

# 一种天基信息支援测控保障能力快速评估方法

张国云, 王大鹏, 韩海涛, 陈庆亚, 王鼎蔚, 任鹏飞  
(航天器在轨故障诊断与维修重点实验室 西安 710043)

**摘要:** 天基信息支援的高时效性对测控保障能力提出了严格要求, 针对测控保障能力的快速评估问题, 提出了一种基于层次分析法的快速评估方法。首先, 依据时序和事件逻辑匹配一致性原则, 将整个评估流程拆解为天基信息支援对测控需求确定、评估数据收集、制定评估指标和标准、分析评估数据、提供评估反馈和建议 5 个步骤, 并基于拆解步骤项, 确定了评估实施流程, 设计了评估层级结构模型, 提出了评估方法。然后, 依据独立性原则确定了评估指标和标准, 采用综合赋值法确定了指标权值, 得到归一化评估结果, 并确定不同标准对应的决策建议。最后, 通过实例验证表明, 方法能够快速完成测控保障能力评估, 并提供对应的合理处置决策建议, 可为天基信息支援的辅助决策快速提供有效依据。

**关键词:** 天基信息支援; 航天测控; 指标体系; 能力评估

**中图分类号:** V556.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)01-0007-08

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20220410001

**引用格式:** 张国云, 王大鹏, 韩海涛, 等. 一种天基信息支援测控保障能力快速评估方法[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 7-14.

## Rapid evaluation method for TT&C support capability in space-based information support

ZHANG Guoyun, WANG Dapeng, HAN Haitao, CHEN Qingya, WANG Dingwei, REN Pengfei  
(Key Laboratory for Fault Diagnosis and Maintenance of Spacecraft in Orbit, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The high timeliness of space-based information support puts forward strict requirements for TT&C support capabilities. Aiming at the problem of rapid evaluation of TT&C support capabilities, an evaluation method based on analytic hierarchy process is proposed. Firstly, according to the matching consistency principle of timing and event logic, the whole evaluation process is divided into five steps: determined the TT&C requirements of actions, collecting evaluation data, setting evaluation index and standard, the analysis of evaluation data, and providing evaluation feedback and advice. Based on the five steps, the evaluation implementation process is determined, the evaluation hierarchy model is designed, and the evaluation method is proposed. Then, according to the principle of independence, the evaluation indexes and standards are determined, and the normalized evaluation result is obtained by metric weight as a result of comprehensive assignment method, and the decision suggestions corresponding to different standards are determined. Finally, an example shows that the method can quickly complete the evaluation of TT&C support capability, provide corresponding disposal suggestions, and provide a basis for space-based information support decision-making.

**Keywords:** Space-based information support; Aerospace TT&C; Index system; Capabilities evaluation

**Citation:** ZHANG Guoyun, WANG Dapeng, HAN Haitao, et al. Rapid evaluation method for TT&C support capability in space-based information support [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 7-14.

## 引 言

当前, 越来越多的国家或国际突发性、紧急

性的军民活动, 对天基信息支援时效性要求不断增强<sup>[1-4]</sup>。天基信息支援从任务规划开始, 经过测控 (Telemetry, Tracking, and Command, TT&C) 资

源调度、航天器载荷指令上注、数据传输等多个过程完成信息获取, 整个流程要求在小时级甚至分钟级时限内完成, 任务窗口缩短至近乎实时。航天器载荷指令上注是整个任务实施的关键环节, 低轨航天器测控弧段通常只有 10 分钟左右, 除去地面装备建立星地间稳定状态所需的时间, 有效上注时间更短, 所以载荷指令上注往往是任务实施中风险较大的环节, 需要加强保障。因此, 任务实施前对航天器运行状态及地面测控保障系统能力进行快速评估, 显得十分必要。由于评估过程对时效性要求较高, 那么就要尽可能地简洁高效, 概略且及时的评估结论比准确但延滞的结果更有助益<sup>[5-7]</sup>。

