2018年国家科技进步奖提名项目公示

一、项目名称

高准确度超大力值计量标准建立的关键技术与应用

二、提名者及提名意见

**提名者：**国家质量监督检验检疫总局

**提名意见：**

项目围绕超大力值力标准装置关键技术，在参考传感器组结构设计、力源控制方法、装置结构等方面取得了重要突破。形成了理论、方法、核心部件、应用等系列成果。研制一台60MN叠加式力标准装置，测量范围为（2~60）MN，准确度为0.05%，其主要技术指标在同类装置中处于国际领先水平，是目前世界上量程最大、准确度最高的超大力值力标准装置。（1）提出了高准确度复合式传感器组结构的设计方法，发明了球铰式二次调节结构的参考传感器组，有效地减小了装置受偏心倾斜载荷时引起的力寄生分量，装置重复性达国际领先水平。（2）首次提出双泵联动泵控缸技术与高速自适应PID算法相结合的力源控制方法，解决了力标准装置中力源稳定控制的问题，实现了控制稳定度优于0.002%/30min，处于国际领先水平。（3）研制了超大力值叠加式力传递系统，提出了该系统校准方法，创建超大力值系统误差精准外推及误差修正模型，实现了超大力值的准确复现。（4）发明了整体框架式机架结构和组合式多油缸力源，首次在力标准机上实现参考传感器组的整体自动切换、自动定位，提高装置的稳定性准确性。

项目成果完善了我国力值量值溯源体系。首先解决了我国超大力值无法准确量值溯源的问题，保证我国超大力值量值准确统一；第二，直接为超大力值产品质量检测提供技术支撑；第三，改变了中国力标准机行业原有的设计理念，将整体制造水平提升至国际领先水平；第四，突破关键领域中超大力值无法检测的瓶颈，在航空航天、船舶重工、钢铁装备、石油化工、建筑交通、核电风能等行业实现应用，为保障国防、公共安全提供强有力的技术支撑；第五，为国际力值标准的研究做出重要贡献，极大增强我国在国际力值计量领域研究的地位和话语权。

国家质量监督检验检疫总局同意推荐该项目申报2018年度国家科学技术进步二等奖。

三、项目简介

力值是产业发展、国防建设及科学研究中不可缺少的重要物理量。精准的超大力值（大于20MN）测量在国防装备、船舶、航空航天、公共安全、基础工业等领域具有关键性作用。超大力值力标准装置是实现超大力值精准测量的基础，是目前国际力值计量领域研究的热点和难点之一，其技术水平反映了国家科技发展的整体实力。随着经济社会的快速发展，相关领域对超大力值测量的量程和准确度要求日益提高，目前我国最大力标准装置为30MN，其准确度0.3%，严重制约相关领域的发展。本项目攻克超大力值高准确度力标准装置关键技术，满足国防、工业、科学研究等重点领域的急迫需求，彰显中国力值计量的国际地位。

本项目围绕超大力值力标准装置关键技术，在参考传感器组结构设计、力源控制方法、外推模型、装置结构等方面取得了重要突破。形成了理论、方法、核心部件、应用等系列成果。研制一台60MN叠加式力标准装置，测量范围为（2~60）MN，准确度为0.05%，其主要技术指标在同类装置中处于国际领先水平，是目前世界上量程最大、准确度最高的超大力值力标准装置。

装置先后与英国、德国进行力值比对，比对结果满意，装置准确度得到国际认可。在此基础上，受邀参与由德国、英国、法国等十个欧洲国家共同承担的欧洲计量联合研究计划项目（EMRP），为兆牛顿范围内力可追溯性研究提供验证。

主要创新点包括：（1）提出了高准确度复合式传感器组结构的设计方法，发明了球铰式二次调节结构的参考传感器组，有效地减小了装置受偏心倾斜载荷时引起的力寄生分量，装置重复性达国际领先水平。（2）首次提出双泵联动泵控缸技术与高速自适应PID算法相结合的力源控制方法，解决了力标准装置中力源稳定控制的问题，实现了控制稳定度优于0.002%/30min，处于国际领先水平。（3）研制了超大力值叠加式力传递系统，提出了该系统校准方法，创建超大力值系统误差精准外推及误差修正模型，实现了超大力值的准确复现。（4）发明了整体框架式机架结构和组合式多油缸力源，首次在力标准机上实现参考传感器组的整体自动切换、自动定位，提高装置的稳定性准确性。

