

基于二态模型递归树的遥测全帧数据仿真算法

李 鑫, 尹 全, 王竞克, 谷鹏冲
(中国太原卫星发射中心技术部 太原 030031)

摘要: 由于不同型号飞行器的遥测数据帧格式复杂多变、形式各异, 使得工作人员不得不频繁更动遥测数据仿真软件, 尤其在面对新型号飞行器时, 软件甚至需要重新开发。为此, 提出了一种基于二态模型递归树的通用化遥测全帧数据仿真算法。首先, 通过对遥测全帧数据的特点进行分析, 提出了基于参数数据和结构数据的遥测全帧数据通用化二态表达模型, 构建了描述遥测全帧数据的递归树, 实现了遥测全帧数据通用化描述。其次, 针对遥测全帧数据仿真问题, 提出了基于多元函数递归运算的结构数据生成算法, 并设计了参数反演算法, 实现了遥测全帧数据的通用化仿真。最后, 通过算例分析, 验证了算法在遥测全帧数据仿真中的实用性和有效性。

关键词: 遥测全帧数据仿真; 二态表达模型; 递归树; 结构数据生成算法; 参数反演算法

中图分类号: V557+.3; V448.15+3

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2023)05-0048-11

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230404001

引用格式: 李鑫, 尹全, 王竞克, 等. 基于二态模型递归树的遥测全帧数据仿真算法[J]. 遥测遥控, 2023, 44(5): 48–58.

Telemetry full-frame data simulation algorithm based on two-state model recursion tree

LI Xin, YIN Quan, WANG Jingke, GU Pengchong

(Technology Department of Taiyuan Launch Center, Taiyuan 030031, China)

Abstract: Due to complicated and volatile telemetry full-frame data formats for different types of aircrafts, the telemetry data simulation software has to be changed frequently. Especially for the new type of aircraft, the software even needs to be redeveloped. Therefore, a universal telemetry full-frame data simulation algorithm based on two-state model recursion tree is proposed. Firstly, by analyzing the characteristics of telemetry full-frame data, a universal two-state representation model based on the parameter data and the structure data is proposed. Based on the model, a recursive tree is constructed to realize the universal description of telemetry full-frame data. Secondly, in order to solve the simulation problem of telemetry full-frame data, a structure data generation algorithm using recursive operation of multiple functions is proposed, and a parameter inversion algorithm is designed. Finally, the practicability and effectiveness of the algorithm for the simulation of telemetry full-frame data are verified by an example analysis.

Keywords: Telemetry full-frame data simulation; Two-state model; Recursion tree; Structure data generation algorithm; Parameter inversion algorithm

Citation: LI Xin, YIN Quan, WANG Jingke, et al. Telemetry full-frame data simulation algorithm based on two-state model recursion tree [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(5): 48–58.

引 言

遥测数据仿真^[1]作为发射场测试系统^[2]、联调联试系统、飞行器模拟系统的重要组成部分, 是飞行器发射前准备过程中一项十分重要的工作。然而, 由于不同型号飞行器的遥测数据帧格式复杂多变、形式各异, 即使同型号不同批次飞行器的遥测数据格式和内容也不尽相同^[3], 使得工作人

员不得不频繁更动遥测数据仿真软件^[4,5], 尤其面对新型号飞行器时, 甚至需要重新开发, 以满足不同条件下遥测数据仿真的需求。因此, 亟需研发一套与飞行器无关的通用化遥测数据仿真软件, 而研发通用化遥测数据仿真软件的关键在于通用化遥测全帧数据^[6,7]仿真算法的设计。

为了解决这一关键性课题, 许多学者都做了比较深入的研究, 并取得了一定的成果。文献[8]

给出了面向测控系统的运载火箭仿真系统设计、软硬件构成,从系统功能的角度说明了遥测数据仿真的重要作用。文献[9]提出了遥测参数计算的通用化模型和方法,有效解决了参数计算过程中配置文件与代码紧耦合的问题,但缺少对遥测参数组帧算法的设计。文献[10]虽然提到了在遥测数据组帧方法中采用递归的思路,但并没有给出具体的模型和算法。文献[11]虽然从遥测数据的特点、数据描述、系统功能与结构等方面给出了遥测数据仿真系统的设计和实现过程,但同样没有给出遥测数据的仿真算法。可见,现有方法要么从系统硬件的角度描述,要么从仿真原理的角度描述,并没有一种用于描述各型号飞行器遥测全帧数据的通用化表达模型和仿真算法,通用化遥测全帧数据仿真算法依然是制约通用化遥测数据仿真软件研发的瓶颈。

为此,本文对遥测全帧数据的通用化仿真方法进行了研究。首先,通过对各型号飞行器遥测全帧数据的特点进行分析,建立了遥测全帧数据的通用化表达模型;其次,利用该模型,设计了基于结构递归运算和参数反演运算的遥测全帧数据通用化仿真算法。最后,通过算例分析,验证了模型和算法的实用性和有效性。

1 遥测全帧数据特点

遥测全帧数据是飞行器上测量参数的载体,虽然不同飞行器甚至同一型号飞行器不同批次的遥测全帧数据格式和内容不尽相同,但本质上可

将其归纳为在某种通用协议下定义的格式数据,其特点可归纳为^[11-14]:

① 遥测全帧数据都具有一些基本属性信息:帧周期、帧长、帧计数、同步码等信息。

② 遥测全帧数据均是按照比特、字节、结构和帧等4个元素逐层次生成的数据流。

③ 遥测全帧数据中结构数据又是由比特、字节、结构或者三者的任意组合组成。

④ 遥测参数虽然种类繁多、性质各异,但归根结底参数要么以比特形式存在于遥测全帧数据中,要么以字节形式存在于遥测全帧数据中。

正是由于遥测全帧数据具有以上特点,使得建立通用化遥测全帧数据表达模型成为可能。

2 模型建立

基于遥测全帧数据的特点分析可知,无论遥测全帧数据的内容和格式如何复杂多变,均可将其分解为相对全帧结构位置固定的参数数据和结构数据,结构数据又可进一步分解为相对该结构位置固定的参数数据或结构数据或此二者的组合,以此类推,直到将所有结构数据分解到仅由相对该结构位置固定的参数数据组成,最终得到如图1所示的遥测全帧结构数据树状分解图。需要说明的是,无论是帧计数,还是同步码、特征码等,本质上都是一种参数。

由此可见,遥测全帧数据通用化表达模型设计的关键在于结构数据和参数数据的描述,为此,本文提出了基于二态表达模型的通用化遥测全帧

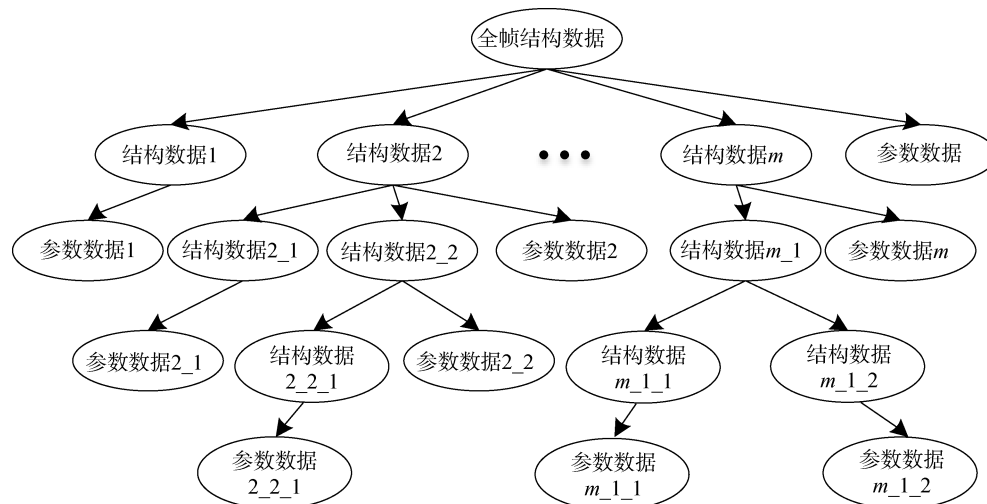


图1 遥测全帧结构数据树状分解图

Fig. 1 The tree decomposition of the telemetry full-frame data

数据描述方法。

2.1 参数数据

参数数据包括字节型参数数据和比特型参数数据。其中, 字节型参数是指参数由字节构成, 其基本组成单元为字节; 比特型参数是指参数由比特构成, 其基本组成单元为比特。

表 1 给出了描述参数数据的属性信息。由表 1 可知: 参数数据由基本属性、结果属性、运算属性及编码属性四类属性描述。基本属性用于描述参数的基本信息, 包括参数名称, 对于比特型参数还包括参数编码名称。结果属性用于获取参数的仿真数值, 包括仿真数值表、插值方法、开始时间、结束时间、仿真数值。其中, 仿真数值表指明了参数仿真数值的时间序列链表, 表中内容包括时间和量值, 插值方法则给出了从仿真数值表中获取任意时刻参数值所采用的插值方法, 如常量插值、一阶多项式插值等方法。运算属性用于从参数仿真数值到编码值的反演计算, 包括计算方法、计算系数, 计算方法给出了反演计算所使用的公式, 计算系数则依据计算方法而定。编码属性用于参数的数值编码, 包括编码字节长度、编码字节顺序、编码类型, 对于比特型参数还包括比特位置。其中, 编码字节顺序指明了编码时

表 1 参数数据属性表

Table 1 Parameter data attributes

性质	属性	字节型参数	比特型参数
基本属性	参数名称	√	√
	参数编码名称		√
结果属性	仿真数值表	√	√
	插值方法	√	√
	开始时间	√	√
	结束时间	√	√
	仿真数值	√	√
运算属性	计算方法	√	√
	系数	√	√
编码属性	编码字节长度	√	√
	编码字节顺序	√	√
	编码类型	√	√
	比特位置		√

字节的高低顺序, 编码类型指明了编码时所采用的数据类型, 如 char、ushort、int、float、double 等, 比特位置指明了比特型参数所在编码的比特

