一种航天测控冗余跟踪弧段处理方法

陈　海,李　斌,李晓明,孟德闯
(北京航天飞行控制中心,北京 100094)

摘　要: 随着在轨航天器的日益增多,测控资源的需求量也日益增大,因此,其使用效率也倍受关注。当航天器重要测控弧段安排多个测控设备进行全力跟踪时,很容易出现测控弧段搭接或完全被覆盖的情况。为有效利用现有测控资源,针对弧段搭接的情况,提出了一种基于冗余度评价函数的跟踪弧段处理方法,该方法在不降低跟踪总时长情况下,通过合理有效地配置测控资源,剔除了冗余跟踪弧段,提高了现有测控资源的使用效率。

关键词: 航天测控(TT&C); 测控资源; 跟踪弧段; 搭接; 冗余
中图分类号: V 556　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.01.005

A Redundant Processing Method Based on Space Tracking

CHEN Hai, LI Bin, LI Xiaoming, MENG Dechuang
(Beijing Aerospace Command Control Centre, Beijing 100094, China)

Abstract: The demand for aerospace telemetry track and control (TT&C) resources is growing higher and higher with the increasing orbit spacecrafts, and thus the use efficiency of TT&C resources receives more and more attention. When important TT&C arcs are tracked by multiple measurement devices, the tracking arcs are easily overlapped or completely covered. In order to use the existing TT&C resources effectively, a space tracking method based on a redundant evaluation function is proposed. The method can eliminate redundant tracking arc segments and improve the use efficiency of existing TT&C resources on the premise that the overall tracking is ensured through distributing the TT&C resources reasonably.

Key words: aerospace telemetry track and command (TT&C); TT&C resource; tracking arc; overlap; redundant

0　引言

在航天任务中,为了稳定可靠地获取航天器遥测信息或各类载荷数传数据,会安排多个天地基测控设备持续跟踪,以便开展航天器上行控制或遥外测数据接收等工作[1-4]。当前,虽然我国天地一体化航天测控体系日趋完善[5-7],但随着在轨航天器数量的日益增多[8-11],测控资源的使用率也越来越高,因此,有限的测控资源面临越来越严重的争用冲突[12-18],如何高效利用测控资源越来越备受关注[19-25]。

为有效利用现有测控资源,提出了1种基于冗余度评价函数的跟踪弧段处理方法,针对2弧段搭接及多弧段搭接的情况,分别构建了冗余度评价函数,并详细设计了冗余弧段的剔除处理方法和实施步骤。该方法在不降低跟踪总时长情况下,合理分配测控资源,剔除了冗余跟踪弧段,有效提高了测控资源使用率。

1　2弧段搭接状态下弧段冗余度评价方法

2个弧段的搭接情况相对简单,其搭接状态可以分为如下3种:

1) 弧段1的跟踪区间和弧段2的跟踪区间首尾之间无任何搭接,如图1所示。

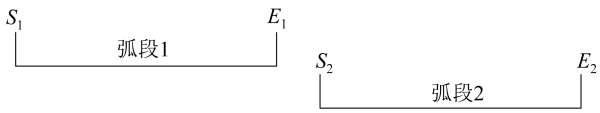

图1　2个弧段不搭接

Fig.1　No overlap between two tracking arcs

收稿日期: 2023-08-03; **修回日期:** 2023-12-11

作者简介: 陈　海(1982—),男,博士,工程师,主要研究方向为航天器任务规划和测控资源调度。

2）弧段 1 的跟踪区间和弧段 2 的跟踪区间之间局部覆盖交叉，这种情况可描述为简单搭接，如图 2 所示。

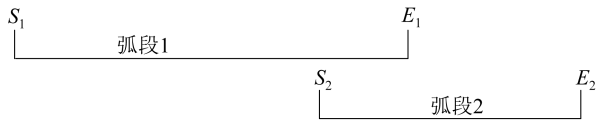

图 2　2 个弧段前后搭接：简单搭接

Fig.2　Simple overlap of two tracking arcs

3）弧段 1 的跟踪区间全部覆盖弧段 2 的跟踪区间，这种情况可描述为完全覆盖，如图 3 所示。

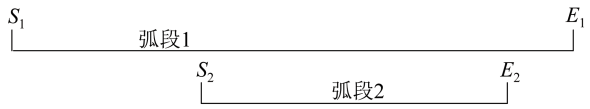

图 3　2 个弧段前后搭接：完全覆盖

Fig.3　Full coverage of two tracking arcs

现将所有的测控弧段记为 $R=(R_1, R_2, \cdots, R_j)$，$j=1, 2, \cdots, n$，其中，$R_j=(S_j, E_j, d_j)$ 为第 j 个弧段的测控信息，S_j 为第 j 个弧段的开始时刻，E_j 为第 j 个弧段的结束时刻，d_j 为该弧段的冗余度评价值。

为量化评价 2 个弧段搭接的情况，假定在 $i<j$（即 $S_i<S_j$）情况下，2 弧段搭接情况下的冗余度函数可定义为 $d_j=f(R_i, R_j)$，该函数表示弧段 R_j 的冗余度，它描述了 R_i 和 R_j 之间的搭接状态情况。根据 2 弧段搭接状态的 3 种情况，构建弧段 R_j 的冗余度函数如下：

$$d_j=f(R_i,R_j)=\begin{cases}0, & [S_i,E_i]\cap[S_j,E_j]=\varnothing \\ 1, & [S_i,E_i]\cap[S_j,E_j]=[S_j,E_i] \\ 2, & [S_i,E_i]\cap[S_j,E_j]=[S_j,E_j]\end{cases} \quad (1)$$

当 $d_j=0$ 时，可判断弧段 R_i 和 R_j 属于不搭接的情况；当 $d_j=1$ 时，可判断弧段 R_i 和 R_j 属于简单搭接的情况；当 $d_j=2$ 时，可判断弧段 R_i 和 R_j 属于完全覆盖的情况，并且弧段 R_j 即是本文要处理的冗余弧段。

2　多弧段搭接状态下弧段冗余度评价方法

3 个弧段跟踪区间的搭接情况可以描述多弧段跟踪区间的搭接情况，因此，可以统一构建 3 个弧段搭接情况下的冗余度评价函数来统一描述。需要指出的是，本文暂不考虑 2 个弧段完全覆盖的情况（图 3），即冗余度函数 d_j 值为 2 的测控弧段在多弧段搭接状态下不进行分析。

对于 3 个弧段间的相互关系，搭接状态相对比较复杂，其搭接状态可以分为以下 4 种。

1）简单搭接 1：3 个弧段依据测控开始时刻依次排列，其中弧段 1 的跟踪区间与弧段 2 的跟踪区间有搭接，属于简单搭接的情况，如图 4 所示，弧段 3 无任何交叉覆盖。

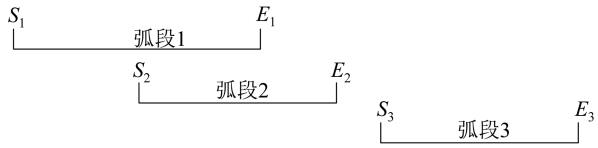

图 4　3 个弧段仅其中 2 个搭接：简单搭接 1

Fig.4　Simple overlap 1: only two of the three tracking arcs overlap

2）简单搭接 2：如图 5 所示，该种弧段搭接情况跟图 4 基本类似，只是属于简单搭接的是弧段 2 和弧段 3，弧段 1 无任何交叉覆盖。

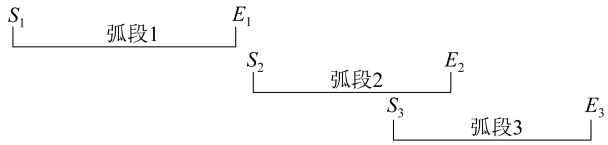

图 5　3 个弧段仅其中 2 个搭接：简单搭接 2

Fig.5　Simple overlap 2: only two of the three tracking arcs overlap

3）简单搭接 3：如图 6 所示，3 个弧段依据测控开始时刻进行排列，该情况较为复杂，弧段 1 的跟踪区间和弧段 2 的跟踪区间、弧段 2 的跟踪区间和弧段 3 的跟踪区间都有交叉搭接，可视为简单搭接的情况，但弧段 1 的跟踪区间和弧段 3 的跟踪区间无任何覆盖交叉。

