申请代码	A030802
接收部门	
收件日期	
接收编号	1197030324

1197030324

国家自然科学基金

申 请 书

（2 0 1 9 版）

资助类别： 面上项目

亚类说明：

附注说明：

项目名称： 极端台址大望远镜的防护方法与关键问题研究

申 请 人： 郭永卫 电 话： 13611210779

依托单位： 中国科学院国家天文台

通讯地址： 北京市朝阳区大屯路甲20号

邮政编码： 单位电话： 010-64875793

电子邮箱： gyw@bao.ac.cn

申报日期： 2019年02月15日

国家自然科学基金委员会

（草稿）请于提交后重新下载PDF的正式稿

基本信息

申请人信息	姓名	郭永卫	性别	男	出生年月	1971年05月	民族	汉族
	学位	博士	职称	高级工程师		每年工作时间（月）		9
	是否在站博士后	否		电子邮箱		gyw@bao.ac.cn		
	电话	13611210779		国别或地区		中国		
	个人通讯地址	北京市朝阳区大屯路甲20号						
	工作单位	中国科学院国家天文台/中智天文联合研究中心						
	主要研究领域	天文技术与方法，机械、结构						
依托单位信息	名称	中国科学院国家天文台						
	联系人	李会贤		电子邮箱		lhx@nao.cas.cn		
	电话	010-64875793		网站地址		http://www.bao.ac.cn/		
合作研究单位信息	单位名称							
项目基本信息	项目名称	极端台址大望远镜的防护方法与关键问题研究						
	英文名称	Research on protective methods and key problems for large telescopes in extreme site						
	资助类别	面上项目		亚类说明				
	附注说明							
	申请代码	A030802.射电、毫米波和亚毫米波天文技术与方法		A030801.光学、紫外和红外天文技术与方法				
	基地类别	光学天文联合实验室						
	研究期限	2020年01月01日 -- 2023年12月31日		研究方向：毫米波和亚毫米波望远镜				
	申请直接费用	80.0000万元						
中文关键词		亚毫米波望远镜；极端环境技术；天文圆顶；可靠性；方案设计方法						
英文关键词		submilimeter telescope; extreme enviroment; enclosure; reliability; conceptual design method						

中文摘要	大望远镜含精密易损器件需要防护。传统圆顶与望远镜随动，由于圆顶转动惯量与半径成五次方关系，所产生的驱动控制问题，制约望远镜向大口径发展。非随动透明防护罩，如OSO等，波段受限；而无圆顶设计，如ALMA等，须整体提高防护等级。 完全开放型圆顶具有通用性防护功能，是诱人的解决方案，但由于圆顶打开时望远镜完全暴露，圆顶能否可靠开闭影响望远镜安全。如何保证方案设计的可靠性，使圆顶可靠开闭从而实现防护功能，准确评估望远镜安全性成为关键技术问题。可靠性设计与安全性评估虽然贯彻于航空航天领域，但在望远镜防护方面却应用很少。本申请拟借助LCT防护建设为契机，以中国在阿塔卡马高原的拟建项目为需求背景，研究圆顶开合机构的可靠性设计机理，通过探索如何分析来自设计方案的固有可靠性，和极限强风、低压、低温、干燥等极端环境因素带来的使用可靠性，建立通用的高可靠性完全开放型圆顶方案及其产生与评定的科学方法。
英文摘要	Large telescopes need protection for its precision or fragile. The traditional enclosure which follows the telescope movement has a crisis problem on driving control for that the relationship between the inericial and radius is 5th power. The problem limits the development of telescopes. The transparent non-follow-up protective cover such as OSO's has application limitations, or the non-dome design such as ALMA, increases protection levels of outside parts and expensive. Entirely open enclosures have usual protective functions. The reliability is so important that there is a possibility of totally no protection when this kind of enclosure is entirely open. The reliability is the key technology problem. To grasp the opportunity that LCT will build a new enclosure, and under the background that China will develop submilimeter telescope project on the Acatama plateau, we will research the nature of reliability for enclosure mechanism, the reliability influences from extreme environments such as strong wind, low pressure, low temperature, dry, and establish conceptions of high reliable enclosures, and methods of how to create them and how to judge their reliabilities.

项目组主要参与者（注：项目组主要参与者不包括项目申请人）

编号	姓名	出生年月	性别	职 称	学 位	单位名称	电话	电子邮箱	证件号码	每年工作时间（月）
1	程诚	1985-06-19	男	助理研究员	博士	中国科学院国家天文台	15101038975	chengcheng@bao.ac.cn	4**********2	3
2	赵保庆	1982-03-04	男	工程师	博士	中国科学院国家天文台	13488680575	bqzhao@bao.ac.cn	3**********9	3
3	马晓耘	1986-03-30	男	工程师	学士	中国科学院国家天文台	15652194344	xyma@bao.ac.cn	1**********6	3

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
6	1	3			1	1

（草稿）请于提交后重新下载PDF的正式稿

国家自然科学基金项目资金预算表（定额补助）

项目申请号：1197030324　　项目负责人：郭永卫　　金额单位：万元

序号	科目名称	金额
	(1)	(2)
1	**项目直接费用合计**	80.0000
2	1、 设备费	7.0000
3	(1)设备购置费	5.00
4	(2)设备试制费	1.00
5	(3)设备升级改造与租赁费	1.00
6	2、 材料费	3.00
7	3、 测试化验加工费	3.00
8	4、 燃料动力费	1.00
9	5、 差旅/会议/国际合作与交流费	27.00
10	6、 出版/文献/信息传播/知识产权事务费	10.00
11	7、 劳务费	27.00
12	8、 专家咨询费	2.00
13	9、 其他支出	0.00

(草稿) 请登录后重新下载PDF的正稿

预算说明书（定额补助）

请按照《国家自然科学基金项目预算表编制说明》的有关要求，对出的主要用途和测算理由，以及合作研究外拨资金、单价≥10万元的设备费等内容进行必要说明。）

（一）直接费用

（1） 设备费

a)设备购置费 预算 5 万

含购置仿真计算用图形工作站型计算机两台 2 万元 * 2 = 4 万元

b)测试设备研制 预算 1 万

c)仪器改造 预算 1 万

共计 7 万

（2） 材料费

样机研制，材料费用预计 3 万

（3） 加工费

样机研制，加工费，工料对半，预计 3 万

（4） 燃料动力费

规划 1 万

（5） 差旅/会议/国际合作与交流费（本科目不超过直接费用 10%的，无需提供预算测算依据，但需说明用途。）

差旅费：出差、科考、调研、交流、参加会议等发生的外埠差旅费，还包括市内交通费。差旅费测算标准参照中国科学院国家天文台差旅费管理办法（国天发字〔2016〕147 号文）。请说明与研究任务的关系和必要性，以及出差次数、出差标准的预算依据。

为开展圆顶现场考察研究，预计去智利国阿塔卡马沙漠现场考察 4 人次，预计花费 机票往返 1.3 万 + 补助 300 美元/天 * 6 天 * 汇率 7 = 10.2 万

参加国际会议，每年参会 1 人次，预计每人次 2.3 万元（包括交通 1 万、住宿和补助 300 美元 * 6 天 * 汇率 7)，4 年共计约 9 万元

国内差旅，每年 2 人次，预计每次 0.5 万元 （包括交通 0.2 万、住宿和补助 600 元/天 *5 天)，4 年共计 4 万元

拟办国际咨询评审会一次，含中国、美国、智利三方专家进行咨询与评审，拟于智利进行（费用最低)，会期一天。三方专家各两名。含差旅。预算：路费中方 1.5 万*2 +美方 0.8 万 *2 + 智方 0.1 万*2 + 补助 0.2 万*6 + 专家咨询费用 0.1 万*6 = 6.6 万

共计约 30 万 拟节约使用 因此预算 27 万

（6） 出版/文献/信息传播/知识产权事务费

版面费，专利费，资料购置、文献检索费，专用软件购置费，专业通信费等（不包含日常手机通讯费、上网费）。请说明与研究任务的关系和必要性，以及数量、单价的预算依据。

预计每年发表论文 1 篇，单篇版面费 1 万元，4 年共计 4 万元。

专利申请和代理费用，预计每年 1 件，代理费用 0.8 万元，4 年共计 3 万元。

购置流体分析软件，例如 Solidworks 软件，用于开展流体力学分析研究，预计花费 3 万元。

共计预算 10 万

（7） 劳务费

项目需聘用 1 名硕士生，开展实验工作，测算依据：平均支付 2100 元/月/人 x 36 月=7.46 万元；

项目需聘用 1 名博士生，开展计算分析工作，测算依据：平均支付 4300 元/月/人 x 48 月=20.46 万元

因此预算 27 万

（8） 专家咨询费

就方案设计进行评估进行会议咨询，以保证课题的顺利开展，预计咨询 10 人次，平均每人次 2 天，咨询费按 1000 元/人/天支付，共计 2 万元。

报告正文

（一）立项依据与研究内容（建议8000字以下）：

1．项目的立项依据（研究意义、国内外研究现状及发展动态分析，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）；

（1）研究意义

地基望远镜由于存在易损精密零部件，一般需要防护。防护方法主要为：

- 可活动天文圆顶；　　[多用于光学望远镜]
- 不可活动的透明罩子；
- 局部防护，无圆顶。　　[多用于射电望远镜]

其中，可活动天文圆顶防护是具有通用性的主要形式。研究以圆顶为代表的望远镜防护方法具有重要研究意义。

天文圆顶对天文观测很重要[1]-[7]：作为天文台的标志性建筑、天文望远镜重要的附属设施，天文圆顶不仅是精密昂贵的望远镜的防护方法，保护其免受天气环境等带来的损害，保障观测顺利进行，天文圆顶还是天文望远镜功能的延伸和保证，是天文望远镜重要的有机组成部分。天文圆顶技术是天文技术领域的重要分支，直接影响天文观测的实现、效率与精度；天文圆顶的建造与运行维护更是天文台成本的重要组成部分。

极端台址[8]的大望远镜更需要可靠的天文圆顶，或称防护，相关研究更加重要：

大望远镜的圆顶建造难度增大。建造与维护成本更高，这是因为望远镜口径增大，望远镜整体增大，包覆望远镜的圆顶更大。圆顶表面积与直径成平方增长，建造成本成平方到立方来增长。结构优化对降低圆顶成本的影响更加明显。圆顶增大时还伴随带来很多科学与技术问题，如结构力学问题，驱动控制问题等。

极端台址对圆顶提出更高的防护要求。为了获得更好的天文观测条件，躲避人类活动造成的光污染、无线电环境污染等，天文台址越来越向地球上人类活动极限位置发展，如沙漠、高原、极地等。恶劣的台址环境对防护技术的要求更加苛刻。海边台址要求圆顶具备良好的防腐性能，高原台址要求圆顶具备良好的防风雪、保温性能，处于地震带的台址要求圆顶具备抗震性能，极地台址要求抗极限低温。天文台址在工程建设的极限位置，是标志人类文明的科学建筑。

保证圆顶可靠运行越来越重要。在一般环境下，圆顶的可靠性可以保证望远镜的使用，降低维修与维护的经济成本与时间成本。而在极端台址，在会对望远镜发生损害的极限环境里，圆顶如果不能可靠工作，制造精密价值高昂的天文望远镜就可能损坏。在可靠性上优化的方案因为避免了重大事故，减少了维修成本，在整个生命周期上是个经济方案。人类难以在极限台址生活，要求天文圆顶尽量采用无人值守的远程或自动控制模式。然而恶劣环境不仅会增加圆顶机械或电器的损坏，还会造成断电、断网，实现远程或自动控制本身就具有极端挑战性。如果圆顶不能可靠工作，远程控制无法实现。保证可靠性是研发成熟度的体现，是具有科学难度、技术难度、管理难度的复杂系统工程。提高圆顶可靠性的实用性和重要性不言而喻。

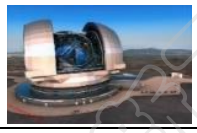
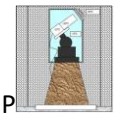
极端台址下的大望远镜项目的成败，可能取决于望远镜的防护。

（2）国内外研究现状

2.1）望远镜防护方法简单分类

在天文科学用途与望远镜发展驱动下，望远镜防护手段如表 1 所示。

表 1 天文望远镜主要防护手段

类别名称				典型案例	结构特点和优缺点	
圆顶防护	随动圆顶（越来越紧凑）	传统式圆顶	大尺寸圆顶	兴隆 2.16m	适合采用传统赤道仪的望远镜的圆顶。尺寸较大，造价高，容易有视宁度问题，目前较少采用	传统、通用、常见的方式
			小尺寸圆顶	SOAR	适合采用地平式机架的望远镜的圆顶。在传统圆顶上尽量减少尺寸，降低造价	
		开启式圆顶（共旋）	开启式	一般都在基础形式上有变化，如开窗或加风屏	圆顶与望远镜随动旋转。望远镜与圆顶间没有相对转动（或很小）。	
			带百叶窗的开启式圆顶	VLT Subaru 	在开启式圆顶基础上加百叶窗，进一步改善视宁度。	
			固定风屏的开启式圆顶	LBT	风屏固定在望远镜结构上。转动惯量增加，但风屏可以完全关闭不再另建圆顶。	
		圆球状圆顶		LEST TMT MSE	圆球形，更紧凑，有垂直地面的旋转轴和与该轴成 45 度的旋转轴。	
	完全开放圆顶		完全开放圆顶	TTL 2m	结构简单成本低。风力较大时，望远镜或有振动。	
			带挡风罩的完全开放圆顶	SDSS	在完全开放结构上，增加与望远镜随动的挡风罩。	
透明罩子	微波透明罩子 光学透明罩子			OSO ASTEP 	采用（微波）透明材料，无活动部件，可靠稳定。	有像差灵敏度降低，安全
无圆顶				ALMA	望远镜结构、面板等防风防雨水设计，并专门设计防护电子设备的舱室。	局部防护全面提高防护等级

2.2)防护方法发展趋势分析

天文圆顶是最主要的防护方法，其发展是随着天文望远镜的口径越来越大，观测换（变）源速度越来越快，台址越来越向人类生存极限位置发展而发展的。科研用望远镜的圆顶发展与科学目标密切相关，具有高度定制，科技含量高（控制、智能、可靠性），多学科融合（流体、传热、力学）的特点，且要求相对望远镜的成本低。

2.2.1）问题的提出

传统的观测模式之一是跟踪观测，对于随动圆顶，望远镜跟踪天体目标时，外面有壳体进行随动，符合牛顿第二定律，其运动规律为：

$$M = J\ddot{\theta}$$

其中M是转矩，J是圆顶转动惯量，θ 是转角，$\ddot{\theta}$是角加速度。将圆顶简化为球壳，转动惯量与半径的关系虽然貌似是平方增长的关系：

$$J = \frac{2}{3}mR^2$$

但由于$m = 4\pi\rho\delta R^2$ ，ρ为材料密度，δ为圆顶厚度，也会随 R 增加而增加，暂设$\delta = cR$，可以看到转动惯量实际如下式所示为 5 次方速度增长

$$J = \frac{8}{3}\pi\rho c R^5$$

就算圆顶厚度不增加 J 也至少以 4 次方以上速度增长，非常惊人，如图 1 所示：

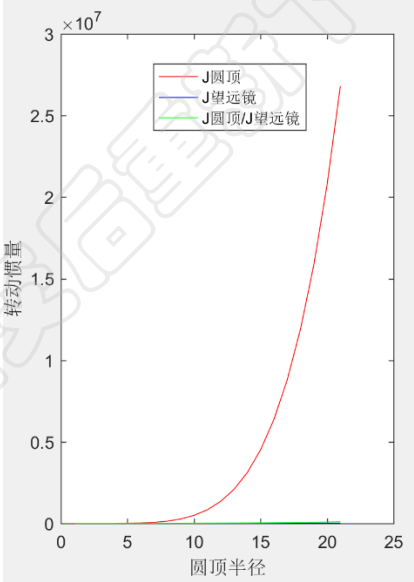


图 1 望远镜口径增长与圆顶转动惯量的增长示意图

圆顶转动惯量越大要求，圆顶驱动力矩越大，控制越难。随着望远镜的发展，口径越来越大，观测技术提高如扫描成图等观测模式，或观测目标快速移动，指向变化增快，随动圆顶设计得再紧凑，也仍会受到迅速增大的角动量限制，难以满足使用要求，需要彻底创新。

