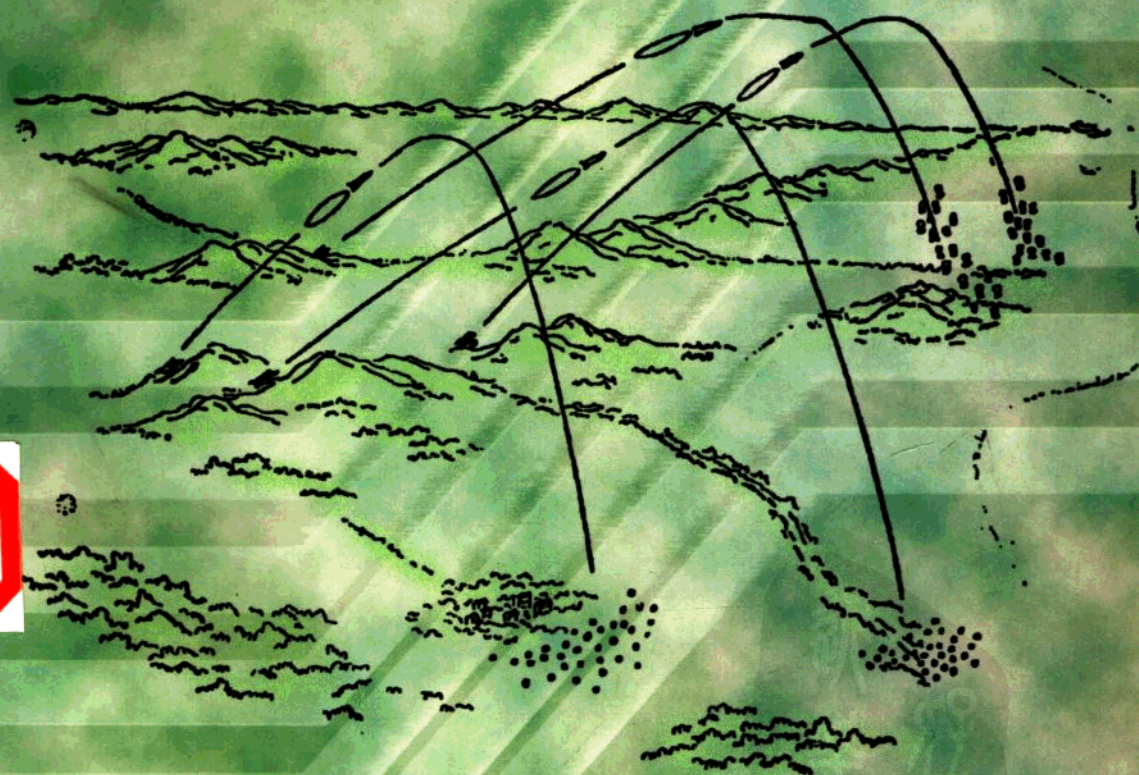


布雷外弹道学

BU LEI WAI DAN DAO XUE

(理想弹道部分)

刘松培 编著



兵器工业出版社

前 言

布雷外弹道学(理想弹道部分)所要解决的问题,是研究普通布雷弹、火箭布雷弹及雷伞系统在理想状态下的飞行轨迹,并寻求在不同的已知条件(参数)下,如何设计布雷弹道、计算火箭布雷弹出口(o)及主动段终点(K)弹道诸元、计算普通布雷弹或火箭布雷弹开舱点(op)、顶点(S)和落点(C)弹道诸元,以及计算雷伞系统临界点(cr)和着地点(im)弹道诸元的科学。

由于它直接涉及普通布雷弹或火箭布雷弹的弹形、速度、开舱装置所采用的抛射动力、开舱形式以及雷伞系统的阻、重力配比等,从而使这门学科成为从事布雷工作研究、设计、试验和生产的工程技术人员所必须具备的基础科学技术知识。又由于本书所述内容具有一般性和普通性,它同样适用于一般的火箭、炮弹、照明弹和宣传弹等,故亦可供从事上述专业的工程技术人员研究、设计时参考。

时至今日,外弹道学尤其理想弹道部分,可以说已成为一门具有较好完整性和系统性的学科,若想创新和突破,实非易事,每前进一步,均会感到步履维艰。

一般外弹道学、火箭外弹道学的理论和公式,虽解决了弹丸、火箭等飞行运动的共性问题,但每门学科均有其特殊性,布雷外弹道亦不例外,如临界点(cr)、着地点(im)等弹道诸元的计算,就需在一般外弹道公式的基础上加以演变和延拓。同时,进行布雷实弹射出时,在试验阶段,往往要多次修改既定的参数,如调整射角 θ_0 等,若要计算对应的火箭布雷弹主动段终点 K 弹道诸元,利用已有的公式,由于借助表格函数较多,就得反复地查表和插值,或需以带有专用弹道程序的计算机进行计算。这对野外条件,尤其是在非正规靶场进行布雷试验时,因条件简陋,而殊感计算不便。针对工程布雷试验的特殊性,本书在第五章中以“近似函数法”、“近似解法”建立了两组公式,利用这些公式无需反复查表即可求解。

自70年代初,我国研制出第一代火箭布雷系统以来(一些军事技术较发达的国家则更早),迄今已20余年。在此期间,火炮、火箭等布雷技术得到迅速发展,布雷武器系统在不断地更新换代,但有关“布雷外弹道”的理论、设计和计算等资料却是凤毛麟角,专著更缺。我在从事多年的布雷工作中,深感这方面资料的重要性,并由此激发了写作热情,但写作过程却是断断续续、写写停停,有时甚至一搁了之。这除了因忙于其它工作外,更因感到水平不高、见识浅薄,怕写不好,错误太多而贻笑大方。

人类知识的丰富本来就是不断发展、不断更新、不断积累的过程,其间一定经历过从无至有,从一鳞半爪至日臻完善,故最后还是决定写出来,以作抛砖引玉之用。

本书承梅凤翔教授审校,李明达高级工程师、吕福生高级工程师等提出过宝贵意见,在此,一并表示衷心感谢!

