

doi: 10.7690/bgzd.2022.02.005

基于 DSP 扩展的多串口伺服控制器及系统

吴建刚, 刘璐雅, 李星洲, 高玉文

(四川航天燎原科技有限公司科研部, 成都 610100)

摘要: 为适应弹载雷达导引头小型化低成本的发展需求, 设计一款基于 DSP 串口扩展的多串口伺服控制器。通过开发 DSP 串口复用功能, 在仅有 3 组 SCI 收发寄存器的硬件资源下, 协同完成方位和俯仰角度、角速度 3 路传感器数据以及 1 路上位机数据的收发, 实现了单 DSP 架构下的 2 维伺服控制系统设计。精简了 FPGA 相关电路和软件设计, 为伺服控制器的低成本微小化提供了技术支撑。实验结果表明: 该系统工作可靠、性能稳定, 适用于工程应用。

关键词: 导引头; 伺服系统; 控制器; DSP 扩展; 串口复用

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Multi-serial Port Servo Controller and System Based on DSP Expansion

Wu Jian'gang, Liu Luya, Li Xingzhou, Gao Yuwen

(Department of Technology Research and Development, Sichuan Spaceflight Liaoyuan Technology Co., Ltd., Chengdu 610100, China)

Abstract: In order to meet the development requirements of miniaturization and low cost of missile-borne radar seeker, a multi-serial port servo controller based on DSP serial port expansion is designed. Through the development of DSP serial port multiplexing function, the hardware resources of only three groups of SCI transceiver registers are used to complete the transceiver of three-way sensor data of azimuth and elevation angle, angular velocity and one-way host computer data, and the design of two-dimensional servo control system based on single DSP architecture is realized. The FPGA related circuit and software design are simplified, which provides technical support for the low cost and miniaturization of the servo controller. The experimental results show that the system is reliable, stable and suitable for engineering applications.

Keywords: seeker; servo system; controller; DSP extension; serial port multiplexing

0 引言

随着电子技术的发展, 现代雷达已发展为集目标探测定位、通信、控制及成像识别于一体的机电综合体^[1]。其中, 雷达导引头伺服系统的正常工作是各种功能正常实现的前提, 是导弹实现对目标搜索和跟踪并输出制导信息的重要子系统, 是实现弹载雷达导引头小型化、国产化以及低成本化的重要环节。

现阶段雷达伺服控制器多采用 DSP+FPGA(CPLD)架构, DSP 进行控制算法处理, FPGA 进行数据的解析和打包。赵凯^[2]设计了基于 DSP+FPGA 的伺服控制, 用于小型低成本简易制导火箭弹稳定平台系统。孙兴等^[3]设计了一种以 DSP+CPLD 为核心控制架构的小体积、轻重量、高可靠性的机载舵机控制器。文献[2-3]设计的 DSP+FPGA(CPLD)架构, 虽然结构清晰, 功能明确, 但是从架构设计上存在元器件资源利用率不足, 电

源种类需求多等问题, 制约了伺服控制器小型化和低成本的实现。善丽辉^[4]设计了以 TI 公司 DSP 芯片 TMS320F2812 为核心的 1 维稳定平台控制电路, 包括控制板、信号处理板、驱动板 3 块电路板。袁伟^[5]搭建了以 TMS320F2812 为控制核心的电视导引头伺服稳定平台单环回路控制系统, 实现了伺服控制器的小型化设计。文献[4-5]虽然实现了单 DSP 架构下的伺服控制器设计, 但仅限于 1 维伺服控制系统的实现, 无法应用于 2 维伺服控制系统。基于行业现状及发展需求, 笔者设计了一款基于单 DSP 架构的小型 2 维伺服控制器。

1 系统组成及原理

该雷达伺服控制系统主要由控制器、驱动器和执行机构及反馈单元组成。控制器以 DSP 为控制核心, 与上位机通信, 并将控制信号下发给驱动器, 同时采集反馈单元的角度、角速度及电流等信号, 驱动器以电机驱动模块为核心, 接收经光耦隔离后

