

ORCA 海洋综合导航定位系统 测线设计与实现

曾凡祥^{1,2}, 彭朝旭^{1,2}, 易 锋^{1,2}

(1 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760; 2 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510760)

摘 要: ORCA 导航定位系统是目前海洋多道地震勘探中应用最为广泛的导航系统, 但并未集成测线设计功能, 需特有的坐标文件才能导入测线信息。对测线设计所用的数学模型进行研究与实现, 结果表明, 所开发的软件能完全满足 ORCA 导航定位系统的需要。

关键词: 导航定位; 海洋勘探; 坐标转换; UTM 投影; 大地线

中图分类号: P229.5

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2015.11009

海洋高分辨率多道地震探测技术是我国海洋油气开发、海洋资源普查、海洋工程建设地质环境评价调查中最为重要的手段之一。而 ORCA 导航系统作为美国 ION 公司生产的 SPECTRA 系统的升级版, 是目前国际海洋多道地震勘探中应用最为广泛、技术最为成熟可靠的导航系统。但相对于其他海洋勘探综合导航系统, ION 公司并未在 ORCA 导航系统中设计相应的测线设计模块, 如不高价购买 ION 公司生产的专用测线设计软件, 就无法正常作业, 不能进行相应的海洋勘探活动。

为满足 ORCA 导航系统的要求, 本文通过探讨 ORCA 测线坐标文件的格式, 深入研究测线设计所需数学模型, 选择了合适算法实现测线设计功能, 通过与其他导航系统的比较、野外调查项目的顺利开展, 证实了所开发的软件能吻合 ORCA 测线坐标文件的所有要求, 满足 ORCA 导航系统海洋多道地震勘探的需要, 具有很强的实用意义。

1 数学模型

ORCA 导航系统所需要的测线坐标文件为 P190 格式^[1], P190 格式对每一字符的意义均做了严格规定。坐标文件中不可缺少的信息包括线头和线尾的大地坐标、投影后的平面直角坐标、首炮炮号、尾炮炮号。对于不同形式的坐标信息, 欲同时获得大地坐标与投影后的平面直角坐标, 需进行坐标转换, 进行投影坐标的正算或反算^[2,3]。同时, 由于海洋多道地震作业常采用的导航方式有大圆导航与格网导航 2 种, 其测线长度也是不一致的, 这就需要采用不同的算法对测线长度进行计算, 进行大地主题反算或几何距离解算。

1.1 UTM 投影坐标正算

我国海洋多道地震勘探作业中, 大多采用 UTM 投影, 极少使用其他投影方式, 故本文仅对 UTM 投影方式进行研究, 详细论述 UTM 投影下大地坐标与平面直角坐标的相互转换。

从几何意义上讲, UTM 投影属于横轴等角割圆柱投影, 它的投影条件是中央子午线投影长度比不等于 1 而是等于 0.999 6, 投影后 2 条割线上没有变形。勘探作业中, 如采用 UTM 投影、

收稿日期: 2015-01-23

基金项目: 中国地质调查局项目 (GZH201400508-01)

作者简介: 曾凡祥 (1981—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋测绘与工程测量方面的研究工作。E-mail: fanxiang510@163.com

施工设计所提供的坐标为大地坐标(大地纬度 B , 大地经度 L),则需要计算出 UTM 投影下的平面直角坐标,供 P190 测线文件使用。将大地坐标转换为 UTM 投影平面坐标的计算方式即称为 UTM 投影坐标正算。转换公式基于参考椭球体:

$$x = 0.999\ 6\{M + N \tan B [\frac{A^2}{2} + (5 - T + 9C + 4C^2) \frac{A^4}{24}] + (61 + 58T + T^2 + 600C - 330e'^2) \frac{A^6}{720}\} \quad (1)$$

$$y = 0.999\ 6N[A + (1 - T + C) \frac{A^3}{6} + (5 - 18T + T^2 + 72C - 58e'^2) \frac{A^5}{120}] \quad (2)$$

$$T = \tan^2 B; C = e'^2 \cos^2 B; A = (L - L_0) \cos B;$$

$$M = a[(1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256})B - (\frac{3e^2}{8} + \frac{3e^4}{32} + \frac{45e^6}{1024})\sin(2B) + (\frac{15e^4}{256} + \frac{45e^6}{1024})\sin(4B) - \frac{35e^6}{3072}\sin(6B)];$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} \quad (3)$$

