

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.012

列车预装配柔性实验平台机械手设计研究

李莹¹, 周永杰¹, 郭冬梅¹, 王琦珑², 负超^{2*}

(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北唐山 063000; 2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要:针对现有高速列车车厢预装配实验平台制造成本高, 重复利用率低, 定位精度差的问题, 对装配对象结构特征、装配工艺需求等方面进行了研究, 提出了一种基于曲面特征点离散化法及多点柔性夹持技术的列车预装配柔性实验平台机械手定位方法; 设计了可重复利用、驱-动分离的自动化、低成本高铁车厢预装配柔性实验平台机械手; 通过 ANSYS 有限元分析工具对机械手关键零部件的强度进行了分析, 验证了机械手结构的安全可靠性, 获得了机械手的优化结构。利用简易车体装配台对机械手定位方法的可行性及预装配柔性实验平台的装配效果进行了验证。研究表明, 该柔性实验平台能实现真实模拟车厢装配环境、准确定位车体关键零部件等多项功能, 整机制造成本低、装配效率高。

关键词:预装配机械手; 柔性装配; 有限元分析

中图分类号: TH122; TP24

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)06-0704-05

Design of train pre-assembly flexible experimental platform manipulator

LI Ying¹, ZHOU Yong-jie¹, GUO Dong-mei¹, WANG Qi-long², YUN Chao²

(1. CRRC TangShan Co., Tangshan 063000, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the problems of the train pre-assembly experimental platform with high cost of manufacture low reusable rate and poor precision of location, the characteristics of continuous surface discretization method and the flexible clamping technology was investigated. After the analysis of the assembly requirement and the structure characteristics of the assembly object, a positioning method of the train that as research object of pre-assembly experimental platform was proposed. An automation and low-cost manipulator of train pre-assembly flexible experiment platform was designed. Through the finite element analysis tool, the mechanical strength of key parts was tested. The optimized structure of the manipulator was established. The feasibility of the positioning method and the assembly effect of the experimental platform were proved by using train assembly machine. The results indicate that the digital flexible assembly technology can reduce the cost and improve the efficiency of experiment platform, it can promote the level of the assembly of the train.

Key words: pre-assembly manipulator; flexible assembly; finite element analysis

0 引言

近年来, 装配技术历经了人工装配、半自动化装配、自动装配及柔性装配几大过程。伴随着大型装备技术的发展, 适应柔性装配的需求, 预装配技术也应运而生。如今, 数字化的预装配技术已经被率先应用于航空航天领域, 以确保装配的精度及提高装配的效率。Zieve 等^[1]研制了 E4000 机翼铆接系统, Hartman 等^[2]

开发了飞机蒙皮自动化装配系统, 在上述的自动化装配应用研究中, 已经能够解决特定环境下的具体任务需求, 但均有着成本高, 电气设计复杂以及装配对象适应性差的缺陷, Bloss 等^[3]率先提出大型设备的装配应具有更高的柔性及适应性, Bukchin 等^[4]设计了柔性装配工具^[4], Gyulaia 等^[5]提出了装配工具可重构的概念, 并开发了可重构装配系统, Rosati 等^[6-7]提出了柔性装配领域内一套新的概念全柔性装配系统。柔性装

收稿日期: 2016-02-23

作者简介: 李莹 (1983-), 男, 辽宁开原人, 主要从事动车组组装技术方面的研究. E-mail: liy@tangche.com

通信联系人: 负超, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: Cyun18@vip.sina.com

配技术的研究及应用使得自动化装配技术有了更高的适应性,也使得自动化装配技术的应用领域进一步拓宽。但现有的大量研究均基于驱动一体,既一个自由度一个驱动单元的模式^[8],这种驱动模式在对不同自由度联动要求高的装配作业上有着速度快、效率高的优势^[9-11],但是在更多的柔性装配技术应用领域,设备成本、电气布局简易性等方面要求更高。在列车领域的预装配实验多是采用基于三维软件的虚拟装配,大型装备制造产品周期均在3~5年,汽车行业产品研发周期也在2~3年,面对国内列车市场现状,产品研发周期均在1年左右,工艺周期则少之又少。柔性自动化装配技术在列车装配领域的应用会大幅缩短研发周期,提高其生产效率。

