

军用车辆太阳辐射热效应模拟试验室设计

高琳, 刘惠丽, 刘坤, 苏倩, 李晓晓

(中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 通过研究太阳辐射国内外相关试验测试标准, 对比了不同标准中太阳辐射热效应试验温度、辐照度等指标要求, 作为太阳辐射热效应模拟试验室的设计输入条件。针对军用车辆的特点, 设计了太阳辐射热效应模拟试验室, 该试验室可满足大尺寸军用车辆五面照射的试验需要, 通过灯阵设计仿真与验证, 试验室辐照度均匀度在 10% 以内。结合温度控制和太阳模拟系统联合控制, 实现了太阳辐射日循环环境模拟, 并结合 A1 干热地区指标要求进行了试验验证。通过试验测试表明, 太阳辐射热效应模拟试验室均匀度和允差范围满足 GJB 150.7A 的设备要求, 对军用车辆的太阳辐射热效应试验室设计具有参考价值。

关键词: 太阳辐射; 热效应; 试验室设计; 军用车辆; 日循环; 环境试验

中图分类号: TJ811

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)06-0008-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.06.002

Design of Solar Radiation Heating Simulation Laboratory of Military Vehicles

GAO Lin, LIU Huili, LIU Kun, SU Qian, LI Xiaoxiao

(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

ABSTRACT: This paper analyzed the internal and external standards of solar radiation tests and summarized the functional indicators of the temperature and radiation, as an input condition to design a solar radiation heating simulation laboratory. According to characteristics of military vehicles, a solar radiation heating simulation laboratory was designed, which could satisfy the test condition of large-scale military vehicles with five-sided irradiation. On the basis of simulation and test, the irradiance uniformity of the laboratory was within 10%. Through combined control of temperature control system and solar simulation system, the solar simulation daily cycle environmental simulation conditions were achieved and verified with indicators of category A1 dry and hot areas. The conclusion show that the uniformity and tolerance range of the solar radiation heating simulation laboratory meets the equipment requirements of GJB 150.7A, which has reference value for solar radiation heating laboratories design of military vehicles.

KEY WORDS: solar radiation; heating effect; laboratory design; military vehicles; daily cycle; environment test

太阳辐射是指太阳光照射到地面具有辐射能量的部分, 其主要产生 2 种效应: 一种是热效应, 一种是光化学效应。光化学效应主要是受光线中紫外线的影

响, 可引起有机材料的光化学劣化, 作用对象主要有有机涂层、纺织品和纸张纤维等。热效应是指太阳辐射使装备温度升高, 从而使装备产生高温条件的各种破坏机理^[1], 主要由太阳光中的可见光和红外光产生。

收稿日期: 2024-04-15; 修订日期: 2024-06-03

Received: 2024-04-15; Revised: 2024-06-03

引文格式: 高琳, 刘惠丽, 刘坤, 等. 军用车辆太阳辐射热效应模拟试验室设计[J]. 装备环境工程, 2024, 21(6): 8-15.

GAO Lin, LIU Huili, LIU Kun, et al. Design of Solar Radiation Heating Simulation Laboratory of Military Vehicles [J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(6): 8-15.

军用车辆在外观构造和材料组成不同于民用汽车, 民用车辆的非金属材料的降解和涂层会受到太阳辐射光化学效应的影响^[2], 装甲车辆一般采用钢板裁切和拼焊成形的加工方式^[3], 且部分车辆具有观瞄系统, 整车透光面小, 舱内材料基本不受太阳光的直射, 车辆所受到太阳辐射中光化学效应的影响较小, 而热效应会使整车受到较大的影响, 热效应引发的高温往往会引起设备或元器件热老化、氧化, 结构软化、熔化及升华, 液体黏度下降和蒸发, 物理膨胀, 还会引起物质的化学反应, 这些影响可导致装备出现各种形式的故障^[4-5]。对于太阳辐射试验, 除考虑高温效应外, 太阳辐照所产生的梯度热可以导致不同材料和部件以不同速率膨胀或收缩, 从而产生严酷的应力, 并破坏结构的完整性。此种热效应不同于高温条件下的热效应, 在高温条件下, 由于热气流的作用, 使得装备受热是均匀的^[6], 而太阳光的照射是定向的, 作用在装备上可使装备产生温度梯度, 从作用机理上, 这 2 种热效应的破坏效应明显不同^[7]。因此, 装备在使用和贮存过程中, 如果预期将间接或直接暴露在太阳辐射条件下, 即使进行了高温试验, 也必需开展太阳辐射试验^[8-9]。太阳辐射试验可以明确暴露在耐受不均匀热效应时整车所受的影响, 对车辆整体环境适应性的提高具有重要意义^[10-11]。

由此可知, 太阳辐射作为一种重要的环境因素, 会对军用车辆的各个部件产生严重的影响。GJB 59.74—2004《装甲车辆试验规程 第 74 部分: 暴晒试验》^[12]是车辆鉴定试验的主要项目, 但该规程所规定的试验是自然环境试验, 未考虑车辆长时间暴露下的热量积聚所产生的高温效应, 且由于自然环境的不可控, 环境温度、辐射强度等指标难以满足极限环境试验要求, 存在太阳辐射产生的影响存在考核评估不足的情况。因此, 有必要设计建设可适配军用车辆尺寸及试验指标要求的太阳辐射热效应模拟试验室进行试验验证, 对太阳辐射的热效应影响作用进行评价。

