

钻孔设计与轨迹动态监控系统研究

彭少龙, 吴翔, 陆洪智, 陈卫明
(中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要:计算机辅助钻孔设计与轨迹监控是钻探工程信息化和数字化发展的必要条件,从理论上、技术上和方法上对计算机辅助设计技术在钻探工程中的应用展开进一步的研究十分必要。钻孔设计与轨迹动态监控系统以定向钻探工程钻孔轨迹控制参数设计和钻孔轨迹分析监控为主,同时包括钻孔轨迹二维图形和三维图形绘制、钻探工程综合技术图、钻孔地质设计书和钻孔地质柱状图等钻探工程技术文件的自动生成等模块功能,利用计算机强大的数据处理及计算、图形绘制及生成等功能,通过软件编程和数据录入,自动完成钻孔设计与轨迹监控。该系统软件不仅适用于定向钻探工程设计与过程监控,还可作为钻探工程电子档案和钻探工程数字化管理系统的组成部分。系统软件经过了野外实践验证,并达到了预期的应用效果。

关键词:计算机辅助;钻探工程;钻孔轨迹;电子档案;数字化管理

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)11-0055-08

Research on Drilling Design and Trajectory Dynamic Monitoring System/PENG Shao-long, WU Xiang, LU Hong-zhi, CHEN Wei-ming (China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Computer aided borehole design and trajectory monitoring are necessary conditions for the information and digital development of drilling engineering. Thus, the further research on the application of computer aided design technology is important for drilling engineering in theory, technology and methods. The drilling design and trajectory dynamic monitoring system is mainly based on the design of drilling trajectory control parameters in directional drilling engineering and drilling trajectory analysis monitoring, including drawing of 2D graphics and 3D graphics of drilling trajectory and module functions of drilling engineering technical documents automatically generating, such as comprehensive charts, drilling geological design documents and drilling geological histograms, and so on. Drilling design and trajectory monitoring can be automatically made by powerful functions of computer in data processing and computing, graphics drawing and generation and by software programming and data entry. This system software is not only suitable for directional drilling engineering design and process monitoring, but also can be used as a component part of electronic files and digital management system of drilling engineering. This software system has been tested in the engineering practice, the desired application effects are achieved.

Key words: computer aided; drilling engineering; drilling trajectory; electronic file; digital management

在国内外石油钻井工程领域,计算机辅助定向井设计及井眼轨迹监控技术已十分普及且相当先进,开发的软件系统较多且完备,如美国的“石油数据系统(PDS)”和“井史控制系统(WHCS)”,以及中国石油勘探开发科学研究院开发的“DECES系统”等。但是,由于油气定向井的设计原则和方法与地质勘探定向钻孔有明显的差别,所以油气定向井设计的软件系统并不能适应于地质勘探定向钻孔

设计^[1]。此外,传统钻探工程技术方法监控钻孔轨迹存在计算方法落后、人工计算复杂等问题,特别是复杂地层钻探和深部钻探钻孔轨迹监控优化设计涉及到巨量计算,进而使设计过程更加繁琐、复杂,导致设计效率低、精度差,而采用计算机辅助设计定向钻孔具有速度快、精度高等绝对的优势,是定向钻探工程现代化发展的重要技术平台^[2]。因此,结合地质勘探工程的特点及技术要求研究开发适用于定向钻探工程的软件系统是一项十分必要、紧迫且极有

收稿日期:2016-01-24; 修回日期:2016-06-30

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项经费课题项目“马坑矿区复杂地层膨胀管技术的应用”(编号:201311059-02);安徽省科技厅科技重点攻关项目“深部矿体勘探钻探技术方法研究”(编号:09010301015)

作者简介:彭少龙,男,汉族,1990年生,硕士研究生在读,地质工程专业,研究方向为水平井钻井技术,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,244969447@qq.com。

通讯作者:吴翔,男,汉族,1964年生,教授,博士,主要从事勘查技术与工程、定向钻进技术的研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, wubox@126.com。

