

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.04.07

通用质量特性在激光测振仪研制过程中的应用研究

种永潮, 李新良, 张大治, 赵春播

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为提升激光测振仪 LV-400(Laser Vibrometer, LV)的性能, 解决激光测振仪难以适应比较恶劣的使用环境的难题, 将通用质量特性应用于激光测振仪的研制中。对通用质量特性标准进行筛选和梳理, 利用六性核心条款完成可靠性鉴定、温度、湿度、随机振动、功能冲击等试验, 并有针对性地进行仪器设计改进。采用机械结构改进、密封、点胶、涂三防漆等一系列措施, 有效克服高温、高湿、振动环境对光学仪器性能的影响; 应用六性相关知识, 提高光学器件的环境适应能力, 拓宽激光测振仪 LV-400 的使用范围, 使该型激光测振仪在较恶劣的使用环境下仍然能够保持稳定的性能。将通用质量特性与激光测振仪 LV-400 研制任务有机结合, 提高了激光测振仪的质量和研发效率, 减轻了科研工作者的负担, 具有重要借鉴意义。

关键词: 通用质量特性; 激光测振; 仪器研制; 六性; 可靠性; 环境适应性

中图分类号: TB96; O439; TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 04-0096-13

Application research of general quality characteristics in the development process of laser vibrometer

CHONG Yongchao, LI Xinliang, ZHANG Dazhi, ZHAO Chunbo

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to improve the performance of the laser vibrometer LV-400 (Laser Vibrometer, LV) and solve the problem of laser vibrometer being difficult to adapt to harsh operating environments, general quality characteristics were applied to the development of laser vibrometer LV-400. By screening and sorting out the general quality characteristic standards, the core clauses of six characteristics were used to complete reliability identification, temperature, humidity, random vibration, function impact and other tests, and targeted instrument design improvements were made. By adopting a series of corrective measures such as mechanical structure improvement, sealing, gluing, and applying three proof paint, the impact of high temperature, high humidity, and vibration environments on the performance of optical instruments has been effectively overcome. By applying professional knowledge related to the six characteristics, the environmental adaptability of optical devices has been improved, and the range of use of the laser vibrometer LV-400 has been expanded. This type of laser vibrometer can still maintain stable performance in relatively harsh operating environments. The organic combination of general quality characteristics with the development task of laser vibrometer LV-400 has improved the quality and development efficiency of laser vibrator, reduced the burden on researchers, and has important reference significance.

Key words: general quality characteristics; laser vibration measurement; instrument development; six characteristics; reliability; environmental adaptability

收稿日期: 2024-05-16; 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 计量与校准技术国家科技重点实验室开放基金项目(JLJK2023001B003)

引用格式: 种永潮, 李新良, 张大治, 等. 通用质量特性在激光测振仪研制过程中的应用研究[J]. 计量技术, 2024, 44(4): 96-108.

Citation: CHONG Y C, LI X L, ZHANG D Z, et al. Application research of general quality characteristics in the development process of laser vibrometer [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44 (4): 96-108.



0 引言

产品质量是企业的核心竞争力。在产品研制过程中,许多潜在风险未能充分暴露,对产品质量产生不利影响,给科研工作带来巨大的不确定性。系统、全面地开展通用质量特性^[1-3]工作是保障产品质量的重要手段,可以有效地激发潜在风险,使产品质量隐患提前暴露,从而使科研人员能够有针对性地进行设计改进。随着产品竞争的不断加剧和质量意识的不断提高,通用质量特性越来越受到重视,应用需求越来越广泛。

质量是客体一组固有特性满足要求的程度。质量特性是指与要求有关客体的固有特性。通用质量特性主要指可靠性、环境适应性、测试性、维修性、保障性和安全性,统称为“六性”。可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。环境适应性是指产品在其预计寿命内,能够在各种环境中实现其所有预定功能、性能,并且不受损坏的能力。测试性是指产品及时、准确地确定其状态,并隔离其内部故障的能力。维修性是指产品在给定的使用和维修条件下,保持或恢复执行要求状态的能力。保障性是指在规定的运行剖面 and 给定的后勤与维修资源下,确保产品维持所需可用性的能力。安全性是指产品所具有不会导致人员伤亡、系统损毁、重大财产损失或不危及人员健康和环境的能力。

早在20世纪50年代后期,美国就已开展通用质量特性相关工作。目前美国已形成一整套严密的武器装备科学技术管理体系,通用质量特性是其中重要的组成部分。我国自20世纪80年代初开始进行通用质量特性研究,并相继出台了一系列标准,这些标准内容丰富,涵盖面广,显然国家很重视通用质量特性相关工作。但在科研仪器研制过程中,由于标准繁杂、相关人员水平参差不齐、试验费用高昂等原因,通用质量特性相关工作开展得并不是很到位。如何充分发挥通用质量特性标准的引领和规范作用,提高产品质量,是许多科研工作者关心的问题。

激光测振技术是目前振动测试领域最重要、应用最广泛的测量方法,具有一定的代表性^[4-6]。

该技术以激光波长作为测量基准^[7],利用多普勒效应^[8]和激光外差干涉原理^[9],实现物体振动的非接触测量^[10],具有无损伤、精度高、测量速度快等优势,已应用于诸多领域的性能测试^[11]及高精度测量中。激光测振仪系统复杂、技术含量高,涉及光学、机械、电子、计算机等多门学科。光路部分是激光测振仪的核心组成部分,但光学器件极其精密且较脆弱,对振动和潮湿等环境因素非常敏感。在复杂多变的使用环境中,激光测振仪很容易出现干涉信号变弱甚至无干涉信号的情况。目前我国的激光测振仪只能实现实验室条件下的校准和测量,难以实现复杂现场环境下的校准和测量。许多应用领域迫切需要具有较好抗振性、耐腐蚀性、耐湿性、耐高低温性的激光测振仪,例如:在发动机试车状态下的机匣振动模态测试中,激光测振仪需要实现高强度振动和高温气流环境下的准确测量^[12];在飞机地面振动测试试验中,激光测振仪需要在环境温度和湿度变化较大的条件下实现准确测量;在风力发电机组叶片/塔架及发电机振动测试中,激光测振仪需要在高噪声、高振动且温湿度变化较大的环境中实现准确测量。

