

海军特种飞机腐蚀防护与控制技术丛书

# 海军特种飞机 结构腐蚀防护与控制设计指南



Guide of Corrosion Protection and Control Design  
for Navy Special Aircraft Structure

欧阳绍修 廖圣智 编著



航空工业出版社

海军特种飞机腐蚀防护与控制技术丛书

# 海军特种飞机结构腐蚀 防护与控制设计指南

欧阳绍修 廖圣智 编著

航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了海军特种飞机结构腐蚀防护与控制设计技术。主要内容包括：飞机结构腐蚀防护与控制一般设计要求、海军特种飞机服役环境分析、材料腐蚀特性与选用/限用、紧固件选用及防腐蚀安装、表面防护体系设计、结构腐蚀监测技术等。本书内容全面系统，具有指导性、实用性。

本书可用于指导海军特种飞机结构设计人员进行腐蚀防护与控制设计，对从事其他型号的设计人员亦有参考价值。

### 图书在版编目 (C I P) 数据

海军特种飞机结构腐蚀防护与控制设计指南 / 欧阳绍修, 廖圣智编著. --北京: 航空工业出版社, 2019. 4  
(海军特种飞机腐蚀防护与控制技术丛书)  
ISBN 978-7-5165-1817-5

I. ①海… II. ①欧… ②廖… III. ①海军-军用飞机-防腐-结构设计-指南 IV. ①V271.4-62  
②V261.93-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 071725 号

### 海军特种飞机结构腐蚀防护与控制设计指南

Haijun Tezhong Feiji Jiegou Fushi Fanghu yu Kongzhi Sheji Zhinan

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010-84936597 010-84936574

中国电影出版社印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2019 年 4 月第 1 版

2019 年 4 月第 1 次印刷

开本: 710×1000 1/16 印张: 16

字数: 245 千字

印数: 1—2800

定价: 80.00 元

# 海军特种飞机结构腐蚀防护与控制设计指南

## 编 委 会

主 任 欧阳绍修 廖圣智

副主任 胡保全 王浩伟

委 员 (按姓氏笔画排列)

王 雷 王英芹 王春雷 王振成

叶远珩 代警卫 刘成臣 刘元海

李敏敏 杨 曦 张 幸 张 登

张新平 金 涛 赵连红 高 翔

梁青森 慕仙莲 谭晓辉

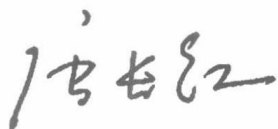
# 丛书序

飞机腐蚀防护与控制是一项复杂的系统工程，贯穿于飞机设计、制造、使用和维护的全寿命周期。开展腐蚀防护与控制工作对提升飞机固有的抗腐蚀品质，降低全寿命周期使用维护成本，提高战时出勤率，具有十分重大的意义。海军特种飞机驻岛驻舰，面临高温、高湿、高盐雾及强紫外的严酷环境，对飞机腐蚀防护与控制设计，以及使用维护提出了更高的要求。

《海军特种飞机结构腐蚀防护与控制设计指南》与《海军特种飞机结构腐蚀维护和修理指南》分析研究了大量国内外相关资料、结合创新实践研究成果，是介绍海军特种飞机腐蚀防护与控制的专业丛书。该丛书系统地阐述了海军特种飞机结构防腐蚀设计和防腐蚀维修的要求、依据、方法，并辅以大量实际案例和分析说明，内容全面，实用性强，具有很高的学术价值和工程应用价值。

编著该丛书的作者都是飞机设计、使用维护的一线技术专家，从20世纪90年代初起，承担并参与了多型飞机的腐蚀防护与控制设计，具有丰富的实践经验和很好的理论基础。汇研究实践之成果于专著，必然对从事飞机设计及使用维护的工程技术人员具有现实指导意义，是一笔宝贵财富。期望并相信该丛书的出版会对我国航空装备的腐蚀防护与控制工作起到积极的技术推动作用。

中国工程院院士



2019年2月

# 前 言

我国海军特种飞机主要是反潜巡逻机和预警机等。由于其服役环境大多具有高温、高湿、高盐雾、强紫外的特点，腐蚀已经日益明显。通过结构腐蚀防护与控制设计提升飞机的固有抗腐蚀品质，提高飞机可靠性和维修性，降低全寿命周期的使用及维护成本，是飞机结构完整性的重要内容。

