

◆ 现代轮机工程系列讲座(七) ◆

# 船舶中央冷却系统的管路水力计算模型

尹自斌, 孙培廷

[中图分类号]

[文献标识码]A

[文章编号]1006-7728(2003)01-0051-03

冷却水系统是船舶柴油机最主要的动力系统之一,其工作质量决定着整个柴油机动力装置的可靠性、经济性和系统主要设备寿命。现代船舶柴油机普遍采用中央冷却系统,其特点是:主柴油机由一个高温冷却水回路进行冷却,各种冷却器由低温冷却水回路冷却;高、低温冷却水回路通过主柴油机淡水冷却器连接或是三通调节阀连接;低温冷却水回路再由舷外海水通过中央冷却器冷却。这种冷却系统很大程度上减少了海水引起的设备及管路腐蚀问题,因此被广泛采用。

## 1 中央冷却系统管路水力计算模型问题的提出

中央冷却系统作为船舶柴油机主要的动力系统之一,其工作要求是:柴油机在整个工作范围内,系统均能对柴油机及其辅助设备适度、可靠冷却,特别是保持柴油机缸套冷却水出口温度稳定,防止柴油机缸套过冷或过热。设计适合工作要求的中央冷却系统,这就需要对系统中各点的流量、压力等参数进行数值计算。计算结果用以确定系统设备(如泵、调节阀、节流孔板等)参数和特性,作为选型依据,也作为确定控制系统控制特性的参考,从而对系统从可靠性、经济性等角度进行优化设计。

然而,目前中央冷却系统的设计在一定程度上还依赖于经验,对系统做简化处理或是参照已有的系统设计。这种设计方法不是完全建立在科学计算基础之上,不利于设备选型和系统优化,设计出的系统难以很好地符合工作要求。为解决这一问题,本文提出采用虚拟阻抗法,利用有限元法建立系统管路水力计算通用数学模型,然后应用于实际系统,对系统中各点的流量、压力等参数进行数值计算。

## 2 中央冷却系统管路水力计算数学模型的建立

### 2.1 系统物理特性分析

虽然船舶中央冷却系统的管路型式不尽相同,实船布置结构复杂,但均可当作水力管网处理。中央冷却系统是一个特殊的水力管网,系统中不仅包含管道元件,还包括泵、阀、

换热器、柴油机缸套和活塞、节流孔板等非管道元件。在实际管网计算中,管道的作用相当于阻抗。对于非管道元件也可虚拟成阻抗,只是水泵的作用相当于负阻抗,而其他非管道元件相当于正阻抗。按阻抗特性的不同,可以将各阻力元件按以下几类分析。

#### 1) 管道元件

船舶冷却系统应当做短管处理,沿程阻力损失不能忽略不计。管道沿程阻力损失表达式:

$$h_f = l \frac{1}{d} \frac{V^2}{2g} = \frac{8ll}{p^2 g d^5} Q^2 \text{ 或表示为: } \Delta H = S Q^2$$

其中,  $S = \frac{8ll}{p^2 g d^5}$ 。

#### 2) 水泵

船舶中央冷却系统的冷却水泵大都采用离心泵,其特性曲线方程可表示为:

$$\Delta H = a + bQ + cQ^2$$

#### 3) 除水泵外的其他非管道元件

阀(包括调节阀和各种截止阀)、换热器、柴油机缸套和活塞、节流孔板等非管道元件,其阻力损失表达式均可表示为:

$$\Delta H = xQ^2$$

只是在系统实际工作中,调节阀的阻力系数是变化的,而其他阻力元件阻力系数不变。

#### 4) 系统特性

根据基尔霍夫定律,管网中各环路的压降的代数和为零,即  $\sum \Delta H_i = 0$

管网中任一节点上需满足流量连续方程,即对任一节点有:

$$\sum_{i=1}^N Q_i^m = C_m$$

[收稿日期]2003-01-5

[作者简介]尹自斌(1971-),男,在读博士,从事现代轮机管理工程研究。

式中:  $Q_i^m$  为单元  $i$  连接于节点  $m$  的节点流量,  $C_m$  为输入

该节点的流量 (若是消耗则为负值)。

## 2.2 系统管路水力计算模型的建立

### 1) 不含泵元件单元的单元方程

图 1 所示,  $Q_i^k$  为单元  $i$  连接节点  $k$  的节点流量,  $Q_i^j$  为单元  $i$  连接节点  $j$  的节点流量, 规定从节点流出流量为正, 流入为负;  $H_i^k$ 、 $H_i^j$  为连接单元  $i$  的节点  $k$  和  $j$  的总水头。

