

制造业可靠性系统工程标准

STANDARD OF RELIABILITY SYSTEMS ENGINEERING FOR MANUFACTURING ENTERPRISES

RSE-STD-1391 2022

功能、性能及裕量分析

Function, Performance, and Margin Analysis

(征求意见稿)

© 本标准属于深圳市为民可靠性系统工程研究院所有，享有著作权及其他法律规定的任何权益，受法律和国际条约保护。

2022-11-16 发布



目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语、定义和缩略语.....	1
3.1 术语和定义.....	1
3.2 缩略语.....	1
4 通用要求.....	2
4.1 分析流程.....	2
4.2 FPMA 工作要点.....	2
4.3 FPMA 报告.....	2
5 详细要求.....	3
5.1 信息收集与整理.....	3
5.2 功能分析.....	3
5.3 性能分析.....	5
5.4 裕量分析.....	11
附录 A (资料性附录) 某型 MOPA 激光器光电组件功能、性能及裕量分析示例.....	21

前 言

本标准由深圳市为民可靠性系统工程研究院提出并发起编制。

本标准起草单位：北京航空航天大学、深圳为民可靠性系统工程研究院、北京航空航天大学云南创新研究院、北京蓝威技术有限公司、台州学院、华为技术有限公司、深圳市杰普特光电股份有限公司、宁德时代新能源科技股份有限公司、深圳乔合里科技股份有限公司、深圳市韶音科技有限公司、兰州空间技术物理研究所、北京广利核系统工程有限公司、中国民航科学技术研究院。

本标准主要起草人：张清源、李晓阳、祖天培、孙富强、伍湘平、王浩伟、杨晗、王文、金毅、税长江、熊钊颀、薛庆瑞、潘力强、刘淼、李婧、莫昌瑜、韦艺、龚文俊。

功能、性能及裕量分析

1 范围

本标准规定了产品功能、性能及裕量分析（Function, Performance, and Margin Analysis, FPMA）的程序和方法。FPMA 是一种有序地开展对产品功能、性能及裕量分析的形式化方法，是开展性能参数退化分析、可靠性建模、可靠性实验、可靠性正向设计、可靠性评估等工作的基础。

本规范适用于深圳市为民可靠性系统工程研究院理事单位，也可供其他企业参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

RSE-STD-451 2022 确信可靠性术语与定义
 RSE-STD-625 2022 使用场景分析
 GJB/Z 1391-2006 故障模式、影响及危害性分析指南

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

RSE-STD-451 2022、GJB/Z 1391-2006 界定的术语与定义适用于本文件。

3.1.1

关键性能参数 critical performance parameters

产品性能参数中重要的、对功能实现影响显著的或用户密切关注的性能参数。

3.1.2

功能、性能及裕量分析 function, performance, and margin analysis

对产品或系统的各项功能及其对应的性能参数进行梳理与分析，确定关键性能参数及其需求阈值，并构建裕量方程的方法。

3.1.3

故障模式、机理及影响分析 failure mode, mechanism, and effect analysis

研究产品的每个组成部分可能存在的故障模式、故障机理并确定各个故障模式对产品或系统其他组成部分和产品要求功能影响的一种分析方法。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

FPMA——Function, Performance, and Margin Analysis 功能、性能及裕量分析；

FMECA——Failure Mode and Effect Analysis 故障模式及影响分析；

FMMEA——Failure Mode, Mechanism, and Effect Analysis 故障模式机理及影响分析。

4 通用要求

4.1 分析流程

功能、性能及裕量分析的基本流程如图 1 所示。FPMA 主要包含四个步骤：信息收集与整理、功能分析、性能分析和裕量分析。

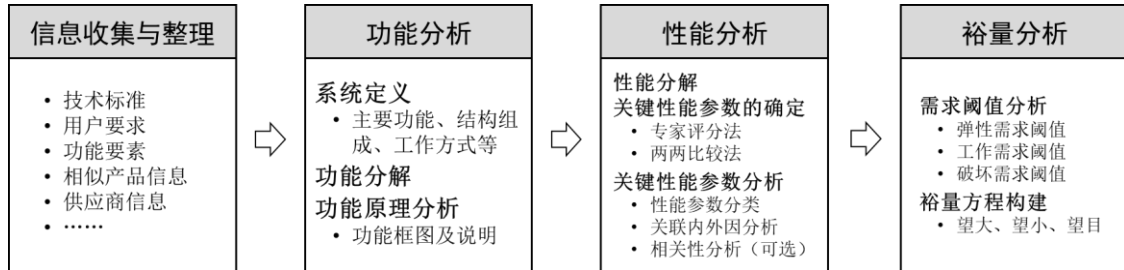


图 1 功能、性能及裕量分析的基本流程

4.2 工作要点

- a) FPMA 工作应由产品设计人员主要完成，即“谁设计、谁分析”。可靠性专业人员应协助设计人员完成相关分析工作，提供实施 FPMA 的程序、方法，尤其要配合完成阈值的确定和裕量方程的建立。
- b) FPMA 应始于产品方案阶段，并贯穿于产品全寿命周期各阶段，应随着产品所处阶段的变化不断更新和完善 FPMA 的分析结果。
- c) 产品各阶段开展 FPMA 的侧重点略有不同：
 - 方案阶段主要分析产品功能及对应的性能，确定关键性能参数，并明确各关键性能参数的需求阈值；
 - 研制阶段主要分析各关键性能参数的关联内外因变量，确定各关键性能参数的裕量方程，为开展可靠性正向设计提供依据；
 - 制造阶段主要分析和明确工艺要素对关键性能参数及其裕量的影响，为制定工艺规范奠定基础；
 - 使用阶段主要根据产品实际表现和实际应用场景更新相关分析内容，为产品设计改进提供依据。

4.3 FPMA 报告

FPMA 报告应包含以下内容：

- a) 概述——实施 FPMA 的目的、产品所处的阶段、已经完成的分析或测试工作等；前期准备收集与整理的主要信息；分析中使用的数据来源说明；其他有关解释和说明等；
- b) 功能分析结果——产品的结构组成、主要功能、工作方式、工作时间，绘制产品功能层次关系图、功能框图等；
- c) 性能分析结果——关键性能参数集、关联内外因变量及相关性分析结果；

- d) 裕量分析结果——关键性能参数需求阈值、各关键性能参数对应的裕量方程；
- e) 结论与建议——阐述主要结论，针对分析结果中尚未明确的部分进行解释说明，并制定下一步工作计划。

5 详细要求

5.1 信息收集与整理

信息收集与整理是 FPMA 的前期准备工作，分析人员应收集与整理的主要信息及内容见表 1。

表 1 FPMA 所需的主要信息

序号	信息来源	内容
1	技术标准	国际/国家准入要求、行业标准及要求等
2	用户要求	产品需要完成的任务或功能、任务阶段、环境条件、结构组成、工作原理、性能试验和使用要求等
3	功能要素	产品结构组成、尺寸大小、各接口关系、各单元动作方式等
4	相似产品信息	a) 从相似产品以往的使用过程获取其可能出现的故障模式（影响哪个性能）、故障机理、敏感载荷； b) 从相似产品以往的可靠性设计与优化过程获取进行过设计改进的内容以及相应的补偿措施； c) 从相似产品中获取 FPMA、FMECA、FMMEA 等工作的信息
5	供应商信息	外购件名称及其主要性能指标、性能极限等

5.2 功能分析

5.2.1 系统定义

系统定义的目的是使分析人员能够有针对性地、有条理地开展产品的功能、性能及裕量分析。这个过程主要需要明确产品的下列重要信息：

- a) 产品的主要功能。明确所分析产品的研制目的和作用，梳理产品必需完成的主要功能，并对这些主功能进行编号及说明。
- b) 产品的结构组成。对产品开展结构层次分解，一般可根据需要划分为系统级、分系统级、部组件级等，但原则上只需分解至某项子功能所对应的产品层次。对于外购件，不需对其进行结构分解。
- c) 产品的使用场景。明确产品的工作模式、工作时间以及每种工作模式下的环境与工作条件。通常情况下可通过使用场景分析来获取产品的使用场景。

5.2.2 功能分解

功能分解的目的是在产品主要功能和产品结构层次的基础上，将产品的主要功能细分为若干子功能，为下一步的性能分析奠定基础。功能分解的主要要求如下。

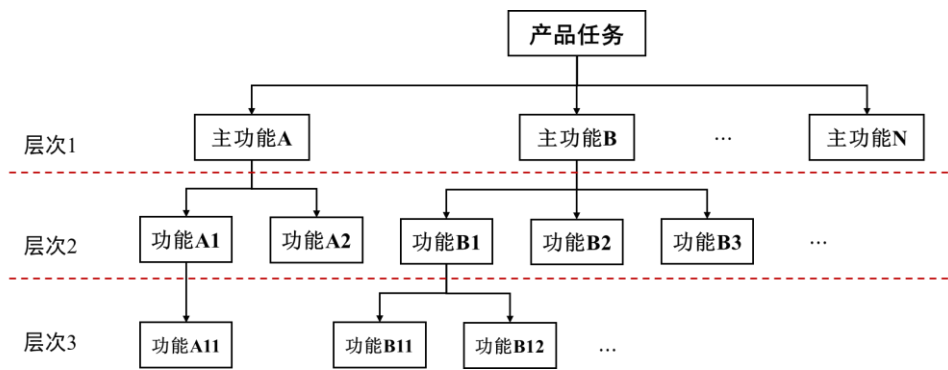


图 2 功能层次关系示意图

针对每个主要功能，结合产品的主要组成结构和相应任务的特点，对主要功能进行分解，并绘制功能层次关系图，如图 2 所示。功能分解需要能够辅助性能分析，帮助分析人员尽可能全的确定完成功能所需的性能参数。因此，功能分解的层次应以这一目标为基础确定，不可过于细致也不可过分粗糙。