式中: a 为椭球体长半轴;

b 为椭球体短半轴;

e 为第 1 偏心率;

e' 为第 2 偏心率;

N 为卯酉圈曲率半径;

R 为子午圈曲率半径;

L_0 为中央子午线;

x 为北坐标;

y 为东坐标。

1.2 UTM 投影坐标反算

当施工设计书仅提供 UTM 投影下的平面直角坐标,或项目方仅提供了 UTM 投影下的 CAD 测线文件,可根据 CAD 文件读取平面直角坐标。这就需要根据参考椭球及 UTM 投影参数进行坐标反算,根据东坐标、北坐标计算出大地纬度 B

和大地经度 L 。UTM 投影坐标反算公式可依以下方式进行计算:

$$B = B_f - \frac{N_f \tan(B_f)}{R_f} [\frac{D^2}{2} - (5 + 3T_f + 10C_f - 4C_f^2 - 9e'^2) \frac{D^4}{24} + (61 + 90T_f + 298C_f + 45T_f^2 - 25e'^2 - 3C_f^2) \frac{D^6}{720}] \quad (4)$$

$$L = L_0 + \frac{1}{\cos(B_f)} [D - (1 + 2T_f + C_f) \frac{D^3}{6} + (5 - 2C_f + 28T_f - 3C_f^2 + 8e'^2 + 24T_f^2) \frac{D^5}{120}] \quad (5)$$

$$\text{式中: } N_f = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(B_f)}};$$

$$R_f = \frac{a(1 - e^2)}{[1 - e^2 \sin^2(B_f)]^{3/2}};$$

$$B_f = \varphi + (\frac{3e_1}{2} - \frac{27e_1^3}{32})\sin(2\varphi) + (\frac{21e_1^2}{16} - \frac{55e_1^4}{32})\sin(4\varphi) + (\frac{151e_1^3}{96})\sin(6\varphi);$$

$$e_1 = \frac{1 - b/a}{1 + b/a}; \varphi = \frac{x/0.9996}{a(1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256})};$$

$$T_f = \tan^2(B_f); C_f = e'^2 \cos^2(B_f);$$

$$D = \frac{y}{0.999\ 6N_f}$$

1.3 大地主题反算

为求得作业测线准确的尾炮炮号,必须先求出测线的长度。然后计算测线的总炮号数,进而计算尾炮炮号。如果测线较短,一般采用格网(Grid)方式导航,可直接采用两点的平面直角坐标计算直线距离,从而计算出测线的长度与尾炮炮号;如果测线较长,一般采用大圆(Great Circle)方式导航,此时若要求出尾炮炮号,需先进行大地主题反算得出两点间的大地线长度。

大地测量学中把在椭球面上解算点的大地坐标和点间的边长、方位角这一类大地测量学的基本问题称为大地测量主题解算。而当已知两点的大地经纬度,计算两点间的大地线长度及其两端的大地方位角,称为大地主题反算,为大地主题解算的一种。

常用的大地主题解算方法有勒让德级数式、

白塞尔法大地主题解算和高斯平均引数法, 基于高斯平均引数是大地主题解算中的一种经典算法, 具有公式简单, 收敛快, 精度高, 无需迭代的优点^[4-5]。本文采用高斯平均引数反算公式来计算大地线的长度与平均方位角。

