

# 无人靶机及其自主控制技术发展

王道波<sup>1</sup>, 任景光<sup>2</sup>, 蒋婉玥<sup>1</sup>, 王寅<sup>1</sup>

1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016

2. 中国空空导弹研究院总体部, 洛阳 471000

**摘要** 靶机是一种用于模拟空中机动目标的军用飞行器, 在对空武器的研制、检验及部队的战训等方面具有非常重要的作用。经过近半个世纪的发展, 中国已研制开发了覆盖低空、低速到高空、高速的各型靶机, 在靶机总体及其飞行控制技术等领域取得了显著的进步。本文系统回顾了无人靶机及其控制技术的发展历程, 深入分析了靶机的类型、自主控制的主要内容, 并对新一代靶机总体及飞行控制的发展趋势进行展望。

**关键词** 靶机; 无人机; 飞行控制; 编队控制

靶机是一种特殊的有动力无人航空器, 作为空中机动目标模拟器用于检验对空武器系统的战术、技术性能及作战部队的训练与演习。多年来, 世界各国作战飞机自身飞行性能、机载武器、航空电子设备、电子或红外干扰设备不断在发展, 技术性能日趋先进, 广泛采用了雷达或红外隐身措施, 使对空武器系统打击这些目标更加困难。因此, 为评估对空武器系统对于空中目标的打击效果, 开展近炸引信和各种杀伤效果的专项试验, 需要具有能够反应目标运动与光电特性的空中机动靶目标。由此可见, 靶机在对空武器的研制、生产和检验过程中具有极其重要的作用。一个国家的靶机水平也间接反映了其对空武器系统的综合性能, 靶机从根本上决定了对空武器装备的最终作战效能。

## 1 现代靶机的历史与发展

### 1.1 无人靶机的发展历史

靶机是无人机最早的应用领域, 英、美等西方国家早在 1922 年就开始研制靶机, 是靶机技术水平最高也是产量最大的地区。伴随着航空技术的飞

跃式发展, 靶机已成为军用航空器的重要组成部分, 从低速靶机、亚音速靶机到超音速、旋翼靶机和实体靶机种类齐全。如图 1 所示, 靶机的分类按巡航靶机、旋翼靶机和实体靶机, 其中巡航靶机又按低速靶机、亚音速靶机和超音速靶机分类<sup>[1-4]</sup>。

低速靶机(图 2)是最早发展的靶机, 美国的典型产品 MQM33/36 是世界上服役时间最长的靶机, 于 1945 年 7 月首飞, 先后为至少 25 个国家生产了 73000 架, 用作多种口径高射炮以及各

种地空导弹的靶标。该型靶机采用上单翼机布局, 机翼无上反角, 安装角在翼根为 1° 而翼尖为 -2°, 无方向舵和起落架。动力装置为 1 台 67.1 kW 的四缸两冲程发动机, 双叶定距木质螺旋桨。机长(不含助推器)3.85 m, 翼展 3.5 m, 空重 122.5 kg, 最大发射重量 181 kg, 最大平飞速度(海平面至 915 m 高度)100 m/s, 实用升限 3050 m, 平均续航时间 52 min。

中国从 20 世纪 60 年代开始研制低速靶机, 典型产品为西北工业大学研制

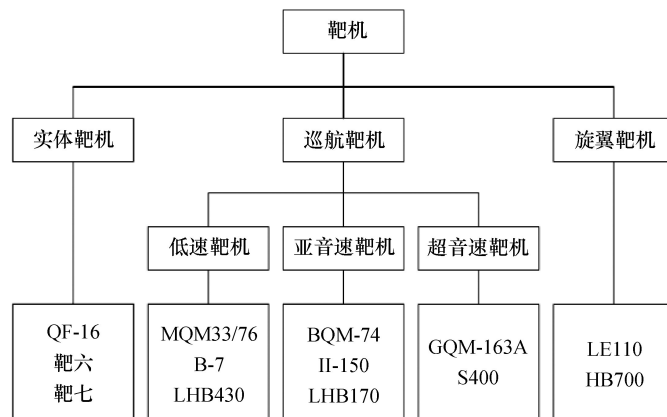


图 1 靶机的分类

Fig. 1 Classification of aerial targets

收稿日期: 2017-02-01; 修回日期: 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(61503185)

作者简介: 王道波, 教授, 研究方向为飞行力学与控制, 电子信箱: dbwangpe@nuaa.edu.cn

引用格式: 王道波, 任景光, 蒋婉玥, 等. 无人靶机及其自主控制技术发展[J]. 科技导报, 2017, 35(7): 49-57; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.07.005



图2 低速靶机

Fig. 2 Low-speed target drones

的B-2型和B-7型靶机。原总参谋部第六十研究所研制生产的II-70型靶机被广泛应用于中国对空武器的性能评估及作战部队训练,是生产时间最长、产量最大的靶机。

低速靶机飞行速度主要特征是飞行速度在100 m/s以下,采用活塞式发动机,可以在6000 m以下高度飞行。图2.3(c)为中国研制生产的LHB430C型低速靶机,翼展6.2 m,机长4.75 m,飞行高度达6000 m,具备高原起降能力,能够搭载50 kg负载以50~60 m/s速度飞行,满足国内各种对空武器的靶试和战训的需要。

