

# 三弯矩方程的改进及船舶轴系校中软件研究

张昇平<sup>1</sup>,周瑞平<sup>1</sup>,颜世文<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院,湖北 武汉 430063;2. 徐州船检,江苏 徐州 221000)

**提 要** 针对一般三弯矩方程在船舶轴系校中计算中存在的缺陷,对其作了改进,并将改进的三弯矩方程应用于轴系校中计算软件中,运用该软件对若干实船进行了计算,同时还与国外软件计算的相应结果作了比较。

**主题词** 船舶轴系校中 计算方法 改进  
实用程序

## 1 概述

船舶轴系校中计算对保证轴系的长期可靠运转极为重要,因此,国内外对轴系校中理论开展了比较深入的研究。传递矩阵法、三弯矩方程法以及有限元法等是现阶段轴系校中计算采用的三种基本方法,其中传递矩阵法,因算法简单,易于在计算机上实现,被普遍地使用<sup>[1]</sup>。不过,随着计算机技术和数值算法的发展,特别是面向对象技术和 Matlab 工具的集成使用,三弯矩方法的应用也日益受到重视,力学含义明确、计算精度高、计算速度快的特点得到了充分的体现。作者通过三弯矩方程的使用,对其在轴系校中计算中的应用进行了针对性的改进,并在此基础上,利用面向对象的编程方法,开发了基于改进的三弯矩方程轴系校中计算软件,对多种船舶的轴系校中作了计算。计算结果正确,操作简便,报告清晰。

## 2 三弯矩方程法

### 2.1 一般三弯矩方程

根据传统的三弯矩理论,在对连续梁划分计算截面后,将实际支承称为实支承,并假定除实支承外的其他变载面处也有“支承”,谓之虚支承<sup>[2]</sup>。这样,便可对每一中间支承列出一个三弯矩方程,第*i*支承(如图 1 所示)的三弯矩方程为(*n* 表示截面个数):

$$\begin{aligned} &\frac{l_{i-1}}{E_{i-1}I_{i-1}}M_{i-1} + 2(\frac{l_{i-1}}{E_{i-1}I_{i-1}} + \frac{l_i}{E_iI_i})M_i + \frac{l_i}{E_iI_i}M_{i+1} \\ &- \frac{6}{l_{i-1}}z_{i-1} + 6(\frac{1}{l_{i-1}} + \frac{1}{l_i})z_i - \frac{6}{l_i}z_{i+1} \\ &= -\frac{1}{4}(\frac{q_{i-1}l_{i-1}^3}{E_{i-1}I_{i-1}} + \frac{q_i l_i^3}{E_i I_i}) \\ &(i = 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \tag{1}$$

式中  $l_i$ ——第*i*与第*i*+1 支承间的跨距,mm;  
 $M_i$ ——第*i*支承截面上的弯矩,kN·m;  
 $E_i$ ——第*i*与第*i*+1 支承间轴段材料的杨氏模量,kN/mm<sup>2</sup>;  
 $I_i$ ——第*i*与第*i*+1 支承间轴段的截面惯性矩,mm<sup>4</sup>;  
 $q_i$ ——第*i*与第*i*+1 支承间轴段所受的均布载荷,kN/mm;  
 $z_i$ ——第*i*截面挠度,mm。

结合边界条件,以及虚支承处支反力为 0,实支承处挠度值给定,共可列出 2*n* 个方程,即可解出  $M_i, z_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$  2*n* 个未知数。

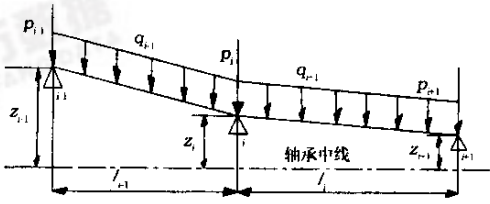


图 1

### 2.2 改进的三弯矩方程

由于实际轴系的受力不只是在 X-Z 平面上,而且也有水平方向的作用力,同时还受到外加力偶(用  $m_i$  表示第*i* 截面处的外加力偶)的作用;再有,实际轴系是非等截面的连续梁,因而在第*i* 截面处的弯矩不能简单地表示为  $M_i$ ,而应表示为左、右截面的弯矩  $M_{iA}$  与  $M_{iB}$ 。因此,将原三弯矩方程式(1)改进为:

$$\frac{l_{i-1}}{E_{i-1}I_{i-1}}M_{i-1B} + 2\frac{l_{i-1}}{E_{i-1}I_{i-1}}M_{iA} + 2\frac{l_i}{E_iI_i}M_{iB}$$