2.2.2）驱动控制极限的解决方法初步分析

要解决上述驱动控制问题，有如下方法：

一是只做局部防护，望远镜整体无防护，但全面提高防护等级；如 ALMA，APEX；

二是用透明罩子让圆顶不动；如 OSO、ASTEP 等；

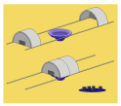
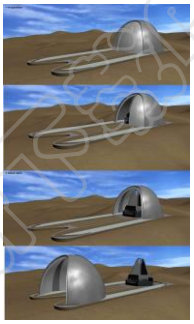
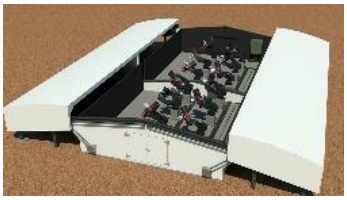
三是极力优化圆顶的尺寸和重量；如 TMT 特意为此采用的球形圆顶；

四是采用完全开放圆顶，望远镜工作时，圆顶完全打开，不跟随望远镜而转动，望远镜不工作时，或极限状况即将发生时，圆顶闭合，发挥保护望远镜的作用。

2.2.3）完全开放圆顶是重要的发展趋势

通过对完全开放式的圆顶[9]-[24]进行文献调研，可以看到全开放式的圆顶主要有表 2 所列几种主要形式。

表 2 主要全开放式圆顶的实现形式

实现形式	案例			
移开式				LAMOST
	怀柔太阳	云南台某圆顶	OWL 概念  	某科普望远镜
	云南 1.2 米			兴隆科普
翻开式	ROTSE-III	丽江 BOOTES-4		
				
旋转式				
	LSST's DIMM			

完全开放形式具有结构简单，对望远镜影响最小的优点。在具体的圆顶设计时，基于完全开放形式，再结合具体望远镜的应用特点和具体台址特点，如设计风屏等，形成有针对性的具体圆顶。因此对完全开启的圆顶形式研究，成为圆顶设计的一项“基础研究”。

通过文献调研[25]-[63]，我们发现国内外关于圆顶的研究主要集中在传统大尺度圆顶或开启式圆顶内的热和通风等问题上，例如圆顶内视宁度问题、圆顶内的望远镜受风扰动等。我们思考认为：

①为解决风场复杂等相关问题的研究较多说明目前大尺度随动圆顶存在很多风场复杂等固有问题。相关研究越多，说明随动圆顶的固有问题越多，越难解决，说明随动圆顶对未来更大望远镜的应用有较多问题。②而采用完全开放式圆顶由于不造成周边气流的复杂化，可以最大限度地避开或简化问题。在相对稳定的自然层流风场下，观测条件稳定。加固望远镜本体结构也相对简单。

“工作中没有圆顶的圆顶，是最好的圆顶”[1][2]。完全开放式圆顶在打开时，对望远镜的影响很小直至为零。完全开放式圆顶还具有结构简单，成本低的特点，完全解决随动圆顶带来的各种问题，是非常重要的圆顶发展趋势。

尽管完全开放圆顶从设计理念上非常迎合天文望远镜口径发展趋势，但是由于配备开放圆顶的望远镜在观测时将会完全被暴露于天地之间，如何在望远镜需要防护的时候可靠地，及时地保护望远镜？现在的光学望远镜使用过程中，也偶尔会发生圆顶不跟着望远镜转，盖子打不开或合不上等机械控制问题，如何科学地避免完全开放圆顶也出这些类似问题？随动圆顶的盖子打不开结果就是没观测成，而结构不合理的完全开放式圆顶发生过门没打开而圆顶飘走把望远镜整个推倒的事故，如何避免再发生？而即使采用了开放圆顶的设计思路，如何把其优势最大化？类似这些具体问题并没有一个明确的答案，亟需针对完全开放式圆顶开展可靠性研究。

2.3）亚毫米波望远镜防护方法分析

2.3.1）亚毫米波是个重要波段

在天文学研究中，亚毫米波（100um-1mm）主要来自直接和恒星形成相关的冷分子气体和致密气体，以及被大质量恒星的紫外光子照亮的尘埃辐射 （图 2），可以直接示踪冷气体含量，恒星形成率，大质量恒星紫外辐射对应的光子电离区（photo-dissociation region），尘埃再辐射，金属丰度等与恒星形成有密切关系的关键信息。另一方面，受星系自身尘埃消光的影响，高红移星系经常在光学波段很暗，其光学辐射被尘埃吸收并且从红外波段再辐射，恰好红移至亚毫米波波段（这类星系常被称为亚毫米波星系, submillimeter galaxy, SMG），因此对于研究银河系内恒星形成区的物理过程，河外星系的恒星形成率，恒星质量增长，气体外流，活动星系核反馈，以及高红移星系形成和演化等一系列前沿的天文学问题至关重要[64]。

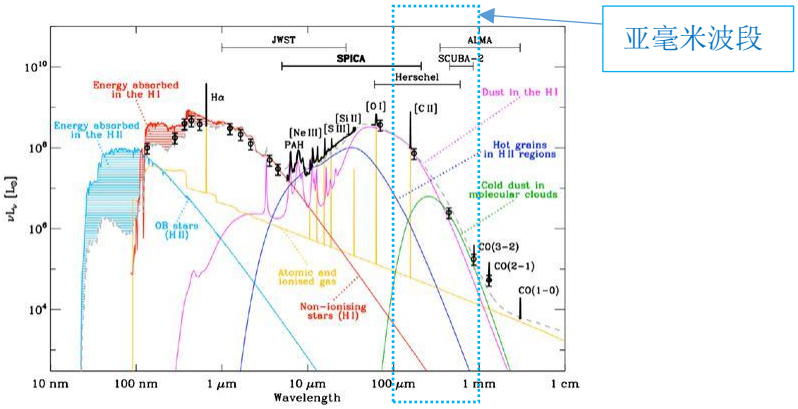
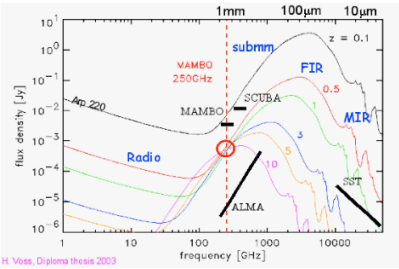
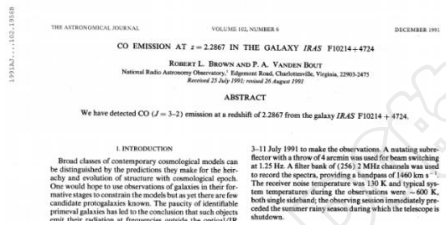


图 2 星系从紫外到射电波段的特征辐射谱，可见红外至亚毫米波波段占据了星系总出

射能量的一半。图中亚毫米波波段（大约 100um 到 1mm 处）恰好对应星系尘埃的连续谱和来自低温分子气体的谱线，两者都和恒星行程过程密切相关[65]。

而且由于星系尘埃辐射(灰体辐射)在亚毫米波波段负 k 改正的特点，我们可以用同样的观测极限探测到从低到高各个红移处的星系（图 3，左）。因此自从第一个高红移星系在亚毫米波波段被探测到以来(图 3 右)，亚毫米波波段一直是研究和寻找高红移天体的重要观测波段，目前亚毫米波光谱认证的星系可以到达到红移 9.1[66]，当时宇宙年龄仅仅是现在年龄的 1.8%，充分显示了亚毫米波波段对于搜寻高红移星系的巨大潜力。




THE ASTRONOMICAL JOURNAL VOLUME 102, NUMBER 6 DECEMBER 1991

CO EMISSION AT $z = 2.2867$ IN THE GALAXY *IRAS* F10214+4724

ROBERT L. BROWN AND P. A. VANDEN BOUT

ABSTRACT

We have detected CO ($J = 3$–2) emission at a redshift of 2.2867 from the galaxy *IRAS* F10214 + 4724.

I. INTRODUCTION

图 3 左图：红移 0.1 到 10 的星系在亚毫米波波段的流量几乎不变，因此亚毫米波波段非常适合寻找和研究宇宙早期的星系性质；右图：第一篇红移 2.2 的星系亚毫米波观测文章发表于 1991 年，当时红移大于 2 的星系观测数据非常稀缺。亚毫米波观测对于星系研究非常重要，在当时仅仅是探测到高红移星系的亚毫米波流量就已经是非常有意义的结果了，以至于这篇文章摘要只需要一句话。

2.3.2）亚毫米波望远镜是一类极端台址大望远镜

2.3.2.1）亚毫米波望远镜的台址一般是极限台址

尽管亚毫米波波段对于恒星和星系形成演化研究至关重要，由于这个波段的大气窗口非常敏感于大气的水汽含量(PWV，Precipitable Water Vapor，图 4)，地球上适合做亚毫米波观测的台址并不多，并且都在气候极端的地区，比如智利，南极，西藏等等。这些地区的干旱条件非常适合做亚毫米波观测，但是偶尔出现的极端的气候条件，比如降雪，强风等等，非常不利于亚毫米波望远镜的正常工作，因此必须防护。例如采用圆顶防护。

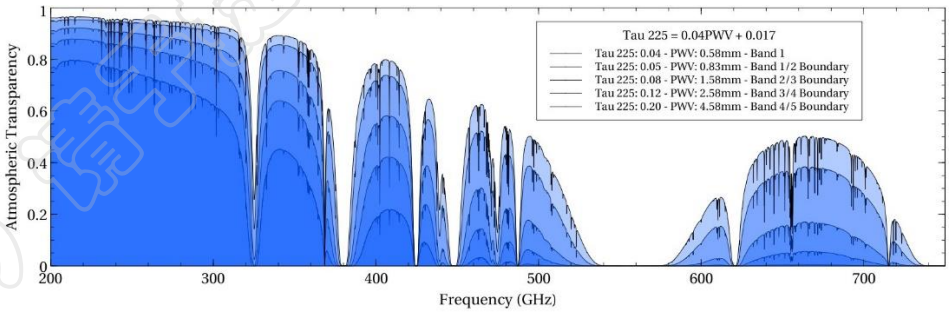


图 4 在不同 PWV 下的亚毫米波波段的大气窗口，可见 PWV 大于 4 的时候高频部分几乎完全被水汽吸收而无法观测。

亚毫米波波段需要非常干燥的地方作台址，南极、智利阿塔卡马的 Chajnantor 等地是较好的台址。例如智利 Chajnantor，可降水汽含量 PWV 可以达到 0.5mm（25%以上时间，典型值 1.0mm[67][68]）以下，但海拔在 5000 米以上，含氧量和气压较低，不适合人类，偶尔会有降雪和强风。

平时的 Chajnantor 风并不大，如图 5 所示[69]，然而偶尔会有大风，曾经观测到 62.2m/s 的风速[49]，相当于 18 级，具有相当破坏力。如果望远镜按抗 18 级风设计，就会有太大的冗余，产生高造价，如果按低风速设计，而用能抗高风速的完全开放圆顶来防护，总体看上去

更合理。

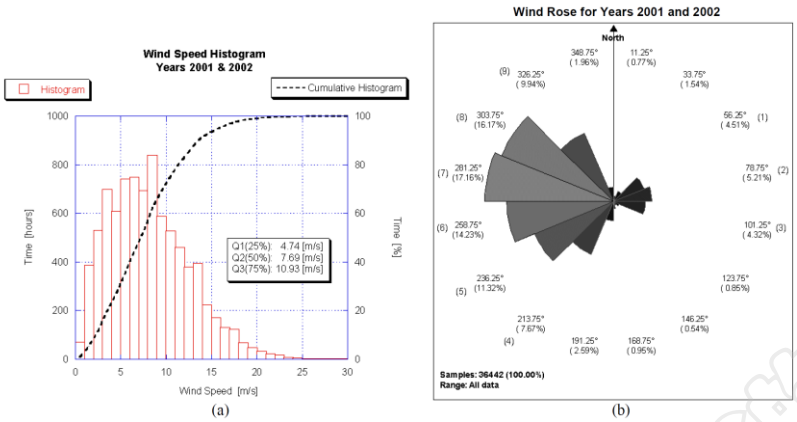


图 5 智利 Chajnantor 的风速和风向分布图

然而智利 Chajnantor 已经是适合科学观测的台址里自然条件比较好的环境了。南极的可及性更差，阿里更不适宜人类生活。相对好点的地方，如羊八井，因 PWV 增加而使大气透明度下降[70]，好观测条件很难得。因此亚毫米波望远镜的台址所处的恶劣环境，要求有较高可靠度的防护来保证望远镜的安全性。

2.3.2.2）亚毫米波望远镜——一类大望远镜

相对光学波段，亚毫米波波长较长，相应的亚毫米波望远镜口径也相对较大。

未来亚毫米波望远镜会向更大口径发展。干涉阵列和单镜对亚毫米波波段的研究互有优势，尽管干涉技术可以用小望远镜阵列增加基线长度来实现高空间分辨率的亚毫米波观测，但是干涉基线最短也达不到单镜的尺寸，也就无法准确测量大尺度结构，因此干涉阵列非常适合做高空间分辨率观测，而单镜则在测量大尺度结构上不可或缺。望远镜口径增加可以提高望远镜的集光能力，提高观测效率，因此大口径亚毫米波望远镜是大势所趋，美国正在研究的 CCAT25 米亚毫米波单镜，墨西哥正在建的 50 米亚毫米波单镜，以及中国天文学界在 2018 年尝试论证的 60 米亚毫米波单镜方案等，都体现了对大口径亚毫米波望远镜的迫切需求。

2.3.3）亚毫米波望远镜指向变化更快，更面临驱动控制极限问题

亚毫米波望远镜可以使用射电领域新兴的快速扫描技术 OTF(On-The-Fly)[71]，如图 6 所示[72]，望远镜指向变化范围越大、速度越快，给天文学家使用的余地就越大。随着望远镜口径的增大，天线效率增高，允许的指向变化越快，观测效率则越高。

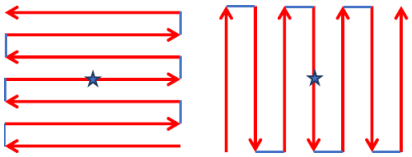


图 6 快速扫描示意图

2.3.4）亚毫米波望远镜的防护

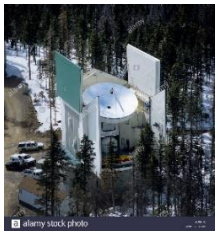
亚毫米波望远镜的观测波段在红外波段与射电波段之间，兼具光学望远镜的精密和射电望远镜口径大的特征。光学望远镜的主要防护点在主镜，因为面形精密的主镜怕水怕灰；射电望远镜的防护点主要在接收机和电子器件；而亚毫米波望远镜的镜面精密，有的附加精密

