



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116280295 A

(43) 申请公布日 2023.06.23

(21) 申请号 202310334787.4

(22) 申请日 2023.03.31

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 冯冠华 李文皓 张珩

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理
事务所(普通合伙) 11390

专利代理师 胡剑辉

(51) Int. Cl.

B64G 7/00 (2006.01)

B64G 1/64 (2006.01)

B64G 1/24 (2006.01)

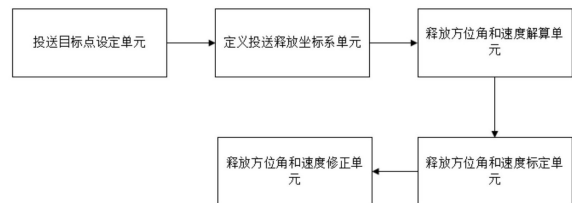
权利要求书4页 说明书12页 附图4页

(54) 发明名称

一种超高速精瞄控制释放分离系统及控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种超高速精瞄控制释放分离系统及控制方法,系统包括:投送目标点设定单元,在投送目标点设定单元设定模拟目标的投送目标点;定义投送释放坐标系单元,用于建立投送释放坐标系,以进行模拟目标的投送释放分离飞行轨迹的模拟,并设置投送释放分离飞行轨迹模拟中的参数;释放方位角和速度解算单元,用于根据投送释放坐标系,解算模拟目标的投送释放方位角和速度;释放方位角和速度修正单元,对释放方位角和速度解算单元解算的模拟目标的投送释放方位角和速度进行修正,根据修正后的投送释放方位角和速度进行释放分离实验。本发明还提供了上述系统的控制方法,解决了现有技术中在获取超高速线速度后不能精准释放分离的问题。



1. 一种超高速精瞄控制释放分离系统,其特征在于,包括:

投送目标点设定单元,在所述投送目标点设定单元设定模拟目标的投送目标点;

定义投送释放坐标系单元,用于建立投送释放坐标系,以进行模拟目标的投送释放分离飞行轨迹的模拟,并设置投送释放分离飞行轨迹模拟中的参数;

释放方位角和速度解算单元,用于根据建立的所述投送释放坐标系,解算位于第一投送组件和第二投送组件端部的模拟目标的投送释放方位角和速度;释放方位角和速度修正单元,对所述释放方位角和速度解算单元解算的模拟目标的投送释放方位角和速度进行修正,根据修正后的投送释放方位角和速度进行超高速投送释放分离。

2. 根据权利要求1所述的一种超高速精瞄控制释放分离系统,其特征在于,

所述超高速精瞄控制释放分离系统还包括释放方位角和速度标定单元,用于根据多组实验的释放时刻的方位角和速度进行标定,得到位于第一投送组件和第二投送组件端部的模拟目标的投送释放方位角和速度的标定误差值;

所述释放方位角和速度修正单元根据所述释放方位角和速度的标定误差值进行修正。

3. 根据权利要求1所述的一种超高速精瞄控制释放分离系统,其特征在于,

第一投送组件和第二投送组件的加速旋转过程中,形成两个独立互不干扰且平行的投送旋转面,两个所述投送旋转面之间设有固定距离,使得所述超高速精瞄控制释放分离系统能够同时/分时释放投送1个至4个模拟目标。

4. 一种根据权利要求1-3任一项所述的一种超高速精瞄控制释放分离系统的控制方法,其特征在于,包括:

步骤1、设定投送目标点;

步骤2、根据设定的投送目标点,基于地面位置固定的超高速精瞄控制释放分离系统,定义投送释放坐标系及其参数;

步骤3、基于所述投送释放坐标系,结合第一投送组件和第二投送组件的对转运动规律,基于设定的投送目标点,分别解算位于第一投送组件和第二投送组件端部的模拟目标的投送释放方位角和速度,作为标定的基础对比值;

步骤4、进行多次所述释放分离标定实验,实时记录投送释放瞬间的方位角和速度,对比实时记录值和所述基础对比值,得到释放方位角和速度的标定误差值;

步骤5、解算出面向设定的投送目标点所需的投送释放方位角和速度值,根据所述标定误差值进行修正,得到投送释放分离修正值,设定所述投送释放分离修正值进行超高速投送释放分离实验。

5. 根据权利要求4所述的控制方法,其特征在于,

步骤2所述定义投送释放坐标系及其参数中,结合原点任选两个坐标轴组成的与投送旋转面平行的面为参照面,通过设定电机零位角所在的线与所述参照面中的其中一个坐标轴平行,建立三维投送释放坐标系,与所述电机零位角所在的线平行的坐标轴与第三坐标轴组成的平面定义为投送可达区域,用于模拟目标的投送释放分离飞行轨迹的模拟。

6. 根据权利要求4所述的控制方法,其特征在于,

步骤3中,位于同一投送组件两端的模拟目标的投送释放方位角的解算值互补,投送释放速度的解算值相等,能够根据投送目标点的投送高度来解算投送释放速度 v_j ,其中 $j=1, 2$ 。

7. 根据权利要求6所述的控制方法,其特征在于,

还包括投送释放方位角的解算方法:

以第一投送组件顺时针旋转、第二投送组件逆时针的选择为例,当旋转方向与此不同时,仅有负号之差,第一投送组件的投送释放方位角解算:

计算角度 $\angle ACD$:

$$\angle ACD = \pi - \delta - \theta$$

式中,A点为投送目标点,C点为模拟目标被释放分离点,C点至A点的实线为模拟目标被投送释放分离的飞行轨迹在 Oxy 面上的投影线,D点为C点在 Oy 轴上的投影点,AB线和BC线的长度分布为 a 和 b , δ 为模拟目标的投送释放方位角, θ 为投送组件在投送组件端部的安装角度;

计算长度 a 和 b ,分别按如下公式计算:

$$a = X + R \sin \delta$$

$$b = \begin{cases} Y - y_0 + R \cos \delta, & \pi - \delta \geq \theta \\ -(Y - y_0 + R \cos \delta), & \pi - \delta < \theta \end{cases}$$

式中, c 是指飞行轨迹在所述坐标系平面 Oxy 面内的投影线的长度; a 和 b 分别是 c 在坐标轴 Ox 和轴 Oy 上的投影长度; X 和 Y 是旋转中心坐标系 $Oxyz$ 中的横、纵坐标值; R 是旋转半径;

然后,基于 a 和 b 计算 $\tan \angle ACD$,可得:

$$\tan \angle ACD = \frac{b}{a}$$

即:

$$\tan(180^\circ - \delta - \theta) = \begin{cases} \frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & \pi - \delta \geq \theta \\ -\frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & \pi - \delta < \theta \end{cases} \quad (1)$$

进一步,计算投送释放方位角 δ ,令 $\tan \delta = \sin \delta / \cos \delta$,带入上式中,可得:

$$\mp \frac{\tan \theta \cos \delta + \sin \delta}{\cos \delta - \tan \theta \sin \delta} = \begin{cases} \frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & \pi - \delta \geq \theta \\ -\frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & \pi - \delta < \theta \end{cases} \quad (2)$$

存在 $(\pi - \delta) \geq \theta \equiv (Y - y_0) \geq R$,因此,式(2)变为如下式(3):

$$\mp \frac{\tan \theta \cos \delta + \sin \delta}{\cos \delta - \tan \theta \sin \delta} = \begin{cases} \frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & (Y - y_0) \geq R \\ -\frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & (Y - y_0) < R \end{cases} \quad (3)$$

针对式(2),当 $(Y - y_0) \geq R$ (或 $\pi - \delta \geq \theta$)时,可得如下式(4):

$$[(Y - y_0) \tan \theta - X] \sin \delta - [(Y - y_0) + X \tan \theta] \cos \delta = R \quad (4)$$