意义的工作^[3-4]。

1 软件系统的整体构架

软件系统以我国地质调查岩心钻探技术规程为依据,在文献调研与实际调研的基础上,研究确定钻孔轨迹坐标定位、钻孔弯曲规律分析、初级定向钻孔与受控定向钻孔轨迹设计理论模型研究及模型优化^[11],二维、三维图形及三维动态显示实现方法及模型建立,协调与构建各功能模块,同时分为数据库、轨迹监控、图形绘制3个部分并行研发。在此基础上,以Windows、Microsoft Office及相关图形绘制通用软件为开发平台,采用C#语言编程实现软件各功能模块,并按各功能模块独立调试,最后选择代表性的实际钻孔进行运行测试,并进一步完善软件编程^[6-9,12]。

软件系统以定向钻探工程钻孔轨迹控制参数设计和钻孔轨迹分析监控为主,同时包括钻探工程综合技术图、钻孔地质柱状图和地质设计书等技术文件的自动生成^[5]。软件系统集钻孔轨迹在地下空间的坐标定位计算、定姿态中靶轨迹设计、受控定向孔轨迹设计、轨迹弯曲规律分析、初级定向孔轨迹设计、二维和三维空间钻孔轨迹形态、钻探工程综合技术图表自动生成等多项功能于一体,其整体构架如图1所示。

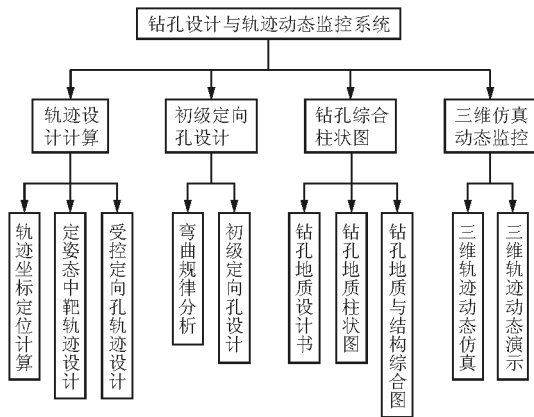


图1 软件系统整体构架

2 软件系统各功能模块

软件系统根据地矿系统的使用习惯,采取人机交互的设计方案,很好地适应了现场操作模式,减少了很多不必要的操作步骤,极大地提高了工作效率。系统的主界面上方有2行功能按钮(如图2所示),第一行为功能模块菜单栏,第二行为功能模块快捷键。菜单栏囊括了快捷键所有的功能模块,菜单栏

的前两项,即“矿区”和“钻孔”为基础数据的录入;菜单栏的后4项,即“轨迹设计计算”、“初级定向孔设计”、“钻孔综合柱状图”、“三维仿真动态监控”为系统的10大功能模块,分别为:轨迹坐标定位计算、定姿态中靶轨迹设计、受控定向孔轨迹设计、弯曲规律分析、初级定向孔设计、钻孔地质设计书、钻孔地质柱状图、钻孔地质与钻孔结构综合图、三维轨迹动态仿真、三维轨迹动态演示。点击功能模块选项,即可进入相应的操作界面。



图2 系统主界面

在实现软件系统各项功能之前,必须通过点击“新建矿区”、“新建钻孔”、“编辑矿区”这3个选项先将钻孔资料录入系统(如图3所示)。钻孔资料包括矿区名称、勘探线方位角或当地磁偏角、钻孔基本信息(钻孔编号、开孔数据、靶点坐标等)、孔斜数据(孔深、顶角、方位角等)、结构信息(孔深、钻孔直径、下入套管直径和深度等)、地层信息(孔深、地层名称、地层描述、岩矿心长度及采取率等)、采样信息(采样位置、样长、岩矿心长度及采样率等)、标志面与轴心夹角(孔深、标志面与轴心夹角等),点击保存即可将录入的数据保存到软件系统的数据库中,后期可在此基础上继续录入或者修改。数据录入结束后,即可实现各设计模块的计算、绘图等功能。

