

doi: 10.7690/bgzdh.2023.11.020

# 基于工业机器人的卫星舱板安装方法

李少华, 吕景辉, 徐波涛, 胡瑞钦

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 为解决机械式 6 自由度翻转架车进行舱板安装时存在的问题, 提出一种基于工业机器人的卫星舱板安装方法。采用移动机器人结合简易支架车的作业模式; 采用机器人柔性力控技术实现舱板的自动销钉导向装配。研制成果应用至我国北斗三号的舱板安装中, 单个舱板装配时间由以往的 1 h 以上缩短至 30 min 以内, 操作人员由 5 人减少至 3 人, 实际应用完成舱板装配 400 余次。结果表明: 该方法为北斗三号的密集研制争取了宝贵时间, 可为其他领域大重量部件的安装提供参考。

**关键词:** 装配; 卫星; 工业机器人; 柔性力控

**中图分类号:** TP242.2; V423.4<sup>+</sup>5 **文献标志码:** A

## Installation Method of Satellite Cabin Board Based on Industrial Robot

Li Shaohua, LYU Jinghui, Xu Botao, Hu Ruiqin

*(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)*

**Abstract:** In order to solve the problems in the installation of the cabin board on the mechanical 6-Dof turnover vehicle, a method of satellite cabin board installation based on industrial robot is proposed. The operation mode of mobile robot combined with simple support vehicle is adopted, and the robot flexible force control technology is used to realize the automatic pin-guided assembly of the cabin board. The research results have been applied to the installation of the cabin board of Beidou 3 in China, the assembly time of a single cabin board has been shortened from more than 1 hour to less than 30 minutes, the number of operators has been reduced from 5 to 3, and more than 400 times of cabin board assembly have been completed in practical application. The results show that this method can provide valuable time for the intensive development of Beidou 3, and provide a reference for the installation of heavy components in other fields.

**Keywords:** assembly; satellite; industrial robot; flexible force control

## 0 引言

卫星总装过程中, 舱板的对接装配是关键质量控制点, 也是重要的安全控制点。目前, 卫星舱板的装配方式有 2 种: 1) 借助 4~6 个自由度的纯机械式舱板翻转架车完成大质量舱板的装配过程; 2) 完全依靠操作者的手工抬扶完成小质量舱板的装配过程<sup>[1]</sup>。

传统装配舱板的模式装配精度不易控制, 装配效率较低, 特别在满舱状态下对接装配时, 易发生擦伤电缆或设备、定位销套卡滞等风险, 一定程度上影响卫星的研制质量和进度。北斗三号导航系统采用星座系统, 具有明显的批生产特点, 需要在 1~2 年完成十余颗卫星的总装工作。如果采用传统舱板对接装配方式, 将面临翻转架车投产数量大、维护成本高、装配效率低以及装配一致性差等问题。

笔者针对北斗三号导航卫星的舱板装配需求, 提出基于 6 自由度工业机器人的舱板装配方案, 克

服传统装配对接过程中操作不稳定、过多依赖人为因素和经验判断等不足, 减少对接装配过程的磕碰、擦伤、卡滞等风险, 提升对接装配环节的装配质量和安全性。同时, 采用移动机器人结合简易支架车的作业模式, 确保工业机器人在总装中的通用性和利用率, 提升航天器总装过程的机械化、自动化水平。

## 1 装配需求分析

北斗三号 MEO 卫星中 4 块舱板由于重量较大, 且与整星有电缆网连接, 需要使用机器人进行安装, 它们的质量特性、外形尺寸、定位销等关键指标如表 1 所示。4 块舱板对接拆卸过程, 需要舱板具有 6 个空间自由度的调整要求。因整星电缆走向限制, 服务舱的 3 块舱板以舱板的下边缘(-Z)为旋转轴进行开合, 载荷舱-X板以舱板的右边缘(-Y)为旋转轴进行开合, 单个卫星研制过程中各个舱板装拆次数如表 2 所示, 共需完成 26 次舱板装拆操作。

收稿日期: 2023-07-02; 修回日期: 2023-08-05

第一作者: 李少华(1985—), 男, 河北人, 硕士。

## 2 机器人装配方案

传统装配方案是基于翻转架车实现，翻转架车同时实现支撑和翻转对接功能，本方案采用机器人装配系统实现卫星舱板的安装工作。舱板的机器人辅助装配方案中，机器人替代原翻转架车的对接翻转功能，原翻转架车的支撑功能则通过结构相对轻便简易的支撑结构实现。

