

## 引入重要度修正因子的复杂光电系统可靠性分配研究

宁飞 郑凤翥 王惠林 边 王乐 王冠

### Research on reliability allocation of complex electro-optical systems by introducing importance correction factors

NING Fei, ZHENG Fengzhu, WANG Huilin, BIAN Yun, WANG Le, WANG Guan

引用本文:

宁飞, 郑凤翥, 王惠林, 等. 引入重要度修正因子的复杂光电系统可靠性分配研究[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 590–597. DOI: 10.5768/JAO202445.0301001

NING Fei, ZHENG Fengzhu, WANG Huilin, et al. Research on reliability allocation of complex electro-optical systems by introducing importance correction factors[J].

Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 590–597. DOI: 10.5768/JAO202445.0301001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0301001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 影响光电侦察系统目标定位精度因素分析

Analysis and study on influence factors of target geo-locating accuracy for electro-optical reconnaissance system

应用光学. 2018, 39(1): 1–6 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101001>

#### 自适应功率分配可见光MIMO信道容量研究

Research on MIMO channel capacity for adaptive power allocation visible light

应用光学. 2020, 41(3): 626–630 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308002>

#### 用于光电设备的航电总线数据测试系统

Avionics bus measurement system used for EO equipments

应用光学. 2018, 39(6): 947–950 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0608002>

#### 航空光电侦察图像质量影响因素分析

Image quality influencing factors for aerial electro-optical detection

应用光学. 2021, 42(5): 817–829 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502001>

#### 某光电吊舱内方位电机组件低温摩擦特性分析研究

Analysis of friction characteristics at low temperature of interior orientation motor assembly in an electro-optical pod

应用光学. 2017, 38(5): 700–705 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0501004>

#### 精密柔性传动技术在光电系统中的应用研究

Application of precision flexible drive in electro-optical system

应用光学. 2017, 38(3): 341–347 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0301001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0590-08

# 引入重要度修正因子的复杂光电系统可靠性分配研究

宁飞, 郑凤翥, 王惠林, 边赞, 王乐, 王冠

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 以某新型复杂光电系统为研究对象, 针对传统评分分配法客观性差、分配偏差大的缺点, 构建重要度修正因子, 提出了一种引入重要度修正因子的可靠性评分分配法。首先, 运用模糊层次分析法, 得到功能单元对上级功能单元/系统可靠性影响的相对重要度; 然后, 基于相对重要度, 按照专家评分规则, 得到功能单元对上级功能单元/系统可靠性影响的绝对重要度; 最后, 基于相对重要度和绝对重要度, 构建功能单元重要度修正因子, 以此修正各功能单元的评分结果。经对比验证, 关键功能单元可靠性分配值较传统评分分配值至少提高6%, 引入重要度修正因子的评分分配法能有效削弱传统评分分配法的主观影响, 释放关键功能单元可靠性余量, 提高功能单元可靠性分配的科学性、合理性, 进而提高复杂系统可靠性设计水平。

**关键词:** 重要度修正因子; 光电系统; 评分分配法; 可靠性设计

中图分类号: TN201

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0301001

## Research on reliability allocation of complex electro-optical systems by introducing importance correction factors

NING Fei, ZHENG Fengzhu, WANG Huilin, BIAN Yun, WANG Le, WANG Guan

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Taking a new type of complex electro-optical system as the research object, in order to address the shortcomings of poor objectivity and large allocation deviation in traditional scoring allocation method, an importance correction factor was constructed, and a reliability scoring allocation method introducing importance correction factor was proposed. Firstly, the fuzzy analytic hierarchy process was used to obtain the relative importance of the impact of functional units on the reliability of superior functional unit or system. Then, based on the relative importance, the absolute importance of the impact of functional units on the reliability of superior functional unit or system was obtained according to expert scoring rules. Finally, based on the relative and absolute importance, a functional unit importance correction factor was constructed to correct the scoring results of each functional unit. After verification and comparison, the reliability allocation value of critical functional units is at least 6% higher than the traditional scoring allocation value, and the scoring allocation method introducing importance correction factor can effectively weaken the subjective impact of the traditional scoring allocation method, release the reliability margin of critical functional units, improve the scientificity and rationality of reliability allocation of functional units, and thereby improving the reliability design level of complex systems.

