

引文格式: 杨波, 江晨, 冯立杰, 等. 面向自动化物料传送的被动驱动托架设计与分析 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(1/2): 94-98.

YANG Bo, JIANG Chen, FENG Lijie, et al. Design and analysis of passive drive brackets for automatic material transfer[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(1/2): 94-98.

## 面向自动化物料传送的被动驱动托架设计与分析

杨波, 江晨, 冯立杰, 吴从焰, 周思浩, 张伟

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

[摘要] 针对现有的航天飞行器数字化装配生产线产品转运自动化、装配数字化的发展趋势,设计了一套兼容生产线全流程转运工作设备、适应多几何尺寸的托架。在分析作业现场产品转运流程、保证要求以及装配需求的基础上,提出了一种基于辊杠动力源的被动驱动托架总体设计方案,解析了托架关键受力部位和薄弱点,有针对性地开展了关键部件的设计、计算、校核,并使用专用软件开展了数值模拟分析与验证,托架试制完成后进行了工程试用。结果表明:关键部件的强度数值模拟值与理论设计计算值偏差在 10% 以内,位移形变均保持在 0.1mm 以下,验证了设计的准确性和合理性;工程使用阶段,托架的功能和性能均满足现场使用要求。

关键词: 生产线; 被动驱动; 托架; 自动化; 飞行器; 数值模拟

### Design and Analysis of Passive Drive Brackets for Automatic Material Transfer

YANG Bo, JIANG Chen, FENG Lijie, WU Congyan, ZHOU Sihao, ZHANG Wei

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

[ABSTRACT] Aiming at the development trend of product transfer automation and assembly digitization of the existing spacecraft digitization assembly line. A set of full-process transshipment equipment compatible with the production line and a multi-geometry bracket are designed. Based on the analysis of product transfer process, guarantee requirements and assembly requirements, a general design scheme of passive drive bracket based on power source of roller is proposed. The key force parts and weak points of the bracket are analyzed. Meanwhile, the design, calculation and verification of key components were carried out. In addition, the numerical simulation analysis and verification were carried out using special software. After the trial production of the bracket was completed, the engineering trial was carried out. The results showed that the deviations of the numerical simulation of strength and calculation values of theoretical design of the key components are within 10%, and the displacement deformation is kept below 0.1mm, which verifies the accuracy and rationality of the design. The function and performance of the bracket meet the requirements of on-site use during the engineering application stage.

Keywords: Production line; Passive drive; Bracket; Automation; Aircraft; Numerical simulation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.01/02.094

20 世纪 80 年代以来,随着计算机、互联网、信息技术的发展,制造业经历了从手工作业到半自动化、自动化的转变<sup>[1-2]</sup>,数字化、信息化的行业布局也逐步应用于工业现场,并正在向智能化方向迈进<sup>[3]</sup>。作为数字化、信息化代表的柔性制造技术应用越来越广泛,并且逐步被航天企业所引进<sup>[4]</sup>。

航天院所针对物料转运、精密装配等方面率先开展

了一系列的柔性制造技术的应用研究,通过与国内优势高校开展联合攻关的形式,取得了许多具有实际应用价值的成果。柔性制造技术的典型应用有:哈尔滨工业大学高超教授等<sup>[5-7]</sup>与航天三院联合研制了导弹数字化柔性对接系统(图 1),重点研究了柔性装配、质量质心测量等关键技术,解决了装配精度和一致性问题,提高了装配效率;西安电子科技大学李耕教授<sup>[8]</sup>开展了圆

柱舱段柔性装夹工装的设计研究,可适应多系列、不同型号舱段的装配,减少装配工具的多样性,减轻装配操作人员的劳动强度,提高装配质量和装配效率;南京航空航天大学机械电子实验室开展了自主引导 AGV 小车控制技术;刘旭<sup>[9]</sup>基于 AGV 平台进行多品种混流装配智能调度与控制技术等研究工作。

