

机载武器制导系统研究

刘廷霞, 李 博

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033))

摘 要: 对机载制导武器进行了阐述, 介绍了机载制导武器的系统, 论述了机载武器制导系统的使用特点及局限性, 并对其主要技术性能和关键技术进行了分析。

关键词: 机载; 制导武器; 红外

中图分类号: TJ95 **文献标识码:** A

DOI: 10.3788/OMEI20112810.0020

Guiding Weapon System Carried by Plane

LIU Ting-xia, LI Bo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: The guiding weapon carried by the plane was presented. The system of the guiding weapon was introduced. The using characteristics and localization of the guiding weapon system plane were discussed. And the main technology capability and the key technology of the system were analyzed .

Keywords: carried by the plane; guiding weapon; infrared

1 引 言

制导武器是装有战斗部的无人驾驶可控飞行器, 是能够利用声波、电波、光波 (包括可见光、

红外线、激光), 甚至气味、气体等一切可以利用的直接或间接的目标信息, 追踪和攻击目标的武器。制导武器一词是目前国内外通用的、跨行业、跨军兵种的一个军事技术术语, 是以是否具有导引系统

与控制系统（合称为制导系统）来分类的一个庞大的武器范畴^[1-3]。

机载制导武器是指飞机（包括直升机、无人机）携带、投放/发射（合称投射）的制导武器，是在非制导航空武器的基础上发展而来的。由于机载制导武器在结构组成上都有精确的导引系统、反应敏捷的控制系统和毁伤目标的战斗部，因而具有很高的命中精度和识别并摧毁目标的能力。机载制导武器在实施攻击时，能够根据获取的目标信息、自身运动信息以及它们的相互关系、目标特征和各种约束条件，按照预定的导引规律和设定的程序，实时校正自身的飞行轨迹，飞向目标的易损部位并适时启动战斗部，以最大限度地摧毁目标。导引系统是机载制导武器的“眼睛”，其功能是在复杂的战场环境中探测和识别目标以及易损部位，通常包括光波（激光、红外）探测器和电波探测器（雷达）等；控制系统是机载制导武器的“大脑”，负责信号处理、资料获取、分系统管理、驱动控制和火力决策等一系列重要工作。因此，可以说机载制导武器就好像是长有神经系统、眼睛和翅膀的武器^[4-6]。

2 机载制导武器的制导方式

制导系统是机载制导武器的核心，其制导方式通常有以下几类：寻的制导，自主制导，遥控制导，复合制导，多模制导和多模复合（串并联）制导。

2.1 寻的制导

寻的制导又称自寻的制导，其特点是通过弹上制导系统感受目标辐射或反射的能量，导引武器飞向目标。寻的制导又分为主动寻的制导（弹上装有能量发射装置和接收装置）、半主动寻的制导（弹上装有能量接收装置，照射源在载机或地面上）和被动寻的制导（弹上只装有接收目标本身辐射能量的接收装置）等类型。按照感受目标辐射或反射的能量种类，可分为声呐（声波寻的）制导、雷达制导、红外制导、电视制导、激光制导等。寻的制导精度较高，但作用距离较近，在复合制导中常用作末段

制导^[7]。

2.2 自主制导

自主制导是指在制导过程中既不和制导站（设在地面或飞机上）、也不和目标传递任何信息，而独自导向目标的制导方式。自主式制导不需要提供目标的直接信息，也不需要弹体以外的设备配合，而仅靠弹体自身装载的测量仪器测量地球的某些物理特征，从而确定弹体的飞行轨道，控制引导弹体命中目标。主要包括惯性制导（INS）、卫星导航定位系统制导（GPS）、GPS/INS组合制导、地形地貌匹配制导等。自主制导的特点是弹体的飞行完全自主，抗干扰能力强、制导距离远，但机动性差，在复合制导中常用作中段制导。但由于制导程序是预先确定的，所以这种制导方式只适于攻击地面固定目标。

