

doi: 10.7690/bgzdh.2014.10.009

舰船指控设备机械结构设计的几个问题

董梅

(江苏自动化研究所电子设备事业部, 江苏 连云港 222061)

摘要: 针对舰船电子设备结构设计中隔振减振、散热以及电磁兼容几个关键技术问题, 探讨它们的现状和发展趋势。基于舰船电子设备对机械结构设计的基本要求, 回顾了不同历史时期指控设备结构型式的演变, 从中看出当今舰船指控设备结构设计中要求与现实之间的差距, 并探讨了它们的发展趋势——三维设计技术的运用和基于仿真的隔振减振、散热和电磁兼容结构设计。该研究结果可为提高我国舰船指控设备的结构设计水平提供参考。

关键词: 舰载指控设备; 结构型式演变; 隔振减振设计; 散热设计; 电磁兼容设计

中图分类号: TJ83 **文献标志码:** A

Several Problems in Structural Design of Shipboard Command and Control Equipment

Dong Mei

(Electronic Equipment Division, Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang 222061, China)

Abstract: Aiming at several key technical issues, including vibration isolation design, thermal design and electromagnetic compatibility design for the mechanical design of shipboard electronic equipment, their status and trends are explored. Starting with the basic requirements for the mechanical design of shipboard electronic equipment, this paper reviews the evolution of command and control equipment in the past decades, the gap between requirements and reality for the mechanical design is seen. Then it focuses on the trends of several key technical issues—3D design technology and vibration isolation design, thermal design and electromagnetic compatibility design based on simulation. It is reference to improve the mechanical design level of China's shipboard command and control equipment.

Keywords: shipboard command and control equipment; evolution of structural; vibration isolation design; thermal design; electromagnetic compatibility design

0 引言

作为舰船作战系统的重要组成部分, 指控系统主要执行情报处理、指挥决策和武器控制 3 大任务, 而指控设备则是实现这些任务的最基本的载体。随着海战环境日益复杂, 舰船必须面对来自海、陆、空多方位、多层次的威胁, 为了遂行作战能力和实现自我保护, 指控系统对多功能化的要求亦不断提高。相应的, 对指控设备机械结构设计的要求也越来越严格。这里从舰船电子设备对机械结构设计的基本要求出发, 回顾了不同历史时期指控设备结构型式的演变, 然后着重就结构设计中的隔振减振、散热以及电磁兼容几个关键技术问题探讨了它们的现状和发展趋势。

1 舰船电子设备的基本要求^[1-2]

1.1 刚度、强度以及稳定性的要求

作为电子设备躯体的机械结构, 支撑功能是最基本的要求。

1.2 散热要求

对元器件、组件以及整机实施温升控制, 保证电子设备正常工作。

1.3 隔振减振要求

舰船上不同部位受到的冲击、振动各异, 即使是在摇摆中心也依然存在, 炮位和发射架位处尤为剧烈, 因此隔振减振设计是必不可少的。

1.4 抗电磁干扰要求

舰船上电磁干扰源繁多, 电子设备需具备良好的抗干扰能力, 以保证作战效能和自身安全。

1.5 防水、防霉菌、防盐雾要求

防水、防霉菌、防盐雾是对舰船电子设备的基本要求。

1.6 符合人机工程学要求

符合人机工程学的机械结构设计, 是最近十几年来所大力提倡的; 人机工程学以人、机、环境三要素为核心, 考虑到工业造型设计技术和艺术, 美观、大方、适用、实用是始终追求的目标。

2 舰船指控设备结构型式的演变

自 20 世纪 50 年代开始, 我国舰船指控设备完成了由机电指挥仪向数字化综合指控设备的演变, 设备从以模拟计算机为主转变成以微型数字计算机

收稿日期: 2014-04-19; 修回日期: 2014-05-20

作者简介: 董梅(1968—), 女, 江苏人, 工学硕士, 工程师, 从事舰艇载电子设备结构与振动仿真分析研究。

为主^[3]。下面介绍指控设备上一些主要器件、部件和结构型式的演变。

2.1 显示器的演变

目前, CRT 显示器已被液晶显示器和 LCD 显示器替代。由于工作原理不同, 液晶显示器、LCD 显示器与 CRT 显示器有明显的性能差异, 较圆满地解决了 CRT 显示器无法克服的在体积、重量、功耗、环保和电磁辐射等方面的缺点。

2.2 计算机的演变

早期舰船用计算机的结构形式是: 各插件模块通过槽口固定于开放式插件框架中, 自带的楔形锁紧装置与槽口两侧壁紧固, 其后部的电连接器通过盲插方式与印制大底板上的电连接器链接, 大底板上的输入输出信号通过专用的转接板转接。现在取而代之的是全密封、全加固的抗恶劣环境加固机, 不仅体积小、重量轻, 而且具有良好的抗振、散热、

