

发射平台快速调平技术研究与应用

吴应涛 杨 企 鲁树珍 杨浩然

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘 要】：野外发射准备中，车载平台初始倾角、支承面刚度和液压同步误差会同时影响水平基准建立。本文分析发射平台快速调平系统的支腿布置、姿态测量、承载转移、机械锁定和结果确认方法，以支承安全和锁定稳定为约束，把速度指标嵌入压力均衡、位移反馈和二次复核过程，建立支腿补偿量、控制增量与残余姿态误差评价关系，并给出不同工况下的时间、姿态和保持参数。

【关键词】：发射平台；快速调平；液压支腿；姿态测量；平台锁定

DOI:10.12417/3041-0630.26.12.021

引言

车载发射平台在野外阵地、临时硬化场坪和坡道路肩上展开时，平台基准面与发射坐标系之间存在初始倾角、轮胎沉降和支腿接地刚度差异。快速调平要在限定准备时间内把车架载荷转移到支腿体系，并由姿态传感器、液压执行元件和机械锁定装置形成稳定发射基准。近五年平台调平成果集中在姿态闭环控制、支承点误差建模和动态响应优化，发射平台还受上装姿态、通信电缆和安全区约束，结构、控制和应用流程必须协同。

1 快速调平系统主要结构及作动流程

1.1 发射车载液压调平支腿布置

车载液压调平支腿承担车架卸载、姿态修正和发射反力传递。四点布置适合矩形平台，支腿中心线宜靠近纵梁与横梁交汇处，使垂向载荷经加强节点进入车架；三点布置可避免过约束，但对平台扭转刚度和支承面沉降更敏感^[1]。发射平台还要兼顾行驶收拢包络、展开避让和发射稳定裕度，支腿外伸量应同时核算重心投影到支承多边形边界的距离。复杂坡地条件下，支承跨距、底盘扭转刚度和垫板刚度共同决定倾角恢复速度。

1.2 平台姿态测量传感元件组装

姿态测量元件决定调平控制量的可信度。惯性测量单元应安装在平台基准面附近，安装座保持稳定机械定位面，避免局部盖板变形进入倾角读数。倾角传感器给出平台姿态，位移传感器给出支腿伸缩量，压力传感器反映接地和承载状态^[2]。三类信号合用后，控制器才能区分未接地、已接地但未承载、承载后仍有姿态偏差等状态。毫米级支点误差控制依赖传感安装精度和控制模型一致性。

1.3 液压支腿和控制单元整体集成

液压支腿、泵阀组和控制单元集成后，快速调平从单支腿

升降转为多执行器协调。控制器读取初始横滚角和俯仰角后，按支腿平面坐标分配伸缩量；泵阀组依据各支路流量和压力反馈调节动作顺序，防止一侧支腿快速顶升造成平台扭转。系统集成应形成姿态测量、控制运算、液压分配和机械保持四个节点，机械锁定装置在姿态收敛后保持支腿长度。

2 发射平台快速调平应用

2.1 液压支腿承载状态快速转移

发射准备开始后，支腿承载状态要要从轮胎主承载转移到支腿主承载。合理顺序是低速接地确认、按对角或同侧差值分配载荷、进入微调段。接地确认以压力突增和位移变化斜率降低为判据，承载转移阶段控制单支腿压力上升速率^[3]。软弱侧若出现位移增加但压力增长不足，继续按位移闭环动作会扩大平台倾角。坡地平台稳定性取决于支承点高度调整与重心变化匹配，发射平台应把这种匹配落实为承载转移速率和重心投影裕度。

2.2 发射平台基准姿态准备工作

基准姿态准备包括场坪选择、支承面处理、平台零位确认和发射方向约束。场坪纵横坡较大时，调平系统虽能修正姿态，但支腿行程会被提前消耗，二次微调和沉降补偿余量随之减少。垫板面积、接触平整度和排水状态要先于自动调平确认，松散土、碎石堆积和冻融表层都可能导致锁定后压力继续变化。平台零位确认应同时检查传感器安装面、发射架基准面和车架基准面之间的固定关系。

2.3 调平支腿展开及机械锁定动作

支腿展开动作分为解锁、外伸、接地、承载、微调和机械锁定。解锁阶段确认行驶锁销退出，外伸阶段控制速度并监测管路压力，接地阶段以低速触地减少冲击，承载阶段按压力分配车体载荷，微调阶段根据姿态误差小步修正，机械锁定阶段把液压保持转化为刚性保持。静态调平响应时间和稳态误差可

评价动作速度,发射平台还要核验锁定保持期内的残余倾角变化。

2.4 平台水平姿态调整及发射位就位

水平姿态调整在闭锁解除、支腿受力稳定后启动,控制器以平台基准面为目标,把俯仰角、横滚角和各支腿位移反馈换算为差动补偿量。粗调阶段优先压缩较大姿态偏差,微调阶段限制单次阀口开度,避免液压冲击使平台越过水平区。第*i*个支腿高度补偿量和第*i*个支腿阀口控制增量分别承担微调分配与末段抑振,两个输出共同约束发射位就位。支腿高度补偿量按式(1)计算。

$$\Delta h_i = x_i \theta_y - y_i \theta_x + \lambda_p \left(P_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_j \right) \quad (1)$$