求解上式(4)中的 δ ,令:

$$[(Y - y_0) \tan \theta - X] = A; \quad (5)$$

$$[(Y - y_0) + X \tan \theta] = B \quad (6)$$

上两式简化为下式:

$$A\sin\delta - B\cos\delta = R \quad (4-1)$$

进一步转换为求解上式(4-1)中的 δ , 设 $t = \tan \frac{\delta}{2}$, 则:

$$\sin \delta = \frac{2t}{1+t^2}; \quad \cos \delta = \frac{1-t^2}{1+t^2}$$

将上两式带入式(4-1)中, 可得下式(7):

$$t = \tan \frac{\delta}{2} = \frac{A \pm \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B} \quad (7)$$

考虑到角度 $\theta > 0$ 且较小, 且 $\delta + \theta > \pi/2$, 得:

$$\tan \frac{\delta}{2} = \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}$$

即:

$$\delta = 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, \quad (Y - y_0) \geq R \text{ (或 } \pi - \delta \geq \theta)$$

上式中, 特别地, 当 $\theta = 0$, 即 $\pi - \delta = 0$ 时, $\delta = \pi$;

同理, 参照上述过程, 针对 $(Y - y_0) < R$ (或 $\pi - \delta < \theta$) 时, 得:

$$\delta = 2\pi + 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, \quad (Y - y_0) < R \text{ (或 } \pi - \delta < \theta)$$

综上, 同时考虑算法的可编程性, 将判定条件等价转化为角度 δ 和 θ 的关系判定, 得:

$$\delta = \begin{cases} 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, & \delta < \pi \text{ (或 } B > R) \\ \pi & \delta = \pi \text{ (或 } B = R) \\ 2\pi + 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, & \delta > 0 \text{ (或 } B < R) \end{cases} \quad (8)$$

通过上式(8)能够得到位于第一投送组件的某一端部的模拟目标的投送释放方位角。

8. 根据权利要求7所述的控制方法, 其特征在于,

步骤3中, 以第一投送组件的顺时针运动解算位于其端部的模拟目标的投送释放方位角和速度时, 第二投送组件为逆时针运动;

其中逆时针运动的投送组件的轨迹模拟中, 模拟目标在所述投送可达区域的平面内的投影点标记为D点, 设定的投送目标点A有两处位于投影点的两侧, 则位于第二投送组件端部的模拟目标的投送释放方位角的表达式为:

$$\delta^* = \begin{cases} 2 \tan^{-1} \frac{A_2 - \sqrt{A_2^2 - (R^2 - B_2^2)}}{R - B_2}, & R \neq B_2 \\ 2 \tan^{-1} \frac{R + B_2}{2A_2}, & R = B_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中, δ^* 为位于逆时针旋转组件的端部的模拟目标的投送释放方位角。

9. 根据权利要求4所述的控制方法, 其特征在于,

还包括标定误差值的方法:

按照步骤1~2和步骤3, 重复至少3次以上, 定义重复的实验次数为n, 记录所有实验的

释放时刻的方位角 β_{ik} ($i=1,2,3,4;k=1,2,\dots,n$) 和速度 V_{jk} ($j=1,2;k=1,2,\dots,n$), 按下式得到释放方位角和速度的标定误差值:

$$\text{标定误差值: } \begin{cases} \Delta\delta_{ic} = \sum_{k=1}^n (\beta_{ik} - \delta_{i0}) / n \\ \Delta v_{jc} = \sum_{k=1}^n (V_{jk} - v_{j0}) / n \end{cases}$$

式中, δ_{i0} ($i=1,2,3,4$) 和 v_{j0} ($j=1,2$) 分别为每次实验前解算的模拟目标的释放方位角和速度, $\Delta\delta_{ic}$ 为释放方位角的标定误差值, Δv_{jc} 为释放速度的标定误差值。

10. 根据权利要求9所述的控制方法,其特征在于,

解算出面向设定目标点的投送释放方位角 δ_i ($i=1,2,3,4$) 和速度值 v_j ($j=1,2$), 实际实验中采取的投送释放的方位角和速度分离修正值更新为如下:

$$\text{分离修正值: } \begin{cases} \bar{\delta}_i = \delta_i + \Delta\delta_{ic} \\ \bar{v}_j = v_j + \Delta v_{jc} \end{cases}$$

式中, $\bar{\delta}_i$ 为投送释放方位角的分离修正值, \bar{v}_j 为投送释放速度的分离修正值。

一种超高速精瞄控制释放分离系统及控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于航天技术领域,具体涉及一种超高速精瞄控制释放分离系统及控制方法。

背景技术

[0002] 当前,以美国星链等为代表的低轨道巨型星座井喷式发展,并在轨快速部署,2022年10月星链在轨部署超3000颗卫星,未来巨型星座将占用近地轨道70%以上的轨道资源,其提供全球互联网服务造福人类的同时,也会加剧“太空拥堵”,造成更多“太空垃圾”,尤其是低轨空间,将成为“重灾区”,国际上已公认主动碎片清除是解决该问题的最直接最有效手段。

[0003] 主动碎片清除即是主动降低低轨空间碎片的轨道高度,借助空间推进技术将碎片的近地点高度降低至约200km以下,受地球大气阻力的影响,它的轨道半长轴迅速减小并最终坠入大气层烧毁。当前空间交会对接、空间目标捕获(如空间机械臂、飞网、飞爪和飞矛等)及常规推进方式拖拽变轨(如化学推进、电推进等)等技术已不存在技术瓶颈,但在面向具备分布散、数量多特点的低轨空间碎片清除任务时,为实现捕获后组合体的降轨再入,不可避免地消耗大量在轨燃料,主动清除低轨道空间碎片的效率性和经济性尚难以解决。

[0004] 为此,专利号为ZL201910773631.X的一种低轨道地磁蓄能-释放投送系统和专利号ZL201910774222.1为的一种传递式对转地磁蓄能-释放投送系统及方法,提出了一种基于低轨原位地磁场能和太阳能的蓄能无工质在轨投送新方法,面向捕获后的组合体变轨再入,无需消耗燃料工质,可有效解决低轨主动清除现有技术经济性和效率性不兼顾的问题。同时,专利号为ZL202110269136.2的一种同轴对转式地磁储能和释能投送地面实验系统及方法和专利号为ZL202110269133.9的一种基于地磁储能释能的多自由度投送地面系统与方法,提出了相应的该技术及其投送技术的地面验证系统与方法,克服了地面空气阻力限制线速度上限的难题。

[0005] 所以,现有技术仅针对蓄能加速旋转及其超高线速度获取的地面验证提出了相应的系统与方法,并未考虑在获取超高线速度(10~100m/s量级)后,如何实现模拟目标的动态、瞬间高响应投送释放分离控制,如何面向预期目标点实现精准释放分离控制,换言之基于现有技术还不能实现获取超高速线速度后的精准释放分离控制。

发明内容

[0006] 本发明公开了一种超高速精瞄控制释放分离系统及控制方法,以解决现有技术中在获取超高速线速度后不能精准释放分离的问题。

[0007] 在本发明的第一个方面,提供一种超高速精瞄控制释放分离系统,包括:

[0008] 投送目标点设定单元,在所述投送目标点设定单元设定模拟目标的投送目标点;

[0009] 定义投送释放坐标系单元,用于建立投送释放坐标系,以进行模拟目标的投送释

放分离飞行轨迹的模拟,并设置投送释放分离飞行轨迹模拟中的参数;

[0010] 释放方位角和速度解算单元,用于根据建立的所述投送释放坐标系,解算位于第一投送组件和第二投送组件端部的模拟目标的投送释放方位角和速度;释放方位角和速度修正单元,对所述释放方位角和速度解算单元解算的模拟目标的投送释放方位角和速度进行修正,根据修正后的投送释放方位角和速度进行超高速投送释放分离。

[0011] 进一步地,所述超高速精瞄控制释放分离系统还包括释放方位角和速度标定单元,用于根据多组实验的释放时刻的方位角和速度进行标定,得到位于第一投送组件和第二投送组件端部的模拟目标的投送释放方位角和速度的标定误差值;