需要注意的是，各层次功能的编号需尽量与产品结构层次的各单元编号一致。若某单元具有多项功能，则需要额外标注。

5.2.3 功能原理分析

功能原理分析的目的是了解产品完成各功能的工作原理，从而使分析人员对产品各个层次单元及其各个接口的时序、逻辑、输入输出关系等有更加清晰的认知，便于后续分析的完成。

在功能原理分析中，需基于功能层次图，分析实现产品主要功能的基本原理。这一分析过程可通过绘制产品功能框图的形式展现。产品功能框图是表示产品各组成部分所承担的任务或功能间的相互关系，以及产品每个结构层次间的功能逻辑顺序、数据（信息）流、接口的一种功能模型。图 3 是产品（高压空气压缩机为例）功能框图的典型示例，表 2 是用于解释框图内容的功能原理分析表。功能原理分析也可以使用产品功能层次与结构层次对应的关系图来表达，如图 4 所示。

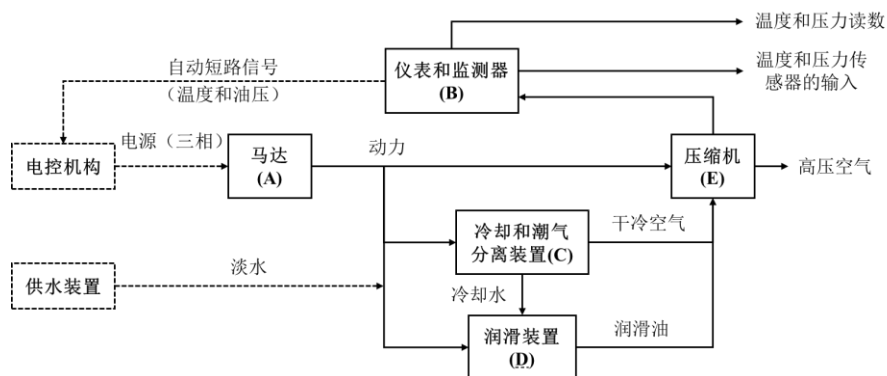


图 3 高压空气压缩机功能框图示例

表 2 高压空气压缩机的功能原理分析表示例

序号	编码	名称	功能	输入	输出
1	A	马达	产生力矩	电源（三项）	力矩
2	B	仪表和监测器	控制温度和压力及显示	压力	温度和压力度数； 温度和压力传感器输入
3	C	冷却和潮气分离装置	提供干冷却气	淡水、动力	向 E 提供干冷空气； 向 D 提供冷却水
4	D	润滑装置	提供润滑剂	淡水、动力、冷却水	向 E 提供润滑油
5	E	压缩机	提供高压空气	干冷空气、动力、 润滑油	高压空气

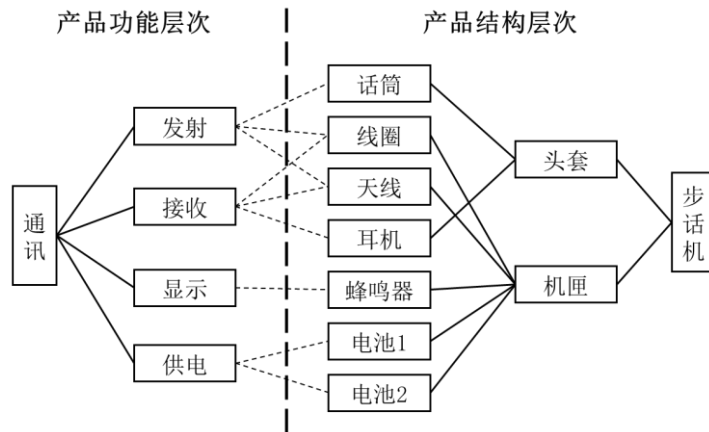


图 4 某步话机功能层次与结构层次对应图

5.3 性能分析

5.3.1 性能分解

为了全面了解产品的各类性能，需在确定关键性能参数之前，根据功能分析的结果填写完成各个功能所需要的性能。每个功能对应的性能可以是一个，也可以是多个。对于功能或结构较为复杂多样的产品，还应将性能进行逐级分解，并填写性能分解表，如表 3 所示。例如，对某电连接器开展 FPMA 时，其连接性能可以继续拆分为插入力、拔出力、螺栓螺母拉脱力等，那么连接性能即为一级性能，后续三者为二级性能。

表 3 性能分解表示例

功能		一级性能	二级性能	...	最低层级性能
功能 A	功能 A1	性能 A1			
	功能 A2	性能 A2	性能 A21		性能 A21..1
			性能 A22		性能 A22..1
功能 B	功能 B1	性能 B1			

	功能 B2	性能 B2	性能 B21	性能 B21..1
				性能 B21..2
			性能 B22	性能 B22..1
...		

5.3.2 关键性能参数的确定

5.3.2.1 目的

确定关键性能参数的目的是将影响产品主要功能或影响产品完成相应任务的最重要、最关键的性能参数挑选出来，并主要针对这些关键性能参数开展分析，从而为裕量分析和未来的可靠性建模分析奠定基础。确定关键性能参数的过程也是一个不断更新的过程。随着研制过程的深入，分析人员若对产品的认知程度有所提升，可对关键性能参数进行修正、更改。

关键性能参数应通过对各关键性能参数的重要度进行评价和排序来确定。常用的方法包括专家评分法和两两比较法。

5.3.2.2 专家评分法

专家评分法适用于性能参数较多的情况。判别性能参数重要程度包含两方面因素。一是超差后果严重性，即性能要求不满足时，其对应的功能丧失对于产品基本使用情况的影响大小；二是用户关注程度，即用户对于产品相关性能的需求程度和要求的高低程度。本方法基于这两方面开展专家评分从而确定性能参数的重要度。实际应用时，若有其他重要度评价准则，可以视情增加。

本方法的具体流程及要求如下：

- a) 针对性能分解结果，列出专家评分表，如表 4 示例形式，其中表头包括“性能分解”、“超差后果严重性评分”、“用户关注度评分”、“重要度”。

表格例中，

- x_{i1} —— 第 i 个性能参数超差后果严重性评分；
- x_{i2} —— 第 i 个性能参数用户关注度评分。

表 4 专家评分法列表示例

性能分解		超差后果严重性评分 (1~10)	用户关注度评分 (1~10)	重要度
一级性能	二级性能			
性能 A	性能 A1	x_{11}	x_{12}	$x_{11} \times x_{12}$
	性能 A2	x_{21}	x_{22}	$x_{21} \times x_{22}$
性能 B	性能 B	x_{31}	x_{32}	$x_{31} \times x_{32}$
...	...			
关键性能参数集				

- b) 对产品性能参数超差后果严重性进行评分，评分准则如表 5 所示。
- c) 对用户关注度进行评分，评分准则如表 6 所示。
- d) 将超差后果严重性评分与用户关注度评分相乘，得到性能参数重要度。

- e) 基于性能参数的重要度评分结果，将重要度高于最高分和最低分中间值的性能参数作为关键性能参数，并整理在表中。

表 5 超差后果严重性评分准则

超差后果严重性评分	评分准则
1, 2, 3	基本不影响产品相应功能、可能导致非计划性维护或调试、不足以或轻度导致人员伤害、造成轻微财产损失、基本不影响环境或造成轻微环境损害
4, 5, 6	导致产品功能不能正常实现或降级运行、产品发生损伤并需要进行维修或更换、导致人员中等程度伤害、造成中等程度财产损失、造成一定程度环境损害
7, 8	导致产品功能丧失并发生严重损坏、导致人员严重伤害、造成严重财产损失及环境损害
9, 10	导致产品毁坏、导致人员死亡、造成重大财产损失及环境损害

表 6 用户关注度评分准则

		该性能参数符合要求时用户体验		
		满意	比较满意	无所谓
用户对该性能的需求程度	安全相关	10		
	必需	9	8	6
	无所谓	7	5	3
	非必需	4	2	1

5.3.2.3 两两比较法

两两比较法适用于性能参数较少且相互之间比较为容易的情况。本方法的具体流程及要求如下：

- 将性能分解得到的性能参数从左到右、从上到下依次排列，形成性能参数重要度评价矩阵。
- 将各个性能两两对比，按照表 7 所示评价标准填写相对重要比率，构成性能重要度评价矩阵 $A_{n \times n} = (a_{ij})_{n \times n}$ ，如表 8 示例所示。