由高斯平均引数正算公式可知:

$$\Delta B'' = (B_2 - B_1)'' = \frac{V_m^2}{N_m} \rho'' \cdot \cos A_m \{1 + \frac{S^2}{24N_m^2} [\sin^2 A_m (2 + 3t_m^2 + 2\eta_m^2) + 3\eta_m^2 \cos^2 A_m (-1 + t_m^2 - \eta_m^2 - 4t_m^2 \eta_m^2)]\} + 5 \text{ 次项} \quad (6)$$

$$\Delta L'' = (L_2 - L_1)'' = \frac{\rho''}{N_m} S \cdot \sec B_m \sin A_m \{1 + \frac{S^2}{24N_m^2} [\sin^2 A_m \cdot t_m^2 - \cos^2 A_m (1 + \eta_m^2 - 9t_m^2 \eta_m^2)]\} + 5 \text{ 次项} \quad (7)$$

$$\Delta A'' = (A_{21} - A_{12})'' = \frac{\rho''}{N_m} S \cdot \sin A_m t_m \{1 + \frac{S^2}{24N_m^2} [\cos^2 A_m (2 + 7\eta_m^2 + 9t_m^2 \eta_m^2 + 5\eta_m^4) + \sin^2 A_m (2 + t_m^2 + 2\eta_m^2)]\} + 5 \text{ 次项} \quad (8)$$

由于大地主题反算中两端点的大地经、纬度坐标已知, 未知数为两点间的大地线长度及正、反方位角 A_{12} 和 A_{21} 。这时, 由于经差 $\Delta L''$ 和纬度差 $\Delta B''$ 及平均纬度 B_m 均为已知, 由(6)、(7)两式分别移项, 经整理可得

$$S \cdot \sin A_m = \frac{\Delta L''}{\rho''} N_m \cos B_m - \frac{S \cdot \sin A_m}{24N_m^2} [S^2 t_m^2 \sin^2 A_m + S^2 \cos^2 A_m (1 + \eta_m^2 - 9t_m^2 \eta_m^2)] \quad (9)$$

$$S \cdot \cos A_m = \frac{\Delta B''}{\rho''} \frac{N_m}{V_m^2} - \frac{S \cdot \cos A_m}{24N_m^2} [S^2 \sin^2 A_m (2 + 3t_m^2 + 2\eta_m^2) - 3\eta_m^2 \cos^2 A_m (-1 + t_m^2 - \eta_m^2 - 4t_m^2 \eta_m^2)] \quad (10)$$

上式右端第 2 项含有 $S \cdot \sin A_m$ 和 $S \cdot \cos A_m$, 它们可用其主式代换, 即有

$$S \cdot \sin A_m = \frac{\Delta L''}{\rho''} N_m \cos B_m,$$

$$S \cdot \cos A_m = \frac{\Delta B''}{\rho''} \frac{N_m}{V_m^2} \quad (11)$$

将上式代入前两式, 并按 ΔL 和 ΔB 集项, 得

$$\left. \begin{aligned} S \cdot \sin A_m &= r_{01} \Delta L'' + r_{21} \Delta B''^2 \Delta L'' + r_{03} \Delta L''^3 \\ S \cdot \cos A_m &= S_{10} \Delta B'' + S_{12} \Delta B'' \Delta L''^2 + S_{30} \Delta B''^3 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中各系数:

$$\left. \begin{aligned} r_{01} &= \frac{N_m}{\rho''} \cos B_m, \\ r_{21} &= \frac{N_m}{24\rho''^3} \cos B_m (1 - \eta_m^2 - 9t_m^2 \eta_m^2), \\ r_{03} &= \frac{N_m}{24\rho''^3} \cos^3 B_m t_m^2 \\ S_{10} &= \frac{N_m}{\rho'' V_m^2}, \\ S_{12} &= \frac{N_m}{24\rho''^3} (-2 - 3t_m^2 + 3t_m^2 \eta_m^2), \\ S_{30} &= \frac{N_m}{8\rho''^3} (\eta_m^2 - t_m^2 \eta_m^2) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

