

融合 DSM 和 DFX 的产品设计优化方法研究

沈靖

(上海互关数据技术有限公司 上海 200082)

摘要: 在产品设计的早期策划阶段, 忽视可制造性会降低新产品开发效率。本文以充电宝为例, 融合 DSM 和 DFX 工具。通过 DSM 聚类来合并零件、简化结构, 计算 DSM 复杂度, 同时通过 DFX 工具分析聚类后方案的 DFA (装配操作复杂度) 和 DFM (零件加工复杂度), 建立 DSM-DFX 总复杂度的评价指标。并进一步以 DSM 复杂度为面积, 以 DFX 复杂度为高度, 实现产品设计总复杂度的可视化, 从而提前识别可制造性风险, 达到新品开发降本增效的目的。

关键词: DSM 设计结构矩阵; 聚类分析; DFX 评价; 公理设计

0 引言

在产品设计早期的策划—概念设计阶段 (简称策划), 容易忽略量产可行性 (简称 DFX), 形成虚假的设计交付——“想得出创意, 画得出方案, 造不出产品”, 最终导致开发过程中后期频繁的设计迭代。原因是策划与量产可行性分析, 在流程上属于串行、相隔甚远, 而且缺乏综合分析工具。

本文基于公理化设计 (AD) 的 2 个基本原则, 以 DSM 聚类分析进行零件合并, 结合 AD 的信息含量计算原理与 DFX 的模糊评价技术进行可制造性的分析, 尝试在策划阶段、从系统工程的角度, 识别可制造性隐患。

1 公理化设计 AD 和设计结构矩阵 DSM 的介绍

Suh Nam-Pyo 于 1990 在《The Principles of Design》一书中提出公理化设计 (Axiomatic Design) [1]。AD 理论基于独立公理和信息最小化公理两个指导原则、建立 ADM 公理化设计矩阵, 通过聚类分析, 转化为设计结构矩阵 DSM (Design Structure Matrix) [2]。通过矩阵解耦 (划分、撕裂、聚类等), 提高产品各个子功能之间的相互独立性, 减低产品设计方案的信息容量, 优化设计方案。

DSM 矩阵的建立: 分析用户需求 (VOC) 得到功能需求 (FR), 再由设计经验提出设计参数 (DP); FR 和 DP 是一一对应的映射关系, 由此建立 FR-DP 的 ADM 矩阵; 聚类后结合材质、形状等机械要素, 形成零件, 将 ADM 矩阵转化为 DSM 矩阵。例如:

一个移动电子设备需要具备输入触发功能, 操作简便不费力, 耐用 (FR), 由经验可知一个垂直往复运动、具有弹性—磁性力 (DP) 的结构可以实现, 结合机械要素推导出 2 个零件: 按键、弹簧。

DSM 矩阵将 FR 和 DP 的两两交互关系可视化, 交互关系包括装配关系、信息交互 (声光电)、能量交互 (作用力、场等) 和物质交换。完全没有交互关系的 FR_i-DP_j 的单元值为 “0”、反之为 “1” (布尔型 DSM), 如图 1 所示。

ADM	DP1	DP2	DP3	DP4	DSM	零件1	零件2	零件3	零件4
FR1	A	1	1	0	FR1/零件1	A	1	1	0
FR2	1	B	0	0	FR2/零件2	1	B	0	0
FR3	0	0	C	1	FR3/零件3	0	0	C	1
FR4	1	1	0	D	FR4/零件4	1	1	0	D

图 1 ADM 和 DSM 关系

图 1 中 ABCD 的连线构成的对角线 (双划线), 称为自关线, 与自关线垂直的对角线, 称为互关线 (箭头虚线); 则某单元中心到自关线的距离为: 该单元中心到自关线的垂直线段长度 (显然平行于互关线)。例如设 DSM 单元边长为 $\sqrt{2}$, 则图 1 中单元 FR2-DP1 到自关线的距离为 1, 单元 FR2-DP3 到自关线的距离为 2。

