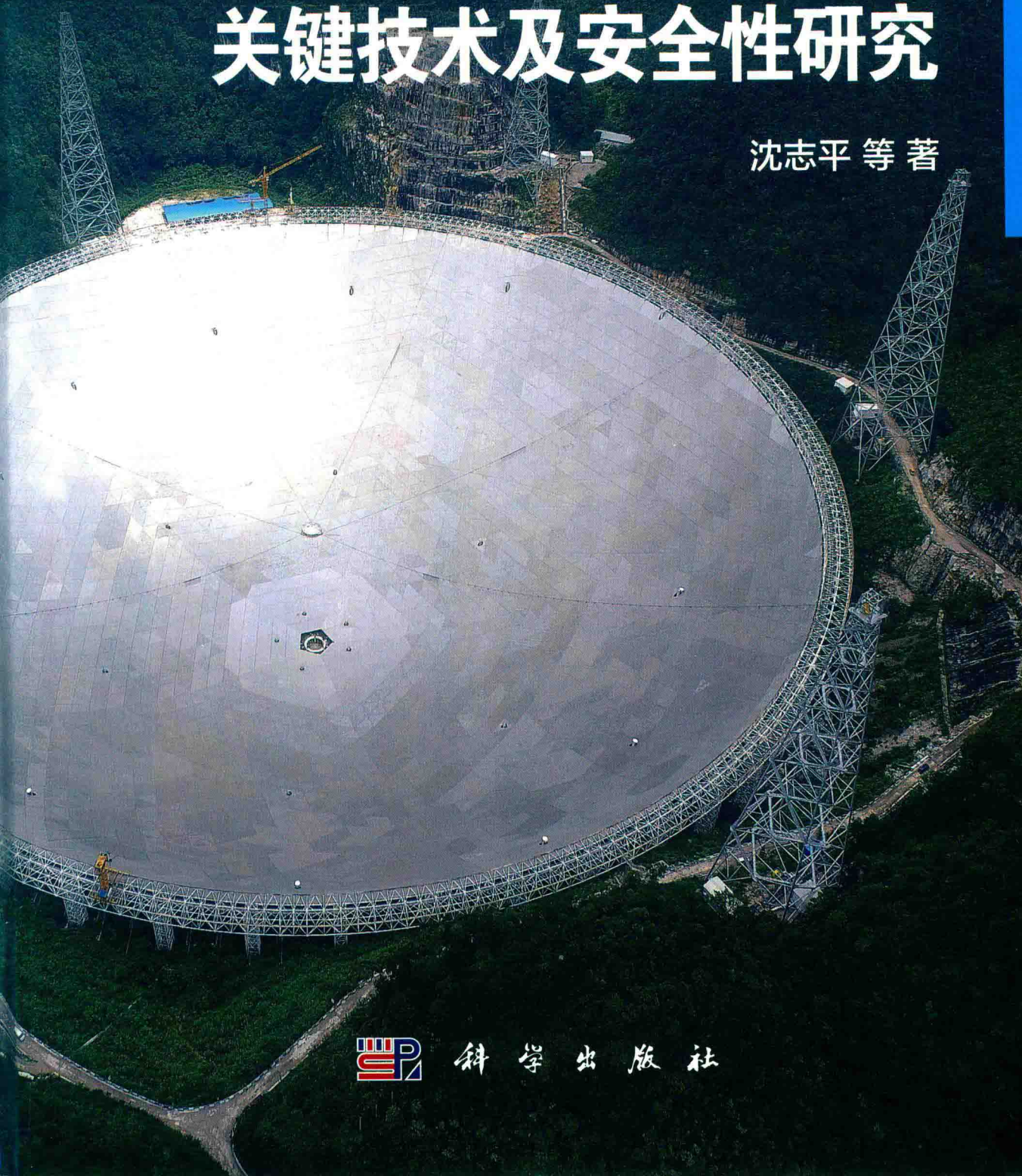


FAST开挖系统 关键技术及安全性研究

沈志平等 著



科学出版社

FAST 开挖系统关键技术及安全性研究

沈志平等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对 FAST 开挖系统的设计、建造及安全性进行了系统研究。全书分为 3 篇 10 章, 涉及 FAST 工程选址、开挖系统建造、台址开挖中心最优化选择、溶塌巨石混合体稳定性分析及加固、拉应力作用下的大型球冠形边坡稳定性评价、岩溶洼地生态及防排水综合治理、岩溶洼地超高边坡稳定性及动力响应特征分析、开挖系统长期稳定性监测和预警系统的建立等问题。第一篇介绍 FAST 工程概况, 选址阶段的研究成果和开挖系统建造过程中开展的相关工作; 第二篇介绍 FAST 开挖系统建造过程中遇到的 5 个岩土工程技术难题及所采用的关键技术, 该篇也是本书的核心内容; 第三篇介绍 FAST 开挖系统长期稳定性分析研究成果, 并提出建立开挖系统灾害预警系统的工作架构。

本书图文并茂, 理论与实践相结合, 可供岩土工程、工程地质、水文地质、地质灾害防治等领域的工程技术人员, 以及科研人员、高校教师、研究生等参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

FAST 开挖系统关键技术及安全性研究 / 沈志平等著. — 北京: 科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057706-1

I . ① F… II . ① 沈… III . ① 射电望远镜—基础开挖—研究
IV . ① TU244. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 115532 号

责任编辑: 张井飞 韩 鹏 姜德君 / 责任校对: 张小霞
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 279 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书其他作者名单

(以贡献程度排序)

宋二祥	朱博勤	聂跃平	徐明	余能彬	朱军
