

文章编号: 1006-1088(2005)05-0005-05

# 在船舶管系设计中的一种简易精度控制的方法

陈 宁<sup>1</sup>, 李永旺<sup>1</sup>, 邹耀明<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学 机械与动力工程学院, 江苏 镇江 212003; 2. 镇江船厂有限责任公司, 江苏 镇江 212000)

**摘 要:** 在船舶管路系统设计中, 弯管数量占管子总数的一半以上, 管系的设计和加工直接影响到造船的进度和产量。采用矢量代数理论建立了完整的管子设计模型和计算公式, 并就轮机专业工程师在 TRIBON 系统中进行管路放样给出了一种简易的三角函数方法和计算机电子表格程序。

**关键词:** 管子设计; 弯管; 弯角; 计算方法; TRIBON

**中图分类号:** U664.84

**文献标识码:** A

## A Facility Method Applied in Quality Control in Ship's Piping Design

CHEN Ning<sup>1</sup>, LI Yong-wang<sup>1</sup>, ZHOU Yao-ming<sup>2</sup>(1. School of Mechanical and Power Eng., Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China;  
2. Zhenjiang Shipyard Ltd., Zhenjiang Jiangsu 212000, China)

**Abstract:** In the piping design in shipbuilding, more than half pipes need bending. The schedule and the output of the shipyard will be therefore affected. The whole project model with calculation formula for piping design are presented by using the theory of vector algebra. A simple method based on triangle function and table program for the marine engineer is given.

**Key words:** piping design; pipe bending; bend angle; calculation method; TRIBON

## 0 引 言

现代造船向总装厂制造的方向发展,其主要任务是船体制造和管子制作<sup>[1]</sup>。近十几年来,管子制作已成为船厂生产中的一条短线,影响着造船的进度和产量,并直接关系到船舶建造成本和船厂信誉<sup>[2]</sup>。据统计,弯管数量占管子总数的 55% 左右。为了降低成本和提高管子的寿命,设计过程中应尽可能减少使用定型弯头而采用弯管机弯制,但是如果设计过程中随意确定弯管的弯角,那么在内场加工时,弯管的制造精度很难满足设计要求。既便是在受到空间或弯管能力的限制而必须使用定型弯头的情况下,由于成品定型弯头一般是固定角度的几种规格,也需要对弯角进行控制以减少切割弯头而造成浪费材料和工时。随着成组技术和预舾装技术的不断发展和应用<sup>[3]</sup>,以及目前正在进行的以中间产品为对象的模块化造船技术的发展<sup>[4]</sup>,更应该对弯管弯角的控制方法进行深入的研究。

**收稿日期:** 2004-10-28

**基金项目:** 企业协作技术攻关课题(校编 2000209)

**作者简介:** 陈 宁(1963-),男,江苏南京人,江苏科技大学副教授。

虽然管路的成本经常达到整个船舶造价的 20% 以上,但是在设计理论上却长期没有引起重视,设计方法的落后经常造成管路系统质量不良的后果。现代工程设计采用数字模型设计的方法,CAD 和 CAM 等技术在管路系统设计领域已经有了飞跃发展。笔者重点介绍了管子设计模型和计算方法。

## 1 设计的模型

工程设计模型的发展就是设计方法的革命,从传统的实物模型和几何模型发展到现在的数字模型、产品信息模型 PIM(Production Information Model)<sup>[4]</sup>,完整和精确的工程设计范围有了很大的提高。

虽然工程设计制图起源于画法几何,但是真正的基础却是数学。数学几何中严格定义的点、线、面、体保证了工程设计制图的完整和精确。随着工程设计的发展,传统几何的点、线、面、体已经不能完全满足现代工程设计的需要。必须采用更为先进的几何模型绘图与数字模型参数表定义的方法。

