

# 基于步进算法的安全壳恒压测流系统设计

滑永振,陈广恒,王思涵,李建发,张 瑞

(中国核电工程有限公司,北京 100048)

**摘要:**安全壳作为核电厂的第 3 道安全屏障,其良好的密封性是在严重事故工况下实现放射性包容的物质基础。为了规避传统压力衰减法安全壳泄漏率测量方案对压力变化具有显著的非线性特征进行回归分析时存在较大测量偏差的问题,本团队研发了恒压法泄漏率测量方案。该方案需要保持安全壳内压力基本恒定,即安全壳气体流入与流出达到动态平衡状态,壳内压力始终围绕目标压力值附件以微小幅度波动。为了实现上述安全壳恒压充气的控制目标,该文基于 PLC 及步进算法设计研发了恒压测流系统,并通过实验验证其功能,确定其适用于不同规格安全壳的正压、负压等应用场景,能够较好的满足恒压法泄漏率测量方案的功能要求。

**关键词:**安全壳;泄漏率;恒压法;步进算法;恒压测流

中图分类号:TL364.3

文章编号:1000-0682(2024)03-0135-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.024

## Design of constant pressure flow measurement system for containment based on step algorithm

HUA Yongzhen, CHEN Guangheng, WANG Sihan, LI Jianfa, ZHANG Rui

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100048, China)

**Abstract:** As the third safety barrier of nuclear power plant, containment is the material basis for radioactive containment under severe accident conditions. In order to avoid the problem of large measurement deviation in the regression analysis of the significant nonlinear characteristics of pressure changes in the traditional pressure attenuation method of the containment leakage rate measurement scheme, the team invented the constant pressure method of the leakage rate measurement scheme. The solution requires that the pressure inside the containment vessel be kept basically constant, that is, the inflow and outflow of the containment gas reach a dynamic equilibrium state, and the pressure inside the containment vessel always fluctuates slightly around the target pressure value attachment. In order to achieve the above control goal of constant pressure inflation of containment, this paper designs and develops a constant pressure flow measurement system based on PLC and step algorithm, verifies its function through experiments, and determines that it is suitable for positive pressure, negative pressure and other application scenarios of different specifications of containment, and can better meet the functional requirements of the leakage rate measurement scheme of constant pressure method.

**Keywords:** containment vessel; leakage rate; constant pressure method; step algorithm; constant pressure flow measurement

## 0 引言

安全壳作为核电厂的第 3 道安全屏障,其良好

的密封性是在严重事故工况下实现放射性包容的物质基础。为了保证安全壳的密封性,目前国内外核电工程中均采用压力衰减法开展泄漏率的测量<sup>[1]</sup>,采用该方法测量泄漏率的过程中,若压力变化具有显著的非线性特征,采用压降法对壳内气体质量进行线性回归分析,将导致测量值偏差较大<sup>[2]</sup>。为了解决此问题本团队研发了更加稳定的恒压法泄漏率

收稿日期:2024-02-28

第一作者:滑永振(1986—),男,硕士,高级工程师,核能自动化及数据采集。E-mail:huayongzhen86@sina.com

测量方法<sup>[2-3]</sup>。在恒压法泄漏率测量方案中,首先需要保持安全壳内压力基本恒定,即安全壳气体流入与流出达到动态平衡状态,壳内压力始终围绕目标压力值附件以微小幅度波动,方便在壳内温度、湿度持续变化的环境下,通过补偿流量的实时计算实现泄漏率的实时准确测量。如何通过合理的手段实时的向存在气体泄漏的安全壳内充入气体,使安全壳内压力达到基本恒定的效果,实时测量在此期间充入气体的流量是该文的研究内容,为了解决此问题笔者研发了基于步进算法的安全壳恒压测流系统。

## 1 研究目标

恒压测流系统预期设计目标是,可以在任意外界环境中,能够不受外界条件(比如气源压力不稳定,温度变化等)制约,当安全壳存在泄漏时,可通过空压机连接该装置对安全壳进行合适的气量补充,使得安全壳压力稳定在某个值附近。该装置中需要布置合理的流量计,以实时监测充气流量,为满足不同工况下泄漏率的测量需求,需要通过流量控制器对其充气流量进行灵活的控制,流量控制器的开度与被测安全壳的压力进行负相关调节,即形成了通过压力来控制补气流量的闭环控制逻辑。