电磁防护能力。

2.3 功能部件的演变

鼠标、键盘、触摸屏等通用的功能逐渐被集成为全加固模块, 通过预留接口与外部设备联系。尺寸被严格定义, 实现了模块标准化、通用化设计。这类模块多采用整体设计和加工工艺, 如真空钎焊、整体铸造和整体机加等, 具有体积小、结构紧凑等特点, 既能减轻重量, 又保证模块有良好的适应性。

2.4 整机结构型式的演变

显示器、计算机和功能模块的进步, 导致了整机在重量、体积上都有了大幅度的下降, 造型变得更加时尚、美观。由于各类模块标准化、通用化的实现, 整机设计变得快捷、方便, 在争取任务和任务立项时, 根据特定的需求, 短时间内可提供初步的技术方案, 确定外形尺寸和重量等指标。表 1 给出了不同时期指控设备的结构型式。

表 1 不同历史时期指控设备的结构型式

序号	名称	结构型式		
		20 世纪 50—60 年代	20 世纪 70—90 年代	21 世纪 10—20 年代
1	指控设备	机电指挥仪, 以模拟计算机为主。	数字化指控设备, 以数字计算机为主。	数字化综合指控设备, 以微型数字计算机为主。台、柜、箱已实现标准化、通用化、系列化。
2	显示器	加固 CRT 显示器。	加固液晶显示器。	加固液晶显示器和 LCD 显示器。
3	计算机	初级加固计算机, 计算机以开放式插件框架为载体。	开始研制全加固计算机, 并逐渐成为主流。	全加固计算机。
4	功能部件	圆齿轮、非线性齿轮、劈锥、加法器、旋转变压器、同步机等。	鼠标、键盘、触摸屏等逐渐由简易加固向全加固过渡。	通用模块, 如鼠标、键盘、触摸屏等以及用户专用模块均实现是全加固。

3 几个关键技术问题的现状

经过几十年的发展, 指控设备的结构设计内容发生了较大的变化, 不再有非线性齿轮、劈锥、传动链这类复杂结构, 剩下的是台、柜造型、面板设计、壳体铸造等^[3]。台、柜、箱及其各层次设备已实现标准化、通用化和系列化。整机内部小到插件模块、通用模块、专用模块, 大到显示器、计算机都实现了全加固设计, 并通过严格的应力筛选试验, 整机必须按国军标要求参加例行试验, 通过抗振、散热和电磁兼容能力测试。结构设计及其可靠性测试方法和手段逐渐成熟, 但也存在一些问题。

3.1 隔振减振设计

隔振减振设计主要还是遵循传统的方法进行, 以定性设计为主。即, 对结构件做个初步的静力分析后, 再根据使用环境和经验乘上一个安全系数, 在设计阶段难以充分考虑动态激励带来的影响。设备的抗振能力主要靠环境试验来验证。这种设计方法带来的问题是: 1) 由于无法准确把握设备内部重量及分布, 台、柜、箱在设计上普遍存在刚强度整体有余、局部不足的问题。虽然在振动、冲击试验

中也能发现一些问题, 诸如在某个频段振动超标, 在哪个频点共振幅值最大等, 但不能具体定位, 也不能准确评估共振带来的影响; 2) 设备的重量和几何重心的位置, 是在总装完成后靠称量才能最终确定, 所以, 通常是选择具有一定承载范围的减震器, 在使用过程中需对承载量进行调节, 给用户带来一定的麻烦。

3.2 热设计

现役的指控设备从机箱到台、柜基本上还是通过风机散热, 这是目前主流散热方式。对于发热量大的模块, 如加固机, 除了要解决自身的散热问题, 还在台、柜内部设计专用风道, 保证热量快速排除。其弊病是会造成电磁干扰且噪声较大; 20 世纪 90 年代, 国外一些潜艇指控设备开始采用液冷散热, 这种通过泵产生的动力推动密闭装置中液体的循环来实现散热的方式, 具有较高的效率, 且噪声较小, 缺点是成本较高。近年来, 国内也开始进行这方面的研究与试验。由于现行的热设计方法不能准确判断台、柜内部气流的走向, 故无法实现对设备从芯片到整机实施有效的温度控制, 仅仅是根据总功耗、