收稿日期: 2021-10-09; 修回日期: 2021-11-28

作者简介: 吴建刚(1986—), 男, 陕西人, 硕士, 工程师, 从事伺服稳定平台控制系统研究。E-mail: 344026616@qq.com。

的控制信号，并将其放大后用于驱动执行机构电机转动，反馈单元包括方位、俯仰电位器和双轴陀螺，执行机构包括方位、俯仰电机和转动结构等，控制系统组成如图 1 所示。

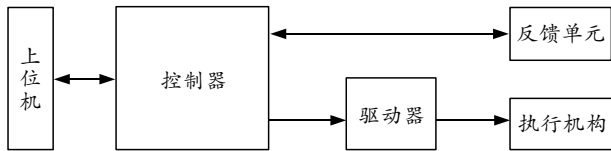


图 1 控制系统组成

系统工作原理为控制器接收到上位机下发的指令后，进入相应的控制流程，经过 DSP 运算后输出控制信号到驱动器，经隔离放大后驱动机构电机带动负载按要求转动，电位器和陀螺分别实时反馈角度和角速度信号并参与系统闭环控制。

2 系统硬件设计

2.1 DSP 外设需求分析

由于 SCI 串口只需 2 对差分线即可完成数据收发，抗干扰能力强；所以，在电磁环境复杂，对传输可靠性要求高的产品上应用广泛。本系统所用角度和角速度传感器数据传输均采用 SCI 差分串口。方位和俯仰角度传感器采用集成了电源预处理电路、AD 采样电路以及后处理电路的新型数字量电位器。角速度传感器选用双轴 MEMS 陀螺，可通过一个差分串口依次输出方位和俯仰角速度信息。

控制器以 DSP 为控制核心，外设需求如图 2 所示。DSP 的 SCI 模块除了与电位器和陀螺相连外，还与上位机相连。其他外设需求还包括 PWM 模块、ADC 模块以及 JTAG 仿真模块，PWM 模块输出经光耦隔离与驱动器相连，ADC 模块负责电流采样，与电流采集模块相连。

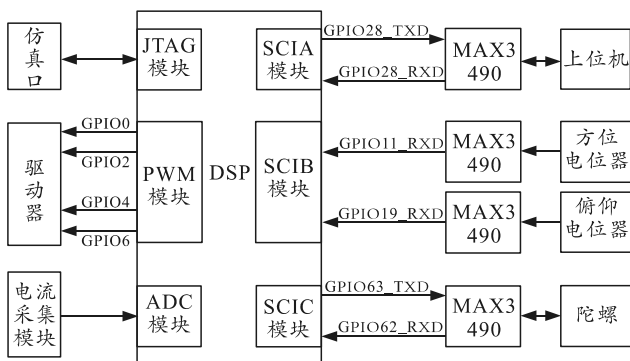


图 2 核心电路原理

2.2 串口扩展硬件电路设计

伺服控制器采用单 DSP 硬件架构，DSP 选用 TI 公司的 TMS320F28335，该器件是 TI 公司推出的

32 位浮点数字控制处理器 (DSP)，外设丰富，在电机控制通信医疗航空航天等领域有广泛应用^[6]；但其只有 3 个 SCI 模块，按照传统设计方法，是实现 3 路 SCI 接口传感器和 1 路上位机串口数据的收发，需要增加 FPGA (CPLD) 或者串口扩展芯片^[7-9]，这样既会增加硬件软件设计成本，又不利于产品实现微型化。笔者在对 TMS320F28335 DSP 芯片深入研究的基础上，开发利用其同一 SCI 模块多组收发 IO 资源，并通过软件设计达到串口扩展的目的。SCIB 模块对应 2 对 GPIO 收发管脚，设计时硬件上将方位电位器数据线与 GPIO11_RXD 管脚相连，俯仰电位器数据线与 GPIO19_RXD 管脚相连，通过软件设计分时复用 SCIB 模块，实现串口扩展功能。

3 软件设计

3.1 系统流程设计

伺服控制系统软件流程处理和控制算法处理均由 DSP 完成，软件由主程序模块和中断子程序模块组成，主程序模块包括系统初始化、读写外部端口等；分支子程序主要有预置中断子程序、搜索中断子程序、跟踪中断子程序等；中断子程序包括角度传感器和速度传感器的数据采集、位置环控制子程序和速度环控制子程序。系统流程控制如图 3 所示。

