

钢丝绳的弹性变形对锁系机构运动同步性的影响分析

郑云青 柏合民 刘 志

(上海宇航系统工程研究所)

摘 要 分析空间对接机构钢丝绳的受力和变形量,建立钢丝绳的力学模型,明确钢丝绳最大拉力的影响因素,确定锁系机构运动的同步性与钢丝绳弹性变形的关系,提出降低钢丝绳拉力和变形量的控制方向。

关键词 钢丝绳 对接 同步性 对接锁

中图分类号 V414 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2009) 03-0059-06

1 引言

对接锁,是实现空间飞行器对接机构刚性密封连接的主要部件之一,各锁之间的运动和驱动力通过钢丝绳传递,形成锁系机构,其作用是为两飞行器提供锁紧力,保证两飞行器的刚性连接,并在对接任务完成后能够同步解锁^[1]。因此,钢丝绳的性能直接关系到飞行任务的可靠性与航天员的安全性。

本文建立了钢丝绳的力学模型,分析了影响钢丝绳预拉力和对接锁运动过程中钢丝绳拉力的因素以及由此产生的钢丝绳弹性变形对锁系机构运动同步性的影响。

2 锁系机构的工作原理简述

对接锁沿周向均布于对接框外侧,分为两组,每组有 6 把对接锁。在 6 把对接锁中,只有 1 把带有驱动装置(图 1 的 1 号对接锁),其它对接锁与对接锁之间,都通过对接锁上的绳轮带动钢丝绳,经定滑轮连接到另一把对接锁的绳轮上(图 2)。如钢丝绳 1,一头与 1 号对接锁的绳轮相连,另一头通过两个定滑轮后与 2 号对接锁的绳轮相连;钢丝绳 2 一头与 2 号对接锁的绳轮相连,另一头通过定滑轮后与 3 号对接锁的

绳轮相连;以此类推,最后形成一个封闭的绳系机构。

在对接时,驱动装置驱动 1 号对接锁运动,并通过钢丝绳同步驱动 2 号到 6 号对接锁;解锁分离时,驱动装置驱动 1 号对接锁反向运动,通过钢丝绳同步驱动 6 号到 2 号对接锁。钢丝绳的选用,受到锁系结构、钢丝绳强度的限制,在保证锁系机构功能正常的情况下,应尽量降低钢丝绳运动过程中受到的拉力。

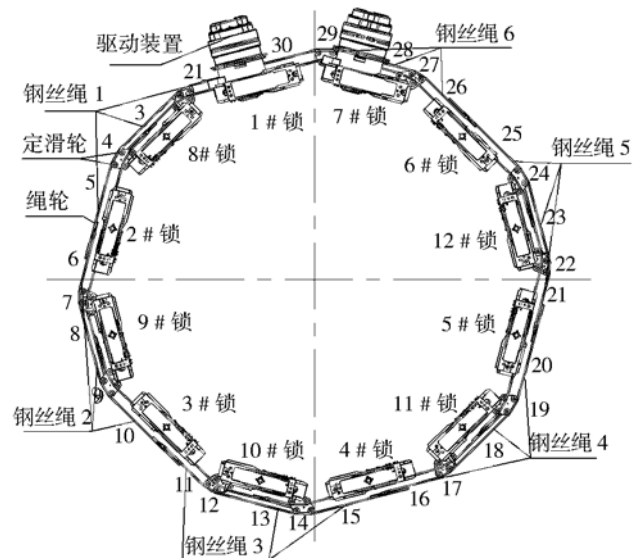


图 1 对接锁布局示意图

(图示 1~6# 锁为第一组对接锁 7~12# 锁为第二组对接锁)

