

文章编号: 1000-7598-(2008)02-562-05

# GPS 变形监测平差计算及不确定度分析

苗胜军<sup>1</sup>, 蔡美峰<sup>1</sup>, 任奋华<sup>1</sup>, 欧阳振华<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 全球定位系统 (GPS) 是一种全天候、高精度的连续定位系统, 它以速度快、方法灵活多样、操作简便等优势被广泛应用于工程测量和变形监测中。结合水厂铁矿 GPS 边坡变形监测实例, 对 GPS 监测网的星历预报、基线向量平差计算、网平差计算、结果及残差不确定度进行了细致分析研究, 以验证 GPS 技术在边坡变形监测中的可靠性和精度。

**关键词:** 全球定位系统 (GPS); 变形监测; 基线向量; 平差; 不确定度

**中图分类号:** P228

**文献标识码:** A

## Adjustment and uncertainty analysis of GPS deformation monitoring

MIAO Sheng-jun<sup>1</sup>, CAI Mei-feng<sup>1</sup>, REN Fen-hua<sup>1</sup>, OUYANG Zhen-hua<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** As an all-weather and high precision continuous positioning system, the global positioning system (GPS) is widely applied to engineering measurement and deformation monitoring because of its speediness, agility and operability. In combination with practice, occupation planning, baseline vector calculating, network adjustment results and residential uncertainty of the deformation monitoring network are analyzed and studied in detail. The reliability and accuracy of GPS monitoring for slope deformation are verified.

**Key words:** GPS; deformation monitoring; baseline vector; adjustment; uncertainty

## 1 引 言

我国很多大中型露天矿山已经或即将进入深凹开采, 随着矿山边坡的加高、加陡, 变形破坏时有发生, 为维护边坡的稳定性, 保证生产安全、避免人员伤害, 必须对边坡变形进行监控<sup>[1]</sup>。

首钢水厂铁矿位于河北省迁安市, 是一座大型变质岩型磁铁矿床。通过对矿区工程地质勘查、构造地质力学资料的分析, 布设了覆盖整个采区的 GPS 边坡变形监测网。现场使用 4 台 TOPCON Legacy-E GD GPS 双频接收机进行同步观测, 采用美国里蒙迪发明的“Stop and Go”定位法<sup>[2]</sup>, 确定监测点的三维坐标。水厂铁矿 GPS 首期监测网, 自 2004 年 4 月布设完毕后, 至 2005 年 11 月共监测 16 次。本文以 2004 年 10 月监测为例, 对 GPS 监测平差计算进行细致分析, 以验证 GPS 技术在边坡变形监测中的可靠性和精度<sup>[3,4]</sup>。

## 2 星历预报

卫星空间分布不仅决定了监测速度, 而且决定着监测的几何精度因子 (DOP)。星历预报可得出监测点上方各时刻的卫星分布图、可用卫星数及三维位置 (PDOP)、垂直分量 (VDOP)、水平分量 (HDOP) 等值。图 2 (a) 为 2004 年 10 月 19 日上午 9:00—11:00, 监测点 G3 上方可见卫星轨迹及 10:00 时卫星分布图。图 2 (b) 为 7:30—17:30 点钟时, 监测点 G3 可用卫星数及 DOP 值<sup>[5]</sup>。

图 2 为监测点 G3 星历预报结果。由图 2 可知, 可用卫星数至少在 5 颗以上, 完全能达到定位所需要的 4 颗卫星。DOP 值与可用卫星数密切相关, 卫星数少, DOP 值大时, 定位精度低, 所以, 在现场监测前应参考星历预报选择合适时段, 并确定观测时段的长短, 以提高监测的效率和精度。

收稿日期: 2006-07-31

基金项目: “国家“十五”科技攻关资助项目(No. 2004BA615A-05)。

作者简介: 苗胜军, 男, 1979 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学与工程方面的监测与控制研究。E-mail:miaoshengjun@163.com

