剂输入的功率 $\dot{W}$ ,这两项都传递给了二回路蒸汽发生器,所以等式右边为蒸汽发生器功率:

$$W_{SG} = h_v Q_v + h_p Q_p - h_e Q_e \quad (3)$$

由于 $Q_v = Q_e - Q_p$ ,所以:

$$\begin{aligned} W_{SG} &= h_v (Q_e - Q_p) + h_p Q_p - h_e Q_e \\ &= (h_v - h_e) Q_e - (h_v - h_p) Q_p \end{aligned} \quad (4)$$

由于华龙一号为三环路结构,具有3台蒸汽发生器,所以堆芯热功率的计算公式为:

$$\begin{aligned} W &= W_{SG1} + W_{SG2} + W_{SG3} - \dot{W} \\ &= \sum_{i=1}^3 [(h_{vi} - h_{ei}) Q_{ei} - (h_{vi} - h_{pi}) Q_{pi}] - \dot{W} \end{aligned} \quad (5)$$

## 3 华龙一号堆芯热功率精度分析

根据误差合成理论,当测量结果受多种因素影响形成若干个误差分量时,测量结果的误差合成规则如下:假设 $y$ 是 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 的函数,表示为 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ ,若

$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  相互独立, 分量  $x_i$  的误差为  $\frac{\Delta x_i}{x_i}$ , 则  $y$  的误差为:

$$\frac{\Delta y}{y} = \left[ \left( \frac{x_1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{\Delta x_1}{x_1} \right)^2 + \dots + \left( \frac{x_i}{y} \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中,  $\Delta$  为增量。

将误差合成准则式 (6) 应用到式 (5), 得到堆芯热功率的误差表达式:

$$\frac{\Delta W}{W} = \left[ \left( \frac{W_{SG1}}{W} \frac{\Delta W_{SG1}}{W_{SG1}} \right)^2 + \left( \frac{W_{SG2}}{W} \frac{\Delta W_{SG2}}{W_{SG2}} \right)^2 + \left( \frac{W_{SG3}}{W} \frac{\Delta W_{SG3}}{W_{SG3}} \right)^2 + \left( \frac{\dot{W}}{W} \frac{\Delta \dot{W}}{\dot{W}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

将  $\frac{W_{SGi}}{W} = \frac{1}{3}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 代入式 (7) 得:

$$\frac{\Delta W}{W} = \left\{ \frac{1}{9} \left[ \left( \frac{\Delta W_{SG1}}{W_{SG1}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta W_{SG2}}{W_{SG2}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta W_{SG3}}{W_{SG3}} \right)^2 \right] + \left( \frac{\dot{W}}{W} \frac{\Delta \dot{W}}{\dot{W}} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

设  $\frac{\Delta W_{SGi}}{W_{SGi}}$  的最大值为  $\left( \frac{\Delta W_{SG}}{W_{SG}} \right)_M$ , 则式 (8)

变为:

$$\frac{\Delta W}{W} \leq \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta W_{SG}}{W_{SG}} \right)_M^2 + \left( \frac{\dot{W}}{W} \frac{\Delta \dot{W}}{\dot{W}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

将误差合成准则式 (6) 应用到式 (4) 得到蒸汽发生器功率的误差表达式:

$$\frac{\Delta W_{SG}}{W_{SG}} = \left\{ \left[ \frac{h_v (Q_e - Q_p)}{W_{SG}} \frac{\Delta h_v}{h_v} \right]^2 + \left( \frac{h_e Q_e}{W_{SG}} \frac{\Delta h_e}{h_e} \right)^2 + \left( \frac{h_p Q_p}{W_{SG}} \frac{\Delta h_p}{h_p} \right)^2 + \left[ \frac{Q_e (h_v - h_e)}{W_{SG}} \frac{\Delta Q_e}{Q_e} \right]^2 + \left[ \frac{Q_p (h_v - h_p)}{W_{SG}} \frac{\Delta Q_p}{Q_p} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