天基信息支援下测控保障能力快速评估一般包括航天器健康状态评估、测控装备保障能力评估两方面。航天器健康状态评估方面, 刘帆等人<sup>[8]</sup>已建立天基信息支援前航天器平台重点参数状态评估, 实现了健康状态评估报告自动生成和快速推送, 可辅助操作员快速研判得出载荷健康的评估结论, 进而支持决策活动。测控装备保障能力评估方面, 当前研究主要集中于装备自身测控保障能力的评估, 包括测控装备健康评估和抗干扰能力评估等方面<sup>[9,10]</sup>。而在任务层面, 结合天基信息支援任务特点, 以及影响任务执行的因素, 对测控保障能力评估的研究还相对欠缺, 缺乏快速评估方法与工具支持, 难以得出定量结论与决策建议, 使得测控流程环节难以提供快速、高效、灵活的保障, 一定程度上降低了测控执行效率和成功率。评估方法方面, 归一化的量化结果可以综合反映多因素的综合影响<sup>[11]</sup>, 可用于测控保障能力快速评估。

本文综合航天器状态、航天器参与度、测控装备参与度、测控装备任务表现、测控窗口满足度、数据注入完成度等因素, 通过合理确定各因素权值, 建立了测控保障能力评估归一化参数, 为天基信息支援决策提供了支撑。

## 1 天基信息支援测控保障特点及流程

### 1.1 测控保障特点

天基信息支援下测控支持主要表现出时效性要求高、制约因素多、逻辑约束强、流程环节多等显著特征<sup>[12-14]</sup>。

① 时效性要求高。由于事件突发性强, 导致

任务执行紧急, 从受领任务到测控保障实施, 要求在很短时间内完成。

② 制约因素多。受限于航天器工作模式、星上载荷工作状态、存储容量、能源管理等多约束条件, 测控保障实施难度大。

③ 逻辑约束强。载荷控制指令存在关联块和独立块, 即多个观测任务之间存在先后关系或互斥关系; 星载内存清除和数据上注有时限要求等。

④ 流程环节多。测控全流程包括需求受理及信息解析、资源分析调配、测控支持能力分析、任务环境建立、多约束条件遥控作业编制、载荷指令注入、故障预案制定等一系列动作。

### 1.2 测控保障流程

天基信息支援下测控保障流程主要有测控需求信息快速获取、资源快速调配、测控装备保障能力快速评估、测控环境快速建立、载荷控制指令快速上注等关键环节, 具体如图 1 所示。

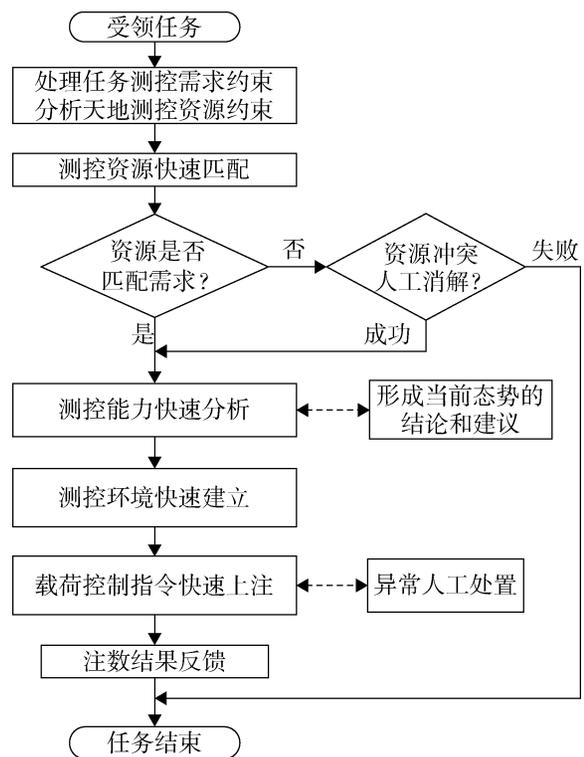


图 1 天基信息支援下测控流程

Fig. 1 TT&C process of space-based information support action

考虑到天基信息支援下测控保障特点, 通常可通过优化航天器和测站资源调度流程、消解任务冲突、建立不间断运行任务环境、提高载荷控制指令

上注效率等一系列动作实现测控需求快速响应。

### 2 测控保障能力快速评估方法

基于历次天基信息支援下测控实践总结，依据时序和事件逻辑匹配一致性原则，将整个评估流程拆解为5个步骤。基于5个步骤，确定了评估实施过程，设计了评估层级结构模型，提出了评估方法。评估方法中，先确定了评估指标，评估