的主动光学器件，接收机及后端设备部分也是精密电子器件。因此亚毫米波望远镜的防护融合了传统光学望远镜所常采用的圆顶防护，和射电望远镜所常采用的无圆顶局部防护。

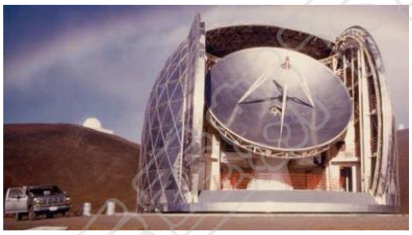
2.3.4.1）随动圆顶防护——典型方式

如图 7 所示，西藏羊八井 CCOSMA[73]是目前国内唯一的亚毫米波望远镜，口径 3m，它是从德国搬来的。中国虽然在努力发展自己的亚毫米波技术[74]，但还没有研制成功自己的大口径亚毫米波望远镜。CCOSMA 采用的是传统式圆顶进行防护。而国外的 CSO（10.4m，夏威夷）、 SMT（10m，亚利桑那）、JCMT（15m，夏威夷）均采用开启式圆顶。开启式圆顶虽然不能让望远镜在圆顶内自由转动，但比传统式小尺寸圆顶紧凑，使得转动惯量的增长不要过快，以提高驱动控制性能。

CCOSMA



SMT



CSO

JCMT

图 7 采用随动圆顶的亚毫米波望远镜

2.3.4.2）透明罩子防护——未应用到亚毫米波段

德令哈 13.7 米毫米波望远镜圆顶订购了美国 ESSCO 公司的微波透明天线罩[75]。如图 8 所示。瑞典 Onsala 的 OSO 20m 和韩国的 TRAO 14m 也采用了透明天线罩。OSO 20m 的工作频率最高到 116GHz，而德令哈 13.7 米和 TRAO 14m 的工作频率到 115GHz，波长为 2.6mm，还没有能覆盖到 1mm 以下。

德令哈 13.7 米

OSO 20m

TRAO 14m

图 8 采用透明罩子的毫米波望远镜，工作波段尚未覆盖到亚毫米

采用透明罩子，由于没有活动部件，是最安全可靠的防护。但是透明罩子毕竟还有能量损失和像差。透明罩子的材料技术，也并非能在每个波段都能做得那么透明。

2.3.4.3）无圆顶的局部防护——高科技高投入

位于智利阿塔卡马的 ALMA（54x12m+16x7m）及其先导 APEX 望远镜（口径 12m）主反

射面采用 CFRP 整体结构，虽然未见采用大口径望远镜普遍采用的主动光学技术[76]，仍然将面板背架封闭以保护面板的精调机构以防护主镜。采用无圆顶设计，将接收机与需防护的电子器件设计到焦点附近的电子设备舱室里。SMA（8x6m）的台址在夏威夷，工作波段达到 0.7mm，面板为铝合金，采用了无圆顶的设计。SEST（15m）在海拔 2400 米的智利 La Silla，有主动光学，工作波段达到了 0.8mm，通过在主镜背面进行防护，也采用了无圆顶设计。

图 8 采用无圆顶设计的 ALMA 及其先导 APEX，SEST 以及夏威夷的 SMA

无圆顶设计是项高投入的高技术，它要求每个外露器件具备较高的防护等级。除了防雨雪外，还要防紫外线等。整体防风设计必须按当地最高风速，而不是平时工作时的风速。BBC 曾报道过题为“ALMA telescope in Chile battles extreme weather”的新闻[77]，这些昂贵的望远镜在极限天气时是否会发生风险？无圆顶设计总是在经受这些考验。

2.3.4.4）完全开放圆顶防护方法——本申请拟重点研究

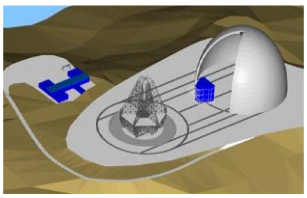
在现有的亚毫米波望远镜中，未见采用完全开放圆顶。本申请拟研究在亚毫米波望远镜使用完全开放圆顶的可行性。这种防护方法看起来是通用的，适合大望远镜，不影响换源及快速扫描观测，价格相对经济，如果我们能准确定量的给出可靠性，并和其它技术路线横向对比，能否能看出来谁将成为未来亚毫米波望远镜防护的发展趋势？

传统的射电望远镜之所以普遍采用无圆顶设计，一个原因是体积太大，如 FAST 直径达到 500m，圆顶太难建、造价太高，而不是不需要。例如，当冰雹来临时，射电望远镜的面板也会被砸出坑而降低精度。没有圆顶的射电望远镜，在冰雹来临时，只能眼巴巴挨砸而束手无策。

亚利桑那 ARO 的 12m 望远镜是拥有传统式圆顶的射电望远镜；OWL 的预研究[78]采用完全开放圆顶方案将圆顶防护方案推广到了 100 米望远镜。而活动屋顶技术，已经将完全开放结构的可能性推广到了 200m。于 2000 年建成的德国勃兰登堡的 Cargolifter 大棚，让我们看到将圆顶建设到更大的希望，而中国的弓式结构及安装工艺[79]（预应力装配弓式结构，一种现代大跨空间结构[80]），应用于国家网球中心 74m 跨度活动屋顶，曾于 1998 年参与珠海中华世纪门（单跨 300 米可平移拱）招标，该技术能否将活动屋顶的跨度提升到他们声称的 500m？如能实现，用完全开放圆顶罩上 FAST 并非没有可能。目前拱形结构已经做到了 552m（重庆朝天门长江大桥），单跨结构已经做到了 1991m（日本明石海峡大桥），而 Alexander

则研究了如何将一个城市罩上[81]以防核战争，以及如何在月球、火星上建设更大的罩子[82]。

ARO 12m



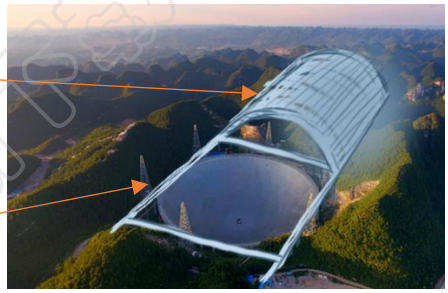
百米望远镜 OWL 预想图

西雅图棒球场（200m*200m）

德国勃兰登堡的 Cargolifter（跨度 225m）

作为热带乐园的 Cargolifter 内景

新智唯公司提供的单拱跨度 165m 弓式结构照片



五百米直径的 FAST 也可以有个圆顶

图 9 带圆顶的射电望远镜，100m 望远镜圆顶的预想图，200m*200m 西雅图棒球场活动屋顶和 363m 长*225m 宽*107m 高的热带大棚 Cargolifter，号称能做 500m 跨度活动屋顶的弓式结构，以及给五百米 FAST 装圆顶的构想，该技术装配大跨度拱时不需要起重机。

如何**依据理性科学选择大望远镜的防护**技术路线？如何在综合考虑性能、造价、安全性等指标下的做出科学决策？这是本申请力图弄清楚的问题和方法。

2.4）望远镜防护可靠性重要性与研究现状

2.4.1）圆顶可靠性就是望远镜的安全性

望远镜防护方式的可靠性，就是望远镜本体的安全性，重要性很明显。完全开放的圆顶，在观测时对望远镜的防护也为零。其可靠性也显得特别重要，因为，突发风雨等状况时，如果圆顶不能立刻执行防护功能，望远镜就有立刻损毁的可能性，圆顶的故障也会直接导致望远镜的损毁，因此，研究圆顶的可靠性对完全开放式圆顶尤为重要。

产品的可靠性是通过设计、生产和管理而实现的，而首先是产品的设计。设计方案的可靠性、安全性，是该产品的固有可靠性、固有安全性[83]-[85]。

对设计方案进行可靠性与安全性评估，是一个重要的科学问题，需要有科学的方法。

2.4.2）望远镜防护的可靠性及望远镜安全性的研究现状

可靠性工程作为保证产品可靠性的科学、技术与管理手段，近年来在航空航天、电子、汽车等领域获得重要发展，已从定性发展到具有许多可靠性指标的定量表述阶段。

例如设计失效模式影响分析 DFMEA（Design Failure Mode and Effects Analysis）方法[86][87]，

起源于 NASA，作为推荐执行的国家标准，最早于 1987 年出版，于 2012 年更新为现行版本。作为管理方法，具有成熟度。DFMEA 等可靠性管理手段，可以帮助设计团队不遗漏相应的工作，然而其中涉及的科学层面，各行业需要各自的数据积累。由于在天文技术领域研究与应用较少，文献仅有国际上较新的望远镜工程如 ELT、TMT、SALT 中的应用[88]-[90]，国内天文望远镜项目如 FAST 在立项后才启动 FMEA，而未见 LAMOST 应用 DFMEA 的报道。

再如故障树分析（Fault Tree Analysis, FTA）法就是通过对可能造成设备故障的环境、硬件、软件和人为等因素进行分析，建立相应的故障树，然后求出造成系统故障原因的所有可能组合和概率。FTA 是目前国际上公认的一种简单、有效的故障分析和可靠性分析方法，且被广泛应用。南极天文望远镜对主轴系统和除霜系统，采用故障树方法进行了可靠性分析[91][92]。

望远镜防护的可靠性决定了望远镜的安全性。关于安全评估，航空航天领域常用功能危险评估法（FHA，Functional Hazard Assessment）进行。该方法在 SOFIA 望远镜中有应用[93]，也可以移植到一般的机电产品[92]。

而在天文圆顶领域，完全未见任何关于可靠性方法在圆顶设计中应用的报道。然而天文圆顶更需要保证可靠性以保护望远镜本体，降低总体费用，圆顶研制既需要可靠性的设计，也需要可靠性的评定。

产品的**可靠性应该是设计出来的**，设计方案应该根据定量的可靠度指标进行决策。圆顶的方案设计，主要部分是机构设计，有别于通常的系统可靠性方法，应更着重于专门针对机构学的机构可靠性[85]研究。例如，对起吊机构的可靠性估计[95]，可以分析出不同方案的可靠性曲线，如图 10 所示，能否应用在天文圆顶领域呢？

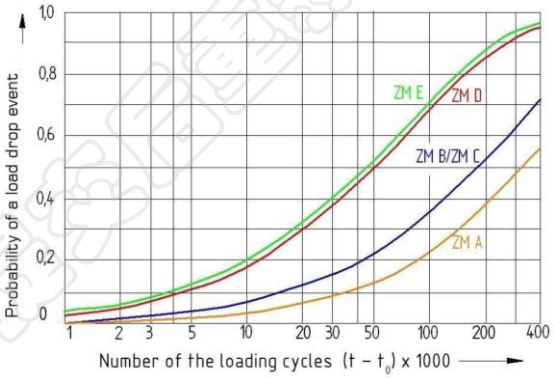


图 10 几种吊车方案的故障概率曲线画在一起，可以定量对比设计方案的可靠性。

如何根据天文需求与台址需求，在设计阶段规定好完全开放天文圆顶的可靠性和维修性的指标？如何在可靠性保证框架下研究并获得优秀的圆顶设计方案？如何通过仿真与实验研究确认圆顶的可靠度？如何保证天文圆顶即使在极端环境下也能可靠地发挥好保护望远镜的作用？这些机构设计中面临的可靠性问题影响着预期的科学功能、技术功能和使用功能能否全面实现，急需研究。

（3）望远镜防护方法研究的现实意义、科学意义、应用前景

3.1）现实意义

天文学是观测科学，天文研究依赖天文望远镜。地基的天文望远镜观测受台址限制。好台址对天文研究的重要性毋庸置疑。最好的地基光学天文台址世界公认在智利。亚毫米波段受水汽影响严重，旱极阿塔卡马沙漠是最好的台址之一（另一个干旱的地方在南极）。因此智利的天文台址是发展天文研究事业的绝佳前沿阵地。美国、欧洲、日本等天文列强都在智利有自己的望远镜。中国要发展天文事业，也应该在智利部署望远镜，第一步就是拥有自己

的台址并建设圆顶，布置望远镜。

中科院南美天文研究中心[96]，是中国科学院实施国际科教合作拓展工程的第一个海外项目，旨在充分利用南美绝佳的地理位置和优质的天文观测资源，实施我国天文科技融入全球化创新网络，促进国际化跨越发展的大战略。中心通过搭建以智利为中心的国际天文科技合作平台，来提高我国天文观测水平。2016 年 11 月，中科院国家天文台与智利北方天主教大学签署合作共建具有国际一流观测条件台站的合作备忘录。其中最重要的内容之一是中国首次获得了直接在文特峰建设并运行天文台站的权利，可以自由进行望远镜项目的建设。该签署由习近平主席与当时的智利总统巴切莱特女士共同见证，极具战略意义。

中国在智利建设天文台站不仅是中智科技合作的创新举措，也是中国实测天文融入国际科研氛围的重要机遇。目前已有两个两米级光学望远镜有意向在此建设，将来还会更多的中国望远镜项目在此建设，如何选择适合这里的天文圆顶成为迫切需要解决的问题。以中心牵头，中、智、美三方将合作进行十米口径亚毫米波望远镜 CSO（Caltech Submillimeter Observatory）从美国夏威夷搬迁到智利北部阿塔卡马，更名为 LCT（Leigton Chajnantor Telescope）望远镜，拟于 2019 年春季开工，中方负责搬迁与新圆顶建设。

目前世界上工作在亚毫米波波段的望远镜并不多，观测申请的竞争异常强烈。CSO 在夏威夷进行北天观测期间产生了很多成果[97][98]。搬到智利台址后观测条件更好，且对南天的亚毫米观测更加稀缺，因此 **CSO 搬迁项目将使中国直接获得世界一流的亚毫米波望远镜观测时间，非常有助于提高中国天文的研究实力及相关国际竞争力。**由于亚毫米波望远镜设备和技术对于中国来说非常难得，因此 LCT 必须做好防护工作。

新的科学需求要求 LCT 具备更快更大范围的快速扫描观测模式，原随动圆顶无法继续使用，其抗风等级也不够，搬迁费用也过高。然而完全开放圆顶，虽然看上去既解决防护问题，又解决驱动控制问题，但 LCT 台址海拔超过 5000m，曾经观测到 62.2m/s 的瞬时大风，虽然气压较海平面较低，但风速已达到 18 级，具有相当的破坏力，一般地面设备的可靠性问题，可以去现场修理，而完全开放圆顶的如果可靠性不足，例如该关闭时不能关闭，是否会带来望远镜完全失去防护？如果此时恰逢在极端天气到来，是否会发生望远镜的损毁？

从国际上看，目前已建各式圆顶中，不出故障是很难的，如果没有人员及时到现场维修，或无法继续工作，严重的会造成事故。日本 6.5m 望远镜的圆顶是该处唯一圆顶，在风载方面投入了大量研究，有许多文章产出。已建的 ALMA 及其先导 APEX 望远镜根据当地条件设计，结构与防护等级增强，主反射面采用 CFRP 整体结构[79]，未见采用大口径望远镜普遍采用的主动光学技术，用很高的投入进行无圆顶设计。然而再大口径的亚毫米波望远镜，还能不采用主动光学么？没有主动光学，重力变化产生的镜面变形必将影响观测，而采用主动光学则会采用大量精密促动器，产生新的防护需求。CSO 不仅采用独特的温控主动光学技术，其原有结构抗风等级较低，是一台防护等级较低的老望远镜，无论是整体结构还是元件防护，都难以像 ALMA，APEX 那样的不用圆顶。阿塔卡马虽然观测条件较夏威夷更好，但海拔更高，环境更严酷，极限风速更高，特别是人类可及性问题，迫切希望能通过远程控制实现无人值守，然而如果圆顶没有可靠性保证，这些要求怎能完成？作为中国在智利建设的第一个具有开拓性意义天文项目，**新建天文圆顶是否可靠地对望远镜进行防护关系到 LCT 项目成败**，事关中国制造的声誉和中国天文在智利的发展步伐。

