潜水器均衡系统设计及软件开发研究

王　斌，李泽成，景易凡，刘媛慧，吴昌脉

（1.中国船舶科学研究中心 船舶振动噪声重点实验室，江苏 无锡 214082;

2.深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214082）

摘要：潜水器均衡系统包括纵倾平衡系统和浮力调整系统，其中纵倾平衡系统可消除纵向不平衡力矩，浮力调整系统能克服浮力、重力变化而出现的不平衡力，合理利用均衡系统可调节潜水器姿态，保持潜水器稳定。均衡系统可采用水泵调水或注排水的方式实现，对均衡系统的组成进行了介绍，绘制系统基本原理图，对纵倾平衡系统和浮力调整系统的运行方式、系统参数计算、管路壁厚计算、管路阻力计算等进行了研究，给出了具体的计算方法。为增加系统设计的快速性与准确性，对设计过程进行了程序化处理，使用VB.net编写了计算软件，可对纵倾平衡系统和浮力调整系统中的参数进行快速化计算，并将计算结果保存为文件，对计算界面进行了介绍，对软件主要操作方式进行了叙述。实践证明，计算方式和计算软件可用于潜水器均衡系统设计，对工程应用具有一定的指导意义。

关键词：潜水器，均衡系统，VB.net

# 1. 概述

潜水器在水下航行或悬停期间，由于载荷消耗、设备或人员移动、水文环境变化等原因，潜水器会出现姿态不平衡的状况，此时需要均衡系统来进行姿态调节。均衡系统包括纵倾平衡系统和浮力调整系统，纵倾平衡系统可消除纵向不平衡力矩，使潜水器保持零纵倾或规定的纵倾；浮力调整系统能克服浮力、重力变化而出现的不平衡力，保持潜水器浮态稳定。

潜水器均衡系统具有多种实现途径，其中纵倾平衡系统常用的方法有：1）通过调水实现，在潜水器内部设置艏艉纵倾平衡水舱，利用水泵移动艏艉纵倾平衡水舱的水调节纵倾；2）通过垂推实现，在潜水器靠艏部或艉部安装垂向推进器，依靠垂向推进器正反转产生作用于潜水器的垂向力来调节纵倾；3）通过质量块移动实现，利用潜水器内部设置的质量块纵向移动改变潜水器重心，以此达到调节潜水器纵倾的目的[1]。利用水泵调水方式调节纵倾，设备占用舱内空间小，技术成熟度高，故本文纵倾调节使用水泵调水方式实现。

浮力调整系统常用的方法有：1）通过浮力调整水舱的注排水改变潜水器重力，注水采用自流注水，排水采用水泵排水的方式；2）设置油囊或气囊，通过改变潜水器排水体积实现浮力调节。本文浮力调整系统采用浮力调整水舱注排水的方式实现。

本文对均衡系统的组成，以及水舱容积、水泵流量、管路计算等设计方法进行了研究，并且对设计过程进行了程序化处理，使用VB.net编写了计算软件，可用于潜水器均衡系统的快速化设计和计算，对工程应用具有一定的指导意义。

