

王田田,尹宪志,李宝梓,等. 基于海拔高度的人影作业安全射界图订正[J]. 干旱气象, 2018, 36(2): 319-325. [WANG Tiantian, YIN Xianzhi, LI Baozi, et al. Revisal on Safe Firing Area Map of Weather Modification Operation Based on Altitude[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(2): 319-325], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-02-0319

基于海拔高度的人影作业安全射界图订正

王田田,尹宪志,李宝梓,黄山,丁瑞津,罗汉

(甘肃省人工影响天气办公室,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃 兰州 730020)

摘要:针对 37 mm 人影作业高炮炮弹推导质点外弹道的计算方法,模拟 0 m 海拔标准气象条件下的弹道诸元。结果发现:高海拔地区空气密度有所降低,弹丸飞行时的阻力加速度减小,射程相对较远,因此高海拔地区在绘制高炮安全射界图时,必须考虑海拔高度因素的订正;基于直接计算和弹道相似原理计算 2 种方法的未爆弹丸最大射程修正值差异较小,2 种方法均可准确计算高海拔地区炮弹落点,对高海拔地区的弹道轨迹修正更为精确,从而提高安全射界图的精细化程度。

关键词:人影作业;安全射界图;海拔高度;弹道计算

文章编号:1006-7639(2018)02-0319-07 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-02-0319

中图分类号:P48

文献标志码:A

引言

全球气候持续变化,间接影响着干旱^[1-3]、冰雹^[4]等极端天气气候事件的发生。同时,我国正处于经济快速发展阶段,对灾害性天气的应对需求越来越高,尤其是大范围的抗旱增雨、防雹减灾。人工影响天气(以下简称“人影”)是为了避免或者减轻气象灾害,而合理利用气候资源,在适当条件下通过科技手段对局部大气的物理、化学过程进行人工影响,实现增雨(雪)、防雹等目的的活动。目前,我国人影业务规模不断扩大,向云层发射催化剂的火箭、高炮等人影作业设备逐年增多,对于人影作业安全性的要求也不断提高。37 mm 高炮是我国开展地面人工增雨防雹的主要作业装备之一,使用的人影炮弹存在约 3‰~3% 的引信瞎火率^[5]。随着人口和建筑物密度的增大,地面人影作业的安全射击范围不断受到挤压限制。利用高分辨率卫星遥感(remote sensing, RS)资料,调查掌握作业点周围人口和重要设施分布情况,精确规范绘制和使用安全射界图,即作业点周围人口和重要设施成为禁射区,其他区域为可射击区,可以有效规避人影作业事故的发生。

随着 3S (geographic information system, remote

sensing, global positioning system) 技术的快速发展,地理信息系统(GIS)技术被引入人影工作中^[6-10]。结合 GIS 技术自动绘制安全射界图时,主要基于外弹道计算结果,利用危险系数进行安全性评估^[11]。对外弹道的研究多集中在弹丸飞行稳定性、飞行姿态的变化规律和落点散布规律等方面。此外,涉及弹丸外弹道特性仿真模拟^[12-14]及不同气象要素对外弹道特性影响^[15-17]的研究已取得诸多成果,如采用空气阻力来修正弹箭残骸的落点^[18-19]。然而,以往研究大多针对不同口径的火炮、榴弹等军事打击类武器,且局限于海平面高度,针对人影常用的 37 mm 高炮弹道进行海拔高度订正的研究相对较少。

我国一半以上的国土面积位于第二、第三阶梯,属于高原地区^[20]。高原地区空气密度较低海拔平原地区小,弹丸飞行过程中稳定性增加,阻力系数减小,从而未爆弹丸弹道与平原地区存在一定偏差。本文基于弹箭外弹道学原理^[21],对 37 mm 高炮弹道进行海拔高度订正,为高炮安全射界图的精细化绘制提供技术支撑。

1 人影作业安全射界图制作

为了提高人影高炮作业点的作业效率和安全

收稿日期:2017-09-10;改回日期:2018-03-05

基金项目:甘肃省人影作业点安全射界图制作系统(2017182)资助

作者简介:王田田(1991—),女,硕士研究生,工程师,主要从事人工影响天气研究. E-mail:wangtiantian7777@163.com。

性,同时实现数据的时像一致性,结合地理信息数据和高分辨率卫星影像,对高炮作业点进行作业区域的裁减和放大处理,以便能够清晰地分辨出作业区域周围的地物情况;编写程序读取地理信息数据和高分辨率卫星影像,并进行坐标校正。根据高炮作业点的经纬度和海拔高度,通过坐标转换,在影像上准确定位各作业点的位置,利用海拔高度对弹道的订正程序自动精确订正该作业点的弹道曲线,把弹道计算结果叠加在高分辨率卫星影像上,并严格按照中国气象局 37 mm 高炮人工影响天气作业点安全射界图绘制规范^[22],自动绘制精确的高炮安全射界图。

