WAFS BUFR 航空数据的解码及可视化研究

欧壮杰

(民航中南空管局通信网络管理中心，广州，510405)

摘要

本文简要地介绍了 BUFR 数据的格式特点，对 WAFS BUFR 航空数据的引入原由做了分析；对 BUFR 文件格式、描述符及码表进行了详细的解剖，给出了解码公式和解码描述符例子。本文还通过解码后的数据，进行可视化的探讨研究，给出了 BUFR 数据可视化的内容，包括底图投影、曲线生成、图形缩放编辑的方法、公式和实现程序。本文对 BUFR 数据的解码及可视化工作有着十分重要的参考价值。

关键词： BUFR，解码，描述符，码表，可视化，地球投影，平滑曲线

1 BUFR 数据格式简介

BUFR 是 Binary Universal Form for the Representation of meteorological data 的缩写，即描述气象数据的二进制统一格式。BUFR 最早于 1988 年开始应用于描述数据，那时，BUFR 数据格式应用于卫星、航空器、风洞和热带气旋的观测。2002 年，WMO(世界气象组织)发布了 FM94 BUFR 数据格式指导文档，对 BUFR 数据的格式、编码/解码方法做了详细的描述。此后，大量的气象数据采用 BUFR 格式来描述、存储和交换。BUFR 是 WMO 用于描述和交换观测数据的唯一推荐编码格式，被建议在现在或未来的 WMO 应用上使用。

BUFR 是一种描述表驱动的编码格式，其特点是：

- BUFR 是一种自描述的数据格式，自描述是指在 BUFR 信息中的格式和数据的内容就是由 BUFR 信息自己来描述。
- BUFR 采用描述符和码表相结合的方式来描述数据，描述符由公用描述符和扩充描述符组成，便于 BUFR 信息的扩充。
- BUFR 数据由二进制组成，信息项所占位数(bits)可不相同。

- BUFR 采用描述符重复循环的方式来用尽量少的节字数描述尽量多的内容。

2 BUFR 格式引入航空气象中

2.1 WAFS 简介

WAFS（World Area Forecast System）即世界区域预报系统。它是一套由国际民航组织(ICAO)认可的国际航空气象业务系统。全球有两大世界区域预报中心（WAFC）建立了 WAFS 系统，它们分别是伦敦中心和华盛顿中心的 WAFS 系统，两个系统互为备份。

现在北京、上海和广州安装了 WAFS 系统，其接收的世界区域预报产品为国内的民航飞行提供了强有力的气象保障，在国际航线上的航班飞行，这些产品更是唯一的、必不可少的飞行气象保障资料。

2.2 WAFS 中引入 BUFR 格式

2.2.1 T4 格式的局限

T4 是 G3 传真机采用的图像格式，采用 CCITT 建议的改进霍夫曼码编码(MH)方案进行压缩。由于传真图为二像素(黑和白)位图格式，采用 MH 算法压缩后，传输量十分小，因此早期的气象无线传真广播系统普遍采用 T4 格式来传输图形。

WAFS 原来也采用 T4 格式来保存和广播航路重要天气预告图，但 T4 格式存在无法编辑、打印与发布效果差、传输变形等诸多局限。

2.2.2 WAFS 引入 BUFR 格式

由于 T4 格式存在种种的局限，因此，WAFC 开始试验采用 BUFR 格式来保存和交换航空气象图形，也就是开展航空气象图形的数字化、矢量化工作。WAFS 伦敦中心分别于 2001 年和 2002 年完成了高空、中空重要天气预告图的 BUFR 码化。WAFS 的 BUFR 格式现已发展到 3.0 版本，原来的 T4 格式也已被淘汰使用。

2.2.3 BUFR 格式的优点

BUFR 格式相对于 T4 格式而言，有其特定的优势：

- 资料传输量缩减为原所有 T4 图的一半，各文件之间没有重复交叉的内容。
- 用户可以根据需要，选择自己感兴趣的区域，定做重要天气预告图，或选特定航线供飞行计划之用。
- 可以实现矢量打印，可以对图中的气象元素进行编辑。
- 可以实现彩色图表显示，上网效果较好。