来稿日期:2008-09-27

作者简介:郑云青(1973,12—),女,硕士,高级工程师,主要从事空间对接机构总装设计工作。

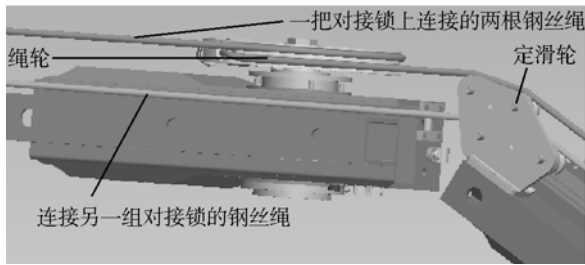


图 2 一把对接锁上的两根钢丝绳

由于同一组对接锁是通过一组钢丝绳驱动的, 钢丝绳的变形会直接影响锁系机构运动的同步性, 进而影响到两飞行器的分离角速度。因此, 必须对钢丝绳的受力和以及由此产生的弹性变形进行分析, 以保证锁系机构能够同步运动。

由于两组对接锁原理相同, 结构相近, 同一组对接锁正反向的工作原理相同, 本文仅以第一组对接锁对接时的状态进行分析说明。

3 受力分析

为了方便分析, 可将 6 根钢丝绳分为 30 段, 每根 5 段, 其中第 1 段和第 30 段都与 1 号对接锁相连, 其余各段之间或是通过定滑轮, 或是直接与对接锁的绳轮相连, 具体的分段号见图 1。

对于通过某一定滑轮的两段钢丝绳, 其受力见图 3。

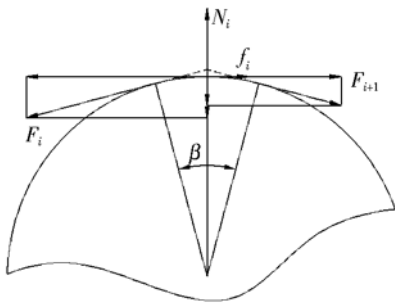


图 3 通过定滑轮的钢丝绳受力图

其受力关系为:

$$\left. \begin{aligned} F_i \cos(\beta/2) &= f_i + F_{i+1} \cos(\beta/2) \\ N_i &= F_i \sin(\beta/2) = F_{i+1} \sin(\beta/2) \\ f_i &= N_i \mu \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: F_{i+1} : 驱动钢丝绳的张力;

F_i : 被驱动钢丝绳的张力;

β : 两端钢丝绳作用在定滑轮上的压力角;

μ : 钢丝绳与定滑轮之间的摩擦系数 $\mu_i = \tan(\alpha_i)$,

α_i 为摩擦角。

因此, 对于所有的定滑轮两侧钢丝绳, 其受力关系为:

$$\left. \begin{aligned} F_{5i-4} &= F_{5i-3} \cos(\beta_{5i-3}/2 - \alpha_{5i-3}) / \cos(\beta_{5i-3}/2 - \alpha_{5i-3}) \\ F_{5i-3} &= F_{5i-2} \cos(\beta_{5i-2}/2 - \alpha_{5i-2}) / \cos(\beta_{5i-2}/2 - \alpha_{5i-2}) \\ F_{5i-2} &= F_{5i-1} \cos(\beta_{5i-1}/2 - \alpha_{5i-1}) / \cos(\beta_{5i-1}/2 - \alpha_{5i-1}) \\ F_{5i-1} &= F_{5i} \cos(\beta_{5i}/2 - \alpha_{5i}) / \cos(\beta_{5i}/2 - \alpha_{5i}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$;

对于连接在绳轮两端的钢丝绳, 其力的传递关系为:

$$(F_j - F_{j+1})R = M \quad (3)$$

式中: $j=1, 2, 3, 4, 5$

M 为驱动一把对接锁所需要的驱动力矩;