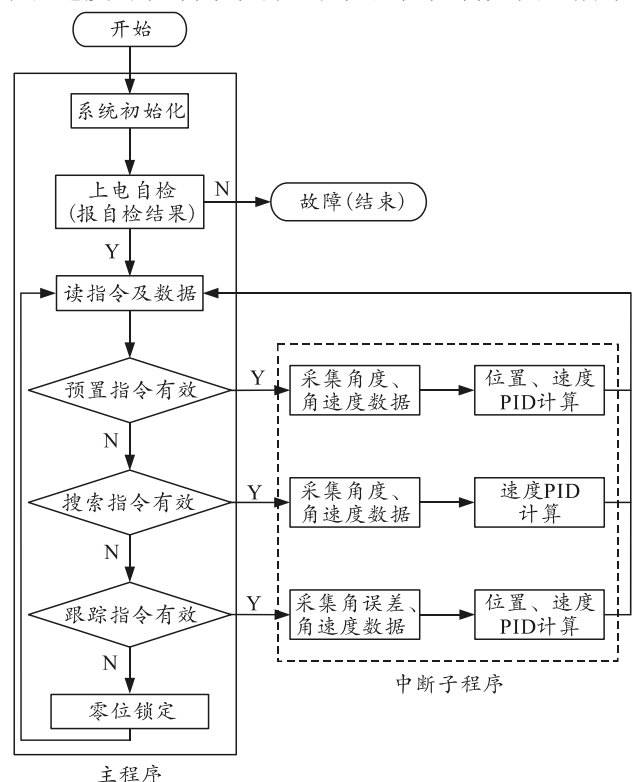


图 3 系统流程控制

系统上电后首先进行系统自检，根据设定好的

自检流程，控制电机带动负载转动，如果在规定的时间内完成自检，则上报自检正常；否则上报故障，中止后续流程，系统处于刹车保护状态。自检完成后，等待指令及数据，如果预置指令有效进行预置流程，采集角度、角速度数据，进行位置速度 PID 计算，预置完成后返回主程序，继续等待新的指令。搜索及跟踪流程与预置流程类似，如果未收到以上流程指令，系统进入零位锁定状态，该状态是预置流程中目标角为 0 的一种特殊状态。

3.2 DSP 扩展串口流程设计

DSP 串口扩展设计是本次单 DSP 架构系统设计的关键，串口扩展设计主要涉及 SCIB 模块和方位、俯仰电位器。SCIB 数据接收流程如图 4 所示，System_Init() 为系统初始化函数，之后进行 SCIB 模块配置 (SCIB_Config())，主要完成外设时钟、波特率以及接收端口配置，默认上电后 SCIB 模块先接收方位点电位器串口数据 (RX_FW_DWQ())，并进行校验 (CHECK_FW())，校验通过后再接收俯仰电位器数据并校验，如此循环实现方位和俯仰电位器的数据接收。

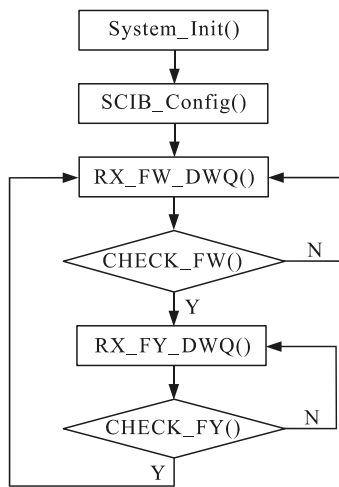


图 4 SCIB 数据接收流程

3.3 DSP 串口扩展配置设计

DSP 串口扩展配置设计主要包括 SCIB 模块串口 IO 管脚配置设计、波特率匹配设计和接收容错设计。

串口 IO 管脚配置必须与接收流程匹配，即按照先接收方位电位器数据，正确接收后再接收俯仰电位器数据的顺序配置，设计时须加一定延时，避免串口竞争，默认 SCIB 模块的 GPIO11 为上电后的串口数据接收管脚，GPIO19 设置为普通 IO 管脚，依次交替切换。

由于 SCIB 模块的串口数据要参与运动控制，实时性要求较高，同时涉及两发一收，且要满足工程批量应用时芯片个体差异及高低温环境下芯片容差性能的变化，所以要求各收发串口波特率误差小于 0.5%。波特率与时钟频率、配置字有关，通常配置字是非连续的，需要选配时钟来满足波特率误差需求。本次设计约定波特率为 460 800 bps，方位和俯仰电位器波特率误差均在 0.2% 以内，DSP 串口波特率误差在 0.3% 以内。

