

文章编号: 2095-4980(2020)05-0761-05

## 140 GHz 回旋振荡管 Denisov 辐射器设计

李志良, 刘本田, 冯进军

(中国电子科技集团公司 第十二研究所, 北京 100015)

**摘要:** 根据几何光学和耦合波理论研究高功率回旋振荡管高阶模式在微扰圆波导中的准光传输特性, 并编制出带有微扰结构辐射器准光模式变换系统的仿真程序, 给出 140 GHz 回旋振荡管 Denisov 辐射器的设计方法及结果, 分析其内部激励起的各模式的功率分布曲线和波导壁上的电流密度分布, 得到扰动长度为 60 mm, 总长度为 136.5 mm 的 Denisov 辐射器结构, 输出功率转换效率为 99.1%, 可满足 140 GHz 整管参数设计要求。并利用 Feko 软件对数值计算结果的可行性进行了有效验证, 从而为热核聚变用回旋振荡管的研制打下技术基础。

**关键词:** 140 GHz 回旋振荡管; 准光模式变换器; 高斯模式

中图分类号: TN129

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019255

## Design of a Denisov launcher of 140 GHz gyrotron

LI Zhiliang, LIU Bentian, FENG Jinjun

(The 12th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The quasi-optical transmission characteristics of high-order mode of high-power gyrotron oscillator are analyzed based on geometrical optics and coupled-wave theory, and the simulation code of quasi-optical mode converter with perturbation waveguide is compiled. The design method and results of Denisov launcher in 140 GHz gyrotron oscillator are given. The power distribution curves of each mode and the current density distribution on the waveguide wall are analyzed. The launcher structure with disturbance length of 60 mm, total length of 136.5 mm and conversion efficiency of 99.1% are obtained. And the results fulfill the requirement of 140 GHz gyrotron. The software of Feko is adopted to analyze the reliability of the results from numerical calculation, which lays technical foundation for the gyrotron in the application of thermonuclear fusion.

**Keywords:** 140 GHz gyrotron oscillator; quasi-optical mode converters; Gaussian mode

高功率回旋振荡管在受控热核聚变中等离子体加热等方面具有广泛应用。当前世界上主要热核聚变装置均采用该器件作为射频加热源, 且为了获得更好的加热效果, 多采用 100 GHz 以上的兆瓦级回旋振荡管, 如中国的 EAST、德国的 W7-X 仿星器和国际热核实验反应堆等<sup>[1]</sup>。此类回旋振荡管工作在高阶模式, 但该模式在自由空间的传输过程中存在严重的绕射和极化损耗, 因此需要将其转换为适合在自由空间传输的高斯波束。准光模式变换器可以把高阶模式高效地转换为横向输出的高斯模式, 同时有助于采用降压收集极来进一步提高整管效率。作为兆瓦级回旋振荡管的一个关键组成部分, 准光模式变换器的横向转换效率对整管的输出功率和输出波束质量影响很大, 因此对它的研究非常重要。本文根据一个 140 GHz TE<sub>22,6</sub> 模式回旋振荡管工作参数<sup>[2]</sup>, 设计出一个内置 Denisov 辐射器结构, 以满足整管设计和工程应用需求。

### 1 Denisov 辐射器设计方法

根据耦合波理论, 波导中径向尺寸的变化会使波导中各传播模式间产生能量耦合, 实现模式变换。故可利用微扰结构将工作的高阶模式变换为辐射器输出波导内表面上呈高斯分布状态的混合模式, 并选择合适的切口路

收稿日期: 2019-07-20; 修回日期: 2019-11-28

基金项目: 中国国家磁约束核聚变能源专项基金项目资助(2017YFE0300203)

作者简介: 李志良(1979-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件。email:lizhiliang100@163.com