**Key words:** importance correction factor; electro-optical systems; scoring allocation method; reliability design

收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-08-10

基金项目: 173 计划基础研究基金 (2021-XXXX-XX-0812)

作者简介: 宁飞 (1980—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事光电总体技术研究。E-mail: ningfei\_001@163.com

## 引言

某复杂光电系统是一种新型机载光电设备, 采用多波段共孔径设计方法, 内部集成可见光/红外成像组件、高精度组合导航单元、快调反射镜组件、智能环控组件等, 采用陀螺稳定平台+快调反射镜控制的二级组合稳定方法, 实现视轴高精度稳定和远距清晰成像。相比于传统光电系统, 该光电系统组成复杂、集成度高, 在可靠性分配时拟采用包含多种综合因子的评分分配法。然而, 传统评分分配法各因素评分结果由于过多依赖评分专家的主观经验, 度量标准缺乏客观性。虽然, 文献[1]~[8]通过增加相关评分因素, 对传统评分分配法进行了各种形式的改进, 但由于新增评分因素的方法和评分分配规则未变, 无法从根本上降低评分专家对最终分配结果的主观影响。

引入重要度修正因子的评分分配法, 是在传统评分因素的基础上, 通过功能单元对上级功能单元/系统可靠性影响的相对重要度和绝对重要度, 构建各功能单元对上级功能单元/系统可靠性影响的重要度修正因子, 然后代入评分分配法对各功能单元评分结果进行修正。该方法能显著降低人为评分时的模糊性和主观判断, 提高指标分配的科学性。

## 1 功能单元重要度修正因子的构建

### 1.1 相对重要度

相对重要度  $I_r$  是在承认各功能单元为系统必需的前提下, 从可靠性角度出发, 各功能单元对上级功能单元/系统可靠性影响程度的相对量化。这里采用模糊层次分析法<sup>[9-15]</sup>进行计算, 计算步骤如下:

1) 建立多级递阶结构。将复杂问题条理化、层次化为包含不同层次等级的结构, 通常包括目标层、准则层、指标层;

2) 建立模糊互补判断矩阵。采用 0.1~0.9 标度法, 对 2 个因素的相对重要程度做出定量表示, 得到各级互补判断矩阵;

3) 判断矩阵权重向量计算。权重向量的计算公式为

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

4) 判断矩阵对应的特征矩阵计算。计算公式为

$$W_{ij} = \frac{W_i}{W_i + W_j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中:  $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$  为判断矩阵的权重向量,  $\sum_{i=1}^n W_i = 1, W_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

5) 判断矩阵一致性检验;

一致性检验是检验判断矩阵建立是否合理的依据, 可用判断矩阵的相容性来检验一致性。矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  和矩阵  $B = (b_{ij})_{n \times n}$  的相容性指标采用下式计算:

$$I(A, B) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} + b_{ji} - 1| \quad (3)$$

当相容性指标  $I(A, B) \leq \alpha$  时, 认为判断矩阵为满意一致的。 $\alpha$  越小, 表明决策者对模糊判断矩阵的一致性要求越高, 一般取  $\alpha = 0.1$ 。

6) 各功能单元对上级功能单元/系统可靠性影响的权重系数计算;

权重系数矩阵  $F$  采用以下矩阵计算:

$$F = W_A^T O R \quad (4)$$

式中: 矩阵  $W_A$  为准则层对目标层影响的权重向量;  $R$  为由各指标层对准则层排序向量组成的评判矩阵; 算子“O”采用模糊数学的加权平均型运算法则:

$$b_j = \min\{1, \sum_{i=1}^n a_i r_{ij}\}, \sum_{j=1}^n a_i = 1 \quad (5)$$

7) 各功能单元对上级功能单元/系统可靠性影响的相对重要度计算。采用下式计算:

$$I_{ri} = E_i \left/ \sum_{j=1}^n E_j \right. \quad (6)$$

$$E_i = 1 - \beta_i \quad (7)$$

式中:  $\beta_i$  为各功能单元对上级功能单元/系统可靠性影响的权重系数;  $I_{ri}$  为各功能单元对上级功能单元/系统可靠性影响的相对重要度;  $n$  为同级功能单元总数。