为了使激光测振仪能够在较为苛刻的环境中实现准确测量,本文将通用质量特性应用于激光测振仪LV-400的研制中,根据项目要求和实际情况,对通用质量特性标准进行筛选和梳理,选择性应用六性相关标准开展试验,使潜在问题在试验中不断暴露,经过反复试验和改进,提高激光测振仪LV-400的环境适应能力,为相关领域的科研人员提供借鉴。

1 激光测振仪LV-400

激光测振仪LV-400的硬件部分包括光学头、控制器和高频电缆,精密调节支架为可选配件;软件部分包括上位机软件和下位机软件。光学头、控制器实物如图1所示。

激光测振仪LV-400的光学部分采用外差激光干涉原理,氦-氖激光器射出激光光束,经偏振分光棱镜1分成振动方向互相垂直的两束光,即参考光和测量光。参考光经过直角棱镜、Bragg盒进入

偏振分光棱镜3；测量光经过偏振分光棱镜2、四分之一波片投射在被测物体上，被反射后再通过偏振分光棱镜2，与参考光在偏振分光棱镜3处会合，之后经偏振片由光电探测器接收。激光测振仪LV-400的光学原理如图2所示。

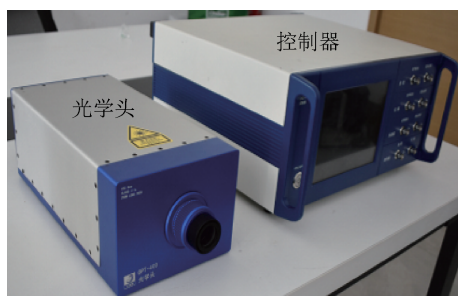


图1 光学头、控制器实物图

Fig.1 Physical image of optical head and controller

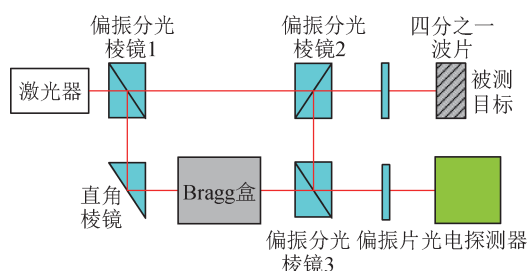


图2 光学原理图

Fig.2 Optical schematic diagram

2 六性应用实例

六性工作贯穿科研仪器研发、生产、使用和报废整个寿命周期，本文以仪器研发阶段的六性工作为例进行介绍。通常科研仪器研制过程分为需求分析、概要设计、详细设计、开发、测试和交付六个阶段。

在需求分析阶段，确定六性目标和要求，包括定量要求和定性要求。在概要设计阶段，根据仪器特点，参考相关资料、文献，确定六性设计原则。在详细设计阶段，根据六性设计原则制定六性设计措施；根据仪器研制要求制定六性工作计划，进行六性分析。在开发阶段，落实六性具体设计措施。在测试阶段，根据仪器测试要求制定六性测试大纲，按测试大纲开展六性测试验证试验。测试验证阶段和开发阶段同步进行，测试验证可根据开发进度按器件级、组件级、产品级

进行。在交付阶段，根据验收方案要求制定六性鉴定试验测试大纲，按鉴定试验测试大纲开展六性鉴定测试验证试验。

2.1 可靠性工作内容

可靠性工作内容包括可靠性设计、可靠性要求、可靠性设计措施、可靠性分析、可靠性试验与评价和可靠性结论等。

2.1.1 可靠性设计

激光测振仪LV-400的可靠性设计包括简化设计、降额设计、容差设计、冗余设计、热设计、环境防护设计、静电防护设计、电路设计、机械设计、元器件及原材料选择与控制设计等。

2.1.2 可靠性要求

可靠性要求包括可靠性定性要求和可靠性定量要求。激光测振仪LV-400的可靠性定性要求涵盖设计、工艺、软件等方面。激光测振仪LV-400的可靠性定量要求通过平均故障间隔时间(Mean Time Before Failure, MTBF)衡量， θ_0 为MTBF检验上限，经综合考虑，可靠性定量要求为 $\theta_0 \geq 5000$ h。

2.1.3 可靠性设计措施

根据激光测振仪LV-400的可靠性设计原则，制定可靠性设计措施：

- ① 优选标准件，压缩元器件及组件的种类；
- ② 采用通用化、模块化设计；
- ③ 根据实际情况对元器件进行降额设计；
- ④ 采用二极管、稳压管等进行电路保护设计；
- ⑤ 进行传导散热、对流散热等热设计等。

2.1.4 可靠性分析

经过可靠性分析，形成可靠性设计分析报告，报告应包含产品概述、可靠性要求、可靠性设计措施和可靠性分析方法等。概述包含研制情况、功能和组成及功能框图。可靠性要求包含定量要求和定性要求。可靠性分析方法包含可靠性建模、可靠性预计、可靠性分配、有限元分析、故障模式、影响及危害性分析、故障树分析、确定可靠性关键件及重要件等。

1) 可靠性建模

激光测振仪LV-400的可靠性建模^[13]选择串联模型建模，将所有可靠性框图逐个分解成相应数学模型，根据所属类型对各个数学模型的可靠性进行计算。

串联模型中任意一个单元失效就会导致整个系统失效，假设每个单元独立，则其数学模型可靠性计算公式为

$$R_c = \prod_{i=1}^n R_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots, n \quad (1)$$

式中： R_c 为模型可靠度， R_i 为第*i*个单元的可靠度。

当系统单个单元的寿命服从指数分布，且每个单元的失效率均为常数 λ 时，经过时间*t*后，单个模型单元的可靠度 $R(t)$ 计算公式为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

系统失效率 λ_s 计算公式为

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots, n \quad (3)$$

式中： λ_i 为第*i*个单元的失效率。

采用串联模型进行激光测振仪LV-400的可靠性建模，整机失效率 $\lambda_{\text{整机}}$ 计算公式为

$$\lambda_{\text{整机}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 \quad (4)$$