在船体结构空间十分紧张的舾装管路系统设计中,对于管子零件设计要求就十分严格。对于众多的管子,为了避免干涉,管子零件必须精确设计。同时,管子的弯角必须严格地加以控制,这时仅仅利用几何模型设计就十分困难。需要采用几何模型加数字模型制图。如图 1 所示,弯角可以指管子弯曲前后,管子中心线相交所夹的锐角  $\beta$ ;也可以指管子弯曲处的圆弧所对应圆心夹角  $\theta$ 。由三角关系可得  $\theta = \beta$ 。在一个平面内,可以应用正弦和余弦定理来控制弯管的角度,在设计平行弯和过桥弯时,由于加工的需要,弯角  $\theta$  尽量选取整数,例如:30°,45°,60°,90°,如图 2 所示。



图 1 弯角  
Fig. 1 Bend angle

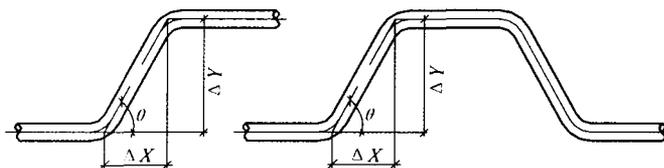


图 2 平面内的平行弯和过桥弯  
Fig. 2 Parallel bend and bridge bend

多数管系设计软件在设计这种弯管时使用相对坐标,即需要输入  $\Delta X$  和  $\Delta Y$ 。一般情况下,根据放样空间的限制, $\Delta Y$  通常是一整数,如果  $\Delta X$  随意给出,那么  $\theta$  值将不是一个整数,这将影响车间弯管的精度,也不利于成组技术的推广。要使  $\theta$  值为整数,只要用三角公式计算出  $\Delta X$ ,然后在相对坐标中输入  $\Delta X$  和  $\Delta Y$  即可:

$$\Delta X = \Delta Y \times \sin \theta \quad (\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ) \quad (1)$$

在空间管路设计时,管子的几何模型可以简化成中心线;通过精确数学定义的矢量线表示<sup>[5~8]</sup>,如图 3 所示,其中数字模型的部分参数定义和代号见表 1。

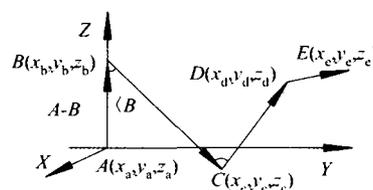


图 3 管子的数字模型

Fig. 3 Digital model of pipe

表 1 管子数字模型的参数

Tab. 1 Parameters in digital model of pipe

参数	定义	代号
点	管子各中心矢量线的端点和终点	A, B, C...
坐标	管子各点的三坐标值	A(x <sub>a</sub> , y <sub>a</sub> , z <sub>a</sub> ), ...
坐标系	XYZ 三坐标直角坐标系(右手系)	xyz
直线段	管子各中心矢量和管子中心线重合线段	A-B, B-C, ...
旋转角	管子各中心矢量线组成的平面所构成的二面角	∠C, ∠D, ...
弯曲角	管子各中心矢量线间的夹角	∠A, ∠B, ...
弯曲半径	管子各中心矢量线间的夹角中心线圆弧的半径	CRA, CRB, ...
圆弧	管子各矢量线间中心线圆弧的长度	RLA, RLB, ...
中心线长度	管子中心线直线段加圆弧的和	CL <sub>ab</sub> , CL <sub>ac</sub> , ...

