

文章编号:1674-8190(2018)04-451-07

未来新一代轰炸机隐身特性需求分析

徐顶国,艾俊强,雷武涛,王立波

(航空工业第一飞机设计研究院 总体气动设计研究所,西安 710089)

摘要: 远程战略轰炸机的自身隐身性能提升和隐身航迹策略规划越来越受到重视。通过对比分析美俄下一代隐身轰炸机的隐身性能和所面对的威胁,指出了未来新一代隐身轰炸机更高的隐身性能需求——全频谱、全方位隐身技术,例如雷达隐身、红外隐身以及射频综合隐身等;并归纳了未来高隐身战略轰炸机的主要突防措施,例如更先进的隐身技术、体系支持、高空突防、加装自卫武器等措施。

关键词: 新一代隐身轰炸机;隐身性能;航迹策略;全频谱隐身;突防措施

中图分类号: V218

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.04.001

Analysis on Stealth Requirement of Next-generation Bomber in the Future

Xu Dingguo, Ai Junqiang, Lei Wutao, Wang Libo

(The General Configuration and Aerodynamics Design and Research Department,
AVIC the First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: The long-range strategic bomber's stealth performance and plan track strategic call more and more attention. By comparing the stealth performance of next generation stealth bombers developed by the United States and Russia and their faced threats, higher performance requirements of the new generation of stealth bombers have been proposed—full spectrum, all directional stealth technology, such as radar stealth, infrared stealth and radio frequency stealth. High stealth strategic bomber penetration measures are also summarize, including more advanced stealth technology, system support, the high altitude penetration, equipped with self-defense weapons.

Key words: the next-generation stealth bomber; stealth performance; track strategic; full-spectrum stealth; penetration measures

0 引言

近年来,随着探测技术和制导武器的迅猛发展,对作战飞机的战场威胁越来越严重。为了提升作战飞机的生存力,各军事强国投入了大量的人力、物力和财力进行研究。随着国内外政治、经济环境的变化,使得作战飞机尤其是轰炸机的发展思路已经发生了重大变化,远程战略轰炸机作为国家重要的空基战略威慑和远程打击工具之一,其自身隐身性能提升和隐身航迹策略规划越来越受到重

视^[1-2]。国内,秦五诗^[3]总结了美国下一代轰炸机发展动向;陈黎^[4]总结了美国空军下一代轰炸机主要突防措施分析;麻连凤等^[5]提出了新一代战机隐身需求分析;和国强等^[6]分析了下一代轰炸机发展动向及性能特征。由于隐身技术涉及军事机密,国外相关资料很少报道。

本文通过对比分析美俄下一代隐身轰炸机的隐身性能以及所面对的威胁,指出未来新一代隐身轰炸机更高的隐身特性需求,并归纳出未来高隐身战略轰炸机的主要突防措施和方式。

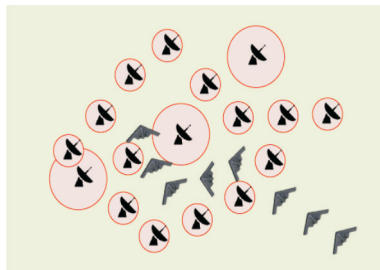
1 美俄未来轰炸机的隐身特点及发展趋势

目前,美国军方正在探讨以系统家族(family

of systems)的全新概念发展下一代远程打击系统(Next Generation Long Range Strike, 简称 NGLRS)。按照这种构想,继 B-2A 隐身轰炸机之后的新一代远程打击系统将不再是某种单一型号的轰炸机,而是一个包括下一代轰炸机(Next-Generation Bomber, 简称 NGB, 目前美国军方和媒体有时也将其称为远程打击飞机)、远程弹道导弹和巡航导弹等成员在内的系统家族。家族内各成员之间在任务执行能力上互补,而轰炸机将在其中发挥主力和核心的作用^[7-10]。远程战略轰炸机作为重要的空基战略威慑和远程打击工具,其除了具备大航程、大载荷、网络化协同、独立作战、武器配置灵活等基本特征外,还应具备很强隐身能力,才能在战时突防到敌方的严密防控体系纵深区域,摧毁敌方战略目标。轰炸机采用非隐身与隐身后的突防区别如图 1 所示^[11]。



