

电机控制及配电系统备件优化配置*

梅 丹^{1,2}, 王公宝¹, 叶志浩², 沈 静¹, 冯 杭¹

(1. 海军工程大学 理学院, 湖北 武汉 430033;

2. 海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 为了提高舰船电力系统的运行安全性和设计科学性, 研究了舰船电力系统电机控制及配电系统的备件设置对电力系统脆弱性的影响。提出了综合考虑降低费用、重量、体积等约束条件, 以多尺度综合脆弱度范数最小与资源消耗规模最小为双目标的优化模型; 根据满足率的要求确定舰船电力系统电机控制及配电系统的初始备件配置方案, 再利用边际优化方法得到最优备件配置方案。实现在网络结构不变的前提下, 通过合理配置节点元件备件数量, 达到提高舰船电力系统健壮性的目的。最后以复杂环形舰船电力系统为例对模型及算法进行了验证。

关键词: 舰船电力系统; 综合脆弱度范数; 配电系统; 备件; 边际优化

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)01-0041-05

Allocation Optimization Model for Electrical Machine Control and Power Distribution System Spare Parts*

MEI Dan^{1,2}, WANG Gongbao¹, YE Zhihao², SHEN Jing¹, FENG Hang¹

(1. College of Sciences, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to improve the safety and design of shipboard power system, the influence of spare parts configuration on the vulnerability of shipboard power network was studied. A two-objective optimization model was proposed to reduce the cost, quality, volume and other constraints. The objectives of optimization model were norm of comprehensive vulnerability degree and resource consumption scale. The initial allocation spare parts of each node in the shipboard power network were determined according to the satisfaction rate. Then, the optimization model was optimized by the marginal optimization algorithm. The purpose of improving the network robustness of the shipboard power system was realized through the reasonable allocation of spare parts. Finally, the model and the algorithm were verified by the example of complex ring shipboard power network.

Key words: shipboard power system; norm of comprehensive vulnerability degree; power distribution system; spare parts; marginal optimization

0 引 言

为实现远海机动作战目标, 加强舰船装备保障能力建设将成为未来海军装备建设发展的重

点, 其中, 合理规划随舰携行备件方案是提高舰船装备海上伴随保障能力的关键^[1]。备件配置优化问题可描述为^[2]: 为保证系统达到使用需求, 对相关备件包括储存位置选择、备件数量确定、储备种

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51377167, 61402516)

作者简介: 梅 丹(1983—), 女, 博士研究生, 研究方向为复杂网络理论、电力系统保护与安全运行。

王公宝(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为小波分析、电力系统谐波检测。

叶志浩(1975—), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全运行。

类选取在内的一系列问题求解。

国内外对备件问题的研究主要基于两个方面:(1) 根据不同的实际需求建立合理的备件模型;(2) 采用合理的优化方法对备件方案进行优化。在库存模型方面,文献[3-7]在供应保障周期和以备件满足率为优化指标的情况下,对备件的最优库存量模型进行了研究。文献[8-9]在备件满足率指标约束下,建立了备件的报废及再订购策略的优化模型,并通过算例给出了优化方案。文献[10]在多级供应保障模式下,将可修备件的多等级可修复备件库存理论应用于军事装备后勤保障领域,以可用度为优化指标,备件库存费用为约束条件建立了装备备件库存量的优化模型。在优化方法方面,边际效应分析^[11-12]是求解备件优化问题中最为常见的种优化方法,随着仿真优化技术的发展以及各种进化式算法(启发式算法、遗传算法、粒子群算法等)的提出,这些方法也被应用于备件优化问题中。如文献[13]通过仿真的方法求解备件的多级库存量优化模型;文献[14]采用启发式算法得到系统备件的最优库存控制策略;文献[15]将进化算法与仿真优化技术相结合来求解航空备件的两级库存分配的多目标优化问题。综合上述分析,所列举的国内外文献都是基于特定的任务背景,针对不同的实际需求以及不同的装备对问题展开研究。