如何保证待建天文圆顶的可靠性？怎样获得可靠性最好的解决方案？怎样知道所选防护方案有多可靠？这些圆顶建设的基本问题长期未能很好解决，然而在 LCT 项目即将进行之际，迫切需要得到回答。无人值守远程控制、维护人员可及性差、地球对侧海外建设，LCT 建设所面临的诸多问题让天文圆顶的可靠性问题变得非常重要。我们为 LCT 提供的防护方案，应该是在充分分析各种方案的安全性、全生命周期成本、可靠性等评价指标下的科学之选、理性之选，而不能是简单任性地给 LCT 披上个圆顶。因此本申请研究，是一个需求牵引、

需要突破、关乎中国天文学发展的重要科学问题，迫切需要充分研究。

作为中、美、智三方合作项目，中方提出高价值的望远镜防护方案，有利于国际合作及相互的交流与借鉴。**中方方案的水准与中方对方案的评价水准**，更决定中方在国际合作中的地位与作用。

智利具有得天独厚的观测条件，我国拟建的 12 米光学望远镜 LOT，筹划中的 60m 亚毫米波望远镜，如果考虑安放于智利，这些望远镜如何防护？是否需要圆顶？需要怎样的圆顶？如何在全生命周期里总投入最少的建设圆顶？这些问题都需要通过开展针对智利台址的圆顶需求与技术研究来解答。

3.2）科学意义

通过课题研究，明确完全开放圆顶的可靠性问题，产生并优化完全开放圆顶方案，可以解除望远镜口径增大这一发展趋势下防护圆顶的驱动控制的限制，解决大口径望远镜的防护问题，特别是在极端台址下的防护问题。

通过解决在智利建设望远镜圆顶中面临的许多急需研究具体科学问题，如：

- 如何制定并保证圆顶的可靠度指标，使得在中国制造并在智利组装的圆顶工程项目，连带维护费用在内的总体费用最低？
- 大口径望远镜的观测模式由传统跟踪模式向快速扫描模式时，传统随动圆顶受限于转动惯量与望远镜随动困难问题如何解决？是通过制定指标来限制还是从概念上彻底避开？
- 采用完全开放的圆顶，采用何种机构实现才能完全不影响望远镜观测？移开式圆顶的存在遮挡问题如何解决？翻转式圆顶与旋转式圆顶的存在尺度受限问题如何解决？如何在圆顶发生故障情况下保证望远镜安全？
- 如何解决大风下可靠开合？如何解决冰冻（低温结冰卡死）、高原低气压下的可靠性问题？如何解决人类生存困难下的应急处理？如断电等现场问题下的望远镜安全问题？如何解决现场方便安装维护等问题？
- 如何判定各圆顶方案的经济性？
- 如何降低圆顶的故障发生率，提高可靠性？
- ……

本申请从天文需求开始，在系统工程科学方法下，结合智利台址进行圆顶设计方案研究，重点研究风场下的天文圆顶，完全开放的天文圆顶、实现高可靠度的圆顶方案，将有如下科学意义：

- 探索极端台址、极限环境下的大望远镜防护方法及其发展趋势，指导未来望远镜的防护方案设计。
- 从天文科学热点需求出发，通过多角度进行望远镜观测模式与圆顶需求研究，指导圆顶的设计与制造。
- 通过机构可靠性研究，以可靠性为目标进行圆顶机构的改进和创新设计。探索圆顶设计方案的可靠度定量评定。
- 通过风载荷下流体力学和开闭过程流体力学模拟，进行圆顶轮廓研究，指导圆顶的结构设计、开启机构设计。
- 通过圆顶结构形式的选择对比，从结构力学与成本概算预算角度进行结构学研究，指导进行面向成本的圆顶结构设计与优化。
- 通过进行结合具体地形的风场研究，摸清 Chajnantor 天文保护区、文特峰等中国权限下智利高原台址的特点，指导进行面向优秀台址、极端台址、极限环境等的望远镜圆顶与望远镜结构的设计。

所以，开展本申请拟进行极端台址大望远镜的防护方法和关键问题的研究，包括圆顶需求研究，圆顶可靠性设计方法研究、高可靠度圆顶方案研究，完全开放圆顶研究以及圆顶风场研究等非常必要。特别是在方案设计阶段的圆顶可靠性相关的研究，通过提高固有可靠性来降低故障发生率，避免重大事故，对大望远镜提供切实防护保障，由于涉及望远镜本体安全、涉及远程遥控和无人值守模式能否实现，具有重要的，且积极的科学意义。

3.3）应用前景

本申请不仅将解决南美天文研究中心在智利台址进行天文圆顶建设中所面临的诸如如何进行方案选择的具体问题，对国内优良台址进行圆顶或天文台站建设也具有参考价值，对其它国内外望远镜建设所配套的圆顶建设也具有重要参考意义，还对更严苛环境如南极、阿里等地区进行大口径亚毫米波望远镜及其圆顶建设具有战略意义和重要参考价值。

明确大望远镜防护发展趋势，对行业发展及未来望远镜建设提供参考；亚毫米波望远镜圆顶是针对大口径望远镜的圆顶，其成果和经验，可以直接应用在相同口径的光学、红外等各类望远镜中。

完全开放圆顶的可靠性影响圆顶防护的有无问题，而圆顶作为附属设施却又是希望尽少的资金投入。因此为解决该问题，必然需要建立一种新型的可靠性设计方法。该方法可以适用其它非核心功能目标却仍然要重点保证可靠性的项目的设计过程。

完全开放圆顶是一种非常经济的圆顶，针对提高圆顶可靠性研究不仅可以应用于未来的圆顶建设，也可以应用于提高现有完全开放圆顶的可靠性。

本申请所研究的完全开放圆顶，由于不必跟随望远镜转动，可以直接应用或提供借鉴于快速扫描雷达，观测人造卫星，空间碎片等快速移动目标的望远镜，以及类似需要完全遮蔽与完全开敞的遮蔽工程。

参考文献

[1] 姚正秋，周放．近代天文圆顶发展概况．天文学进展, 2003, 21(3): 206-218.
[2] Lorenxzo ZAGO. Enclosure and Buildings for the ESO Large Telescope. VLT Report, No 46, Garching: ESO, 1986.5
[3] David Leverington. Observatiories and Telescopes of Modern Times. Cambridge university press. London. 2017
[4] Albert Greve, Michael Bremer. Thermal Design and Thermal Behaviour of Radio Telescopes and their Enclosures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2010
[5] Henry C. King. The History of the Telescope. Charles Griffin & Company Limited, London, 1955.
[6] http://www.astrosurf.com/re/history_telescope.html
[7] Pierre U. Bely 主编，高昕，王建立 等译．大型光学望远镜的设计与建造．清华大学出版社，北京: 2015.7
[8] 自然科学基金委，“极端台址环境下的天文望远镜关键技术方法研究”重大项目指南，2011，http://www.nsfc.gov.cn/Portal0/InfoModule_396/34547.htm
[9] M. Quattri, F. Koch. Enclosure and infrastructure requirements for OWL: possible solutions. SPIE Vol. 4004, Munich, March 2000
[10] N. Crouzet, K. Agabi, et. al.. ASTEP South: An Antarctic Search for Transiting Planets around the celestial South pole. Prec. IAU Symposium No. 253, 2008.
[11] Zheng qiu Yao, Xiangqun Cui, et. al.. LAMOST enclosure and its wind load analysis. Proc. SPIE 4004, 2000. 0277-786X. Doi: 10.1117/12.393911

[12] Anthony G. Mansfield. “Open-air” approach to enclosure design. Proc. SPIE 4004, 2000. Doi: 10.1117/12.393912
[13] Torben Andersen, P.H.Christensen. Is there an upper limit to the size of enclosures?. Proc. SPIE 4004, 2000. Doi: 10.1117/12.393945
[14] Jacques Maurice Beckers. Future giant telescopes: astronomy’s Hoy Grail or Pandora’s Box？ Proc. SPIE 4840, 2003. Doi: 10.1117/12.457989
[15] Eric J. Simison, Douglas R. Ferrell, et. al.. Automated telescope enclosure for the CHARA array. Proc. SPIE 4004, 2000. Doi: 10.1117/12.393954
[16] http://www.eso.org/sci/facilities/eelt/owl/Phase_A/OWL_Phase_A_ENCLOSURE_INFRASTRUCTURES.pdf
[17] C. W. Akerlof, M. C. B. Ashley， et. al.. The ROTSE-III Robotic Telescope System. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0210238
[18] N.Loewen, W. Brzezik, et. al.. Feasibility study of calotte enclosure for Cornell Caltech Atacama Telescope. Proc. SPIE 6267, 62672J, 2006.6. DOI:10.1117/12670037
[19] Robert H. Hammerschlag, Sander Deelen, et. all.. Completely open-foldable domes remaining cool in sunshine. Proc. SPIE 9912, 99121e. 2016.7. DOI:10.1117/12.2232097
[20] Robert H. Hammerschlag, Johannes N.M.Kommers, et. al.. Mechanical design of a completely open-foldable dome for EST. SPIE 2010, 7733-15
[21] R.H.Hammerschlag, J.N. Kommers, et.al.. Open-foldable domes with high-tension textile membranes – The GREGOR dome. Astron. Nachr./AN 1-10(2012)
[22] Yim, Hong-Suh, Kang, Yong-Woo, et. al.. Dome Enclosure: Clam Shell Design. J.Astron. Space Sci. 19(4), 341-350 (2002)
[23] C.W.Akerlof, R.L.Kehoe, et. al.. The ROTSE-III Robotic Telescope System. arXiv:astro-ph/0210238v1 10.Oct 2002
[24] James E.Gunn, Walter A. Siegmund, et. al.. The 2.5m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey. arXiv:astro-ph/0602326v1 15.Feb 2006
[25] 和寿圣，辛玉新，伦宝利等. 基于 ASCOM 和 Modbus/TCP 协议的天文圆顶控制系统. 天文研究与技术, 2017
[26] 祝杰，曹凯，郑义劲. 1.56m 望远镜天文圆顶电控的改造. 中国科学院上海天文台年刊, 2009 (30): 79-86
[27] 和丽娟，鞠德华，等. 云南天文台 1.2 米望远镜的圆顶自动化控制系统. 天文研究与技术. 14(1), 2017.1, 87-93
[28] 许骏，钱铜铃，汪从云. 太阳随动圆顶的一种实现. 云南天文台台刊. 2000.3: 37-41
[29] 高杰 肖宏玲 姜晓军. 一种基于 AS-1 总线的圆顶随动系统. 天文研究与技术--国家天文台台刊 2004. 1 (3):196-202
[30] 陆栋宁，黄垒，陈颖为，魏建彦. 85cm 天文望远镜圆顶和天窗自动化系统研制. 天文研究与技术-国家天文台台刊，2008 5(4) 386-391
[31] 王红帅 天文建筑对圆顶视宁度的影响研究 中国科学院研究生院(云南天文台) 2009
[32] 竺迷荣 北京天文台 2.16 米光学天文望远镜观测室圆顶施工设计,建造工艺论析 江南造船技术，https://www.ixueshu.com/document/540b41c7abcf8a3d318947a18e7f9386.html
[33] 毛同生，蒋世仰. 2.16 米反射望远镜圆顶室. 天文学报. v33(2), 1992.6 https://www.ixueshu.com/document/46fcd11cb970b982318947a18e7f9386.html
[34] 徐江海，宫雪非. 利用数值风洞实验进行四种天文圆顶的风载研究. 光学学报, v35(5), 2015.5, 0501005-1-11

[35] 徐江海. 利用数值风洞实验进行 KDUST 圆顶的风载研究. 北京. 中国科学院研究生院. 2016.
[36] 宫雪非, 温海焜, 周放. 适用于南极的轻质从动式天文望远镜圆顶. . 2012.6. 中国专利：CN201210203186.1
[37] Ryan Danks, William Smeaton, et. al.. Initial computational fluid dynamics modeling of the Giant Magellan Telescope site and enclosure. Proc. SPIE vol 9911. 991113. 2016. Doi:10.1117/12.2233288
[38] Douglas G. MacMynowski, Torben Andersen. Wind buffeting of large telescopes. APPLIED OPTICS, v49(4), 2010
[39] Myung K. Cho, Larry M. Stepp, et. al.. Wind loading of large telescopes.
[40] Benli Liu, Jianjun Qu, et. al.. Numerial simulation of wind flow over transverse and pyramid dunes. J.Wind Eng. Ind. Aerodyn. 99 (2011) 879-888
[41] David S. De Young. Numerical Simulations of Airflow in Telescope Enclosures. The Astronomical Journal. V112(6). Dec. 1996
[42] Thomas A.G. Smyth. A review of Computational Fluid Dynamics (CFD) airflow modelling over Aeolian landforms. Aeolian Research 22 (2016) 153-164
[43] Masayshi Nakai, Kiyoaki Hirakawa, et.al.. Performance-based Wind-resistant Design for High-rise Structures in Japan. International Journal of High-Rise Buildings v2(3), 2012
[44] Feasibility Study Report. Amec Dynamic Structures Ltd. 2002.5
[45] M. Schock, S.Els, et. al.. Thirty Meter Telescope Site Testing I: Overview. arXiv:0904.1183v1 [astro-ph.IM] 7 Apr 2009
[46] N. Loewen, W. Brzezik, et. al.. Conceptual design of enclosure for Thirty Meter Telescope. Proc. SPIE n6267, 62672I, 2006.6. DOI:10.1117/12.671867
[47] N. Loewen, C. Breckenridge, "Enclosure design status for Thirty Meter Telescope," Proc. SPIE 7733, Ground-based and Airborne Telescopes III, 773322 (5 August 2010); doi: 10.1117/12.856526
[48] S. Sako, U. Yoshii, et. al.. Design of enclosure and support facilities for the University of Tokyo Atacama Observatory 6.5-m Telescope. Proc. SPIE 9145, 91454p. 2017.7. DOI:10.1117/12.2056944
[49] Masahiro Konishi, Shigeyuki Sako, et. al.. The University of Tokyo Atacama Observatory 6.5m Telescope: enclosure design and wind analysis. Proc. SPIE 9145, 91454p. 2017.7. DOI:10.1117/12.2231385
[50] H.Ando, L.Barr, et. al.. Some Airflow Properities of Telescope Enclosures Estimated from Water-tunnel Tests. The Astronomical Society of the Pacific. 103:597-605, 1991.7
[51] http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/gopirafuture/proc040122/iye-pm.pdf
[52] http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/elt/reports/pdf-reports/enclosure-all.pdf
[53] Jose Teran U., Daniel H.Neff, et. al.. Conceptual design study of the GMT enclosure.
[54] Douglas G. MacMynowski, Konstantinos Vogiatzis, et. al.. Wind loads on ground-based telescopes. APPLIED OPTICS v45(30), 2006
[55] Kei Szeto, Konstantinos Vogiatzis, et. al.. Conceptual design study to determine optimal enclosure vent confighration for the Maunakea Spectroscopic Explorer (MSE).
[56] Gemini 8m Telescope Enclosure Design Requirements Document. https://www.gemini.edu/documentation/webdocs/spe/spe-te-g0012.pdf
[57] Jacob W.M. BAARS, Robert N. Martin, et. al.. The Heinrich Hertz Telescope and the