## 2 设计的计算公式

利用如图 3 表示的数字模型,采用矢量代数理论就可以设计出管子零件的设计计算公式<sup>[8~10]</sup>。其中矢量表示和弯曲角计算见公式(2)、(3):

$$\begin{cases} AB = (x_b - x_a)i + (y_b - y_a)j + (z_b - z_a)k \\ BC = (x_c - x_b)i + (y_c - y_b)j + (z_b - z_a)k \\ DC = (x_d - x_c)i + (y_d - y_c)j + (z_d - z_c)k \\ DE = (x_e - x_d)i + (y_e - y_d)j + (z_e - z_d)k \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \angle B = \arccos \frac{AB \cdot BC}{|AB| \cdot |BC|} \\ \angle C = \arccos \frac{BC \cdot CD}{|BC| \cdot |CD|} \\ \angle D = \arccos \frac{CD \cdot DE}{|CD| \cdot |DE|} \end{cases} \quad (3)$$

直线段和圆弧计算见公式(4)、(5):

$$\begin{cases} A - B = |AB| - CRA \cdot \tan(\angle A/2) - CRB \cdot \tan(\angle B/2) \\ B - C = |BC| - CRB \cdot \tan(\angle B/2) - CRC \cdot \tan(\angle C/2) \\ C - D = |CD| - CRC \cdot \tan(\angle C/2) - CRD \cdot \tan(\angle D/2) \\ D - E = |DE| - CRD \cdot \tan(\angle D/2) - CRE \cdot \tan(\angle E/2) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} RLB = \frac{CRB \cdot \pi \cdot \angle B}{180} \\ RLC = \frac{CRC \cdot \pi \cdot \angle C}{180} \\ RLD = \frac{CRD \cdot \pi \cdot \angle D}{180} \end{cases} \quad (5)$$

中心线长度计算见公式(6):

$$\begin{cases} CL_{ab} = CL_{ac} + A - B + RLB \\ CL_{ac} = CL_{ab} + B - C + RLC \\ CL_{ad} = CL_{ac} + C - D + RLD \\ CL_{ae} = CL_{ad} + D - E + RLE \end{cases} \quad (6)$$

旋转角的计算见公式(7)、(8)、(9)。其中旋转角的计算包括数值计算( $\angle \diamond C$ )和方向计算( $F \diamond C$ ), 其中数值计算的结果是角度, 方向计算的结果是正负号, 需要分别计算完成再进行相乘。

数值计算代号( $\angle \diamond C$ )见公式(7):

$$\begin{cases} \angle \diamond C = \arccos \frac{AB \times BC \cdot BC \times CD}{|AB \times BC| \cdot |BC \times CD|} \\ \angle \diamond D = \arccos \frac{BC \times CD \cdot CD \times DE}{|BC \times CD| \cdot |CD \times DE|} \end{cases} \quad (7)$$

方向计算代号( $F \diamond C$ )见公式(8)。旋转方向计算中正方向规定是沿管子 A、B、C 方向观察管子轴线顺时针旋转的方向。sign 函数是取数据正负号的函数。公式中的(-1)是右手坐标系常数。

$$\begin{cases} F \diamond C = (-1) \times \text{sign}[(AB \times BC) \cdot AD] \\ F \diamond D = (-1) \times \text{sign}[(BC \times CD) \cdot BE] \end{cases} \quad (8)$$

总计算公式代号  $\diamond C$  公式:

$$\begin{cases} \diamond C = F \diamond C \times \angle \diamond C \\ \diamond D = F \diamond D \times \angle \diamond D \end{cases} \quad (9)$$

### 3 数学模型简化

在实际管系设计过程中, 由于船体结构的影响或因为设计要求, 出现立体弯管, 如图 4 所示。在三维空间放样时, 可将弯管简化成可转化成平面弯管的立体弯管, 如图 4a。不能转化成平面弯管的立体弯管, 如图 4b 和图 4c。