将(12)、(13)式一并代入(8)式, 经整理得到

$$\Delta A'' = t_{01} \Delta L'' + t_{21} \Delta B''^2 \Delta L'' + t_{03} L''^3 \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} t_{01} &= t_m \cos B_m, \\ t_{21} &= \frac{1}{24\rho''^2} \cos B_m t_m (3 + 2\eta_m^2 - 2\eta_m^4) \\ t_{03} &= \frac{1}{12\rho''^2} \cos^3 B_m t_m (1 + \eta_m^2) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

求出 $S \cdot \sin A_m$, $S \cdot \cos A_m$ 及 $\Delta A''$ 后, 按下式计算大地线长度 S 及正、反方位角 A_{12} , A_{21}

$$\left. \begin{aligned} \tan A_m &= \frac{S \cdot \sin A_m}{S \cdot \cos A_m} \\ \text{由此求出 } A_m \text{ 后, 进而再求} \\ S &= \frac{S \cdot \sin A_m}{\sin A_m} = \frac{S \cdot \cos A_m}{\cos A_m} \\ A_{12} &= A_m - \frac{1}{2} \Delta A'', \\ A_{21} &= A_m + \frac{1}{2} \Delta A'' \pm 180^\circ \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

上述公式与高斯正算公式一样, 保证了四次项的精度, 在 200 km 内可达到厘米级的精度, 完全能满足 ORCA 导航定位系统炮号设置的精度要求。

为判断方位角 A_m 所处的象限, 设 $b = B_2 - B_1$, $l = L_2 - L_1$, 先按下式求出

$$T = \begin{cases} \arctan \left| \frac{S \cdot \sin A_m}{S \cdot \cos A_m} \right|, & \text{当 } |b| \geq |l| \\ \frac{\pi}{4} + \arctan \left| \frac{1-c}{1+c} \right|, & \text{当 } |b| \leq |l| \end{cases}$$

$$c = \left| \frac{S \cdot \cos A_m}{S \cdot \sin A_m} \right|$$

所以

$$A_m = \begin{cases} T & \text{当 } b > 0, l \geq 0 \\ \pi - T & \text{当 } b < 0, l \geq 0 \\ \pi + T & \text{当 } b \leq 0, l < 0 \\ 2\pi - T & \text{当 } b > 0, l < 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{当 } b = 0, l > 0 \end{cases}$$

2 程序设计与实现

笔者使用 Visual C++ 2005 开发工具设计制作了测线计算的程序。程序实现的流程图如图 1 所示。

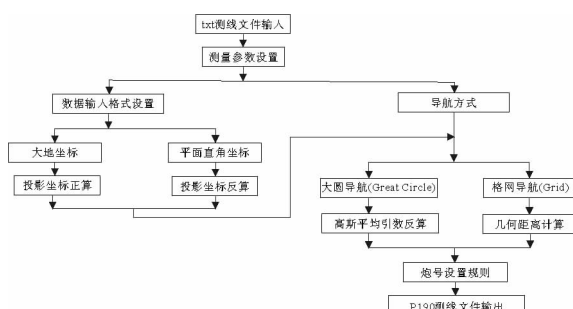


图 1 ORCA 测线设计流程

Fig. 1 Flow chart of ORCA survey line design

具体实现过程如下:

(1) 将编辑好的 txt 测线坐标文件输入软件中。

(2) 设置坐标系、投影等测量参数(图 2)。根据海洋勘察中常用的坐标系分为:WGS-84、国家 1980 坐标系、国家 2000 坐标系;因海洋调查中常用的投影方式较少,仅编写了 UTM 投影与高斯-克吕格投影。