2 弹道计算

由经典牛顿动力学定律可知,37 mm 人影高炮弹丸射出炮口后,运动轨迹呈带有初始速度的抛物线,其位置和速度矢量可以从失去动力时刻进行积分得到。

根据质点弹道原理,以及人影 37 mm 高炮特点,对弹丸运动做如下假设:①弹丸运动期间攻角为 0;②弹丸是轴对称体;③地表面是平面,重力加速度为常数,方向垂直向下;④科氏加速度为 0;⑤气象条件为标准气象条件(地面气温 15 °C、虚温 288.9 K、空气密度 1.206 kg·m⁻³、地面气压 1 000 hPa、相对湿度 50%),无风雨。

以弹丸质心为原点建立自然坐标系,弹道切线(即弹丸速度矢量方向)为横轴,法线为纵轴,得到质点运动方程组^[21]如下:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = -CH(y)F(v) - g\sin\theta \\ \frac{d\theta}{dt} = -\frac{g\cos\theta}{v} \\ \frac{dy}{dt} = -v\sin\theta \\ \frac{dx}{dt} = -v\cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 、 y 、 v 、 θ 分别表示弹道水平距离(m)、弹道高度(m)、弹丸速度(m·s⁻¹)和弹道倾角(°); C 为弹道系数,反映弹丸自身特征对运动的影响,其计算公式如下:

$$C = \frac{id^2}{m} \times 10^3 \quad (2)$$

式中: i 为弹形系数, d 为弹丸直径(mm), m 为弹丸质量(kg)。

$H(y)$ 为空气密度函数,反映大气对弹丸飞行的影响:

$$H(y) = \frac{\rho}{\rho_{0m}} \quad (3)$$

式中: ρ 为弹丸所在高度的空气密度, ρ_{0m} 为地面标准空气密度(kg·m⁻³)。当 $y \leq 9\ 300$ m 时, $H(y)$ 可以近似为 y 的函数,表达式如下:

$$H(y) = (1 - 2.190\ 4 \times 10^{-5} y)^{4.399} \quad (4)$$

$F(v)$ 为空气阻力函数,反映空气对弹丸运动的影响:

$$F(v) = 4.737 \times 10^{-4} v^2 C_{x0N}(\text{Ma}) \quad (5)$$

式中:马赫数 Ma 是速度与当地音速的比值; $C_{x0N}(\text{Ma})$ 是一组标准弹的阻力系数 C_{x0N} 与马赫数 Ma 的关系,本文采用目前使用最多的弹丸空气阻力定律 43 a 阻力定律表插值获得。

从质点运动方程组(1)和方程(3)可以看出,高海拔地区空气密度有所减小,弹丸飞行时的阻力加速度也减小,在相同初速度下,弹丸飞行速度较高;在相同射角下,弹道的倾角变化率较小。因此,高海拔地区的弹道射程相对较远。

对微分方程组(1)进行求解,可获得未爆弹丸的弹道诸元。本文对常用的 83 型和 JD-89 型人雨弹的弹道轨迹进行测算,并与炮弹厂家提供的最大射程进行对比(表 1 和图 1)。其中 83 型人雨弹弹丸参数为:弹丸口径 37 mm,弹形系数 $i = 1$,质量 m 为 0.722 kg,初速度为 866 m·s⁻¹;JD-89 型人雨弹弹丸参数为:弹丸口径 37 mm,弹形系数 $i = 1$,质量为 0.6 kg,初速度为 950 m·s⁻¹。

由表 1 和图 1 可知,计算值与厂家提供的结果拟合度很高,能够很好地表征弹丸的运动轨迹。其中,在 60°~65°射角附近,其拟合度最高,几乎完全重合;射角小于 60°时,计算的最大射程略小于厂家数据;射角大于 65°时,计算的最大射程略大于厂家数据。整体来看,相对误差在 2% 以内。二者存在一定误差的主要原因为:一是本文为简化计算,对运动弹丸作了近似为质点的合理假设,二是由于 43 a 阻力定律表中的数值固定,在阻力系数 $C_{x0N}(\text{Ma})$ 插值计算时会产生误差。这两方面均属于不随海拔高度变化的系统误差。

