

放大器光机模块现场安装工艺设备的结构设计

刘小波^{1,2}, 袁晓东², 谢志江³, 倪卫^{2*}

¹重庆电子工程职业学院机械工程系, 重庆 401331;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

³重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044

摘要 为应对激光装置对放大器光机模块更大规模的现场安装需求和提高现有放大器光机模块现场安装工艺质量,分析了现有光机模块现场安装工艺设备结构设计的不足,研究了放大器光机模块现场安装工艺流程、安装精度与时间分配,构建了光机模块现场安装工艺设备的功能结构树,并优化了分功能和结构集成。在此基础上,提出了适用于现有装置放大器光机模块的新现场安装工艺设备设计方案,分析了该设备的实现过程和优势,开展了新设备的关键结构理论计算、工程设计、分功能验证和整机调试,并用于某激光装置光机模块批量装校验证试验。结果表明,该设备满足光机模块现场安装工艺指标的要求,验证了该设备结构设计的可行性。

关键词 光学器件; 放大器; 现场安装; 功能结构; 自动转运; 精密对接; 洁净高效

中图分类号 TH122

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.071407

Structural Design of Field Installation Process Device for Optomechanical Module of Amplifier

Liu Xiaobo^{1,2}, Yuan Xiaodong², Xie Zhijiang³, Ni Wei²

¹Department of Mechanical Engineering, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China;

²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

³State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract In order to meet the developing demands of subsequent larger scale amplifier and improve the field installation quality of the optomechanical modules of existing amplifier, we analyze the flaws in the structure design of the field installation process device, study the technique flow, accuracy and time-allotment of field installation, construct the function structure tree of the field installation device, and optimize the sub-function and structure integration. Based on these studies, the design sketch of the new field installation device is proposed, which is suitable for the optomechanical modules installation of existing amplifier. In the following, realization process and advantages of the system are further analyzed, the theoretical calculation of key structure, engineering design, sub-functional verification and machine debugging of the new device are carried out before it is used to verify design effectiveness through batch installation mission test of optomechanical modules of existing amplifier. The results show that the new device meets the requirements of the field installation of optomechanical modules of amplifier, the feasibility of its structural design is verified.

Key words optical devices; amplifier; field installation; function and structure; automated transshipment; precisely alignment; clean and efficiency

OCIS codes 140.3280; 230.4480; 230.7400

收稿日期: 2018-01-05; 收到修改稿日期: 2018-02-01

基金项目: 国家重大科技专项资助项目(S033.9)

作者简介: 刘小波(1977—),男,博士,副教授,主要从事光机元件精密装校方面的研究。E-mail: cquliuxb@cqu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: daweyim@126.com

1 引言

目前,世界上主要的惯性约束聚变(ICF)建成装置主要有美国国家点火装置(NIF)和中国神光-III激光原型装置^[1]。高功率钕玻璃激光驱动器是ICF装置的重要部件,而激光驱动器的“核心”部件是氙灯抽运的钕玻璃放大器^[2],它主要由激光片、氙灯、供能单元和框架装配单元(FAU)组成。基于激光实验特性、集成批量安装和运行维护等多方面考虑,激光驱动器将这类光学元件按一定规律集成在某特定金属框架内形成光机模块,也称在线可替换单元(LRU)。放大器LRU的现场安装与维护采用下装方式,提高了集成安装和维护效率^[3]。随着ICF物理实验对激光输出能量和功率要求的不断提高,放大器的总体规模将变大,且对放大器光机模块现场安装质量(安装精度、效率和洁净度)的要求也会更高。因此,研究放大器光机模块高效率、高精度、高洁净的现场安装对我国ICF装置的研制有极其重要的意义。

近年来,为提高放大器光机模块现场安装质量和安装设备的自动化水平,国内外学者在此领域做了很多工作。在NIF/法国兆焦激光器(LMJ)放大器样机研制阶段,Horvath^[4]所在团队研制了一套放大器光机模块现场安装工艺设备,虽然该设备的机械操纵较多,但有效支持了放大器样机功能验证及光机模块现场安装流程测试,达到了少模块的现场安装质量要求。在NIF建设阶段,Tiszauer等联合RedZone Robotics公司和AGV Products公司研制了通用性较强的光机模块现场安装工艺设备^[5],该设备的自动化程度较高,完成了大批量光机模块的现场安装任务。为提高该设备特别是转运车的通用性,并兼顾其他类光机模块的转运,该设备的整体结构不仅复杂,而且体积庞大。