单个风机的风量以及热源的位置来大略地确定风机的数量和进、出风口的位置，散热效率不高。

3.3 电磁兼容设计

早期的纯机械设备和机电设备几乎不要做电磁兼容试验，然而，随着军械电子化程度的迅速提高，越来越多的电路被装入有限的空间，设备内外电磁信号纵横交错、密集重叠，功率分布不均匀；特别是电子战，其基本着眼点就是夺取“制电磁权”^[3-4]。电磁兼容设计在现代指控系统中的重要性可见一斑。电磁兼容设计涉及电器和结构等多个专业，综合性很强。虽然电磁干扰主要是电子元器件及其分布的问题，但与它们安装的位置、元器件屏蔽与密封的好坏、材料固有的屏蔽效能等紧密相关。经过多年的研究并结合试验，指控设备的电磁兼容设计已初具规模，并制定了一些设计规范。但是，由于设备内部安装的模块较多，很难直观地了解内部的电磁环境，一些问题在设计阶段很难被发现。而电磁兼容检测试验又是在设备出厂、功能调试完成后根据要求进行的，这时已到了研制的后期，等发现了问题，再针对超标项目实施解决方案，通常代价是昂贵的，会增加一些不期望的附加元器件。

4 关键技术的发展趋势

从上节中可以看到：1) 指控设备结构设计的研制任务量大、周期长、成本高；2) 隔振减振、散热、电磁防护等关键技术的研究进入了瓶颈期，还停留在依靠经验或以往环境试验结果类比、亦或有限的公式估算上。置身于21世纪，这种设计方法已无法适应现代国防对产品快速、可靠、经济的要求。三维设计技术和仿真技术的发展与推广，为这些研究内容的突破提供了有力支持。它们与传统的经验设计方法的融合，将有助于提高研制效率，推动机械结构设计从定性到定性与定量相结合的转变。

4.1 三维设计技术的应用

结构设计实现由二维向三维的转变可以说是革命性的，设计者借助计算机将设计思想转化为可视的、可修改、可分析的实体模型，为新产品研发、仿真分析及后续的演示带来诸多方便。

1) 三维设计可以直观地反映整机内部各单元的装配关系，避免产生干涉等错误。

2) 三维软件参数化设计技术特别适于复杂构件局部特征修改的快速设计^[5]。以机柜壳体为例，对于同一规格的不同机柜，壳体大部分设计特征是通用的，不同主要表现为：两侧壁上横向加强筋和走线凸台的高度位置，导销支架、前横梁支架

安装位置以及后横梁的高度位置。如果利用三维软件参数化建模工具，在壳体三维模型构建过程中使用变量来控制上述特征的位置尺寸和约束关系，根据不同的机柜需求编辑这些参数，即可得到具有相似拓扑结构的壳体。

3) 随着舰船装备量的加大，用户对设备的重量提出了严格要求。在设计阶段通过指定材质，可快速预测出整机的重量，避免了整机装配完成后再进行减重或配重处理。

4) 根据台、柜、箱内部的重量分布，可较准确地计算出设备的几何重心，并以此为依据确定隔振器的大小和安装位置，逐步实现由选择隔振器到定制隔振器的转变。

5) 建立产品常用件、标准件数据库，在新产品设计时可直接调用，节省了人力、物力，避免了重复劳动。

6) 仿真分析和演示系统需要三维模型的支持。以仿真为例，在国外设计和分析通常分属不同的部门，设计者考虑的是功能的实现，分析人员则是负责对设计的合理性和准确性做出评估。有了三维模型，分析人员可直接在三维模型上进行简化，开展分析，保证设计与仿真同步进行。

4.2 基于仿真分析的隔振减振设计

仿真技术的引入，在方案论证阶段有助于快速了解整机的振动特性以及对外载的响应情况，为决策提供支持；在设计过程中能及时发现结构上的薄弱环节，尽量做到结构合理、加工量少、材料利用率高，在保证抗振能力的前提下，实现轻量化设计^[5]。国内很多研究机构 and 高校都开展了这项工作，并取得了良好的效果。应用较广泛的结构力学仿真软件有很多，如 ANSYS、UG NX、ABAQUS 等。建议组织专人开展这项研究，掌握模块、机箱和整机各层次设备的结构力学性能，提高指控设备机械结构设计的竞争力。

4.3 基于仿真分析的热设计

随着电子技术的迅速发展，指控设备集成化程度不断提高，单位体积内产生的热量不断增加，而有效的散热面积却相对减少；一些发热量较大的功率器件和组件的热设计问题日显突出。如何有效降低传热路径上的热阻成为急待解决的问题，这需要可靠性高且工程化强的热仿真软件的支持。目前已广泛应用的计算机辅助热设计软件有 FLUENT、ANSYS、ICEPAK 等。这类软件可在短时间内获得复杂热分析方案的模拟结果，及时对元器件的布局、传热路径的设计是否合理做出判断^[6]。