本研究设计的列车实物模拟装配实验平台具有一定的先进性,国内同类研究较少。实物模拟装配环境相比于虚拟装配,能够更直观地表现装配的实际情况,缩短开发周期,减少开发风险,降低开发成本,提高装配操作人员的培训速度,提高装配质量和效率,解决部分三维模型虚拟装配难以解决的技术问题。目前实物模拟装配发展中的主要问题是现有同类型密集型装夹具装配线,造价高、动力系统布局复杂,施工难度大,且普遍不适用于列车装配的线的现场环境;同时另一种普遍采用的模型车实验的方法,又造成了极大的资源浪费,且具有可重复利用率低,装配精度不高等问题。

本研究拟解决现有柔性装配设备动力系统复杂、造价高、不可重复利用等问题,设计一套结构简单、定位准确,且驱动分离的预装配柔性夹具执行机构,并通过ANSYS有限元分析技术对结构设计的强度等安全性参数进行校核。

1 车厢结构特征及预装配功能分析

列车车厢结构具有其特有的结构特点,及较高的复杂性;同时对于车厢模拟装配也有着特有的模拟模块划分及装配需求。车厢结构特征分析及预装配需求的研究是设计的基础。

1.1 车厢结构特征

完整的车厢结构可分为龙骨、外覆盖件、空调系统、车窗、座椅等主要组成部分。

为便于对装配任务的分解及装配对象的明确,进一步将整体车厢结构分成内外两套子结构系统,分别为外框架子结构及内部附属子结构。外框架子结构主要包括车厢的龙骨、车窗及必要覆盖件,如图1所示,该子结构系统主要起到支撑内部子结构的作用,是整个预装配系统需完成的基础工作,同时时进行内部子结构装配的基础。

内部子结构系统主要包括车厢的主要功能组件包

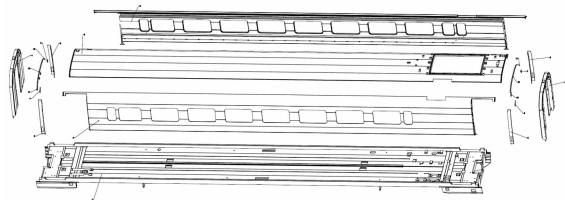


图1 车厢外框架子机构

括空调、座椅、管线等,如图2所示。

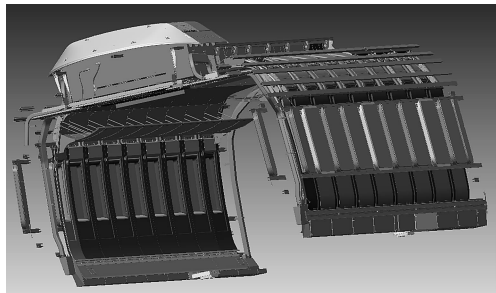


图2 车厢内部子结构

从结构图中可以看出,内部子结构均需定位、安装在外部框架结构上,这也就是涉及到了装配顺序及安装基准等装配技术问题。本研究重点研究执行机构的设计,因此对于装配技术的相关问题仅作简要阐明。

1.2 预装配功能分析

模拟装配时需充分考虑到整体车厢的装配顺序、预期实验效果等具体要求,明确预装配要求是进一步进行结构设计的基础。

首先,该平台的主要功能是,在产品结构设计完成后,通过系统集成预装配接口验证平台进行车内设施的一比一实物安装,即可直观的反映出设计效果,又可对设施接口进行验证,同时满足无法通过三维表述干涉的部位进行实物验证(布线等),以达到实际生产制造中装配效果的目的;其次,可以进行批量生产前的产品工艺性验证,在实际生产制造之前,通过系统集成预装配接口验证平台对产品的工艺设计进行验证,对装配工艺顺序,结构装配方法提前研究设计,工艺数据提前收集整理,以确保在实际生产中工艺设计的准确性;同时,预装配平台应具有具备验证车内设备、客室设备、端部布线、制动管路、地板的各个接口的合理性的功能,可以提高新产品生产一次性合格率,降低返工返修风险周期。