[0012] 所述释放方位角和速度修正单元根据所述释放方位角和速度的标定误差值进行修正。

[0013] 进一步地,第一投送组件和第二投送组件的加速旋转过程中,形成两个独立互不干扰且平行的投送旋转面,两个所述投送旋转面之间设有固定距离,使得所述超高速精瞄控制释放分离系统能够同时/分时释放投送1个至4个模拟目标。

[0014] 在本发明的第二个方面,提供一种超高速精瞄控制释放分离系统的控制方法,包括:

[0015] 步骤1、设定投送目标点;

[0016] 步骤2、根据设定的投送目标点,基于地面位置固定的超高速精瞄控制释放分离系统,定义投送释放坐标系及其参数;

[0017] 步骤3、基于所述投送释放坐标系,结合第一投送组件和第二投送组件的对转运动规律,基于设定的投送目标点,分别解算位于第一投送组件和第二投送组件端部的模拟目标的投送释放方位角和速度,作为标定的基础对比值;

[0018] 步骤4、进行多次所述释放分离标定实验,实时记录投送释放瞬间的方位角和速度,对比实时记录值和所述基础对比值,得到释放方位角和速度的标定误差值;

[0019] 步骤5、解算出面向设定的投送目标点所需的投送释放方位角和速度值,根据所述标定误差值进行修正,得到投送释放分离修正值,设定所述投送释放分离修正值进行超高速投送释放分离实验。

[0020] 进一步地,步骤2所述定义投送释放坐标系及其参数中,结合原点任选两个坐标轴组成的与投送旋转面平行的面为参照面,通过设定电机零位角所在的线与所述参照面中的其中一个坐标轴平行,建立三维投送释放坐标系,与所述电机零位角所在的线平行的坐标轴与第三坐标轴组成的平面定义为投送可达区域,用于模拟目标的投送释放分离飞行轨迹的模拟。

[0021] 进一步地,步骤3中,位于同一投送组件两端的模拟目标的投送释放方位角的解算值互补,投送释放速度的解算值相等,能够根据投送目标点的投送高度来解算投送释放速度 v_j ,其中 $j=1,2$ 。

[0022] 进一步地,还包括投送释放方位角的解算方法:

[0023] 以第一投送组件顺时针旋转、第二投送组件逆时针的选择为例,当旋转方向与此不同时,仅有负号之差,第一投送组件的投送释放方位角解算:

[0024] 计算角度 $\angle ACD$:

[0025] $\angle ACD = \pi - \delta - \theta$

[0026] 式中,A点为投送目标点,C点为模拟目标被释放分离点,C点至A点的实线为模拟目标被投送释放分离的飞行轨迹在 Oxy 面上的投影线,D点为C点在 Oy 轴上的投影点,AB线和BC线的长度分布为 a 和 b , δ 为模拟目标的投送释放方位角, θ 为投送组件在投送组件端部的安装角度;

[0027] 计算长度 a 和 b ,分别按如下公式计算:

$$[0028] \quad a = X + R \sin \delta$$

$$[0029] \quad b = \begin{cases} Y - y_0 + R \cos \delta, & \pi - \delta \geq \theta \\ -(Y - y_0 + R \cos \delta), & \pi - \delta < \theta \end{cases}$$

[0030] 式中, c 是指飞行轨迹在所述坐标系平面 Oxy 面内的投影线的长度; a 和 b 分别是 c 在坐标轴 Ox 和轴 Oy 上的投影长度; X 和 Y 是旋转中心坐标系 $Oxyz$ 中的横、纵坐标值; R 是旋转半径;

[0031] 然后,基于 a 和 b 计算 $\tan \angle ACD$,可得:

$$[0032] \quad \tan \angle ACD = \frac{b}{a}$$

[0033] 即:

$$[0034] \quad \tan(180^\circ - \delta - \theta) = \begin{cases} \frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & \pi - \delta \geq \theta \\ -\frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & \pi - \delta < \theta \end{cases} \quad (1)$$

[0035] 进一步,计算投送释放方位角 δ ,令 $\tan \delta = \sin \delta / \cos \delta$,带入上式中,可得:

$$[0036] \quad \mp \frac{\tan \theta \cos \delta + \sin \delta}{\cos \delta - \tan \theta \sin \delta} = \begin{cases} \frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & \pi - \delta \geq \theta \\ -\frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & \pi - \delta < \theta \end{cases} \quad (2)$$

[0037] 存在 $(\pi - \delta) \geq \theta \equiv (Y - y_0) \geq R$,因此,式(2)变为如下式(3):

$$[0038] \quad \mp \frac{\tan \theta \cos \delta + \sin \delta}{\cos \delta - \tan \theta \sin \delta} = \begin{cases} \frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & (Y - y_0) \geq R \\ -\frac{Y - y_0 + R \cos \delta}{X + R \sin \delta}, & (Y - y_0) < R \end{cases} \quad (3)$$

[0039] 针对式(2),当 $(Y - y_0) \geq R$ (或 $\pi - \delta \geq \theta$)时,可得如下式(4):

$$[0040] \quad [(Y - y_0) \tan \theta - X] \sin \delta - [(Y - y_0) + X \tan \theta] \cos \delta = R \quad (4)$$

[0041] 求解上式(4)中的 δ ,令:

$$[0042] \quad [(Y - y_0) \tan \theta - X] = A; \quad (5)$$

$$[0043] \quad [(Y - y_0) + X \tan \theta] = B \quad (6)$$

[0044] 上两式简化为下式:

$$[0045] \quad A \sin \delta - B \cos \delta = R \quad (4-1)$$

[0046] 进一步转换为求解上式(4-1)中的 δ ,设 $t = \tan \frac{\delta}{2}$,则:

$$[0047] \quad \sin \delta = \frac{2t}{1+t^2}; \quad \cos \delta = \frac{1-t^2}{1+t^2}$$

[0048] 将上两式带入式(4-1)中,可得下式(7):

$$[0049] \quad t = \tan \frac{\delta}{2} = \frac{A \pm \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B} \quad (7)$$

[0050] 考虑到角度 $\theta > 0$ 且较小,且 $\delta + \theta > \pi/2$,得:

$$[0051] \quad \tan \frac{\delta}{2} = \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}$$

[0052] 即:

$$[0053] \quad \delta = 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, \quad (Y - y_0) \geq R \text{ (或 } \pi - \delta \geq \theta)$$

[0054] 上式中,特别地,当 $\theta = 0$,即 $\pi - \delta = 0$ 时, $\delta = \pi$;

[0055] 同理,参照上述过程,针对 $(Y - y_0) < R$ (或 $\pi - \delta < \theta$)时,得:

$$\delta = 2\pi + 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, \quad (Y - y_0) < R \text{ (或 } \pi - \delta < \theta)$$

[0056] 综上,同时考虑算法的可编程性,将判定条件等价转化为角度 δ 和 θ 的关系判定,得:

$$[0057] \quad \delta = \begin{cases} 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, & \delta < \pi \text{ (或 } B > R) \\ \pi & \delta = \pi \text{ (或 } B = R) \\ 2\pi + 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, & \delta > 0 \text{ (或 } B < R) \end{cases} \quad (8)$$

[0058] 通过上式能够得到位于第一投送组件的某一端部的模拟目标的投送释放方位角。

[0059] 进一步地,步骤3中,以第一投送组件的顺时针运动解算位于其端部的模拟目标的投送释放方位角和速度时,第二投送组件为逆时针运动;

[0060] 其中逆时针运动的投送组件的轨迹模拟中,模拟目标在所述投送可达区域的平面内的投影点标记为D点,设定的投送目标点A有两处位于投影点的两侧,则位于第二投送组件端部的模拟目标的投送释放方位角的表达式为:

$$[0061] \quad \delta^* = \begin{cases} 2 \tan^{-1} \frac{A_2 - \sqrt{A_2^2 - (R^2 - B_2^2)}}{R - B_2}, & R \neq B_2 \\ 2 \tan^{-1} \frac{R + B_2}{2A_2}, & R = B_2 \end{cases} \quad (11)$$