合理设置舰船电力系统发电机、配电系统控制组件的备件方案更是提高舰船电力系统安全性和可靠性的有力保障。本文建立了舰船电力系统脆弱性最低和资源消耗规模最小为目标的备件配置优化模型,研究了电机控制及配电系统备件设置对电力网络脆弱性的影响,得到了合理的备件配置方案。

1 备件方案双目标优化模型

若某一舰船电力系统包含 m 个节点: b_{1j} 为第 j 个节点归一化的度数指标; b_{2j} 为第 j 个节点归一化的介数指标; b_{3j} 为第 j 个节点归一化的最大连通子图规模指标; b_{4j} 为第 j 个节点归一化的可靠度指标。

$$b_1 = \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ \vdots \\ b_{1m} \end{pmatrix}, b_2 = \begin{pmatrix} b_{21} \\ b_{22} \\ \vdots \\ b_{2m} \end{pmatrix}, b_3 = \begin{pmatrix} b_{31} \\ b_{32} \\ \vdots \\ b_{3m} \end{pmatrix}, b_4 = \begin{pmatrix} b_{41} \\ b_{42} \\ \vdots \\ b_{4m} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: b_1 ——舰船电力系统度数指标向量;

b_2 ——舰船电力系统介数指标向量;

b_3 ——舰船电力系统最大连通子图规模指标向量;

b_4 ——舰船电力系统可靠度指标向量。

对于舰船电力系统,采用多尺度综合脆弱度范数 P_s^p 描述系统的脆弱程度。舰船电力系统多尺度综合脆弱度范数 P_s^p 定义为

$$P_s^p = \|b\|_p = \left(\sum_{i=1}^4 \|b_i\|_p^p \right)^{1/p} \quad (2)$$

多尺度综合脆弱度范数 P_s^p 值越大,舰船电力系统的综合脆弱程度越高,系统越脆弱;多尺度综合脆弱度范数 P_s^p 值越小,舰船电力系统的综合脆弱程度越低,系统越不脆弱。

在舰船电力系统多尺度综合脆弱度范数的表达式中, P_s^p 实际上是关于 b_1, b_2, b_3, b_4 的函数,因此,式(2)可写为:

$$P_s^p = F(b_1, b_2, b_3, b_4) \quad (3)$$

舰船电力系统综合脆弱性主要考虑网络的拓扑结构脆弱性和元件可靠性两个方面。本文假定网络结构不变化,仅对备件配置进行优化,将备件数量作为导致舰船电力系统多尺度综合脆弱度范数发生改变的唯一变量,此时式(3)可进一步写为:

$$P_s^p = G(n_1 + 1, n_2 + 1, \dots, n_m + 1) \quad (4)$$

式中: $n_i (1 \leq i \leq m)$ ——舰船电力系统中第 i 个节点元件的备件数量。

当舰船出行时,备件携行能力和经费预算有限,最优的备件方案应当在使整个舰船电力系统多尺度综合脆弱度范数 P_s^p 达到最小的同时,还需要降低费用、重量、体积等资源消耗规模。以多尺度综合脆弱度范数 P_s^p 最小与资源消耗规模 Y 最小为目标,约束条件为总费用不超过既定的预算,总重量、总体积不超过舰船提供给备件的承载能力范围,建立如下双目标优化模型:

$$\begin{aligned} \min P_s^p &= \left(\sum_{i=1}^4 \|b_i\|_p^p \right)^{1/p} \\ \min Y &= \sum_{i=1}^m \left(\frac{M_{ik_0}}{M_0} + \frac{C_{ik_0}}{C_0} + \frac{V_{ik_0}}{V_0} \right) \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \sum_{i=1}^m M_{ik_0} \leq M_{\max} \\ \sum_{i=1}^m C_{ik_0} \leq C_{\max} \\ \sum_{i=1}^m V_{ik_0} \leq V_{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: M_0 ——单个各类备件的重量总和;