作者简介:张昇平(1971—),男,硕士研究生。

$$\begin{aligned}
& + \frac{l_i}{E_i I_i} M_{i+1A} - \frac{6}{l_{i-1}} z_{i-1} + 6 \left( \frac{1}{l_{i-1}} + \frac{1}{l_i} \right) z_i - \frac{6}{l_i} z_{i+1} \\
& = \frac{-1}{4} \left( \frac{q_{i-1} l_{i-1}^3}{E_{i-1} I_{i-1}} + \frac{q_i l_i^3}{E_i I_i} \right) \\
& (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)
\end{aligned}$$

将  $M_i$  分为  $M_{iA}$  与  $M_{iB}$ , 改进后的三弯矩方程组的未知数共有  $3n$  个, 未知数比原来的方程组多了  $n$  个。要解出这  $3n$  个未知数, 就得增加  $n$  个方程, 这  $n$  个方程是:  $M_{iA} - M_{iB} = m_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。方程组的求解方法很多<sup>[3]</sup>, 作者在软件中集成 Matlab 函数<sup>[4]</sup>, 直接求解, 方便准确。求出各截面的弯矩和挠度值后, 用下列方程求解第  $i$  截面处的转角  $\theta_i$  和该处左、右截面剪力  $Q_{iA}$  与  $Q_{iB}$ , 以及各实支承的支反力  $R_i$ 。

$$\begin{aligned}
R_i &= \frac{M_{i-1B} - M_{iA}}{l_{i-1}} + \frac{M_{i+1A} - M_{iB}}{l_i} \\
&+ \frac{1}{2} (q_{i-1} l_{i-1} + q_i l_i) + P_i \\
&(P_i \text{ 为第 } i \text{ 截面上的外力}) \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\theta_i &= \frac{l_{i-1}}{3E_{i-1}I_{i-1}} M_{iA} + \frac{l_{i-1}}{6E_{i-1}I_{i-1}} M_{i-1B} \\
&- \frac{q_{i-1} l_{i-1}^3}{24E_{i-1}I_{i-1}} - \frac{z_{i-1} - z_i}{l_{i-1}} \quad (4)
\end{aligned}$$

$$Q_{iA} = \sum_{j=1}^{i-1} (P_j + q_j l_j - R_j) \quad (5)$$

$$Q_{iB} = \sum_{j=1}^i (P_j + q_j l_j - R_j) \quad (6)$$

改进后的三弯矩方程比原三弯矩方程有着显著的优点。它不仅满足了静态校中计算的要求, 而且还可以进行动态校中计算, 而一般的三弯矩方程只能进行简单的校中计算。虽然轴系在动态下受力比较复杂, 但都可以把合力分解到经过轴心线的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴上的力和力偶, 所以可以直接用改进的三弯矩方程对轴系进行  $X$ - $Z$  平面上(垂直平面)和  $X$ - $Y$  平面上(水平平面)的校中计算, 最终可将改进后的三弯矩方程应用于动态校中计算之中。因此, 改进后的三弯矩方程使用范围更广、计算结果更符合船舶轴系实际情况, 且可以较好地完成动态校中计算。

### 3 软件实现

Visual Basic 6.0 是一种基于 Windows 操作系统的图形界面开发工具, 具有面向对象的特点, 可通过控件、窗体、文本、菜单、图形以及 OLE 嵌入方式进行规范化的程序设计。同时, VB6 支持 API 函数