3 高海拔地区弹道订正

在高海拔地区空气密度有所减小,有利于弹丸出炮口时陀螺稳定性的提高,同时也有利于出炮口弹丸的动态稳定性^[23-24]。在高原,弹丸的飞行稳定性较平原高。由此可见,基于海拔高度对高炮炮弹弹道订正的可应用性很强。

表1 不同类型37 mm 炮弹最大射程的计算值与生产厂家提供值对比
 Tab.1 Comparison of the maximum range of 37 mm anti-aircraft gun with different types calculated by this paper and provided by the manufacturer

射角/(°)	83 型			JD-89 型		
	计算值/m	厂家提供值/m	相对误差/%	计算值/m	厂家提供值/m	相对误差/%
45	9 438	9 596	1.6	8 706	8 814	1.2
50	9 222	9 331	1.2	8 509	8 543	0.4
55	8 812	8 866	0.6	8 057	8 095	0.5
60	8 191	8 190	0.0	7 456	7 462	0.1
65	7 308	7 298	0.1	6 633	6 639	0.1
70	6 230	6 191	0.6	5 656	5 626	0.5
75	4 912	4 877	0.7	4 466	4 429	0.8
80	3 407	3 378	0.9	3 084	3 068	0.5

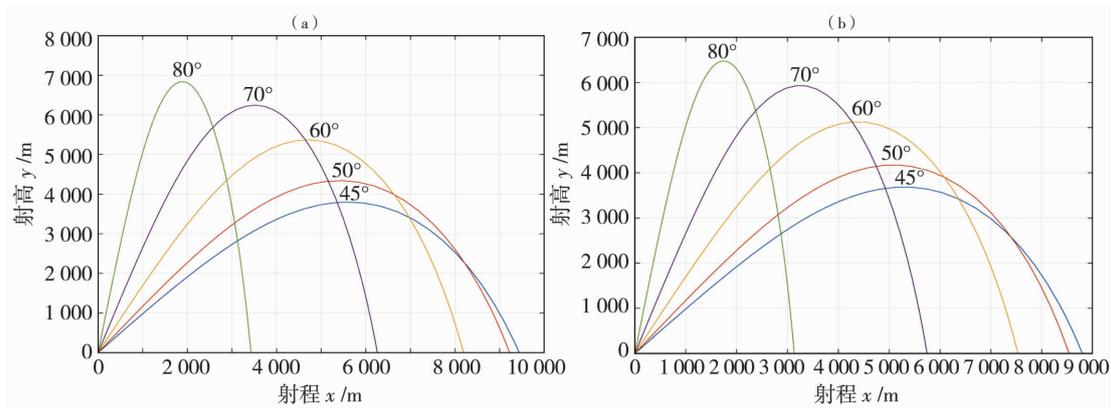


图1 83型(a)和JD-89型(b)人雨弹在0 m海拔处计算的外弹道轨迹

Fig.1 The calculated exterior ballistics trajectories for 83 type (a) and JD-89 type (b) projectiles at sea level

3.1 直接计算法

由质点弹道方程组(1)可见,质点弹道由 C 、 v_0 、 θ_0 三个参数确定,积分起始条件中, $x = y = 0$,故只要给定弹道系数 C 、初速度 v_0 和射角 θ_0 ,就可以对时间积分,从而得到任一时刻 t 的弹道诸元 x_t 、 y_t 、 v_t 、 θ_t 。然而,高海拔地区起始条件中 $y \neq 0$,故需将该地区的海拔高度代入起始条件 y 中进行积分,从而得到该地区的弹道。

3.2 弹道相似原理订正

由大气物理学原理可知,海拔高度的变化通常伴随着空气密度、气温和气压的变化,而气温、气压、空气密度对弹丸弹道的影响可由以下公式表示:

$$H(y) = \frac{\rho}{\rho_{on}} = \frac{P}{P_{on}} \times \frac{\tau_{on}}{\tau} \quad (6)$$

$$Ma = \frac{v}{\sqrt{kR_d\tau}} \quad (7)$$

式中: ρ_{on} 、 P_{on} 、 τ_{on} 为地面标准空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、