其中， $A_{n \times n}$ —— $n \times n$ 阶的方阵；

n —— 进行分析的性能参数个数；

a_{ij} —— 第 i 个性能参数对第 j 个性能参数的重要比率，必须保证矩阵中元素 a_{ij} 和 a_{ji} 互为倒数。

- 对重要度评价矩阵 $A_{n \times n} = (a_{ij})_{n \times n}$ 进行一致性检验。计算一致性检验指标

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},$$

式中， CI —— 一致性检验指标，

λ_{\max} —— 矩阵 $A_{n \times n}$ 的最大特征值，

n —— 矩阵 $A_{n \times n}$ 的维数。

若 $CI \leq 0.1$ ，则认为重要性评价矩阵具有较为满意的一致性，否则需要重新修改评价矩阵，直至一致性指标达到要求。

- d) 计算 λ_{\max} 对应的特征向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，对 X 进行标准化处理得到权重向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ，权重向量各元素的计算公式为：

$$w_j = \frac{x_j}{\sum_{i=1}^n x_i}, \quad j=1, 2, \dots, n.$$

式中， w_j — 向量 W 的第 j 个元素，

x_i — 向量 X 的第 i 个元素。

- e) 选择向量 W 各元素中排名前 40% ~ 50% 的元素，其下标对应的性能参数则划分为关键性能参数，进一步得到相对应的关键性能参数集。

表 7 重要比率评价标准

两两比较值 a_{ij}	含义
1:1	功能 i 和功能 j 的重要程度相当
3:1	功能 i 比功能 j 略重要
5:1	功能 i 比功能 j 重要
7:1	功能 i 比功能 j 重要很多
9:1	功能 i 比功能 j 极其重要

表 8 性能参数重要度评价矩阵示例

a_{ij}	j	1	2	3	4	5
i	含义	性能 A1	性能 A2	性能 B1	性能 C1	性能 C2
1	性能 A1	1	3	5	7	7
2	性能 A2	1/3	1	5	3	3
3	性能 B1	1/5	1/5	1	1/3	1/3
4	性能 C1	1/7	1/3	3	1	1
5	性能 C2	1/7	1/3	3	1	1

5.3.3 关键性能参数分析

5.3.3.1 目的

关键性能参数分析的目的是对关键性能参数进行分类、细化，获取它们的类别信息、关联内外因变量、关联外因变量（着重分析敏感应力）以及性能参数之间的相关性特征，从而为裕量分析做好准备。

5.3.3.2 性能参数分类

关键性能参数分为三类：望大性能参数、望小性能参数、望目性能参数。应根据各关键性能参数与产品功能的关系确定它们的类别。

具体分类方法如下：

- a) 在自身取值空间内，若性能参数的取值越大越有利于产品相关功能的实现，则将

其归类为望大性能参数；

- b) 在自身取值空间内，若性能参数的取值越小越有利于产品相关功能的实现，则将其归类为望小性能参数；
- c) 在自身取值空间内，若性能参数的取值越接近于某个特定目标越有利于产品相关功能的实现，则将其归类为望目性能参数。

5.3.3.3 关联内外因分析

关联内外因是指影响性能参数取值的内因变量和外因变量。关联内外因分析的目的是为裕量分析提供重要信息，并为后续的学科交叉方程与退化方程构建奠定基础。关联内外因分析开展后，需要在性能分解的基础上注明各级性能的关联内外因。具体表格形式可参考表 9。需要注意的是：

- a) 对于关键性能参数的关联内因变量而言，往往需要首先结合产品功能原理，定位影响关键性能参数的产品结构，因此应在表格中予以注明；
- b) 关联内外因变量中应该尽量选取影响相对大的变量，关联内因应选取核心的设计变量，关联外因应选取敏感应力。

表 9 关联内外因分析表示例

关键性能参数	对应结构	关联内因	关联外因
性能 A1	结构 A1-1	内因 A1-1-X1 内因 A1-1-X2	无
	结构 A1-2	内因 A1-2-X1	外因 A1-2-Y1
	结构 A1-3	内因 A1-3-X1	无
性能 B22	结构 B22-1	内因 B22-1-X1	外因 B22-1(2)-Y1
	结构 B22-2	内因 B22-2-X1	
...

关联内外因分析的具体要求如下。

(1) 关联内因分析

关联内因分析应充分结合设计过程遵循的相关原理开展分析。一般而言，典型的关联内因包括尺寸、材料、工艺、布局、内部力等类别，典型的描述方式如表 10 所示。

表 10 典型关联内因及描述方式

类别	描述方式
尺寸	长度、宽度、高度、跨度、角度、直径、曲率、间隙等
材料	材料类型（牌号）、材料参数（如刚度、屈服强度、热膨胀系数等）
工艺	装配工艺参数、生产工艺参数、封装形式、封装工艺参数等
布局	布局形式、安装位置等
内部力	粘合力、连接力、张紧力、预紧力矩等

关联内因分析的方法包括：

- a) 设计人员基于设计方法、功能原理、相似产品，结合自身工程经验，分析确定主要的关联内因；
- b) 基于设计过程中开展的性能测试，推断影响性能的关联内因；

- c) 针对产品开展性能仿真，通过改变某些内因变量的取值，观测性能的变化，从而判定是否为关联内因。

(2) 关联外因分析

关联外因分析可以从工作应力和环境应力两个角度考虑。典型的关联外因变量类型及描述方式如表 11 所示。

表 11 典型关联外因类型及描述方式

类别	电子产品	机械产品
工作应力	<ul style="list-style-type: none"> 电应力：电压、电流等 磁场力 半导体器件工作结温 	<ul style="list-style-type: none"> 静力学应力：拉应力、压应力、弯曲应力等 动力学应力：摩擦力、交变应力等
环境应力	<ul style="list-style-type: none"> 温度（热）应力：高温、低温、高低温循环/冲击等 湿度应力 振动应力 化学（腐蚀）环境应力 辐射应力 	<ul style="list-style-type: none"> 温度应力：高温、低温、高低温循环/冲击等 湿度应力 振动应力 冲击应力 化学（腐蚀）环境应力

关联外因分析应着重确定对产品关键性能参数敏感的应力。在认知有限的情况下应确定关联外因变量的全集，随着理论分析的进行和实验的开展，可不断更新分析结果。关联外因分析的方法包括：

- 根据使用场景分析中确定的产品主要工作模式和经历的环境条件，分析可能影响产品性能参数的工作应力和环境应力，并作为关联外因变量；
- 查找设计准则中对于性能指标和应力条件的相关描述或规定，识别关联外因变量。例如，电子产品通常会规定工作允许的环境温度，则温度应力可作为关联外因变量。
- 基于设计过程中开展的性能测试，推断关联外因变量。

5.3.3.4 性能参数相关性分析*

性能参数相关性分析的目的是确定关键性能参数集中可能存在的强相关性能参数，并对它们尽可能地进行合并，从而保证分析得到的关键性能参数是相互独立的。实际分析时可根据需要选择性地开展性能参数相关性分析。

两性能参数之间典型的相关关系有：

- 正相关，即一个性能指标的增加使得另一个性能指标也相应增加。例如，机械结构的弯曲强度和抗拉强度即为正相关关系，通常抗拉强度大增加时，弯曲强度也会相应增加。
- 负相关，即一个性能指标的增加使得另一个性能指标减小。例如，手机屏幕亮度与手机续航时间即为负相关关系，在其他使用条件相同的情况下，屏幕亮度越大，手机续航时间越短。
- 其他，即较为复杂的耦合关系。例如，机械结构承载能力和热传导速率之间的关系就较为复杂，当裂纹出现使得承载能力降低时，热传导速率减缓，结构温度升

高使得承载能力进一步降低。

若不确定两性能参数是否相关，则应在分析报告中注明“不确定相关关系”，并在下一步的工作中进行验证。若确定两性能参数相关，但并不明确具体的量化关系，则需要分析中说明理由，并在后续的产品研发中进行确认。

5.4 裕量分析

5.4.1 需求阈值分析

需求阈值分析的目的是明确产品的需求阈值，辅助裕量方程的构建。分析关键性能参数需求阈值的步骤如下：

- a) 构建关键性能参数需求阈值分析表，表头为“参数属性”、“关键性能参数名称”、“需求阈值分析过程”、“阈值来源”，如表 12 所示；
- b) 根据参数属性，对关键性能参数进行分类列举；
- c) 根据产品功能对性能的不同需求，分析性能参数的需求阈值，并填写表 12。

表 12 关键性能参数需求阈值分析表示意及说明

参数属性	关键性能参数名称	需求阈值分析过程	阈值来源
望大	按照关键性能参数类别，分别列出所有关键性能参数	简要介绍关键性能参数阈值的分析过程及阈值确定的原因	列出阈值确定的方法和途径，如理论分析、用户要求、材料极限等
望小			
望目			

关键性能参数的需求阈值分为三类，即弹性需求阈值、工作需求阈值、破坏需求阈值。对这三类需求阈值的说明如下：

(1) 弹性需求阈值

弹性需求阈值是根据产品功能对性能受扰动后能够弹性恢复的要求确定的需求阈值。例如，产品功能需要某性能在受到 80℃ 高温冲击后即使发生降级也仍然可以在温度降至 40℃ 后恢复至额定值，则可用 80℃ 来表征弹性需求阈值。