径, 以有效降低辐射器切口边缘场强, 减少绕射损失, 最终实现提高输出波束的高斯含量。目前的 Denisov 辐射器, 其波导内表面方程通常为:

$$R(\varphi, z) = a + \alpha z + \sigma_1 \cos(l_1 \varphi + \Delta\beta_1 z) + \sigma_3 \cos(l_3 \varphi + \Delta\beta_3 z) \quad (1)$$

式中:  $\varphi$  和  $z$  分别为角向和纵向变量;  $a$  为辐射器入口处均匀波导的半径;  $\alpha$  为辐射器张开的斜率;  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  为扰动幅度;  $l_1$  和  $l_3$  分别为纵向和角向的扰动周期,  $\Delta\beta_1$  和  $\Delta\beta_3$  为工作模式与耦合模式之间轴向传播常数之差。

根据文献[3]可知, 要获得理想的准高斯波束, 混合模式的场可由 9 个特定的圆波导模式并以一定的比例叠加而得, 其各模式的相对功率分布需满足表 1 要求。

表 1 合成准高斯模所需的模式及相对功率比值  
Table 1 Set of TE modes to generate a Gaussian-like field distribution and its relative power

	azimuthal bunching		
	TE <sub>m-2,n+1</sub> (1/36)	TE <sub>m+1,n</sub> (1/9)	TE <sub>m+4,n-1</sub> (1/36)
axial bunching	TE <sub>m-3,n+1</sub> (1/9)	TE <sub>m,n</sub> (4/9)	TE <sub>m+4,n-1</sub> (1/9)
	TE <sub>m-4,n+1</sub> (1/36)	TE <sub>m-1,n</sub> (1/9)	TE <sub>m+4,n-1</sub> (1/36)

实际 Denisov 辐射器设计中, 需参考表 1 所示各模式相对功率比值, 并利用耦合波方程优化, 确定扰动幅度  $\sigma_1, \sigma_3$  和长度等结构参数, 然后根据得到的结果分析波导壁场分布, 最后选择出该辐射器的切口位置及扰动长度。其耦合波方程为<sup>[4-6]</sup>:

$$\frac{\partial A^k}{\partial z} = -jk_{z,k}(z)A^k - j\sum_l K_{k,l}(z)A^l \quad (2)$$

式中:  $k_{z,k}$  为第  $k$  个模式的波数;  $A^k$  与  $A^l$  为各个模式的幅度;  $K_{k,l}$  为第  $k$  个模式与第  $l$  个模式之间的耦合系数。

## 2 数值仿真及结果

根据上述几何光学和耦合波理论编写出 Denisov 型辐射器的数值仿真程序<sup>[7-9]</sup>, 选择 140 GHz 回旋振荡管的工作模式为 TE<sub>22,6</sub> 模式, 辐射器的入口波导半径为 17 mm, 并以表 1 中各模式相对功率比值作为优化目标进行迭代计算。设计过程中, 可对 2 个维度的扰动分别设计, 即单独分析  $l_1$  和  $l_3$  的扰动( $l_1$  对应  $Z$  向,  $l_3$  对应  $\varphi$  向)。图 1 为角向扰动幅度  $\sigma_3=0$ , 只分析纵向扰动时, 波束在纵向形成的聚焦, 得到的波导壁表面电流在波纹波导内壁的分布图, 由图 1 可得纵向扰动幅度值:  $\sigma_1=0.059$  mm。图 2 为当纵向扰动幅度  $\sigma_1=0$ , 只分析角向扰动时, 波束在角向形成的聚焦, 得到在螺旋波纹波导内壁的表面电流分布图, 由图 2 可得角向扰动幅度值:  $\sigma_3=0.048$  mm。