亚音速靶机(图3)常作为导弹的测试和评估的空中机动目标,是需求量最大的一种靶机。美国的典型产品BQM-74“石鸡”(Chukar)于1965年开发,在全球多国生产,产量已超过10万架,至今仍在服役。“石鸡”靶机采用可拆卸的梯形上单翼,圆截面的流线型机身,其下方有发动机进气道,倒Y型尾翼,带30°下反角的水平安定面。动力装置为1台推力为1070 N的WR24-8涡喷发动机,机身3.95 m,翼展1.75 m,空重133 kg,最大起飞重量270 kg,最大平飞速度953 km/h,升限12200 m,续航时间78 min,能够满足防空火炮、地空和空空导弹训练及武器系统评估的需求。

国内与美国BQM-74型靶机性能相近的产品有II-150型靶机和HB-170B靶机,均采用小型涡喷发动机作为动力装置,配置双通道数字式飞控,能携带典型的目标增强器和诱饵弹,是国内的战训和科研重点产品。HB170B

靶机采用双涡喷发动机为推进动力,翼展1.8 m,机长4.0m,最大任务载荷25 kg,最大起飞重量150 kg,飞行速度大于170 m/s,飞行高度6000 m,具有最大4g的横向过载能力。

为模拟第二代战机高亚音速飞行的特性,美国研制世界上首架用于面空武器战术训练以及性能测试的“火蜂”I型靶机(Firebee I BMQ-34,图4(a))。该型靶机依据美国陆军、海军和空军联合计划而研制,由特里达因·瑞安航空科技公司和富士重工业株式会社生产,由空中或地面发射。北大西洋公约组织用其进行导弹测试和评估等项目,此外,“火蜂”I型靶机还被改造成面空武

器使用,服役于美国空军。“火蜂”I型采用中单翼机,双翼梁矩形机翼布局,机翼有45°后掠角,无上反角和安装角;后掠尾翼(垂直尾翼后掠角48°,水平尾翼后掠角45°);尾椎下面有一个腹鳍;锥形机身,机身中段下面有抗震龙骨。机身6.98 m,翼展3.93 m,空重680 kg,最大起飞重量可达1134 kg,最大平飞速度1111 km/h,使用高度5~18920 m,最大续航时间115 min。

中国的高亚音速靶机由赵煦院士团队于20世纪60年代首次研发成功,后由南京航空航天大学发展和生产的长空系列靶机(图4(b)),其采用涡喷-6发动机,具有飞行包线宽机动能力强



图3 亚音速靶机

Fig. 3 sub-sonic target drones



图4 高亚音速大型靶机

Fig. 4 High sub-sonic aerial targets

的特点,是中国典型的大型高亚音速靶机,至今已生产数百架。长空系列靶机已广泛应用在国内各类中高空导弹的评估和试验中,为国防武器的发展做出了巨大贡献。

超音速靶机(图5)大多采用火箭或冲压发动机为动力,美国的典型产品GQM-163A“郊狼”(Coyote)是海军研制的一种超音速掠海飞行靶机,用于模拟超音速掠海飞行的反舰巡航导弹。“郊狼”为两级圆柱形机体,前段为主发动机段,安装涵道式火箭/冲压发动机,后段为一个MK70 Mod1标准导弹助推器,具有一个NSROC 1型尾翼,总长9.56 m,其中主发动机段5.62 m,助推器段3.94 m;最大飞行速度在发射后6 s为Ma2.8,发射后20 s为Ma2.5,发射后122 s为Ma2.2;使用高度在发射后6 s为213 m,发射后20 s为5 m,发射后122 s为4 m;以Ma2.5巡航期间航程为66.7 km,以Ma2.2飞行末端为20.4 km。国产S-400型超音速无人靶机采用两级固体火箭作为发射助推和巡航动力,最大飞行速度Ma1.2,具有定高、定向、支线飞行,以及遥控遥测功能。

美国的实体靶机QF-4始于20世纪70年代,利用美国军方不再使用的F-4“鬼怪”战斗机为美国空军和海军改装成的高速全尺寸靶机,是双发喷气、下单翼布局,动力装置为2台推力为48.5 kN的J79-GE-8涡喷发动机(开后加力时推力可达75.6 kN)。机长19.2 m,翼展11.77 m,空重13757 kg,最大起飞重量28030 kg,最大平飞速度2389 km/h,实用升限16575 m。

QF-16(图6(a))是美国军方改造的另一系列全尺寸高速靶机,F-16“战隼”一直被视为QF-4系列靶机的后继机型。2013年QF-16完成了首次自主飞行,最大飞行速度达到Ma1.47。它采用单发喷气式单翼布局,半硬壳式机身采用翼身融合形式与机翼相连,提高了升阻比并增加了刚度,开裂式减速板位于平尾内侧的尾撑后端。F-16A采用1台推力为100.5 kN的涡扇发动机,F-16C采用1台推力为105.7 kN的涡扇发动机。机长15.09 m,翼展9.45 m,

空重7070 kg,最大起飞重量10800 kg,实用升限15240 m。

20世纪80年代,赵煦院士团队研制成功由歼5战机改装的靶五实体靶机,至20世纪90年代又成功完成歼七飞机改装完成的靶七型靶机,最大马赫数可达M2.05,首次实现了由航空动力推进的超音速靶机,填补了中国超音速靶机的空白。随后又成功将退役的歼6飞机改装为靶六型靶机,在中国先进对空武器系统的科研和评估中起到巨大作用。