陈德茂	闫金凯	吴斌	李颀	石雅镠	杨振杰
王文沛	孙洪	袁江文	余永康	连江波	姚亮
王鸿	付君宜	孙玉进	孔郁斐	王蕴嘉	杜小平
姜鹏	潘高峰	高晓芬	蔡聪	谢涛	李振庆

序 一

具有中国独立自主知识产权的 500m 口径球面射电望远镜 (FAST), 是世界已建造的口径最大、最具威力的单天线射电望远镜, 其设计综合体现了我国科技创新能力。FAST 工程不仅在规模上是独一无二的, 而且台址开挖系统的建造也独树一帜。台址开挖系统是 FAST 工程建造的基础平台。台址大窝凼洼地发育在碳酸盐岩地下河系统中, 岩溶峰丛、洼地、落水洞极为发育。洼地内大量厚度较大的古岩溶作用遗留的巨石堆积体、周围山体斜坡上的危岩体, 以及周围高陡的地形都给 FAST 台址开挖带来了前所未有的难题。

当时台址开挖系统设计采用全国公开招标方式, 沈志平的汇报与台址开挖系统需要达到的目标相当接近, 得到了 FAST 总工程师南仁东教授的好评和中国科学院国家天文台的认可, 最终他的团队成为 FAST 工程台址开挖系统的核心技术团队。沈志平带领的技术团队不仅圆满地完成了台址开挖系统的全部设计任务, 同时进行了大量的科学研究工作, 取得了很好的研究成果, 为 FAST 工程的顺利实施和精准运行做出了很好的贡献。

该书主要从多目标方法下的台址开挖中心最优化选择技术, 溶塌巨石混合体稳定性分析及加固技术, 台址球冠形边坡稳定性评价技术, 岩溶洼地生态及防排水综合治理技术, 超高边坡稳定性及动力响应特征分析等几个方面阐述了 FAST 台址开挖系统中的关键技术, 并通过后期台址开挖系统安全性专题研究及灾害预警系统建立对台址的安全性做出评价。

该书由贵州正业工程技术投资有限公司 FAST 台址开挖系统核心技术团队领头人沈志平牵头, 联合中国科学院国家天文台、清华大学土木工程系、中国科学院遥感与数字地球研究所、中国地质环境监测院的专家、教授共同完成。该书全面系统地反映了 FAST 工程台址开挖系统建设的研究成果及工程应用, 是迄今为止国内外大型岩溶洼地综合利用岩土工程方面集学术研究与工程应用为一体的第一本专著, 其中凝聚着很多科研工作者和工程技术人员的心血。我很高兴为本书作序, 并由衷地祝愿 FAST 能不断为天文科学的发展做出贡献, 早日实现南仁东先生重树中国天文强国的梦想, 告慰他的在天之灵。

