

doi: 10.7690/bgzd.2016.09.005

## 改进的光学下滑道稳定算法

张涛, 潘传勇, 孙婧

(海军航空工程学院青岛校区, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 针对常见光学下滑道稳定算法中飞行员操纵负担和着舰误差二者相互矛盾, 并且不能实现闭环控制的问题, 提出一种改进的光学下滑道稳定算法。首先介绍母舰运动的简化模型, 分析点稳定、角稳定、线稳定和惯性稳定 4 种常见的光学下滑道稳定算法, 然后建立飞行员操纵负担和着舰误差的数学模型, 最后在惯性稳定的基础上, 将着舰误差作为飞行员操纵负担进行稳定解算, 得到改进算法的灯箱运动控制规律。分析结果表明: 该算法充分兼顾了飞行员操纵负担和着舰误差这 2 个主要因素, 并通过着舰误差的引入实现了闭环控制, 为光学下滑道的稳定提供了新思路。

**关键词:** 光学下滑道; 稳定算法; 飞行员操纵负担; 着舰误差

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Improved Optical Glideslope Stabilization Algorithm

Zhang Tao, Pan Chuanyong, Sun Jing

(Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** Aiming at the problems that common optical glide slope stabilization algorithms cannot keep pilot control burden and landing error in good condition simultaneously, and cannot realize close-loop control, an improved optical glide slope stabilization algorithm is proposed. Firstly, simplified model of carrier motion was introduced, and point stabilization, angle stabilization, line stabilization and inertia stabilization which are common optical glide slope stabilization algorithms were analyzed. Then the mathematic models of pilot control burden and landing error were established. Lastly, based on inertia stabilization, the stabilization algorithm was solved by using landing error as pilot control burden, and the lamp-box motion control rules of improved algorithm were obtained. The analysis results indicate that the two main factors of pilot control burden and landing error were overall considered, and the lose-loop control was realized by landing error in this improved algorithm, which can provide a new idea for optical glide slope stabilization.

**Keywords:** optical glide slope; stabilization algorithm; pilot control burden; landing error

### 0 引言

光学助降装置是现役航母上普遍装备的近程着舰引导设备。它采用特定的稳定算法, 通过其随动系统对母舰的运动进行补偿, 为返航着舰的舰载机提供一个相对稳定的光学下滑道, 引导飞行员进行目视着舰<sup>[1-4]</sup>。光学下滑道的稳定算法是决定光学助降装置性能的一个重要因素, 这也引起了广大学者的研究兴趣。例如文献[5]分析了几种常见的光学下滑道稳定算法和终端误差统计方法; 文献[6-7]研究了一种近程改进型光学助降装置的终端着舰误差, 并进行了数字仿真; 文献[8]比较系统地分析了光学助降装置终端着舰误差的来源和产生机理, 并对不同的误差源建立了数学模型。目前, 针对算法本身的研究较少, 大多是针对不同稳定算法的着舰误差开展研究, 但没有考虑飞行员跟踪光学下滑道的操纵负担。笔者在综合考虑着舰误差和飞行员操纵负担这 2 个主要因素的前提下, 提出一种改进的光学

下滑道稳定算法。

### 1 母舰运动的简化模型

舰载机在返航着舰时, 母舰自身的航行对舰载机着舰几乎没有任何影响, 真正影响舰载机着舰的是母舰自身的扰动。母舰舰体会在海浪及浪涌的作用下产生 6 个自由度的扰动, 分别为沿自身 X、Y、Z 轴 3 个方向上的运动及绕这 3 个轴的转动, 分别为纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和艏摇。航母 6 个自由度的扰动如图 1 所示。

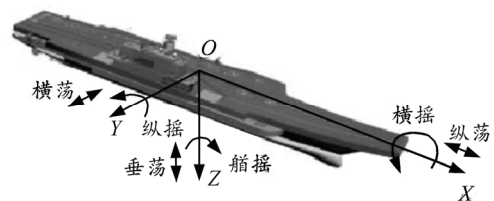


图 1 航母六个自由度的扰动

母舰自身的运动会使光学助降装置发出的光平

收稿日期: 2015-05-20; 修回日期: 2016-06-17

作者简介: 张涛(1983—), 男, 山东人, 博士, 讲师, 从事舰面航空保障研究。

面产生波动，引起光学下滑道的不稳定，最终导致理想着舰点发生变化。在舰载机触舰瞬间，理想着舰点位置的变化可能会造成舰载机着舰失败，降低舰载机着舰的成功率，并影响舰载机着舰的安全性；因此，在研究航母 6 个自由度扰动的影响时，笔者只关注会对理想着舰点高度造成影响的航母扰动。