式中： λ_1 为光学头失效率， λ_2 为控制器失效率， λ_3 为高频电缆失效率， λ_4 为软件失效率。

2) 可靠性分配

根据复杂程度和技术水平，将可靠性指标按照从上到下、从大到小、从整体到局部的顺序逐步分解，分配到各个分单元模块。

激光测振仪LV-400的可靠性分配主要考虑重要度和复杂度，在设计时可靠性分配值按指标的1.5倍进行分配，并且预留25%的余量。整机可靠性分配结果如表1所示。

表1 整机可靠性分配结果

Tab.1 Reliability allocation result of the whole machine

平均故障间隔时间/h	失效率分配值/(10 ⁻⁶ h ⁻¹)	可靠度
9 375	107	99.989

按照分配准则，分系统光学头、控制器、高频电缆和软件可靠性分配结果如表2所示。

3) 可靠性预计

采用元器件计数法进行激光测振仪LV-400的可靠性预计，先计算产品中各种型号和各种类型的元器件数目，然后将元器件数目乘以相应型号或相应类型元器件的通用失效率，最后把各乘积累加起来得到部件、系统的失效率。

表2 分系统可靠性分配结果

Tab.2 Reliability allocation result of subsystems

序号	组件名称	θ_0 / h	失效率分配值/(10 ⁻⁶ h ⁻¹)
1	光学头	14 500	69.0
2	控制器	44 400	22.5
3	高频电缆	1 000 000	1.0
4	软件	69 000	14.5
合计			107

单元的失效率计算公式为

$$\lambda_i = N_i \pi_{Qi} \lambda_{Gi} \quad (5)$$

式中： λ_i 为第*i*个元器件失效率， N_i 为第*i*类元器件的总数， π_{Qi} 为第*i*类元器件的通用质量等级系数， λ_{Gi} 为第*i*类元器件的通用失效率。

参考相关标准，确定激光测振仪LV-400的质量等级为B级^[14]，质量评定类别为I类。可靠性预计结果如表3所示。

表3 可靠性预计结果

Tab.3 Reliability prediction result

序号	组件名称	失效率预计值/(10 ⁻⁶ h ⁻¹)
1	光学头	55.450
2	控制器	15.148
3	高频电缆	0.172
4	软件	13.369
合计		84.139

4) 可靠性分配预计结果分析

根据可靠性预计结果，激光测振仪LV-400失效率预计值为84.139 × 10⁻⁶ h⁻¹。因此，预计其可靠度为99.99。基于寿命服从指数分布、恒定失效率假设，预计平均故障间隔时间为11 885 h。

5) 可靠性有限元分析

激光测振仪LV-400的可靠性有限元分析主要包括热仿真分析和振动仿真分析，其中移动透镜的导轨和分光棱镜会对光路产生较大影响。移动透镜导轨热仿真结果为：X方向位移最大变形量为11.948 μm，Y方向位移最大变形量为55.536 μm，Z方向位移最大变形量为63.717 μm，3个方向合成后位移最大变形量为77.545 μm，满足设计要求。移动导轨热仿真变形图如图3所示。

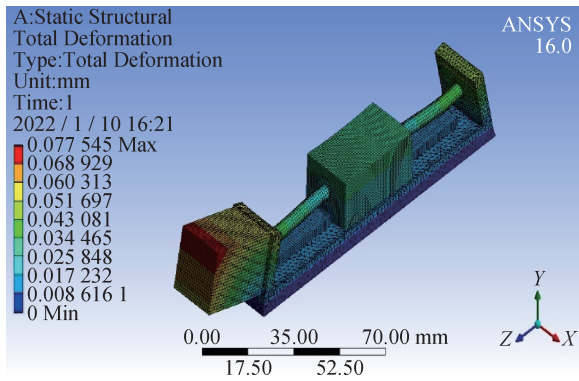


图3 移动导轨热仿真变形图

Fig.3 Thermal simulation deformation diagram of guide rail

分光棱镜热仿真结果为：3个方向位移最大值变形量为20.387 μm，满足设计要求。分光棱镜热仿真变形图如图4所示。

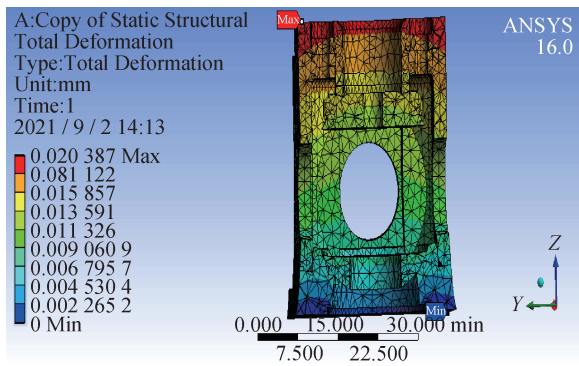


图4 分光棱镜热仿真变形图

Fig.4 Thermal simulation deformation diagram of splitting prism

光学头随机振动仿真结果为：最大应力1.274 5 MPa，3个方向位移最大变形量为58.982 μm，满足设计要求。振动仿真变形图如图5所示。

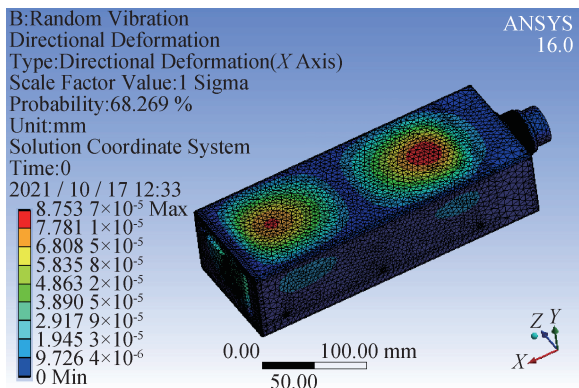


图5 振动仿真变形图

Fig.5 Simulation deformation diagram of random vibration

6) 故障模式、影响及危害性分析

开展故障模式、影响及危害性分析(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA)，将每个故障模式按其影响的严重程度予以分类，整理得出单点故障和严重程度高的故障，确定严酷度为I、II类的单点故障模式清单，并制定相应改进措施，进一步提高可靠性。