中国科学院国家天文台台长



2018 年 4 月 8 日

序 二

坐落于贵州平塘大窝凼洼地的 500m 口径球面射电望远镜 (FAST) 工程堪称世界上最大的单口径射电望远镜。FAST 观测台址建设利用了天然喀斯特洼地带来的得天独厚的地形地貌条件。但是, 由于洼地发育在贵州碳酸盐岩地下河系统中, 遇到了复杂的工程地质和水文地质问题, 其中涉及台址开挖中心的多参数优选与精确定位, 大型喀斯特洼地陡崖斜坡危岩体, 溶塌巨石混合体安全性评价及加固, 台址开挖形成的高陡边坡群稳定性评价及加固, 台址洪涝淹没灾害治理和排水工程设施及生态保护等工程技术问题。

在沈志平教授级高工的带领下, 贵州正业工程技术投资有限公司联合国内多家科研单位一起协作攻关, 通过台址开挖系统关键技术及安全性研究, 有效地解决了台址开挖过程中遇到的各种复杂喀斯特工程地质问题, 为 FAST 工程的建造及运行提供了安全可靠的措施, 保障了基础安全, 也成功展示出喀斯特洼地综合利用的一个新示范。该书正是在此基础上凝炼而成。

该书中包含了台址开挖系统关键技术及安全性研究成果, 凝聚了沈志平及其团队的辛劳和智慧。其中内容涉及喀斯特洼地综合利用理论、喀斯特溶塌巨石混合体治理理论及方法、喀斯特洼地生态防排水技术、喀斯特洼地地球冠形边坡的稳定性分析及治理等关键技术问题。不仅创新了喀斯特洼地综合利用的各种关键技术及安全性评价方法, 也丰富和发展了喀斯特地区开挖建设理论, 而且对喀斯特地区开发和促进地方经济可持续发展, 具有极重要的指导意义。

我很高兴能看到这样一部高水平的喀斯特洼地综合利用研究的学术专著问世, 为此欣然作序。祝愿“中国天眼”取得更多更好的具有国际前沿水平的科技成果。

中国工程院院士



2018 年 3 月 1 日

前 言

大型射电望远镜建造设想始于 1993 年在日本东京召开的国际无线电科学联盟大会上,包括中国在内的 10 个国家的射电天文学家提出了“建造接收面积一平方千米的巨型射电望远镜”的国际合作计划,名为 Square Kilometre Array (SKA)。随后,中国科学院北京天文台(现国家天文台)开始主持 SKA 单元工程概念的预研究,并提出了利用贵州喀斯特洼地作为台址建造世界上最大的射电望远镜,即 500m 口径球面射电望远镜(five-hundred-meter aperture spherical telescope, FAST)的计划。2005 年 12 月中国科学院国家天文台正式选定贵州省平塘县克度镇大窝凼洼地为 FAST 工程的台址,2009 年 7 月贵州正业工程技术投资有限公司联合国内多家相关科研院所、高等院校,共同承担了 FAST 开挖系统的设计研究和后期安全性评价工作,取得了一批原创性科研成果。本书就是在此研究成果的基础上凝练而成的。

本书共分 3 篇 10 章,其中,第一篇共 3 章,对 FAST 工程基本概况及开挖系统建造进行了介绍;第二篇共 5 章,对 FAST 开挖系统建造过程中遇到的精确定位最优开挖中心、溶塌巨石混合体的评价及治理、大型球冠形边坡稳定性评价、岩溶洼地积水及生态保护、洼地内超高边坡稳定性评价及治理 5 个关键技术问题进行了研究;第三篇共 2 章,开展了 FAST 开挖系统长期稳定性分析研究,提出了开挖系统灾害预警系统建立的工作架构。各章节及主要研究人员如下。

绪论——由沈志平主笔,宋二祥、朱博勤、聂跃平等参与编写。介绍了 FAST 工程背景,开挖系统关键技术问题,以及与 Arecibo 台址开挖的技术难点比较。

第 1 章 FAST 工程概况——由聂跃平主笔,朱博勤、杨振杰、孙洪等参与编写。介绍了 FAST 工程选址、建造历程,以及大窝凼场地条件。

第 2 章 FAST 开挖系统建造多因素影响分析——由朱博勤主笔,李颀、石雅镠、姜鹏等参与编写。介绍了影响开挖系统建造的多因素指标,以及台址最优化开挖原则。

第 3 章 FAST 开挖系统建造——由朱军主笔,袁江文、余永康、姚亮等参与编写。介绍了 FAST 开挖系统建造时遇到的各种关键技术难题及其治理方案和施工技术。

第 4 章 多目标方法下的开挖中心最优化选择技术——由沈志平主笔,吴斌、姜鹏、杜小平等参与编写。分析了影响 FAST 台址开挖中心选择的多种因素,采用多属性决策的数学评价模型和 BIM(building information modeling)技术,精确求解出了最优开挖中心、馈源塔塔基、圈梁柱基和索网节点的空间坐标。