1 太阳辐射模拟试验标准研究

国内 GJB 150A 系列标准是我国军用装备最常用、范围最广的环境试验标准^[12], 主要用于考核军用装备的环境适应性。其中 GJB 150.7A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第 7 部分: 太阳辐射试验》^[13-14]提供了 2 种太阳辐射试验程序, 对军用装备的太阳辐射试验有指导性的原则概述。程序 I 循环试验考核太阳辐射产生的热效应对军用装备的影响, 24 h 为 1 个循环, 包含 3 类日循环条件, 分别对应于装备预期暴露的全球不同地区环境。程序 II 稳态试验主要考核太阳辐射产生的光化学效应对装备的影响, 将试件暴露于强化的太阳辐射载荷下, 24 h 为 1 个循环^[15], 强化系数约为 2.5。

GJB 2093A—2012《军用方舱试验方法》^[16]主要是对军用方舱类装备的环境试验标准, 在标准中将太阳辐射进行了分类。方法 204: 光化学效应试验主要用于评价在太阳辐射下方舱表面涂层是否有开裂等情况, 试验条件与 150.7A 中程序 II 一致; 方法 203: 日照热效应试验主要是考核热效应对军用方舱的影响, 标准中以军用方舱表面温度作为指向性参数, 在保持环境温度的条件下, 通过调节辐射强度保持舱顶表面温度, 并持续一定的时间, 恢复常温后进行外表面检查^[17]。

美军标 MIL-STD-810H《环境工程考虑和实验室试验方法》^[18-19]中, 试验方法 505.7-太阳辐射(日照), 太阳辐射试验方法基本与 GJB 150.7A 相同, 标准提供了 A1 与 A2 地区的温度及辐照度条件^[20]。英军标 DEF STAN 00-35^[21-22]系列标准, 根据设备使用区域确定相关试验指标^[22]。其中, 试验 CL3 太阳辐射适用于 A 类高温气候区, 在考虑湿度影响时, 可参考 B 类高湿气候区或 M 类海域气候区, 各类气候在标准中都提供了温度、湿度和太阳辐射强度的日循环曲线。针对太阳辐射热效应试验, 国内外标准在环境温度、辐照度、允差值等环境指标和控制指标存在差异, 试验指标对比如表 1 所示。

表 1 国内外标准中太阳辐射热效应试验指标对比
Tab.1 Comparison of test indexes of solar radiation at home and abroad

标准	方法名称	温度范围/℃	温度 允差/℃	辐照度范围/ (W·m ⁻²)	辐照度允差	辐照度均 匀度/%	风速要求/ (m·s ⁻¹)
GJB 150.7A	程序 I 循环试验	A1: 32~49 A2: 30~44 A3: 28~39	±2	0~1 120	±47 W/m ²	10	0.25~1.5
MIL-STD-810H METHOD 505.7	Procedure1-Cycling Test	A1: 32~49 A2: 30~44	±2	0~1 120	±4%或±15 W/m ² (两者最大值)	10	1.5~3 (不小于 0.25)
GJB 2093A—2012 方法 203	日照热效应试验	50	不超过 55	—	—	—	—
DEF STAN 00-35 Test CL3	Test CL3 Solar Radiation	A1: 32~49 A2: 30~44 A3: 28~39	±2	A1: 0~11 20 A2: 0~1 120 A3: 0~1 060	±10%	10	1.5~3

2 太阳辐射热效应模拟试验室设计及测试

分析各试验标准对太阳辐射热效应试验条件的技术要求,主要包括辐射强度和变化温度2项参数。太阳辐射热效应模拟试验室主要由太阳模拟系统和温度控制系统2部分构成,2个系统可独立控制及运行。太阳模拟系统主要是提供红外辐射,实现灯架位置、辐照度等因素的条件和控制,温度控制系统主要作用是实现试验室温度及风速等因素的调节和控制。设计输入条件主要依据 GJB 150.7A 中的试验指标要求,具体内容:

1) 模拟温度范围。常温 $\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,可实现模拟日循环温度控制,温度允差在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

2) 模拟辐照度范围。辐照度为 $0\sim 1\,120\text{ W/m}^2$,辐照度允差为 $\pm 47\text{ W/m}^2$,辐照均匀度在10%以内,可实现辐照度循环控制。

3) 考虑地面及舱体反射,太阳模拟系统可根据物体实际辐照度进行闭环调节。

4) 试验室灯架辐射灯设计需要满足车辆除底面外5个面受到均匀辐照。

5) 试验室应具备足够的排烟能力,并具有补充足够新鲜空气。

2.1 温度控制系统

温度控制系统主要由循环风系统、排烟系统和新风系统等组成,如图1所示。循环风系统的主要作用是产生试验所需要的循环风速,保证样品周围风速在 1.5 m/s 以下,同时使空气在试验室内循环流动,流动的空气通过换热器换热,达到调节试验室内温度的作用。温度控制的主要方式是以管道控制阀的开度及管道电加热投入量的方式来调节制冷站提供的载冷剂温度,进行温度精确控制,其中电加热器功率为 300 kW ,分3组控制,每组 100 kW 。