位置, 可以是一位, 也可以是某几位。可以看出, 相比字节型参数的属性, 比特型参数的属性中增加了用于描述比特和字节的关系属性, 即参数编码名称和比特位置。

2.2 结构数据

结构数据包括全帧结构数据和通用结构数据。其中, 全帧结构数据属性用于描述全帧数据的格式信息; 通用结构数据属性用于描述全帧数据中所包含子结构的格式信息。

表 2 给出了描述结构数据的属性信息。由表 2 可知: 结构数据由基本属性、位置属性、运算属性三类属性描述。基本属性仅包括数据名称, 位置属性用于描述数据所在的位置。对于全帧结构, 采用二维描述方式, 其位置属性包括子帧波道位置、副帧波道位置、延时子帧波道位置、延时副帧波道位置^[15-17]; 对于通用结构, 采用一维描述方式, 其位置属性仅包括数据起始位置。运算属性用于数据的递归运算, 包括数据类型、数据长度、下级结构表、结构长度, 其中, 数据类型指明了数据的性质, 包括字节型参数、比特型参数和结构三种。当数据类型为字节型参数时, 下级结构表为字节型参数所对应的属性链表, 结构长度对应参数所占字节数, 数据长度为当前结构中参数所占字节数; 当数据类型为比特型参数时, 下级结构表为比特型参数所对应的属性链表, 结构长度对应参数编码所占字节数, 数据长度为当前结构中参数编码所占字节数; 当数据类型为结构数据时, 下级结构表为下级结构数据所对应的属性链表, 结构长度对应应该结构所占字节数, 数据长

表 2 结构数据属性表

Table 2 Structure data attributes

性质	属性	全帧结构	通用结构
基本属性	数据名称	√	√
	子帧波道位置	√	
位置属性	副帧波道位置	√	
	延时子帧波道位置	√	
	延时副帧波道位置	√	
	数据起始位置		√
运算属性	数据长度	√	√
	数据类型	√	√
	下级结构表	√	√
	结构长度	√	√

度为当前结构中该结构所占字节数。可以看出，全帧结构和通用结构数据的属性区别仅在于位置信息的描述方式不同。

3 算法设计

通过上述分析可知，遥测全帧数据仿真就是从全帧结构数据开始，按照其树状分解图对遥测

全帧数据进行递归解析^[18-21]，直至将每个结构数据解析至仅存在相对该结构位置固定的参数数据。对于参数数据，其内容可直接由参数仿真数值反演运算得到；对于结构数据，其内容则需要通过逐级递归运算得到。因此，遥测全帧数据仿真的核心问题在于如何实现结构的递归运算和参数的反演运算。

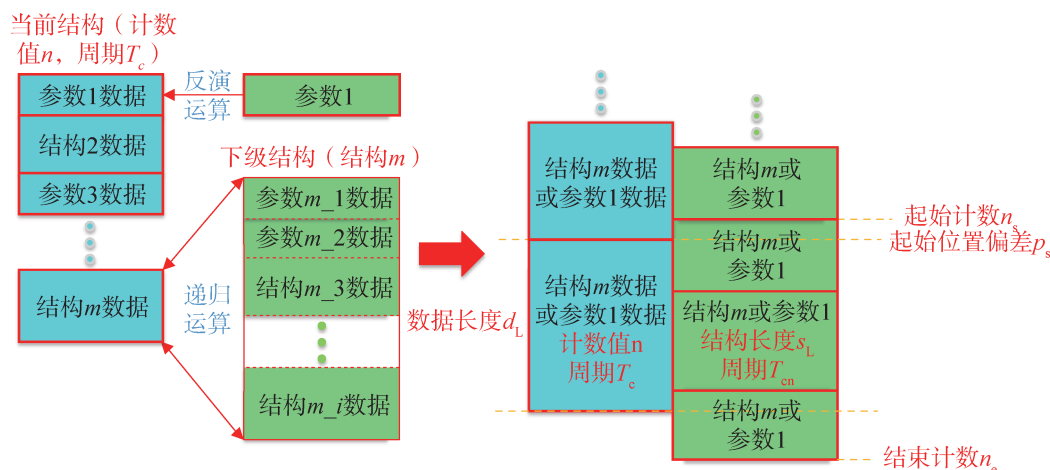


图2 相邻结构递归算法示意图

Fig. 2 The schematic diagram of recursive algorithm for adjacent structures

3.1 结构递归算法

图2给出了相邻结构递归算法示意图。由图2可知：无论是参数的反演运算还是结构的递归运算，要想实现参数数据或结构数据的仿真，都需要知道结构或参数的起始计数、结束计数、数据长度、结构长度、起始位置偏差和周期这六要素。为此，本文提出了基于多元函数递归运算的结构数据生成算法。

