

项目公示信息(自然科学奖)

一、项目名称： 星空地观测大数据时代下大地测量学
新平差问题理论研究

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省教育厅

提名意见：

测量平差理论与方法是测绘学的基础，为高精度定位、重力测量、遥感及其应用提供理论基础保障。测量平差理论都是在加性误差模型的基础上发展起来的。本项目重点研究三个基础测量平差理论问题：第一系统提出并发展了大地测量乘性误差的新平差理论与方法；第二提出并系统研究了部分EIV模型及其EIV模型误差对加权最小二乘平差及其方差分量估计的影响；第三研究等式约束条件下测量平差的计算复杂性问题的。

近十多年来项目组一直致力于研究新测量随机误差的平差理论与方法及平差计算复杂性研究。在大地测量乘性误差的研究方面，有别于各学科领域的通用拟似然法，我们系统地研究并提出了以最小二乘为基础的乘性误差模型的新平差理论和方法，系统地研究新方法的统计特性，对乘性误差平差理论做出了基础性贡献，极大地丰富和完善了测量平差理论和方法，对于推动大地测量学科的发展具有重要的理论价值和意义。就大地测量学科而言，我们是国内外率先开展大地测量乘性误差模型研究的团队，我们的理论研究成果填补了国内外大地测量领域关于乘加性随机误差模型研究的空白。因为最小二乘原理不要求(拟)似然函数，我们的理论研究成果对于大地测量以外的领域也可以说是一个重要贡献。我们也是国内外率先提出部分EIV模型概念的团队，并系统研究相应的新平差方法，统计特性以及系数误差对最小二乘平差和方差分量估计的影响，更对Tienstra平差理论做出了新的原创性贡献。可以不夸张地说，我们以最小二乘原理为基础发展起来的新测量随机误差平差理论与方法的研究成果在国际大地测量领域具有最先进水平，在国际大地测量界获得高度评价与认可，并得

到了广泛引用。

本项目成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。特提名为陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介

本项目属于大地测量基础领域。

测量平差理论与方法是测绘学的基础，为高精度定位、重力测量、遥感及其应用提供理论基础保障。自高斯提出最小二乘法以来，测量平差理论与方法都是以加性误差模型为基础发展起来的，本研究中将之简称为传统误差模型。近代新测绘与遥感技术以电磁波技术为手段，采集的数据表现出乘性误差特征。新随机误差的大小与信号强弱成正比。但是，国内外大地测量领域对于乘性随机测量误差的研究一片空白。因此，传统的测量平差理论与方法已经不能满足现代大地测量数据处理中的新问题，本项目系统地研究发展大地测量乘性误差的新平差理论与方法。另一方面，传统误差模型中的系数矩阵是确定性非随机的。但是，测量平差中，我们遇到了平差系统系数矩阵由其它大地测量值确定的问题，称之为**Errors-in-Variables (EIV)** 模型，也简称为**EIV**模型。但是，现实的大地测量**EIV**模型的系数矩阵元素并不都是随机的，也有部分是非随机的，称之为**Partial EIV**模型或部分**EIV**模型。本项目的重要原创基础研究贡献是首先提出部分**EIV**模型的概念，系统地研究其平差统计特性以及系数矩阵随机性对加权最小二乘平差和方差分量估计的影响。本项目的第三个重要原创基础研究成果证明，在等式约束平差理论的研究方面，**Tienstra**的等式约束平差法比包括统计数学和大地测量学在内的各相关领域广泛使用的拉格朗日法计算工作量小，荷兰科学院院士，国际著名大地测量学家**Teunissen**教授高度评价该研究成果是对**Tienstra**平差理论做出了新的原创性贡献。

乘性误差模型在统计学与其它领域有着广泛的研究与应用，全世界解决乘性误差模型的通用方法是统计学家上世纪70年代提出的拟似然法。众所周知,拟似然法中的拟似然函数是由一组微分方程定义

的。因为观测方程是任意的，微分方程的解函数不一定可以标准化成有传统意义的似然函数。拟似然法存在多组解，缺乏根据判断哪个解才是真正的拟似然解。更可以证明，大地测量学领域经常使用的正态分布不是该微分方程的解。因此，统计学中的通用拟似然法不能简单地应用于处理正态分布的新大地测量乘性随机误差，必须为大地测量乘性误差模型发展新的平差理论和方法。

