

附件材料一：

成果总结报告

从2000年前后引力中心开始酝酿一套规范化、标准化、可操作性强的研究生科研管理办法,以保障研究生的培养质量。通过长期的探索,凝练出了“三阶段、九步骤”研究生科研过程管理办法,通过多年的实践证明该办法能够对研究生培养过程和培养质量进行规范管理。从事实验研究的“三九式”科研管理主要包括以下内容:

阶段	步骤	内容
第一阶段 方案设计	第一步 背景调研	文献阅读、明确各种方案的优缺点。
	第二步 方案建模	理论模型、优化设计、独立检验。
	第三步 方案设计	总体设计图、误差分配表、操作流程。
第二阶段 实验准备	第四步 单元准备	购买清单、加工图纸、自行研制。
	第五步 组装调试	验收检验、测试复测、流程控制。
	第六步 测试改进	灵敏度检测、噪声功率谱密度。
第三阶段 正式试验	第七步 数据积累	各种调制实验、各种特征参数
	第八步 数据处理	数据处理规范、实验结果分析
	第九步 撰写论文	创新点、科学价值、存在问题

从事理论研究的“三九式”科研管理主要包括以下内容:

阶段	步骤	内容
第一阶段 选定问题	第一步 文献阅读	读懂相关参考文献
	第二步 提出问题	梳理创新点、科学价值、存在问题
	第三步 确定问题	科学问题的重要性
第二阶段 初步结果	第四步 确定方法	弄清现有方法的优缺点
	第五步 知识准备	掌握选定方法的计算过程
	第六步 初步计算	初步尝试并给出初步结论
第三阶段 正式结论	第七步 自我验算	重复检验、不同方法检验
	第八步 导师复查	基本假设、计算过程、结论意义
	第九步 撰写论文	创新点、科学价值、存在问题

根据“三九式”管理方法，研究生培养一转二阶段，实验室学术委员会将对研究生科研选题的意义及可行性进行评审，要求科研选题或面向基础科学前沿，或面向国家重大战略需求，课题目标要有难度，实验方案需可行。研究生二转三阶段是对研究生毕业答辩前的学术成果和学术水平的评价，是对研究生培养质量的最后把关。在研究生培养的各个时期，通过九步骤规范管理明确研究生培养目标，使研究生培养工作得以按照“规范、有序、可查、高效”开展。此外，为了时刻督促师生保持严谨的科研作风，中心制定了“十要十不准”等系列科研行为准则，对实验过程、数据处理、论文撰写等多方面给出了应该做什么、禁止做什么等规范，细则为：

十要十不准科研行为准则

- 一、实验状态记录要详实，不准含糊遗漏；
- 二、实验输入条件要验证，不准存在假设；
- 三、实验流程安排要论证，不准随心所欲；
- 四、实验进展报告要及时，不准拖拉隐瞒；
- 五、实验原始数据要真实，不准任何修改；
- 六、实验数据文档要备份，不准单一存储；
- 七、数据处理规范要会审，不准私自更改；
- 八、实验报告复查要独立，不准敷衍了事；
- 九、最终实验结果要会评，不准擅自公布；
- 十、实验报告引文要注明，不准故意隐瞒。

依托此办法，培养出了一批具有创新精神、吃苦精神及团队精神的领军人才。17年来，在整个办法探索及推广的过程中，共培养博士 58 人，硕士 194 人，其中有 2 人获得全国百篇优秀博士论文，以研究生为主的研究论文有 6 篇发表在物理学顶尖杂志 *Phys. Rev. Lett.* 上，多篇发表在 *Phys. Rev.* 系列杂志上，200 多人参加国际学术会议并做报告，6 人获研究生国家奖学金。部分毕业生已成为相关领域的领头人，其中 2 人获得国家自然科学基金杰出青年基金资

助，1 人获国家自然科学基金优秀青年基金资助，5 人次获得湖北省自然科学一等奖，3 人获得教育部新世纪优秀人才的支持，1 人入选“万人计划”领军人才，1 人获得全国“五一”劳动奖章，1 人获校学术新人奖，多人承担国家自然科学基金委重点项目及科技部 973、863 项目。培养的研究生在面向基础科学前沿和国家重大需求两方面的科研中都取得了丰富的成果：万有引力常数 G 的测量结果多次被国际科学数据委员会收录；近距离牛顿反平方定律的实验检验取得国际最好水平；研制的冷原子干涉重力仪的分辨率达到国际领先水平；研制的加速度计分别于 2013 年和 2017 年实现了空间飞行器搭载实验等，分述如下：