对各分量精度分析如下:

$$(1) \frac{\Delta h_v}{h_v}$$

$$h_v = x h_{vs} + (1-x) h_{es} \quad (11)$$

式中,  $h_{vs}$  为饱和蒸汽比焓;  $h_{es}$  为饱和水比焓;  $x$  为含汽量;  $(1-x)$  为蒸汽中夹带的水量。将误差合成准则式 (6) 应用到式 (11), 得到蒸汽发生器出口湿蒸汽比焓的误差表达式:

$$\frac{\Delta h_v}{h_v} = \left\{ \left[ \frac{x}{h_v} (h_{vs} - h_{es}) \frac{\Delta x}{x} \right]^2 + \left[ \frac{h_{vs}}{h_v} (x) \frac{\Delta h_{vs}}{h_{vs}} \right]^2 + \left[ \frac{h_{es}}{h_v} (1-x) \frac{\Delta h_{es}}{h_{es}} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (12)$$

式中,  $\frac{\Delta x}{x} = \frac{1-x}{x}$ ;  $\frac{\Delta h_{vs}}{h_v}$  来源于压力测量误差和 IAPWS-IF97 公式计算的误差,

$$\frac{\Delta h_{vs}}{h_v} = \left[ \left( \frac{\Delta h_{vs}}{h_{vs}} \right)_{PV}^2 + \left( \frac{\Delta h_{vs}}{h_{vs}} \right)_f^2 \right]^{1/2}, \quad \text{其中,}$$

$$\left( \frac{\Delta h_{vs}}{h_{vs}} \right)_{PV} = \frac{P_v}{h_{vs}} \frac{\partial h_{vs}}{\partial P_v} \frac{\Delta P_v}{P_v}, \quad \left( \frac{\Delta h_{vs}}{h_{vs}} \right)_f = \frac{0.2}{h_{vs}}; \quad \text{同理}$$

$$\frac{\Delta h_{es}}{h_{es}} = \left[ \left( \frac{\Delta h_{es}}{h_{es}} \right)_{PV}^2 + \left( \frac{\Delta h_{es}}{h_{es}} \right)_f^2 \right]^{1/2}.$$

$$(2) \frac{\Delta h_e}{h_e}$$

给水比焓误差来源于温度测量误差和 IAPWS-IF97 公式误差, 压力的影响可以忽略。

$$\frac{\Delta h_e}{h_e} = \left[ \left( \frac{\Delta h_e}{h_e} \right)_{te}^2 + \left( \frac{\Delta h_e}{h_e} \right)_f^2 \right]^{1/2}, \quad \text{其中}$$

$$\left( \frac{\Delta h_e}{h_e} \right)_{te} = \frac{t_e}{h_e} \frac{\partial h_e}{\partial t_e} \frac{\Delta t_e}{t_e}, \quad \left( \frac{\Delta h_e}{h_e} \right)_f = \frac{0.2}{h_e}.$$

$$(3) \frac{\Delta h_p}{h_p}$$

排污水比焓等于饱和水比焓, 压力等于蒸汽

$$\text{压力 } P_v, \text{ 则 } \frac{\Delta h_p}{h_p} = \frac{\Delta h_{es}}{h_{es}}.$$

$$(4) \frac{\Delta Q_e}{Q_e}$$

$\frac{\Delta Q_e}{Q_e} = \frac{AS}{Q_e}$ ,  $A$  为给水流量测量精度;  $S$  为量程。

$$(5) \frac{\Delta Q_p}{Q_p}$$

当排污管线不能被隔离时,误差估计为 25%, 即  $\frac{\Delta Q_p}{Q_p} = 25\%$ 。

$$(6) \frac{\dot{W} \Delta \dot{W}}{W \dot{W}}$$

该参数估计为 25%, 即:  $\frac{\dot{W} \Delta \dot{W}}{W \dot{W}} = 25\%$ 。

#### 4 华龙一号堆芯热功率精度定量计算与分析

根据华龙一号的设计数据计算出堆芯热功率精度, 如表 1 所示。此时, 给水温度测量精度为 B 级精度, 蒸汽发生器出口蒸汽压力和给水压力测量精度为 2%, 给水流量测量精度为 1%。

表 1 热功率精度 %  
Tab. 1 Thermal Power Accuracy

负荷	50	60	70
$\frac{\Delta W}{W}$	1.58436	1.31188	1.12367
负荷	80	90	100
$\frac{\Delta W}{W}$	0.98788	0.88684	0.81034