确定出 2 个维度扰动幅度后再进行叠加, 进而得到整个螺旋波纹波导的扰动分布设计。当同时扰动纵向  $\sigma_1$  和角向  $\sigma_3$ , 见图 3, 把图 1 和图 2 合成在一起, 同时在轴向和角向对波束形成聚集, 共同作用, 可在波纹波导内壁的布里渊区中得到高斯分布。同时根据耦合波理论, 通过数值计算可以得出各个模式的相对功率大小沿轴向的变化曲线。图 4 为表 1 中 9 个主要模式的变化曲线, 由图 4 可以得出在经过 60 mm 扰动段后, 9 个模式相对功率稳定后的各个模式的功率比例分布: 在输入端口 TE<sub>22,6</sub> 模式的相对功率为 1, 其他模式的相对功率为 0, 随着波纹波导的扰动, 模式之间发生耦合, 并按一定功率比例保持稳定的模式变换。

各个模式叠加的壁电流在波纹波导内部分布见图 5 和图 6, 其中白线表示选择的辐射器切口区域, 切口沿壁电流最弱的路径切开, 其切口位置为  $L=101$  mm,  $\varphi=2.38$  rad。同时, 图 7 和图 8 给出了切口后第一个布里渊区, 微波能量将从此处向外辐射。由图可以看出, 在辐射器切口处很好地形成准高斯波束, 其辐射场的中心值与切口边缘处的差值可达 30 dB, 表明产生的混合模式已经实现了很好的集中, 从而可有效降低由于切口影响带来的寄生辐射和杂散损耗, 实现高功率微波的高效输出。

## 3 数值结果可行性验证

为了验证辐射器的数值计算结果可行性, 通过三维全波电磁仿真软件 Feko 分析波导内壁上的电流分布, 并与数值计算结果进行比较。图 9 为圆波导输入端口处的输入信号场分布, 可见其激励源为 TE<sub>22,6</sub> 的旋转模式。图 10 分别给出利用 Feko 软件和数值仿真计算微扰波纹波导在距离辐射器切口 10 mm 处波导端面上的场分布情况, 由图可见, 两者经过微扰结构能量耦合后场型一致。

在上述工作的基础上, 进一步验证分析在辐射器切口处形成的准高斯波束。图 11(a)为利用 Feko 软件获得

的整个辐射器的场分布，(b)为通过 Feko 建立的辐射切口模型，并根据图 10(b)的数值计算结果导入端面上的场分布进行仿真，(c)为辐射器切口在观测面上的场分布。由图 11 可知，在输出前的最后一个布里渊区处，壁电流很好地汇聚，在辐射器的切口处，所设计的 Denisov 辐射器可以把输入的  $TE_{22,6}$  模式转换为类高斯分布，这在切口辐射出的场分布可以得到体现，从而验证了本文采用的准光模式变换器数值仿真程序的可行性。另外，对比图 11(c)中场功率与输入端口处功率，可计算出其输出功率转换效率达到 99.1 %。

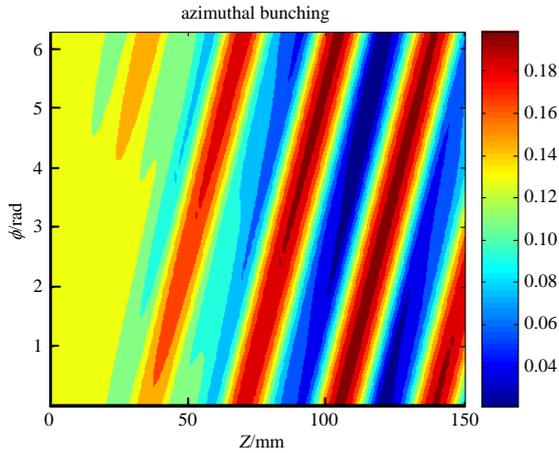


Fig.1 Azimuthal bunching with only  $\sigma_3=0$  in wall deformations  
图 1 纵向扰动后波导内壁表面电流分布图( $\sigma_3=0$ )

