

航天发射场光学设备主机核心能力的正向体系设计研究

任臻臻, 王强, 吴高杨, 王康, 张瀚

(西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000)

摘要: 在测控设备新技术、新体制应用发展的新形势下, 以及设备体系效能最优的新需求下, 传统设备逆向建设论证因导致航天发射场设备体系存在冗余设计不合理、效能发挥不完尽等问题从而难以继, 而采用基于需求牵引、技术推动的正向建设论证的科学方法满足总体要求、兼顾长远, 以航天发射场光学设备更新换代的建设论证为例, 进行了一套完整的光学设备主机核心能力的正向体系设计具体流程及方法分析, 即建立了正向体系设计模型; 最后, 通过对设备实际场景应用的计算分析, 表明相较于传统逆向论证的设备, 该光学设备基于多设备体系联合工作, 体系职能定位得到最大效能发挥, 说明了建立的光学设备主机核心能力的正向体系设计模型科学合理、实用有效, 且能够为航天测控设备的正向体系化设计的工程应用提供参照示范。

关键词: 正向建设论证; 航天发射场; 光学设备; 体系设计模型; 测控设备

Research on Forward System Design for the Mainframe Core Capability of Optical Equipment in Space Launch Site

REN Zhenzhen, WANG Qiang, WU Gaoyang, WANG Kang, ZHANG Han

(Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615000, China)

Abstract: With the application and development of new technology and new system, as well as the new demand for optimal equipment system efficiency, the traditional reverse construction demonstration of equipment is no longer applicable because it leads to the problems of unreasonable redundancy design and incomplete performance of the space launch site equipment system. It is necessary to adopt a forward construction demonstration based on demand traction and technology promotion. This scientific approach meets the overall requirements and takes into consideration the long term. Taking the construction demonstration of the new optical equipment of the space launch site as an example, a complete set of specific process and methods are proposed for the forward system design of the mainframe core capability of the optical equipment, which is to establish the forward system design model. Finally, though the calculation and analysis of the actual scenario application of the equipment, it shows that compared with the traditional reverse demonstration of the equipment, the optical equipment based on the joint work of multiple equipment systems, the system functions are positioned to maximize the effectiveness, which shows that the rationality and effectiveness of the forward system design model are verified. The system design model can provide an effective reference for the forward system design of space telemetry, tracking and command (TT&C) equipment.

Keywords: forward construction demonstration; space launch site; optical equipment; system design model; TT&C equipment

0 引言

当前航天测控以信息为主导, 各种测控设备以信息为纽带, 形成一个互联互通的有机整体, 航天测控体现的是测控设备整体效能发挥。针对这个特点, 测控设备建设论证应采用体系化论证方法, 既要重视设备体系构成中各子系统的性能指标, 更要注重它们之间的交互以及由此产生的整体效应, 体现出整体效能最优发挥。这就需要基于航天发射场设备体系构成现状, 建立一个“体系环境”, 把某台设备的建设论证置于“体系环境”中进行基于需求牵引、技术推动的正向论证^[1]。

国外已建立了基于体系需求、体系设计、体系集成、体系管理、体系优化、体系评估和体系演化的建设论证的系统理论与框架, 研究形成了一整套实用化的设备论证工程体系, 美国已形成了设备论证完整的系统工程方法及参考模型库^[2]。国内设备建设论证已开始重视基于需求牵引、遵循现代系统工程思想、构建模型体系设计方法, 以设备体系构成的局部协调优化、整体效能最优为设计目标, 进行大系统顶层设计, 不断迭代优化, 从而促进设备体系设计的科学化、规范化^[3]。

目前, 航天发射场测控设备体系, 经过数十年的建设

收稿日期: 2022-08-27; 修回日期: 2022-09-08。

作者简介: 任臻臻(1995-), 女, 河北衡水人, 大学本科, 工程师, 主要从事航天发射场测控系统外测方向的研究。

引用格式: 任臻臻, 王强, 吴高杨, 等. 航天发射场光学设备主机核心能力的正向体系设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 292-296.