### 1.2 重要度修正因子构建方法

绝对重要度  $I_a$  是基于各功能单元相对重要度排序下, 采用传统评分分配法对各影响因素的打分规则, 依据评分专家的经验 and 判断, 取打分平均值得到。某功能单元失效导致的后果越严重, 相应的功能单元就越关键, 绝对重要度就越高。对绝对重要度高的单元打低分, 绝对重要度低的单元打高分, 取值为 1 分~10 分。

基于相对重要度和绝对重要度, 采用以下方式

构建各功能单元重要度修正因子  $I_i$ :

$$I_i = I_{ri} \times I_{ai} \quad (8)$$

式中:  $I_{ri}$  为各功能单元相对重要度;  $I_{ai}$  为各功能单元绝对重要度。

## 2 引入重要度修正因子的可靠性评分分配法

基于上述分析,引入重要度修正因子的可靠性评分分配法如下:

$$\lambda_i = C_i \times \lambda_s^* \quad (9)$$

$$C_i = \omega_i / \omega \quad (10)$$

$$\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (11)$$

$$\omega_i = \prod_{j=1}^4 r_{ij} \times I_i \quad (12)$$

式中:  $\lambda_s^*$  为系统失效率;  $\lambda_i$  为分配给各功能单元的失效率;  $C_i$  为第  $i$  个功能单元的评分系数;  $\omega_i$  为第  $i$  个功能单元评分数;  $\omega$  为系统的总评分数;  $r_{ij}$  为第  $i$  个功能单元,第  $j$  个因素的评分数;  $j=1$  为技术水平,  $j=2$  为复杂度,  $j=3$  为工作时间,  $j=4$  为环境条件;  $I_i$  为第  $i$  个功能单元的重要度修正因子。