M_{ik_0} ——第 i 个节点元件的备件总重量,

$$M_{ik_0} = \sum_{k=1}^{n_i} M_{ik};$$

C_0 ——各类备件的单价总和;

C_{ik_0} ——第 i 个节点元件的备件总费用,

$$C_{ik_0} = \sum_{k=1}^{n_i} C_{ik};$$

V_0 ——单个各类备件的体积总和;

V_{ik_0} ——第 i 个节点元件的备件总体积,

$$V_{ik_0} = \sum_{k=1}^{n_i} V_{ik};$$

$M_{\max}$ ——所携带的备件重量上限;

$C_{\max}$ ——备件费用上限;

$V_{\max}$ ——所携带的备件体积上限。

事实上,在对式(5)的求解中,需要将双目标转化为单目标优化模型:

$$\begin{aligned} \min Q &= \lambda_1 P_s^p + \lambda_2 \frac{Y}{Y_{\max}} \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \sum_{i=1}^m M_{ik_0} \leq M_{\max} \\ \sum_{i=1}^m C_{ik_0} \leq C_{\max} \\ \sum_{i=1}^m V_{ik_0} \leq V_{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: λ_1, λ_2 —— P_s^p, Y 的权值,且 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$;

$Y_{\max}$ ——在费用、重量、体积均取上限时的资源消耗规模。

2 备件初始配置方案的计算

假设舰船电力系统节点对应的元件随舰配备

了 n 个相同的备件,如果将装备上的元件本身也视为一个随舰备件,则该元件随舰携带的实际备件数量为 $n+1$ 个。若舰船在海上执行任务期间元件工作时间为 T ,在元件工作时间 T 内发生的故障次数 X 应服从泊松分布,即随机变量 X 的分布律为

$$P(X=k) = \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T}, k=0,1,2,\dots \quad (7)$$

随舰元件的满足率指在规定的时间内现有备件量能需求量的百分比,也称为备件保障概率。也可理解为在任务时间 T 内随舰元件的满足次数与维修元件实际需要次数之比(记为 Y)。 Y 是一个离散型随机变量,与随机变量 X 有如下关系:

(1) 当 $0 \leq X \leq n$ 时,即元件实际发生的故障次数小于随舰备件个数时,则随舰器材的满足率 Y 为 1;

(2) 当 $X > n$ 时,即元件实际发生的故障次数大于随舰携带的备件个数时,则随舰器材的满足率 Y 为 $\frac{n+1}{X+1}$ 。

综上所述,随机变量 Y 与 X 的关系式为

$$Y = \begin{cases} 1 & 0 \leq X \leq n \\ (n+1)/(X+1) & X > n \end{cases} \quad (8)$$

式(8)实际上是从统计角度给出了现有随舰元件在一次任务时间内的满足率。

定义随舰元件的满足率为随机变量 Y 的数学期望,通过计算其数学期望可以得到以下两个结论:

结论 1:若元件寿命服从故障率为 λ 的指数分布,则在给定任务时间 T 内,当配置随舰备件数量为 n 时,随舰元件满足率为

$$P_f(n, T) = EY = \frac{1}{T} \int_0^T P(n, t) dt \quad (9)$$

式中: $P(n, t)$ ——配置 n 个备件时所对应的保障概率。

$$P(n, t) = \sum_{i=0}^n P(X=i) = \sum_{i=0}^n \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \quad (10)$$

从结论 1 可以看到,元件满足率与备件保障概率紧密相关,实际上是备件保障概率的平均值,反映了备件的随舰配置数在给定任务时间内满足维修保障需求的程度。

结论 2: 若元件寿命服从故障率为 λ 的指数分布, 在给定任务时间 T 内, 当配置随舰备件数量为 n 时, 则随舰元件的平均工作时间为

$$ET' = \int_0^T R_s(t) dt \quad (11)$$

式中: T' ——元件和 n 个随舰备件在任务期间能够正常工作的实际时间;

