

引用格式:石章松,刘志超,吴鹏飞.编队舰炮发射末端与导弹火力兼容方法[J].电光与控制,2018,25(8):65-69,87. SHI Z S, LIU Z C, WU P F. Firing compatibility of naval guns at the launch end with missiles in warship formation[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(8):65-69, 87.

编队舰炮发射末端与导弹火力兼容方法

石章松, 刘志超, 吴鹏飞
(海军工程大学,武汉 430033)

摘要:针对舰艇编队防空反导背景下舰炮与防空导弹的火力兼容问题,以舰炮全航路拦截反舰导弹为研究对象,基于空域格模型对空域资源的量化描述,采用弹道微分方程进行火控解算,建立了基于空域格的火控诸元快速解算模型,解算出舰炮对反舰导弹全航路拦截情况下,舰炮弹丸炸点占用的空域资源和时间资源。对占用的空域和时域资源进行时空匹配,给出在舰炮抗击末端,基于空域格的舰炮与导弹火力兼容判断的方法,对解决舰炮与导弹火力兼容问题提供了一定的补充和借鉴。

关键词:防空反导;舰艇编队;火力兼容;空域格模型;舰炮;防空导弹

中图分类号: E927 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.08.013

Firing Compatibility of Naval Guns at the Launch End with Missiles in Warship Formation

SHI Zhang-song, LIU Zhi-chao, WU Peng-fei
(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: This paper addresses the issue of firing compatibility of the naval guns with the air-defense missiles in air defense and missile defense of warship formation. Taking the interception of the anti-ship missile by the naval gun during its full air route as the object of study and based on the quantitative description of airspace resource by using the airspace grid model, this paper adopts the ballistic differential equation to solve the fire control problem and builds a rapid calculation model of fire control units based on the airspace grid. Under the condition of the full-course interception of the anti-ship missile by the naval gun, the occupied airspace resource and time resource by naval gun projectile are calculated. The matching of the occupied spatial and temporal resources is carried out, and a new method based on airspace grid is given, which is helpful to solve the problem of firing compatibility between the naval guns at the launch end with the missiles.

Key words: air defense and missile defense; warship formation; firepower compatibility; airspace grid model; naval gun; air-defense missile

0 引言

武器装备的快速发展使得舰艇防空反导作战中的空中对抗越来越激烈,由此也带来了火力兼容的问题。舰炮作为舰艇防空作战中近末端防线,与各种型号中远程导弹的协同使用构筑了舰艇的安全防线。舰炮与导弹火力兼容的研究,目的就是解决因火力交叉产生的影响武器作战效能的问题。文献[1-3]建立了垂直发射导弹上升段和转弯段的弹道与散布体模型,研究

了导弹在发射初段,重点是转弯段与火炮的兼容性问题。文献[4]通过武器发射初段动态火力散布体交叉的时空模型,提出了舰载武器火力兼容的优先级控制模型。在实际作战过程中,舰炮与导弹火力冲突除了导弹发射初期外,舰炮拦截末端,即与目标相遇点附近也是一个重要位置,炸裂的舰炮碎片极易对在同一时刻交叉航路点经过的我方导弹造成误伤。文献[5]通过将武器的火力交叉表示为射面交叉,建立了射面交叉的判断模型,给单舰硬武器火力兼容提供技术支撑。但在现代海战中,编队火力兼容的问题更加突出,也更迫切需要解决,从现有文献来看,该问题的解决一般通过建立武器弹道模型^[6],分析是否存在火力交叉,其缺点是计算量过于庞大,存在应用难度。

收稿日期:2017-08-07 修回日期:2017-10-13

基金项目:国家自然科学基金(61773395)