Submillimeter Telescope Observatory. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 111:627-646, 1999.5

[58] Bruce C. Bigelow, Nathan P. Loewen, et. al.. "A survey of enclosure suspension and rotation systems for 3-15m telescopes," Proc. SPIE 9906, Ground-based and Airborne Telescopes VI, 99060E (27 July 2016); doi: 10.1117/12.2231530

[59] https://en.wikipedia.org/wiki/Starfire_Optical_Range

[60] Eric Simison. Telescope Enclosure. United States Patent: 6,151,840. Nov.28,2000

[61] Wayne J.Parker, Farhat Hanna. Personal Observatory Structure Having Pivotally Connected Dome Segments. United States Patent: US 8,033,060,B2. Oct.11.2011

[62] Steven Struck, Clinton Vos. Waste Dsposal Enclosure with Solid Retractable Walls. United Stast Patent: US2018/0305119 A1. Oct 25, 2018

[63] Gaizka Murga, Armando Bilbao, et. al.. Preliminary design for an enclosure for the European Extremely Large Telescope. Proc. SPIE 7012, Ground based and Airborne Telescopes II, 70121C(10 July 2008); doi:10.1117/12.788939

[64] Blain, A.; Smail, I. et al. Submillimeter galaxies , Physics Reports 369 (2002) 111–176

[65] Galliano, Frédéric; Galametz, Maud; Jones, Anthony P. The Interstellar Dust Properties of Nearby Galaxies. Annual Review of Astronomy and Astrophysics. V56, 2018, 673-713. https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-astro-081817-051900

[66] Hashimoto, T., Laporte, N., Mawatari, K., et al. The onset of star formation 250 million years after the Big Bang. Nature, v557, 2018.5, 392-395. https://www.nature.com/articles/s41586-018-0117-z

[67] http://www.apex-telescope.org/sites/chajnantor/atmosphere/

[68] Cortés, F., R. Reeves, and R. Bustos (2016), Analysis of the distribution of precipitable water vapor in the Chajnantor area, Radio Sci., 51, 1166–1175, doi:10.1002/2015RS005929.

[69] Juan Pablo Perezaupuits, Angel Otarola, et.al.. ANALYSIS of WIND DATA GATHERED at CHAJNANTOR. https://library.nrao.edu/public/memos/alma/memo497.pdf

[70] 周明峰，姚骑均，等. 羊八井 460GHz 大气透明度的测量. 天文学报. 52(1), 2011.1, 61-72

[71] https://www.as.arizona.edu/aro/12_obs_manual/OTF/on_the_fly_observing.htm#1.2_How_OTF_Observing_Works_

[72] 五百米口径球面射电望远镜（FAST）观测性能概述，中国科学院国家天文台 FAST 工程，2018

[73] CCOSMA 亚毫米波望远镜在西藏羊八井成功“开光”----国家天文台 http://www.bao.ac.cn/xwzx/zyxw/201411/t20141105_4247517.html

[74] “大口径主动光学亚毫米波/毫米波望远镜方案及关键技术研究”通过验收----中国科学院 http://www.cas.cn/ky/kyjz/201303/t20130304_3786060.shtml

[75] 13.7 米毫米波射电望远镜新天线罩安装成功----中国科学院南京分院 http://www.njb.cas.cn/kygl/kydt/201108/t20110815_3322419.html

[76] Nobuharu Ukita, Masao Saito, et. al.. Design and performance of the ALMA-J prototype antenna, https://www.cv.nrao.edu/~awootten/mmaimcal/SPIE_5489-73c.pdf

[77] Alma telescope in Chile battles extreme weather - BBC News https://www.bbc.com/news/science-environment-17599722

[78] C. Dichirico, J.Quentin, et. al.. Enclosure and infrastructures. https://www.eso.org/sci/facilities/eelt/owl/Phase_A/OWL_Phase_A_ENCLOSURE_INFRASTRUCTURES.pdf

[79] 刘志伟. 弓式支架结构及其安装方法. 中国专利 CN93120116 1993.12
[80] 董石麟，邢栋，赵阳. 现代大跨空间结构在中国的应用与发展. 空间结构. 18(1), 2012.3:3-16
[81] Alexander Bolonkin. Cheap Method for Shielding a City from Rocket and Nuclear Warhead Impacts. Article City Shield after RBC 12 27 07 https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0707/0707.3990.pdf
[82] Alexander A Bolonkin. Inflatable Dome for Moon, Mars, Asteroids and Satellites. AIAA 2007-6262 https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0707/0707.3990.pdf
[83] 刘惟信. 机械可靠性设计. 清华大学出版社，北京：1996.8
[84] 赵竹青. 机构运动精度可靠性分析与设计. 硕士学位论文，西安电子科技大学，2002.10
[85] 孙致礼. 机构可靠性设计与分析技术. 国防工业出版社，北京：2015.08
[86] GB/T7826-2012 系统可靠性分析技术 失效模式与影响分析（FMEA）程序
[87] NASA Systems Engineering Handbook, NASA/SP-2007-6105, National Aeronautics and Space Administration, NASA Headquarters Washington, D.C. 20546, December 2007
[88] Gianluca Verzichelli. European Extremely Large Telescope (E-ELT) availability stochastic model: integrating failure mode and effect analysis (FMEA), influence diagram, and Bayesian network together. Proc. SPIE 9911, Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VI, 99110V (12 August 2016); doi: 10.1117/12.2232623
[89] SYSTEM FMEA of SOUTHERN AFRICAN LARGE TELESCOPE ROBERT STOBIE SPECTROGRAPH NEAR INFRARED INSTRUMENT https://www.ssec.wisc.edu/nir/mtr09/hazard_analysis.pdf
[90] Sco2 Roberts. Systems Engineering of TMT. 18_06_Roberts__SE_Instrumentation_Workshop_Tucson_final.pdf https://conference.ipac.caltech.edu/tmtsf2014/system/media_files/binaries/119/original/18_06_Roberts__SE_Instrumentation_Workshop_Tucson_final.pdf
[91] 冯晴晨，李晓燕. 基于故障树的南极天文光学望远镜镜面除霜系统的可靠性分析. 天文研究与技术. 15(1), 2018.1, 111-118
[92] 李运，杨世海. 基于故障树的南极赤道式天文望远镜主轴控制系统可靠性分析. 天文学报. 58(3). 2017.5. 24-1-11
[93] Koushik Datta. The Application of NASA Risk Management to the SOFIA Program. 2007 Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2007, 410-413
[94] 牛明伟，杨黎明，等. 功能危险评估在机电产品安全性评价中的应用. 机电产品开发与创新. 25(6), 2012.11, 32-34
[95] Eva FALTINOVA, Martin MANTIC, et. al.. Reliability Analysis of Crane Lifting Mechanism. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2018, 98, 15-26. ISSN: 0209-3324. DOI: https://doi.org/10.20858/sjsutst.2018.98.2.
[96] http://www.cassaca.org/zh/2018/08/
[97] http://cso.caltech.edu/wiki/cso/publications/publications
[98] Bing-Ru Wang, Lei Qian, Di Li, and Zhi-Chen Pan. Water abundance in four of the brightest water sources in the southern sky. Res. Astron. Astrophys. v16(3), 2016.3. doi: 10.1088/1674–4527/16/3/039 （*CSO 搬迁前的最后一篇文章，是由中国科学家贡献的*）
[99] 王志. 光电经纬仪防护圆顶技术. 光机电信息. 2011.9:18-28

文中没有标注的部分圆顶和的望远镜的照片来自互联网

2. 项目的研究内容、研究目标，以及拟解决的关键科学问题（此部分为重点阐述内容）；

研究内容：

本申请拟研究大望远镜的防护方法。在全面了解前述四种防护方法的基础上，重点研究以完全开放圆顶为技术路线，以方案设计可靠性为关键技术，以阿塔卡马高原为典型的极端台址大望远镜防护方法与关键问题。研究内容主要包括三部分，分别为：圆顶可靠性影响机理研究，阿塔卡马天文圆顶研究，LCT 圆顶方案研究。根据可靠性影响机理，进行天文圆顶技术研究，并应用于 LCT 圆顶的方案研究。前一项是方法论研究，偏向于研究通用技术，最后一项是针对阿塔卡马高原具体地点——智利 Chajnantor 天文保护区，针对亚毫米波望远镜 LCT 工程实际的方法应用实践研究；中间项是兼顾通用设计方法与阿卡塔马高原这一全球公认好台址的研究。

（1）圆顶设计可靠性影响机理研究

从设计最初，研究清楚怎样的机构和结构是高可靠性的，是什么影响这圆顶的可靠性，为设计高可靠度圆顶奠定方法与技术基础，需要详细研究清楚：

- 怎样的机构（可动的）是高可靠性的，各种可用机构的可靠性程度如何？
- 怎样的结构（不动的）是高可靠性的，各种结构的可靠性程度如何？
- 如何定性比较不同设计方案的可靠性？
- 如何定量比较不同设计方案的可靠性？
- 圆顶的可靠性评估与望远镜的安全性评估方法？
- 如何规定可靠度指标，为圆顶方案选取何种评价指标？
- 通常影响可靠性的因素有哪些？
- 与台址相关的影响可靠性的因素有哪些？
- 何种软件工具最适合天文圆顶设计方案的可靠性仿真？如何进行？

与一般可靠性功能应用场合不同。一般情况下，可靠性功能应用在主要功能领域，通过大量的测试，保证可靠性，如航天、航空领域，具有较大经济投入，或者应用在大批量产品上，如汽车，大批量电子产品，具有大量统计数据支持。圆顶在科学观测过程中从属地位，在投资上要求尽量少，单件生产的，统计方法效果不明显。因此，如何保证天文圆顶的可靠性与通常可靠性工程不同，具有难度，需要研究。

（2）阿塔卡马高原的天文圆顶研究

在可靠度指标框架下，本申请拟以中国即将在智利进行建设的望远镜的科学目标为出发点，通过科学需求来进行圆顶的需求研究。在需求基础上，研究天文圆顶的创新概念。通过机构学、结构学、仿真技术，包括结构、机构、风环境、伺服模型等，并进行模型样机研究，获得适合的经济可靠创新概念方案。具体包括：

1） 望远镜观测模式与圆顶需求研究

研究科学需求和阿卡塔马台址条件，得出圆顶的使用要求与技术要求；

- 从望远镜的科学目标出发，明确望远镜的观测模式，据此确定对圆顶的科学需求与功能需求；重点研究亚毫米波观测模式，研究亚毫米波望远镜对圆顶的科学需求与功能需求；
- 研究阿塔卡马高原特点，研究中国台址的特点，并在台址研究的基础上，研究确定

望远镜圆顶的技术需求；

- 面向中国拟建望远镜的圆顶使用需求与技术要求的研究：以 LCT 望远镜为重点，以及其它如十二米光学望远镜 LOT 和 60m 亚毫米波望远镜等；

圆顶需求研究的重要性在于，圆顶的所有功能都是为了天文观测服务的，和天文观测相关的部分是圆顶的真正需求，与天文观测无关的部分都是冗余功能，能没有就没有。这既保证本申请研究出来的是“天文”圆顶，也通过为方案设计可以实现简约来保证可靠性和经济性。

2） 创新技术方案研究

根据圆顶的科学要求与技术需求，进行天文圆顶的方案及其可行性的研究，包含圆顶流体力学及风场研究，机构学、力学、结构与机构间的耦合、可靠性等：

- 通过改进现有方案、创造全新方案的方法提出天文圆顶方案；
- 通过研究天文圆顶史收集各种圆顶方案，启迪创新方案。（目前未见文献系统研究天文圆顶的发展史）；
- 各种天文圆顶方案的机构学研究；
- 针对待选方案进行流体力学仿真与风环境模拟研究，包括外轮廓，结合地形的外轮廓，开闭过程中的风场等内容；
- 开闭过程模拟研究，包括开闭过程中关键位置的受力研究，结合风阻的受力研究；
- 控制系统对圆顶可靠性的影响研究；将圆顶考虑成全面防护系统（含控制内容）时的系统可靠性研究；
- 现有各种典型圆顶形式以及新设计方案的 DFMEA 研究与可靠性评估研究；

圆顶方案研究是实现圆顶需求的重要研究内容，研究圆顶机构学是圆顶能可靠工作的保证，研究开闭过程是保证圆顶可靠工作的关键的内容，研究圆顶相关风场因为风是圆顶受到的最大威胁。所有这些圆顶方案研究都围绕着可靠性目标，在系统可靠性工程框架之下，运用可靠性方法来进行。

3） 面向成本的圆顶结构轻量化研究及成本估计

- 圆顶开闭机构所需的结构研究；
- 各种方案中主体结构的尺度与形式选择研究；
- 材料用量与工程量测算研究，正确估计所提方案的物料及人工成本等研究；
- 阿塔卡马地区对结构选择、施工维护等方面的限制或成本提高作用研究；

圆顶结构研究是控制圆顶成本的关键所在，通过研究保证圆顶方案为实际可行方案。

4） 其它技术路线与完全开放圆顶技术路线的对比

- 其它类型圆顶与完全开放圆顶的对比；
- 无圆顶设计与完全开放圆顶的对比；
- 透明罩子方案与完全开放圆顶的对比；
- 明确各技术路线适用的口径、可靠性、全生命周期成本等；
- 研究是否还有其它技术路线；

明确各技术路线的适用范围，为未来建设的望远镜提供防护方案参考。通过科学对比，

才能科学判定未来技术发展趋势，明确谁是必由之路，从而积累技术经验，有利于在阿塔卡马地区的长远发展。

要进行阿塔卡马高原的天文圆顶研究，需要回答许多方法上的问题，如：

- 如何评价圆顶的可靠性？采用哪些定量指标？
- 怎样的圆顶是高可靠性的，如何定量表达？
- 现有的各种典型圆顶式样，可靠程度分别如何？
- “好”圆顶需要考虑哪些因素？权重？
- 圆顶机构有哪些？如何选择？如何创新运动机构？
- 如何可靠开闭，如何在极限天气、极限状况下也不出故障？
- 如何在打开状态下完全不影响望远镜部分的气流？
- 如何在闭合状态下最优地防护望远镜免受环境影响？
- 如何在开闭过程中少受气流影响？
- 如何对圆顶方案进行空气动力学仿真？
- 开闭机构的如何选择？
- 圆顶结构如何满足开闭机构的功能要求？
- ……

回答上述问题需要以天文学为导向，将机构学、空气流体力学、结构计算、施工工艺学等各学科和机构可靠性性方法、机构创新设计方法等工程设计方法相互结合，综合研究，是科学、方法、与技术紧密结合的基础科学应用研究工作。

（3）LCT 圆顶研究

1） LCT 圆顶科学需求与技术要求研究

- 根据 LCT 科学目标的研究，提出对 LCT 圆顶的科学需求；
- 研究位于阿塔卡马 Chajnantor 的 LCT 台址条件，含地形信息、气象信息、地质条件等；综合台址条件，研究 LCT 圆顶的技术要求；
- 根据台址条件，确定 LCT 圆顶的可靠度指标要求；