其中，横荡、纵荡以及艏摇这 3 个扰动改变的只是理想着舰点在甲板平面上的位置，不会对理想着舰点的高度造成影响。而纵摇、横摇和垂荡(又称为升沉)这 3 个扰动都会从不同的角度使理想着舰点的高度发生变化<sup>[9-11]</sup>；因此，文中所涉及的母舰的姿态信息就是指母舰纵摇、横摇和升沉这 3 个自由度的扰动。

### 2 常见的光学下滑道稳定算法

当母舰发生运动时，如果不对下滑道光束进行补偿，下滑道光束与甲板面之间的夹角将保持不变。随动系统的作用，就是通过对光平面进行补偿，隔离母舰运动对光平面所产生的影响，从而保证下滑道的相对稳定。具体而言，当母舰姿态发生变化时，随动系统根据所选取的下滑道稳定算法进行相应的解算，输出电压信号控制电机旋转，带动灯箱运动，从而保证下滑道光束的相对稳定。光学助降装置目前主要有点稳定、角稳定、线稳定和惯性稳定 4 种稳定算法。

点稳定是指在下滑道光束上某一点保持空间稳定不变，这一点通常选取在距离透镜 762 m 的位置处；角稳定是指下滑道光束与水平面的夹角保持空间稳定不变。点稳定和角稳定如图 2 所示。

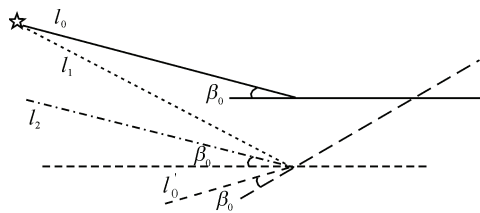


图 2 点稳定和角稳定示意图

图中，光束  $l_0$  为初始光束； $l_0'$  为舰体姿态发生变化后未经补偿的光束； $l_1$  为点稳定补偿后的光束； $l_2$  为角稳定补偿后的光束。可以看出：点稳定相当于在空间中把原下滑道光束绕着固定点进行一个角度的旋转，使下滑道光束过理想着舰点。而角稳定相当于在空间中把原下滑道光束进行了平移，下滑道光束仍过理想着舰点。

线稳定是指在着舰过程中使下滑道光束这条直

线保持空间相对稳定不变；相对稳定具体指下滑道光束不受舰体纵/横摇运动的影响，仅随舰体的升沉运动而垂直变化。

惯性稳定实际上就是在线稳定的基础上增加了对航母升沉运动的补偿，这样光束就在惯性空间内保持绝对的稳定不变。在惯性稳定下，下滑道光束不受舰体纵/横摇和升沉运动的影响。线稳定和惯性稳定如图 3 所示。

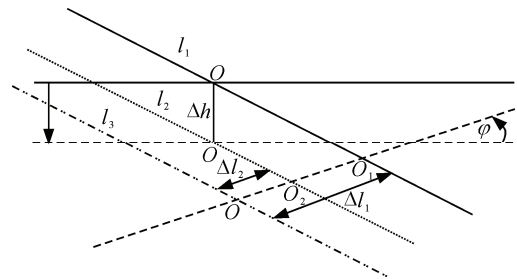


图 3 惯性稳定和线稳定示意图

图 3 中， $l_1$  为惯性稳定的下滑道光束； $l_2$  为线稳定的下滑道光束； $l_3$  则为角稳定的下滑道光束； $O$  点为理想着舰点； $O_1$  点为惯性稳定的实际着舰点； $O_2$  为线稳定的实际着舰点。由图中可见，惯性稳定的下滑道光束是绝对稳定的，与母舰姿态无关，但惯性稳定的着舰点偏移量  $OO_1$  明显大于线稳定的着舰点偏移量  $OO_2$ 。

这 4 种稳定算法中，对于角稳定和点稳定而言，理想着舰点保持不变，但它是以增大飞行员操纵负担为代价换来的。对于惯性稳定而言，飞行员的操纵负担最小，而这是以增大着舰误差为代价换来的。由此可见，着舰误差与飞行员操纵负担这二者是一对矛盾关系。

### 3 改进的光学下滑道稳定算法

针对光学下滑道稳定算法中着舰误差与飞行员操纵负担这一对矛盾，同时为了能定量比较稳定算法中着舰误差与飞行员操纵负担，实现稳定的闭环控制，分别建立这二者的数学模型，提出改进算法。

#### 3.1 飞行员操纵负担模型 $l_0'$

母舰的纵摇、横摇和升沉运动会使下滑道光束产生相应的波动，如图 4 所示。

其中，虚线表示理想的光学下滑道；实线表示实际的飞行轨迹。飞行员的主要任务就是在竖直方向上及时调整飞机的高度跟踪理想的光学下滑道，所以飞行员的操纵负担可用实际飞行轨迹上的某一点相对于理想光学下滑道的在竖直方向上的偏移