1.1 独立公理 + DSM 矩阵

分析设计方案得到 4 种基本的交互关系, 如图 2 所示。

DSM含义	壹			贰			叁			肆		
装配结构	A和B是独立的机械零件			A提供装配基准给B			A和B分别开始装配，但B需要提供装配基准给A，A才能完全装配			AB互为装配基准		
时序描述	A和B是并行的设计活动			A先B后，串行的设计活动			A和B并行,但A需要B输入，然后A才能完成，			A先B后串行，B反馈给A		
关系描述	AB相互独立，并行			A输出给B，串行			B输出给A			A先B后，B还需要反馈给A		
关系图												
DSM描述		零件C1	零件C2		零件C1	零件C2		零件C1	零件C2		零件C1	零件C2
	FR1	A	0	FR1	A	0	FR1	A	1	FR1	A	1
	FR2	0	B	FR2	1	B	FR2	0	B	FR2	1	B
DSM复杂度	0=0.5*(FR2-C1)+1*(FR1-C2) =0.5*0+1*0			0.5=0.5*(FR2-C1)+1*(FR1-C2) =0.5*1+1*0			1=0.5*(FR2-C1)+1*(FR1-C2) =0.5*0+1*1			2=2*(FR2-C1+FR1-C2) =2*(1+1) =2*1		

图 2 DSM 含义解读

图中，A 为对应 FR1-DP1 的设计－制造活动，或者零件－模块；B 为对应 FR2-DP2 的设计－制造活动，或者零件－模块。

对于一个 N 阶 DSM 矩阵而言，对其进行解耦：将非零单元聚集到矩阵自关线的附近（聚类），将矩阵右上三角区单元值为“1”的单元转移到左下（划分），同时尽可能将矩阵中的“1”化解为“0”（通过实际的设计手段、任务统筹等）。划分多用于动态 DSM（有时间顺序的任务）的分析，聚类用于静态 DSM（同时存在的零件等装配结构）的分析。解耦可降低 DSM 矩阵的耦合复杂度，Suh Nam-Pyo 提出用指标 R 和 S 评价 DSM 的耦合复杂度^[3]。本文结合移动电子设备的设计实践，提出一种简便的评价方法：

- ①对 DSM 矩阵中所有耦合单元组，赋以权重 2；
- ②排除耦合、自关线右上三角的非零单元，赋以权重 1；
- ③排除耦合、自关线左下三角的非零单元，赋以权重 0.5。

从而得到如下计算公式：

DSM耦合复杂度 = $2 \times \sum_{i \neq j} (c_{ij} + c_{ji}) + 1 \times \sum_{i < j} u_{ij} + 0.5 \times \sum_{i > j} l_{ij}$ (1)

式中： $\sum_{i \neq j} (c_{ij} + c_{ji})$ －情况①耦合单元到自关线垂直距离之和；

$\sum_{i < j} u_{ij}$ －情况②单元到自关线的垂直距离之和；

$\sum_{i > j} l_{ij}$ －情况③单元到自关线的垂直距离之和。

1.2 信息最小公理

在满足独立公理的设计中，具有最少信息含量或最高成功概率的设计是最好设计。信息含量的计算公式^[4]如下：

信息含量 $I = \log_2 \left(\frac{\text{系统范围}}{\text{公共范围}} \right)$ (2)

计算原理如图 3 所示，系统 pdf (Probability Density Function)：功能需求系统范围内的系统概率密度函数。公共范围 (Common Range)：设计范围 (Design Range) 与系统范围 (System Range) 的交集。公共范围面积记为 A_{cr} ，即满足功能需求的设计概率，存在多个 A_{cr} 时，采用 A_{cr} 的几何平均^[4]，计算公式为：

$\overline{A_{cr}} = (A_{cr1} \times A_{cr2} \times A_{cr3} \times \cdots \times A_{crn})^{1/n}$ (3)

则设计信息含量的计算公式为：

DFM复杂度 = $I = \log_2 \left(\frac{1}{\overline{A_{cr}}} \right) = -\log_2 \overline{A_{cr}}$ (4)