(2) 工作需求阈值

工作需求阈值是根据产品功能对性能有效的要求确定的需求阈值。例如，电机功能要求在 20℃~80℃ 的使用场景下，转速始终保持在 2000rpm±50rpm 范围内，则 1950rpm 和 2050rpm（20℃~80℃）就可以构成工作需求阈值。

(3) 破坏需求阈值

破坏需求阈值是根据产品对是否允许发生完全破坏的要求确定的需求阈值，通常使用外因变量来描述。例如，某电子产品功能要求其在 120℃ 运行时不被烧毁，则可用 120℃ 来表征破坏需求阈值。

分析关键性能参数需求阈值的要求如下：

- a) 需求阈值的表达形式应与产品的使用场景密切相关，需要明确在什么样的使用场景下功能对性能有何种需求，也可使用外因变量进行替代；
- b) 需求阈值分析过程中，应该阐明是根据产品功能的何种需求确定的，即明确是弹性需求阈值、工作需求阈值还是破坏需求阈值；例如，产品有性能受扰动后的恢复性需求，那么则是根据弹性需求确定的弹性需求阈值；

- c) 为了满足各种需求，关键性能参数的需求阈值可能存在多个，此时应在分析表中注明；例如，在电子元器件某个 70℃ 工作的使用场景下，考虑焊锡破坏的温升需求要低于 110℃，考虑元器件性能有效的温升需求要低于 80℃，则 110℃ 称为破坏需求阈值，80℃ 也称为工作需求阈值。

5.4.2 裕量方程构建

裕量方程构建的目的是根据关键性能参数的类别确定性能裕量形式，并帮助设计分析人员了解所有关键性能参数在现有设计下的性能裕量水平，并为后续的确信可靠性建模分析、可靠性实验规划等工作奠定基础。裕量方程构建应填写如表 13 所示表格，以整合所有关键性能参数的裕量信息。

表 13 关键性能参数裕量信息表示意及说明

关键性能参数	裕量方程	裕量计算
列出关键性能参数的名称	根据关键性能参数的类别列出裕量方程的数学表达式	说明现有设计下关键性能参数和需求阈值的取值，并依据裕量方程计算产品性能裕量的值

裕量方程的形式主要包含两种，可按需选择，具体如下。

- a) 若主要关注裕量的绝对值，不需对各关键性能参数的裕量进行比较，则可按照如下形式构建裕量方程：

$$m_i = \begin{cases} p_i - p_{th,i}, & \text{若 } p_i \text{ 是望大性能参数} \\ p_{th,i} - p_i, & \text{若 } p_i \text{ 是望小性能参数} \\ \min\{p_i - p_{thL,i}, p_{thU,i} - p_i\}, & \text{若 } p_i \text{ 是望目性能参数} \end{cases}$$

式中， i —— 关键性能参数的编号，
 p_i —— 编号为 i 的关键性能参数，
 $p_{th,i}$ —— p_i 的需求阈值，
 $p_{thL,i}$ —— p_i 的下界需求阈值，
 $p_{thU,i}$ —— p_i 的上界需求阈值，
 m_i —— p_i 的性能裕量，
 $\min\{\cdot\}$ —— 最小值函数。

- b) 若主要关注裕量的相对值，或需要对各关键性能参数的裕量进行比较，则可按照如下形式构建裕量方程：

$$m_i = \begin{cases} \ln\left(\frac{p_i}{p_{th,i}}\right), & \text{若 } p_i \text{ 是望大性能参数} \\ \ln\left(\frac{p_{th,i}}{p_i}\right), & \text{若 } p_i \text{ 是望小性能参数} \\ \min\left\{\ln\left(\frac{p_i}{p_{thL,i}}\right), \ln\left(\frac{p_{thU,i}}{p_i}\right)\right\}, & \text{若 } p_i \text{ 是望目性能参数} \end{cases}$$

式中， $\ln(\cdot)$ —— 自然对数函数。

附录 A (资料性附录)

某型 MOPA 激光器光电组件功能、性能及裕量分析示例

A.1 分析目标

针对激光器光电部分的研发状态，本 FPMA 分析的主要侧重点有以下几点：

- a) 对光电部分的功能进行详细分析，充分了解光路部分和电路部分的功能原理和信息流，明确各模块或组件在功能实现中的作用；
- b) 明确光电部分的主要性能，确定关键性能参数，分析其关联的内外因变量，为后续设计改进和可靠性建模提供依据；
- c) 确定关键性能参数的阈值，构建裕量方程。

A.2 前期准备

为了开展光电部分的 FPMA 分析，分析人员根据需求收集了三类信息或资料进行参考，详细如下：

- a) 设计原理图及仿真模型。光路部分的设计人员为本分析提供了产品的光学结构及基本功能原理信息，电路部分提供了电路原理图、实物图、EDA 仿真模型等；
- b) 相似产品的故障信息。该型激光器与历史出货产品有较强的继承性和相似性，客退数据、失效分析报告等资料有助于确定关键性能参数；
- c) 对标产品信息及主要性能指标。

A.3 功能分析

A.3.1 结构组成

电路部分由主控模块、驱动模块、种子控制模块、指示光控制等四个模块组成，电路部分的实物图如图 A.1 所示。

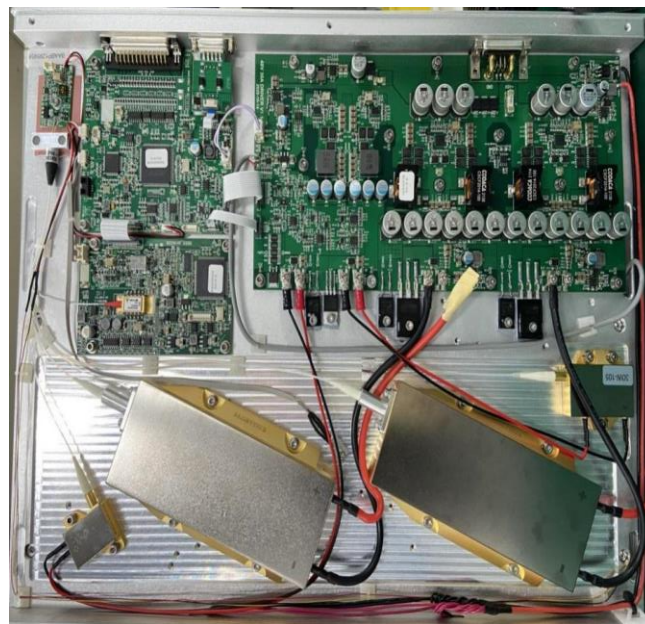


图 A.1 电路部分实物图

该激光器的光路部分由一个单模半导体激光器和三级光纤激光放大器组成，其结构如图 A. 2 所示。

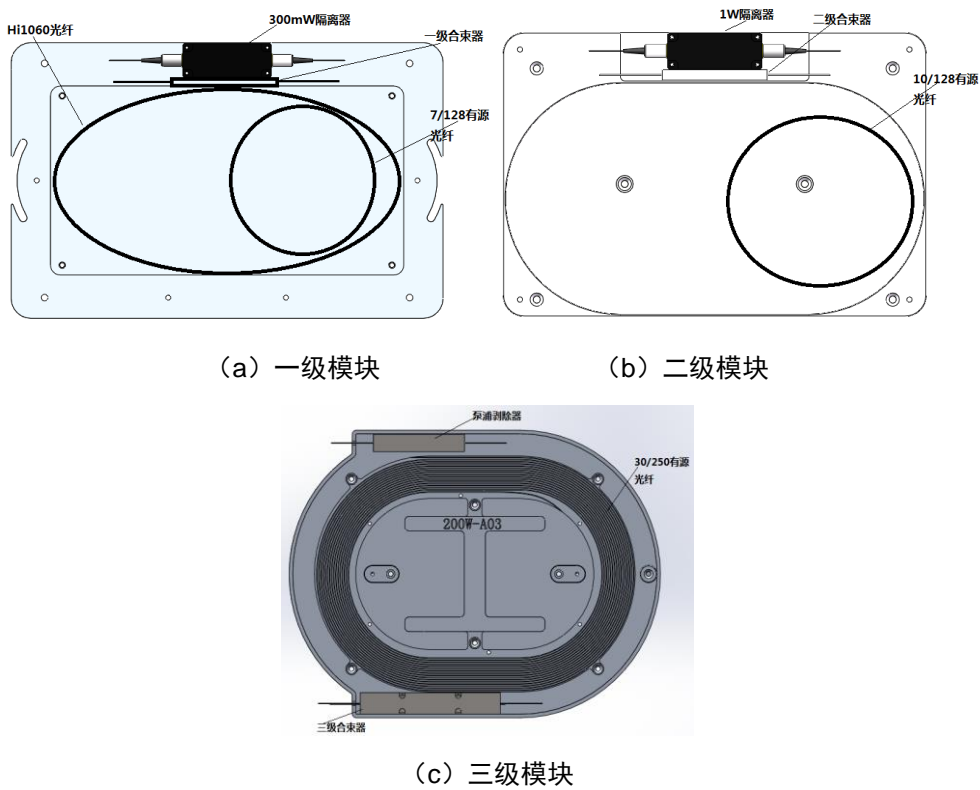


图 A. 2 光路部分结构组成图

A. 3. 2 主要功能及功能原理

对某型 MOPA 光纤激光器的主要功能是输出高能激光，完成对板材的切割、焊接、打标等工艺加工工序，光路部分和电路部分的功能框图如图 A. 3 和 A. 4 所示。