数字化装配生产线由物料贮存立体库、AGV、对接测量装备等智能柔性设备构成,各信息设备既能独立提供数字化、可视化功能,又能交互通信、信息互联,完成指定的产品作业流程。目前,总装数字化生产线多以智能化配料、自动化运转、柔性化装配为基本构成,部件或零件在智能柔性设备之间自动流转,最终实现产品级的装配。托架是生产线的智能柔性设备必备的产品托举机构,其在产品自动流转、柔性装配方面的作用不可或缺。生产线用托架运转过程与产品一对一组合,要求能够自动在不同的智能柔性设备之间流畅运转;托架在不同设备上平稳移动,并具备一定的防倾覆能力;装配作业时,托架可六向姿态调整,为便捷装配操作提供运动空间;特殊装配环节,托架定位牢靠,能够承受大扭矩加载;托架具有良好的通用性,可适应前弹身、战斗部、发动机以及舵机舱等多个舱段的支撑要求。

基于数字化装配生产线的托架应用,拟开展托架的

设计、分析和优化工作,并在现有生产线平台上进行工程验证。

## 1 方案设计

### 1.1 需求分析

某型号数字化生产线(图2)的主要功能包括基于立体库的物料管理信息化、基于自主引导 AGV 的物流运输自动化、基于自动对接装置的产品总装柔性化。从物料管理到产品总装完成,托架始终跟随部件同步流转。期间托架既要在动态运动中稳定承载,又要在静态装配过程中便于操作,对可靠性、安全性、适应性提出了较高的要求,需要解决辊杠旋转动力驱动控制、大载荷垂直升降、精密对接、周向自由调节等工程难题。

### 1.2 总体设计

根据生产线用托架的使用需求,设计了一种被动驱动托架,如图3所示。结构主体由被动驱动装置、升降机构、承托机构等3部分构成,被动驱动装置采用V型沟槽设计,内嵌耐磨型深沟球轴承,能够与现有自动导引运载器、产品自动对接平台的动力机构衔接,实现托架的往复自驱动;升降机构采用涡轮蜗杆传动形式,通过成对双联轴接触球轴承竖直固定在底板上,涡轮蜗杆机构的自旋运动转化为法兰的垂直运动,带动承托机构



图1 柔性装配平台

Fig.1 Flexible assembly platform

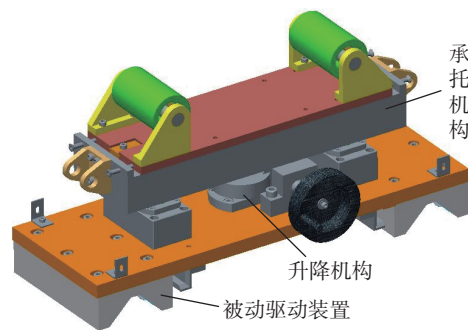


图3 被动驱动托架模型图

Fig.3 Model diagram of passive drive bracket

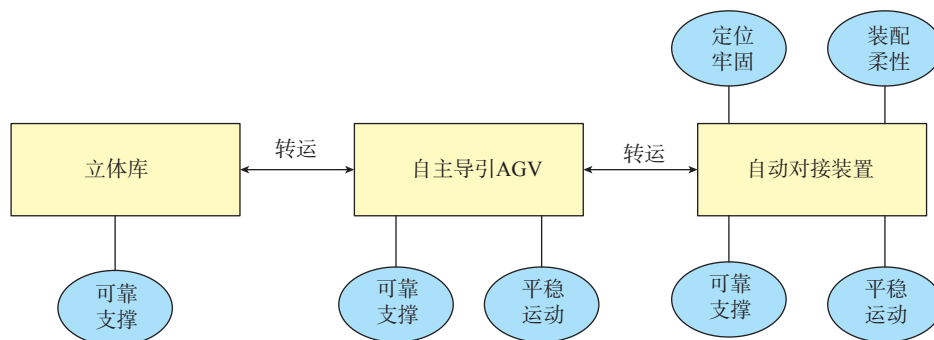


图2 典型生产线用托架流转及功能示意图

Fig.2 Flow and function diagram of bracket for typical production line

实现上下调整; 承托机构采用固定底面和可更换弧面托盘的形式, 能够适应多型号弹径的产品, 托盘侧面设置一定角度的限位槽和定位孔, 既能提供装配环节舱体轴向微量调节自由度, 又能提供装配紧固操作时的握紧摩擦力。