但是，使用 BUFR 数据的条件比较高，收到 BUFR 数据后必须对数据进行解码，然后必须编写专门的图形软件进行可视化处理，这也是本文要探讨的重点。

3 WAFS BUFR 数据的解码

3.1 WAFS BUFR 数据文件

WAFS BUFR 数据文件包含的内容是全球范围的航路重要天气的元素，WAFS 一天发布四个时次，每一时次有 11 个文件，每一个文件包括一到几种气象元素。这些文件包含了高层(SWH)和中层(SWM)的重要天气预告图的内容。

3.2 WAFS BUFR 文件格式

WAFS BUFR 文件和通用的 BUFR 文件格式是一样的，由六个部分组成，如下表所示：

部分序号	部分名字	内容
0	指示部分	“BUFR”标识，信息长度和版本号
1	信息头	数据时间、发布中心等
2	可选部分	数据处理中心的局地化信息
3	数据描述部分	数据描述符 F + X + Y
4	数据部分	真正的数据
5	结束标记	“7777”ASCII 码

WAFS BUFR 文件没有可选部分的内容。其它每一部分由一连串的字节构成 ，每一单独部分总是由偶数字节组成，需要时将补上 0 值来凑上偶数字节。任何一个 BUFR 文件最少应包括 46 个字节。

数据描述和数据部分可以包括多种气象图形元素，使用顺序方式依次存放。

3.3 数据描述符

能够理解数据描述符概念，也就基本上能够理解 BUFR 数据的存放格式。BUFR 信息是一种自描述的信息，其数据项的内容由数据描述符来描述。描述符部分和数据部分是分开的，但描述符会和数据相对应。

一个描述符总共占两个字节，分为三个部分，如表 1 所示：

表 1 FXY 描述符

F	X	Y
2 BITS	6 BITS	8 BITS

F 表示描述符本身的内容，当 F 为表入口时，会到相应的表去检索，查出本描述符所描述的数据内容。描述符的 X 部分表示航空气象所有可能的类别，如温度、风等参数，而 Y 部分则是 X 部分参数的入口值，可以理解为子类型。

3.4 码表

码表由描述符和其所对应用的参数组成。在 WMO FM94 BUFR 文档中，码表分为多个表，可由描述符的 F 部分来定位哪一个表，但在进行 WAFS BUFR 的解码时，我们把所有重要天气预告图要用到的码表的条目集中在一个表中，这样做的好处是表中的所有项都有用，加快了描述符的定位。表 2 为码表部分条目示例：

表 2 码表部分条目

FXY	单位	比例因子	参考值	数据宽度(bit)	说明

031001	数值	0	0	8	有多少个描述符将被复制
001031	码表	0	0	16	发布中心代码
001022	CCITTIA5	0	0	224	天气现象名字
004001	年	0	0	12	时间：年
005002	度	2	-9000	15	粗精度纬度，负数为南半球
008011	码表	0	0	6	气象特征：颠簸
019006	米/S	2	0	14	移速

下面为一个 WAFS BUFR 的重要云区元素的描述符组成：

112000　F=1,重复标志;X=12,表示接下来有 12 个描述符被循环，外框重复

031001　重复次数,从数据区获,得即是有多少个云区

008011　　外框开始重复数据,气象特征,12:CLOUD

008007　　空间(维数)指示码 1: LINE

007002　　云底高

007002　　云顶高

102000　　F=1,重复标志;X=02,接下来有 02 个描述符被循环，内框重复

031001　　重复次数,从数据区获得,即是云区的点数

005002　　内框开始重复数据　纬度

006002　　内框结束重复数据　经度

020008　　云散程序

020012　　云类型,如 CB 等

008007

008011　　外框结束重复数据

3.5 解码

BUFR 数据的解码由描述符、码表和取出的数据共同完成，在描述符部分取出一个描述

符，比如取出的 FXY 为 005002，到码表中定位 005002，根据表 2 可知这是个粗精度纬度，根据数据的宽度 15,在数据部分取出 15 位(bit)的数值(Value),然后根据比例因子(Scale)、参考值(Ref)算出真实的数值(Real Value)。计算公式如下：

Real Value = (Value + Ref) / Power(10, Scale)

在这里 Power 为幂运算，假设在数值部分(15bits)取出的值为 12140，则真实的值：

Real Value = (12140 + (-9000)) / Power(10, 2) = 31.4

得出北纬 31.4 度的真实值。

4 WAFS BUFR 数据的可视化

4.1 可视化的基本功能

WAFS BUFR 数据的可视化，也即是要把 WAFS BUFR 数据转换为航路重要天气图的图表，是一项非常复杂、艰巨的工程，它涉及航空气象、GIS 学科、计算图形学以及软件工程等诸多知识。

