

Integration of Spatial Geophysical Data by Geostatistical Simulation

Integration räumlicher geophysikalischer Daten mittels geostatistischer Simulation

Integración de datos geofísicos espaciales mediante simulación geoestadística

PETER A. DOWD, Adelaide & EULOGIO PARDO-IGÚZQUIA, Madrid

Key words: Data integration, geostatistics, simulation, spatial factors, geophysical data.

Abstract

Studies of the mechanical, hydrogeological and structural characteristics of an underground rock volume are often based on two or more types of data. For example, characteristics can be measured directly on cores of rock or indirectly by wireline geophysical logs along boreholes or from three-dimensional seismic surveys. There are usually qualitative and quantitative differences among the different types of data. For example, core data provide direct measurements of the variable of interest whereas wireline logs and seismic surveys provided indirect measurements; the quality and reliability of wireline data may be significantly better than seismic data. For qualitative or/and quantitative reasons one variable is chosen as the primary variable and the others are designated secondary variables. The purpose of a data fusion procedure in this context is to produce a complete as possible image of the variable of interest (e. g., porosity, hydraulic conductivity) by incorporating and integrating all available data. One possibility is to estimate the variable of interest using a multivariate procedure, such as cokriging, which also provides an evaluation of the uncertainty of the estimate. One difficulty with this approach is that the estimated image is much smoother than reality. Geostatistical simulation is an efficient alternative that can be used to generate a large number of stochastic images, each of which is a possible realisation of reality that reproduces the spatial variability observed in the experimental data and reproduces the experimental data at the sampled locations. Data integration is accomplished by requiring the simulated images to be coherent with the experimental data provided by the secondary variables. The authors describe the methodology of data fusion by simulation and illustrate its application by merging wireline acoustic impedance data (primary data) measured along boreholes with acoustic impedance data from a 3D seismic survey (secondary data). The wireline acoustic impedance data are more accurate and reliable measurements than those provided by the 3D seismic survey but they are available from only nine boreholes that represent only a small proportion of the total rock volume. Although the 3D seismic acoustic impedance data are of significantly lower quality they provide a complete coverage of the 3D rock volume. Integrating the two types of data should provide more realistic images, and hence images that are more useful in practical applications, than images obtained from using only one type of data.

Zusammenfassung

Die Untersuchung der mechanischen, hydrogeologischen oder strukturellen Charakteristik des Untergrundes eines Gesteinskörpers basiert häufig auf zwei oder mehr Datentypen. Beispielsweise kann diese Charakteristik unmittelbar an Gesteinskernen, indirekt aus multiplen geophysikalischen Bohrlochmessdaten oder aus dreidimensionalen seismischen Untersuchungen gewonnen werden. Normalerweise bestehen zwischen den unterschiedlichen Datentypen qualitative und quantitative Unterschiede. So repräsentieren die Bohrkerndaten direkte Messungen der interessierenden Variablen, während die elektrischen Bohrlochmessdaten und die seismischen Aufnahmen indirekte Messungen darstellen. Qualität und Zuverlässigkeit der Bohrlochmessdaten sind signifikant besser als diejenigen der seismischen Aufnahmen. Nach qualitativen und/oder quanti-

tativen Kriterien wird eine Variable als die primäre ausgewählt, und die übrigen werden als sekundäre Variable eingeordnet. Ziel einer daten-fusionierenden Prozedur ist es in diesem Zusammenhang, ein möglichst vollständiges Abbild der interessierenden Variablen wie Porosität, hydraulische Durchlässigkeit usw. durch Inkorporation und Integration aller verfügbaren Daten zu erhalten. Eine der Möglichkeiten besteht darin, eine interessierende Variable mathematisch mit Hilfe einer multivariaten Prozedur wie Cokriging zu schätzen, wobei auch die Unsicherheit der Schätzung beurteilt werden kann. Eine Schwierigkeit dieses Zugangs ist, dass das durch Schätzung erzeugte Abbild „glatter“ als die Wirklichkeit ist. Die geostatistische Simulation ist eine effiziente Alternative, mittels derer eine große Anzahl stochastischer Bilder generiert werden kann, die jeweils eine mögliche Realisierung der Wirklichkeit darstellen, welche die in den experimentellen Daten beobachtete räumliche Variabilität und die experimentellen Daten an den beprobten Lokationen reproduziert. Die Datenintegration wird ergänzt durch die Forderung, dass die simulierten Bilder kohärent mit den experimentellen Daten – unterstützt durch die sekundären Variablen – sein sollen. Der Beitrag beschreibt die Methodologie der Datenfusion durch Simulation und veranschaulicht deren Anwendung, indem akustische Impedanzdaten aus Bohrlochmessungen als Primärinformation mit akustischen Impedanzdaten einer seismischen 3D-Aufnahme (sekundäre Information) verbunden werden. Die akustischen Impedanzdaten sind genauere und zuverlässigere Messungen als diejenigen der seismischen dreidimensionalen Aufnahme, aber sie stehen nur aus neun Bohrlochern zu Verfügung - einer vergleichsweise geringen Anzahl hinsichtlich des gesamten Gesteinsvolumens. Obwohl also die seismisch gewonnenen akustischen Impedanzdaten von signifikant geringerer Qualität sind, reflektieren sie das dreidimensionale Gesteinsmassiv vollständig. Mittels Integration der zwei Datentypen soll ein realistischeres Abbild erzeugt werden, also Bilder, die in der praktischen Anwendung gebräuchlicher sind als Bilder, die nur vermittels eines Datentyps gewonnen wurden.