限于水平,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编著者

1996-12-08

目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1 布雷弹的主要组成及分类	(1)
§ 2 布雷弹的工作原理及用途	(3)
§ 3 布雷外弹道学(理想弹道部分)的研究对象及其任务	(4)
§ 4 本书特点、常用术语和符号	(4)
第二章 布雷外弹道学的预备知识	(11)
§ 1 作用于布雷弹上的主要力	(11)
§ 2 重力及重力加速度	(11)
§ 3 空气阻力及阻力加速度	(13)
§ 4 火箭发动机推力及推力加速度	(22)
第三章 布雷弹质心运动方程组	(26)
§ 1 基本假设	(26)
§ 2 布雷弹质心运动的标量方程组	(27)
第四章 真空中的弹道方程组	(31)
§ 1 普通布雷弹的真空弹道	(31)
§ 2 火箭布雷弹质心在定向器上的运动	(36)
第五章 主动段终点 K 弹道诸元的计算方法	(40)
§ 1 迭代法	(41)
§ 2 近似函数法	(46)
§ 3 近似解法	(52)
第六章 普通布雷弹全程或火箭布雷弹被动段的弹道解法	(57)
§ 1 普通布雷弹顶点和落点弹道诸元的计算方法	(57)
§ 2 火箭布雷弹被动段的弹道解法	(62)
§ 3 开舱点(op)弹道诸元的计算方法	(65)
第七章 雷伞系统运动方程及其近似解法	(73)
§ 1 运动概况	(73)
§ 2 雷伞系统运动方程	(74)

§ 3 运动方程的近似解法.....	(77)
第八章 布雷外弹道的设计	(89)
§ 1 布雷外弹道的战术技术指标.....	(89)
§ 2 需确定和选择的参量.....	(90)
§ 3 计算布雷弹整弹(不开舱)的顶点和落点弹道诸元.....	(92)
§ 4 等程弹道.....	(93)
§ 5 确定开舱点(<i>op</i>).....	(96)
§ 6 计算临界点(<i>cr</i>)和雷着点(<i>im</i>)弹道诸元.....	(98)
主要参考文献	(112)
附录 A 与布雷外弹道学相关的各种表格	(113)
A1 $g-y$	(113)
A2 g_y-y	(113)
A3 $\tau-y$	(114)
A4 $a-y$	(115)
A5 $\pi(y) = p(y)/p_{on} = \exp\left(-\frac{1}{R_1}\int_0^y \frac{dy}{\tau}\right)$	(115)
A6 $H(y) = \rho(y)/\rho_{on} = \frac{\tau_{on}}{\tau}\pi(y)$	(116)
A7 饱和蒸汽压力	(117)
A8 西亚切阻力定律 $C_{zon}(Ma)$	(117)
A9 1943年阻力定律 $C_{ron}(Ma)$	(118)
A10 1943年阻力定律的 $F(v_r)$	(118)
A11 $K(\mu) = \ln \frac{1}{1-\mu}$	(124)
A12 $K_1(\mu) = (1-\mu)\ln(1-\mu) + \mu$	(126)
A13 $K_2(\mu) = -\int_{0.01}^{\mu} \frac{d\mu}{\ln(1-\mu)}$	(127)
A14 $L(v) = \int_0^v F(v)dv$	(127)
A15 $R(v) = \frac{L(v)}{v}$	(128)
A16 $\xi(\theta) = \int_0^\theta \frac{d\theta}{\cos\theta} = \ln \frac{1+\sin\theta}{\cos\theta}$	(129)

第一章 绪 论

§ 1 布雷弹的主要组成及分类

布雷弹的定义:作为载雷体,自发射原点飞出后,经空中飞行,在弹道上的预定点(开舱点)抛射出一簇可撒布地雷的弹丸。

这里的“弹丸”泛指火箭或炮弹。为便于区分,今后凡以火箭作载雷体的称为火箭布雷弹;以炮弹等作载雷体的称为普通布雷弹(有时亦简称为布雷弹)。由于有制导(有控)的火箭即导弹,通常不用于布雷,故不列入本书的内容。

§ 1.1 主要组成

布雷弹的种类很多,结构各异,但究其主要组成可概括为以下几个部分。

一、战斗部

战斗部由雷舱、可撒布地雷簇及风帽等组成。

1. 雷舱 雷舱为装载地雷簇的壳体,通常设计成圆柱形。有的结构,内侧表面镶有桁条,以增加强度及在抛射地雷簇时起导向作用。

2. 地雷 地雷为可撒布型。为使地雷能稳定而缓慢地降落,其上大多装有雷伞或雷翼,且设计有特殊的着地机构,以提高地雷的站立率。

3. 风帽 风帽的作用是维护气动力外形。为多增载雷数,布雷弹风帽的外形大多设计成大锥角的锥形或截锥形,即使制成弧形,其弧形部也较其它的弹种短。

二、发射动力

布雷弹所采用的发射动力与一般的火箭或炮弹相同。但有的近距离布雷弹常采用高低压腔或以火药直接抛射作为动力。

三、开舱装置

此装置由开舱引信、抛射机构及其它附件所组成。

1. 开舱引信 以往常采用机械式钟表引信或延期药盘引信,随着现代电子技术的发展,目前,均采用精度较高的电子定时引信。

2. 抛射机构 其作用是产生抛射动力,将可撒布地雷簇推出舱外。通常采用火药产生的高温高压气体作动力源,亦有少数利用弹簧释放能量作动力源;