旋翼靶机(图7)是用于对武装直升机专门研制的空空和地空战术导弹的测试靶机,20世纪80年代美国波音公司研制(Mi-4UM),可以高度逼真地模拟来袭攻击直升机,对地对空武器进行训练和评估。采用俄罗斯米格24D

“雌鹿”直升机的半尺寸模型,机长8.32 m,宽1.12 m,旋翼直径6.6 m,最大发射重量170 kg,最大任务载荷重量55 kg,最大平飞速度215 km/h。国内同类产品是由南京航空航天大学与上海雏鹰科技有限公司合作研制的LE110直升机靶机,起飞重量300 kg,旋翼直径5.98 m,机长5.78 m,于2005年投入某新型导弹的科研靶试应用。

## 1.2 靶机控制的现状和发展目标

如今国际军事航空工业已进入由第三代战斗机向第四代战斗机过渡的阶段,中国也已进入了四代战机的部署与列装阶段,为检验第四代战斗机的作战性能,为第四代战斗机对空武器系统的试验鉴定和装备部队后的军事训练提供保障,为地面防空部队防御第四代战斗机的导弹提供目标,开展研制模拟



(a) 美国GQM-163A“郊狼”超音速靶机

(b) 中国S-400 超音速靶机

图5 超音速靶机

Fig. 5 Super-sonic target drones



(a) 美国QF-16 实体靶机

(b) 中国靶七实体靶机

图6 实体靶机

Fig. 6 Full size target drone



(a) 美国的米24缩比旋翼靶机

(b) 中国的LE110旋翼靶机

图7 旋翼靶机

Fig. 7 Rotary target drones

第四代战斗机的高速、大机动性和高隐身性的靶机显得非常重要。相对于四代战机配套武器的先进靶机研制已成为无人机领域中迫切需要发展的目标。

靶机有两大作用,一是新型对空武器的检验标准,二是战训的假想目标,相比与战训靶机而言,用于对空武器检验和评估的靶机具有更高性能要求,即必须能够模拟四代战机的基本飞行特征。四代战机的基本特征是:高隐身目标(雷达散射截面 Radar Cross Section,  $RCS < 0.02 \text{ m}^2$ )、大机动过载(横向过载  $8g$  并持续  $30 \text{ s}$ )、超音速飞行( $M1.2 \sim M1.7$ )。为了体现现代战斗机的空中防御能力,靶机还需携带相应的任务装置,使之具有红外和雷达的对抗能力,用于模拟战机在受导弹攻击时能够采用对抗行动。

体现四代战机基本性能和抗干扰能力的靶机主要性能和特征如下。

1) 小 RCS 目标特性<sup>[5-6]</sup>,前向 $\pm 30^\circ$  雷达反射面小于  $0.01 \text{ m}^2$ 。

2) 大机动飞行特征<sup>[7-8]</sup>,要求水平过载  $8g$  持续  $40 \text{ s}$ ,或  $10g$  过载持续  $10 \text{ s}$ 。

3) 高空高速飞行<sup>[9-11]</sup>,要求飞行高度大于  $18000 \text{ m}$ ,速度  $M1.2 \sim M2$ 。

4) 目标增强器和抗干扰设备携带能力,  $25 \sim 50 \text{ kg}$  任务设备。

5) 低研制和产生成本。

对空武器系统性能包络面很宽,不是采用一个弹道就可以全面考核性能,通常需要设置 10 条以上的典型弹道来检验导弹性能,因此以四代战机的模拟目标特性为牵引,按不同的导弹攻击弹道和靶试科目针对性来设计和研制先进靶机。

先进靶机及控制的发展目标如下。

1) 采用先进的气动隐身一体化布局,或直接采用先进战机的缩比设计,减小靶机的 RCS 面积。显然采用大尺寸的实体靶机不仅隐身设计很困难,其工程实现上也有很大的代价。采用减小靶机几何尺寸的方案显然是减小 RCS 的最直接和最便捷措施,但靶机尺寸的减小会使靶机的携带红外和电磁干扰弹的能力下降。因此,在适当减小

无人机外形尺寸前提下,综合气动隐身一体化设计与吸波涂层技术,实现具有足够任务携带能力的无人机是新一代小 RCS 靶机的一种有效措施。

2) 对于高速靶机而言,采用高推重比的涡喷发动机是提高靶机的速度有效方法,但高端的高增压比大推力发动机不仅使靶机的尺寸增加,研制成本随之也大幅度增加。实际上靶机并不需要长时间超音速巡航飞行,只需在进入靶道后有限的时间内超音速飞行,因此采用机-弹结合方案是较好的选择,即靶机以较小的航空动力飞行进入靶道,再启动火箭动力作为加力推进,使靶机达到超音速状态飞行一段有限时间(十几秒至几十秒钟)。

目前大机动靶机一是采用航空动力,二是采用火箭动力,无论采用哪种动力方案,不采用矢量推进技术很难达到持续过载的要求。对于国内经典的大机动靶机长空靶机而言,其动力余量是很大的,几乎达到 1:1 的推重比,其水平过载能力还未达到  $6g$ 。显然依靠舵面控制的操纵能力尚不能满足飞行控制的要求,长时间大坡度过载的飞行将会明显损失靶机飞行高度。有效的技术措施之一是在常规靶机基础上,应用矢量推进技术来实现靶机的直接力和力矩控制,这不仅可实现靶机较长时间的大机动飞行,而且在可行性和经济上都是理想的。

