

# 超声波技术在核电厂给水流量测量中的应用

王 旭,张赫男

(上海核工程研究设计院,上海 200233)

**摘要:**为了解决差压式流量计在主给水流量测量中存在的问题,将超声波技术应用到主给水流量测量中。开展了主给水流量精度对于核电厂反应堆功率计算及其不确定度影响的分析,总结了国内外核电厂通过提高主给水流量测量精度的方式进行核电厂小幅度功率提升的研究成果和实践经验。分析了国内在建的AP1000核电厂中,通过采用超声波流量计进行主给水流量测量以及进行小幅度功率提升项目的意义、可行性、需要开展的工作以及实施该项目潜在的收益和风险。研究表明,基于超声波技术完成主给水流量测量,可以实现AP1000核电厂的小幅度功率提升,同时可以使核电厂更加安全、稳定和有效地运行。

**关键词:**核电厂;给水流量测量;差压式流量计;超声波技术;小幅度功率提升

中图分类号:TM623;TB51;TH814

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)09-1055-06

## Application of ultrasonic techniques in feedwater flow measurement of nuclear power plant

WANG Xu, ZHANG He-nan

(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of differential pressure flow meter used in feedwater flow measurement, the ultrasonic flow meter to measure feedwater flow was investigated. After the analysis of the relation between reactor core thermal power calculation uncertainty and feedwater flow measurement accuracy, the successful experience of measurement uncertainty recapture power uprates (MUR) projects was studied. The feasibility, potential profit and risk of using ultrasonic flow meter and performing MUR project in AP1000 nuclear power plant (NPP) were evaluated. The analysis results indicate that the MUR project in AP1000 NPP is feasible based on the feedwater ultrasonic flow meter, and the safety, operation performance of the plant will be improved.

**Key words:** nuclear power plant (NPP); feedwater flow measurement; differential pressure flow meter; ultrasonic techniques; measurement uncertainty recapture power uprates (MUR)

## 0 引 言

核电厂给水流量测量值是热平衡计算中的一个关键输入参数,也是实现蒸汽发生器液位优化控制的关键参数,因此准确可靠的给水流量测量对于核电厂堆芯热功率的准确测量计算以及核电厂的安全、有效运行都是非常重要的。以往核电厂中常用的主给水流量测量装置多为基于差压测量原理的文丘里管、喷嘴和孔板等。多年的实践经验表明,差压式流量测量装置在长期使用的过程中,其测量精度由于种种原因可能会逐渐变差。

目前,通过蒸汽发生器热平衡方法计算反应堆堆芯热功率是工程上最有效的方法。热平衡法就是通过测量二回路工作介质获得的热量,同时考虑反应堆冷却剂泵机械能到内能的转换、环境散热损失等,推算出反应堆产生的热功率。目前,国际上采用热平衡法测量和计算反应堆热功率的公司有法国电力公司(EdF)、美国西屋电气公司(WEC)等。主给水流量测量精度的优劣将直接影响反应堆热功率计算值的准确性。

在核电厂运行期间,反应堆堆芯热功率是十分重要的一个运行安全监控参数。如果堆芯热功率测量

值低于实际值,核电厂将在超设计工况下运行,由此将加快堆芯及设备老化,增加故障和事故发生概率,最终危及电厂设备、工作人员甚至公众的安全。反之,如果堆芯热功率测量值高于实际值,反应堆则不能达到其额定运行条件,核蒸汽供应系统(NSSS)的蒸汽供应量及由此导致的发电量将均低于设计值,机组的经济性将受到影响。

本研究主要探讨如何利用超声波技术提高主给水流量测量精度,进而提高反应堆热功率计算值的准确性,为核电厂安全、高效的发电提供有力的保证。

## 1 核电厂反应堆热功率计算及其不确定度

出于安全考虑,核电厂设计中必须要考虑很多影响因素,其中包括综合考虑仪表测量误差、随机/系统误差等引入的测量不确定度。以国内在建的AP1000项目设计为例,其采用热平衡法计算反应堆堆芯热功率,计算公式如下所示:

$$Q_{\text{core}} = W_{\text{fw}} \cdot (H_{\text{s}} - H_{\text{fw}}) - W_{\text{bd}}(H_{\text{s}} - H_{\text{bd}}) + Q_{\text{lo}} \quad (1)$$