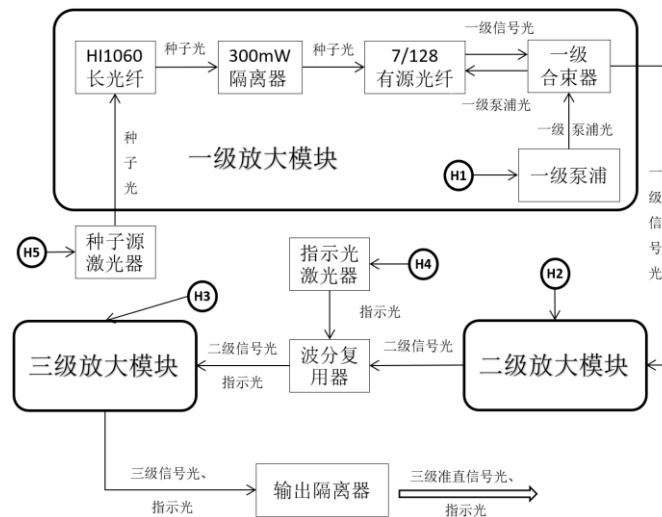


图 A. 3 光路部分功能框图

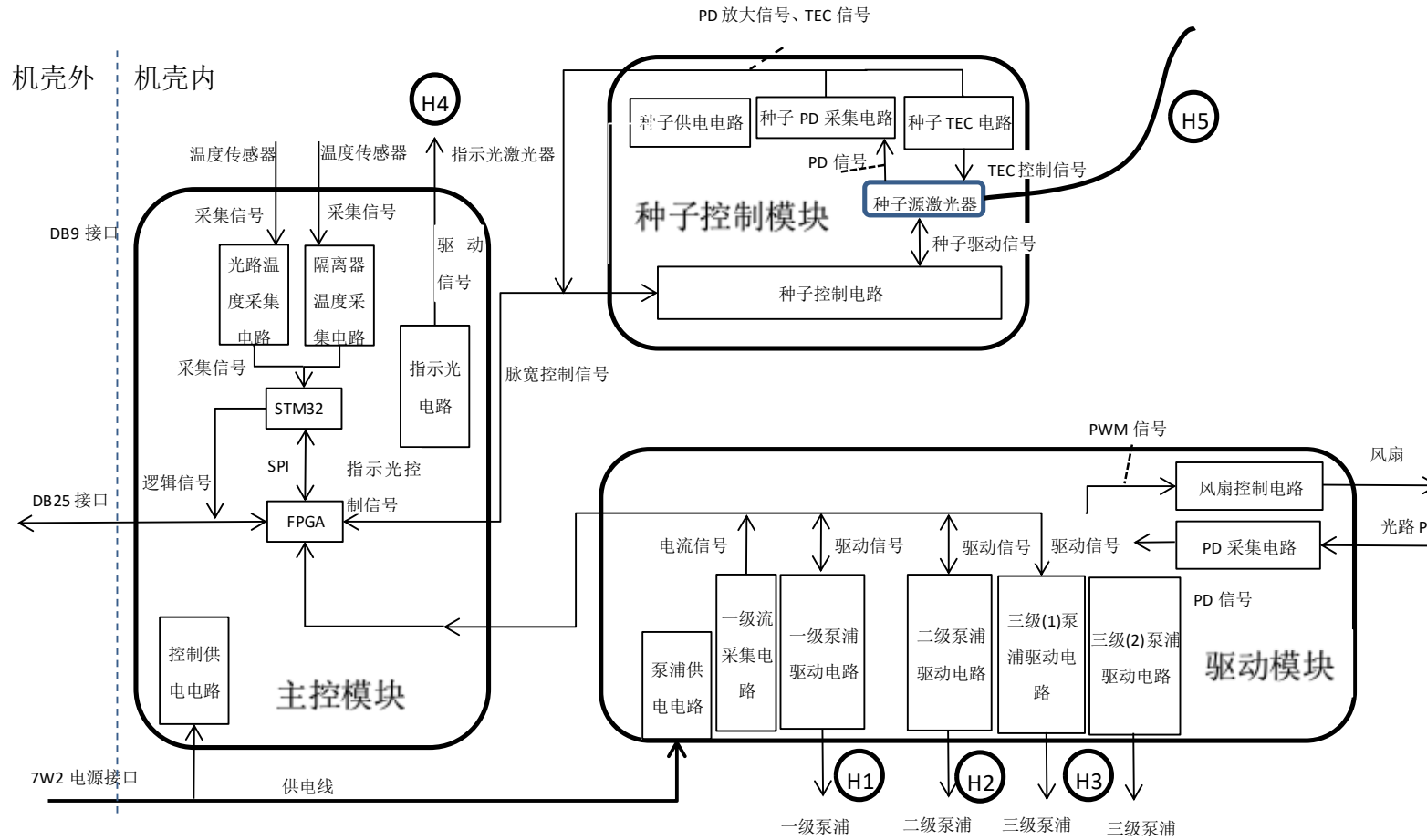


图 A. 4 电路部分功能框图

A.3.3 功能分解

该激光器光电部分的主要功能的细化分解如图 A.5 所示，具体的功能原理分析表如表 A.1 所示。

A.3.4 使用场景

根据使用场景分析结果，该激光器的使用场景主要包括 4 种：电池极片切割 (T_A)、电池极柱/注液孔清洗/打二维码 (T_B)、硬质金属切割/切削 (T_C)、金属深雕/打孔 (T_D)。

电池极片切割 (T_A)：主要应用于新能源动力电池领域，使用环境温度为 25-28℃，湿度 < 80%。每个加工周期内使用参数为 350ns/250kHz/180W，激光器持续出光，任务剖面如图 A.6 所示。

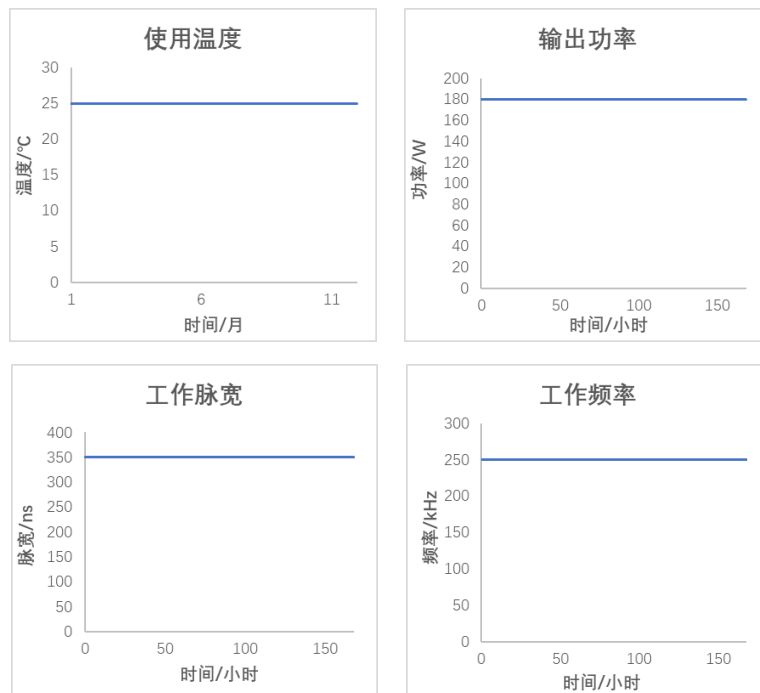


图 A.6 电池极片切割的任务剖面

电池极柱/注液孔清洗/打二维码 (T_B)：主要应用于新能源动力电池领域，使用环境温度为 0-40℃，湿度 < 80%。每个加工周期内使用参数为 200ns/240kHz/160W，完成一个工位预计 3 秒，切换到下一个工位预计 1 秒，任务剖面如图 A.7 所示。

硬质金属切割/切削 (T_C)：主要应用于金刚石/刀具/五金等领域，使用环境温度为 0-40℃，湿度 < 80%。每个加工周期内使用参数为 350ns/150kHz/180W，完成一个产品预计 30 秒，切换到下一个产品预计 3 秒，任务剖面如图 A.8 所示。

金属深雕/打孔 (T_D)：主要应用于模具五金/PCB 覆铜板/汽车/电子烟等领域，使用环境温度为 0-40℃，湿度 < 80%。每个加工周期分为二个阶段，第一阶段使用参数为 500ns/130kHz/180W，第二个阶段使用参数为 250ns/150kHz/100W，完成第一个阶段预计 15 秒，切换到下一个阶段预计 0.1 秒，完成第二个阶段预计 3 秒，加工周期之间的间隔 1 秒，任务剖面如图 A.9 所示。