R 为对接锁的绳轮半径。

对于第 1 段和第 30 段, 其力的传递关系

$$(F_1 - F_{30})R + M = M_0 \quad (4)$$

式中: M_0 为驱动机构需要输出的驱动力矩。

锁系机构装调结束时, 各段钢丝绳的拉力都是一致的, 都为 F 。由于各段钢丝绳通过绳轮形成一个封闭的绳系结构, 在支撑结构保持不变的情况下, 钢丝绳的总长度是一定的, 即在有预紧力的情况下, 钢丝绳的总变形量是一定的。因此, 在钢丝绳运动过程中, 钢丝绳的总拉力是不变的, 即

$$\sum_{i=1}^{30} F = 30\bar{F} \quad (5)$$

4 钢丝绳的拉力计算分析

对公式 2~5 在 MATLAB 软件中进行编程, 通过设置不同的设计参数, 计算钢丝绳拉力的影响因素及其变化趋势。

4.1 钢丝绳预紧力的确定

为了保证钢丝绳对最后一把对接锁具有足够的驱动力, 最后一段钢丝绳不能松弛, 即 F_{30} 必须大于或等于零。当钢丝绳的预紧力最小时, F_{30} 应等于零。

通过 MATLAB 计算, 在单把锁所需的不同驱动力矩下, 钢丝绳的最小预紧力见图 4。

从图 4 可以看出, 钢丝绳的最小预紧力与单锁驱动力矩成正比。因此, 为了保证所有的对接锁都能被同步驱动, 钢丝绳装调时的预紧力, 应不小于驱动一把对接锁所需的最大驱动力矩对应的最小预紧力。

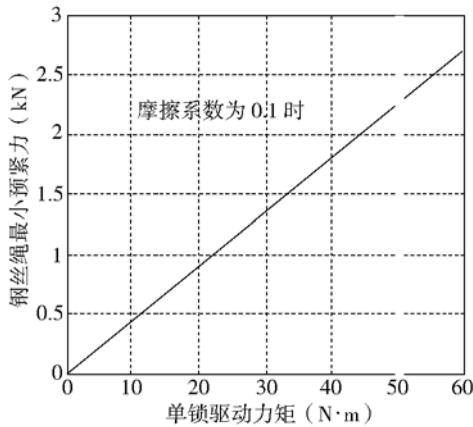


图 4 钢丝绳最小预紧力随单锁驱动力矩的变化

此外，摩擦系数对钢丝绳的最小预紧力也有一定的影响，且随着摩擦系数的增大，预紧力成幂指数增加(图 5)。因此，必须对定滑轮和钢丝绳之间采取润滑措施，以减小钢丝绳运动过程中的摩擦力，从而减小钢丝绳的预紧力。

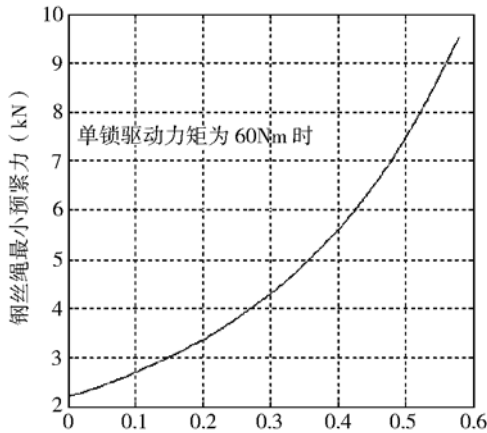


图 5 摩擦系数对钢丝绳最小预紧力的影响

由上述分析可知，钢丝绳的最小预紧力与对接锁运动时所需要的驱动力矩以及定滑轮与钢丝绳之间的摩擦系数有关。为了降低钢丝绳的预紧力，应尽量减小钢丝绳和定滑轮的摩擦，并优化对接锁的设计，降低对接锁运动所需的驱动力矩。

4.2 钢丝绳的拉力计算

为了降低钢丝绳的承载极限，必须了解钢丝绳工作过程中的最大载荷。

通过计算，钢丝绳的拉力与对接锁运动时所需要的驱动力矩的关系见图 6。在摩擦系数和预紧力一定的情况下，钢丝绳的最大拉力 F_1 随着单锁驱动力矩的增大而线性增大，而最小拉力 F_{30} 则随着单锁驱动力矩的增大而线性减小。