2.3 遥控制导

遥控制导是指由制导站（设在地面或飞机上）传递信息进行的制导方式，主要包括指令制导和波束制导等。指挥站可设于地面、海上或空中（载机）。指挥站的制导指令计算装置，根据跟踪测量系统测得的目标和导弹的运动参数、选定的导引规律和对制导过程的动态要求，形成制导指令，通过指令发送设备不断发送给导弹，弹上接收机接收制导指令并进行解调，由自动驾驶仪控制导弹飞行，直至命中目标。遥控制导抗干扰能力强，但敏捷性较差。

2.4 复合制导

复合制导是指在弹道的两个和两个以上制导段，采用不同的体制或不同的频段，按照一定的先后顺序依次进行的制导方式。目前常用的复合制导有：INS+末段雷达制导、INS+末段红外制导、GPS/INS+末段雷达制导、GPS/INS+末段红外制导等，其中典型的复合制导有无线电指令修正初制导+捷联惯性中制导（SINS）+主动雷达末制导。复合制导的突出优点是能极大地增加精确制导距离^[8]。

2.5 多模制导

多模制导是指其制导系统在同一制导段同时采

用两种或两种以上体制或频段进行工作的制导方式。目前常用的多模制导有红外/紫外双模制导、主/被动雷达多模制导、红外成像/毫米波双模制导、多波段红外成像制导等,正在研制的还有红外成像/毫米波/激光多模制导。多模制导可以实现各种制导方式的优势互补,极大地提高武器系统的探测能力、抗干扰能力和自身生存能力。但是,其结构较为复杂,技术难度较大^[9]。

2.6 多模复合(串并联)制导

多模复合(串并联)制导是指其制导系统采用多种传感器同时工作并按一定程序交替工作,是多模制导和复合制导的有机组合,以充分发挥各传感器的优势,提高武器系统的反隐身能力、抗干扰能力、目标识别能力、恶劣战场环境中的作战效能和自身生存能力等。多模寻的复合绝不是简单意义上单模寻的的相加,各种模式复合的首要前提要考虑作战目标和电子、光电子干扰的状态,根据作战对象选择、优化模式的复合方案。但是这种制导方式结构非常复杂,技术难度很大,只有极少数武器采用这种制导方式^[10-12]。

3 寻的制导方式的方法与原理

寻的制导方式是机载制导武器制导方式中应用最为普遍的一种方式。下面对其进一步详细分析。

寻的制导体制又称自动导引制导体制,是指导弹能够自主地搜索、捕获、识别、跟踪和攻击目标的制导方式,这是制导武器系统最主要的现代制导体制。寻的制导导弹在整个战术导弹领域中占有重要的地位,由于它的自主性好、火控系统简单、制导精度高等优点,在空中发射的导弹中几乎全部采用寻的制导方式。在地空导弹武器系统中,为了提高机动性、快速性、火力强度、攻击多目标和抗干扰能力,也越来越多地采用寻的制导方式^[13]。

从原理上讲,寻的制导是利用导引头接受目标辐射或反射的某种特殊能量(电磁、红外、可见光、激光等)识别目标,并确定导弹和目标的相对位置

及速度,在导弹上形成控制指令,自动将导弹引向目标。寻的制导体制可以根据能源所在位置不同分为自主式、半自主式和被动式3种。

主动式寻的制导是在弹头上装有信号发射机和接受机。发射机发射激光、红外线、雷达波或声波等信号照射目标,接受机接受目标反射的信号,从而引导弹体命中目标。这种系统在锁定目标之后便自动地、完全独立地去攻击目标,因此以这种方式制导的导弹具有“发射后不管”的能力。但这种系统加重了武器的重量,而且价格昂贵。因此,主动式寻的制导一般只适用于作末段制导。

半主动式寻的制导是用弹外的信号发射器发射信号,照射或选定目标,弹上的信号接受机接受目标反射的信号,引导弹体命中目标。与主动式寻的制导相比,它的最大优点是不需要增大武器的重量和尺寸,就可以大大增加攻击目标的威力。