笔者开发设计串口分时复用功能，方位和俯仰电位器串口数据时序是随机的，存在丢帧可能，导致 FIFO 因为存入不完整的 2 包数据而溢出报错；因此，程序须考虑丢帧情况下不会跑死，丢帧不会对运动控制产生影响。设计时在溢出和错误情况下对 SCI 复位重启，程序如下：

```

if(ScibRegs.SCIRXST.bit.RXERROR ==1)
{
    Cout_DWQ_RXERROR++;
    ScibRegs.SCICTL1.bit.SWRESET=0;//复位
    Delay(1); //1μs
    ScibRegs.SCICTL1.bit.SWRESET=1;//重启
}
if(ScibRegs.SCIRXST.bit.RXFFOVF ==1)
{
    Cout_DWQ_FFOVF++;
    ScibRegs.SCICTL1.bit.SWRESET=0;
    Delay(1); //1μs
    ScibRegs.SCICTL1.bit.SWRESET=1;
}
  
```

为避免系统控制影响，要求电位器数据更新率比系统控制提高 1 倍，确保丢帧不影响系统控制。

4 试验测试

4.1 常温测试

笔者设计的单 DSP 伺服控制器与现阶段的 DSP+FPGA 架构伺服控制器相比，主要把 FPGA 需要完成的数据收发和转换工作融合到 DSP 软件设计中，融合以后控制流程是否有冲突、串口数据收发是否有异常等需要在整个系统中进行验证。为此，搭建的测试系统如图 5 所示，包括上位机、集成控制驱动器(包括控制器和驱动器)以及执行机构。其中，集成控制驱动器和执行机构是设计完成的正式产品，上位机为笔者单位成熟软件，具有数据存储功能，可将数据导出用于分析。经反复测试，基于单 DSP 伺服控制器系统工作稳定可靠，串口数据收