与美国NIF装置相比,我国神光装置结构特点决定了我国同类设备的研制有所不同。为此谢志江等^[6]根据当时我国装置的特点提出了“专用车+洁净传递箱+支撑平台”的光机模块现场安装工艺设备设计思路,并完成了样机研制,支撑了我国4×2-3放大器样机的验证工作,但同NIF建设阶段一样,为兼顾多类型光机模块的现场安装,设备的总体结构比较复杂,机电物理分离严重,自动化程度较低,且过分依赖人工操作经验。在神光-III主机建设时期,谢志江等^[7]开展了基于4×2-3时期的光机模块现场安装工艺设备的改进工作,机电集成度得到了

提高,但激光实验区LRU的转运、传递箱与FAU的粗定位仍然依赖人工操作经验。随后,谢章^[8]根据已有资料创新性地提出了采用6-PSS并联机构平台来实现光机模块的垂直提升,但他仅着重分析了该并联机构平台的运动学、动力学及工作空间。同样,邹顺^[9]对光机模块现场安装也进行了一定研究,但研究重点放在了模块精密对接和整机设备结构刚度与动态分析上。通过对相关文献进行分析后发现,目前国内针对该类设备的功能优化、转运自动化及精密高效自动对接方面的研究还比较少,特别是随着ICF研究的不断深入,更大规模的放大器对光机模块的大规模安装要求,以及安装工艺设备性能如何提升,以实现更多模块的高效率、高精度、高洁净现场安装等方面的研究比较少。

本文从研究放大器现场安装的工艺与要求出发,分析国内现有设备结构设计的不足,根据模块安装流程合理分配安装关键节点的模块安装精度与耗费时间;应用功能设计法构建设备功能结构树,优化设备分功能和结构集成;在此基础上,提出适用于现有装置放大器光机模块的新现场安装工艺设备设计方案,并开展样机研制,为我国即将研制的特大型激光驱动装置提供技术支持。

2 工艺流程与要求

2.1 安装流程与现有设备性能分析

我国现有的某激光装置的光机组装区(OAB)、激光实验区(LAB)及两区物流通道如图1所示,百级洁净的光机组装区与十万级洁净的激光实验区相距约40 m,设计人/物流通道连接两区。首先在光机组装区离地面约0.8 m高的装配站上完成光机模块的组装和离线调试,然后进入光机组装区门口待命的百级洁净传递箱内,再经物流通道传送至激光实验区离地面约3.2 m高的光路FAU正下方,姿态调整后向上举升插入百级洁净的FAU内,直至到位;最后完成厢内模块的锁紧,至此完成模块的现场安装。拆卸过程相反。

现有的光机模块现场安装工艺设备主要由传递箱和对接平台组成,用传统叉车代替了专用车。光机模块跨区传送由经验丰富的操作人员开着叉车完成(转运装有光机模块的传递箱);光机模块与FAU姿态对接由集成了气悬浮技术的多自由度对接平台完成^[10],其中气悬浮平台实现模块与FAU的粗定位。该定位方式的定位精度较低,且至少要由4人共同操作方能完成。光机模块与FAU姿态对接全程不仅人

工参与较多,而且严重依赖人工经验。若运行工人不在现场,就会有出现停产的隐患,这与设备的全程自动化对接还有很大差距。光机模块的姿态调整是通过调整对接平台和传递箱的共同姿态间接获取的,而

光机模块质量仅为传递箱质量的 1/4,占整个设备质量的 1/10,光机模块姿态调整功耗大,机械效率低。由于现有的光机模块现场安装工艺设备存在着上述诸多不足,因此有必要开展此类设备的研制工作。

