

引用格式:陈国强,秦晓科,李莹柯,等. 红外/激光/毫米波共孔径光学系统设计[J]. 电光与控制,2020,27(4):98-102. CHEN G Q, QIN X K, LI Y K, et al. Optical design of an IR/SAL/MMW system with common aperture[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(4):98-102.

红外/激光/毫米波共孔径光学系统设计

陈国强, 秦晓科, 李莹柯, 徐 炜, 时光煜, 郭小青
(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 为了使导弹具备全天候作战和抗干扰能力,设计了一种红外/激光/毫米波共孔径光学系统。通过计算设计参数,确定了共孔径光学系统总体构型:3个波段共用抛物面主镜;次镜反射红外和激光,透射毫米波。长波红外模式采用光学被动无热化技术,设计的光学系统能够保证高低温下的成像性能。半主动激光模式探测器离焦后,获得激光光斑仿真结果,表明线性区内满足四象限探测器使用要求。毫米波模式优化次镜后,计算远场光强分布,导出的半功率波束角和旁瓣电平均符合设计要求。红外/激光/毫米波共孔径光学系统可以应用于多模复合制导武器,能够较好地适应目标和环境,显著提高作战效能。

关键词: 光学设计; 三模复合制导武器; 长波红外; 无热化设计; 半主动激光; 毫米波

中图分类号: TJ765.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.04.019

Optical Design of an IR/SAL/MMW System with Common Aperture

CHEN Guoqiang, QIN Xiaoke, LI Yingke, XU Wei, SHI Guangyu, GUO Xiaoqing
(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: An optical system of IR/SAL/MMW band with common aperture is designed to enable the missile all-weather operational capability and anti-interference abilities. The overall layout of the common-aperture optical system is determined by calculating the design parameters. All the three bands are reflected by the primary mirror. IR band and SAL band are reflected by the secondary mirror, while MMW band transmits through it. As to LWIR mode, the optical system designed by using passive athermalization technology performs very well, even when it is exposed to extreme temperatures. As to SAL mode, after the defocusing of the detector, the simulation result of the laser spot with field-of-view in the linear region is obtained, which is suitable for the four quadrant detector. As to MMW mode, after the optimization of the back surface of the secondary mirror, the intensity distribution of the far field is calculated, and the deduced half-power beam angle and side-lobe level conform to the design requirements. The common-aperture IR/SAL/MMW system can be applied to multi-mode combined-guidance weapons, which well adjusts to various targets in bad environment, and improves the combat capability.

Key words: optical design; tri-mode combined-guidance weapon; LWIR; athermalization design; SAL; MMW

0 引言

精确制导武器已成为高科技战争中遂行有效打击的常规手段,其中,导引头的应用使导弹攻击的准确性显著提高。导引头采用的寻的制导方式主要包括激光半主动制导^[1]、电视探测制导^[2]、红外成像制导^[3]、毫米波主动探测制导^[4]等技术。随着战场上对抗手段的升级,单一的制导方式已不能完成作战使命,近年来双

模复合制导技术由于能够结合各自模式优势,得到了飞速发展。目前,比较常见的双模复合制导技术为红外/激光复合制导技术^[5]及红外/毫米波复合制导技术^[6]。为了保证精确制导武器在复杂战场环境下在作用距离、战术灵活性、抗干扰、反隐身等方面的优势,进而较好地适应目标和环境,关于红外/激光/毫米波三模复合制导技术的研究正在逐步应用。据有关资料显示,国外已研发了三模导引头的样机^[7],而目前国内尚无三模导引头样机的公开报道。红外/激光/毫米波共孔径光学系统是三模导引头研发的关键技术之一,具有很高的实战价值。

收稿日期:2019-07-24

修回日期:2019-08-26

作者简介:陈国强(1982—),男,陕西延安人,硕士,高工,研究方向为光电探测与对抗技术。

1 总体设计

1.1 技术要求

三模导引头具备全天候作战和抗干扰能力,并能适应复杂电磁环境,典型打击目标为地面车辆目标,尺寸 $8\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3\text{ m}$,运动速度不超过 15 m/s ,作用距离要求如下:红外打击目标 $\geq 4\text{ km}$;激光打击目标 $\geq 6\text{ km}$;毫米波打击运动目标 $\geq 4\text{ km}$,静止目标 $\geq 2\text{ km}$ 。