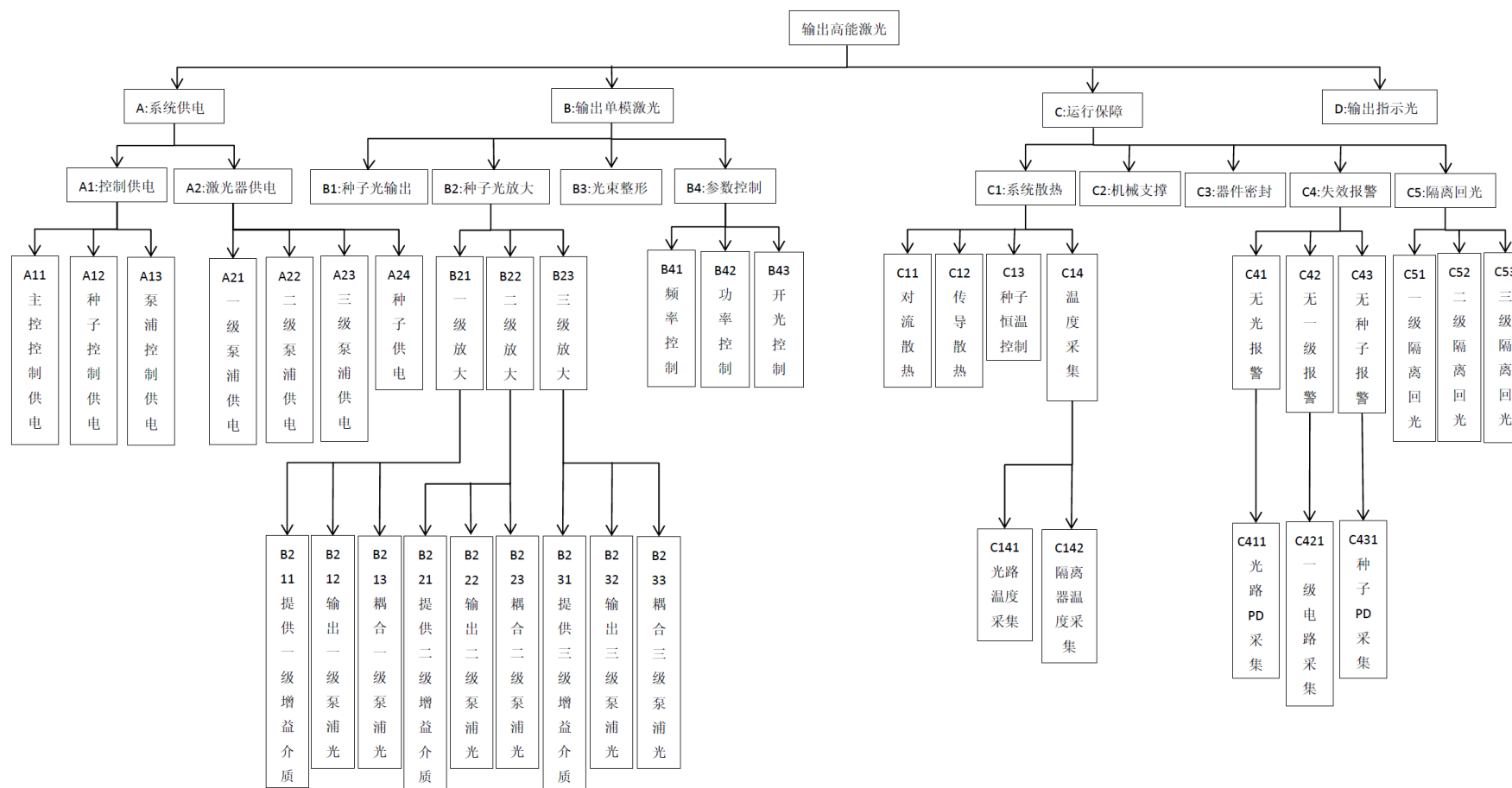


图 A.5 功能原理分解图

表 A. 1 光电部分功能分解表

各级功能及代码		对应结构	功能描述	
A1-控制供电		控制供电电路	为各个控制部分提供稳定的供电。	
A2-激光器供电	A21、A22、A23-泵浦供电	泵浦供电电路	为各部分泵浦电路提供稳定供电。	
	A24-种子供电	种子供电电路	为种子激光器提供稳定的供电。	
B1-种子光输出		种子控制电路 种子激光器	种子源激光器由一个光纤输出的单模半导体激光器组成，可以根据控制信号对输出激光进行调制，产生不同的脉冲宽度及重复频率。	
B2-种子光放大	B21-一级放大	B211-一级增益	7/128 有源光纤	7/128 有源光纤是一种双包层光纤，7 μm 的纤芯内掺杂有增益介质、用于传输种子源输出的 1064nm 单模信号光，128 μm 内包层用于传输泵浦激光器输出的 915 或 960nm 多模泵浦光，增益介质吸收泵浦光后、信号光再经过时便发生受激辐射、从而放大 1064nm 信号光。
		B212-输出一级泵浦光	10W 泵浦激光器	输出波长 960nm 的泵浦光，受电控控制，可调节输出时长及输出功率大小。
		B213-耦合一级泵浦光	一级合束器	将泵浦光耦合到内包层中，同时信号光不受影响、仍在纤芯中低损耗的传输。
	B22-二级放大	B221-二级增益	10/128 有源光纤	工作原理同 7/128 有源光纤，使用更大纤芯的光纤使承受的平均功率更高。
		B222-输出二级泵浦光	30W 泵浦激光器	工作原理同 10 泵浦激光器，更多的内部芯片使输出功率更高。
		B223-耦合二级泵浦光	二级合束器	工作原理同一级泵浦合束器，使用更大纤芯的光纤使承受的信号平均功率更高。

	B23-三级放大	B231-三级增益	30/250 有源光纤	工作原理同 7/128 有源光纤，使用更大纤芯的光纤使承受的信号平均功率更高，使用更大芯径的外包层是承受的泵浦功率更高。
		B232-输出三级泵浦光	三级泵浦激光器	工作原理同一级泵浦合束器，使用 5 只 80W 泵浦激光器。
		B233-耦合三级泵浦光	三级合束器	工作原理同一级泵浦合束器，使用更大纤芯的光纤使承受的平均功率更高，在熔接时通过不同工艺，将多条（6 条）泵浦光纤熔接至合束器，可以同时连接多个泵浦激光器。
B3-光束整形			输出隔离器	由准直、隔离、扩束三部分组成，将光纤输入的发散信号光转为大光斑的准直光束，适应应用端，同时也起到隔离回返光的作用。
B4-参数控制	频率控制 B41	主控电路 种子控制电路		由电平转换芯片、主控芯片，种子控制电路组成，控制种子的脉宽。
	功率控制 B42	主控电路 泵浦驱动电路 种子控制电路		由电平转换芯片，主控芯片组成，控制种子的输出频率，以及泵浦电流的限制。
	开关控制 B43	主控电路 泵浦驱动电路 种子控制电路		由电平转换芯片、主控芯片，控制泵浦、种子的启动。
C1-系统散热	C11-对流散热	主控电路 风扇控制电路 风扇、散热齿		由两个 MOS 管、24V 供电组成，通过主控的 PWM 控制风扇的转速，散热齿为齿状铝型材，增大散热面积。
	C12-传导散热	导热垫		加强电路和光路部分的热传导。
	C13-种子恒温控制	种子 TEC 电路		实现设定温度的闭环控制。

	C14-温度采集	C141-光路温度采集	光路温度采集电路	用于接收光路部分的温度传感器信号。
		C142-隔离器温度采集	隔离器温度采集电路	用于接收隔离器处的温度传感器信号。
C2-机械支撑			散热齿	加强散热及提供支撑。
C3-器件密封			铝制外壳	采用铝制外壳，以到达封闭激光器的目的。
C4-失效报警	C41-无光报警	C411-光路PD采集	光路PD采集电路	对检测到的光路部分的PD信号进行处理，以便于主控能够正常识别。
	C42-无一级报警	C412-一级电路采集	一级电流采集电路	对一级电流进行采集，由主控判断是否正常。
	C43-无种子报警	C413-种子PD采集	种子PD采集电路	对检测到的种子激光器的PD信号进行处理，以便于主控能够正常识别。
C5-回光隔离	C51-一级回光隔离		300mW 隔离器	隔离反向光，反向光存在时会降低激光输出甚至损坏光路器件。
	C52-二级回光隔离		1W 隔离器	工作原理同 300mW 隔离器，使用更大纤芯的光纤和更大尺寸的晶体使承受的平均功率更高，达到 1W。
	C53-三级回光隔离		10W 隔离器	工作原理同 300mW 隔离器，使用更大纤芯的光纤和不同的晶体使承受的平均功率更高，达到 5W，使用 2 只，进一步提升隔离能力。
D-输出指示光			指示光驱动电路 指示光激光 波分复用器	红色可见光作为应用端指示光，与激光共同输出。