(a) 非隐身飞机突防



(b) 隐身飞机突防

图 1 非隐身与隐身飞机的突防区别

Fig. 1 Penetration difference between non-stealth and stealth aircraft

美国下一代战略轰炸机“袭击者”(B-21)和俄罗斯下一代战略轰炸机“远程航空兵的未来飞机”(PAK DA)两型轰炸机在生存力方面,都强调高隐身能力^[12-14]。美国下一代 B-21 轰炸机示意图如图 2 所示^[14],俄罗斯下一代轰炸机 PAK DA 示意图图 3 所示^[14]。



图 2 美国 B-21 轰炸机示意图

Fig. 2 Schematic diagram of American B-21 bomber

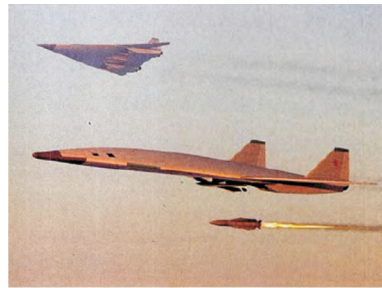


图 3 俄罗斯轰炸机 PAK DA 示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Russian PAK DA bomber

相对于以隐身性能绝佳而被称为“幽灵”的 B-2 战略轰炸机,其美国新一代战略轰炸机 B-21 整机隐身效果进一步加强。B-21 可能采用全频段、全向隐身技术,能够在很大程度上避免被米波雷达发现,而后者正是现有反隐身雷达的主要类型。由于新一代抗气流冲蚀、防雨水高速冲击的长寿命隐身材料和密封材料投入应用,其维护性和部署灵活性也将更好。该机还将配装一体化电子侦察与对抗系统,并与隐身侦察无人机和空中电子攻击装备等组成远程打击“系统簇”,能尽可能“静默”并在强对抗环境中突破先进防空系统。该机很可能还未配装拦截来袭导弹的自卫激光武器,预留了空间、重量和功率,以进一步提高生存力。

俄罗斯虽未按照“系统簇”的思想设计 PAK DA,但该机将是俄罗斯首款隐身轰炸机,能够避免被米波雷达和厘米波雷达发现。将配装基于 PAK FA 的航电系统和隐身材料,包括等离子体技术,其中很可能包括 PAK FA 的“喜马拉雅”综合电子战系统的改型。俄媒还曾披露,该机将可携带超视距空导弹以进一步提高生存力^[15-17]。

除了轰炸机自身隐身外,美俄等国家还在大力发展低频雷达反隐身技术。目前,美俄在低频的雷达已占反隐身远程预警雷达总量的 37% 以上,例如俄罗斯的“P-18M”三坐标雷达等和美国的 FPS-

115 雷达等,如图 4~图 5 所示^[18-20]。

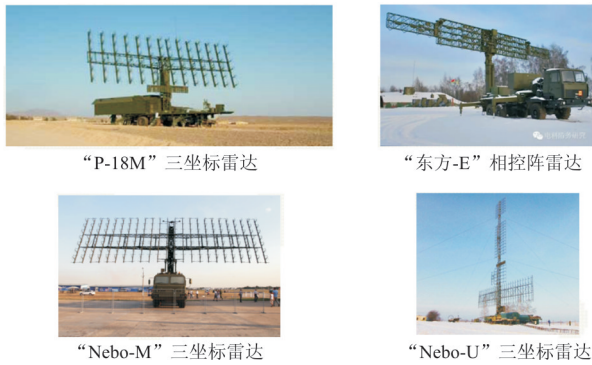


图 4 俄罗斯低频预警雷达

Fig. 4 Russian low frequency radar



图 5 美国典型低频预警雷达

Fig. 5 American low frequency radar

此外,采用低频雷达定位精度大幅增强,通过信息网络化体系作战,低频雷达系统正在具备引导防空导弹进行远程打击能力。

2 未来隐身轰炸机的隐身需求分析

美俄新一代轰炸机对高隐身性能的需求非常明确,从隐身布局、隐身材料、隐身关键技术等方面进行了大量的人力、物力和财力研究。根据资料显示,新一代轰炸机应该在 2030 年左右形成初始作战能力,具备独立执行敌方纵深轰炸能力,必须能够对抗装备下一代先进电子攻击设备、先进战斗机、先进地面预警防控系统、综合支援系统、定向武器和网络电磁攻击设备的敌军。因此,国外下一代轰炸机除了具备雷达隐身、红外隐身、射频隐身等隐身能力需求外,还具备隐身突防能力。