尽管数学界，工程界及大地测量界等对EIV模型有了很多的研究并且取得了很多重要成果，鉴于EIV模型的系数矩阵元素并不都是随机的事实，有必要对之进行专门系统研究，为此项目组首先提出了Partial-EIV模型的概念。另一方面，在EIV模型的严格平差中，除了模型未知参数之外，也需要附加平差所有随机的系数矩阵元素。在当今的大数据时代，就是世界最快的超级计算机也无能为力，必须考虑计算复杂性以及平差最优性之间的最佳平衡。事实上，项目组首先提出的Partial-EIV模型之后，国际大地测量领域众多的研究人员在此基础上深入开展扩展研究，也取得了一系列重要成果。鉴于EIV模型的超大规模计算工作量问题，项目组研究了如何在不损害方法严密性的条件下减少计算复杂性问题，系统研究了EIV模型误差对加权最小二乘平差和方差分量估计的影响，研究了其对可靠性的影响，并研究发展了附有不等式约束的部分EIV模型问题。

近十多年来项目组一直致力于研究这些新测量随机误差的平差理论与方法及平差计算复杂性研究，有别于各学科领域的通用拟似然法，我们系统地研究并提出了以最小二乘为基础的乘性误差模型的新平差理论和方法，系统地研究新方法的统计特性，对乘性误差平差理论做出了基础性贡献，极大地丰富和完善了测量平差理论和方法，对于推动大地测量学科的发展具有重要的理论价值和意义。就大地测量学科而言，我们是国内外率先开展大地测量乘性误差模型研究的团队，我们的理论研究成果填补了国内外大地测量领域关于乘加性随机误差模型研究的空白。因为最小二乘原理不要求(拟)似然函数，我们的理论研究成果对于大地测量以外的领域也可以说是一个重要贡献。我们也是国内外率先提出部分EIV模型概念的团队，并系统研究其影

响，更对Tienstra平差理论做出了新的原创性贡献。可以不夸张地说，我们以最小二乘原理为基础发展起来的新测量随机误差平差理论与方法的研究成果在国际大地测量领域具有最先进水平，在国际大地测量界获得高度评价与认可，并得到了广泛引用。

具体地说,我们在新随机误差的平差理论与方法研究方面主要取得了以下重要基础性成果:

1) 项目组首先证明了拟似然函数对应的微分方程是任意的,其解函数不一定可以标准化成有传统意义的似然函数,通用的拟似然法本质上不具有传统意义的似然特性。另一方面,拟似然法可能存在多组解,缺乏根据判断哪个解才是真正的拟似然解。更可以证明,大地测量学领域经常使用的正态分布不是该微分方程的解。

2) 发展了以最小二乘原理为基础的乘性随机误差模型的新平差理论与方法,即最小二乘法,加权最小二乘法和偏差改正加权最小二乘法,并研发出了它们各自的算法。不同于各学科领域的通用拟似然法,我们的新方法不需要似然函数,具有一般可用性。具体地说,系统地推导了这三种最小二乘法的参数平差值以及各有关量的方差协方差公式并对相应的平差值进行精度评定。证明了加权最小二乘法是有偏估计,推导了估计的偏差并提出了偏差改正加权最小二乘法。在乘性随机误差模型基础上,推导了这三种最小二乘法相对应的单位权方差估计公式。理论与模拟结果表明,新公式理论正确,简单有效。

3) 首先提出了部分EIV模型的概念并研究了相应的平差理论与方法,开创了国际大地测量数据处理领域一个新的研究方向。国际大地测量领域众多的研究人员在此基础上深入开展扩展研究,也取得了一系列重要成果。在EIV模型平差的精度评定方面,迄今为止,只有Gleser (1981, Ann Stat)及van Huffel/Vandewalle于1991年出版的书中的无限样本条件下的渐进精度公式,缺乏现实应用意义。我们针对实际问题不可能有无限多个大地测量观测值的现实,推导了有限样本一阶精度公式。

4) EIV模型的平差未知参数包括模型未知参数和随机的系数矩阵元素,在当今的大数据时代,随机系数矩阵的行数都可以轻易超过

亿级，列数也可能超过百万，仅平差系数矩阵元素就达10的14次方，世界最快的超级计算机也无能为力，必须考虑计算复杂性以及平差最优性之间的最佳平衡。项目组研究了如何在不损害方法严密性的条件下减少计算复杂性问题，全面系统地研究了EIV模型误差对加权最小二乘平差和方差分量估计的影响，研究了其对可靠性的影响，证明了模型EIV方差分量的不可估性，并研究发展了附有不等式约束的部分EIV模型的平差方法。