## 3 应用验证及对比

以某复杂光电系统为研究对象,验证引入重要度修正因子的可靠性分配效果,并与传统评分分配法得到的结果进行对比。

### 3.1 可靠性模型

根据光电系统功能、组成特点,为简化可靠性模型,将光电系统按功能层级划分为两级,如图 1 所示。可靠性模型采用二级串联结构,如图 2~图 4 所示。

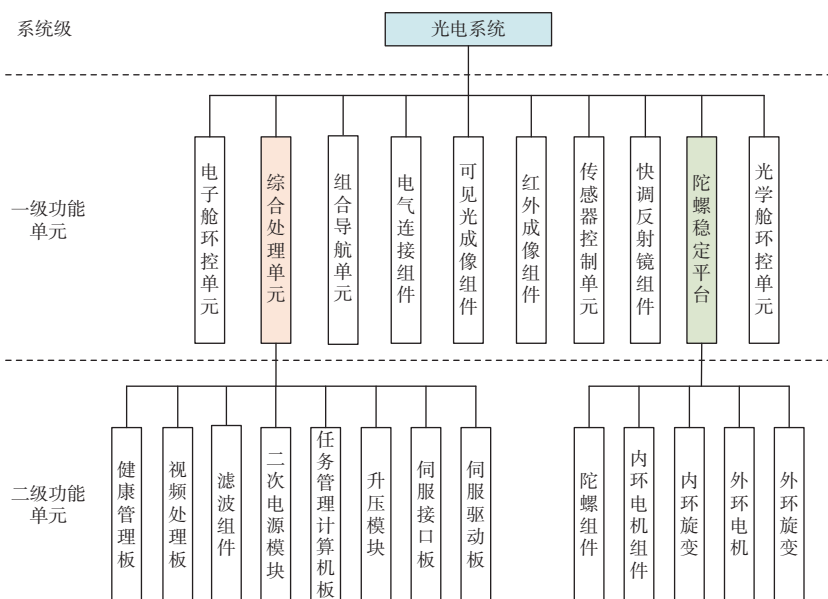


图 1 光电系统功能单元层级划分

Fig. 1 Hierarchical division of functional units of electro-optical system

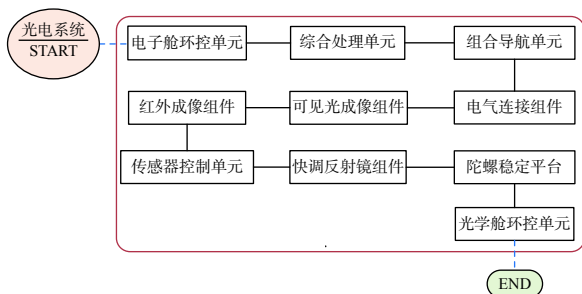


图 2 光电系统一级可靠性模型

Fig. 2 Primary reliability model of electro-optical system

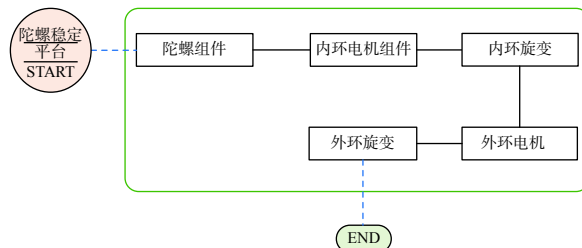


图 3 陀螺稳定平台二级可靠性模型

Fig. 3 Secondary reliability model of gyro stabilized platform

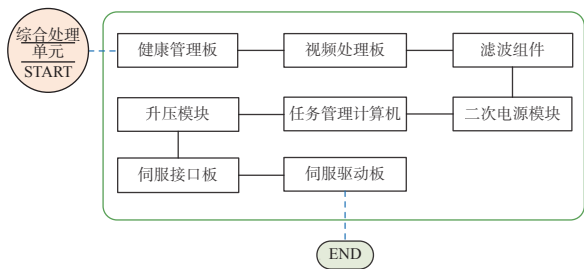


图 4 综合处理单元二级可靠性模型

Fig. 4 Secondary reliability model of integrated processing unit

3.2 可靠性数学模型

从组成特点看, 光电系统为可修复产品, 主要由电子类和机电类单元组成, 电子产品的失效服从指数分布, 而光电系统机电类产品在一定载荷

下的失效, 也服从指数分布<sup>[16]</sup>。因此, 建立的可靠性数学模型如下:

$$\lambda_s^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i \tag{13}$$

$$T_{\text{MBF}} = 1/\lambda_s^* \tag{14}$$

式中:  $\lambda_s^*$  为系统失效率;  $\lambda_i$  为各功能单元的失效率;  $n$  为功能单元数量;  $T_{\text{MBF}}$  为系统平均故障间隔时间。

3.3 各功能单元重要度相关参数计算

由于篇幅限制, 本文不再给出各功能单元对上级功能单元/系统相对重要度计算过程, 直接给出各功能单元对上级功能单元/系统可靠性影响的权重系数、相对重要度、绝对重要度、重要度修正因子(合称重要度相关参数)结果, 如表 1~表 3 所示。

表 1 一级功能单元对光电系统可靠性影响的重要度相关参数

Table 1 Importance related parameters of impact of primary functional units on reliability of electro-optical system

参数	模块									
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>9</sub>	A <sub>10</sub>
$\beta_i$	0.091 50	0.105 30	0.099 60	0.105 60	0.103 10	0.104 90	0.092 50	0.102 60	0.102 70	0.092 10
$I_{ri}$	0.100 94	0.099 41	0.100 04	0.099 38	0.099 65	0.099 45	0.100 83	0.099 71	0.099 70	0.100 88
$I_{ai}$	6	3	4	2	3	3	4	3	3	5
$I_i$	0.605 64	0.298 23	0.400 16	0.198 76	0.298 95	0.298 35	0.403 32	0.299 13	0.299 10	0.504 40

注: A<sub>1</sub>为电子舱环控单元; A<sub>2</sub>为综合处理单元; A<sub>3</sub>为组合导航单元; A<sub>4</sub>为电气连接组件; A<sub>5</sub>为可见光成像组件; A<sub>6</sub>为红外成像组件; A<sub>7</sub>为传感器控制单元; A<sub>8</sub>为快调反射镜组件; A<sub>9</sub>为陀螺稳定平台; A<sub>10</sub>为光学舱环控单元。

表 2 相关二级功能单元对陀螺稳定平台可靠性影响的重要度相关参数

Table 2 Importance related parameters of impact of related secondary functional units on reliability of gyro stabilized platform

参数	模块				
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>
$\beta_i$	0.208 00	0.205 70	0.194 80	0.194 30	0.197 20
$I_{ri}$	0.198 00	0.198 58	0.201 30	0.201 43	0.200 70
$I_{ai}$	3	4	4	4	4
$I_i$	0.594 00	0.794 32	0.805 20	0.805 72	0.802 80

