

doi: 10.7690/bgzdh.2021.01.004

遥控武器站瞄准线平移的补偿方法

文云¹, 鲁飞², 向学辅¹, 刘启辉¹, 陈浩¹, 王科¹

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司武器装备信息与控制中心, 四川 绵阳 621000;

2. 中国人民解放军 32381 部队, 北京 100071)

摘要: 为解决遥控武器站行进间对固定目标稳瞄过程中瞄准线平移的影响, 运用已有的传感器信息进行角速度补偿。分析补偿角速度数学推导过程中存在的问题, 提出根据几何关系近似求解的方法, 对近似求解公式进行推导, 并通过 Matlab 软件在不同捷径下对补偿角速度近似解与真值进行仿真对比。结果表明: 补偿误差和误差率均符合精度要求, 满足实际应用。

关键词: 遥控武器站; 瞄准线平移; 补偿角速度; 近似解

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

Compensation Method of Sight Line Translation on Remote Control Weapon Station

Wen Yun¹, Lu Fei², Xiang Xuefu¹, Liu Qihui¹, Chen Hao¹, Wang Ke¹

(1. Weapon Equipment Information & Control Center, Automation Research Institute Co., Ltd. of

China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;

2. No. 32381 Unit of PLA, Beijing 100071, China)

Abstract: Aimed at the influence of sight line translation during marching on remote control weapon station (RCWS), an angular velocity solved to compensate by using the existing sensors. Analyzed the shortcomings in the process of mathematical deduction of compensation angular velocity, put forward an approximate solution method according to geometric relationship, deducted the approximate solution formula, and contrasted the approximate compensation angular velocity with the truth value at different shortcuts by Matlab software. The results show that compensation error and error rate meet the demand of precision, and satisfy actual application.

Keywords: RCWS; sight line translation; compensation angular velocity; approximate solution

0 引言

遥控武器站(remote controlled weapon station, RCWS)是集目标搜索、识别、跟瞄和打击于一体的小型火力打击系统, 具有遥控操作、质量轻、适装性强、射击反应时间短和行进间射击等特点^[1-2]。随着现代战争中城市作战、反恐作战、无人作战等新型作战样式的出现, 遥控武器站的诸多优势不断突显, 成为各国竞相研制的重点装备^[3]。

行进间稳定瞄是遥控武器站在高机动条件下进行目标跟踪、打击的基础。通常情况下, 采用安装于运动轴系或载体上的陀螺敏感角速率扰动引入控制回路中实现武器站的空间指向稳定, 但这种方式并不能消除车体机动行驶产生的瞄准线平移误差^[4]。郝强等^[5]通过采集目标距离、火线相对车体角度和车体速度等信息, 根据坦克与目标的相对位置和运动关系进行分类, 循环解算瞄准线平移的补

偿角速度, 使瞄准线始终跟踪目标, 但分类繁琐, 计算复杂。

笔者在此基础上研究了遥控武器站瞄准线的平移补偿方法, 按照车体与固定目标的相对关系, 在 4 个角度象限进行数学推导。为简化判断条件和计算量, 对补偿角速度 ω 进行近似求解, 通过 Matlab 仿真验证证明该方法满足精度要求, 并应用于某型遥控武器站火控系统中。试验结果表明: 加入补偿角速度 ω 后, 降低了瞄准难度, 减小了瞄准误差。

1 稳定控制原理

遥控武器站可安装独立式或集成式观瞄。采用独立观瞄进行瞄准时, 射手通过操控终端控制观瞄, 武器站火力线随动于瞄准线^[6]; 采用集成观瞄进行瞄准时, 瞄准线与火力线同轴, 射手直接操控武器站。图 1 为武器站目标瞄准的工作原理。车体行进过程中, 3 个正交的角速度陀螺安装在站体底部,

收稿日期: 2020-08-27; 修回日期: 2020-10-08

作者简介: 文云(1987—), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事伺服系统稳定控制设计研究。E-mail: 13981185356@139.com。