令单元阻力损失系数为  $S_i'$ , 则有:

$$\begin{cases} \Delta H_i = (H_i^k - H_i^j) = S_i' |Q_i^k| |Q_i^j| \\ Q_i^k = -Q_i^j \end{cases} \quad (1)$$

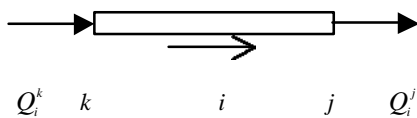


图 1 管路水力计算模型

对于纯管道单元  $i$ ,  $S_i' = S_i$ ; 对于含有非管道元件 (泵

除外) 的管道单元  $i$ ,  $S_i' = S_i + x_i$ 。

上式含有非线性关系, 取单元特征参数:

$$K_i = \frac{1}{S_i' |Q_i^k|} \quad (2)$$

将式 (1) 线性化, 得到单元特征方程组:

$$\begin{cases} Q_i^k = K_i \Delta H_i = K_i (H_i^k - H_i^j) \\ Q_i^j = -K_i \Delta H_i = -K_i (H_i^k - H_i^j) \end{cases} \quad (3)$$

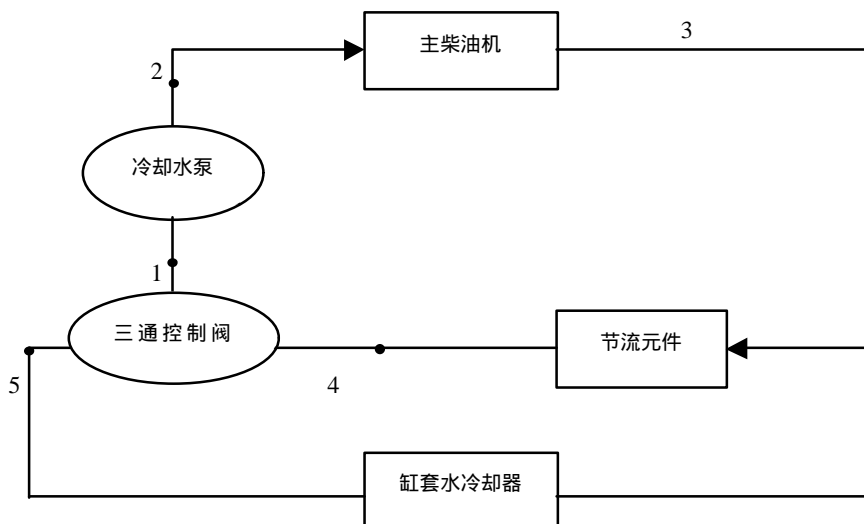


图 2 中央冷却系统高温回路图

写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} Q_i^k \\ Q_i^j \end{bmatrix} = K_i \begin{bmatrix} +1 & -1 \\ -1 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_i^k \\ H_i^j \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 2) 水泵单元的单元方程

由水泵特性曲线方程可得:

$$Q = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c(a - \Delta\zeta)}}{2c}$$

若将水泵编为  $i$  单元, 连接水泵的两节点为  $k$ 、 $j$ , 则同样可得水泵单元的单元方程为:

$$\begin{bmatrix} Q_i^k \\ Q_i^j \end{bmatrix} = K_i \begin{bmatrix} +1 & -1 \\ -1 & +1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_i^k \\ H_i^j \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中:

$$K_i = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c[a - (H_i^k - H_i^j)]}}{2c} \cdot (H_i^k - H_i^j)^{-1} \quad (6)$$