## 2 相关技术应用情况

恒压供气系统在天然气、煤矿、铁路、医疗、汽车等诸多行业有着广泛的应用<sup>[2-5]</sup>,但大多是用于的气动系统的恒压气源或天然气供气等场景,比如周佳英利用 PLC 和 PID 算法构建空压站恒压供气监控系统<sup>[4]</sup>,利用 PID 模块对变频器进行闭环调速控制,从而控制电动机的转速使得主管道压力不断趋于设定目标值,实现钢管厂生产作业所需的恒压气源。薛乾利用 PLC 和 PID 算法构建的恒压气腹机系统,利用 PID 模块对进气量进行闭环调整,控制流量比例阀的开度从而控制进气量使得腹腔压力不断趋于设定目标值,实现稳定的腹压控制<sup>[5]</sup>。徐跃利用 PLC 及 PID 模块对风机变频器进行闭环控制,实现天然气的恒压供气,减少过量供应带来的排放浪费<sup>[6]</sup>。刘禹廷利用 PLC、节流阀、比例调节阀搭建的恒压控制系统,通过双闭环调节控制实现了更加稳定的供气设备出口压力<sup>[7]</sup>。朱冬等利用计算机、数据采集卡、比例调节阀搭建的恒压恒湿供气系统,通过 PID 控制算法对比例流量阀的开度进行闭环调节,实现储气罐目标压力恒定的控制效果<sup>[8]</sup>。王慧

等在设计矿山生产恒压气源时,基于 PLC 硬件采用模糊 PID 参数自整定方案替代传统 PID 方案,实现更快速的调节并规避修改目标压力后的超调震荡问题<sup>[9]</sup>。黄雪琴设计多通道多管径配合供气,搭配精密调压阀,并采用 LabView 软件及模糊 PID 控制方案,实现压力的快速准确调节<sup>[10]</sup>。该文将探讨恒压供气系统在安全壳泄漏率测量场景下的应用,并尝试全新的流量控制方案。

## 3 系统设计

### 3.1 系统结构设计

恒压测流系统主要包含气路模块、测控模块、执行模块 3 部分。气路模块采用多管路供气设计,主要包括管线、调压阀、大、小量程流量计和压力变送器,通过 3 个气体通路对容器进行充气 and 检测,测量方式采用流量补充技术,并实现 3 个通路的自动切换。测控模块负责对安全壳内当前压力实时监测,并对执行模块下发指令,以安全壳压力为过程量,实现流量控制器开度自动闭环调节,从而做到对压力微小波动的主动适应和调整,与此同时通过流量计测量充气流量。执行模块主要包含电磁阀、流量控制器等执行机构。电磁阀可以接收来自控制模块发出的指令,并据此改变自身的开合状态,以控制气路模块的导通与关闭。流量控制器可以接收来自控制模块发出的指令,并据此调整自身的开度,以控制测量管路中的补充流量。管路中的流量计将气路模块中的流量信号发送给控制模块,控制模块收到流量信号后进行流量控制参数计算,并对流量控制器发出指令,实现气路模块中气体流量大小的自动调节功能。在空压机与本系统衔接处配置调压阀,进行初步的压力调节,做到气源压力基本稳定。系统结构如图 1 所示。控制逻辑如下:

(1)系统启动后,打开电磁阀 3,系统开始快速充气,压力表 1 达到一定值后,电磁阀 2 关闭;

(2)电磁阀 1-4 关闭,PLC 记录压力表 1 变化;

(3)根据压力变化,打开电磁阀 4 和 2,PLC 输出定值流量至 FC-1;PLC 记录 FT1、FT2;

(4)PLC 根据压力表 1 变化,调整 FC-1 输入信号,调整 FC-1 流量,根据流量控制开启电磁阀 1 或者电磁阀 2;

(5)PLC 记录压力和流量数据,并转发恒压法泄漏率测量系统进行数据计算。

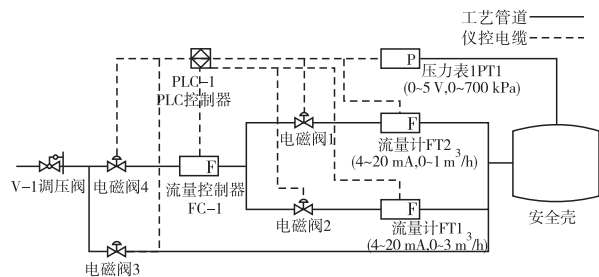


图1 安全壳泄漏率测量工艺流程图

调压阀下游分为3个充气管路:其中电磁阀3所在的第一管路为快速充气管路,不配置流量计;电磁阀2所在的第二管路为大流量测流充气管路,配置大量程流量计;电磁阀1所在的第三管路为小流量测流供气管路,配置小量程流量计。本系统实现快速充气功能的同时,为管路2和管路3配置的流量计均为量程合适且精度较高的流量计,并且通过安全壳当前压力为输入值的充气流量闭环控制,从而实现准确的泄漏率测量功能。