式中:  $Q_{\text{core}}$ —反应堆堆芯热功率;  $H_{\text{s}}$ —蒸汽发生器出口处蒸汽的比焓,由蒸汽压力和蒸汽发生器的水分残留量决定;  $H_{\text{fw}}$ —蒸汽发生器入口处给水比焓;  $H_{\text{bd}}$ —蒸汽发生器出口处排污水比焓;  $W_{\text{fw}}$ —给水流量;  $W_{\text{bd}}$ —排污水流量;  $Q_{\text{lo}}$ —其他向反应堆冷却剂的传热(如:由稳压器、电加热器、主泵等产生的功率或热功率损失)。

蒸汽发生系统的热平衡示意图如图1所示。

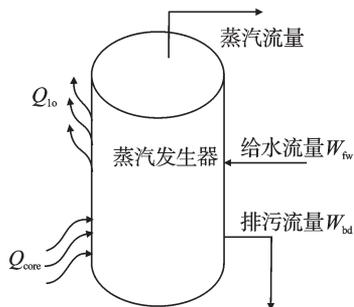


图1 蒸汽发生器系统热平衡示意图

在以上给出的核电厂热功率的计算公式中,蒸汽和给水的比焓值相对来说是比较准确的,因此热功率的计算结果的不确定度主要来源于给水流量的测量不确定度<sup>[1]</sup>。虽然各核电厂运行参数各有不同,给水流量测量所引起的热功率测量值不确定度有所不同,但是给水流量测量不确定度对热功率测量值不确定度贡献很大是可以肯定的。以EdF给出的计算分析结果为例,热功率的不确定度有83.18%是由于给水流

量测量的不确定度造成的<sup>[2]</sup>。因此,提高给水流量测量的准确度对于获得准确的热功率计算值非常重要。

## 2 差压式给水流量测量存在的问题和解决方法

### 2.1 存在的问题

根据EPRI和EdF的一项联合研究表明<sup>[3]</sup>,近年来,在美国和法国发生了一系列由于反应堆功率计算值高于或低于真实值而影响核电厂生产的事件。在美国,从1990年~1996年,多个核电厂出现了文丘里管污垢堆积引起热功率计算值过高,从而导致没有满功率运行的问题。另一方面,根据核动力研究所(INPO)的记录,从2000年~2003年,由于热功率计算值过低引起了14起超功率事件。

美国很多在役核电厂的给水流量测量使用文丘里管流量计。与其他流量测量节流装置的情况类似,位于流体下游的节流元件取压口附近容易产生污垢(如图2所示),导致测量到的差压值大于真实的差压值,从而使得流量测量值大于真实的流量。最终,由该流量测量值计算得到的热功率也大于实际的热功率。为了使核电厂运行在核安全监管部认可的限值之内,核电厂实际上是在一种非满负荷运转的状态下运行。根据EPRI报告的描述,文丘里管的取压口污垢问题是导致美国核电厂不能满负荷运转最常见的原因,根据该报告的描述,发电功率的损失最大可以达到满负荷的3%。

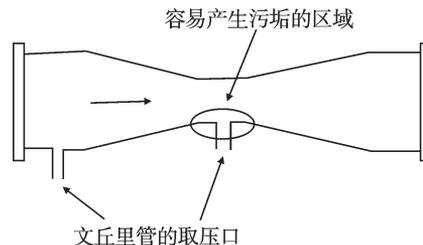


图2 文丘里管示意图

孔板在EdF的核电厂中有着广泛使用,并且有记录表明其测量不确定度约在 $\pm 0.8\%$ 以内。EdF的核电厂具有多年使用孔板对主给水流量进行测量的运行经验,该流量测量值用于热功率计算,计算得到的热功率不确定度较低。直至2000年,没有一家EdF的核电厂发现孔板测量装置取压口有污垢的现象,尽管一些孔板已经安装使用了超过20年。但是,从2002年~2007年,在法国6个核电厂发生了给水流量测量元件由于污垢影响而导致的热功率计算值过低的事件。事后,核电厂运行人员降低了电厂运行的功率水平并上报给了法国的核安全监管部。