被动式寻的制导系统是在弹头上装有信号接受器,信号接受器接受到目标发射或辐射的信号后,引导弹体命中目标。这是一种便宜而有效的制导方式。通信卫星的电波、喷气发动机的尾烟、舰艇烟囱的热流等都可能成为这种制导武器的“向导”。例如,反辐射导弹就是雷达被动寻的制导的导弹,鱼雷则采用声波被动寻的制导。

3.1 几种典型制导的方法与原理

3.1.1 微波寻的制导

微波寻的制导装置主要工作在3 cm以上频段,分为微波主动寻的制导、微波半主动寻的制导和微波被动寻的制导。3种微波寻的制导方式如图1所示。

(1) 微波主动寻的制导。在这种制导方式下,寻的装置全部在导弹上,即导弹上装有主动式导引头。该导引头发射出的电磁波对目标照射,照射信号一旦从目标反射回来,就被导引头的接收机接收,导引头根据接收信号确定导弹与目标的相对位置与速率,形成导引规律所需要的控制指令,进而控制导弹飞行,直至命中目标。

(2) 微波半主动寻的制导。在微波半主动寻的

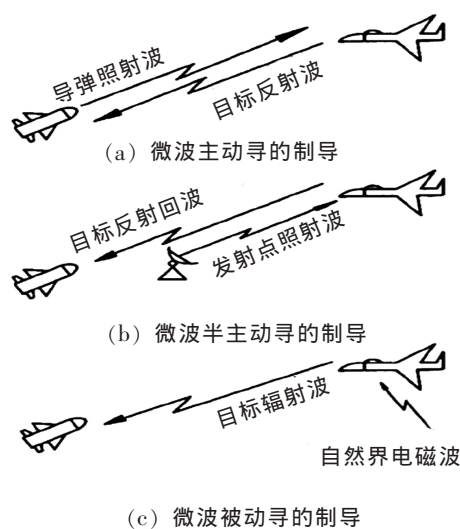


图1 3种微波寻的制导方式的工作信息源示意图

制导中，用来照射目标的照射信号不是由导弹上产生，而是由导弹外的发射点产生，该发射点可以是地基、空基、舰基等。导弹上的导引头接收目标的反射回波，输出导引规律所要求的信息，形成控制指令，控制导弹飞行。

(3) 微波被动寻的制导。在这种制导方式下，导弹上的接收机以目标本身辐射的电磁波或自然界的电磁波在目标上的反射能量为工作信息，按照导引规律的要求形成控制指令，将导弹引向目标，并最终命中目标。

3.1.2 毫米波寻的制导

毫米波寻的制导工作在毫米波段， $\lambda=1\sim 10\text{ mm}$ 。在毫米波寻的制导中，目前主要采用的是毫米波被动寻的制导，而毫米波主动寻的制导和毫米波半主动寻的制导实用的不多。

毫米波寻的制导的突出优点是既避免了电视、红外制导的全天候工作能力差的弱点，又能获得较微波寻的制导精度高、抗干扰能力强的优势。再者，它体积小，质量轻，很适用于小型导弹使用。

由于目标辐射的毫米波能量很弱，所以探测距离较近，加之目前毫米波元器件的发展尚未成熟，故限制了毫米波寻的制导的广泛应用。不过，毫米波寻的制导已经开始用于一些导弹中，且作战效果

不错。

3.1.3 红外寻的制导

红外寻的制导已经广泛应用于各类导弹武器系统上。它是利用装在导弹上的红外探测器，即红外导引头来识别、捕获和跟踪目标辐射的红外能量来实现寻的制导。

红外寻的制导分为红外非成像寻的制导（即红外点源寻的制导）和红外成像寻的制导，发展很快，应用越来越多。

(1) 红外点源寻的制导

红外点源寻的制导是一种被动寻的制导方式。实现红外点源寻的关键部分是红外点源寻的器，即红外点源引导头。它主要由红外光学系统、调制器、光电转换器、误差信号放大器和角跟踪系统等部分组成，用于探测目标的高温部分，如飞机发动机的尾喷口与喷射流、舰艇的烟囱等。在寻的制导中完成对目标的搜索、识别和跟踪，并引导导弹攻击和击毁目标。应该指出，从原理和理论上讲，任何点源目标都有一个共性，即比起背景是一个张角很小的物体，这样可以利用空间滤波等背景鉴别技术，把目标从背景中识别出来^[14]。

