

舱段柔性装配与测量一体化平台设计

曹红星,毛旦平,刘 驰,周思浩,朱鲲捷

(上海航天精密机械研究所,上海 201600)

摘要:针对某导弹总装车间采用传统人工装配舱段与测量方法,同时需要多种工装辅助作业,多人协同调整舱段姿态,导致生产劳动强度大、效率低及质量差等问题,在研究总结国内外舱段柔性装配与测量技术发展现状和趋势后,根据实际科研生产情况设计了一个适用于不同型号舱段柔性装配与测量一体化平台。主要分析了舱段柔性装配与测量需求,确定机械结构组成并对关键部件结构进行设计以及仿真和原理分析,建立系统网络架构;提出了控制系统软硬件等重要部件快速选型、设计、编程与组态工程方法,通过一系列舱段工艺装配、质量质心与长度及水平测量试验,验证了该设计可以满足舱段装配与测量自动化、柔性化及数据化等需求。

关键词:导弹舱段;质量质心;水平测量;柔性装配

中图分类号:TP23

文章编号:1000-0682(2024)02-0030-09

文献标识码:B

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.006

Design of integrated platform for flexible assembly and measurement of cabin

CAO Hongxing, MAO Danping, LIU Chi, ZHOU Sihao, ZHU Kunjie

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

Abstract: For a missile assembly workshop, the traditional manual assembly and measurement method is used, and a variety of tools are needed to assist the operation, and many people cooperate to adjust the attitude of the cabin, resulting in high labor intensity, low efficiency and poor quality, after studying and summarizing the development status and trend of flexible assembly and measurement technology at home and abroad, an integrated platform for flexible assembly and measurement of different types of cabin is designed according to the actual research and production situation. It mainly analyzes the requirements of flexible assembly and measurement of the cabin, determines the composition of the mechanical structure and the structural design, simulation and principle analysis of key components, and establishes the system network architecture. It proposes the rapid selection, design, programming and configuration engineering methods of important components such as the hardware and software of the control system. It passes a series of cabin process assembly, centroid of mass, length and level measurement tests. It is verified that the design can meet the requirements of assembly and measurement automation, flexibility and digitization.

Keywords: missile compartment; centroid of mass; horizontal measurement; flexible assembly

0 引言

随着我国航天武器事业快速发展,新型武器装备逐渐朝着大规模、多品种和高机动战术指标方向

发展,对舱段装配与参数测量效率、精度、柔性化以及质量等提出更高的要求^[1]。传统的人工舱段装配与参数测量方法,因测量精度、测量质量和测量效率受人工和工装架车影响很大,很难满足新型武器的舱段装配与测量需求;同时,随着先进装配与测量技术的不断发展,对新型武器快速研制与生产要求越来越高,人力成本占比大幅增加,舱段部件装配与测量的柔性化、自动化及数据化是其发展趋势^[2-4]。

收稿日期:2023-09-14

第一作者:曹红星(1990—),男,河南人,工程师,主要研究方向为弹上电缆网设计制造及导弹数字化智能装配技术。

E-mail:435994039@qq.com

20世纪末,国外一些国家已经对舱段装配和测量技术进行了大量研究与实践。以美国为首的欧美发达国家在飞机、导弹等航空航天领域的柔性装配与测量技术,不论是理论上还是生产制造上都取得极大进展。如美国波音公司、雷神公司及欧洲一些国家研究的JAM和ADFAST等项目将柔性装配与测量技术应用于飞机生产和导弹制造等领域,不仅提高了舱段装配与测量精度和测量质量,还大大缩短了作业时间,使飞机、导弹等的整机大部件在对接装配过程中实现最大程度的自动化、柔性化与数字化,大幅节约成本^[5-6]。

随着我国国防武器需求量逐渐增大以及需求种类增加,基于柔性化舱段对接装配与测量的需求也越来越迫切。针对此,国内相关科研人员及院校等机构也进行了多方面的研究与工程实践:李亚军等^[7]以2-PPRRR并联机构作为舱段对接机构,基于环路矢量法和D-H法对舱段调姿机构进行运动学分析与仿真,做出舱段柔性自动化装配工程样机并进行舱段对接试验,以验证舱段对接装置设计的合理性及高效性;张解语等^[8]基于线结构光扫描和分布式机器视觉等技术,提出了舱段对接与位姿综合测量方法,并通过工程样机验证试验实现舱段自动化对接装配需求的非接触、无靶标测量方法;高健程等^[9]通过分析筒类舱段调姿原理,提出了舱段位姿与调姿机构运动关系,利用牛顿-欧拉方程推导出调姿机构动力学模型,并在仿真软件中搭建调姿机构虚拟样机模型,通过ADAMS与MATLAB联合仿真,验证了所设计的筒类舱段调姿机构控制系统可实现舱段自动、平稳和高精度调姿以及柔性对接要求。