$R_s(t)$ ——元件和 n 个随舰备件组成的冷储备系统的可靠度, $R_s(t) = P(n, t)$ 。

由式(9)和式(11), 可得

$$P_f(n, T) = \frac{ET'}{T} \quad (12)$$

由式(12)可知, 满足率实际上表示了在规定时间内元件与随舰备件组成的冷储备系统的平均工作时间与给定任务时间的比值, 反映的是在给定任务时间内随舰备件的保障能力的大小。比值越大, 说明完成预定任务的能力越强, 否则, 完成预定任务的能力越低。从执行任务的重要程度出发, 可以直观地提出随舰备件满足率大小的要求, 为随舰备件配置方案的制定奠定基础。

随舰备件配置是指根据装备的满足率要求, 按照备件配置时间内使用、更换与维修需要确定随舰备件的品种和数量。根据满足率的要求确定电网各节点元件的初始备件配置方案。

不可维修器材的工作时间为 T , 当给定元件的保障满足率 P_0 时, 元件配备的备件数从零开始逐次增加。当计算得到的满足率 $P_f(n, T)$ 首次达到给定满足率要求 P_0 时, 得到元件配备的备件数 n_1 就是该元件达到满足率要求条件下的随舰备件配置数:

$$n_1 = \min\{n | P_f(n, T) \geq P_0\} \quad (13)$$

3 备件方案优化流程

根据式(6), 由初始备件方案运用边际优化方法探求最优方案, 作出具体的优化流程图, 如图 1 所示。

求解步骤:

(1) 初始备件方案为 $(m_{01}, m_{02}, \dots, m_{0n})$, 在该方案下的目标值为 Q_0 。

(2) 计算各个节点元件备件分别增加或减少 1 个数量, 其余节点备件数量保持不变时 (简记为 $s \leftarrow s \pm 1$) 对应的备件方案。

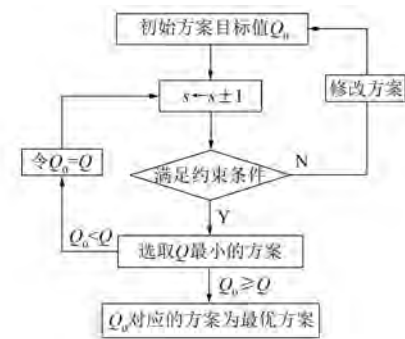


图 1 舰船备件方案优化流程示意图

(3) 对所有方案进行检验, 选取其中满足约束条件的方案进入步骤(4)。

(4) 选取所得方案中 Q 最小的方案。若 $Q < Q_0$, 则令 $Q_0 = Q$ 进入步骤(2); 若 $Q \geq Q_0$, 则 Q_0 对应的方案为最优方案。

4 实例分析

以某复杂环形舰船电力系统网络为例进行模型验证。为了建立舰船电力系统等效网络模型, 结合其结构及运行特点, 按照文献[16]的方法将发电机、主配电板、分配电板等电气设备等效为复杂网络模型中的节点; 将电网元件之间的连接关系等效为复杂网络模型中的边, 建立舰船电力网络的等效拓扑模型。图 2 所示为复杂环形舰船电力网络的结构示意图。图 3 所示为该电网对应的等效拓扑模型, 其中, G 表示发电机节点; S 表示配电板节点; L 表示负载节点; D 表示发电机电缆节点; J 表示跨接电缆节点; F 表示馈线电缆节点^[16]。