注: B<sub>1</sub>为陀螺组件; B<sub>2</sub>为内环电机组件; B<sub>3</sub>为内环旋变; B<sub>4</sub>为外环电机; B<sub>5</sub>为外环旋变。

表 3 相关二级功能单元对综合处理单元可靠性影响的重要度相关参数

Table 3 Importance related parameters of impact of related secondary functional units on reliability of integrated processing unit

参数	模块							
	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>8</sub>
$\beta_i$	0.115 30	0.128 80	0.115 90	0.130 40	0.139 30	0.119 50	0.126 80	0.124 10
$I_{ri}$	0.126 39	0.124 46	0.126 30	0.124 23	0.122 96	0.125 79	0.124 74	0.125 13
$I_{ai}$	6	2	5	2	2	5	3	4
$I_i$	0.758 33	0.248 92	0.631 51	0.248 46	0.245 92	0.628 94	0.374 22	0.500 52

注: D<sub>1</sub>为健康管理板; D<sub>2</sub>为视频处理板; D<sub>3</sub>为滤波组件; D<sub>4</sub>为二次电源模块; D<sub>5</sub>为任务管理计算机; D<sub>6</sub>为升压模块; D<sub>7</sub>为伺服接口板; D<sub>8</sub>为伺服驱动板。

3.4 引入重要度修正因子的可靠性分配结果

以复杂光电系统的可靠性指标(平均故障间隔时间  $T_{\text{MBF}}$ : 400 h)进行分配, 结果如表 4~表 6 所示。

表 4 光电系统一级功能单元可靠性分配结果

Table 4 Reliability allocation results of primary functional units of electro-optical system									
一级功能单元	技术水平	复杂度	工作时间/h	环境条件	重要度修正因子	各单元评分结果	各单元评分系数	分配给各单元的 $\lambda/(\times 10^{-6} \text{ h})$	平均故障间隔时间 $T_{\text{MBF}}/\text{h}$
电子舱环控单元	2	2	8	10	0.605 64	193.804 8	0.038 4	96.082 9	10 407.68
综合处理单元	6	8	10	10	0.298 23	1 431.504 0	0.283 9	709.698 8	1 409.05
组合导航单元	3	3	10	10	0.400 16	360.144 0	0.071 4	178.549 1	5 600.70
电气连接组件	2	2	10	10	0.198 76	79.504 0	0.015 8	39.415 8	25 370.53
可见光成像组件	5	6	10	8	0.298 95	717.480 0	0.142 3	355.706 1	2 811.31
红外成像组件	6	7	9	8	0.298 35	902.210 4	0.178 9	447.290 1	2 235.69
传感器控制单元	4	4	10	6	0.403 32	387.187 2	0.076 8	191.956 4	5 209.52
快调反射镜组件	4	4	10	6	0.299 13	287.164 8	0.056 9	142.368 1	7 024.05
陀螺稳定平台	3	6	10	10	0.299 10	538.380 0	0.106 8	266.913 4	3 746.53
光学舱环控单元	2	3	8	6	0.504 40	145.267 2	0.028 8	72.019 3	13 885.16
光电系统						5 042.646 4	1.000 0	2 500	400

表 5 陀螺稳定平台二级功能单元可靠性分配结果

Table 5 Reliability allocation results of secondary functional units of gyro stabilized platform									
二级功能单元	技术水平	复杂度	工作时间/h	环境条件	重要度修正因子	各单元评分结果	各单元评分系数	分配给各单元的 $\lambda/(\times 10^{-6} \text{ h})$	平均故障间隔时间 $T_{\text{MBF}}/\text{h}$
陀螺组件	4	6	10	8	0.594 00	1 140.480 0	0.286 4	76.455 6	13 079.48
内环电机组件	3	3	10	8	0.794 32	571.910 4	0.143 6	38.339 8	26 082.57
内环旋变	3	3	10	8	0.805 20	579.744 0	0.145 6	38.864 9	25 730.13
外环电机	3	4	10	10	0.805 72	966.864 0	0.242 8	64.816 7	15 428.12
外环旋变	3	3	10	10	0.802 80	722.520 0	0.181 5	48.436 4	20 645.64
陀螺稳定平台						3 981.518 4	1.000 0	266.913 4	3 746.53