表 1 MEO 卫星需装配舱板装配需求分析

序号	舱板名称	满载重量/kg	长×高/mm <sup>2</sup>	舱板距地面高度/mm	定位销个数
1	服务舱+Y板	95.5	1 117×878	1 135.5	3
2	服务舱-Y板	93.7	1 417×878	1 135.5	3
3	服务舱-X板	28.9	1 117×878	1 135.5	3
4	载荷舱-X板	30.1	1 209×1 421	2 042.0	4

表 2 舱板拆装次数统计

序号	动作	次数	序号	动作	次数
1	开服务舱+Y板	3	5	合服务舱+Y板	3
2	开服务舱-Y板	3	6	合服务舱-Y板	3
3	开服务舱-X板	4	7	合服务舱-X板	4
4	开载荷舱-X板	3	8	合载荷舱-X板	3

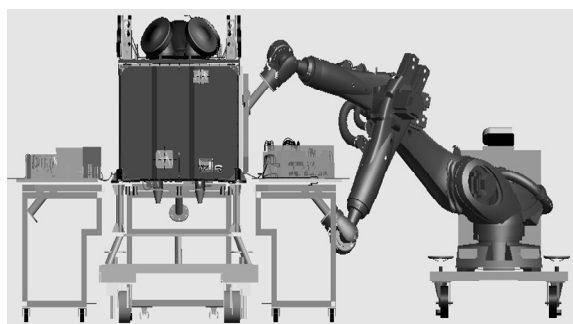


图 1 机器人舱板装配

### 2.1 机器人系统组成

机器人装配系统主要由移动平台、机器人、机器人控制器、机器人柔顺控制器、适配器和 6 维力传感器等组成，其系统组成如图 2 所示。

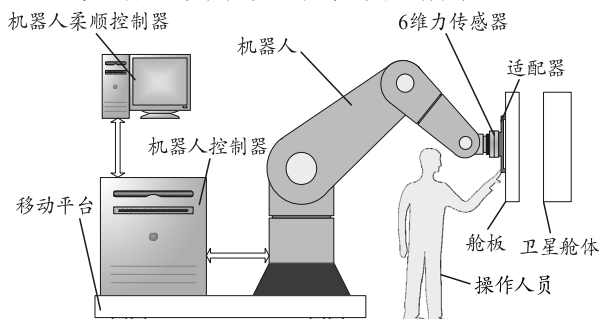


图 2 机器人装配系统组成

移动平台用于机器人在不同总装工位的快速转运及对机器人的支撑和固定。机器人及配套的控制柜用于完成舱板装配过程中所需位姿的调整及对

机器人舱板装配如图 1 所示，舱板在打开状态时在简易支架车上停靠在星旁，并安装有与机器人连接的适配器。在需要对舱板进行安装操作时，移动机器人转移至适当工作位置，机器人通过适配器与舱板连接，并完成装配操作。每块舱板只需要 1 套适配器及简易停放装置，与机器人的连接接口通用，这样单套机器人系统即可满足不同舱板的装配需求。

接。适配器实现机器人与待装配舱板间的连接。6 维力传感器是智能机器人重要的传感器，能同时检测 3 维空间(笛卡尔坐标系)的全力信息，即 3 个力分量和 3 个力矩分量，用于感知机器人末端待装配产品的受力。机器人柔顺控制器用于采集力反馈信息，并对机器人进行柔顺控制<sup>[2]</sup>。

由于航天产品单件、小批量的特点，此处应用机器人无法采用流水线作业中的全自动作业方式。在导航卫星舱板安装中采用了人机协作<sup>[2-5]</sup>的方式，大范围的位置粗调通过操作人员手动操控机器人完成，而在销钉导向的精密对接环节，则采用基于力反馈的柔顺控制技术，实现自动对接。