的调用和 ODBC 功能, 便于外部函数的调用和数据库文件的管理。本系统以 Windows2000 Server 版为开发平台, VB6.0 作为开发工具, 进行界面设计和文件管理, 通过 API 函数的调用、OLE 自动化以及集成的 Matlab6.1 的使用, 使软件具有功能齐全、界面友好、操作方便、数学模型简单、计算速度快、计算精度高、报告输出多样化等特点, 很好地满足了船舶轴系校中计算的现实需求和理论研究的需要, 对船舶轴系设计和轴系故障分析也具有参考作用。

#### 3.1 软件主要功能

- (1) 适用于船舶轴系多种状态(坞上、水中、带桨与不带桨等)校中计算;
- (2) 直线校中计算;
- (3) 合理校中计算(热态、冷态等);
- (4) 安装状态校中计算;
- (5) 运行状态时考虑齿轮啮合力矩作用情况下的计算;
- (6) 合理校中最佳轴承变位计算;
- (7) 衡准判断;
- (8) 满足多种规范要求的校中计算内容(轴承反力影响系数计算; 计算轴系中各轴承的反力和比压, 各轴截面的挠度、转角、剪力和弯曲力矩, 各轴段的最大弯曲应力等; 给定轴承变位计算, 并确定轴系的施工工艺参数; 给定法兰开口偏移计算, 并确定轴系的施工工艺参数; 计算校中检验参数; 确定用顶举法检验轴系负荷时千斤顶的安装位置和顶举系数; 计算艏管后轴承支点转角的实际限值和艏管斜腔孔时的工艺参数; 计算运转状态下齿轮轴轴承动载荷的方向和大小);
- (9) 轴系综合强度校核计算;
- (10) 嵌入式多文件方式的报告输出(\*.doc、\*.txt、\*.html 等)。

#### 3.2 数据库系统设计

数据库设计以 Microsoft SQL2000 为数据库引擎, 实现数据查询、添加、更新、删除、索引、排序等基本数据库管理功能操作, 同时, 易于扩充, 满足轴系其他计算调用, 如扭振、纵振以及横振计算等。本系统数据库由主机参数、螺旋桨参数、齿轮箱参数、轴段结构参数、节点状态参数和图形等表所组成。

- (1) 主机参数: 型号、生产厂家、类型、冲程数、缸径、行程、额定功率、额定转速、平均有效压力等;
- (2) 螺旋桨参数: 型号、生产厂家、类型、直径、叶数、盘面比、螺距比、重量、径向惯量矩、极惯性矩、附

水系数、材料等;

(3) 齿轮箱参数:型号、生产厂家、速比、大齿轮重量、轴承允许比压等;

(4) 轴段结构参数:轴段各截面参数(如截面序号、轴段长度、内径、外径、均布载荷、集中载荷、附加弯矩等)、轴承位置、轴承参数(长度、刚度、允许比压);

(5) 节点状态参数:各截面处的挠度、转角、弯矩、支反力等;

(6) 图形:轴系简图、轴系弹性曲线图、弯矩图、法兰脱开图、应力图等。

3.3 流程图

流程见图 2。

4 计算实例

4.1 算例 1

算例 1 选自 NV5060 计算报告中,直线校中情况下计算所得的轴承支反力、轴承处的转角,以及负荷影响系数与本软件计算的结果比较(如表 1 和表 2 所示)。

表 1 轴承处转角轴承支反力与计算结果比较

序号	轴承变位	转 角		支反力	
		算例 1	本软件	算例 1	本软件
1	0.000	4.134E-04	4.1478E-04	895.8768	895.7486
2	0.000	-1.766E-04	-1.7717E-04	138.3662	138.2435
3	0.000	0.363E-04	0.3636E-04	619.8794	619.7233
4	0.000	-0.051E-04	-0.0514E-04	34.3196	34.3610

表 2 负荷影响系数与计算结果比较

轴承号	1		2	
	算例 1	本软件	算例 1	本软件
1	7.3892	7.3672	-17.2970	-17.2428
2	-17.2970	-17.2428	50.8424	50.6724
3	26.2934	26.2049	-122.5980	-122.1758
4	-16.3856	-16.3294	89.0526	88.7461