项目成果完善了我国力值量值溯源体系。首先解决了我国超大力值无法准确量值溯源的问题，保证我国超大力值量值准确统一；第二，直接为超大力值产品质量检测提供技术支撑；第三，改变了中国力标准机行业原有的设计理念，将整体制造水平提升至国际领先水平；第四，突破关键领域中超大力值无法检测的瓶颈，在航空航天、船舶重工、钢铁装备、石油化工、建筑交通、核电风能等行业实现应用，为保障国防、公共安全提供强有力的技术支撑；第五，为国际力值标准的研究做出重要贡献，极大增强我国在国际力值计量领域研究的地位和话语权。

本项目申请专利22项，授权发明专利4项；发表论文26篇，其中1篇SCI检索，10篇EI检索；制定国家计量检定规程1项。研究成果在国际计量联合会（IMEKO）国际会议上应邀报告5 次。2014年国家质检总局以“我国建成世界量程最大的力标准机”为题向国务院中办和国办进行了专报。项目成果获得2016年度福建省科技进步一等奖。

四、客观评价

1. **国内专家、同行评价**

2015年1月21日, 以中国工程院叶声华院士、王海舟院士为组长，中国计量科学研究院李振民、张智敏研究员等为专家的项目验收委员会对本装置形成如下评价意见：

该项目突破五大关键技术，研制的60MN叠加式力标准装置具有创新性。该项目研制的60MN叠加式力标准装置(2～60)MN量程段重复性优于0.01%，优于美国NIST 54MN叠加式力标准机、英国NPL 30MN叠加式力标准机。

该装置能够符合国家计量检定规程要求，其结构合理、精密度高，力值稳定性好、自动化程度高。该项目的实施将解决我国超大力值量值溯源问题，为国防装备、航空航天、交通、建筑等关键领域的检测和安全提供有力的技术支撑和保障。将推动我国基础工业发展，促进产业结构调整，提升国家核心竞争力。可面向国际开展大力值校准工作，增强中国在国际制订力值产业标准、力值比对、国际力值研究的地位和话语权。该项目具有显著的社会效益和经济效益。

该项目技术难度大，创新性强。研制的60MN叠加式力标准装置为目前世界上量程最大的力标准装置，其重复性和负荷波动性等主要技术指标在同类装置中处于国际领先水平。

针对项目组在系统误差模型建立方面发表的论文《叠加式力标准装置系统误差修正研究》，审稿专家认为：“超大力值叠加式力标准装置是力值计量领域研究的关键问题，对其误差分析研究具有重要的实际意义。”

1. **国际专家、同行评价**

国际计量技术联合会力值与质量技术委员会(IMEKO TC3) 组成的专家组，包括TC3主席、德国PTB力学室主任Kumme博士，副主席英国国家物理研究院力学室主任Knott博士，前主席Sawla博士，德国试验机校准实验室主任Gerber博士，法国国家计量研究院力学室主任Philippe博士，于2014年10月实地考察了60MN力标准装置。Sawla博士亲自主持了重复性现场测试，并对试验结果签字确认。专家组一致认为： 60MN叠加式力标准机是目前世界上量程最大的力标准机，控制力值波动性好、自动化程度和准确度高，各项技术指标均达到国际领先水平，准确度和控制力值的波动性处于国际领先水平。本装置的建成，是勇气和智慧的结晶。

德国PTB力值计量专家Falk Tegmier认为：“…It is proved that the ability of the 60 MN FSM of FJIM to be named with an uncertainty of 0,05%”（…证明福建省计量科学研究院的60MN力标准装置的不确定度为0.05%）。