# 2. 均衡系统组成

当均衡系统采用调水或注排水方式实现时，其主要组成如下：

液舱：艏纵倾平衡水舱、艉纵倾平衡水舱、浮力调整水舱、含舱内液位变送器、排气阀等；

水泵：纵倾平衡水泵、浮力调整水泵，为装置运行提供动力；

水管路：连接艏艉纵倾平衡水舱及浮力调整水舱的管路及附件；

仪器仪表：用于监测流量、压力的流量变送器、压力变送器等；

控制箱：均衡系统控制箱（包含水泵控制单元和阀组控制单元）。

# 3. 纵倾平衡系统设计方法

潜水器纵倾平衡系统的基本原理图如图1所示。

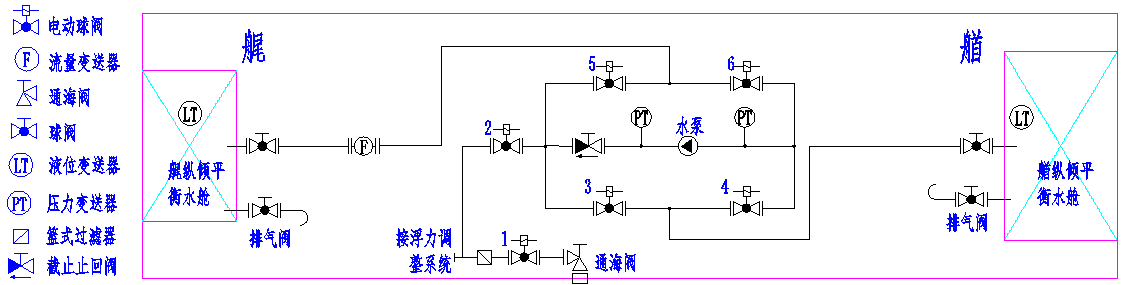


图1 潜水器纵倾平衡系统原理图

**3.1 系统运行方式**

（1）初始状态

各水舱出口处的手动球阀均为打开状态，截止止回阀为打开状态，通海阀为打开状态；各电动球阀均为关闭状态；各传感器供电正常且信号传输正常。

（2）艏纵倾平衡水舱自流注水

当需要向艏纵倾平衡水舱注水时，打开电动球阀1、2、3，舷外水经通海阀、电动球阀等注入艏纵倾平衡水舱，注水过程中注意观察水舱液位显示，当达到设定注水量时，关闭各电动球阀，艏纵倾平衡水舱自流注水完成。

（3）艉纵倾平衡水舱自流注水

当需要向艉纵倾平衡水舱注水时，打开电动球阀1、2、5，舷外水经通海阀、电动球阀等注入艉纵倾平衡水舱，注水过程中注意观察水舱液位显示，当达到设定注水量时，关闭各电动球阀，艉纵倾平衡水舱自流注水完成。

（4）艏纵倾平衡水舱向艉纵倾平衡水舱调水

打开电动球阀4、5，启动纵倾平衡水泵，开始调水，调水过程中观察液位变送器、流量变送器以及潜水器姿态信息，当姿态调整完毕或达到设定的移水量时，关闭纵倾平衡水泵，关闭各电动球阀，艏纵倾平衡水舱向艉纵倾平衡水舱调水完成。

（5）艉纵倾平衡水舱向艏纵倾平衡水舱调水

打开电动球阀6、3，启动纵倾平衡水泵，开始调水，调水过程中观察液位变送器、流量变送器以及潜水器姿态信息，当姿态调整完毕或达到设定的移水量时，关闭纵倾平衡水泵，关闭各电动球阀，艏纵倾平衡水舱向艉纵倾平衡水舱调水完成。

**3.2 系统设计计算原则**

**3.2.1 系统参数计算**

当潜水器通过压载水舱注水，完成水面状态向为水下状态转变后，首先处于水下悬浮静止状态，因潜航器首尾形状不完全对称，在水压作用下潜航器会有纵倾角，在作业期间，由于载荷消耗、内部载荷移动等因素，潜水器也会有纵倾角，此时复原力矩为[2]：