（一）面向基础科学前沿研究。

物理学中四种基本相互作用（引力、电磁、强、弱）的最终统一描述是物理学的前沿科学问题之一。迄今为止，物理学家们一直努力寻找一个合适的理论来涵盖四种基本相互作用，而对引力基本性质更加深入的研究是关键的科学问题之一。对现有引力理论的基本假设和定律进行更加精密的检验，所获得的实验结果对于引力理论自身以及包罗四种基本相互作用的“统一理论”进一步发展具有重要意义。围绕着这一科学目标，实验室提出了具有创新思想和可行性的实验研究方案，进行扭秤周期法和角加速度法精确测量牛顿万有引力常数 G 、近距离牛顿反平方定律实验检验、基于精密扭秤实验技术的弱等效原理实验检验、以及关于引力的相关理论研究等，相关实验结果和理论研究成果达到国际领先水平，代表性研究工作介绍如下。

万有引力常数 G 的精确测量：万有引力常数 G 的精确测量不仅能加深对引力相互作用性质的认识，而且能促进精密测量技术发展。采用扭秤周期法和角加速度法两种方法测量牛顿万有引力常数 G 均达到国际领先

水平。自 1998 年以来测 G 实验结果一直被国际科技数据委员会 CODATA 收录。此后历时十年先后解决了一系列实验技术难题后，完成改进的周期法测 G 实验，并首次采用“双丝双摆”的实验方案对实验中使用的钨丝滞弹性效应进行了高精度的直接测量[Phys. Rev. D 80, 122005(2009)]最终给出的测 G 实验结果精度为 26ppm [Phys. Rev. Lett. 102, 240801 (2009); Phys. Rev. D 82, 022001 (2010)], 测量结果被 CODATA2010 和 2014 收录，是当时国际上扭秤周期法测 G 精度最高的实验结果。目前采用扭秤周期法和角加速度法两种方法同步测 G 的实验均已完成。两种方法测 G 结果的重复性均好于 12ppm，是目前国际上测 G 精度最高的结果，这必将提升我国在下一轮 CODATA 推荐 G 值中的所占权重和在精密测量物理领域的国际影响力。

刘祺博士生参与了该内容的钨丝周期法测 G 正式实验测量研究，并于 2009 年在 Phys. Rev. Lett. 发表研究论文；刘琳霞、王晴岚博士生参与了该内容的部分系统效应评估，并于 2009 年在 Phys. Rev. A 发表研究论文；杨山清博士生参与了该内容的钨丝滞弹性效应测量，并于 2009 年在 Phys. Rev. D 发表研究论文；黎卿、刘建平博士生参与了高 Q 值石英丝扭秤周期法测 G 正式实验测量研究，并先后于 2010 年和 2014 年在 Phys. Rev. D 和 Phil. Trans. R. Soc. A 上发表研究论文；薛超、全立地、邬俊飞博士生参与了角加速度法测 G 实验，并于 2014 年在 Phil. Trans. R. Soc. A 和 Rev. Sci. Instru. 上发表研究论文；薛超、刘建平、邬俊飞博士生于 2013 年、2016 年和 2017 年多次获得引力中心学术年会特等奖。黎卿、薛超博士生于 2014 年参加英国皇家学会举办的测 G 专题研讨会 (“The Newtonian constant of gravitation, a constant too difficult to measure?”)，薛超博士生在会上作报告，得到国际同行的广泛关注。

牛顿反平方定律实验检验：将引力与其它三种基本相互作用统一起来

的主要困难之一是引力较另外三种力小很多，考虑时空存在额外维度的 ADD 理论预言在近距离牛顿反平方定律可能会出现偏离可解释这一问题，但在该尺度下实验难度大，证据少。利用精密扭秤双调制“零”实验检验近距离牛顿反平方定律，实验结果验证了作用程大于 $66\mu\text{m}$ 时牛顿反平方定律的正确性[Phys. Rev. Lett. 98, 201101 (2007)]，并被国际同行认可；采用改进的方法完成的毫米范围的实验结果将国际上保持近三十年的实验精度提高 8 倍[Phys. Rev. Lett. 108, 081101 (2012)]；采用密度调制的亚毫米实验结果将国际最好水平提高 2 倍[Phys. Rev. Lett. 116, 131101 (2016)]。