指标分为时间维度和空间维度，其中时间维度参数约束最强，是任务是否可开展的前提，需要重点评估，而后确定了评估标准。

#### 2.1 快速评估流程建立

整个评估流程整体划分为5个步骤，见表1。5个步骤按照匹配测控时间窗口、确定评估窗口和框架、制定评估指标和标准、分析处理数据和评估结论4类事件递进展开。

表1 天基信息支援下测控保障能力快速评估流程

Table 1 Rapid evaluation process of TT&C support capabilities in space-based information support

步骤	输入	输出
确定任务对测控需求	载荷控制指令上注时间约束信息	测控资源
收集评估数据	多源数据融合(总结报告、测控数据库、归零报告、任务方案等)	数据收集和整理
制定评估指标和标准	收集和分析那些对任务最有价值的、易用且精简的评估指标,如载荷上注时间约束,测控窗口,任务实际表现	指标集 评估标准
分析评估数据	分析方法	对当前任务实现预期结果最终态势进程分析
提供评估反馈和建议	任务评估报告	评估结果与决策建议

#### 2.2 快速评估实施过程

测控保障时间约束主要与3个时间参数有关，即星载内存清除最早时间、星载内存清除最晚时间和载荷控制指令上注最晚时间。当测控资源满足时间约束匹配成功且载荷控制指令确定后，按照评估流程，开展后续评估，得出航天装备测控能力评估结果，为本次任务开展提供决策。

##### 2.2.1 评估框架模型及方法确定

天基信息支援下测控保障形成的历史测控数据可服务于尚未开展待规划的任务，对制定形成指挥决策的质量有着至关重要的作用<sup>[15,16]</sup>。当前

工程化评估理论和工具尚未广泛应用于天基信息支援活动，本文从利于评估开展和实践的角度，采用层次分析法<sup>[17-19]</sup>，建立的评估层级结构模型如图2所示。各指标描述可基于量化或非量化状态描述的历史测控数据，运用统计评估方法获得。

##### 2.2.2 评估指标

在天基信息支援任务执行期间，随着任务进程持续推进，任务实施节奏会逐渐加快，该特殊条件下难以全面对各类指标进行信息采集与评估，因此需要重点分析对任务参考价值大、易使用、

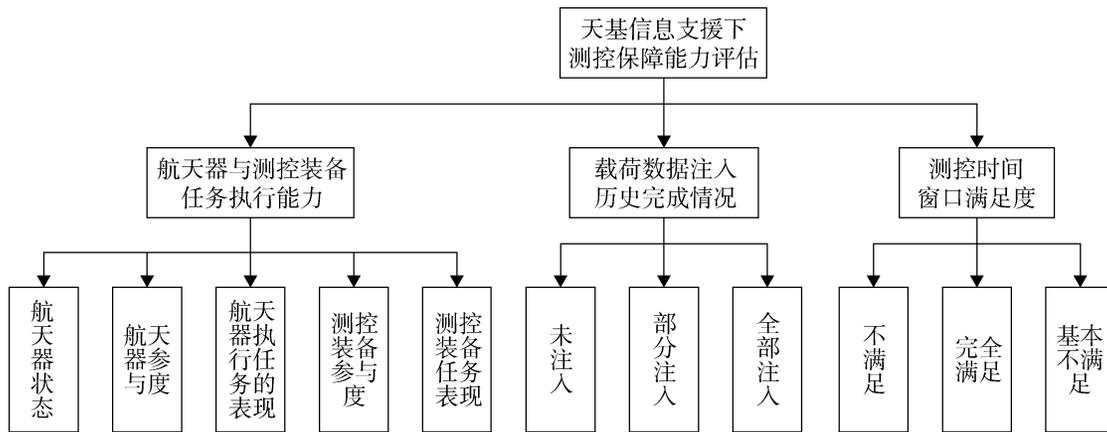


图2 天基信息支援下测控保障能力评估层级结构模型

Fig. 2 Evaluation hierarchy model of space-based information support capabilities