### 1.3 关键部件设计与分析

进行生产线用被动驱动托架的总体设计, 为满足托架的设计需要和使用要求, 重点对被动驱动装置、升降机构、承托机构的主要部位进行设计、计算和分析。

#### 1.3.1 被动驱动装置详细设计

以一侧辊杠被动驱动托架为例开展被动驱动装置的设计, 如图 4 所示。被动驱动装置截面为 V 型, 斜面两侧等间距嵌入各 5 个深沟球轴承, 轴承与所镶嵌平面呈 45° 倾斜角度。

辊杠旋转时, 与斜面 10 个轴承接触摩擦, 其中一侧的 5 个轴承受到沿水平方向 45° 的挤压力。由于辊杠是旋转的, 轴承与辊杠之间产生滑动摩擦, 轴承相应地也做旋转, 两者在不断地旋转摩擦过程中推动被动驱动装置产生向前的力。跨在两侧滚杠上的托架受到两个 45° 向前的驱动力, 两者合力为托架运动的正前方。

#### 1.3.2 升降机构支撑轴承座设计与校核

涡轮蜗杆传动机构安装固定于支撑轴承组件上, 轴承主要承受轴向载荷。设计载荷按照 3000N 计算, 轴承选用 NSK7906DT 成对双联角接触球轴承, 动载荷 23.2kN, 静载荷 20kN, 此轴承适用于承受单向轴向大载荷的场合。

成对双联角接触球轴承安装在自行设计的轴承座内(图 5), 通过轴肩与挡圈配合固定。托架载重时, 大部分载荷通过蜗杆传递到轴承座轴肩部位, 此处既承受挤压力, 也承受较大的剪切力。轴承座设计材料选用 40Cr, 屈服强度  $\sigma_s=540\text{MPa}$ 。

轴肩的挤压强度为:

$$\sigma_p = \frac{3000}{\pi \times (24 \times 24 - 21 \times 21) \times 10^{-6}} = 6.98\text{MPa} \quad (1)$$

取  $[\sigma_p] = \frac{\sigma_s}{1.5} \times 0.6 = 216\text{MPa}$ , 得到剩余安全系数  $n = \frac{[\sigma_p]}{\sigma_p} = 30$ 。

轴肩根部的剪切强度为:

$$\tau = \frac{3000}{\pi \times 48 \times h \times 10^{-6}} \quad (2)$$

许用剪切应力  $\tau = 0.2\sigma_s = 108\text{MPa}$ , 取 2 倍的余量得到, 轴肩厚度  $h \geq 0.4\text{mm}$ , 设计取值 4mm, 剪切强度剩余安全系数放大至 20 倍。

#### 1.3.3 升降机构法兰及螺钉设计与校核

涡轮蜗杆机构的法兰通过 4 个 M6 × 16 的不锈钢

螺钉与承托机构连接。载重时, 4 个螺钉作为主承力件, 平均分担 3000N 的作用力, 同时黄铜材料的法兰承沉头孔处受螺钉产生的剪切力。下面对螺钉直径、法兰沉头孔厚度进行计算和校核。

不锈钢螺钉材料 1Cr18Ni9Ti, 拉伸强度  $\sigma_s=700\text{MPa}$ , 法兰材料 H68 普通黄铜, 屈服强度  $\sigma_s=295\text{MPa}$ 。

螺钉受到的竖直方向的剪切强度为:

$$\tau = \frac{3000}{\pi \times 6 \times 6 \times 4 \times 10^{-6}} = 6.6\text{MPa} \quad (3)$$

其中, 许用剪切应力  $[\tau] = 0.3\sigma_s = 210\text{MPa}$ , 剩余安全系数

$$n = \frac{210}{6.6} = 31$$

法兰沉头孔受到的竖直方向的剪切强度为:

$$\tau = \frac{3000}{\pi \times 10 \times 4 \times 4 \times 10^{-6}} = 5.6\text{MPa} \quad (4)$$