本指南在充分调研国内海军特种飞机外场腐蚀现状、吸收消化国内外相关资料、对某型海军特种飞机结构设计方案进行腐蚀防护与控制优化设计、进行大量试验验证研究等基础上编著而成。本指南共分为9章，重点介绍了飞机结构腐蚀防护与控制一般设计要求，分析了海军特种飞机服役环境，并针对海军特种飞机面临的环境特点，综合介绍了材料腐蚀特性与选用/限用、紧固件选用及防腐蚀安装、表面防护体系设计、密封材料的选用及密封/装配设计、结构排水设计、试验与评估、结构腐蚀监测技术等内容，同时给出了典型案例。内容全面系统，可用于指导海军特种飞机设计人员进行结构腐蚀防护与控制设计，对其他型号的腐蚀防护与控制设计亦有重要的参考价值。

全书由欧阳绍修和廖圣智编著。在本书的编写过程得到了海军机关、国内同行及外场部队的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于飞机腐蚀防护与控制是一项复杂的系统工程，书中的内容可能存在疏漏和不足，敬请广大读者、同行批评指正。

作 者

2019年2月

# 目 录

第 1 章 飞机结构腐蚀防护与控制一般设计要求 .....	1
1.1 飞机腐蚀防护与控制一般原则 .....	1
1.2 确定腐蚀防护与控制目标 .....	2
1.3 飞机各阶段腐蚀防护与控制工作 .....	2
1.3.1 方案阶段 .....	2
1.3.2 工程研制阶段 .....	3
1.3.3 设计定型阶段 .....	3
1.3.4 生产（定型）阶段 .....	4
1.3.5 使用维护阶段 .....	4
1.4 环境分类及环境谱编制一般要求 .....	4
1.5 材料选用 .....	5
1.6 表面防护设计 .....	6
1.7 防腐蚀密封设计 .....	7
1.8 防排水设计 .....	8
1.8.1 排水系统组成 .....	8
1.8.2 防水、排水设计一般要求 .....	8
1.9 通风设计 .....	9
1.9.1 通风设计一般原则 .....	9
1.9.2 通风结构形式 .....	10
1.10 可达性设计 .....	10
1.11 可修性设计 .....	11

1.12	生产制造中的腐蚀防护与控制	11
1.13	使用维护中的腐蚀防护与控制	13
1.14	试验与评估	14
1.14.1	加速腐蚀试验	14
1.14.2	自然环境曝露试验	15
1.15	适航性要求	15
<b>第2章</b>	<b>海军特种飞机服役环境分析</b>	<b>17</b>
2.1	总体使用环境	17
2.1.1	停放环境	17
2.1.2	空中飞行环境	22
2.2	海军特种飞机典型局部环境及分类	26
2.2.1	典型局部环境	26
2.2.2	局部环境分类	27
<b>第3章</b>	<b>材料腐蚀特性与选用/限用</b>	<b>29</b>
3.1	概述	29
3.2	金属材料的腐蚀特性	29
3.2.1	铝合金	29
3.2.2	钛合金	49
3.2.3	结构钢	54
3.2.4	不锈钢	60
3.2.5	铜及铜合金	66
3.3	复合材料的腐蚀特性	71
3.3.1	腐蚀类型	71
3.3.2	复合材料的选用	72
3.3.3	几种常用复合材料	73
3.4	非金属材料的腐蚀特性	74
3.4.1	塑料	75
3.4.2	橡胶	75