2.1 “轨迹坐标定位计算”功能模块

点击第一行菜单栏中的“轨迹设计计算”,并选取“轨迹坐标定位计算”,或者直接点击第二行功能快捷键中的“轨迹计算”(两种方式效果是一样的,下面以介绍功能快捷键为主),即可跳出计算操作界面(如图4所示)。软件系统各功能模块的操作界面模式基本相同,只是各功能模块需要录入的数据类型和结果的输出方式有所差异。

该功能采用全角全距法、全角半距法、均角全距法、曲率半径法和最小曲率法这5种方法来计算钻孔轴线空间位置^[5]。由于这5种计算方法的精确程度

(a) 新建矿区

(b) 新建主干孔

(c) 编辑钻孔

图 3 钻孔资料录入

有一定的差别,所以需要根据实际要求选择计算方法^[10],然后点击计算即可得到计算结果(如图 5 所示)。在计算结果界面, X 、 Y 、 Z 坐标是选择坐标系的绝对坐标, ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 坐标是相对于孔口的坐标偏差值,输出结果时还可以计算出钻孔实际中靶精度,以此评价钻孔实际中靶偏距(靶点 X 轴偏移 1.299, Y 轴偏移 1.431, 综合偏移 1.933)。

对于轨迹坐标定位计算结果,一方面可以直接保存到软件系统的数据库中,另一方面还可以保存到 Excel 表格中,以便后期直接调入使用。除了以数据的形式输出计算结果之外,软件系统还可以直接输出设计计算结果的二维和三维图形,其中二维图形包括钻孔轨迹的垂直平面和水平面投影图,可以直观地了解钻孔在垂直平面和水平面上的投影轨迹,三维图形为钻孔轨迹的立体曲线图,可以直观观察到钻孔的空间轨迹状态(如图 6 所示)。钻孔轨迹的二维和三维图形在每个设计计算功能模块中都可以输出。

2.2 “定姿态中靶轨迹设计”功能模块

定姿态中靶轨迹设计功能模块是根据钻孔基本数据、靶点坐标和要求的中靶顶角、方位角设计定向钻孔轨迹及造斜控制参数^[14-15]。在人机交互对话框

数据来源	孔深 (米)	顶角 (度)	方位角 (度)	备注
安徽ZK418	25.0000	0.4500	6.9000	
安徽ZK418	50.0000	0.7000	18.3400	
安徽ZK418	75.0000	0.6100	7.7100	
安徽ZK418	100.0000	0.6500	26.4700	
安徽ZK418	125.0000	0.6400	23.8200	
安徽ZK418	150.0000	0.6800	25.2700	
安徽ZK418	155.0000	0.8400	36.3300	
安徽ZK418	160.0000	2.5500	11.0600	
安徽ZK418	165.0000	2.9700	6.1000	
安徽ZK418	175.0000	3.1400	334.5600	
安徽ZK418	200.0000	3.3300	333.9700	
安徽ZK418	225.0000	3.3800	334.6000	
安徽ZK418	250.0000	3.4700	339.1000	
安徽ZK418	275.0000	3.4200	340.0900	
安徽ZK418	300.0000	3.3900	341.2900	
安徽ZK418	325.0000	3.1800	344.3600	
安徽ZK418	350.0000	3.1700	346.3000	
安徽ZK418	375.0000	3.0100	352.0000	

图 4 轨迹坐标定位计算操作界面

中根据实际情况人工输入造斜强度、造斜起点孔深、造斜终点顶角和方位角,软件系统则可以通过这个模块的功能设计计算,可以得出造斜段长度、造斜全弯曲角、中靶孔深、稳斜段长度和安装角等相关参数