轴承号	2		4	
	算例 1	本软件	算例 1	本软件
1	26.2934	26.2049	-16.3856	-16.3294
2	-122.5980	-122.1758	89.0526	88.746
3	453.6028	452.0587	-357.3080	-356.0878
4	-357.3080	-356.0878	28.6410	283.6711

4.2 算例 2

算例 2 以中国船级社(CCS)的计算报告为例,比较轴承的支反力、转角以及千斤顶顶举系数,见表 3 和表 4。

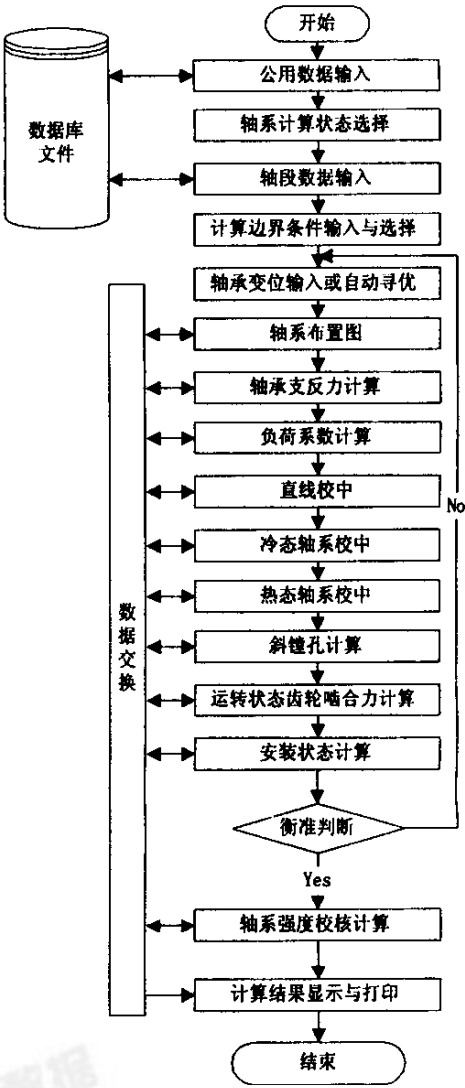


图 2 软件设计流程图

表 3 轴承处转角轴承支反力计算结果比较

序号	轴承变位	转 角		支反力	
		算例 2	本软件	算例 2	本软件
1	0.000	3.850E-04	3.846E-04	215.51	215.4814
2	0.000	-9.786E-04	-9.735E-05	60.65	60.5853
3	0.000	-7.144E-04	-7.280E-05	109.74	110.0465
4	-1.700	-4.848E-04	-4.849E-04	75.01	74.9664
5	-4.250	-1.760E-04	-1.762E-05	55.26	55.2250
6	-4.250	1.298E-04	1.299E-05	63.37	63.3979

表 4 千斤顶顶举系数计算结果比较

千斤顶序号	千斤顶位置	对应轴承序号	顶举系数	
			算例 2	本软件
1	22355	4	0.96	0.9881
2	28407	5	1.659	1.9477

4.3 算例 3

算例 3 以全国船舶标准化技术委员会指导性技术文件(CB\*/Z 338-84)《船舶推进轴系校中》中附例<sup>[5]</sup>为例,比较轴承的支反力及千斤顶顶举系数,见表 5 和表 6。

表 5 轴承的支反力计算结果比较

序号	轴承变位	转 角		支反力	
		算例 3	本软件	算例 3	本软件
1	0.000	0.2135E-03	0.2134E-03	173.1278	173.1470
2	0.000	-0.1560E-03	-0.1559E-03	47.8044	47.8697
3	-1.100	-0.3942E-03	-0.3942E-03	58.5815	58.6131
4	-2.200	-0.5353E-05	-0.5359E-05	-6.5043	-6.7302
5	-2.200	0.1464E-05	0.1465E-05	93.4753	93.6788
6	-2.200	-0.2407E-05	-0.2405E-05	68.1502	68.1515
7	-2.200	-0.1240E-05	-0.1236E-05	148.9159	148.9349
8	-2.200	0.7356E-05	0.7350E-05	44.2215	44.2294