2 预装配柔性夹具定位方法

传统的列车车厢装配的定位方法是采用夹具直接固定真实车厢龙骨或仿真木龙骨,这种方法施工时间很长,难度也很高,同时列车车厢许多结构部位如龙骨、外覆盖件均具有较高的强度及空气动力学形貌要求,因此在固定或夹持时具有很大的限制性。本研究

采用多点柔性夹持技术,夹持多尺寸 C 型固定槽,通过对 C 型槽的优化组合,模拟出车厢断面轮廓结构。

根据车厢的具体结构,该柔性定位方法需要实现变曲率曲面的轮廓模拟、大跨度车体的连续模拟以及不同截面轮廓尺寸车体的普遍适应性等功能,因此不能采用传统的刚性工装对车厢轮廓进行模拟,同时考虑到需对变曲率曲面的模拟,因此本研究将车厢轮廓的连续曲面离散为多个特征固定点,根据不同车厢外型结构的不同,将截面特征点数量确定为 15~21 个不等,并将整节车厢进一步分解为 8 个组成模块,基于以上所述的特征曲面离散定位方法,可以将车体柔性夹具的数量尽量减少,得到能满足实际模拟效果的最优数量配置,简化了预装配柔性夹具的定位过程,同时提高了效率。

基于多点柔性工装技术设计相应柔性夹具,应具有 4 个自由度,既 X 、 Y 、 Z 3 个方向的水平移动,以及为了满足曲面特征的机械手末端旋转自由度。通过预装配柔性夹具夹持 C 型固定槽模拟车厢外框子结构,并通过 C 型槽进一步定位车厢内部功能子结构。

柔性夹具装配模拟效果如图 3 所示。

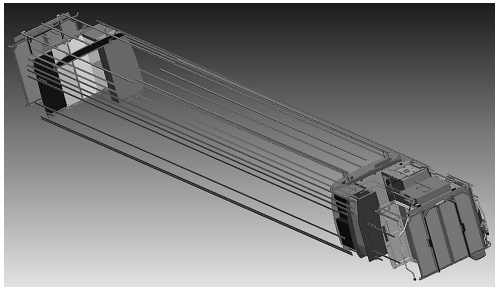


图 3 柔性夹具模拟效果

针对上述功能,本研究设计了由外移动框架、内移动框架及执行机构组成的预装配平台,该预装配实验平台具有 9 个可移动的内龙门框架,每个内龙门框架上安装有 21 个具有 3 个自由度的执行机械手,但该机械手不具有独立的驱动系统,另外具有 1 个可移动的外龙门框架,该框架上安装有 6 个驱动机械手,在搭建装配模拟平台时驱动机械定位内框架上的执行机械手完成对接,并运动到确定位置,将模拟用 C 型槽固定在执行机械手,以此类推,采用多点柔性定位的方法,完成车厢的外部结构模拟。

3 预装配实验平台机械手结构设计

预装配柔性实验平台中的重要组成部分是分别安装在外移动框架与内移动框架上的驱动机械手和执行机械手,分别完成动力驱动及定位装配的功能。

3.1 外框架驱动机械手

外框驱动机械手由 3 套伺服驱动系统及 1 套气动伸

缩装置组成,分别为升降伸缩及旋转 3 个自由度提供动力,同时还对升降制动装置提供驱动。结构如图 4 所示。

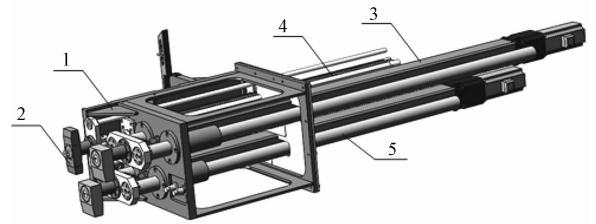


图 4 外驱动机械手总图

1—升降固定组件;2—内外机械手动力对接组件;3—伺服驱动组件;4—气动伸缩组件;5—导向支撑组件

外框架机械手的驱动单元是预装配时执行机械手,即安装、定位执行装置的动力来源,其动力系统功率、传动比等性能参数均需综合考虑内外综合负载的情况,本研究以升降自由度的动力性能参数为例进行动力系统性能指标计算的阐述。