该文结合国内外舱段柔性装配与测量平台设计技术优缺点,以提升舱段装配效率、精度和可靠性以及同时兼顾导弹特性参数快速测量为目标,设计了舱段柔性装配与测量一体化平台,可完成多种型号舱段的柔性装配,以及质量质心、长度及水平参数测量,具有很大适应性及共用性,大幅提高了舱段装配与测量质量、测量效率,满足了测量自动化、柔性化和数据化等需求。

1 方案设计

1.1 功能需求

某导弹总装车间作为航天领域重要导弹生产基地,急切需要提高车间舱段装配与测量设备技术水平,使其具有柔性化、自动化和数字化生产能力。

目前,该导弹总装车间导弹装配工装及特性参数测量方法等和预期的智能化工厂还存在着很大差距,主要问题在于舱段装配仍然采用人工方式,完全依靠工人经验进行装配,人工吊装称重、计算质量质心与长度测量等,同时还需要多种工装辅助作业,多人协同调整舱段姿态等,操作繁琐复杂且不同型号导弹需要设计不同舱段工装和测量辅助工装,导致舱段装配与测量效率低,测量周期长,测量质量差,已无法满足现代化武器快速发展的需求。

1.2 平台组成

导弹结构主要由导引头、战斗部、发动机、舵机舱及助推器等舱段组成,每个舱段的直径和长度均不同^[10]。根据舱段装配工艺流程与参数测量方法,该文设计的一体化平台主要由机械结构系统、控制硬件系统和控制软件系统组成,系统平台架构如图1所示。

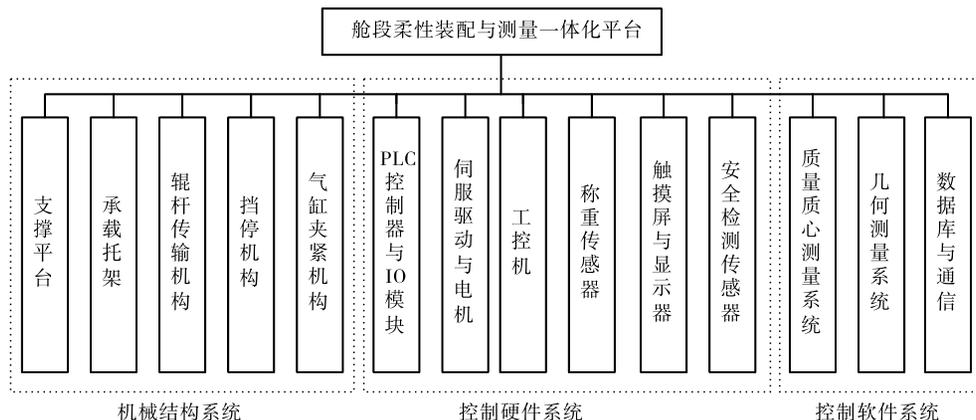


图1 系统平台架构图

1.3 结构设计与分析

结合舱段装配与导弹参数测量功能需求,从结

构设计、测量方法及可靠性等方面对平台主要机械部分进行结构设计以及仿真和原理分析。

1.3.1 结构设计

(1) 考虑到车间常规武器舱段特性参数,设计的支撑平台外形尺寸为长 5500 mm、宽 600 mm。支撑平台是承载托架、辊杆传输、挡停、气缸夹紧、质量质心测量及水平测量等机构集成载体与安装基准,具有满足要求的支撑刚度及精加工安装定位接口。支撑平台示意图如图 2 所示。

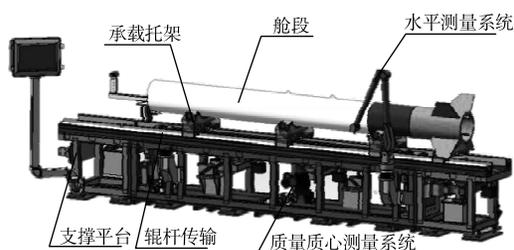


图 2 支撑平台示意图

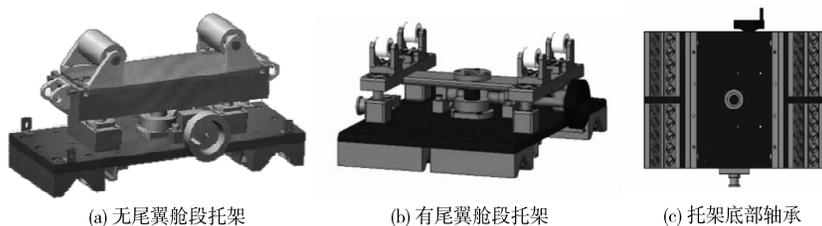


图 3 托架结构组成

(4) 挡停机构用于承载托架停止定位及锁定,由轴向移动装置、垂向升降装置及夹持机构组成。轴向移动装置由伺服电机驱动直线运动模组传动、导向及支撑;垂向升降装置顶端设置夹爪锁定机构,由气缸驱动实现挡停机构垂向升降及夹紧功能。