[0062] 式中, δ^* 为位于逆时针旋转组件的端部的模拟目标的投送释放方位角。

[0063] 进一步地,还包括标定误差值的方法:

[0064] 按照步骤1~2和步骤3,重复至少3次以上,定义重复的实验次数为 n ,记录所有实验的释放时刻的方位角 β_{ik} ($i = 1, 2, 3, 4; k = 1, 2, \dots, n$)和速度 V_{jk} ($j = 1, 2; k = 1, 2, \dots, n$),按下式得到释放方位角和速度的标定误差值:

$$[0065] \quad \text{标定误差值:} \begin{cases} \Delta \delta_{ic} = \sum_{k=1}^n (\beta_{ik} - \delta_{i0}) / n \\ \Delta v_{jc} = \sum_{k=1}^n (V_{jk} - v_{j0}) / n \end{cases}$$

[0066] 式中, δ_{i0} ($i = 1, 2, 3, 4$)和 v_{j0} ($j = 1, 2$)分别为每次实验前解算的模拟目标的释放

方位角和速度, $\Delta \delta_{ic}$ 为释放方位角的标定误差值, Δv_{jc} 为释放速度的标定误差值。

[0067] 进一步地, 解算出面向设定目标点的投送释放方位角 δ_i ($i=1, 2, 3, 4$) 和速度值 v_j ($j=1, 2$), 实际实验中采取的投送释放的方位角和速度分离修正值更新为如下:

$$[0068] \quad \text{分离修正值: } \begin{cases} \bar{\delta}_i = \delta_i + \Delta \delta_{ic} \\ \bar{v}_j = v_j + \Delta v_{ic} \end{cases}$$

[0069] 式中, $\bar{\delta}_i$ 为投送释放方位角的分离修正值, \bar{v}_j 为投送释放速度的分离修正值。

[0070] 本发明和现有技术相比具有如下有益效果:

[0071] 本发明提供一种超高速精瞄控制释放分离系统与方法, 其主要特点为:

[0072] 1) 相比已授权专利的加速旋转获取超高线速度的地面验证, 本发明提供的系统及控制方法可进一步实现投送目标的动态、瞬间高响应投送释放控制, 用于地面实验验证。

[0073] 2) 本发明提出的精瞄控制系统及控制方法, 可用于空间变轨所需的几十米每秒至百米每秒量级的地面验证过程中的模拟目标物的精瞄投送释放分离控制, 此方法可经过简单完善用于低轨实际在轨飞行过程中的精瞄投送释放分离控制。

[0074] 3) 本发明提出的精瞄控制系统及控制方法, 不仅可以用于单个目标的精准投送, 还可以用于多个目标的针对同一目标点的精准投送, 具有普适性。

附图说明

[0075] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案, 下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地, 下面描述中的附图仅仅是示例性的, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动的前提下, 还可以根据提供的附图引申获得其它的实施附图。

[0076] 图1为本发明实施例中一种超高速精瞄控制释放分离系统的原理框图;

[0077] 图2为本发明实施例中投送组件端部的投送释放器的安装示意图, 左图为安装角度; 右图为模拟目标被释放后的飞行方向(二者均是图中箭头方向), 图中圆形虚线是末端模拟目标旋转形成的轨迹, 虚线中的横线指的是投送组件;

[0078] 图3为本发明实施例中电机零位角定义示意图, 图中横杆上右末端是第一/第二投送组件的左端;

[0079] 图4为本发明实施例中投送释放坐标系 $Oxyz$ 定义示意图(图中黄色区域代表投送可达区域);

[0080] 图5为本发明实施例中图4的俯视图, 此图中以投送杆左端模拟目标释放为例;

[0081] 图6为本发明实施例中第二投送组件(此处以逆时针旋转为例)的模拟目标被释放后飞行方向示意图;

[0082] 图7为本发明实施例中第二投送组件(此处以逆时针旋转为例)的释放投送示意图, 目标点在D点左侧时的投送释放示意图;

[0083] 图8为本发明实施例中第二投送组件(此处以逆时针旋转为例)的释放投送示意图, 目标点在D点右侧时的投送释放示意图;

[0084] 图中标号:

[0085] 1-投送杆, 2-旋转轴, 3-投送可达区域, 4-电极0位。

具体实施方式

[0086] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0087] 需要说明的是,本发明中的上、下、左、右只是本发明实施例中结构的相对位置,并无特定技术含义,并无特定指定结构。

[0088] 如图1所示,本发明公开了一种超高速精瞄控制释放分离系统,包括投送目标点设定单元、定义投送释放坐标系单元、释放方位角和速度解算单元、释放方位角和速度修正单元。

[0089] 投送目标点设定单元,在所述投送目标点设定单元设定模拟目标的投送目标点;

[0090] 定义投送释放坐标系单元,用于建立投送释放坐标系,以进行模拟目标的投送释放分离飞行轨迹的模拟,并设置投送释放分离飞行轨迹模拟中的参数;

[0091] 释放方位角和速度解算单元,用于根据建立的所述投送释放坐标系,解算位于第一投送组件和第二投送组件端部的模拟目标的投送释放方位角和速度;

[0092] 释放方位角和速度修正单元,对所述释放方位角和速度解算单元解算的模拟目标的投送释放方位角和速度进行修正,根据修正后的投送释放方位角和速度进行超高速投送释放分离。

[0093] 释放方位角和速度修正单元,对所述释放方位角和速度解算单元解算的模拟目标的投送释放方位角和速度进行修正,以确定超高速精瞄控制释放分离系统中端部模拟目标释放分离瞬间的投送释放方位角和速度。

[0094] 在一个可能的实施例中,系统还包括释放方位角和速度标定单元,用于对多组实验的释放时刻的方位角和速度进行标定,得到位于第一投送组件和第二投送组件端部的模拟目标的投送释放方位角和速度的标定误差值,所述释放方位角和速度修正单元根据所述释放方位角和速度的标定误差值进行修正。其中,释放方位角和速度标定单元,可以通过对比释放分离实验中记录的模拟目标的投送释放方位角和速度与解算的模拟目标的投送释放方位角和速度,标定得到位于第一投送组件和第二投送组件端部的模拟目标的投送释放方位角和速度的标定误差值。

[0095] 本发明中,在某个固定实验场所,设定完投送目标点之后,地面装置依靠上述各单元,对解算得到的投送释放方位角和速度进行修正,以提高投送释放精度,实现投送目标的动态、瞬间高响应投送释放控制,用于地面实验验证。

[0096] 其中,第一投送组件和第二投送组件的旋转方向是相对的,一个顺时针转动,另一个逆时针转动。两投送组件在加速旋转过程中,形成两个独立互不干扰且平行的投送旋转面,两个所述投送旋转面之间设有固定距离,使得所述超高速精瞄控制释放分离系统能够同时/分时释放投送1个至4个模拟目标。

[0097] 在本发明的第二个方面,还提供一种上述超高速精瞄控制释放分离系统的控制方法,以实现多投送目标同时/分时可控的超高度精瞄投送释放分离,包括如下步骤:

[0098] 步骤1:设定投送目标点。

[0099] 选定实验场地后,在当前旋转场地范围,按照选择投送组件可达的目标范围内,选

定投送目标点,目标点设定范围按如下公式进行,然后通过解算器解算出面向该目标点的投送释放角 β_0 和角速度值 ω_0 :

$$[0100] \quad \text{设定目标点:} \begin{cases} l \leq \max\{L, W\} \\ h \leq H - 0.5g(l/v_{\max} \cos \alpha)^2 \end{cases}$$

[0101] 式中, l 和 h 分别为目标点距旋转投送释放点的水平距离和高度, $\max\{L, W\}$ 为取实验室长 L 和宽 W 的最大值函数, H 为投送释放分离点的高度, g 为重力加速度, v_{\max} 为旋转加速电机可驱动模拟目标达到的最大线速度, α 为旋转面与水平面的角度;