4.4 基于仿真分析的电磁兼容设计

相对抗振和散热，舰船领域的电磁兼容仿真研究更是鲜见。直到近年才有一些成熟的电磁兼容仿真分析软件被引入国内，如 SEMCAD、EMC-A、IE3D-SI 等，它们从电磁兼容三要素(干扰源、耦合路径、接收器)出发，与实际工程紧密结合，通过建立干扰源、接收器与多种传输路径的数学模型来模拟传导、辐射、屏蔽等电磁干扰现象，并提供发射机和接收机的端口库、滤波器库、频谱信号库、屏蔽材料库等，可在研制过程中对板卡、模块和台柜等各层次设备及设备间的抗干扰设计做出评估，便于及早发现问题，减少试验阶段的整改。

5 结束语

由于仿真软件的局限性和实际设备的复杂性，

(上接第 24 页)

按照传统的 TaskScheduler-T 算法和 TSUL、TSU 算法所得的实验结果如表 2 所示。

各测试资源的资源利用率如表 3 所示。

仿真分析与物理试验之间会存在一定的差异，仍需综合考虑试验结果和设计者的经验，最终使定量研究的理论成果与经验设计方法在试验的基础上统一起来。

参考文献:

[1] GJB 4.1-4.13-83, 舰船电子设备环境试验[S]. 1983.
 [2] GJB 48A-96, 舰船武器设计指挥仪通用规范[S]. 1996.
 [3] 董志荣. 指控系统发展哲学视野[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(6): 1-5.
 [4] 高波, 马向玲, 隋江波. 海战复杂电磁环境分析[J]. 火力与指挥控制, 2013(3): 1-4, 11.
 [5] 董梅. 舰载电子机柜抗振加固设计[J]. 机械与电子, 2013(6): 45-47.
 [6] 卢锡铭. 电子设备热仿真及热测试技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2013, 36(6): 118-120.

表 2 实验结果比较 s

算法名称	测试时间	算法名称	测试时间
TaskScheduler-T	133	串行测试	202
TSUL	102	文中算法	54
TSU	116		

表 3 资源利用率比较 %

算法名称	资源						
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	r ₇
文中算法	85.19	18.52	87.04	18.52	74.07	14.81	74.07
TaskScheduler-T	34.59	7.52	70.68	7.52	30.08	6.02	60.15
TSUL	45.10	9.80	92.16	9.80	39.22	7.84	78.43
TSU	39.66	8.62	81.03	8.62	34.48	6.90	68.97
串行测试	22.77	4.95	46.53	4.95	19.80	3.96	39.60

在 TaskScheduler-T 算法和并行测试完成时间极限定理的基础上，文中的算法充分考虑了实际的测试资源约束，最终获得的测试序列完成时间与测试极限时间非常接近，节省时间接近 50%，同时，部分测试资源的资源利用率也得到了较大幅度的提高，除 r₃ 和 r₇，其他资源与以往算法比较，资源利用率提高幅度均接近 50%，较好地实现了缩短测试时间，提高测试资源使用效率的任务目标。

4 结论

1) 笔者在考虑测试资源实际约束条件下，通过对 TaskScheduler-T 算法和并行测试完成时间极限定理的研究，设计了一种新的测试任务调度算法。经实例验证，文中的算法能够很好地缩短测试时间，提高测试资源利用效率。

2) 与已有的各种算法相比较，文中的算法能将测试时间缩短近 50%，小于串行测试方法测试时间的 30%，同时能大幅度提高测试资源利用率，满足并行测试任务需求。

3) 从某种意义上讲，文中提出的算法是以牺牲测试费用换取时间成本。如何在测试费用和测试任

务时序相关制约下优化资源调度算法，使测试时间尽可能接近并行测试极限时间，从而获得满意的测试任务序列，尚需要进一步研究。

参考文献:

[1] Anderson Jr J L. High performance missile testing[C]//AUTOTESTCON 2003. IEEE Systems Readiness Technology Conference. Proceedings. IEEE, 2003: 19-27.
 [2] Ross W A. The impact of next generation test technology on aviation maintenance[C]//AUTOTESTCON AUTOTESTCON 2003. IEEE Systems Readiness Technology Conference. Proceedings. IEEE, 2003: 2-9.
 [3] 肖明清, 付新华. 并行测试技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 101-115.
 [4] 付新华, 肖明清, 夏锐. 基于蚁群算法的并行测试任务调度[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16): 4352-4356.
 [5] 谢化勇, 肖明清, 陈伟明, 等. 导弹并行测试系统设计与任务调度仿真[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 22-26.
 [6] 胡瑜. 基于有色 Petri 网理论的并行自动测试系统建模研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2003: 53-66.
 [7] 李云涛, 崔少辉. 一个关于并行测试完成时间的定理及其应用[J]. 电子测量技术, 2009, 32(10): 27-29.
 [8] 方丹, 崔少辉, 卢慧卿, 等. 一种基于并行测试完成时间的任务调度算法[J]. 测控技术, 2013, 32(1): 121-124.