

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.S.024

## 航天测控装备跟踪质量考核标准分析

刘安, 陈学军, 杨慧影

(中国西安卫星测控中心, 西安 710043)

**摘要:** 针对航天测控装备在役考核标准缺乏的问题, 分析了航天测控(Space tracking telemetry and control, TTC)标准的现状, 梳理了可用于在役考核的现有航天装备相关标准。提出了航天测控装备考核跟踪质量稳定性的参考标准, 分析了标准对在役考核要求的适用性, 并对跟踪质量稳定性考核科目进行了修正扩展。实际工程算例表明考核效果合理有效, 跟踪质量稳定性考核标准可为在役考核标准制定提供借鉴参考。

**关键词:** 航天测控; 在役考核; 质量稳定性; 标准

中图分类号: V55 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2021)S-0148-05

## Tracking Quality Assessment Standard for Aerospace Equipment

LIU An, CHEN Xuejun, YANG Huiying

(Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** Given the lack of in-service assessment standards for space tracking telemetry and control (TTC) equipment, this paper analyzes the current standard situation, and combs the existing space equipment related standards that can be used for in-service assessment. The reference standard is put forward for the evaluation of tracking quality stability of space TTC equipment. The applicability of the standard to the in-service evaluation requirements is analyzed. The evaluation subjects of tracking quality stability are modified and expanded. The practical engineering example shows that the assessment effect is reasonable and effective, and the tracking assessment standard of quality stability can provide reference for the formulation of in-service assessment standard.

**Key words:** aerospace measurement and control; in-service assessment; quality stability; standard

近年来, 中国航天测控航天测控(Space tracking telemetry and control, TTC)装备已逐步按照新模式开展装备的试验鉴定工作, 包括性能试验、工程试验及在役考核<sup>[1]</sup>。作为考核试验装备列装“好用”与否的关键环节, 在役考核对于装备使用方具有重要的意义和价值<sup>[2]</sup>。航天装备特别是地面测控装备的试验鉴定工作, 增加了工程试验和在役考核的试验要求, 随着工程实践的进展, 考核依据标准规范缺乏的问题凸显, 成为制约在役考核实际应用的瓶颈之一。目前尚无明确的在役考核方面的

标准规范, 不能满足试验鉴定工作的需求, 亟需制定补充<sup>[3]</sup>。

针对在役考核缺乏标准的问题, 文献[4]分析了在役考核的逻辑关系, 初步构建了一类装备的在役考核评估指标体系, 突出了问题层、指标层、数据层的评估体系, 为统一规范在役考核评估工作提供了参考。针对在轨航天器的在役考核, 文献[5]提出了卫星在役考核的特点, 对卫星在役考核的指标体系设计提出了建议。

航天装备建设从“能用”“管用”到“好用”, 实现

基金项目: 航天装备在役考核标准研究基金(201TJ1102)资助项目。

收稿日期: 2021-05-10; 修订日期: 2021-06-25

通信作者: 刘安, 男, 博士, 高级工程师, E-mail: 15191681263@163.com。

引用格式: 刘安, 陈学军, 杨慧影. 航天测控装备跟踪质量考核标准分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S): 148-152. LIU An, CHEN Xuejun, YANG Huiying. Tracking quality assessment standard for aerospace equipment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S): 148-152.

了全方位的提升。在役考核更关注装备的适用性、质量稳定性、经济性、适配性和保障性<sup>[6]</sup>。本文将从在役考核标准化的角度出发,利用已颁布的航天测控装备质量稳定性的一类考核评估相关标准,进行适用性分析,构造出适用航天测控装备跟踪质量稳定性的方法,从标准化方面解决在役考核“考什么”和“怎么考”的问题。

## 1 中国航天测控标准的现状

中国的航天测控数传设备分布在遍布全国的

地面站及海上测量船上,对合作目标信号的发射、接收、解调及传输处理,需要统一的信号频点、统一的时间基准及统一的信号格式等。航天信息标准的研制,呈现多元化特点。国际标准、国家标准、行业标准及国家军用标准都有航天测控相关的标准。

### 1.1 航天测控设备相关标准

在航天标准化领域,据统计,航天测控标准有国军标 42 项,航天行业标准 23 项<sup>[7]</sup>。随着标准的修订完善,与测控装备跟踪测量密切相关的 18 项航天测控类国军标列表如表 1 所示。

