

# 基于仿真的正交试验在对接机构设计中的应用

汤树人 肖 杰 赵金才

(上海宇航系统工程研究所)

**摘 要** 丝杠联系组合作为空间对接机构传动缓冲的重要部件,其万向节摆角范围直接影响对接环的推出、拉回和对接缓冲作用。基于仿真模型,采用交互作用下的正交试验设计,量化分析显著影响万向节摆角范围的主要因素,为空间对接机构优化设计提供指导依据,解决对接环拉回干涉问题。

**关键词** 对接机构 仿真 正交试验

**中图分类号** V526 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2009) 03-0019-04

## 1 引 言

空间对接机构是实现两个飞行器空间对接的关键产品。丝杠联系组合作为空间对接机构中传动缓冲链的重要组成部分,结构上起着联系捕获锁、对接环、丝杠等部件的作用,在对接环推出拉紧过程中,传递运动和动力;在缓冲过程中,消耗碰撞能量,同时贮藏部分能量,而后释放以校正对接环姿态<sup>[1]</sup>。丝杠联系组合通过圆周上布置的 6 个万向节与丝杠安装组合实现连接。因此,万向节作为承上启下的活动构件,其摆角范围直接影响着对接环的偏摆性能。

在此前研制过程中,出现对接环难以从极限位置拉回到初始位置的现象,即处于如图 1 所示的不

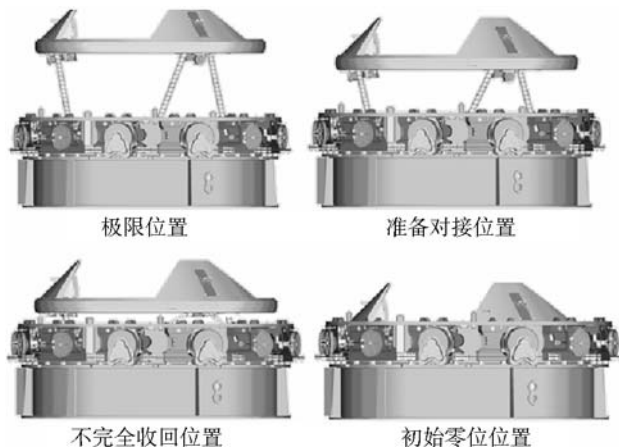


图 1 空间对接机构各位置模型

完全收回位置,将使得产品在后续试验、使用时,两飞行器之间不能实现刚性连接、形成密封通道。

检查对接机构传动链,确认为丝杠联系组合万向节部位发生干涉所致。本文针对这一工程问题,由对接机构空间布局入手,进行万向节摆角需求分析,揭示导致该问题的主要原因。之后着重基于 Pro/E 仿真模型,利用考虑交互作用的正交试验设计,量化分析影响万向节摆角范围的各因素,从而为机构优化设计提供指导依据,以解决对接环拉回干涉问题。

## 2 万向节摆角需求计算

### 2.1 空间布局简化模型

为进行万向节摆角需求计算,解决对接环收回运动干涉问题,将现实的上下支点、分布平面和运动轨迹做对接机构空间布局如图 2 所示。

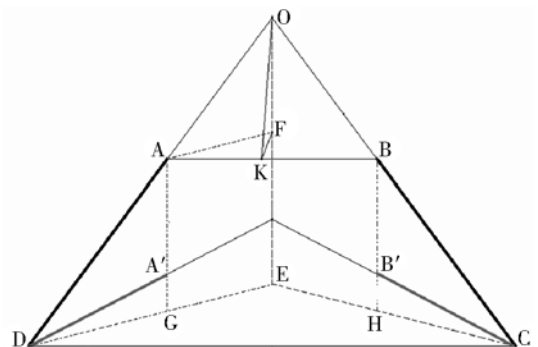


图 2 对接机构空间布局图

来稿日期:2008-10-08

作者简介:汤树人(1981,05—)男,硕士,工程师,主要从事空间对接机构优化设计研究。

图 2 中 A、B 表示在准备对接位置时的上支点位置；A'、B' 表示在初始零位位置时的上支点位置；上支点在 下支点所构成平面上的投影分别为 G、H；C、D 表示一对下支点，直线 DG、CH 相交于 E 点；直线 DA、CB 交于点 O，取 K 为 AB 中点，上支点分布平面与 OE 交于 F 点。

