

# 船舶航向控制系统设计中有关问题的研究

刘国平<sup>1</sup>, 王溪海<sup>2</sup>, 赵秋亮<sup>1</sup>

(1. 浙江海洋学院机电工程学院, 浙江舟山 316004; 2. 大连菱电, 辽宁大连 116024)

**摘要:** 研究了船舶航向控制设计中航向控制环与舵机控制间的联结方式, 舵机开关控制特性对船舶航行的影响, 航向控制的综合优化指标, 以及线性控制原则在航向非线性系统中的主要作用, 如何体现在2个舵角(初始舵角和反舵角)控制量上等问题, 以供船舶航向控制工程设计时参考。

**关键词:** 初始舵角; 反舵角; 航向控制; 开关特性

**中图分类号:** U666.134

**文献标识码:** A

## The Research of the Relevant Questions Regarding the Course Control Design of a Ship

LIU Guo-ping<sup>1</sup>, WANG Xi-hai<sup>2</sup>, ZHAO Qiu-liang<sup>1</sup>

(1. Electromechanical Engineering School of Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316004;

2. Dalian Ryoden, Dalian 116024, China)

**Abstract:** This paper mainly researches several questions about course control design of ship, for example, the connection between course control circuit and steering control; the influence of steering on-off control characteristic on shipping navigation; the synthetic optimum index for the course control; and how the main function of the linear control principle in the system of course non-linear control; is express in the two rudder angle control value (initial rudder angle and opposite rudder angle), etc. The above things are available for reference during the engineering design of a shipping course control.

**Key words:** initial rudder angle; opposite rudder angle; course control; on-off characteristic

我国船舶航向控制系统设计与制造, 自二十世纪六七十年代以来, 在元件创新、系统类型选择、现代控制理论与先进工艺应用等各方面, 呈现了很大的进步和完善, 发展是非常迅速的。但是事物发展的实际应用中, 细究起来, 如舵机系统与罗经电路的联接, 何种方式好? 自动操舵时, 初始舵角和反舵角的作用? 线性控制原则与非线性开关系统间的关系? 舵机开关特性、灵敏度与回差值对系统航行影响? 优化指标指定

等仍将有待进一步研究和讨论。

## 1 航向给定与校正环节方案选择

船舶航向控制系统实现了船舶航向给定与校正功能,它是由 2 个角度系统,以内外环形式构成的。内环是一个舵角跟随系统,它完成了从指令舵角到反馈舵角间的相互比较与控制。因为指令舵角的任意性,所以在类型上它是一个随动系统。系统要求有一定跟随精度与速度,在满足上述条件下,希望不发生打舵振荡,而单调跟随。常独立用于舵机的随动操作方式。在航向控制时,它是以内环形式出现的,外环是船舶航向角控制环,系统要求除精度和速度外,动态要求比较严格。由于船舶惯性大,舵角控制要合适,否则会引起航向大惯性振荡。该系统还要求航向给定与校正功能操作灵活,安全可靠。

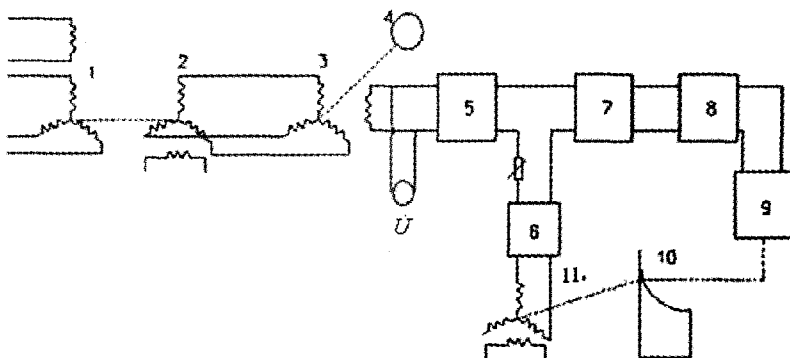


图 1 航向控制系统

Fig.1 Ship course control system

- |              |               |
|--------------|---------------|
| 1. 分罗经       | 2. 发送机        |
| 3. 接收机       | 4. 旋转轴(给定与校正) |
| 5、6. 航向、舵角相敏 | 7. 控制策略       |
| 8. 开关执行      | 9. 舵机及驱动装置    |
| 10. 舵叶       | 11. 舵角发送      |