系统总体根据作用距离并结合器件灵敏度分配到红外/激光/毫米波共孔径光学系统的技术要求如下。

1) 红外模式。

红外模式采用长波非制冷探测器,分辨率 640×512 ,像元尺寸 $17\text{ }\mu\text{m}$,光学系统设计参数如下:工作波长 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$;F数 ≤ 1.3 ;视场 $\geq 5^\circ\times 4^\circ$;工作温度 $-55\sim +70\text{ }^\circ\text{C}$;系统畸变 $\leq 3\%$;无热化设计。

2) 激光模式。

半主动激光制导模式采用靶面直径 $\phi 10\text{ mm}$ 的四象限探测器,激光模式光学系统设计参数如下:工作波长 1064 nm ;瞬时视场 $\pm 3^\circ$;线性区 $\geq \pm 1^\circ$;入瞳直径 $\geq 90\text{ mm}$ 。

3) 毫米波模式。

毫米波模式为主动毫米波雷达,电磁模块占主导,三模共用天线可以使用准光学方法设计和分析。工作波段 3.2 mm (94 GHz);半功率波束角 $\leq 2.9^\circ$;旁瓣电平 $\leq -9\text{ dB}$ 。

1.2 设计参数计算

1) 红外光学系统焦距为

$$f_{\text{IR}} = \frac{Np}{2 \tan(H_{\text{FOV}}/2)} \quad (1)$$

式中: N 为水平分辨率, p 为像素尺寸, Np 表示靶面水平方向尺寸; H_{FOV} 表示水平方向视场。计算得到红外成像系统焦距 $f_{\text{IR}} = 125\text{ mm}$ 。红外波段入瞳直径取 100 mm ,对应F数 1.25 ,满足设计要求。

2) 同理,根据激光靶面直径和瞬时视场,求出激光光学系统焦距 $f_{\text{SAL}} = 95.4\text{ mm}$ 。激光模式入瞳直径要求大于等于 90 mm ,此处取 96 mm 。

3) 对于毫米波,圆形孔径的辐射场所能达到的半功率波束角极小值为^[8]

$$\theta = 1.02\lambda/D \quad (2)$$

式中: λ 为毫米波工作波长; D 为入瞳直径。

半功率波束角要求不大于 2.9° ,因此,口径至少需要 62 mm ,考虑到所选取构型中心开孔及次镜像差等其他影响因素,口径需尽可能大,毫米波口径取 104 mm ,与红外波段入瞳直径相当。

1.3 总体构型

红外/激光/毫米波共孔径光学系统整体构型如图

1所示。

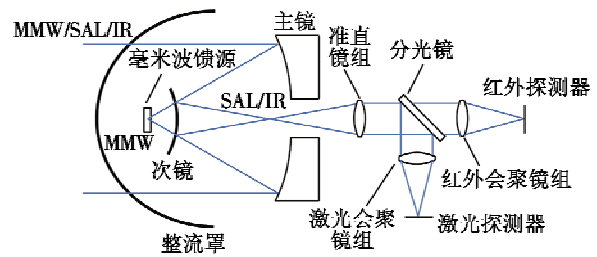


图1 红外/激光/毫米波系统整体构型

Fig. 1 Layout diagram of IR/SAL/MMW system

图中,红外(IR)、半主动激光(SAL)、毫米波(MMW)3个波段共用整流罩和抛物面主镜,次镜反射红外和激光,透射毫米波。毫米波馈源喇叭前置,位于主镜的焦点附近。红外、激光光束经共用准直镜组后进入分光镜分离,红外透过分光镜后被红外会聚镜组成像,激光经过分光镜反射后被激光会聚镜组聚焦,激光探测器适当离焦后得到符合要求的激光光斑。

红外/激光/毫米波共孔径光学系统口径 $\phi 160\text{ mm}$,整流罩到非制冷红外探测器像面长度 177.2 mm ,可以应用于 $\phi 180\text{ mm}$ 及以上弹径的导弹。