针对差压式给水流量测量元件取压口受污垢影响的问题,EPRI的报告对此进行了详细描述<sup>[4-5]</sup>。有研究报告指出测量给水流量的文丘里管、孔板和喷嘴取压口处产生污垢有以下几种原因:

- (1) 给水系统中使用的铜或含铜合金;
- (2) 给水系统的流体中有铁的氧化物;
- (3) 给水流量测量设备表面磨损。

流量测量元件中的污垢能够通过机械式或化学处理的方法进行清除。用水冲洗或手工擦拭清污是最常用的机械式方法,化学清洗方法也已经成功用于清除污垢,但前提条件是必须使用与污垢的组成成分相匹配的化学物质,同时该化学物质应该对被清洗的设备表面不会产生腐蚀等副作用。

无论是采用机械式或者化学方法清除污垢,一般只能在核电厂停闭状态下,将设备拆卸下来进行清洗。但在一些核电厂中,主给水流量测量设备是焊接在主给水管道上的,这就给设备的清洗带来了很大的困难。另外一个值得注意的问题是流量测量设备中污垢被清洗干净之后,在下一个运行周期内又会产生污垢。

### 2.2 解决方法

为了有效地去除给水流量设备中污垢的影响,使核电厂安全、稳定并且有效的运行,世界各地的核电厂采用了很多方法,其中包括:

- (1) 使用核电厂在线记录的数据和历史数据进行对比来确定给水流量设备污垢的校正因子;
- (2) 使用蒸汽流量测量值确定给水流量设备污垢的校正因子;
- (3) 安装第2个差压式流量测量设备来测量流量或确定给水流量设备污垢的校正因子;
- (4) 使用超声波流量计来测量给水流量或确定给水流量设备污垢的校正因子;
- (5) 使用化学溶剂跟踪测试法来测量给水流量或确定给水流量设备污垢的校正因子。

以上5种方法各有特点,根据目前了解的情况,在EdF的压水堆核电厂中采用的是类似第3种方法的策略,即采用两个差压式流量测量元件(文丘里管+ISO标准孔板)对给水流量进行测量,当两个测量设备的测量结果超过运行总则规定的限值时进行相应的处理。目前,国内正在建设的AP1000项目设计中,使用的方案类似于第4种方法,即采用文丘里管和超声波流量计同时对主给水流量进行测量,准确度比较高的超声波流量测量值用于校准文丘里管的流量测量值,进而提高给水流量测量准确度和热功率计算的准确度。

## 3 超声波流量计原理

所有的超声波流量计都是通过测量传输时间或频率变化来计算流体的速度。AP1000项目中采购的超声波流量计是采用时差式原理,时差式技术是通过测量流体中的声音传播时间来计算流速。下面以八(声波)通道应用为例进行说明。

仅使用一对换能器测量流体流速的示意图如图3所示。

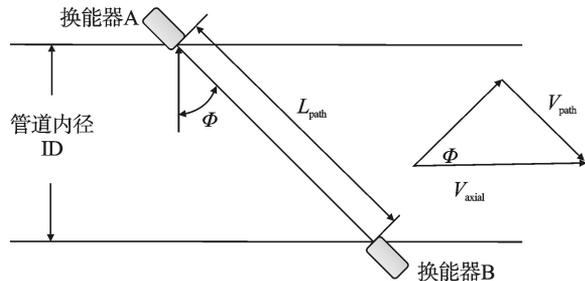


图3 管道中一对超声波换能器对流速的测定

且:

$$t_{AB} = \frac{L_{path}}{C_{path} + V_{path}} + t_{delays} \tag{2}$$

$$t_{BA} = \frac{L_{path}}{C_{path} - V_{path}} + t_{delays} \tag{3}$$

式中:  $t_{AB}$  —换能器A发出声波开始计时到换能器B接收到声波计时停止的时间差,  $t_{BA}$  —换能器B发出声波开始计时到换能器A接收到声波计时停止的时间差,  $V_{path}$  —流体流速在声波通道方向上的分量,  $C_{path}$  —超声波在流体中的传输速率,  $t_{delays}$  —计时的延时。