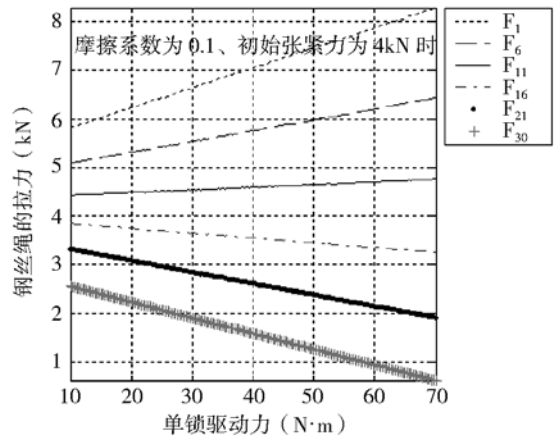


图 6 钢丝绳拉力随单锁驱动力矩的变化

(图中 F_i 为第 i 段钢丝绳的拉力, $i=1, 6, 11, 16, 21, 30$)

随着被驱动锁的数量逐渐减少，各段钢丝绳的拉力逐渐减小，衰减量随着被驱动锁的数量减少而线性递减(图 7)。该衰减量由两部分组成，其中大部分是用于驱动对接锁运动，是一定值，与单锁所需要的驱动力矩有关。

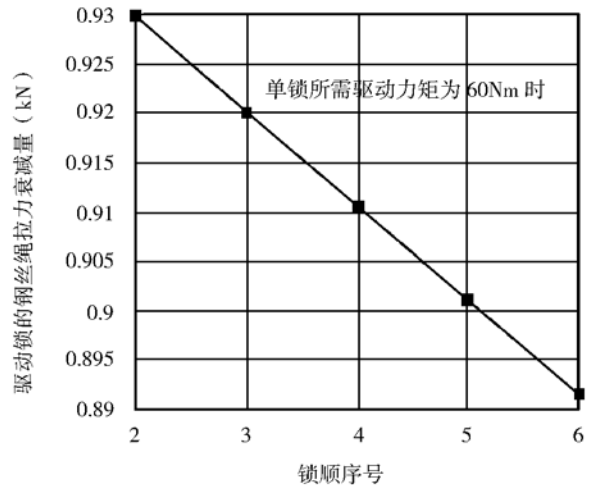


图 7 钢丝绳拉力的衰减量

另一部分是由于摩擦导致。在驱动一把对接锁所需的驱动力矩和钢丝绳的初始预紧力一定时，随着钢丝绳与定滑轮之间摩擦系数的增大，钢丝绳的最大拉力 F_1 呈近似线性增加，而最小拉力 F_{30} 则呈近似线性减小(图 8)。随着被驱动锁数量的减少，摩擦力导致的钢丝绳拉力衰减量逐渐减小。这是由于钢丝绳在运动过程中的拉力逐渐减小，对定滑轮的正压力减小，从而摩擦力也逐渐减小。

图 9 为摩擦系数为 0.2、单锁驱动力矩为 $50 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时，钢丝绳通过四个定滑轮后张力的衰减量。