针对项目组在传感器结构设计上发表的论文“The inﬂuence of a balanced structure on the rotation effect of a build-up system”，国际计量界权威学术期刊*Measurement* 给予好评，IMEKO前主席、力学计量专家Dae-Im Kang教授认为该研究非常具有价值，对力学计量十分有益。

针对项目组在叠加系统结构上发表的论文“Practical Applications of An Enhanced Uncertainty Model for Build-Up Systems”,IMEKO TC3委员Aimo Pusa 认为该研究具有重要应用价值，前景广阔。

针对项目组在国际力值比对发表的论文“Force Comparison between FJIM and PTB up to 16.5MN ”，IMEKO TC3副主席Andy Nott认为这是一次极其成功的国际比对，向参加比对的中德双方项目组表示祝贺。

1. **国际学术会议**

2014年2月在南非举办的IMEKO TC3委员会第22届年会上，项目组成员应邀在会上作了题为 “Design of 60 MN Build-up Force Standard machine”的专题报告。

2015年8月在捷克举办的IMEKO第21届世界大会上，福建省计量科学研究院代表应邀宣读了题为“INTERCOMPARISON BETWEEN LARGE FORCE STANDARD MACHINES IN CHINA AND UK”的报告。

2017年6月在芬兰举行的IMEKO TC3年会上，福建省计量科学研究院代表应邀宣读了题为“INVESTIGATION THE CREEP AND CREEP RECOVERY”的报告。

同时，与德国PTB研究人员共同宣读题为“PRACTICAL APPLICATIONS OF AN ENHANCED UNCERTAINTY MODEL FOR BUILD-UP SYSTEMS”的报告。

4.国内外科技查新

查新总述：国内报道以及国际计量技术联合会力与质量技术委员会(IMEKO TC3) 主席等德国、英国、法国的计量国际计量权威专家均认定: 委托查新项60MN 力标准机是世界量程最大的力标准机。国外专家认为该力标准机控制载荷波动性结果优于0.005%的指标在世界上是独一无二的。各国专家一致认为，委托查新单位所建立的世界量程最大的60MN 力标准机，其结构合理，自动化程度高，力值控制波动性好，各项技术指标达到国际先进水平。

其他查新点均为委托查新单位的专利。委托查新项目具有新颖性。

5.政府专报

2014年11月，国家质检总局以“我国建成世界量程最大的力标准机”为题向国务院中办和国办进行了专报。2016年3月，福建省政府《政讯专报》刊发了《省质监局计量院正式参与欧洲计量联合研究计划（EMRP）》的信息。

五、推广应用情况

60MN叠加式力标准装置自投入使用以来，在多个领域开展应用，显著促进了相关行业的技术进步。

1. 超大力值量值溯源

已为全国计量技术机构（如江苏、山东省计量院见应用证明）校准标准测量仪，保证其量值的准确可靠，这些测力仪应用于各级计量技术机构对制造业、建筑、交通等重点领域的检定。

2.提供产业校准服务

为传感器生产企业、用户（如莆田市鸿飞传感器有限公司、上海自动化仪表研究院见应用证明）提供校准服务，极大地缩短了企业研发周期和降低研发成本。

3.提供技术支撑

本装置参考传感器组的设计对叠加式力标准机、试验机行业（如绍兴市肯特机械电子有限公司见应用证明）的技术创新、结构性改革提供了强有力的技术支撑和保障，使我国力标准机行业技术水平达到国际领先。

4.保障国防、公共安全

为国防装备、航天航空（如国防科技工业大扭矩一级计量站、北京航天计量测试技术研究所见应用证明）提供校准服务，保障长征系列火箭及国防科技工业尖端武器计量的精密测试和跟踪工作的准确可靠。为交通、建筑、能源等重点工程领域（如福建省交通建设工程公司、浙江欧感机械制造有限公司见应用证明）的桥梁支座和荷载箱校准，有效保证了重点工程安全质量。