2.1 雷达隐身

在现代战争中,低空突防到敌纵深进行轰炸仍

然是轰炸机的作战模式,在这种模式下轰炸机的隐身的重点仍将是雷达隐身。随着雷达隐身技术的发展,反隐身技术也在飞速的发展。通过采用有源相控阵等技术,使得雷达的目标探测性能、目标容量、可靠性都大为提高。

此外,目前国外正大力发展空中平台监视系统,包括空中预警机系统、系留气球载雷达系统、飞艇载雷达监视系统等。该系统与地面警戒雷达及战斗机载雷达组成了多频段、多层次的雷达覆盖网,如图 6 所示^[21]。

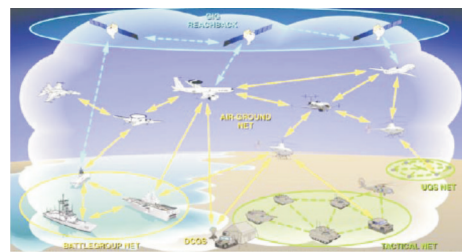


图 6 雷达组网
Fig. 6 Radar networking

通过在大角度范围内的多部雷达,从隐身飞机的下面、背面和侧面多点观察,所有截获的信号由数据中心进行数据融合和相关处理,从而准确发现和识别目标。这对隐身飞机的雷达隐身能力也提出了新的要求。

为了适应未来的战场环境,新一代轰炸机具备全频谱、全方位的隐身技术,必须进一步降低平台在 P、X 等重点频段的 RCS,从而增大被地面预警雷达和空中火控雷达截获和锁定的距离,且应该具备更强的隐身能力,例如电磁对消技术、等离子体隐身技术、智能蒙皮、超材料应用。

2.2 红外隐身

近年来,红外探测器及探测系统发展突飞猛进,机载红外搜索与跟踪(Infrared Search and Track,简称IRST)系统对飞机的探测距离已达到 200 km,与机载雷达的作用距离相当,对飞机构成了日益严重的威胁。目前,国外的大部分先进战斗机均已装备IRST系统,如图 7 所示^[22],红外探测器的定位研究也已经取得突破性进展,使得红外探测器具备了定位能力。

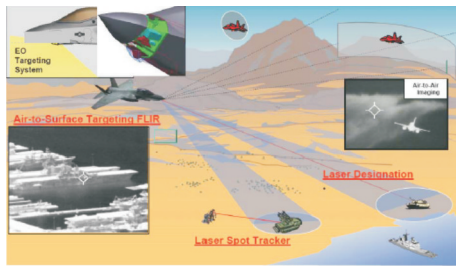


图7 机载红外搜索与跟踪系统

Fig. 7 Infrared search and track system

第四代多波段制导导弹采用先进的控制系统和气动外形,其制导方式同时采用红外制导和雷达制导,探测器采用焦平面阵列多元成像技术(如图8所示^[23]),通过红外诱饵弹与加速机动已不能有效对抗第四代制导导弹。因此,飞机对红外隐身的需求越来越迫切,红外隐身作用越来越重要。



图8 红外焦平面阵列导引头成像

Fig. 8 Seeker imaging of infrared focal plane array

远距离的红外探测飞行器和红外制导导弹已经对轰炸机构成实质上的威胁。因此,随着红外探测技术的进一步提高,下一代轰炸机应在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段,全方位进行红外隐身抑制技术研究。例如,主动冷却技术、红外低发射率材料技术以及末端主动隐身防御系统^[24],主动隐身技术——气溶胶技术如图9所示。