表 1 航天测控类国家军用标准集

Table 1 National military standards for space TTC

| 序号 | 标准编号             | 标准名称                    |
|----|------------------|-------------------------|
| 1  | GJB 4227—2001    | 地面统一 S 频段测控系统通用规范       |
| 2  | GJB 6372—2008    | 航天测控系统扩频系统              |
| 3  | GJB 1924—1994    | 微波统一测控系统通用规范            |
| 4  | GJB 2250—1994    | 航天测控系统坐标系               |
| 5  | GJB 1198.1A—2004 | 航天器测控和数据管理第 1 部分 PCM 遥控 |
| 6  | GJB 1198.2A—2004 | 航天器测控和数据管理第 2 部分 PCM 遥测 |
| 7  | GJB 1198.3A—2004 | 航天器测控和数据管理第 3 部分 遥测信道编码 |
| 7  | GJB 1198.4A—2004 | 航天器测控和数据管理第 4 部分 测距     |
| 8  | GJB 1198.5A—2004 | 航天器测控和数据管理第 5 部分 射频和调制  |
| 9  | GJB 1198.6A—2004 | 航天器测控和数据管理第 6 部分 分包遥测   |
| 10 | GJB 1198.7A—2004 | 航天器测控和数据管理第 7 部分 分包遥控   |
| 11 | GJB 1198.8A—2004 | 航天器测控和数据管理第 8 部分 数据管理接口 |
| 12 | GJB 6378—2008    | 航天器实时轨道确定与分析方法          |
| 13 | GJB 4006—2000    | 航天器定轨精度评定               |
| 14 | GJB 6901—2009    | 航天测控多功能数字基带设备规范         |
| 15 | GJB 2994—1997    | 航天数据系统时间码格式             |
| 16 | GJB 9086—2017    | 航天工程天地测控对接试验规程          |
| 17 | GJB 7063—2010    | 航天测控设备跟踪与控制质量评估方法       |
| 18 | GJB 153—2008     | 通用电子对抗装备维护保养指南          |

### 1.2 航天测控设备在役考核相关标准

在役考核是考核装备适用性、质量稳定性、适配性等。对航天装备的在役考核而言,有 3 项影响广泛、适用性高的标准:国家军用标准 GJB 7063—2010《航天测控设备跟踪与控制质量评估方法》<sup>[8]</sup>, GJB 6901—2009《航天测控多功能数字基带设备规范》<sup>[9]</sup>及 GJB 4227—2001《地面统一 S 频段测控系统通用规范》<sup>[10]</sup>。

航天测控装备(包括无线电测控设备及光学测量设备)主要是完成对航天器进行跟踪测量及遥测遥控等。装备对用户的适用性主要表现在装备的可靠性及维修性,可以用装备的平均完好率、平均故障间隔时间及平均故障修复时间等考核。装备工作质量的稳定性主要从任务出发,通过航天装备

跟踪测量的精度及任务成功率等来考核评估。基带设备主要完成信号的调制解调任务,功能共性成分集中,方便形成标准化的产品。

## 2 跟踪质量稳定性标准的适应性分析

对航天装备进行在役考核,满足质量稳定性需求,可以从服役复杂机电装备的标准体系出发<sup>[11]</sup>,参考近年来,在装备使用方经常应用的国家军用标准《航天测控设备跟踪与控制质量评估》加以扩展完善,形成在役考核中用于评定航天装备质量稳定性的标准。

### 2.1 跟踪质量稳定性标准内容

该标准首先应定义考核跟踪质量常用的术语,

在此基础上制定相应的考核科目,规范科目的计算方法。考核术语包括:跟踪测量元素、跟踪弧段符合率及测量数据使用率等。

质量考核的科目指标包括:弧段符合率、测量元素精度比、测量数据使用率、遥测接收质量、遥控发送质量、建链时间比。

上述科目的具体计算方法如下:

设备跟踪弧段符合率

$$H_{\Delta} = \frac{H_s}{H_L} \quad (1)$$

式中: $H_s$ 表示设备实际跟踪时段; $H_L$ 表示设备计划跟踪时段。

测量元素精度比

$$J_{\Delta} = \frac{J_L}{J_s} \quad (2)$$

式中: $J_L$ 表示测量元素精度指标; $J_s$ 表示测量元素实测精度或设备测量误差。

设备测量数据使用率

$$W_{\Delta} = \frac{W_L}{W_s} \quad (3)$$

式中: $W_L$ 表示实际采用测量数据量; $W_s$ 表示测量数据量,参与轨道确定的测量数据总点数。

遥测接收质量(遥测帧有效率)

$$M_{\Delta} = \frac{M_s}{M_L} \quad (4)$$

式中: $M_s$ 表示遥测有效接收总帧数; $M_L$ 表示遥测计划接收总帧数。

遥控发送质量(遥控指令注入成功率)

$$C_{\Delta} = \frac{C_s}{C_L} \quad (5)$$

式中: $C_s$ 表示遥控注入成功次数; $C_L$ 表示遥控注入总次数。

建链时间比

$$T_{\Delta} = \frac{T_L}{T_s} \quad (6)$$

式中: $T_s$ 表示实际建链时间, $T_L$ 表示建链时间技术指标。

科目的评估方法通过科目权重的分配综合形成跟踪质量的评估值。方法有单一跟踪圈次评估及多圈次跟踪综合评估,具体计算方法如下:

单次评估得分

$$X = \sum_{i=1}^n (F_i \times Q_i) \quad (7)$$

式中: $F_i$ 表示科目评估结果; $Q_i$ 表示科目对应权

重, $n$ 表示考核科目集的科目个数。

综合评估得分

$$Y = \sum_{i=1}^m X_i / m \quad (8)$$

式中: $X_i$ 表示科目单次评估结果, $m$ 表示参加综合考核的单次评估量。

标准对选择质量评估科目(项目)和科目的权重分配进行了规范。考核科目根据不同任务特点对陆基、海基及天基测控设备进行了划分,科目的权重也不尽相同,各有侧重。权重分配反映了航天测控任务的每个科目的重要程度,在地面测控中,遥控发令质量尤为重要,其权重分配较大。对统一测控设备的分配具体如表2所示<sup>[8]</sup>。

表2 考核科目选择与权重分配

Table 2 Weight of equipment quality stability

| 考核科目    | 权重分配 |    |    |
|---------|------|----|----|
|         | 陆基   | 海基 | 天基 |
| 弧段符合率   | 10   | 15 | 10 |
| 测量元素精度比 | 20   | 20 | 15 |
| 测量数据使用率 | 10   | 5  | 15 |
| 遥测接收质量  | 20   | 20 | 20 |
| 遥控发送质量  | 40   | 40 | 30 |
| 建链时间比   |      |    | 10 |

## 2.2 跟踪精度与综合评估标准内容修正

对航天设备跟踪精度的考核评估,对于评价设备质量稳定性,检验设备性能保持或退化状态有着重要的意义<sup>[12]</sup>。在实际航天测控中,更通用的考核跟踪精度的指标常用测距数据统计偏差来评价,即用测距的随机差来表示跟踪精度,系统差作为参考,具体计算公式如下

$$\begin{cases} \mu = \sum_{i=1}^n P_i / k \\ S_k = \sqrt{\sum_{i=1}^k (P_i - \mu)^2 / (k - 1)} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mu$ 为系统差; $P_i$ 为每个测距偏差; $k$ 为样本点数; $S_n$ 为随机差。

因此,在式(2)中计算测量元素的精度常用测距随机差直接带入即可。对综合评估得分,只是得到了多次考核的均值,还可以利用式(9)计算多次考核的均方差,更好地反映评估数据与均值的偏离程度,作为评价质量稳定性的度量标准值之一。

## 3 标准应用的实际算例

以某在役陆地固定航天测控设备跟踪某星为

例,对跟踪质量的稳定性进行考核评估。该设备某天计划跟踪弧段为8 h 05 min 00 s~8 h 15 min 40 s,整个跟踪时间640 s,该圈次有高仰角状态。高仰角跟踪低轨目标时,目标方位速度有可能无穷大,天线此时跟踪不上目标,会出现信号失锁现象。同样,过低仰角,路径反射会引起信号不稳。这些现象都是天线结构或地球结构的问题,与设备运行无关,不应在考核范围内。考核弧段取仰角 $5^{\circ}$ ~ $70^{\circ}$ ,对应时间8 h 05 min 49 s~8 h 08 min 50 s,8 h 11 min 50 s~8 h 14 min 50 s。设备跟踪细节见表3实际跟踪弧段<sup>[8]</sup>。