红外点源寻的制导是目前导弹，尤其是战术导弹最常用的寻的制导方式之一，优点主要有：制导精度高、攻击隐蔽性好，同时比红外成像寻的制导经济、实用。但只能提供目标的方位信息，不能提供距离信息，易受曳光弹、红外诱饵、阳光和其他热源干扰。

(2) 红外成像寻的制导

红外成像寻的制导是发展中的新型红外寻的制导方式。在寻的制导中，它利用红外成像导引头获得目标红外图像，其图像同电视图像相似，具有很好的可视性，从而完成对目标的探测、识别和定位等。红外成像导引头主要由多元实时红外成像器和视频信息处理器组成。

红外成像寻的制导最突出的优点是具有高分辨率的目标识别能力，甚至可以识别出目标的薄弱部

位,故制导精度高,具有全天候工作能力和抗干扰能力。当然,随之而来的缺点是技术复杂、成本高。目前,红外成像寻的制导已经进入实战应用阶段。

3.1.4 电视寻的制导

电视寻的制导一般作为导弹武器系统的末制导。由于制导是利用目标的反射可见光信息,所以也是一种被动寻的制导方式。电视制导控制系统主要由电视摄像机、光电转换器、误差信号处理器、伺服机构、导弹控制系统组成。导弹对准目标方向发射后,在寻的制导中,电视摄像机拍摄目标和周围环境图像,从有一点反差的背景中自动提取目标,并借助跟踪波门对目标实施跟踪。当目标偏离波门中心时,随之产生偏差信号,形成导引指令,并输出驱动伺服机构的信号,使摄像机光轴始终对准目标,同时自动控制导弹飞行^[15]。

电视寻的制导具有制导精度高,可对付超低空目标(如巡航导弹)或低辐射能量的目标,可工作在广阔的光谱波段,有强烈的抗无线电干扰的能力,体积小、质量轻、耗电低,适用于小型导弹等突出优点。因此,是精确制导武器的发展方向 and 热点,获得了广泛应用。但电视寻的制导方式也有不足之处,主要是对气象要求高,在雾雨天气和夜间不能使用。此外,由于它属于被动寻的制导方式,所以使导弹武器的射程受到了很大限制。电视寻的制导控制系统如图2所示。

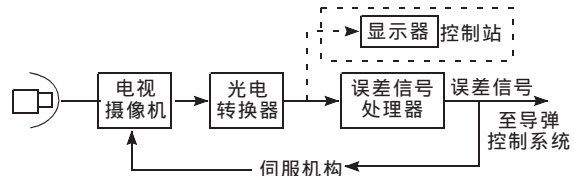


图2 电视寻的制导控制系统示意图

3.1.5 激光寻的制导

激光寻的制导是由弹外或弹上的激光束照射在目标上,弹上的激光寻的器利用目标漫反射的激光,实现对目标的跟踪和对导弹的控制,使导弹飞向目标的一种制导方式。按照激光源所处位置不同,激光寻的制导又可分为激光主动寻的制导与激光半主动寻的制导。

(1) 激光主动寻的制导。

在这种制导方式下,激光源和激光寻的器均设置在弹上。当导弹发射后,能主动寻找被攻击目标,是一种发射后不管的制导方式。由于激光源设备大而笨重,因此,目前难以用于实战。但是,这种制导方式很有吸引力,是激光寻的制导的发展方向。

(2) 激光半主动寻的制导。

激光半主动寻的制导是目前最广泛、技术最成熟的一种激光寻的制导方式。在这种制导方式下,激光源放在弹外载体上,而激光寻的器放在弹上。激光半主动寻的制导系统如图3所示。