其中：

式中：——水下状态纵倾复原力矩，；

——水下排水量，t；

——水上排水量，t；

，——增加重力法得到的浮心、重心垂向坐标，m；

——固定浮容积的几何形心坐标，m；

——损失浮力法得到的重心垂向坐标，m。

若通过调水来调节纵倾角，则调水量*Q*为：



式中：*l——*艏艉纵倾平衡水舱之间距离，m。

根据式(2)，在已知总体规定的最大可调节纵倾角度时，即可计算出纵倾平衡水舱的最小容积*S*为：



根据系统每平衡1°纵倾所需移水时间*t*min~*t*max的指标要求，可计算出纵倾平衡水泵的流量范围：





根据式(4)和式(5)计算结果，可选定纵倾平衡水泵额定流量。

**3.2.2 管路壁厚计算**

管路基本计算壁厚*t*0为[3]：



式中：*t*0——最小计算壁厚，mm；

*P*——设计压力，N/mm2；

*D*0——管路外径，mm；

[*σ*]——管路许用应力，N/mm2；

*e*——焊接有效系数。

计算管路弯曲附加余量*b*：



式中：*R*——平均弯曲半径，mm，通常*R*不小于3*d*。

即管路的最小壁厚*t*为：



式中：*c*——腐蚀余量，mm。

计算管路制造负公差修正后的最小壁厚*tm*：



式中：*a*——制造负公差与管路之比的百分数。

**3.2.3 管路阻力计算**

黏性流体管道计算的伯努利方程为：



式中：、——管道内1-1与2-2截面中心至基准水平面的垂直距离，m；

**、——1-1与2-2截面上的流体压力，Pa；

**、——1-1与2-2截面上的流体平均速度，m/s；

——管路内流体的重度，N/m3；

**——管路内流体在1-1与2-2截面间的压头损失，m。

压头损失可分为沿程压力损失和局部阻力损失，对于简单管路计算如下：



式中：——摩擦阻力系数；

*L*——管路长度，m；

*d*——管路内径，m；

*u*——管路内流体平均速度，m/s；

——局部阻力系数。

用带入式(11)，有：



在式(12)中，为沿程压力损失，为局部阻力损失。

# 4. 浮力调整系统设计方法

浮力调整系统的基本原理图如图2所示。

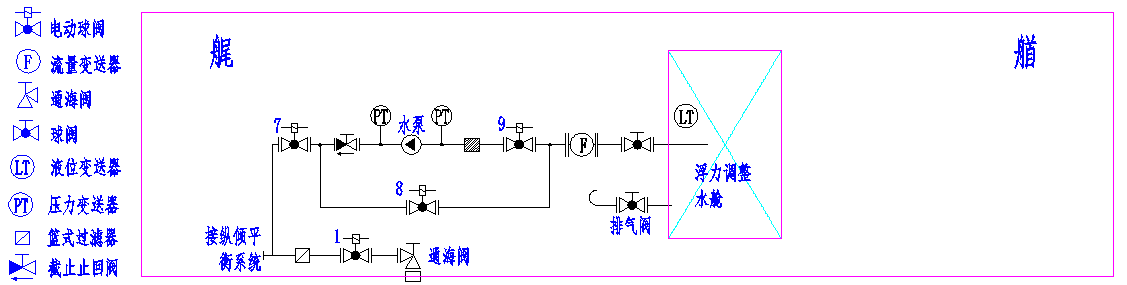


图2 浮力调整系统原理图

**4.1 系统运行方式**

（1）初始状态

各水舱出口处的手动球阀为打开状态，截止止回阀为打开状态，通海阀为打开状态；电动球阀均为关闭状态；各传感器供电正常且信号传输正常。

（2）浮力调整水舱自流注水

打开电动球阀1、7、8，舷外水经通海阀、管路等流入浮力调整水舱，注水过程中观察流量变送器和液位变送器的数值，当达到设定注水量时，关闭各电动球阀，浮力调整水舱自流注水过程完成。

（3）浮力调整水舱排水

打开电动球阀9、7、1，启动浮力调整水泵，则浮力调整水舱的水被排出舷外，排水过程中观察流量变送器数值以及艇体状态，当艇体恢复正常或达到设定排水量时，关闭浮力调整水泵，管理各电动阀，浮力调整水舱排水过程结束。

**4.2 系统设计计算原则**

根据设计规范，浮力调整水舱的容积应根据变动载荷代换确定，一般在总排水量的2%左右，按照总体要求选择合适的浮力调整水泵流量，其余管壁厚度计算及管路阻力计算可参考纵倾平衡系统计算部分。

# 5. 均衡系统设计软件

为增加均衡系统设计的快速性与准确性，本文使用VB.net对系统计算过程进行了编程处理，当潜水器均衡系统采用调水的方式执行时，本软件可对均衡系统进行快速化设计计算。

**5.1 软件功能**

本软件是一个计算应用程序，计算输入是所需要的潜水器部分参数，输出为计算数据及相应的计算文件。程序首先读入潜水器的基本参数，将其作为各系统设计的输入，在各系统的设计界面按照要求选择或输入相应参数，依据操作步骤得出需要的计算结果。