7) 可靠性关键件、重要件确定

根据危害性分析结果中的危害风险指数确定激光测振仪LV-400的可靠性关键件、重要件，具体如表4所示，其中，FPGA为现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array)，AD转换器为模数转换器(Analog to Digital Converter)，DA转换器为数模转换器(Digital to Analog Converter)。

表4 可靠性关键件、重要件

Tab.4 Reliability critical and important components

序号	名称	关键故障模式	最终故障影响	严酷度类别
1	稳压电源	短路、漏电、电伤、爆裂、熔断、击穿	不开机	I
2	机械结构	异味	危害健康	I
3	微处理器	短路、烧毁	无信号	I
4	FPGA	短路、烧毁	无信号	I
5	晶体振荡器	短路、烧毁	无信号	I
6	运算放大器	击穿、烧毁	无信号	I
7	铝电解电容器	漏液、失效	危害环境	I
8	AD转换器	短路、烧毁	信号无效	I
9	DA转换器	短路、烧毁	信号无效	I
10	激光器	漏电、电伤、短路、辐射、灼伤、爆炸	无信号、危害健康	I
11	光电探测器	短路、烧毁	无信号	I
12	声光调制器	短路、烧毁	无信号	I
13	矩形连接器	短路、烧毁、破损	无信号	I

2.1.5 可靠性试验与评价

可靠性试验时间一般较长，试验成本是科研团队必须考虑的问题。在试验条件允许且保证试验总时间符合要求的情况下，可通过优化试验方

案提升试验效率。根据和验收方达成的协议，试验统计方案选择 GJB 899A-2009 《可靠性鉴定和验收试验》中的 21 号短时高风险统计方案，双方的判决风险为 30%，采用 3 台 LV-400 样机进行可靠

性鉴定试验。标准型定时试验统计方案参数表如表 5 所示，其中， α 为生产方风险， β 为使用方风险， r 为故障数， θ_1 为 MTBF 检验下限， d 为鉴别比， $d = \theta_0 / \theta_1$ 。

表 5 标准型定时试验统计方案参数表

Tab.5 Parameter table of standard timed test statistical plan

方案号	决策风险 / %				鉴别比 d	试验时间	故障数 r / 个	
	标准值		实际值				拒收数 (\geq)	接收数 (\leq)
	α	β	α'	β'				
21	30	30	30.7	33.3	3.0	$1.1\theta_1$	1	0

根据选定的 21 号短时高风险统计方案，总试验时间为

$$T = \frac{(\theta_0 / d) \times 1.1}{n} \quad (6)$$

单台样品计划试验时间为 611 h，试验过程中不发生任何一次责任故障则判定试验通过。

LV-400 激光测振仪的可靠性鉴定试验综合环境剖面采用 GJB 3947A-2009 《电子测试设备通用规范》中的 4.6.8.4 节推荐的实验室设备典型试验剖面。可靠性鉴定试验实物图如图 6 所示。

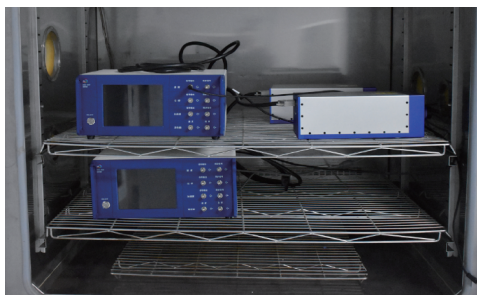


图 6 可靠性鉴定试验实物图

Fig.6 Physical picture of reliability qualification test

仪器与温箱边缘保持合适距离，而且要便于试验中进行性能测试，如果温箱内无足够空间，需分多个温箱进行测试。在保持阶段试验应力稳定，温度变化率为 $1 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C} / \text{min}$ 。在不同试验应力条件下，按规定的项目和方法进行功能监视与性能测试。可靠性鉴定试验结果如表 6 所示。

2.1.6 可靠性结论

经过以上可靠性分析和试验，激光测振仪 LV-400 可靠性指标均达到了设计要求。

表 6 可靠性测试结果

Tab.6 Reliability test result

可靠性试验	总试验时间 / h	故障数 / 个
试验结果	612	0
判定标准	≥ 611	0
判定结果	符合	符合

2.2 环境适应性工作内容

环境适应性工作内容包含环境适应性的设计、要求、设计措施、分析、试验与评价和环境适应性结论。

2.2.1 环境适应性设计

激光测振仪 LV-400 的环境适应性设计包括低气压、高温、低温、振动、冲击、噪声、潮湿、盐雾和霉菌等适应性设计。

2.2.2 环境适应性要求

激光测振仪 LV-400 的环境适应性要求：① 储存温度范围为 $-20 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ ；② 工作温度范围为 $0 \sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ；③ 最大相对湿度为 80%；④ 试验期间能量条为 80%，各项功能正常。

2.2.3 环境适应性设计措施

根据激光测振仪 LV-400 的环境适应性原则，制定具体环境适应性设计措施：

- ① 利用相关软件进行热仿真和振动仿真分析；
- ② 采用风冷和导冷相结合的散热方式；
- ③ 采用固定装置和锁紧装置；
- ④ 元器件合理布局，综合考虑散热和防振；
- ⑤ 采用绝缘设计，并喷三防漆等。

2.2.4 环境适应性分析

环境适应性分析包括抗力学、热设计、三防

设计分析等。经过环境适应性设计分析，形成《环境适应性报告》，报告应包含产品概述、产品组成、环境适应性要求、环境效应分析等。

2.2.5 环境适应性试验与评价

环境适应性试验包括环境应力筛选试验、环境适应性摸底试验、环境适应性鉴定试验等。其中，环境应力筛选试验主要针对整机组装前的组件。

开展环境适应性试验时，为了满足高标准、严要求，尽量选择高于指标要求的试验参数进行试验。激光测振仪LV-400应符合GJB 3947A-2009《电子测试设备通用规范》中的4级^[15]设备要求，环境适应性试验包括低气压试验、温度试验、湿度试验、随机振动试验和功能冲击试验。