发展和迭代完善, 形成了包括光学、雷达、遥测、遥控、统一测控、中心机与指显在内的较为成熟完备的设备体系构成。因而, 对于设备更新换代的建设论证往往采用的是逆向工程模式, 即根据相应的经费指标开展需求论证。该模式在相当长的一段时间内具备其成熟继承性和传统适用性^[4-5]。但是, 随着设备建设体系化论证需求愈发迫切, 以及测控新技术、新体制的发展应用, 必将深入推动标准化、信息化、自动化、复合型设备的发展, 未来航天发射场测控设备必将迎来革新的体系构成, 传统的逆向论证已不再适用, 不能满足未来测控设备体系发展的应用需求。

因此, 为适应新形势下设备发展需求, 航天发射场测控设备建设论证需采用基于需求牵引、技术推动的正向工程论证模式^[6-8]。以航天发射场某型光学设备更新换代的建设论证为例, 光学设备建设论证参数包括主机核心能力设计、跟踪机架结构总体设计和电子学总体设计, 跟踪机架结构和电子学设计的变化差别很小, 因此本文中对光学设备建设论证主要指主机核心能力的体系设计。研究形成了一套完整的光学设备主机核心能力的正向体系设计具体流程及方法, 即建立了光学设备正向体系设计模型, 为航天测控设备的正向体系化设计提供了参照示范。

1 正向体系设计指导方法

图 1 为测控设备逆向、正向建设论证流程示意图。测控设备逆向建设论证是按照建设需求、总体要求、经费指标、系统设计的流程进行工程论证, 正向建设论证是按照建设需求、总体要求、体系定位、系统设计、经费预算的流程进行工程论证, 正向论证的关键在于体系定位分析。

逆向建设论证通常是按照经费指标将单台设备功能做到最全、性能做到最好, 但往往忽略了多设备体系联合工作的最大效能发挥, 从而造成航天发射场设备体系存在冗余设计不合理、效能发挥不尽等情况。而正向建设论证从需求到经费, 基于多设备体系联合工作最大效能发挥的体系职能定位, 此正向体系建设的科学方法满足总体要求、兼顾长远, 将设备做到体系效能最好、经费最实。

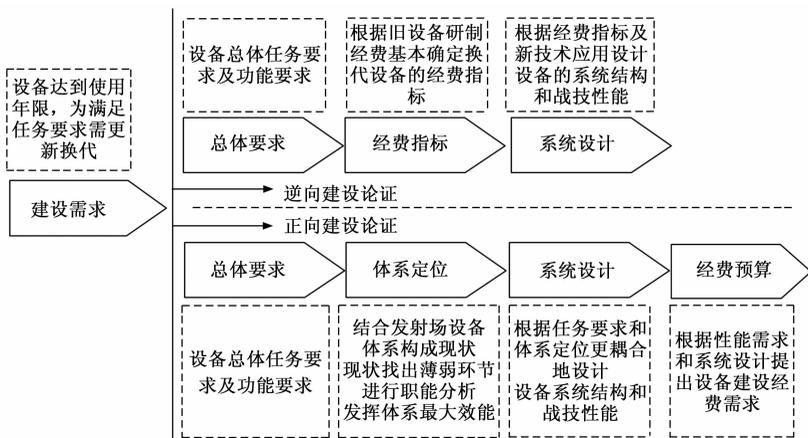


图 1 测控设备逆向、正向建设论证流程示意图

2 光学设备正向体系设计模型

基于正向建设论证的总体流程, 根据实际需求进行具体的分解论证, 以航天发射场某型光学设备更新换代的建设论证为工程实例, 形成总体要求、体系定位、主机核心能力设计的具体论证分析的思路方法, 即建立了光学设备主机核心能力的正向体系设计模型, 具体如下。

2.1 总体要求

基于总体任务要求和新技术发展, 该型光学设备总体功能要求有: 具备可见光、长波红外、中波红外三种成像手段, 可实时输出相应实况图像以及融合处理后的视频图像; 具备获取火箭起飞至一二级分离段的高清实况图像记录能力; 采用一体化单车载机动工作模式, 具备高机动快速部署能力; 具备高质量成像和智能稳定跟踪能力, 自动化、信息化程度高等。