(3) 数据输入格式的设置(图 3)。因项目方提供的坐标的格式并不统一,为减少导航作业人员的工作量,程序可采用多种数据输入方式。

(4) 炮号设置规则设定。一般海洋多道地震勘查均有导航方式、炮号设置的要求如图 4 所示。



图 2 测量参数

Fig. 2 Geodetic parameters



图 3 坐标格式设置

Fig. 3 Settings of coordination format

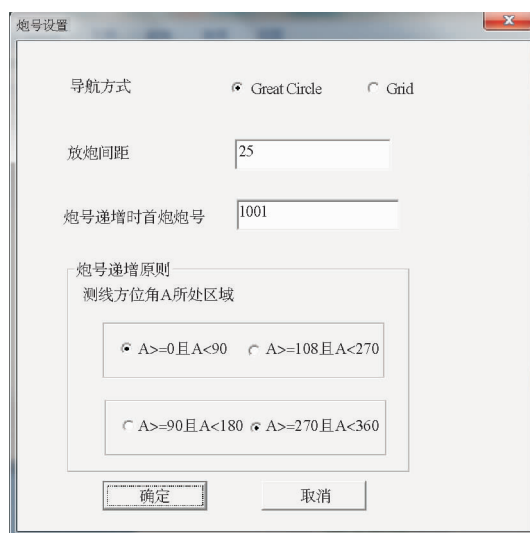


图 4 导航方式、炮号设置

Fig. 4 Navigation mode and settings of shot number

(5) 在完成测线坐标输入、测量参数选择、输入坐标格式设置、炮号规则设定后程序进行投影

坐标的正算或反算、高斯平均引数反算或几何距离计算、计算首/尾炮号,然后按照 P190 的测线格式进行数据输出,以供 ORCA 导航系统测线输入用。以下数据是经程序运行后输出的 P190 数据文件内容:

```
H2600 01 Vessel Id          1
H2600 02 Preplot Dimension   2
H2600 03 SHOOTING POINT    0  0.0000
                                0.0000
StestLine1  1  1001170804. 27N1105029.
30E0483137. 91894443. 1
StestLine1  1  3802173124. 61N1101918.
```

82E0428022. 31937597. 2

为检验程序计算结果的可靠性,将程序的运行结果与其他海洋勘探导航系统:SERCEL 公司的 SEAPRO NAV 综合导航系统、Hypack 导航系统的计算结果进行比较,结果如下:

1. 输入坐标为大地坐标(线头:19°10′24.64″N,117°25′19.19″E;线尾:18°26′08.82″N,117°50′47.59″E),采用 WGS—84 坐标系、UTM 投影,中央经线为 117°、大圆导航方式、方位角递增方位为 90°~180°与 180°~270°,结果见表 1。

2. 当导航方式选择格网导航,其他条件与 1 相同,计算结果见表 2。

表 1 自制程序与其他导航系统计算结果的比较

Table 1 Comparison of calculation results between authors-made program and other navigation systems

数据项 软件名称	直角坐标		炮号	备注
	北坐标/m	东坐标/m		
自制程序	2 120 079.92	544 369.2	1001	线头
	2 038 608.9	589 398.2	3485	线尾
SEAPRO NAV 导航系统	2 120 079.92	544 369.24	1001	线头
	2 038 608.88	589 398.21	3485	线尾
Hypack 导航系统	2 120 079.92	544 369.24	/	线头
	2 038 608.88	589 398.21	/	线尾

3. 当输入的坐标为投影平面坐标(线头:北坐标 2 120 079.92 m,东坐标 544 369.24 m;线尾:北坐标 2 038 608.88 m,东坐标 589 398.21 m),其他设置与 1 同时,比较结果:

从表 1 可以看出,当输入值为大地坐标时,程序计算得出的投影平面坐标与 SEAPRONAV、Hypack 导航系统得出的结果相同,说明了 UTM 投影坐标正算计算的正确性;从表 1、表 2 分析线