$h_b$  来表示。经推导，飞行员操纵负担  $h_b$  的最终表达式由下式表示，文献[12]给出了详细的推导过程。

$$h_b = (h_s + C_1\theta_s + C_2\varphi_s + C_3\varphi_L) + (C_4\theta_s + C_5\varphi_s + C_6\theta_L)R \quad (1)$$

式中： $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$  分别表示航母的几何尺寸，具体含义可参阅文献[12]； $\theta_s$  和  $\varphi_s$  分别为舰体的俯仰角和横摇角； $h_s$  表示舰体的升沉幅度，即  $\theta_s$ 、 $\varphi_s$  和  $h_s$  表示母舰的姿态角变化规律； $\theta_L$  和  $\varphi_L$  分别为灯箱运动的俯仰角和横摇角； $R$  定义为实际的下滑基准光波束上的一点到透镜的距离。

由式 (1) 可见，飞行员的操纵负担  $h_b$  与航母的几何，海浪的形式与大小  $h_s$ 、 $\theta_s$ 、 $\varphi_s$ ，波束点的位置  $R$ ，以及灯箱的运动  $\theta_L$ 、 $\varphi_L$  有关。

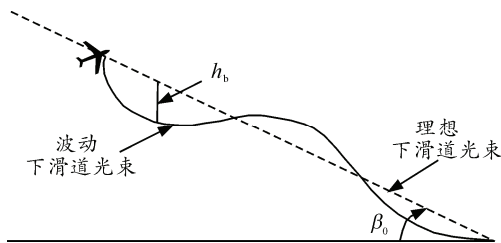


图 4 下滑道光束的波动示意图

### 3.2 着舰误差模型

着舰终端误差通常用理想着舰点的高度误差  $\Delta h_{TD}$  来表示。理想着舰点的高度误差  $\Delta h_{TD}$  决定着舰载机能否成功着舰，如果  $\Delta h_{TD}$  过大，飞机将不能钩住阻拦索；如果  $\Delta h_{TD}$  过小，飞机将会撞在舰艙上。航母甲板上一般布置有 4 根阻拦索，从舰艙至舰艏依次编号为 1 号至 4 号，所谓的理想着舰点就是指位于 2 号和 3 号阻拦索之间的中心位置。

按理想状态着舰，飞机在惯性轨迹的末端钩住航母上的阻拦索，此时理想着舰点的高度(相对惯性基准轨迹而言)  $h_{TD} = 0$ 。但由于母舰自身的扰动，理想着舰的实际高度

$$h_{TD} = h_s - L_{TD} \cdot \sin \theta_s + Y_{TD} \cdot \sin \varphi_s \approx h_s - L_{TD} \cdot \theta_s + Y_{TD} \cdot \varphi_s \quad (2)$$

式中： $L_{TD}$  为理想着舰点距离舰体俯仰中心的水平距离； $Y_{TD}$  为理想着舰点距离舰体滚转轴的距离； $\theta_s$ 、 $\varphi_s$  和  $h_s$  为母舰的姿态信息。

理想着舰点的高度误差  $\Delta h_{TD}$  可定义为

$$\Delta h_{TD} = h_{aTD} - h_{TD} \quad (3)$$

式中， $h_{aTD}$  为飞机在理想着舰点处的实际高度，计

算  $h_{aTD}$  的几何关系如图 5 所示。

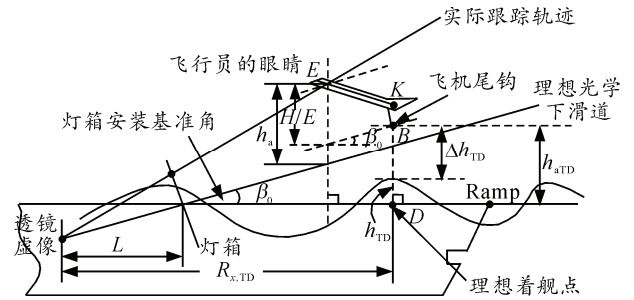


图 5 计算理想着舰点高度误差的几何关系

由图 5 中的几何关系可得

$$h_{aTD} = (h_a - H/E) + (R_{x,TD} - L) \tan \beta_0 \quad (4)$$

把式 (2) 和式 (4) 代入式 (3) 可得

$$\Delta h_{TD} = (h_a - H/E) + (R_{x,TD} - L) \tan \beta_0 - (h_s - L_{TD} \cdot \theta_s + Y_{TD} \cdot \varphi_s) \quad (5)$$