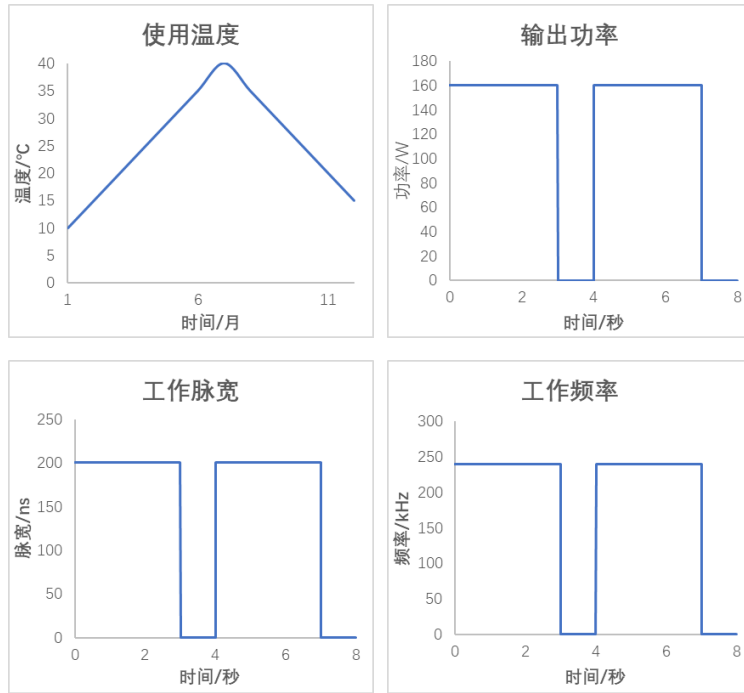


图 A. 7 注液孔清洗等的任务剖面

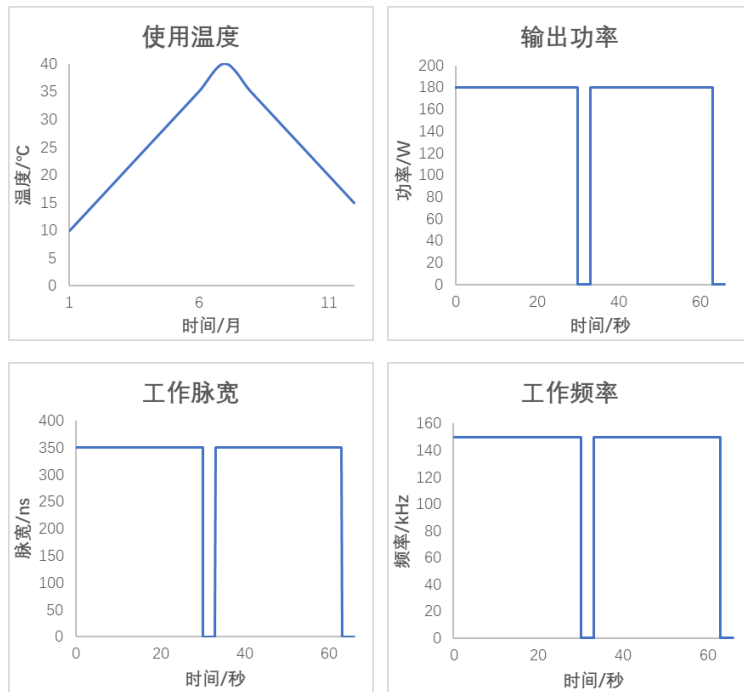


图 A. 8 硬质金属切割/切削的任务剖面

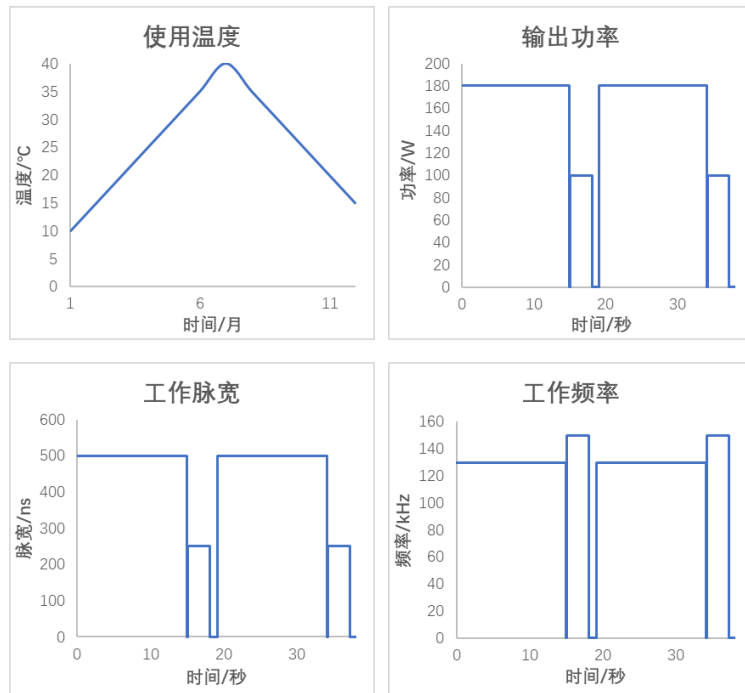


图 A.9 金属深雕/打孔的任务剖面

A.4 性能分析

A.4.1 性能分解

基于表 A.1 中光电部分的功能分析结果，依据主要功能所对应的性能指标进行性能分解。结果见表 A.2 所示。

表 A.2 中，“输出光偏置光功率”指未接收到开光指令时种子源预输出的光功率，与工作光功率区分。吸收系数“”指增益介质吸收泵浦光的能量，光纤中单位为 dB/m，如 3dB/m，指 1m 增益光纤可以吸收 50%的泵浦光，2m 则吸收 75%，指数增加。“光束质量因子”用于衡量光单模的程度，一般用 M2 表示，为一个大于等于 1 的数值，越接近 1 表示越接近单模。“隔离度”表示对方向光的隔离能量，与正向通光率对应，单位为 dB，如 10dB，表示反向光通过率为 10%。

A.4.2 确定关键性能参数

在激光器的光电部分性能分解的基础上，确定“后果严重度”、“问题常见度”等两个评分项，具体打分规则如表 A.3 和 A.4 所示。经专家打分，各性能参数的评分结果见表 A.2；选取总分大于等于 10 的参数作为关键性能参数，见表 A.2 的关键性能参数集。

A.4.3 关键性能参数特征分析

根据功能对关键性能参数的要求，判定关键性能参数的类型；根据学科原理、性能试验、过往失效经验等，确定各关键性能参数的影响因素，见表 A.5 所示。

表 A. 2 光电部分性能分解及关键性能参数分析表

功能分析			性能分析						
功能	功能层次		性能分解		专家打分			是否关键	
			一级性能参数	二级性能参数	后果严重度	问题常见度	总分		
系统供电 A	控制供电 A1	主控控制供电 A11	输出功率 P_A11_1		3	1	3	否	
			输出电压 P_A11_2		3	1	3	否	
		种子控制供电 A12	输出功率 P_A12_1		5	1	5	否	
			输出电压 P_A12_2		5	1	5	否	
		泵浦控制供电 A13	输出功率 P_A13_1		3	1	3	否	
			输出电压 P_A13_2		3	1	3	否	
	激光器供电 A2	一级泵浦供电 A21	驱动参数 P_A21_1	上升时间 P_A21_11		3	1	3	否
				驱动功率 P_A21_12		5	1	5	否
				下降时间 P_A21_13		3	1	3	否
		一级泵浦供电 A21	电源参数 P_A21_2	输出电压 P_A21_21		5	1	5	否
				动态响应时间 P_A21_22		4	1	4	否
				输出功率 P_A21_23		5	1	5	否
				输出纹波 P_A21_24		2	1	2	否
		二级泵浦供电 A22	驱动参数 P_A22_1	上升时间 P_A22_11		3	1	3	否
				驱动功率 P_A22_12		5	1	5	否
下降时间 P_A22_13				3	1	3	否		

		电源参数 P_A22_2	输出电压 P_A22_21	5	1	5	否	
			动态响应时间 P_A22_22	4	1	4	否	
			输出功率 P_A22_23	5	1	5	否	
			输出纹波 P_A22_24	2	1	2	否	
	三级泵浦供电 A23	驱动参数 P_A23_1	上升时间 P_A23_11	3	1	3	否	
			驱动功率 P_A23_12	3	1	3	否	
			下降时间 P_A23_13	3	1	3	否	
		电源参数 P_A23_2	输出电压 P_A23_21	3	2	6	否	
			动态响应时间 P_A23_22	3	1	3	否	
			输出功率 P_A23_23	3	1	3	否	
	种子供电 A24	电源参数 P_A24	输出纹波 P_A23_24	2	1	2	否	
			输出电流 P_A24_1	5	1	5	否	
			输出电压 P_A24_2	5	1	5	否	
			输出纹波 P_A24_3	3	1	3	否	
	输出单 模激光 B	种子光输出 B1	输出光光学参数 P_B1_1	驱动电流 P_A24_4	5	2	10	是
				输出光峰值功率 P_B1_11	5	1	5	否
输出光偏置光功率 P_B1_12				3	1	3	否	
输出光中心波长 P_B1_13				5	1	5	否	
输出光控制参数 P_B1_2		输出光控制参数 P_B1_2	输出光谱宽 P_B1_14	5	1	5	否	
			输出光脉冲形状 P_B1_21	5	1	5	否	
			输出光频率 P_B1_22	5	1	5	否	