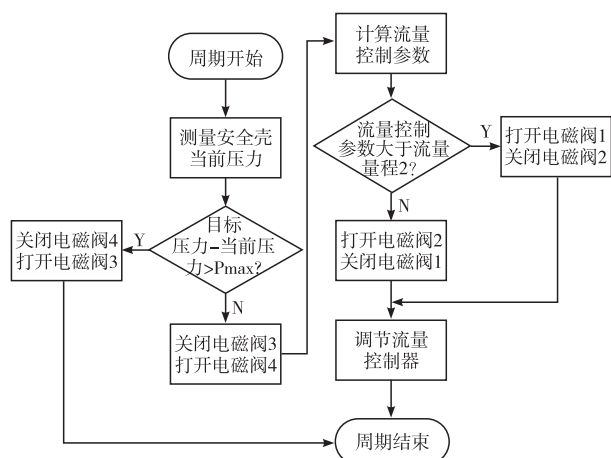


图2 管路控制流程图

恒压法安全壳泄漏率测量系统需要同时支持正压环境和负压环境下的安全壳泄漏率测量功能,由于篇幅限制,该文以内层安全壳正压环境为例讲述充气控制过程及流量调节算法模型的实现方式。如图2所示,当安全壳压力远远小于目标压力时,打开电磁阀3、关闭电磁阀4,采用第一管路快速充气,在尽可能短的时间内使得安全壳压力接近目标值;然后关闭第一通路的电磁阀3,打开电磁阀4和电磁阀2开始闭环调节的慢速充气,随着安全壳压力持续上升,与目标压力越来越接近,充气速率降低,充气流量进入第三管路中小量程流量计的量程范围,关闭电磁阀2,打开电磁阀1,继续闭环调节的慢速充气,

直至安全壳压力与目标压力十分接近时停止充气,进入保压状态。

本系统选型的流量控制器控制范围是30 L/h ~ 3000 L/h,我们需要在这个范围内找到一个确定的流量控制参数,以控制流量控制器的开度,并以该速度补充安全壳的气体泄漏量,该流量控制参数的寻找方法是本系统的核心算法。

### 3.2 流量控制参数算法

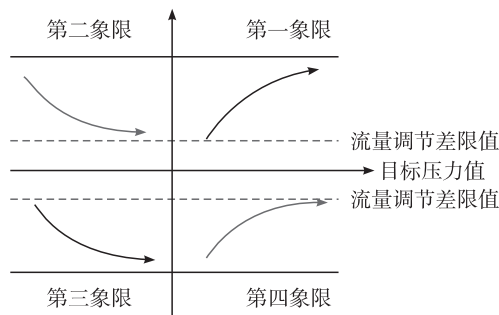


图3 流量控制分析象限

本系统采用PLC+步进式流量调节算法实现气流量的实时闭环控制,以达到安全壳内压力相对稳定的平衡状态。流量调节算法是系统稳定运行的核心,其设计思路如下,PLC控制器在周期程序中循环判断当前压力值与目标压力值的关系,并通过当前压力与上一循环周期压力值的大小关系,判断当前工况处于上述图2象限的类别。

第一象限:当前压力大于目标压力,仍在上升,此时应调小阀门开度,减少充气量,增大步进值;

第二象限:当前压力大于目标压力,正在下降,此时应调大阀门开度,增大充气量,减小步进值;

第三象限:当前压力低于目标压力,仍在下降,此时应调大阀门开度,增大充气量,增大步进值;

第四象限:当前压力低于目标压力,正在上升,此时应调小阀门开度,减小充气量,减小步进值。

当系统处于第一、四象限的工况时,执行以下算法:

首先,执行公式(1)在流量控制参数下限的基础上增加一个流量控制参数步长,上调流量控制参数下限的值。

$$Flow_{edown} = Flow_{edown} + \Delta Flow \quad (1)$$

式中: $Flow_{ecurrent}$ 为流量控制参数下限; $\Delta Flow$ 为流量控制参数步长。

然后,执行公式(2)通过二分法计算当前程序周期的流量控制参数,实现折半查找最佳流量目标值的目的。

$$Flow_{ccurrent} = \frac{Flow_{cup} + Flow_{cdown}}{2} \quad (2)$$

式中:  $Flow_{ccurrent}$  为当前流量控制参数。

然后,再执行公式(3)将流量控制参数上限设置为通过公式(2)二分法计算后的当前流量控制参数,实现流量控制参数上限大幅下调的效果,增快最佳流量目标值查找速度。

$$Flow_{cup} = Flow_{ccurrent} \quad (3)$$

当系统处于第二、三象限的工况时,执行以下算法:

首先,执行公式(4)在流量控制参数上限的基础上减少一个流量控制参数步长,下调流量控制参数下限的值。

$$Flow_{cup} = Flow_{cup} - \Delta Flow \quad (4)$$

然后,执行公式(2)通过二分法计算当前程序周期的流量控制参数,实现折半查找最佳流量目标值的目的。

然后,再执行公式(5)将流量控制参数下限设置为通过公式(2)二分法计算后的当前流量控制参数,实现流量控制参数下限大幅上调的效果,增快最佳流量目标值查找速度。

$$Flow_{cdown} = Flow_{ccurrent} \quad (5)$$

不论当前工况处于哪种象限类别,均需周期性地通过公式(6)判断当前压力与目标压力的差值情况,

$$|Pw_{set} - Pw_{current}| \leq Min_{sp} \quad (6)$$

式中:  $Pw_{set}$  安全壳设定压力值;  $Pw_{current}$  为安全壳当前压力值; ,当时,停止巡查流量控制参数,流量控制器以当前流量控制参数控制充气流量,对待测安全壳进行相对恒压的充气。  $Min_{sp}$  参数设置不宜过大,否则容易导致目标压力附近波动较大。

### 3.3 运行效果实践

通过该恒压测流系统对内部容积为  $2.5 \text{ m}^3$  的小型安全壳开展正压恒压充气实验,目标压力  $419 \text{ kPa}$ ,其充气过程如图 4 所示。快速充气模式期间通过通道 1 不计量快速充气,快速充气模式持续 1 小时 6 分钟安全壳压力接近目标压力  $419 \text{ kPa}$ ,进入计量充气模式,通过通道 2、通道 3 的计量充气并实现闭环控制,最终保证安全壳压力稳定在目标值附近,且波动较小。

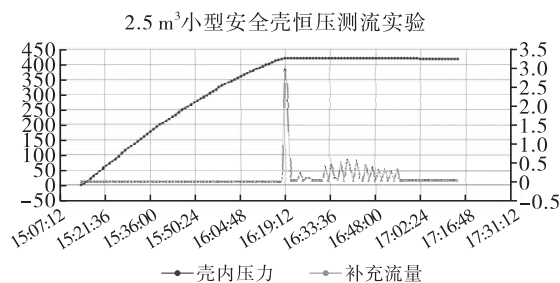


图 4  $2.5 \text{ m}^3$  安全壳正恒压测流实验

通过该恒压测流系统对内部容积为  $2.5 \text{ m}^3$  的小型安全壳开展负压恒压充气实验,目标压力  $-300 \text{ kPa}$ ,其充气过程如图 5 所示。快速充气模式期间通过通道 1 不计量快速充气,快速充气模式持续 1 小时 13 分钟安全壳压力接近目标压力  $-300 \text{ kPa}$ ,进入计量充气模式,通过通道 2、通道 3 的计量充气并实现闭环控制,最终保证安全壳压力稳定在目标值附近,且波动较小。

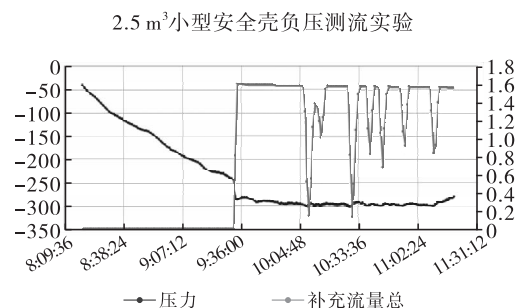


图 5  $2.5 \text{ m}^3$  安全壳负恒压测流实验

通过该恒压测流系统对内部容积为  $1000 \text{ m}^3$  的安全壳开展正恒压充气实验,目标压力  $534 \text{ kPa}$ ,其充气过程如图 6 所示。快速充气模式期间通过通道 1 不计量快速充气,快速充气模式持续 19 小时 35 分钟安全壳压力接近目标压力  $534 \text{ kPa}$ ,进入计量充气模式,通过通道 2、通道 3 的计量充气并实现闭环控制,最终保证安全壳压力稳定在目标值附近,且波动较小。