设当前结构的仿真计数为 n ，周期为 T_c ，下级结构或参数的数据长度为 L_d ，结构长度为 L_s ，则下级结构或参数的起始计数 n_s 为：

$$n_s = \text{floor} \left((n-1) \times \frac{L_d}{L_s} \right) + 1 \quad (1)$$

结束计数 n_e 为：

$$n_e = \text{ceil} \left(n \times \frac{L_d}{L_s} \right) \quad (2)$$

起始位置偏差 p_s 为：

$$p_s = (n-1) \times L_d - (n_s-1) \times L_s \quad (3)$$

周期为 T_{cn} ：

$$T_{cn} = T_c \times \frac{L_s}{L_d} \quad (4)$$

其中， floor 表示向下取整， ceil 表示向上取整，数据长度 L_d 和结构长度 L_s 可通过当前结构数据属性表获得。

如图3给出的结构递归算法流程图所示，利用公式(1)~公式(4)，基于当前结构的起始计数、结束计数、数据长度、结构长度、起始位置偏差和周期的结构递归算法为：

① 依据当前结构的起始计数、结束计数逐一实现各计数值对应当前结构数据的仿真，从而获取需要仿真的所有当前结构数据，其中，每个计数值对应的当前结构数据仿真过程如下：

1) 依据当前结构长度构造数据缓冲区。

2) 依据当前结构数据属性表中数据的属性内容，逐一实现当前结构中各数据的仿真，每个数据的仿真过程如下：

i 依据当前结构数据属性表确定下级结构或参数的数据长度和结构长度。

ii 依据当前结构仿真计数值、周期和下级结构或参数的数据长度、结构长度，利用公式(1)~公式(4)计算下级结构或参数的起始计数、结束计数、起始位置偏差和周期。

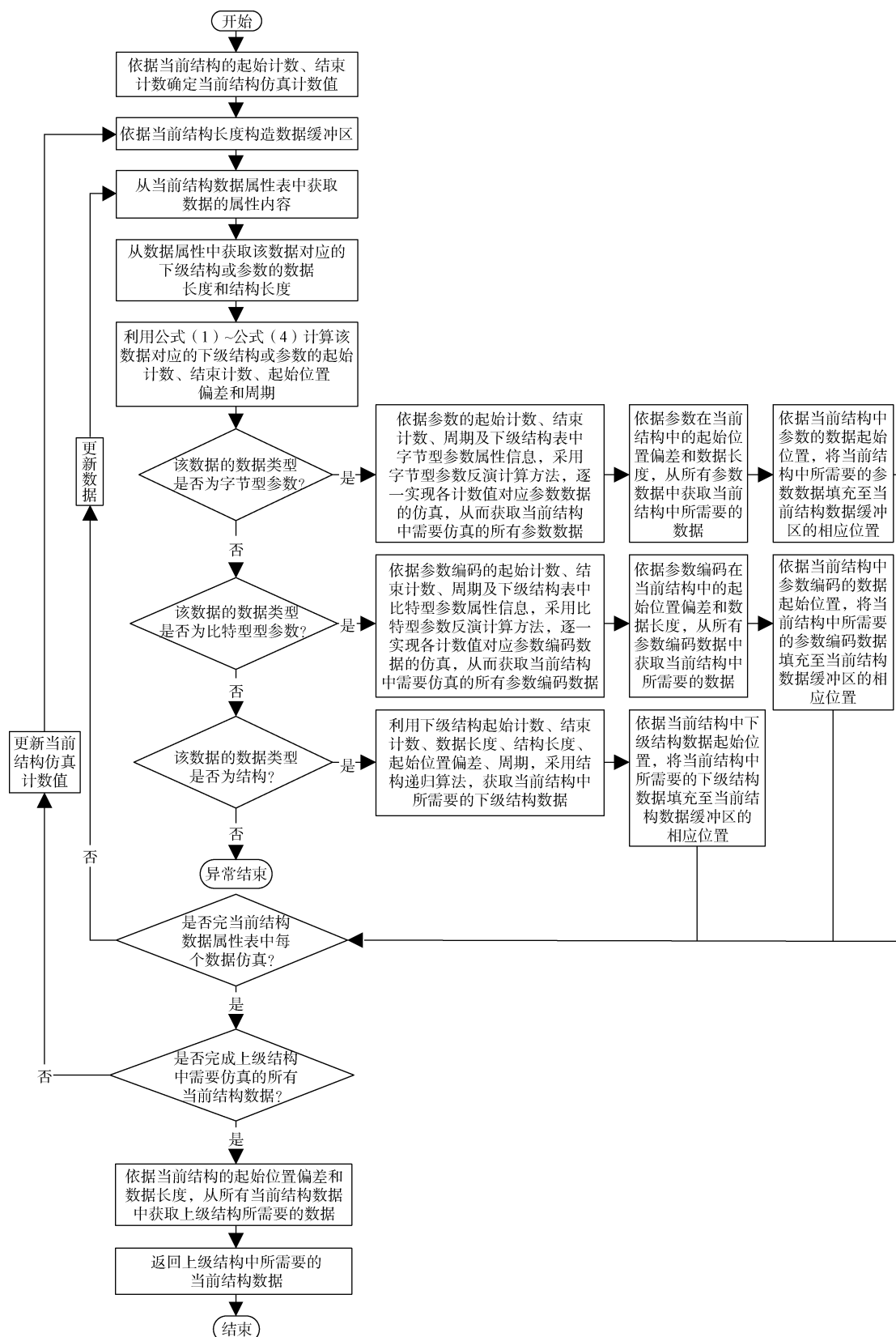


图3 结构递归算法流程图

Fig. 3 The flow chart of recursive algorithm for structures

iii 依据当前仿真数据的数据类型实现数据的仿真:

当数据类型为字节型参数时:

(a) 依据参数的起始计数、结束计数、周期及下级结构表中字节型参数属性信息, 利用字节型参数反演计算方法, 逐一实现各计数值对应参数数据的仿真, 从而获取当前结构中需要仿真的所有参数数据。

(b) 依据参数在当前结构中的数据长度和起始位置偏差, 从所有参数数据中获取当前结构中所需要的数据。

(c) 依据当前结构中参数的数据起始位置, 将当前结构中所需要的参数数据填充至当前结构数据缓冲区的相应位置。

当数据类型为比特型参数时:

(a) 依据参数编码的起始计数、结束计数、周期及下级结构表中比特型参数属性信息, 利用比特型参数反演计算方法, 逐一实现各计数值对应参数编码数据的仿真, 从而获取当前结构中需要仿真的所有参数编码数据。

(b) 依据参数编码在当前结构中的数据长度和起始位置偏差, 从所有参数编码数据中获取当前结构中所需要的数据。

(c) 依据当前结构中参数编码的数据起始位置, 将当前结构中所需要的参数编码数据填充至当前结构数据缓冲区的相应位置。

当数据类型为结构时:

(a) 利用下级结构起始计数、结束计数、数据长度、结构长度、起始位置偏差、周期, 重复步骤①~步骤③, 直至获取当前结构中所需要的下级结构数据。

(b) 依据当前结构中下级结构数据起始位置, 将当前结构中所需要的下级结构数据填充至当前结构数据缓冲区的相应位置。

② 依据当前结构的起始位置偏差和数据长度, 从所有当前结构数据中获取上级结构所需要的数据。

③ 返回上级结构中所需要的当前结构数据。

这样, 当仿真时刻到来时, 通过当前仿真时间和帧周期, 确定当前时刻需要仿真的全帧计数, 再根据全帧结构数据属性表中各数据下级结构或参数数据长度和结构长度, 利用公式(1)~公式(4)获取下级结构或参数的起始计数、结束计数、起始

位置偏差和周期, 采用结构递归算法便可实现当前时刻遥测全帧数据的仿真。

3.2 参数反演算法

无论是字节型参数还是比特型参数, 其反演运算均包含3个过程: 参数值计算、编码值计算、编码。二者区别在于: 当进行结构递归运算时, 对于字节型参数, 结构数据属性表中的数据名称与参数数据属性表中的参数名称对应; 对于比特型参数, 结构数据属性表中的数据名称与参数数据属性表中的参数编码名称对应。

3.2.1 字节型参数反演算法

图4给出了字节型参数反演算法的过程为:

① 利用参数的周期和仿真计数值计算参数的仿真时刻。

② 从字节型参数属性表中获取参数的属性信息。

③ 利用插值方法从仿真数值表中计算仿真时刻的参数值或通过开始时间、结束时间、仿真数值确定仿真时刻的参数值。

④ 利用参数的计算方法和系数, 将参数值转化为编码值。

⑤ 依据参数编码类型和编码字节长度对参数编码值进行编码运算。

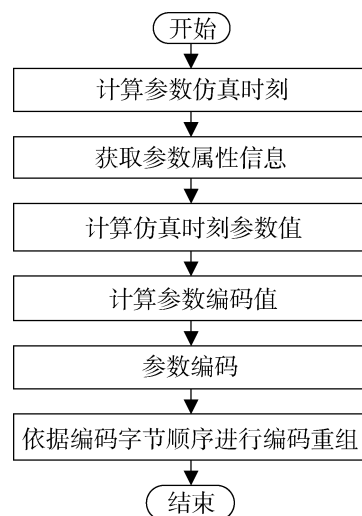


图4 字节型参数反演算法流程图

Fig. 4 The flow chart of inversion algorithm for the byte type parameter

⑥ 依据编码字节顺序进行编码重组。

3.2.2 比特型参数反演算法

图5给出了比特型参数反演算法的过程为:

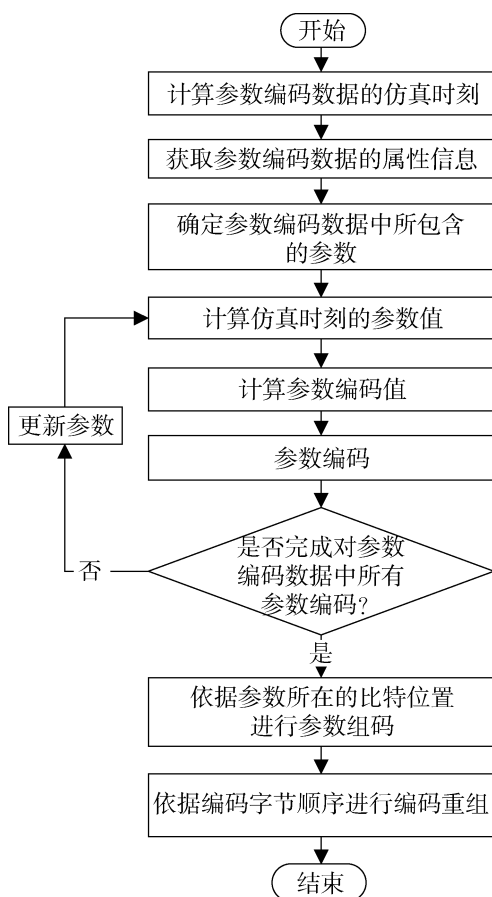


图 5 比特型参数反演算法流程图

Fig. 5 The flow chart of inversion algorithm for the bit type parameter

① 依据参数编码数据的周期和仿真计数值计算参数编码数据的仿真时刻。

② 从比特型参数属性表中获取参数编码数据的属性信息。

③ 依据比特型参数数据属性表中参数编码名称和参数名称的关系, 确定参数编码数据中所包含的参数, 并逐一对各参数进行编码, 过程如下:

1) 利用插值方法从仿真数值表中计算仿真时刻的参数值或通过开始时间、结束时间、仿真数值确定仿真时刻的参数值。

2) 利用参数的计算方法和系数, 将参数值转化为编码值。

3) 依据参数编码类型对参数编码值进行编码运算。

④ 依据参数编码数据中各参数所在的比特位置, 对所有参数进行组码。

⑤ 依据编码字节顺序进行编码重组。

4 算例分析

为了评估本文所提出的仿真算法, 以某飞行器遥测全帧数据仿真为例, 对模型的实用性和算法的有效性进行了详细检验和分析。设飞行器遥测全帧数据的帧周期为 10 秒, 子帧长为 10, 副帧长为 5, 子帧同步码为 0xAAAA, 副帧同步码为 0xB BBBB。

表 3 全帧结构数据信息表

Table 3 The information of the full-frame structure data

数据名称	子帧波道位置	副帧波道位置	延时子帧波道位置	延时副帧波道位置	数据长度/byte	数据类型	下级结构表	结构长度
子帧同步码	6,7	1-4	—	—	8	字节型参数	全帧结构数据_字节型	2
副帧同步码	6,7	5	—	—	2	字节型参数	全帧结构数据_字节型	2
帧计数	5	5	—	—	1	字节型参数	全帧结构数据_字节型	1
参数 1	1-4	1	—	—	4	字节型参数	全帧结构数据_字节型	4
参数 2	1-4	2-5	—	—	16	字节型参数	全帧结构数据_字节型	4
参数编码 1	5	1	—	—	1	比特型参数	全帧结构数据_比特型	1
结构 1	8-10	1-5	—	—	15	结构	结构 1 数据	5

依据遥测全帧数据的内容及本文所提出的通用化二态表达模型, 得到了如表 3~表 9 所示的仿真信息表。其中, 在插值方法中, 0 表示常量插值, 1 表示一阶多项式插值; 在计算方法中, 0 表示编码值即为参数值, 1 表示编码值为等差数列, 其中, 第一个系数表示初值, 第二个系数表示步长,

2 表示编码值为参数值的一阶多项式计算结果, 其中, 第一个系数表示截距, 第二个系数表示斜率 (详见表 4)。由表 3 所示的全帧结构数据信息表可以看出, 该飞行器遥测全帧数据由 7 种数据组成, 分别为子帧同步码、副帧同步码、帧计数、参数 1、参数 2、参数编码 1 和结构 1。其中, 子帧同步

表 4 全帧结构数据_字节型参数信息表

Table 4 The information of byte type parameter for the full-frame structure data

参数名称	插值标志	仿真数值表	插值方法	开始时间/s	结束时间/s	仿真数值	计算方法	系数	编码字节长度	编码字节顺序	编码类型
子帧同步码	false	—	—	0	150	0xAAAA	0	—	2	序 21	ushort
副帧同步码	false	—	—	0	150	0xB BBB	0	—	2	序 21	ushort
帧计数	false	—	—	0	150	—	1	1,1	1	序 1	uchar
参数 1	true	参数	0	0	150	—	2	1,0.1	4	序 1234	float
参数 2	true	参数	1	0	150	—	0	—	4	序 4321	float

表 5 全帧结构数据_比特型参数信息表

Table 5 The information of bit type parameter for the full-frame structure data

参数编码名称	参数名称	插值标志	仿真数值表	插值方法	开始时间/s	结束时间/s	仿真数值	计算方法	系数	编码字节长度	编码字节顺序	比特位置	编码类型
参数编码 1	参数 3	false	—	—	0	120	0	0	—	1	序 1	7	uchar
参数编码 1	参数 3	false	—	—	120	150	1	0	—	1	序 1	7	uchar
参数编码 1	参数 4	false	—	—	0	120	1	0	—	1	序 1	6	uchar
参数编码 1	参数 4	false	—	—	120	150	0	0	—	1	序 1	6	uchar
参数编码 1	参数 5	false	—	—	0	120	0	0	—	1	序 1	5	uchar
参数编码 1	参数 5	false	—	—	120	150	1	0	—	1	序 1	5	uchar

表 6 结构 1 数据信息表

Table 6 The information of the structure 1 data

数据名称	数据起始位置	数据长度/byte	数据类型	下级结构表	结构长度
结构头	0	2	字节型参数	结构 1 数据_字节型	2
参数编码 2	2	1	比特型参数	结构 1 数据_比特型	1
结构尾	3	2	字节型参数	结构 1 数据_字节型	2

表 7 结构 1 数据_字节型参数信息表

Table 7 The information of byte type parameter for the structure 1 data

参数名称	插值标志	仿真数值表	插值方法	开始时间/s	结束时间/s	仿真数值	计算方法	系数	编码字节长度	编码字节顺序	编码类型
结构头	false	—	—	0	150	0xEEEE	0	—	2	序 21	ushort
结构尾	false	—	—	0	150	0xFFFF	0	—	2	序 21	ushort