图9 气溶胶技术示意图

Fig. 9 Schematic diagram of aerosol technology

2.3 射频隐身

除了具有优异的雷达隐身和红外隐身性能外,

轰炸机还应该具备全面实施全机射频综合控制与管理技术的能力,确保隐身状态的无线电静默以及低截获概率的射频发射,否则可能反而在更远的距离上被对方电子对抗(ESM)系统探测定位,如图10所示^[25]。其有源相控阵雷达全面采用辐射功率、辐射方向图、辐射时序等控制与管理,确保雷达开机时的低截获概率(Low Probability of Intercept,简称LPI)。

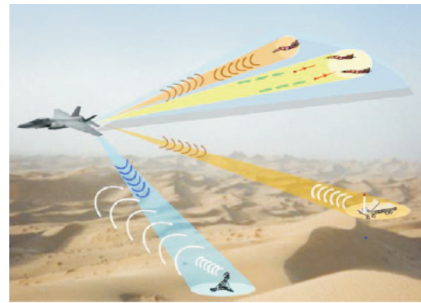


图10 无源探测系统定位以及追踪

Fig. 10 Location and trace of passive detection system

美国在F-117研制过程中,就全面验证过射频隐身技术,美国1980年美国射频隐身飞行验证的结果如表1所示,可以看出:在采用射频隐身手段后,雷达天线被接收机截获的距离大幅缩减,RHAW、ELTNT和ARM对雷达探测距离分别下降了97.55%、99.12%和99.13%。

表1 机载雷达射频隐身后被探测距离比较

Table 1 Comparison of the detection distance between the airborne radar RF with stealth and without stealth

机载雷达	无源探测系统对雷达探测距离/km		
	RHAW	ELTNT	ARM
未隐身机载雷达	346.50	2 188.40	55.00
隐身机载雷达	8.50	19.30	0.48

3 未来隐身轰炸机隐身突防措施分析

目前,美国空军下一代轰炸机的研讨论证仍在进行中,新机的主要性能指标是有人、还是无人驾驶,飞行速度是超声速还是亚声速,航程和载弹量大小等均需确定,但是基于上述对未来战场威胁的分析,美国军方和工业界已开始探讨采取多种措施来提高下一代轰炸机在未来战场上的突防和生存能力,并且要进行隐身突防策略。

3.1 更先进隐身技术

在近年来的多次局部战争中,美国空军 F-117A 隐身战斗轰炸机和 B-2A 隐身轰炸机所表现出的作战效能、尤其是高生存力充分证明了作战飞机采用隐身技术的巨大价值,因此,下一代轰炸机仍会将隐身作为提高自身防护的首要手段。为了应对近年来反隐身技术的快速发展,下一代轰炸机将综合采用多种手段来全面提高自身的隐身性能,包括通过外形设计(先进的翼身融合体和飞翼布局)、吸波材料(先进的轻量化、宽频带、结构/隐身一体化材料)和有源对消等技术来获得全向(前、后和侧向)和宽频(可对付低频雷达)的雷达隐身性能;通过非常规喷管外形、燃料添加剂和隔热/屏蔽等技术来降低红外特征;通过采用智能蒙皮、凝结尾迹消除等技术来降低目视特征。

3.2 体系支持

根据美国军方的设想,今后包括下一代轰炸机在内的远程打击系统家族的全部成员都将接入美军全球信息栅格(Global Information Grid,简称 GIG)并连入全球指挥控制系统(Global Command and Control System,简称 GCCS)中,从而与美军作战体系中的其他装备无缝结合在一起,在为整个体系提供信息的同时也从中获得支持。战时,美军将综合运用其作战体系中的各个成员,根据战场态势和任务要求,相互配合,协同作战,在追求任务效能和效率最大化的同时,也将任务风险降到最低^[26-30]。在此背景下,美军在重视通过各种技术措施来提高下一代轰炸机的单机突防/生存能力的同时,更强调在战时通过体系支持、协同作战的手段来达到同样目的。