温度试验中，仪器应与温箱边缘保持合适距离，而且要便于试验中进行性能测试，温度变化率为1~10℃/min。根据试验进程及时打开或关闭仪器电源，按规定方法进行功能监视与性能测试。温度试验实物图如图7所示。

温度试验包括-40℃低温存贮、70℃高温存贮、0℃低温工作、55℃高温工作试验，每个状态持续时间为4h。温度试验曲线如图8所示。



图7 温度试验实物图

Fig.7 Physical picture of temperature test

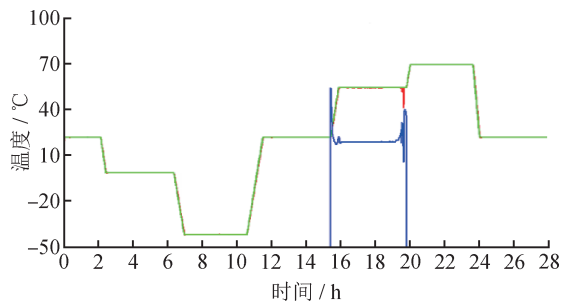


图8 温度试验曲线图

Fig.8 Curve graph of temperature test

通过温度试验发现光学头光路受温度影响较大，原因是试验时1个棱镜的微调机构内部组件位置会发生轻微变动，导致测量光和参考光无法形成干涉。为解决该问题，改进了棱镜微调机构，将温度对光路的影响降低到可接受的范围，使光学头性能保持稳定。棱镜微调机构的结构如图9所示。

在湿度试验中，以24h为一个完整的循环，总计执行5个循环，湿度75%和95%交替，温度30℃和40℃交替。湿度试验实物如图10所示。湿度试验曲线如图11所示。

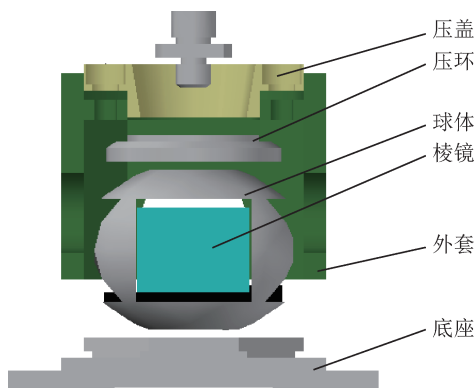


图9 棱镜微调机构结构图

Fig.9 Structure diagram of prism fine tuning

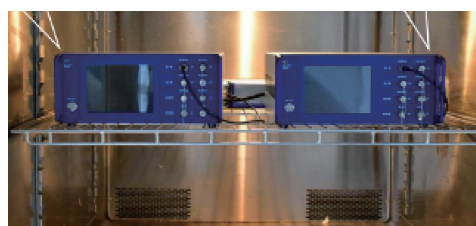
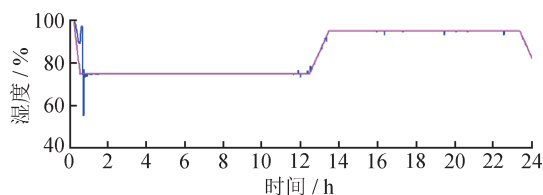
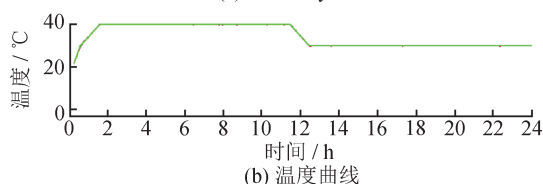


图10 湿度试验实物图

Fig.10 Physical picture of humidity test



(a) 湿度曲线
(a) Humidity curve



(b) 温度曲线
(b) Temperature curve

图11 湿度试验实际曲线图

Fig.11 Curve graph of humidity test

在湿度试验过程中, 激光测振仪 LV-400 的光学器件表面形成了薄雾层, 使光路受到严重影响, 测量性能显著下降。采用隔离和密封等方式提升光学器件的抗潮湿能力, 经过反复试验和改进, 最终使激光测振仪 LV-400 能够应用于高湿环境。

随机振动试验中, 仪器被刚性固定在振动台上, 控制器和光学头分别进行 X、Y、Z 三个方向的随机振动, 每轴 30 min, 试验中仪器处于不工作状态。随机振动试验实物如图 12 所示。

随机振动功率谱密度参数为 0.015 0、0.007 5、0.003 9 g^2/Hz , 斜率为 -6 dB/oct, 扫频范围为 5 ~ 500 Hz。随机振动试验曲线如图 13 所示。

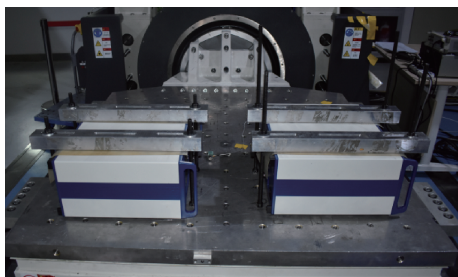


图 12 随机振动试验实物图

Fig.12 Physical picture of random vibration test

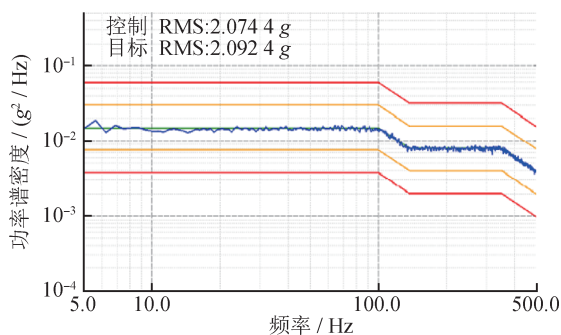


图 13 随机振动试验曲线图

Fig.13 Curve graph of random vibration test

功能冲击试验中, 仪器被刚性固定在振动台上, 控制器和光学头分别进行 X 正向、X 负向、Y 正向、Y 负向、Z 正向和 Z 负向 6 个方向的功能冲击振动, 每个方向 3 次, 试验中仪器处于不工作状态。功能冲击试验实物图如图 14 所示, 功能冲击试验曲线图如图 15 所示。