官盛果博士生参与了精密扭秤双调制“零”实验检验近距离牛顿反平方定律的方案设计、装置搭建和正式实验测量研究，并于 2007 年在 Phys. Rev. Lett. 上发表论文；占必富博士生参与了毫米范围实验的装置搭建、系统干扰研究与排除、结果分析等，参加了第 10 届亚太引力与天体物理国际会议，并于 2012 年在 Phys. Rev. Lett. 上发表论文；谭文海博士生参与了密度调制亚毫米范围的实验装置搭建、误差评估等，并于 2016 年在 Phys. Rev. Lett. 上发表论文；谈玉杰博士生根据实验结果对标准模型扩展理论中纯引力部分的洛伦兹破缺效应进行了分析，分析结果于 2015、2016 年分别在 Phys. Rev. D、Phys. Rev. Lett. 上发表，她多次参加国际学术会议并作报告，于 2015 年获得研究生国家奖学金；杜安斌博士生参与了密度调制亚毫米范围改进实验的方案建模、单元准备。占必富、谭文海博士生获得引力中心学术年会特等奖。

弱等效原理实验检验：等效原理是广义相对论基本假设之一，但几乎所有试图将引力和其它相互作用统一的理论都要求它破缺。国际上认为等效原理破缺的原因主要是存在与组成成分、自转或自旋、极化或者手

性等依赖的新的基本相互作用。其中，国际上尚无手性材料检验等效原理的实验。采用精密旋转扭摆，首次利用了不同手性的检验质量检验弱等效原理。目前实验已完成，实验结果接近当前国际上弱等效原理地面检验的最好水平，是国际上在手性方面检验弱等效原理的最好水平。

郝琳、赵慧慧博士生参与了该内容的实验准备、方案设计和正式实验测量研究。郝琳、赵慧慧博士生于 2016 年和 2017 年获得引力中心学术年会特等奖、一等奖。

（二）面向国家重大战略需求的研究。

地球重力场是近地空间最基本的物理场之一，反映了地球（固体地球、水和大气）物质分布及其随时间和空间的变化。精密重力测量是对全球和局部区域地球重力场进行高分辨率和高精度的测量。精密重力测量可以用来开展地球物理、资源勘探、重力辅助导航与重力环境变化等研究。引力中心“十五”以来开展了其核心高精度重力测量仪器以及相关的关键技术的研究，并取得一系列重要成果。中心作为主要单位成功申报并承担精密重力测量国家重大科技基础设施建设，计划建成国际一流、综合指标国际领先的精密重力测量研究设施，并使之发展成为具有国际影响力的重力测量科学中心之一。代表性研究工作介绍如下。

空间加速度计：高精度空间加速度计是进行引力波探测等空间基础科学实验、全球卫星重力测量等空间任务的关键载荷之一。引力中心针对我国空间引力波探测和首颗低低跟踪重力测量卫星重大工程项目，开展了其关键载荷高精度静电加速度计的研究，成功研制了加速度计飞行样机并于 2013 年和 2017 年分别搭载实验五号卫星和天舟一号货运飞船进行了两次在轨验证，均取得圆满成功，测试结果表明研制的空间静电加

速度计性能指标达到国际先进水平，直接推动了我国卫星重力计划立项。

李竹溪博士生参与了该内容的软件工程化测试研究、于健博博士生参与了该内容的地面性能测试、软件设计、产品验收测试和在轨运控及数据处理的研究，并于 2017 年获得研究生国家奖学金，于 2016 年 1 月和 2017 年 9 月两次获得引力中心学术会议一等奖。

冷原子重力仪：作为一种高精度的量子传感器，冷原子物质波干涉仪已被广泛应用于地球物理、资源勘探、重力导航等领域。原子干涉仪在重力测量方面的高灵敏度，使其在原子时间频率标准、精细结构常数测量、基础引力实验等基础科学领域也具有广泛的应用前景。自 2005 年起，引力中心开始进行冷原子干涉绝对重力仪的实验平台的建设，先后实现了 ^{87}Rb 原子冷却囚禁、喷泉和原子干涉，研制了一系列高精度原子干涉精密仪器。经过多年持续不断的努力，原子重力仪分辨率水平达到了 $4.2 \times 10^{-9} \text{g/Hz}^{1/2}$ 的国际最好水平。目前，围绕高精度原子干涉重力测量，已经初步取得了一系列成果。概括如下：①自主研制了分辨率世界第一的原子干涉绝对重力仪，实现了 100 秒积分时间内 10^{-10}g 分辨率的突破，达到世界领先水平，为下一代重力基准仪器打下了基础。②研制了基于双喷泉的原子干涉重力梯度仪，首次提出并实现双条纹锁定技术，分辨率达到 $67 \text{E}@100 \text{s}$ ，为我国重力勘探储备了技术基础。③实现了共振周期大于 60s 的超低频三维隔振系统，解决了微伽级重力仪中的隔振问题。④利用原子干涉仪进行了真空中的磁场梯度测量，其分辨率达到国际先进水平。实验室自主研制的高分辨率原子重力仪样机被国际同行[Appl. Phys. Lett. 105, 144102 (2014)]评述是“record sensitivities”；同行[Phys. Today 67, 30 (2014)]评述是至今最灵敏的物质波传感器“Entanglement-based beam splitters have become the basis for the most sensitive and most