式(1)中, Δh_i 为第*i*个支腿高度补偿量,单位为mm; x_i 为第*i*个支腿纵向坐标,单位为mm; y_i 为第*i*个支腿横向坐标,单位为mm; θ_x 为平台俯仰角,单位为rad; θ_y 为平台横滚角,单位为rad; λ_p 为压力修正系数,单位为mm/kN; P_i 为第*i*个支腿压力,单位为kN; P_j 为第*j*个支腿压力,单位为kN; *j* 为求和支腿序号,无量纲; *n* 为参与调平的支腿数量,单位为计数。该关系同时处理姿态角和支腿压力偏差,输出单腿补偿量,约束小角度微调边界、承载均衡和阀前分配。

单腿高度补偿量确定后,液压阀口仍要根据误差变化趋势分配开度。只按当前位移一次性驱动时,平台接近水平区容易出现回弹和过冲;把累计误差与相邻采样差值同时纳入末段控制,可以让阀口开度在接近零误差时平滑收敛,并降低支腿压力突变。该承接段对应控制输入与输出,避免把几何补偿量直接当作阀口动作。阀口控制增量按式(2)计算。

$$u_i(k) = K_p e_i(k) + K_i \sum_{j=1}^k e_{ij} + K_d [e_i(k) - e_i(k-1)] \quad (2)$$

式(2)中, $u_i(k)$ 为第*i*个支腿阀口控制增量,单位为无量纲; $e_i(k)$ 为第*i*个支腿当前高度误差,单位为mm; K_p 为比例增益,单位为1/mm; K_i 为积分增益,单位为1/mm; e_{ij} 为第*i*个支腿第*j*次采样高度误差,单位为mm; *j* 为采样序号,无量纲; *k* 为当前采样序号,单位为计数; K_d 为差分增益,单位

为1/mm; $e_i(k-1)$ 为第*i*个支腿上一采样高度误差,单位为mm。该关系把当前误差、累计误差和相邻采样差值纳入同一控制增量,约束末段超调、阀口开度和回弹趋势。

2.5 调平结果确认和平台锁定保持

调平结果确认先读取平台基准面两轴残余角,再核对支腿压力差、锁定销到位信号和位移回零趋势。残余姿态误差均方根用于统一比较多次复核读数,合格后机械锁定先保持支腿受力,再切换发射准备联锁。硬化场坪调平时间为90s,坡地临停为180s,差值为90s;硬化场坪残余姿态误差限值为1mrad,坡地临停为1.8mrad,差值为0.8mrad。二次复核时间比坡地临停少120s,误差限值比坡地临停少1mrad,说明首次展开、复杂支承和发射前复查应采用不同确认口径。

平台锁定不是单点读数确认,发射准备要连续复核俯仰和横滚残余角。将两轴误差和复核次数合并为统一指标后,控制人员才能用同一口径比较首次展开、复杂支承和二次复核的保持状态,并判断机械锁定是否稳定。残余姿态误差按式(3)评价。

$$E = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{r=1}^m (\phi_{x,r}^2 + \phi_{y,r}^2)} \quad (3)$$

式(3)中, *E* 为残余姿态误差均方根,单位为mrad; $\phi_{x,r}$ 为第*r*次复核俯仰残余角,单位为mrad; $\phi_{y,r}$ 为第*r*次复核横滚残余角,单位为mrad; *r* 为复核序号,无量纲; *m* 为复核次数,单位为计数。该关系把俯仰、横滚和复核次数合并为统一误差指标,可服务锁定保持、时间响应、误差边界和复核判定。

3 结语

发射平台快速调平的核心在于支承结构、姿态测量、液压作动和机械锁定的连续配合。支腿布置决定承载边界,传感器组装决定姿态误差输入,控制单元集成决定动作闭合质量。应用阶段应先完成承载转移和基准姿态准备,再通过支腿展开、微调就位、结果确认和锁定保持形成发射基准。后续工程应用可围绕油温变化、软弱地基沉降和多点支承虚腿识别继续完善参数整定。

参考文献:

- [1] 周伯俊,于传强,谭立龙,等.基于干扰补偿的车载平台快速调平控制技术[J].北京航空航天大学学报,2023,49(6):1495-1503.
- [2] 毕晓文,熊露,张慧勇.一种便携式车载雷达辅助调平系统的设计与实现[J].光学与光电技术,2023,21(2):127-135.
- [3] 商涛,鲍成文,寇士营,王文宗,石震宇.一种太阳翼对接用调姿机构虚腿调平策略[J].航天控制,2024,42(4):78-84.