定义：

锥角：万向节轴线 AO 与轴线 OK 夹角  $\angle AOK$ ；

背倾角：平面 ABCD 与平面 ABGH 的夹角，此两平面夹角等同于  $\angle KOF$ ；

万向节摆角：万向节从初始对接位置到完全收回位置所摆过角度，即图中所示  $\angle ADA'$ 。

### 2.2 参数计算结果

按照以上立体几何模型，依据现有上下支点分布位置、准备对接位置以及初始零位位置等对接机构参数计算，将所得计算结果列表如下。

表 1 对接机构参数计算列表

	准备对接位置	初始零位位置
锥角 $\angle AOK$	24.804°	46.685°
背倾角 $\angle KOF$	11.364°	30.939°
万向节摆角 $\angle ADG$	66.750°	36.634°
万向节绝对摆角 $\Delta\alpha$	30.116°	

对比以上参数可以发现，目前万向节摆角范围在最小部位仅为 26°，比理论计算所需的万向节绝对摆角  $\Delta\alpha$  小 4.116°。

此外考虑锥角和背倾角设计时舍进整引入的误差，则要求万向节在全周向上具有不小于 32° 的偏摆性能。因此，将万向节摆角范围由 26° 提高到 32°，成为丝杠联系组合机构优化设计所必须攻克的难题。

### 3 基于仿真的正交试验概述

结合现代计算机软/硬件的发展，改变正交试验普遍采用实物试验的传统思维，对相关指标、因素进行转换后，应用正交试验的方法去分析导致万向节摆角范围小的影响因素，首先做基于仿真的正交试验工作流程如下图 3 所示。

随后针对所要解决的问题，开展以下工作：

#### (1) 正交试验因数查找确认

将影响万向节摆角范围的因素分为以下几种：A 表示万向节所处的外围齿轮内腔结构形式，B 表示万向节轴头结构形式，C 表示万向节外端口结构形式；以及为了更深入分析各因素对万向节摆角范围的潜在影响，综合考虑各因素两两之间的交互作用 AXB、AXC 和 BXC，并将此作为影响万向节摆角范围的新因素。

#### (2) 正交试验各因素两种水平设计

对于以上因素，为量化考核各种因素对指标的影响显著程度，分别设定两种水平状态，默认水平 1 均表示方案产品初始设计状态，水平 2 均表示改进设计的设想状态。在此举例 A 因素的两种水平仿真模型如图 4 所示。