3.4.3 透明材料 .....	75
3.4.4 胶黏剂 .....	76
3.4.5 密封剂 .....	76
3.5 选材案例 .....	76
3.6 海军特种飞机材料选用/限用建议 .....	81
3.6.1 铝及铝合金 .....	82
3.6.2 结构钢 .....	84
3.6.3 不锈钢 .....	85
3.6.4 钛及钛合金 .....	85
3.6.5 铜及铜合金 .....	86
3.6.6 镁合金 .....	86
3.6.7 复合材料 .....	86
3.6.8 塑料、橡胶、透明材料 .....	88
3.6.9 胶黏剂 .....	89
3.6.10 其他非金属材料 .....	90
<b>第4章 紧固件选用及防腐蚀安装 .....</b>	<b>91</b>
4.1 概述 .....	91
4.2 海洋环境下飞机紧固件腐蚀现状 .....	91
4.3 紧固件选取及防腐蚀安装设计要求 .....	98
4.4 国内外飞机紧固件发展及选用情况 .....	99
4.5 海军特种飞机紧固件防腐蚀设计建议 .....	100
4.5.1 加强紧固件的质量管控 .....	101
4.5.2 重视先进材料及表处方法的应用 .....	101
4.5.3 采取合理的密封防护措施 .....	101
4.5.4 控制安装工艺质量 .....	101
<b>第5章 表面防护体系设计 .....</b>	<b>103</b>
5.1 概述 .....	103
5.2 表面处理技术 .....	103

5.2.1	表面处理层选用原则	103
5.2.2	表面处理层性能、应用范围与限制	104
5.3	表面涂层设计	123
5.3.1	概述	123
5.3.2	国内现役机型涂层材料	126
5.4	缓蚀剂的应用	137
5.4.1	缓蚀剂种类	137
5.4.2	国外缓蚀剂应用状况	139
5.4.3	国内缓蚀剂发展现状	142
5.5	防护体系设计案例	143
5.5.1	表面防护体系	143
5.5.2	缓蚀剂应用	145
5.6	海军特种飞机表面防护体系选用建议	148
5.6.1	海军特种飞机表面处理选用建议	148
5.6.2	海军特种飞机表面涂层选用建议	153
5.6.3	海军特种飞机缓蚀剂选用建议	154
<b>第6章</b>	<b>防腐蚀密封/装配设计</b>	<b>156</b>
6.1	概述	156
6.2	密封材料及其选用原则	156
6.2.1	密封剂类型及性能要求	156
6.2.2	密封材料选用原则	159
6.3	典型密封形式及其密封工艺要求	160
6.3.1	飞机结构密封	160
6.3.2	紧固件密封安装	166
6.4	国内外飞机典型结构防腐蚀密封案例分析	173
6.4.1	长桁与蒙皮之间	173
6.4.2	剪切角材与蒙皮之间	174
6.4.3	蒙皮纵向搭接区域	175

6.4.4	蒙皮对接区域	177
6.4.5	天线安装区域	177
6.4.6	电搭接结构区域	179
6.4.7	衬套密封	180
6.5	海军特种飞机结构防腐蚀密封设计建议	181
6.5.1	密封设计要求	181
6.5.2	贴合面和接头密封	182
6.5.3	不可卸紧固件安装	188
6.5.4	可卸紧固件安装	190
<b>第7章</b>	<b>结构排水设计</b>	<b>191</b>
7.1	概述	191
7.2	国内外飞机典型结构/部位排水设计案例分析	192
7.2.1	机身隔框排水	192
7.2.2	剪切角材与桁条之间	194
7.2.3	应急门门槛区域排水	195
7.2.4	登机门门槛区域排水	197
7.2.5	机身下部桁条排水(非端部区域)	199
7.2.6	机身下部桁条端部排水(接头与框水平缘条搭接)	201
7.2.7	机身下部桁条端部排水(接头通过框腹板对接)	202
7.3	海军特种飞机结构排水设计建议	203
7.3.1	全机排水设计思路	204
7.3.2	机身排水设计	205
7.3.3	机翼排水设计	208
7.3.4	尾翼排水设计	212
7.3.5	短舱排水设计	217
<b>第8章</b>	<b>试验与评估</b>	<b>218</b>
8.1	概述	218
8.2	研制性试验与评估	218

8.3	验证性试验与评估	219
8.4	试验对象的选取	220
8.5	加速试验环境谱	221
8.5.1	加速试验环境谱编制原则	221
8.5.2	加速试验环境谱的编制步骤	222
8.5.3	加速试验环境谱组成	223
<b>第9章</b>	<b>飞机结构腐蚀监测技术</b>	<b>227</b>
9.1	概述	227
9.2	国内外飞机结构腐蚀监测技术研究现状	228
9.2.1	国外研究现状	228
9.2.2	国内研究现状	233
9.3	腐蚀监测系统简介	234
9.3.1	腐蚀监测系统组成	234
9.3.2	工作模式	234
9.3.3	性能指标	235
9.4	腐蚀监测系统在海军特种飞机上应用方案	236
9.4.1	探头布置区域	236
9.4.2	监测参数	237
9.4.3	腐蚀自动监测仪、探头和电缆线安装方式	237
9.4.4	采样间隔周期	237
9.4.5	确定数据下载方式及下载周期	238
9.5	腐蚀监测系统在飞机上应用案例	238
<b>参考文献</b>		<b>241</b>