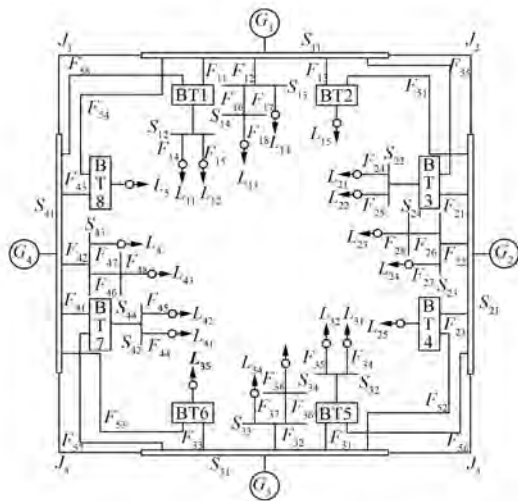


图 2 复杂环形舰船电力系统的结构示意图

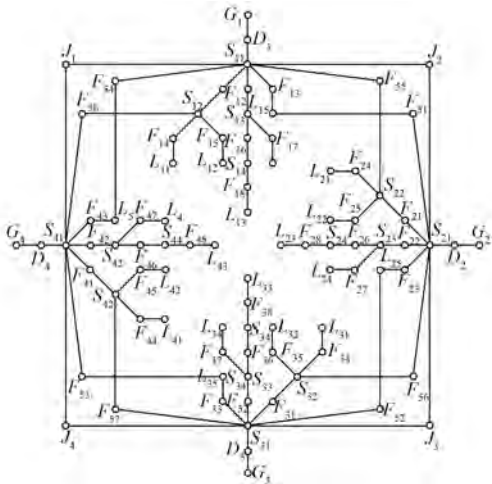


图3 复杂环形舰船电力系统对应等效拓扑图

本文只考虑发电机和配电板控制组件的备件配置情形。表1、表2为发电机和配电板的备件参数。

表1 发电机备件参数

备件	宽/ mm	高/ mm	深/ mm	质量/ kg	价格/ 万元	MTBF/ h
励磁 控制器 (备件1)	300	500	300	5	30	10 000
整流 二极管 (备件2)	540	750	930	300	60	5 000

表2 配电板备件参数

备件	宽/ mm	高/ mm	深/ mm	质量/ kg	价格/ 万元	MTBF/ h
断路器 (备件1)	240	805	640	114	173	1 600 000
继电器 (备件2)	90	160	140	1	0.005	1 200 000

在舰船电力系统性能优化双目标模型式(6)中,主要考虑使整个系统多尺度综合脆弱度范数尽可能大,因此选取 $\lambda_1=0.8, \lambda_2=0.2$ 。由于 p 范数的等价性,不妨取 $p=1$ 。设备件的质量约束指标 $M_{\max}=1\,500\text{ kg}$;费用约束指标 $C_{\max}=2\,000$ 万元;体积约束指标 $V_{\max}=50\text{ m}^3$ 。

表3给出了发电机节点和配电板节点的不同类型备件数量方案。此时优化模型(6)中的目标

函数下降了18.74%。这也说明系统的脆弱程度降低了,网络性能得到了优化。

表3 备件携行方案

节点	备件1/个	备件2/个	节点	备件1/个	备件2/个
G_1	2	0	S_{21}	1	6
G_2	3	1	S_{22}	0	3
G_3	3	1	S_{23}	0	3
G_4	2	0	S_{24}	0	4
S_1	0	8	S_{31}	1	5
S_2	0	7	S_{32}	0	4
S_3	0	7	S_{33}	0	4
S_4	0	8	S_{34}	0	3
S_{11}	1	5	S_{41}	1	6
S_{12}	0	3	S_{42}	0	3
S_{13}	0	4	S_{43}	0	3
S_{14}	0	3	S_{44}	0	2

5 结 语

本文研究了舰船电力系统发电机、配电系统控制组件的备件设置对电力网络脆弱性的影响。为了保证舰船电力系统脆弱程度最低,提出了以舰船电力系统多尺度综合脆弱度范数和资源消耗规模最小为目标的双目标优化模型;并通过边际优化算法从初始备件配置方案中寻找最优求解结果。在网络结构不变的前提下,通过合理配置节点对应设备的备件数量达到提高舰船电力系统安全性的目的。

【参考文献】

[1] 阮旻智,李庆民,张光宇,等.多约束下舰船装备携行备件保障方案优化方法[J].兵工学报,2013,34(9): 1144-1149.