理解 and 必要的专用工具,所以一旦发生差错和卡住,必将造成校正和操作困难,妨碍正常运行。因此在外环设计中采用自整角机形式的电气差动,可以避免上述问题发生。其原理如图 1 所示,与罗经电路联接部分主要是分罗经 1,航向角度信号通过分罗经输出,并和自整角发送机 2 同轴传动,后发送机与接收机 3 构成自整角机变压器状态联结,在接收机 3 的定子绕组上,输出相应于航向角信号的电压  $\dot{U}$ 。平时轴 4 是锁住的。上述电路通过旋转轴 4 可以完成给定航向与实际航向的差动比较功能。当需要改变航向时,一种操作方式是先用随动操作使船舶航行在新的需要航向上,待稍稳定后,切入自动操作电路如图 1 所示,此时,在新的航向下,自整角机 3 输出电压  $\dot{U}$  就不为 0。然后转动轴 4,调整使  $\dot{U}=0$ ,并锁定。这样就可以在新给定航向下航行。由于此时  $\dot{U}=0$ ,再偏航时就会自动调整。另一种操作方式是在原自动航向操作下,直接以小角度方式旋转接收机轴 4,使船舶航行在新的航向上时,再校正轴 4,使输出电压  $\dot{U}=0$ ,并锁住。这种航向改变操作,一般一次约在  $5^\circ$  内调整,再大的航向改变可分几次操作完成,否则因船舶大惯性易引起航向振荡,上述电路只要电气联结无误,初始调试成功后,一般不会改变电气传动关系,可以完成航向给定与校正功能,是比较稳当和安全可靠的。

## 2 初始舵角与反舵角的作用

一个熟练的舵工,在把定船舶航向时,打舵总是这样操作的,船舶由于风浪扰动发生偏航时,舵工及时打出相反方向舵角(第一次舵角称初始舵角),阻止船舶偏航,有时头一次偏舵角,就阻止了船舶偏航,有时航向还要继续偏,需打第二、第三次舵角,以阻止船舶偏摆,但当船舶在舵角作用下开始回航时,熟练的舵工会及时收舵,并在船舶回到正航向时,舵工已给出超前的反向偏航角,以阻止船舶由于惯性向相反方向一侧偏航。所以一个熟练的操舵工,给出的初始舵角以及回航时给出反向超前的偏航角(反舵角),只要把握好该两舵角的大小和作用时间,就可以使船舶偏航后,恢复航向,使航向呈衰减的 S 形曲线前进,并可保

证一定的精度。

为讨论方便,作简单分析:假设船舶在某一航向上呈S形曲线前进。如图2(a~d)所示,设 $\varphi$ 为偏航角,所设计的偏舵角为 $\beta$ ,令 $\beta=\beta_1+\beta_2$ ,其中 $\beta_1=k_1\varphi$ ;  $\beta_2=-k_2 d\varphi/dt$ ,  $k_1$ 为舵角比,它的选择一般要考虑船舶吨位数、航行条件和海浪大小等。吨位数越大,  $k_1$ 数相应取大,以得到更大的舵角来平衡航向的偏摆,而 $k_2$ 与 $k_1$ 也大致有一定的比例,如选定 $k_2$ 与 $k_1$ 比为1:4左右,也可在此比例下再进行细调。 $k_2$ 实际为微分量舵角比,它是考虑偏航速度,  $k_2$ 取得过大,则船舶稍受风浪扰动就引起舵机动作,使舵机动作频繁,太小则纠偏效果差,起不到应有作用。