由以上公式可以得出,一对收发声波的时间记录差值  $\Delta t$  为:

$$\Delta t = t_{BA} - t_{AB} = \frac{L_{path}}{C_{path} - V_{path}} - \frac{L_{path}}{C_{path} + V_{path}} = \frac{2L_{path}V_{path}}{C_{path}^2 - V_{path}^2} \cong \frac{2L_{path}V_{path}}{C_{path}^2} \tag{4}$$

进而得出这一对换能器所在管道剖面的平均流速:

$$V_{axial} = \frac{V_{path}}{\sin(\phi)} = \frac{\Delta t \cdot C_{path}^2}{2L_{path} \sin(\phi)} \tag{5}$$

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。八(声波)通道超声波流量计示意图如图4所示,通过布置多对换能器,即可达到更高的测量精度。目前八(声波)通道超声波流量计最好情况下可以将测量不确定度控制在±0.28%以内。

通过调研,笔者了解到近年来国外核电厂(尤其

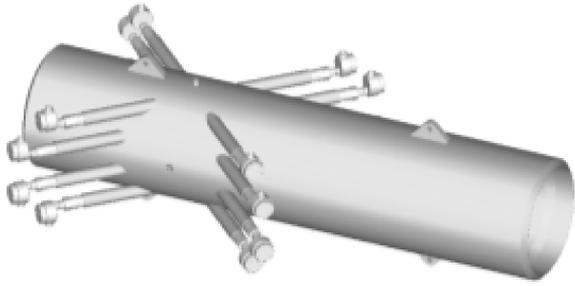


图4 八(声波)通道超声波流量计示意图

是美国的核电厂在进行核电厂改造、延寿研究的同时,也积极开展核电厂功率提升方面的尝试。尤其是通过提高给水流量测量精度(例如使用高精度的超声波流量计)进而减少热功率计算不确定度的方法进行小幅度功率提升的尝试非常具有实践价值。

## 4 核电厂功率提升的研究和实践

### 4.1 功率提升

所谓功率提升(Power Uprates)就是提高核电厂的发电功率,增加发电量,将核电厂的经济效益发挥得更高。美国核管会(NRC)已经批准的核电厂功率提升项目分为3类:

(1) 小幅度功率提升(Measurement Uncertainty Recapture Power Uprates, MUR),通过在给水流量测量中使用超声波流量计提高其测量精度,需要进行局部安全分析,提升功率小于2%;

(2) 中幅度功率提升(Stretch Power Uprates, SPU),不更换重大设备,需要进行完整的安全分析,可以实现小于7%的功率提升;

(3) 大幅度功率提升(Extended Power Uprates, EPU),需要更换重大设备,需要进行完整的安全分析,可以实现小于20%的功率提升。

关于功率提升的进一步信息可以查询NRC的网站<sup>[6]</sup>,美国在役核电厂功率提升项目的介绍,以及功率提升项目前景的分析可以参考Teresa Hansen的文章<sup>[7]</sup>。

### 4.2 小幅功率提升

MUR项目通过提高给水流量的测量精度来降低热功率计算的不确定度,无论是对于提高在役核电厂还是在建核电厂的经济性都是很有意义的。根据最初的美国联邦法规10 CFR 50 Appendix K的规定,与应急堆芯冷却系统(ECCS)有关的电厂安全分析必须在102%或高于102%额定功率下进行,即保留2%功率不确定度裕量。NRC在2000年修订了Appendix K的规定,允许执照申请方可以在LOCA分析中使用小于2%的功率不确定度;执照申请方所提出的降低裕量的方案,必须证明热功率的不确定度是由于热功率测量计算

误差所造成的,并且必须能证明为了降低热功率不确定度而使用了行之有效的方法和设备。热功率计算测量不确定度的降低,可以用来进行小幅度的功率提升。

使用更精确的给水流量测量仪表,例如超声波流量计(UFM),在最好的情况下由于给水流量测量值引入的功率不确定度可以由以往定义的2%降低至0.3%。这就意味着若使用UFM测量给水流量,则功率可以提升到当前功率水平的101.7%。小幅度功率水平提升示意图如图5所示,如果研究者能够证明通过改善仪表精度计算得到的热功率不确定度在 $\pm 0.3\%$ 以内,那么核电厂能够通过相应整定值的改变得到1.7%的功率提升。