我们经过多年潜心研究，WAFS BUFR 数据的可视化功能已基本上实现。

其主要功能必须包括：

- BUFR 重要天气预告图底图，包括 Mercator、Lambert 和极射赤面三种投影的底图定义，范围选取和底图其它格式定制。
- 将解码出来的数据按气象元素的格式转换为可视图形画到底图上，这是 BUFR 可视化必有的基本功能。
- 可对气象元素进行编辑操作。
- 可以自动以位图格式输出，也可以按矢量方式打印输出图形。

可视化后重要天气预告图的样式如图 1 所示：

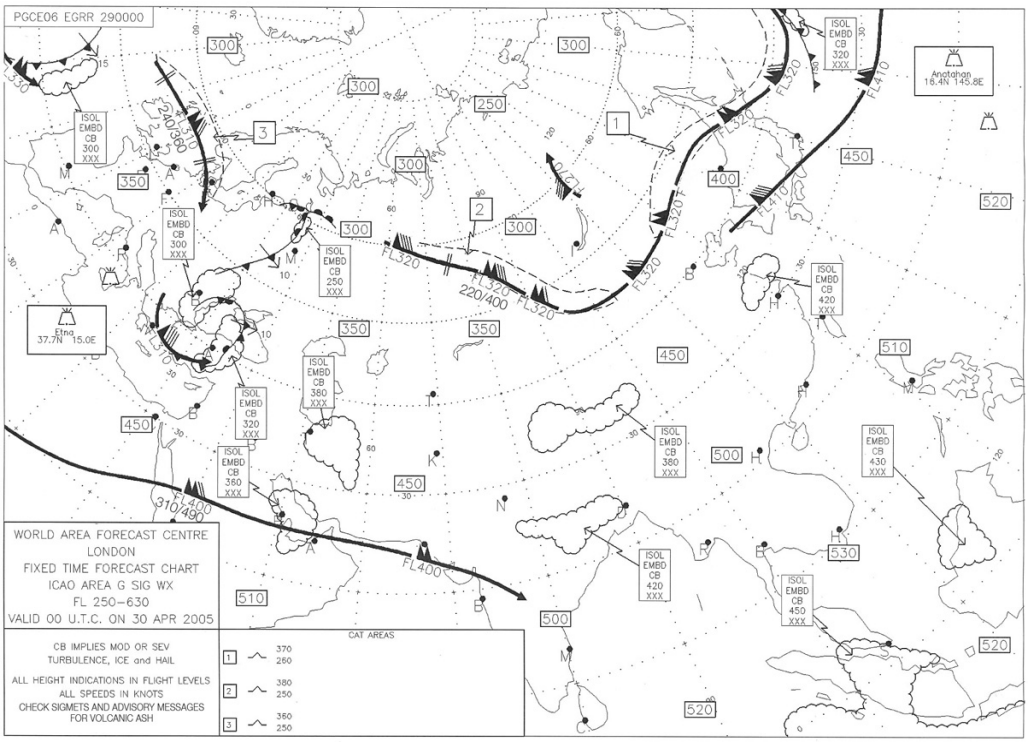

图 1 BUFR 数据可视化图形

4.2 底图地球投影的生成

底图的地球投影，就是地球椭圆球坐标系和平面坐标系的相互转换。为和国外制作的图形相一致，WAFS BUFR 的底图以 WGS-84 坐标系为基准面。本文仅介绍 Mercator 投影，其它投影请参考列出的文献。

Mercator 投影是一种“等角正轴圆柱投影”，Mercator 投影没有角度变形，由每一点向各方向的长度比相等，它的经纬线都是平行直线，且相交成直角，经线间隔相等，纬线间隔从标准纬线向两极逐渐增大。所以纬度越高，变形越大，只适合于制作中低纬度的底图。

下面给出 Mercator 投影的正反解公式：

正解公式：(B,L）→(X,Y)，标准纬度 B0，原点纬度 0，原点经度 L0：

$$X_N = K\ln[tg(\frac{\pi}{4}+\frac{B}{2})*(\frac{1-e\sin B}{1+e\sin B})^{\frac{e}{2}}]$$

$$Y_E = K(L-L0)$$

$$K = N_{B0} * \cos(B0) = \frac{a^2 / b}{\sqrt{1 + e'^2 * \cos^2(B0)}} * \cos(B0)$$