气压 (hPa)、气温 (K); k 为空气绝热指数,值为 1.4; R_d 为普适气体常数,值为 $287.06 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

当最大射高小于 9 300 m 时,可以用弹道相似法来修正高海拔地区弹道^[15]。所谓弹道相似,是将空气密度、气压和气温不同于海平面标准值时的质点运动方程组在形式上转变成与标准条件时完全一样,由此通过查询标准弹道表来换算非标准时的弹道诸元(最大射高、射程和飞行时间等)。

分别采用以上 2 种方法对 83 型和 JD-89 型人雨弹在 1 500 ~ 4 000 m 海拔高度上不同射角下的弹丸最大射程进行订正(表 2 和图 2)。可以看出,海拔高度对人雨弹射程的影响很大,在同一射角下,海拔高度对高炮射程的影响随着高度的升高而增大;同一海拔高度上,海拔高度对射程的影响随着射角的增大而减小。因此,高海拔地区在绘制高炮安全射界图时,必须考虑海拔因素的订正。

表 2 不同海拔地区 83 型和 JD-89 型人雨弹在不同射角下未爆弹丸的最大射程

		The maximum shooting range of 83 type and JD-89 type projectiles with different angles at different altitudes								单位:m
型号	海拔 高度/m	50°		60°		70°		80°		
		X1	X2	X1	X2	X1	X2	X1	X2	
83 型	0	9 331	9 331	8 190	8 190	6 191	6 191	3 378	3 378	
	1 500	10 337	10 436	9 226	9 212	7 001	6 988	3 844	3 817	
	2 000	10 774	10 869	9 544	9 617	7 313	7 306	4 018	3 992	
	3 000	11 706	11 727	10 464	10 424	8 017	7 941	4 403	4 344	
	4 000	12 824	12 723	11 502	11 367	8 816	8 687	4 877	4 757	
JD-89 型	0	8 543	8 543	7 462	7 462	5 626	5 626	3 068	3 068	
	1 500	9 535	9 616	8 527	8 452	6 483	6 397	3 538	3 494	
	2 000	9 933	9 989	8 859	8 798	6 786	6 668	3 709	3 643	
	3 000	10 809	10 842	9 689	9 595	7 451	7 295	4 103	3 990	
	4 000	11 815	11 799	10 648	10 499	8 247	8 010	4 556	4 387	

注: X1、X2 分别表示直接计算法和弹道相似法得到的最大射程。

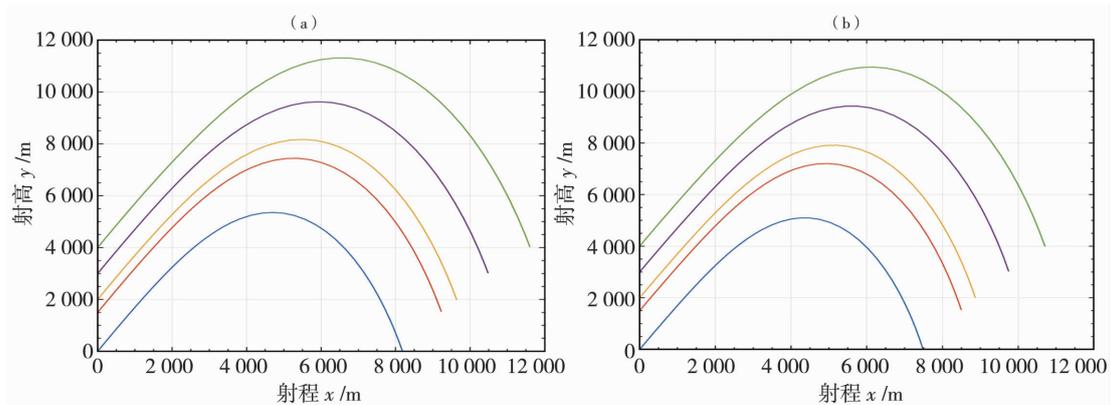


图 2 基于直接计算方法的 83 型 (a) 和 JD-89 型 (b) 人雨弹不同海拔高度下 60° 射角的外弹道轨迹

Fig. 2 The trajectories of exterior ballistics based on direct calculation method for 83 type (a) and JD-89 type (b) projectile with 60° shooting angle at different altitudes