2 红外模式

2.1 光学设计

红外光学系统采用光学被动无热化技术^[9],保证在 $-55\sim +70\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内均能清晰成像。该技术利用光学材料色差与热差的不同,合理分配不同光学元件的光学材料、光焦度与间隔,使其热离焦满足使用要求。

本文中主镜采用微晶玻璃,表面镀全波段反射膜。整流罩和次镜采用硫化锌,次镜表面镀分光膜,反射长波红外和激光光束,透射毫米波。主次镜采用铜钢固定,准直镜组需同时透过长波红外和激光2个波段的光线,可供使用的材料主要有硫化锌、硒化锌、红外玻璃。分光镜采用锗,透射长波红外光束,反射激光光束。红外会聚镜组利用锗和红外玻璃组合并加入非球面,在消色差的同时实现消热差。后端结构件材料为铝。利用Code V软件结合红外、激光和毫米波波段优化后,得到红外系统的光线追迹图,如图2所示。

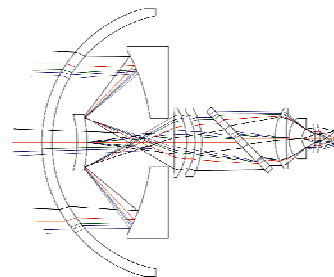


图2 红外系统光线追迹图

Fig. 2 Optical raytracing of IR system

2.2 像质评价

对于红外光学系统,评价成像质量主要通过调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)。图3展示了该系统在常温下的MTF曲线。在探测器空间截止频率30 cycle/mm处,轴上点及轴外点 MTF 设计值均在0.3以上,接近衍射极限,保证了光学系统具有较好的像质,从而匹配17 μm 像元的探测器。