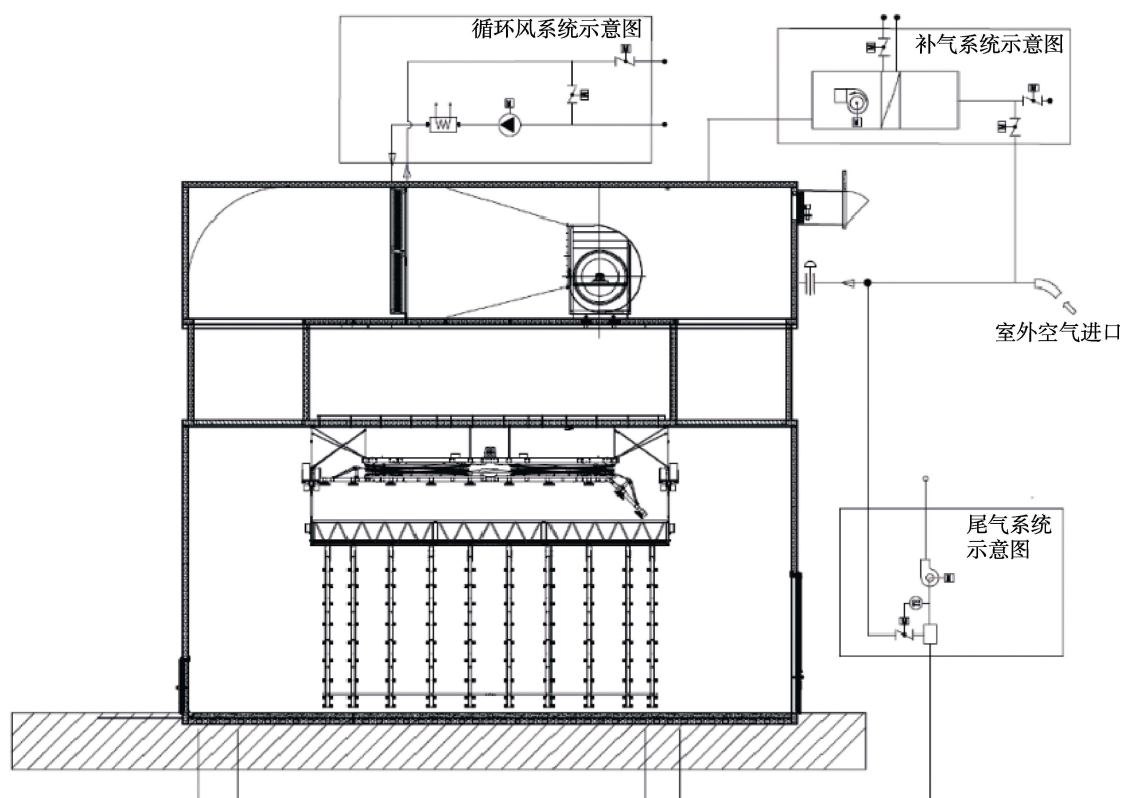


图1 温度控制系统整体结构
Fig.1 Structure of environment simulation system

排烟系统和新风系统主要为车辆起动提供尾气处理及试验室内新风的供给,维持舱内压力的稳定。试验期间,车辆起动、怠速时产生的废气可通过排烟系统排出舱外。由于尾气温度较高,通过混合一部分环境空气,使尾气温度降至 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,由排烟风机将尾气排至室外。新风系统用来通过室外空气补给维持室内 $+20\text{ Pa}$ 微正压环境,补气风机根据舱内压力变频控