作者简介:石章松(1975—),男,湖北阳新人,博士,教授,博导,研究方向为目标定位与跟踪,信息融合与舰艇火力控制。

综上,本文基于文献[7]空域格模型对空域资源的量化描述,对编队舰炮发射末端与导弹火力兼容方法进行了研究。

1 空域资源描述

如图 1 所示,选取战场任一点 O 作为原点,建立直角坐标系 $O-XYZ$, OX 轴水平指东, OY 轴水平指北, OZ 轴垂直于水平面。战场空间均等划分为底面边长为 a 、高度为 b 的长方体空间,即空域格 G ,其几何中心点坐标为 $((i+1/2)a, (j+1/2)a, (k+1/2)b)$,数组 (i, j, k) 称为空域格坐标^[7]。设原点 O 为编队某舰艇中心,并以该舰艇舰炮全航路拦截反舰导弹为例进行仿真计算。

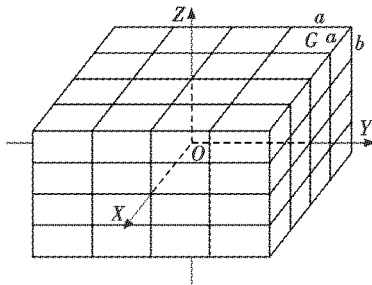


图 1 空域资源的划分

Fig. 1 The division of airspace resource

2 基于空域格舰炮末端反导拦截过程建模

舰炮空域格尺度过大使得武器利用率较低,为提高计算精度和武器使用效率,一般选取小尺度的空域格。因此,对亚音速、超音速反舰导弹来说,对空域格的占用时间段可用占用时刻来近似。

2.1 基于空域格目标运动建模

假设目标运动速度为 v_t ,航向角为 φ ,俯仰角为 ϑ ,初始位置为 $X_{t0}(x_{t0}, y_{t0}, z_{t0})$,我舰运动速度为 v_w ,航向角为 C_w ,则目标相对于我舰运动速度在各坐标的分量为

$$\begin{cases} v_{tx} = v_t \times \cos \vartheta \times \sin \varphi - v_w \times \sin C_w \\ v_{ty} = v_t \times \cos \vartheta \times \cos \varphi - v_w \times \cos C_w \\ v_{tz} = v_t \times \sin \vartheta \end{cases} \quad (1)$$

初始位置占用的空域格为 (i_{t0}, j_{t0}, k_{t0}) , $i_{t0} = [x_{t0}/a]$, $j_{t0} = [y_{t0}/a]$, $k_{t0} = [z_{t0}/b]$ 。 (i_{tm}, j_{tm}, k_{tm}) 为占用的第 m 个空域格,空间位置为 $X_{tm}(x_{tm}, y_{tm}, z_{tm})$, 则

$$\begin{cases} i_{tm} = i_{tm-1} + 1 \\ j_{tm} = (y_{t0} + m v_{ty} \Delta t) / a \\ k_{tm} = (z_{t0} + m v_{tz} \Delta t) / b \\ x_{tm} = x_{t0} + m v_{tx} \Delta t \\ y_{tm} = y_{t0} + m v_{ty} \Delta t \\ z_{tm} = z_{t0} + m v_{tz} \Delta t \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Delta t = a/v_{tx}$ 。

由空域格模型计算,则目标运动轨迹占用空域集合 $G_t = \{i_{tm}, j_{tm}, k_{tm}\}, m = 1, 2, \dots$ 。

目标占用空域格的时间集合为

$$T_t = \{t_{tm} | t_{tm} = f(i_{tm}, j_{tm}, k_{tm}) = m \Delta t, (i_{tm}, j_{tm}, k_{tm}) \in G_t\} \quad (3)$$

2.2 基于空域格舰炮弹丸运动建模

2.2.1 舰炮弹丸弹道模型

舰炮弹丸质心运动方程组为^[8-9]

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v_x \\ \frac{dy}{dt} = v_y \\ \frac{dz}{dt} = v_z \\ \frac{dv_x}{dt} = -CH(z)F(v) \cos \theta \sin \delta_0 \\ \frac{dv_y}{dt} = -CH(z)F(v) \cos \theta \cos \delta_0 \\ \frac{dv_z}{dt} = -CH(z)F(v) \sin \theta - g \\ v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: C 为导弹系数; $H(z)$ 为空气密度函数; $F(v)$ 为空气阻力函数。