### 3) 总体方程组的合成

在管网中任一节点上须满足流量连续方程, 对任一节点有:

$$\sum_{i=1}^N Q_i^m = C_m \quad (7)$$

由于中央冷却系统为环状管网, 则  $C_m = 0$ 。

## 2.3 建立系统模型算例

作为建立管路水力计算模型基本思路的研究, 为表述简便, 减少单元数, 现以图 2 所示的中央冷却系统高温回路为例, 且不计管路阻力损失。单元及节点编码如图所示, 带圈数字的表示单元编号 (三通调节阀两通路编为 1、2 两单元), 不带圈数字的表示节点编号。

根据以上单元方程建立及总体方程合成方法，即可得到此管网总体特征方程组如下：

$$\begin{bmatrix} K_1 + K_4 + K_5 & -K_1 & & & \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 & & \\ & -K_2 & K_2 + K_3 + K_6 & -K_3 & -K_6 \\ -K_4 & & -K_3 & K_3 + K_4 & \\ -K_5 & & -K_6 & & K_5 + K_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

## 2.4 管网边界条件及求解

### 1) 边界条件

求解管网总体方程组，必须引进适当的边界条件，任一节点  $m$  的边界条件可以给为“节点消耗”  $C_m$ ，或者给为其总水头值  $H_m$ 。此冷却系统管网边界条件与一般管网边界条件有所不同。此管网为环状管网，“节点消耗”  $C_m = 0$ ，节点 1 处的压头可以根据冷却水泵在工作温度下的最大允许吸入真空高度来确定；同时隐含一热平衡条件，对于柴油机某一工况下，单元的热负荷已知，节点 3、5 的温度为设定值，单元的流量是通过系统热平衡法计算得到。在不同的情况下，还可以得到其他不同的求解条件。

### 2) 解法

方程组 (8) 为一非线性代数方程组，可以采用高斯-塞德尔迭代法予以求解。先对未知节点压头赋初值，代入方程组 (8) 迭代计算出新的压头值，将其与前一次压头相比

较，若差值绝对值的最大值超过设定精度，则利用新的压头值代入继续迭代计算，直至前后压头差绝对值的最大值在设定精度范围内。

## 3 结论

随着柴油机动装置设计水平的整体进步，对船舶冷却系统的设计要求也越来越高，冷却系统的设计须建立在科学计算的基础之上。本文提出采用虚拟阻抗法，利用有限元法建立系统管网的水力计算模型，可以解决模型的通用性和实用性问题。运用建立的数学模型可以对已有系统管网运行状况进行验证，也可以在系统设计时用于系统元件（如调节阀）选型和系统优化。但应用于实际冷却系统时，由于阻力元件阻力系数一般为经验数据，这会影响到运用模型计算的精确性，这一问题尚有待研究。

## 最大的升高舵

世界上最大的升高舵已安装到最近交付的 160 000 dwt 苏伊士型油船“Cap Diamant”上。该油船是由韩国现代重工 (HHI) 为希腊船东 Ceres Hellenic 建造的，船上安装了由 Hamworthy KSE 提供的 Schilling 舵。该舵面积约 100 m<sup>2</sup>，它是到目前为止英国航海设备制造商所交付的最大的海舵。

这种舵包括一弧形导边以获得良好的水流特性，以及鱼尾型随边来加速水流并使螺旋桨排出流覆盖到舵的后部。Hamworthy KSE 最近又在三星分别同 Golar—Nor Offshore 和 Ugland Nordi Shipping and Mowinckels Rederi 签订合同为其 2 艘阿芙拉梭型油船、2 艘苏伊士梭型油船安装这种舵。



(徐海蓉)

## Furuno 推出新型 AIS 和 VDR

Furuno 已完成了对其新型的 FA-100 型 AIS (自动识别系统) 及 VDR (黑匣子数据记录仪) 的测试，并已提交给德国船级社进行型式认可。FA-100 型 AIS 由一组控制电子单元及一个用电缆连接的接线盒组成。该设备有两种天线供选择，一种是紧凑组合，VHF-GPS 天线；另一种是单独的 GPS 和 VHF 天线。当与兼容设备雷达或

ECDIS 设备组合时，AIS 目标的相关信息被转换到这种设备上，以帮助航海者综合信息。VR-5000 型 VDR 由 1 个 19 英寸的支架（其上装有数据收集单元）、1 个数据保护存贮盒、以及 1 个收集多种不同数据的遥控电缆接线盒组成。

(徐海蓉)