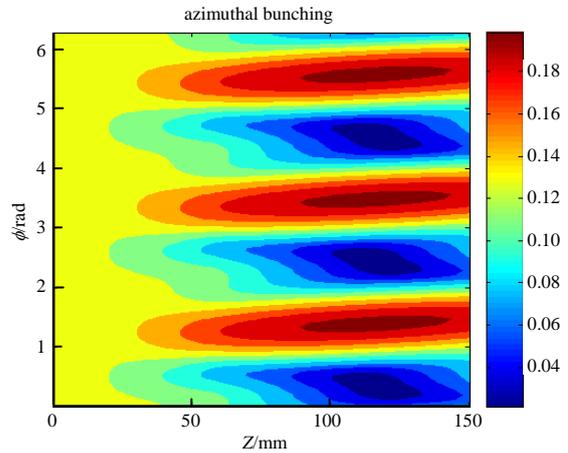


Fig.2 Azimuthal bunching with only  $\sigma_1=0$  in wall deformations  
图 2 角向扰动后波导内壁表面电流分布图( $\sigma_1=0$ )

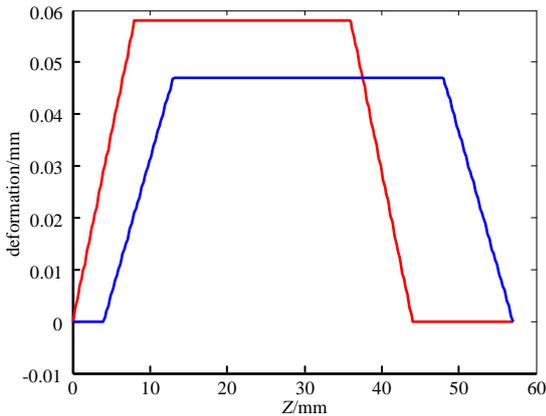


Fig.3 Wall deformations of Denisov launcher  
图 3 扰动幅度变化线

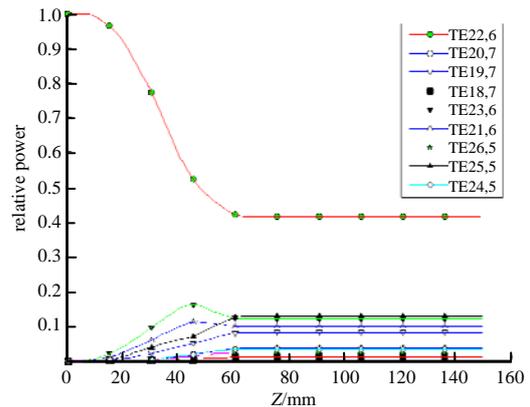


Fig.4 Relative power variation of each mode along Z-axis  
图 4 各模式沿纵向的相对功率变化曲线

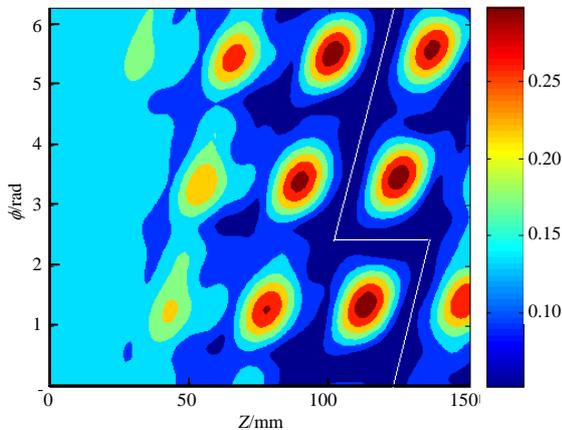


Fig.5 Contour map of electrical field of dimpled-wall launcher  
图 5 波纹波导内表面电场幅度分布图