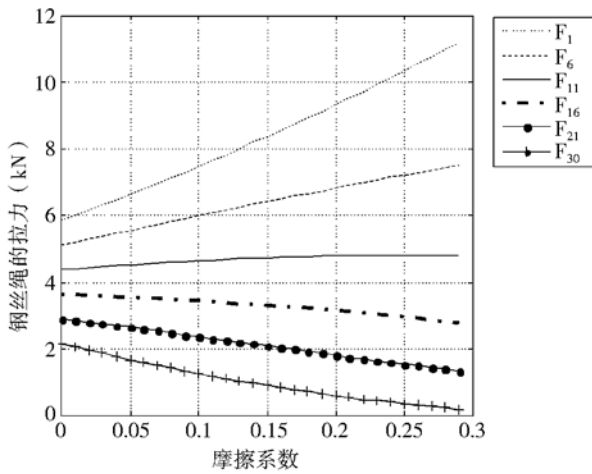


图 8 摩擦系数对拉力的影响

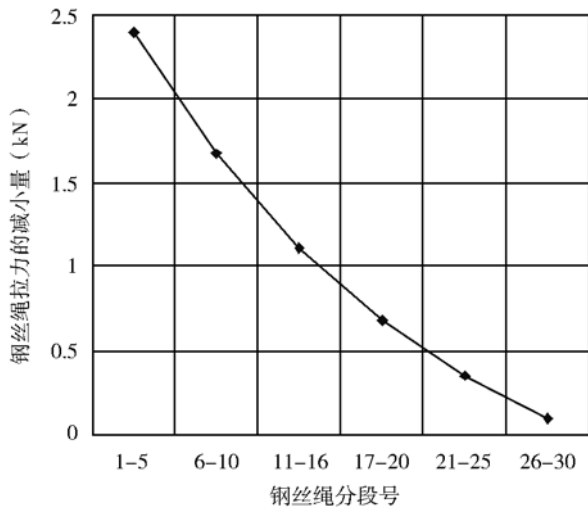


图 9 摩擦力产生的拉力减小量

此外，钢丝绳的拉力随着预紧力的增大而线性增大(图 10)。因此，必须使钢丝绳的预紧力在一个合理的范围内，以保证既能驱动所有的对接锁工作，又使钢丝绳的最大拉力最小。

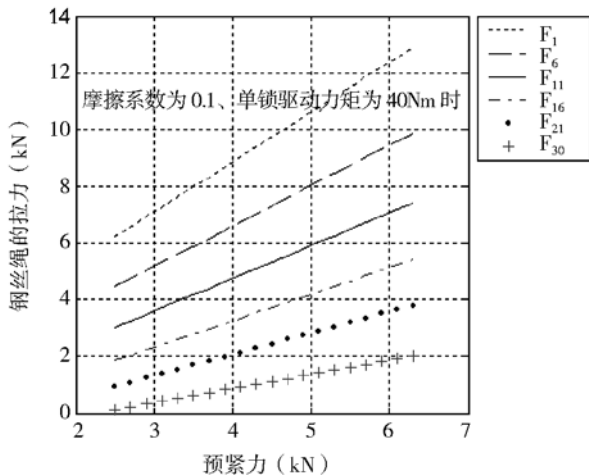


图 10 预紧力对钢丝绳拉力的影响

由上述分析可知，为了降低钢丝绳的最大拉力，应尽量减小钢丝绳和定滑轮的摩擦，降低对接锁运动所需的驱动力矩和钢丝绳的拉力。

5 钢丝绳的变形对运动同步性的影响

5.1 钢丝绳的变形与运动同步性的关系

在对接锁运动过程中，钢丝绳的弹性变形使得各对接锁之间的运动存在一定的不同步。在对接锁和定滑轮布局一定的情况下，6 根钢丝绳的初始长度 L_0 是相同的。通过钢丝绳的拉伸试验可知，钢丝绳的伸长量是与钢丝绳的拉力以及钢丝绳的总长度成正比，即

$$\Delta L = L \cdot F \cdot k \quad (6)$$

式中： k 为钢丝绳的弹性变形系数，单位为 mm/kg/mm 。

在预紧力作用下，6 根钢丝绳伸长量 $\Delta \bar{L} = L_0 \cdot \bar{F} \cdot k$ 是相同的。在有拉力 F_i 作用时，钢丝绳的伸长量为

$$\Delta L_i = L_0 \cdot F_i \cdot k \quad (i=1\sim 6) \quad (7)$$

相邻两锁之间的钢丝绳长度变化量为

$$\Delta LL_i = \frac{\Delta L_i - \Delta L}{R} \quad (i=1\sim 6) \quad (8)$$

若 $\Delta LL_i > 0$ ，说明钢丝绳连接的前一把对接锁比后一把运动快。反之，则说明前一把对接锁比后一把运动慢。

5.2 钢丝绳拉力对运动同步性的影响

从公式 6~8 可以看出， ΔLL_i 与钢丝绳的拉力以及钢丝绳的弹性变形系数有关。由于各段钢丝绳的拉力随着对接锁所需的驱动力矩成线性变化，因此计算了 ΔLL_i 随对接锁驱动力矩的变化趋势(图 11)。