2.2 体系定位

2.2.1 重点弧段分析

设备重点弧段分析旨在分析测量弧段内, 多设备协同工作情况下, 系统设计应突出局部协调优化的职能定位。弧段的分析即对目标(火箭箭体)成像最佳效果的弧段进行分析。为便于计算, 我们将火箭近似为柱状物体。

目标成像占视场比例 10%~80%, 观测效果最佳。通过光学成像分系统(可见光、长波红外、中波红外)焦距、探测器靶面尺寸可确定各分系统最大和最小视场角, 通过视场角、火箭与设备的径向距离以及火箭姿态角, 即可得到火箭在成像视场中的所占比例^[9]。

$$P = \frac{L \cdot \sin(180^\circ - \beta) + D \cdot \cos(180^\circ - \beta)}{N \cdot a \cdot R / f} \quad (1)$$

式中, P 为目标所占视场比例, L 为火箭的长度, D 为火箭的直径, β 为火箭轴线与观测方向的夹角, N 为火箭成像在探测器所占像元数, a 为探测器靶面的单个像元尺寸, f 为光学成像分系统焦距, R 为火箭与设备的径向距离。

1) 可见光需要接力的重点弧段分析。

该型光学设备处于首区和航区光学设备之间, 通过计算得出, 目标在首区、航区光学设备可见光最大、最小视场中所占比例随时间变化关系如图 2 所示。

根据最大至最小视场的包围范围, 从图中可以看出: 0~30 s, 火箭约占首区设备可见光视场的 10%~40%, 成像尺寸稳定合适; 0~170 s, 火箭约占航区设备可见光视场的 10%~50%, 成像尺寸稳定合适, 考虑到航区设备有初始跟踪遮挡, 设备 40 s 后才能稳定获取光学图像。

考虑到弧段接力需要一定的冗余, 该型光学设备可见光需要接力的重点弧段在 20~60 s 弧段, 需着重保证该弧段目标成像比例合适, 能够获取高质量可见光实况图像。

