

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的建立

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：

项目围绕超大力值计量标准的关键技术，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。

创新点包括：(1) 首次提出了复合式传感器变刚度叠加结构设计方法，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，使参考传感器组准确度提高了一个数量级，达国际领先水平。

(2) 首次提出采用双泵联动泵控缸技术的力源控制方法，解决了力标准装置中力源稳定控制的难题，实现了控制稳定度优于 0.002%/30min，处于国际领先水平。(3) 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。(4) 提出了超大力值力标准装置自校准方法，研制了超大力值叠加式力传递系统，创建了超大力值预测模型。

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，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；第四，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。

鉴于以上所述，提名该项目参评 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）测量在航空航天、船舶、建筑交通、装备制造、能源等领域具有关键性作用。高准确度的超大力值计量标准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。

由于受到力值参考标准准确度、力源控制稳定性、装置结构等技术水平限制，国际上超大力值计量标准最大量程为 54MN，准确度低于 0.2%；国内最大力值标准量程为 30MN，准确度仅为 0.3%，其量程和准确度无法满足超大力值

溯源的要求。

本项目针对上述技术难题，在参考传感器组结构设计、力源控制方法、装置结构设计、力值预测模型等方面进行研究，取得了重大突破，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，建立了国家超大力值计量标准，测量范围为（2~60）MN，准确度 0.05%，是目前世界上量程最大、准确度最高的超大力值标准，达到国际领先水平。装置先后与英国、德国进行力值比对，比对结果为“满意”，装置准确度得到国际认可。依托本标准，作为唯一的非欧洲区域计量组织（EURAMET）成员单位，福建省计量院受邀参与欧洲计量联合研究计划（EMRP）的研究，为兆牛顿范围内力可追溯性研究提供验证标准，彰显中国力值计量的国际地位。

主要创新点包括：（1）首次提出了复合式传感器组变刚度叠加结构的设计方法，揭示了球铰接触副影响应变式负荷传感器输出的机理，发明了球铰式二次调节结构的参考传感器组，有效减小了装置受偏心倾斜载荷时引起的力寄生分量，使装置准确度提高了一个数量级，达到国际领先水平。（2）提出采用双泵联动泵控缸技术的力源控制方法，解决了力标准装置中力源稳定控制的难题，实现了控制稳定度优于 0.002%/30min，处于国际领先水平。（3）发明了整体框架式机架结构、组合式多油缸力源和辅助安装系统，首次在力标准机上实现参考传感器组的整体自动切换、自动定位以及被检件的准确安装，确保力值的准确复现。（4）提出力标准装置自校准方法，研制了超大力值传递系统，创建超大力值预测模型，解决了超大力值标准装置高准确度自校准的难题，保证量值的准确可靠。

项目成果完善了我国力值量值溯源体系。第一，解决了我国超大力值无法准确溯源的问题，保证我国超大力值量值准确统一；第二，直接为力传感器、荷载箱等超大力值产品质量检测提供技术支撑；第三，突破关键领域中超大力值无法检测的瓶颈，为中国航天、宝山钢铁、中国铁建等重点领域企业提供超大力值校准服务，为保障国防和公共安全提供强有力的技术支撑；第四，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 4 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。《新华网》等主流媒体报道了本成果。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. 国内外同类装置比较

目前世界上超大力值力标准装置共有 5 台，分别为：

- （1）美国国家标准技术研究院（NIST）54MN 力标准机，准确度为 0.50%；
- （2）英国国家物理实验室（NPL）30MN 力标准机，准确度为 0.20%；

(3) 俄罗斯科学院 (IMM) 30MN 力标准机, 准确度为 0.20%;

(4) 中国测试技术研究院 (NT) 30MN 力标准机, 准确度为 0.30%;

本项目研制的 60MN 力标准装置, 准确度为 0.05%。

此外, 欧洲为研制其超大力值标准装置, 在欧洲计量联合研究计划 (EMRP) 中开展了兆牛顿范围内力可追溯性研究, 研制了 50MN 力传递系统, 并于 2017 年 1 月在本装置上进行了测量验证, 结果显示: 在 20MN~50MN 范围内力值偏差为-0.029%~0.002%。

2. 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。”

3. 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 and 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

计量科学研究所的 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，向参加比对的德中双方项目组表示祝贺。

4. 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，项目组成员应邀宣读了题为 “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，项目组成员应邀宣读了题为 “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

查新综述：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：委托查新项目 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. 政府专报及媒体报道

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。新华网、新浪网、凤凰网、福建日报、福建电视台等主流媒体报道了本成果。

五、推广应用情况

超大力值计量标准自投入应用以来，在多个领域开展应用，显著促进了相关行业的技术进步。首先为全国计量技术机构校准超大力值标准测力仪，保证

其量值的准确可靠。为传感器生产企业和用户提供校准服务，极大地缩短了企业研发周期和降低研发成本。同时，本项目突破的关键技术对力标准机、试验机行业的技术创新提供了强有力的技术支撑，使我国该行业技术水平达到国际领先。为航空航天、兵器、船舶等领域提供校准服务，保障国防科技工业尖端武器精密测试工作的准确可靠。为交通、建筑、能源等重点工程领域的桥梁支座和荷载箱校准，有效保证了重点工程安全质量。此外还开展国际大力值校准工作。

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、力标准机技术	2015-03-01	李廷元 13651339772	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、力标准机技术	2015-09-01	李涛 13761170123	服务超大扭矩标准装置里发生系统，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。
江西省计量科学研究院	测力仪校准	2016-07-08	薛岩 13808920366	对 30MN 标准测力仪进行检定，保证了其量值准确可靠，满足了一批重点工程安全质量的要求。
中铁西北研究院	桥梁支座检测	2014-6-01	王建松 13687093726	解决大型橡胶支座无法进行最大试验力和过载试验的难题，保证梅汕铁路等重点工程的安全。
上海工业自动化仪表研究院	传感器校准	2014-01-13	张怀锁 13641645668	为宝钢、沙钢使用的量程 45MN 以上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，为保障大型舰船用宽厚板等重点产品质量提供技术支撑。
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	力标准机技术	2016-10-05	falk.tegtmeier 0049 531592	根据协议为该院承担的 EMRP 项目研究结果提供验证。

院 (PTB)			1122	
---------	--	--	------	--

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、研究方案与大綱制定，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統软件设计与研究等，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。