针对纵倾平衡系统，可实现纵倾平衡水舱容积计算、纵倾平衡水泵流量范围计算、纵倾平衡管路选型计算、纵倾平衡管路阻力计算，并生成计算结果文件。

针对浮力调整系统，可实现浮力调整系统管路选型计算、管路阻力计算，并生成计算结果文件。

**5.2 功能模块操作**

软件主界面如图3所示。



图3 软件主界面

点击“进入程序”按钮，则进入潜水器基本参数输入界面，如图4所示。

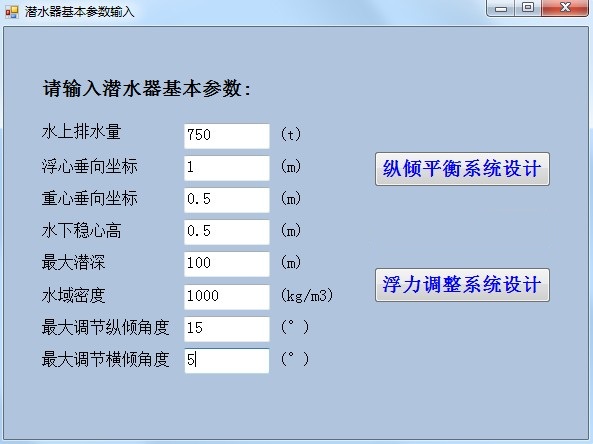


图4 潜水器基本参数输入界面

在输入“水上排水量”、“浮心垂向坐标”、“重心垂向坐标”、“水下稳心高”、“最大潜深”、“水域密度”、“最大调节纵倾角度”、“最大调节横倾角度”所对应的数据后，选择点击右侧的系统设计按钮，则进入相应的系统设计界面。若输入的数据不完整或格式不正确，软件会进行相应提示。所有数据正确输入后，点击右侧的系统设计按钮，进入相应的系统设计界面。

**5.2.1 纵倾平衡系统计算界面**

纵倾平衡系统的设计界面如图5所示，操作过程应遵照计算步骤，首先进行纵倾平衡水舱容积的计算，然后进行纵倾平衡水泵流量范围的计算，根据计算结果输入额定流量、管路流速以及设计压力，计算管路最小内径，然后选择管路规格并进行强度和流速的计算，根据选定的管路规格以及输入的管路附件信息，计算纵倾平衡系统管路阻力，最后生成计算结果文件。

在纵倾平衡系统设计界面中，绿色文本框为软件计算得出，无需手动输入，白色文本框需根据实际设计条件输入参数。

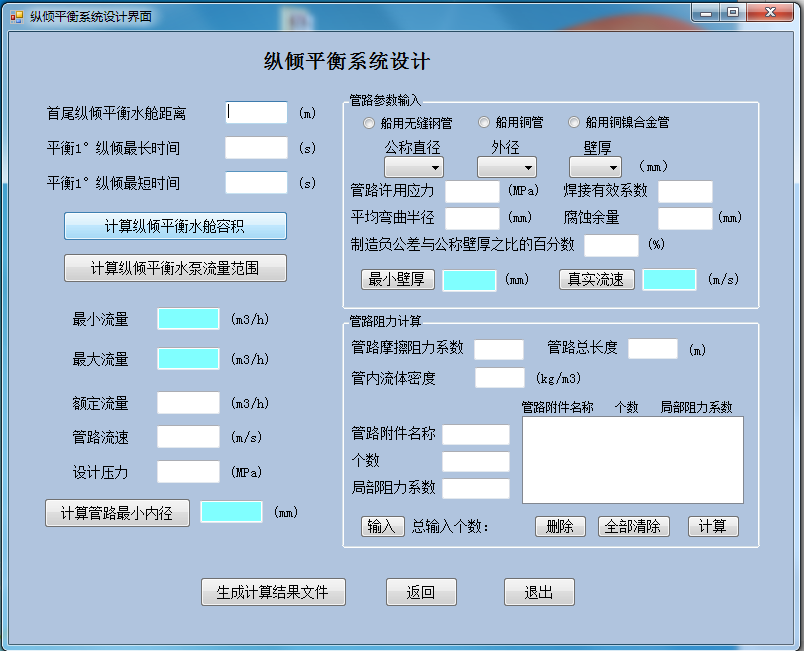


图5 纵倾平衡系统设计界面

为提高管路设计的标准性与便捷性，软件将常用的管路的材料和规格进行了嵌入处理，首先选择管路材料，管路的公称直径、外径、壁厚等将会根据材料自动更新，继续输入管路参数，则可以计算出所选管路的最小壁厚，并提示设计结果，如图6所示。