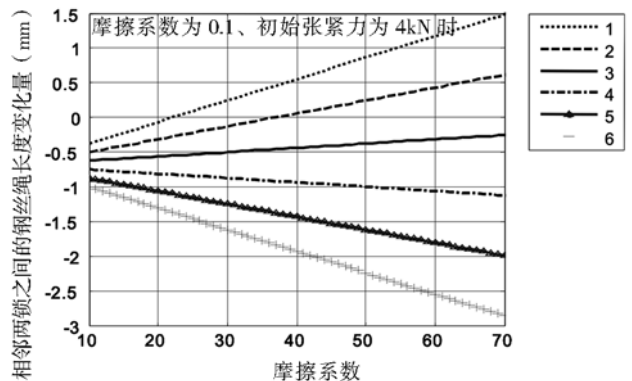


图 11 钢丝绳的长度变化量与单锁驱动力矩的关系

图 11 中,1~6 分别为图 1 所示的 6 根钢丝绳的编号。4、5、6 号三根钢丝绳的长度变化量为负值,是由于在钢丝绳力传递过程中,这三根钢丝绳所受到的力相对于预紧力减小了,因而其变形量也相对于初始状态减小了。

由图 11 可知,锁系机构运动过程中,各对接锁之间的运动先后顺序为:

- 1 号锁>2 号锁>3 号锁>4 号锁
- 1 号锁>6 号锁>5 号锁>4 号锁

因此,4 号对接锁的运动最慢,1 号对接锁运动

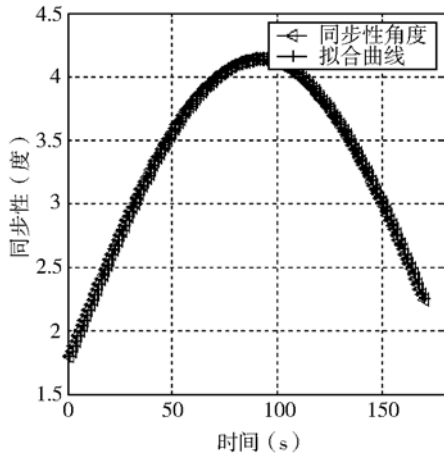


图 12 同步性与运动时间的关系

最快,与测试结果一致,对接锁之间的同步性是由 1、4 号对接锁之间运动的角度差决定的,即

$$\theta = (\Delta LL_1 + \Delta LL_2 + \Delta LL_3) / R \quad (8)$$

若对接锁的结构、定滑轮的结构和材料以及钢丝绳的结构、材料、预紧力等都已确定,对接锁运动时所需的驱动力矩按照正弦曲线随时间变化,则锁系机构运动的同步性随时间的变化见图 12。

图 13 计算了锁系机构运动的同步性与单锁所需的驱动力矩的关系。

从图 13 可以看出,锁系机构运动的同步性与对

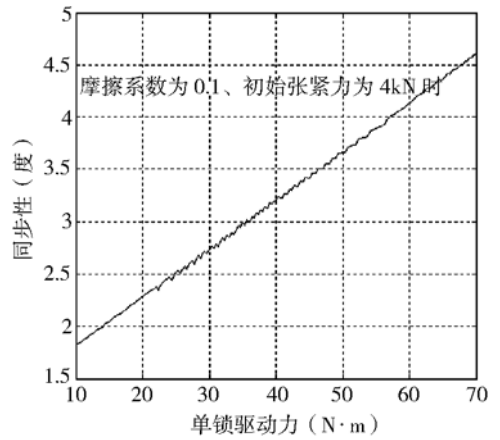


图 13 同步性与单锁驱动力矩的关系

5.3 钢丝绳弹性变形系数对运动同步性的影响

接锁单锁运动时所需的驱动力矩成正比。从公式 8 可以看出,锁系机构运动同步性与钢丝绳的拉力成正比。随着钢丝绳拉力的增大,钢丝绳的弹性变形对接锁系机构运动的同步性的影响也逐渐增大。