分别敏感武器站在 3 个轴向的扰动，通过空间坐标转换至方位和俯仰轴，作为前馈补偿引入至位置和速度环路，实现空间指向稳定。稳瞄时，武器站接收射手或观瞄装置的瞄准信号，作为位置环路偏差，控制方位和俯仰轴随动于目标，实现对固定目标瞄准的目的。

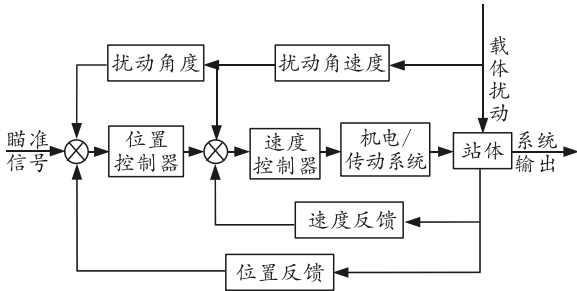
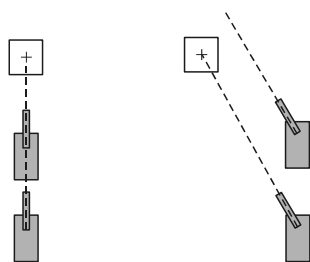


图 1 武器站稳定原理

2 瞄准线平移及其影响

采用惯性传感器的稳定控制方式，可消除瞄准线方位和俯仰轴在路面颠簸以及车体转向过程中产生角度偏差，保持空间指向稳定，但不能消除车体行进过程中位置变化带来的平移误差。行驶过程中，路面起伏在高低向的落差小，对以地面打击为主的遥控武器站的影响可忽略不计。在方位向，车体高速行驶必然会带来瞄准线的平移。

图 2 为目标位于车体正前方时，车体行驶过程中瞄准线始终指向目标；车体运动方向与目标存在夹角时，瞄准线将产生平移，直至目标脱离视场。当观瞄装置的图像跟踪器能够输出目标脱靶量时，可采用光闭环保持瞄准线始终指向目标；射手进行半自动瞄准时，车体高机动行驶过程中产生的瞄准线平移具有随机性，将增大瞄准难度和误差。



(a) 目标在车体正前方 (b) 目标不在车体正前方

图 2 瞄准线平移

3 瞄准线平移补偿的数学推导

为消除瞄准线平移的影响，在不增加硬件成本的基础上，利用现有传感器信息，对瞄准线平移进行角速度补偿，可驱动瞄准线始终对准目标，降低射手稳瞄难度。求解瞄准线平移补偿角速度角度，

需要的数据有：1) 车体与目标的距离 D ，由武器站观瞄系统激光测距机测得；2) 车体与目标之间的方向角 α ，由武器站方位位置传感器输出，规定车体正前方角度为 0 ，顺时针方向为正，反之为负， α 的角度范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$ ；3) 车体前进速度 v ，由车体的速度传感器输出。令激光测距间隔为 d_t ，相邻的 2 次测距时刻目标相对于车体的角度值分别为 α_0 和 α_1 ，由于 d_t 一般较小，可认为该时间段内车体匀速运动，则瞄准线的补偿角速度 ω 可表示为：

$$\omega = (\alpha_1 - \alpha_0) / d_t \quad (1)$$

式中， α_0 和 d_t 已知，得到 α_1 即可求解出 ω 。根据车体与固定目标的相对位置关系，可将 ω 的迭代解算分为 4 种情况：

1) $-180^\circ \leq \alpha \leq -90^\circ$ 。

目标位于车体左后方，武器站的瞄准线补偿解算如图 3 所示。车体中心线箭头方向为车体的正前方，速度箭头方向为正方向，车体位于初始点 A 时，已知激光测距机测得距离 D_0 、测距间隔时间 d_t 、车体前进速度 v 、方位轴角度传感器 α_0 ，有：

$$\left. \begin{aligned} BC &= AC + vd_t \\ CT &= AT |\sin \alpha_0| \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