[2] 周伟,王东锋,刘亚杰,等.考虑相关失效的备件优化配置模型[J].系统工程与电子技术,2011,33(10): 2338-2342.

[3] ZHANG J, ZHANG J. Fill rate of single-stage general periodic review inventory systems [J]. Operations Research Letters, 2007, 35(4): 503-509.

[4] HEIJDEN M. Near cost-optimal inventory control policies for divergent networks under fill rate constraints [J]. International Journal of Production Economics, 2000, 63(2): 161-179.

(下转第63页)

- 策, 2016, 31(8): 1509-1512.
- [7] 刘朝华, 张兢, 李小花, 等. 免疫协同微粒群进化算法的永磁同步电机多参数辨识模型方法[J]. 自动化学报, 2012, 38(10): 1698-1708.
- [8] 张令朝, 刘国海, 潘天红, 等. 基于新型转子磁链辨识方法的多电机系统同步控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(12): 1804-1809.
- [9] 刘朝华, 周少武, 刘侃, 等. 基于双模态自适应小波粒子群的永磁同步电机多参数识别与温度检测方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(12): 2121-2130.
- [10] 祝晓辉, 李颖晖, 孙国强. 永磁同步电机非线性观测器设计及内核验证[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(12): 1594-1602.
- [11] 梅从立, 殷开婷, 黄文涛, 等. 基于数据驱动感应电机多模型逆自适应解耦控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1037-1041.
- [12] 潘月斗, 郭映维, 贺靛. 基于重置算法的感应电机转速自适应观测器[J]. 控制与决策, 2015, 30(9): 1723-1728.
- [13] 潘月斗, 陈虎. 基于高增益观测技术的高精度感应电机磁链观测研究[J]. 控制与决策, 2014, 29(8): 1495-1500.
- [14] 赵海森, 杜中兰, 刘晓芳, 等. 基于递推最小二乘法与模型参考自适应法的鼠笼式异步电机转子电阻在线辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5386-5394.

收稿日期: 2017 -03 -20

(上接第 45 页)

- [5] TEUNTER R H. Note on the fill rate of single-stage general periodic review inventory systems [J]. Operations Research Letters, 2009, 37(1): 67-68.
- [6] 阮旻智, 李庆民, 彭英武, 等. 任意结构系统的备件满足率模型及优化方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1799-1803.
- [7] 罗伟, 阮旻智, 袁志勇. 多级维修供应下可修复备件库存建模与优化[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(10): 2623-2630.
- [8] PINCE C, GURLER U, BERK E. A continuous review replenishment disposal policy for an inventory system with autonomous supply and fixed disposal costs[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 190(2): 421-442.
- [9] AXSATER S. A simple procedure for determining order quantities under a fill rate constraint and normally distributed lead-time demand[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(1): 480-491.
- [10] LAU H C, SONG H, SEE C T, et al. Evaluation of time-varying availability in multi-echelon spare parts systems with passivation [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 170(1): 91-105.
- [11] 孙江生, 李苏剑, 吕艳梅, 等. 武器贵重备件三级库存模型仿真研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(7): 854-858.
- [12] 王乃超, 康锐. 基于备件保障概率的多级库存优化模型[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1043-1047.
- [13] TEE Y S, ROSSETTI M D. A robustness study of a multi-echelon inventory model via simulation [J]. International Journal of Production Economics, 2002, 80(3): 265-277.
- [14] AL-RIFAI M H, ROSSETTI M D. An efficient heuristic optimization algorithm for a two-echelon (R, Q) inventory system [J]. International Journal of Production Economics, 2007, 109(12): 195-213.
- [15] LEE L H, CHEW E P, TENG S Y, et al. Multi-objective simulation based evolutionary algorithm for an aircraft spare parts allocation problem [J]. European Journal of Operational Research, 2008 (189): 325-341.
- [16] 梅丹, 王公宝, 叶志浩, 等. 基于复杂网络理论的舰船电力网络脆弱性分析[J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(3): 28-32.

收稿日期: 2017 -06 -10

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

反映行业最新动态