### 2.2 应用流程

机器人舱板安装应用流程如图 3 所示。应用中，首先采用人机协作方式，通过人工牵引或操作手持示教器使待安装舱板向目标位置运动，实现粗定位。在舱板进入舱上销钉的导向范围后(即销钉尖端进入销孔的范围内)，开启柔顺力控功能，通过实时采集 6 维力传感器数据并进行处理，得到舱板所受的外力，在此基础上，根据制定的机器人出力/位混合控制策略，形成控制指令，机器人按照施加的力/力矩的方向进行运动<sup>[3]</sup>。通过实时测量反馈，控制机器人做连续柔顺的运动，实现柔顺的销钉导向对接。

舱板安装流程如下：

- 1) 工位建立：移动平台将工业机器人运送至目标总装工位，并支撑固定；
- 2) 初始化：初始化 6 维力传感器和 6 自由度机器人；

3) 大行程粗定位: 操作人员通过示教器控制机器人的运动位姿, 在操作人员观察下带动待装舱板粗略移动至初始目标位置, 使舱板进入舱上销钉的导向范围, 大行程粗定位阶段工作完成;

4) 精确调整定位: 将机器人切换到柔性力控模式, 该模式下机器人基于对舱板所受的外力反馈实现柔性装配, 完成销钉柔顺导向对接;

5) 螺钉安装: 人工装配定位销和连接螺钉, 拆装待装舱板与工艺对接框的连接;

6) 装配完成: 组装完成后, 控制机器人按原路径返回至起始位置, 机器人复位。

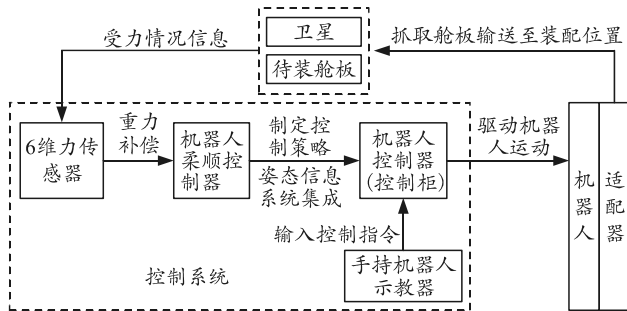


图 3 机器人舱板安装应用流程

### 3 机器人柔顺控制

卫星舱板装配应用中需要机器人具有顺应外界边界条件的柔性, 通过装配边界约束结合力反馈控制将部件安全安装到位<sup>[4]</sup>。为实现柔顺装配功能, 需要以下关键技术:

- 1) 机器人末端负载受力感知;
- 2) 机器人柔顺装配控制。

#### 3.1 机器人末端负载受力感知

图 2 中, 在机器人末端与负载之间安装有 6 维力传感器, 6 维力传感器测量读数中包含负载重力的影响, 要得到外部作用力的信息, 需要在算法中将负载重力的影响减除<sup>[5-9]</sup>。进一步, 机器人控制系统才能根据力反馈信息进行柔顺控制调整。要定量明确负载重力的影响, 需要预先测得负载的重心位置及重量。

在机器人动作过程中, 如果负载上没有外力作用, 此时 6 维力传感器得到的力与力矩数据完全来自于负载重力的影响。负载重力在 6 维力传感器坐标系中的作用示意如图 4 所示, 6 维力传感器的坐标系有 X、Y、Z 3 个坐标轴, 假设负载重力大小为 G, 负载中心在该坐标系中的位置为(x, y, z), 重力 G 在 X、Y、Z 轴方向的分量分别为 G<sub>x</sub>、G<sub>y</sub>、G<sub>z</sub>, 假设重力 G 对于 X、Y、Z 轴的力矩分别是 M<sub>gx</sub>、M<sub>gy</sub>、

M<sub>gz</sub>, 参照图 4 容易得到:

$$\left. \begin{aligned} M_{gx} &= G_z \times y - G_y \times z \\ M_{gy} &= G_x \times z - G_z \times x \\ M_{gz} &= G_y \times x - G_x \times y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

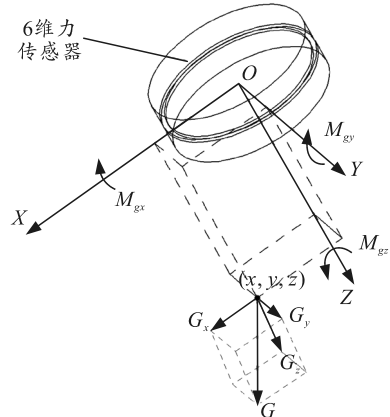


图 4 6 维力传感器坐标系中负载重力作用

通过调整机器人末端姿态, 进而使负载处于不同姿态, 如此可以得到 6 维力传感器坐标系下不同重量方向的测量数据, 利用这些数据即可求解得到负载的重心位置(x, y, z)及重量 G。