2.2.2 舰炮弹丸运动占用空域资源

假设舰炮弹丸初速为 v_0 ,射角为 θ_0 ,旋回角 δ_0 ,初始位置为 (x_0, y_0, z_0) ,利用四阶-龙格库塔法求解弹道微分方程,得到舰炮弹丸运动轨迹为 $X(x(t), y(t), z(t))$,则舰炮弹丸运动占用空域资源为

$$\begin{cases} i_n = [x(t)/a] & i_n a \leq x(t) < i_n a + a \\ j_n = [y(t)/a] & j_n a \leq y(t) < j_n a + a \\ k_n = [z(t)/b] & k_n a \leq z(t) < k_n a + a \end{cases} \quad (5)$$

记 $G_{\theta_n, \delta_n} = \{i_n, j_n, k_n\}, n = 1, 2, \dots$,为舰炮弹丸占用空域资源集合。

舰炮弹丸在第 n 个空域格里运动点迹为 $X(x(t_{ns}), y(t_{ns}), z(t_{ns}))$,位置中心为 $X(\bar{x}_n, \bar{y}_n, \bar{z}_n)$,占用时间为 \bar{t}_n , 则

$$\begin{cases} \bar{x}_n = \frac{1}{s} \sum_{p=1}^s x_{np} \\ \bar{y}_n = \frac{1}{s} \sum_{p=1}^s y_{np} \\ \bar{z}_n = \frac{1}{s} \sum_{p=1}^s z_{np} \\ \bar{t}_n = \frac{1}{s} \sum_{p=1}^s t_{np} \end{cases} \quad (6)$$

舰炮弹丸占用空域格时间集合为

$$T = \{\bar{t}_n | \bar{t}_n = g(i_n, j_n, k_n), (i_n, j_n, k_n) \in G_{\theta_n, \delta_n}\} \quad (7)$$

对于空域格 $(i, j, k) \in G_{\theta_n, \delta_n}$,舰炮射击火控诸元为 $(\theta_0,$

δ_0), 即

$$Q = \{(\theta_0, \delta_0) | (i, j, k) \in G_{\theta_0, \delta_0}\} \quad (8)$$

2.3 拦截适宜性判断

舰炮对典型目标拦截过程如图 2 所示。

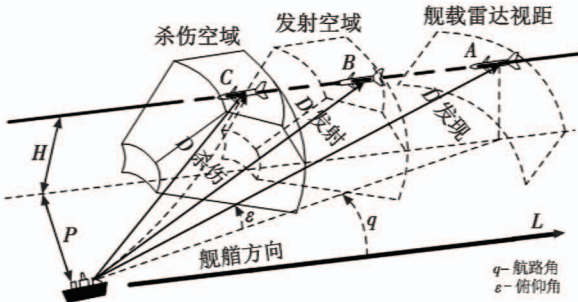


图 2 舰炮武器系统对典型目标拦截示意图

Fig. 2 The sketch map of naval gun weapon system intercepting the typical target

2.3.1 舰炮武器拦截空域建模

舰炮武器末端反导拦截空域^[10] (如图 3 所示)以搭载武器平台为圆心,其拦截空域由自身武器性能决定,通常以拦截远界、近界、高界、低界、高低角描述^[11-12],在水平面投影显示为环形。

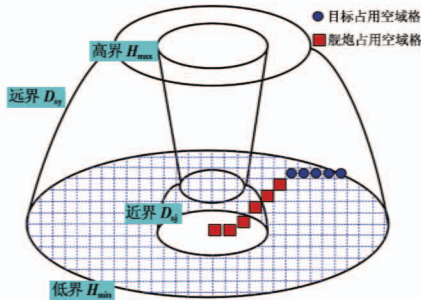


图 3 舰炮武器系统防空反导拦截空域

Fig. 3 The air defense and missile defense area of naval gun weapon system

远界约束为

$$\sqrt{(ia + a/2)^2 + (ja + a/2)^2 + (kb + b/2)^2} \leq D_{sj}$$

近界约束为

$$D_{sj} \leq \sqrt{(ia + a/2)^2 + (ja + a/2)^2 + (kb + b/2)^2}$$

高界约束为 $kb + b/2 \leq H_{max}$, 低界约束为 $H_{min} \leq kb + b/2$,

高低角约束为

$$\arctan((kb + b/2) / \sqrt{(ia + a/2)^2 + (ja + a/2)^2}) \leq \varepsilon_{max}$$