LCT 圆顶的需求研究是亚毫米波望远镜需求研究的具体应用。

2） LCT 圆顶指标关键控制内容与各指标权重分析

- 明确 LCT 圆顶方案设计的评判标准；

正确的认识各指标的权重，才能正确进行 LCT 圆顶的设计、制造与施工，最终完成一个让科学家、投资者、维护者认为“好”的圆顶。

3） 结合 LCT 圆顶的设计、加工与安装，进行天文圆顶技术验证研究

- LCT 圆顶方案的提出、建议、分析；
- 方案设计的数值仿真与模型实验研究；
- LCT 圆顶的性能测试研究；

结合实际 LCT 圆顶的建造，可以使研究工作更实际可行。

研究目标

本申请的研究目标是解决未来大望远镜如何防护问题，即确定哪种技术路线是适合向极端台址发展、向大口径发展的未来望远镜的防护方案，明确是否就是完全开放圆顶，明确什么样的完全开放圆顶是最可靠的。发展中国在阿塔卡马地区天文望远镜防护技术，并以 LCT 为例，确定它具有前瞻性的最佳防护方案。

通过研究如何评估圆顶方案优劣，掌握如何获得优秀的圆顶方案设计。通过研究极端台址因素、通常条件、以及其它内在外在因素对圆顶可靠性的影响，获得高可靠性的完全开放圆顶方案设计，确认其具备高可靠性，并定量衡量可靠度，从而不仅使望远镜具备高安全性，且能掌握其定量的安全度。考虑到成本控制，圆顶可靠性应该准确评估，望远镜的安全性也应该准确的定量评估，以实现全生命周期成本（建设成本+维护成本）的最优化。最终获得在极端台址的大望远镜的最适宜的防护方法。

拟解决的关键科学问题

- 最适合未来大望远镜的防护方法是什么？是否就是高可靠性的完全开放圆顶？
- 怎样的完全开放圆顶是最适合某个极端台址某个望远镜的防护方案？
- 如何定量判断该圆顶防护的可靠度并科学地评价该防护设计方案？

(草稿) 请于提交后重新下载PDF的正稿

3. 拟采取的研究方案及可行性分析（包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）；

研究方法：

- 在方案提出方面采用文献研究、现场考察、头脑风暴相结合；
- 在方案评估验证方面采用理论分析与仿真模拟相结合为主，具体设计与模型实验相结合为辅；
- 整体研究引入系统工程理论，基于可靠性评价方法，借鉴其它行业可靠性设计经验；
- 特别注意和考察现有智利台址、高原台址、极地台址以及类似项目的经验和教训等。

技术路线

在全面研究大望远镜防护的四条技术路线（§2.2.2）基础上，重点研究完全开放圆顶方案这条技术路线。

该技术路线中，望远镜并不是一直在防护之下。在需要防护的时候能实现防护功能，也就是防护的可靠性，决定了望远镜的安全性。当望远镜处在极限环境时，望远镜有被破坏的可能性，因而需要防护。在该技术路线下，应该在可靠性保障下进行设计活动。

要产生高可靠度的设计，关键在于明白怎样的设计是高可靠性的。首先进行机构可靠性设计研究，对设计的可靠性建立定量评价体系，对所采用的机构建立定量的评价指标。

在可靠性研究基础上，以天文科学需求与台址实际条件相结合的圆顶需求出发，通过现有圆顶概念与创新圆顶概念相结合提出创新圆顶方案，以仿真模拟技术为基础，以模型试验为辅助，进行方案验证与评估，在此基础上进行圆顶需求的再认识和方案的改进，并不断循环。

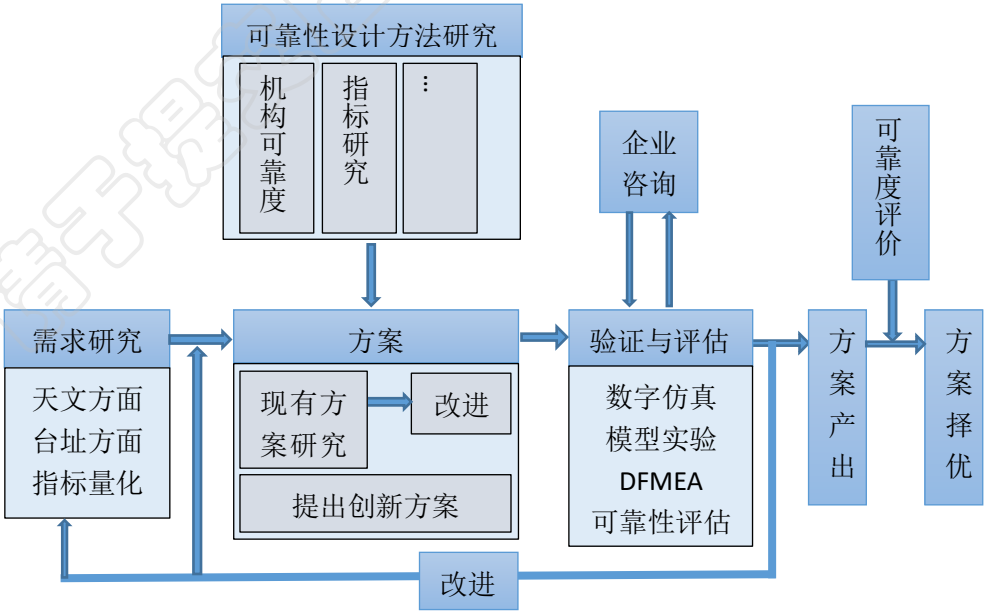


图 11 技术路线

通过文献、网络、邮件、和实地考察，对具有典型意义和文物价值的圆顶建筑进行研究与领悟，深入发掘其科学内涵和技术玄妙、工程合理性与可行性。

（1）需求研究

作为天文圆顶方案设计的研究起点，从天文学家（用户）出发，在充分吸取具有望远镜实测经验与技术经验人员的经验，充分的文献研究基础上，基于望远镜重点完成的与可能完成的、现时的与未来的科学目标，提出对圆顶的使用要求与指标要求；结合具体台址研究，提出对圆顶的技术要求；结合圆顶解决方案和望远镜的安全度，逐步修订对圆顶的可靠度要求指标。

我们从理念上，将对望远镜圆顶设计，提升到对望远镜的防护方案设计，或整体防护系统设计。例如要解决瞬时大风的问题，防护系统中设计预警系统，如果有瞬时大风过来，那么应该有警报，如果圆顶关闭的时间指标为 10 分钟，则预警时间应该高于 10 分钟。其提前量需要根据技术难度与预警准确度以及圆顶关闭时间综合考虑。

没有充分的需求研究，怎知设计方案是否有缺陷？只能建成后空遗憾。这是需求研究的重要性。

（2）可靠性设计方法研究

研究常用机构与圆顶可能采用机构的可靠度，为方案提出提供数据；

研究适用于项目的可靠度指标；

基于系统工程方法，提供方案设计的可靠性方法支持；

（3）方案研究

我们力图提出新的望远镜圆顶概念方案，进行技术研究。新方案分为现有方法改进和完全创新方案。例如：

1）在现有方法改进的方案：

移开式圆顶是一种经济型的圆顶。现有移开式圆顶有两侧移开的方式与一侧移开的方式。

方案一：

两侧移开的圆顶最早在 OWL 项目提出，适用于很大的望远镜防护，成本较低，LAMOST 也采用了这种两侧移开方案。

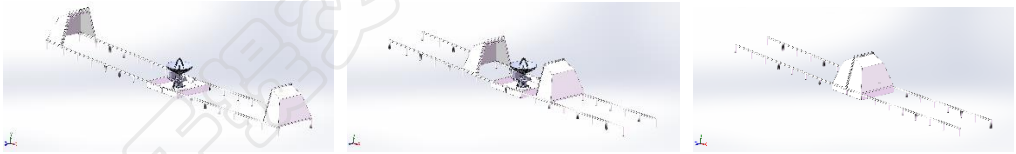


图 12 方案一 从左到右显示圆顶闭合过程

如图 12 所示，在行走系统中采用多个轮子将固定在地面的轨道包裹，使其不会被风吹翻。将轨道支起后，壳体可以从下面过风，减少风阻。将轨道设计出倾角，停电故障发生时，圆顶可以在重力下缓慢滑下，并自动闭合，从而保证对望远镜实施有效保护。

方案二：

过去的一侧移开式的圆顶，采用如卷帘门这样的刚性门，兴隆站科普望远镜、斯隆望远镜都曾用这样的圆顶概念。

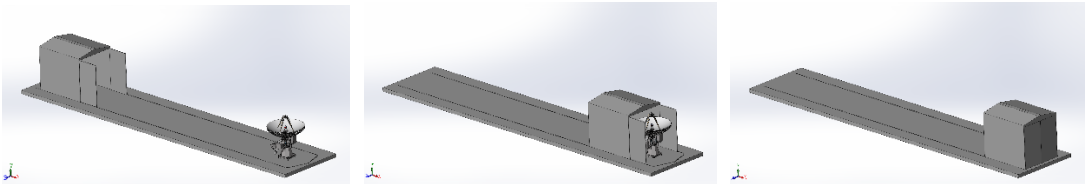


图 13 方案二 从左到右显示圆顶闭合过程

在大风、故障、误操作等情况下，存在门未打开而圆顶移开的可能性。该风险有破坏望远镜的可能性。如图 13 所示改进的一侧移开式圆顶，将大门约束在地面的轨道上。改进的

方案不用电路进行限位，圆顶因门未打开而撞击望远镜的可能性降低了。

2）完全创新的方案：

完全开放圆顶自然是追求完全的开放。下面这两个方案，打开时，与地面接平，做到完全的开放，将对望远镜观测的影响降到最低。采用金字塔外形，由于闭合时四边线互相抵住，因此会有较好的结构稳定性，意味着这可以使用较少的材料实现较大的刚度，从而降低成本。

方案三：

翻转式的金字塔圆顶，针对与地面平齐的亚毫米波望远镜。

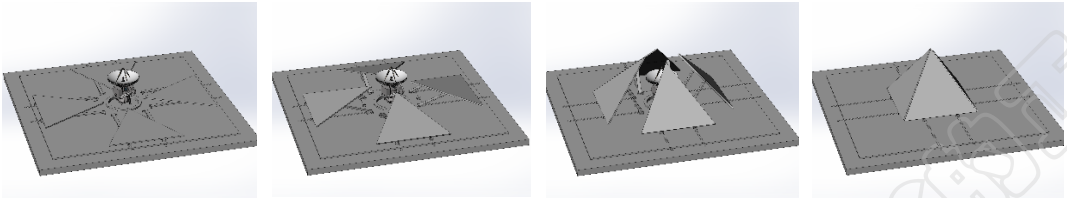


图 14 方案三 从左到右显示圆顶闭合过程

如图 14 所示圆顶，打开时可以完全在地面上铺平，能否像没有一样？闭合时，金子塔形状是否是比球型还要好的抗风外形呢？

方案四：

堆积式的金字塔圆顶，占地面积更小。

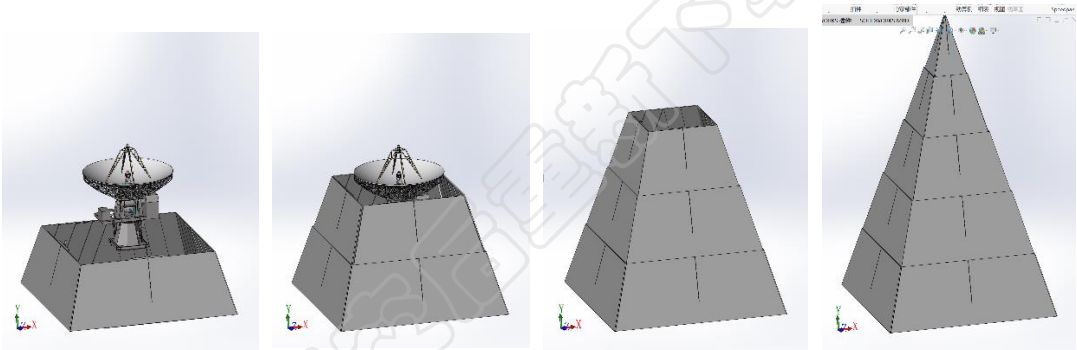


图 15 方案四 从左到右显示圆顶闭合过程

如图 15 所示圆顶，各级四个壁板依次向上伸出，互相抵住形成金字塔结构时，将具有很大的刚度，直至行程完整的塔形结构。这个概念方案虽然需要将望远镜建在一个台子上，但占地面积更小。打开时，圆顶对望远镜的影响看上去可以忽略。

（4）验证与评估

上述所列各个方案，只是一些例子，我们还会产生很多的方案，每个方案有每个方案的特色，它们看上去挺好，但它们**是否可行？如何评估？怎样改进？如何选择？**本申请力图**采用科学方法，而不是主观臆测**。

采用 DFMEA 程序方法进行可靠性分析，获得定量的可靠度评估，指出方案的可靠性短板，并提出建议。

进行相关的机构学、结构力学、流体力学等的分析与计算，考量各种工况对可靠度的影响。

通过与企业之间进行咨询等，使设计方案更结合实际社会实际，更多借助社会力量实现研究目标。

（5）持续改进

根据验证与评估结果对方案设计进行修改，也酌情调整需求等设计输入。

我们打算尽量多的提出概念方案。这些概念的可行性我们可以自己研究、也可以和厂商讨论。随着对可靠性的理解深入，我们在方案方面将有更多的直观认识，这对以灵感为重要因素的方案创新具有较大影响。

（6）可靠度评价

我们希望根据可靠度函数 R(t)=P(T>t)，为每种圆顶设计方案或防护方案绘制出可靠度曲线，就像图 10 所显示的那样。有了曲线，就可以方便地定量对比各方案的可靠性。根据定量的指标曲线进行对比，望远镜圆顶设计方案的决策将更加科学理性。

（7）方案择优

拟采用雷达图来对比各种方案的优劣。毕竟方案优劣不是只有一个指标。我们将这些指标选择出来，进行量化，用一个统一直观的表达方式来表达，进行横向对比，使得决策更容易，更科学。

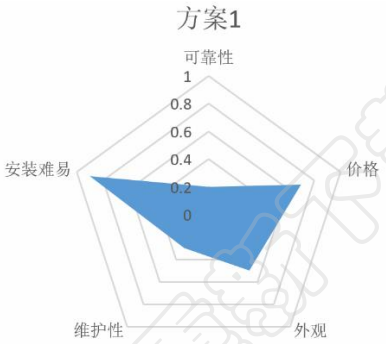


图 16 雷达图示意，具体评价指标选取还有待研究

本申请目标在提出更多的方案，通过仿真研究，对比不同口径下，各种不同方案间，使用性能与成本区别。

实验手段

（1）主要通过数字仿真进行方案可行性研究

包括：

- 可靠性仿真，电子类可以用 ANSYS-Icepak、silvaco、Sherock 等进行，机械类，用 ANSYS 基于 Monte-Carlo 法和 RMS 方法的简单的可靠性分析，复杂些的需要用 Matlab 编程来进行；BlockSim、ReliaSoft 可以进行基于框图的有限元分析，如何选择以及具体如何进行，还待更深入的研究。本申请拟研究如何用软件进行天文圆顶设计的可靠性分析；
- 流体力学仿真，可以用 ANSYS-CFD、Solidworks-fluent 等进行；
- 机构学仿真，可以用 ADAMS、Solidworks 等进行；
- 结构力学仿真、可以用 ANSYS 等进行；
- 伺服控制仿真，可以用 Matlab-Simulink 等进行；