3) 靶机还需要装备有与目标战斗机相似的目标特征模拟器和对抗导弹的各种干扰装置,因此靶机能装载足够重量和尺寸的任务设备。一般载荷能力必须在  $25 \sim 50 \text{ kg}$ 。

4) 靶机的飞行保障也是靶机的重要内容<sup>[4,23]</sup>,靶机大多在野外靶场使用,地面保障应尽可能简便,大多场合要求靶机能零长发射、1 h 的快速阵地布置和 20 min 内快速撤收。

靶机的回收是降低靶机使用费用的重要因素,在科研或战训中常有非实弹发射过程的演练和测试飞行,靶机应能多次使用,并保持较低的单次使用费用。伞降气囊回收是最常见的靶机回

收方式。零长发射和定点伞降+气囊回收更便于靶机的外场使用。

5) 为适应多机编队和协同任务的靶试也将成为科研和战训的内容,采用一站多机的测控链路装置将有利于靶机的集群供靶的需要。

6) 无论何种靶机,其低成本研制要求都十分明确,国际上通常一枚新型导弹研制从设计到定型过程至少需要 40~50 次空中靶试,多达十几个靶试科目,因此发展中国的靶机需从多方面着手,不能按照四代战机的要求去研制靶机,不仅技术实现难度大,而且研制经费昂贵,即使研制成功也因生产费用昂贵而难以大量使用。对于战训靶机而言,武器系统的典型弹道和敌机的典型特征是对靶机的基本要求,这种靶机不追求武器系统的边界指标和性能,主要用于对武器系统的操纵和发射过程的演练,并具有一定的战训效果为宜,重要的还是靶机大量生产后能降低成本,以适应战训需求。

## 2 无人靶机的自主控制

靶机是一种无人机,靶机的自动控制和自主控制很大程度体现靶机的性能和品质。靶机作为一类特定的无人航空飞行器,在气动结构方面以常规布局的构形为主,在控制方面则与常规无人机控制模式大致相同。当靶机配置适当的动力装置,搭载各类任务设备,具备远程遥控飞行和预设航迹自主飞行,并在规定时刻准确启动目标增强器和各类干扰源,即可完成靶试任务。靶机作为无人机还要求必须有较高的可靠性,能在恶劣条件下起飞,在复杂的电磁环境和地形环境中飞行,完成各种各样的科研和战训供靶任务。

早期的靶机采用模拟电子电路实现对靶机的姿态控制,通过远程遥控指令,由地面操纵员发送指令来控制靶机的高度和航线飞行。如今随着计算机技术的发展,所有靶机均已采用计算机数字控制,因此从靶机的控制而言不仅由数字控制带来了控制逻辑复杂度的提高,还将不断引入智能技术大大增强

靶机的自主能力。

按照靶机的使用要求,靶机控制的基本内容如下。

1) 对常规布局靶机的控制策略通常按常规飞行控制策略来设计,需设置的基本控制回路包括增稳回路、姿态回路、定向回路、定高回路、航迹回路等,以实现各种模式下的可靠飞行,其中航迹控制包括靶机的出航、靶道巡航和返航等航线自主飞行控制,使靶机能从起飞点以最短航线进入靶道,并能根据空勤指挥的指令在靶道多次进入和即时退出,具备多次重复进入靶道的功能,在完成靶试任务或训练任务后,靶机可按预设航线安全返航并回收。

2) 靶机控制目的是提高靶机的稳定性和操纵性,改善靶机的飞行品质,靶机控制以经典控制理论为基础,由系统给定指令值与实际输出状态值之差构成偏差,并基于偏差通过比例(P)、积分(I)、微分(D)3个基本校正环节以及滤波器和陷波器产生成操纵控制量,实现对靶机运动模式的稳定化控制和回路品质的调节。虽然有大量文献采用各类先进和复杂控制规律对无人机的飞行控制进行验证,但以理论推导和数字仿真验证为多,投放实用的很少,因此仅从靶机的基本控制而言,采用经典控制理论的线性控制规律仍有很大应用,在全飞行包线中的控制参数则多采用增益表来实现变参数控制。实践证明这些方法是行之有效的。

3) 从可靠性而言,靶机控制需包括故障识别和特情处置逻辑,当发生局部部件或传感器故障能及时判断和正确处置,保证完成飞行任务,最低限度也要保证靶机的安全。靶机可配置必要的冗余结构来提高靶机的任务可靠度指标。

4) 靶机具有必要的任务设备控制功能,即能按航路和触发逻辑启动红外目标模拟器和各种雷达、红外干扰设备,尤其是干扰的投放控制需与导弹的发射时刻保持同步,以规范靶试科目的评判标准。

5) 对于多机协同和编队飞行,也

是靶机自主控制的基本要求,即当需要靶机编队飞行时,要考虑多机的集结和编队飞行策略与协同控制。

综上考虑,靶机自主飞行控制等级应接近5级,即靶机的飞控系统具备全部自动控制功能、自主航线控制功能、故障诊断和处理功能、控制系统重构功能、机上航线重规划功能和多机自主协同编队飞行功能。