表 6 综合处理单元二级功能单元可靠性分配结果

Table 6 Reliability allocation results of secondary functional units of integrated processing unit									
二级功能单元	技术水平	复杂度	工作时间/h	环境条件	重要度修正因子	各单元评分结果	各单元评分系数	分配给各单元的 $\lambda/(\times 10^{-6} \text{ h})$	平均故障间隔时间 $T_{\text{MBF}}/\text{h}$
健康管理板	2	2	10	10	0.758 33	303.331 2	0.092 9	65.908 3	15 172.60
视频处理板	3	8	10	10	0.248 92	597.403 2	0.182 9	129.804 7	7 703.88
滤波组件	2	2	10	10	0.631 51	252.604 0	0.077 3	54.886 2	18 219.52
二次电源模块	3	7	10	10	0.248 46	521.766 0	0.159 7	113.370 1	8 820.67
光电管理计算机	3	8	10	10	0.245 92	590.203 2	0.180 7	128.240 3	7 797.86
升压模块	2	2	10	10	0.628 94	251.576 0	0.077 0	54.662 8	18 293.97
伺服接口板	3	4	10	10	0.374 22	449.067 6	0.137 5	97.574 1	10 248.62
伺服驱动板	2	3	10	10	0.500 52	300.312 0	0.091 9	65.252 3	15 325.14
综合处理单元						3 266.263 2	1.000 0	709.698 8	1 409.05

3.5 可靠性预计

采用相似产品数据法对各功能单元的可靠性指标进行预计, 如表 7~表 9 所示。光电系统  $T_{MBF}$  预计值为 539.08 h, 满足指标要求。

表 7 综合处理单元二级功能单元可靠性预计  
Table 7 Reliability prediction of secondary functional units of integrated processing unit

一级功能单元	二级功能单元	失效率 $\lambda/(\times 10^{-6} \text{ h})$	平均故障间隔 时间 $T_{MBF}/\text{h}$
综合处理单元	健康管理板	30	33 333.33
	视频处理板	110	9 090.91
	滤波组件	30	33 333.33
	二次电源模块	90	11 111.11
	光电管理计算机	120	8 333.33
	升压模块	30	33 333.33
	伺服接口板	80	12 500.00
	伺服驱动板	45	22 222.22
	总计	535	1 869.16

表 8 陀螺稳定平台二级功能单元可靠性预计  
Table 8 Reliability prediction of secondary functional units of gyro stabilized platform

一级功能单元	二级功能单元	失效率 $\lambda/(\times 10^{-6} \text{ h})$	平均故障间隔 时间 $T_{MBF}/\text{h}$
陀螺稳定平台	陀螺组件	60	16 666.67
	内环电机组件	30	33 333.33
	内环旋变	30	33 333.33
	外环电机	50	20 000.00
	外环旋变	40	25 000.00
	总计	210	4 761.90

表 9 一级功能单元可靠性预计  
Table 9 Reliability prediction of primary functional units

系统名称	二级功能单元	失效率 $\lambda/(\times 10^{-6} \text{ h})$	平均故障间隔 时间 $T_{MBF}/\text{h}$
复杂光电系统	电子舱环控单元	50	20 000.00
	综合处理单元	535	1 869.16
	组合导航单元	90	11 111.11
	电气连接组件	30	33 333.33
	可见光成像组件	310	3 225.81
	红外成像组件	380	2 631.58
	传感器控制单元	130	7 692.31
	快调反射镜组件	80	12 500.00
	陀螺稳定平台	210	4 761.90
	光学舱环控单元	40	25 000.00
	总计	1 855	539.08

3.6 分配结果对比

采用传统评分分配法和引入重要度修正因子

的评分分配法对系统各功能单元可靠性指标分配结果进行对比, 如表 10~表 12 所示。

表 10 两种分配方法结果对比(一级功能单元)  
Table 10 Results comparison of two allocation methods (primary functional units)