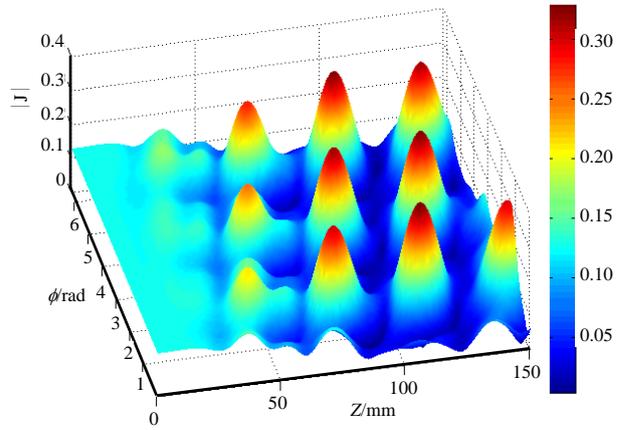


Fig.6 The 3D contour map of electrical field of dimpled-wall launcher  
图 6 波纹波导内表面电场幅度三维分布图

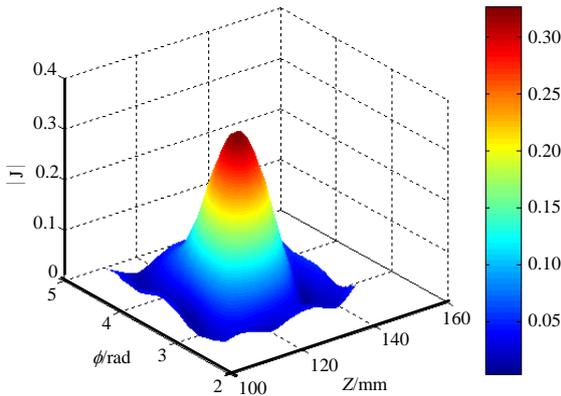


Fig.7 Contour of the field at the aperture of launcher (3D)  
图 7 辐射器切口处电场幅度分布(3D)

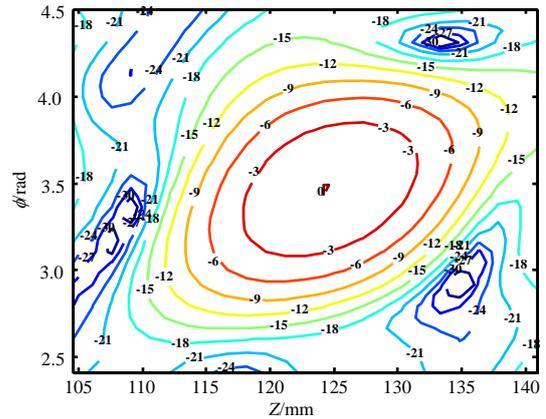


Fig.8 Contour of the strength of the field at the aperture of launcher  
图 8 各个模式叠加的壁电流分布

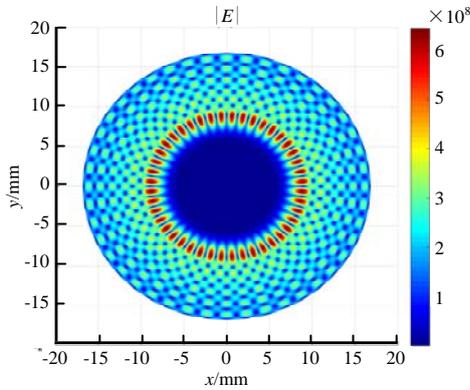
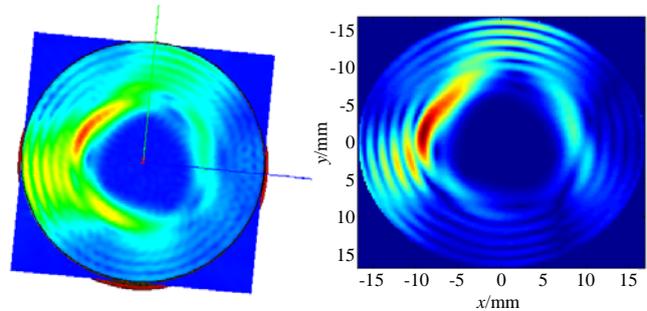
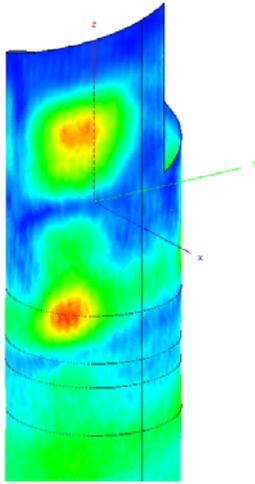