（2）辅助通过建立缩比模型样机，进行最终方案可行性研究

- 为了防止数字仿真时的条件漏项，对最终的优化方案进行缩比模型仿真；
- 结合 LCT 圆顶建设，进行实验验证工作；

（3）利用新建成的 LCT 圆顶，进行方案验证研究工作

- LCT 圆顶建设完成后，方案阶段的研究工作可以有条件进行实验验证。

关键技术

（1）完全开放圆顶的关键技术在可靠性。因此，系统工程方法特别是可靠性工程方法在本申请研究中是关键技术。可靠性工程方法在天文圆顶领域应用未见文献，但在航空航天、汽车电子设备等有大量应用，比较成熟，在望远镜技术领域已有一些应用，可以借鉴。

（2）望远镜防护方法是以方案设计为基础与保证，因为合理可行的改进创新概念方案或完全创新概念方案，能否获得技术验证，是否真正技术可行，也是本申请的关键技术。技术验证主要通过软件模拟与仿真来完成，主要是机构学仿真与流体力学仿真。我们采用商用软件 ADAMS 和 FLUENT 进行仿真研究。

目前商用计算软件 MATLAB 已经可以完成从输入到输出的全过程仿真例如，控制系统可以采用 Simulink 进行仿真。数学模型已经可以基本完成样机验证，减少模型制造的风险。在仿真基础上，针对高风险位置，设计缩比模型，验证创新概念方案的可行性。

因此本申请中的关键技术是基本成熟的技术，本申请项目具备可行性。

4. 本项目的特色与创新之处；

（1）在极端台址，用高可靠性的完全开放圆顶对大型亚毫米波望远镜进行防护；

（2）基于可靠性设计原理，特别是机构可靠性设计原理，进行天文圆顶创新方案设计研究。在可靠性领域，过去成功的是那些满足主要功能的部分如卫星、飞机，以及批量很大的电子产品，而圆顶相对于望远镜属于次要功能，是单件定制的偏建筑结构机械为主的综合设备，这在过去是可靠性研究关注较少的领域；另外过去可靠性更多关注的是系统，偏向管理、测试、和产品，而本申请更关注如何积极地产生高可靠性的设计方案；

（3）研究在旱极——阿塔卡马高原台址建设的天文圆顶方案；这里是难得的亚毫米波观测台址，是国际公认最好的地基光学天文台址，也是中国天文发展具有战略意义的地方；

（4）从防护系统的角度看待与研究圆顶技术，并搞清楚未来大望远镜防护的发展趋势与必由之路；

（5）力图提出关闭时防护性能好，打开时对望远镜完全没有影响，开合过程特别可靠的全开放式圆顶创新设计方案；

（6）在可靠性方法框架下，结合科学目标与观测模式，结合结构研究控制成本，通过创新机构进行方案设计；

（7）将天文观测科学目标，具体望远镜使用实践，具体台址的综合环境深层结合，建立圆顶使用需求研究；通过流体力学环境仿真，借助机构学创新，进行圆顶的创新方案设计；基于结构力学仿真，结合工程实践，进行面向成本的结构优化。

5. 年度研究计划及预期研究结果（包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等）。

年度计划

结合 LCT 望远镜圆顶建设及 CSO 搬迁计划制定本研究计划。CSO 将于 2019 年春开始拆除，随后运至智利 Chajnantor 山下进行组合及升级调试，根据计划，拟于两年后在山下完成设备升级及调试，再搬至最终观测地点，即阿塔卡马高原上的 ALMA 台址旁边位置。我们拟

结合该搬迁升级计划进行圆顶研究，力图将研究成果应用于该项目，并利用由此产生的实验条件，进行深入的研究工作。具体年度进度计划如表所示：

年度	工作内容
2020	文献研究；台址考察；观测模式研究，方案提出，方案模拟，结构研究，可靠性评估、成本评价
2021	虚拟样机模拟，缩比模型实验，方案改进，国际咨询及评审（中、美、智三方）
2022	配合圆顶建设，可靠性测试，LCT 安装后的使用效果跟踪与评价总结
2023	实验测试，实验验证，成果总结

预期研究成果

（1）明确极端台址的大望远镜防护的发展方向；

（2）建立圆顶方案设计的定量评价方法，开拓一种适用于解决次要功能、单件或小批量的机械产品的可靠性设计方法；

（3）开拓出中国在阿塔卡马地区建设天文圆顶的范式；

（4）获得一种或几种圆满实现观测功能、高可靠度低成本的新概念天文圆顶设计方案；

（5）针对 LCT 望远镜需求，完成新概念圆顶缩比实验模型；

（6）预期还将发表 SCI/EI 文章 2~3 篇，专利 2~3 项，培养博士/硕士研究生 1~2 名。

（二）研究基础与工作条件

1．研究基础（与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩）；

本研究依托中国科学院国家天文台中智天文研究中心\中国科学院南美天文中心进行。中科院南美中心荟萃了一大批具有观测经验的实测天文学家，在望远镜使用上具有丰富的经验，在望远镜圆顶的使用需求方面，具有第一手资料。其中的许多天文学家来自国内各研究团组，为了获得国际一流台站一流望远镜的观测时间开展天文学研究，长期驻扎在距离祖国亲人最遥远的智利，他们迫切地希望中国有自己支配时间的一流天文设备，在世界最好的台址上占有一席之地。国家天文台运行着兴隆、怀柔等观测基地，拥有一批望远镜及其圆顶。这些对研究望远镜防护与圆顶工作奠定了技术基础。

针对即将建设的 LCT 所需圆顶，我们进行了需求分析研究，对潜在的圆顶承接企业进行了一些调研，与初步接触。我们发现不论国内，还是国际上，圆顶作为天文仪器的附属品，具有相当科学要求，却又处在从属地位，企业研制也没有连续性，是个被忽视的角落，在可靠性上落后于其它民用与科学研究领域，需要很好的研究，才能与天文学发展前沿相匹配。

我们初步进行了一些文献研究，整理了一下天文圆顶样式及分类，尝试提出一些初步方案和仿真（***Yongwei Guo***, Classification of Telescope Enclosures and Possible Application on LCT，The 5th China-Chile Bi-lateral Astronomy Science Meeting, Kunming, Jan 22-26th, 2019）。我们意识到 LCT 使用传统随动圆顶的困难，透明罩子和无圆顶方案皆不可行，不得不选择完全开放式圆顶，但具体采用怎样的方案设计？如何保证可靠性成为一个必须认真对待的科学问题，如何在可靠性工程框架下获得可靠的 LCT 天文圆顶的方案设计是个急需研究的现实问题。

申请人们过去的工作经历与经验，对本申请课题提供一些研究基础。

申请人**郭永卫**，曾参与空间太阳望远镜SST项目、五百米球面射电望远镜FAST项目，以及航空器研制，在机械工程、方案设计方面积累的经验，如指导研究生所进行的开合机构

研究（高思齐,古学东,***郭永卫,赵保庆***,等. 大射电望远镜面板开合机构传动装置的设计. 机械设计. 2017,5），为圆顶开合方案研究提供直接经验；在参与北航WG5，M16等飞行器型号研制中，对质量体系的作用直接体会；在光机结构的设计研究中，深刻体会到复杂光机系统的机械结构必须具备高度稳定性和可靠性，否则造成精度漂移，无法保证最终精度，因此长期进行结构稳定性研究和探索；参与FAST风环境模拟（吴明长, 王启明, ***郭永卫, 赵保庆***. 射电望远镜FAST风环境数值模拟研究. 天文研究与技术, 2012,2）积累的经验，可以直接应用于阿塔卡马台址风环境的分析；在美国OVRO天文台访问期间，与美方联合进行的LCT望远镜伺服模型建模与旨在提升望远镜OTF扫描速度的仿真研究，对LCT圆顶的工作模式加深了理解；在参与FAST工程的实践中，深刻体会到可靠性研究在项目最初时就应该进行，等到总体设计完成，即使后补文档，也仍将遗留隐患和风险。这些工作经历与经验，既是本申请的工作基础，也使得申请人深刻认识到对本课题研究的重要性。

申请人**程诚**，理论与实测兼修，射电与光学兼备，在智利作博士后研究期间，不仅曾以PI身份申请到ALMA、SMA、APEX等国际顶端亚毫米波望远镜和Magellan(6.5m)、MMT(6.5m)、Palomar(5m)、Gemini-South(8.2m)等国际尖端光学望远镜的观测时间，还在未来LCT台址附近的APEX营地驻站使用望远镜长达一周。具体的实测研究工作，使他深刻体会中国天文学家在申请国外设备中的无奈与艰辛，在对中国能有自主权利的望远镜如何使用上，进行了大量思考。作为潜在的LCT用户，他对LCT及其圆顶如何使用方面做出了许多设想，对本课题研究非常重要。

申请人**赵保庆**，在FAST背架结构研究上积累了大量经验，是他将螺栓球节点结构引入到FAST背架结构设计中，大幅降低了FAST背架单位面积的重量，他在如何提高FAST背架、圈梁等结构可靠性上进行了许多研究。这些工作对本申请进行的机构可靠性研究及圆顶结构研究都很有借鉴作用。

申请人**马晓耘**，毕业于复旦大学，是在阿根廷进行的四十米射电望远镜建设中主要参与者，并在该野外台站进行了四年运行维护，深知设备可靠性问题对后期维护带来的代价，电控系统可以影响机械设备的可靠性，但电控系统本身可靠性使得整体的可靠性变得更复杂，其经验对本课题的研究非常重要。

我们将以文献与现有望远镜防护与圆顶技术为基础，力图将望远镜防护与圆顶的研究迅速拓展到现有技术与人类认知的前沿领域。

2. 工作条件（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况）；

本研究依托中国科学院南美天文研究中心\中国科学院国家天文台中智天文研究中心进行。南美天文中心不仅拥有了文特峰光学天文望远镜台址，还有研究阿塔卡马高原亚毫米波望远镜台址的地利上的条件。

南美天文中心地处智利，与境内各国台站具有很好的合作关系和地利条件，有大量的大口径望远镜及其圆顶实例，在现有方案考察上具有地利优势。

南美天文中心荟萃了一大批国内外观测经验丰富的实测天文学家，他们不仅拥有丰富的学识，还亲眼见过甚至亲手使用过大量的望远镜及其圆顶，通过咨询交流与学习可以了解到世界上很多不见文献的望远镜圆顶信息，在方案研究上具有人和优势。

另外，国内如云南天文台1m太阳塔圆顶，LAMOST圆顶、兴隆科普望远镜圆顶，这些都是完全开放圆顶；羊八井观测站也有一台3m口径的亚毫米波望远镜CCOSMA，我们和这些单位长期友好的关系，也提供了一些实验条件。特别感谢兴隆站王建峰博士，完全开放圆

顶可靠性的重要性是他们以望远镜安全性代价换来的，并将教训与经验毫无保留的给了我们。

- 已具备进行软件模拟的硬件条件，有 Dell 移动工作站 5510 一台；
- 所缺乏的 CFD 软件，可以通过以北京市计算中心、中科院计算所计算中心等单位进行租赁获得；
- 采用委托实验的方法实现可能发生的风洞实验；
- 实验研究场地可以通过租赁厂房等方式获得，尺度较小的缩比模型可以在办公桌上完成装配与调试；

还有，当 LCT 的圆顶建成后，它可以作为一个研究平台，对方案阶段的研究内容进行实验验证研究。

3. 正在承担的与本项目相关的科研项目情况（申请人和项目组主要参与者正在承担的与本项目相关的科研项目情况，包括国家自然科学基金的项目和国家其他科技计划项目，要注明项目的名称和编号、经费来源、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等）；

无

4. 完成国家自然科学基金项目情况（对申请人负责的前一个已结题科学基金项目（项目名称及批准号）完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该已结题项目研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果的详细目录）。

申请人于 2014 年 1 月始至 2017 年 12 月止，承担并完成面上基金《空间望远镜地面检测中重力影响的测试方法研究》（批准号：11373046）。

2018 年初完成基金结题后，申请人将研究成果继续进行总结，使其在理论上更加严密自洽；将课题的全面总结文章向行业国际顶尖期刊《应用光学-APPLIED OPTICS》投稿，已被接收。

本申请是新研究课题，与前课题研究基本没有关系，但前课题研究中所涉及的流体力学、结构力学等研究工作，以及研制试验系统时积累的设计经验，特别是在其中所涉及的光机结构稳定性问题的研究与思考，对进行本申请课题的研究很有益处。

前课题摘要(限 500 字)：

如何在 1g 地面环境下装调空间望远镜，保证在轨失重工作时像质，非常重要，以前唯一能实现的 Hinode 方法在大口径下由于需要整体翻转，实现困难。

为解决该关键科学问题，我们的研究聚焦在望远镜姿态不变前提下理论完备实际可行的去除重力影响的实验方法与算法。通过令检测系统上下振动，产生不同加速度下不同的面形测量结果，多次采样外插计算等精度的望远镜 0g 波前。利用缩比模型，等效一米口径空间太阳望远镜 DSO 的刚度，进行实验方案验证，并与 Hinode 方法对比。

基于各种振子方案，设计建立了缩比实验模型，实际搭建实验系统，完成试验研究。借

助光学检测系统的力学数学模型，建立了 0g 波前的求解算法，分析了误差的产生机制和测量结果的置信度。基于试验数据，进行了波前解算与误差解算。对比试验显示的结果一致，误差小于 1/4 波长 PV 或 1/20 波长 rms，证明该方法适用于衍射受限的光学系统，具备实用性，达到了基金研究预期目标。

在缩比模型建立中，我们采用薄平面镜替代薄抛物面镜，降低了加工难度。提出并建立了利用表面张力悬浮镜面的测量方法，基于力学模型与误差分析，实现了 φ100 δ 0.7 薄镜面的 0g 面形测量，解决了缩比模型中核心部件 φ100 δ 1.4 平面镜的 0g 面形测量问题，为镜面磨制提供了验收方法。

成果目录：

Yongwei Guo. “A surface shape test method for a thin flat mirror”. *OPTIK*, 2018.1.1, 152(1): 116~126，SCIE, EI

Yongwei Guo, Zhichao Dong, Shen Wang. “Ground testing method of zero gravity wavefront for space telescopes”. *APPLIED OPTICS*, accepted.