发正常，控制流程满足设计预期，预置和搜索流程部分数据如图 6、7 所示。

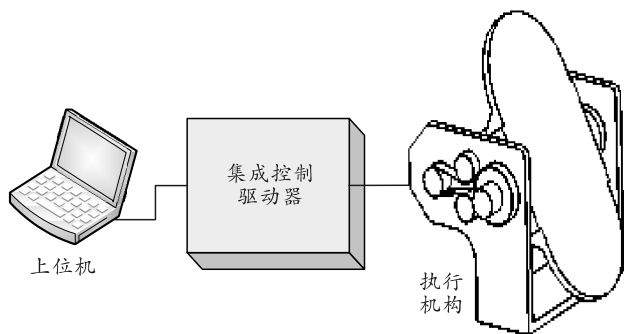


图 5 测试系统

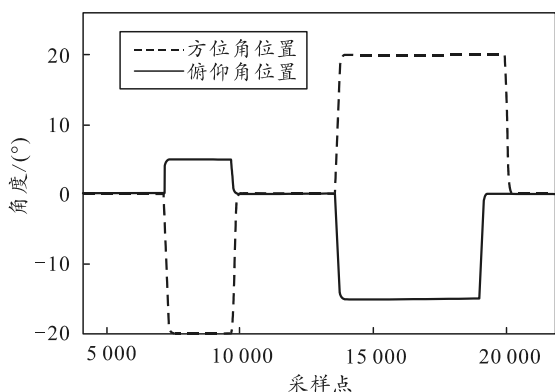


图 6 常温预置流程部分数据

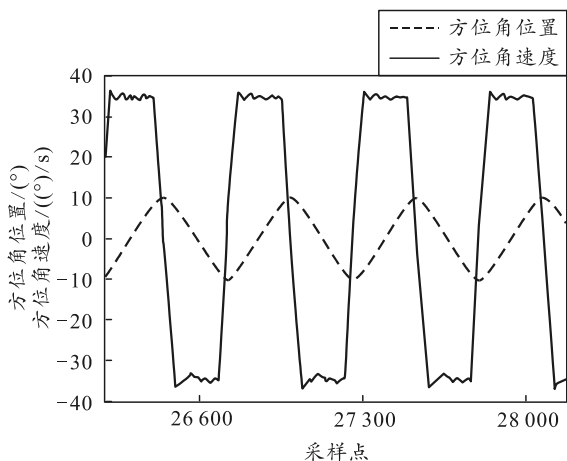


图 7 常温搜索流程部分数据

4.2 温度适应性测试

以芯片为主的伺服控制器硬件和软件设计裕度是否够用，通常可通过温度循环试进行考核。为此，将被测产品放入高低温循环试验箱中，按要求完成了 10 组温循试验(高温+60℃，低温-40℃)，试验过程按要求进行测试。高温和低温，各流程正常工作。高低温部分数据如图 8—11 所示。测试数据表明，该伺服控制系统工作稳定可靠，适用于导引头伺服系统工作环境。

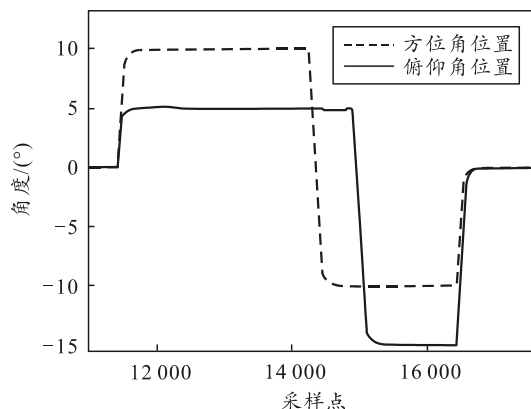


图 8 高温预置流程部分数据

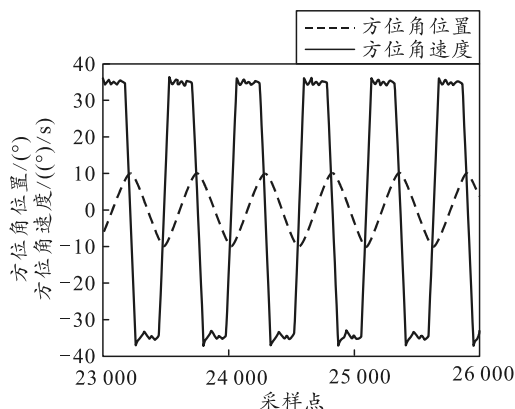


图 9 高温搜索流程部分数据

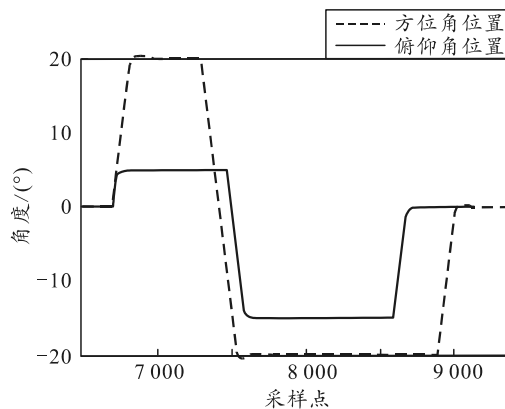


图 10 低温预置流程部分数据

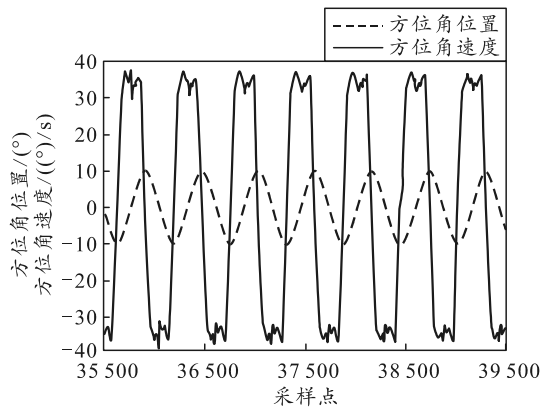


图 11 低温搜索流程部分数据

5 结束语

为适应弹载雷达导引头小型化低成本的发展需求,设计开发一款基于 DSP 串口扩展的多串口伺服控制器。对 DSP 外设需求及 DSP 串口扩展的硬件、软件设计进行了介绍。通过开发 DSP 串口复用功能,协同完成方位和俯仰角度、角速度 3 路传感器数据以及 1 路上位机数据的收发,实现了单 DSP 架构下的 2 维伺服控制系统设计。通过温循试验验证了系统性能的可靠性和稳定性,为伺服控制器低成本小型化的工程实现提供了技术支撑。

参考文献:

[1] 张维宁. 提高雷达测角精度的方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
 [2] 赵凯. 基于 DSP 的吊舱系统跟踪技术研究和开发[D].