因此,靶机的控制技术体现在全自动控制、适应靶试科目的自主航线控制、任务设备的即时控制、密集编队和协同任务控制几个方面。

## 2.1 靶机的全自动控制

靶机自动控制不仅指一般意义上的姿态稳定控制,更重要的是指在尽可能低的成本代价上能保证靶机可靠飞行的控制效能。

### 1) 增稳和姿态控制。

对于常规固定翼靶机而言,其基本控制回路是增稳回路和姿态回路,即靶机能够实现纵向和横向的姿态稳定和姿态保持,通过遥控指令可以使靶机爬升、平飞、下滑、直飞、左转和右转飞行。增稳回路在靶机上体现的是角速率陀螺构成的闭环阻尼回路,通过角速率陀螺增加靶机的固有阻尼系数,从而使二个通道的姿态闭环易于实现。靶机不过于关注转弯时的侧滑角,因而很少使用方向舵与副翼舵共同完成的协调控制方式,有的靶机采用双V型尾舵而没有设置方向舵,更是不便于构成协调转弯的控制回路。在角速率闭环回路中多采用比例控制规律,为了提升控制的稳定性在该回路很少采用积分控制。姿态回路则以比例控制为主,辅助有限幅的慢积分控制,以减小姿态控制误差和超调。虽然有很多文献对无人机的姿态控制提出多种先进控制规律,包括自适应控制或其他复杂控制,但作为靶机而言虽然也有大的飞行包线和建模的误差存在,采用线性控制规律的阻尼回路和姿态回路仍是目前靶机的主要控制方式<sup>[12-15]</sup>。

### 2) 故障诊断和系统重构。

靶机的先进性还体现在使用过程

中的高可靠性,环境复杂、指挥操纵错误及靶机自身器件故障等因素均可能导致飞行任务失败,因此靶机需要具备一定的故障诊断与重构能力以提高任务的鲁棒性。从研制和生产成本角度,并不希望靶机具有很大的任务余度,即不能按一般无人机那样采用多余度备份的方式提高其任务可靠度,但仍要从不增加明显成本的角度实现其任务可靠性。靶机安全的要求一是保证自身的安全,最坏情况也要保证靶机能安全回收,二是要保证足够高的任务可靠度,即其任务可靠度应在94%以上。为了达到94%的任务可靠度,靶机需要有一定的故障诊断和系统重构功能,其体现在:关键低成本的器件如全球定位系统(Global Position System, GPS)或北斗导航定位接收器可采用双备份构型,而对陀螺或惯导装置等则只采用单件配置,对于执行机构也是以单通道部件为主,局部采用备份回路的方式提高系统重构逻辑,如当副翼舵出现故障时可将升降舵改为差动升降舵模式来代替副翼舵功能,实现系统重构的实现。靶机的飞控计算机可以采用双机热备份方案,即当其中某一模块出现故障时,另一热备份的模块即时投入运行,保证飞行安全。当靶机出现机上不可控故障时,需对靶机进行应急处置,包括采用应急回收等措施。总之,靶机不能过度强调其高可靠性而过大地提升了研制和生产成本,靶机的故障诊断和重构逻辑应保持在一定的适用程度。

### 3) 发动机及其推力变向控制。

发动机控制是靶机中的重要内容之一,靶机配置的发动机一般也配置有发动机的电子控制单元(electronic control unit, ECU),可以直接实现对靶机发动机的控制。在现代靶机控制中,飞行推进一体化控制已成为可行的方案,并具有很好的效果。特别在推力变向控制中,将发动机的ECU单元与飞控计算机融合在一体能极大地方便飞行推进一体化控制。受靶机飞行任务的限制,发动机并不需要频繁地改变状态,只有在编队或协同任务时发动机状

态调整才变得十分必要。因此将发动机控制的策略与飞控策略组合设计和考虑是现代靶机的重要研究内容<sup>[20-23]</sup>。

实现大坡度的横向大机动飞行,靶机仅靠气动舵的功效已难实现。靶机的矢量推进和推力变向对提升靶机的横向机动性有着明显的作用。一般采用气动舵面的靶机横向机动过载在3g~4g,达到6g时高度将很难保持,为了实现大于8g的横向过载,将发动机的喷口推力线在360°范围内转动,以适应推力与靶机保持坡度和高度的需要。

#### 4) 安保控制。

靶机一般在靶场内飞行,对超出靶场的安全区域需要有严格的限定,即靶机正常飞行时不应越过安全边界,但当靶机受伤或部件失效时会出现失控和失联等现象,尤其在沿海靶场,失控的靶机有可能飞入其他国家的领空或领海。就安全飞行区域保护而言,靶机上需设置特殊的安保装置,在出现越界飞行时应及时启动,紧急回收或迫降靶机,甚至采取措施坠毁靶机。安保控制装置采用单独的GPS或北斗导航定位接收器,通过安保边界红线识别程序在靶机飞出警戒和控制区域时发出告警信号,当靶机飞出限制边界时启动坠毁程序<sup>[24]</sup>。

### 2.2 靶试航线的自主控制

靶试航线的自主控制是指靶机能按照靶试科目自动设置飞行航线并按航线要求完成直线飞行、等弯道转向飞行和沿设定的任意机动航线飞行。完成要求科目航线飞行中不仅能保持较小的航偏距,而且重要的是在任何干扰条件如大侧风条件下保证飞行航迹的准确性和飞行的安全性。靶机的航线设置一般分为3个航段,一是出航航段,即靶机从起飞点以尽可能短的距离到达靶道的进入点,随后靶机进入靶道巡航航段。在靶道巡航航段,靶机有可能是直线飞行,也有可能沿靶道的一弧段飞行,当靶机到达退出点后,靶机应转入另一侧再进入航段,或听令返航。从靶道的退出点再次到达进入点的过程拟按典型的四弯航线飞行。另外靶机还具备有任意机动航线的设置和飞

