

doi: 10.7690/bgzdh.2015.03.005

基于虚拟样机的机械件消耗规律确定方法

孟祥辉¹, 鲁刚²

(1. 中国人民解放军 91872 部队, 北京 102442; 2. 海装军械保障部, 北京 100891)

摘要: 针对传统的消耗规律确定方法很难准确地预测舰炮机械件的消耗量的问题, 提出基于虚拟样机的机械件消耗规律确定方法。以舰炮典型机械机构方向传动系统为例, 采用 FTA、FMECA 方法得到该机械机构的关重件, 采用 Virtual.Lab Motion 仿真软件构建了方向传动系统仿真模型, 对齿轮故障进行仿真验证; 通过建立疲劳可靠性寿命预测流程与模型, 得到不同可靠度下的第三级齿轮疲劳可靠性寿命; 在对核对表法修正的基础上, 建立机械件年消耗量解析模型, 得到了方向传动系统年平均消耗量。应用表明, 该方法可较准确获得装备机械件年消耗量。

关键词: 虚拟样机; 舰炮机械件; 疲劳可靠性寿命; 核对表法

中图分类号: TJ07 **文献标志码:** A

Mechanical Spares Consumption Law Confirmation Method Based on Virtual Prototyping

Meng Xianghui¹, Lu Gang²

(1. No. 91872 Unit of PLA, Beijing 102442, China;

2. Department of Ordnance Support, Equipment Department of the Navy, Beijing 100891, China)

Abstract: Traditional consumption law confirmation method is hard to accurately forecast shipborn gun mechanical spares consumption. Put forward mechanical spares consumption law confirmation method based on virtual prototyping, which purpose is to accurately forecast navy gun mechanical spares yearly consumption. Taking the drive system of naval gun for typical mechanical mechanism as an example, navy gun direction drive system key-valuable spares can be confirmed by FTA and FMECA. Direction drive system simulation model can be built by Virtual.Lab Motion simulation software, and which gear failure can be simulated and verified. Secondly, fatigue reliability life forecasting program and model is built, by which could get third level gears life in different reliability level. Finally, mechanical spares yearly consumption analytic model is built by mended check list method, and by which get direction drive system yearly consumption. Application result shows the method could accurately forecast mechanical spares yearly consumption.

Keywords: virtual prototyping; navy gun mechanical spares; fatigue reliability life; check list method

0 引言

海军舰炮具有型号多、批量小、结构复杂、工作环境恶劣等特点, 特别是舰炮机械件的消耗, 存在着影响因素多、分布非线性等问题, 造成了其故障率曲线难以用合适的解析式来描述, 备件消耗历史数据样本量小, 传统的消耗规律确定方法很难准确地预测舰炮机械件的消耗量。考虑到装备机械件物理消耗过程归根到底是一种复杂力学行为的事实, 虚拟样机技术(virtual prototyping technology, VPT)可更加准确地建立机械件消耗模型。因而, 笔者以舰炮方向传动系统为主要研究对象, 将虚拟样机技术引入舰炮机械件故障仿真中, 并结合疲劳寿命预测技术、核对表法等, 研究建立更加科学、可行的舰炮机械件消耗规律确定方法。

1 虚拟样机技术

虚拟样机是指建立在计算机上的原型系统或子系统模型, 在一定程度上具有与物理样机相当的功

能真实程度。采用该技术可准确地仿真机械结构运动学和动态动力学规律, 通过仿真的工作历程来确定实装工作中故障发生的时机及产生的备件消耗。

笔者采用虚拟样机技术对机械机构工作过程进行仿真来确定备件消耗规律, 其分析与仿真过程包括: 关重件确定、机械机构多体动力学仿真、基于可靠性的关重件寿命分析和关重件消耗规律确定, 如图 1 所示。下面对各关键步骤进行分析。

2 舰炮方向传动系统关重件确定

某型舰炮方向传动系统用于方向调炮, 主要由驱动电机、三级减速箱、座圈、压缩碟簧等构成。驱动电机为交流永磁同步电机, 脉宽调速, 为确保系统的可靠性, 采用双电机驱动。其中, 三级减速箱由箱体、第 1 级减速齿轮副、第 2 级减速齿轮副、第 3 级减速齿轮副、轴承构成。