# 第1章 飞机结构腐蚀防护与控制一般设计要求

随着服役年限的增加，腐蚀对服役于海洋环境下飞机的影响将更为突出。目前，海军装备“适海性”已成为我国海军新研装备研制的强制要求，海军飞机“腐蚀控制系统工程”逐渐成为研发、生产人员的思想共识。

所谓腐蚀控制系统工程是指为最大程度地降低腐蚀对武器装备的危害、保证其使用寿命内正常运行，在装备的设计、制造、使用和维护过程中实施全面的腐蚀预防与控制。其中心思想是：腐蚀控制要从设计开始，贯穿于制造、储存、运输、使用、维护、维修全过程，进行全过程、全方位的控制，研究每一个零部件的制造环境、运行环境和周围自然环境及其协同作用，提出控制措施和实施细节，进行“精心设计、精心制造、精心维护、精心管控”。本章基于腐蚀控制系统工程的理念，介绍了飞机腐蚀防护与控制一般原则、目标、各阶段工作，并提出了结构设计、制造、使用、试验中的腐蚀防护与控制一般要求。

## 1.1 飞机腐蚀防护与控制一般原则

飞机腐蚀防护与控制工作一般原则如下：

(1) 充分认识飞机预期的使用环境、任务模式、使用寿命，以及保障性要求，确定飞机腐蚀防护与控制工作及要求。

(2) 针对飞机典型局部环境和使用功能特点，结合现役装备出现的典

型腐蚀问题，提出型号腐蚀防护与控制具体要求/规定，规范全寿命期的腐蚀防护与控制工作。

(3) 飞机腐蚀防护与控制要求/规定应以相关规范与标准规定为依据，同时与型号腐蚀防护与控制大纲协调匹配，并可通过试验和工程应用经验进行补充完善，具有可剪裁性。

(4) 在满足耐环境、防腐蚀要求的情况下尽量采用现有的、成熟的防腐蚀材料、技术、工艺与产品等，节省研制成本，缩短研制周期。

## 1.2 确定腐蚀防护与控制目标

通过腐蚀控制系统工程的贯彻、落实，达到以下目标：

(1) 一般结构、系统和设备腐蚀防护与控制效能应在规定的首翻期（或翻修间隔）内保持有效。

(2) 对于难以检查、修理、更换或过分增加使用维护费用的结构，腐蚀防护与控制效能应在规定的使用寿命期间保持有效。

## 1.3 飞机各阶段腐蚀防护与控制工作

飞机结构腐蚀控制工作是一项系统工程，必须贯穿于方案论证、工程研制、设计定型、生产定型和使用维护的各个阶段。

### 1.3.1 方案阶段

方案阶段主要工作如下：

- (1) 分析型号服役环境及约束条件。
- (2) 制订并实施型号腐蚀防护与控制大纲。
- (3) 制订型号腐蚀防护与控制工作计划。
- (4) 筹备、建立型号腐蚀防护与控制工作分系统。
- (5) 开展型号腐蚀防护与控制顶层（技术）设计。

- (6) 完成型号工作环境谱及加速谱的编制。
- (7) 针对性开展型号腐蚀防护与控制设计研制性试验或摸底试验。
- (8) 明确腐蚀防护与控制相关的技术、工艺、方法、判定标准等相关信息。
- (9) 制订型号腐蚀防护与控制详细初步设计方案。
- (10) 进行型号腐蚀防护产品（用品）协调。
- (11) 对设计、工程技术人员开展腐蚀防护与控制设计技术培训。
- (12) 编制腐蚀维护与修理工具配套清单（初稿）。