3. 附件 附件主要为传力件,其作用是将抛射机构产生的推力传递于雷底。若采用火药作动力,还需附加密封件,以防止所产生的气体在膨胀作功(推雷过程中)大量外泄。

四、稳定装置

利用火炮进行布雷的布雷弹,其稳定装置或稳定方式通常与同种类的弹丸无异;利用火箭布雷的火箭布雷弹,为在可能条件下装载较多数量的地雷,一般不采用弹长受到限制的涡轮式,而采用尾翼式。利用迫击炮布雷,其弹丸一般采用长弹结构。

火箭布雷弹的结构如图 1 所示。

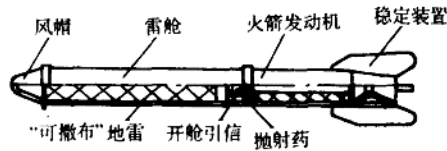


图 1 火箭布雷弹结构示意图

§ 1.2 分类

根据不同准则,布雷弹可进行不同分类。

一、按可撒布地雷种类划分

可分为防坦克布雷弹(雷舱内装防坦克地雷簇),防步兵布雷弹(雷舱内装防步兵地雷簇),以及防步兵坦克布雷弹(按一定配比,雷舱内既装有防坦克地雷,亦装有防步兵地雷)。

二、按发射动力划分

可分为以火箭发动机作动力的火箭布雷弹,以火炮(包括榴弹炮、迫击炮等)发射的普通布雷弹,及以高低压腔,甚至抛射药筒作动力的单兵布雷弹。

三、按运载形式划分

可分为车载式,组合式及便携式三种。

1. 车载式 车载式主要用于中、远程火炮及火箭布雷系统。这不仅因为中、远程布雷弹本身较重,需要车辆运载,尚因为达到中、远射程后,弹的散布距离相对增大,布雷密度也相应下降,必须单车甚至数车齐射,方可形成布雷密度达到具有足够杀伤力的雷场。

2. 组合式 组合式主要用于近程布雷系统。由于射程近,要求武器本身应具有一定的灵活性和隐蔽性,因此不适于车载。而整个系统的质量又不宜单兵携带,故采用组合式,由两人以上携带。现场组合完成阵地作业,如迫击炮布雷系统、近程火箭布雷系统等。

3. 便携式 这种形式为单兵近距离布雷弹所采用。为减轻质量,缩短阵地作业时间,单兵布雷弹通常将包装筒(箱)与发射筒(箱)制成一体,再加上背具即呈便携式,宜于单兵携带、作业。

四、按布雷射程的远近划分

对布雷射程的远近,很难作出严格的划分界限。因为它不仅与一个国家的布雷技术发展有密切关系,且与该国的武器装备、不同射程上的火力配系有关。更为重要的因素,是该国军队各级所属炮兵阵地至前沿的距离。70 年代末 80 年代初,曾一度认为布雷射程在 10km 以内的为近程(配属营、团一级);在 10~20km 的为中程(配属师一级);在 20km 以上的为远程(配属集团军以上)。现代,随着武器技术的发展,军队各级对所配属的布雷武器系统的射程要求也愈来愈远。按布雷射程,大致可分为:

1. 远程布雷弹 射程大于 40km(配属集团军以上);
2. 中程布雷弹 射程为 20~40km(配属师一级);
3. 近程布雷弹 射程小于 20km(配属营、团级);
4. 近距离布雷弹 射程小于 1km(由单兵携带)。

§ 2 布雷弹的工作原理及用途

§ 2.1 工作原理

布雷弹发射后经空中飞行,达预定时间或高度,开舱引信动作,点燃抛射机构中的抛射药(或释放机构中的弹簧),产生大量的高温高压气体(或产生机械力),作用于推板上,再通过传力圈将力传于雷底。当作用力达到一定值后,闭锁器即解脱,地雷簇即由雷舱中抛出。

地雷簇出舱后,在分离机构的强制作用下,地雷相互迅速分离,其上的雷伞或雷翼很快便充气或张开,制动能力猛增,迫使雷伞系统因受阻而减速,运动方向也逐渐改变,趋于垂直地面。当运动速度降低至一定值后,作用于雷伞系统上的阻力和重力会接近相等(处于动平衡状态),达到所谓“临界速度”。然后以此速度下降,直至落地或插入地面。在下降过程中,由于高度和倾角的变化,实际上,下降速度并不为常值,而稍有变化。

发射多发布雷弹,抛射出大量的可撒布地雷,落地后即构成雷场。落地后的可撒布地雷,达到预先设定的延期时间后,即开始工作,处于警戒或待发状态,从而完成了布雷任务。

由于现代可撒布地雷,大多采用带有雷伞的结构形式,况且雷翼的作用与雷伞并无实质性的区别,故以后无论是带雷伞,还是带雷翼的可撒布地雷,均统称为“雷伞系统”。

§ 2.2 用途

雷场中的可撒布地雷,一旦处于警戒或待发状态,即担当起迟滞、杀伤敌步兵或击毁敌坦克的任务。

利用布雷弹布雷,改变了传统的人工敷设地雷的方法,将属于防御手段之一的地雷变成了具有进攻能力的武器,收到了快速、机动布设地雷场的效果。

布雷弹的主要用途是实施机动、快速地布设雷场,以阻止、迟滞敌方的行动,为己方赢得时间、创造战机。若敌方强行通过所布雷场,其步兵会遭到大量杀伤,其坦克会遭到大量击毁或重创。具体运用如下:

一、进攻战斗中

1. 在己方攻占的阵地前沿,快速布设雷场,以阻止、迟滞敌方的反扑。
2. 在敌方后撤或增援的必经地域,快速布设雷场,以阻止、迟滞敌方的撤退或增援。

二、防御战斗中

1. 当预设雷场遭到破坏时,实施快速补设雷场;
2. 对战事前未能预先设置地雷的地域,以及已遭到敌方突破的突破口前沿,实施快速增设雷场。

三、特殊运用

1. 远程布雷弹可深入到敌方的坦克、步兵集结地,或他们必经之地实施快速布雷,以打乱敌方的部署。

2. 单兵便携式布雷器则用得更为灵活,在阻止敌方追击或撤退的小分队战斗中,以及侦察遭遇战中均可实施近距离快速布雷。由于携带方便,空降兵还可用来执行特殊任务,如突袭包围敌兵营、军用机场、重要军事据点及实施等。

§ 3 布雷外弹道学(理想弹道部分)的研究对象及其任务

§ 3.1 研究对象

布雷外弹道学(理想弹道部分)是根据普通外弹道学和火箭外弹道学的有关理论,针对本门学科的特点,解释和研究布雷弹和雷伞系统在飞行中的运动规律,并建立有关数学力学模型和公式,用以计算外弹道诸元的科学。布雷弹的运动,究其本质而言,与普通弹丸或火箭无异,都遵守同样的力学定律,并可用同样形式的微分方程来描述其运动规律。因此,本书中建立的有关公式和计算方法,具有一定的共性,同样亦适用于其它类型的弹丸。但是,由于布雷外弹道的特殊性,它的研究对象不仅是开舱前布雷弹质心运动的规律,尤其着重开舱后雷伞系统质心运动的规律,以合理地选择或确定各设计参量。

时至今日,对布雷外弹道的计算,国外一些军事技术较先进的国家和我国的一些有关研究单位、工厂,多采用电子计算机进行,这可以得到快速、准确的结果。然而,近似解析计算仍有其独到的长处。首先,近似解析计算利于分析各种因素之间的相互关系和影响;其次,藉助有关的近似解析公式,可以进行简化计算或估算,这对研究设计工作的初期阶段尤为必要。

§ 3.2 任务

布雷外弹道学(理想弹道部分)的主要任务是根据(或选择)已知(或待定)的参量,设计、计算满足于既定战术技术指标的布雷外弹道,从而确定其布雷场中心的最大射程(或最小射程)。具体可概括为以下内容:

1. 选择或确定布雷弹的结构或特性参数,设计和计算满足于既定战术技术指标的布雷弹道;
2. 计算对应于布雷最大(或最小)射程的开舱时间(或高度),以为开舱引信的定时(或定高)提供依据;
3. 计算临界点的“临界速度”,以给雷体,着陆机构等的强度设计提供依据。

§ 4 本书特点、常用术语和符号

§ 4.1 本书特点

本书是关于布雷外弹道内容的专著。书中对布雷工作者极为感兴趣的问题——如何设计计算满足于既定战术技术指标的布雷外弹道一事做了较详细的分析和阐述,并研究了雷伞系统(质心)在空中的运动规律,用近似解析方法建立了一系列计算临界点、雷着点等特征点弹道诸元的公式。对火箭布雷弹主动段终点 K 弹道诸元的计算,除介绍了原习用的近似解析法外,又提出了两种新的解法——近似函数法和近似解法。近似函数法是在不同的 v 值区间,将表格函数 $R(v)$ 以近似函数的形式表示,由于函数 $R(v)$ 有了连续性,因而在求解方程组时不需反复地查表和插值。近似解法是以一组近似公式——代数方程组来代替原微分方程组。由于近似公式的形式简单、易于求解,有关工程技术人员,用此组公式进行迅速、简便的计算即可获得主动段末端 K 点弹道诸元。对于主动段不长的火箭布雷弹,利用此组公式(又称经验公式)可获

得较为准确的结果。

为使学者能够迅速掌握布雷外弹道的计算方法,作者以深入浅出的手法,在书中列举了大量的算题。

§ 4.2 术语和符号

基于理想弹道的假设,开舱前,火箭布雷弹的质心运动及开舱后雷伞系统的质心运动,可将二者运动轨迹的连线视为一条连续的平面曲线(o, op, im),如图 2 所示。图中的双点划线表示整弹(不开舱)时,火箭布雷弹后续运动的轨迹。

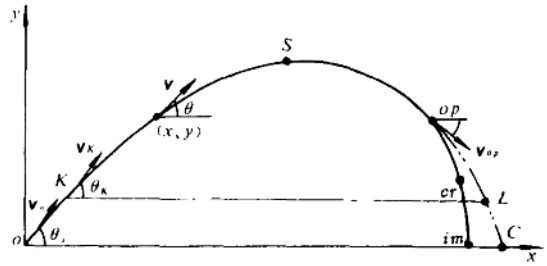


图 2 火箭布雷弹布雷弹道轨迹示意图

在布雷外弹道计算中常采用下列术语和符号。

一、术语

弹道——布雷弹质心运动的轨迹;

射击平面——通过炮管或定向器纵轴

线的铅垂面,以 xoy 表示。其中 ox 轴平行水平面,指向由左至右, oy 轴铅垂向上;

发射原点——为便于计算,通常取炮管或定向器前端作为坐标原点,以 o 表示;

初速——布雷弹飞离发射原点瞬间的速度(或补偿后效作用后的虚拟速度),以 v_0 表示;

射角——炮管或定向器纵轴线与水平轴 ox 间的夹角,以 θ_0 表示;

主动段——火箭布雷弹后定心部脱离定向器前端至发动机停止工作时的飞行区间;

被动段——火箭布雷弹主动段结束后的飞行区间;

临界段——雷伞系统脱离雷伞前端(或后端)后,至其上所受空气阻力与重力相互近似平衡时的飞行区间;

着地段——临界段结束后,雷伞系统的飞行区间;