若空域格 $A(i, j, k)$ 满足上述条件, 则判定在舰炮拦截空域内。舰炮拦截空域集合为

$$G_{kill} = \{(i, k, j) |$$

$$D_{sj} \leq \sqrt{(ia + a/2)^2 + (ja + a/2)^2 + (kb + b/2)^2} \leq D_{sy},$$

$$H_{min} \leq kb + b/2 \leq H_{max},$$

$$\arctan((kb + b/2) / \sqrt{(ia + a/2)^2 + (ja + a/2)^2}) \leq \varepsilon_{max}\} \quad (9)$$

2.3.2 舰炮武器拦截占用空域资源

考虑舰载障碍物遮挡及舰炮发射时的弹丸散布, 舰炮有效射角 $\theta \in [\theta_1, \theta_2]$, 旋回角 $\delta \in [\delta_1, \delta_2]$, 则对满足射角约束的任一射击诸元 (θ, δ) , 舰炮弹丸占用资源模型如下所述。

1) 舰炮弹丸占用空域资源集合为

$$G'_{kill} = G_{\theta, \delta} \cap G_{kill} = \{i_n, j_n, k_n\} \quad n = 1, 2, \dots \quad (10)$$

2) 舰炮弹丸占用空域格时间集合为

$$T = \{\bar{t}_n | \bar{t}_n = g(i_n, j_n, k_n), (i_n, j_n, k_n) \in G'_{kill}\} \quad (11)$$

3) 拦截空域内任一空域格 $(i, j, k) \in G'_{kill}$, 舰炮射击火控诸元为 (θ, δ) , 即

$$Q = \{(\theta, \delta) | (i, j, k) \in G'_{kill}\} \quad (12)$$

2.3.3 拦截适宜性判断

分别求取目标运动轨迹空域集合 G_t 和舰炮弹丸在拦截空域内集合 G'_{kill} 。若目标运动轨迹与舰炮拦截空域有交集, 且占用空域格的时间差满足一定精度范围, 则舰炮可以拦截目标。拦截适宜性判断模型为

$$\begin{cases} G_t \cap G'_{kill} \neq \emptyset \\ |t_i - \bar{t}| = |f(G_t \cap G'_{kill}) - g(G_t \cap G'_{kill})| \leq \Delta t_{sy} = \frac{\sqrt{2a^2 + b^2}}{v_t} \end{cases} \quad (13)$$

2.4 火控诸元解算

2.4.1 火控诸元粗粒度解算模型

当目标运动轨迹空域集合 G_t 和舰炮质点运动在拦截空域内集合 G'_{kill} 不为空集且相遇时间满足一定精度范围时, 求取粗粒度的火控诸元 (θ_0, δ_0) 。

$$Q = \{(\theta_0, \delta_0) | (G_t \cap G'_{kill}) \in G_{\theta_0, \delta_0}\} \quad (14)$$

2.4.2 火控诸元细粒度解算模型

(θ_0, δ_0) 弹道落在空域格 (i, j, k) 的位置为 $X(\bar{x}_n, \bar{y}_n, \bar{z}_n)$, 若当前目标位置不在弹道落点, 而是位于当前空域格某个位置 $X_t(x_t, y_t, z_t)$, 则弹目误差较大, 需要修正射击诸元, 满足弹目误差精度要求。火控诸元细粒度解算模型为

$$\begin{cases} \theta_0 = \theta_0 + \frac{z_t - \bar{z}}{|z_t - \bar{z}|} \cdot \Delta\theta & z_t - \bar{z} \neq 0 \\ \delta_0 = \delta_0 + \frac{\arctan(x_t/y_t) - \arctan(\bar{x}/\bar{y})}{|\arctan(x_t/y_t) - \arctan(\bar{x}/\bar{y})|} \cdot \Delta\delta & \arctan(x_t/y_t) - \arctan(\bar{x}/\bar{y}) \neq 0 \end{cases} \quad (15)$$