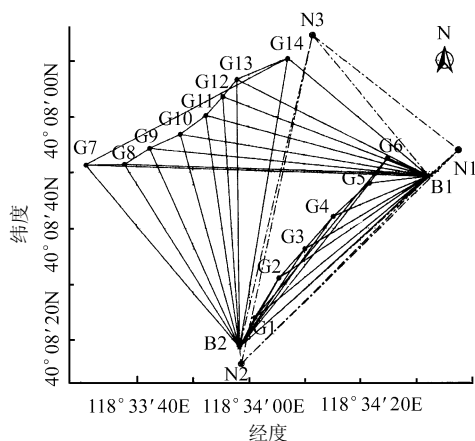
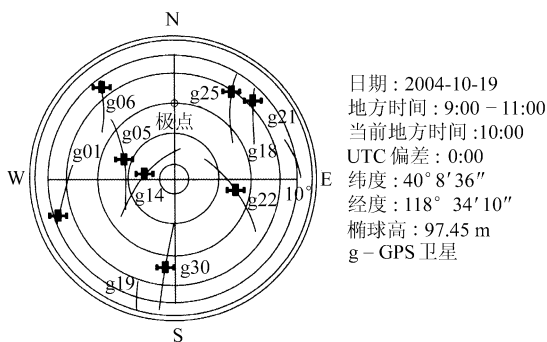
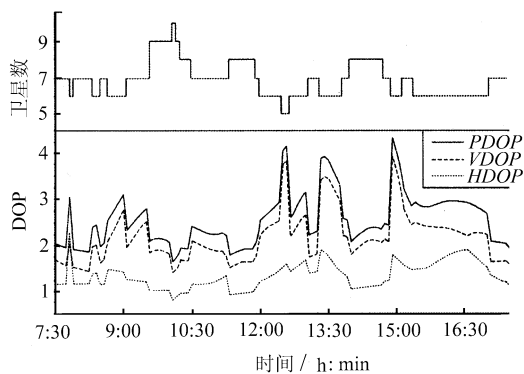


图 1 水厂铁矿首期监测点监测网形  
Fig.1 GPS monitoring network in the first period



(a) 卫星轨迹及分布图



(b) 卫星数及 DOP 值

图 2 监测点 G3 星历预报

Fig.2 Occupation planning for G3 monitoring point

### 3 基线向量平差计算

#### 3.1 基线向量解算

GPS 监测平差计算分基线向量解算和网平差两个阶段<sup>[6,7]</sup>。对两台及两台以上接收机同步观测值进行独立基线向量的平差计算叫基线向量解算,表 1 为 2004 年 10 月 19 日段 B1B2G1G2 中基线 B1G2 解算属性表。

**表 1 基线向量解算属性表**  
**Table 1 Baseline vector solution properties**

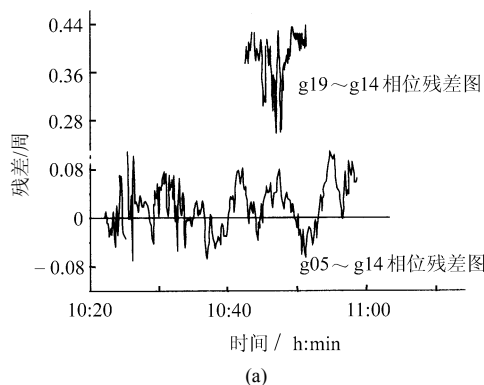
基线	观测时长 /h: min:s	解算代码	类型	历元总数 /个	RMS /mm · (min) <sup>-1</sup>	距离 /m
B1G2	01:21:50	OT DD FX	Static	5 013	1.6	849.240 8

注: OT DD FX 表示 L1&L2 双差 固定解; Static 表示静态。

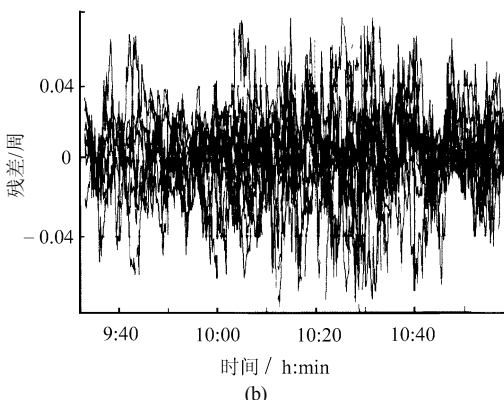
#### 3.2 基线质量检验

基线解算完毕后,其结果并不能马上用于后续的处理,还必须对基线质量进行检验。通常,先采用载波相位残差图来检验基线解算结果,正常的残差图一般绕着 0 轴上下摆动,振幅不超过 0.1 周。从残差图中可判断卫星是否含有周跳,受其他因素影响,以决定是否进行删星或剔除数据不好的时间段。