另外,利用上述 2 种计算方法对 83 型和 JD-89 人雨弹在不同海拔高度下的最大射程订正值进行统计(表 3)。从表 3 可知,随着射角的增大,最大射程的订正值变小,这一现象在 JD-89 型人雨弹上表现得略微明显,这可能由于 JD-89 型人雨弹的质量较小、初速较大造成了弹道系数相比于 83 型人雨弹较大所致;海拔高度对两种人雨弹的最大射程订正值相差不多;2 种订正方法对射程的订正值($dX1$ 和 $dX2$) 之间的差异较小,平均差异在 10% 以内。由此可见,2 种方法都适用于人影高炮炮弹弹道的海拔高度订正和人影作业安全射界图的精细化绘

制。不过,出于高炮射击安全性考虑,绘制安全设计图时,建议采用订正值较大的方法来计算未爆弹丸落点。

为了便于手动绘制人影安全射界图作参考,表 4 和表 5 分别列出基于直接计算法的 2 种人雨弹在不同海拔高度(间隔 100 m)、不同射角(间隔 5°)下未爆弹丸的最大射程。利用表 4 和表 5 进行订正时,应注意 2 点:(1)采用线性内插法对海拔高度进行内插;(2)由于相同海拔高度上随着射角增大,射程呈非线性减小,因此,应采用非线性内插法对射角进行内插。

表3 83型和JD-89型人雨弹在高海拔地区不同射角下未爆弹丸最大射程订正量统计

Tab.3 The revisal statistics of the maximum shooting range for 83 type and JD-89 type projectile with different shooting angles at different altitudes 单位:m

型号	海拔 高度/m	50°		60°		70°		80°	
		dX1	dX2	dX1	dX2	dX1	dX2	dX1	dX2
83型	1 500	1 006	1 105	1 036	1 022	810	797	466	439
	2 000	1 443	1 538	1 354	1 427	1 122	1 115	640	614
	3 000	2 375	2 396	2 274	2 234	1 826	1 750	1 025	966
	4 000	3 493	3 392	3 312	3 177	2 625	2 496	1 499	1 379
JD-89型	1 500	992	1 073	1 065	990	857	771	470	426
	2 000	1 390	1 446	1 397	1 336	1 160	1 042	641	575
	3 000	2 266	2 299	2 227	2 133	1 825	1 669	1 035	922
	4 000	3 272	3 256	3 186	3 037	2 621	2 384	1 488	1 319

注:dX1、dX2 分别表示直接计算法和弹道相似法得到的最大射程订正值。

表4 基于直接计算法的83型人雨弹在不同海拔高度、不同射角下未爆弹丸最大射程

Tab.4 The maximum shooting range of 83 type projectile with different firing angles at different altitudes based on the direct calculation method 单位:m

海拔高度/m	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°
1 500	10 337	9 867	9 226	8 210	7 001	5 535	3 844
1 600	10 431	9 961	9 253	8 294	7 072	5 592	3 882
1 700	10 523	10 050	9 335	8 355	7 139	5 643	3 914
1 800	10 616	10 150	9 437	8 457	7 208	5 695	3 947
1 900	10 703	10 225	9 498	8 513	7 262	5 736	3 983
2 000	10 774	10 290	9 544	8 570	7 313	5 778	4 018
2 100	10 839	10 362	9 625	8 637	7 371	5 827	4 048
2 200	10 911	10 440	9 717	8 722	7 444	5 887	4 083
2 300	11 016	10 540	9 811	8 806	7 517	5 944	4 122
2 400	11 116	10 635	9 899	8 886	7 586	5 999	4 160
2 500	11 221	10 737	9 994	8 972	7 659	6 057	4 201
2 600	11 322	10 833	10 085	9 054	7 729	6 113	4 240
2 700	11 417	10 924	10 170	9 131	7 796	6 165	4 276
2 800	11 519	11 022	10 262	9 214	7 868	6 223	4 316
2 900	11 614	11 114	10 358	9 292	7 935	6 278	4 354
3 000	11 706	11 217	10 464	9 377	8 017	6 335	4 403
3 100	11 816	11 307	10 529	9 456	8 077	6 408	4 445
3 200	11 939	11 425	10 640	9 557	8 164	6 476	4 483
3 300	12 049	11 532	10 741	9 649	8 243	6 539	4 526
3 400	12 174	11 652	10 854	9 752	8 332	6 609	4 576
3 500	12 299	11 774	10 969	9 856	8 422	6 680	4 625
3 600	12 419	11 890	11 079	9 957	8 509	6 749	4 674
3 700	12 534	12 002	11 185	10 053	8 592	6 814	4 720
3 800	12 643	12 108	11 286	10 145	8 672	6 864	4 764
3 900	12 750	12 220	11 393	10 244	8 757	6 932	4 811
4 000	12 824	12 337	11 502	11 344	8 816	7 001	4 877