取 $(\theta_0 + \Delta\theta, \delta_0 + \Delta\delta)$, 当落点位于空域格 (i, j, k) , 其位置为 $(\bar{x}', \bar{y}', \bar{z}')$, 占用时间(飞行时间)为 \bar{t}' , 两次落点的时间间隔为

$$\Delta\bar{t} = \bar{t} - \bar{t}' \quad (16)$$

目标的位置为

$$\begin{cases} x'_i = x_i + v_x \cdot \Delta \bar{t} \\ y'_i = y_i + v_y \cdot \Delta \bar{t} \\ z'_i = z_i + v_z \cdot \Delta \bar{t} \end{cases} \quad (17)$$

直到弹目距离满足距离精度要求

$$D = \sqrt{(\bar{x}' - x'_i)^2 + (\bar{y}' - y'_i)^2 + (\bar{z}' - z'_i)^2} \leq \varepsilon_D \quad (18)$$

式中, ε_D 为弹目距离精度。

2.4.3 火控诸元粗、细粒度解算流程

综上,火控诸元粗细粒度解算步骤为:1) 求解目标运动占用空域资源集合 G_t 和舰炮拦截空域资源集合 G'_{kill} ;2) 进行拦截适宜性判断,若适宜拦截,转入3),否则转入6);3) 求取粗粒度火控诸元;4) 判断弹目误差,若弹目误差满足精度要求,转入6),否则转入5);5) 判断目标和舰炮落点的空间几何位置,修正射击诸元 $\theta_0 = \theta_0 + [(z_i - \bar{z})/|z_i - \bar{z}|] \cdot \Delta\theta, \delta_0 = \delta_0 + [(\arctan(x_i/y_i) - \arctan(\bar{x}/\bar{y})) / |\arctan(x_i/y_i) - \arctan(\bar{x}/\bar{y})|] \cdot \Delta\delta$,计算弹目误差,转入4);6) 算法结束。

3 仿真分析

舰炮末端全航路反导仿真流程如图4所示。

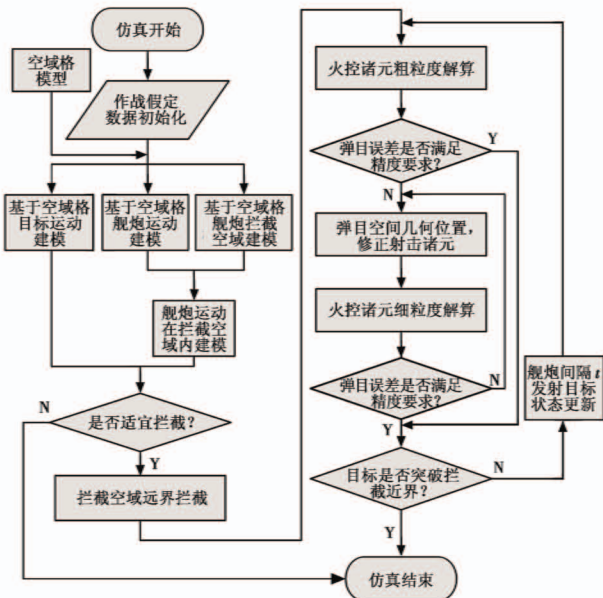


图4 基于空域格舰炮末端反导仿真流程

Fig.4 The simulation flow of naval gun missile defense based on airspace grid

3.1 作战假定

假定目标 T 在 t_0 时刻的位置坐标为(10 000,10 000,4200)(单位:m)、飞行速度为400 m/s、俯冲角为16.45°、航向角为225°,目标 T 在其全航路上均做等速直线运动;拦截目标 T 的近程舰炮初速为340 m/s,射击时间间隔为1 s,舰炮有效射击角度旋回角为 $-75^\circ \sim 75^\circ$,

射角为 $5^\circ \sim 85^\circ$,舰炮拦截远界为8000 m、近界为500 m、高界为5000 m,低界为10 m,高低角为 85° 。空域格水平尺度为10 m、垂直尺度为10 m。