升弧段——从 o 点与 S 点的一段弹道;

降弧段——从 S 点至 im 点(或 C 点)的一段弹道;

主动段终点——发动机停止工作时,火箭布雷弹的质心所处的位置,以 K 表示;

弹道顶点——弹道最高点,以 S 表示;

开舱点——开舱引信启动抛射机构瞬间,布雷弹质心在弹道上所处的位置,以 op 表示;

临界点——雷伞系统所受的空气阻力与重力相互接近平衡(动平衡)时的速度称为“临界速度”。达临界速度瞬间,雷伞系统质心所处的位置称为临界点,以 cr 表示;

雷着点——雷伞系统质心轨迹与炮口水平面的交点,以 im 表示;

落点——布雷弹整弹(不开舱)质心轨迹再次与炮口水平面的交点,以 C 表示;

弹道诸元——某瞬间,布雷弹或雷伞系统在空中的质心坐标及质心速度的数值与方向的诸参量。时间以 t 表示,质心坐标以 x, y 表示,速度的数值以 v 表示,速度矢量与水平轴间的夹角称弹道切线倾角,以 θ 表示。

二、专用符号

弹道上任意点与主要点的弹道诸元符号,如表 1.1 所示。

表 1.1 弹道上任意点与主要点的弹道诸元符号

质心位置	任意点 N	发射原点 o	主动段终点 K	顶 点 S	开舱点 op	临界点 cr	雷着点 im	落点 C
坐 标	x, y	x_0, y_0	x_K, y_K	$x_s, y_s = Y$	x_{op}, y_{op}	x_{cr}, y_{cr}	$x_{im} = X_B$ $y_{im} = 0$	$x_C = X$ $y_C = 0$
速 度	v	v_0	v_K	v_s	v_{op}	v_{cr}	v_{im}	v_C
倾 角	θ	θ_0	θ_K	$\theta_s = 0$	θ_{op}	θ_{cr}	θ_{im}	θ_C
飞行时间	t	t_0	t_K	t_s	t_{op}	t_{cr}	$t_{im} = T_B$	$t_C = T$

表中的某些符号具有专用名称：

X ——射程(系指布雷弹整弹)(m)；

X_B ——布雷射程(m)；

Y ——弹道顶点高(m)；

T ——全飞行时间(系指布雷弹整弹)(s)；

T_B ——与布雷射程 X_B 相对应的飞行时间(s)；

v_C ——落速(系指布雷弹整弹)(m/s)；

v_{im} ——雷着速(系指雷伞系统)(m/s)；

θ_C ——落角(系指布雷弹整弹)(°、'、")；

θ_{im} ——雷着角(系指雷伞系统)(°、'、")。

三、主要符号

A_0 参量, 见式(6-3-3)

A_1 参量, 见式(6-2-6)

$A(U)$ 西亚切主要函数

a 声速, 见式(1-2-16) (m/s)

a_k 科氏加速度 (m/s²)

a_p 推力加速度, 见式((1-3-12)(m/s²)

a_x 空气阻力加速度, 见式((1-2-23)(m/s²)

B_1, B_2, B_3, B_4 参量, 见式((4-1-17)②, ③, ④, ⑤)

b_1, b_2 常量, 一般取 $b_1 = 200\text{m}, b_2 = 500\text{m}$

C 布雷弹整弹(不开舱)落点

c 弹道系数, 见式(1-2-20)

c_K 火箭布雷弹被动段弹道系数, 见式(5-2-2)

c' 修正后的弹道系数, 见式(5-1-3)

cr 雷伞系统临界点

$C_{x_0}(M_0)$ 或 $C_{x_0}\left(\frac{v}{a}\right)$ 空气阻力系数

D_{cr} 函数, 见式(6-4-2)

$D(U)$ 西亚切主要函数

d 弹径(mm)

d_m 雷径(mm)

d_s 伞衣最大直径(mm)

e 空气中水蒸气压力(Pa)
 F_p 火箭发动机推力(N)
 $F(v)$ 声速 $a=a_m$ 时的阻力函数
 $F(v, a)$ 阻力函数, 见式(1-2-21)
 $F(v_r)$ 阻力函数, 见式(1-2-24)
 $f_0, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6$ 西亚切辅助函数, 见式(5-1-2)
 $f(\theta)$ 函数, 见式(6-2-8)
 G 重力, (N)
 G_1 地心引力(N)
 $G(v, a)$ 函数, 见式(1-2-28)
 g 重力加速度(m/s^2)
 H_r 弹头弧形部长度(mm)
 $H(y)$ 空气密度函数, 见式(1-2-12)
 $H_{cr}(y)$ 临界段内空气密度函数, 见式(6-2-1)①
 $H_{im}(y)$ 着地段内空气密度函数, 见式(6-2-1)②
 I 火箭发动机总冲量, 见式(1-3-8)(N·S)
 I_1 火药比冲量, 见式(1-3-10)(S)
 $I(U)$ 西亚切主要函数
 i 布雷弹弹形系数
 im 雷伞系统雷着点, 亦称着地点
 i_{sy} 雷伞系统弹形系数
 K 主动段终点
 k 气体绝热指数, 或函数, 见式(6-2-4)
 $K(\mu)$ 函数, 见式(4-1-3)
 $K_1(\mu)$ 函数, 见式(4-1-14)
 $K_2(\mu)$ 函数, 见式(4-1-11)
 $L(v)$ 函数, 见式(4-1-5)
 Ma 马赫数, $Ma=v/a$
 m_0 火箭布雷弹起始质量(kg)
 m_K 火箭布雷弹被动段质量(kg)
 m_w 火箭发动机发射药质量, $m_w=m_0-m_K$ (kg)
 m_{sy} 雷伞系统质量(kg)
 n_{pr} 速度损失系数, $n_{pr}=(0.8\sim 1.2)\frac{d_s^2}{d_m^2}$
 n_i 等程弹道高 \bar{Y} 的函数, 见式(7-4-2)
 O 发射原点
 op 开舱点
 p 大气压力, 见式(1-2-1)(Pa)
 p_1 喷气反作用力或称动推力(N)