制,试验室设计最大新风量为 0.7 kg/s ,同时新风系统通过制冷站的载冷剂的供给,可以调节控制送风温度。

2.2 太阳模拟系统

太阳模拟系统主要提供红外光辐射的模拟,太阳模拟系统主要由光源系统、灯架、移动执行机构、调光器单元、控制系统等设备组成,如图2所示。

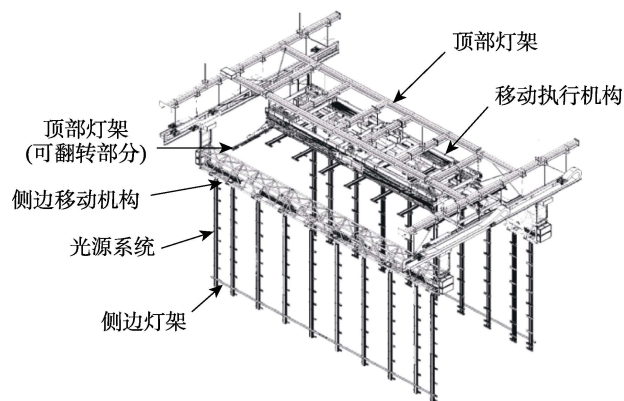


图 2 太阳模拟系统整体结构
Fig.2 Structure of solar simulation system

2.2.1 灯架尺寸和移动机构的设计

军用车辆外形尺寸范围较广,大型军用车辆车体总长度约 10 m,宽度约 3.5 m,考虑一定的设计余量,顶部灯架有效辐照面积设计为 4 m(W)×11 m(L),左右侧有效辐照面积设计为 4.5 m(H) ×11 m(L)。在 GJB 150.7A 中,要求辐照灯应安置在被试件表面至少 0.76 m,考虑试验过程中需要监测车辆周围 1 m 范围内的空气温度,且传感器需要免受到辐射灯的直接照射和来自试件的热辐射影响,辐照灯距离车辆表面设计距离为 1.5 m。顶部灯架的中间部分角度固定向下,前部和后部可在 0°~45°角翻转,根据车辆前后部结构调节角度进行照射,保证军用车辆 5 面照射的需求。

在顶部设计有升降机构,使用驱动电机可以实现灯架上下移动,考虑检修等因素,顶部灯架升降范围为离地 1.5~8 m。侧面灯架通过轨道车结构进行左右移动,在侧灯排不使用时,可以移动至舱体外墙一侧,贴墙放置,达到节约空间的作用。以车体宽度和辐照灯与表面距离计算,两侧灯架距离调节范围为 0~8 m。

2.2.2 光源系统的选择

选取合适的光源是太阳模拟系统的核心问题,光源的主要作用是为太阳模拟系统提供可调光强度,需覆盖短波及中波红外波长的红外光照射,辐照度不小于(1 120±47) W/m²。光源系统主要由红外灯体、灯座等部件组成。

金属卤素灯和氙灯是提供辐照度的 2 种主要光源^[23],这 2 种灯源加装合适滤光镜后,都可以达到模拟阳光辐射的要求。但是氙灯的光效率较低,使用中将会产生很大热量,必须采取降温措施,所以氙灯较少应用于大型试验室的建设,一般多用于小型阳光辐射箱。由于本系统需要对整车进行试验,所以采用金属卤素灯作为光源^[24-25]。金属卤素灯有功率高、模拟性好的优点,适合开展大型样品的太阳模拟试验。

系统选用卤钨灯作为光源,光谱覆盖情况见表 2。其中,灯管辐照度调节范围为 100~1 200 W/m²,辐照度无级可调,单盏红外灯管功率为 2 000 W,色温

表 2 卤钨灯(2 500 K)光源光谱分布
Tab.2 Spectral distribution of halogen tungsten lamp (2 500 K)

光源	波长范围/nm	辐射强度百分比/%	
红外线	IR-A	780~1 400	34.1
	IR-B	1 400~3 000	49.2
	IR-C	3 000~10 000	10.2
可见光	VIS	380~780	6.4

2 500 K,外形为长形直管灯,并带有铝材质反射器。

2.2.3 灯阵排列设计

为保证辐照均匀度,顶部灯架和侧面灯架设计有 10 组灯列,顶部每列有 8 个灯源,侧面每列有 8 个灯源,灯阵整体呈矩阵式排列,在有效辐照面中间区域呈均匀分布,边缘位置相邻灯排或灯组距离缩近,减少辐照度在边缘位置降低的影响。将卤钨灯光谱参数作为输入条件,采用仿真软件进行辐照度仿真,选择距离灯架 1.5 m 的位置作为参考平面,侧边及顶部有效辐照面积的仿真结果如图 3 所示。顶部辐照面积为 4 m×11 m,辐照度范围为 1 150~1 270 W/m²,辐照面平均辐照度为 1 220 W/m²;侧部辐照面积为 4.5 m×11 m,辐照度范围为 1 170~1 270 W/m²,辐照面平均辐照度为 1 230 W/m²。

参考 JJF 1615—2017《太阳模拟器校准规范方法》^[26]计算辐照面的均匀度,顶部和侧部的均匀度为 5.78%、3.67%,灯阵排列设计满足辐照度均匀度在 10%以内的要求。辐照度均匀度计算公式见式(1)。

$$H = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}$$

(1)

式中: $E_{\max}$ 为辐照度最大值; $E_{\min}$ 为辐照度最小值。

2.3 控制系统的设计

控制系统主要包括太阳辐射模拟控制和环境温度控制 2 部分。太阳模拟控制系统主要实现控制光源系统的开关和调光、移动执行机构、传感器采集和处理、辐照度程序编程、安全防护和监控等功能,采用 PLC+CPU 的方式管理太阳模拟系统正常使用所需要的输入输出信号。温度控制系统主要实现对试验间内温度、压差、风速等参数的调节。2 个系统通过 TCP/IP 网络协议进行信号通讯,协调控制试验设备运行。

在进行太阳辐射试验时,试验控制的主要参数需要在 2 个系统中分别设置。太阳模拟系统准备完成后由温度控制系统作为主控系统,根据设定试验温度,将试验指令发送至制冷站,待载冷剂温度达到目标值时,循环风机和载冷剂循环泵启动,调节电加热投入量及比例阀开度。达到温度循环起始条件后,向太阳模拟系统发送启动信号,同时开始辐照度与温度环境模拟。试验控制流程如图 4 所示。