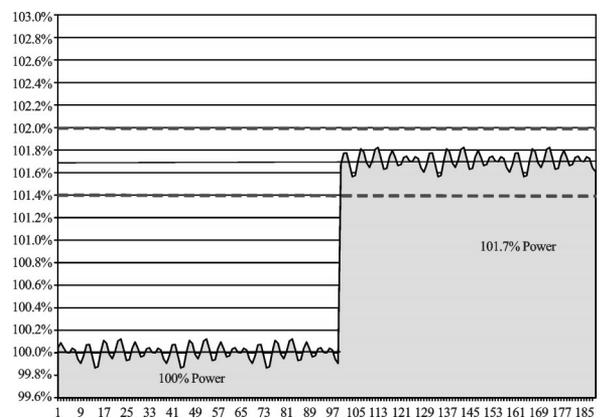


图5 小幅度功率水平提升示意图

截至2011年10月,NRC批准的核电厂功率提升项目已有139个,其中批准的小幅度功率提升(MUR)项目共计52个,最多的提升功率1.7%,最少的提升功率0.4%<sup>[8]</sup>。

西班牙的ALMARAZ核电厂等多个核电厂和我国台湾省的核一、二、三厂的6部机组都进行了小幅度的功率提升项目,最多的提升功率1.7%,最少的提升功率1.4%。其中,核一、二、三厂的6部机组,已于2009年顺利完成小幅度功率提升计划,每年约可增加发电量4.4亿度。

自从2000年以来,国内外很多核电厂进行了发电功率提升相关项目的理论探讨和积极尝试,其对于核电厂小幅度功率提升的研究进展和实践经验对开展AP1000核电厂小幅度功率提升的可行性分析和研究很有借鉴意义。

## 5 AP1000核电厂小幅度功率提升的探讨

### 5.1 MUR的意义

如前所述,开展包括MUR在内的功率提升项目的主要意义在于通过给水流量的精确测量能够使核电厂

在不影响运行可靠性和安全性的前提下小幅度(<2%)提升功率,提高核电机组运行的经济性,挖掘核电厂的发电潜能。

以在建的浙江三门核电厂一期工程1、2号机组(AP1000设计)为例,其设计额定电功率约为 $2 \times 1\,250$  MWe,如果可以提升功率1.5%,以每台机组平均每年连续运行330天<sup>[9]</sup>计算,浙江三门一期1、2号机组每年增发电2.97亿度。参考秦山核电厂0.414元/度的上网电价,每年可以增加将近1.23亿元的收入。

### 5.2 AP1000核电厂主给水流量测量方案

在目前的AP1000核电厂设计中,西屋公司在采用文丘里管和超声波流量计的同时对主给水流量进行测量,超声波流量计用于标定文丘里管的流量测量值,进而提高给水流量测量精度和热功率计算的精度。

目前,WEC在AP1000相关设计资料中指出,仅使用文丘里管测量给水流量,计算得到的热功率的不确定度约为0.91%。由于还有高精度的超声波流量计(UFM)对文丘里管的测量值进行校正,最后得到的热功率计算不确定度应该会更小。

根据浙江三门一期项目的相关信息,目前UFM已经确定使用LEFM CheckPlus™超声波给水流量测量系统(8通道),该系统能够更精确地测量给水流量,且符合10 CFR 50 Appendix K有关功率不确定度计算的要求。其在美国、西班牙和我国台湾省的MUR项目中,为核电厂提供了最多1.7%的功率提升。三门核电厂使用的LEFM CheckPlus™系统与已经在美国等地使用的测量系统相同,在Alden实验室(或同等资质的流体实验室)进行全实流标定,以往的应用经验表明,使用LEFM CheckPlus™系统后,由于测量误差引起的热功率不确定度最多可以减少到0.3%。在主给水流量测量中使用UFM,可以得到高精度的流量测量数据。

以浙江三门核电厂一期工程为例,现在主给水流量测量采用的文丘里管和UFM的方案能够为热功率计算和测量提供比较准确的测量数据,为核电厂的小幅度功率提升提供了技术保证。