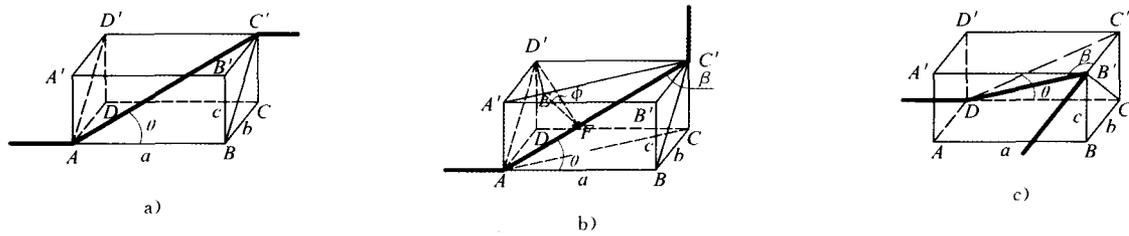


图 4 立体弯角

Fig. 4 Tridimensional bend angle

由于 TRIBON 系统定义了弯管机的弯模半径<sup>[11]</sup>,也就定义了管子弯曲时对应角度弧长的约束,因此,管系放样时不需要考虑管子的弯角圆弧长度,只需考虑管子在 X、Y、Z 的 3 个方向发生增量 a、b、c 的变化,来计算管子轴线旋转的空间夹角∠A、∠B…。因此对于图 4 所示,可以简化为 2 类情况。

### 3.1 可以转化成平面弯管的立体弯管

如图 4a,管子只是在 X、Y、Z 的 3 个方向发生增量,而管子的走向仍然平行于发生增量前管子的走向。这种情况在立体弯管中比较常见,其弯角的控制也比较简单。由图 4a)中可以看出,角  $\theta$  就是管子的弯角,整根管子处于  $ABC'D'$  所确定的平面内,这样立体弯管也就转化为平面内的弯管。假定 b 和 c 是已经确定的值,由勾股定理可以求出  $BC'$  的长度,再将弯角确定为  $\theta$ ,同样使用三角公式即可确定 AB 的长度。

$$|BC'| = \sqrt{b^2 + c^2} \tag{10}$$

$$a = |AB| = |BC'| \times \sin\theta \tag{11}$$

### 3.2 不能转化成平面弯管的立体弯管

如图 4a 和图 4c,管子除在 X、Y、Z 三个方向发生增量外,管子的走向不是与发生增量前管子的走向平行,而是与发生增量前管子的走向垂直,这样整根管子就处于两个平面了。以图 4b 为例说明这种情况下管子弯角的控制方法。

$\theta$  为 A 点处的管子弯角, $\beta$  为 C' 处的管子弯角。在平面  $ABC'D'$  内,过 D' 做  $D'F$  垂直于  $AC'$ ,再在面  $ACC'A'$  内做  $EF$  垂直于  $AC'$ , $EF$  交  $A'C'$  于 E,连接 DE,这样  $\angle D'FE$  就是面  $ABC'D'$  和面  $ACC'A'$  所夹的二面角  $\varphi$ 。此二面角  $\varphi$  也就是管子加工时的管子转角,同理,此角度为整数时管子加工比较方便和准确。

可以根据管子在空间的几何关系推导出方程组(12)。

$$\begin{cases} \sqrt{b^2 + c^2} = a \cdot \operatorname{tg}\theta \\ \sqrt{a^2 + b^2} = c \cdot \operatorname{tg}\beta \\ \cos\varphi = \frac{c^2 \cdot \cos^2\theta + (a^2 + b^2) \sin^2\theta - b^2}{2 \cdot c \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} \end{cases} \tag{12}$$

假定  $\beta$  和  $\theta$  已知,由方程组(12)中的前 2 个方程可以得到 a 和 b 关于 c 的方程组:

$$\begin{cases} a = c \cdot \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2\beta}{1 + \operatorname{tg}^2\theta}} \\ b = c \cdot \sqrt{\frac{(\operatorname{tg}^2\theta \cdot \operatorname{tg}^2\beta - 1)}{(\operatorname{tg}^2\theta + 1)}} \end{cases} \tag{13}$$