航向控制是属角度恒值系统,虽说可用上述比例微分控制概念去解析,但在实际控制设计中,更要注意舵机执行机构的明显开关控制特性的非线性特点,前面分析的是线性控制原则,而后面执行的是开关特性,所以真正起主要作用的却是开关第一次动作的初始舵角 $\beta_a$ 和船舶回航时给出的反舵角 $\beta_b$ ,如图2(d)所示,它们的大小和作用时间,如在开关特性中灵敏度和回差选择合适条件下,可用 $\beta$ 的均值来考虑。至于航向调整中可能出现的二、三次偏航,作用相对减弱,所以不作重点讨论,更何况它们并不是每次调整都出现的,只要 $\beta_a$ 、 $\beta_b$ 控制好,它们将不出现,且 $\beta_a$ 、 $\beta_b$ 舵角值将随控制结果而逐渐衰减,所以在设计中控制好上述2个舵角,相当于控制了舵角比与微分舵角比的大小,而其它的连续测量值,由于非线性开关特性在系统中将不会出现,这一点与连续系统控制是不一样的。

实际上,熟练的舵工也不是连续操作舵机的,只是开始打舵(初始舵角)与收航给出反舵角,把握好大小和时间就能把定航向,甚至不需二次偏舵。

### 3 舵机的开关控制特性

在航向控制中,对舵机要求,希望船舶航行中,舵机不经常起停和频繁动作,所以在现实控制中,舵机很少采用连续控制方式而设计成开关工作方式。

既然舵机控制处于开关状态,那么必然涉及开关特性中的灵敏度 $e$ 和 $\varepsilon$ 回差特性,如图3所示,这里所说的回差是指开关控制中电子线路的人为设计形成的。

在舵机运行中,开关特性若灵敏度低,则要影响跟随精度,如指令舵角变化,舵角跟不准。若灵敏度高,要影响随动环振荡。而回差宽度小,特性则不稳,过大又要影响系统振荡,所以在实际应用中,互相是矛盾的,一般取回差值为灵敏度值的一半左右。至于对开关特性不注意,任意形成的特性会使打舵关系不准确,不对称,甚至混乱。