5.开展国际大力值校准工作

德国联邦物理研究院将其50MN传递系统送我院进行校准，与德国传感器生产企业HBM公司、GTM公司签订合作协议（见应用证明）。

主要应用单位情况

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 应用单位名称 | 应用技术 | 应用起止时间 | 联系人/电话 | 应用情况 |
| 北京航天计量测试技术研究所 | 测力仪校准 | 2015-03-01 | 李廷元  13651339772 | 对2台量程为10MN的0.1级测力仪进行了校准，保障了长征系列火箭及国防科技工业尖端武器计量保障精密测试和跟踪工作的准确可靠。 |
| 国防工业大扭矩一级计量站 | 测力仪校准 | 2015-09-01 | 李涛  13761170123 | 对5台20MN的0.1级测力仪进行校准。应用于我国在研大型、超大型水面水下舰艇的研究。 |
| 江苏省计量科学研究院 | 测力仪校准 | 2016-04-06 | 胡强  13851822878 | 对30MN标准测力仪进行检定，保证了其量值准确可靠，解决了该院超大力值传感器无法进行量值溯源的困难。 |
| 山东省计量科学研究院 | 测力仪校准 | 2016-07-08 | 李万升  13808920366 | 对30MN标准测力仪进行检定，保证了其量值准确可靠，满足了济南轨道交通、鲁南铁路等一批重点工程安全质量的要求。 |
| 莆田市鸿飞传感器有限公司 | 传感器技术 | 2014-03-13 | 郑建平  13305946811 | 对LC系列大量程力传感器均进行检定和校准，解决了大力值传感器校准的难题，为产品质量提升提供了准确的试验手段，为技术创新、供给则结构性改革提供技术支撑和保障。 |
| 上海工业自动化仪表研究院 | 传感器校准 | 2014-01-13 | 张怀锁  13641645668 | 检测45台磁弹性测力传感器，55台电阻应变式测力传感器， 3台宝钢、1台沙钢使用的量程为60MN的轧制力传感器进行了校准，解决了超大力值传感器在国际上无法准确校准的难题，为该院研发传感器技术提供了测试手段和精准服务，为钢铁企业的产品质量提供技术支撑。 |
| 浙江欧感机械制造有限公司 | 荷载箱检测 | 2015-01-15 | 屠叶中  13588396719 | 对118台自平衡深层荷载试验检测设备进行了校准，解决了建筑及桥梁等领域桩基承载力检测的难题，保证建筑及桥梁的安全；同时为产品研发提供了有效的试验手段，促进了产品质量水平的提升，加速新产品开发进程，进一步扩大企业市场占有率。 |
| GTM传感器公司 | 传感器技术 | 2016-04-30 | 黄伟军  18017569611 | 根据协议为该公司产品进行校准，并为其质量提升和新产品开发提供技术支撑。 |
| HBM传感器公司 | 传感器技术 | 2016-10-20 | 金智伟  18913555729 | 根据协议为该公司产品进行校准，并为其质量提升和新产品开发提供技术支撑。 |
| 德国联邦物理研究院（PTB） | 力标准机技术 | 2016-10-05 | falk.tegtmeier  0049 531592 1122 | 根据协议为该院承担的EMRP项目研究结果提供验证。 |
| 南非国家计量院 | 力标准机技术 | 2016-11-20 | Wynand louw  027128414227 | 根据协议为其提供校准服务。 |