- p_a 喷口端面处燃气压力(Pa)
 R 空气阻力(N),或空气气体常数
 R_0 火箭布雷弹与定向器之间摩擦力(N)
 R_1 函数,见式(4-2-4)①
 R_s 水蒸气气体常数
 $R(v)$ 函数,见式(4-1-6)
 r_E 地球半径(km)
 S 弹道顶点
 S_0 定向器有效长度(m)
 S_e 喷管出口处端面面积(mm²)
 S_m 弹体最大横截面面积(mm²)
 T 火箭布雷弹整弹(不开舱)全飞行时间(s),或热力学温度, $T=273K+t$
 T_B 与布雷射程 X_B 对应的全飞行时间(s)
 $T(U)$ 西亚切主要函数
 t 摄氏温度,或布雷弹飞达弹道上任意点的时间(°C)或(s)
 t_0 火箭布雷弹质心离轨时间,见式(3-2-7)(s)
 t_{cr} 雷伞系统自开舱点运动至临界点的时间,见式(6-3-7)①(s)
 t_{im} 雷伞系统自开舱点运动至雷着点的时间,见式(6-4-5)(s)
 t_K 火箭发动机主动段工作时间(s)
 t_{op} 布雷弹飞达开舱点的时间,见式(5-3-2)④(s)
 U 假速度(m/s)
 u_1 火箭发动机燃气相对于火箭布雷弹体的喷射速度(m/s)
 u_e 火箭发动机有效排气速度,见式(1-3-5)(m/s)
 v 布雷弹或雷伞系统在弹道上任意点的质心速度(m/s)
 v_0 初速(m/s)
 \dot{v}_0 参量,见式(4-3-1)
 \ddot{v}_0 参量,见式(4-3-2)
 v_1 常量,见式(4-2-4)③、④
 v_C 布雷弹整弹(不开舱)落速(m/s)
 v_{cr} 雷伞系统在临界点的质心速度,见式(6-3-2)(m/s)
 v_{ep} 静抛速度(m/s)
 v_{CK} 不考虑空气阻力时,火箭布雷弹在 K 点的质心速度,见式(4-2-5)(m/s)
 v_{ik} 最大理想速度,见式(4-1-17)①(m/s)
 v_{im} 雷伞系统着地速度,亦称雷着速,见式(6-4-3)(m/s)
 v_K 火箭布雷弹在 K 点的质心速度,见式(6-1-9)(m/s)
 v_{op} 布雷弹在开舱点的质心速度,见式(5-3-2)③(m/s)
 v_p 可撒布地雷脱离雷舱后的质心速度,见式(6-1-1)(m/s)
 v_{pr} 雷伞系统在临界段内的平均速度,见式(7-1-3)(m/s)

- v_x 布雷弹质心速度沿 x 向的分量(m/s)
 v_y 布雷弹质心速度沿 y 向的分量(m/s)
 v_r 虚拟速度(m/s)
 X 布雷弹整弹(不开舱)射程,见式(5-2-5)①
 X_B 布雷射程(m)
 x_0 火箭布雷弹脱离定向器瞬间,质心水平坐标,见式(3-2-9)①(m)
 x_{cr} 临界点的水平坐标,见式(6-3-7)②(m)
 x_{im} 雷着点与开舱点的水平距离,见式(6-4-6)(m)
 x_K K 点水平坐标,见式(4-1-15)(m)
 x_{op} 开舱点水平坐标,见式(5-3-2)①(m)
 Y 弹道顶点高(m)
 y 布雷弹或雷伞系统在弹道上任意点,质心垂直坐标(m)
 y_0 火箭布雷弹脱离定向器瞬间,质心垂直坐标,见式(3-2-9)②(m)
 y_1 雷伞系统自开舱点运动至临界点的高度差,见式(6-3-10)(m)
 y_{a1}, y_{a2} 用以检验开舱点选择得是否恰当的 y_{op} 的上下限,见式(7-1-2)(m)
 y_{cr} 临界点的垂直坐标,见式(6-3-7)④(m)
 y_{GK} 不考虑空气阻力时,火箭布雷弹运动至 K 点的垂直坐标,见式(4-2-6)(m)
 y_K K 点垂直坐标,见式(4-1-13)(m)
 y_{op} 开舱点垂直坐标,见式(5-3-2)③(m)
 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ 常量,见式(4-2-4)②,③,④
 α_{yk} 函数,见式(4-2-18)
 α_{ok} 函数,见式(4-2-13)
 β 补偿系数
 β' 常量, $\beta' = 1.059 \times 10^{-4} (1/m)$
 β_0 参量,见式(3-2-2)
 β_1 函数,见式(2-2-10)
 β_2 函数,见式(2-2-11)
 β_3 函数,见式(4-2-8)
 β_f 参量,见式(3-2-11)
 β_K 参量,见式(4-2-9)
 θ 弹道上任意点的切线倾角(°,'")
 θ_0 射角(°,'")
 θ_c 布雷弹整弹(不开舱)落角(°,'")
 θ_{cr} 雷伞系统在临界点的弹道切线倾角,见式(6-3-4)及(6-3-5)(°,'")
 θ_{im} 雷伞系统着地角,亦称雷着角,见式(6-4-1)(°,'")
 θ_K 火箭布雷弹在 K 点的弹道切线倾角,见式(4-2-12)(°,'")
 θ_{oa} 火箭布雷弹在主动段弹道切线倾角的平均值,见式(7-2-1)及(7-2-2)(°,'")
 θ_{om} 雷伞系统在着地段弹道切线倾角的平均值,见式(6-4-4)(°,'")