2) 红外需要接力的重点弧段分析。

首区光学设备无红外图像获取能力, 通过

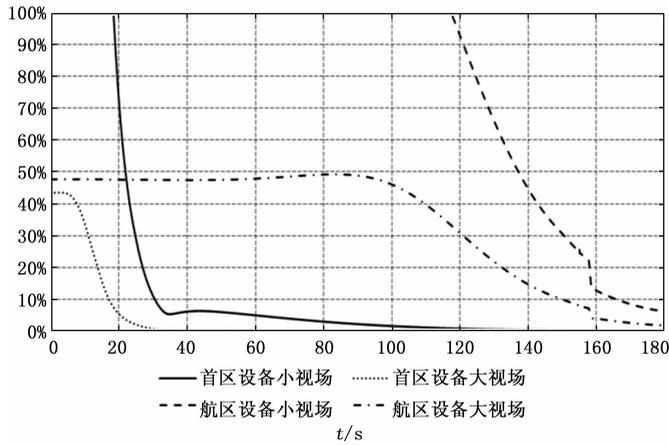


图 2 目标在首区、航区光学设备可见光最大、最小视场中所占比例曲线图

计算得出，目标在航区光学设备红外视场中所占比例随时间变化关系如图 3 所示。

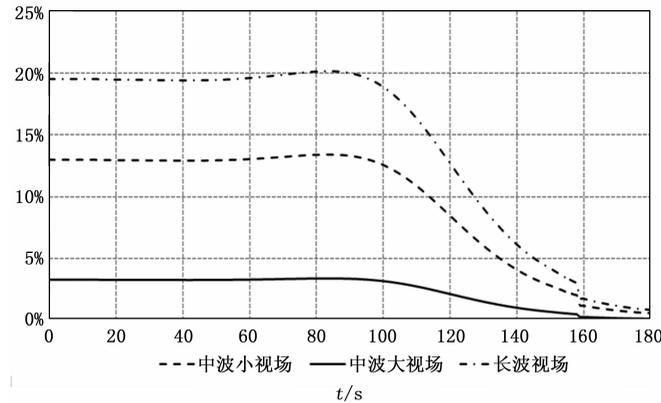


图 3 目标在航区光学设备红外视场中所占比例曲线图

从图中可以看出：0~130 s，火箭约占航区设备红外视场的 5%~20%，成像尺寸较为稳定合适，由于初始跟踪遮挡，设备 40 s 后才能稳定获取光学图像。

该型光学设备红外需要接力的重点弧段在 0~60 s 弧段，需着重保证该弧段目标成像比例合适，能够获取高质量红外实况图像。

2.2.2 站点视场分析

该型光学设备可机动布设于首区多个站点，以距离发射工位最近站点进行分析说明（该站点对设备要求最苛刻，系统设计视场范围满足该站点要求，即可满足其他站点要求）。

由上节分析可知，设备应满足：20~60 s，目标占可见光视场的 10%~80%；0~60 s，目标占红外视场的 10%~80%。

通过计算得出，设备布于最近站点时不同视场角目标在视场中所占比例随时间变化的曲线如图 4 所示。由图可知，要达到最佳观测效果，设备设计应满足的观测视场需求为：

- 1) 20~60 s，可见光视场角范围最小需为 0.5~5°；
- 2) 0~60 s，红外视场角范围最小需为 0.5~6°。

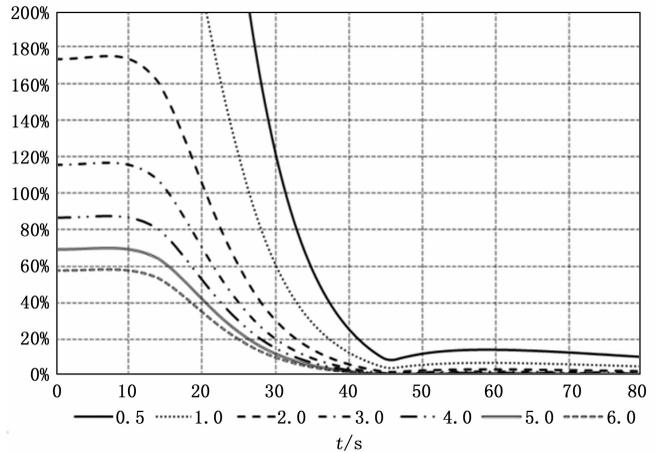


图 4 设备布于最近站点不同视场角目标在视场中所占比例的对比曲线图

2.3 主机核心能力设计

2.3.1 光学系统总体架构设计

根据可见光、红外最小视场角范围，如果采用单个光学系统口径的设计，那么可见光需要 10 倍变焦，红外需要 12 倍变焦。基于航天发射场光学设备工程技术现状，总体设计思路是：

1) 可见光，250 mm 以下的小口径光学系统采用透射式设计，焦距设计能够达到 20 倍，一个小口径可见光系统即可满足 20~60 s 实况记录要求。根据设备测量弧段要求，还需要满足中远距离（至一二级分离，对箭体目标作用距离要求大于 150 km）高质量实况图像记录，设备应配置中等口径光学系统^[10]。为避免中等口径光学系统在近距离目标充满视场的情况，同时保证起飞段更高质量的清晰成像，可见光成像系统需采用中等口径长焦电视+小口径大视场电视的设计模式。

2) 中波红外和长波红外，对火箭箭体成像长波红外效果更佳（中波红外主要是用于目标跟踪和对尾焰成像），300 mm 以下小口径光学系统，目前已工业成熟设计产品最大焦距为 4 倍^[11]（长波红外对进入探测器靶面的光能量要求较高，焦距太小无法满足高清成像的能量要求）；300 mm 以上的中大口径光学系统，因为采用的是折返式设计，为保证图像质量采用定焦设计。因此，中波红外成像系统采用中等口径主镜的设计模式即可，长波红外需采用中等口径主镜+小口径大视场的设计模式。

同时，设计时应采用最新的多光路合一技术，即长焦电视、长波红外、中波红外应通过光谱分光方式共用中口径光学系统。一方面能够提高设备跟踪稳定性，实况图像效果更佳，而且为实现设备全自动化稳定跟踪提供了技术支持；另一方面为实现可见光、长波红外、中波红外多源融合图像输出提供了技术基础^[12-15]。