3.2 舰炮拦截空域仿真

当旋回角 δ_0 一定, θ_0 步长为 5° ,舰炮质点运动时间取1~35 s,仿真得到垂直面内射角 θ_0 与舰炮弹丸空间位置的关系如图5所示,舰炮落点时间与舰炮在拦截空域内落点位置的关系如图6所示。

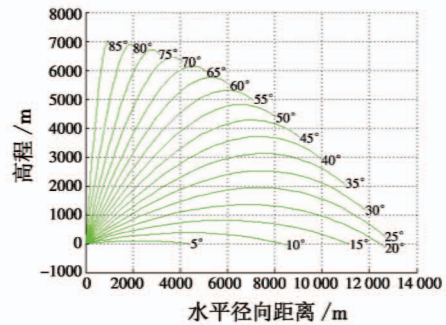


图5 射角变化舰炮质点弹道轨迹图

Fig.5 The trajectory map of naval gun with variation of departure angle

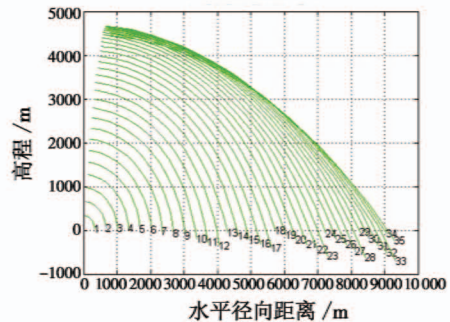


图6 时间变化舰炮质点弹丸落点图

Fig.6 The map of projectile falling points over time

3.3 舰炮末端反导全航路拦截仿真

舰炮全航路拦截过程为在拦截空域远界点开始拦截,近界点结束拦截,对目标全航路拦截仿真结果如图7所示。

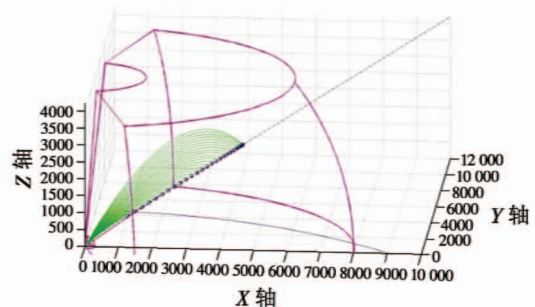


图7 近程舰炮全航路拦截仿真图

Fig.7 The simulation map of full route interception by naval gun weapon system

舰炮全航路拦截弹目相遇点占用空域资源如表1

所示,全航路射击诸元通过火控诸元粗、细粒度解算模型实时、快速解算诸元,不断修正弹目距离,调整武器射角和旋回角,使弹目距离逐渐收敛,全航路防空反导拦截射击诸元如表 2 所示。

表 1 弹目相遇点占用的空域资源

Table 1 The occupied airspace resource of projectile and target meeting point

空域格	<i>i</i>	429	427	425	422	418	413	407	400	393	384	375	364	353	341
	<i>j</i>	587	585	583	580	575	570	564	556	548	539	529	518	505	492
	<i>k</i>	173	173	172	170	169	166	164	161	158	154	150	146	141	136
空域格	<i>i</i>	328	314	300	286	270	254	238	221	204	186	167	148	128	108
	<i>j</i>	478	464	449	433	416	399	381	363	344	324	304	282	261	238
	<i>k</i>	130	124	118	112	105	98	91	84	77	69	61	53	44	36