行能力,能执行复杂航线的机动飞行。当靶机完成靶试任务或测试任务后,如靶机没有被击中,靶机可进入返航的航段,到达预定回收点按指令回收。靶机的自主航线控制还包括靶机在空中出现故障后的应急回收航线,即靶机进入安全区域回收或坠毁<sup>[25-28]</sup>。

靶机的各航段和航点均可预先装订,航线和航点通常在起飞前完成装订,根据任务要求以一条航线为主,同时多装订1~3条备份航线,也可以在空中飞行时按四弯航点装订进入靶道和退出靶机的航点参数,以提高靶机空中飞行时的灵活性。

靶机具有远程遥控指令模式,可以通过地面测控站实现对靶机的瞬时指令控制,通过人工引导完成航线飞行。

### 2.3 靶机任务设备的自动控制

靶机任务设备的控制也是靶机控制中的重要组成单元,靶机的任务设备有多种形式,控制方式各异,主要包括以下设备。

1) 目标增强器:靶机的目标增强器包括红外增强器和电磁增强器。红外增强器大多采用火药燃烧来增加红外辐射的强度,使导弹能在更远的距离发现目标。采用火药燃烧的红外增强器采用点火雷管点燃,只需提供一定电压的直流电流即可。低温红外增强器则多采用小型燃气发生器排出的灼热气流增加靶机红外目标特性,这时包含了小型燃气发生器的控制:一是能将小型燃气发生器空中成功点火,二是可以控制燃气发生器的工作状态,使其喷出的火焰温度有所调整。雷达目标的增强一是采用无源的角反射体或龙伯球来增强雷达的反射波,二是采用主动的微波信号发生源主动模拟雷达的反射波,并可以通过其反射波的强弱来模拟目标的大小和距离。这种主动目标模拟器通过串行通信接口接收地面的控制指令,通过遥控讯道来改变目标的大小和距离。

2) 诱饵弹:靶机上安装多枚红外诱饵弹或铂条弹形成红外目标和雷达目标的干扰效果。靶机上使用的诱饵

弹与战斗机上的诱饵弹相同,通过电击发方式发射。对于诱饵弹的发射时机、发射枚数和发射间隔则因攻击的导弹不同而有所变化,一般要在飞行前装订。发射时机需要在导弹发射后的某一时刻才发射诱饵弹,靶机发射时刻常需要由导弹的离靶信号作为触发信号,这在科研阶段是十分重要的,因此在靶机和攻击机间构成讯道成为抗干扰靶试的基本要求。

3) 拖曳干扰:拖曳干扰是现代空战中的重要干扰形式,即被攻击的飞机投放出一个拖曳的假目标,其相对目标机保持一个安全的距离,当导弹来袭时会将拖曳的目标误认为是攻击目标而保证目标机的安全。靶机拖曳的假目标也是一个无动力的飞行器,需要保持一定的距离、姿态和高度,因此拖曳靶标本身也设置有控制单元,当拖曳靶标投放后,靠其自身控制器能保持其姿态和高度跟随飞行。拖曳靶标也能在适当时机触发红外或雷达的目标增强器,使导弹不能命中靶机。

另外靶机上还有其他类型的干扰源,能模拟形形色色的假目标,如拖影干扰源等,随着红外和雷达对抗技术的不断发展,对靶机挂载不同任务设备的要求也会不断提升,总之靶机具备一定重量和尺寸的机载装置搭载能力是必要的性能和要求。

### 2.4 密集编队和协同任务控制

靶机的密集编队和协同任务是靶机应用的发展趋势。近年来,飞行编队技术发展迅速,多机协同作战已经成为未来空战的主要作战方式之一,相应地,对空武器系统需要具备打击敌方飞行编队的能力。事实上,目前固定翼靶机编队技术尚处于试验和验证阶段,现役靶机尚不具备采用单一测控站的密集编队控制能力。靶机编队飞行时,靶机不仅要通过机载的定位装置确定本机的位置,还需通过网络通信获取其他靶机的位置信息以推算出各靶机之间的相对距离,需要自主地适应复杂的环境因素及飞行时的不确定因素,根据实际情况实时地调整航线和编队策略,这

对靶机自主控制有着较高的要求。在合作式的飞行编队中,编队中的靶机可以互相通信,可以得知编队中其他靶机的位置、速度、角速度等信息,并根据这些信息对自身飞行状态进行调整,从而保持编队队形。合作式编队的通信问题较为复杂,通信方式是多对多的,任意一架飞机的通信发生故障都将影响到编队的稳定性,且通信装置相对昂贵。靶机采用非合作式的编队方式,即编队中的靶机之间相互不进行通信,各靶机只与地面站进行通信,通过地面站对各靶机进行协同控制。

目前,靶机编队多为松散编队,远远没有达到靶机编队的实际需求。靶机编队应实现密集编队飞行,编队内各相邻靶机的水平距离小于 300 m。

按照靶机密集编队的要求,靶机自主控制中的难点和要点如下。

1) “一站多机”的通信与控制技术。

“一站多机”的通信与控制技术是多机协同飞行的关键技术之一。目前多靶机编队飞行主要靠多个飞行员远距离地面操纵,每个飞行员分别控制一架飞机。然而,这种方式对飞行员的经验技术要求很高,其设备成本和人力成本消耗很大,这限制了靶机编队飞行的实际应用。“一站多机”是指一个地面站同时监测和控制多个靶机的飞行,只需