图 3 为基线 B1~B2 解算载波相位残差图,(a)图中显示卫星 g05~g14 相位残差属正常范围,而卫星 g19~g14 相位残差振幅较大,结果发现 g19 卫星的跟踪时间较短,周跳未处理成功,故应删去 g19 卫星的数据重新解算。表 2 给出了该时段基线 B1~G2 载波相位中误差的绝对值。



(a)



(b)

图 3 基线 B1~G2 载波相位残差图

Fig.3 Residual result of carrier phase for vector B1-G2

基线解算完毕后,还需要通过同步环闭合差、异步环闭合差和重复基线较差检验,只有质量合格的基线才能用于后续的处理。表 3 (以时段

B1B2G1G2 和 B1B2G13G14 为例) 为基线向量解算成果检验表。

### 3.3 基线解算结果及观测质量分析

由图 3 (b)中可以看出, 观测值残差振幅多分布在 0.04 周范围内, 观测质量好。时段 B1B2G8G9

最终基线解算结果见表 4, 水平 N(North)、E(East) 方向上的中误差相当, 最大为 0.8 mm, 高程 U(Up) 方向的中误差稍大, 大约为水平中误差 2 倍, 最大为 1.7 mm。整个观测时段基线向量中误差较小, 观测精度高。

表 2 GPS 载波相位中误差  
Table 2 RMS of GPs carrier phase

卫星号	g 05~g 14		g 22~g 14		g 30~g 14		g 25~g 14		g 01~g 14		g 18~g 14		g 06~g 14	
载波	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2	L1	L2
历元数 / 个	446	484	472	468	479	487	482	478	386	349	207	195	85	85
RMS / 周	0.015	0.018	0.015	0.011	0.012	0.010	0.019	0.013	0.024	0.016	0.032	0.023	0.032	0.024

表 3 基线向量解算成果检验表  
Table 3 Verify for baseline vector solution results

状态	闭合环		环闭合差 / mm				限差 / mm
	闭合基线	环长 / m	dN	dE	dPlan	dU	
同步闭合环	B1B2G1	2 505.872 7	0.9	0.5	1.0	0.2	6.0
	B1B2G2	2 512.292 2	0.5	0.1	0.5	1.1	6.0
	B1G2G1B2	2 523.276 8	0.7	0.9	1.1	1.8	6.5
异步闭合环	B1B2G1	2 505.872 5	0.7	1.6	1.8	4.7	6.0
	B1B2G2	2 512.292 0	2.0	2.0	2.8	5.6	6.0
	B1G2G1B2	2 523.276 6	0.9	1.2	1.5	2.7	6.5
	B2G2G1B1G13G14	3 894.459 5	1.1	1.3	1.7	1.9	8.8
重复基线	基线	同步闭合环基线长 / m	异步闭合环基线长 / m		较差 / mm		
	B1B2	1 245.3 500	1 245.349 8		0.2		

注: 限差求解公式:  $T=[(基线数)^2 \times 0.002 + 闭合环长度 \times 10^{-6}] m$ 。

表 4 基线向量解算成果表  
Table 4 Baseline vector solution results

编号	基线 起止	相对坐标						中误差  / mm		
		$\Delta N / m$	$\Delta E / m$	$\Delta U / m$	距离 / m	方位角	高度角	s(N)	s(E)	s(U)
1	B1~G8	67.5 687	-1 289.3 294	-41.369 5	1 291.761 3	272°59'59.65"	-1°50'06.90"	0.8	0.8	1.7
2	B1~G9	154.9 773	-1 185.1 614	-40.585 8	1 195.940 1	277°26'59.98"	-1°56'41.22"	0.7	0.8	1.6
3	B2~B1	946.8 585	808.901 2	5.882 2	1 245.350 0	40°30'26.15"	0°16'14.27"	0.5	0.5	1.1
4	B2~G8	1 014.283 4	-480.440 7	-35.334 6	1 122.872 5	334°39'15.31"	-1°48'11.83"	0.7	0.7	1.4
5	B2~G9	1 101.703 1	-376.282 0	-34.575 7	1 164.703 1	341°08'33.42"	-1°42'04.14"	0.7	0.8	1.5
6	G9~G8	-87.423 9	-104.154 3	-0.765 3	135.984 0	229°59'27.37"	-0°19'20.91"	0.6	0.5	1.1

