

# 一种大型转运车的同轴度检测方案

邢广强 王国星 徐云甫 霍珍一 韩 翠 郭迎雪 王炳龙

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)



**摘要:** 舱体转运车是大型空间站舱体转运装置的重要部件, 它的位置精度直接影响了空间站舱体中各舱段的协调能力。本文从转运车的结构分析入手, 分析了大型转运车同轴度检测过程中存在的问题, 并指出了检测难点。针对检测难点, 提出了一种采用标尺和经纬仪配合测量的检测方法。该方法先确定大型架车水平方向和垂直方向基准尺寸, 再计算得出同轴度。试验结果表明本文提出的方法检测精度高于 0.05mm, 满足转运车实际使用要求, 对提高大型舱体转运的生产效率检测质量具有重要意义。

**关键词:** 大型转运车; 同轴度; 经纬仪

## A Coaxiality Detection Scheme for Large Transfer Vehicle

Xing Guangqiang Wang Guoxing Xu Yunfu Huo Zhenyi Han Cui Guo Yingxue Wang Binglong

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

**Abstract:** The large transfer vehicle is an important component of the cabin transfer device of a large space station, and its position accuracy directly affects the coordination ability of each cabin in the space station cabin. This article starts with the structural analysis of the transfer vehicle, analyzes the problems in the coaxiality detection process of the large transfer vehicle, and points out the detection difficulties. Aiming at the difficulty of detection, this paper proposes a detection method that uses a ruler and theodolite to measure together. This method first determines the horizontal and vertical reference dimensions of the large-scale frame, and then calculates the coaxiality. The test results show that the detection accuracy of the method proposed in this paper is higher than 0.05mm, which meets the actual use requirements of transfer vehicles, and is of great significance for improving the production efficiency of large-scale cabin transfer.

**Key words:** large transfer vehicle; coaxiality; theodolite

### 1 引言

中国空间站由一个核心舱和两个实验舱组成, 每个舱体都重达 20t 以上, 且各个舱体都是由不同的柱段或球段对接而成。舱体径向尺寸 4m, 轴向尺寸 20m, 如此结构复杂的核心舱在研制过程中需要经历各种试验, 整个试验过程都需要采用大型转运车转运和停放。

大型空间站舱体转运车全长大约 20m, 由整器转运车和热控小舱转运车两部分组成。其中整器转运车全长约 16.3m, 由两个 4800 型架车和一个 4280 型架车通过级联而成。小舱转运车与整器转运车一起使用时

小舱转运车的托架圆弧与整器转运车托架上的圆弧需要同轴, 整套架车同轴度要求为  $\Phi 1\text{mm}$ , 以保证空间站舱体在轴向和径向方向都能避免有应力, 以防舱体受损, 且结构稳定, 实现停靠及转运等功能。

首先结合中国空间站大型舱体转运车特点分析了其检测难点, 提出了转运车测量的必要性; 然后对比较分析了两种转运车的测量实现方案的优缺点, 指出这两种方法均无法适用于高效率高精度测量的要求; 随后提出一种新的同轴度检测方法, 目的在于在精度满足测量要求的前提下提高测量效率, 结合实际产品指标给出了实测数据, 测量结果表明利用该检测方法能

够达到理想的效果。

## 2 方案设计

### 2.1 测量需求

实现大型转运车转运功能且保护好舱体最重要的指标即为转运车各级联段的同轴度。图1所示为多级级联的整器转运车结构示意图,同轴度直接决定了转运车的质量<sup>[1]</sup>。

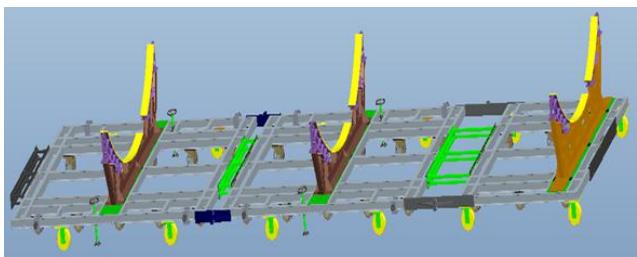


图1 多级级联整器转运车结构示意图

在实际测量中,完成大型转运车的同轴度检测存在以下难点:

a. 转运车的长度达到16.3m,测量范围较大,是典型的大尺寸大范围检测;

b. 同轴度公差要求 $\Phi 1\text{mm}$ ,反推测量系统在20m的测量范围内测量精度优于 $1 \times (\frac{1}{2}) \times (\frac{1}{3}) \approx 0.17\text{mm}$ ,测量精度要求较高。