要一个地面人员进行监控,由计算机来控制靶机,真正地实现多靶机协同编队飞行。因此,“一站多机”技术的研发是十分必要的。

2) 靶机的自主编队集结。

靶机集结是靶机编队飞行的必要条件。由于固定翼靶机无法悬停,必须保持一定的前飞速度,其集结难度远高于直升机和旋翼类飞机。目前多固定翼靶机集结的方案是使二架或二架以上的靶机从相近的初始位置,在尽量短的时间间隔内依次起飞,从而使靶机之间的距离间隔与编队飞行的距离要求相近,通过微小的速度和路径调整来形成指定的编队队形。然而这种方式只能应用于编队内靶机较少的情况,严重限制了靶机编队技术的发展。为使靶机能在更宽松的初始条件下形成编队,应研究有多固定翼靶机的自主编队集结策略,使初始距离及起飞时间不同的靶机,经过路径及速度的调整自主形成编队,并能在遇到干扰时进行机上航线重规划,保证编队靶机在集结点附近形成多靶机的到达时间一致、航向一致、高度一致和速度一致,即完成集结飞行任务。

3) 靶机的协同编队飞行。

靶机的协同编队飞行技术是靶机编队的关键。由于各种不确定因素的存在,靶机不能完全按照所设定的航线飞行,其实际位置与期望位置会有所偏

差。因此,在靶机距离较近时,可能存在碰撞危险。目前的靶机编队中,各靶机之间的距离较远,通常在 1 km 以上,属于松散编队,不能完全发挥靶机编队的优势。为此,靶机在编队飞行时,需自主地根据其飞行状态对干扰进行估计,对碰撞等威胁进行预测,进而通过编队飞行控制规律使其安全、稳定地保持编队队形。靶机编队飞行控制的重点是设计一个编队控制器,使所有靶机按照预定的队形沿航线飞行,靶机之间保持固定的相对位置。目前,无人机编队飞行的主要方法有跟随-领航法、虚拟结构法、基于行为法、人工势场法等。

### 3 结论

本文系统地回顾了无人靶机的发展历史,总结了靶机控制技术的现状与发展目标,并对无人靶机及其自主控制技术的未来发展需求进行了展望。随着四代战机的逐步列装,能够模拟四代战机飞行特征的靶机是其发展的重要方向。新一代靶机除具备超音速机动性、隐身性以及强机动性等飞行特性外,还需要能够满足电子、光电武器以及战术对抗训练的要求,这对靶机飞行控制系统提出了更高的智能化要求。研究靶机的发展模式和控制策略,研发四代靶机对中国面空武器系统的发展具有巨大的支撑作用。

### 参考文献(References)

- [1] 滕涛, 郭英, 刘帅, 等. 国外装备试验用动力空靶的应用现状及发展趋势研究[J]. 飞航导弹, 2016(7): 67-73.  
Teng Tao, Guo Ying, Liu Shuai, et al. Application status and development trend of power vacuum targets in foreign equipment testing[J]. Falair, 2016(7): 67-73.
- [2] 颜芳芳, 袁关章, 邓克绪. 靶标技术的现状与关键技术及发展趋势[C]//第九届长三角科技论坛——航空航天科技创新与长三角经济转型发展分论坛论文集. 南京: 江苏省航空航天学会, 2012.  
Yan Fangfang, Yuan Guanzhang, Deng Kexu. Study on the present situation and key technology and development trend of target technology[C]//The 9th Yangtze River Delta Science and Technology Forum- Proceedings of Aerospace Science and Technology Innovation and Yangtze River Delta Economic Transition. Nanjing: Jiangsu Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012: 10.
- [3] 符松海, 何明清, 吴宝林, 等. 靶机系统发展趋势研究[C]//2014(第五届)中国无人机大会论文集. 北京: 航空工业出版社, 2014: 28-30.  
Fu Songhai, He Mingqing, Wu Baolin, Zhang Suzhong. The development trend of the target system[C]//Proceedings of the 5th China UAV Conference. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 28-30.
- [4] 李裕栋. 靶机与威胁模拟应用研究[J]. 现代防御技术, 2010, 38(6): 32-35.  
Li Yudong. Application of target and threat simulation[J]. Modern Defense Technology, 2010, 38(6): 32-35.