根据三角函数关系，求取 α_1 ：

$$\alpha_1 = -180^\circ + \arctan(CT/BC) \quad (3)$$

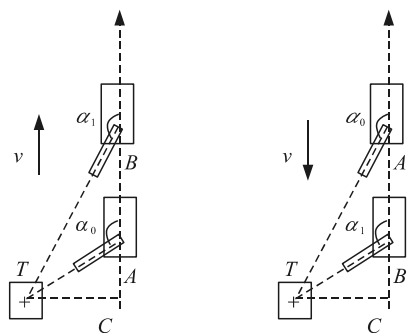
尽管 α_0 已知，为便于分析，根据式(3)，可得到 α_0 的表达式为：

$$\alpha_0 = -180^\circ + \arctan(CT/AC) \quad (4)$$

求解 ω ：

$$\omega = (\arctan(CT/BC) - \arctan(CT/AC)) / d_t \quad (5)$$

当 $v \geq 0$ 时， $BC \geq AC$ ， $\omega \leq 0$ ；当 $v < 0$ 时， $BC < AC$ ， $\omega > 0$ 。



(a) 速度大于 0 时 (b) 速度小于 0 时

图 3 $-180^\circ \leq \alpha \leq -90^\circ$ 时的瞄准

2) $-90^\circ < \alpha \leq 0^\circ$ 。

目标位于车体左前方，瞄准线补偿解算如图 4

所示，根据三角函数关系，求取 α_1 ：

$$\alpha_1 = -\arctan(CT/BC)。 \quad (6)$$

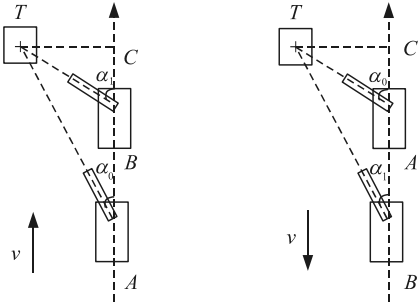
α_0 的表达式为

$$\alpha_0 = -\arctan(CT/AC)。 \quad (7)$$

求解 ω ：

$$\omega = (\arctan(CT/AC) - \arctan(CT/BC))/d_t。 \quad (8)$$

当 $v \geq 0$ 时， $BC \leq AC$ ， $\omega \leq 0$ ；当 $v < 0$ 时， $BC > AC$ ， $\omega > 0$ 。



(a) 速度大于 0 时 (b) 速度小于 0 时

图 4 $-90^\circ < \alpha \leq 0^\circ$ 时的瞄准

3) $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 。

目标位于车体右前方，瞄准线补偿解算如图 5 所示，根据三角函数关系，求取 α_1 ：

$$\alpha_1 = \arctan(CT/BC)。 \quad (9)$$

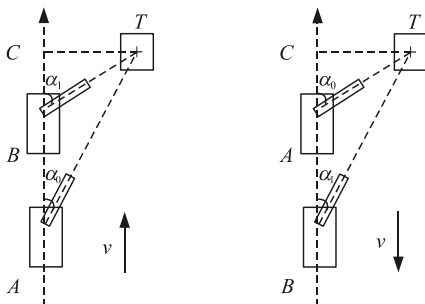
α_0 的表达式为：

$$\alpha_0 = \arctan(CT/AC)。 \quad (10)$$

求解 ω ：

$$\omega = (\arctan(CT/BC) - \arctan(CT/AC))/d_t。 \quad (11)$$

当 $v \geq 0$ 时， $BC \leq AC$ ， $\omega \geq 0$ ；当 $v < 0$ 时， $BC > AC$ ， $\omega < 0$ 。