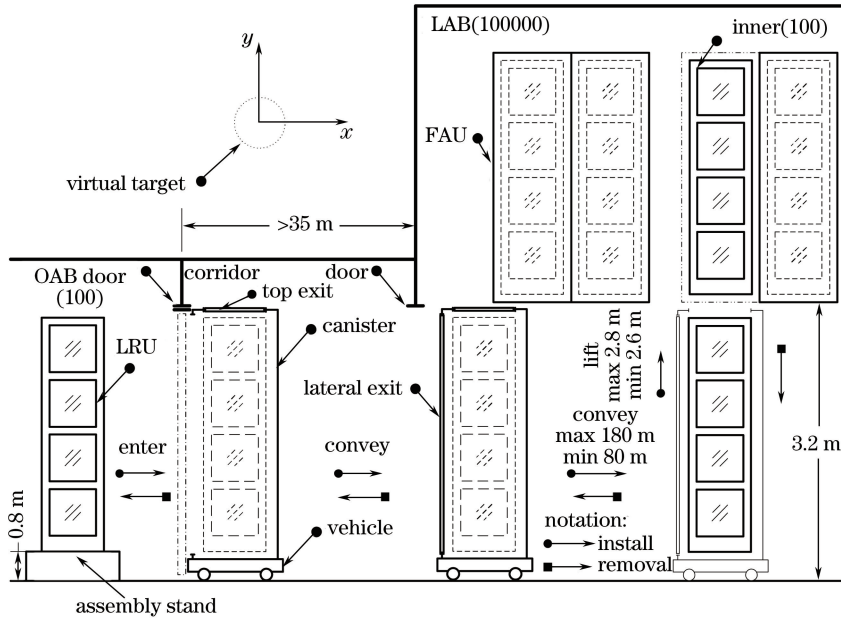


图 1 LRU 现场安装的空间布局与安装示意

Fig. 1 Spatial layout and installation schematic of field installation for LRU

2.2 安装要求

根据 LRU 与 FAU 的定位尺寸、接口尺寸、位置精度以及装置打靶时间间隔要求,该激光装置对光机模块现场安装的技术要求主要有:现场安装时限(每件) ≤ 30 min,线误差 ≤ 0.5 mm,角误差 $\leq 0.1^\circ$,百级洁净不能破坏^[11]。对安装工艺设备的技术要求则转换为:模块调平角和对准角误差 $\leq 0.1^\circ$ ^[3],定位线误差优于 0.5 mm。另外还包括安装设备对 LRU 位姿的调整范围、安装时间(效率)、洁净度、设备自动化以及机械效率等技术指标。

由前述分析可知,现有设备对放大器光机模

块不能很好地满足现场安装的部分要求,但光机模块安装流程和安装的最终定位精度得到了验证。为适应光机模块更大规模的现场安装需求、更高的洁净控制要求以及更短的现场安装时间,现场安装设备的自动化水平必须要提升,同时也必须要优化模块安装时间和分配模块的定位精度。为此,应结合安装流程合理分配关键节点。根据目前机械结构和电气控制的技术水平,模块现场安装精度与安装时间的分配见表 1。这些参数将成为提升放大器光机模块安装自动化水平的重要输入条件。

表 1 模块现场安装精度和时间分配表

Table 1 Allocation table of accuracy and consume time during module field installation

Main install process	Time /min	Position accuracy /mm	Orientation accuracy /($^\circ$)
Dock between LRU and canister in OAB	5	0.25	0.05
Convey & dock accuracy	8	10	2
The first stage lift	2	0.05	0.5
Dock between canister and FAU in LAB	3	0.05	0.1
Dock between LRU and FAU at LAB	2	0.25	0.05
The second stage lift	7	0.05	0.1
Lock	3	0.5	0.1
Total	30		

3 功能设计与优化

大多数设备的设计离不开设备自身的功能设计与优化。从系统工程学的角度出发,将设计需求转化为有规范性的功能描述是设备功能设计的前提,而功能结构(含子功能和功能元)表达了不同层次和不同作用功能之间的关联性,因此准确建立、选择和确定功能结构是设备功能设计的重要内容^[12]。完整的设备功能设计还应包括结构布局设计和同一功能多种机械实现方式的权重取舍。设备功能优化是在现有设备功能的基础上,对功能结构和功能元的最佳重新排布,以及引入新元素以寻求对相关配套

的条件、环境等的最佳匹配和最快响应。

借鉴现有设备已成功验证的结构设计,构建了如图 2 所示的放大器模块现场安装工艺设备功能结构树。该设备功能结构树主要体现了三个层次:分功能层、功能元层及功能实现层。处于分功能层的传送、对接、举升描述了光机模块现场安装的主要工序;处于功能元层的光机模块沿自身坐标系的移动姿态调整和旋转姿态调整是对动力源和机械传动结构提出的具体要求和具体运动方式,也是设备采取机构实现的指南;处于功能实现层的转运子设备、对接平台、举升机构和传递箱是光机模块运动姿态调整的实现载体或集合形式。