如果再给定 c 的值,那么由式(13)和式(12)的第 3 个方程即可求得  $\varphi$ 。显而易见,如此的计算量很大,可以通过 Excel 进行试算<sup>[12]</sup>,即可以预先给出  $\beta$ 、 $\theta$  和 c 值,再计算出 a、b 和  $\varphi$  的值,值得注意的是,由式(13)的第 2 个方程可以看出只有当下式成立时才可以得到有效的 b 值。

$$\operatorname{tg}^2\theta \cdot \operatorname{tg}^2\beta \geq 1 \quad (14)$$

用上述方法计算得到的  $\varphi$  一般也不会刚好是一个整数,但是管系放样过程中受到空间限制的情况比较常见,因此只要在保证弯角为整数, $a$ 、 $b$ 、 $c$  的值能够满足空间要求也就可以了。在此给出试算时使用的 Excel 表格,见图 5。图中斜黑体单元格是输入变量值,带底色的单元格是通过表格的计算功能得到的计算结果。

	B	C	D	E
13				
14	角度	60	45	54.736
15	弧度	1.047197551	0.785398163	0.955316618
16	TAN	1.732050808	1	
17	TAN^2	3	1	
18	SIN	0.866025404		
19	COS	0.5		0.577350269
20				
21		a	b	c
22		7.071067812	7.071067812	1.0
23				

图 5 使用 Microsoft Excel 计算

Fig. 5 Calculation with Microsoft Excel

## 4 结束语

在船舶管系放样实际工作中,对于许多复杂的管子设计,利用传统的几何模型进行的工程制图从来没有完成设计,其中往往是最简单的中心线长度和复杂的二面角都没有计算。然而,真正的问题在于轮机工程专业工程师都没有意识到产品设计出了什么问题,一直没有意识到要采用正确的设计模型去完成设计。当管子设计采用正确的数字模型并通过计算机软件辅助计算时,管子设计速度和质量都有了提高。TRIBON 软件为轮机工程师进行管路设计提供了有效的管系数值计算工具,其对于弯管机弯模设置模块,使得轮机工程师在船舶管系放样时,可以忽略管路弯曲处弧长对于整个管路矢量的影响,而交由计算机内部自己运算,从而使复杂的矢量问题简化成了轮机工程师在从事管放设计工作中只需考虑的管路布放中的轴线走向和轴线的两面角计算这类简单的三角函数问题,通过 Microsoft Excel 表格的计算功能进行试算,在管系设计时,只是在编辑好的 Excel 表中输入变量,就可以直接根据需要的弯角空间限制方便的求出不能转化成平面弯管的管子在三维方向上的增量  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$  和  $\Delta Z$ ,从而提高了管子放样的设计速度和精度。

### 参考文献:

- [1] 罗国荣. 机舱管系的综合布置与施工[J]. 广船科技, 2000, (4): 16-18.
- [2] 李绍东. 管件高效生产系统原理[J]. 造船技术, 1995, (7): 17-24.
- [3] 翁德伟, 徐学光, 陆伟东. 造船成组技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1990.
- [4] 杨 屹, 于 杰, 叶全焕, 等. 舰船模块化设计初探[J]. 舰船科学技术, 2003, (5): 3-6.
- [5] 王永昌, 林建荣. 管子设计的一种简易方法[J]. 燕山大学学报, 2000, (4): 103-105.
- [6] 雷天觉. 液压工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [7] 王 军, 陈 宁, 李永旺. 管系放样中下料长度精度控制方法的研究[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2004, (3): 43-50.
- [8] POURMOVAHED A. Modeling of a hydraulic energy regeneration system—Part II[J]. Experiment program Trans of the ASME, 1992 (14): 160-165.
- [9] MARLS A. Standard Handbook for Mechanical Engineers[M]. London: Que Corperation, 1996.
- [10] DIUMLIJA G. Mill modernization for improvements in strip quality and yield[J]. Steel Time International, 1995, September: 78-93.
- [11] KOCKUM Computer System AB 公司. TRIBON USER GURD[Z]. 瑞典: 2002.
- [12] 黄明达. Excel 中文版入门与范例[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.