(如图 7 所示)。点击绘图之后,软件系统会根据计算输出的结果绘制类似于图 6 的钻孔轨迹二维和三维图。

2.3 “受控定向孔轨迹设计”功能模块

轨迹计算参数 轨迹计算结果 空间曲线图 平面曲线图 测孔、首先处理当地磁偏角											
钻孔编号	孔深(米)	顶角(度)	方位角(度)	X(米)	Y(米)	Z(米)	ΔX (米)	ΔY (米)	ΔZ (米)	备注	
安徽ZK418	166.9341	3.0029	0.0000	3422395.0236	39584355.1108	-75.0852	1.9638	0.4608	166.9152	顺时针过零点	
安徽ZK418	175.0000	3.1400	334.5600	3422395.4366	39584354.9901	-83.1395	2.3786	0.3401	174.9695		
安徽ZK418	200.0000	3.3300	333.9700	3422396.6697	39584354.3010	-108.0997	3.6097	-0.3490	199.9297		
安徽ZK418	225.0000	3.3800	334.6000	3422397.9466	39584353.5869	-133.0568	4.8866	-1.0631	224.8868		
安徽ZK418	250.0000	3.4700	339.1000	3422399.2815	39584352.9170	-158.0122	6.2215	-1.7330	249.8422		
安徽ZK418	275.0000	3.4200	340.0900	3422400.6549	39584352.3083	-182.9870	7.5949	-2.3417	274.7970		
安徽ZK418	300.0000	3.3900	341.2900	3422402.0236	39584351.7326	-207.9229	8.9636	-2.9174	299.7529		
安徽ZK418	325.0000	3.1800	344.3600	3422403.3639	39584351.2269	-232.8818	10.3039	-3.4231	324.7116		
安徽ZK418	350.0000	3.1700	346.3000	3422404.6795	39584350.7951	-257.8434	11.6195	-3.8549	349.6734		
安徽ZK418	375.0000	3.0100	352.0000	3422405.9851	39584350.4611	-282.8071	12.9251	-4.1889	374.6371		
安徽ZK418	396.9294	3.0816	360.0000	3422406.6134	39584350.3783	-294.7186	13.5534	-4.2717	396.5486	逆时针过零点	
安徽ZK418	390.0000	3.1000	2.0600	3422406.7789	39584350.3712	-297.7858	13.7189	-4.2788	389.6158		
安徽ZK418	395.0000	3.0000	10.8900	3422407.0446	39584350.3650	-302.7787	13.9846	-4.2650	394.6087		
安徽ZK418	400.0000	3.6400	2.0000	3422407.3338	39584350.3999	-307.7703	14.2738	-4.2501	399.6003		
安徽ZK418	400.3228	3.6458	0.0000	3422407.3542	39584350.3990	-308.0922	14.2942	-4.2510	399.9222	顺时针过零点	
安徽ZK418	405.0000	3.7300	331.0000	3422407.6404	39584350.3060	-312.7599	14.5804	-4.3440	404.5899		
安徽ZK418	410.0000	4.1400	321.5000	3422407.9135	39584350.0983	-317.7482	14.8535	-4.5517	409.5782		

中靶精度 (ΔX : 1.299(米), ΔY : 1.431(米), ΔS : 1.933(米))