种子光放大 B2	一级放大 B21	提供一级增益介质 B211	纤芯直径 P_B211_1	5	1	5	否
			NA(数值孔径)P_B211_2	5	1	5	否
			吸收系数 P_B211_3	5	1	5	否
		输出一级泵浦光 B212	泵浦光功率 P_B212_1	5	1	5	否
			泵浦光波长 P_B212_2	5	1	5	否
		耦合一级泵浦光 B213	泵浦光通光率 P_B213_1	5	1	5	否
			信号光通光率 P_B213_2	5	1	5	否
			信号光光束质量因子 P_B213_3	3	1	3	否
		二级放大 B22	提供二级增益介质 B221	纤芯直径 P_B221_1	5	1	5
			NA(数值孔径)P_B221_2	5	1	5	否
			吸收系数 P_B221_3	5	1	5	否
	输出二级泵浦光 B222		泵浦光功率 P_B222_1	5	1	5	否
			泵浦光波长 P_B222_2	5	1	5	否
	耦合二级泵浦光 B223		泵浦光通光率 P_B223_1	5	1	5	否
			信号光通光率 P_B223_2	5	1	5	否
			信号光光束质量因子 P_B223_3	3	1	3	否
	三级放大 B23		提供三级增益介质 B231	纤芯直径 P_B231_1	5	1	5
			NA(数值孔径)P_B231_2	5	2	10	是
			吸收系数 P_B231_3	4	1	4	否
		输出三级泵浦光 B232	泵浦光功率 P_B232_1	4	2	8	否
			泵浦光波长 P_B232_2	4	1	4	否

RSE-STD-1391 2022

	耦合三级泵浦光 B233	泵浦光通光率 P_B233_1		5	2	10	是				
		信号光通光率 P_B233_2		5	3	15	是				
		信号光光束质量因子 P_B233_3		4	4	16	是				
	光束整形 B3		输出光斑直径 P_B3_1		4	5	20	是			
			输出光束质量因子 P_B3_2		4	5	20	是			
	参数控制 B4	频率控制 B41		输出频率 P_B41		5	2	10	是		
		功率控制 B42		输出功率 P_B42		3	1	3	否		
		开光控制 B43		开光响应时间 P_B43		2	1	2	否		
	运行保障 C	系统散热 C1		对流散热 C11		满功率工作时热沉温度与环境温度温差 P_C11		3	2	6	否
				传导散热 C12		发热源与热沉温差 P_C12		3	2	6	否
种子恒温控制 C13				温度精度 P_C13		5	2	10	是		
温度采集 C14		光路温度采集 C141		温度精度 P_C141		4	2	8	否		
		隔离器温度采集 C142		温度精度 P_C142		4	2	8	否		
机械支撑 C2		可承受的振动参数 P_C2_1		振动频率 P_C2_11		3	1	3	否		
				振动幅值 P_C2_12		3	1	3	否		
器件密封 C3		密封等级 P_C3		3	1	3	否				
失效报警 C4		无光报警 C41	光路 PD 采集 C411		最低响应光功率 P_C411		4	3	12	否	
		无一级	一级电路采		最低响应电流 P_C421		4	1	4	否	

	报警 C42	集 C421					
	无种子 报警 C43	种子 PD 采 集 C431	最低响应光功率 P_C431	4	1	4	否
回光隔 离 C5	一级回光隔离 C51		常温隔离度 P_C51_1	5	1	5	否
			0-50℃最低隔离度 P_C51_2	5	1	5	否
			插损 P_C51_3	5	1	5	否
	二级回光隔离 C52		常温隔离度 P_C52_1	5	1	5	否
			0-50℃最低隔离度 P_C52_2	5	1	5	否
			插损 P_C52_3	5	1	5	否
	三级回光隔离 C53		常温隔离度 P_C53_1	5	4	20	是
			0-50℃最低隔离度 P_C53_2	5	4	20	是
			插损 P_C53_3	5	4	20	是
输出指示光 D			指示光功率 P_D_1	2	2	4	否
			回光功率 P_D_2	2	2	4	否
			驱动功率 P_D_3	2	1	2	否
关键性能参数集			驱动电流 P_A24_4、数值孔径 P_B231_2、泵浦光通光率 P_B233_1、信号光通光率 P_B233_2、信号光光束质量因子 P_B233_3、输出光斑直径 P_B3_1、输出光束质量因子 P_B3_2、输出频率 P_B41、温度精度 P_C13、常温隔离度 P_C53_1、0-50℃最低隔离度 P_C53_2、插损 P_C53_3。				

表 A.3 后果严重度打分规则

分数	后果严重度描述
1	不严重，如外观稍有影响，不影响使用性能。
2	严重程度弱，稍微影响性能或用户体验，如功耗增大，噪音增加，偶尔误报警，红光弱。
3	较严重，影响使用或引入失效风险，如热透、光斑抖动、串口连不上。
4	很严重，导致难以使用或引入较大失效风险，如 PD 误报无法开光、输出光斑严重异常。
5	非常严重，导致破坏性烧毁。

表 A.4 问题常见度打分规则

分数	问题常见度描述
1	未出现，理论上可能出现，但实际未出现过
2	极少出现，只作为个例出现，小于 1%
3	少出现，实际产品中偶尔出现，小于 3%
4	较常出现，实际产品中较常出现，小于 6%
5	经常出现，实际产品中经常出现，大于 6%

表 A.5 激光器关键性能参数裕量分析表

关键性能参数	类别	关联内因	关联外因
驱动电流 P_A24_4	望大	MOS 管最大输出电流	环境温度
		运放 IC 输入电压	
		采样电阻的精度	
泵浦光通光率 P_B233_1	望大	泵浦熔接点参数	挤压应力
		泵浦光功率	
		泵浦光模式	
信号光通光率 P_B233_2	望大	信号熔接点参数	挤压应力
		信号光功率	
		信号光模式	
信号光光束质量因子 P_B233_3	望小	信号熔接点参数	挤压应力
		注入光模式	
输出光斑直径 P_B3_1	望目	输出光功率	环境温度
		输出光模式	
		输出光谱宽	环境洁净度

		输出光波长	
输出光束质量因子 P_B3_2	望小	输出熔接点参数	环境温度
		输出光功率	
		输出光模式	
		输出光谱宽	环境洁净度
		输出光波长	
输出频率 P_B41	望目	电平转换芯片的转换速率	环境温度
温度精度 P_C13	望小	供电电源的输出电流	环境与 TEC 温度设置值温差
		功放 IC 的输出电流	
常温隔离度 P_C53_1	望大	输出光功率	外部反射率
		输出光波长	
0-50℃最低隔离度 P_C53_2	望大	输出光功率	外部反射率
		输出光波长	
插损 P_C53_3	望小	输出熔接点参数	环境温度
		信号光功率	
		信号光模式	挤压应力
		信号光波长	环境洁净度

A.5 裕量分析

本部分对关键性能参数进行阈值分析并计算性能裕量值，分析结果如表 A.6 所示。

表 A.6 激光器关键性能参数裕量分析表

关键性能参数	类别	名义值	阈值	设计裕量	阈值来源及分析过程
驱动电流 P_A24_4	望大	2A	1.8A	0.2A	种子峰值功率要求
泵浦光通光率 P_B233_1	望大	98%	97%	1%	该参数低于阈值会导致激光器效率降低、性能劣化，同时会增大合束器处热累积，增加激光器失效风险。
信号光通光率 P_B233_2	望大	97%	95%	2%	该参数低于阈值会导致激光器效率降低、性能劣化，同时会增大合束器处热累积，增加激光器失效风险。
信号光束质量因子 P_B233_3	望小	1.4	1.6	0.2	信号光束质量会影响最终输出的光束质量，该参数超过阈值会导致激光器性能劣化。

RSE-STD-1391 2022

输出光斑直径 P_B3_1	望目	7mm	7± 0.5mm	0.5mm	应用端需求
输出光束质量因子 P_B3_2	望小	1.8	2.0	0.2	应用端需求
输出频率 P_B41	望目	± 1KHz	±1KHz	0	光放大需求，光路各个脉宽输出所需的最大频率。
温度精度 P_C13	望小	±0.1℃	±0.5℃	0.4	种子光谱稳定性需求
常温隔离度 P_C53_1	望大	25dB	23dB	2dB	该参数低于阈值，会造成较强的回光、易损坏光路器件、增加激光器失效风险。
0-50℃最低隔离度 P_C53_2	望大	20dB	18dB	2dB	该参数低于阈值，会造成较强的回光、易损坏光路器件、增加激光器失效风险。
插损 P_C53_3	望小	0.3dB	0.4dB	0.1dB	该参数低于阈值会导致激光器效率降低、性能劣化，同时增大输出隔离器的热累积，增加激光器失效风险。