由图3可见,系统主要由弹上寻的系统、弹外

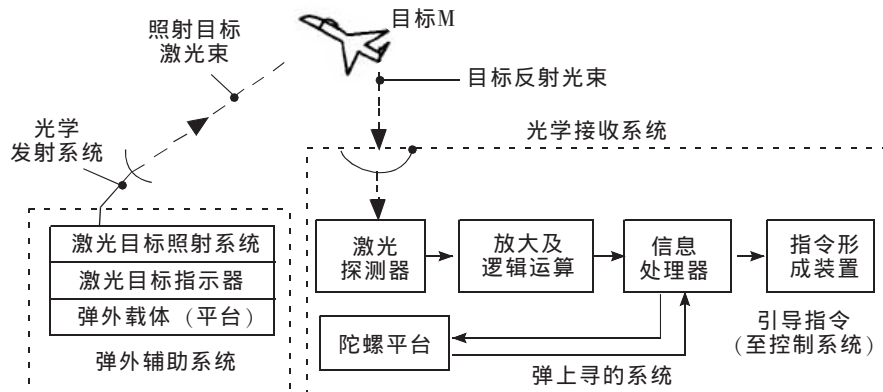


图3 激光半主动寻的制导系统

载体及安置在载体内的激光目标指示器构成。弹上寻的系统是其核心部分，一般由激光探测器、放大及逻辑运算器、信息处理器、指令形成装置和陀螺平台组成。

激光半主动寻的制导中，激光目标指示器向被攻击的目标发射激光束为导弹指示目标，光学接收系统接收并汇聚目标反射的激光束能量，通过激光探测器转换成电信号；放大器把信号放大，并经逻辑运算产生误差信号，从而测出目标所处的位置及导弹飞行偏离；这样，信号处理器依据角误差信号求出纠正导弹偏离的导引信息；指令形成装置依据导引信息产生导引控制指令，操纵导弹沿着正确的弹道飞向目标，直至命中目标。激光寻的制导的突出优点在于：制导精度高、抗干扰能力强和可用于复合制导^[16-18]。

4 机载制导武器系统

机载制导武器能否充分发挥作战效能，与其载机的性能是密切相关的。

为了从载机上投射且充分发挥制导武器的作战效能，必须由载机、机载火控系统、机载制导武器及其投射装置、地面设备等构成载机/机载制导武器系统，如图4所示。

在载机/机载制导武器系统中，载机是机载制导武器的投射平台，它将制导武器携带到指定空域，并按照规定的程序投射制导武器攻击目标。机载火控系统是载机上用于制导武器的瞄准、控制和管理的设备，通常由目标搜索跟踪系统、投射控制系

统和显示系统3部分组成。机载制导武器系统是直接杀伤、摧毁目标或完成其他特定任务的武器，是机载制导武器系统的核心，是发挥整个武器系统作用的最直接部分。投射装置用于悬挂、运载和投射制导武器，在载机与制导武器之间起过渡作用。地面设备包括地面测试设备和地面保障设备，地面测试设备又分为制导武器地面测试设备和投射装置地面测试设备，它们分别用于检查、测试制导武器和投射装置的功能及主要性能指标是否符合要求，确定故障产品的故障部位；地面保障设备主要用于地面测试设备的校准，制导武器能源的提供，以及制导武器的贮运、挂装和维护等^[19-20]。

5 机载制导武器的发展方向

面对性能先进的战斗机、神出鬼没的巡航导弹、远在战线后方的预警机和干扰机、虎视眈眈的军事卫星、威力强大的防空体系以及复杂电磁干扰下的作战环境等主要因素的挑战和威胁，机载制导武器必将在新的战争理论和微电子、红外、激光、信息、通信、推进、束能、新能源、新材料等科学技术的推动下迅速发展。机载制导武器的发展几乎融入了当今信息时代所有的最新科学技术，特别是以信息技术为核心的高技术发展成果。