战时,下一代轰炸机将会在美军信息网络支持下,与陆、海、空、天中的各种节点进行信息交换,借助体系的支持来协助自身完成任务。例如,下一代轰炸机在突防过程中可实时接收敌方防空导弹、截击机的动向等相关威胁信息,通过任务规划选择更加安全的飞行路线;或者实时召唤己方 F-22 / 35 战斗机、弹道/巡航导弹、电子战飞机压制敌方防空系统,协助自身突防。

两架 F-22 进行伴飞 B-2 轰炸机如图 11 所示^[26]。



图 11 两架 F-22 进行伴飞 B-2 轰炸机
Fig. 11 B-2 bomber flying accompanied by two F-22 aircrafts

3.3 高空突防

自 20 世纪 60 年代以来,作战飞机采用低空、超低空突防以尽量降低敌方雷达发现概率的战术,广为世界各国军方所推崇。但是随着空中预警机、脉冲多普勒雷达等技术装备的广泛使用,这种战术的价值已经大幅降低。由于目前美国军用飞机隐身技术世界领先,再结合其先进的电子战手段,已经可以确保高空飞机被敌方雷达发现的概率大幅降低,也没必要再为此而采取低空、超低空突防战术。不仅如此,根据近年来多次局部战争的经验教训,作战飞机在战时低空、超低空飞行,通常会面临敌方由各种中/低空防空导弹、便携式防空导弹、中小口径高炮、高射机枪甚至步兵轻武器所组成的密集防空火力,这将对自身安全构成极大威胁,对于目标信号特征明显、机动性差、备弹面积大的轰炸机来说更是如此。

从美国和北约国家军队在近期几次局部战争中损失飞机情况可以看出,多数是被各种低空防空火力所击落,尤其是操作简单、隐蔽性好、让人防不胜防的便携式防空导弹更令美国军方头疼。若提升作战飞机的飞行高度,则可大幅降低这类威胁。根据目前美国军方和工业界拟议中的一种技术方案,下一代轰炸机有望将飞行高度提高到 18 288 m,这将超过多数现役战斗机,鉴于此高度以上的天空背景接近黑色,而且不易形成凝结尾迹,无疑将会大幅降低飞机被敌方飞行员目视发现的机率。

3.4 加装自卫武器

为了给下一代轰炸机提供一种更加积极主动的生存力增强手段,目前美国军方正在考虑为其配备空空导弹和激光定向能武器作为自卫火力。然

而,为了保证不破坏全机的隐身性能,下一代轰炸机携带的空空导弹将很可能由内埋弹舱携带,战时发射制导空空导弹所需的信息也尽可能通过被动手段获取或由友邻平台提供,自身则保持电磁静默。

从长远计划看,美国军方也在考虑为下一代轰炸机配备机载激光武器,战时不仅可以将其作为近距自卫火力,还可用来对付来袭导弹,实施火力拦截,从而极大地提高飞机的生存力。

4 结束语

随着科技的发展和战场环境的变化,未来作战飞机无不体现当今隐身技术的最高水平。新一代轰炸机的隐身能力需求远远高于现役战机水平,为了实现综合隐身能力,需要引入新的隐身技术思路。可以归纳总结成以下两点:

(1) 除了传统的被动雷达技术以外,还应考虑主动隐身技术、智能蒙皮、超材料应用的雷达隐身技术,并且兼顾高低频隐身;采用基于主动降温、智能蒙皮、低发射率材料应用的红外/可见光等隐身技术;采用基于低截获概率(LPI)系统以及功率管理等射频综合隐身技术。