因此, 总体架构设计是: 设备配置一个中等口径主镜的光学系统, 长焦电视、长波红外、中波红外通过光谱分光方式共用主镜, 外挂一个小口径的可见光大视场和一个小口径的长波红外大视场分系统。

2.3.2 光学系统主口径设计

光学设备口径的大小决定了设备收集光能量的强弱, 从而决定了设备对目标的作用距离, 光学系统主口径的设计主要是根据可见光成像对目标的作用距离要求进行分析论证。

为了保证对目标的观察和成像跟踪, 必须满足以下三个基本条件要求:

- 1) 目标在靶面上的成像尺寸在 2×2 个像元以上;
- 2) 目标靶面照度 $\geq 0.33 \text{ lx}$;
- 3) 调制对比度 $|CM| \geq 0.03$ 。

目标在靶面上的像元数根据公式 (1) 可计算得出, 目标靶面照度以及调制对比度^[16-17]计算公式如下:

$$E_s = \frac{D_s^4 \cdot \tau_s \cdot E \cdot D \cdot L \cdot \rho \cdot \tau \cdot K}{16 \cdot A_s \cdot R^2} \quad (2)$$

式中, E_s 为目标在靶面的照度, D_s 为光学系统入瞳直径, τ_s 为光学系统透过率, E 为太阳光在目标处的照度 (将火箭近似为柱状物体), D 为柱状物体的直径, L 为柱状物体的长度, ρ 为目标表面对太阳光的漫反射系数, τ 为目标与观测站之间的大气透过率, A_s 为目标成像后综合像斑面积, R 为目标到观测点的距离, K 为变换系数。

$$C_M = \frac{E_s}{E_s + \frac{\pi}{2} \left(\frac{D_s}{f}\right)^2 \cdot \tau_s \cdot L_B} \quad (3)$$

式中, C_M 为调制对比度, E_s 为目标在靶面的照度, D_s 为光学系统入瞳直径, f 为光学成像分系统焦距, τ_s 为光学系统透过率, L_B 为背景辐射亮度。

目标的作用距离要求大于 150 km。基于大气抖动均方根值不大于 $2''$, 大气水平能见度不小于 20 km, 观测方向与太阳夹角 $\geq 15^\circ$ 的条件, 以及光学系统镜头和探测器性能指标取行业内较低标准, 计算得到: 观测仰角为 15° 时, 400 mm 口径最长焦距 4 m 端, 长焦电视不能对 150 km 的目标进行观测; 但在观测仰角为 20° 的条件下, 400 mm 口径最长焦距 4 m 端, 长焦电视可对 150 km 的目标进行观测^[18]。

实际场景应用中 150 km 的目标实际观测仰角大于 20° , 因此, 为确保中远距离的高清成像, 设备主光学系统口径为 400 mm 最为适宜。

2.3.3 光学系统总体设计

设备总体设计的组成如图 5 所示。主要包括主光学系统、长焦电视、长波红外、中波红外、可见光大视场、红外大视场、精密跟踪架、信息综合、跟踪控制、数据交互等分系统。考虑高机动需求, 设备采用一体化单载车设计模式。