第5章 溶塌巨石混合体稳定性分析及加固技术——由闫金凯主笔,王文沛、连江波、李振庆等参与编写。通过数值试验研究了土颗粒粒径尺寸与主动土压力的关系,提出了多种溶塌巨石混合体加固结构。

第6章 下拉索拉应力作用下的大型球冠形边坡稳定性评价——由徐明主笔,宋二祥、付君宜、孔郁斐、高晓芬等参与编写。研究了多种不同外形边坡的稳定性,分析了下拉索拉应力作用下的FAST台址区局部球冠形边坡的稳定性。

第7章 岩溶洼地生态及防排水综合治理技术——由余能彬主笔,余永康、王鸿、蔡聪等参与编写。介绍了大型岩溶洼地工程建造的生态保护措施,并结合FAST工程所在区域的地质条件特点,研发了大型岩溶洼地防排水综合治理成套技术。

第8章 超高边坡稳定性及动力响应特征分析——由宋二祥主笔,徐明、孙玉进、王蕴嘉等参与编写。以FAST台址区两处超高边坡为例,研究了该两处边坡在加固前后及地震动力响应作用下的稳定性问题。

第9章 开挖系统长期稳定性分析研究——由吴斌主笔,朱博勤、姜鹏、潘高峰等参与编写。采用现场监测手段对FAST台址区布设的97个变形监测点进行长期监测,对台址区高边坡、危岩和溶塌巨石混合体的长期稳定性进行了评价。

第10章 开挖系统灾害预警系统建立——由陈德茂主笔,潘高峰、蔡聪等参与编写。介绍了影响FAST开挖系统安全的多种因素,以监测变形数据、降水量为判据,提出了开挖系统的灾害预警系统。

全书由沈志平统稿,前言和后记由沈志平执笔完成。

衷心感谢FAST工程首席科学家兼总工程师南仁东教授的关怀、鼓励、支持,在台址开挖建设中,给予了大量的指导。诚挚感谢FAST系统总工程师(地质)殷跃平研究员,他对项目的重大地质与工程问题亲自把关,提出了大量的宝贵意见和建议。衷心感谢中国科学院国家天文台严俊台长和中国工程院卢耀如院士为本书专门作序,并对本书的撰写提供了大力支持。诚挚感谢中国工程院钱七虎院士、中国科学院何满潮院士、中国工程院任辉启院士、中国工程院郑健龙院士、重庆大学刘汉龙教授、天津大学郑刚教授、长安大学彭建兵教授、大连理工大学唐春安教授、中国科学院地质与地球物理研究所李晓研究员、军事科学院张福明教授级高工、北京科技大学方祖烈教授对本书撰写提出的宝贵意见。