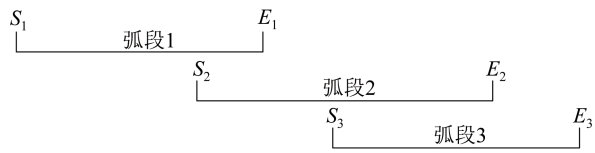

图 6　3 个弧段两两搭接：简单搭接 3

Fig.6　Simple overlap 3: three tracking arcs overlap in pairs

4）3 个弧段交叉搭接：如图 7 所示，3 个弧段仍然按照测控开始时刻进行依次排列，该情况最为复

杂,任意2个弧段的跟踪区间有简单搭接的情况,此时,弧段2可认为是冗余弧段。

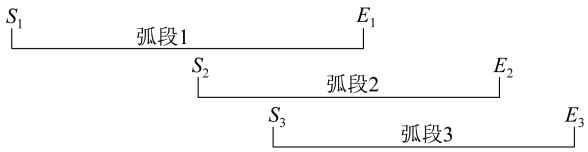

图7 3个弧段交错搭接

Fig.7 Staggered overlap of three tracking arcs

为量化评价3个弧段搭接的情况,假定 $i<j<k$(即 $S_i<S_j<S_k$)情况下,定义多弧段冗余度函数 $d_j=h(R_i,R_j,R_k)$,该函数表示弧段 R_j 的冗余度,它描述了 R_i,R_j,R_k 之间的搭接状态。根据图4~7描述的3弧段搭接情况,构建弧段 R_j 的冗余度函数如下:

$$d_j=h(R_i,R_j,R_k)=f(R_i,R_k)\times(f(R_i,R_j)+f(R_j,R_k)) \quad (2)$$

实际上,d_j 只有如下2种取值:

$$d_j=h(R_i,R_j,R_k)=\begin{cases}0, & [S_i,E_i]\cap[S_k,E_k]=\varnothing \\ 2, & [S_i,E_i]\cap[S_k,E_k]\neq\varnothing \text{且} [S_j,E_j]\subset[S_i,E_i]\cup[S_k,E_k]\end{cases} \quad (3)$$

当 $d_j=0$ 时,可判断弧段 R_j 属于不搭接的情况,并且不是冗余弧段;当 $d_j=2$ 时,可判断弧段 R_i 和 R_k 属于搭接的情况,同时又完全覆盖弧段 R_j,该弧段 R_j 即是要处理的冗余弧段。

3 冗余弧段的剔除方法

弧段选优的过程便是剔除冗余弧段的过程,如图8所示。

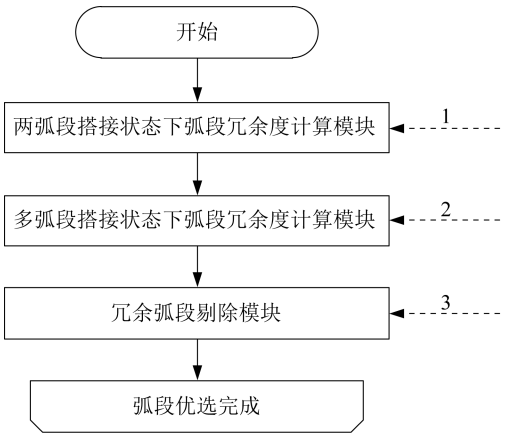

图8 弧段选优方法

Fig.8 Flow chart of the preferred tracking arc selection method

该过程可按照如下3个阶段进行。

1)第1个阶段:将所有待评价弧段首先按照两弧段搭接冗余度评价函数进行计算,统计出完全被覆盖的弧段情况。如图9所示,假设 $i<j$,计算任意两弧段 R_i 和 R_j 构建的冗余度函数 $f(R_i,R_j)$,便可获取弧段 R_j 的冗余度 d_j。当 $d_j=2$ 时,表示弧段 R_j 便是要剔除的冗余弧段。