上式中， $R_{x,TD}$  为理想着舰点与光学助降装置所成虚像的水平距离； $L$  为光学助降装置光学透镜与其虚像之间的水平距离； $\beta_0$  为灯箱的安装基准角； $H/E$  为飞机的钩眼距，是飞机的一个具体尺寸，与飞机的类型有关； $h_a$  为在理想着舰点处，飞行员的眼睛与理想光学下滑道的垂向偏移，即

$$h_a = h_b \Big|_{R = \frac{(R_{x,TD} - L)}{\cos \beta_0}} = (h_s + C_1\theta_s + C_2\varphi_s + C_3\varphi_L) + (C_4\theta_s + C_5\varphi_s + C_6\theta_L) \frac{(R_{x,TD} - L)}{\cos \beta_0} \quad (6)$$

### 3.3 改进算法的实现

点稳定和角稳定由于飞行员的操纵负担太大，目前已基本不用。惯性稳定在空间中是绝对稳定的，只需令  $h_b = 0$  即可解算出灯箱的运动控制规律；由于线稳定相对于母舰的纵摇和横摇能保持稳定，但会随母舰的升沉运动而垂直运动，并且升沉运动造成的垂向偏移与舰体的升沉幅度相等，令  $h_b = h_s$  同样可解算出灯箱的运动控制规律。

由式 (5) 可见：对于惯性稳定和线稳定中的着舰误差完全是由母舰的姿态信息决定，与具体的稳定算法无关；所以上述光学下滑道的稳定算法实际上都是开环控制，飞机的跟踪轨迹只与母舰姿态的变化有关，而不会随着着舰误差的变化进行相应的调整。基于此，为尽可能地减小着舰误差，在惯性稳定的前提下，将理想着舰的高度误差作为飞行员的操纵负担，即可得到一种改进的闭环控制稳定算法，即

$$h_b = \Delta h_{TD} \quad (7)$$

由式 (7) 可得到改进稳定算法的灯箱运动的控制规律

$$\left. \begin{aligned} \theta_L &= -\frac{C_4}{C_6}\theta_s - \frac{C_5}{C_6}\varphi_s \\ \varphi_L &= -\frac{C_1}{C_3}\theta_s - \frac{C_2}{C_3}\varphi_s - \frac{1}{C_3}(h_s - \Delta h_{TD}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由式 (5) 可得,  $\Delta h_{TD}$  并不是一个固定值。它的计算还与  $h_b$  的计算表达式有关, 由此形成一个互相迭代的闭环控制, 计算时初始计算条件设为惯性稳定, 同时母舰静止不动, 即  $h_b = 0$ ,  $h_s = 0$ ,  $\varphi_s = 0$ ,  $\theta_s = 0$ 。

#### 4 结束语

笔者针对常见光学下滑道稳定算法的定性分析, 建立了飞行员操纵负担和着舰误差的数学模型, 并提出了一种改进的光学下滑道稳定算法, 在惯性稳定算法的基础上, 将着舰误差作为飞行员的操纵负担, 从而实现了稳定算法的闭环控制, 为光学下滑道的稳定控制提供了一种新的思路。

#### 参考文献:

[1] McCabe M J. NATOPS Landing signal officer reference manual[M]. Washington DC, naval air systems command,

2009: 1-16.  
 [2] 彭秀艳, 赵希人. 舰载机起降指导技术研究现状及发展趋势[J]. 机电设备, 2006, 23(2): 12-15.  
 [3] 欧汛. 航母舰载机着舰助降装置[J]. 现代舰船, 2005, 245(8): 42-47.  
 [4] 杨一栋, 姜龙宝, 许卫宝. 舰载机光学着舰引导控制要素[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 4-7.  
 [5] 彭贞慧, 王新华, 方芬. 菲涅尔透镜助降系统配置及终端误差分析[J]. 大众科技, 2008(8): 49-50.  
 [6] 郑峰婴, 杨一栋. “艾科尔斯”改进型光学助降系统的纵向着舰精度研究[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 4(2): 111-115.  
 [7] 龚华军, 方芬, 邢建芳, 等. 先进的目视回收光学助降系统纵向着舰精度[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(5): 677-681.  
 [8] 黄炯, 洪冠新. FLOLS 误差源建模与仿真研究[J]. 飞行力学, 2010(1): 92-96.  
 [9] 朱齐丹, 张雯, 张智. 菲涅耳引导光线惯性补偿稳定规律研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(5): 619-626.  
 [10] 许东松, 刘星宇, 王立新. 航母运动对舰载机着舰安全性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(3): 289-294.  
 [11] 贾新强, 林鹏, 王敏文, 等. 舰载机着舰甲板运动误差及其补偿仿真研究[J]. 航空计算技术, 2010, 40(1): 114-118.  
 [12] Durand B S, Teper G L. An analysis of terminal flight path control in carrier landing[R]. AD606040. Washington DC: Office of Naval Research Department of the Navy, 1964.