信息精简的关键评估指标,使评估工作高效顺利进行。根据这一特征要求,结合天基信息支援下测控保障特点,采用独立性原则,评估指标主要包括两方面:

① 时间维度指标,用于表征任务实施在时限方面的要求,判定任务能否按计划时间节点逐步完成;

② 空间维度指标,表征历次天基信息支援任务中航天装备参与次数、实际表现、执行情况等原因等内容,该类指标对待规划任务的实施策略制定、情况研判有重要指导意义。

按照测控保障流程环节划分,天基信息支援下测控保障包含的执行类时间参数主要有 4 项:

① 全向中继测控遥测下传时长  $T_{ZICYC}$ ,指从盲发打开中继测控发射机第 1 条指令至地面收到下传遥测的时间。

② 全向中继测控遥测停传时长  $T_{ZITYC}$ ,指从发送关闭中继测控发射机第 1 条指令至地面未收到星上下传遥测的时间。

③ 航天器健康状态检查时长  $T_{JKJC}$ ,指地面收到遥测至关键分系统重要参数判读完成所需的时间。

④ 星载内存清除时长  $T_{NCQC}$ ,指星载内存清除指令发出至完成清除内容所需的时间。

根据以上,天基信息支援下测控保障主要时间约束量各执行时间可量化为:

① 单块数据注入平均耗时  $t_{ks}$ ,表示每块载荷数据注入平均用时,表达式为:

$$t_{ks} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{SJKS}} t_i}{N_{SJKS}} \quad (1)$$

式中:  $t_i$  为每块数据上注用时,  $N_{SJKS}$  为注入数据块总数。

② 测控窗口时长  $N_{SJKS}$ ,表示测控装备可跟踪航天器的时间,表达式为:

$$t_{ck} = T_{GZJS} - T_{GZKS} \quad (2)$$

式中:  $T_{GZJS}$  为跟踪结束时刻,  $T_{GZKS}$  为跟踪开始时刻。

③ 数据上注最长耗时  $T_{max}$ ,表示历史测控保障中单次上注的最多数据块数与单块数据注入平均耗时的乘积:

$$T_{max} = n_{max} \cdot t_{ks} \quad (3)$$

式中:  $T_{max}$  为注数最大耗时,  $n_{max}$  为历史最大数据注

入量。

根据上述时间参数,可以得到天基信息支援下测控保障载荷控制指令上注的预估时长  $t_{yg}$  为:

$$t_{yg} = T_{ZICYC} + T_{ZITYC} + T_{JKJC} + t_{ks} \cdot n + T_{NCQC} \quad (4)$$

式中:  $n$  表示本次待注入数据块数。值得注意的是,其中星载内存清除耗时对于部分航天器只有在有星载内存清除要求的情况下才考虑;全向中继测控遥测下传时长、全向中继测控遥测停传时长仅适用于中继测控的情况。

为保证任务顺利实施,在时间关系上需要满足载荷控制指令上注预估时长小于测控跟踪窗口时长 ( $t_{yg} < t_{ck}$ ),该条件是测控保障成功执行的前提条件,此指标记为  $C_1$ 。实际运行时,  $t_{yg}$ 、 $t_{ck}$  由系统在信息库中数据分析得到,自动判定。空间维度评估指标有以下 5 项:

① 航天器状态  $C_2$ ,指在轨运行航天器各分系统健康状态。

② 航天器参与度  $C_3$ ,指航天器参与天基信息支援任务的历史次数、成功率等。

③ 测控装备参与度  $C_4$ ,指航天测控装备参与天基信息支援任务的次数、成功率等。

④ 测控装备任务表现  $C_5$ ,指测控装备系统捕获速度、跟踪稳定性、链路误码率等参数。

⑤ 数据注入完成率  $C_6$ ,指测控装备最近 5 次参与天基信息支援任务数据注入完成情况。

### 2.2.3 评估标准

针对时间、空间指标内容,设计形成了评估标准,根据实际表现情况将标准划分为 I 阶、II 阶、III 阶三种等级。通过制定评估指标及其评估标准,从整体上形成了一套简洁有效的天基信息支援下测控保障能力评估框架。其中,航天器健康状态分数采用综合分值表征,是依据在轨长期运行及管理要求,由管理人员根据在轨运行遥测数据综合航天器测控、电源、控制、热控、载荷等分系统运行状态加权得到<sup>[20]</sup>。

为快速直观反映测控保障能力,采用归一化结果,每个指标按百分制,结合其权值得出。由于测控窗口满足度  $C_1$ 、航天器健康状态  $C_2$  对任务成败具有决定作用,设置为整个结果修正因子  $W_1$ 、 $W_2$ ,取值为 0、0.85、1 分别表示完全不满足、基本满足、完全满足。航天器参与度  $C_3$ 、测控装备参与度  $C_4$  为客观间接指标,测控装备任务表现  $C_5$ 、数据注入完成率  $C_6$  为直接指标,权值大小采

用综合赋值法，在主要参考各指标在历史任务中异常所占比率的基础上，结合专家意见得出。权向量  $W$  可表示为：

$$W=(W_3, W_4, W_5, W_6)^T=(0.1, 0.1, 0.35, 0.45)^T$$

综合以上，测控保障能力综合评分  $C$  计算公式为：

$$C=W_1W_2(C_3, C_4, C_5, C_6)(W_3, W_4, W_5, W_6)^T \quad (5)$$

各指标及对应的具体量化标准如表2所示，其中，测控装备任务表现  $C_5$  需遥控稳定锁定耗时  $t$  秒（地基： $0 < t \leq 10$ ，天基： $0 < t \leq 60$ ）、稳定锁定占跟踪时长比率  $\eta$ （ $98\% \leq \eta \leq 100\%$ ）、链路误码率  $\gamma_{BER}$ （ $0 \leq \gamma_{BER} \leq 10^{-6}$ ）三个指标综合平均得到。

表2 天基信息支援下测控保障能力评估标准

Table 2 Evaluation standards of TT&C support capabilities in space-based information support

评估指标	量化标准	I阶标准	II阶标准	III阶标准
$C_1$ 时间满足度 $\alpha=t_{yg}/t_{ck}$		$\alpha > 1$ , 完全不满足; $W_1=0$	$0.9 < \alpha \leq 1$ , 基本满足, 有风险; $W_1=0.85$	$\alpha \leq 0.9$ , 完全满足; $W_1=1$
$C_2$ 航天器健康综合分数 $\beta$		$\beta < 60$ , 影响载荷应用 $W_2=0$	$60 \leq \beta < 85$ , 不影响载荷应用; $W_2=0.85$	$85 \leq \beta \leq 100$ , 无异常; $W_2=1$
$C_3$ 近1月完成载荷数据注入次数 $n, C_3=12n$		$n < 5$ , 频率低; $C_3 < 60$	$5 \leq n < 8$ , 频率较高; $60 \leq C_3 < 96$	$n \geq 8$ , 频率高; $C_3=100$
$C_4$ 近1月执行任务次数 $n, C_4=12n$		$n < 5$ , 频率低; $C_4 < 60$	$5 \leq n < 8$ , 频率较高; $60 \leq C_4 < 96$	$n \geq 8$ , 频率高; $C_4=100$
$C_5$ 遥控稳定锁定耗时 $t$ 、稳定锁定占跟踪时长比率 $\eta$ 、链路误码率 $\gamma_{BER}$		$C_5 < 60$	$60 \leq C_5 < 90$	$C_5 \geq 90$ , 上限100。
$C_6$ 最近10次任务, 按时限完成注入次数 $n, C_6=12n$		$n < 5$ , 完成率低; $C_6 < 60$	$5 \leq n < 8$ , 完成率较高; $60 \leq C_6 < 96$	$n \geq 9$ , 完成率高; $C_6=100$