可见, 堆芯热功率误差较大, 特别是在低功率运行时, 误差最高达到 1.58%。分析 4 个测量值的精度, 即给水流量精度、给水温度精度、蒸汽发生器出口压力精度和给水压力精度对各误差分量的影响, 给水流量精度影响  $\frac{\Delta Q_c}{Q_c}$ , 给水温度

精度影响  $\frac{\Delta h_e}{h_e}$ , 蒸汽发生器出口压力精度影响  $\frac{\Delta h_v}{h_v}$  和  $\frac{\Delta h_p}{h_p}$ , 给水压力精度的影响忽略不计,

$\frac{\Delta Q_p}{Q_p}$  和  $\frac{\dot{W} \Delta \dot{W}}{W \dot{W}}$  均为定值。

分别提升给水流量精度、给水温度精度、蒸汽发生器出口压力精度到 50%和 10%, 如表 2 所示。依次保持其他 2 个精度为基准值, 计算单一精度提升后对热功率精度的影响。

表 2 精度基准值和提升值  
Tab. 2 Accuracy Reference Value and Boost Value

参数精度名称	基准值	提升到 50%	提升到 10%
蒸汽发生器出口蒸汽压力精度	2%	1%	0.2%
给水温度精度	B 级, ±1.55	±0.775	±0.155
给水流量精度	1%	0.5%	0.1%

当给水温度和给水流量精度为基准值时, 将蒸汽发生器出口蒸汽压力精度提升到 1%和 0.2%, 计算热功率精度提升量如表 3 所示。

当蒸汽发生器出口蒸汽压力精度和给水流量精度为基准值时, 将给水温度精度提升到 ±0.775 和 ±0.155, 计算热功率精度提升量如表 4 所示。

当蒸汽发生器出口蒸汽压力精度和给水温度精度为基准值时, 将给水流量精度提升到 0.5%和 0.1%, 计算热功率精度提升量如表 5 所示。

从表 3~表 5 可见, 对 3 个参数的精度进行相同幅度的提升时, 蒸汽发生器出口蒸汽压力精度和给水温度精度对热功率精度的影响非常小, 给水流量精度的影响最大, 所获得的热功率精度提升量是前两者的几十倍。再次计算式 (9) 中 6 个中间误差分量对于热功率的贡献度如表 6 所示。

从表 6 可以看出,  $\frac{Q_c (h_v - h_e) \Delta Q_c}{W_{SG} Q_c}$  项的占比是最大的, 即给水流量精度对热功率精度的影响

表 3 蒸汽发生器出口蒸汽压力精度对热功率精度的影响 %  
Tab. 3 Effect of Steam Pressure Accuracy on Thermal Power Accuracy

负荷		50	60	70	80	90	100
压力 2%	$\Delta W/W$	1.58436	1.31188	1.12367	0.98788	0.88684	0.81034
	$\Delta W/W$	1.58284	1.31001	1.12145	0.98529	0.88390	0.80704
压力 1%	提升量	0.00151	0.00186	0.00223	0.00259	0.00294	0.00331
	提升百分比	0.09560	0.14198	0.19822	0.26197	0.33155	0.40793
压力 0.2%	$\Delta W/W$	1.58237	1.30942	1.12074	0.98447	0.88296	0.80599
	提升量	0.00199	0.00245	0.00294	0.00341	0.00388	0.00435
	提升百分比	0.12536	0.18690	0.26132	0.34520	0.43755	0.53676

表 4 给水温度精度对热功率精度的影响 %

Tab. 4 Effect of Feedwater Temperature Accuracy on Thermal Power Accuracy

负荷		50	60	70	80	90	100
温度 B 级±1.55	$\Delta W/W$	1.58436	1.31188	1.12367	0.98788	0.88684	0.81034
	$\Delta W/W$	1.57442	1.29909	1.10798	0.96903	0.86465	0.78477
温度±0.775	提升量	0.00993	0.01279	0.01569	0.01885	0.02219	0.02557
	提升百分比	0.62682	0.97483	1.39662	1.90829	2.50193	3.15533
温度±0.155	$\Delta W/W$	1.57123	1.29503	1.10294	0.96293	0.85742	0.77649
	提升量	0.01313	0.01684	0.02073	0.02495	0.02942	0.03385
	提升百分比	0.82843	1.28385	1.84494	2.52520	3.31705	4.17727