表 8 结构 1 数据_比特型参数信息表

Table 8 The information of bit type parameter for the structure 1 data

参数编码名称	参数名称	插值标志	仿真数值表	插值方法	开始时间/s	结束时间/s	仿真数值	计算方法	系数	编码字节长度	编码字节顺序	比特位置	编码类型
参数编码 2	参数 6	false	—	—	0	100	0	0	—	1	序 1	7	uchar
参数编码 2	参数 6	false	—	—	100	150	1	0	—	1	序 1	7	uchar
参数编码 2	参数 7	false	—	—	0	130	0	0	—	1	序 1	6	uchar
参数编码 2	参数 7	false	—	—	130	150	1	0	—	1	序 1	6	uchar
参数编码 2	参数 8	false	—	—	0	115	0	0	—	1	序 1	5	uchar
参数编码 2	参数 8	false	—	—	115	150	1	0	—	1	序 1	5	uchar

表 9 参数的仿真数值表

Table 9 The value table of parameter simulation

时间/s	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
量值	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

码、副帧同步码、帧计数、参数 1、参数 2 为字节型参数数据, 其数据的属性信息如表 4 所示; 参数编码 1 为比特型参数数据, 其数据的属性信息如表 5 所示; 结构 1 为结构数据, 其内容由表 6 给出的结构 1 数据信息表所示, 可以看出, 该结构又由 3 种数据组成, 分别为结构头、参数编码 2 和结构尾, 且数据类型仅包含字节型参数和比特型参数数据。因此, 结合表 7 给出的结构 1 数据字节型参数信息表和表 8 给出的结构 1 数据比特型参数信息表, 便可实现该结构数据的描述, 从而实现了飞行器遥测全帧数据的描述。

图 6 给出了当仿真时间为 120 秒, 帧计数为 12 时, 采用结构递归运算和参数反演运算得到的遥测全帧数据仿真结果。从图 6 中可以直观看出, 该遥测全帧数据的子帧同步码为 0xAAAA, 副帧同步码为 0xB BBB, 帧计数为 0x0C, 即 12, 符合设

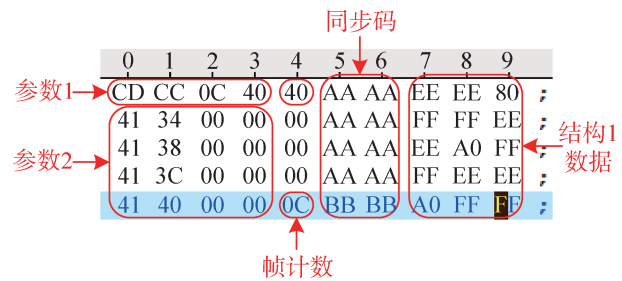


图 6 遥测全帧数据的仿真结果(帧计数为 12)

Fig. 6 The simulation result of telemetry full-frame data when frame count is 12

计要求。为进一步核实仿真数据的准确性, 对该数据进行了解算, 得出如表 10 所示参数解算结果, 通过与表 4、表 5、表 8 及表 9 的仿真参数值比对可以看出, 二者一致, 说明本文所提出的基于二态模型递归树算法能够有效实现遥测全帧数据的仿真。

表 10 参数解算结果表

Table 10 Results of parameter calculation

参数名称	参数 1	参数 2	参数 3	参数 4	参数 5	参数 6	参数 7	参数 8
时间/s	120	112.5、115、117.5、120	120	120	120	113.3、116.7、120	113.3、116.7、120	113.3、116.7、120
结果	12	11.25、11.5、11.75、12	0	1	0	1、1、1	0、0、0	0、1、1

5 结束语

本文对遥测全帧数据仿真问题进行了深入研究, 提出了一种基于二态模型递归树的通用化遥测全帧数据仿真算法。通过对各型号飞行器遥测全帧数据的特点进行分析, 提出了基于参数数据和结构数据的遥测全帧数据通用化二态表达模型, 构建了描述遥测全帧数据的递归树, 实现了遥测全帧数据的通用化描述。同时, 针对参数数据的仿真问题, 依据参数类型分别设计了字节型参数反演算法和比特型参数反演算法, 针对结构数据仿真问题, 提出了一种基于起始计数、结束计数、数据长度、结构长度、起始位置偏差、周期的多元函数递归运算方法, 从而按照遥测全帧结构数据的树状分解图, 逐级实现各级参数数据和结构

数据的仿真, 进而实现了遥测全帧数据的仿真。算例分析和实践应用表明, 本文提出的模型和算法能够有效解决不同型号飞行器的遥测数据通用化仿真问题, 为通用化遥测数据仿真系统和模拟源的设计提供了一种有效的技术方法。

参考文献

[1] 蔡晓玮, 智佳, 陈志敏, 等. 基于关联知识的航天器有效载荷遥测数据仿真方法[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(7): 2095-2101.

CAI Xiaowei, ZHI Jia, CHEN Zhimin, et al. Simulation method of spacecraft payload telemetry data based on correlation knowledge[J]. Computer Engineering and Design, 2022, 43(7): 2095-2101.