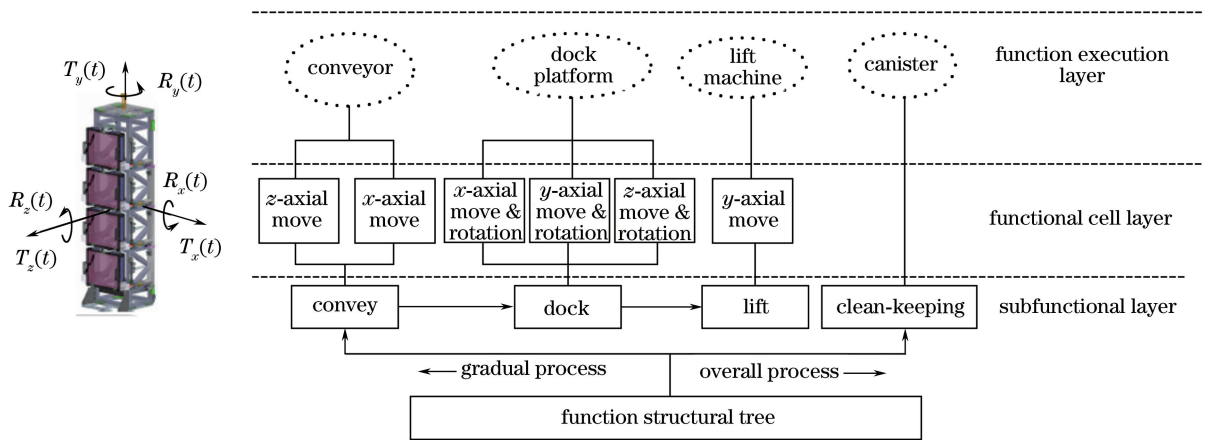


图 2 现场安装工艺设备功能结构树

Fig. 2 Function structural tree of field installation device

图 2 所示的功能结构树是开展功能优化的基础。此处功能优化主要体现为功能元的整合、功能实现层的归聚细化以及能与环境有最佳响应的最新元素的选用。优化前后的设备功能布局对照见表 2。从表 2 可

以看出:采用自动导引车(AGV)新元素来实现转运和粗定位,可以提高转运和对接的自动化水平及安装效率;传递箱集成了比优化前更多的功能结构,可使机械效率得到提高,设备的整体结构更加紧凑。

表 2 设备功能布局对照表

Table 2 Functional layout comparison table

Item	Before optimization	After optimization	
Main-function	Convey	Dock platform, forklift	AGV
	Coarse dock	Air cushion	AGV
	Precisely dock: θ_x/θ_z	Dock platform	Level kinematics in canister
	Precisely dock: $\theta_y/x/z$	Dock platform	Align kinematics in canister
	Lift: y	Lift machine in canister	Lift machine in canister
Other-function	Clean: class 5	Seal canister	Seal canister
Energy supply	Dock assist-CCD	Manual model principal	CCD principal
	AC/DC/compressed air	CCD auxiliary	Manual model auxiliary
		Compressed air, AC supply	Battery

Note: AC represents alternating current; DC represents direct current.

优化前的设备技术指标和优化后设备拟达到的设计指标见表 3。从表 3 可以看出,设备的对接精

度、自动化程度以及安装时间得到改善,操作人数减少,位姿调整范围缩小,有利于结构设计的紧凑性。

表 3 设备技术参数对照表

Table 3 Technical parameters comparison table of device

Item	Before optimization	After optimization	
Dock precision	Coarse dock liner /mm	$< \pm 20$	$< \pm 5$
	Coarse dock angular /($^{\circ}$)	$< \pm 5$	$< \pm 2$
	Precisely dock: θ_x/θ_z	$< \pm 0.1^{\circ}$	$< \pm 0.1^{\circ}$
	Precisely dock: $\theta_y/x/z$	$< \pm 0.1^{\circ}; < \pm 0.5$	$< \pm 0.1^{\circ}; < \pm 0.5$
Dock-adjust-range	Precisely dock: θ_x/θ_z	$\pm 5^{\circ}$	$\pm 3^{\circ}$
	Precisely dock: $\theta_y/x/z$	$\pm 7.5^{\circ}; \pm 75$	$\pm 5^{\circ}; \pm 50$
Lift precision /mm	Lift: y /mm	$< \pm 0.5$	$< \pm 0.5$
	Lift load /kg	< 800	< 600
Convey load /kg		< 4000	< 2500
Cleanliness		Class 5	Class 5
Energy supply	AC/DC/compressed air	Compressed air, AC supply	Battery
Operators number		Above 4 people	Under 2 people (desired)
Operating mode		Manual model in chief	Self-service
Installation time /min		30	25