3.1.1 设备驱动功率 $N_{\text{驱}}$ 的确定

驱动功率 $N_{\text{驱}}$ 为:

$$N_{\text{驱}} = F_{\text{运}} V / \eta \quad (1)$$

式中: F_b —轴向力, $F_{\text{运}} = 354.73 \text{ N}$; V —设备运行速度, $V = 0.25 \text{ m/s}$; η —传动效率, $\eta = 0.85$ 。

将数值代入式(1),得:

$$N_{\text{驱}} = 104 \text{ W}$$

3.1.2 减速器速比 i 的确定

速比 i 为:

$$i = n_{\text{emax}} / n_{\text{max}} \quad (2)$$

式中: n_{emax} —电机最大旋转转速(50 Hz 时电机转速), $n_{\text{emax}} = 3000 \text{ r/min}$; n_{max} —设备最大运行速度。

当设备运行速度最大时,丝杆转速为:

$$n_{\text{max}} = V_{\text{max}} / l \quad (3)$$

式中: V_{max} —设备最大运行速度, $V_{\text{max}} = 15 \text{ m/min}$; D —丝杆导程, $D = 0.01 \text{ m}$ 。

将数值代入式(3),得: $n_{\text{max}} = 150 \text{ r/min}$ 。

将式(3)结果代入式(2),得: $i = 20$ 。

3.1.3 电机扭矩计算

顺向转动时,电机驱动扭矩为:

$$T_a = \frac{F_b \times l}{2\pi\eta i} \quad (4)$$

逆向转动时,电机驱动扭矩为:

$$T_b = \frac{F_b \times l \times \eta}{2\pi i} \quad (5)$$

式中: F_b —螺杆所受轴向力, $F_b = 354.73 \text{ N}$; l —螺杆导程, $l = 0.01 \text{ m}$; η —机械效率, $\eta = 0.9$; i —行走机构传动比, $i = 20$; T_{eH} —电机额定输出扭矩, $T_{eH} = 1.27 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

将上述参数代入式(3~4)中,得:

$$T_a = 0.047 \text{ N} \cdot \text{m} \leq T_{eH} = 1.27 \text{ N} \cdot \text{m};$$

$$T_b = 0.038 \text{ N} \cdot \text{m} \leq T_{eH} = 1.27 \text{ N} \cdot \text{m}。$$

3.2 内框执行机械手

内框执行机械手具有伸缩、转动及升降3个自由度,但内框执行机械手上并不具有动力系统,其驱动需依靠外框驱动机械手,由于列车车厢模拟时特征点数量大,所需执行机械手数量众多,如果将每个执行机械手配置单独的驱动系统会使成本大幅度增加,另外由于预装配平台模拟实验的特点并不需要各个执行机械手联动,因此将预装配平台机械手的动力采用分离设计,内框执行机械手结构如图5所示。

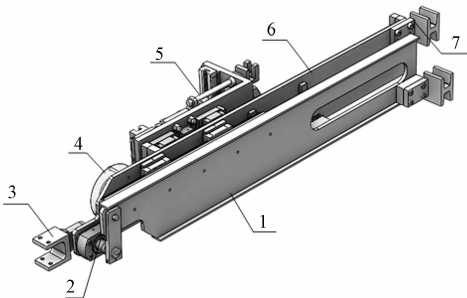


图5 内框执行机械手总图

1—旋转轴连接组件;2—旋转组件;3—安装手爪;4—伸缩制动组件;5—升降制动组件;6—伸缩组件;7—动力对接组件

内框执行机械手的驱—动分离设计,不单降低了整机成本,同时也大幅降低了设备线路的复杂程度,由于内移动框架上电器设备少,线路相应减少,这种设计对于大型装备来说大大降低了制造难度,意义重大。