(a) 速度大于 0 时 (b) 速度小于 0 时

图 5 $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 时的瞄准

4) $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ 。

目标位于车体右后方，瞄准线补偿解算如图 6 所示，根据三角函数关系，求取 α_1 ：

$$\alpha_1 = 180^\circ - \arctan(CT/BC)。 \quad (12)$$

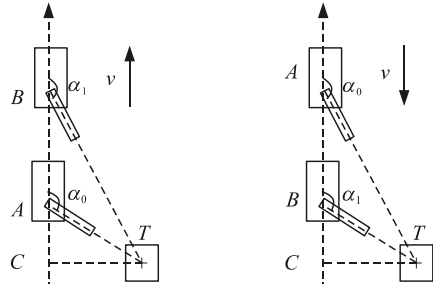
α_0 的表达式为：

$$\alpha_0 = 180^\circ - \arctan(CT/AC)。 \quad (13)$$

求解 ω ：

$$\omega = (\arctan(CT/AC) - \arctan(CT/BC))/d_t。 \quad (14)$$

当 $v \geq 0$ 时， $BC \geq AC$ ， $\omega \geq 0$ ；当 $v < 0$ 时， $BC < AC$ ， $\omega < 0$ 。



(a) 速度大于 0 时 (b) 速度小于 0 时

图 6 $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ 时的瞄准

4 瞄准线平移补偿的近似求解

从补偿角速度 ω 的推导过程可以看出：1) 车体和固定目标相对位置不同时，求解公式不同；2) 车体与固定目标相对运动，过边界点时需进行单独判断；3) 解算过程需对多个中间变量进行求解，涉及正弦、反正切等计算，占用资源大；因此，笔者对 ω 简化近似求解方法进行研究。

图 7 为武器站瞄准线平移。图中 AB 为车体前进的距离， d 为车体横向运动距离， $\Delta\alpha$ 为补偿角， l 为 $\Delta\alpha$ 角对应的弧长，根据几何关系，有

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= l/D \\ d &= AB \cdot \sin\alpha \end{aligned} \right\}。 \quad (15)$$

车体与固定目标之间的距离 D 远大于车体前进距离，且测距的间隔时间 d_t 较小，可认为 $d \approx l$ ，有

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \Delta\alpha/d_t \\ AB &= vd_t \end{aligned} \right\}。 \quad (16)$$

联立式(15)、式(16)求解，得到：

$$\omega = v \cdot \sin \frac{\alpha}{D}。 \quad (17)$$

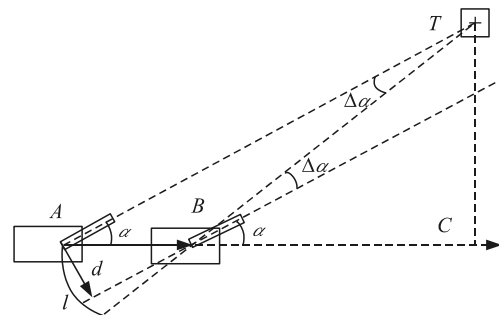


图 7 瞄准线平移

5 仿真验证

式(17)将补偿角速度 ω 的近似结果简化为距离、方向角和车速的表达式，且车体和固定目标相对位置任意变化时均保持不变。为验证提出的瞄准线平移补偿方法能否满足实际应用要求，以图 7 所示的运动模型进行 Matlab 仿真，对比近似求解公式与数学推导公式求解得到的补偿角速度误差及误差率。

假定目标处于静止状态，测距频率固定为 1 Hz，车体从距目标 2 km 初始位置以 15 m/s 的速度匀速直行，直至距目标的距离为 200 m。当车体行驶路径与目标的捷径(CT)为 200 m 时，仿真得到近似补偿角速度与真实值曲线以及误差曲线分别如图 8、图 9 所示。可以看出：车体行程范围内最大补偿角速度为 70.9 mil/s，最大补偿误差为 0.06 mil/s，最大误差率为 0.09%。