其中, 许用剪切应力  $[\tau] = 0.4\sigma_s = 118\text{MPa}$ , 剩余安全系数

$$n = \frac{118}{5.6} = 20$$

螺钉和法兰都设置了 10 倍的强度剩余安全系数, 满足设计要求。

#### 1.3.4 承托机构滚轮轴设计与校核

承托机构由弧形托盘和固定底座构成, 材料都为 45# 钢, 屈服强度  $\sigma_s=375\text{MPa}$ , 其中支撑弧形托盘的滚轮轴是主要的承力部件, 其性能的优劣直接影响托盘的支撑稳定性。同时固定底座作为滚轮轴安装载体, 滚轮轴对安装底座产生挤压作用。因此, 滚轮轴、安装底座支撑面厚度是设计校核的关键考虑点。

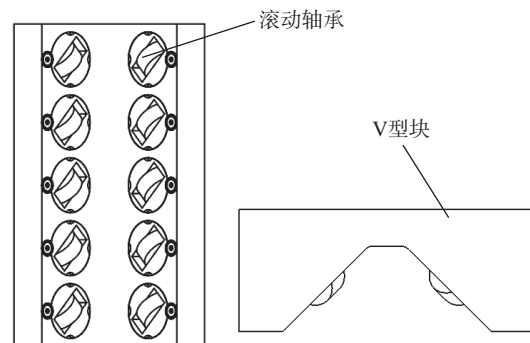


图4 被动驱动装置  
Fig.4 Passive driving device

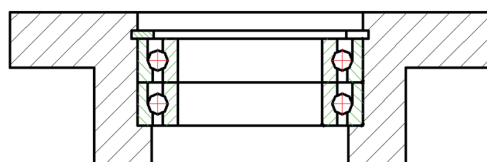


图5 轴承组件安装图  
Fig.5 Installation diagram of bearing assembly

滚轮轴两端固定在固定底座上,其剪切模型是双剪切面,直径 $\phi 12\text{mm}$ ,212kg的剪切力平均分布作用于2个剪切面,剪切强度计算如下:

$$\tau = \frac{2120}{\pi \times 6 \times 6 \times 2 \times 10^{-6}} = 9.4\text{MPa} \quad (5)$$

其许用剪切应力 $[\tau]=0.3\sigma_s=112.5\text{MPa}$ ,剩余安全系数 $n = \frac{112.5}{9.4} = 11.9$ 。

固定底座支撑面厚度10mm,安装孔直径12mm,单侧受力106kg,挤压强度计算如下:

$$\sigma_p = \frac{1060}{12 \times 10 \times 10^{-6}} = 8.8\text{MPa} \quad (6)$$

取许用挤压应力 $[\sigma_p] = \frac{\sigma_s}{1.5} \times 0.6 = 150\text{MPa}$ ,得到剩

余安全系数 $n = \frac{[\sigma_p]}{\sigma_p} = 17$ 。

## 2 仿真试验与结果分析

针对设计完成的被动驱动装置进行数值模拟仿真,一方面验证设计参数的可靠性,另一方面为关键部位的

应力分布情况及趋势提供宏观的趋势参考。实际生产过程中,产品需要有两个被动驱动托架承托,考虑到存在一个被动驱动托架极端情况,仿真时加载300kg,分别对滚轮支撑轴、法兰盘及紧固螺钉、轴承座进行模拟分析。

### 2.1 滚轮支撑轴应力与位移模拟分析

滚轮支撑轴材料为45#钢,屈服强度375MPa,两个滚轮两侧支撑弧形托盘。现对托盘弧形面施加300kg的压力,得到的数值模拟结果如图6所示,最大应力7.63MPa,最大位移0.001mm,数值模拟应力与理论计算值偏差10%,约为材料许用屈服强度的1/24,不存在轴弯曲变形和断裂的可能,满足设计和使用要求。其数值模拟值与理论计算值相近,进一步验证了设计和选型的准确性。