### 5.3 MUR需要进行的工作

按西屋和NRC的做法,在开展MUR项目之前,需要给水流量测量装置(如UFM)的供货方提交设备和系统的专题报告(Topical Report)给核安全监管部门,最终核安全监管部门以安全评估报告(Safety Evaluation Reports, SERs)的形式对其进行审核批准。以目前浙江三门一期工程和山东海阳一期工程中西屋公司已经确定使用的LEFM CheckPlus™ UFM为例,该测量系统和设备于1997年提交专题报告供NRC审查,于1999年获得NRC审核批准的安全评估报告<sup>[10]</sup>。

进行功率提升项目时,需要NSSS的设计方进行相关安全分析,同时需要CI/BOP的设计方对核电厂功率提升后的相关运行参数进行评估。NSSS设计方和CI/BOP的设计方需要进行的具体分析工作可以参考EPRI的相关报告<sup>[11]</sup>。主要进行的评估工作就是功率提升后带来的系统参数或整定值的调整是否仍然符合安全分析的要求,提升功率的最终方案需要国家的核安全监管部门批准之后才可以提升核电厂的功率水平,实现核电厂发电功率的提升。

自2000年起,NRC经过多个核电厂小幅度功率提升的审查之后,于2002年制定了专门的RIS<sup>[12]</sup>作为小幅度功率提升的审查导则。我国今后的核电厂小幅度功率提升(MUR)工作也可以用该导则作为指导。

MUR项目具体需要做哪些工作或者说考虑哪些方面可以参考已经进行过小幅度功率提升项目的电站的情况,以台湾电力公司的核一、三厂为例,它的方案是不改变反应堆冷却剂系统正常运行压力,稳压器正常压力不变,几乎不改变热段温度。在此条件下,可以使功率提升对反应堆冷却剂系统设备负荷的影响最低、环境因素的评估最少、与系统压力有关的仪控整定值改变最小,以及RCS的压力控制仍然维持原样。该小幅度热功率提升将导致给水流量及主蒸汽流量分别增加约2%,而主蒸汽流量的增加可以通过调节汽轮机调门开度降低蒸汽流动阻力来实现。在安全分析上,由于之前与应急堆芯冷却系统(ECCS)有关的电厂安全分析都是在102%额定功率水平下进行的,原则上只需要重新分析以新的100%额定功率为基础的瞬态。

### 5.4 使用UFM实现MUR带来的潜在风险

实现了MUR之后,可以为核电厂带来很多经济上的收益,但是也可能对核电厂带来一些潜在的风险,因此必须要加强电站运行的监测工作,多渠道检测超功率事件的发生。

## 6 结束语

本研究通过深入了解超声波流量计的工作原理,分析了其流量测量不确定性以及使用超声波技术进行堆芯功率计算的不确定性,给出了超声波流量技术主给水流量测量中的应用数据,综合了通过提高给水流量测量精度的方式进行核电厂小幅度功率提升的实践经验,以及AP1000项目中核电厂主给水流量测量的方案,本研究从MUR实施的经济意义、现有AP1000项目主给水流量测量中超声波流量计的使用情况、MUR项目中各方需要开展的工作以及MUR实施后潜在的风险几方面进行了分析。

随着科研人员对于 AP1000 核电厂掌握程度的逐渐加深,在今后的项目中可以基于超声波流量测量技术,实现 AP1000 核电厂的小幅度功率提升,使核电厂可以更加安全、稳定和有效地运行。