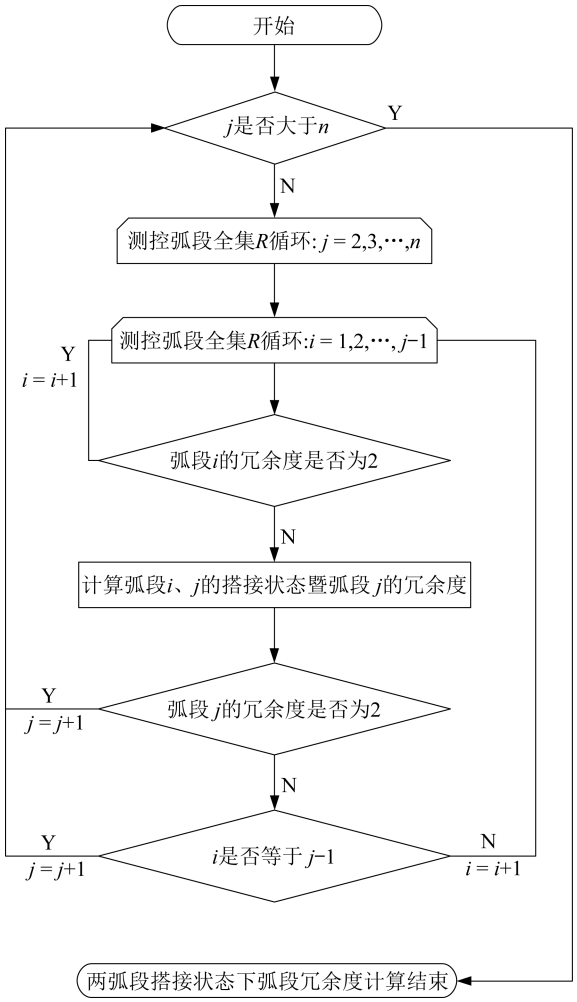

图9 两弧段搭接状态下弧段冗余度计算模块

Fig.9 Flow chart of calculating the redundant of two overlap tracking arcs

2)第2个阶段:基于第1阶段的计算结果,将所有弧段重新按照3个弧段搭接的冗余度评价函数进行计算,再次标记完全覆盖的弧段。如图10所示,假设 $i<j<k$,对任意3个测控弧段 R_i,R_j,R_k,计算弧段冗余度函数 $h(R_i,R_j,R_k)$,便可获取弧段 R_j 的冗余度 d_j,当 $d_j=2$ 时,表示弧段 R_j 即是要剔除的冗余弧段。