c. 转运车尺寸大、结构复杂,测量点位较多并且遮挡严重;

d. 因为产品尺寸大,测量效率低,且需要多人配合高空作业,存在较大的安全隐患。因此需要一种高精度高效率且安全性较高的测量方法。

### 2.2 常规大型舱体转运车测量方法分析

#### 2.2.1 常用量具测量技术

传统采用卷尺和拉直线对大尺寸件同轴度进行检测。这种检测方式的前提是转运车放置的平台的平面度在允许的公差内,首先在转运车的托架圆周上从圆周的起始位置到终止位置均分圆周标记出需要测量的点位,多级架车要求标记的位置一致。采用卷尺依次测量架车上的标记点到放置平台的垂直距离,以一台架车为基准,计算另外架车相应位置与基准架车的垂直差值,计算出多个标记点的平均值,此值即为架车的垂直方向的调整量。将各级架车初步级联后,标记出托架的圆弧中心点,用一根直线拉线测量各个架车相对于直线的水平方向偏移距离,调整后保证各级架

车水平方向的偏差小于0.5mm。此方法存在以下问题:

#### a. 测量效率低

人工测量需要多人配合做测量点位标记,多人配合依次测量,并且测量时都需要升降车,单级架车测量时间超过1h,整个转运车测量需要4h以上。

#### b. 测量精度低

此方案的前提是假设转运车放置的平台的平面度优,由上述分析可得要求平面度优于0.1mm,实际厂房中地面较难达到此精度。卷尺的最小刻度为1mm,精确读数比较困难。此方法也无法确立全局坐标系,不能准确定位各级架车各方向的偏差。

综上,传统卷尺测量方式不适用于大型转运车同轴度测量。

#### 2.2.2 激光跟踪仪测量技术

激光跟踪仪在20m范围内测量精度为0.11mm,是大尺寸测量很好的选择。首先定义测量坐标系,标记架车的圆周上测量点,以中间托架为基准托架,在每一托架圆弧相同位置取6个测量点,通过激光跟踪仪测量各点,模拟计算出各个托架的圆心位置,依次测量各个测量点,调整架车使其水平和垂直方向都在公差范围内<sup>[2]</sup>。此方案存在以下问题:

#### a. 测量误差放大

三个支架的圆弧采点范围较小,属于较典型“大圆小圆弧”问题,拟合圆计算中存在较明显的测量误差放大,可能导致测量精度不符合要求。

#### b. 调整难度增加

反馈数据为三个圆弧的圆心点相对偏移关系,与产品调整环节不对应,导致三个支架位姿调节“答非所问”的问题,增加了调整难度。

#### c. 调整项指导不全

对圆弧的测量无法得到三个支架的俯仰、扭摆和滚动姿态数据,对位姿调整没有指导作用。

综上,激光跟踪仪测量技术不适用于大型转运车同轴度测量。

### 2.3 一种新颖的大型舱体转运车同轴度测量技术

#### 2.3.1 方案介绍

本文提出的方案是利用经纬仪对转运车进行分解测量,再对测量结果综合计算,得到转运车的同轴度。在组合加工转运车圆弧段时,整体架车以圆弧中心为基准在各自侧面以及平行于圆弧直径的水平端面铣削一处辅助基准面。依次测量时可将架车圆弧段替换为圆弧段侧面和辅助基准面;锁定经纬仪为90°俯仰角,并调节扭摆角标尺辅助测量左右侧面基准面,调整架

车的水平偏差到公差内；同理，经纬仪为0°扭摆角，并调节俯仰角标尺辅助测量水平基准面，调整架车的垂直偏差到公差内；同轴度值为三个架车水平偏差和垂直偏差的综合。图2所示为经纬仪与标尺结合测量辅助基准面示意图<sup>[3]</sup>。

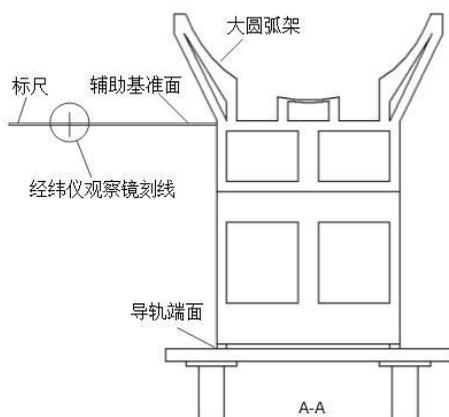


图2 经纬仪与标尺结合测量辅助基准面示意图

本方案具有以下优点：

a. 测量效率提升

测量仪器由卷尺或者激光跟踪仪更换为经纬仪，在调整过程中能实时反馈数据，提高检测、装调两个环节的互动效率。并简化了计算过程，用加减法代替拟合计算，实现调节数据实时反馈。