反解公式：(X,Y) →（B,L)，标准纬度 B0，原点纬度 0，原点经度 L0(图 3 所示)。

$$B = \frac{\pi}{2} - 2arctg(EXP^{(-\frac{X_N}{K})} * EXP^{(\frac{e}{2})\ln(\frac{1-e\sin B}{1+e\sin B})})$$

$$L = \frac{Y_E}{K} + L0$$

在公式中，*EXP* 为自然对数底数，*e* 为地球偏心率，*a*、*b* 为地球椭球长、短半轴长，N_{B0} 为在标准纬度 *B0* 处的卯酉圈曲率半径，*e'* 为地球第二偏心率。反解公式中，*B* 的计算通过迭代算法，可以很快收敛。

根据正解公式，给出 Mercator 投影的标准纬度、原始经度，读出全球海岸线的纬度、经度，则可算出在底图范围内的海岸线每一点的 XY 坐标，再经过平移和缩小，画在底图上，再画上经纬线和标注，底图就生成了。

4.3 BUFR 气象要素可视化及编辑

根据 BUFR 数据解码出来的经纬度及其它气象元素，通过投影坐标变换和计算机图形学的方法，将其绘制到底图上，这就是可视化；绘制出的气象图形还应可通过人工操作的方式进行编辑。下面探讨几个关键的技术。

4.3.1 平滑曲线的实现

平滑曲线是绘制锋面、急流轴等线型天气系统的关键技术。平滑曲线必须通过给定的点，插值加入其它的点，是光滑无拐点的线型。好的算法必须有较高的计算效率，而且改变一个点位置时，不会对其它的点之间的线段造成较大的影响。

4.3.1.1 Akima 算法

Akima 算法是一种 5 点平滑二次多项式插值算法，可以由前面的点追到下一个点。而点与点之间通过插值的方式得出其它点，再通过连线实现平滑。当插值步长过于大时，曲线无法光顺，当插值步长过小时，造成计算量增大，而且步长过小时，反而会出现曲线粗糙现象。

因此，必须根据线长，动态调整插值步长。

Akima 的追踪算法，十分适合于线中间要插入其它符号的急流轴绘制，当追踪到某位置时，可先画出其它气象符号，比如风标符号，再接着跳过符号画出余下部分。图 2 为通过四个关键点，采用 Akima 算法画出急流轴，并加入风标的例子。

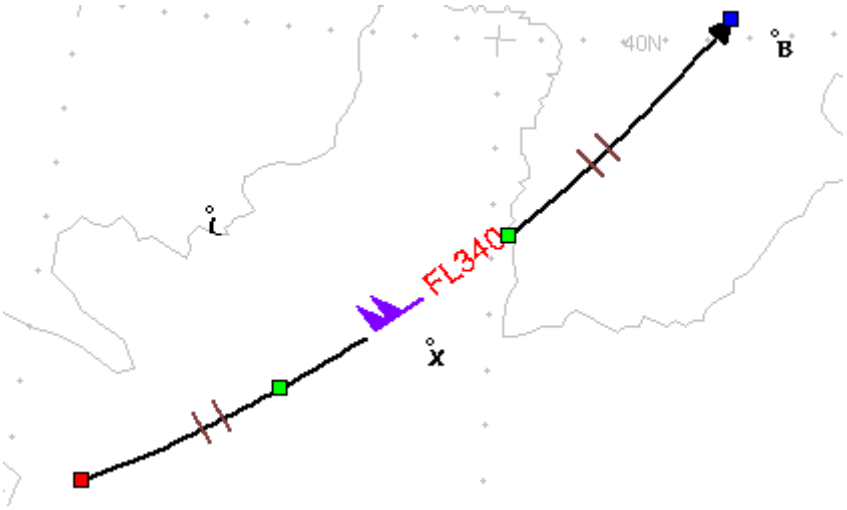

图 2 Akima 算法画出的急流轴

通过我们的实践表明，Akima 曲线算法能很好地应用于曲线形天气系统的绘制。

4.3.1.2 Spline 算法

样条(Spline)算法是一种多次多项式的平滑算法，该算法比较常用，也是 WAFC 在指导 BUFR 可视化时所推荐的方法之一。该算法虽能画出平滑的曲线，但画出的曲线通常不过中间的关键点，经我们多次研究后，写出了通过中间关键点的样条曲线程序。图 3 为用该算法画出的样条曲线：