本书凝聚了全体执笔作者和参研人员的共同心血,在即将付梓之际,特向大家致以衷心的感谢。

沈志平

2018年3月30日

目 录

序一

序二

前言

绪论..... 1

 0.1 研究背景 1

 0.2 关键技术问题 2

 0.3 FAST 与 Arecibo 台址开挖技术难点比较 7

 0.4 研究内容 8

 0.5 技术路线 8

 0.6 主要成果 9

第一篇 FAST 工程基本概况及开挖系统建造

第 1 章 FAST 工程概况 11

 1.1 工程简介 11

 1.2 选址研究 13

 1.3 FAST 开挖系统建造历程 15

 1.4 大窝凼场地条件 17

第 2 章 FAST 开挖系统建造多因素影响分析 29

 2.1 开挖系统建造需求及多因素指标选取 29

 2.2 开挖最优化原则分析 29

 2.3 多因素影响分析 30

 2.4 本章小结 31

第 3 章 FAST 开挖系统建造 32

 3.1 概述 32

 3.2 球冠形开挖及曲面暗渗排水填方工程 34

 3.3 高能量高冲击崩塌型破坏超高边坡优化设计及防护 37

3.4 复杂地质条件下的洼地地质灾害危险源的评估及治理 41

3.5 多干扰源下的检修道路最优化选线技术 48

3.6 利用微地形地貌单元切分小区分流地表水防排水系统 55

3.7 下拉索促动器基础定位技术 61

3.8 本章小结 64

第二篇 FAST 开挖系统关键技术

第 4 章 多目标方法下的开挖中心最优化选择技术..... 65

4.1 概述 65

4.2 多目标方法的应用研究 66

4.3 球冠构筑物球心和索网节点连线与地面交点坐标解析技术 84

4.4 球冠形体岩土开挖剖面信息表达技术 85

4.5 本章小节 88

第 5 章 溶塌巨石混合体稳定性分析及加固技术..... 89

5.1 概述 89

5.2 溶塌巨石混合体主动土压力研究 89

5.3 溶塌巨石混合体整体补强加固结构 97

5.4 溶塌巨石混合体微型组合桩群支挡结构 101

5.5 本章小结 105

第 6 章 下拉索拉应力作用下的大型球冠形边坡稳定性评价..... 106

6.1 概述 106

6.2 外形对边坡稳定性的影响 106

6.3 下拉索拉应力对球冠形边坡稳定性影响研究 109

6.4 本章小结 112

第 7 章 岩溶洼地生态及防排水综合治理技术..... 113

7.1 概述 113

7.2 台址区周边生态环境保护技术 113

7.3 岩溶洼地防排水治理技术 118

7.4 综合治理效果评价 126

7.5 本章小结 126

第 8 章 超高边坡稳定性及动力响应特征分析..... 128

8.1 概述 128

8.2 超高边坡稳定性分析	128
8.3 地震作用下超高边坡动力响应特征	133
8.4 本章小结	137

第三篇 FAST 开挖系统安全性研究专题篇

第 9 章 开挖系统长期稳定性分析研究	138
9.1 概述	138
9.2 监测方法	138
9.3 监测测点布设整体情况	142
9.4 长期监测结果分析	143
9.5 锚索应力计监测	152
9.6 本章小结	159
第 10 章 开挖系统灾害预警系统建立	161
10.1 概述	161
10.2 开挖系统安全控制因素分析	161
10.3 开挖系统预警系统建立	163
10.4 本章小结	169
参考文献	170
后记	173

绪 论

0.1 研究背景

1994 年起，大射电望远镜的选址工作正式展开。2006 年 12 月，中国科学院国家天文台正式选定大窝凼为 500m 口径球面射电望远镜（FAST）工程的台址。大窝凼位于贵州省黔南布依族苗族自治州平塘县克度镇金科村，北东距平塘县城约 85km，西南距罗甸县城约 45km，如图 0.1 所示。



图 0.1 FAST 台址地理位置图

2009 年 7 月，贵州正业工程技术投资有限公司联合中国科学院国家天文台、清华大学土木工程系、中国科学院遥感与数字地球研究所和中国地质环境监测院组成 FAST 台址开挖系统技术团队，承担 FAST 开挖系统的设计研究工作；2014 年 9 月，联合申报了贵州省科技计划项目“国家天文台 500 米口径球面射电望远镜台址岩土工程安全性研究”（黔科合 SY 字 [2014]3086）。研究成果系统地解决了大型岩溶洼地，薄壳岩溶岩体精细开挖建设过程中，遇到的各种复杂岩土工程技术难题。通过台址开挖系统使用 4 年中的监测数

据分析,论证了 FAST 工程使用的安全性。研究成果为 FAST 台址建设和正常运行提供了技术保障,项目团队将研究成果系统总结成专著《FAST 开挖系统关键技术及安全性研究》。

0.2 关键技术问题

FAST 是世界上利用大型岩溶洼地建设的最大工程,关键技术问题涉及望远镜开挖中心的多参数最优化比选与精确定位,大型岩溶洼地深切斜坡危岩体和溶塌巨石混合体的空间分布状况和对 FAST 的危害性,望远镜开挖形成的高陡边坡群的稳定性及工程加固,台址洪涝淹没灾害及生态保护。