[0102] 步骤2:定义投送释放坐标系及其参数定义。

[0103] 根据步骤一中选定的投送目标点,同时基于地面位置固定的高速旋转装置平台,进行投送释放坐标系及其参数的定义,具体定义参考如下具体示例。

[0104] 其中,以实现同时/分时一个至4个模拟目标释放投送为例,进行举例,进行坐标系及其相关参数的定义。当模拟目标更多,或者旋动方向不一致时,同样可参考该方法进行定义,下文的释放方位角和速度标定、解算和确定同样是按照该示例进行展示。

[0105] 步骤2-1:定义投送释放相关参数。

[0106] 同样是针对同时/分时1个至4个模拟目标释放投送的情况,因此加速旋转过程中,形成两个投送旋转面,两个投送旋转面平行,且两个面相对独立不干扰,存在一定距离。旋转投送组件均在试验前进行了调平处理,因此两个旋转面均与水平面平行。

[0107] 在此基础上,定义如下投送释放相关参数:

[0108] • $v_j (j=1, 2)$ --- 第一投送组件、第二投送组件末端的模拟目标被投送释放瞬间的线速度,单位m/s;

[0109] • H --- 第一投送组件旋转面距地高度,单位m;

[0110] • h --- 第二投送组件旋转面与第一投送组件旋转面之间的高度,单位m;

[0111] • R --- 投送旋转半径,单位m;

[0112] • $\theta_i (i=1, 2, 3, 4; 0 < \theta_i < 90^\circ)$ --- 第一投送组件左端、第一投送组件右端、第二投送组件左端、第二投送组件右端的投送释放器安装角度,单位 $^\circ$ 。

[0113] 其中,末端投送释放器的安装角度(由于模拟目标安装在投送释放器上,也可以理解为模拟目标的安装角度)定义如图2左图,图2中的左图是释放器安装方向角度,但实际试验时投送释放末端模拟目标后,图2中的右图是模拟目标被释放后飞行方向。

[0114] • $\varphi_j (j=1, 2)$ --- 第一投送组件、第二投送组件的电机零位角,单位 $^\circ$ 。

[0115] 定义 φ_j 逆时针旋动为正角度。电机零位角度的定义如图3所示,水平横线(即坐标轴的 $0y$ 方向)为投送释放方位角的 0° 位角,则可得到实际投送释放方位角相对于电机的零位角,第一投送组件左末端为 $(\varphi_1 + \delta_1)$ 、右末端为 $(\varphi_1 + \delta_2 + \pi)$;同理,第二投送组件左末端为 $(\varphi_2 + \delta_3)$ 、右末端为 $(\varphi_2 + \delta_4 + \pi)$ 。图3中,上述提到 $0y$ 轴的以及图3中出现的坐标系 $0xy$ 为投送释放坐标系,将在步骤2-2中详细给出定义。

[0116] ● $\delta_i (i=1, 2, 3, 4)$ --- 第一投送组件左端、第一投送组件右端、第二投送组件左端、第二投送组件右端的投送释放方位角度,单位 $^\circ$ 。定义 δ_i 为相对于电机零位角的相对角度,且逆时针为正角度。

[0117] 步骤2-2:定义投送释放坐标系。

[0118] 根据上述定义可知,当面向具体的投送目标点时,预实现精准投送释放分离,需求释放器(或模拟目标)投送释放方位角($\varphi + \delta$)和投射速度 v 。

[0119] 由于需要面向不同方位和不同可投送距离的目标点,所以定义不同的投送释放坐标系来解决释放器投送释放方位角($\varphi + \delta$)和投射速度 v 的精准求解。

[0120] 定义投送释放坐标系的方法为:结合原点任选两个坐标轴组成的与投送旋转面平行的面为参照面,通过设定电机零位角所在的线与所述参照面中的其中一个坐标轴平行,建立三维投送释放坐标系,与所述电机零位角所在的线平行的坐标轴与第三坐标轴组成的平面定义为投送可达区域,用于模拟目标的投送释放分离飞行轨迹的模拟。

[0121] 在一个具体实施例中,定义投送释放坐标系 O_{xyz} 如图4所示。

[0122] 首先明确几个点并做出字母代表声明,如下:

[0123] ●目标点:坐标值为 $(0, y_0, z_0)$,为已知量。

[0124] ●第一投送组件的旋转中心:坐标值为 (X, Y, H) ,为已知量。

[0125] ●第二投送组件的旋转中心:坐标值为 $(X, Y, H+h)$,为已知量。

[0126] 如图4所示,原点 O 位于水平面上且与投送旋转装置的底座所在的面共面, O_{xy} 面与投送旋转面平行, O_y 轴与电机零位角所在的线平行,且方向一致,坐标系满足右手定则;根据实际实验室尺寸大小及目标点的位置选择原点 O ,具体地,即当选定目标点 $(0, y_0, z_0)$ 后,再定义面 O_{yz} ,使得目标点 $(0, y_0, z_0)$ 位于面 O_{yz} 上,原点 O 的具体位置可根据实验室尺寸灵活选择,例如可直接定义在目标点上,此处以将原点定义在实验室的最极限可视边线上(墙跟)为例,进行后续的投送释放方位角和速度的解算。

[0127] 此外,定义的坐标系 O_{xyz} 的俯视图如图5所示,进行相关字母及线条的说明。图中, E 为投送杆旋转中心,目标点设定为 A 点, C 点为模拟目标被释放分离点, C 点至 A 点的实线为模拟目标被投送释放分离飞行轨迹, D 点为 C 点在 O_y 轴上的投影点, AB 线和 BC 线分别平行于 O_x 轴和 O_y 轴。

[0128] 步骤3:解算投送释放方位角和速度。

[0129] 以第一投送组件顺时针旋转、第二投送组件逆时针选择为例,解算相应的投送释放方位角和速度。当旋转方向与此处举例不同时,仅有负号之差。

[0130] 步骤3-1:解算第一投送组件的投送释放方位角。

[0131] 首先,计算角度 $\angle ACD$:

$$[0132] \quad \angle ACD = \pi - \delta - \theta$$

[0133] 计算图5中的长度 a 和 b ,分别按如下公式计算:

$$[0134] \quad a = X + R \sin \delta$$

$$[0135] \quad b = \begin{cases} Y - y_0 + R \cos \delta, & \pi - \delta \geq \theta \\ -(Y - y_0 + R \cos \delta), & \pi - \delta < \theta \end{cases}$$

[0136] 然后,基于 a 和 b 计算 $\tan \angle ACD$,可得:

$$[0137] \quad \tan \angle ACD = \frac{b}{a}$$

[0138] 即:

$$[0139] \quad \tan(180^\circ - \delta - \theta) = \begin{cases} \frac{Y-y_0+R \cos \delta}{X+R \sin \delta}, & \pi - \delta \geq \theta \\ -\frac{Y-y_0+R \cos \delta}{X+R \sin \delta}, & \pi - \delta < \theta \end{cases} \quad (1)$$

[0140] 进一步,计算投送释放方位角 δ 。令 $\tan \delta = \sin \delta / \cos \delta$,带入上式中,可得:

$$[0141] \quad \mp \frac{\tan \theta \cos \delta + \sin \delta}{\cos \delta - \tan \theta \sin \delta} = \begin{cases} \frac{Y-y_0+R \cos \delta}{X+R \sin \delta}, & \pi - \delta \geq \theta \\ -\frac{Y-y_0+R \cos \delta}{X+R \sin \delta}, & \pi - \delta < \theta \end{cases} \quad (2)$$

[0142] 存在 $(\pi - \delta) \geq \theta \equiv (Y - y_0) \geq R$,因此,式(2)可变为如下式(3):

$$[0143] \quad \mp \frac{\tan \theta \cos \delta + \sin \delta}{\cos \delta - \tan \theta \sin \delta} = \begin{cases} \frac{Y-y_0+R \cos \delta}{X+R \sin \delta}, & (Y - y_0) \geq R \\ -\frac{Y-y_0+R \cos \delta}{X+R \sin \delta}, & (Y - y_0) < R \end{cases} \quad (3)$$