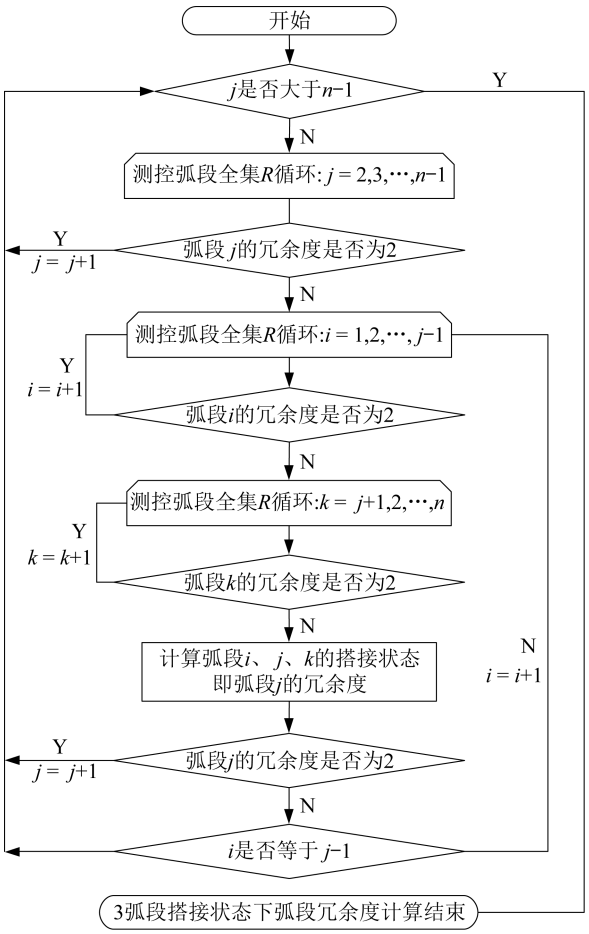

图 10　3 弧段搭接状态下弧段冗余度计算模块

Fig.10　Flow chart of calculating the redundant of three overlap tracking arcs

3）第 3 个阶段：在前 2 个阶段基础上，将所有弧段遍历，将冗余度值为 2 的弧段完全剔除，如图 11 所示。

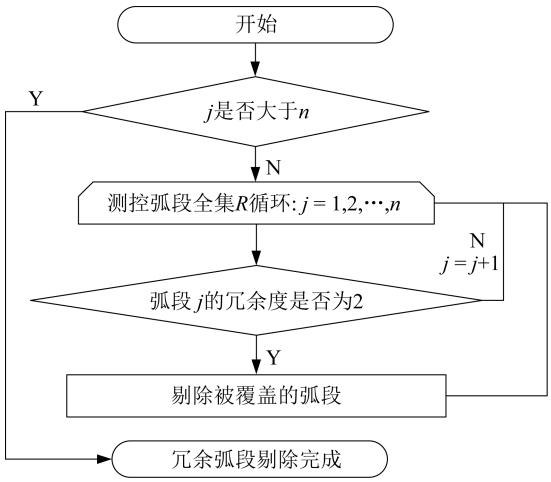

图 11　冗余弧段剔除模块

Fig.11　Flow chart of deleting the redundant tracking arc

4　实施方法

测控弧段的选优方法如图 8～图 11 所示。该方法的实施步骤如下。

步骤 1　首先根据两弧段搭接状态下弧段冗余度评价函数计算每个弧段的冗余度（第 1 个弧段不作考虑），对弧段 R_j，$j=1,2,\cdots,n$，循环变量为 $i=1,2,\cdots,j-1$，计算弧段 R_j 的冗余度函数 $f(R_i,R_j)$ 值。具体各分支计算方法如下：

1）如弧段 R_i 的冗余度 $d_i=2$，并且 $i\neq j-1$，则 $i=i+1$，直接选取后续弧段进行判断；

2）如弧段 R_j 的冗余度 $d_j\neq 2$，而且 $i\neq j-1$，则 $i=i+1$，直接选取后续弧段进行判断；

3）如弧段 R_j 的冗余度 $d_j=2$，则 $j=j+1$，计算后续弧段冗余度；

4）结束判断的条件为弧段 R_j 是弧段集合 R 的最后一个。

步骤 2　按照多弧段搭接状态下弧段冗余度评价函数计算多弧段间的冗余度（首尾弧段不作考虑），对弧段 R_j，$j=1,2,\cdots,n$，循环变量为 $i=1,2,\cdots,j-1$，$k=j+1,2,\cdots,n$，计算弧段 R_j 的冗余度函数 $h(R_i,R_j,R_k)$ 值。具体各分支计算方法如下：

1）如弧段 R_i 的冗余度 $d_i=2$，并且 $i\neq j-1$，则 $i=i+1$，直接选取后续弧段进行判断；

2）如弧段 R_k 的冗余度值 $d_k=2$，而且 $k\neq n$，则 $k=k+1$，直接选取后续弧段进行判断；

3）如弧段 R_j 的冗余度 $d_j\neq 2$，且 $i\neq j-1$，则 $i=i+1$，直接选取后续弧段进行判断；

4）如弧段 R_j 的冗余度 $d_j\neq 2$，且 $k\neq n$，则 $k=k+1$，直接选取后续弧段进行判断；

5）如弧段 R_j 的冗余度 $d_j=2$，则 $j=j+1$，计算后续弧段冗余度；

6）结束判断的条件：弧段 R_j 是弧段集合 R 的最后一个。

步骤 3　根据各弧段冗余度函数值，将完全覆盖的弧段剔除。对于全集 R 中的每个弧段 R_j，$j=1,2,\cdots,n$，如出现冗余度 $d_j=2$ 的弧段，便将该弧段剔除；否则 $j=j+1$，继续进行判断。