(5) 质量质心测量系统用于舱段及全弹质量与轴向质心测量,由安装在支撑平台内部顶升称重机构组成。称重机构在非测量状态时落下,低于辊杆导轨不影响舱段传输与装配。当质量质心测量时,顶升机构驱动测量架上升,使舱段与承载托架脱离实现导弹质量及质心测量。

(6) 几何测量系统选用 FARO 关节测量臂,测量臂安装座采用轻量化、速装式设计便于快速拆装。该平台采用 2 个测量关节臂对导弹外形上标识关键点进行测量,能够实现全部测量点覆盖,并通过蛙跳方式实现两次测量坐标系拟合与转换。

1.3.2 仿真与原理分析

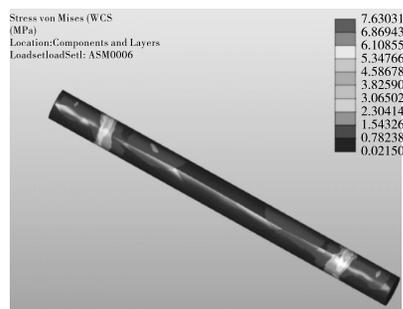
(1) 承载托架仿真分析

为验证承载托架结构设计的有效性及其可靠性,综合考虑舱段装配过程中托架传输及承重情况,对一些关键零部件^[11]如滚轮支撑轴(材料为 45#钢、屈服强度约为 355 MPa)、法兰盘(材料为 H68 黄

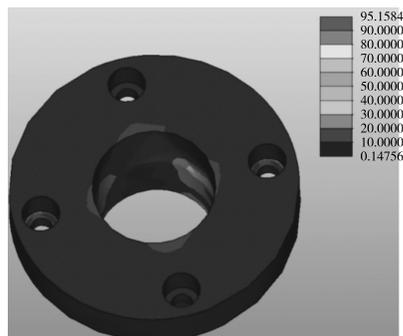
(2) 承载托架结构组成如图 3 所示,承载托架用于舱段支撑和装配时舱段姿态调整。根据舱段有无弹翼和尾翼托架可设计 2 种规格,如图 3(a)和图 3(b)所示,一种为大圆弧托架支撑导引头和战斗部,一种为小圆弧托架支撑发动机舱和舵机舱。托架采用涡轮连接螺旋传动机构实现垂向升降运动,蜗杆连接调整手柄进行舱段姿态微调,上部设置滚轮实现舱段 360°方向旋转。

(3) 辊杆传输机构包含辊杆组件、伺服驱动电机及同步带传动装置。辊杆轴线与承载托架滑块底部轴承成 45°倾角接触,伺服电机驱动辊杆转动与轴承产生轴向摩擦分力,托架沿转辊方向直线前进或后退用于舱段装配时同向或反向传输。托架底部滑块轴承如图 3(c)所示。

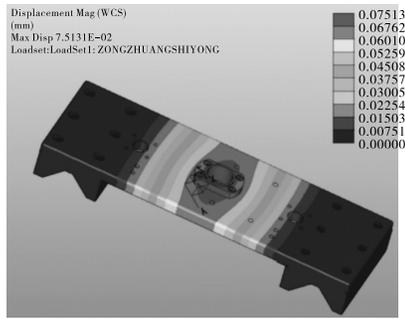
铜、屈服强度约为 300 MPa)、轴承座(材料为 40Cr、屈服强度约为 750 MPa)进行应力与位移仿真分析,仿真时加载 300 kg 载荷,应力与位移仿真分析如图 4 所示。



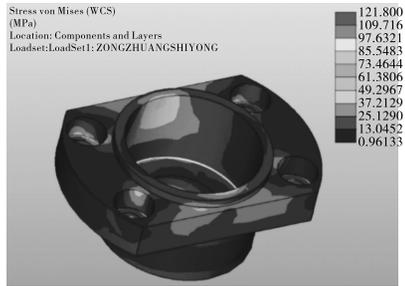
(a) 滚轮轴应力分析



(b) 法兰盘应力分析



(c) 底板位移分析



(d) 轴承座应力分析

图 4 应力与位移仿真分析

从图 4 可知,对 2 个滚轮两侧支撑弧形施加 300 kg 载荷后,滚轮轴最大应力 7.63 MPa,45#钢屈服强度约为仿真数据最大应力的 47 倍,满足使用要

求;对法兰安装板施加 300 kg 载荷后,法兰盘产生的最大应力为 95.15 MPa,仿真数据约为材料允许屈服强度的 1/3,不存在弯曲变形,可能满足使用要求;托架载重过程中压力通过轴承座施加到底座,施加载荷仿真分析可知底板中间位置仿真位移为 0.075 mm,轴承座仿真应力为 121.8 MPa,材料允许屈服强度约为仿真数据的 6.2 倍,满足设计和使用要求。