因而，地基测控装备任务表现  $C_5$  可表示为：  

$$C_5=(10 \times (10-t)+100 \times (\eta-98\%)+10^4 \times (10^{-6}-\gamma_{BER}))/3 \quad (6)$$

对于天基测控装备任务表现  $C_5$  可表示为：  

$$C_5=(100/60 \times (60-t)+100 \times (\eta-98\%)+10^{-4} \times (10^{-6}-\gamma_{SER}))/3 \quad (7)$$

通过表2中量化指标计算，可以计算出归一化的测控保障能力评估值  $C$ 。按照设定的各阶标准，总体上， $C=0$  时，应暂停任务； $C < 80$  分时，谨慎开展， $C > 80$  分时，正常开展。

### 2.3 评估结论及建议

在确定评估指标后，通过地面系统数据信息库，运用统计评估法，系统可自动、快速输出各指标统计结果以支持操作人员决策，在得到综合归一化的评估结果之后，还需输出每种标准对应的处置建议<sup>[21]</sup>，为地面操作人员活动提供具体依据，评估决策建议见表3。每个指标处置建议分为“暂停任务”“谨慎开展”和“正常开展”3个等级，结合具体评估指标包含有更加详细的操作建议。

表3 天基信息支援下测控保障能力评估决策建议

Table 3 Suggestions to decision-making of TT&C support capabilities in space-based information support

	I阶建议标准	II阶建议标准	III阶建议标准
$C_1$ 暂停任务, 重新规划。		①双站接力跟踪。 ②若双站接力不满足条件, 告知用户存在不能按要求注入数据的风险。	正常开展
$C_2$ 暂停任务, 重新规划。		谨慎开展, 密切关注航天器状态。	正常开展
$C_3$ 谨慎开展, 建议加强技术支持。		谨慎开展, 密切关注航天器状态。	正常开展
$C_4$ 谨慎开展, 建议装备操控方加强技术支持。		谨慎开展, 密切关注装备状态。	正常开展
$C_5$ 谨慎开展, 建议加强技术支持。		谨慎开展, 密切关注装备状态。	正常开展
$C_6$ 谨慎开展, 建议加强技术支持。		谨慎开展, 密切关注航天器状态。	正常开展

### 3 评估应用实例

以想定天基信息支援下测控保障任务为输入, 以实际例行轨道数据代替载荷控制指令, 基于天地基测控装备开展保障能力评估活动。对历史测控保障任务中产生的测控数据进行快速挖掘分析, 对照表 2 和表 3 制定的标准, 形成基于某次地基测控装备的测控保障能力评估及对应处置建议。 $W_1=0.85$ ;  $W_2=1$ ;  $(C_3, C_4, C_5, C_6) = (84, 100, 87.69, 100)$

根据公式 (1), 可得  $C=79.82$ , 说明本次任务整体上可谨慎开展, 具体实施建议见表 4。

根据本次实例评估结果, 此次任务可以开展实施。但由于航天器近期参与任务频度较低, 可靠性和适应性未得到充分验证, 同时地面测站系统捕获速度比理想状态略慢, 有一定误码率, 因此在执行任务期间需要密切关注航天器和测站状态, 及时响应异常。此外, 单测站不满足数据上注预估时间, 为保证任务可靠完成, 需要提前安排双站接力跟踪, 延长测控时间窗口, 提高数据上注成功率, 若不能安排双测站接力跟踪, 则需要告知用户数据注入存在一定风险, 需要谨慎开展。

表 4 天基信息支援下测控保障能力评估结果

Table 4 Evaluation results of TT&C support capabilities in space-based information support

评估指标	评价情况	标准等级	处置建议
$C_1$	时间基本不满足, 有风险	II 阶	①双站接力跟踪。 ②若无双站接力条件, 告知用户注入数据存在风险。
$C_2$	状态完好	III 阶	正常开展
$C_3$	近 1 月执行任务次数为 6 次, 参与频度较高。	II 阶	谨慎开展, 密切关注航天器状态。
$C_4$	近 1 月执行任务次数为 18 次, 参与频度高。	III 阶	正常开展
$C_5$	系统捕获较快、跟踪较稳定、链路误码率较低。	II 阶	谨慎开展, 密切关注装备状态。
$C_6$	最近 5 次任务中, 均按特定时限节点要求完成注入, 执行成功、注入完整。	III 阶	正常开展