保存结果到数据库 保存结果到EXCEL 绘图

图5 轨迹坐标定位计算结果界面

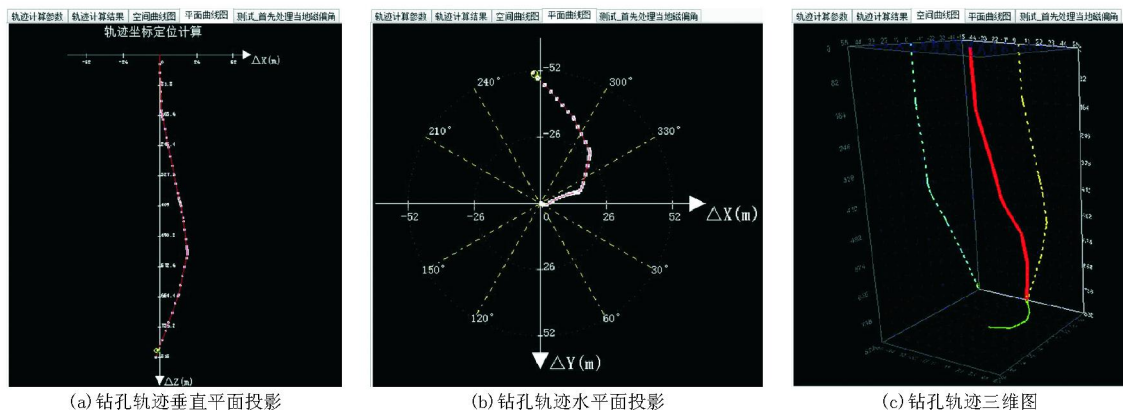


图6 钻孔轨迹平面和空间状态

定姿中靶轨迹设计计算 定姿中靶轨迹设计计算结果 空间曲线图 平面曲线图 测孔、首先处理当地磁偏角											
钻孔编号	孔深(米)	顶角(度)	方位角(度)	X(米)	Y(米)	Z(米)	ΔX (米)	ΔY (米)	ΔZ (米)	备注	
安徽ZK418	290.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-190.1700	0.0000	0.0000	290.0000	0A段	
安徽ZK418	295.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-203.1700	0.0000	0.0000	295.0000	0A段	
安徽ZK418	300.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-208.1700	0.0000	0.0000	300.0000	0A段	
安徽ZK418	305.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-213.1700	0.0000	0.0000	305.0000	0A段	
安徽ZK418	310.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-218.1700	0.0000	0.0000	310.0000	0A段	
安徽ZK418	315.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-223.1700	0.0000	0.0000	315.0000	0A段	
安徽ZK418	320.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-228.1700	0.0000	0.0000	320.0000	0A段	
安徽ZK418	325.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-233.1700	0.0000	0.0000	325.0000	0A段	
安徽ZK418	330.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-238.1700	0.0000	0.0000	330.0000	0A段	
安徽ZK418	335.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-243.1700	0.0000	0.0000	335.0000	0A段	
安徽ZK418	340.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-248.1700	0.0000	0.0000	340.0000	0A段	
安徽ZK418	345.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-253.1700	0.0000	0.0000	345.0000	0A段	
安徽ZK418	350.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-258.1700	0.0000	0.0000	350.0000	0A段	
安徽ZK418	355.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-263.1700	0.0000	0.0000	355.0000	0A段	
安徽ZK418	360.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-268.1700	0.0000	0.0000	360.0000	0A段	
安徽ZK418	365.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-273.1700	0.0000	0.0000	365.0000	0A段	
安徽ZK418	370.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-278.1700	0.0000	0.0000	370.0000	0A段	
安徽ZK418	375.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-283.1700	0.0000	0.0000	375.0000	0A段	
安徽ZK418	380.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-288.1700	0.0000	0.0000	380.0000	0A段	
安徽ZK418	385.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-293.1700	0.0000	0.0000	385.0000	0A段	
安徽ZK418	390.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-298.1700	0.0000	0.0000	390.0000	0A段	
安徽ZK418	395.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-303.1700	0.0000	0.0000	395.0000	0A段	
安徽ZK418	400.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-308.1700	0.0000	0.0000	400.0000	0A段	
安徽ZK418	405.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-313.1700	0.0000	0.0000	405.0000	0A段	
安徽ZK418	410.0000	0.0000	0.0000	3422395.4278	39584351.1861	-318.1700	0.0000	0.0000	410.0000	0A段	

(a) 造斜控制参数录入界面

(b) 轨迹设计计算结果

图7 定姿中靶轨迹设计计算

该功能模块采用“直线—曲线—直线”三维模型进行设计,在数据录入界面依据实际情况人工输入造斜起点孔深和造斜强度,然后点击计算,软件系统即可根据钻孔基本数据和靶点坐标以及人工输入的造斜起点和造斜强度进行受控定向孔设计,在很短的时间内完成定向孔轨迹设计控制参数计算(如图8