### 2.2 法兰盘及紧固螺钉数值模拟分析

本设计选用螺钉规格为M6×16的不锈钢螺钉,拉伸强度为700MPa,螺钉头部厚度6mm,法兰材料为H68黄铜,屈服强度295MPa,沉头孔厚度4mm。对法兰安装板施加300kg的压力载荷,观察其受力情况如图7所示。法兰最大应力95MPa,沉头孔处的应力约为20MPa,螺钉最大应力5.36MPa,数值模拟应力安全系数均

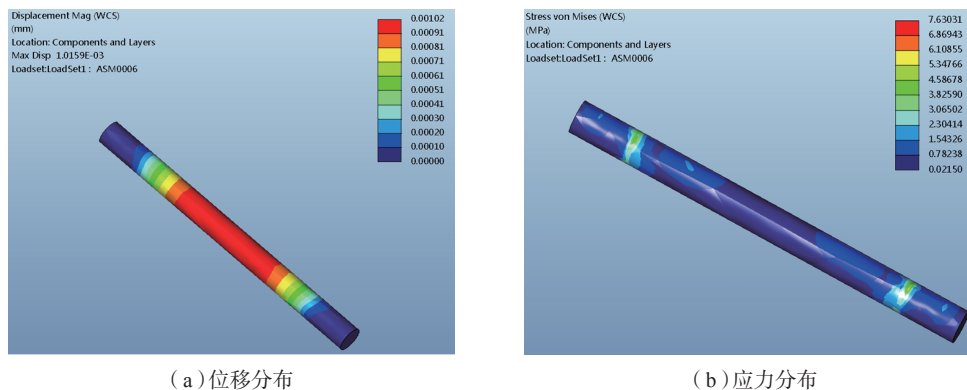


图6 滚轮轴仿真图

Fig.6 Simulation diagram of roller shaft

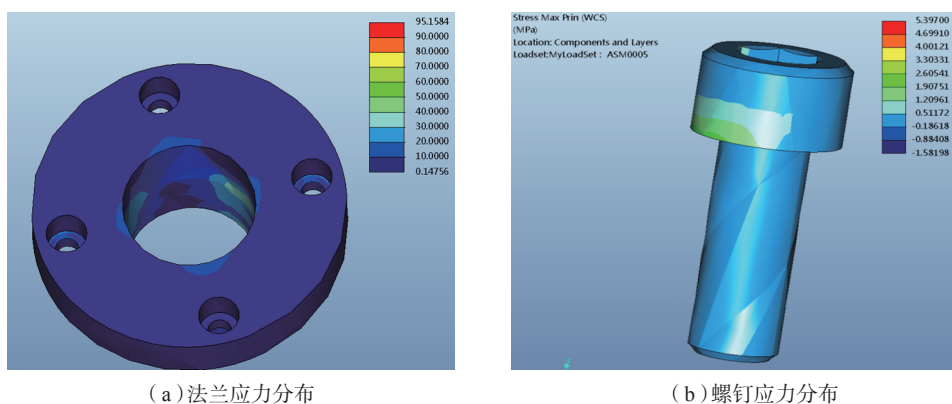


图7 法兰及紧固螺钉仿真图

Fig.7 Simulation diagram of flange and fastening screw

在 10 倍以上,不存在螺钉拉伸断裂和法兰沉头孔剪切断裂的可能,满足设计和使用要求。

### 2.3 轴承座数值模拟分析

轴承座通过 4 个螺钉固定于底座,托架上的载荷压力最终都会传递到轴承座凹槽台面。为了数值模拟的直观效果,仿真时将底座和轴承座组合在一起,加载后观察底板的位移形变情况和轴承座的应力分布如图 8 所示。底板中间位置位移形变最大为 0.07mm,轴承座最大应力 121MPa,材料许用屈服强度约为数值仿真的 2.5 倍,满足设计和使用要求。