μ 火箭发动机排出火药量的相对值, 见式(2-2-2)

$\xi(\theta)$ 函数, 见式(4-1-10)

π 常数, $\pi \approx 3.1416$

$\pi(y)$ 气压函数, 见式(1-2-11)

ρ 空气密度(kg/m^3)

ρ_1 干空气(不含水蒸气)密度, 见式(1-2-4)(kg/m^3)

ρ_2 空气中水蒸气密度, 见式(1-2-5)(kg/m^3)

τ 虚拟温度

φ_0 参量, $\varphi_0 = v_0$

φ_1 参量, $\varphi_1 = \dot{v}_0$

φ_2 参量, $\varphi_2 = \ddot{v}_0$

φ 参量, 见式(4-3-4)

φ_0 函数, 见式(4-3-7)

注冠“ \sim ” 表示等程弹道中对应的弹道诸元

注脚“0” 表示原点值或攻角为零的值

注脚“n” 表示标准值

注脚“on” 表示地面标准值

第二章 布雷外弹道学的预备知识

布雷弹及雷伞系统的飞行理论是基于较为简单的刚体动力学。就布雷弹道所要解决的基本问题而言,由于围绕质心的运动对其质心本身的运动影响不大,故在研究布雷外弹道(理想弹道部分)时,就将布雷弹和雷伞系统的飞行,简化处理为质心运动。致于普通布雷弹与火箭布雷弹的区别,在于后者是采用变质量刚体动力学的概念和方程,而前者则采用定质量的概念和方程。

§ 1 作用于布雷弹上的主要力

布雷弹和其它被研究的力学对象一样,遵循着一定的力学规律而运动着。使物体产生运动的因素是力,因此,首先要了解作用于布雷弹(质心)上的力。飞行中的普通布雷弹、被动段飞行中的火箭布雷弹及脱离雷舱后运动中的雷伞系统,均会受到空气动力和重力的作用,而主动段飞行中的火箭布雷弹,除受到以上两力的作用外,还受到火箭发动机推力(此力,究其本质而言应属内力)的作用。以上诸力的作用方向是不同的,重力的作用方向接近于指向地心,空气动力的方向取决于质心速度矢量与弹(雷)纵轴线间夹角的大小,而推力则作用(或接近)于火箭布雷弹的纵轴方向。飞行中,作用于布雷弹上的诸力是分不开的,但在工程实践上,为便于计算和以实验方法确定各因素影响的大小程度,利用力的独立作用原理(即力的叠加原理),就可对空气动力和推力进行独立计算,并可用实验方法确定。用实验方法所获得的结果,完全可以满足工程上要求的准确性。在理想弹道中,由于将布雷弹或雷伞系统视为质点,故作用于其上的诸力矩不予讨论。而柯氏力、燃气加速运动产生的惯性力等,由于影响较小、属次要力将略去不计,则作用于火箭布雷弹上的力(普通布雷弹或雷伞系统无推力)如图 3 所示。

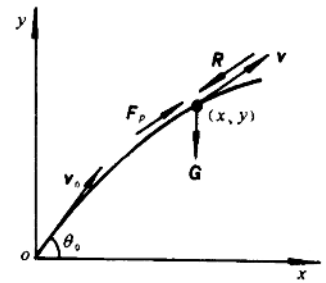


图 3 作用于火箭布雷弹上的主要力

以下将对重力、空气动力及推力分别予以讨论。

§ 2 重力及重力加速度

由于地球自转,地面上的物体会受到因地球旋转所引起的离心力的作用。布雷弹也不例外,它除了受地球引力的作用,还受到这种牵连惯性力的影响。重力,正是引力与这种离心惯性力二者的矢量和。如图 4 所示,该图为北半球的一部分,图中 G_1 表示地球引力, F_E 表示离心惯性力,于是重力 G 的矢量表达式为:

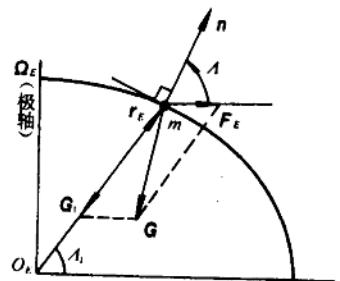


图 4 重力

$$G = G_1 + F_E \quad (1-1-1)$$

地球是一个略呈扁平形状的旋转椭球体,实际的地球外形是凸凹不平的不规则几何体。为便于进行大地测量及天文学、弹道学等学科进行有关的计算工作,将它简化成了较规则的地球模型。常采用的有两种:椭球模型和圆球模型。

对椭球模型,它的两轴长度为:

$$\text{赤道半径(长半轴)} = 6378.24\text{km};$$

$$\text{极半径(短半轴)} = 6356.86\text{km}.$$

对圆球模型,它的主要参数是地球半径。一般按体积确定,具有与椭球体相同体积的球体,其半径等于 6371.11km,此值通常作为地球的平均半径,以 r_E 表示,即

$$r_E = 6371.11\text{km} \quad (1-1-2)$$

弹道计算中,均以此假想的平均地球半径作为标准。重力的方向与铅垂线的方向一致,即在重力场中,某一点的铅垂方向与通过该点的地球表面的法线方向一致。地球表面的法线 n 与赤道面之间的夹角称为地球纬度,以 Λ 表示;而地球半径矢量 r_E 与赤道面之间的夹角称为地心纬度,以 Λ_1 表示。 Λ 与 Λ_1 两者有所差别,但差别不大,其间的关系可由下列近似公式确定:

$$\Lambda_1 \approx \Lambda - 11'30'' \cdot \sin 2\Lambda \quad (1-1-3)$$

由上式可知,在北纬 45° , 因 $\sin 2\Lambda = 1$,

$$\Lambda - \Lambda_1 \text{ 将获得最大值, } (\Lambda - \Lambda_1)_{\max} = 11'30'',$$

而 $\Lambda_1 = 44^\circ 48' 30''$ 。

由此可见,只要知道地球纬度(或地心纬度),则重力 G 及其相应的重力加速度 g 便可确定。重力加速度、地球自转角速度与地球纬度(或地心纬度)之间的关系如下:

$$g = g_1 - \Omega_E \times (\Omega_E \times r) \quad (1-1-4)$$

式中 g_1 ——引力加速度;