表 6 千斤顶顶举系数计算结果比较

千斤顶序号	千斤顶位置	对应轴承序号	顶举系数	
			算例 3	本软件
1	6770.0	2	0.930	0.9297
2	9170.0	3	0.954	0.9541
3	13280.0	4	2.579	2.5785

上述六个表中的数据,是用国内外不同的软件,分别对三艘实船在不同状态(直线状态、冷态、热态)下进行校中计算的结果。从表 1、表 3、表 5 中轴承的

船舶压力推进

广西柳州市民生科技开发研究所工程师,经 20 多年潜心研究发明的“船舶压力推进”,实船试验证明,其概念、原理成立。采用这种推进方式,不需增加任何附加机构和设备,就能将船舶的前进、后退、左右回转融于一体。

该发明是继船舶螺旋桨推进和船舶喷水推进之后的,一项概念、原理全新,结构极为简单,对船舶的设计、建造、使用和营运有直接影响的新技术。这项技术的基本原理是,在船内建立和释放出具有一定压力、流量和流速的流体,连续作用于船艉外部水下,流体质量和环境压力构成一压力场,由压力场获得与其大小相等方向相反连续反作用力,形成对船的连续推进力;由操纵器改变作用力方向,实现船舶的前进、后退、左右回转。

该发明与船舶螺旋桨推进比较,没有了螺旋桨推进所必需的正倒车减速齿轮箱,没有了轴系,没有了螺旋桨,没有了舵系(舵、舵机及传动装置);与 1986 年 11 月 12 日申请,1989 年 4 月 26 日公开的发明“喷水推进组合体”比较,没有

转角和支反力的数据可以看出,用本软件计算的结果分别与 NV0560、CCS、CB\*/Z338—84 提供的结果是相一致的。表 2 中的轴承负荷影响系数也是基本吻合的。千斤顶顶举系数的计算结果与 CCS 提供的计算结果最大误差 3%,而与 CB\*/Z338—84 指导性文件提供的数据是完全一致的。综上所述,本软件计算的结果无论与国外软件计算提供的结果,还是国内提供的数据相比,都能很好地吻合,由本软件计算得到的数据,整体性能优良。

5 结论

通过分析与测试,作者使用改进的三弯矩方程所建立的校中计算模型,以及基于 VB6.0 设计的计算软件,功能完善,操作简便,适用于轴系的初步设计、校核设计以及修船中校中计算。

6 参考文献

1 魏海军.传递矩阵法在轴系校中计算中的应用.中国修船.1998,(6):14  
2 周继良,邹鸿钧,编著.船舶轴系校中原理及应用.北京:人民交通出版社,1985.  
3 徐士良.计算机常用算法.北京:清华大学出版社.1996.  
4 [美]Magrab E B,等著. Matlab 原理与工程应用.北京:电子工业出版社,2002.  
5 全国船舶标准化技术委员会指导性技术文件(CB\*/Z338—84).船舶推进轴系校中.1984.

舰喷水泵出口后面的舵叶和舵壳可以转动的舵装置。

整个船舶压力推进系统,全由标准化、系列化组件组成,安装在舱内,船外看不到任何与水接触的悬挂物。压力推进适用于螺旋桨能推进的水面和水下大小船艇(大到万吨级以上,小到 0.5 吨级以下),深浅宽窄航道(0.3~100m 水深,不小于一个船长的任何宽度)。对螺旋桨推进的常规潜艇和核潜艇将是一个比较理想的推进方式。

采用该技术推进的船舶,起航、停航、前进、后退、左右回转、加速、减速全由操纵器操纵,无需改变力机的工况。航行时,尾流无波无浪,前进和后退一样能够原地迅速左右回转调头,并能无级变速。无惯性滑动,要走即走,要停即停。操纵简单、省力、方便灵活。整个推进系统维护修理无需上船台,无需进船坞。目前,照搬原理试验结果,即可开发游船、渡船、渔船、交通船、防洪船、环保船等。

该发明已申请中国发明专利。  
申请号:98118259.3,公开号:CN1249259A。  
若想知进一步情况,可通过电话 0722—3128963 联系。

[程尚光]