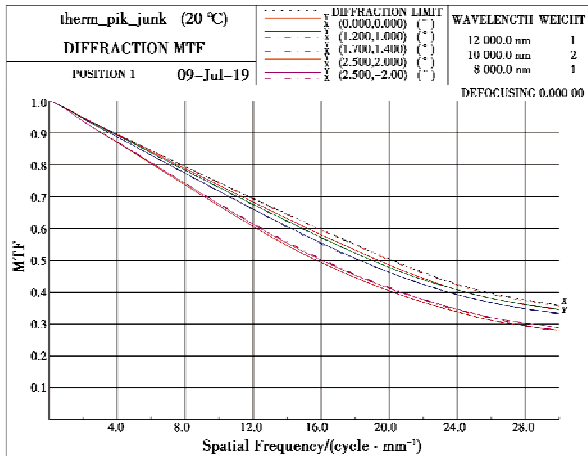


图3 红外系统常温下 MTF 曲线

Fig.3 MTF of IR system at 20 °C

图4所示为红外系统常温下畸变曲线。

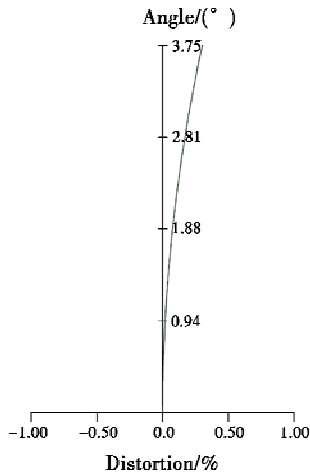


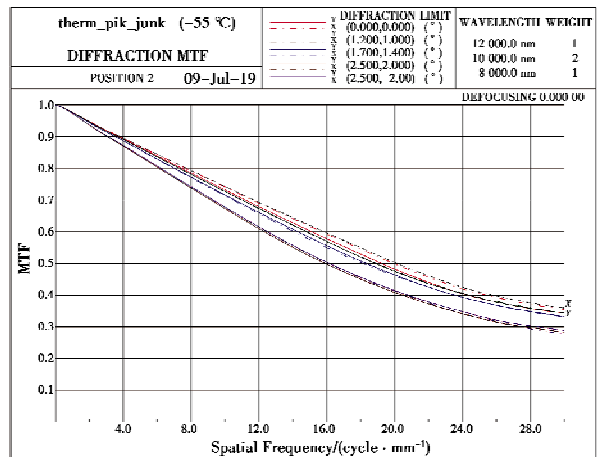
图4 红外系统常温下畸变曲线

Fig.4 Distortion of IR system at 20 °C

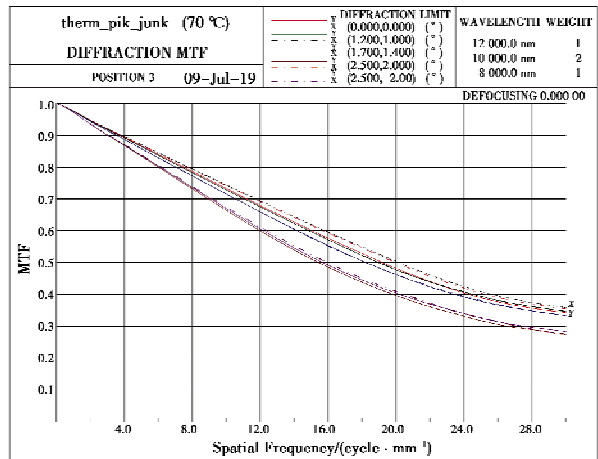
红外系统半对角视场3.75°,因此,图4畸变曲线表明,在全视场范围内畸变均小于1%,能够满足不大于3%的设计要求。

2.3 环境适应性

图5为红外系统高低温下 MTF 曲线,可以看到,在探测器空间截止频率30 cycle/mm 以下,所有视场 MTF 与常温下 MTF(图3)对比无明显下降,证明了系统在-55 ~ +70 °C 温度范围内能够清晰成像,满足环境工作温度要求。



(a) -55 °C低温下



(b) +70 °C高温下

图5 红外系统高低温下 MTF 曲线

Fig.5 MTF of IR system at -55 °C and +70 °C

3 激光模式

3.1 光学设计

半主动激光系统在准直镜组后的分光镜处分光,分光镜反射激光光束。激光会聚镜组采用ZF6, K9 等玻璃材料,中间为带宽约1 nm 的窄带滤光片^[10]。利用Code V 软件优化后,对像面后离焦4.5 mm,得到如图6所示的半主动激光系统的光线追迹图。

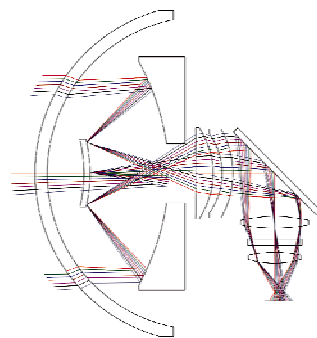


图6 半主动激光系统光线追迹图

Fig.6 Optical raytracing of SAL system

3.2 仿真计算

由于分光镜反射激光光束,因此激光模式可以看作旋转对称系统,只需分析激光模式Y方向视场的性能。图7为激光模式在视场 θ 分别取 $0^\circ, 0.3^\circ, 0.6^\circ, 1^\circ, 1.5^\circ$ 和 3° 时的点列图。可以看出,在线性区 1° 视场范围内,光斑直径最大偏差量小于3%,且除次镜造成的中心遮挡外,光线分布比较均匀,满足四象限探测对光斑尺寸和能量均匀性的要求。

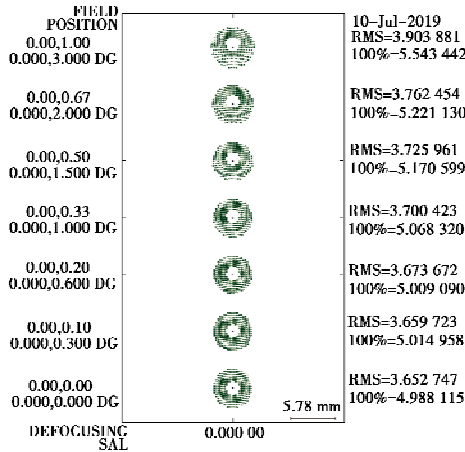


图7 半主动激光系统点列图

Fig.7 Spot diagram of SAL system

对于存在中心遮拦的系统四象限探测,落在第一象限和第二象限能量之和 V_u 与落在第三象限和第四象限能量之和 V_d 满足

$$V_u + V_d = k(\pi r_o^2 - \pi r_i^2) \quad (3)$$

式中: r_o 表示光斑半径; r_i 为遮拦半径; k 为系数。

1) 当 r_i 大于 $f_{SAL} \sin(\theta)$, V_u 可表示为

$$V_u = k r_o^2 (\pi/2 - \arcsin(y/r_o)) - y \sqrt{r_o^2 - y^2} - k [r_i^2 (\pi/2 - \arcsin(y/r_i)) + y \sqrt{r_i^2 - y^2}] \quad (4)$$