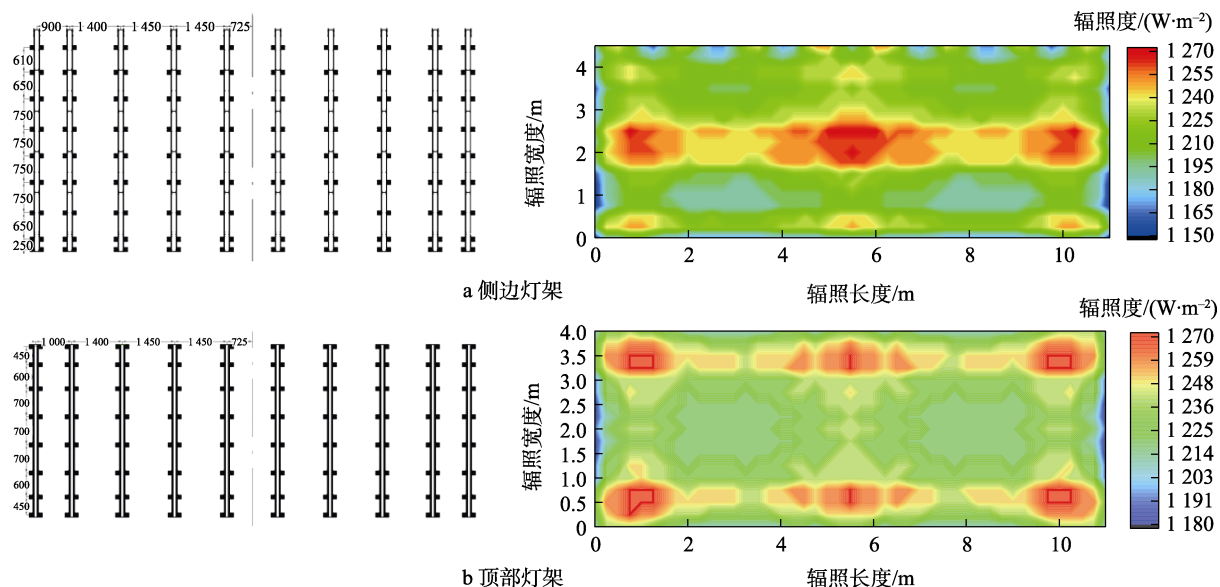


图3 灯阵排列与辐照度仿真结果

Fig.3 Result of lamps array and irradiance simulation; a) side light frame; b) top light frame