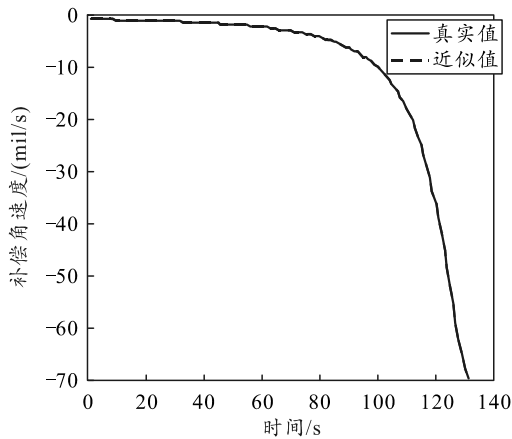


图 8 补偿角速度近似值与真值

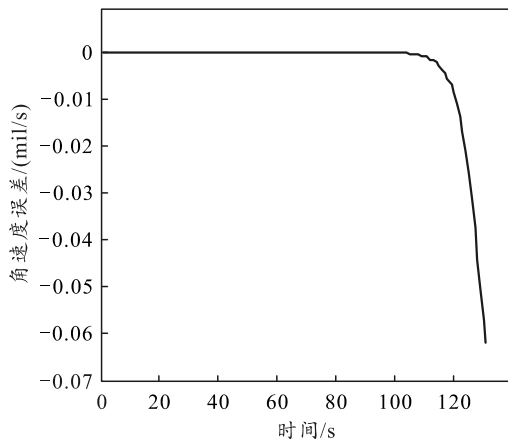


图 9 补偿角速度误差

保持车速和测距频率不变，分别选取不同的捷径进行仿真对比，得到数据结果如表 1 所示。可以看出：1) 捷径越小，最大补偿角速度、最大补偿误差和误差率越大；2) 不同捷径下，最大补偿误差和误差率均符合精度要求，满足实际应用要求。

表 1 补偿角速度误差

捷径/m	最大补偿角速度/ (mil/s)	最大补偿误差/ (mil/s)	误差率/ %
200	70.9	0.06	0.09
150	90.4	0.15	0.16
100	134.5	0.45	0.33
50	222.1	2.00	0.90
20	255.4	3.04	1.19

6 结束语

鉴于陀螺的空间稳定方案不能克服车体行进过程中产生的瞄准线平移误差，笔者运用已有的传感器信息进行角速度补偿^[8]，分析了补偿角速度数学推导过程中分类繁琐、计算复杂以及边界点判断不精确等缺点，提出根据几何关系近似求解的方法，将补偿角速度表示为距离、车速和角度 3 个变量的简单表达式。在不同捷径下近似值与真值的仿真比较，结果表明：补偿误差和误差率均符合精度要求，可满足实际应用。

参考文献：

- [1] 毛保全, 吴永亮, 高玉水, 等. 车载顶置武器站发展综述[J]. 装甲兵工程学院学报, 2013, 27(5): 1-7.
- [2] 毛保全, 赵俊严, 王晓栋, 等. 遥控武器站性能评价方法研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2011(4): 54-57.
- [3] 李超, 李大庆, 徐龙堂, 等. 国外装甲车辆遥控武器站的发展现状与趋势[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(1): 66-70.
- [4] 王钦钊, 谷晓伟, 李小龙, 等. 基于高机动条件下的坦克火控系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 19-21.
- [5] 郝强, 南立军, 刘斌, 等. 坦克火控系统瞄准线平移的补偿方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2018, 39(3): 71-75.
- [6] 向学辅, 李永成, 万海兵, 等. 遥控武器站跟踪线隔离连续射击扰动分析[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(9): 105-109.
- [7] 杨善超, 田康生, 刘仁争, 等. 传感器管理增量控制方法[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(8): 151-156.
- [8] 谢昌荣, 李菊英. 基于动态规划的无线传感器网络路由优化策略[J]. 兵工自动化, 2019, 38(10): 28-31.