2) 当 r_i 小于 $f_{SAL} \sin(\theta)$, V_u 更改为

$$V_u = k r_o^2 (\pi/2 - \arcsin(y/r_o)) - k y \sqrt{r_o^2 - y^2} \quad (5)$$

通过对激光光斑照度的仿真分析可得 V_u/V_d ,进而由式(4)和式(5)可以求出激光光斑照度对应的视场值。若参数 r_o 为2.5 mm, r_i 为0.5 mm,可得不同视场下由 V_u/V_d 计算的视场值,如表1所示。在线性区 1° 范围内,测角精度优于 0.15° ,满足使用要求。

表1 通过仿真计算的视场值

Table 1 FOV results from the simulation

视场 $\theta/(^\circ)$	V_u/V_d 仿真	计算视场 $(^\circ)$
0.0	1.000	0
0.2	0.735	0.212
0.4	0.513	0.418
0.6	0.304	0.673
0.8	0.175	0.899
1.0	0.081	1.127
1.2	0.011	≥ 1.000
1.4	0.000	≥ 1.000

4 毫米波模式

毫米波模式为主动毫米波雷达,电磁模块占主导,三模共用天线可以使用准光学方法设计和分析,主要成像器件为抛物面主镜。从几何光学角度分析,抛物面可将焦点处的球面波转换成平面波发射,也就是半功率波束角无限小。考虑有限孔径下的衍射效应,半功率波束角见式(2)。

红外/激光/毫米波共孔径光学系统中毫米波模式除抛物面主镜参与发射接收外,还有整流罩、次镜透射及次镜对主镜遮挡等因素影响,通过Code V软件改变次镜近馈源面曲率并调整馈源位置优化毫米波模式,得到毫米波系统的光线追迹图,如图8所示。其中,整流罩和次镜采用硫化锌材料,在毫米波模式下折射率为2.9。

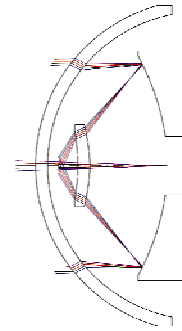


图8 毫米波系统光线追迹图

Fig.8 Optical raytracing of MMW system

为了评价毫米波波段的成像质量,即半功率波束角和旁瓣电平,需将馈源放置在毫米波光学系统焦点处,馈源发射球面波,观察远场场强随角度的变化(方向图),即点扩散函数,如图9所示。对数据分析可得,旁瓣电平为 -9.2 dB,小于 -9 dB,半功率波束角为 2.8° ,符合设计要求。

实际应用中焦点处放置的馈源发射的电磁波并非球面波,而是笔形波束,发射的毫米波辐射半功率波束角可以控制在 2° 以下,旁瓣电平可压缩到 -15 dB以下。关于毫米波馈源加天线的计算和作用距离的核算,可借助电磁学仿真软件获得^[8]。

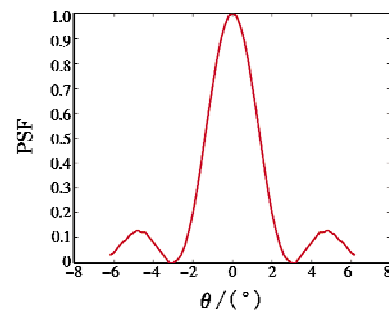


图9 毫米波系统点扩散函数

Fig.9 Point spread function of MMW system

5 结 论

本文设计了一种红外/激光/毫米波共孔径光学系统,是实现多模复合制导的关键技术。为满足技术要求,三模共用整流罩和抛物面主镜,次镜反射红外和激光,透射毫米波。长波红外模式采用光学被动无热化技术,设计的光学系统保证了高低温下的成像性能。仿真分析表明,半主动激光制导模式在线性区内的激光光斑满足四象限探测器使用要求。利用远场光强分布获得毫米波模式的方向图,进而求解半功率波束角和旁瓣电平。