#### 参考文献(References):

- [1] Electric Power Research Institute. Feedwater Flow Measurement in U. S. Nuclear Power Generation Stations[R]. California:Electric Power Research Institute, 1992.
- [2] Electric Power Research Institute. Improving Pressurized Water Reactor Performance Through Instrumentation; Application Case of Reducing Uncertainties on Thermal Power [R]. California:Electric Power Research Institute, 2001.
- [3] Electric Power Research Institute. Plant Support Engineering: Methodologies for Monitoring and Adjustment of Reactor Power Measurement Drift [R]. California:Electric Power Research Institute, 2007.
- [4] Electric Power Research Institute. Volume 1, Survey and Characterization of Feedwater Venturi Fouling at Nuclear Power Plants-Vol. 1: Feedwater Venturi Fouling [R]. California:Electric Power Research Institute, 1992.
- [5] Electric Power Research Institute. Volume 2, Survey and Characterization of Feedwater Venturi Fouling at Nuclear Power Plants-Vol. 2: Photomicrograph and Chemical Analysis [R]. California:Electric Power Research Institute, 1992.
- [6] U. S. Nuclear Regulatory Commission. Power Uprates [EB/OL]. [2011-07-07]. <http://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/power-uprates.html>.
- [7] HANSEN T. Nuclear Plant Uprates Power Engineering [EB/OL]. [2007-03-01]. <http://www.power-eng.com/articles/print/volume-111/issue-3/features/nuclear-plant-uprates.html>.
- [8] U. S. Nuclear Regulatory Commission. Approved Applications for Power Uprates [EB/OL]. [2011-12-23]. <http://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/power-uprates/status-power-apps/approved-applications.html>.
- [9] 张焕欣. 核电厂热功率监视的设计实现[J]. 自动化博览, 2007, 24(6): 87-89.
- [10] Safety Evaluation by the Office of Nuclear Regulation. Topical Report ER-80P, "Improving Thermal Power Accuracy and Plant Safety While Increasing Operating Power Level Using the LFM System," Comanche Peak Steam Electric Station Units 1 and 2, Docket Nos. 50-445 and 50-446 [R]. USA: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1999.
- [11] Electric Power Research Institute. Small Power Uprates Under Appendix K: Benefits And Considerations [R]. California:Electric Power Research Institute, 2000.
- [12] U. S. Nuclear Regulatory Commission. NRC Regulatory Issue Summary 2002-03 Guidance on the Content of Measurement Uncertainty Recapture Power Uprate Applications [EB/OL]. [2002-01-31]. <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/gen-comm/reg-issues/2002/ri02003.html>.

[编辑:张翔]

(上接第 1049 页)

## 4 结束语

为提高电液伺服控制系统的响应速度和精度,本研究开发了基于 Mlx90316 的电-机械转换器角位移测量系统,采用 Mlx90316 不仅使电路变得简单,减少了元器件数量,同时保证了测量的稳定性与准确性。同时,基于霍尔技术的角位移测量使该系统环境适应能力强、抗污染能力强。理论研究与实验结果表明,位置补偿校正能很好地改善电-机械转换器的动态特性,可以提高系统频响,缩短阶跃响应上升时间,增大对应相位滞后 90° 的最大频宽。该位置测量系统测量速度快,精度高,可广泛应用于各种角位移检测场合。该测量系统与微控制器连接简单方便,使之具有智能的特点,是一种不错的方案。

#### 参考文献(References):

- [1] 路甬祥. 液压气动技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [2] 白明方,杨瑞峰. 基于 SPI 总线的双机通信系统设计[J]. 机械管理开发, 2010(12): 181-182.
- [3] BRASSEUR G. A robust capacitive angular position sensor. [C]// IEEE Instrumentation Measurement Technology Conference, Bursseles, Belgium, 1996: 1081-1086.
- [4] 陶卫,浦昭邦,孙运斌. 角度测量技术的发展[J]. 激光杂志, 2002, 22(2): 5-7.
- [5] BARKER M J, COLOUGH M S. A two-dimensional capacitive position transducer with rotation output [J]. **Review of scientific Instruments**, 1997, 68(8): 3238-3240.
- [6] 周红峰,宫爱玲. 小角度测量的光学方法[J]. 云南民族大学学报:自然科学版, 2006, 15(2): 130-133.
- [7] 汪晓文. 低惯量电-机械转换器的研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院, 2011.
- [8] 苏奎峰,吕强,常天庆,等. TMS320X281xDSP 原理及 C 程序开发[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2008.
- [9] 苏奎峰,蔡昭权,吕强,等. TMS320X281xDSP 应用系统设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2008.
- [10] WILMSHURST T. PIC 嵌入式系统开发[M]. 陈小文,闫志强,译. 北京:人民邮电出版社, 2008: 255-259.

[编辑:张翔]