(2) 质量质心测量原理分析

质量质心测量系统测量原理^[12-13]如图 5 所示。

由力平衡知导弹质量与质心计算公式为:

$$P = P_1 + P_2 \tag{1}$$

$$X = (P_1/P) \cdot L_g \tag{2}$$

$$X_{CC} = X + L_1 - L_0 = (P_1/P) \cdot L_g + L_1 - L_0 \tag{3}$$

式中: P 为产品质量; P_1 和 P_2 分别为传感器 P_1 和 P_2 的读数; X 为产品质心到称重传感器 P_2 的距离, X_{CC} 为产品质心到产品测试基准的距离; L_g 为传感器 P_1 和传感器 P_2 之间的距; L_0 为产品测量基准到测量仪基准的距离; L_1 为测量仪基准到传感器 P_2 的距离。

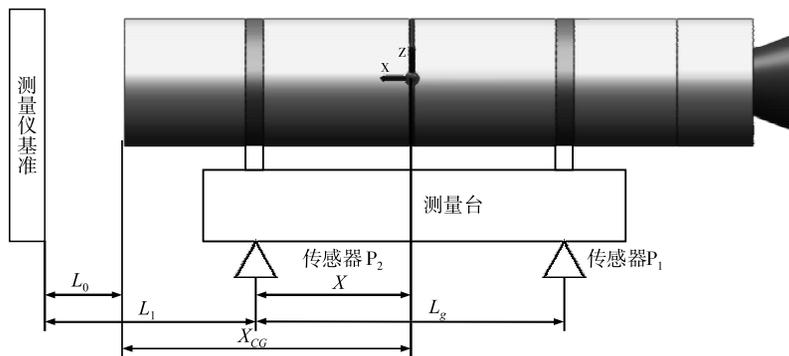


图 5 质量和 X 方向质心测量原理

1.4 网络系统设计

一体化平台网络系统分为信息管理层和工业控制层。信息管理层实现对舱段装配与测量过程的数据采集、查询、管理与数据化展示功能;工业控制层通过 PLC 控制器实现对下位执行机构如传输机构、挡停机构、质量称重机构及其他外围灯光、传感器、安全设备的控制功能。工业控制层和信息管理层通过 PROFINET 数据总线构成一个工业网络并进行通信,既可保证系统之间通信数据可靠性,也可由 PLC 控制器对总线上各个设备进行控制与协调。

1.5 控制系统硬件选型

结合舱段实际装配工艺流程与测量方法,从硬

件性能与可靠性等方面对控制系统关键硬件进行选型。

1.5.1 工控机

工控机是专门为工业现场设计的具有多种连接端口的计算机,其结构紧凑,抗震、抗电磁干扰性强,具有扩展性强、稳定性高、可靠性大等优点。该平台选用的 UNO-2184G 型研华工控机是一款集成高性能第二代英特尔 core i7 的高级控制器,支持 PCI-104 板卡扩展,支持 3 路显示及多个 USB/RS232/RS485 等接口,同时具备 4 个千兆网口,具有错容能力和负载均衡、链路聚合的网络分组能力,该控制器提供 PoE 模块可用于处理任何图像应用的视觉测

量系统中。

1.5.2 控制器与 IO 模块

PLC 是专门为中小型自动化控制系统设计的可编程逻辑控制器,具有硬件设计紧凑、扩展性强、通信功能大、集成性好、安全性高以及使用灵活等特点,广泛应用于控制各种设备以满足多个行业自动化控制需求^[14]。该平台选用西门子 S7 - 1200 系列 1215C 与 1212C 型号 PLC 控制器及 SM 系列数字量输入输出 IO 模块,PLC 集成 PROFINET 接口用于编程、HMI 连接及 CPU - to - CPU 通信集成工艺功能,用于计数、测量、PID 闭环控制以及运动控制等。S7 - 1200 系列 PLC 控制器技术参数参见文献^[15]。

1.5.3 伺服驱动器与电机

西门子 SINAMICS V90 伺服驱动器控制性能卓越,经济实用,稳定可靠,可与 SIMOTICS S - 1FL6 伺服电机组成伺服驱动系统。V90 驱动器采用 PROFINET 总线技术配合西门子 PLC 使用,通过博途软件程序编程组态实现伺服驱动系统运动控制功