[0144] 针对式(2)(或式(3)),当 $(Y - y_0) \geq R$ (或 $\pi - \delta \geq \theta$)时,可得如下式(4):

$$[0145] \quad [(Y - y_0) \tan \theta - X] \sin \delta - [(Y - y_0) + X \tan \theta] \cos \delta = R \quad (4)$$

[0146] 求解上式(4)中的 δ ,令:

$$[0147] \quad [(Y - y_0) \tan \theta - X] = A; \quad (5)$$

$$[0148] \quad [(Y - y_0) + X \tan \theta] = B \quad (6)$$

[0149] 简化上两式为式(4-1):

$$[0150] \quad A \sin \delta - B \cos \delta = R \quad (4-1)$$

[0151] 进一步转换为求解上式(4-1)中的 δ ,设 $t = \tan \frac{\delta}{2}$,则:

$$[0152] \quad \sin \delta = \frac{2t}{1+t^2}; \quad \cos \delta = \frac{1-t^2}{1+t^2}$$

[0153] 将上两式带入式(4-1)中,可得式(7):

$$[0154] \quad t = \tan \frac{\delta}{2} = \frac{A \pm \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B} \quad (7)$$

[0155] 考虑到角度 $\theta > 0$ 且较小(通常为 $0 \sim 10^\circ$),且 $\delta + \theta > \pi/2$,可得:

$$[0156] \quad \tan \frac{\delta}{2} = \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}$$

[0157] 即:

$$[0158] \quad \delta = 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, \quad (Y - y_0) \geq R \quad (\text{或 } \pi - \delta \geq \theta)$$

[0159] 上式中,特别地,当 $\theta = 0$,即 $\pi - \delta = 0$ 时, $\delta = \pi$ 。

[0160] 同理,参照上述过程,针对 $(Y - y_0) < R$ (或 $\pi - \delta < \theta$)时,可得:

$$[0161] \quad \delta = 2\pi + 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, \quad (Y - y_0) < R \quad (\text{或 } \pi - \delta < \theta)$$

[0162] 综上,同时考虑算法的可编程性,将判定条件等价转化为角度 δ 和 θ (或长度 B 和旋

转半径R)的关系判定,可得:

$$[0163] \quad \delta = \begin{cases} 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, & \delta < \pi (\text{或 } B > R) \\ \pi & \delta = \pi (\text{或 } B = R) \\ 2\pi + 2 \tan^{-1} \frac{A - \sqrt{A^2 - (R^2 - B^2)}}{R - B}, & \delta > 0 (\text{或 } B < R) \end{cases} \quad (8)$$

[0164] 步骤3-2:解算确定第一投送组件的投送释放方位角。

[0165] 因为位于同一投送组件两端的模拟目标的投送释放方位角的解算值互补,根据式(8)可知,第一投送组件左端和右端模拟目标的投送释放方位角的解算值分别为:

$$[0166] \quad \begin{cases} \delta_1 = \delta \\ \delta_2 = \pi + \delta \end{cases} \quad (9)$$

[0167] 步骤3-3:解算第二投送组件的投送释放方位角。

[0168] 参照上述第一投送组件的相关解算过程,可以得到第二投送组件的投送释放方位角表达式。

[0169] 但是,首先需要明确的是第二投送组件旋转方向与第一投送组件的旋转方向相反,因此第二投送组件为逆时针方向旋转,如图6所示。

[0170] 同理,第二投送组件的电机零位角定义示意图如图7和图8所示,定义逆时针方向为正角度,此处以图7中的水平0y轴方向为电机零位角,与上述的第一投送组件的电机零位角定义方向一致。同样,投送释放方位角为相对于电机零位角的角度,逆时针为正,反之为负。

[0171] 而逆时针运动的投送组件,在针对已定义好的位于0yz面上的目标点(0, y₀, z₀)时,为兼顾所有可能出现的区域,投送组件旋转必然存在通过电机零位角的情况,此时会引起电机零位角由0°到±180°或±180°到0°的跳变,此跳变点对应的目标点位于投影点D的两侧。

[0172] 即逆时针运动的投送组件的轨迹模拟中,模拟目标在所述投送可达区域的平面内的投影点标记为D点,设定的投送目标点A有两处位于投影点的两侧,如图7和图8所示。

[0173] 因此解算公式(8)不能同时准确地解算出两侧不同的情况,必须按两侧分别考量,其过程为:

[0174] 参照第一投送组件解算过程,同理可得式(10):

$$[0175] \quad [X + (Y - y_0) \tan \theta] \sin \delta - [(Y - y_0) - X \tan \theta] \cos \delta = R \quad (10)$$

[0176] 求解式(10)中的 δ ,令:

$$[0177] \quad [X + (Y - y_0) \tan \theta] = A_2; \quad (10-1)$$

$$[0178] \quad [(Y - y_0) - X \tan \theta] = B_2; \quad (10-2)$$

[0179] 将上两式(10-1)和(10-2)简化为式(10-3):

$$[0180] \quad A_2 \sin \delta - B_2 \cos \delta = R \quad (10-3)$$

[0181] 然后,直接利用上述的第一投送组件的计算过程结论(式(8)),且同理考虑到 $\tan \frac{\delta}{2} > 0$,可知 $A_2 > 0$ 恒成立,且分子项(即: $A_2 - \sqrt{A_2^2 - (R^2 - B_2^2)}$)和分母项(即: $R - B_2$)同号。

[0182] 故可得针对第二投送组件的释放方位角 δ^* 为:

$$[0183] \quad \delta^* = 2 \tan^{-1} \frac{A_2 - \sqrt{A_2^2 - (R^2 - B_2^2)}}{R - B_2}, \quad R \neq B_2 \quad (11-1)$$

[0184] 特别地,此处需考虑特殊情况,即 $R=B_2$ 时,分母项(即: $R-B_2$)等于0,此时有:

$$[0185] \quad \delta^* = 2 \tan^{-1} \frac{R+B_2}{2A_2}, \quad R = B_2 \quad (11-2)$$

[0186] 综上,可得针对第二投送组件的投送方位角为下式,定义下式为式(11):

$$[0187] \quad \delta^* = \begin{cases} 2 \tan^{-1} \frac{A_2 - \sqrt{A_2^2 - (R^2 - B_2^2)}}{R - B_2}, & R \neq B_2 \\ 2 \tan^{-1} \frac{R+B_2}{2A_2}, & R = B_2 \end{cases} \quad (11)$$

[0188] 步骤3-4:解算确定第二投送组件的投送释放方位角。

[0189] 根据式(11)可知,第二投送组件左端和右端模拟目标的投送释放方位角的解算值分别为:

$$[0190] \quad \begin{cases} \delta_3 = \delta^* \\ \delta_4 = \pi + \delta^* \end{cases} \quad (12)$$

[0191] 步骤3-5:解算第一&第二投送组件的投送释放速度。

[0192] 根据目标点 $(0, y_0, z_0)$ 的高度 z_0 来解算投送释放速度 v_j ($j=1, 2$),由于位于同一投送组件两端的模拟目标的投送释放速度的解算值相等,所以 $j=1, 2$ 。

[0193] 首先,定义模拟目标的飞行距离为投送释放分离点到目标点之间的飞行轨迹在平面 Oxy 上的投影线的长度,模拟目标的飞行距离 Δl 为式(12-1):

$$[0194] \quad \Delta l = \sqrt{X^2 + (Y - y_0)^2} \quad (12-1)$$

[0195] 然后,定义模拟目标的飞行落差为投送释放分离点到目标点之间的飞行轨迹在平面 Oxz (或 Oyz)上的投影线的长度,模拟目标的飞行落差 Δh 为式(12-2):

$$[0196] \quad \Delta h = \begin{cases} H - z_0, & \text{下杆} \\ H + h - z_0, & \text{上杆} \end{cases} \quad (12-2)$$