5) 在等式约束平差计算复杂性研究方面，尽管包括数学界在内的几乎所有领域都采用通用的拉格朗日法，项目组证明了 Tienstra 的等式约束平差法计算量比拉格朗日法计算量小。荷兰科学院院士，国际著名大地测量学家 Teunissen 教授高度评价研究成果是Tienstra平差理论做出了新的原创性贡献。

本项目的相关研究成果已经发表在国内外高水平学术刊物上，多数论文刊登于国际大地测量界的最高学术刊物Journal of Geodesy上。

四、客观评价

测量平差理论与方法自古以来都属于应用数学和统计学。高斯以大地测量实践为基础发明最小二乘法；德国大地测量学家 Helmert 与英国数学家、天文大地测量学家 Airy 于 1900 年前后发明方差分量估计方法，比统计学早近 30-40 年；瑞典大地测量学家 Bjerhammer 与 Penrose 几乎同时研究广义逆矩阵。但是，建立在加性误差模型基础上的传统测量平差理论，即最小二乘估计无法进行或者说完全不适合乘性或者加乘性混合误差模型的参数估计，本基础研究项目率先在国际大地测量界研究并发展新大地测量误差的平差理论与方法，新的平差理论与方法建立在严格的数学和统计学的基础上，理论严密，推理清楚。等式约束平差理论的计算复杂性研究成果也得到国际大地测量同行专家的高度评价。

本基础研究项目最重要的基础平差方法，特色与创新之处表现在如下六个方面：

1)深入研究乘性误差数据方面各科学与工程领域的通用拟似然法。项目组的研究表明，通用拟似然法对应的似然函数只能由微分方

程定义，其解所对应函数不一定可以标准化传统意义上的似然函数。大地测量学领域经常使用的正态分布不是该微分方程的解。因此，统计学中的通用拟似然法不能简单地应用于处理正态分布的新大地测量乘性随机误差。通用拟似然法可以存在多组解，因为不知道似然函数，我们将没有理论根据判断哪个解才是真正的拟似然解。从这个意义上说，拟似然法在理论上存在严重缺点。因此，可以说是对乘性误差模型做出了新的基础性贡献。

2)针对国内外大地测量领域迫切需要处理乘性随机测量误差的研究的现状，项目组系统地发展了以最小二乘原理为基础的新的乘性误差模型平差理论与方法。我们提出的新平差理论目标函数明确，不需要任何概率分布假设，具有一般可用性。详细推导完成了各种估计方法、精度评定和单位权方差估计，研发了相应的软件系统。为乘性随机误差模型建立了比较完整的新平差理论及其应用公式体系，为处理地空观测值建立一个坚实的理论基础，极大地丰富了大地测量平差理论和方法。以最小二乘原理为基础发展起来的新测量随机误差平差理论研究成果在国际大地测量领域具有最先进水平。引领国内外大地测量研究领域关于乘性加乘性随机误差模型的研究。推动了测绘学基础平差理论与方法的发展。

3)在国际大地测量平差理论研究领域，项目组首先提出了部分 EIV 模型的概念并研究了相应的平差理论与方法，开创了国际大地测量数据处理领域一个新的研究亮点。国际大地测量领域众多的研究人员在此基础上深入开展扩展研究，也取得了一系列重要成果。在 EIV 模型平差的精度评定方面，迄今为止，只有无限样本条件下的渐进精度公式，缺乏现实应用意义。针对实际问题不可能有无限多个大地测量观测值的现实，项目组推导了有限样本一阶精度公式。

4)因为 EIV 模型需要平差大量的未知参数，必须考虑计算复杂性以及平差最优性之间的最佳平衡。项目组研究了如何在不损害方法严密性的条件下减少计算复杂性问题，全面系统地研究了 EIV 模型误差对加权最小二乘平差和方差分量估计的影响，研究了其对可靠性的影响，证明了模型 EIV 方差分量的不可估性，并研究发展了附有不

等式约束的部分 EIV 模型的平差方法。

5)在等式约束平差理论的计算复杂性研究方面，迄今为止，包括数学界在内的几乎所有科学与工程领域都采用通用的拉格朗日法，项目组证明 Tienstra 的等式约束平差法比包括统计数学和大地测量学在内的各相关领域广泛使用的拉格朗日法计算工作量小，荷兰科学院院士，国际著名大地测量学家 Teunissen 教授高度评价该研究成果是对 Tienstra 平差理论做出了新的原创性贡献。