表3 某设备实际跟踪弧段

Table 3 Actual tracking segment of certain equipment

| 序号 | 测控事件            | 时间              | 仰角/ $(^{\circ})$ |
|----|-----------------|-----------------|------------------|
| 1  | 发现目标            | 8 h 04 min 55 s | 2.7              |
| 2  | 锁定目标            | 8 h 05 min 08 s | 3.2              |
| 3  | 送出测量数据          | 8 h 05 min 20 s | 3.5              |
| 4  | 仰角 $5^{\circ}$  | 8 h 05 min 49 s | 5.0              |
| 5  | 目标失锁            | 8 h 07 min 50 s | 45.1             |
| 6  | 重新捕获            | 8 h 08 min 15 s | 55.0             |
| 7  | 送出测量数据          | 8 h 08 min 25 s | 63.5             |
| 8  | 仰角 $70^{\circ}$ | 8 h 08 min 48 s | 70.0             |
| 9  | 目标过顶            | 8 h 10 min 21 s | 87.1             |
| 10 | 重新捕获            | 8 h 10 min 55 s | 76.0             |
| 11 | 送出测量数据          | 8 h 11 min 05 s | 73.5             |
| 12 | 仰角 $70^{\circ}$ | 8 h 11 min 48 s | 70.0             |
| 13 | 仰角 $5^{\circ}$  | 8 h 14 min 48 s | 5.0              |
| 14 | 目标出站            | 8 h 15 min 45 s | 2.3              |

该测控设备符合考核的实际3个跟踪弧段8 h 05 min 49 s~8 h 07 min 50 s,8 h 08 min 25 s~8 h 08 min 48 s,以及8 h 11 min 48 s~8 h 14 min 48 s,共计时间324 s。单次考核计算结果见表4。

表4 考核科目计算结果

Table 4 Results of assessment subjects

| 考核科目      | 实测值 | 标准值   | 结果比值 |
|-----------|-----|-------|------|
| 弧段符合率/s   | 324 | 360   | 0.9  |
| 测距精度比/m   | 8   | 10    | 0.8  |
| 测量数据使用率/帧 | 162 | 324   | 0.5  |
| 遥测接收质量/帧  | 972 | 1 296 | 0.75 |
| 遥控发送质量/条  | 45  | 48    | 0.9  |
| 单次加权评估    |     |       | 81.0 |

考虑到设备跟踪不同目标、不同时间的差异,考察设备不同时段、对不同目标的多次跟踪结果,形成10组单次跟踪考核结果如表5所示,综合评估得分98.05,说明设备跟踪质量优良,综合得分均方差8.084 5,说明跟踪质量的稳定性优。

表5 10次跟踪考核计算结果

Table 5 Comprehensive results of ten times assessments

| 单次序号  | 考核时间                    | 跟踪目标   | 结果      |
|-------|-------------------------|--------|---------|
| 1     | ×年×月22日8 h 05 min 00 s  | 某型卫星-1 | 81.0    |
| 2     | ×年×月24日9 h 11 min 06 s  | 某型卫星-5 | 100.0   |
| 3     | ×年×月29日19 h 21 min 11 s | 某型卫星-2 | 90.0    |
| 4     | ×年×月04日8 h 00 min 23 s  | 某型卫星-7 | 94.5    |
| 5     | ×年×月12日1 h 05 min 43 s  | 某型卫星-2 | 105.0   |
| 6     | ×年×月30日7 h 05 min 43 s  | 某型卫星-4 | 110.0   |
| 7     | ×年×月11日3 h 09 min 22 s  | 某型卫星-6 | 98.0    |
| 8     | ×年×月25日12 h 15 min 10 s | 某型卫星-3 | 101.0   |
| 9     | ×年×月30日2 h 01 min 50 s  | 某型卫星-9 | 99.0    |
| 10    | ×年×月22日4 h 25 min 40 s  | 某型卫星-4 | 102.0   |
| 综合均值  |                         |        | 98.05   |
| 综合均方差 |                         |        | 5 8.084 |