回差特性在自动操舵时,会出现更严重的影响,回差量的大小直接影响初始舵角和反舵角大小,因为自动航行时,航向和舵角多数处

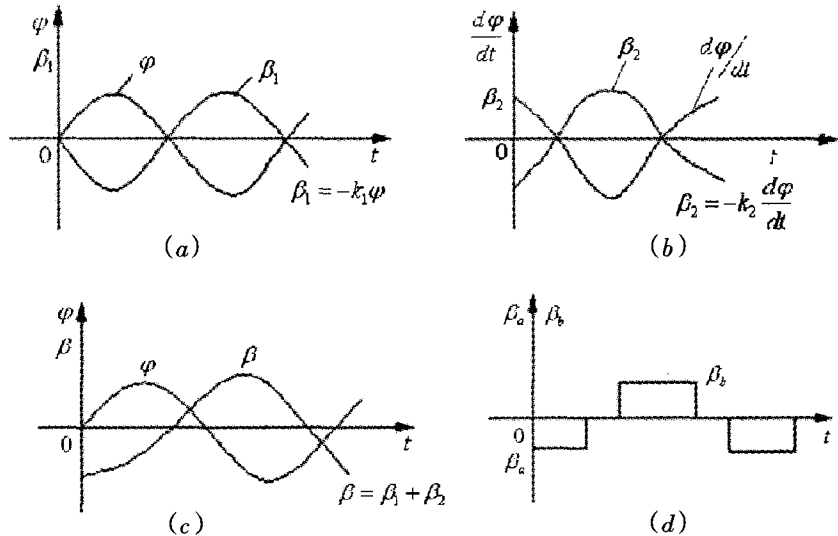


图2 航向角 $\varphi$ 与偏航角 $\beta$

Fig.2 Path angle  $\varphi$  and drift angle  $\beta$

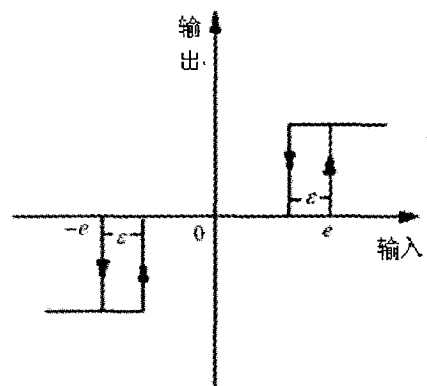


图3 舵机开关控制特性

Fig.3 Characteristic of steering gear switch control

在小角度范围内工作,在船舶偏航时,如回差过小,则初始舵角过小,舵机动一下即停,甚至会产生一动一停现象,所以阻止不了船舶偏航,需二次三次舵机动作,这种现象多数是回差宽度、灵敏度大小调整不当造成的。

而反舵角的给出,其大小也是与相反方向成对称的另一回差与灵敏度有关,所以它们的大小与随动、自动操舵时系统运行质量有关。线性比例,微分控制原则,在执行上与开关特性配合,将直接影响给出的初始舵角和反舵角的大小和时间。

#### 4 综合优化指标

应用现代控制理论中二次型性能指标的概念解决航向控制问题时,某些类型指标由于涉及较多物理量检测,如航向角、速度、加速度等,实现时有一定困难。比较实用的方法,可以考虑以航向精度与舵机动作开关量作为二次型指标的要求。另外在硬件上加一个备用随动通道设计,以满足系统综合优化要求。为什么要这么考虑呢?因为航向控制系统精度要求应该是首先的,如果没有精度要求就没必要设立该系统。而航向速度、加速度分量要求,在航行中,在某种程度上会在精度上反映出来,所以为简易起见,可以不直接把它们包含在指标中。而舵机动作开关量作为控制量,它代表开关动作的功率损耗,所以是需要的,两者结合作为指标是比较全面的,在实际航向控制中,单纯的追求航向精度往往是徒劳的,并且有时在恶劣的环境下,即使舵机频繁动作,要求过高的航向精度也是达不到的。更何况动舵需要能量,且在大风大浪下,动舵太多有一定风险,所以可以通过二次型指标的末值项与权系数选择,定出合理的航向精度要求如  $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$ ,并限制一定的动舵次数,如每分钟十几次左右。

另一方面,在控制设计中尽量提高安全可靠意识。因为航向系统的可靠是船舶航行的生命,尤其船舶在窄航道中航行,绝对要把定好航向,稍不留神,几秒钟的误操作,就可能引起船舶重大碰撞事故,所以随动操作是要保证的。在规范中,强调了舵机动力及供电电源需两路系统供给,而控制部分,因为有多种操作,所以一般不提备用要求。但是随动操作由于它常用于窄航道,并且自动操舵时,控制也要通过随动通道起作用,所以设计中,有些自动操舵仪已设计了 2 条随动通道,可以快速切换,这是实际需要和比较合理的。另外,航向系统总体设计时,能综合考虑上述各方面要求。那么在工程上可以认为具有综合优化的功能。

#### 5 结束语

航向控制中,上述谈及的几个问题,仅从实践方面提出。在航向控制上,线性控制原则,要在非线性舵控环节中应用,需要提醒注意实际作用舵机的开关控制量,它们不是连续的。至于单侧风造成的长期航向误差积累,可在航向压舵环节上校正作用(积分作用)。一个航向控制系统设计时,要考虑各种特性的综合影响,必要时控制器将采用变特性方案才能满足多方的要求。

#### 参考文献:

- [1] 陆祥润. 船舶航向与航线自适应控制系统及其装置[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1993.
- [2] 黄涵洲, 李志恒. 现代控制理论引论[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1995.
- [3] 冒天诚. 船舶与港口电气及自动化问答(二)船舶电气传动自动化系统[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992.
- [4] 王顺晃, 徐迪前. 智能控制系统及其应用[M]. 北京: 机械工程出版社, 1995.
- [5] NAGRATH I J, GOPAL M. Control Systems Engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.