4 结构设计

4.1 设计方案

为在现有激光装置上验证放大器光机模块“新形势”下的安装流程,在现有设备设计理念的基础上,针对优化后的设备功能布局设计了如图 3 所示的放大器光机模块新现场安装工艺设备。它主要由提供转运的 AGV、能提供洁净环境的传递箱、集成了 LRU 举升及姿态对准调整的垂直提升平台,以及通过调节洁净箱水平姿态达到 LRU 姿态调平的可调支腿等组成。根据表 2 的有关内容,将垂直提升机、模块姿态调整机构(含对准机构、调平机构)都集成在传递箱内。

LRU 现场安装实现过程为:AGV 传送空传递箱至 OAB 门→AGV 与 OAB 内的 LRU 姿态对接→如图 3(a)所示的 LRU 水平方向入箱和销柱锁定→AGV 传送 LRU 至 FAU 正下方→AGV 实现传递箱相对 FAU 的粗定位→传递箱一级提升和水平姿态调整→CCD 检测 LRU 相对 FAU 的对准位姿误差→传递箱内设机构修正 LRU 对准位姿→如图 3(b)所示 LRU 举升出箱到位锁紧→AGV 与空传递箱返回泊车位。

新设备设计方案与现有设备比较具有以下优点:一是摒弃了传统叉车,采用激光 AGV 实现光机模块全自动跨区转运以及 LRU 与 FAU 自动粗定位,现场安装效率和粗定位精度可以提高;二是将多自由度对接平台、提升机集合在密闭传递箱中,实现了光机模块的保洁、姿态调整及举升功能,可使整体结构更加紧凑,机械效率得到提高;三是采用机器视

觉技术实现 LRU 与 FAU 的自动对接,安装效率和对接精度将会提高。总之,与现有设备相比,新设备设计方案的优势主要体现在光机模块现场安装自动化水平和安装质量都得到提高。

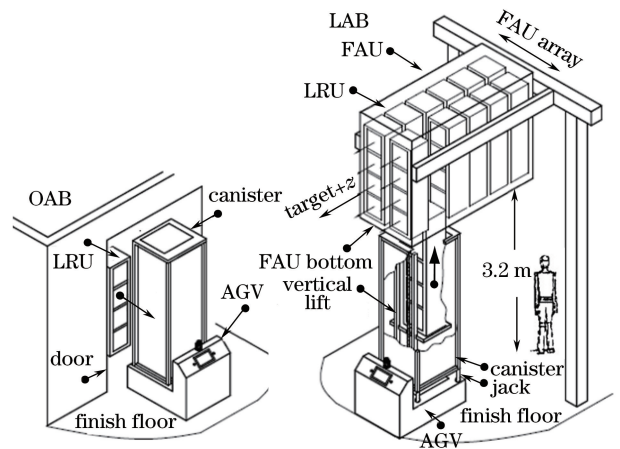


图 3 设备设计方案与实现示意。

(a) LRU 入箱过程;(b) LRU 入 FAU 过程

Fig. 3 Design plan and install sketch of device.

(a) LRU insert canister process;

(b) LRU insert FAU process

4.2 关键结构设计

4.2.1 AGV 设计

要实现 LRU 的洁净转运必须在转运过程中将 LRU 置于密闭传递箱内,而传递箱又集成了许多功能结构,因此转运总质量将达到 2500 kg。尽管目前国内外 AGV 技术比较成熟,但重载型(如负载高于 2500 kg)、有洁净要求且要求蓄电池组体积小的 AGV 却没有。所述 AGV 为本课题组自行开发的,如图 4 所示,AGV 主要由车架、转向驱动单元、惰

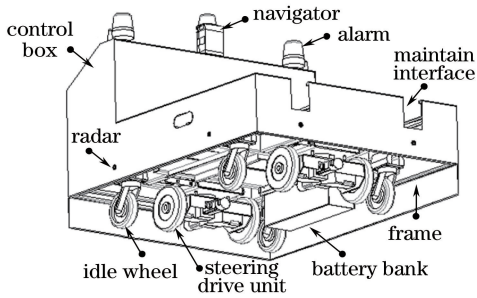


图4 AGV结构设计布局

Fig. 4 Structural design layout of AGV

轮、电池组、导航仪、雷达监测器及控制箱等构成。它的驱动和转向采用两组基于差速原理的驱动单元来实现。AGV由48V镍氢电池(较同容量的铅酸电池体积更小)供电。自动导引采用激光制导。AGV由其四周布置的雷达检测障碍物信号,信号送入控制箱后传达给执行机构避障。