在随机振动和功能冲击试验中, 部分光学器件从固定位置脱落, 如图 16 所示。产生此现象的原因是: 为使激光测振仪 LV-400 满足便携化要求, 设计的光学头组件尺寸较小, 从而导致部分

光学器件的固定面缩小, 粘接不牢固。经过反复试验, 改进了粘贴胶的性能, 最终使激光测振仪 LV-400 在振动和冲击环境中能够保持性能稳定。

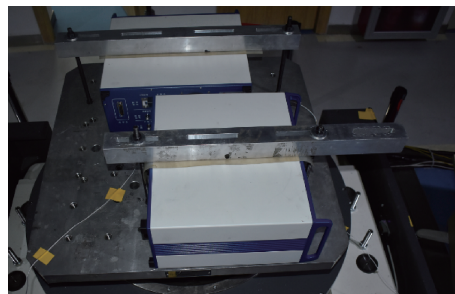


图 14 功能冲击试验实物图

Fig.14 Physical picture of shock test

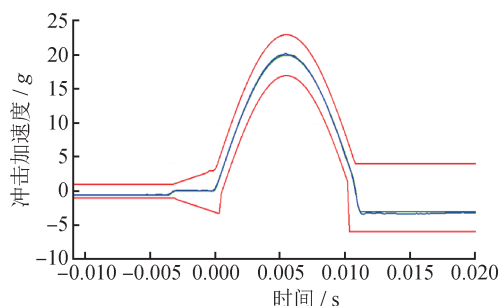


图 15 功能冲击试验实际曲线图

Fig.15 Curve graph of shock test

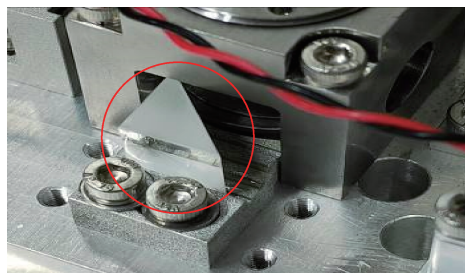


图 16 直角棱镜脱落

Fig.16 Right angled prism detachment

环境适应性试验结果如表 7 所示。

2.2.6 环境适应性结论

经过环境适应性分析、试验及改进, 提升了激光测振仪 LV-400 的环境适应能力, 使该仪器能够应用于室外较恶劣的环境中。

2.3 安全性工作内容

安全性工作内容包含安全性设计、安全性要求、安全性设计措施、安全性分析、安全性试验与评价和安全性结论。

表7 环境适应性测试结果
Tab.7 Environmental adaptability test result

编号	试验名称	试验结果	判定标准	判定结果
1	温度	无故障,性能达标,能量条90%	无功能故障,试验中能量条 $\geq 80\%$,	符合
2	湿度	无故障,性能达标,能量条85%	试验后性能指标达标	符合
3	随机振动	无故障,性能达标		符合
4	功能冲击	无故障,性能达标	试验后无功能故障,性能指标达标	符合
5	低气压	无故障,性能达标		符合

2.3.1 安全性设计

激光测振仪LV-400安全性设计包括电子类设计、机械类设计、温度类设计、辐射类设计、振动类设计等。

2.3.2 安全性要求

激光测振仪LV-400的安全性定性要求是在产品全寿命周期内综合权衡性能、进度及费用,将风险控制到可接受的水平。安全性定量要求是:标准大气条件下绝缘电阻不小于100 M Ω ,潮湿环境条件下绝缘电阻不小于2 M Ω ;载流电路与机壳之间有足够的绝缘介电强度,在规定试验条件下不发生击穿、飞弧和闪烁现象,最大限制电流10 mA;泄漏电流不大于3.5 mA。

2.3.3 安全性设计措施

根据激光测振仪LV-400的安全性设计原则,制定安全性设计措施:

- ①采用新材料、新工艺时寻求风险最小化;
- ②关键件、控制装置、系统电源隔离保护;
- ③采用防差错设计;
- ④优选安全环保材料,确保无毒无污染;
- ⑤采用警告装置,并且贴安全标志等。

2.3.4 安全性分析

结合仪器特点及使用剖面,重点开展的安全性设计分析主要包括初步危险表、初步危险分析、分系统危险分析、系统危险分析、使用和保障危险分析和职业健康安全分析等。

从危险风险严重性、可能性两方面综合评价

危险的风险水平。危险严重性等级划分参考GJB 900A-2012《装备安全性工作通用要求》^[16]中的4.3.5.2节,危险可能性等级划分参考该文献的4.3.5.3节,危险风险指数、风险接收原则参考该文献的4.3.5.4节。

2.3.5 安全性试验与评价

安全性试验包括绝缘电阻试验、泄漏电流试验和介电强度试验等。激光测振仪LV-400的安全性试验实物图如图17所示,安全性试验结果如表8所示。



图17 安全性试验实物图

Fig.17 Physical picture of safety test

表8 安全性试验结果

Tab.8 Safety test results

试验名称	试验结果	判定标准	判定结果
绝缘电阻试验	7 381 M Ω	≥ 100 M Ω	符合
介电强度试验	3.233 mA	≤ 10 mA	符合
泄漏电流试验	0.536 mA	≤ 3.5 mA	符合

2.3.6 安全性结论

经过以上安全性分析和试验,得出安全性结论:激光测振仪LV-400满足安全性设计要求。

2.4 测试性工作内容

测试性工作内容包含测试性设计、测试性要求、测试性设计措施、测试性分析、测试性试验与评价和测试性结论。

2.4.1 测试性设计

激光测振仪LV-400的测试性设计包括测试点、测试数据设计、嵌入式设计、传感器设计、电子功能结构设计、电子功能划分设计、测试控制设计、测试通路设计和元器件选择设计等。

2.4.2 测试性要求

测试性定性要求主要包括测试点设置要求、功能划分要求、测试可控性要求、测试可观测性

要求、被测试模块(Unit Under Test, UUT)与外部测试设备兼容性要求和机内测试(Built-In Test, BIT)要求等。

2.4.3 测试性设计措施

根据激光测振仪LV-400的测试性设计原则,制定测试性设计措施:

- ①合理设计测试点,快速判断识别故障;
- ②进行综合诊断设计,提高故障隔离率;
- ③进行自动化测试设计;
- ④进行故障模式及影响分析;
- ⑤进行电子功能结构设计和电子功能划分等。

2.4.4 测试性分析

首先对激光测振仪LV-400进行功能划分,编制功能划分表,然后根据故障模式及影响分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)结果确定关键参数清单,根据故障模式确定电子设备性能参数清单及BIT配置表,确定合理测试点,通过BIT、人工测试等方式实现相关测试,最后编制功能测试覆盖分析表。

2.4.5 测试性试验与评价

测试性试验主要包括故障检测试验、严重故障检测试验和故障隔离试验等。测试性试验结果如表9所示。

表9 测试性试验结果

Tab. 9 Testability test results

试验名称	试验结果	判定标准	判定结果
故障检测试验	检测率 97%	检测率 $\geq 90\%$	符合
严重故障检测试验	检测率 100%	检测率 $\geq 98\%$	符合
故障隔离试验	隔离率 98%	隔离率 $\geq 95\%$	符合

2.4.6 测试性结论

经过测试性分析和试验,得出测试性结论:激光测振仪LV-400满足测试性设计要求。

2.5 维修性工作内容

维修性工作内容包含维修性设计、维修性要求、维修性设计措施、维修性分析、维修性试验与评价和维修性结论。

2.5.1 维修性设计

激光测振仪LV-400的维修性设计包括简化维

修设计、可达性设计、标准化设计、互换性设计、模块化设计、防差错设计、识别标志设计和预防性维修设计等。

2.5.2 维修性要求

维修性要求包括维修性定性要求和定量要求。维修性定性要求涵盖维修设备、体系、监管、考核等方面。维修性定量要求为平均修理时间(Mean Time To Repair, MTTR)小于等于2 h。

2.5.3 维修性设计措施

根据激光测振仪LV-400的维修性设计原则,制定维修性设计措施:

- ①简化设计,易于操作;
- ②标准化、模块化设计,缩短维修时间;
- ③进行维修级别分析;
- ④进行可达性、互换性设计;
- ⑤进行识别标识设计及防差错设计。

2.5.4 维修性分析

维修性分析包括维修性建模、维修性预计和维修性分配等。维修性分析还需对各组成部分维修难易程度进行分析,按照维修复杂程度进行分级,分为:很难、难、一般、简单。

根据维修难易程度评级规则综合评级分析,形成维修难易程度评级结果表,难易度为难和很难的部分是维修性分析重点。

选择平均维修时间模型进行激光测振仪LV-400维修性建模,则

$$\bar{M}_s = \sum_{i=1}^n a_i \bar{M}_i \quad (i = 1, 2, 3, 4, \dots, n) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (i = 1, 2, 3, 4, \dots, n) \quad (8)$$

式中: \bar{M}_s 为系统平均维修时间, \bar{M}_i 为第*i*项维修事件的平均维修时间, a_i 为第*i*项维修事件发生的概率, n 为所建模的维修级别上系统维修事件数。

2.5.5 维修性试验与评价

维修性试验包括可达性试验、标准化与互换性试验、维修安全性试验、防差错试验、模拟故障维修试验和自然故障维修试验等。维修性试验结果如表10所示。

2.5.6 维修性结论

经过维修性分析和试验,得出维修性结论:

表10 维修性试验结果
Tab.10 Maintainability test results

试验名称	试验结果	判定标准	判定结果
可达性	可达率93%	可达率 $\geq 90\%$	符合
标准性互换性	信号峰值偏差不超过 ± 0.05 V	信号峰值偏差不超过 ± 0.2 V	符合
维修安全性	无漏电、无短路、无人员受伤	无漏电、无短路、无人员受伤	符合
防差错	差错率0%	差错率 $\leq 10\%$	符合
故障维修	平均修理时间 ≤ 1.5 h	平均修理时间 ≤ 2 h	符合

激光测振仪LV-400满足维修性设计要求。

2.6 保障性工作内容

保障性工作内容包含保障性设计、保障性要求、保障性设计措施、保障性分析、保障性试验与评价和保障性结论。

2.6.1 保障性设计

激光测振仪LV-400的保障性设计包括规划保障、供应保障设计、供应设备保障设计、技术资料保障设计、人力资源保障设计、培训保障设计、包装保障设计、装卸保障设计、储存保障设计和运输保障设计等。

2.6.2 保障性要求

从供应保障、维修保障等方面制定保障性要求。元器件国产化率大于95%，进口件备货满足未来5年使用要求。

2.6.3 保障性设计措施

根据激光测振仪LV-400保障性设计原则，制定保障性设计措施：

- ①进行维修保障设计，使维修保障合理可行；
- ②进行供应保障设计，确保供货长期有效；
- ③供应装备规划和技术资料编制；
- ④人力资源及培训保障设计；
- ⑤包装、储存、装卸及运输设计等。

2.6.4 保障性分析

保障性分析包括使用保障分析和维修保障分析两方面。使用保障包括：储存保障、运输保障、包装保障、装卸保障、工作保障、人员保障和计量保障。维修保障包括：训练保障、维修规划、保障设施、保障供应和技术资料。

从是否容易购买、生产、维修、测试、运输和贮存等方面考虑，制定保障重要性评级规则，

并进行打分评估，形成保障重要性评估表，确定保障性分析重点。

2.6.5 保障性试验与评价

保障性试验包括保障特性设计检查试验、保障资源检查试验、保障系统完好性检查试验等。保障性试验结果如表11所示。

表11 保障性试验结果
Tab.11 Supportability test results

试验名称	试验结果	判定标准	判定结果
设计性检查	合理性 $\geq 95\%$ 可行性 $\geq 98\%$	合理性 $\geq 90\%$ 可行性 $\geq 90\%$	符合
保障资源检查	协调性 $\geq 97\%$ 匹配性 $\geq 95\%$ 充足度 $\geq 92.5\%$	协调性 $\geq 90\%$ 匹配性 $\geq 90\%$ 充足度 $\geq 90\%$	符合
系统完好性检查	完好性96%	完好性 $\geq 90\%$	符合