b. 避免误差放大

利用产品整体机加的特性，每个架车增加三处辅助基准面，实现对架车位姿更高效更直接的测量，避免测量小圆弧导致的误差放大。

c. 优化调测流程

先测量B支架的姿态，以B支架为目标，调测A、C支架位姿，极大地降低了调节复杂性。将检测目标设定为使水平方向和铅垂方向实际偏差都小于0.2mm，以兼顾经纬仪精度水平和设计公差要求。

2.3.2 检测过程

2.3.2.1 检测前期准备

在转运车测量区域架设一台经纬仪，要求经纬仪可无遮挡地测量圆弧架侧面辅助基准面和上表面六处机加基准面；选择导轨侧面距离较远的两个点位，反复将标尺水平靠在两点，使用经纬仪测量标尺上刻度对应的扭摆角角度，最终找到标尺某刻度在两个点位的扭摆角相同；将经纬仪当前扭摆角置0°，得到导轨垂直基准面。

2.3.2.2 实施步骤

a. 在转运车前方架起一个经纬仪后调平，见图3，架设要求见上述检测前准备；

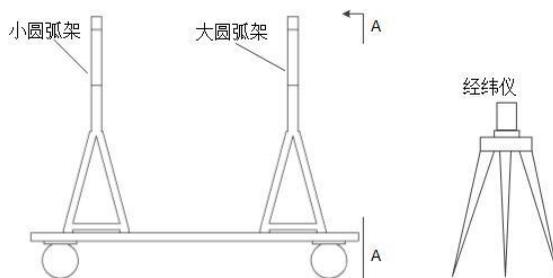


图3 经纬仪摆放位置示意图

b. 在标尺辅助下，经纬仪锁定90°俯仰角并调节扭摆角，测量B支架两个圆弧辅助基准面刻度 $Y_{B左}$ 、 $Y_{B右}$ ；

c. 在经纬仪实时读数反馈指导下，调整B支架滚动姿态，使 $|Y_{B左} - Y_{B右}| \leq 0.2\text{mm}$ ；

d. 在标尺辅助下，经纬仪锁定0°扭摆角并调节俯仰角，读取标尺在测量三个支架水平方向辅助基准面刻度 $X_A$ 、 $X_B$ 、 $X_C$ ；

e. 在标尺辅助下，经纬仪锁定90°俯仰角并调节扭摆角，读取标尺在测量六个圆弧辅助基准面刻度 $Y_{A左}$ 、 $Y_{B左}$ 、 $Y_{C左}$ 、 $Y_{A右}$ 、 $Y_{B右}$ 、 $Y_{C右}$ ；

f. 在经纬仪实时读数反馈指导下，调整A、C支架水平位置和滚动姿态，使 $Y_{A左} - \frac{Y_{B左} + Y_{B右}}{2} \leq 0.2\text{mm}$ 、

$$Y_{A右} - \frac{Y_{A左} + Y_{A右}}{2} \leq 0.2\text{mm}、Y_{C左} - \frac{Y_{B左} + Y_{B右}}{2} \leq 0.2\text{mm}、$$

$$Y_{C右} - \frac{Y_{C左} + Y_{C右}}{2} \leq 0.2\text{mm}、|X_A - X_B| \times \frac{H_A}{L_B} \leq 0.2\text{mm}、$$

$$|X_C - X_B| \times \frac{H_C}{L_C} \leq 0.2\text{mm}；$$

g. 给出最终同轴度 $\phi = 2 \times \sqrt{\Delta X_{MAX}^2 + \Delta Y_{MAX}^2}$ 。

其中， $L_A$ ——A支架两个圆弧辅助基准面水平方向距离； $H_A$ ——A支架水平方向辅助基准面与圆心的垂直方向距离； $L_C$ ——C支架两个圆弧辅助基准面水平方向间距； $H_C$ ——C支架水平方向辅助基准面与圆心的垂直方向距离； $\Delta Y_{MAX}$ ——六个圆弧辅助基准面刻度中与 $\frac{Y_{B左} + Y_{B右}}{2}$ 差值绝对值的最大值。