## 4 GPS 监测网平差计算

### 4.1 GPS 监测网三维网平差计算

(1) 提取基线向量, 构建 GPS 基线向量网。要进行 GPS 控制网平差, 首先必须提取基线向量, 构建 GPS 基线向量网。提取基线向量时需要遵循以下几项原则: ① 必须选取相互独立的基线; ② 选取的基线应构成闭合几何图形; ③ 选取质量好的基线向量; ④ 选取能构成边数较少的异步环的基线; ⑤ 选取边长较短的基线向量。

(2) 三维无约束平差, 构成 GPS 基线向量网后, 需要进行三维无约束平差, 就是在 GPS 网平差时提供一个位置基准 (B1 点), 网不会因为该基准而产生变形, 从而达到以下几个目的: ① 判别所构

成的 GPS 网中是否有粗差基线, 使得最后用于构网的所有基线向量均满足质量要求; ② 调整各基线向量观测值的权, 使得它们相互匹配。

(3) 约束平差。以国家大地坐标系或地方坐标系某些点的固定坐标、固定边长及固定方位为网的基准, 将其作为平差中的约束条件, 进行约束平差, 具体步骤: ① 指定进行平差的基准和坐标系统; ② 指定起算数据; ③ 检验约束条件的质量; ④ 进行平差计算, 求得监测点三维坐标。

### 4.2 平差结果及其不确定度分析

图 4 为 2004 年 10 月监测网三维平差后基线向量 NEU 残差分布柱状图。可以看出, 平差后 NEU 残差的误差分布成高斯正态分布, 均值  $\mu$  趋近于

0,  $\mu$  和均方差  $\sigma$  的置信区间小, 观测质量好, 残差正态分布特征见表 5。图 5 表明, 平差后水厂铁矿 GPS 监测网基线精度较高。

表 5 残差正态分布特征表

Table 5 Properties of residuals normal distribution

方向	置信度 $\alpha$	均值 $\mu$	均方差 $\sigma$	$\mu$ 的置信区间	$\sigma$ 的置信区间
N	0.95	0.226	0.954	-0.061~0.513	0.790~1.205
E	0.95	-0.077	0.791	-0.315~0.160	0.655~0.999
U	0.95	0.030	0.740	-0.192~0.253	0.613~0.935
NEU	0.95	0.060	0.837	-0.083~0.202	0.747~0.950

### 4.3 监测结果

GPS 监测系统采用 WGS-84 坐标系, 而水厂铁矿在生产 and 建设过程中一直沿用北京 54 坐标系, 为

满足生产, 需要进行坐标系的转换。WGS-84 系为 1984 年世界大地坐标系, 使用 WGS-84 椭球, 长半径  $a=6\ 378\ 137\ \text{m}$ , 扁率  $\alpha=1/298.3$ , 而北京 54 坐标系, 参考椭球为 Krassovsky 椭球, 长半径  $a=6\ 378\ 245\ \text{m}$ , 扁率  $\alpha=1/298.3$ 。水厂铁矿生产所采用的北京 54 坐标系中央子午线为  $118^{\circ}30'00''$ , E 向偏移量为  $5 \times 10^5\ \text{m}$ <sup>[8]</sup>。

表 6 为监测网三维平差后部分监测点在 WGS-84 和北京 54 坐标系下的最终成果。图 6 为现场 16 期监测, 监测点水平位移变化矢量结果。从表 6 可以看出, 平差后监测点坐标中误差的绝对值较小, 水平 N 和 E 方向上最大为 0.7 mm, 高程 H 方向上为 1.4 mm, 高程 H 方向上中误差比水平 N 和 E 方向普遍偏大近一倍。