西安: 西安电子科技大学, 2015.
 [3] 孙兴, 和阳, 朱纪洪, 等. 一种集成驱动的高可靠舵机控制器设计[J]. 微电机, 2017, 50(1): 43-46.
 [4] 善丽辉. 小型低成本简易制导火箭弹一维稳定平台系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
 [5] 袁伟. 电视导引头伺服稳定平台及其控制技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
 [6] 郭凯旋, 徐龙祥. 基于 TMS320F28335DSP 的磁悬浮轴承数字控制器的研究与设计[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(4): 184-187.
 [7] 张羽, 胡玉贵. 基于 FPGA 的多串口扩展实现[J]. 电子器件, 2009, 32(2): 234.
 [8] 朱学明, 丁万山. 一种基于 TL16C554A 的 DSP 多串口扩展方法[J]. 微处理机, 2006, 6(12): 25.
 [9] 祖平, 严新荣. 基于 DSP 的串口扩展[J]. 舰船电子工程, 2007(5): 145-146.

(上接第 13 页)

根据上图, 当平台能力权重 ω_1 、 ω_2 在 0~1 范围内变化时, 体系防御能力 R 变化比较平缓, 变化范围为 0.6~0.85, 说明平台能力权重即使在较大范围内波动, 对体系防御能力影响较小, 表明该方法适用性较强。另外, 在 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 不变时, 由于系统防御能力计算结果是确定的, 假设个别系统能力权重准确性较低, 但平台内各系统能力权重存在相互制约关系(系统权重之和为 1), 由系统能力权重变化导致的平台防御能力变化较小, 再经平台能力权重加权后, 对体系防御能力影响将进一步降低; 因此, 在采用该方法分析体系防御能力时, 为进一步提高体系防御能力分析结果的置信度, 应重点研究平台能力权重专家打分方法, 以满足平台能力权重赋值准确性要求。

4 结束语

准确分析体系作战能力对于提升军事能力, 补足军事短板和弱项具有重要意义。笔者以体系防御能力分析为切入点, 根据体系作战兵力构成将体系防御能力由各平台能力权重和平台防御能力参数表征, 采取从系统到平台至体系的分析过程给出体系防御能力分析结果。经过适当变换, 该方法同样适用于分析体系作战条件下的信息能力、打击能力、机动能力和保障能力等。分析结果表明: 笔者提出

的分析方法适用性强、可操作性好, 具有重要的理论和现实意义。

参考文献:

[1] 杨克巍, 杨志伟, 谭跃进, 等. 面向体系贡献率的装备体系评估方法研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(2): 311-318.
 [2] 姜剑雄, 孔祥龙, 师鹏, 等. 基于 ANP 的天基海洋监视体系作战能力评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(10): 53-58.
 [3] 毕开波, 董受全, 杨兴宝. 区域防御体系的配系和部署研究[J]. 现代防御技术, 2016, 44(4): 6-12.
 [4] 张亮, 赵振南, 王利. 基于体系作战效能的武器装备体系评估[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(3): 51-58.
 [5] 赵会朋, 冯占林, 李博骁, 等. 防空反导预警装备覆盖能力推演分析[J]. 兵工自动化, 2020, 39(8): 16-21.
 [6] 杨继坤, 王娜, 肖飞, 等. 航母编队体系作战试验设计与评估[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(4): 91-97.
 [7] 杨明, 焦松, 李伟. 武器作战效能参数化仿真评估技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(12): 1270-1273.
 [8] 王生玉, 王正, 蔡绪涛. 舰载机救援装备效能评估指标体系[J]. 兵工自动化, 2021, 40(2): 65-69.
 [9] 胡伟涛, 赵青松, 罗弋洋, 等. 基于体系结构框架的反潜作战装备体系[J]. 兵工自动化, 2021, 40(4): 49-53.
 [10] 刘德胜, 付东. 作战体系评估及评估方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2018, 32(3): 14-17.