### 4 结束语

天基信息支援下测控保障能力快速评估中, 采用层次分析法建立了评估层级结构模型、评价指标。为快速直观反映测控保障能力, 采取加权叠加算法对各指标结果进行归一化处理, 每个指标按照百分制, 权值大小采用综合赋值法, 在主要参考各指标在历史任务失败原因所占比率的基础上, 结合专家意见得出。实例验证了本文提出的方法可快速完成测控保障能力评估, 并提供对应的处置决策建议, 为天基信息支援辅助决策提供依据。下一步主要工作为基于历史测控数据, 建立智能系统, 得出更加详细的评估结论及建议。

同时, 为更直观表示评估结果, 评估系统除了输出综合分数及建议外, 还输出能力雷达图, 可视化显示每项指标评估情况, 对评估指标的消涨情况, 一目了然, 辅助地面操控人员快速决策与应对。测控保障能力评估雷达图如图 3 所示。

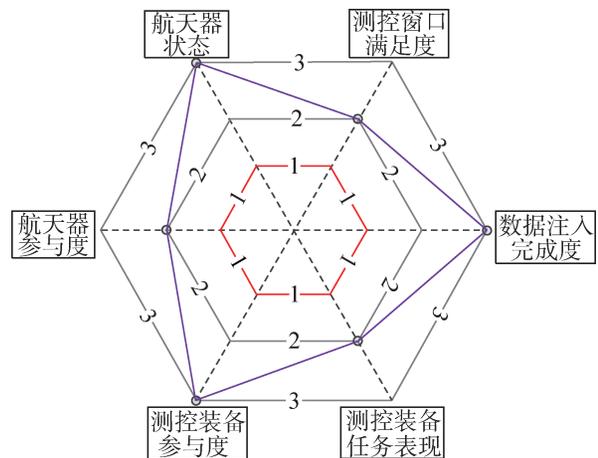


图 3 测控保障能力评估雷达图

Fig.3 Evaluation radar chart of TT&C support capabilities

### 参考文献

[1] 张汉峰, 卢昱, 张立云. 天基信息支援下装备保障建模研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.  
ZHANG Hanfeng, LU Yu, ZHANG Liyun. Research on