故障树分析(FTA)与故障模式、影响和危害度分析(FMECA)是可靠性分析常用的技术^[1-3]。通过

收稿日期: 2014-09-03; 修回日期: 2014-10-29

作者简介: 孟祥辉(1979—), 男, 河南人, 博士, 工程师, 从事装备综合保障、维修工程、器材管理方面的研究。

FTA 分析, 可以建立舰炮方向传动系统各种故障与故障原因的对应关系, 从而得到了造成各机构故障的主要底事件, 底事件包括零件及零件的失效方式。而通过 FMECA 分析, 可确定舰炮传动系统的关重件。考虑到研究对象的复杂性, FMECA 分析是以 FTA 的底事件进行, 分析后从底事件中可以得到关重件及其失效模式列表。即根据系统危害度矩阵, 选择发生概率频繁, 危害度高的零件作为关重件, 最终得到的方向传动系统关重件及故障模式列表如表 1 所示。

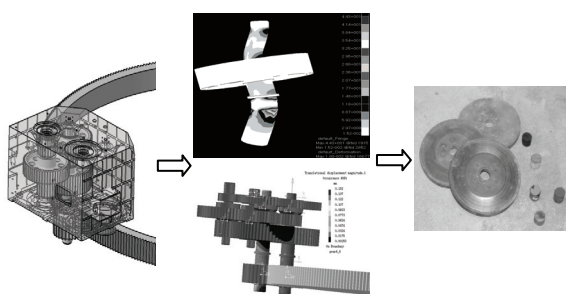


图 1 基于虚拟样机的机械件消耗规律确定过程

表 1 方向传动系统关重件及失效模式

序号	关重件	失效模式
1	齿轮支撑轴承	破碎
2	第三级齿轮副	轮齿折断
3	输出端齿轮副	轮齿折断
4	箱体	裂纹
5	碟簧	过紧或过松

3 舰炮方向传动系统故障仿真

多体动力学仿真主要包括机械零部件三维实体数字化模型的建立和虚拟样机模型的建立, 进行各种工况过程的动力学仿真分析, 确定关重件的载荷谱。针对各关重件的常见故障现象, 对关重件的常见故障模式进行了动态仿真, 为确定机械件寿命和消耗规律提供输入^[4]。

3.1 基于 Virtual.Lab Motion 的仿真模型

Virtual.Lab Motion 是由比利时的 LMS 公司开发的集建模、求解、可视化技术于一体的世界上第一个仿真研究整个机械系统工作性能的机械系统仿真分析软件。利用 Virtual.Lab Motion, 用户可以快速、方便地创建完全参数化的机械系统几何模型。Virtual.Lab Motion 下的方向传动系统模型如图 2。

将相关参数设置并施加到仿真模型中, 可得到 3 种仿真工况, 即 90°跟踪、大正弦调炮、制动。以 90°跟踪工况为例, 在 Virtual.Lab Motion 环境下第三级齿轮副啮合力如图 3 所示。