1) 驱动力与力矩的理论计算

由汽车行驶动力学方程可得AGV驱动力与力矩分别为

$$\sum F = F_f + F_w + F_g \sin \gamma + F_a + F_r, \quad (1)$$

$$\sum M = \sum Fr + J\epsilon, \quad (2)$$

式中: F_f 为滚动阻力,且 $F_f = \mu G$, μ 为摩擦因数, G 为额定负载; F_w 为空气阻力; F_g 为额定负载重力

表4 蓄电池容量分配表

Table 4 Capacity allocation table of battery

Main install process	Time /min	Power /W	Consume capacity /(A·h)
Dock & insert between LRU and canister at OAB	2.5	900	0.78
Convey	8	600	1.66
Dock between canister and FAU at LAB	2.5	900	0.78
The first stage lift	2	1200	0.83
Dock between LRU and FAU at LAB	2.5	600	0.52
The second stage lift	5	400	0.69
Control system (inclusive CCD)	30	400	4.16
Total (one module, 30 min)			9.42
Total (eight modules, one day)			75.36

根据表4计算的电池容量数据,可选40块110 A·h/1.2 V镍氢电池串联组装供电,这样可以保证每天八模块工作制。另外,充电器也集成设计在车上。AGV到达泊车位后引出充电线,接入220 V交流电即可对蓄电池快速充电,一次充满大约需要2 h。

4.2.2 传递箱设计

如图5所示,传递箱主要由调平支腿、框架、三自由度平台、提升机、CCD、倾角传感器及亚克力玻

璃等组成,集成了对LRU的保洁、二级提升和基于CCD姿态自动调整功能。LRU二级提升:一级由箱外4套调平支腿实现;二级由箱内垂直举升平台完成。LRU位姿调整:传递箱与FAU的粗定位以及一级提升完成后,先由举升平台内的倾角传感器检测升降平台的水平角度误差,再由箱外4套调平支腿(机构原理见图5(b))完成LRU转角 φ_x 和转角 φ_z 的调整;然后由传递箱顶部布置的双CCD检测传递箱与FAU的对准误差^[13-14],再由传递箱内

加速度分量; γ 为坡度; F_a 为加速阻力; F_r 为惰轮回转力; r 为驱动轮半径; J 为转动惯量; ϵ 为转动角速度; r 驱动轮半径。
给定技术参数:额定负载为2500 kg,行驶速度(按最远距离和分配时间计算)为0.5 m/s,行驶加速度为0.25 m/s², $\mu = 0.018$, $\gamma = 0.5\%$, $F_w = 0$, $r = 0.08$ m,采用(1)式计算驱动力 $\sum F = 1240$ N;采用(2)式计算所需驱动力矩 $\sum M \approx 100$ N·m。若取机械效率为0.7,则每轮驱动力矩 $M \approx 36$ N·m。再选用合适的安全系数(2.5),则可选出满足扭矩和转速要求的直流伺服电机和L型减速机。

AGV定位精度主要取决于激光导航精度和行走精度。目前,激光导航仪(如SICK的NAV350)的线定位精度为 ± 4 mm,角定位精度为 0.5° ;减速机选用精密级。AGV定位精度将优于 ± 5 mm和 2° 。

2) 电池组选配计算

镍氢电池不仅要为AGV供电,还要为传递箱和所有控制系统供电。蓄电池的容量以A·h为单位,理论上,100 A·h的电池以10 A放电,则可持续放电10 h,但工程设计最多取0.7的系数。根据各功能单元用电功率和表1的时间分配可计算出用电量,见表4。

璃等组成,集成了对LRU的保洁、二级提升和基于CCD姿态自动调整功能。LRU二级提升:一级由箱外4套调平支腿实现;二级由箱内垂直举升平台完成。LRU位姿调整:传递箱与FAU的粗定位以及一级提升完成后,先由举升平台内的倾角传感器检测升降平台的水平角度误差,再由箱外4套调平支腿(机构原理见图5(b))完成LRU转角 φ_x 和转角 φ_z 的调整;然后由传递箱顶部布置的双CCD检测传递箱与FAU的对准误差^[13-14],再由传递箱内