### 1.3.2 工程研制阶段

工程研制阶段主要工作如下：

- (1) 制订型号腐蚀防护与控制详细设计规定、要求，开展型号结构腐蚀防护与控制详细设计。
- (2) 进行详细设计图样审查。
- (3) 开展型号腐蚀防护新产品、新材料研制性或验证试验。
- (4) 开展型号典型结构细节、腐蚀关键结构部位、特殊结构/机构腐蚀防护设计验证试验。
- (5) 型号腐蚀防护设计环境适应性评估分析报告。
- (6) 构建型号生产制造过程腐蚀防护与控制管理体系规范。
- (7) 补充、修订型号腐蚀防护与控制相关工艺文件。
- (8) 进行型号试制跟产。
- (9) 编制型号腐蚀防护与控制维修/腐蚀控制手册（初稿）。

### 1.3.3 设计定型阶段

设计定型阶段主要工作如下：

- (1) 进行型号腐蚀防护与控制设计定型总结。
- (2) 进行型号腐蚀防护与控制设计问题归零处理。
- (3) 编制型号腐蚀防护与控制维修/腐蚀控制手册（正稿）。

### 1.3.4 生产（定型）阶段

生产（定型）阶段主要工作如下：

- (1) 进行型号腐蚀防护与控制生产定型总结。
- (2) 进行型号生产制造中的腐蚀防护与控制问题归零处理。

### 1.3.5 使用维护阶段

使用维护阶段主要工作如下：

- (1) 跟踪外场使用情况，及时处理使用过程中出现的腐蚀问题。
- (2) 依据外场腐蚀问题，对型号的腐蚀防护控制进行设计改进。
- (3) 视情调整日常维护、修理措施，腐蚀防护与控制维修手册持续改进。

## 1.4 环境分类及环境谱编制一般要求

应根据飞机战术技术要求、设计使用用途和飞行任务剖面，分析与确定结构预期经历的使用环境及其影响。

参照 GJB/Z 594A，将飞机结构/细节的使用环境条件分为良好、一般、恶劣、海上、特殊共五类，见表 1-1。

表 1-1 使用环境分类

类型	代号	环境特征
良好	L	相对湿度不大于 70%，不曝露在大气中，无工业气体、燃料废气、介质蒸气及其他腐蚀性介质
一般	Y	相对湿度不大于 95%，不受阳光、雨、雪、海水等直接侵害，但有少量工业气体、燃料废气、介质蒸气或海雾的一般环境条件
恶劣	E	相对湿度大于 95%，受风、沙、雨、雪、海雾、阳光、工业气体、燃料废气及其他腐蚀性介质直接影响，或者温度、湿度变化较大的环境

表 1-1 (续)

类型	代号	环境特征
海上	H	直接与海水接触或经常处于饱和海雾中
特殊	T	处于特殊腐蚀环境中或要求具有某些特殊性能（如动力装置和其他热源引起的稳态和瞬态加热、地面试车和顺风延长滑行、舰上环境等）

环境谱编制的原则与方法如下：

- (1) 可通过查询相关资料、飞行实测获取可靠的环境数据。
- (2) 对获取的环境数据进行统计分析，包括分析结构/细节/材料对环境的腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳等的敏感性，并考虑腐蚀环境、热应力和机械应力的相互影响。
- (3) 应根据飞机的设计用途和飞行任务剖面，确定对结构/细节耐久性有较大影响的环境条件（如环境强度、持续时间和频率等），并编制成地面停放和飞行使用环境谱。
- (4) 环境谱的编制需进行剪裁、加速，但应能再现装备在整个使用寿命期内的腐蚀效应。

## 1.5 材料选用

飞机结构选材对于飞机的防腐蚀能力具有重要的意义，需考虑服役中预期的环境条件对材料的影响。飞机结构选材一般要求如下：

- (1) 在满足型号技战术性能要求的前提下，尽可能地选用耐蚀性能良好的材料，尤其是易产生腐蚀和不易维护的部位。
- (2) 在恶劣腐蚀环境下承受高载荷的构件或其他重要的构件，应选用对应力腐蚀、氢脆和腐蚀疲劳等敏感性小的材料。
- (3) 应全面综合地考虑材料的强度、疲劳性能、断裂性能、耐腐蚀性、工艺性、经济性等的选材原则。