[2] 杨同智, 刘廷玉, 王杰, 等. 面向一体化测试与运管的航

- 天器指令技术研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 1-9.
- YANG Tongzhi, LIU Tingyu, WANG Jie, et al. Research on spacecraft instruction technology for integrated testing and operation management[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 1-9.
- [3] 谷阳阳, 张东. 基于规范帧的遥测数据矩阵分路方法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 108-113.
- GU Yangyang, ZHANG Dong. Matrix partitioning method of telemetry data on the base of standard frames[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(24): 108-113.
- [4] 吕治国. 智能化多站遥测数据处理系统[J]. 遥测遥控, 2017, 38(4): 9-19.
- LYU Zhiguo. Intelligent multi-station telemetry data processing system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, 38(4): 9-19.
- [5] 贾海艳, 于瑞年. 多任务遥测数据实时处理系统[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(5): 102-106.
- JIA Haiyan, YU Ruinian. Multi-task telemetry data real-time processing system[J]. Journal of Detection & Control, 2020, 42(5): 102-106.
- [6] 杨军, 张东. 基于全帧最优的多站遥测数据融合方法[J]. 电子测量技术, 2019, 42(17): 101-105.
- YANG Jun, ZHANG Dong. Multi-station telemetry data fusion method based on frame optimization[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(17): 101-105.
- [7] 舒传华, 王竞克, 唐海波, 等. 基于遥测全帧的延时数据弥补方法研究与应用[J]. 遥测遥控, 2016, 37(4): 14-19.
- SHU Chuanhua, WANG Jingke, TANG Haibo, et al. Research and application of the remedy method using delay data based on telemetry frame[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2016, 37(4): 14-19.
- [8] 杨永安, 冯祖仁, 杜小宁, 等. 面向测控的运载火箭仿真设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2507-2510.
- YANG Yongan, FENG Zuren, DU Xiaoning, et al. Design and realization of TT&C-oriented simulation of launch vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(11): 2507-2510.
- [9] 周侗, 苗毅. 基于计算树的航天遥测参数仿真[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(5): 1064-1069.
- ZHOU Ti, MIAO Yi. Telemetry parameters simulation of spacecraft based on computation tree[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(5): 1064-1069.
- [10] 武征, 李海鹏. 遥测参数仿真与判决系统设计与实现[J]. 无线电工程, 2013, 43(8): 44-46.
- WU Zheng, LI Haipeng. Design and implementation of telemetry parameter simulation and decision system[J]. Radio Engineering, 2013, 43(8): 44-46.
- [11] 马贤颖, 刘文红, 张磊. 遥测数据仿真系统的设计和实现[J]. 飞行器测控学报, 2008, 27(6): 39-42.
- MA Xianying, LIU Wenhong, ZHANG Lei. Design and realization of simulation system for telemetry data[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008, 27(6): 39-42.
- [12] 赵圣占. 遥测复杂数据帧参数的处理方法[J]. 仪器仪表用户, 2016, 23(1): 81-82.
- ZHAO Shengzhan. Processing methods of complex frame parameters of telemetry[J]. Instrumentation Customer, 2016, 23(1): 81-82.
- [13] 谷阳阳, 赵圣占. 基于参数属性的遥测数据处理方法研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(23): 70-73.
- GU Yangyang, ZHAO Shengzhan. The method of telemetry data processing on the base of parameter attribute[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(23): 70-73.
- [14] 王洪凯, 李东星, 田恒春, 等. 小型空间飞行器通用化遥测系统设计与实现[J]. 遥测遥控, 2021, 42(1): 40-45.
- WANG Hongkai, LI Dongxing, TIAN Hengchun, et al. Design and implementation of a modularity telemetry system for small space vehicle[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(1): 40-45.
- [15] 吴江波, 韩杰, 刘建梁. 一种通用小型弹载图像遥测设备设计[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 74-81.
- WU Jiangbo, HAN Jie, LIU Jianliang. Design of a universal small missile-borne image telemetry equipment[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 74-81.
- [16] 张东. 典型遥测帧结构分析与数据处理关键技术[J].

- 兵工自动化, 2020, 39(3): 5-9.
- ZHANG Dong. Structure analysis of typical telemetry frame and key techniques of data processing[J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(3): 5-9.
- [17] 于长海, 倪风岳, 沈惠. 遥测实时与延时数据结果弥补拼合方法[J]. 遥测遥控, 2019, 40(2): 51-56.
- YU Changhai, NI Fengyue, SHEN Hui. A fusion method of real-time and delay telemetry data[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(2): 51-56.
- [18] 倪锦园, 张建勋. 递归算法的应用与分析[J]. 现代信息技术, 2020, 4(20): 146-148.
- NI Jinyuan, ZHANG Jianxun. Application and analysis of recursive algorithm[J]. Modern Information Technology, 2020, 4(20): 146-148.
- [19] WANG Y, LI M, DAI H, et al. Deadlock avoidance algorithms for recursion-tree modeled requests in parallel executions[J]. IEEE Transactions on Computers, 2022, 71(9): 2073-2086.
- [20] TOOFANPOUR J, JAVANIA M, IMANY-NABIYYI R. Normal limit law for protected node profile of random recursive trees[J]. Theory of Probability & Its Applications, 2022, 67(3): 452-464.
- [21] HOSAM M. Profile of random exponential recursive trees[J]. Methodology & Computing in Applied Probability, 2022, 24(1): 259-275.
- [作者简介]
- 李 鑫 1986 年生, 博士, 工程师。
- 尹 全 1977 年生, 本科, 工程师。
- 王竞克 1983 年生, 硕士, 工程师。
- 谷鹏冲 1987 年生, 硕士, 工程师。
- (本文编辑: 傅 杰)