[0197] 最后,基于式(12-1)和式(12-2),可得投送释放速度 v_j ($j=1, 2$)为式(12):

$$[0198] \quad v_j = \sqrt{\frac{2g}{\Delta h}} \Delta l \quad (12)$$

[0199] 步骤4:标定投送释放方位角和速度。

[0200] 本发明中的标定具体是通过比对标定实验的记录值和对应的解算值,得到释放方位角和速度的误差,以得到标定误差值。

[0201] 步骤4-1:记录释放时刻的投送释放方位角和速度。

[0202] 解算完成后,开始投送释放实验,假设每次实验前解算的方位角和速度分别为 δ_{i0} ($i=1, 2, 3, 4$)和 v_{j0} ($j=1, 2$)。通过装置的角位移和旋转速度敏感器,实时记录旋转过程及投送释放瞬间的方位角和速度,在完成投送释放分离瞬间,记录当前时刻的四个末端模拟

目标的投送释放方位角和速度。

[0203] 步骤4-2: 标定释放方位角和速度。

[0204] 按照步骤1~2和步骤3, 重复至少3次或3次以上, 定义重复的实验次数为n, 记录所有实验的释放时刻的方位角 β_{ik} ($i=1, 2, 3, 4; k=1, 2, \dots, n$) 和速度 V_{jk} ($j=1, 2; k=1, 2, \dots, n$), 按下式得到释放方位角和速度的标定误差值。

$$[0205] \quad \text{标定误差值: } \begin{cases} \Delta\delta_{ic} = \sum_{k=1}^n (\beta_{ik} - \delta_{i0}) / n \\ \Delta v_{jc} = \sum_{k=1}^n (V_{jk} - v_{j0}) / n \end{cases}$$

[0206] 式中, $\Delta\delta_{ic}$ 为释放方位角的标定误差值, Δv_{jc} 为释放速度的标定误差值。

[0207] 步骤5: 修正面向具体实验的投送释放方位角和速度。

[0208] 步骤5-1: 解算投送释放方位角和速度。按照步骤1~2和步骤3进行实验准备。

[0209] 步骤5-2: 对投送释放方位角和速度进行修正。

[0210] 在步骤3中, 解算出面向设定目标点的投送释放方位角 δ_i ($i=1, 2, 3, 4$) 和速度值 v_j ($j=1, 2$), 实际实验中采取的实际投送释放角修正值 $\bar{\delta}_i$ ($i=1, 2, 3, 4$) 和速度修正值 \bar{v}_j ($j=1, 2$) 更新为如下:

$$[0211] \quad \text{分离修正值: } \begin{cases} \bar{\delta}_i = \delta_i + \Delta\delta_{ic} \\ \bar{v}_j = v_j + \Delta v_{jc} \end{cases}$$

[0212] 式中, $\bar{\delta}_i$ 为投送释放方位角的分离修正值, \bar{v}_j 为投送释放速度的分离修正值。

[0213] 释放分离实验中, 一旦释放了模拟目标, 模拟目标本身不具备自我修正能力, 被释放后模拟目标将按照释放时的方向和速度飞行下去, 而实操实验中, 由于仪器等一系列原因, 会造成端部模拟目标分离时的释放方位角和速度不是解算出的基础对比值, 即释放分离瞬间的方位角和速度和解算的基础对比值可能存在误差。而速度越高带来的可能性误差就越大, 所以本发明在释放分离的瞬间进行修正, 提供了端部模拟目标投送分离瞬间的修正值, 能够保证超高速运行下的精瞄控制。

[0214] 步骤6: 数据实时获取与后处理。

[0215] 以投送释放方位角和速度的分离修正值进行超高速投送释放分离实验, 每次的投送释放实验过程中, 不断实时纪录实验旋转加速角位置和旋转速度; 同时在完成投送释放分离瞬间, 记录当前时刻的角位置和旋转速度, 供用户实验数据分析。

[0216] 步骤7: 完成本实验或进行新一轮投送释放验证实验。

[0217] 结束本轮次实验, 或者返回步骤1进行新一轮验证实验。

[0218] 以上实施例仅为本申请的示例性实施例, 不用于限制本申请, 本申请的保护范围由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内, 对本申请做出各种修改或等同替换, 这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。