- modeling of equipment supporting supported by space information[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [2] 潘升东,张占月,侯妍,等. 美国天基侦察监视信息支援任务流程研究[C]//第5届中国指挥控制大会论文集,北京,中国,2017.
- [3] 刘欣,张占月,吴俊娴,等. 美军天基信息支援空中进攻作战研究[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(7): 118-123.  
LIU Xin, ZHANG Zhanyue, WU Junxian, et al. Research on space-based information support to air offensive operations fire[J]. Control & Command Control, 2021, 46(7): 118-123.
- [4] 陈建光,梁晓莉,王聪,等. 2018年美军天基信息支援装备技术综述[J]. 中国航天, 2019, 42(5):27-29.
- [5] 毛翔,褚瑞,邢蓬宇. 美军作战评估理论与实践[M]. 北京: 知识产权出版社, 2019.  
MAO Xiang, CHU Rui, XING Pengyu. US armed forces operational assessment theory and practice[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2019.
- [6] 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(1): 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(1): 148-152.
- [7] 孙远新,朱鸿乔,王少坤,等. 航天测控领域质量意识现状分析及培养途径[J]. 质量与可靠性, 2018, 33(2): 25-29.
- [8] 刘帆,刘兵,王力,等. 一种基于投影寻踪的航天器健康评估方法[J]. 飞行器测控学报, 2016, 35(5): 351-357.  
LIU Fan, LIU Bing, WANG Li, et al. A method of spacecraft health assessment based on projection pursuit algorithm[J]. Journal Spacecraft TT&C Technology, 2016, 35(5): 351-357.
- [9] 西南电子技术研究所. 航天测控数传综合设备健康状态评估方法: CN112836833A. [P]. [2021-05-25].
- [10] 秦国领,李晓波. 基于能力指数法的测控系统抗干扰性能评估方法[J]. 遥测遥控, 2014, 35(6): 33-37.  
QIN Guoling, LI Xiaobo. Performance evaluation of TT&C anti-jamming based on capability index[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(6): 33-37.
- [11] 井元良,孙海涛,雷英俊. 太阳同步轨道航天器太阳能电池阵在轨特性分析[J]. 航天器工程, 2013, 22(5): 61-66.  
JING Yuanliang, SUN Haitao, LEI Yingjun. Analysis on performance of solar array for satellite in sun synchronous orbit[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(5): 61-66.
- [12] 董勇. 面向应急管理的天基系统需求与构建设想[J]. 航天器工程, 2019, 28(6): 1-7.  
DONG Yong. Requirements and construction of spaced-based systems for emergency management[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(6): 1-7.
- [13] 胡建平,徐会忠,李婷,等. 网络化综合化的天地一体化信息系统探讨[J]. 飞行器测控学报, 2017, 36(4): 241-252.  
HU Jianping, XU Huizhong, LI Ting, et al. Networked and integrated space-ground information system[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2017, 36(4): 241-252.
- [14] 孙盛智,侯妍. 天基信息支援层次化保障模式及其应用[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(10): 99-104.  
SUN Shengzhi, HOU Yan. Hierarchical support model of space-based information and its application[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(10): 99-104.
- [15] 杨槐,宫研生. 作战数据在指挥决策中的作用评估方法研究[J]. 兵工自动化, 2012, 31(6): 25-27.  
YANG Huai, GONG Yansheng. Research on assessment methods of role of combat data in command and decision-making[J]. Ordnance Industry Automation, 2012, 31(6): 25-27.
- [16] 张耀鸿,叶培春. 面向任务的作战数据保障能力评估方法与工具[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(3): 136-138.  
ZHANG Yaohong, YE Peichun. Tool and method of task-oriented operational data guarantee capability evaluation[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(3): 136-138.
- [17] 朱东济,蔡红维,欧阳霄,等. 基于AHP、灰色关联法和TOPSIS的航天测控装备评估模型研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 240-244.  
ZHU Dongji, CAI Hongwei, OU Yangxiao, et al. Research on evaluation model of aerospace TT&C equipment based on AHP and grey relational analysis and TOPSIS[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(11): 240-244.
- [18] 崔银江. 层次分析法及其在GPS控制网中的应用[J]. 北京测绘, 2018, 32(6): 692-696.  
CUI Yinjiang. Analytic hierarchy process and its representation in GPS control network[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2018, 32(6): 692-696.

- [19] 成浩, 何新华, 屈强, 等. 武器装备体系作战能力探索性评估方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(5): 2-4.

CHENG Hao, HE Xinhua, QU Qiang, et al. Research on exploratory evaluation method of combat capability of weapon SOS[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(5): 2-4.

- [20] 冯文婧, 潘宇倩, 白东炜, 等. 应用层次分析法的航天器健康评估方法[J]. 航天器工程, 2014, 23(2): 12-18.

FENG Wenjing, PAN Yuqian, BAI Dongwei, et al. Application of analytical hierarchy process in spacecraft health evaluation[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(2): 12-18.

- [21] 李璇. 基于作战数据分析的装备评价与运用方案决策研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.

LI Xuan. Equipment evaluation and operational plan decision based on operational data analysis[D]. Changsha:

University of Defense Technology, 2016.

#### [作者简介]

张国云 1977年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向航天器测控与管理。

王大鹏 1989年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为航天器测控与管理。

韩海涛 1988年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天器测控与管理。

陈庆亚 1991年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为航天器测控与管理。

王鼎蔚 1993年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天器测控与管理。

任鹏飞 1985年生, 本科, 工程师, 主要研究方向为航天器测控与管理。

(本文编辑: 杨秀丽)