头/线尾的炮号,可以得出,不管采用大圆导航还是格网导航方式,程序计算的炮号与 SEAPRO NAV 导航系统计算得出的结果一致,说明了程序所采用的大地主题解算算法可靠性,可用于确定线尾的炮号。从表 3 的计算结果可得出,当输入数据位投影平面坐标时,程序计算得出的大地坐标与其他导航系统运算的结果一致,说明了 UTM 投影坐标反算公式的正确性。

表 2 自制程序与其他导航系统计算结果的比较

Table 2 Comparison of calculation results between the authors-made program and other navigation system

数据项 软件名称	直角坐标		炮号	备注
	北坐标/m	东坐标/m		
自制程序	2 120 079.92	544 369.2	1001	线头
	2 038 608.9	589 398.2	3484	线尾
SEAPRO NAV 导航系统	2 120 079.92	544 369.24	1001	线头
	2 038 608.88	589 398.21	3484	线尾

表 3 自制程序与其他导航系统计算结果的比较

Table 3 Comparison of calculation results between the author—made program and other navigation systems

数据项 软件名称	直角坐标		炮号	备注
	纬度 (ddmmss. ss)	经度 (dddmmss. ss)		
自制程序	191024. 64	1172519. 19	1001	线头
	182608. 82	1175047. 59	3485	线尾
SEAPRO NAV 导航系统	191024. 64	1172519. 19	1001	线头
	182608. 82	1175047. 59	3485	线尾
Hypack 导航系统	191024. 6401	1172519. 1900	/	线头
	182608. 8201	1175047. 5902	/	线尾

2014 年该软件成功应用于多个油气资源调查、资源普查等项目的多道地震勘查,实际应用表明,程序所计算得出并输出的测线坐标文件能完全满足 ORCA 综合导航定位系统的需要,坐标数据正确、可靠。

3 结论

(1) 本文设计的测线设计软件能完全满足 ORCA 综合导航系统的需要,无需高价从 ION 公司购买专门的软件,可节省大量资金,具有很强的实用意义。

(2) 可采用相应的投影坐标正算/反算模型与高斯引数公式进行测线设计所需数据的计算,计算结果可靠;与多套导航系统的比较结果表明,自行编制的软件计算结果与其他导航系统一致,结果无误,适用于 ORCA 综合导航系统多道地震勘探作业。

(3) 论文提供的算法及思路亦可用于增强测线设计功能,增加平移、延长、辐射等功能并输出至 P190 文件中,提高测线设计工作效率,减小出错率。

参考文献:

[1] ION Concept Systems. ORCA Preplot Formats [OL]. [2012-05-21]. <http://www.csl.co.uk>.

[2] 孔祥元,郭际明,刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2010.

[3] OGP Publication. Geomatics Guidance Note Number 7, part 2. Coordinate Conversions and Transformations including Formulass (Map Projections and Their Coordinate Conversion Formulass) [OL]. [2012-06-10]. <http://www.epsg.org/>.

[4] 周振宇,郭广礼,贾新果. 大地主题解算方法综述[J]. 测绘科学,2007,32(4):190-191.

[5] 尹文亭,徐昌荣. 基于 C# 的嵌套系数法大地主题反解研究[J]. 江西理工大学学报,2013,34(1):55-58.

SURVEY LINE DESIGN AND REALIZATION FOR ORCA INTEGRATED MARINE NAVIGATION AND POSITIONING SYSTEM

ZENG Fanxiang, PENG Chaoxu, YI Feng

(1 GuangZhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510760, China;

2 Key Laboratory of Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, GuangZhou 510760,China)

Abstract: The ORCA navigation and positioning system is the most widely used navigation system in marine multichannel seismic survey at present. However, it does not have the function of integrated survey line design. It needs some sort of special coordination file to import line imformation. We proposed a mathematical model in this paper for survey line design. Results show that the software developed may perfectly meet the needs of the ORCA navigation and positioning system.

Key words: navigation and positioning; marine exploratiion; coordinate transformation; UTM Projection; geodetic line