(2) 根据未来作战环境,结合新型隐身技术思路,实现隐身轰炸机的突防策略和需求发展的未来作战投防模式。

参考文献

- [1] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 112-180.
Sang Jianhua. Low-observable technologies of aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 112-180. (in Chinese)
- [2] 桑建华, 周海, 陈颖闻. 隐身技术推动新一代飞行器发展[J]. 航空科学技术, 2012(3): 15-18.
Sang Jianhua, Zhou Hai, Chen Yingwen. Development of new generation air vehicles driven by stealth technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(3): 15-18. (in Chinese)
- [3] 秦五诗. 美国下一代轰炸机发展动向[J]. 飞机设计参考资料, 2007(4): 29-32.
Qin Wushi. The development trend of the next generation of american bombers[J]. Aircraft Design Reference Materials, 2007(4): 29-32. (in Chinese)
- [4] 陈黎. 美国空军下一代轰炸机主要突防措施分析[J]. 武器系统, 2011(9): 80-83.
Chen Li. Analysis of major penetration measures for the next generation of air force boomers[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2011(9): 80-83. (in Chinese)
- [5] 麻连凤, 陈颖闻, 王烁, 等. 新一代战机隐身需求分析[J]. 隐身技术, 2012(2): 32-36.
Ma Lianfeng, Chen Yingwen, Wang Shuo, et al. Analysis of stealth demand for a new generation of aircraft [J]. Stealth Technology, 2012(2): 32-36. (in Chinese)
- [6] 和国强, 陈黎. 下一代轰炸机发展动向及性能特征分析[J]. 航空科学技术, 2013(4): 9-12.
He Guoqiang, Chen Li. Developments and performance analysis for next-generation bomber[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(4): 9-12. (in Chinese)
- [7] Christopher R Beskar. Cold plasma cavity active stealth technology[EB/OL]. [2018-02-11]. <http://www.doc88.com/p-0354526677033.html>.
- [8] 石怀林, 武卫兵, 张立涂, 等. 美军第六代战斗机典型技术特征[J]. 国防科技, 2010(6): 10-14.
Shi Huailin, Wu Weibin, Zhang Litu, et al. The sixth generation of American fighter aircraft[J]. National Defense Science and Technology, 2010(6): 10-14. (in Chinese)
- [9] 管元璋. 美空军设想的第六代战斗机[J]. 空军装备研究, 2010(8): 61-62.
Guan Yuanzhang. The sixth generation of fighter aircraft envisaged by the air force[J]. Air Force Equipment Research, 2010(8): 61-62. (in Chinese)
- [10] 赵群力. 美国新一代战斗机方案初探[J]. 国际航空/专家论坛, 2012(5): 20-23.
Zhao Qunli. A new generation of American fighter planes [J]. The International Air/Aeronautical Science & Technology, 2012(5): 20-23. (in Chinese)
- [11] Canada's next generation fighter capability [EB/OL]. [2018-02-11] www.forces.gc.ca.
- [12] David Lynch Jr. 射频隐身导论[M]. 沈玉芳, 等. 译. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 155-289.
David Lynch Jr. Radio frequency stealth introduction[M]. Translated by Shen Yufang, et al. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2009: 155-289. (in Chinese)
- [13] 桑建华, 陈益邻. 发展中的飞行器射频隐身技术[J]. 航空制造技术, 2011(2): 48-50.
Sang Jianhua, Chen Yilin. Air vehicle RF stealth technology in evolution[J]. Aeronautical Science & Technology, 2011(2): 48-50. (in Chinese)
- [14] 徐顶国, 桑建华, 罗明东. 红外隐身技术在无人机上的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3154-3159.
Xu Dingguo, Sang Jianhua, Luo Mingdong. Research on application of UAVS' infrared stealth technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3154-3159. (in Chinese)
- [15] 桑建华, 张宗斌. 红外隐身技术发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 14-19.