同时,虽然内框执行机械手并不具有单独的驱动系统,但是各个自由度上均配有不同形式的制动装置,这是为了保证当外动力源脱开后,内框执行机械手可以继续保持固定状态。

3.3 内外机械手动力连接

若想实现内执行机械手的运动,首先需要完成外驱动机械手与内执行机械手的动力连接。在动力对接这一领域虽然国内外学者也有所研究,但大部分研究并不适用于此预装配平台,如果动力连接机构设计地过于复杂,则失去了驱—动分离设计降低成本的设计目的,因此简单的动力对接机构与动作流程,是该预装配平台的关键。

对接状态示意图如图6所示。

如图6所示,当外框架机械手运动到指定位置时,系统首先将外框架推块沿水平Y轴方向移动到合适位置,沿Z轴下降,下降到指定位置后,沿Y轴移动到工字结构内部并使得内外框架推块的特定面相接触,通过面接触传递动力实现Y轴升降。当需沿水平方向运动时,则需将工字结构槽内的两个侧面与外框架推块的侧面相接触,同样通过接触面传递动力实现水平方向的运动。

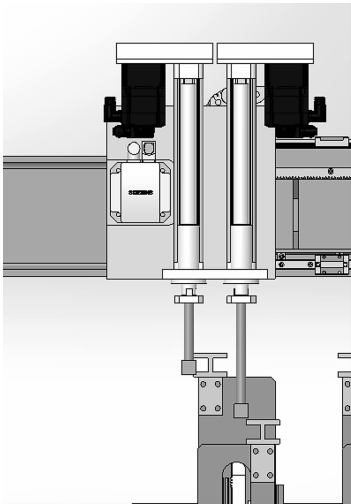


图6 对接状态示意图

4 预装配平台机械手强度分析

预装配柔性实验平台需搭建真实的车体环境,车厢内部的功能部件均需安装在模拟车厢上,另外预装配平台机械手是模拟车厢的定位、安装组件,因此整个车厢的负载均会施加在机械手结构上,因此保证机械手零部件的强度是确保整个预装配柔性实验平台安全、可靠的关键。下面本研究以内框执行机械手上的负载状况较恶劣的旋转轴零件为例,阐述预装配平台机械手的强度分析方法。

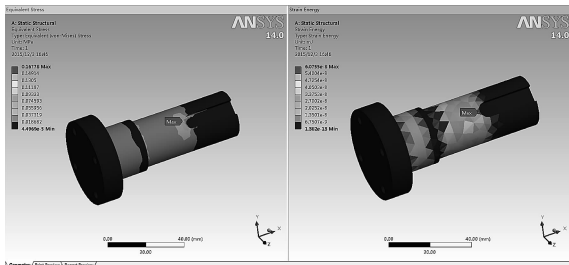
该部件是外负载产生扭矩的直接作用零件,为了保证预装配实验平台的安全及可靠性,需要对该零件的应力值、应变值、变形量进行计算,并与材料的许用值进行对比,完成该零件的强度校核。该零件选用工程中常规的轴类零件材料45号钢,其材料特性如表1所示。

表1 45号钢材料特征属性

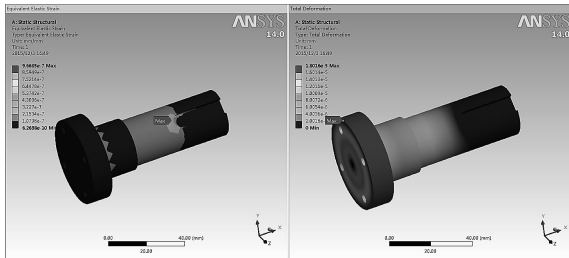
材料名称	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	抗剪强度/MPa	密度/(t·mm ⁻³)
45 钢	2.1e5	0.3	355	178	7.85e-0.9

根据实际工作状态确定分析约束条件,约束轴承定位面的轴向移动,同时轴回转体的径向及轴向传动,约束键槽的各向运动,在手爪连接处施加转矩。通过有限元分析软件获得各项分析结果如图7所示。