机载制导武器的发展方向为：

(1) 提高数字化、网络化程度，加装双向数据链，提高打击高机动目标能力。

机载制导武器网络化是指其制导信息的来源从目标和投射平台向网络过渡，即能够综合利用卫星、预警飞机、地面雷达、机载雷达等提供的信息进行制导。使用超大规模集成电路，超高速、大容量计算机，专用处理器及功能模块，以提高制导武器对目标和环境信息的识别处理速度和利用率，进而提高和改善武器系统的目标捕获能力、抗干扰能力及自动寻的能力。其中，采用“人在回路中参与控制”方式，通过弹上传感器获取的由数据链传回的战场景象，操作手可以正确识别目标；在武器自动跟踪

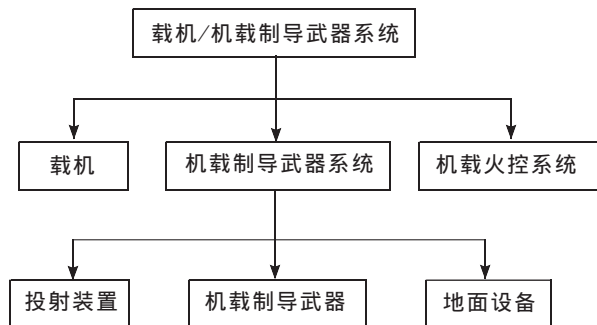


图4 载机/机载制导武器系统组成图

目标过程中,一旦目标丢失,可以通过人工参与重新搜索、截获,直至命中目标;操作手还可以根据武器命中前发送的最后一帧视频图像判断其命中精度,评估杀伤效果,确定是否需要引导尚处于飞行中的其他武器继续攻击该目标;此外,操作手还可以根据网络系统提供的战场即时信息,修改飞行中的武器的攻击计划,去攻击更为重要的目标。“人在回路中”参与控制技术已成为解决制导武器探测、识别目标和提高命中精度的重要手段,可普遍应用于防区外发射的空地导弹。美国的“斯拉姆”(SLAM)空地导弹和新一代“战斧”Block4 巡航导弹就是典型的“人在回路中”参与控制的武器。

(2) 改进武器制导系统,进一步提高命中精度和全天候作战能力。

制导系统是机载制导武器的“心脏”,是提高其命中精度的关键。在提高制导系统的制导能力方面,研究的重点是确保精确制导武器在复杂战场环境中精确命中目标,乃至目标易损部位的末制导技术,如红外成像制导、毫米波制导、多模或复合制导以及智能化信息处理等精确制导技术,使弹药具备目标自动识别和自动交战能力。

(3) 发展制导武器远程化、隐身化、高速化,增强突防能力,以应对敌方防空系统的对抗。

高技术局部战争一开始,首先打击的目标是敌方指挥决策中心及通信枢纽、交通要地及工业中心,以瘫痪其军事机器和社会运转秩序。由于这一行动是在敌方的防空系统未被摧毁前的突然袭击,因此必然是大纵深作战。打击预警机的空空导弹射程需大于预警机的探测距离(400 km 甚至更远);打击地面目标的机载制导武器的投射距离大于防区半径(1 000 km 甚至更远)。为提高机载制导武器的突防能力,除隐身化是重要途径外,采用高超声速攻击,使对方防御系统来不及反应,也是制导武器的一大

发展方向。

(4) 实现低成本研制生产,扩大弹药制导化改造范围,提高作战效费比。

现代战争中,机载制导武器的消耗量组大,且价值昂贵,巨额的军费开支是所有国家的后顾之忧。因此,想方设法降低精确制导武器的成本,是研制生产者必须重视的问题。在机载制导武器研制、生产过程中,要重视走“基本型、系列化、模块化”道路,采用模块化设计,在基本型的基础上,不断改进、完善和发展,以形成威力大中小、射程远中近的攻击空、地、天不同目标的系列产品;根据作战对象和使用环境的差异,更换不同的舱段,以形成满足不同作战任务要求的产品,提高制导武器的适应能力。系列化和模块化,是走“多、快、好、省”发展途径的重要措施,不仅能避免重复研制,有利于缩短研制周期、扩大批量生产、简化后勤保障,而且可以降低研制、生产、使用、维护成本。另外,扩大常规弹药的制导化改造范围,也是降低制导武器成本的有效措施之一^[13-14]。