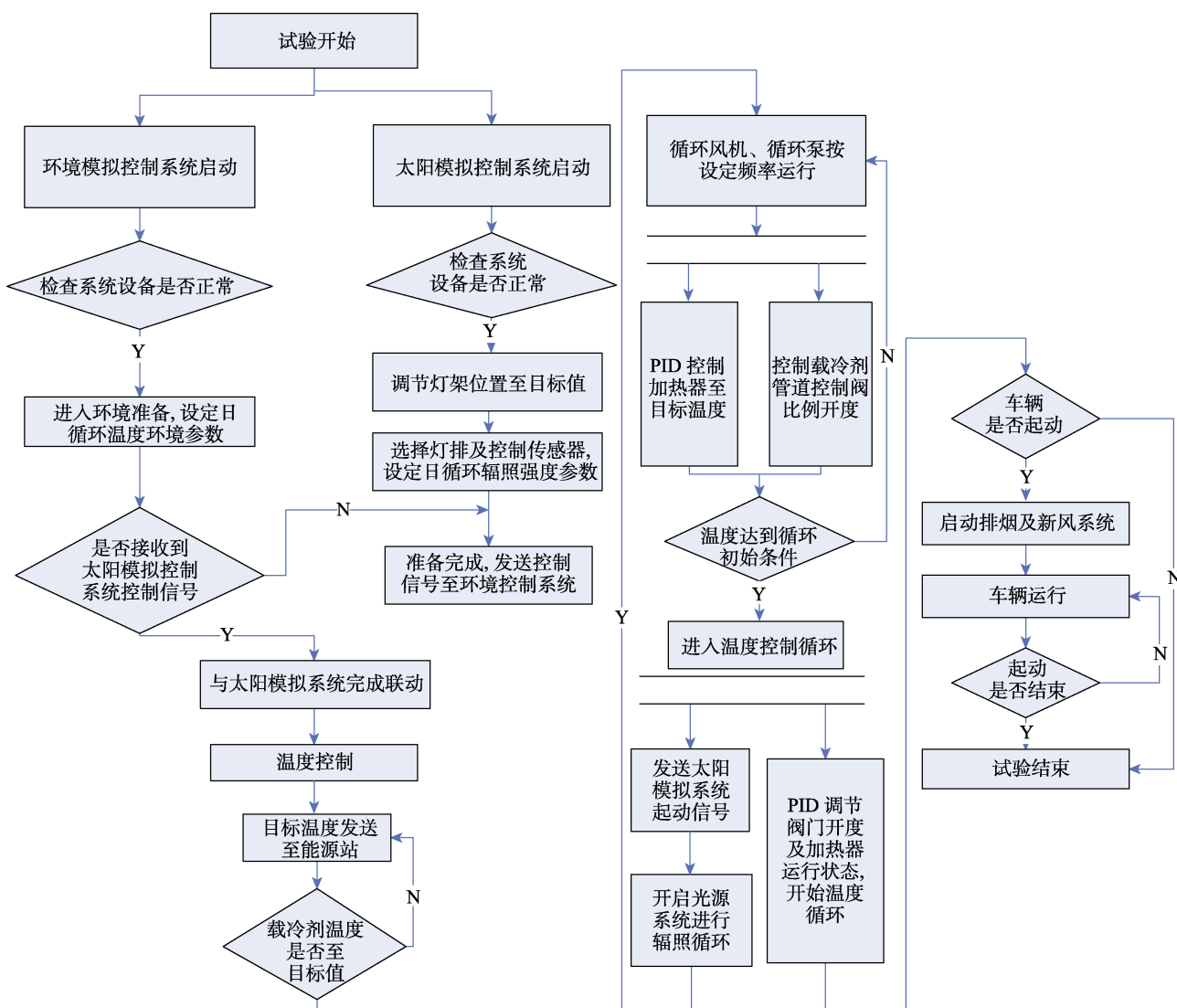


图4 试验控制流程

Fig.4 Flow chart of test control system

2.4 试验测试

2.4.1 均匀度测试试验

为了验证太阳辐射系统辐照强度的均匀性是否满足设计要求,对太阳辐射热效应试验室顶部和左右两侧有效辐照面积区域的辐照度均匀度分别进行了测试。参考 JJF 1615—2017《太阳模拟器校准规范》中的均匀度测试方法,将测试面均分为 2×5 个区域,采用检测器测量各区域和中心点(共 11 个点)的信号值,检测器的短路电流经 I-V 转化器转换为电压信号,等效于采集辐照度,测量结果如图 5 所示。

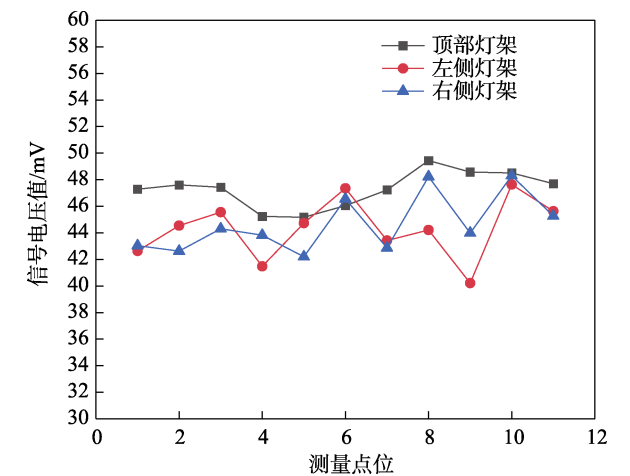


图 5 均匀度测试数据
Fig.5 Data of irradiance uniformity test

通过式(1)计算,结果见表 3。顶部及左右侧灯架辐照度均匀度分别为 4.51%、8.45%、6.74%,满足均匀度在 10%以内的要求。

表 3 辐照度均匀度测试结果 Tab.3 Result of irradiance uniformity test			
灯架位置	辐照度最大值 $E_{\max}/\text{mV}$	辐照度最小值 $E_{\min}/\text{mV}$	辐照度均匀度/%
顶部	49.44	45.17	4.51
左侧	47.63	40.21	8.45
右侧	48.30	42.20	6.74

2.4.2 太阳辐射模拟试验

按照 GJB 150.7A 程序 I 中 A1 干热地区要求的辐照度和温度进行太阳辐射热效应试验验证,检测太阳辐射热效应模拟实验室的各项性能指标是否满足设计要求。在整个试验期间,测量并记录辐照度及环境温度值,如图 6 所示,部分主要试验数据见表 4。经试验验证,辐照度上偏差为 10.6 W/m^2 ,下偏差为 -3.3 W/m^2 ,温度上偏差为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,下偏差为 $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足 GJB 150A 中试验允差(辐照偏差 $\pm 47\text{ W/m}^2$ 、温度偏差 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$)的要求,太阳辐射热效应模拟试验

室可完全按照设定值进行试验,满足设计目标和功能要求。

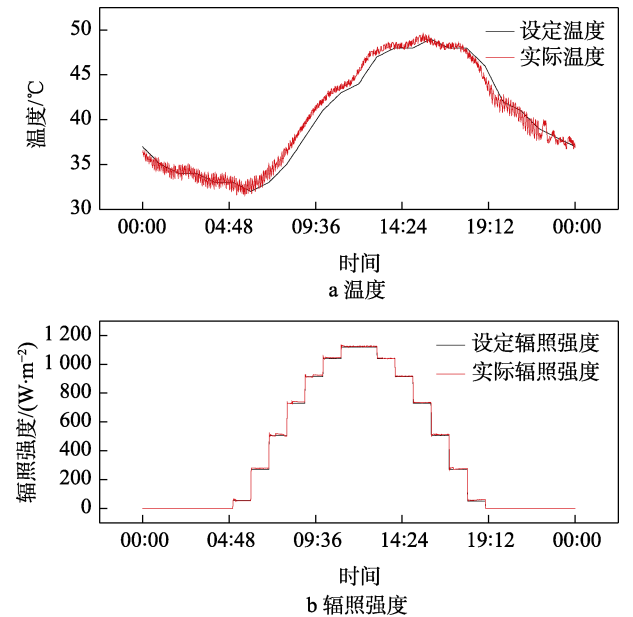


图 6 A1 地区日循环试验环境模拟曲线
Fig.6 Environment simulation curve of area A1 in daily cycle test: a) temperature; b) radiation intensity