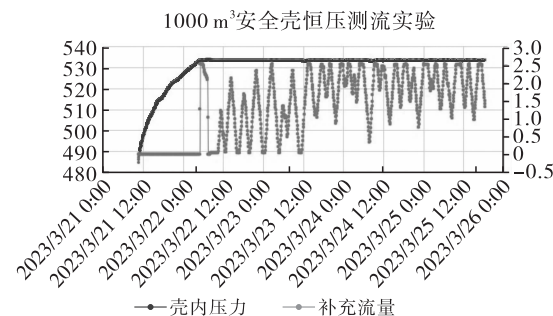


图 6  $1000 \text{ m}^3$  安全壳正恒压测流实验

通过以上 3 种应用场景下工作曲线的对比,发现采用恒压测流系统对安全壳进行充气时,安全壳

容积越大快速充气时间越长,相对而言大容积安全壳充气效率更高,但不同容积安全壳的气压最终均能稳定在目标值附近,并且波动较小。对于小型安全壳而言,正恒压测流充气相较于负恒压测流充气达到稳态的速度更快,恒压状态更稳定。

#### 4 结论

该文基于 PLC 及步进算法设计并开发的恒压测流系统,具备对安全壳快速充气并实现恒压控制的功能,能够为恒压法安全壳泄漏率测量方案提供稳定的安全壳压力,同时通过补充气体流量的实时采集,可以为恒压法安全壳泄漏率计算提供原始数据。此外,该系统具备一定的通用性,可以满足不同规格安全壳的正压及负压环境恒压测流充气需求。

##### 参考文献:

- [1] 李建发,刘丰,滑永振,等. 压降法测量核电厂安全壳泄漏率的影响因素研究[J]. 核动力工程,2023,44(03):196-201.
- [2] 李建发,陈广恒,张瑞,等. 恒压法安全壳泄漏率测量

技术的开发与可行性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2023,44(07):1124-1130.

- [3] 李建发,滑永振,刘丰,等. 恒压法测量核电厂安全壳泄漏率的实验研究[J]. 核动力工程,2023,44(05):175-180.
- [4] 周佳英,徐竞天. 基于 PLC 的空压站恒压供气监控系统设计[J]. 工业控制计算机,2018,31(04):136-139.
- [5] 薛乾. 基于 PID 控制的恒压气腹机系统的设计与实现[D]. 苏州:苏州大学,2019.
- [6] 徐跃. 智能恒压燃气供气系统在生产中的应用[J]. 煤矿机电,2016,2016(4):111-112.
- [7] 刘禹廷. 基于 AMESim 涡轮增压器试验台恒温恒压供气控制系统仿真研究[J]. 机械工程师,2019,11:18-23.
- [8] 朱冬等. 一种恒压恒湿供气系统的设计与试验[J]. 机床与液压,2021,49(1):82-85.
- [9] 王慧等. 基于 PLC 的空压机恒压供气控制系统及特性仿真分析[J]. 仪表技术与传感器,2012,11:174-180.
- [10] 黄雪琴. 快速充气控制系统研究[D]. 杭州:中国计量大学,2016.

## 2024 年主题征文活动通知

各位作者朋友们:

《工业仪表与自动化装置》期刊开展“2024 年主题征文活动”,积极宣传并报道国内外工业流程自动化、工业互联网、人工智能、工业物联网、智能制造、智慧能源、分布式能源、仪器仪表等行业的发展方向、新技术和新工艺、应用科研设计、信息与动态,探讨新的工业革命的突破点,搭建企业、高校、行业开展论坛交流平台。

#### 一、征文主题

智能传感器/工业自动化系统/智能测控技术/仪器仪表与系统设计应用/人工智能

#### 二、征文要求

1. 稿件选题应符合上述 5 项主题,力求新颖、有创新或独特视角,应具学术性、前瞻性、实用性和指导性。
2. 稿件请用 Word 排版。论文模板参考本刊官网提供的投稿模板。
3. 投稿方式:请登陆本刊刊官网 <http://yb-zdh.shaangu-group.com>,在“作者在线投稿”中进行注册并投稿。

#### 三、征文展示

1. 稿件经审核,符合要求的论文将发表在本刊。
2. 征文活动结束后,将评选优质论文,获奖论文的作者将被邀请参加本刊相关活动,并进行表彰宣传。

#### 四、联系方式

联系地址:陕西省西安市高新区沣惠南路 8 号

邮政编码:710075

联系电话:029-81871277

E-mail:gyybbjb@126.com

《工业仪表与自动化装置》编辑部