- Sang Jianhua, Zhang Zongbin. Development trends of infrared stealth technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 14-19. (in Chinese)
- [16] 姜曙光. 美国新一代轰炸机发展路线图[J]. 国际航空, 2008(9): 38-41.
- Jiang Shuguang. Development roadmap for next-generation bomber in U. S. [J]. International Aviation, 2008(9): 38-41. (in Chinese)
- [17] 张丽, 张力. 美国战略轰炸机发展计划[J]. 现代军事, 2000(3): 44-45.
- Zhang Li, Zhang Li. U. S. strategic bomber development program[J]. Modern Military, 2000(3): 44-45.
- [18] 张庆, 周振国. 盘点美国战略轰炸机[J]. 国防科技, 2002(6): 43-45.
- Zhang Qing, Zhou Zhenguo. U. S. strategic bomber inventory[J]. National Defense Science and Technology, 2002(6): 43-45. (in Chinese)
- [19] 朱宝璠. 21世纪需要什么样的战略轰炸机? [J]. 国际航空, 2002(10): 43-45.
- Zhu Baoli. Strategic bombers in the 21st century? [J]. International Aviation, 2002(10): 43-45. (in Chinese)
- [20] 孙文德. 美国下一代轰炸机揭秘[J]. 中国青年科技, 2000(2): 86-88.
- Sun Wende. The next generation of us bombers[J]. Science and China Youth Technology, 2000(2): 86-88. (in Chinese)
- [21] 高广东, 李瞰, 魏立英. 俄罗斯的“空中利剑”——战略轰炸机[J]. 当代世界, 2006(6): 44-46.
- Gao Guangdong, Li Kan, Wei Liying. Russian air swords—strategic bombers[J]. The Contemporary World, 2006(6): 44-46. (in Chinese)
- [22] 凌云. “美利坚”轰炸机项目(下) Ho-XVIII 飞翼轰炸机与“银鸟”空天轰炸机[J]. 国际展望, 2006(8): 64-69.
- Ling Yun. American bomber project(below) Ho-XVIII flying wing bomber and “Silver Bird” air bomber[J]. World Outlook, 2006(8): 64-69. (in Chinese)
- [23] 徐德康. 核打击能力和隐身性美国下一代轰炸机的两个优先权[J]. 国际航空, 2008(1): 26-27.
- Xu Dekang. USAF's new bomber :to carry nukes and feature stealth[J]. International Aviation, 2008(1): 26-27. (in Chinese)
- [24] 岳江锋. “远程防区外”核巡航导弹: 美战略轰炸机未来的“精锐武器”[J]. 生命与灾害, 2013(6): 32-35.
- Yue Jiangfeng. “Remote out-of-zone” nuclear cruise missile: the future “fine weapon” of the US strategic bomber [J]. Life & Disaster, 2013(6): 32-35. (in Chinese)
- [25] 傅攀峰, 周经伦, 罗鹏程, 等. 一种轰炸机压制防空导弹的解析模型[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(1): 66-69.
- Fu Panfeng, Zhou Jinglun, Luo Pengcheng, et al. An analytical model for bomber suppressing SAM[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(1): 66-69. (in Chinese)
- [26] 周小华. 隐身飞机的使用及对防空作战的影响[J]. 国防科技, 2002(1): 60-61.
- Zhou Xiaohua. The use of stealth aircraft and its impact on air defense operations [J]. National Defense Science & Technology, 2002(1): 60-61. (in Chinese)
- [27] 王狂飙. 隐身飞机的战术技术特点分析与防御对策[J]. 火力与指挥控制, 2003, 28(6): 1-4.
- Wang Kuangbiao. The technical & tactical analysis of stealth aircraft and the countermeasure of its defense[J]. Fire Control & Command Control, 2003, 28(6): 1-4. (in Chinese)
- [28] 魏岳江. 美军未来的轰炸机[J]. 百科知识, 2004(6): 63-64.
- Wei Yuejiang. U. S. army future bombers[J]. Encyclopedia of Knowledge, 2004(6): 63-64. (in Chinese)
- [29] 彦铭. 折刀翼幽灵揭秘美国黑计划中的“掠食鸟”轰炸机[J]. 国际展望, 2007(4): 44-45.
- Yan Ming. Future bombers of US[J]. World Outlook, 2007(4): 44-45. (in Chinese)
- [30] 许云峰, 郭圣洪. 美俄下一代战略轰炸机技术方案分析[J]. 航空科学技术, 2015(4): 1-6.
- Xu Yunfeng, Guo Shenghong. The technical conceptions of next generation strategic bombers of united states and russia [J]. Aeronautical Science & Technology, 2015(4): 1-6. (in Chinese)

作者简介:

徐顶国(1985—),男,博士,工程师。主要研究方向:飞行器总体设计和隐身技术。

艾俊强(1964—),男,博士,研究员。主要研究方向:飞行器总体设计和隐身技术。

雷武涛(1975—),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞行器总体设计和隐身技术。

王立波(1985—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞行器总体设计和隐身技术。

(编辑:赵毓梅)