Abb. 1a zeigt die Probenahmepunkte der 3D seismischen Aufnahme zusammen mit einer horizontalen Projektion der Bohrlochmesspunkte entlang der neun Bohrungen im gleichen Maßstab wie die seismische Aufnahme. Abb. 1b veranschaulicht eine perspektivische Sicht auf ausgewählte Bohrungen.

Abb. 2a stellt das Semivariogramm der akustischen Impedanzdaten aus Bohrlochmessungen und Abb. 2b dasselbe aus der seismischen Aufnahme dar. In Abb. 2c ist das Cross-Semivariogramm der akustischen Impedanzdaten aus Bohrlochmessungen und den 3D-Seismikmessungen dargestellt.

In Abb. 3 sind die Histogramme der akustischen Impedanzdaten aus Bohrlochmessungen bzw. einer zufallsmäßig ausgewählten konditionalen Simulation der akustischen Impedanz enthalten.

Abb. 4 enthält vier Simulationen: (a) eine nicht-konditionale; (b) eine nur hinsichtlich der Primärdaten konditionale; (c) eine bezüglich primärer und sekundärer Daten konditionale, wobei die Konditionierung durch gewöhnliches Cokriging erfolgte; und (d) eine bezüglich primärer und sekundärer Daten konditionale bei Konditionierung mittels einfachem Cokriging.

In Abb. 5 sind vier verschiedene Typen von mathematischen Schätzungen dargestellt: (a) gewöhnliches Kriging der akustischen Impedanz aus Bohrlochmessung zwischen den Bohrungen; (b) gewöhnliches Kriging der akustischen Impedanz aus der seismischen Feldaufnahme zwischen den Bohrungen; (c) eine Karte der konditionierten Komponente, die durch gewöhnliches Cokriging der Simulation der akustischen Impedanz erzeugt wurde; (d) eine Karte der konditionierten Komponente, die durch einfaches Cokriging der Simulation der akustischen Impedanz erzeugt wurde. Die Gewichte, welche den Primär- und Sekundärinformationen an einer typischen Stelle mittels gewöhnlichem bzw. einfachem Cokriging zugeordnet wurden, sind aus Abb. 6a bzw. 6b zu erkennen.

Abb. 7a enthält die richtungsabhängigen Semivariogramme der simulierten akustischen Impedanz zusammen mit der für die Simulation spezifizierten Variogramm-Modellfunktion. Abb. 7b hingegen zeigt die richtungsabhängigen Cross-Semivariogramme zwischen der simulierten akustischen Impedanz und den sekundären Bohrlochmessdaten und dem spezifizierten Cross-Variogramm-Modell.

Ein zweidimensionales Tomogramm zwischen den Bohrungen BH5 und RCF3 aus Abb. 1a bzw. 1b ist in Abb. 8 dargestellt. Abb. 9 zeigt schließlich vier verschiedene konditionale Simulationen der akustischen Impedanz.

Resumen

Los estudios sobre las características mecánicas, hidrogeológicas, y estructurales de las rocas del subsuelo se basan, frecuentemente, en dos o más tipos de datos. Por ejemplo, las características de interés se pueden medir directamente sobre testigos de sondeos o indirectamente a partir de diagráfias de sondeos o a partir de investigaciones sísmicas tridimensionales. A menudo, existen diferencias cuantitativas y cualitativas entre los diferentes tipos de datos. Por ejemplo, los testigos de sondeos proporcionan medidas directas de la variable de interés mientras que las diagráfias y la investigación sísmica proporciona medidas indirectas. Asimismo, la calidad y fiabilidad de los datos que proporcionan las diagráfias pueden llegar a ser significativamente mejores que los datos sísmicos. Debido a razones cualitativas y/o cuantitativas, una de las variables se considera como variable primaria y el resto son variables secundarias. En este contexto, el propósito de la fusión de datos es producir una imagen de la variable de interés (ej. porosidad, conductividad hidráulica) tan completo como sea posible, mediante la incorporación e integración de todos los datos disponibles. Una posibilidad es estimar la variable de interés

utilizando un procedimiento multivariante, como puede ser el cokrigeaje, el cual además proporciona una evaluación de la incertidumbre del valor estimado. Sin embargo, una dificultad con este enfoque es que la imagen estimada tiene una variabilidad más suavizada que la realidad.

La simulación geoestadística es una alternativa eficiente que puede ser utilizada para generar un gran número de imágenes estocásticas, cada una de las cuales es una posible realización de la realidad, que reproduce la variabilidad espacial observada en los datos experimentales y que coincide con los datos experimentales en las localizaciones de muestreo. En este caso, la integración de los datos se logra mediante el requerimiento de que las imágenes simuladas sean coherentes con los datos experimentales proporcionados por las variables secundarias. Los autores describen la metodología de fusión de datos por simulación e ilustran su aplicaciones mediante la fusión de impedancia acústica medida en diagragías de sondeos (datos primarios) e impedancia acústica obtenida a partir de una campaña sísmica 3D (datos secundarios). Los datos de impedancia acústica suministrados por las diagragías son más precisos y fiables que los proporcionados por la sísmica 3D, pero sólo son disponibles en 9 sondeos que sólo representan una pequeña proporción del volumen total de roca. Por otra parte, aunque la impedancia acústica calculada a partir de la sísmica 3D es significativamente de menor calidad, proporciona un recubrimiento completo del volumen 3D de roca. La integración de los dos tipos de datos, debería proporcionar imágenes más realistas, y por lo tanto imágenes que son más útiles en las aplicaciones prácticas.