表 5 基于直接计算法的 JD-89 型人雨弹在不同海拔高度、不同射角下未爆弹丸最大射程

Tab. 5 The maximum shooting range of JD-89 type projectile with different firing angles at different altitudes based on the direct calculation method

单位:m

海拔高度/m	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°
1 500	9 535	9 123	8 527	7 609	6 483	5 113	3 538
1 600	9 613	9 198	8 577	7 733	6 542	5 160	3 573
1 700	9 692	9 274	8 648	7 797	6 584	5 208	3 606
1 800	9 771	9 351	8 721	7 862	6 642	5 256	3 639
1 900	9 852	9 430	8 794	7 927	6 699	5 305	3 674
2 000	9 933	9 509	8 859	7 994	6 786	5 354	3 709
2 100	10 016	9 590	8 945	8 061	6 844	5 405	3 746
2 200	10 099	9 672	9 023	8 130	6 909	5 456	3 782
2 300	10 184	9 755	9 101	8 200	6 975	5 508	3 819
2 400	10 270	9 839	9 181	8 272	7 043	5 561	3 857
2 500	10 357	9 924	9 262	8 345	7 111	5 616	3 895
2 600	10 445	10 011	9 344	8 419	7 230	5 671	3 934
2 700	10 534	10 099	9 427	8 495	7 287	5 727	3 975
2 800	10 624	10 188	9 511	8 572	7 345	5 785	4 015
2 900	10 716	10 279	9 597	8 650	7 403	5 845	4 056
3 000	10 809	10 371	9 689	8 730	7 451	5 905	4 103
3 100	10 903	10 464	9 773	8 812	7 570	6 027	4 141
3 200	10 998	10 559	9 864	8 895	7 641	6 088	4 184
3 300	11 095	10 655	9 956	8 979	7 713	6 150	4 228
3 400	11 194	10 753	10 050	9 065	7 787	6 213	4 273
3 500	11 293	10 852	10 145	9 153	7 862	6 275	4 319
3 600	11 395	10 953	10 242	9 243	7 939	6 338	4 365
3 700	11 498	11 055	10 341	9 334	8 017	6 402	4 413
3 800	11 602	11 159	10 442	9 426	8 097	6 467	4 462
3 900	11 708	11 265	10 544	9 521	8 169	6 533	4 512
4 000	11 815	11 373	10 648	9 617	8 247	6 600	4 556

4 结 论

(1) 大气密度、气压和气温等气象条件随着海拔高度变化而变化,因此海拔高度对弹道的影响较大,且这种影响随着海拔高度的升高而增大。因此,高海拔地区在绘制高炮安全射界图时,必须考虑海拔因素的订正。

(2) 高海拔地区空气密度有所减小,弹丸飞行时的阻力加速度也减小,在相同的初速度下,弹丸飞行速度较高;在相同射角下,弹道的倾角变化率较小。因此,高海拔地区的弹丸射程相对较远。

(3) 同一射角下,随着海拔高度的升高,最大射程的订正值增大;同一海拔高度上,随着射角的增大,最大射程的订正值减小,这一现象在 JD-89 型人雨弹上表现得略微明显。

(4) 基于海拔高度的外弹道方程组,直接计算法和弹道相似原理法计算的未爆弹丸最大射程订正值差异较小,这 2 种方法均可用于计算高海拔地区高炮未爆弹丸落点。

本文在进行弹道海拔高度订正时,仅计算了特定海拔高度的最大射程。然而,不同的高炮作业点海拔高度各异,在实际绘制安全射界图时,应按照不

同作业点所处海拔高度精确计算,从而提高绘制图的精细化程度。

参考文献:

- [1] 张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展,2015,30(2):196-211.
- [2] 胡蝶,郭锐,王丽娟,等. TRMM 降雨数据在甘肃省干旱监测中的应用[J]. 干旱气象,2017,35(3):374-382.
- [3] 陈斐,杨沈斌,王春玲,等. 基于 SPEI 指数的西北地区春旱时空分布特征[J]. 干旱气象,2016,34(1):34-42.
- [4] 钱莉,滕杰,杨鑫,等. 逐步消空法在祁连山区东部冰雹预报中的应用[J]. 干旱气象,2016,34(3):560-567.
- [5] 马官起,王洪恩,王金民,等. 人工影响天气三七高炮实用教材[M]. 北京:气象出版社,2011.
- [6] 陈怀亮,邹春辉,周毓荃. 人影决策指挥地理信息平台的建立和应用[J]. 南京气象学院学报,2002,25(2):265-270.
- [7] 王钊,邓凤东,刘贵华. 陕西人影决策指挥地理信息平台简介[J]. 陕西气象,2004(5):19-20.
- [8] 黄毅梅,陈跃,周毓荃,等. 基于 ArcGIS 的人工影响天气综合分析平台[J]. 气象,2007,33(12):116-120.
- [9] 王以琳,张新华,贾斌,等. 地面人影作业决策指挥系统建设的技术问题探讨[J]. 气象科技,2011,39(4):502-506.
- [10] 刘志,郝克俊. 基于 ArcGIS Python 的安全射界图自动化制作[J]. 气象科技,2016,44(5):816-821.
- [11] 黎祖贤,刘红武,廖俊,等. 基于外弹道计算的人影高炮作业安全评估方法[J]. 气象科技,2016,44(1):152-156.
- [12] 吴汉洲,宋卫东,张磊,等. 某型 130 mm 榴弹刚体弹道建模与飞行稳定性分析[J]. 火炮发射与控制学报,2015,36(3):17-22.
- [13] 杨翔,王雨时,闻泉. 应用阻力系数拟合曲线解析式数值解算外弹道诸元[J]. 弹箭与制导学报,2014,34(5):151-155.
- [14] TANG Y, HUANG P. Boost-Phase ballistic missile trajectory estimation with ground based radar[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2006,17(4):705-708.
- [15] 刘俊邦,张猛,朱建峰. 非标准气象条件下火炮外弹道仿真[J]. 指挥控制与仿真,2013,35(2):80-84.
- [16] 王兆胜. 气象条件的时空变化对炮兵分队射击精度的影响[J]. 弹道学报,2010,22(2):103-106.
- [17] 杨凡,黄明政,薛允传,等. 基于高分辨率卫星影像的高炮作业点安全射界图的制作[J]. 气象,2008,34(4):124-126.
- [18] 倪庆乐,王雨时,闻泉,等. 弹丸空气阻力定律全定义域解析函数经验公式[J]. 弹箭与制导学报,2017,36(6):101-104.
- [19] 何京江,魏志东,董继辉,等. 采用空气阻力修正的火箭残骸落点算法[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2012,35(10):99-103.
- [20] 蒋明,刘玉文,李泳,等. 我国高原气象条件及其对火炮外弹道特性影响[J]. 兵器装备工程学报,2016,37(5):7-11.
- [21] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014.
- [22] 中国气象局. 37 mm 高炮人工影响天气作业点安全射界图绘制规范(QX/T 256—2015)[S]. 北京:气象出版社,2015.
- [23] 王良明,钱明伟. 高原环境对高炮外弹道特性的影响[J]. 弹道学报,2006,18(1):18-21.
- [24] 王基组. 关于弹道气象误差的弹迹偏差分析[J]. 火力与指挥控制,2000,25(1):66-69.

Revisal on Safe Firing Area Map of Weather Modification Operation Based on Altitude

WANG Tiantian, YIN Xianzhi, LI Baozi, HUANG Shan, DING Ruijin, LUO Han

(Gansu Weather Modification Office, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The calculation method of particle external trajectory of 37 mm anti-aircraft gun was deduced, and the method was widely used to simulate the ballistic parameters data under the standard atmospheric conditions at sea level in the field of weather modification. The results show that the air was thinner over high altitude area, so the flying resistance of shell in the air reduced, and then the projectile had a longer range. Therefore, the revisal of elevation must be considered when drawing safe firing area map at weather modification sites. The difference of the maximum firing range correction between the direct calculation method and ballistic similarity theory calculation method was smaller. Both of two methods were able to accurately calculate the projectile landing point in high altitude area and improve precision of safe firing area map.

Key words: weather modification operation; safe firing area map; altitude; external trajectory calculation