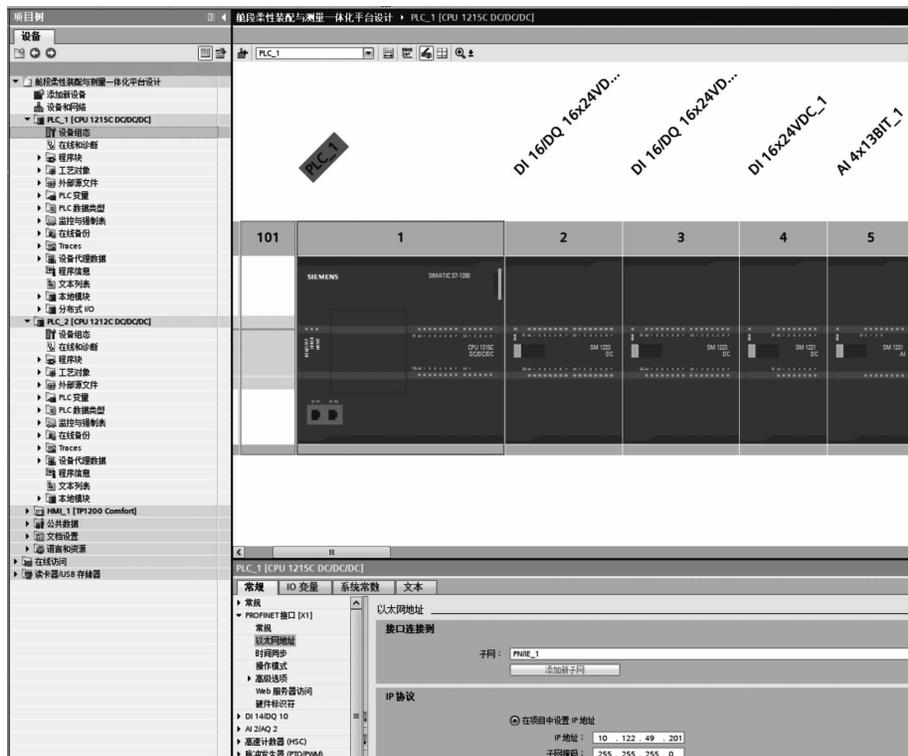
能。舱段柔性装配与测量平台控制系统共采用 5 个交流伺服驱动器与伺服电机,分别用来控制托架传输、托架挡停、质量称重顶升等机构进行运动,实现不同舱段在平台上自动化传输装配与质量质心测量等功能。

1.6 硬件组态与程序设计

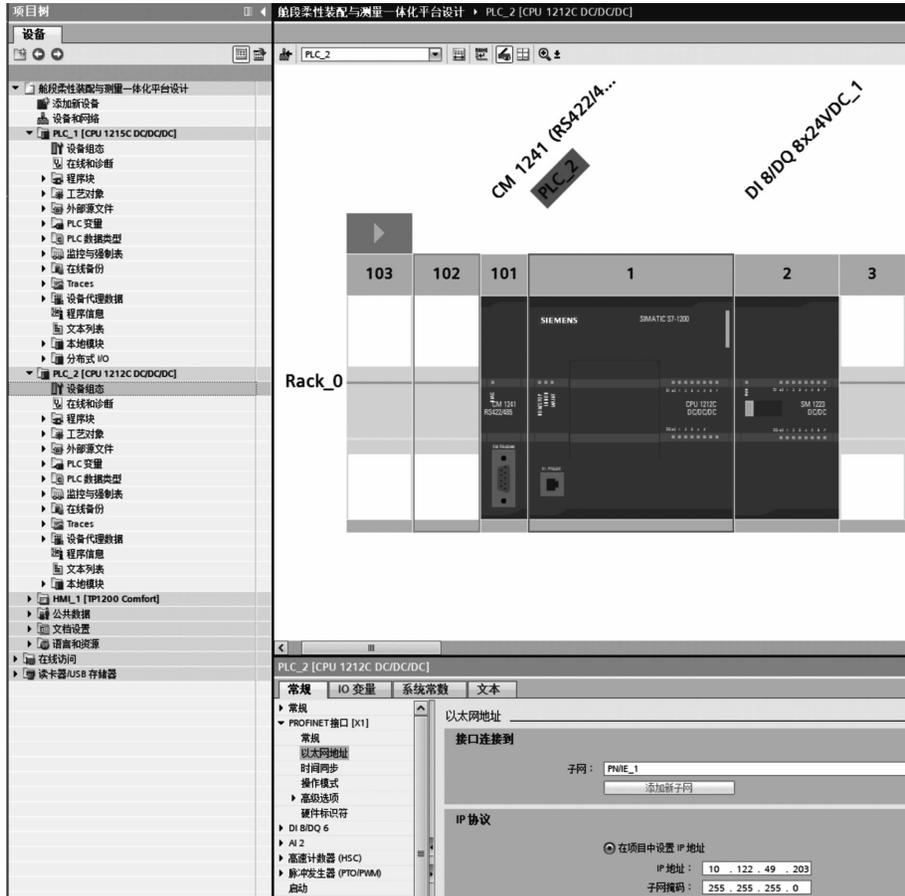
PLC 控制器作为舱段装配与测量平台运动控制的核心,不仅包括主控制器及 IO 拓展模块等硬件选型,还包括 PLC 控制系统软硬件组态、编程与设备之间数据通信交互等。

1.6.1 硬件组态与参数设置

博途 TIA 软件是一款功能强大的自动化编程工具,用于西门子 PLC 编程、调试、监控和诊断,支持多种不同的通信协议接口,实现多种不同工业自动化设备之间数据交换与通信^[16]。舱段柔性装配与测量平台控制器及 IO 模块等硬件组态与参数设置如图 7 所示。