表 5 给水流量精度对热功率精度的影响 %

Tab. 5 Effect of Feed Water Flow Accuracy on Thermal Power Accuracy

负荷		50	60	70	80	90	100
流量 1%	$\Delta W/W$	1.58436	1.31188	1.12367	0.98788	0.88684	0.81034
流量 0.5%	$\Delta W/W$	0.89397	0.76298	0.67621	0.61704	0.57611	0.54740
	提升量	0.69039	0.54890	0.44746	0.37084	0.31072	0.26294
	提升百分比	43.57520	41.84058	39.82138	37.53867	35.03730	32.44781
流量 0.1%	$\Delta W/W$	0.50166	0.46658	0.44670	0.43622	0.43179	0.43059
	提升量	1.08270	0.84530	0.67697	0.55166	0.45505	0.37975
	提升百分比	68.33676	64.43423	60.24656	55.84266	51.31118	46.86287

表 6 各误差分量对热功率精度的贡献度 %

Tab. 6 Contribution of Each Error Component to Thermal Power Accuracy

负荷	$\frac{h_v(Q_e - Q_p) \Delta h_v}{W_{SG} h_v}$	$\frac{h_e Q_e \Delta h_e}{W_{SG} h_e}$	$\frac{h_p Q_p \Delta h_p}{W_{SG} h_p}$	$\frac{Q_e (h_v - h_e) \Delta Q_e}{W_{SG} Q_e}$	$\frac{Q_p (h_v - h_p) \Delta Q_p}{W_{SG} Q_p}$	$\frac{\dot{W} \Delta \dot{W}}{\dot{W}}$
50	5.78454	13.51553	0.34490	64.16070	12.18692	4.00740
60	6.86953	16.17443	0.33624	60.89111	11.84404	3.88465
70	7.90380	18.72377	0.32626	57.80274	11.48471	3.75871
80	8.87914	21.19926	0.31635	54.85651	11.11787	3.63085
90	9.79786	23.60856	0.30664	52.03466	10.74930	3.50298
100	10.66259	25.88843	0.29644	49.39495	10.38056	3.37703

最大。综合表 3~表 6 的计算结果可知，对于热功率精度影响最大的是给水流量精度，其次是给水温度精度，最后是蒸汽发生器出口蒸汽压力精度。所以提高热功率精度最直接有效的方法是提高给水流量精度。

## 5 超声波流量计用于华龙一号小幅功率提升

目前，华龙一号采用孔板流量计测量主给水流量的，该流量计的最高精度可达 0.5%，但使用一段时间后，节流元件取压口容易产生污垢，使得测量精度下降。而节流元件的清洗只能在核电厂停闭状态时，将设备拆卸下来进行清洗，对于焊接在主给水管道上的节流元件，拆卸也是有困难的，并且污垢被清洗干净之后，在下一个运行周

期内又会产生污垢。

超声波流量计利用时差原理测量流速，超声波在流体中向上游和向下游的传播速度不同，主要因为叠加了流体的流速，因此通过测量超声波在流体中向上游和向下游的传播时间差测得流体的流速，从而测得流量。如图 2 所示，在管道两

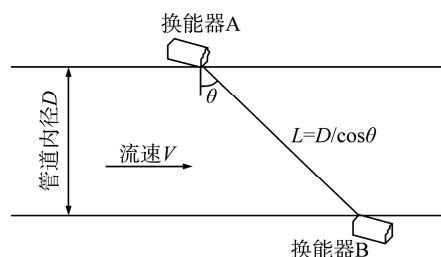


图 2 超声波流量计原理图

Fig. 2 Principle of Ultrasonic Flowmeter

表7 超声波流量计在初始时刻获得的热功率精度提升 %

Tab. 7 Accuracy of Thermal Power Obtained by Ultrasonic Flowmeter at Initial Moment

负荷		50	60	70	80	90	100
流量 0.5%	$\Delta W/W$	0.89397	0.76298	0.67621	0.61704	0.57611	0.54740
	提升量	0.65891	0.58239	0.53427	0.50376	0.48470	0.47275
流量 0.3%	$\Delta W/W$	0.23506	0.18059	0.14194	0.11328	0.09142	0.07466
	提升量						