3-DOF(机构原理见图 5(c))对准平台完成 LRU 转角 φ_y 、平移量 x 和平移量 z 的调整。另外,传递箱还要求有密闭性设计,完好的密闭性设计可保证箱外标准大气压的十万级空气不能侵入箱内高于标准大气压的百级洁净环境,从而保证了 LRU 的洁净不被破坏。传递箱密闭性设计主要采用了汽车挡风玻璃黏胶和冰箱门胶条技术。现有设备已验证了 LRU 的提升和位姿调整精度是满足要求的。

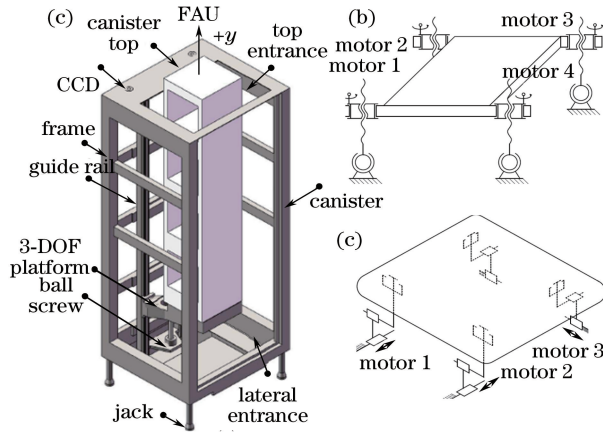


图 5 传递箱结构设计示意图。

(a) 3D 全图; (b) 水平调整; (c) 平面运动

Fig. 5 Structural design schematic of canister. (a) Overall 3D sketch; (b) level adjustment; (c) planar motion

5 测试与验证

因光机模块价格昂贵,现场安装要求较高,且新设备结构特别是 AGV 承载大,且有不稳定性,故必须在出厂前对关键结构单元进行功能测试和整机联调。研制过程中相继开展了如图 6 所示的 AGV 路径规划与 2.6 t 负载行走,以及传递箱的姿态调整与 616 kg 负载提升等分功能测试,测试结果表明各分功能满足表 3 的相应设计要求。

设备分功能测试完成后进行设备联调。设备进入激光实验区前进行了洁净处理,并通过了如图 7(a)所示的传递箱箱内百级洁净测试,并在随后进行了如图 7(b)所示的批量光机模块现场安装验证考核,对照表 1、表 3 和表 4 的数据可知:光机模块现场安装的精度、洁净度、安装时间、自动化对接及所需电池功耗等都是满足要求的,且在传递箱与 FAU 粗定位方面,定位精度由原设备的 ± 20 mm 提高至新设备的 ± 5 mm 以内;在操作人员数量方面,人数由不少于 4 人减至最多 2 人;在设备自动化程度方面,新设备在激光试验区运行基本上可以做到无人操作;单模块的安装时间由分配的 30 min 降至 25 min,说明光机模块的安装效率得到了提高。



图 6 分功能测试

Fig. 6 Subfunction test

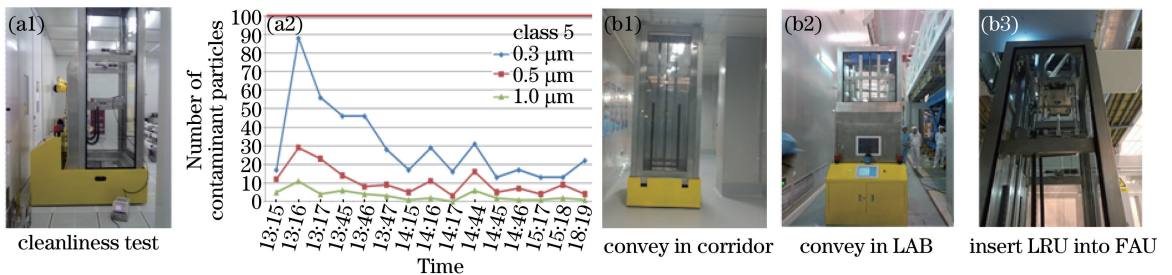


图 7 (a) 洁净测试与 (b) 样机装校验证

Fig. 7 (a) Cleanliness test and (b) installation test of field installation device