(a) 1215C控制器组态

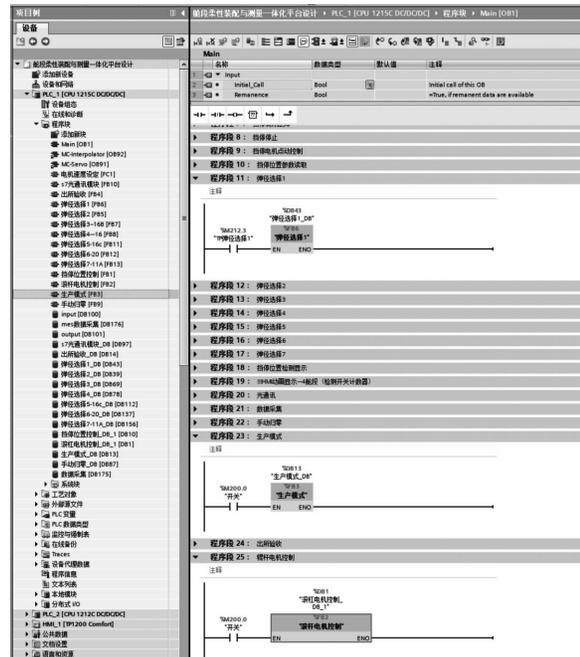


(b) 1212C 控制器组态

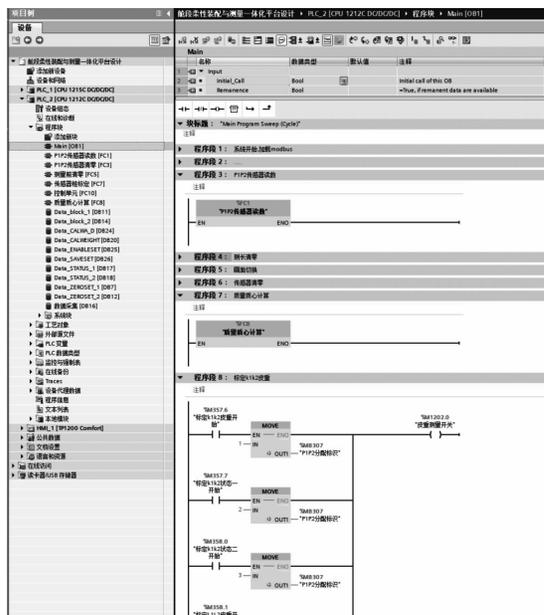
图6 控制器硬件组态与参数设置

1.6.2 PLC 程序设计

控制系统硬件组态与参数设置完成后,根据舱段装配工艺流程与测量方法对控制系统软件部分进行 PLC 程序编程设计。1215C 控制器主要对辊杆传输机构、挡停机构、弹径选择、生产模式、灯光报警、数据通信与采集等部分功能进行程序设计,如图 7 (a)所示。1212C 控制器对质量质心计算、控制单元、测力测量压力传感器数据标定与采集等功能进行程序设计,如图 7(b)所示。



(a) 1215C 程序设计



(b) 1212C程序设计

图7 1215C与1212C控制器程序设计

1.7 安全性设计

舱段柔性装配与测量一体化平台安全性设计方面采取如下多种措施:

(1)限速设计。平台设置空载、满载两档速度,每种速度中增加速度调节功能,只在设定档位速度以内控制运行。

(2)急停设计。极端异常情况下平台失控会造成不可预测后果,急停开关设置是一种常规避险措施。该平台在四角分别设置常闭式急停开关,保证在任意方向可以随时直接断开控制回路使平台紧急停止。

(3)复位设计。控制模式之间随机操作或模式切换过渡阶段突然断电,易造成二次开机下编码器数值紊乱等安全隐患,复位功能使开机后状态安全

可操作。

(4)防倾覆设计。承载托架与辊杆输送机构之间设计L型挡边防倾覆机构,保证在传送过程中舱段不会出现倾覆情况。

(5)防静电设计。平台结构设计时在支撑平台设置静电泄放连接点,电气控制柜配置标准接地线,有效避免静电干扰。

2 试验验证

舱段柔性装配与测量一体化平台设计完成后进行系统硬件安装与软件调试工作,通过对某型号舱段模拟件装配、标准体质量质心长度测量与几何水平测量等工艺试验对该平台功能进行验证。

2.1 舱段模拟件装配试验

一体化平台用于全弹总装阶段,实现导引头、战斗部、发动机和舵机舱等舱体柔性装配,燃气舵、弹翼、尾翼等直属件安装,并对装配完成的导弹进行几何水平与质量质心测量。该平台满足多种型号舱段装配要求,通过辊杆传输、承载托架与挡停等机构协同作业,实现舱段自动化、柔性化装配,能够减轻工人劳动强度,提高舱段装配效率、精度及质量。

2.2 质量质心与长度测量试验

舱段装配完成后对导弹质量、质心及长度进行测量,该试验采用标准体1649为测量对象。标准体经过南京市计量监督检测院校准,质量为534.100 kg,总长为4701.80 mm,到两端面 G_A 和 G_B 质心分别为2350.00 mm和2351.80 mm。依据测量原理对标准体校准后,通过一体化平台对标准体质量质心及长度测量进行验证试验。标准体校准与测量基准如图8所示。