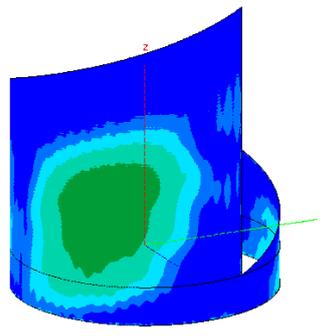
Fig.9 Contour of the field of TE<sub>22,6</sub> mode at the aperture of waveguide  
图 9 圆波导输入端口 TE<sub>22,6</sub> 模式场分布



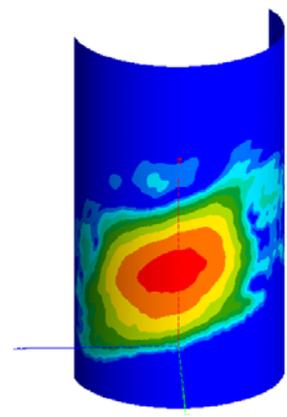
(a) the result of Feko (b) the result of numerical calculation  
Fig.10 Contour of the field at the aperture before cut  
图 10 辐射器切口前波导端面场分布



(a) the result of Feko



(b) the result of numerical calculation



(c) field distribution from cut of launcher

Fig.11 Contour of the field at the aperture of launcher  
图 11 辐射器场分布

#### 4 结论

本文采用几何光学理论和耦合波理论设计了 140 GHz TE<sub>22,6</sub> 模式 Denisov 辐射器, 分析了 Denisov 辐射器内激励起的各模式的功率分布曲线和波导壁上的电流分布, 并利用电磁仿真软件验证了数值仿真的可靠性, 最后得到其扰动长度为 60 mm, 总长度为 136.5 mm, 输出功率转换效率为 99.1%。并利用 Feko 软件对数值计算结果的可行性进行了有效验证。由仿真结果可见, 该辐射器可在布里渊区中得到很好的高斯分布, 这有利于后续准光反射镜面的设计。本文计算结果为热核聚变用 140 GHz 回旋振荡管的研制打下技术基础。