在有外力作用机器人末端负载的情况下, 假设通过 6 维力传感器得到的力数据为 F<sub>x</sub>、F<sub>y</sub>、F<sub>z</sub>, 力矩数据为 M<sub>x</sub>、M<sub>y</sub>、M<sub>z</sub>。

在机器人动作过程中, 负载重力方向在 6 维力传感器坐标系中随机器人姿态的变化而相应变化。通过对机器人安装角度的测定, 容易通过机器人控制器得到当前重力方向与力传感器坐标系 X、Y、Z 轴之间的角度 α、β、γ, 从而可计算各重力分量的大小:

$$\left. \begin{aligned} G_x &= G \times \cos \alpha \\ G_y &= G \times \cos \beta \\ G_z &= G \times \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将该结果其与已得到的重心坐标(x, y, z)代入式(1), 可以得到重力带来的力矩分量 M<sub>gx</sub>、M<sub>gy</sub>、M<sub>gz</sub>, 从而可以得到:

外力作用分量为:

$$\left. \begin{aligned} F_{ex} &= F_x - G_x \\ F_{ey} &= F_y - G_y \\ F_{ez} &= F_z - G_z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

外部力矩作用分量为:

$$\left. \begin{aligned} M_{ex} &= M_x - M_{gx} \\ M_{ey} &= M_y - M_{gy} \\ M_{ez} &= M_z - M_{gz} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 3.2 机器人柔顺装配控制

使用机器人进行工件装配过程中，工件与待安装主体接触后，接触位置产生力作用，如果力过大则会带来产品损伤；因此，在装配中需要控制工件的受力保持在安全范围，同时又要控制工件达到目标位置<sup>[10]</sup>。根据舱板的装配应用需求，分析了 2 种情况下的机器人柔顺控制策略：自由空间力控制、销钉导向对接。

#### 3.2.1 自由空间力控制

自由空间力控制是对机器人末端负载在笛卡尔坐标系中 6 个自由度的运动都采用基于力反馈的控制方式，工件完全按照外力的作用情况进行位姿调整，由外力的作用带来工件的位置调整，而外力矩的作用带来工件的姿态调整<sup>[5]</sup>。在这种模式下，工件可自动顺应外部的作用及接触情况进行位姿调整。

在卫星舱板的机器人装配中，该控制方式可实现舱板的“人机协作”操作，如图 5 所示。操作人员用较小的力即可对大重量舱板进行便捷的位姿调整<sup>[6]</sup>。

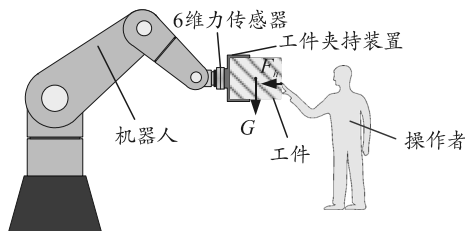


图 5 机器人人机协作

该控制方式也可用于紧固件安装的环节，如图 6 所示。当工件粗定位至安装位置后，安装面间留有缝隙，安装孔位也没有完全对准，在紧固件拧紧的过程中采用力反馈控制，工件可以在紧固件的力作用下自适应调整到位。

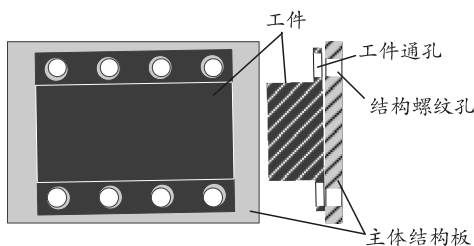


图 6 紧固件柔性安装

#### 3.2.2 销钉导向对接

在舱板装配中，舱板通过 3 个销钉实现在卫星舱体上的定位，在舱板销孔与销钉的装配过程，需对销钉与销孔间的作用力进行控制，销钉柔顺导向如图 7 所示。工件在向安装面靠近过程中，先在销