表 2 全航路防空反导拦截射击诸元

Table 2 The firing data of full route air defense and missile defense

时间/s		射击诸元/(°)		落点位置/m			弹目距离/m
发射时间	落点时间	射角	旋回角	X	Y	Z	
0.00	35.00	43.72	0.63	4 288.80	5 870.73	1 733.43	12.30
1.00	33.95	42.72	0.63	4 273.70	5 854.06	1 727.55	9.97
2.00	32.91	41.72	0.63	4 251.02	5 829.81	1 717.59	9.74
3.00	31.88	40.73	0.63	4 219.42	5 795.89	1 703.90	8.75
4.00	30.84	39.76	0.63	4 177.43	5 750.59	1 686.01	7.53
5.00	29.81	38.78	0.63	4 128.95	5 698.91	1 664.51	7.06
6.00	28.78	37.82	0.63	4 070.77	5 636.36	1 639.43	6.28
7.00	27.74	36.86	0.62	4 002.76	5 563.39	1 609.89	5.98
8.00	26.71	35.91	0.62	3 926.84	5 481.56	1 577.44	5.79
9.00	25.68	34.96	0.62	3 841.90	5 389.96	1 541.15	5.32
10.00	24.64	34.01	0.62	3 747.48	5 288.08	1 500.87	4.67
11.00	23.60	33.04	0.61	3 643.62	5 176.45	1 455.95	4.63
12.00	22.58	32.07	0.61	3 530.58	5 054.29	1 407.86	4.31
13.00	21.54	31.09	0.61	3 409.20	4 923.66	1 355.51	4.20
14.00	20.51	30.09	0.60	3 280.34	4 784.86	1 299.99	4.00
15.00	19.48	29.07	0.60	3 144.75	4 638.93	1 241.44	3.78
16.00	18.47	28.05	0.59	3 003.15	4 485.86	1 180.90	3.31
17.00	17.43	27.01	0.58	2 855.68	4 327.37	1 116.82	3.28
18.00	16.43	25.97	0.58	2 702.90	4 161.27	1 052.17	3.27
19.00	15.40	24.90	0.57	2 544.55	3 989.59	984.52	3.09
20.00	14.38	23.80	0.56	2 380.53	3 812.37	913.71	3.02
21.00	13.36	22.67	0.55	2 211.01	3 628.73	840.74	2.96
22.00	12.34	21.51	0.53	2 036.30	3 437.82	766.48	2.91
23.00	11.31	20.27	0.52	1 855.65	3 241.04	688.86	2.90
24.00	10.31	19.00	0.50	1 670.18	3 035.91	610.62	2.86
25.00	9.28	17.61	0.48	1 478.70	2 824.15	529.00	2.86
26.00	8.24	16.04	0.46	1 279.93	2 606.45	442.38	2.85
27.00	7.26	14.39	0.43	1 079.59	2 376.64	358.57	2.76

4 结束语

本文运用了空域格模型思想对舰炮全航路防空反导进行了研究,采用弹道微分方程进行火控解算,建立了基于空域格的火控诸元粗、细粒度快速解算模型,具有较广适应范围和通用性;仿真计算了舰炮在对来袭目标全航路拦截过程中与目标相遇的时间和空域。当导弹轨迹与舰炮预测炸点在同一个时刻处于同一个格子时,可延缓舰炮或导弹的发射来避免冲突,其研究成果为编队舰炮发射末端与导弹火力兼容控制方法提供了一种新的思路。

空域格尺度大、计算量小,武器资源利用率低;反之,计算量大,武器资源利用率高。空域格尺度的大小要根据舰炮的爆炸杀伤区大小进行设置。合理的空域格尺度设置既能够简化计算,又能提高武器资源利用率,满足防空作战中对武器安全管理和综合控制的战术需求。

参考文献

- [1] 桂秋阳,邱志明. 基于垂直发射武器的火力兼容控制模型研究[J]. 指挥控制与仿真,2007,29(1):28-30.

(下转第 87 页)

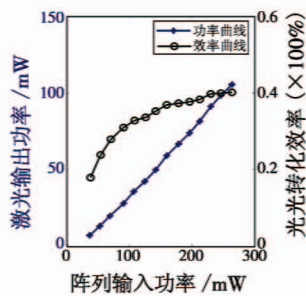


图 6 最佳耦合位置处的激光输出性能

Fig. 6 Laser output performance in the optimum coupling position

选用光学耦合系统 2, 泵浦焦点位置距离工作物质前端面 5.5 mm, 通过改变阵列的驱动电流来改变阵列注入的能量, 泵浦功率较小时, 随着阵列注入能量的提高, 激光器输出能量呈线性增长, 输出的能量暂时未达到饱和, 但是泵浦光-振荡光的光光转化效率却随着泵浦功率的增加逐步趋于饱和, 基于上述构型, LD 直接耦合端面泵浦激光器最大能获得 40% 的光光转化效率。