主光学分系统将目标及背景光信息进行汇聚, 经光谱

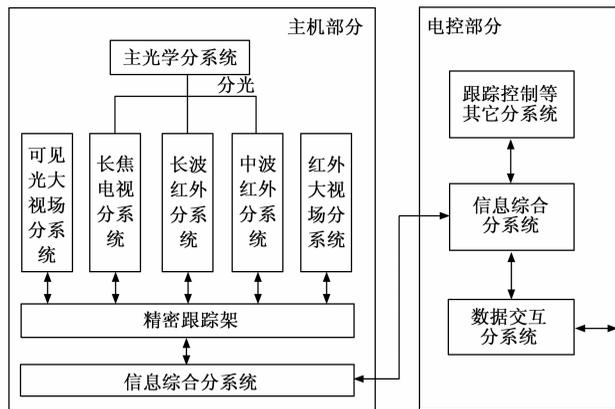


图 5 设备总体设计的组成框图

分光分为可见光、长波红外和中波红外三路不同波长的光, 分别进入各自的光学子系统传递至探测器。跟踪外挂的长波红外和可见光大视场镜头分别将各自的光信息传递至探测器。

其中, 为了保证距离变化时, 目标成像尺寸相对稳定, 长焦电视焦距设计为 1~4 m 连续变焦, 选用动态范围较高的高分辨力探测器; 由于定焦镜头比变焦镜头成像性能更可靠, 长波红外选用 800 mm 的定焦光学系统, F 数常用的主要有 $F/2$ 和 $F/4$ 两种, 同等口径条件下, F 数为 2 的系统视场角大, 获得的图像对比度高, 有利于远距离弱目标的提取及捕获跟踪, 因此最终选择 F 数为 2 的制冷型长波红外焦平面探测器^[19]; 中波红外分系统: 选用 800 mm 定焦的光学系统, 选用制冷型中波红外焦平面探测器; 可见光大视场, 所需视场较大, 成像质量要求较高, 需选用小口径连续变焦光学系统, 光学系统镜头选用货架产品 (专业级成熟产品精密度更高), 探测器选用高分辨率成熟商业相机^[20]; 红外大视场, 主要完成对近距离火箭全体成像, 所需视场较大, 需采用口径不小于 150 mm 的连续变焦光学系统, 选用制冷型长波红外焦平面探测器。

3 体系模型分析验证

3.1 验证方法

根据论证光学设备的系统结构和性能指标, 以及某发射场区实际站点的场景应用, 将光学设备布设在距离火箭几百米的首区固定站点和距离火箭十几公里的航区机动站点, 计算设备各光学分系统在起飞段 (0 s)、主口径接力段 (45 s)、一二级分离段 (160 s) 火箭目标所占视场比例, 通过分析视场比例的合理性, 直观反映光学实况记录的观测效果, 可验证光学设备主机核心能力的正向体系设计的合理性、有效性。

3.2 试验结果分析

选取首区固定、航区机动 2 个站点进行计算分析, 设备在实际站点的场景应用中各光学分系统目标所占视场比例计算结果如表 1 所示。

表 1 设备在实际站点的场景应用中各光学分系统目标所占视场比例

	首区固定站点(大视场与主口径 接力、变焦使用)			航区机动站点 (最大焦距)	
	起飞段 (0 s)	接力段 (45 s)	一二级分离 段(160 s)	初始 段	一二级 分离段 (160 s)
长焦电视	404%(短焦)	41%(短焦)	1.5%(长焦)	15%	24%
可见光大视场	39%(短焦)	40%(长焦)	—	—	—
长波/中波红外	588%	60%	0.5%	5%	8%
红外大视场	34%(短焦)	14%(长焦)	—	—	—

计算结果表明:

光学设备布设于首区固定站点时,起飞段可见光大视场分系统目标所占视场比例为 39%,红外大视场分系统目标所占视场比例为 34%,由这 2 个光学分系统可保证高质量实况图像记录;接力段长焦电视分系统使用短焦观测目标,目标所占视场比例为 41%,长波/中波红外分系统目标所占视场比例为 60%,即主口径光学分系统能够实现很好的接力观测能力,从而获得目标视场比例稳定合适的高质量实况图像;一二级分离段目标所占视场比例很小,分辨力不足,主口径光学分系统能够获取一二级分离的关键动作实况图像,实现对航区其余光学设备的实况图像冗余。

光学设备布设于航区机动站点时,根据部分测量需求用于更好地观测火箭关键动作,长焦电视分系统使用最大焦距观测目标,目标所占视场比例为 15%~24%,长波/中波红外分系统目标所占视场比例为 5%~8%,即直接使用主口径光学分系统,从初始跟踪段至一二级分离段均可获取视场比例合适的高质量实况图像。

通过实际场景应用的计算试验,论证的光学设备在首区固定站点时,能够重点保证可见光 20~60 s、红外 0~60 s 测量弧段内成像比例稳定合适的高质量实况记录,而一二级分离段的高质量成像由其它航区光学设备保证;机动至航区适宜站点时,能够完成一二级分离等火箭关键动作的高质量实况记录。相较于传统逆向论证的光学设备造成航天发射场光学设备体系存在冗余设计不合理、效能发挥不完等情况,该正向论证的光学设备基于多设备体系联合工作,体系职能定位得到最大效能发挥,验证了建立的光学设备主机核心能力的正向体系设计模型科学合理、实用有效,能够展现出多设备联合工作的最优效能发挥。