通过研究分析结果可知,该零件最大等效应力出现在轴肩过度连接处及键槽处,应力值为0.16 MPa,远低于材料的屈服强度,满足设计要求,但同时应注意的时由于键槽处的等效应力值较大,因此对键的选用应同样满足强度要求;最大变形出现在与手爪连接处,变形量为1.8e-5 mm,此变形量较小并不会影响手爪定位精度;剪切应力及强度指标也均符合设计要求。



(a) 等效应力及应变能云图

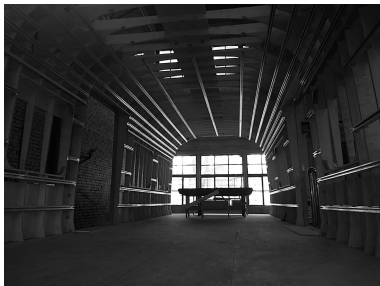


(b) 等效应变及变形云图

图 7 有限元分析结果

5 实验及结果分析

为了验证预装配实验平台定位方法的定位效果及柔性实验平台与预装配的可行性,本研究搭建了简易的验证实验平台。在验证实验平台上,笔者利用钢材固定架代替机械手固定 C 型结构钢,并通过在刚才固定架上设置特征固定点,模拟机械手的固定状态,验证定位方法的有效性。验证实验平台装配效果如图 8 所示。



(a) 实验平台装配效果



(b) 钢材固定架模拟机械手定位

图 8 实验平台

6 结束语

本研究通过对列车车厢结构及预装配模拟装配要求的具体分析,提出了不破坏车厢关键结构件,同时能够模拟车厢曲面结构的机械手定位方法,在此基础上设计了能够大幅降低装备成本的,驱一动分离的内外机械手结构及提出了简单易行的动力对接方案,并利用有限元分析技术对关键结构零件进行了强度校核。

在下一阶段,本研究将通过样机实验来进一步验证该预装配柔性实验平台的可行性。并逐步完善整体实验平台的设计,同时研究优化的控制算法,提高柔性预装配实验平台的效率。

参考文献 (References):

- [1] ZIEVE P, SMITH A. Wing assembly system for britishh aerospace airbus for the A320[R]. Aerospace Automated Fastening Conference and Exposition Long Beach, California: SAE Technical Paper,1998.
- [2] J HARTMANN, C MEEKER, A SMITH, et al. Automated wing panel assembly for the A340-600[R]. SAE Aerospace Automated Fastening New orleans, Louisiana SAE Technical Paper,2000.
- [3] R BLOSS. Assembly and automation expo highlights innovations in automated assembly[J]. **Assembly Automation**, 2011,31(3):220-223.
- [4] BUKCHIN Y, MELLER, R D, QI Liu. Assembly system facility design[J]. **IIE Transactions**,2006,38(1):53-65.
- [5] GYULAIA D, PFELFFER A, MONOSTORI L, et al. Matching demand and system structure in reconfigurable assembly system[J]. **Procedia CIRP**,2012,3(3):579-584.
- [6] ROSATI G, FACCIO M, CARLI A, et al. Fully flexible assembly systems a new concept in flexible automation[J]. **Assembly automation**,2013,33(1):8-21.
- [7] ATIYA AL-ZUHERI. Structural and operational complexity of manual assembly systems[J]. **Journal of Computer Science**,2013,9(12):1822-1829.
- [8] 田 威,廖文和,唐金成,等. 面向复杂产品装配的柔性工装共性技术研究[J]. **中国机械工程**,2010,21(22):2699-2705.
- [9] 王 亮,李东升,罗红宇,等. 飞机装配数控柔性多点工装技术及应用[J]. **北京航空航天大学学报**,2010,36(5):540-544.
- [10] 邬 静. 钻具旋转机械手设计[J]. **机械**,2014,41(6):60-63.
- [11] 龚 辉,朱柏荣,方 强. 用于机器人自动钻铆的自动供钉系统试验研究[J]. **机电工程**,2012,29(4):404-408.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

李 莹,周永杰,郭冬梅,等. 列车预装配柔性实验平台机械手设计研究[J]. **机电工程**,2016,33(6):704-708.

LI Ying, ZHOU Yong-jie, GUO Dong-mei, et al. Design of train pre-assembly flexible experimental platform manipulator[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2016,33(6):704-708.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>