0.2.1 精确定位最优开挖中心

FAST 工程是在岩溶洼地内修建一个口径 500m、张角约 120° 的球面射电望远镜。望远镜反射面系统包括以下几个组成部分:①内径为 500m 的圈梁;② 4355 块边长为 11m 的背架及面板;③ 6670 根主索构成的索网;④ 2225 个索节点、下拉索、促动器及地锚。这些组成部分对 FAST 台址区岩土也有相应的要求。正确处理好相应的工程矛盾,才能保证 FAST 开挖系统的顺利进行。

大射电望远镜主动反射面在洼地中的不同几何位置将反映不同的挖填工程量及不同的地质灾害治理面积,因此,如何最优化确定台址开挖中心是首要而又必须解决的关键技术难题。事实上,FAST 台址岩土工程开挖问题与边坡稳定性、不良地质体治理甚至上部结构的建设和望远镜工作性能等问题都不是相互独立的,而是彼此密切相关的。台址的开挖要如何在设计标高下充分利用开挖线与地形的结合来控制挖填方量,如何按工程构筑物不同,分步、分别确定开挖形式,在开挖过程中如何确保溶塌巨石混合体、块石的稳定,以及合理设置开挖坡度保证开挖质量等都是需要考虑的一系列难题。在最优化定位开挖中心的基础上,需进一步解决以下几个相关的技术问题:①最优化定位 50 个支撑柱的平面位置;②最优化地定位 6 个馈源塔塔基的空间坐标;③精确求解球心和 2225 个索网节点连线与洼地地面的三维交点坐标;④平面表达球冠形体岩土开挖中的多要素、多维度信息。

0.2.2 成层分布、厚度变化较大、形态各异的危岩及溶塌巨石混合体

1) FAST 危岩及溶塌巨石混合体特征

(1) 不稳定斜坡危岩。FAST 台址区受北东、南东两组共轭节理切割破坏、卸荷裂隙的切割及树木根劈作用的影响,陡坡和石崖上常见松动危岩体分布。现场调查发现单体超

过 1000m^3 的危岩块就有 5 处，其余多数为小于 10m^3 的危岩块，不时出现松动岩块的塌落，对工程建设造成一定的不良影响。洼地内危岩总方量达到 115764m^3 之多，其中处于不稳定状态的危岩就有 63 处。不稳定危岩多为近水平岩层面与近垂直结构面切割形成，未形成大规模滑移式危岩，其破坏类型为崩塌、倾倒、滑塌、滚落等一种方式或几种方式的组合，如图 0.2 所示。



图 0.2 FAST 台址不稳定斜坡危岩体现场照片

(2) 溶塌巨石混合物（岩堆）。在大窝凼洼地底部及缓斜坡地带还分布有溶塌巨石混合物，在陡斜坡区局部也分布有较大面积的溶塌巨石混合物及零星的崩落块石。斜坡区的这类溶塌巨石混合物大多未胶结，结构松散，厚度较小；洼地底部的溶塌巨石混合物大多已胶结、结构较为密实，厚度大，最大厚度超过 60m。洼地内 48 处溶塌巨石混合物大部分处于整体稳定的状态，15 处为不稳定状态，25 处为基本稳定状态。FAST 溶塌巨石混合物规模大、类型复杂、结构复杂。根据《岩土工程勘察规范》（GB50021—2001）（2009 年版）3.3 条规定，粒径大于 2mm 的颗粒质量超过总质量 50% 的土，应定名为碎石土，因此溶塌巨石混合物应归为碎石土一类。考虑到 FAST 台址溶塌巨石混合物中多含有大块石（图 0.3），有的直径甚至超过 1m，其局部物理力学性能和岩体密切相关，不能完全用岩石或者土体来解释，这就决定了溶塌巨石混合体的稳定性评价标准与碎石土有很大区别。在有关规范和

相应的手册中尚未有涉及溶塌巨石混合体的规定用来评价、解决实际工程问题。



(a) 架空的溶塌巨石混合物 (编号: WY15)

(b) 未胶结的溶塌巨石混合物 (编号: WY93)