6)把所有理论研究成果应用到对地观测技术中来，对 GNSS、InSAR、EDM 数据进行几种方法的参数估计和精度评定结果分析比较。通过激光测距 LiDAR 技术模拟一个滑坡模型，研究分析了乘性观测误差对于 DEM 构建及其在估计滑坡方量方面的影响。

在不同的研究阶段，及时将有关理论和计算成果写成论文公开发表。完成了乘性误差模型以及加乘性混合误差模型的平差研究，包括参数估计，精度评定与分析，偏差分析，编制了相应的软件系统，最终把大地测量平差理论扩展至乘性误差模型，丰富和完善了大地测量平差理论。研究成果也得到了荷兰科学院院士，国际著名大地测量学家 Teunissen 教授的高度评价。最后在研究过程中形成具有创新意识、跨学科、跨部门的测量数据处理研究团队。

本项目属于基础理论研究。最重要的理论研究成果刊登在国际大地测量界最高(SCI)学术刊物 Journal of Geodesy 上。据 google scholar, 本项目主要论文的引用情况如下，最多的一篇 Journal of Geodesy 论文有 190 个以上引用，另一篇 Journal of Geodesy 论文有 55 个引用。并且一篇 Advances in Space Research 论文获得了最优秀论文奖。取得了这些基础原创研究成果的主要内容已经在第三部分做了相应的叙述。我们也把发展起来的理论应用于 LiDAR DEM 滑坡方量估计的影响上，特别是本项目组在应用方面也取得许多显著研究成果，发明专利和软件系统。

五、代表性论文专著目录（限 5 条）

序号	论文专著名称	刊名	作者	第一完成单位	年卷页码	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	SCI 他引次数	他引总次数	知识产权是否归国内所有
1	Alternative Formulae for Parameter Estimation in Partial Errors-in-variables Models	Journal of Geodesy	Yun Shi, Peiliang Xu; Jingnan Liu, Chuang Shi	西安科技大学	2015-89(1): 13-16	2015/01	徐培亮	师芸	师芸, 刘经南, 施闯	21	29	是
2	Comparing the estimates of the variance of unit weight in multiplicative error models	Acta Geodaetica et Geophysica	Yun Shi, Peiliang Xu	西安科技大学	2015-50(3): 353-363	2015/09	徐培亮	师芸	师芸	5	6	是
3	Error analysis of high-rate GNSS precise point positioning for seismic wave measurement	Advances in Space Research	Yuanming Shu, Yun Shi, Peiliang Xu, Xiaoji Niu, Jingnan Liu	武汉大学	2017-59 (2): 2691-2713	2017/02	徐培亮	束远明	束远明, 师芸, 牛小骥, 刘经南	11	15	是

4	A Computational Complexity Analysis of Tienstra's Solution to Equality-constrained Adjustment	Studia Geophysica et Geodaetica	Yun Shi, PeiLiang Xu, JunHuan Peng	西安科技大学	2017-61: 601-615	2017/10	徐培亮	师芸	师芸, 彭军还	0	0	是
5	GPS-based PWV for precipitation forecasting and its application to a typhoon event	Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics	Qingzhi Zhao, Yibin Yao, Wanqiang Yao	西安科技大学	2018-167: 124-133	2018/01	赵庆志	赵庆志	赵庆志, 姚宜斌, 姚硕强	21	31	是