表8 超声波流量计在孔板流量计精度劣化后获得的热功率精度提升 %

Tab. 8 Accuracy of Thermal Power Obtained by Ultrasonic Flowmeter with Deteriorated Accuracy of Orifice Flowmeter

负荷		50	60	70	80	90	100
流量 2%	$\Delta W/W$	3.05846	2.50530	2.11758	1.83209	1.61393	1.44384
	提升量	0.65891	0.58239	0.53427	0.50376	0.48470	0.47275
流量 0.3%	$\Delta W/W$	2.39955	1.92291	1.58331	1.32833	1.12923	0.97109
	提升量						

端布置一对换能器 A、B，夹角为  $\theta$ ，换能器间的距离为  $L$ ，管道直径为  $D$ ，超声波速度为  $C$ ，流体流速为  $V$ ，则流速在两个换能器方向的分量为  $V^* = V / \sin\theta$ 。当超声波从换能器 A 发出，换能器 B 接收时，超声波传输的时间为  $T_{AB} = \frac{L}{C+V^*}$ ，

同理  $T_{BA} = \frac{L}{C-V^*}$ ，则  $\Delta T = T_{BA} - T_{AB} = \frac{2LV^*}{C^2 - V^{*2}}$ ，因此，测得  $\Delta T$  就能求出  $V^*$ ，最终求得  $V$ 。在管道中布置一对换能器，即可测量该对换能器所在的管道轴向剖面的平均流速。由于流体流场在各个轴向剖面分布并不均匀，可以布置多对换能器，进而达到更高的测量精度。目前八通道超声波流量计的最高精度能达到 0.28%，并且长期使用精度不会劣化。

因此，在华龙一号可采用精度为 0.3% 的超声波流量计测量主给水流量，假设孔板流量计初始精度为 0.5%，所获得的功率提升如表 7 所示。

当孔板流量计精度劣化到 2% 时，所获得的功率提升如表 8 所示，从表 8 可以看出，采用超声波流量计代替孔板流量计可以使热功率精度提升 0.97%，即能获得 0.97% 的功率提升。若 1 台机组 1 a 连续运行 330 d，则 1 a 提升的发电量为  $3060(\text{MW}) \times 0.97\% \times \frac{1}{3} \times 24 \text{ h} \times 330 = 7.8 \times 10^7$

(kW · h)，按照 0.43 元/(kW · h) 的电价计算，1 a 增加的收入为 3300 万。

## 6 结论

本文从华龙一号热功率的计算过程入手，对

影响热功率精度的各个分量进行了分析，通过计算，定量地给出了主给水流量测量精度、给水温度精度，蒸汽发生器出口蒸汽压力精度对热功率精度的影响。结果表明，对于热功率精度影响最大的是给水流量精度，其次是给水温度精度，最后是蒸汽发生器出口蒸汽压力精度，因此，提高热功率精度最直接有效的方法是提高给水流量精度。目前主给水流量采用孔板流量计测量，该流量计长期使用后节流元件取压口将产生污垢，使得精度降低，采用精度为 0.3% 超声波流量计可以解决该问题，并获得 0.97% 的功率提升。

### 参考文献：

- [1] 向文元, 吕永红, 路广遥, 等. 核电厂反应堆功率的提升技术及其发展[J]. 电力与能源, 2012, 33(03): 263-265+270.
- [2] 居法立, 陈远伦, 陶佳林. 核电厂超声波流量计在主给水流量测量中的应用[J]. 中国核电, 2014, 7(02): 118-123+112.
- [3] 王旭, 张赫男. 超声波技术在核电厂给水流量测量中的应用[J]. 机电工程, 2012, 29(09): 1055-1060.
- [4] 余俊辉, 关仲华, 霍雨佳, 等. 参数测量不确定度优化用于核电厂小幅功率提升的研究[J]. 核动力工程, 2019, 40(03): 170-174.
- [5] 徐昌荣, 宋晓娜, 陈黎明, 等. 反应堆堆芯热功率测量方法及其误差分析[J]. 核科学与工程, 2003(01): 26-31.
- [6] 宋世霞. 计算核反应堆堆芯功率的热平衡试验[J]. 核动力工程, 2002, 23(02): 82-86.

(责任编辑：杨洁蕾)