3 结论

通过对比两种不同的耦合光学系统, 研究了最佳泵浦耦合效率问题, 耦合系统的焦点与工作物质的相对位置会影响工作物质对泵浦光的吸收效率, 以及泵浦光场的空间分布, 泵浦光场与激光振荡光场分布重叠区域越大, 泵浦效率越高。基于此端面泵浦构型, 由实验验证可得, 将泵浦光的焦点聚焦至 4 mm × 4 mm × 10 mm 工作物质的前端面 5.5 mm 处, 能获得最佳的泵浦效果, 在上述最佳状态下, 激光器静态调试的光光转化效率最大能达到 40%, 激光动态输出的能量由光光转化效率和动

静比两者共同决定, 此高效率的 LD 直接端面泵浦系统能应用于对后续高能端泵激光器的设计, 对后续实现机载环境下的 LD 端泵激光器具有重要的指导意义, 并且此 LD 直接端面泵浦耦合系统的研究思路与方法对于后续光学耦合系统的设计具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] HAO Y C, NING J P, YANG J S, et al. Coupling systems in LD end-pumped solid-state lasers [J]. Laser Journal, 2002, 23(1): 25-27.
- [2] 薛珮瑶, 何燕波, 薄报学, 等. LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器耦合光学系统的设计[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2008, 31(1): 89-91.
- [3] 赵致民, 陈浩伟, 解慧明, 等. LD 端面泵浦全固态绿光激光器耦合系统研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2004, 34(6): 669-672.
- [4] 邢俊红, 焦明星, 刘芸. 自聚焦透镜在全固态激光器中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 127-131.
- [5] LAPORTA P, BRUSSARD M. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(10): 2319-2326.
- [6] KUBODDERA K, OTSUKA K. Single-transverse-mode LiNdP₄O₁₂ slab waveguide laser [J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(2): 653-659.
- [7] 马欲飞. 全固态高重频窄脉宽 Nd:GdVO₄ 激光器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 王成. LD 端面泵浦高重频电调 Q Nd:GdVO₄ 激光器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [8] 裴雪兵, 胥文清, 陈吉超. 一种装舰约束条件下的武器通道作战能力计算方法[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(2): 111-116.
- [9] 余戌瞳, 吴玲, 卢发兴. 舰艇摇摆下射界动态变化对武器目标分配的影响[J]. 兵工学报, 2015, 36(9): 1819-1824.
- [10] 俞晓飞, 杜新宇. 防空杀伤区拟合算法设计[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(9): 3470-3474.
- [11] 代进进, 李相民, 刘培培, 等. 舰艇编队网络化反导作战动态目标分配方法[J]. 电光与控制, 2013, 20(5): 15-20.
- [12] 黎子芬, 李相民, 代进进, 等. 编队对地动态联合火力分配建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(12): 2900-2905.

(上接第 69 页)

- [2] 桂秋阳, 邱志明. 垂直发射武器与舰炮武器火力交叉的判断[J]. 系统仿真实报, 2008, 20(1): 33-36.
- [3] 桂秋阳, 邱志明. 基于垂直发射武器的火力交叉判断模型[J]. 兵工学报, 2008, 29(11): 1373-1378.
- [4] 邱千钧, 石章松, 王航宇. 一种舰载多武器火力兼容优先级控制模型和方法[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(1): 68-70.
- [5] 李亦伟, 邢昌风. 射面交叉分析及武器控制方法研究[J]. 海军工程大学学报, 2007, 19(3): 94-97.
- [6] 王慕鸿, 周智超. 基于弹道仿真的舰艇近末端防空火力兼容判断方法[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(4): 113-117, 130.
- [7] 余亮, 邢昌风, 石章松. 协同防空作战中的空域资源建模[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(1): 54-59.