所示)。界面上方是设计钻孔轨迹各孔深点处的顶角、方位角以及对应的坐标,下方是根据录入的该钻孔的基本数据而设计的造斜段及过程控制参数。

2.4 “弯曲规律分析”功能模块

该模块功能是根据钻孔基本数据以及孔斜数据进行弯曲规律的数学分析,得出弯曲规律分析的数学



图 8 受控定向孔轨迹设计计算结果

方程。可以选择单孔或者多孔进行统计分析按最高
信度原则确定反映钻孔弯曲变化的数学方程和相关

系数,并且能够预测待钻钻孔的轨迹形态变化规
律^[5-7]。钻孔弯曲规律分析结果如图 9 所示。



(a) 回归方程选择界面



(b) 弯曲规律分析结果

图 9 钻孔弯曲规律分析结果界面

2.5 “初级定向孔设计”功能模块

该功能模块是利用弯曲规律分析所得到的回归方程进行初级定向孔设计,根据区域钻孔弯曲规律和待钻钻孔设计目标,自动确定钻孔轨迹形态以及

地标开孔点坐标,绘制钻孔轨迹展开图形和平面投影图形,并通过计算得到中靶精度(靶点偏差值),以供实际钻孔参考。初级定向孔设计结果如图 10 所示。



图 10 初级定向孔设计结果界面

2.6 “钻孔综合柱状图”功能模块

该功能模块包括钻孔地质设计书、钻孔地质柱状图、钻孔地质与钻孔结构综合图 3 项功能,可根据操作人员输入的孔斜数据(孔深、顶角、方位角等)、地层数据(孔深、地层名称、地层图案、地层描述等)、钻孔结构数据(孔深、孔径、下入套管直径和深

度等)、岩矿心采取资料等自动生成钻孔地质设计书、钻孔地质柱状图、钻孔地质与钻孔结构综合图,极大地减少了设计人员绘制图表的工作量。某地测试矿区钻孔地质与钻孔结构综合图如图 11 所示(截取了综合图的部分,实际图幅可任意调整比例)。

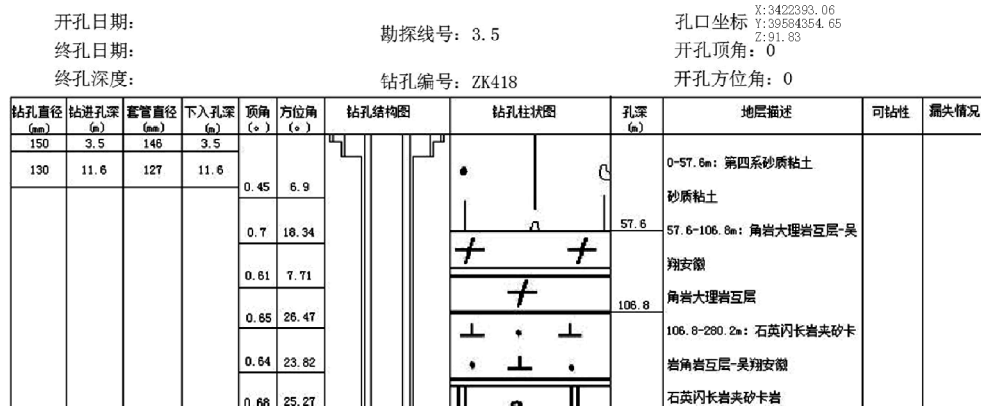


图 11 某地测试矿区钻孔地质与钻孔结构综合图

2.7 “三维仿真动态监控”功能模块

该功能模块针对不同来源的数据源,在三维场景可视化的输入过程中采用分离式建模场景的可视化输出,显示出动态的设计过程和设计结果,模拟出钻孔的实际空间轨迹状态,该三维空间状态不仅可