图 0.3 FAST 台址溶塌巨石混合体现场照片

2) 溶塌巨石混合物稳定性分析

目前在实际工程中的稳定性问题,一般采用极限平衡法计算安全系数,由于岩体介质的复杂性,分析边界和工况的多变,用经典力学求解已经很难,甚至不可能实现。随着计算机技术的发展,数值分析方法在岩土工程领域获得了迅速的发展,为研究岩体工程问题提供了强有力的手段。常用的数值分析方法包括有限差分法、有限元法和边界元法,但是这几种方法与极限平衡法一样都是以连续介质为出发点,当溶塌巨石混合物粒径足够小时,可假设溶塌巨石混合物为连续介质,其计算结果符合工程实际;但当溶塌巨石混合物粒径较大时,已经无法将溶塌巨石混合物视为连续介质,其所得结果往往与工程实际误差较大。而 FAST 台址的溶塌巨石混合物中多为大块石,有的直径在 1m 以上。相对于 5 ~ 6m 的堆积厚度,已经无法将溶塌巨石混合物视为连续介质,基于连续介质假定的极限平衡法和有限元数值分析方法均不适用。因此需要寻求更为合理的分析方法,用来分析台址内溶塌巨石混合体的稳定性。

3) 支护结构

由于岩溶洼地内的溶塌巨石混合物治理问题通常伴随着复杂的地形,其支挡结构往往形式各异。FAST 工程中就出现“特殊”的支挡结构用于治理溶塌巨石混合物,这些特殊结构由于传力路径不明确,结构形式复杂等,目前尚无相关规范用于设计指导,如何对这类特殊结构进行合理的受力分析并加以设计,是 FAST 工程中需要解决的难题。

0.2.3 开挖形成的边坡群

1) 边坡总体分布

FAST 台址因工程建设的需要而开挖的土石方量达 88 万 m^3 左右,最终在大窝凼内部形成了一个“边坡群”,即边坡类型多、分布广、破坏形式复杂。FAST 边坡包括 1H 馈源塔边坡、3H 馈源塔边坡、5H 馈源塔边坡、7H 馈源塔边坡、9H 馈源塔边坡、挖方边坡 1、反射面高边坡、螺旋道路边坡、环形道路边坡等,如图 0.4 所示。