2.3.2.3 检测结果验证

a. 卷尺测量

以中间托架为基准托架，在每一托架圆弧相同位置取6个测量点，通过卷尺测量各点与基准点的差值，测量值为：

垂直方向：A 支架：1.2mm, 1.5mm, 1.1mm, 1.8mm, 2.1mm, 1.4mm，平均值为：1.517mm；B 支架：0mm, 0mm, 0mm, 0mm, 0mm, 0mm；C 支架：0.8mm, 1.3mm, 1.0mm, 1.6mm, 1.2mm, 1.7mm，平均值为：1.267mm。

水平方向：2.1mm, 1.7mm, 1.2mm, 2.5mm, 1.9mm, 1.4mm，平均值为：1.800mm。整个过程测量用时 2d。

b. 激光跟踪仪测量

测量值为：A 支架：垂直方向 0.21mm，水平方向 0.17mm；B 支架：垂直方向 0mm，水平方向 0mm；C 支架：垂直方向-0.15mm，水平方向-0.25mm；无法得到三个托架的俯仰、扭摆和滚动姿态数据，测量数据对位姿调整没有借鉴意义。

c. 利用经纬仪辅助计算方法测量

支架两个圆弧辅助基准水平方向间距理论尺寸为 4300，支架水平方向辅助基准面与圆心的垂直方向距离理论尺寸为 1326mm，所以 H/L 的比值为 1326÷4300

=0.3084。

支架水平方向辅助基准面理论尺寸为 1046mm，标尺为 1000mm，支架水平方向辅助基准面刻度理论值为 1046+1000=2046mm；圆弧辅助基准面垂直方向刻度理论值为 1945mm。

实物测量过程中的测量值为下述数值：

水平方向：A 支架：2046.45mm；B 支架：2046mm；C 支架：2046.38mm。

垂直方向： $Y_{A左} : 1945.32mm, Y_{B左} : 1945.42mm, Y_{C左} : 1944.94mm, Y_{A右} : 1945.28mm, Y_{B右} : 1945.15mm, Y_{C右} : 1945.30mm$ 。

所以， $Y_{A左} - (Y_{B左} + Y_{B右}) \div 2 = 0.185mm, Y_{A右} - (Y_{B左} + Y_{B右}) \div 2 = 0.145mm, Y_{C左} - (Y_{B左} + Y_{B右}) \div 2 = -0.195mm, Y_{C右} - (Y_{B左} + Y_{B右}) \div 2 = 0.165mm$ ；

$X_A - X_B = 0.45mm, X_C - X_B = 0.38mm; \Delta X = 0.45mm, \Delta Y = 0.195mm, \Phi = 2 \times 0.4904 = 0.9808mm$ ，整个过程测量用时 4h。

2.3.2.4 试验总结

表 1 各测量方案测量结果比对

测量工具	卷尺		激光跟踪仪		经纬仪	
	垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向
A 支架测量结果/mm	1.517	-0.20	0.21	0.17	0.185	0.45
B 支架测量结果/mm	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00
C 支架测量结果/mm	1.267	-0.025	-0.15	-0.25	0.145	0.38
测量用时/h	16		2		4	
结果比较	效率低、误差大		无法得到俯仰、扭摆和滚动姿态数据		测量效率高、测量数据对位姿调整具有借鉴意义	

试验结果如表 1 所示，通过以上数据可以看出，采用本文所提出的大型舱体转运车同轴度检测技术，可以同时满足大型舱体转运车检测中的测量精度与测量效率的要求，在现场测量时具有良好的应用效果。

3 结束语

应用上述检测方法降低了测量采样和计算的难度以及产品调整的复杂性。可以方便得出所需测量的同轴度实测值，克服了精测设备的不足；检测方法原理简单、容易理解、操作简便，能够为设计、工艺人员提供有效的实际数据，检测效率高、时间成本低。

通过大型架车同轴度检测实例可以得出，测量方

法和测量工具的选择是决定测量结果精确性的关键因素，同时也论证了测量工具对测量结果的影响。因此，在选择测量方法和测量工具的时候不仅要考虑设计指标的要求，也要考虑现有测量工具的局限性和可完善性，才能实现快速、准确、有效的检测。

参考文献

- 1 吴慧仙. 一种同轴度检测新装置及其检测方法[J]. 科技资讯, 2016, 14(34): 61~62
- 2 李岩, 孟祥旺, 章恩耀. 一种新型激光扫描式大工件孔-孔同轴度测量仪[J]. 激光与红外, 2000, 30(5): 279~282
- 3 吕乃光, 邓文怡, 燕必希, 等. 大型机械零部件孔同轴度测量技术研究[J]. 光子电子激光, 2001, 12(7): 694~696