六、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
师芸	1	无	教授	西安科技大学	西安科技大学	对本项目做出了原创性贡献。提出了新误差模型的新平差理论与方法，建立了相应的精度评定体系。证明 Tienstra 平差法比拉格朗日法计算工作量小，著名学者 Teunissen 教授评价是对 Tienstra 理论做出了新的原创性贡献。推导了 EIV 模型新 TLS 迭代公式，对大数据问题具有重要实际应用价值。
刘经南	2	国家卫星定位系统工程中心主任	工程院院士，教授	武汉大学	武汉大学	项目主要完成人，参与指导研究方案设计、特别是模型平差理论建立研究与应用研究等工作。对本项目部分创新研究内容做出了创造性贡献。系统研究了乘性噪声随机误差模型，EIV 模型和部分 EIV 模型平差等关键理论问题，指导项目组开展各项研究工作，对高质量，高水平地完成本项目做出了重要贡献。
束远明	3	无	副教授	中国海洋大学	武汉大学	项目主要完成人，本完成人在系统研究高频 GNSS 数据处理理论研究进展的基础上，主要完成了地震波测量中高频 GNSS 单点定位精度问题的研究。对高质量，高水平地完成本项目做出了重要贡献。
徐培亮	4	无	助理研究员	京都大学	京都大学	项目主要完成人，指导研究方案设计、特别是模型平差理论建立研究与应用研究等工作。对本项目创新研究内容做出了创造性贡献。系统研究并且指导了乘性噪声随机误差模型，EIV 模型和部分 EIV 模型平差等关键理论问题的各项研究工作。对高质量，高水平地完成本项目做出了重要贡献。
赵庆志	5	无	副教授	西安科技大学	西安科技大学	本完成人主要是利用 GNSS 观测数据进行多维水汽反演研究及其在极端天气中的应用。利用对流层层析技术，基于协整检验思想，研究极端降雨期间多维水汽的时空变化特征，构建极端天气与多维水汽时变特征的关系模型。编制相应的专利和软件系统。

七、主要完成单位情况

1.西安科技大学

主要负责理论、实验研究、实测数据的分析、理论研究和应用技术攻关，在 EIV 模型、计算复杂性、乘性噪声模型、加性/乘性混合噪声模型平差方法的理论研究、实验研究与应用研究方面作出了贡献。

2.武汉大学

项目主要完成单位，主要完成项目的部分理论研究和应用研究的

设计与工程实践应用。

3.中国海洋大学

项目主要完成单位，与其它两单位一起完成项目有关各个方面的理论和应用研究。主要完成人之一在武汉大学攻读博士期间就开始了合作研究并完成了部分重要合作成果，后该团队成员博士毕业后进入中国海洋大学任教职，但团队合作没有中断，一直在持续进行中。

八、完成人合作关系说明

1) 师芸，项目总负责人，第 1 完成人，对本项目做出了原创性贡献，自 2008 年开始一直与第四完成人合作，2013 年开始与第二完成人合作，2012 年开始与第三完成人合作，2015 年开始与第五完成人合作。针对新误差模型，提出并发展了以最小二乘为基础的新平差理论与方法，建立相应的精度评定体系。新平差理论目标函数明确，不需要概率分布假设，具有一般可用性，避免了通用拟似然的缺点。证明 Tienstra 的等式约束平差法比包括统计数学和大地测量学在内的各相关领域广泛使用的拉格朗日法计算工作量小，荷兰科学院院士，国际著名大地测量学家 Teunissen 教授高度评价研究成果是对 Tienstra 平差理论做出了新的原创性贡献。

2) 刘经南，第 2 完成人，主要指导研究方案设计、特别是理论研究与应用研究与模型建立等工作，2013 年开始与项目总负责人合作，数十年来一直与第四完成人有直接或间接合作，2012 年开始与第三完成人合作。对本项目创新研究内容做出了创造性贡献，与项目组其他成员合作的相关研究成果在国际大地测量界得到了高度评价，研究论文被广泛引用。

3) 束远明，第 3 完成人，项目主要完成人，本完成人在系统研究高频 GNSS 的基础上，与项目组其他成员一起提出了假设，即短期 PPP 可以达到毫米级精度并从理论和实验上证实该假设是正确的，同时应用高频 GNSS 单点定位精度于地震波测量中。对高质量，高水平地完成本项目做出了重要贡献。自 2012 年开始一直与项目总负责人，第二和第四完成人合作。

4) 徐培亮，第 4 完成人，主要指导理论研究与应用研究工作。自 2008 年开始一直与项目总负责人合作，数十年来一直与第二完成

人有直接或间接合作，2012 年开始与第三完成人合作。对本项目所有研究内容做出了创造性贡献。系统研究了乘性误差随机模型的平差理论，提出部分 EIV 模型，EIV 模型的有限样本精度估计，模型误差对方差写方差估计，加权最小二乘估计的影响问题，推进了高质量成果的产出。

5) 赵庆志，第 5 完成人，本完成人与项目总负责人合作主要利用 GNSS 观测数据进行多维水汽反演研究及其在极端天气中的应用。利用对流层层析技术，基于协整检验思想，研究极端降雨期间多维水汽的时空变化特征，构建极端天气与多维水汽时变特征的关系模型。