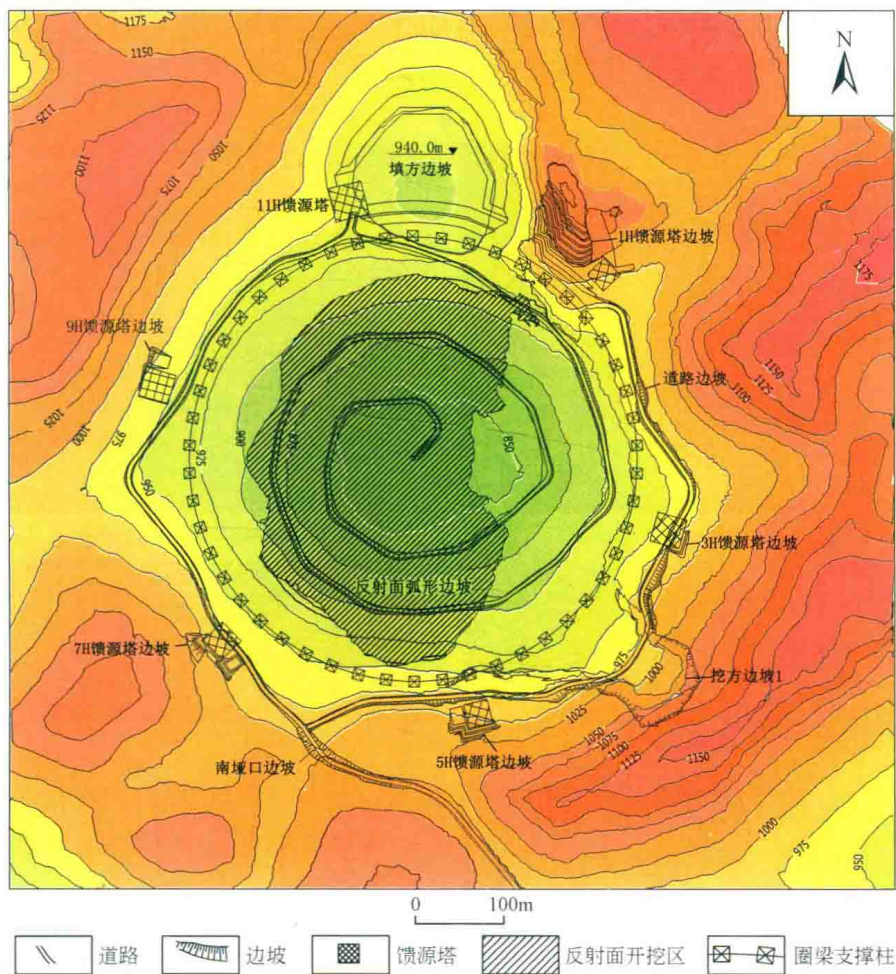


图 0.4 FAST 台址边坡分布图

2) 超高边坡稳定性

边坡工程在工程建设方面已经占据越来越重要的作用，国内外学者及工程技术人员在边坡工程方面展开过大量的研究。然而对于高边坡甚至超高边坡的稳定性评价方法目前尚无规范用于工程设计，特别是岩溶洼地内超高边坡的研究尚未见文献报道。FAST 台址位于岩溶洼地内，边坡自然坡度陡，无放坡条件，在大窝凼内部形成了两处高度 100m 以上的超高边坡，如图 0.5 所示，边坡裂隙极为发育，给 FAST 工程的边坡治理带来了技术难题。

3) “球冠形”超大规模边坡稳定性

由于拟合 FAST 主动反射面的需要，在岩溶洼地内，环状圈梁以下形成了一个上陡下缓的球冠形边坡。边坡坡顶直径达到 700m，最大坡高达到 135m。边坡呈现 360° 环状“凹坡”，其变形特征、破坏形式、稳定性评价与常见的长直边坡存在差异，其受力状态较为复杂。

台址区表面要承担反射面下拉索拉应力的作用，同时表面岩土分布极为复杂，有黏（沙）土夹块石区 1、黏土夹块石区 2、断层影响胶结较好区 3、断层影响胶结较差区 4、基岩破碎区 5、强风化基岩区 6、岩溶崩塌体区 7、董当断层区 8、小窝凼回填区 9、断层

影响破碎基岩区 10、断层影响强风化区 11、断层影响溶蚀区 12、残坡积溶塌巨石混合体区 13、中风化较完整基岩区 14 共 14 个分区（图 0.6），如此复杂的地质条件，给地锚下拉索的设计带来诸多影响。



图 0.5 FAST 台址超高边坡现场照片图

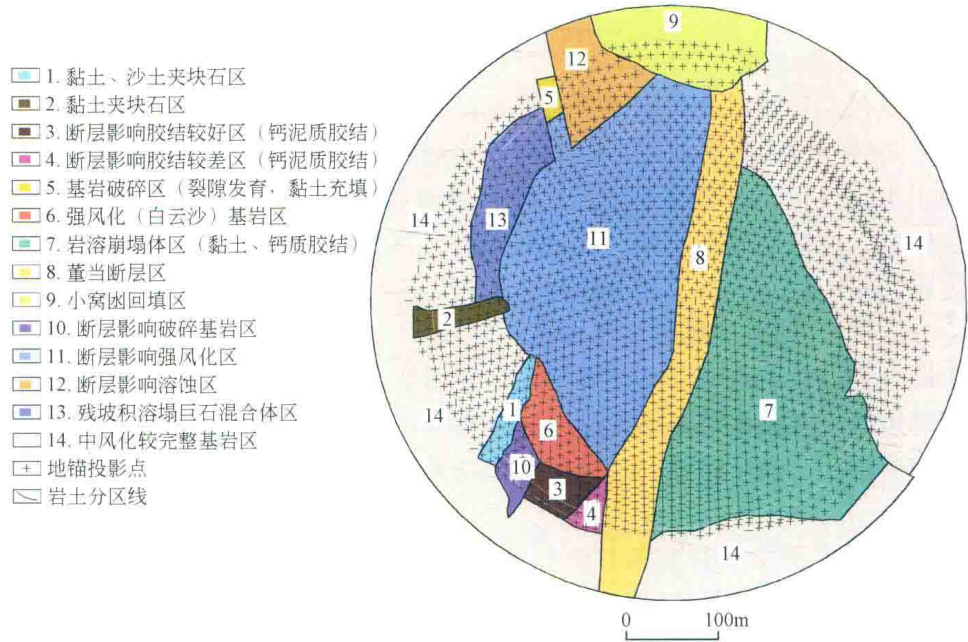


图 0.6 FAST 台址岩土工程分区平面图