六、主要知识产权证明目录

**主要知识产权证明目录（不超过10件）**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 知识产权类别 | 知识产权具体名称 | 国家  （地区） | 授权号 | 授权日期 | 证书编号 | 权利人 | 发明人 | 发明专利有效状态 |
| 发明专利 | 一种测力传感器结构 | 中国 | ZL201110449912.3 | 2014-01-15 | 1335819 | 福建省计量科学研究院 | 姚进辉,林建辉, 池辉,王秀荣,郭贵勇, 赖征创 | 有效专利 |
| 发明专利 | 一种力标准机机架结构 | 中国 | ZL201110448590.0 | 2014-07-02 | 1430858 | 福建省计量科学研究院 | 姚进辉，许航，林建辉，王秀荣，郭贵勇，赖征创。 | 有效专利 |
| 发明专利 | 力标准机的高度调节装置 | 中国 | ZL201110449583.2 | 2013-10-09 | 1282602 | 福建省计量科学研究院 | 姚进辉，林建辉，王秀荣，郭贵勇， 赖征创。 | 有效专利 |
| 发明专利 | 用调速电机直接驱动油泵的高精度液压动力源 | 中国 | 200810121691.5 | 2009-03-25 | 676981 | 绍兴肯特机械电子有限公司 | 李海根，李招海，刘胜 | 有效专利 |
| 实用新型 | 力标准机的液压油缸结构 | 中国 | ZL201120561558.9 | 2012-09-05 | 2395261 | 福建省计量科学研究院 | 姚进辉，池辉，许航，林建辉，王秀荣，郭贵勇, 赖征创。 | 有效专利 |
| 实用新型 | 用于叠加式力标准机的传感器更换装置 | 中国 | ZL201120558455.7 | 2012-09-05 | 2371543 | 福建省计量科学研究院 | 姚进辉，许航，林建辉，王秀荣，郭贵勇, 赖征创。 | 有效专利 |
| 实用新型 | 用调速电机直接驱动油泵的叠加式力标准机 | 中国 | ZL200820166751.0 | 2009-09-09 | 1275244 | 绍兴肯特机械电子有限公司 | 李海根，李招海，刘胜 | 有效专利 |
| 实用新型 | 力标准机液压控制中的储油罐装置 | 中国 | ZL201420465649.6 | 2014-08-18 | 4022379 | 福建省计量科学研究院 | 姚进辉，王秀荣，郭贵勇, 赖征创。 | 有效专利 |
| 实用新型 | 一种多油路液压控制设备 | 中国 | ZL201120548982.X | 2012-8-29 | 2371376 | 福建省计量科学研究院 | 姚进辉，许航，林建辉，王秀荣，郭贵勇, 赖征创。 | 有效专利 |
| 实用新型 | 60MN叠加式力标准装置 | 中国 | ZL201120560045.6 | 2012-09-05 | 2399004 | 福建省计量科学研究院 | 姚进辉，许航，林建辉，王秀荣，郭贵勇, 赖征创。 | 有效专利 |

七、主要完成人情况

第1完成人：姚进辉，主持国家质检总局科技计划项目“60MN叠加式力 装置”，总体负责项目实施、研究方案与大纲制定，审查各专项成果，总体质量把关。以及对参考传感器组、液压系 统等关键技术进行整体设计，负责整机的安装调试，负责国际力值比对。对创新点1、2、3、 4 均做出主要贡献。提出了高准确度复合式传感器组结构的设计方法，发明了球铰式二次调节结构的参考传感器组，研制了超大力值叠加式力传递系统，提出了该系统校准方法，创建超大力值系统误差精准外推及误差修正模型，发明了整体框架式机架结构和组合式多油缸力源。