在界面上任意平移,还可任意旋转不同视角,增强了钻孔轨迹的直观效果^[13](如图 12 所示)。

3 野外试验

本次软件系统野外试验选取了福建和安徽等地的定向钻探实际工程中的 6 个钻孔,分别对软件系统

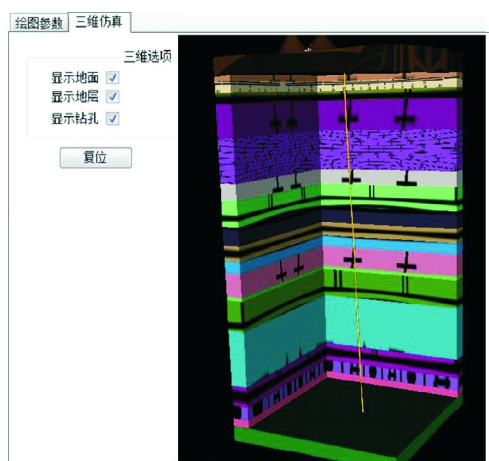
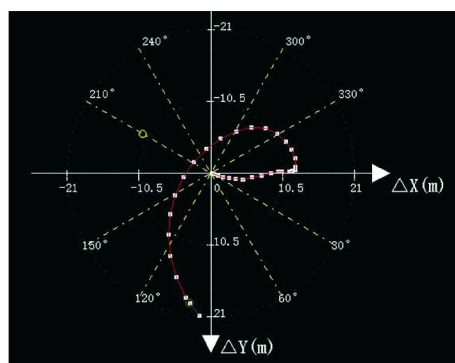


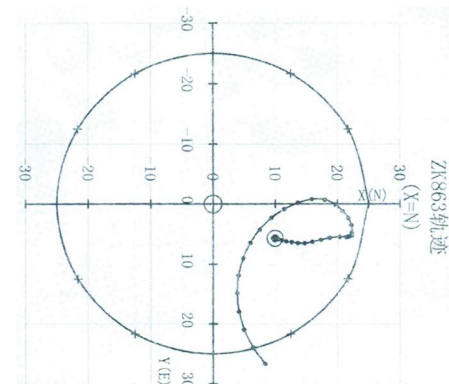
图 12 三维轨迹动态仿真

的各大功能模块进行测试验证。在两地不同矿区、不同地层的钻孔施工中应用测试了钻孔信息管理、钻孔轨迹坐标定位计算、定向钻进钻孔轨迹设计、钻孔轨迹图形绘制及三维空间轨迹演示、钻孔地质设计书、钻孔地质柱状图及钻探工程综合技术图的自动生成等功能模块。应用结果表明,运用该软件系统进行轨迹定位及轨迹设计速度快,采用传统方法需要几个小时,甚至几十个小时的工作量,用该软件系统只需几秒钟即可完成,且设计计算精度高,避免了大量繁琐的人工设计计算工作和容易出错的问题,图 13 为安徽某矿区运用该软件系统进行钻孔轨迹坐标定位计算的绘图结果与人工计算的绘图结果对比,可见钻孔轨迹完全吻合(由于原点选取的标准不一样,所以钻孔轨迹的起点和终点有所差异)。