5　结束语

本文立足航天任务中天地基测控资源的实际

需求,设计实现了基于冗余度函数的跟踪弧段处理方法,该方法通过合理配置测控资源,能够有效剔除冗余弧段,提高了现有测控资源的使用效率。另外,对只有部分搭接的弧段本文暂未处理,如何合理分配该情况下的测控资源以及上下行通信链路,将是后续研究的重点工作。

参考文献

[1] 朱华,席露华.载人航天飞行任务USB测控网优化配置解决方案[J].飞行器测控学报,2006(6):6-9.

[2] 陈峰.多星测控调度问题的遗传算法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2010:1-3.

[3] 樊慧晶.基于卫星数传与测控任务的地面站资源调度研究[D].长沙:中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院),2021:17-18.

[4] 唐旻.卫星系统数传与测控服务策略研究[D].长沙:国防科学技术大学,2013:11-13.

[5] 凌晓冬,武小悦,李云飞,等.卫星测控调度问题发展趋势探析[J].无线电工程,2022,52(10):1788-1793.

[6] 凌晓冬.多星测控调度问题建模及算法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009:22-26.

[7] 李瑭,刘保国,汤达,等.天基为主的空间站测控通信模式[J].上海航天(中英文),2023,40(5):134-139.

[8] 卜慧娇.多星地面站测控调度多目标优化研究[D].长沙:国防科学技术大学,2011:2-3.

[9] 徐小辉.陆基卫星测控调度问题建模及算法技术研究[D].北京:清华大学,2012:1-2.

[10] 赵啸宇.卫星测控资源调度模型和算法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2019:1-2.

[11] 金光.卫星地面站测控资源调度CSP模型[J].系统工程与电子技术,2007,29(7):1117-1120.

[12] 薛乃阳,丁丹,王红敏,等.基于改进遗传算法的多类测控资源调度方法[J].系统工程与电子技术,2021,43(9):2535-2543.

[13] 张娜,柯良军,冯祖仁.一种新的卫星测控资源调度模型及其求解算法[J].宇航学报,2009,30(5):2140-2145.

[14] 辛立强,张超,赵灵芝,等.面向复杂关联测控需求的冲突规避调度算法[J].系统工程与电子技术,2022,44(5):1581-1588.

[15] 刘建平,李晶,张天骄.航天测控网调度的混合构造启发式算法[J].系统工程与电子技术,2015,37(7):1569-1574.

[16] 杜永浩.面向卫星任务调度问题的通用化调度引擎研究[D].长沙:国防科技大学,2021:1-2.

[17] 李长德,徐伟,徐梁,等.基于深度神经网络的多星测控调度方法[J].中国空间科学技术,2022,42(1):65-72.

[18] 王璐琦.地月中继卫星任务调度问题研究[D].上海:上海交通大学,2020:3-4.

[19] 白剑,高惠荔,谷小松,杨慧影.航天测控资源统一分配的多维遗传算法[J].飞行器测控学报,2017,36(1):25-30.

[20] 张天骄,李济生,李晶,等.基于混合蚁群优化的天地一体化调度力法[J].系统工程与电子技术,2016,38(7):1555-1562.

[21] 樊慧晶,章文毅,田妙苗,等.基于粒子群算法的卫星任务地面站资源调度方法[J].中国科学院大学学报,2022,39(6):801-808.

[22] 王忠贵.载人空间站工程测控通信系统挑战和机遇[J].飞行器测控学报,2013(4):281-285.

[23] 陈峰,武小悦.天地测控资源一体化调度模型[J].宇航学报,2010(5):1405-1412.

[24] 康宁,武小悦.基于任务开始时刻的天地基测控资源调度模型[J].装备指挥技术学院学报,2011(6):97-101.

[25] 武艺.基于深度强化学习的多星测控资源调度方法研究[D].重庆:重庆大学,2020:1-2.