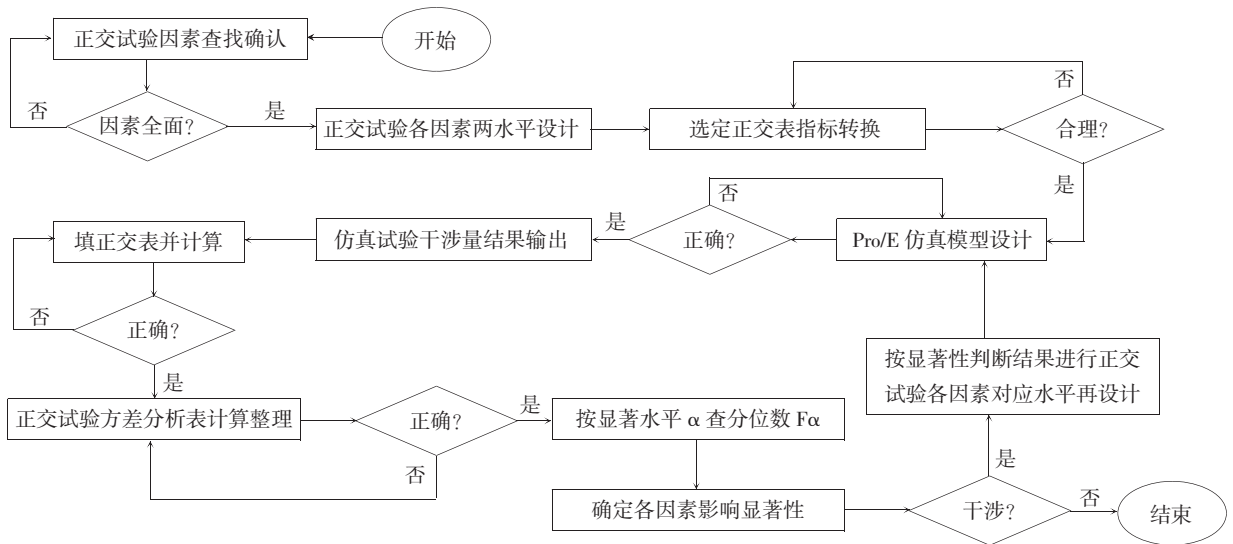


图 3 基于仿真的正交试验流程图

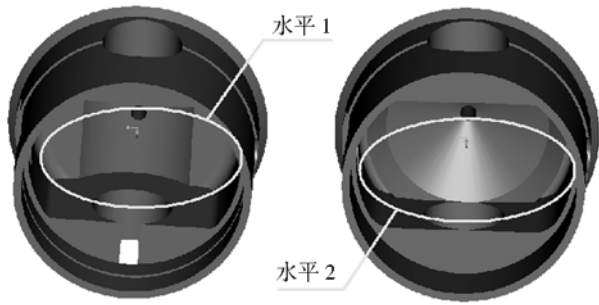


图 4 A 因素两水平模型示意图

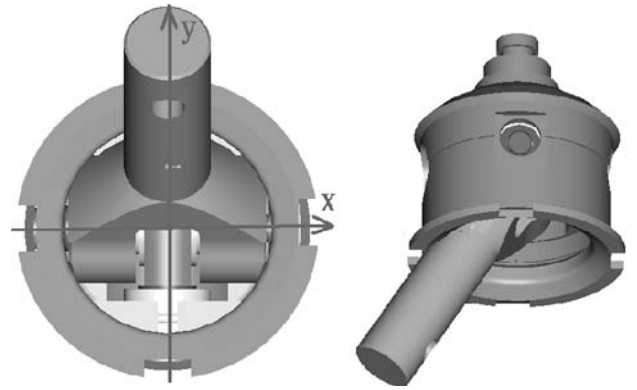


图 5 指标检测视图

图 6 仿真模型

(3) 选定正交表

为实现上文所述因素水平的试验设计,采用 L8

(2<sup>7</sup>)正交表;

(4) 指标转换

现实指标是检测万向节是否能够达到 32°偏摆角。由于仿真分析要实现偏摆角度自动定量检测困难,但容易实现干涉量的定量检测;同时考虑万向节所处外围齿轮内腔结构形式在图 5 所示 x、y 轴线两个方向上的差异,故将摆角指标转换为:万向节处于 x、y 轴线正向位置偏摆 32°时,产生的总干涉量。

(5) 仿真设计及试验干涉结果输出

运用 Pro/E 软件建立外围齿轮及万向节部位的实体仿真模型,使其处于如图 6 所示的待检测干涉量的摆角角度并输出此次干涉量检测值。

(6) 正交试验数理统计

在得到干涉量检测值后,再运用正交试验的步骤流程,分析各因素对所要求指标的影响显著性;最后按照影响显著程度,抓住主要影响因素,进行如图 3 所示的迭代改进设计。

4 正交试验数理统计分析

4.1 正交试验数理统计

按照正交试验表对应的因素和水平随机进行 8 次试验之后,通过 Pro/E 模型检测获得 x、y 轴向总干涉量填表,并进行后续数理统计计算如表 2 所示。

由表 2 数值计算总离差平方和:

表 2 正交试验数理统计列表

实验号	A	B	AXB	C	AXC	BXC	试验干涉量	平方
1	1	1	1	1	1	1	414.10 mm <sup>3</sup>	171478.81
2	1	1	1	2	2	2	262.36 mm <sup>3</sup>	68832.77
3	1	2	2	1	1	2	341.39 mm <sup>3</sup>	116547.13
4	1	2	2	2	2	1	189.68 mm <sup>3</sup>	35978.50
5	2	1	2	1	2	1	188.54 mm <sup>3</sup>	35547.33
6	2	1	2	2	1	2	36.83 mm <sup>3</sup>	1356.45
7	2	2	1	1	2	2	151.70 mm <sup>3</sup>	23012.89
8	2	2	1	2	1	1	1.96 mm <sup>3</sup>	3.84
水平 1 干涉量 总和 K <sub>1</sub>	1207.53	901.83	830.12	1095.73	794.28	794.28	历次试验干涉 量总和 K= 1586.56 mm <sup>3</sup>	历次试验干涉 量平方和 W= 452757.72
水平 2 干涉量 总和 K <sub>2</sub>	379.03	684.73	756.44	490.83	792.28	792.28		
$U = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^l (K_i)^2$	400448.11	320538.13	315325.17	360384.58	314647.08	314647.08	P=1/8 · K <sup>2</sup> =314646.58	
误差 Q	85801.53	5891.55	678.59	45738.0	0.5	0.5		

$$Q_T = W - P = 138111.14$$

误差:

$$Q = Q_T - Q_A - Q_B - Q_C - Q_{AB} - Q_{AC} - Q_{BC} = 0.47$$

由于因素 AXC 和 BXC 计算离差平方和仅为 0.5,接近计算误差值 0.47,故可以认为因素 AXC 和 BXC 对指标几乎没有影响,因此将其归结为误差级别,并进行方差分析如表 3 所示。

表 3 正交试验方差分析表

来源	离差 Q	自由度	均方离差	F 值
A	85801.53	1	85801.53	175105.2
C	45738.00	1	45738.00	93342.9
B	5891.55	1	5891.55	12023.6
AXB	678.59	1	678.59	1384.9
误差	1.47	3	0.49	
总和	138111.14	7		

给定显著水平  $\alpha=0.005$ ;

查 F 分布上侧分位数表得

$$F_{0.005}(1, 3) = 55.55;$$

对照表 3 数值,显然

$$F_A > F_C > F_B > F_{AB} > F_{0.005}(1, 3) = 55.55;$$

由此可知 A、B、C、AXB 对摆角范围的影响显著。

#### 4.2 正交试验结果分析

通过正交试验,可以看出各因素对指标的影响显著程度由高到低排列为 A, C, B, AXB,即外围齿轮

内腔结构形式对万向节摆角范围的影响最大,之后是万向节外端轴径、端盖的结构形式,再之后是万向节轴头的结构形式。此外,外围齿轮内腔与万向节轴头的结构形式所产生的交互作用,对万向节摆角范围也具有显著影响。

依据以上量化分析结果,首先从优化外围齿轮内腔结构和万向节外端轴径、端盖的结构形式提高万向节摆角范围;达到一定的程度后,综合考虑万向节轴头和交互作用的影响。依据以上方法,经若干轮调优试验后,最终使得万向节的摆角范围达到了  $35^\circ$ ,超过了初始的设计目标。

### 5 结 论

文章基于 Pro/E 仿真模型,应用考虑交互作用的正交试验设计,开拓了正交试验方法的应用领域。并在实际研制工作中验证了分析结论的正确性。

经轮调优试验,万向节摆角范围最小部位增加到  $35^\circ$ ,增幅近 35%,满足了上级指标要求;并经产品验证,解决了空间对接机构对接环拉回干涉问题。◇

#### 参 考 文 献

[1] 娄汉文,曲广吉,刘济生. 空间对接机构[M].北京:航空工业出版社,1992,52-156[LOU Han-wen, QU Guang-ji, LIU Ji-sheng. Space Docking Mechanism. Bei Jing: Aviation Industry Publishing Company, 1992, 52-156(in Chinese).]

[2] 汪荣鑫.数理统计.西安:西安交通大学出版社,2003

[3] 徐龙详,欧阳祖行.机械设计[M].航空工业出版社,1999

## The application of Taguchi method based on Simulation in the design of Docking mechanism

TANG Shuren XIAO Jie ZHAO Jincai  
(Aerospace System Engineering Shanghai)

**Abstract:** This paper used Taguchi method to arrange emulate experimentation in reason, optimize it on the base of analyzing notability of each factor, and solve the problem of docking ring pullback interference.

**Key words:** docking mechanism, simulation, Taguchi Method