钢丝绳的变形量与其弹性变形系数有关。图 14 表明,锁系机构运动的同步性与钢丝绳的弹性变形系数成正比。由上分析计算可知,为了保证锁系机构运动的同步性,在保证锁系机构完成锁紧和解锁功能的情况下,应尽量降低钢丝绳的拉力和钢丝绳的弹性变形系数。

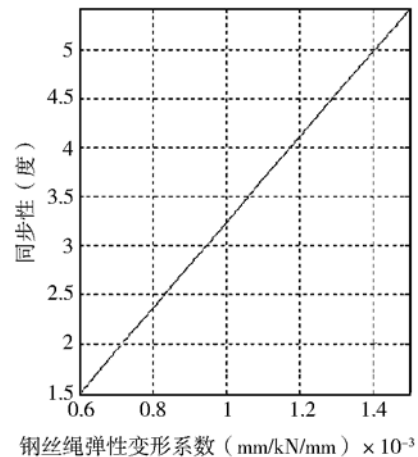


图 14 同步性与钢丝绳弹性变形系数的关系

6 结论

弹性变形的关系,提出了降低钢丝绳拉力和变形量的控制方向。◇

本文对钢丝绳的受力和变形量进行了分析,建立了钢丝绳的力学模型,明确了钢丝绳最大拉力的影响因素,确定了锁系机构运动的同步性与钢丝绳

◇

参 考 文 献

[1] 空间对接机构. 航空工业出版社. 1992

Synchronous Analysis of the Wire Cable Flexibility Transformation Between the Structure Latches

ZHENG Yunqing BAI Hemin LIU Zhi

(Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201108, China)

Abstract: This paper analyses the wire cable force and the cable flexibility transformation. Through establishing the mechanics model of the wire cable, influence factor related with maximal force of wire cable is confirmed, the relation between the synchronization of the structure latches and the wire cable flexibility is found, and the control direction to lower the wire cable force and transformation is put forward.

Key words: wire cable, docking, synchronization, structure latch

飞船伴随卫星实现绕飞需要的条件

伴星在航天领域是指伴随某个航天器飞行的卫星,通常用于对伴飞目标进行观察、干扰或合作完成某种任务。伴随飞行的相对轨迹,根据伴星和伴飞目标初始相对运动状态的不同而千差万别,绕飞是其中很有意思的一种。

大家知道,月球围绕地球飞行,是地月间的万有引力使然。而伴星和伴飞目标的质量很小,二者之间的万有引力微乎其微,那么,伴飞目标凭什么让伴星绕着自己飞行呢?

其实,这种绕飞只是相对运动造成的视觉效果,就像我们坐在汽车里看别的汽车忽前忽后、忽左忽右一样。现在,假如我们坐在沿圆轨道飞行的飞船里,如何才能让伴星看起来是绕着我们飞行的呢?

首要条件是要保证伴星和飞船的轨道周期相同。轨道周期表征了航天器绕地球飞行的快慢,相当于汽车行驶速度的概念。轨道周期越短,飞行越快,反之越慢。实现绕飞时伴星和飞船形影不离,因此必然要具有相同的“行驶速度”。

仅仅周期相同还不够。假如一个在前,一个在后,那么后面的永远追不上前面的,就像一前一后、时速相同的两辆汽车总也不能并排行驶一样。因此实现绕飞还需要伴星和飞船之间的距离足够近。

现在,假设伴星和飞船足够近,轨道周期也相同,那么是不是就能实现绕飞了呢?还不是。如果伴星和飞船轨道完全相同,那么它们的前后和上下相对距离是不变的,也形不成绕飞,因此实现绕飞还需要伴星和飞船轨道的偏心率或近地点幅角不同。

对于在同一个轨道面上飞行的伴星和飞船,形成绕飞必须满足上述三个条件,当然,要形成大小、形状等满足要求的绕飞轨道,还需要精心设计变轨控制参数。

(摘自即将出版的《中国载人航天科普丛书》)