Ω_E ——地球自转角速度;

r ——点的地心向径,即地心至布雷弹质心的矢量线。若采用圆球模型并设布雷弹质心离地面的高度为 y , 则:

$$r = r_E + y \quad (1-1-5)$$

$$\text{因 } |\Omega_E \times (\Omega_E \times r_E)| = r_E \Omega_E^2 \cos \Lambda_1 \quad (1-1-6)$$

由于地球自转一周的时间为 23 小时 56 分 4 秒,故自转角速度为:

$$\Omega_E = \frac{2\pi}{(23 \times 60 + 56) \times 60 + 4} = 7.292 \times 10^{-5} \text{ 1/s}.$$

$$\text{则 } |\Omega_E \times (\Omega_E \times r_E)|_{\max} = r_E \Omega_E^2 = 6371110 \times (7.292 \times 10^{-5})^2 = 0.034 \text{ m/s}^2.$$

由此可见,离心惯性力的数值很小,只是地心引力的千分之几,因此可认为 g 与 g_1 的方向是基本上一致的,其数值也相差无几。

据实测,赤道($\Lambda_1 = 0$)上的重力加速度 $g_e = 9.78084\text{m/s}^2$ 。重力加速度与地理纬度之间的关系见附录 A1。考虑我国的地理位置,对射程不大的弹道而言,可忽略重力加速度随地理纬度的变化,而视为常量,并取平均值作为标准值

$$g_0 = 9.80\text{m/s}^2 \quad (1-1-7)$$

离地球表面的距离(与地心反向)越大,重力加速度会越小。重力加速度与离地球表面距离之间的关系见附录 A2。若地球采用圆球模型,离地面高度 y 处的重力加速度为:

$$g = g_0 \left(\frac{r_E}{r_E + y} \right)^2 = g_0 \left(\frac{1}{1 + \frac{y}{r_E}} \right)^2 \approx g_0 \left(1 - \frac{2y}{r_E} \right) \quad (1-1-8)$$

【例 1】 试求某布雷弹飞行至 $y=32\text{km}$ 处时,该处重力加速度的变化。

【解】

将 $g_0=9.80$ $y=32000$ $r_E=6371110$ 代入式(1-1-8)中:

$$g = g_0 \left(1 - \frac{2y}{r_E} \right) = 9.8 \times \left(1 - \frac{2 \times 32000}{6371110} \right) \approx 9.8 \times 0.99 = 9.702 \text{m/s}^2.$$

计算结果表明,当弹道高达 32km 时,重力加速度虽有变化,但变化不大,仅减少 1% ,故对射程不大的弹道,可不考虑重力加速度随高度的变化。

§ 3 空气阻力及阻力加速度

§ 3.1 大气特征及标准气象条件

一、大气特征

地球周围的空气层称为大气。大气层的最高高度大约不超过 1000km 。大气的分布虽然很广,但其密度却随高度减少得很快。其质量大部分集中于底层:

20km 以下,含有将近全部空气质量的 90% ; 10km 以下,含有将近 75% ;而在 5km 以下,竟含有 50% 。

在大气下层,即高度在 10km 左右范围内的大气层,发生着空气的上下对流,此层称为对流层。对流的产生,主要是由于大气直接吸收太阳热量的能力小,太阳的大部分热量为地球表面所吸收,因此地球表面的温度通常较大气高,使下面的空气受热上升,随之膨胀而冷却;上面较冷的空气下降,压缩而变热,结果就产生了空气对流,并形成了温度随高度而降低的分布状态。

在对流层以上,即高度在 11km 至 50km 范围内的大气层属同温层。此层的特征是处于热平衡状态。高度在 $30\sim 35\text{km}$ 范围内的同温层,其特征是温度不变,且空气无上下对流。

对流层与同温层之间并无绝对界限,但其间有一厚度在数百米至 2km 的所谓亚同温层。

同温层以上,即高度在 $50\sim 90\text{km}$ 范围内的大气层称为散逸层。该层的特征是温度随高度的增加而下降,且紊流度有所提高。

散逸层以上,即高度在 $90\sim 500\text{km}$ 范围内的大气层称为电离层。该层的特征是温度随高度的增加而不断上升。在高度为 $400\sim 500\text{km}$ 的电离层上部,空气温度可达 1500K 。

电离层以上称为外大气层,因与布雷外弹道的关系不大,就不予讨论了。

地球表面大气层中的大气,究其化学成分主要是氮气和氧气。其中氮气占 76% 、氧气占 21% ,其余 3% 为水蒸气、氢气和二氧化碳等气体。根据空气成分分布的状况,大气可分为均质层和非均质层。上层为非均质层、下层则为均质层。在延伸到高度为 95km 处的均质层中,氮气、氧气和其它气体在太阳紫外线的辐射作用下将会分解,并处于原子状态。

二、干、湿空气状态方程

1. 干空气状态方程

标志空气状态的诸特征量是压力 p 、温度 t 或 T 、空气密度 ρ 。干空气状态,即假设不含有