- [5] Amin B G, Reza C J, Bijan Z. RCS computation of a relatively small complex structure by asymptotic analysis[C]//2013 International Symposium on Electromagnetic Theory. Hiroshima: International Union of Radio Science, 2013: 1066-1069.
- [6] Vaclav V P. The analysis of small RCS target detection in primary radar system[C]//2016 International Symposium ELMAR. Zadar: IEEE, 2016: 141-145.
- [7] Samira R, Arvan M R. Comparison of extended and unscented Kalman smoother in deriving kinematic characteristics of a high maneuver flying target[C]// Proceedings of 2011 International Conference on Modeling. Shanghai: Identification and Control, 2011: 537-542.
- [8] Zohreh B, Hamid K. An innovative fuzzy covariance presetting for high maneuvering target tracking problems[C]//2009 Chinese Control and Decision Conference. Piscatawa: IEEE Press, 2009: 5623-5628.
- [9] Kohei O, Ishii M, Eri T, Masatoshi Ishikawa Gaze matching capturing for a high-speed flying object[C]//The SICE Annual Conference 2013. Nagoya: The Society of Instrument and Control Engineers, 2013: 649-654.
- [10] GÜndÜz, D. Eren, Ünver, Alper, Orhan, Fatos Esen, et al. Aerodynamic heating effects on a flying object at high speeds[C]//International Conference on Recent Advances in Space Technologies. New York: IEEE, 2005: 277-281.
- [11] Sa I, Corke P. Close-quarters Quadrotor flying for a pole inspection with position based visual servoing and high-speed vision[C]// International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Orlando: IEEE, 2014: 623-631.
- [12] Xiao J, Zhang W, Han Y J, et al. Influencing factor and corresponding method of target drone dynamic stability[C]//2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Hohhot: IEEE, 2011: 4998-5001.
- [13] Thanakorn S, Chin E L. Altitude stabilization in unmanned vertical take-off/landing aircraft[C]//Industrial Electronics Society, IECON 2014 -, Conference of the IEEE. Dallas: IEEE, 2014: 71-76.
- [14] Mohammad A A, Sean S, Nhan N. Fuzzy model-based pitch stabilization and wing vibration suppression of flexible aircraft[C]// 2014 American Control Conference. Portland: ACC, 2014: 3083-3088.
- [15] Gianpietro D R, Eugenio D. Sensor fusion approach for aircraft state estimation using inertial and air-data systems[C]//2016 IEEE Metrology for Aerospace. Florence: IEEE, 2016: 624-629.
- [16] Yao Q, Wang J, Zhang G. A fault diagnosis expert system based on aircraft parameters[C]//2015 12th Web Information System and Application Conference (WISA). Beijing: China Computer Federation, 2015: 314-317.
- [17] Yu X P, Li Q, Hu X. Aircraft fault diagnosis system research based on the combination of CBR and FTA[C]. 2015 First International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE). New York: IEEE, 2015. Doi: 10.1109/ICRSE.2015.7366506.
- [18] Deng W, Wen B, Zhou J, et al. The study of aircraft fault diagnosis method based on the integration of case and rule reasoning[C]// Prognostics and System Health Management Conference. New York: IEEE, 2014: 271-274.
- [19] Lungu M, Lungu R, Preotu O. Estimation of aircraft state during landing by means of multiple observers[C]//International Conference on Systems, Signals and Image Processing. New York: IEEE, 2016: 1-4.
- [20] Albin T, Frank F, Ritter D, et al. Nonlinear MPC for Combustion Engine Control: A parameter study for realizing real-time feasibility[C]// IEEE Conference on Control Applications. Buenos Aires: IEEE, 2016: 311-316.
- [21] Shi Y, Zhao J. A safety protection control strategy for aero-engines[C]//The 35th Chinese Control Conference. Chengdu: Technical Committee on Control Theory, Chinese Association of Automation, 2016: 2454-2458.
- [22] Li Y, Lu H, Tian S, et al. Posture control of electromechanical-actuator-based thrust vector system for aircraft engine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(9): 3561-3571.
- [23] Long H, Song S. Design of nonlinear optimal control system for aircraft with thrust vector[C]//International Conference on Mechatronics and Automation. New York: IEEE, 2009: 508-512.
- [24] Hu Y, Zhang X. A new method of distance measuring based on frame synchronization code for airborne target drone[C]//2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Montreal: IEEE, 2006: 2710-2713.
- [25] Zhu K, Bo Y, Tao D, et al. Route design of the target drone[C]//2013 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation. Nanjing: Control and Intelligent Systems, 2013: 175-178.
- [26] German D G, Ricardo A V V, Juan S B. UAV route planning optimization using PSO implemented on micro-controllers[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(4): 1705-1710.
- [27] Chi K, James W. Aircraft route re-planning for a pop-up obstacle using a direct method[C]//UKACC International Conference on Control 2010. Coventry: IET, 2010: 1-6.
- [28] Luo J, Xie S, Gong Z, et al. Subminiature unmanned surveillance aircraft and its ground control station for security[C]//Safety, Security and Rescue Robotics, Workshop, 2005 IEEE International. Workshop: IEEE, 2005:116-119.

## An overview of the development of target drones and associated autonomous control

WANG Daobo<sup>1</sup>, REN Jingguang<sup>2</sup>, JIANG Wanyue<sup>1</sup>, WANG Yin<sup>1</sup>

1. School of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. China Air-Air Missile Research Institute, Luoyang 471000, China

**Abstract** Target drones are a type of military unmanned aerial vehicles (UAVs) used for simulating target characteristics in the air, which play an important role in both developing and testing of anti-air weapons, as well as training of anti-aircraft crews. After nearly half a century of development, China has developed a large array of aerial targets from low-altitude, low-speed to high-altitude, high-speed types, and achieved a great deal of success in the field of flight control technologies. This paper carries out a systemic study about the development of target drones and associated flight control technologies. Particularly, the main features for different types of target drones are discussed, and the development trend of new generation of flight control techniques are introduced in detail. The paper provides a reference for understanding drone technology at home and abroad of the status quo and development trends.

**Keywords** target drone; unmanned aerial vehicles; flight control; cooperative control

(责任编辑 刘志远)