一级功能单元	传统评分法下平均故障间隔 时间 $T_{MBF}/\text{h}$	引入重要度修正因子法下平均故障 间隔时间 $T_{MBF}/\text{h}$	可靠性 预计值
电子舱环控单元	19 815.00	10 407.68	20 000.00
综合处理单元	1 321.00	1 409.05	1 869.16
组合导航单元	7 045.33	5 600.70	11 111.11
电气连接组件	15 852.00	25 370.53	33 333.33
可见光成像组件	2 642.00	2 811.31	3 225.81
红外成像组件	2 096.83	2 235.69	2 631.58
传感器控制单元	6 605.00	5 209.52	7 692.31
快调反射镜组件	6 605.00	7 024.05	12 500.00
陀螺稳定平台	3 522.67	3 746.53	4 761.90
光学舱环控单元	22 016.67	13 885.16	25 000.00

表 11 两种分配方法结果对比(陀螺稳定平台)  
Table 11 Results comparison of two allocation methods (gyro stabilized platform)

二级功能单元	传统评分法下平均故障间隔 时间 $T_{MBF}/\text{h}$	引入重要度修正因子法下平均故障 间隔时间 $T_{MBF}/\text{h}$	可靠性 预计值
陀螺组件	10 017.58	13 079.48	16 666.67
内环电机组件	26 713.56	26 082.57	33 333.33
内环旋变	26 713.56	25 730.13	33 333.33
外环电机	16 028.13	15 428.12	20 000.00
外环旋变	21 370.84	20 645.64	25 000.00

表 12 两种分配方法结果对比(综合处理单元)  
Table 12 Results comparison of two allocation methods (integrated processing unit)

二级功能单元	传统评分法下平均故障间隔 时间 $T_{MBF}/\text{h}$	引入重要度修正因子法下平均故障 间隔时间 $T_{MBF}/\text{h}$	可靠性 预计值
健康管理板	32 694.75	15 172.60	33 333.33
视频处理板	5 449.13	7 703.88	9 090.91
滤波组件	32 694.75	18 219.52	33 333.33
二次电源模块	6 227.57	8 820.67	11 111.11
光电管理计算机	5 449.13	7 797.86	8 333.33
升压模块	32 694.75	18 293.97	33 333.33
伺服接口板	10 898.25	10 248.62	12 500.00
伺服驱动板	21 796.50	15 325.14	22 222.22

将两种分配方法获得的可靠性分配值与可靠性预计值进行对比,得出以下结论:

1) 仅对比每个功能单元可靠性分配值和预计值,两种分配方法似乎均可行。但传统评分分配法获得的电气连接组件、电子舱环控单元、光学舱环控单元的  $T_{MBF}$  分配值不合理,因为从功能和使用经验可知,电子连接组件的  $T_{MBF}$  值远大于电子舱环控单元和光学舱环控单元的  $T_{MBF}$  值,引入重要度修正因子后获得的分配结果更符合产品实际和使用经验。

2) 健康管理板、滤波组件和升压模块在传统评分分配法下不应分配相同的可靠性指标。因为滤波组件和升压模块的失效会导致光电系统功能丧失或性能下降,而健康管理板的失效,不影响系统功能和性能,只会降低系统的维修效率,三者的重要性不同,引入重要度修正因子后修正了该分配偏差。

3) 对基于相对重要度分析下得到的关重功能单元,如电气连接组件、可见光成像组件、红外成像组件、综合处理单元、快调反射镜组件、陀螺稳定平台、任务管理计算机、二次电源模块、视频处理板等,当采用引入重要度修正因子的评分分配法后,其可靠性分配值至少提高 6%,有效释放了关重功能单元可靠性余量。

## 4 结 论

本文从传统评分分配法的不足和缺点出发,通过相对重要度和绝对重要度,构建重要度修正因子,提出引入重要度修正因子的评分分配法。在此基础上,以某复杂光电系统为应用对象,将两种分配方法获得的可靠性分配值与可靠性预计值进行对比。结果表明,引入重要度修正因子的评分分配法能有效削弱传统评分分配法的主观影响,释放关重功能单元可靠性余量,提高各功能单元可靠性分配的科学性、合理性。因此,对组成复杂、集成度高的复杂系统进行可靠性分配时,宜采用本方法。