## 参考文献:

- [1] 李志良,冯进军,刘本田,等. 140 GHz 回旋振荡管高频腔体的数值模拟[J]. 微波学报, 2016,32(2):52-54. (LI Zhiliang, FENG Jinjun, LIU Bentian, et al. Design of an interaction cavity for 140 GHz gyrotron oscillator[J]. Journal of Microwaves, 2016,32(2):52-54.)
- [2] 安康,刘本田,张亦弛,等. 140 GHz, TE<sub>22,6</sub> 模式回旋振荡管高频谐振腔[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(1):18-23. (AN Kang, LIU Bentian, ZHANG Yichi, et al. The resonator in 140 GHz, TE<sub>22,6</sub>-mode gyrotron oscillator[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(1):18-23.)
- [3] 薛长江,施美友,张永刚,等. 高阶过模 Denisov 辐射器设计[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(3):727-730. (XUE Changjiang, SHI Meiyu, ZHANG Yonggang, et al. Design of high-order overmoded Denisov launcher[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(3):727-730.)
- [4] JIN J B, THUMM M, PIOSCZYK B, et al. Novel numerical method for the analysis and synthesis of the fields in highly oversized waveguide mode converters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009,57(7):1661-1668.
- [5] 王虎,沈文渊,耿志辉,等. 高功率回旋振荡管 Denisov 型辐射器的研究[J]. 物理学报, 2013,62(23):238401-1-9. (WANG Hu, SHEN Wenyuan, GENG Zhihui, et al. Study on a high efficient Denisov-type launcher for high-power gyrotron oscillators[J]. Acta Physica Sinica, 2013,62(23):238401-1-9.)
- [6] 张天钟,喻胜,牛新建,等. 94 GHz TE<sub>6,2</sub> 模式 Denisov 辐射器的研究[J]. 物理学报, 2014,63(12):128402-1-8. (ZHANG Tianzhong, YU Sheng, NIU Xinjian, et al. Analysis of a 94 GHz, TE<sub>6,2</sub> Denisov launcher[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(12):128402-1-8.)
- [7] BLANK M, KREISCHER K, TEMKIN R J. Theoretical and experimental investigation of a quasi-optical mode converter for a 110 GHz gyrotron[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1996,24(3):1058-1066.
- [8] BLANK M. High efficiency quasi-optical mode converter for a overmoded gyrotrons[D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [9] JIN J B, THUMM M, PIOSCZYK B, et al. Theoretical investigation of an advanced launcher for a 2 MW 170 GHz TE<sub>34,19</sub> coaxial cavity gyrotron[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006,54(3):1139-1145.

-----  
(上接第 760 页)

- [2] 崔瀚,焦志刚. 国外末敏弹发展概述[J]. 飞航导弹, 2015(2):24-31. (CUI Han, JIAO Zhigang. Overview of the development of foreign terminal-sensitive projectile[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2015(2):24-31.)
- [3] 殷希梅,冯鹏鹏. 末敏弹对抗技术现状及展望[J]. 探测与控制学报, 2017,39(5):1-6. (YIN Ximei, FENG Pengpeng. Status and prospect of terminal sensitive projectile technology[J]. Journal of Detection & Control, 2017,39(5):1-6.)
- [4] 王宏强,邓彬,秦玉亮. 太赫兹雷达技术[J]. 雷达学报, 2018,7(1):1-21. (WANG Hongqiang, DENG Bin, QIN Yuliang. Review of terahertz radar technology[J]. Journal of Radars, 2018,7(1):1-21.)
- [5] 郭明伟,温云鹏,仪名星. 高功率微波对抗末敏弹可行性分析[J]. 电子信息对抗技术, 2019,34(1):27-30,55. (GUO Mingwei, WEN Yunpeng, YI Mingxing. The feasibility analysis of terminal sensitive projectile countermeasure using high power microwave[J]. Electronic Warfare Technology, 2019,34(1):27-30,55.)
- [6] 杨毅. 毫米波 FMCW 雷达近炸引信信号处理设计与实现[J]. 电子技术应用, 2010(10):53-56. (YANG Yi. Design and implementation of signal processor for FMCW millimeter radar fuze[J]. Application of Electronic Technique, 2010(10): 53-56.)
- [7] 丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 4 版. 北京:电子工业出版社, 2009. (DING Lufei, GENG Fulu, CHEN Jianchun. Radar principle[M]. 4th ed. Beijing: Electronics Industry Press, 2009.)
- [8] 王攀. 金属立体目标毫米波辐射特性及其探测研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015. (WANG Pan. Research and detection on the radiation characteristics of solid metal in millimeter wave band[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science & Technology, 2015.)
- [9] 逯暄,肖泽龙,许建中. 用于末敏弹的毫米波主被动复合引信[C]// 中国兵工学会第十六届引信学术年会论文集. 中国,宁波:《探测与控制学报》编辑部, 2009. (LU Xuan, XIAO Zelong, XU Jianzhong. Millimeter-wave main passive composite fuze for terminal bombs[C]// The Sixteenth Annual Academic Meeting of The Chinese Military Academy of Fuze. Ningbo, China: Journal of Detection & Control, 2009.)