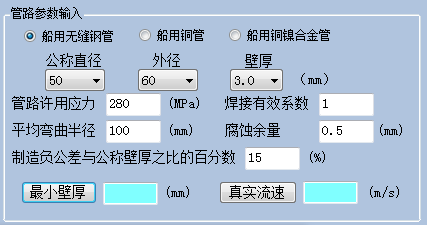
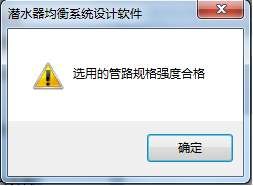
 

图6 管路壁厚计算部分

下一步可进行管路阻力计算，如图7所示，依次输入“管路摩擦阻力系数”、“管路总长度”、“管内流体密度”，此三项可用于计算管路沿程压力损失。在“管路附件名称”文本框中输入管路附件名称，如球阀，在“个数”文本框中输入球阀的个数，在“局部阻力系数”文本框中输入球阀的局部阻力系数，点击输入按钮，则右侧列表框中则显示出所输入的球阀信息，按照纵倾平衡系统所有的管路附件，可依次输入，下方的“输入数”统计会自动更新，点击“计算”按钮，软件弹出对话框，显示所计算出的沿程压力损失、局部阻力损失和总阻力损失。

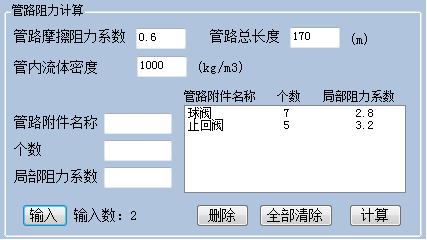


图7 管路阻力计算部分

点击纵倾平衡系统设计界面下部的“生成结果文件”，则软件将纵倾平衡系统计算结果以txt文件格式进行保存，保存内容如图8所示。

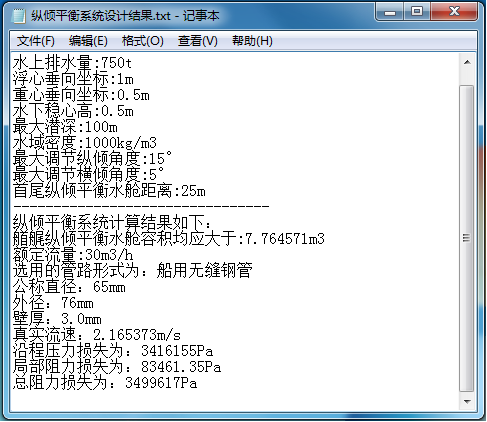


图8 结果文件保存的计算信息

**5.2.2 浮力调整系统计算界面**

浮力调整系统的计算界面如图9所示。



图9 浮力调整系统计算界面

浮力调整系统计算前首先应输入浮力调整水泵额定流量，其余的计算模块包括管路壁厚确定与管路阻力计算，此部分的操作方法可参考纵倾平衡系统软件部分。

# 6. 结语

潜水器均衡系统包括纵倾平衡系统和浮力调整系统，其可以平衡因载荷消耗、设备或人员移动、水文环境变化等原因而出现的不平衡力及力矩，保持潜水器均衡。使用水舱调水或注排水的方式实现均衡，设备占用舱内空间小，技术成熟度高，本文以此种方式为研究对象，形成研究结论如下：

(1)均衡系统主要包括纵倾平衡水舱、浮力调整水舱、水泵、水管路及附件、传感器等，系统原理图及运行方式等可根据潜水器实际情况进行修正。

(2)由潜水器排水量、重心、浮心等数据，可计算出纵倾平衡水舱最小容积、纵倾平衡水泵额定流量等，进而可计算管路壁厚、管路阻力损失等数据。

(3)针对均衡系统所编写的设计软件，可实现均衡系统基本参数的计算，增加了设计的快速性与准确性，具有一定的工程应用价值。

参考文献

[1]王斌,段勇,李泽成.机械式纵倾平衡系统在大型无人潜航器应用研究[J].舰船科学技术, 2022, 44(24):45-49.

[2]苏玉民, 庞永杰. 潜艇原理[M]. 哈尔滨工程大学出版社, 2013.

[3]中国船舶工业集团公司.船舶设计实用手册(第3版)((轮机分册) [M].国防工业出版社,2013.

作者简介：王斌，男，1993年10月出生，工程师，主要从事轮机设计方向，邮箱：upcwangbin@163.com。