## 4 结 论

对于航天装备在役考核使用的装备质量稳定性考核标准,本文利用已有的设备跟踪质量评估标准,分析了航天地面设备多次跟踪目标效果,根据单次跟踪的多重任务要求,提出了标准的补充修正方法。按照这种方法和标准要求,对某设备跟踪实际数据进行了计算评估,结果表明了装备跟踪质量稳定性的评估有效性,可以为相关标准的制定提供参考。

### 参考文献:

- [1] 曹裕华,孟礼.典型航天装备试验鉴定总体策略研究[J].国防科技,2020,41(5):59-66.  
CAO Yuhua, MENG Li. Research on the general strategy of typical space equipment test and evaluation [J]. National Defense Technology, 2020, 41(5): 59-66.
- [2] 钱昭勇,曹裕华,燕如意,等.基于数据挖掘的装备在役考核评估研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(8):158-162.  
QIAN Zhaoyong, CAO Yuhua, YAN Ruyi, et al. Research of data mining on equipment assessment in service [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(8): 158-162.
- [3] 高强,叶红菲.地面设备研制程序探讨[J].航天标准

- 化, 2020, 37(4): 1-3, 14.  
GAO Qiang, YE Hongfei. Investigation on the development procedure of ground equipment[J]. Aerospace Standardization, 2020, 37(4): 1-3, 14.
- [4] 孟庆均, 郭齐胜, 曹玉坤, 等. 装备在役考核评估指标体系[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32(1): 18-24.  
MENG Qingjun, GUO Qisheng, CAO Yukun, et al. Evaluation indicators system of equipment assessment in service[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2018, 32(1): 18-24.
- [5] 刘党辉. 卫星在役考核相关问题研究[J]. 国防科技, 2017, 38(6): 16-21.  
LIU Danghui. Research on test and evaluation of served satellites[J]. National Defense Technology, 2017, 38(6): 16-21.
- [6] 孟庆均, 曹玉坤, 张宏江, 等. 装备在役考核的内涵与工作方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(5): 18-22.  
MENG Qingjun, CAO Yukun, ZHANG Hongjiang, et al. Connotation and working method of equipment assessment in service[J]. Journal of Armored Force Engineering, 2017, 31(5): 18-22.
- [7] 陈晨, 陆静. 浅谈国内外航天测控标准化的基本状况[J]. 航天标准化, 2005, 22(4): 9-14.  
CHEN Chen, LU Jing. Brief talk on the basic situation of aerospace TTC standardization at home and abroad[J]. Aerospace Standardization, 2005, 22(4): 9-14.
- [8] 中国人民解放军第二十六试验训练基地. 航天测控设备与跟踪质量评估方法: GJB 7063—2010[S]. [S. l.]: 中国人民解放军总装备部, 2010.
- [9] 中国人民解放军第二十六试验训练基地. 航天测控多功能数字基带设备规范: GJB 6901—2009[S]. [S. l.]: 中国人民解放军总装备部, 2009.
- [10] 中国人民解放军第二十六试验训练基地. 地面统一S频段测控系统通用规范: GJB 4227—2001[S]. [S. l.]: 中国人民解放军总装备部, 2001.
- [11] 李庆先, 刘良江, 王晋威, 等. 复杂机电系统服役质量评估与维护质量控制标准体系研究[J]. 中国标准化, 2020, 47(6): 154-158.  
LI Qingxian, LIU Liangjiang, WANG Jinwei, et al. Research on service quality evaluation and maintenance quality control standard system of complex electromechanical system [J]. China Standardization, 2020, 47(4): 154-158.
- [12] 史慧敏, 史海龙, 张宇飞, 等. 跟踪雷达精度检飞试验标准值修正方法[J]. 兵工自动化, 2013, 32(10): 58-61.  
SHI Huimin, SHI Hailong, ZHANG Yufei, et al. Standard coordinate amending method in accuracy evaluation flying test tracing radar[J]. Ordnance Industry Automation, 2013, 32(10): 58-61.

(编辑: 孙静)