表 4 A1 地区温度及辐照度模拟环境数据
Tab.4 Data of environment simulation of area A1

循环小时/h	设定辐照度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	实际辐照度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	辐照度偏差/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	设定温度/ $^{\circ}\text{C}$	实际温度/ $^{\circ}\text{C}$	温度偏差/ $^{\circ}\text{C}$
0	0.0	0.0	0.0	37.0	36.4	-0.6
2	0.0	0.0	0.0	34.0	34.6	0.6
4	0.0	0.0	0.0	33.0	33.8	0.8
6	55.0	51.7	-3.3	32.0	33.5	1.5
8	505.0	501.7	-3.3	35.0	36.3	1.3
10	915.0	925.6	10.6	41.0	42.3	1.3
12	1 120.0	1 125.7	5.7	44.0	45.3	1.3
14	1 040.0	1 040.9	0.9	48.0	47.9	-0.1
16	730.0	735.2	5.2	49.0	49.1	0.1
18	270.0	274.1	4.1	48.0	47.7	-0.3
20	0.0	0.0	0.0	42.0	42.1	0.1
22	0.0	0.0	0.0	39.0	37.8	-1.2
24	0.0	0.0	0.0	37.0	36.9	-0.1

3 结论

1) 基于太阳辐射试验标准要求,设计了军用车辆太阳辐射热效应试验室。试验室由太阳模拟系统和温度控制系统 2 部分构成,温度控制系统通过 PID 对加热器和载冷剂阀门开度的精确控制,可实现高温日循环温度模拟;太阳模拟系统选用卤钨灯金属卤素

灯,作为太阳辐射灯,提供红外光辐射的模拟,并设计可移动机构,实现灯架移动,满足大尺寸军用车辆太阳辐射试验5面照射的需求。

2)对试验室的控制系统进行设计,太阳模拟控制系统和温度控制系统的联合控制,实现环境温度及太阳辐照度双环境因素的日循环模拟试验控制。

3)通过试验对顶部及侧边灯架进行均匀度测试,并结合GJB 150.7A程序I中A1地区日循环进行环境模拟试验。试验结果表明,辐照度均匀度指标满足要求,复现了A1地区温度和太阳辐照度的变化,温度允差和辐照度允差均满足试验需求,达到设计要求。

4)下一步将针对装备车辆在典型干热地区的实测数据,继续开展基于被试装备表面响应温度的辐照度自动控制研究,实现基于热效应的多参数太阳辐射环境模拟。

参考文献:

- [1] 马力. 常规兵器环境模拟试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
MA L. Simulation Test Technology of Conventional Weapon Environment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [2] 王云. 汽车全光谱阳光模拟老化试验方法研究与应用[J]. 汽车与配件, 2019(1): 73-75.
WANG Y. Research and Application of Automobile Full-Spectrum Sunlight Simulated Aging Test Method[J]. Automobile & Parts, 2019(1): 73-75.
- [3] 周力辉, 赵国伟. 装甲车辆车身造型研究与设计[J]. 包装工程, 2017, 38(2): 82-86.
ZHOU L H, ZHAO G W. Styling Analysis and Design of Armored Vehicles[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(2): 82-86.
- [4] 秦剑. 电子设备太阳辐射试验方法分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(2): 15-21.
QIN J. Analysis of Solar Radiation Test Method for Electronic Equipment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2016, 34(2): 15-21.
- [5] 张保军, 缙宇翔. 装备车辆综合气候环境构建分析[J]. 环境技术, 2019, 37(S2): 41-46.
ZHANG B J, GOU Y X. Analysis on the Construction of Comprehensive Climate Environment for Equipment Vehicles[J]. Environmental Technology, 2019, 37(S2): 41-46.
- [6] 陈颖. 车载装备高温环境论证问题及对策探讨[J]. 环境技术, 2022, 40(3): 182-186.
CHEN Y. Discussion on Demonstration Problems and Countermeasures of High Temperature Environmental Conditions of Vehicle Mounted Equipment[J]. Environmental Technology, 2022, 40(3): 182-186.
- [7] 王忠, 陈晖, 张铮. 环境试验[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
WANG Z, CHEN H, ZHANG Z. Environmental Testing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [8] 李明, 彭雄伟, 祝耀昌. GJB 150.3A 中高温试验程序剖析(二): 高温日循环数据的选用和标准应用分析[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(6): 607-611.
LI M, PENG X W, ZHU Y C. Analysis of High Temperature Test Procedures in GJB 150.3A: (Part II) Selection of High Temperature Diurnal Cycle Data and Application of GJB 150.3A[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(6): 607-611.
- [9] 程丛高. GJB 150.3A 高温试验方法的应用及分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 91-96.
CHENG C G. Application and Analysis of GJB 150.3A High Temperature Test Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 91-96.
- [10] 罗来科, 韩玉阁, 章桂芳, 等. 坦克车辆红外特性测试与分析[J]. 车辆与动力技术, 2005(4): 7-11.
LUO L K, HAN Y G, ZHANG G F, et al. Study on Test and Evaluation on Infrared Features of Tanks[J]. Acta Armamentarii the Volume of Tank, Armored Vehicle and Engine, 2005(4): 7-11.
- [11] 韩玉阁, 李强, 宣益民. 装甲车辆热特征试验研究[J]. 弹道学报, 2002, 14(1): 63-68.
HAN Y G, LI Q, XUAN Y M. Experimental Investigation on Thermal Features of Armored Vehicles[J]. Journal of Ballistics, 2002, 14(1): 63-68.
- [12] 中国人民解放军总装备部. 装甲车辆试验规程 第74部分: 暴晒试验: GJB 59.74—2004[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2005.
General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army. Test Operations Procedure for Armoured Vehicles Part74: Insolate Test: GJB 59.74—2004[S]. Beijing: Army Standards Press of General Armament Department, 2005.
- [13] 中国人民解放军总装备部. 军用设备环境试验方法 第7部分: 太阳辐射试验: GJB 150.7A—2009[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.
General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army. Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel Part7: Solar radiation Test: GJB 150.7A—2009[S]. Beijing: Army Standards Press of General Armament Department, 2009.
- [14] 国家科学技术工业委员会. 军用设备环境试验方法 第7部分: 太阳辐射试验: GJB 150.7—1986[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 1986.
Commission of State Science, Technology and Industry. Environmental Test Methods for Military Equipment Solar Radiation (Sunshine) Test: GJB 150.7—1986[S]. Beijing: Army Standards Press of General Armament Department, 1986.
- [15] 刘海龙, 马英, 魏媛. GJB 150.7A-2009 太阳辐射试验方法分析与实践[J]. 环境技术, 2019, 37(2): 130-136.
LIU H L, MA Y, WEI Y. Solar Radiation Test Method and

- Practice of GJB 150.7A-2009 Standard[J]. Environmental Technology, 2019, 37(2): 130-136.
- [16] 中国人民解放军总装备部. 军用方舱试验方法: GJB 2093A—2012[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2013.
- General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army. General Test Methods for Military Shelter: GJB 2093A—2012[S]. Beijing: Army Standards Press of General Armament Department, 2013.
- [17] 刘炳均, 谭国斌, 赵晓鹏. 方舱日照热效应试验影响因素分析[J]. 中国测试, 2012, 38(4): 110-112.
- LIU B J, TAN G B, ZHAO X P. Analysis of Influencing Factors of Shelters Solar Load Test[J]. China Measurement & Test, 2012, 38(4): 110-112.
- [18] United States Department of Defense. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests: MIL-STD-810H[S]. USA: United States Department of Defense, 2019.
- [19] United States Department of Defense. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests: MIL-STD-810G[S]. USA: United States Department of Defense, 2008.
- [20] 马建军. 飞机实验室低温试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(4): 51-57.
- MA J J. Low Temperature Test Method for Aircraft in Climatic Laboratory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(4): 51-57.
- [21] Defence Procurement Agency, An Executive Agency of The Ministry of Defence, UK Defence of Standardization. Environmental Handbook for Defence Materiel Part4: Natural Environments: DEF STAN 00-35[S]. UK: Defence Procurement Agency, An Executive Agency of The Ministry of Defence, UK Defence of Standardization, 2006.
- [22] Defence Procurement Agency, An Executive Agency of The Ministry of Defence, UK Defence of Standardization. Environmental Handbook for Defence Materiel Part3: Environmental Test Methods: DEF STAN 00-35[S]. UK: Defence Procurement Agency, An Executive Agency of The Ministry of Defence, UK Defence of Standardization, 2006.
- [23] 赵立华, 唐其环. 太阳辐射试验标准中的太阳光谱分布[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12): 65-70.
- ZHAO L H, TANG Q H. Solar Spectral Distribution in Solar Radiation Test Standard[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(12): 65-70.
- [24] 刘克涛, 程金华, 孙建勇, 等. 汽车模拟日照太阳辐射试验设备研制[J]. 环境技术, 2009, 27(3): 47-51.
- LIU K T, CHENG J H, SUN J Y, et al. Research and Development on Automobile Test Equipment of Simulated Solar Radiation[J]. Environmental Technology, 2009, 27(3): 47-51.
- [25] 王昱辉, 冯欢欢. 环境试验箱加装太阳辐射试验装置的设计[J]. 环境技术, 2019, 37(4): 133-136.
- WANG Y H, FENG H H. Design on Solar Radiation Test Device for Environmental Test Box[J]. Environmental Technology, 2019, 37(4): 133-136.
- [26] 国家质量监督检验检疫总局. 太阳模拟器校准规范: JJF 1615—2017[S]. 北京: 中国质检出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Calibration Specification for Solar Simulators: JJF 1615—2017[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2017.