以上分析表明,本文设计的红外/激光/毫米波共孔径光学系统,各项性能均符合设计要求,为三模导引头的研发奠定了技术基础,对提高精确制导武器的适应性和作战效能非常关键。

参 考 文 献

- [1] 刘智颖,邢天祥. 激光半主动导引头光学系统设计[J]. 激光与红外,2016,46(5):527-531.
- [2] 陈蕾,姜允东,张峰,等. 烟雾干扰下电视导引头作用距离研究[J]. 弹箭与制导学报,2013,33(1):17-18,24.
- [3] 陈玉波,陈乐,曲长征,等. 红外制导技术在精确打击武器中的应用[J]. 红外与激光工程,2007,36(s):35-38.
- [4] 黄雨辰. 毫米波成像方法及系统关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [5] 毛延凯,仇振安,罗金平,等. 共孔径红外/激光复合导引头系统仿真研究[J]. 电光与控制,2018,25(1):19-22.
- [6] 胡体玲,李兴国. 毫米波/红外复合导引头关键技术分析[J]. 激光与红外,2007,37(2):101-103,116.
- [7] FAWCETT J M, SCHWERDT C B. Tri-mode seeker: US6606066[P]. 2003-08-12.
- [8] 林昌禄,聂在平. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [9] 申碧云,高明. 红外光学系统被动式无热化设计方法[J]. 电光与控制,2012,19(6):70-73,78.
- [10] 胡博,常伟军,孙婷,等. 激光半主动制导导引头光学系统的设计[J]. 应用光学,2012,33(2):402-405.
- (上接第37页)
- [4] TAI L, PAOLO G, LIU M. Virtual-to-real deep reinforcement learning: continuous control of mobile robots for mapless navigation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017:31-36.
- [5] 肖潇,方勇纯,贺锋,等. 未知环境下移动机器人自主搜索技术研究[J]. 机器人,2007,29(3):224-229.
- [6] 赵晓,王铮,黄程侃,等. 基于改进A*算法的移动机器人路径规划[J]. 机器人,2018,40(6):903-910.
- [7] 刘二辉,姚锡凡. 基于改进遗传算法的自动导引小车路径规划及其实现平台[J]. 计算机集成制造系统,2017,23(3):465-472.
- [8] 王晓燕,杨乐,张宇,等. 基于改进势场蚁群算法的机器人路径规划[J]. 控制与决策,2018,33(10):1775-1781.
- [9] LI M H, HONG B R, LUO R H, et al. A novel method for mobile robot simultaneous localization and mapping[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2006,7(6):937-944.
- [10] 梁明杰,闵华清,罗荣华. 基于图优化的同时定位与地图创建综述[J]. 机器人,2013,35(4):500-512.
- [11] GRISETTI G, STACHNISS C, BURGARD W. Improved techniques for grid mapping with Rao-Blackwellized particle filters[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007,23(1):34-46.
- [12] 罗元,苏琴,张毅,等. 基于优化RBPF的同时定位与地图构建[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2016,44(5):30-34.
- [13] DOUCET A, DE FREITAS N, GORDON N. Sequential Monte Carlo methods in practice[M]. New York:Springer, 2001.
- [14] KOHLBRECHER S, MEYER J, GRABER T, et al. Hector open source modules for autonomous mapping and navigation with rescue robots[C]//RoboCup 2013: Robot World Cup XVII, 2013:624-631.
- [15] KOHLBRECHER S, STRYK O V, MEYER J, et al. A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation[C]//IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, 2011:1-6.
- [16] 王伟,储林波,马玉林. 一种改进的机器人路径规划算法[J]. 哈尔滨工业大学学报,1998,30(2):97-98.
- [17] 程传奇,郝向阳,李建胜,等. 融合改进A*算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J]. 西安交通大学学报,2017,51(11):137-143.