（三）其他需要说明的问题

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况（列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息，并说明与本项目之间的区别与联系。

无

2. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者，并说明单位不一致原因。

无

3. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月，并说明单位不一致原因。

无

4. 其他。

无

(草稿) 请于提交后重新下载PDF的正式稿

郭永卫 简历

中国科学院国家天文台，中智天文联合研究中心，高级工程师

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

(1) 2002.3 - 2006.3， 中国科学院研究生院，国家天文台， 天文技术与方法，博士， 导师：杨世模

(2) 1989.9 - 1993.7， 北京航空航天大学， 机械设计及制造， 学士，导师：陈其明 刘二丽

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾有博士后研究经历，请列出合作导师姓名）：

(1) 2008.6-至今，中国科学院国家天文台，国家天文台，副研究员，高级工程师

(2) 1999.9-2002.2，
北京凯思博宏计算机应用工程有限责任公司，开发部、销售部，工程师

(3) 1993.7-1999.9，北京航空航天大学，机械厂，工程师

(4) 2006.3-2008.6，中国科学院国家天文台云南天文台，博士后，合作导师：南仁东

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）：

主持或参加科研项目（课题）情况（按时间倒序排序）：

自然科学基金面上项目，11373046 ，空间望远镜地面检测中重力影响的测试方法研究，2014.1-2017.12，90万，已结题，主持；

自然科学基金青年科学基金项目，11303060，深空太阳台文台相关跟踪器集成化建模与仿真研究，2014.1-2016.12，29万，已结题，参加；

自然科学基金联合基金项目重点重点支持项目，u1231204，空间太阳望远镜热光学问题研究，2013.1-2016.12，250万，已结题，参加；

自然科学基金面上项目，10433020，大射电望远镜主动反射面控制策略与拟合精度研究，2007.1-2009.12，46万，已结题，参加；

代表性研究成果和学术奖励情况

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称（或会议论文集名称及起止页码）、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后

注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

按照以下顺序列出：①代表性论著（包括论文与专著，合计5项以内）；②论著之外的代表性研究成果和学术奖励（合计10项以内）。

一、代表性论著

(1) **Yongwei Guo**(#)(*), A surface shape test method for a thin flat mirror, OPTIK, 2018.1.1, 152(1): 116~126 **（期刊论文）**

(2) **郭永卫**(#)(*); 王启明, 索网机构的理论建模与位置求解, 机械工程学报, 2010.1, 46(1): 18~23 **（期刊论文）**

(3) **Guo Yongwei**(#)(*); Wang Qiming; Nan Rendong, Simulation for the Active Reflector of FAST 30m Model - art. no. 701849, International Conference on Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation, 2008.06.23-2008.06.28 **（会议论文）**

(4) **Guo Yongwei**(#)(*); Wang Qiming; Gu Xuedong, ANALYSIS OF MANUFACTURE ERRORS FOR SPACE TRUSS WITH BOLTED SPHERICAL JOINTS BASE ON MONTE CARLO METHOD, 10th ASME Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 2010.07.12-2010.07.24 **（会议论文）**

(5) **郭永卫**(#)(*); 杨世模; 王慎; 古学东, Φ1m平面镜的力学分析及实验研究, 光学技术, 2005.7.20, 31(4): 618~621 **（期刊论文）**

二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励

(1) 郭永卫(#)(*); 王启明; 薛建兴; 杨世模; 南仁东, 一种机械式地锚疲劳特性的测试装置, 2011.11.02-2014.07.16, 中国, CN201110136383 **（专利）**

(2) **郭永卫**(#)(*), 一种可调矩型光阑, 2015.06.10-2019.02.01, 中国, CN201510081932 **（专利）**

(3) 王森; **郭永卫**, 一种紫外光谱仪光谱分辨力的检测装置及方法, 2015.11.18-2019.02.01, 中国, CN201510086813 **（专利）**

(4) 王启明; **郭永卫**; 古学东, 一种液压式地锚疲劳特性测试装置, 2011.11.02-2014.07, 中国, CN201110136385 **（专利）**

(5) **郭永卫**(#)(*), 一种带舱外微调机构的真空光学实验系统, 2015.07.08-2019.02.01, 中国, CN201510086774 **（专利）**

(6) **郭永卫**(#)(*)；王启明；南仁东，一种促动器力学性能的测试装置，2009.01.28-2011.09.14，中国，CN200810116587 （专利）

(7) 古学东；杨世模；**郭永卫**，高精度平面镜倒置吊装机构，2014.10.22，中国，CN201410278181 （专利）

(8) 南仁东；李建斌；王启明；朱文白；**郭永卫**；李辉，球铰保护装置，2009.5.13-2014.8.27，中国，CN200820126828 （专利）

(草稿) 请于提交后重新下载PDF的正稿

程诚 简历

中国科学院国家天文台，中智中心，助理研究员

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

（1）2008/09-2013/07，中国科学院高能物理研究所，粒子天体物理中心，博士，导师：王建民

（2）2004/09-2008/06，中国科学技术大学，近代物理系

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾有博士后研究经历，请列出合作导师姓名）：

（1）2017/12-至今，国家天文台，中智中心，助理研究员

（2）2013/08-2017/12,国家天文台，中智中心，博士后，合作导师：黄家声

曾使用其他证件信息（应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目（课题）情况（按时间倒序排序）：

国家自然科学基金青年基金，11803044，ALMA亚毫米CO谱线成像观测:红移0.15的星系恒星形成效率的空间分辨研究，28万，2019/01-2021/12，在研，主持

代表性研究成果和学术奖励情况

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

按照以下顺序列出：

一、 代表性论著（包括论文与专著，合计5项以内）；

（1）**Cheng Cheng**(#)(*); E. Ibar; T. M. Hughes; V. Villanueva; R. Leiton; G. Orellana; A. Munoz-Arancibia; N. Lu; C. K. Xu; T. Cao; J. Huang; C. Willmer; C. Yang; Y. Xue; and K. Torstensson VALES: IV. Exploring the transition of star formation efficiencies in normal and starburst galaxies using APEX/SEPIA and ALMA at low redshift, MNRAS, 2018, 475, 248C

（2）Wei Du, **Cheng Cheng**, Hong Wu, Ming Zhu and Yougang Wang Low Surface Brightness Galaxy catalogue selected from the α.40-SDSS DR7 Survey and Tully-Fisher relation, MNRAS, 2019, 483, 1754

（3）Molina, J.; Ibar, Edo; Villanueva, V.; Escala, A.; **Cheng, Cheng**.; Baes, M.; Messias, H.; Yang, C.; Bauer, F. E.; van der Werf, P.; Leiton, R.; Aravena, M.; Swinbank, M. J. Michałowski; A. M. Muñoz-Arancibia, A. M.; Orellana, G.; Hughes, T. M.; Farrah, D.; De Zotti, G.; Lara-López, M. A.; Eales, S.; Dunne, L. VALES V: A kinematic analysis of the molecular gas content in H-ATLAS galaxies at z ~ 0.03 - 0.35 using ALMA , MNRAS, 2018, 482, 1499

（4）Lu, Nanyao; Cao, Tianwen; Díaz-Santos, Tanio; Zhao, Yinghe; Privon, George C.; **Cheng, Cheng**; Gao, Yu; Xu, C. Kevin; Charmandaris, Vassilis; Rigopoulou, Dimitra; van der Werf, Paul P.; Huang, Jiasheng; Wang, Zhong; Evans, Aaron S.; Sanders, David B. CO (76), [C I] 370 μm, and [N II] 205 μm Line Emission of the QSO BRI 1335-0417 at Redshift 4.407, ApJ, 2018, 864, 38L

二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励（合计10项以内）。

赵保庆 简历

中国科学院国家天文台，FAST工程，工程师

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

（1）2013/09-2018/05，中国科学院大学，国家天文台，博士，导师：王启明

（2）2005/09-2008/01,北京建筑工程学院，结构工程系，硕士，导师：苗启松，戚承志

（3）2001/09-2005/07，山东科技大学，土木工程系

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

2008/05-至今，中国科学院国家天文台，FAST工程，工程师

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目（课题）及人才计划项目情况（按时间倒序排序）：

国家自然科学基金青年基金，Y711191N01，FAST反射面支承结构在役可靠性研究，2018/1-2020/12,30万，在研，主持

国家自然科学基金面上项目，Y111421001，大型望远镜状态监控与故障诊断，2011/10-2016/01，58万元，已结题，参加

代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

一、代表性论著（包括论文与专著，合计5项以内）；

(1) **Baoqing Zhao**(#)(*)，Qiming Wang, Benning Song, The method to realize the performance of FAST reflector unit,SPIE, Austin，2018.08.24

(2) **赵保庆**(#)(*)，王启明，李志恒，雷政，FAST圈梁支承结构性能理论与实验研究，工程力学，2018年6月，35(S1)：200-204,211

(3) **Zhao Baoqing**(#)(*), Wang Qiming, Zhao Qing, Gu Xuedong, Hu Jinwen, A new Type aluminum alloy Backup Frame of FAST project, the 2014 4th International Conference on Materials Science and Information Technology, Tianjin, P.R.China, 2014.06.14-06.15

(4) 吴明长，王启明，郭永卫，**赵保庆**，大射电望远镜FAST风环境数值模拟研究，Astronomical Research & Technology，2012年4月，9（2）：121-128

(5) 戚承志，**赵保庆**，罗健，不同的结构层次上岩体变形破坏的能量关系，北京建筑工程学院学报，2007，第4期，1－4

二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励（合计10项以内）。

(1) **赵保庆**(#)(*)，王启明，周观根，严永忠，李之硕，王淞波,用于连接FAST射电望远镜四边形反射面单元和圈梁的组件,2018.12.14，中国，ZL 2016 1 0569843.2

(2) **赵保庆**(#)(*)，张琳，朱忠义，王启明，王哲，刘传佳，古学东，刘飞，梁宸宇,崔建华,一种FAST望远镜圈梁格构柱结构体系用抗拔装置,中国,2018.3.26, ZL2016 1 0056425.0

(3) **赵保庆**(#)(*)，古学东，赵清，王启明，南仁东，FAST射电望远镜反射面单元支撑调整装置，2014.11.27，中国，ZL 2014 2 0734530.4

(4) **赵保庆**（20/20），500米口径球面射电望远镜超大空间结构工程创新与实践，北京市科技进步奖，一等奖，2016

（南仁东，朱忠义，朱万旭，王启明，姜鹏，张琳，黄颖，王晓波，齐五辉，郭正兴，高继领，刘传佳，王哲，韦福堂，刘飞，刘漩，古学东，郑晓年，张升华，**赵保庆**）

(5) **赵保庆**（7/9），昆明长水国际机场网架工程，中国钢结构协会空间结构分会，设计金奖，2015

（朱忠义，束伟农，齐五辉，秦凯，李华峰，卜龙瑰，**赵保庆**，王毅，李云）

马晓耘 简历

中国科学院国家天文台，南美观测站，工程师

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

2004.7－2008.9，复旦大学，电子信息科学与技术，学士

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

2011.3-至今， 中国科学院国家天文台,国家天文台,工程师

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目(课题)及人才计划项目情况(按时间倒序排序)：

科技部重大合作项目，2010DFA02710，国家天文台与圣胡安大学开展VLBI合作观测与研究，2011年1月1日-2018年12月31日，8819万元，在研，参加。

代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

按照以下顺序列出：

一、代表性论著（包括论文与专著，合计5项以内）；

（1）赵卫普; 李建斌; 李金增; 孙建民; 齐力; 罗滔; **马晓耘**; 莫铠玮; 李鹏程; 夏跃兵; MALLAMACI C C; PODESTA R C; PACHECO A M; ACTIS E; CASTRO J I; ALVIS R H; LOPEZ C E; FRANCILE C; PODESTA F; PEREZ J, 中阿40m射电望远镜选址与电磁环境监测 ，天文学进展, 2014.8.15, (03): 395~408

（2）S. Souto; H. Alvis Rojas; **X. Ma**; R. Podesta; A. Pacheco, Banco de datos meteorologicos para aplicaciones GNSS, XXVIII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geodestas y Geofísicos, Facultad de Ciencias Astronomicas y

Geofisicas Universidad Nacional de La Plata, 2017.4.17-2017.4.21

二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励（合计10项以内）。

(草稿) 请于提交后重新下载PDF的正稿

附件信息

序号	附件名称	备注	附件类型

(草稿) 请于提交后重新下载PDF的正式稿

项目名称： 极端台址大望远镜的防护方法与关键问题研究
资助类型： 面上项目
申请代码： A030802.射电、毫米波和亚毫米波天文技术与方法

国家自然科学基金项目申请人和参与者公正性承诺书

本人**在此郑重承诺：**严格遵守中共中央办公厅、国务院办公厅《关于进一步加强科研诚信建设的若干意见》规定，所申报材料和相关内容真实有效，不存在违背科研诚信要求的行为；在国家自然科学基金项目申请、评审和执行全过程中，恪守职业规范和科学道德，遵守评审规则和工作纪律，杜绝以下行为：

（一）抄袭、剽窃他人科研成果或者伪造、篡改研究数据、研究结论；

（二）购买、代写、代投论文，虚构同行评议专家及评议意见；

（三）违反论文署名规范，擅自标注或虚假标注获得科技计划等资助；

（四）购买、代写申请书；弄虚作假，骗取科技计划项目、科研经费以及奖励、荣誉等；

（五）在项目申请书中以高指标通过评审，在项目计划书中故意篡改降低相应指标；

（六）以任何形式探听尚未公布的评审专家名单及其他评审过程中的保密信息；

（七）本人或委托他人通过各种方式及各种途径联系有关专家进行请托、游说，违规到评审会议驻地游说评审专家和工作人员、询问评审或尚未正式向社会公布的信息等干扰评审或可能影响评审公正性的活动；

（八）向评审工作人员、评审专家等提供任何形式的礼品、礼金、有价证券、支付凭证、商业预付卡、电子红包，或提供宴请、旅游、娱乐健身等任何可能影响评审公正性的活动；

（九）其他违反财经纪律和相关管理规定的行为。

如违背上述承诺，本人愿接受国家自然科学基金委员会和相关部门做出的各项处理决定，包括但不限于撤销科学基金资助项目，追回项目资助经费，向社会通报违规情况，取消一定期限国家自然科学基金项目申请资格，记入科研诚信严重失信行为数据库以及接受相应的党纪政纪处理等。

编号	姓名 / 工作单位名称（应与加盖公章一致）/ 证件号码 / 每年工作时间（月）	签字
1	**郭永卫** / 中国科学院国家天文台 / 1**********0 / 9	
2	**程诚** / 中国科学院国家天文台 / 4**********2 / 3	
3	**赵保庆** / 中国科学院国家天文台 / 3**********9 / 3	
4	**马晓耘** / 中国科学院国家天文台 / 1**********6 / 3	
5		
6		
7		
8		
9		
10		

项目名称： 极端台址大望远镜的防护方法与关键问题研究
资助类型： 面上项目
申请代码： A030802.射电、毫米波和亚毫米波天文技术与方法

国家自然科学基金项目申请单位公正性承诺书

本单位依据国家自然科学基金项目指南的要求，严格履行法人负责制，**在此郑重承诺：**本单位已就所申请材料内容的真实性和完整性进行审核，不存在违背中共中央办公厅、国务院办公厅《关于进一步加强科研诚信建设的若干意见》规定和其他科研诚信要求的行为，申请材料符合《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规，在项目申请和评审活动全过程中，遵守有关评审规则和工作纪律，杜绝以下行为：

（一）采取贿赂或变相贿赂、造假、剽窃、故意重复申报等不正当手段获取国家自然科学基金项目申请资格；

（二）以任何形式探听未公开的项目评审信息、评审专家信息及其他评审过程中的保密信息，干扰评审专家的评审工作；

（三）组织或协助项目团队向评审工作人员、评审专家等提供任何形式的礼品、礼金、有价证券、支付凭证、商业预付卡、电子红包等；宴请评审组织者、评审专家，或向评审组织者、评审专家提供旅游、娱乐健身等任何可能影响科学基金评审公正性的活动；

（四）包庇、纵容项目团队虚假申报项目，甚至骗取国家自然科学基金项目；

（五）包庇、纵容项目团队，甚至帮助项目团队采取“打招呼”等方式，影响科学基金项目评审的公正性；

（六）在申请书中以高指标通过评审，在计划书中故意篡改降低相应指标；

（七）其他违反财经纪律和相关管理规定的行为。

如违背上述承诺，本单位愿接受国家自然科学基金委员会和相关部门做出的各项处理决定，包括但不限于停拨或核减经费，追回项目经费，取消一定期限国家自然科学基金项目申请资格，记入科研诚信严重失信行为数据库以及主要责任人接受相应党纪政纪处理等。

依托单位公章:
日期： 年 月 日

合作研究单位公章:
日期： 年 月 日

合作研究单位公章:
日期： 年 月 日