(5) 发展多用途机载制导武器,提高引战系统威力。

采用“一种平台多种武器”或“一种武器多种平台”的模式,是机载制导武器向多用途方向发展的主要手段。“一种平台多种武器”,是指一种作战飞机可以同时携带和装备集中不同功能的制导武器,用于攻击不同的作战对象。“一种武器多种平台”,是指一种制导武器可以同时搭载或装备于多种不同的作战平台,如固定翼飞机、直升机、无人机甚至地面和海面平台,用于攻击同一类作战目标。这样,不仅促进了制导武器本身多功能化和广泛应用,而且提高了飞机等运载平台的综合作战能力,形成有效的攻防体系。

参考文献

- [1] 马翔, 肖立志, 戴杰. 机载激光定向红外干扰效能研究[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(4): 50-53, 65.
- [2] 王浩, 丁达理, 殷学忠. 无人机载激光制导武器系统目标参数测量与分析 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(7): 116-119.
- [3] 张晓琳, 唐文彦, 孙和义. 水下声信号的激光干涉测量[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(4): 809-815.
- [4] 卢科青, 王文, 陈子辰. 点激光测头激光束方向标定[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(4): 880-886.
- [5] 齐振恒, 李涛. 机载制导武器导航系统嵌入式软件结构设计[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(1): 85-89.
- [6] 郑猛, 冯其波, 邵双运, 等. CR 扫描仪激光扫描光学系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(1): 21-28.
- [7] 章大勇, 吴文启, 吴美平. 机载激光雷达系统标定方法[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2806-2813.
- [8] 贾方秀, 丁振良, 袁锋. 相位法激光测距接收系统[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(10): 2377-2384.
- [9] 陈健, 薛乐堂. 舰载红外告警分系统的告警距离研究[J]. 光机电信息, 2010, 27(10): 55-58.
- [10] 冯志庆, 白兰, 张增宝, 等. 高能激光反射镜热变形补偿[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(8): 1781-1787.
- [11] 陈洪芳, 钟志, 丁雪梅. 激光外差干涉的非线性误差补偿[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(5): 1043-1047.
- [12] 王思雯, 郭立红, 赵帅, 等. 高功率 CO₂ 激光对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(4): 798-804.
- [13] 陈健, 吉桐伯. 基于大规模多元面阵探测器的凝视型星载红外告警技术研究[J]. 光机电信息, 2010, 27(9): 77-80.
- [14] 刘万里, 欧阳健飞, 曲兴华. 激光光束入射角度变化对角锥棱镜测量精度的影响[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2): 286-291.
- [15] 高明, 吴振森. 远场光束扩展对光斑瞄准偏差影响的实验[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(3): 602-608.
- [16] 晋耀, 潘文庚, 郭巍巍. 复杂电磁环境下机载制导弹药的电磁兼容研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 112-115.
- [17] 苏鑫鑫, 王永寿. 欧美空军新一代机载精确制导武器[J]. 飞航导弹, 2009(12): 13-19.
- [18] 丁全心, 刘华. 光电探测与制导技术在机载成像系统中的应用与展望[J]. 红外与激光工程, 2007(z2): 7-14.
- [19] 李保平. 直升机载武器系统发展趋势分析[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(2): 111-117.
- [20] 胡志鹏, 李耐和. 机载红外对抗系统[J]. 红外, 2004(11): 31-34.

作者简介: 刘廷霞 (1973-), 女, 汉族, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 2005年于中科院长春光机所获得博士学位, 主要从事高精度伺服控制及其跟踪算法的研究。E-mail: liutingxia2001@sohu.com