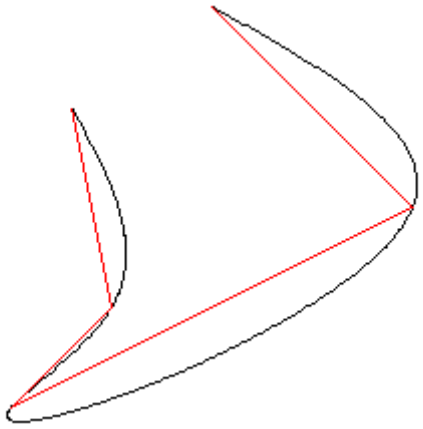

图 3 Spline 算法画出的平滑曲线

4.3.1.3 Bezier 曲线

Bezier 曲线是一种简单的多项式曲线算法，由四个关键点插值出曲线， Bezier 曲线不适合于画多点平滑的曲线，但 Windows 系统的 GDI 应用接口可支持直接画出，编写程序简单。但由 Windows GDI 画出的 Bezier 曲线不通过中间两点，应用性差。我们利用给定的中间点，来反求新中间点的坐标，再由新中间点来计算新曲线，则曲线可通过给定的中间点。

在画重要云区曲线时，可以采用 Akima 曲线叠加 Bezier 曲线的方法来实现，图 4 为画出的示例：

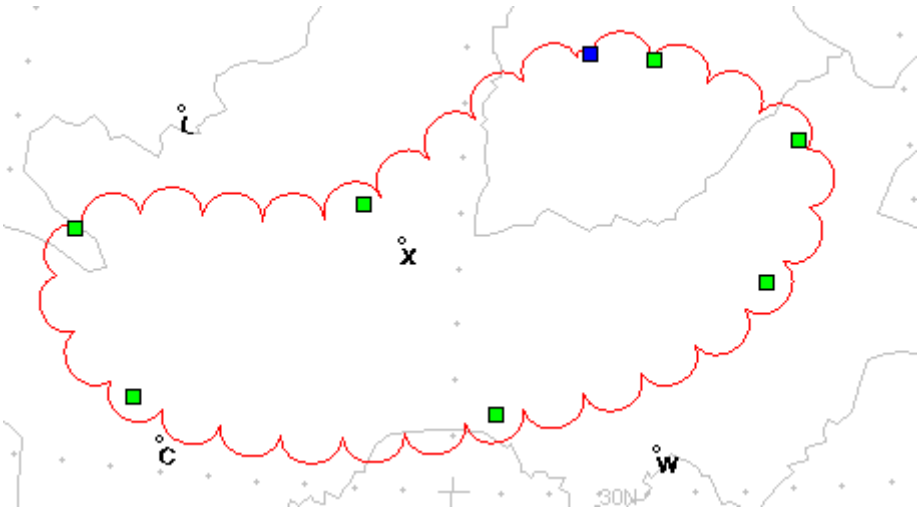

图 4 Akima + Bezier 算法画出的云区曲线

4.3.2 气象符号的放缩及旋转

气象符号的放缩和旋转，可以达到手工调整气象符号的目的。气象符号应该可以定义大小、长宽比例、角度等。

图 5 显示气象符号随经纬度旋转的例子。

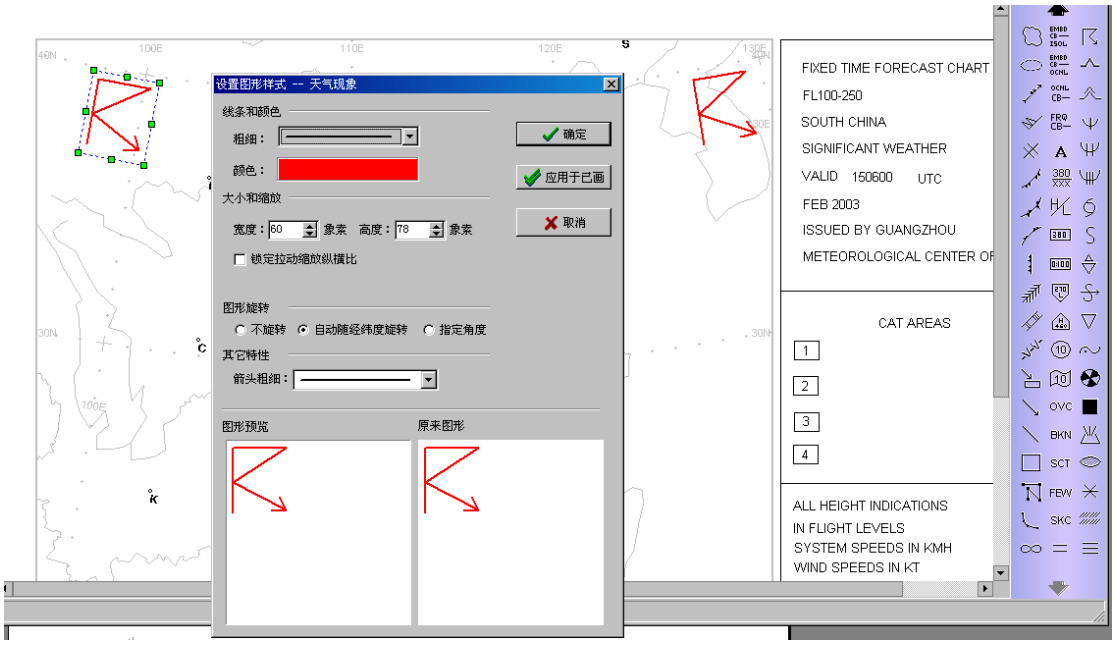

图 5 气象图形随经纬度旋转

除了通过操作气象符号上的方块手柄，可实现气象符号的缩放外，还应可通过设置图形的样式来精确设置图形的大小、颜色和旋转等属性。

4.3.3 其它图形学问题

为了实现整个 BUFR 数据的可视化，还必须解决如下问题：

- 必须实现文字的旋转。
- 通过图形分层的原理和底图缓冲的方式，实现图形互相覆盖时的删除、移动问题。
- 实现图上气象元素的操作感知功能。

4.4 图形的输出

做好的图形必须能够输出和发布，这是 BUFR 数据可视化的目的，通常有两种输出方式，一是将做好的图形存为位图格式，发布到网上，供用户浏览；一是将图形以矢量的方式输出到打印机上。

5 BUFR 数据可视化水平展望

全自动生成重要天气图图形，BUFR 航空数据的可视化工作还存在一些难题：

- 注释方框会出现相互重叠现象，即使是由 WAFC 生成的图也会存在此问题；注释和天气现象的结合程度比较松散。