accurate matter-wave sensors to date”。在国际上首次提出并检验了原子自旋与引力耦合效应，相关结果发表在 *Phys. Rev. Lett.* 上。自主研发的可搬运原子重力仪成功参加了 2017 年在北京举办的国际重力比对，圆满完成了比对测量任务。

周敏康博士生与段小春博士生参与了原子干涉重力仪研究，先后留校任教；罗覃博士生参与了原子干涉重力基准仪器的研究，于 2017 年获得获得研究生国家奖学金；徐耀耀博士生参与了可搬运原子重力仪的研制，并成功参加了 2017 年在北京举办的国际重力比对，获得引力中心学术年会特等奖；邓小兵博士生参与了自旋与引力耦合效应的量子检验研究，于 2016 年在 *Phys. Rev. Lett.* 发表研究论文。

重力梯度仪：对地球重力场的梯度进行测量可提供局部场源的细节信息，梯度测量利用多个加速度计的差分输出，并共模抑制外界干扰，引力中心自十一五开始进行基于移动平台的重力梯度测量系统的设计，并分别针对基于旋转加速度计的重力梯度仪和基于低温超导的重力梯度仪开展关键技术攻关和样机研制工作。在旋转加速度计重力梯度测量技术攻关和实验室原理样机研制中，形成了硅基挠性加速度计整套研制工艺，研制的硅基挠性加速度计样机静态噪声优于 $10\text{ng}/\text{Hz}^{1/2}@1\text{Hz}$ ，将国内同类加速度计噪声降低两到三个数量级；首次实现了四个石英挠性加速度计一致性达到 5.5 个量级的实时匹配技术，在此基础上研制出旋转加速度计重力梯度仪原理样机，并实现 50E 以内的静态重力梯度测量。在基于低温超导重力梯度测量关键技术研究，完成了平面和曲面超导线圈的制作与匹配、检验质量高精度匹配、铌材料的高精度加工与装配、以及电磁屏蔽、温度控制等环境抑制技术，国内首次集成了超导重力梯度仪原理样机，静态噪声本底优于 $10\text{E}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，填补国内空白。目前正在进行

两种重力梯度仪的工程样机研制，完成重力场辅助定位系统的第三要素，早日实现重力场辅助的自主导航。

伍文杰博士生参与了该内容的研究，并于 2015 年获得了博士研究生国家奖学金。在此期间，伍文杰博士生两次获得引力中心学术年会一等奖，获得一次引力中心学术年会特等奖，并且多次参加国际国内会议做学术报告，并于 2014 年获得中国地球科学联合学术年会优秀学生论文奖，于 2015 年与 2017 年分别在 *Journal of Electronic Materials* 与 *Sensors* 发表了研究论文。李祝博士生参与了该内容高精度探测电路研究，并于 2016 年在 *Micromachines* 发表研究论文。黄祥青博士生参与了该内容加速度计匹配技术的研究，并于 2017 年在 *Sensors* 发表了研究论文。邓忠光博士生参与了该内容重力梯度仪集成的研究，并获得一次引力中心学术年会二等奖。刘习凯博士生参与了该内容超导重力梯度仪样机的研究，并两次获得引力中心学术年会二等奖。

自 2009 年“三九式”管理方法在物理学院引力中心全面推广实施以来，引力中心严把研究生培养质量关，共进行了约 22 次转阶段评审，其中参与“一转二”评审的研究生 108 人次，通过 94 人，博士生未通过评审转为硕士研究生的近 10 人，参与“二转三”评审的研究生 34 人次，通过 32 人。部分毕业生已成长为各行各业的领军人才，他们为增强国民经济实力和解决国家重大需求方面发挥了重要作用。实践证明该方法是一套行之有效、规范可行的管理办法，有效提高了研究生培养质量。