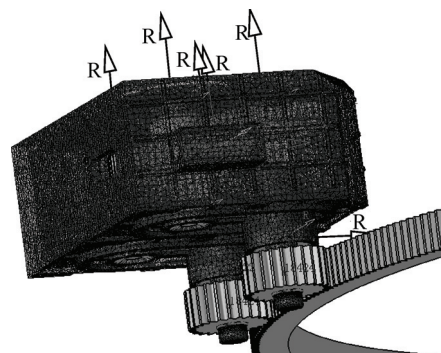


图 2 Virtual.Lab Motion 下的齿轮传动箱模型

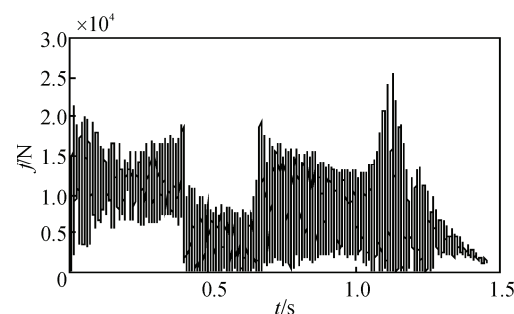


图 3 Virtual Lab 中第 3 级齿轮副啮合力

3.2 齿轮故障仿真

齿轮的故障主要发生在轮齿, 而轮缘、轮辐、轮毂很少失效。轮齿的失效形式主要有过载折断、疲劳折断、齿面点蚀、齿面胶合、齿面磨损、齿面塑性变形等。方向机输出端齿轮副为开式传动, 其主要失效模式是磨损; 由于方向机的频繁调炮, 轮齿受到交变载荷的作用, 易产生疲劳损坏, 这里对齿轮疲劳故障进行仿真^[5-6]。为方便研究假设在疲劳故障仿真时, 假定只有主动轮的一个轮齿产生疲劳裂纹破坏, 其他轮齿既不磨损, 也不产生裂纹。

根据故障模型, 以一个系数来仿真轮齿的损伤情况, 这里分别取: -0.1, -0.3, -1, 其中取值 -1 为断齿时的仿真, 另假设第 5 个轮齿发生损伤。不同疲劳损失度下的齿轮接触力如图 4(a)~4(c)所示。

从图中可以发现在齿轮损伤部位, 齿轮的接触力和振动情况很激烈, 当损伤程度在 0.3 时, 齿轮还可以正常工作, 最大接触力由 8×10^5 增加到 10×10^5 , 但当损伤程度继续增大, 断齿时, 最大接触力达到 1×10^8 , 这种条件下, 齿轮不能继续工作, 会出现打齿, 使其他齿轮过载折断。当轮齿损伤折断时, 此时当前一个齿啮出时, 下一个齿不能啮入, 轮齿不能持续接触, 当再下一对齿啮入时, 没有配对齿与其啮合, 此时, 齿轮转动速度很高, 齿圈处没有负载, 在电机作用下, 转速升高, 齿轮继续啮合, 相当于输出端齿轮突然加载, 产生巨大冲击, 齿轮的啮合力和振动情况激烈^[7]。

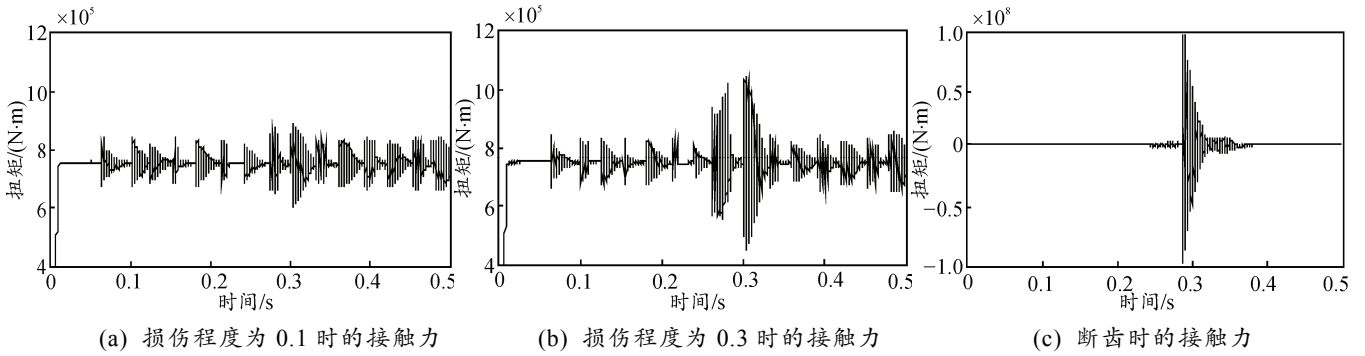


图 4 不同疲劳损失度下的齿轮接触力

4 关重件疲劳寿命分析与消耗量确定

4.1 疲劳可靠性寿命预测流程

舰炮传动系统中的齿轮属于高强度脆性材料，一出现裂纹就会引起破坏，裂纹扩展寿命短，因此只考虑裂纹萌生寿命。裂纹萌生疲劳寿命分析方法主要有名义应力法、局部应力法、应力应变场强法、能量法、响应面法、断裂力学等方法。由于舰炮传动系统的疲劳寿命属于高周疲劳寿命，故采用名义应力法对其进行疲劳分析。