6 结论

为提高放大器光机模现场安装工艺质量和现有

安装工艺设备的能力,在深入剖析现有设备结构设计和研究光机模块现场安装工艺流程的基础上,结合光机模块现场安装要求,合理分配光机模块的安

装精度与安装时间,为放大器光机模块新现场安装工艺设备的功能结构设计提供了设计基础。

采用功能设计法,借鉴现有设备设计的思路,构建了三层功能结构树,优化了设备分功能和结构集成,提出了适用于我国现有装置的放大器光机模块新现场安装工艺设备设计方案。随后开展的新设备关键结构理论计算、工程设计和分功能验证,很好地体现了新研制设备的优势。经过某激光装置光机模块批量装校任务验证后可知,新设备不仅可满足光机模块的现场安装精度、洁净度及安装效率的要求,而且还可减少现场安装 LRU 的操作人员数量,提高设备自动化水平。

随着 ICF 研究工作的不断深入,后续激光装置会要求更大规模的放大器与之匹配,光机模块现场安装数量会更多,现场安装要求也会更高。本课题组的研究成果将为我国即将研制的特大型激光驱动装置提供一定的技术支持。但从新设备的使用情况来看,本课题组的研究成果还有不足的地方。在后续的研究中,应加大对传递箱洁净控制的研究,实现传递箱与 FAU“真正”的洁净、闭环。

参 考 文 献

- [1] Fan D Y, Zhang X M. Laser fusion and high power laser: history and progress [J]. *Physics*, 2010, 39(9): 589-596.
范滇元, 张小民. 激光核聚变与高功率激光: 历史与进展 [J]. *物理*, 2010, 39(9): 589-596.
- [2] Xu L, Yin D J, Lu H H, *et al.* Design and application of Nd:glass disc-amplifier as pump source of 5 PW Ti:sapphire chirped pulsed amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1201006.
徐露, 印定军, 陆海鹤, 等. 用于抽运 5 PW 钛宝石啁啾脉冲放大器的钕玻璃片状放大器的设计与应用 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1201006.
- [3] Liu X B, Wei X F, Yuan X D, *et al.* Research on technology of field installation for amplifier optomechanical components of NIF [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 092301.
刘小波, 魏晓峰, 袁晓东, 等. NIF 放大器光机组件现场安装技术研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 092301.
- [4] Horvath J A. NIF/LMJ prototype amplifier mechanical design [C]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 3047: 148-157.
- [5] Bonanno R E. Assembling and installing LRUs for NIF [C]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5341: 137-146.
- [6] Xie Z J, Zhang J, Xu X L. The development report on the field precision installation system of bottom-

load and lateral optomechanical modules of SG-III [R]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

谢志江, 张钧, 徐新来. 神光-III 主机装置下装侧装模块洁净精密装校系统研制报告 [R]. 重庆: 重庆大学, 2010.

- [7] Xie Z J, Ma W, Ni W, *et al.* Improved design and research of an installation and alignment equipment [J]. *Journal of Machine Design*, 2012, 29(7): 16-19.
谢志江, 马伟, 倪卫, 等. 一种装校设备的改进设计与研究 [J]. *机械设计*, 2012, 29(7): 16-19.
- [8] Xie Z. Design and research of six degrees of freedom position and posture dynamic adjustment bottom-loading equipment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
谢章. 下装六自由度位置姿态动态调整装置的设计与研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [9] Zou S. Research on technology of clean-precision alignment and installation of bottom loading system to optomechanical assembly [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
邹顺. 光学组件下装系统洁净精密装校技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [10] Ni W, Xie Z J, Yuan X D, *et al.* Design for a self-adaptive platform based on air cushion [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2009(3): 38-40.
倪卫, 谢志江, 袁晓东, 等. 基于气垫的自适应平台设计 [J]. *液压与气动*, 2009(3): 38-40.
- [11] Xu X L, Ni W, Xie Z J. The engineering design report on the field precision installation system of bottom-load and lateral optomechanical modules of SG-III [R]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
徐新来, 倪卫, 谢志江. 神光-III 主机装置下装及侧装模块现场精密安装系统工程设计报告 [R]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [12] Cai X X. Practical handbook of modern mechanical design methods [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
蔡学熙. 现代机械设计方法实用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [13] Fan R Q. Key technology research on visual measurement based on machine vision [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
范容谦. 基于机器视觉的位姿测量关键技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [14] Xie Z X, Chen W Z, Chi S K, *et al.* Industrial robot positioning system based on the guidance of the structured-light vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1015001.
解则晓, 陈文柱, 迟书凯, 等. 基于结构光视觉引导的工业机器人定位系统 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1015001.