- 由于 BUFR 数据属于全球范围预报数据，而制作图形时，则只有一定的范围，必然存在气象符号或天气系统符号在图边被裁剪问题，使到无法完整了解图边被裁剪符号的所有属性。

上述问题，只有经过逐渐提高 BUFR 数据的可视化算法，才能更加完美地实现 BUFR 数据的可视化。

6 总结

WAFS BUFR 航空数据的解码和可视化是近年来航空气象的一个重要研究课题，如何更好地应用这一全球数字化模式预报的重要天气产品，来为日益扩大范围的国际航空飞行服务，迫切地摆在了航空气象科研人员的面前，本文通过对 WAFS BUFR 航空数据的解码和可视化这一复杂课题进行探讨，以期达到抛砖引玉的作用，切实提高应用 WAFS 产品的能力。

参考文献：

(1) Guide to WMO Table Driven Code Forms:FM 94 BUFR and FM95 CREX Layer 1、2、3.

(2) World Area Forecast Centres (WAFCs) London and Washington. Representing WAFS Significant Weather (SIGWX) Data in BUFR Version 3.0.

(3) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. BUFR reference manual (2006)

(4) A guide to the encoding into BUFR of Significant Weather Features extracted from a SIGWX chart, $Revision: 1.9 $。

(5) 孙家广. 计算机图形学.北京:清华大学出版社，1986 年 12 月。

(6) http://www.ossim.org/ 网站之投影部分内容。

(7) International Association of Oil & Gas Producers(OGP). Surveying and Positioning Guidance.

(8) 戴勤奋.常用地图投影转换公式.青岛海洋地质研究所。