名义应力法是最早形成的抗疲劳设计方法，它

是以材料的 S-N 或 P-S-N 曲线为基础，对照试件或结构疲劳危险部位的应力集中系数和名义应力，校核试件或结构的疲劳强度或计算疲劳寿命。名义应力法认为，由相同材料制成的任意构件，只要应力集中系数和载荷相同，它们的寿命相同。结合材料的 S-N 曲线，可进一步得到在给定应力水平下疲劳寿命的分布数据，或给定有限寿命下疲劳强度的分布数据。通过名义应力法估算传动系统齿轮疲劳寿命的流程如图 5^[8-12]所示。以流程图为主线，以第 3 级齿轮副弯曲疲劳为例，可研究得到传动系统齿轮的疲劳可靠性寿命。

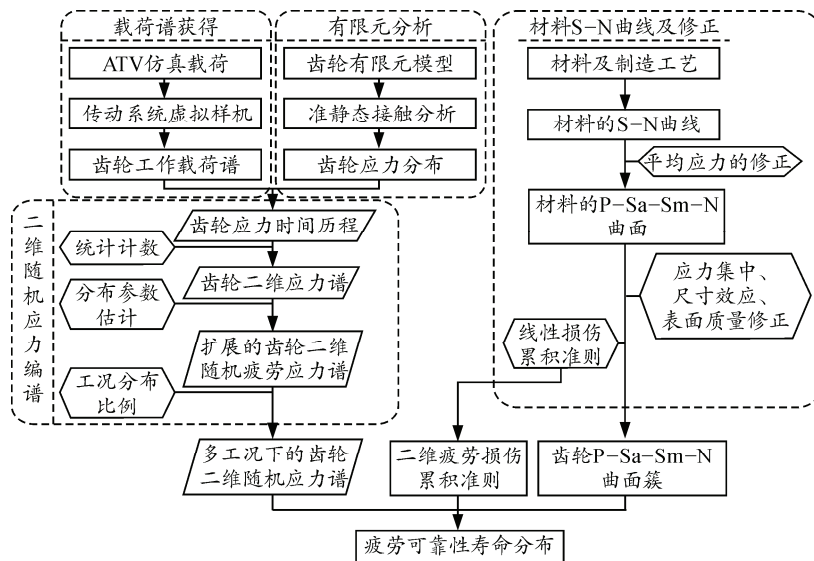


图 5 齿轮疲劳可靠性寿命预测流程

4.2 第 3 级齿轮疲劳可靠性寿命分布

在研究得到第 3 级齿轮副多工况二维应力谱和齿轮 Pa-Sa-Sm-N 曲面，采用 MTPMiner 准则，可估算出指定可靠度下轮齿的疲劳寿命。结果如表 2。

4.3 基于核对表法的关重件年消耗量确定

核对表法是美国陆军用来确定备件维修率的方法，美国陆军的维修率与我们定义的消耗率相似，但有一定的区别。通过调研和专家咨询，可以得出

影响舰炮方向传动系统关重备件消耗主要因素有备件的固有故障率和备件的使用率，并以此为基础得到备件消耗率定量分析模型和年消耗量。

表 2 第 3 级齿轮的疲劳可靠性寿命

可靠度 R/%	对数疲劳寿命	工作时间/h
50.0	4.334 1	1 438.8
90.0	4.136 3	912.4
95.0	4.079 8	801.2
99.0	3.975 1	629.6
99.9	3.858 6	481.6

4.3.1 备件消耗率的定量分析模型

1) 符号规定。

D 为备件的消耗率。即在 100 台含有该备件的装备中，每年消耗该备件的预期数；

λ 为备件的固有故障率，即备件的疲劳寿命的倒数，次/h；

m 为每台装备含某同型备件单元数；

n 为包含该备件的装备的年工作时间，h；

R_s 为在 100 台含有该备件的装备中，每年由于使用率而造成的备件故障数；

π 为故障的备件，通过修理能恢复良好状态的比率。

2) 假设。

① 可更换单元的寿命为一般分布，其分布密度函数为 $f(t)$ ，分布函数为 $F(t)$ ；

② 各同型单元故障相互独立；

③ 一种单元只采取一种预防维修手段；

④ 1 台装备所含的 m 个同型备件单元的工作环境应力相同

3) 备件消耗规律模型。

根据上面的消耗因素分析，可得备件的消耗率模型

$$D = (R_g + R_m + R_s)(1 - \pi) \quad (1)$$

其中，在 100 台含有该备件的装备中，由于固有故障率造成的备件每年的消耗数 R_g 与含有该备件的装备的年工作时间和备件的固有故障率有关。显然有下面的计算公式：