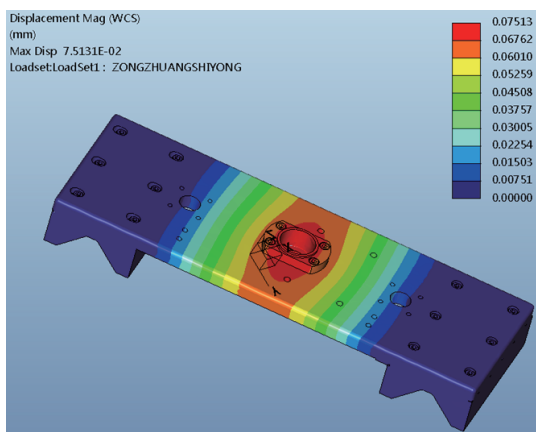
## 3 结论与展望

本文设计了一种数字化生产线用被动驱动托架,完成了被动驱动装置、升降机构、承托机构的理论分析与计算,并使用专用软件进行了数值模拟分析与验证,关键部位的设计强度和数值模拟强度均满足使用要求。经工程试用,托架各项功能和性能均符合数字化生产线的要求,并可靠稳定应用于整个生产线的产品转运和产

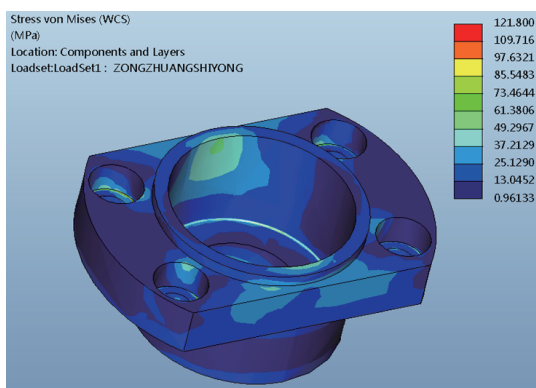
品装配。后续将开展托架在自动对接平台上的产品装配周向调节、轴向紧固装配等工程应用技术研究,进一步提高托架与装配工艺的结合度,为构建实用性数字化装配生产线提供工程经验。

### 参 考 文 献

- [1] 蒋丹鼎. 航天复杂产品数字化生产线的研究与应用[J]. 航天制造技术, 2011(6): 3-6.  
JIANG Danding. Digital manufacturing-oriented platform for complicated product in aerospace engineering[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(6): 3-6.
- [2] 姚利明, 杨森元. 面向柔性装配的全向移动技术[J]. 航空制造技术, 2017, 60(23/24): 64-67.  
YAO Liming, YANG Senyuan. Omni-directional vehicle for flexible assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(23/24): 64-67.
- [3] 栗增杰. 舱段柔顺装配中可调柔性支撑设计与实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.  
LI Zengjie. Design and experimental study of adjustable flexible support in cabin flexible assembly[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [4] 郭洪杰. 飞机数字化柔性装配生产线关键技术[J]. 航空制造技术, 2011, 54(17): 40-43.  
GUO Hongjie. Key technology of aircraft digital flexible assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(17): 40-43.
- [5] 高超. 导弹柔性装配系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
GAO Chao. Research on key technologies of missile flexible assembly system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [6] 马剑锋. 导弹数字化柔性对接系统设计及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
MA Jianfeng. Design and experimental study of digital missile assembly system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [7] 丁宇亭. 柔性支撑轴承的最小工作载荷仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
DING Yuting. Simulation analysis with the smallest working load of flexible support bearing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [8] 李耕. 圆柱形舱段支撑架及底座的设计与分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.  
LI Geng. Design and analyse of the supporting frame and the base of the cylindrical cabin[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [9] 刘旭. 基于 AGV 平台的多品种混流装配智能调度与控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.  
LIU Xu. Research on intelligent dispatching and control for mixed mode assembly based on AGV platform[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.



(a) 位移分布



(b) 应力分布

图8 轴承组件及底板仿真图

Fig.8 Simulation diagram of bearing assembly and baseplate

通讯作者: 杨波, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天飞行器装配工艺、航天飞行器结构数字化仿真, E-mail: 18916824056@163.com。

(责编 古京)