图8 标准体校准与测量基准

以标准体1649作为被测产品使用质量质心测量系统进行重复测量,对该输出数据进行采集,采集质量质心与长度数据见表1~表3。从表1~表3可知,使用舱段柔性装配与测量一体化平台测量结果和标准体理论值相比,质量测量误差小于0.1 kg,质心和长度的测量误差小于1 mm,误差值均符合平台设计与使用要求。

表1 质量测量结果

测量项目	测量次数	检验结果	
		$M_{测}/\text{kg}$	$ M_{标} - M_{测} \leq 0.1 \text{ kg}$
标准体1649 的质量 $M = 534.100 \text{ kg}$	第1次	534.110	0.010
	第2次	534.132	0.032
	第3次	534.036	0.094
	平均值	534.120	0.045

表2 质心测量结果

测量项目	测量次数	检验结果		误差分析
		$G_{A测}/mm$	$G_{B测}/mm$	$ L_{标} - G_{A测} - G_{B测} \leq 1 * 2 mm$
标准体 1649 的质心 $G_A = 2350.00 mm$ $G_B = 2351.80 mm$	第 1 次	2350.647	2352.123	0.970
	第 2 次	2349.533	2352.026	0.241
	第 3 次	2349.677	2351.255	0.868
	平均值	2349.952	2351.801	0.046

表3 长度测量结果

测量项目	测量次数	检验结果	误差分析
		$L_{测}/kg$	$ L_{标} - L_{测} \leq 1 mm$
标准体 1649 的总长 $L = 4701.80 mm$	第 1 次	4702.172	0.372
	第 2 次	4702.213	0.413
	第 3 次	4702.087	0.287
	平均值	4702.157	0.357

2.3 几何水平测量试验

通过集成在一体化平台上的 FARO 测量臂与软件 FARO CAM2018 对某金属棒头部偏斜角、侧边、尾边安装角及反角等位置采取 18 个测量点进行测量。一体化平台对金属模拟棒 5 次几何水平测量的数据结果如表 4,单位为 mm。

表4 金属棒 5 次水平测量结果

测量项目	要求值	平台实测值 1	平台实测值 2	平台实测值 3	平台实测值 4	平台实测值 5
头部偏斜角 1	0 ± 2	-0.465	-0.502	-0.437	-0.323	-0.401
头部偏斜角 2		0.193	0.437	0.412	0.237	0.238
侧边 1 安装角	0 ± 4.07	-0.563	-0.657	-0.821	-0.788	-0.903
侧边 2 安装角		-0.509	-0.562	-0.488	-0.421	-0.584
侧边 3 安装角		-1.079	-1.001	-1.333	-1.172	-0.968
侧边 4 安装角		0.666	0.587	0.703	0.436	0.751
尾 1 安装角	0 ± 1.96	-1.100	-1.038	-1.186	-1.169	-1.231
尾 2 安装角		-1.077	-1.050	-0.897	-0.785	-0.930
尾 3 安装角		-0.293	-0.325	-0.320	-0.335	-0.322
尾 4 安装角		0.073	0.119	-0.023	-0.056	-0.063
侧边 1 安装反角	0 ± 0.80	-0.075	-0.153	-0.346	-0.011	-0.022
侧边 2 安装反角		0.473	0.528	0.451	0.385	0.314
侧边 3 安装反角		-0.015	-0.175	-0.085	0.113	-0.215
侧边 4 安装反角		-0.400	-0.286	-0.321	-0.240	-0.147
尾 1 安装反角	0 ± 2.73	-0.658	-0.765	-0.568	-0.522	-0.840
尾 2 安装反角		0.264	0.193	0.259	0.200	0.051
尾 3 安装反角		-0.277	-0.300	-0.459	-0.225	-0.472
尾 4 安装反角		-1.439	-1.405	-1.234	-1.274	-1.217

一体化平台水平测量一致性分析如图 9 所示。图中横坐标对应数据为对比分析表中第 1 列 18 个测量项目,纵坐标为各测量点位测量值。

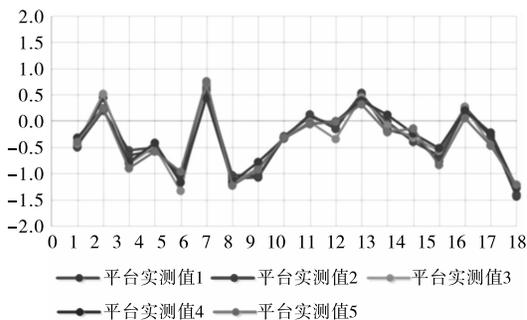


图9 水平测量一致性分析图

通过金属棒 5 次水平测量数据与要求值对比,可知表 4 中产品测量结果均满足要求。由图 9 可知金属棒在一体化平台上 5 次测量结果数值十分接近,数据一致性很高,满足测量使用要求。