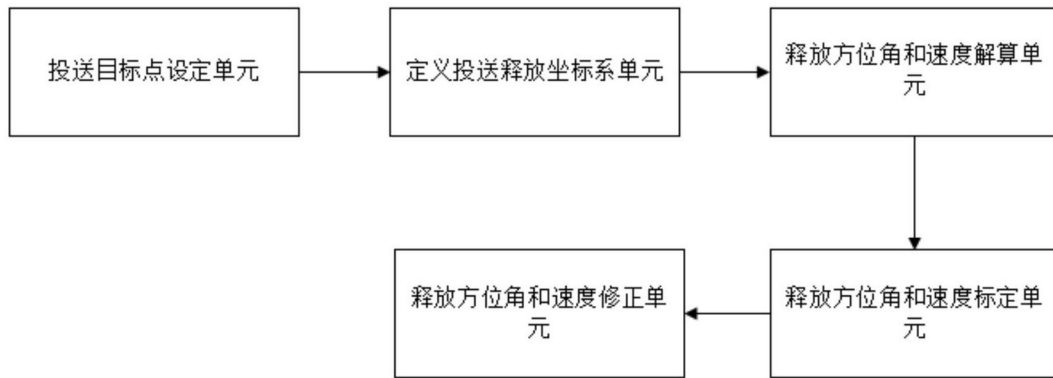


图1

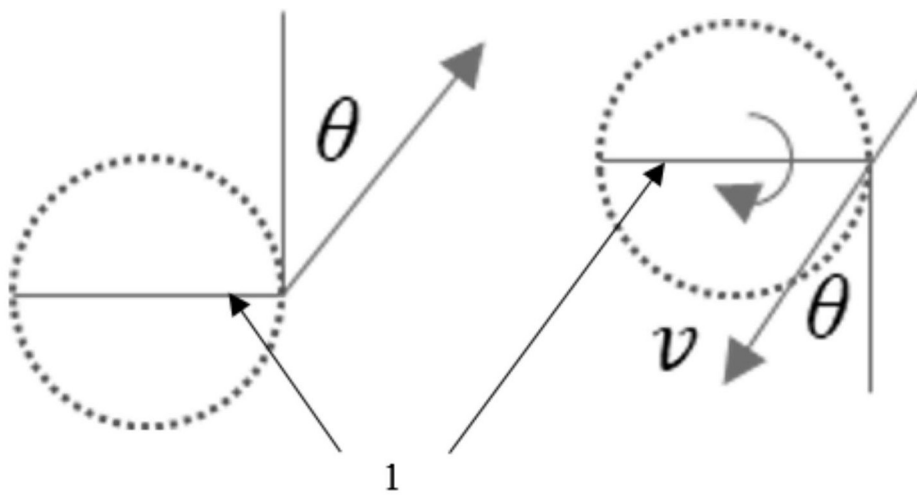


图2

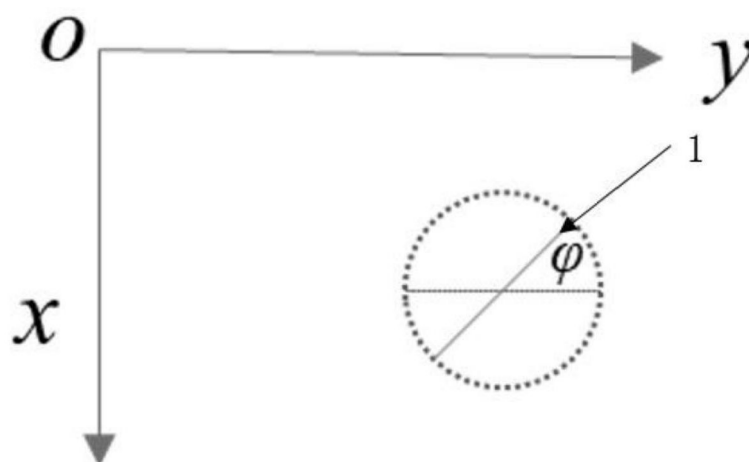


图3

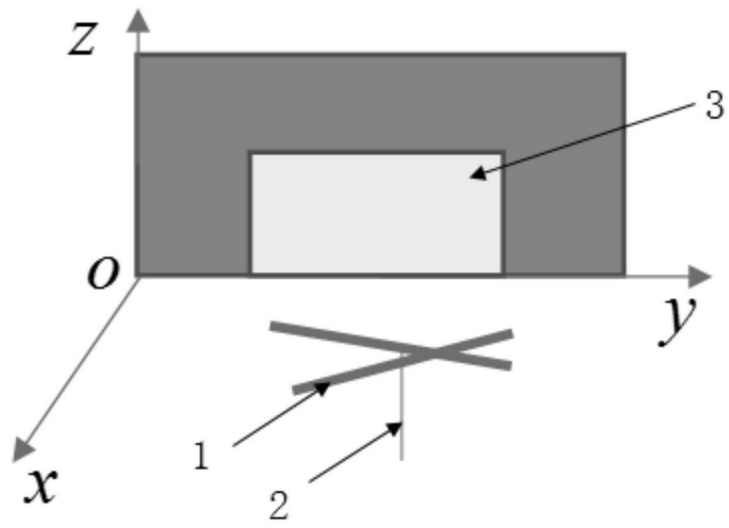


图4

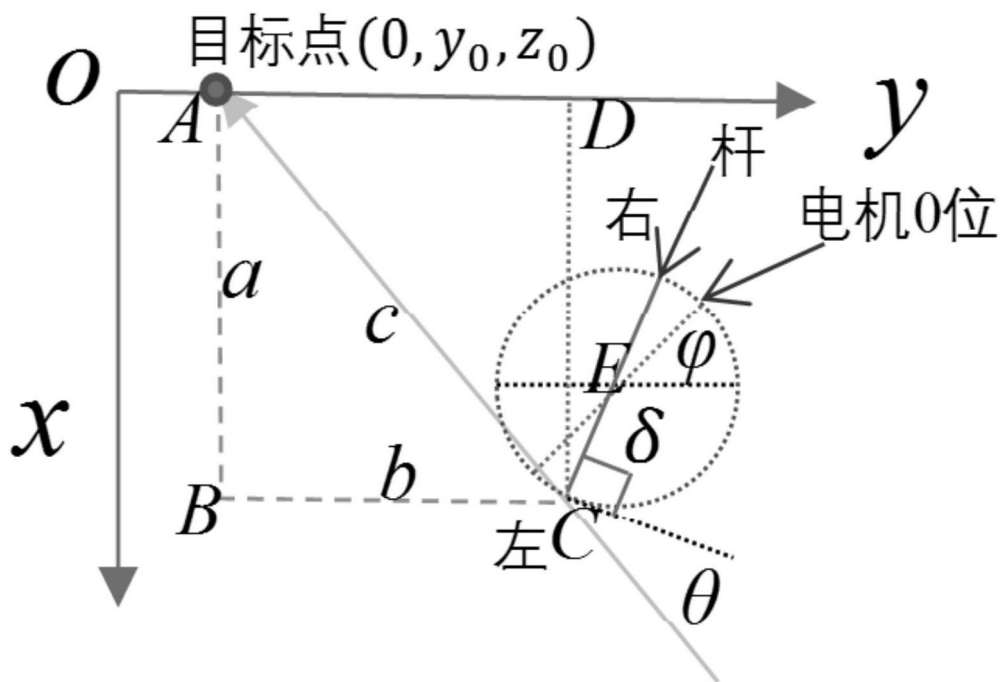


图5

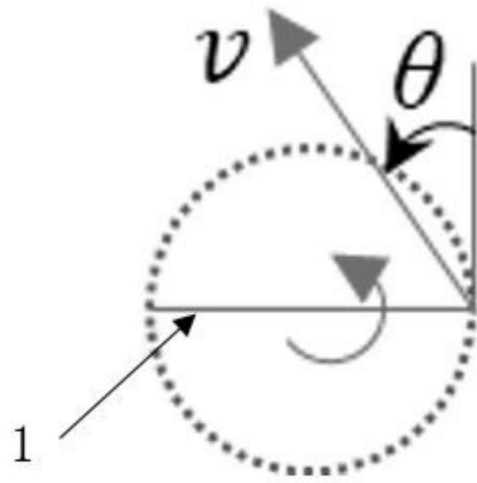


图6

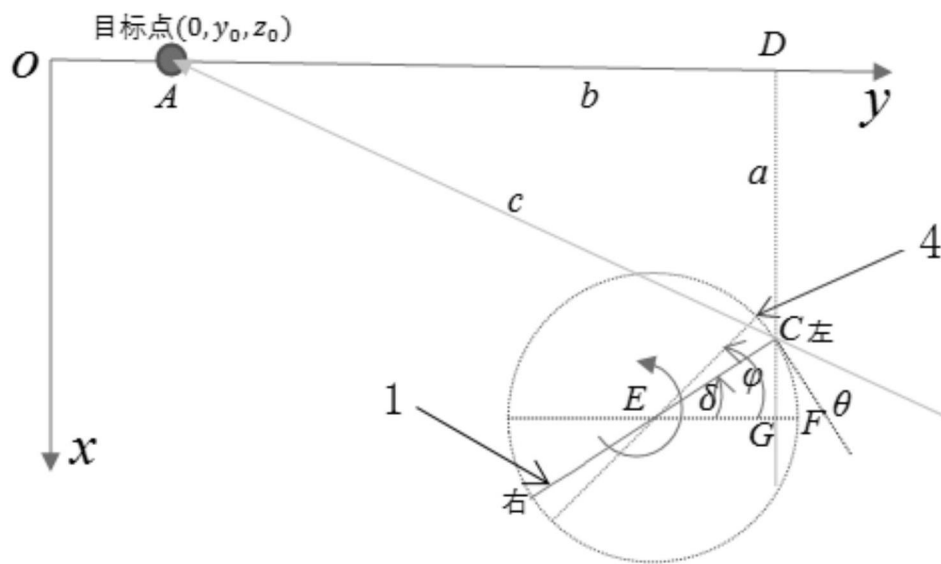


图7

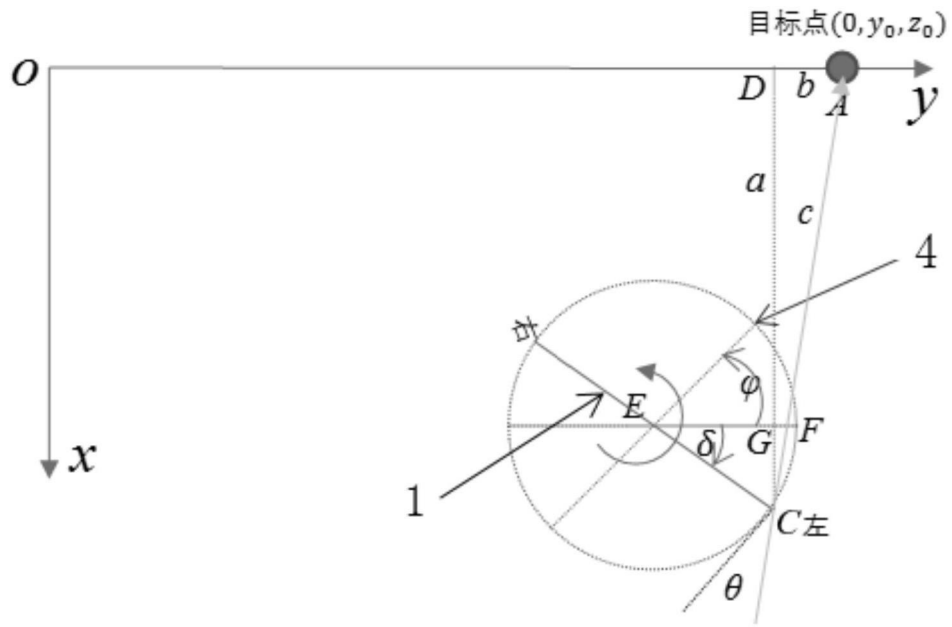


图8