运用该软件绘制的钻孔轨迹图、钻孔地质柱状图等综合技术文件清晰美观,符合钻探工程规范要求,并且利用该软件可以实现三维钻孔轨迹的演示



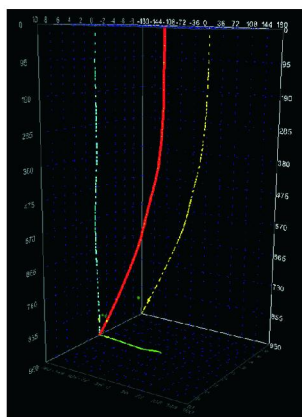
(a) 软件计算绘图结果



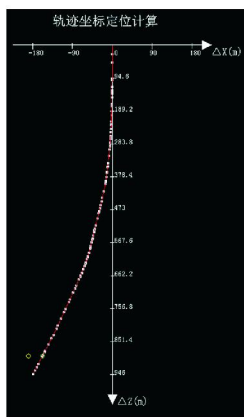
(b) 人工计算绘图结果

图 13 软件系统计算与人工计算绘图结果对比

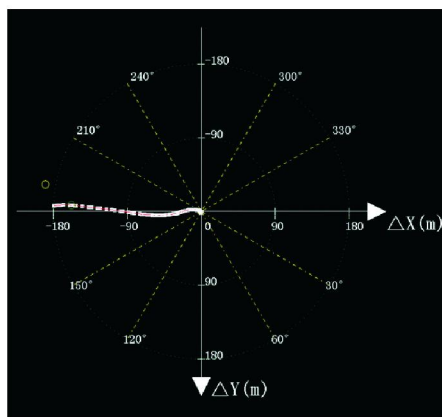
和钻孔、地层的三维仿真等功能,图 14 为福建某矿区运用该软件系统绘制的钻孔平面曲线图和空间曲线图。通过对安徽某矿区钻孔轨迹坐标定位计算以及对福建某矿区平面曲线图和空间曲线图的绘制,充分验证了该软件系统的应用效果,也显示出其对于推动钻探技术,特别是提高定向钻进技术水平具有重要意义和实际应用价值。



(a) 钻孔轨迹空间曲线图



(b) 钻孔轨迹垂直平面投影



(c) 钻孔轨迹水平面投影

图 14 福建某矿区运用软件系统绘制的钻孔平面曲线图和空间曲线图

4 结语

计算机辅助设计技术已经逐渐成为计算机应用学科中一个重要的分支,针对我国钻探工程领域一直沿用传统的人工设计计算方法,还没有专门的集成化钻探工程设计软件系统的现实,“钻孔设计与轨迹动态监控系统”以现行钻探工程技术规范和规程为依据,以广泛应用的 Windows 操作系统、Microsoft Office 办公软件和相关图形绘制通用软件为开发平台,按照钻探工程实际应用技术要求开发,基于 C#语言,采用 Visual Studio 2010 编程软件,实现软件系统各功能模块。该软件系统以钻孔轨迹监控为主,兼顾地质成果自动生成,对地质勘探钻探工程有很大的促进作用,同时,该软件系统可作为钻探工程数字化管理系统的组成部分,具有广阔的推广应用前景,对提高我国钻探工程特别是受控定向钻探技术水平具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 彭明明. 钻探钻井设计部分辅助软件开发[D]. 江西南昌: 东华理工大学, 2013.
- [2] 吴翔, 陆洪智, 朱恒银, 等. 多功能定向钻探软件系统设计与开发[J]. 地质科技情报, 2014, (3): 191 - 195.
- [3] 丁景祥. 钻探工程钻进微机自动控制系统及软件的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2003, 30(6): 25 - 28.
- [4] 胡远彪. 钻探工程计算机辅助设计系统的研究与开发[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- [5] 吴翔, 蒋国盛, 杨凯华. 定向钻进原理与应用[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2006: 44 - 48.
- [6] 张礼炎. 应用 PC - 1500 计算机设计受控定向钻探孔身轨迹[J]. 西部探矿工程, 1993, 5(1): 15 - 19.
- [7] 韩泽坤. 地质钻探孔身结构计算机设计系统的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005.
- [8] 刘正斌. PC - 1500 计算机在受控定向钻探方面的应用[J]. 西部探矿工程, 1994, (1): 72 - 77.
- [9] John L. Cranmer Jr., 鄢泰宁. 介绍几个钻探专用计算机程序[J]. 国外地质勘探技术, 1984, (12): 23 - 26.
- [10] 刘修善. 定向钻井轨道设计与轨迹计算的关键问题解析[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(5): 1 - 7.
- [11] 江天寿, 周铁芳, 刘励慎, 等. 受控定向钻探技术[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 272 - 273.
- [12] 王安德, 许兴基. 钻探工程 AUTOCAD 应用[J]. 西部探矿工程, 1991, (3): 62 - 67.
- [13] Angel E. 交互式计算机图形学: 基于 OpenGL 的自顶向下方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 26 - 262.
- [14] 韩志勇. 定向井的靶心距计算[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(5): 1 - 3.
- [15] 陈军. 基于地质导向的给定井眼方向待钻轨道设计[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(1): 232 - 236.