2.6.6 保障性结论

经过保障性分析和试验，得出保障性结论：激光测振仪LV-400满足保障性设计要求。

3 结论

在激光测振仪LV-400的研制过程中，开展六性分析和试验验证等工作，全面、综合、系统地考虑影响因素，将各种潜在风险提前暴露，并针对发现的问题进行反复改进、反复验证，将风险尽可能地减小，有效降低环境条件对激光测振仪的限制，拓宽使用范围，使其在比较恶劣的环境下依然能保持稳定的性能。文中所展示的六性工作实例为科研人员提供了重要参考，使科研人员

在时间紧、任务重的情况下能够快速、有效地把握六性工作重点,提高仪器研制的效率和质量。

为最大程度地发挥通用质量特性对仪器研制的积极作用,可从以下方面统筹安排通用质量特性相关工作:①根据科研任务内容,梳理、筛选六性相关标准;②多个科研团队可以共用通用质量特性专业人员;③优化试验流程、精选试验方案,通过试验发现潜在问题,有针对性地进行技术改进从而解决这些问题,并合理控制成本,实现试验的最大价值;④在仪器研制的全阶段开展具体且扎实的通用质量特性相关工作;⑤开展通用质量特性培训,让更多科研人员了解六性相关知识,并能利用六性相关知识解决实际问题。

参考文献

- [1] 中央军委装备发展部. 质量管理体系要求: GJB 9001C-2017[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2017.
Equipment Development Department of the Central Military Commission. Quality management systems requirements: GJB 9001C-2017 [S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing and Distribution Department, 2017. (in Chinese)
- [2] 中国国家标准化管理委员会. 质量管理体系——基础和术语: ISO 9000-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
China National Standardization Administration. Quality management systems——fundamentals and terminology: ISO 9000-2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [3] 中国人民解放军总装备部. 装备通用质量特性术语: GJB 451B-2021[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2021.
The General Equipment Department of People's Liberation Army of China. Equipment general quality characteristics terminology: GJB 451B-2021 [S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing and Distribution Department, 2021. (in Chinese)
- [4] 赵锦春. 激光测振在振动计量中的发展概况及作用[J]. 计量与测试技术, 2011, 38(6): 11-13, 15.
ZHAO J C. Development overview and role of laser vibration measurement in vibration metrology[J]. Metrology & Measurement Technique, 2011, 38(6): 11-13, 15. (in Chinese)
- [5] 胡红波, 杨丽峰, 于梅. 零差干涉仪用于振动校准中关键技术的研究[J]. 计量学报, 2018, 39(3): 368-372.
HU H B, YANG L F, YU M. Study on key technologies of vibration calibration using homodyne interferometer [J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(3): 368-372. (in Chinese)
- [6] 杨军, 张力, 李新良. 动态计量技术发展中的几个关键问题[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 39-42.
YANG J, ZHANG L, LI X L. Several primary problems in the development of dynamic metrology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 39-42. (in Chinese)
- [7] 于梅, 何闻, 刘爱东, 等. 超低频振动国家计量基准装置的研究与建立[J]. 计量学报, 2011, 32(2): 1-8.
YU M, HE W, LIU A D, et al. Research and establishment of a national metrological benchmark device for ultra-low frequency vibration [J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, 32(2): 1-8. (in Chinese)
- [8] 王辉林, 王迎春. 双光束激光多普勒测速实验系统的不确定度分析[J]. 计量学报, 2013, 34(1): 31-35.
WANG H L, WANG Y C. Analysis of uncertainty of double beam laser doppler velocity measurement system [J]. Acta Metrologica Sinica, 2013, 34(1): 31-35. (in Chinese)
- [9] 柯伟, 冯秀娟, 杨平, 等. 基于FPGA的激光外差干涉仪反正切解调技术[J]. 计量学报, 2022, 43(3): 399-404.
KE W, FENG X J, YANG P, et al. Technology of arctangent demodulation of laser heterodyne interferometer based on FPGA [J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(3): 399-404. (in Chinese)
- [10] 茹宁, 张力. 非接触式测振技术最新进展及应用[J]. 计测技术, 2016, 36(6): 1-3, 61.
RU N, ZHANG L. The latest development and application of non-contact measurement technology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2016, 36(6): 1-3, 61. (in Chinese)
- [11] 孙浩琳, 张大治. 高精度低冲击加速度校准装置研究[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 172-177.
SUN H L, ZHANG D Z. Research on the calibrating device for high precision and low impact acceleration [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 172-177. (in Chinese)
- [12] 徐佳, 张炳毅. 高温环境激光测振实验研究[J]. 计测

技术, 2015, 35(3): 39-42.

XU J, ZHANG B Y. Research of vibration measurement experiment by laser in high temperature[J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35(3): 39-42. (in Chinese)

[13] 国防科学技术工业委员会. 可靠性模型的建立和可靠性预计: GJB 813-2005[S]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

National Defense Science & Technology and Industry Committee. Establishment of reliability model and reliability prediction: GJB 813-2005 [S]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)

[14] 中国人民解放军总装备部. 电子设备可靠性预计手册: GJB/Z 299C-2006[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2006.

The General Equipment Department of People's Liberation Army of China. Reliability prediction handbook for electronic equipment: GJB/Z 299C-2006 [S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing and Distribution Department, 2006. (in Chinese)

[15] 中国人民解放军总装备部. 军用电子测试设备通用规范: GJB 3947A-2009[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.

The General Equipment Department of People's Liberation Army of China. General specification for military

electronic test equipment: GJB 3947A-2009 [S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing and Distribution Department, 2009. (in Chinese)

[16] 中国人民解放军总装备部. 装备安全性工作通用要求: GJB 900A-2012[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2012.

The General Equipment Department of People's Liberation Army of China. General requirements for materiel safety program: GJB 900A-2012 [S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing and Distribution Department, 2012. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨, 孟薇)



第一作者: 种永潮(1975—), 男, 工程师, 主要研究方向为通用质量特性、激光测振技术和软件开发。