4 结束语

针对传统设备逆向建设论证存在导致航天发射场设备体系冗余设计不合理、效能发挥不完,未来测控设备建设发展必然更加重视体系效能的最佳发挥,设备建设论证必将采用正向体系化论证方法的问题。本文基于此形势需求,采用基于需求牵引、技术推动的正向建设论证的科学方法,研究形成了一套完整的光学设备主机核心能力的正向体系设计模型,包括总体要求、体系定位和主机核心能

力设计具体的论证流程、科学方法。通过对设备实际场景应用的计算分析得出,正向体系设计的设备,能够获取体系定位重点弧段的视场比例稳定合适的高质量实况记录,能够实现多光学设备联合工作的体系效能最优发挥,验证了正向体系设计模型的合理性和有效性。同时,该套正向体系设计模型也可为其他航天测控设备的正向体系化设计的工程应用提供参照示范。

参考文献:

- [1] 魏继才,崔 颖,任庭光,等.关于武器装备体系论证方法的思考[J].系统工程理论与实践,2011,31(11):2202-2209.
- [2] 闫小伟,邓甲昊,李承延,等.信息化作战设备体系及其论证方法[J].科技导报,2012,30(15):53-56.
- [3] 杨东昌,马永忠,宋 科.武器装备体系需求论证研究[J].中国设备工程,2021(12):250-251.
- [4] 贾晨星,李 胜,周 宇.武器装备论证工作中标准体系构建[J].指挥控制与仿真,2019,41(2):20-23.
- [5] 林 涛,徐伟鑫,张 震,等.基于嵌入式的车辆行驶记录系统设计[J].计算机测量与控制,2014,22(1):168-171.
- [6] 陈文英,张兵志,谭跃进,等.基于体系工程的武器装备体系需求论证[J].系统工程与电子技术,2012,34(12):2479-2484.
- [7] 孙续文,孙东彦,阚荣才,等.基于任务能力的武器系统体系结构论证方法探析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(S1):224-226.
- [8] 汪浩洋,吴 伟,向 超,等.武器装备测试数据立方体模型的构建[J].计算机测量与控制,2021,29(9):142-146.
- [9] 张 坤.高精度大视场空间目标测量光学系统研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2021.
- [10] 徐 斌.中远距离高分辨率成像技术与实验研究[D].天津:天津大学,2019.
- [11] 赵 磊,白 剑,方卫栋.小口径长焦透镜的焦距检测技术[J].光学学报,2020,40(4):85-90.
- [12] 佃仁伟.高光谱和多光谱图像融合方法研究[D].长沙:湖南大学,2020.
- [13] 刘春鹏,张 伟.基于 IHS_NSCT 多光谱图像融合算法的研究[J].农机化研究,2022,45(2):50-55.
- [14] 孙佳敏,宋慧慧.基于 DWT 和生成对抗网络的高光谱多光谱图像融合[J].无线电工程,2021,51(12):1434-1441.
- [15] 沈宜帆.多光谱图像的配准融合及动目标检测算法研究[D].武汉:华中科技大学,2021.
- [16] 史学舜,刘红元.成像跟踪系统作用距离测试方法探讨[J].科技信息,2009(29):807,845.
- [17] 王建军,王 颖,高 昕.光学设备白天观测目标可行性分析[J].红外与激光工程,2006,35(S1):120.
- [18] 卫沛锋,卢振武,刘欣悦,等.自适应光学系统对空间运动目标校正性能分析[J].光子学报,2015,44(7):106-112.
- [19] 沈为民.轻小型高分辨空间光学系统的参数选取和设计[J].红外与激光工程,2006(S2):38.
- [20] 刘妍妍,高印寒,李国宁.大视场 TDI CCD 相机焦平面电路一致性设计[J].半导体光电,2015,36(6):988-992.