$$R_g = 100m \times n \times \lambda \quad (2)$$

在 100 台含有该备件的装备中，每年由于使用率而造成的备件故障数 R_s ，又包括由于严峻使用、人员操作失误和循环使用造成的故障数，若分别用 R_y 、 R_r 、 R_x 表示，则有

$$R_s = R_y + R_r + R_x \quad (3)$$

在 100 台含有该备件的装备中，每年消耗该备件的预期数，即该备件的消耗率的预计模型，可以表示为

$$D = (100mn\lambda + R_y + R_r + R_x)(1 - \pi) \quad (4)$$

模型中的后面 3 项，没有量化的公式，根据部队调研数据和专家评判得到。

4.3.2 案例分析

取舰炮方向传动系统关重件的可靠度为 99%，

即固有故障率为 99%可靠度下疲劳寿命的倒数。以第 3 级齿轮副为例，由表 2 可知第 3 级齿轮副在 99%可靠度下的疲劳寿命为 629.6 h，即 $\lambda=1/629.6$ ，假设每年舰炮方向传动系统运行时间 $n=200$ h，根据调研结果取 $R_y=2$ ， $R_r=1$ ， $R_x=1$ ， $\pi=0.1$ ，得到每 100 台装备一年内第 3 级齿轮副消耗量为 35.8 个。同理，可得到其他关重件年消耗量。

5 结束语

为准确地得到机械件消耗规律，在分析确定机械机构关重件基础上，笔者将虚拟样机技术引入机械件消耗确定。通过构建方向传动系统动力学仿真模型、故障仿真与验证，模拟得到机械件故障产生特点；并以此为基础，构建基于可靠性的疲劳寿命预测模型和机械件消耗解析模型，获得了方向传动系统备件年消耗量，为编制舰炮备件目录和消耗标准提供了输入，具有一定的军事和经济意义。

参考文献：

- [1] 牟春燕, 徐刚. FTA 在汽车起重机液压系统的诊断应用[J]. 起重运输机械, 2006(10): 57-58.
- [2] 吴超, 王克然. 基于 FTA 方法对某型飞机直流电源系统故障分析[J]. 飞机设计, 2003(3): 48-50.
- [3] 孙柏树, 马成斌, 金晓宇. 应用 FMECA 方法对某型号末修迫弹进行可靠性分析[J]. 国防技术基础, 2010(4): 27-30.
- [4] 杨高宏, 程珩, 齐有军, 等. 基于虚拟样机技术的齿轮故障特征提取方法研究[J]. 煤矿机械, 2009, 30(3): 193-195.
- [5] 李昌, 韩兴. 基于显式动力学的齿轮箱动态有限元数字仿真[J]. 兵工学报, 2009(7): 978-983.
- [6] Ziegler P, Eberhard Peter. Simulative and experimental investigation of impacts on gear wheels[J]. compute methods in applied mechanics and engineering, 2008, 0197(052): 4653-4662.
- [7] Ziegler P, Eberhard P, Schweizer B. Simulation of impacts in gear trains using different approaches[J]. Arch Appl Mech, 2006, 76: 537-548.
- [8] 周志峰, 刘伟, 王婧. 渐开线直齿轮修形的有限元分析与研究[J]. 机电工程, 2013, 30(12): 1490-1493.
- [9] 王立华, 李润方, 林腾蛟, 等. 齿轮系统时变刚度和间隙非线性振动特性研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(13): 1143-1146.
- [10] 唐进元, 彭方进, 黄云飞. 冲击载荷下的齿轮动应力变化规律数值分析[J]. 振动与冲击, 2009(8): 138-143.
- [11] 关贞珍. 基于非线性理论的齿轮箱轴承故障诊断及严重程度分析[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2011.
- [12] 张庆霞. 自行火炮传动件疲劳寿命分析与结构改进研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2007.