钉锥面处发生接触，此时可以根据得到的接触力信息，调整工件的位姿，使工件能够在保持受力在安全范围的同时沿销钉向安装面接续靠近，直至工件达到装配位置<sup>[7]</sup>。

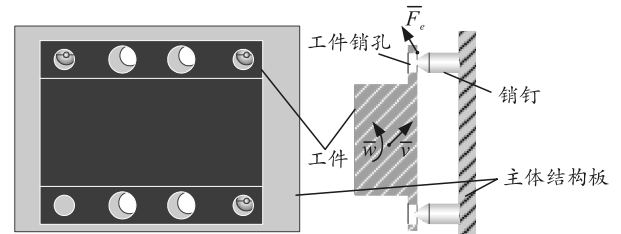


图 7 销钉导向柔性装配

销钉柔顺导向控制流程如图 8 所示，在控制中实时获取舱板受到的作用力信息，对机器人进行相应控制，可实现在保持受力安全范围内的同时，使工件沿销钉向安装面靠近<sup>[8]</sup>。

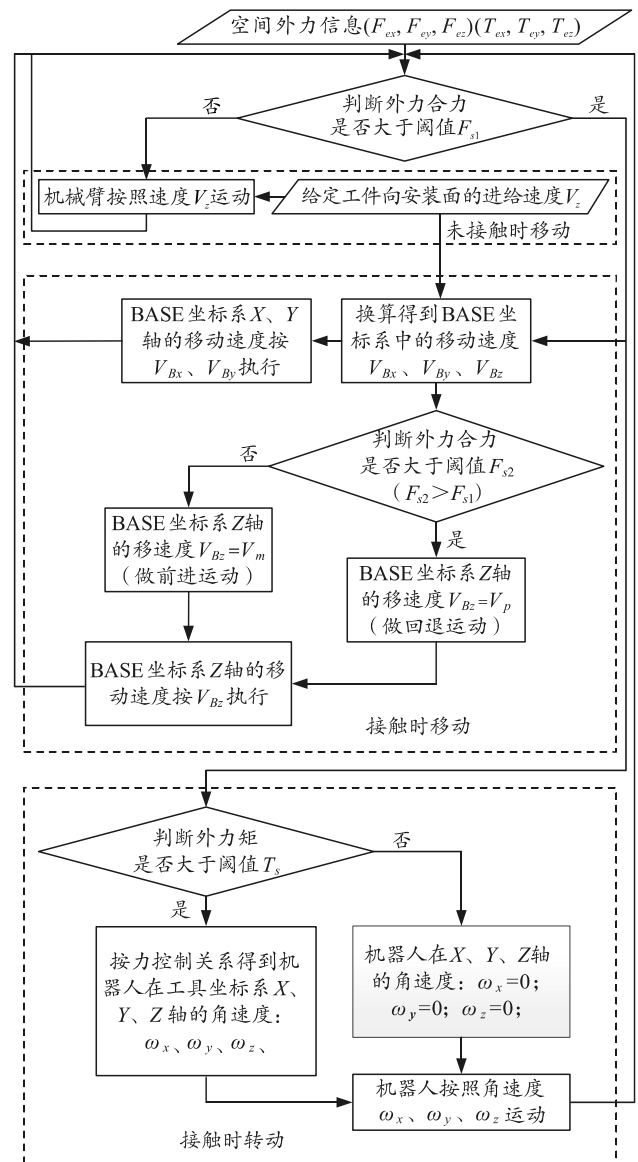


图 8 销钉导向柔性对接控制

### 4 应用情况

2018 年 1 月至 2020 年 6 月, 应用所研究的机器人装配技术, 完成北斗三号卫星舱板装配 400 余次, 单个舱板装配时间由以往的 1 h 以上缩短至 30 min 以内, 操作人员由 5 人减少至 3 人, 为北斗三号的密集研制争取了宝贵时间, 节约了人力。由于装备的通用化, 相对于传统作业方式节省工装投入成本近千万元。目前, 采用机器人进行卫星舱板安装已成为一种成熟的作业模式, 并在我国遥感、通信等领域卫星的舱板安装中实现了推广应用。