第2完成人：许航，审查专项成果，总体质量把关，负责项目技术方案论证、指导总体的研究设计。对创新点1、 2、3、4 均做出主要贡献。

第3完成人：池辉，负责对装置的控制系统软件设计与研究等，负责整机的调试。对创新点1、2、3均做出 主要贡献。

第4完成人：杨晓翔，负责对装置的总体结构分析和优化等，在结构计算分析方面做出了大量创新性的工作。对创新点1、2、3、4均做出主要贡献。

第5完成人：郭贵勇，参与项目论证、结构设计，负责对装置的拖动系统研究和设计等，参与安装调试。对创新点3、4均做出主要贡献。

第6完成人：王秀荣，参与整体设计，负责对装置的机架结构分析和优化等工作，参与安装调试。对创新 点3、4均做出主要贡献。

第7完成人：赖征创，参与结构设计、优化分析，负责对装置力源系统、高度调节系统研究和设计，负责 整机的安装调试，参与国际力值比对。对创新点2、3、4均做出主要贡献

第8完成人：梁伟，负责对建立力值预估模型，参与结构设计，参与整机的安装调试，参与国际力值比对。对创新点2、3、4均做出主要贡献。

第9完成人：林硕，负责对装置力源系统优化改进，参与整机的安装调试，对创新点2、3均做出主要贡献。

第10完成人：吴泓，主要参与创新点4的研究工作。参与研发整体焊接框架结构和高度调节装置。

八、主要完成单位及创新推广贡献

第一完成单位：福建省计量科学研究院，（1）全面负责60MN叠加式力标准装置的理论、方法、核心部件及应用的研究；（2）提出了高准确度复合式传感器组结构的设计方法，发明了球铰式二次调节结构的参考传感器组；（3）研制了超大力值叠加式力传递系统，提出了该系统校准方法，创建超大力值系统误差精准外推及误差修正模型，实现了超大力值的准确复现；（4）发明了整体框架式机架结构和组合式多油缸力源；（5）作为发明单位获得3项发明专利，作为文章第1 单位发表文章12篇，其中EI 收录5 篇 ，作为第1 完成单位获得成果登记证书、 成果验收证书各1 份。

第二完成单位：福州大学，（1）参与项目论证、整体设计，负责对60MN叠加式力标准装置总体结构进行有限元优化和分析设计，提供有限元分析报告，并对装置的设计、安装调试提出相关的可行性建议。（2）作为参与单位发表项目论文6篇，其中SCI收录1篇，EI收录1篇。

第三完成单位：绍兴市肯特机械电子有限公司，（1）提出双泵联动泵控缸技术与高速自适应PID算法相结合的力源控制方法；（2）负责制造、安装该标准装置；（3）获得1项发明专利授权。

九、完成人合作关系说明

第1完成人：姚进辉，为本项目负责人，总体负责项目实施、研究方案与大纲制定，审查各专项成果，总体质量把关。对参考传感器组、液压力源系统等关键技术进行整体设计，负责整机的安装调试，负责国际力值比对。对创新点1、2、3、4 均做出主要贡献。提出了高准确度复合式传感器组结构的设计方法，发明了球铰式二次调节结构的参考传感器组，提出了该系统校准方法，创建超大力值系统误差精准外推及误差修正模型，发明了整体框架式机架结构和组合式多油缸力源。

第2完成人：许航，审查专项成果，总体质量把关，负责项目技术方案论证、指导总体的研究设计。从基本设计-详细设计-生产设计的创新方法及技术风险进行了大量的创新性工作。

第3完成人：池辉，负责对装置的控制系统软件设计与研究等，负责整机的调试。与第1完成人共同提出双泵联动泵控缸技术与高速自适应PID算法相结合的力源控制方法。

第4完成人：杨晓翔，作为子任务负责人与第1完成人完成国家重大科学仪器设备开发专项“高精度衡器载荷测量仪开发和应用”，负责对装置的总体结构分析和优化等，在结构计算分析方面做出了大量创新性的工作。协助第1完成人发明了整体框架式机架结构和组合式多油缸力源等。

第5完成人：郭贵勇，参与项目论证、结构设计，负责对装置的拖动系统研究和设计等，参与安装调试。协助第1、3、4完成人完成整体焊接框架结构设计和拖动系统的设计。

第6完成人：王秀荣，参与整体设计，负责对装置的机架结构分析和优化等工作，参与安装调试。协助第1、2、3、5完成人申请知识产权成果，为第1完成人的发明创新发表论文。

第7完成人：赖征创，参与结构设计、优化分析，负责对装置力源系统、高度调节系统研究和设计，负责 整机的安装调试，参与国际力值比对。与第1、2、5、6完成人完成国际力值比对、发明专利的申请。

第8完成人：梁伟，负责对建立力值预估模型，参与结构设计，参与整机的安装调试，参与国际力值比对。与第1完成人共同提出了该系统校准方法，创建超大力值系统误差精准外推及误差修正模型。

第9完成人：林硕，负责对装置力源系统优化改进，参与整机的安装调试，协助第1、2、3、4完成人完成发明专利的申请，协助第1、3完成人提出双泵联动泵控缸技术与高速自适应PID算法相结合的力源控制方法。

第10完成人：吴泓，主要参与创新点4的研究工作。协助各成果完成人进行安装调试、比对试验测试工作。