### 参考文献:

- [1] 石闯,陈永冰. 基于评分法的某新型船舶操舵控制系统基本可靠性分配[J]. 船舶电子工程, 2021, 321(3): 115-118.  
SHI Chuang, CHEN Yongbing. Basic reliability distribution of a new ship steering control system based on scoring method[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 321(3): 115-118.
- [2] 张琳,黄敏,刘婷. 航空发动机可靠性评分分配法[J]. 质量与可靠性, 2009, 140(2): 10-14.  
ZHANG Lin, HUANG Min, LIU Ting. Aircraft engine reliability scoring and allocation method[J]. Quality and Reliability, 2009, 140(2): 10-14.
- [3] 阮宏泽. 民机复杂系统任务可靠性指标分配方法研究[J]. 科技创新导报, 2011, 33(1): 2-3.  
RUAN Hongze. Research on assignment method of mission reliability index for civil aircraft complex system[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011, 33(1): 2-3.
- [4] 赵嘉媛. 基于评分分配法的水下液压机械手可靠性分配研究[J]. 质量成本管理, 2019, 57(9): 88-90.  
ZHAO Jiayuan. Research on reliability distribution of underwater hydraulic machinery based on scoring distribution method[J]. Quality Cost and Management, 2019, 57(9): 88-90.
- [5] 胡斌,刘松林,刘刚. 基于任务重要度的舰船总体任务可靠性分配法[J]. 中国造船, 2013, 54(2): 165-170.  
HU Bin, LIU Songlin, LIU Gang. Mission reliability allocation method for whole ship based on the importance of missions[J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(2): 165-170.
- [6] 王开山,郝宗敏. 直升机系统基本可靠性分配方法研究[J]. 直升机技术, 2017, 192(2): 33-36.  
WANG Kaishan, HAO Zongmin. Research on application of common reliability allocation method in helicopter[J]. Helicopter Technique, 2017, 192(2): 33-36.
- [7] 杨翊,谢里阳,阎绍泽,等. 卫星太阳翼展开机构可靠性分析[J]. 失效分析与预防, 2011, 6(4): 213-218.  
YANG Yi, XIE Liyang, YAN Shaoze, et al. Reliability analysis of unfolding unit of satellite solar array[J]. Failure Analysis and Prevention, 2011, 6(4): 213-218.
- [8] 彭兆春,李小萍. 可靠性分配在机载相控阵雷达研制中的应用[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 39(3): 58-63.  
PENG Zhaochun, LI Xiaoping. The application of reliability allocation in the development of airborne phased array radar[J]. Electronic Product Reliability and Environment Testing, 2021, 39(3): 58-63.
- [9] 徐平涛. 飞机机载设备重要度分类方法及分类应用研究[J]. 科技与创新, 2020, 4(1): 156-159.

- XU Pingtao. Research on the importance classification method and classification application of aircraft airborne equipment[J]. Science, Technology and Innovation, 2020, 4(1): 156-159.
- [ 10 ] 李鸣章. 光刻机双工件台系统的可靠性分配和预计[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- LI Mingzhang. Reliability allocation and prediction for dual-stage system of lithography[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [ 11 ] 徐付伟. 基于元动作单元的数控机床可靠性分配与预计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- XU Fuwei. Research on reliability allocation and prediction technology based on meta units of CNC machine tools[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [ 12 ] 阚桐. 基于AHP的飞机驾驶舱信息元重要度计算[J]. 科技资讯, 2019, 6(1): 251-254.
- KAN Tong. Calculation of the importance of aircraft cockpit information elements based on AHP[J]. Science and Technology Information, 2019, 6(1): 251-254.
- [ 13 ] 吴倩, 张永领. 基于FAHP的应急决策影响因素重要度研究[J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39(3): 281-285.
- WU Qian, ZHANG Yongling. Research on the importance of factors influencing emergency decision based on FAHP[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2017, 39(3): 281-285.
- [ 14 ] 刘承. 基于重要度分析的电子电路系统可靠性评估与优化设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- LIU Cheng. Reliability evaluation and optimal design of electronic circuit system based on importance analysis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [ 15 ] 郑凤翥, 宁飞, 王惠林, 等. 光电系统伺服稳定平台可靠性定性分析[J]. 应用光学, 2022, 43(5): 853-858.
- ZHENG Fengzhu, NING Fei, WANG Huilin, et al. Qualitative analysis of reliability on servo stabilization platform of electro-optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(5): 853-858.
- [ 16 ] 李翠. 机电系统可靠性分析与寿命评估[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016.
- LI Cui. Reliability analysis and life evaluation of mechanical and electrical systems[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2016.