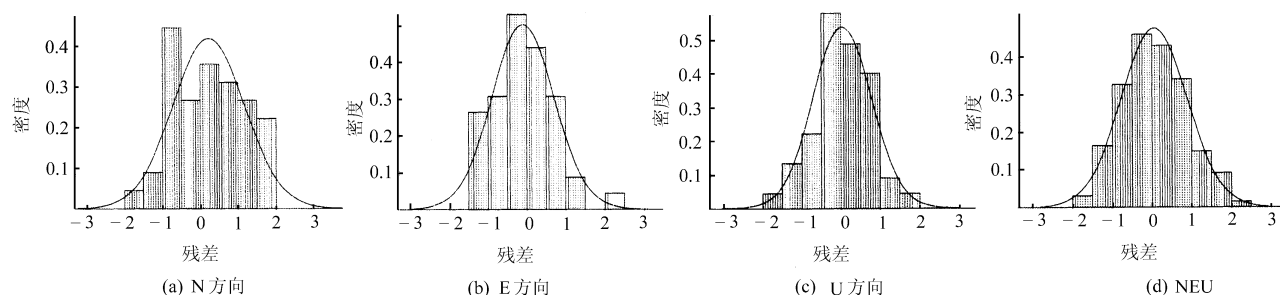


图 4 残差的误差分布成高斯正态分布

Fig.4 Residuals distribution appears normal

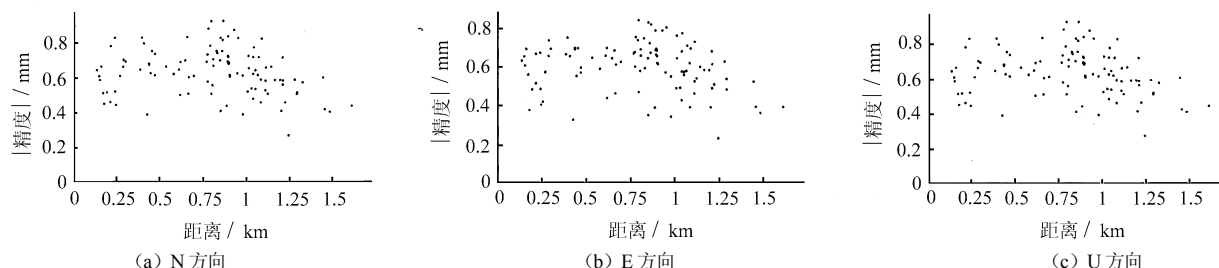


图 5 平差后基线精度图

Fig.5 Accuracy

表 6 WGS-84 和北京 54 坐标系下监测结果

Table 6 Monitoring results under WGS-84 and BJ-54 coordinates

点号	WGS-84 坐标系下监测成果 (BLH)			水厂北京 54 坐标系下监测成果 (NEH)			中误差 /mm		
	纬度	经度	椭球高 / m	N 向 / m	E 向 / m	H 向 / m	S(N)	S(E)	S(H)
G2	40°08'31.09074"N	118°34'05.49958"E	101.331 2	4 445 370.947 6	505 811.3982	102.5718	0.4	0.3	1.0
G3	40°08'36.26483"N	118°34'10.13608"E	97.440 7	4 445 530.623 4	505 921.0273	98.6742	0.4	0.3	0.9
G4	40°08'41.95269"N	118°34'15.26879"E	81.477 6	4 445 706.157 4	506 042.3849	82.7032	0.7	0.5	1.4
G8	40°08'51.35589"N	118°33'38.01586"E	106.816 6	4 445 995.539 7	505 160.3851	108.0775	0.6	0.4	1.1
G9	40°08'54.19030"N	118°33'42.41634"E	107.582 7	4 446 083.036 9	505 264.4828	108.8377	0.5	0.4	1.1
G10	40°08'56.84811"N	118°33'47.86750"E	105.406 9	4 446 165.105 9	505 393.4505	106.6550	0.5	0.4	1.1

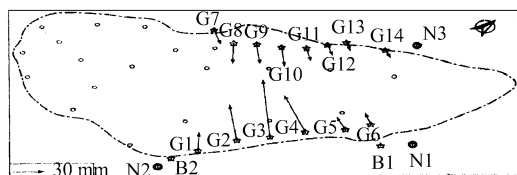


图 6 水厂铁矿 GPS 监测点水平位移矢量图

Fig.6 GPS monitoring points' Vector of level displacement

## 5 结论

从 GPS 边坡变形监测现场实践和数据处理, 得出以下结论:

- (1) 相对其他常规仪器, GPS 具有监测范围广、

测站间无需通视, 可提供三维坐标, 操作简便, 全天候作业等优势<sup>[3,9]</sup>;

(2) 从监测结果可以看出, GPS 变形监测中误差小, 观测质量好, 精度高, 完全能达到矿山变形监测的精度和要求;

(3) 水厂铁矿已进行的 16 期 GPS 边坡变形监测表明监测结果与水厂铁矿边坡的现场情况吻合<sup>[3]</sup>。GPS 定位技术具有良好的可靠性, 适合在边坡变形监测领域中推广使用。

### 参 考 文 献

- [1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] REMONDI B. W. Pseudo-kinematic GPS results using the ambiguity function method[J]. *Navigation*, 1991, 38(1): 17—36.
- [3] 苗胜军. 复杂岩体边坡变形与失稳预测研究[博士学位论文 D]. 北京: 北京科技大学, 2006.
- [4] VINCENZO Rizzo. GPS monitoring and new data on slope movements in the Maratea Valley (Potenza, Basilicata)[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, (27): 1 535—1 544.
- [5] ELLIOTT D Kaplan. GPS 原理与应用[M]. 邱致和, 王万义译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [6] 高成发. GPS 测量[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [7] Yu-ping Gao, Zheng-ming Wang. Application of network adjustment to the GPS common-view time links for TAI computations[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2003,27(2): 217—225.
- [8] 苗胜军, 蔡美峰, 张丽英, 等. 水厂铁矿边坡变形 GPS 监测及数据处理[J]. *金属矿山*, 2005, 346: 11—13. MIAO Sheng-jun, CAI Mei-feng, ZHANG Li-ying, et al. GPS monitoring and data processing of slope deformation in Shuichang Iron Mine[J]. *Metal Mine*, 2005, 346: 11—13.
- [9] 熊春宝, 唐立刚, 匡绍君, 等. 大范围地面沉降的差分 GPS 监测法[J]. *岩土力学*, 2003, 4(6): 931—934. XIONG Chun-bao, TANG Li-gang, KUANG Shao-jun, et al. Method of differential GPS to monitor large-scale land subsidence[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 4(6): 931—934.

## 高速路穿越坎儿井 千万元加固“地下长城”

正在建设中的连云港至霍尔果斯国道主干线新疆星星峡—吐鲁番段高速公路下面, 有 200 多条坎儿井与之垂直交错。为避免这些“地下长城”遭受损坏, 新疆交通部门近日斥资千万余元, 正在对坎儿井内壁进行加固。新疆维吾尔自治区交通厅介绍, 这些坎儿井地下潜流, 至今仍在浇灌着吐鲁番和哈密地区的大片绿洲良田, 对当地农业生产和居民生活具有重要意义。星星峡—吐鲁番段高速公路的建设, 不可避免地要穿过大量坎儿井。如果不对其进行加固而直接修筑路基, 坎儿井的暗渠内壁会松动, 从而造成暗渠塌方、淤堵, 路面也会随之沉陷。为此, 公路设计部门在设计伊始就摸清了这些地下潜流的分布和走向, 并在设计方案中提出了加固措施, 以保证高速公路与坎儿井和谐共存。坎儿井是古代新疆农民智慧的结晶, 已有 2000 多年历史。当地农民巧妙利用山地坡度, 在地下挖掘坎儿井, 将北部天山雪水融化渗入戈壁滩形成的地下潜流引用灌溉农田, 避免水分大量蒸发, 保证了充沛的流量, 使吐鲁番、哈密地区成为瓜果飘香的绿洲。目前世界上大约有 40 多个国家有坎儿井, 我国新疆留存最多, 达 600 余条, 主要分布在吐鲁番、哈密地区。随着近年来当地社会经济的发展, 地下水位的不断下降, 新疆坎儿井由 50 年前的 1 700 多条, 正以平均每年 20 余条的速度消失, 拯救和保护坎儿井已经成为当地农业发展和群众生活的当务之急。目前, 新疆坎儿井总长度为 5 000 多公里, 与万里长城、京杭大运河被誉为我国古代三大工程。2006 年, 星星峡——吐鲁番高速公路开工建设, 全长 586 公里, 预计 2008 年底建成通车。

(信息来源: 中国公路网, 编辑部编辑)