3 结论

该文针对某导弹总装车间舱段装配与测量技术现状和存在的问题,提出舱段柔性装配与测量平台一体化设计需求,并对该平台组成进行设计,同时提出平台关键部件结构设计与仿真原理分析、控制系统硬件选型与组态、PLC 程序编程设计及安全设计

等方法,通过对某型号舱段模拟件柔性装配试验、标准体质量质心与长度测量及几何水平测量试验进行一体化平台功能性试验验证工作,试验表明:

(1)一体化平台设计合理可行,关键部件选型与设计有效、可靠;

(2)一体化平台满足多种弹径舱段柔性装配与质量质心、长度及几何水平测量的需求;

(3)一体化平台采用电驱动设计、多机构自动化协同作业,减少人工参与,提高装配与测量效率、质量,实现舱段自动化、柔性化装配及质量质心、几何水平测量数据可视化;

(4)一体化平台设计方法对舱段装配与测量技术普及应用具有较好借鉴意义,对未来进一步建设导弹总装智能化工厂具有一定探索价值。

参考文献:

[1] 董云龙,李祥飞,刘行,等. 航空航天领域机器人化智能装配技术综述[J]. 人工智能,2022(03):6-20.

[2] 袁桢棣,周愿愿,张解语,等. 导弹舱段六自由度并联调姿托架设计及运动学分析[J]. 机械设计与制造,2022(01):202-205.

[3] 吴昉,李桢,张礼立. 数字化柔性装配生产线的建设方法与实践[J]. 自动化仪表,2022,43(10):86-90.

[4] 赵罡,李瑾岳,徐茂程,等. 航空发动机关键装配技术综述与展望[J]. 航空学报,2022,43(10):475-507.

[5] 刘如才. 飞行器舱段柔性装配系统设计与控制仿真研

究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[6] 宋兴君. 导弹舱段对接中的非接触测量系统设计与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.

[7] 李亚军. 基于双机器人协同的舱段对接装置结构设计与分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2021.

[8] 张解语. 面向舱段对接的位姿自动化测量关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2021.

[9] 高健程. 筒类舱段调姿机构控制系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.

[10] 陈胜政,高晓波. 小型飞航导弹发展综述[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(01):94-99.

[11] 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(Z1):94-98.

[12] 李强,黄小春,张志博,等. 大型运载火箭质量质心测量系统校准方法[J]. 机械工程与自动化,2019(2):5-7.

[13] 刘明勇,罗锋,徐健. 质量质心测量方法及实例分析[J]. 制造技术与机床,2019(04):138-141.

[14] 段礼才. 西门子 S7-1200 PLC 编程及使用指南[M]. 北京:机械工业出版社,2020.

[15] 西门子(中国)有限公司. S7-1200 可编程序控制器[Z]. 2023.

[16] 廖常初. S7-1200 PLC 编程及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2021.

(上接第 20 页)

[13] 王兴鑫. 高精度快速升降温热电阻检定恒温槽的研制[D]. 泰安:山东农业大学,2022.

[14] 庞党锋,宋亚杰,王春光,等. 基于工业机器人的数控加工控制系统设计[J]. 机床与液压,2020,48(21):62-64.

[15] 罗旋,李永忠. Modbus TCP 安全协议的研究与设计

[J]. 数据采集与处理,2019,34(06):1110-1117.

[16] 韩丹涛,赵艳领,公彦杰. 一种工业以太网状态安全监视器的设计[J]. 电子测量技术,2019,42(08):110-114.

[17] 张建敏,罗昶,王建森,等. 省级气象计量检定业务自动化系统[J]. 应用气象学报,2012,23(02):251-256.

(上接第 24 页)

[8] 郑田娟. 基于可编程逻辑控制器的变频调速系统研究[J]. 现代电子技术,2019,42(19):164-167.

[9] 张丽. 基于 PLC 和 HMI 的电机无级调速系统的设计与实践[J]. 今日制造与升级,2022(10):45-47.

[10] 郑伟卫. 基于 PLC 控制的三相异步电动机变频调速系统设计[J]. 能源与环保,2022,44(07):260-264.

[11] 王付军,宋妮俐,杨长青. 基于 Modbus RTU 协议的 Delta 系统与西门子 S7-200 SMART PLC 串行通信[J]. 工业控制计算机,2023,36(08):38-39.

[12] 李建飞,王万成,卢斯煜,等. 基于 Modbus RTU 协议

实现 DCS 与 PLC 实时数据通讯设计[J]. 自动化应用,2021(03):76-78.

[13] 张伟,周鹏飞. 基于 S7-300 PLC 和 WinCC 组态软件的自动打料控制系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2020(03):99-102.

[14] 乔社娟,陈佩. 基于 PLC 与组态软件的异步电机在线故障诊断设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2021(06):17-20+73.

[15] 孙子贻,孙国靖,孙延寿,等. 基于 PLC 与力控组态软件的液化天然气工厂模拟仿真系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2021(03):22-25+70.