### 5 结论

针对北斗三号导航卫星的舱板装配需求, 提出了基于 6 自由度工业机器人的舱板装配方案。采用移动机器人结合简易支架车的作业模式, 节省工装投入成本; 采用机器人柔性力控技术实现舱板的自动销钉导向装配, 避免了以往采用手动调节方式的人工精确对准调节环节, 大大提高装配效率<sup>[9]</sup>。由于柔顺力控技术的应用, 装配中能够将装配力控制在安全范围, 进而保证装配质量。基于工业机器人的导航卫星舱板安装装备及方法, 已经在我国北斗三号导航卫星舱板的安装中应用超过 400 次, 形成了成熟的作业模式。该方案可为其他领域大重量部件的安装提供参考。

### 参考文献:

[1] 姚延风, 范为, 王伟. 批产卫星验证技术分析[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(1): 90-99.

[2] DONG K, LIU H, ZHU X, et al. Force-free control for the

\*\*\*\*\*

(上接第 67 页)

[10] MARINES. DEPLOYABLE VIRTUAL TRAINING ENVIRONMENT[EB/OL]. (n.d.), [2022-4-8]. <https://www.tecom.marines.mil/Units/Divisions/Range-and-Training-Programs-Division/DVTE/>.

[11] MEGAN E. Navy turns to new Aegis Virtual Maintenance Trainer to boost crews' self-sufficiency at sea[EB/OL]. (2021-11-16), [2022-4-5]. <https://www.defensenews.com/naval/2021/11/15/navy-turns-to-new-aegis-virtual-maintenance-trainer-to-boost-crews-self-sufficiency-at-sea/>.

[12] MARINES. COMBAT CONVOY SIMULATOR[EB/OL]. (n.d.), [2022-4-6] <https://www.tecom.marines.mil/Units/>

flexible-joint robot in human-robot interaction[J]. Computers & Electrical Engineering, 2019, 73: 9-22.

[3] YAO B, ZHOU Z, WANG L, et al. Sensor-less external force detection for industrial manipulators to facilitate physical human-robot interaction[J]. Journal of Me-chanical Science and Technology, 2018, 32(10): 4909-4923.

[4] REN T, DONG Y, WU D, et al. Design of direct teaching behavior of collaborative robot based on force interac-tion[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 96(1): 83-93.

[5] 张立建, 胡瑞钦, 易旺民. 基于六维力传感器的工业机器人末端负载受力感知研究[J]. 自动化学报, 2017, 43(3): 439-447.

[6] KIM Y B, SEOK D Y, LEE S Y, et al. 6-Axis Force/Torque Sensor With a Novel Autonomous Weight Compensating Capability for Robotic Applications[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 6686-6693.

[7] ALMUSAWI A R J, DULGER L C, KAPUCU S. Online teaching of robotic arm by human-robot interaction: end effector F/T sensing[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(9): 1-14.

[8] YAO L, GAO Q, ZHANG D, et al. An integrated compensation method for the force disturbance of a six-axis force sensor in complex manufacturing scenarios [J]. Sensors, 2021, 21(14): 1-17.

[9] 张春柳, 张立建, 胡瑞钦. 工业机器人在航天装配应用中的质量安全管理[J]. 兵工自动化, 2019, 38(4): 92-96.

[10] XIAO J, ZENG F, ZHANG Q, et al. Research on the force-free control of cooperative robots based on dynamic parameters identification[J]. Industrial Robot, 2019, 46(4): 499-509.

Divisions/Range-and-Training-Programs-Division/CCS/.

[13] MARINES. INDOOR SIMULATED MARKSMANSHIP TRAINER[EB/OL]. (n.d.), [2022-4-7]. <https://www.tecom.marines.mil/Units/Divisions/Range-and-Training-Programs-Division/ISMT/>.

[14] MARINES. Supporting Arms Virtual Trainer[EB/OL]. (n.d.), [2022-4-8]. <https://www.pendleton.marines.mil/Main-Menu/Staff-Agencies/Assistant-Chief-of-Staff-G-3-5/Training-Support-Division/Training-Devices/Supporting-Arms-Virtual-Trainer/>.

[15] MARINES. COMBAT VEHICLE TRAINING SYSTEM[EB/OL]. (n.d.), [2022-4-8]. <https://www.tecom.marines.mil/Units/Divisions/Range-and-Training-Programs-Division/CVTS/>.