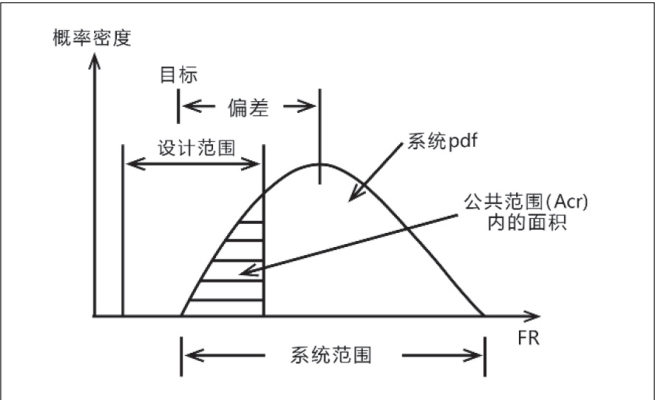


图 3 设计信息含量的计算原理

信息含量 I 越大, 产品越复杂、零件越复杂。

由企业统计数据, 得到设计参数 (DP_j) 或零件 C_i 满足功能需求 (FR_i) 的概率 P_{ij} (表 1), 由此得到产品的信息含量为:

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{A_{cr}} \right) = -\log_2 \overline{A_{cr}}$$
$$= -\log_2 (0.75 \times 0.1 \times 0.1 \times 0.2 \times 0.8 \times 0.6 \times 0.3 \times 0.05 \times 0.3 \times 0.6)^{0.1}$$
$$= 1.897$$

表 1 零件 C_i 满足功能需求 (FR_i) 的概率

DSM	零件 C1	零件 C2	零件 C3	零件 C4
功能 1	0.75	0.1	0.1	0
功能 2	0.2	0.8	0	0
功能 3	0	0	0.6	0.3
功能 4	0.05	0.3	0	0.6

作为对比, 设计参数 (DP_j) 或零件 C_i 满足功能需求 (FR_i) 的概率 P_{ij} 如表 2 所示时, 产品的信息含量为:

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{A_{cr}} \right) = -\log_2 \overline{A_{cr}} = \log_2 (1 \times 1 \times 1 \times 1)^{1/4} = 0$$

表 2 零件 C_i 满足功能需求 (FR_i) 的概率

DSM	零件 C1	零件 C2	零件 C3	零件 C4
功能 / 零件 1	1	0	0	0
功能 / 零件 2	0	1	0	0
功能 / 零件 3	0	0	1	0
功能 / 零件 4	0	0	0	1

信息含量为 0, 设计方案是理想的最优方案。

例如一款产品壳体, 外观要求进行 CMF (color, material&finishing) 加工, 需要具备抗冲击性能、耐腐蚀性能, 内部结构有精度要求。该壳体首次试制 (含小批量) 的成功率 (尺寸、外观、性能测试合格) 为概率 $\overline{A_{cr}}$ (零件设计满足加工要求概率), 制作评价量表, 如表 3 所示。

计算结果如表 4 所示, 该壳体的 3 种加工工艺中, 压铸的复杂度最高, 其次是注塑, 最低是钣金。

2 DFX 的介绍

杰弗里·布斯罗伊德等^[3]提出 DFM 和 DFA 的理论体系, 随着并行工程在复杂机电产品开发中的推广应用, 产品生命周期中的各个要素, 都开始主

表 3 零件设计满足加工要求概率评分量表

$\overline{A_{cr}}$ (新零件的首次试产合格率, 由统计值或者专家经验获得)	评分量表
86% ~ 100%	5
61% ~ 85%	3
0 ~ 60%	1

表 4 三种工艺的 DFM 复杂度

模具加工	工装加工	连续加工	组合其他加工	表面处理	加工工艺	DFM 复杂度
3	5	5	4	3	注塑	0.359
1	5	1	3	5	压铸	1.076
5	5	5	5	5	钣金	0.000

张各自的话语权, 逐步形成了 DFX 的概念, 主要包括:

- (1) DFA (Design for Assembly), 面向装配的设计。
- (2) DFM (Design for Manufacture), 面向零件加工的设计, 包含机械加工、CMF 表面处理、PCBA (印制电路板) 的 SMT (表面组装技术) 工艺。
- (3) DFC (Design for Cost), 面向成本的设计。
- (4) DFT (Design for Testing), 面向测试的设计。
- (5) DFS (Design for Service), 面向维护的设计。
- (6) DFE (Design for Environment), 面向环境的设计。

本文以应用最广泛的 DFA、DFM 为对象, 进行论述。DFA/ 装配设计的关注点如下:

- (1) 设计中进行零件合并, 简化装配结构;
- (2) 对装配效率的量化评价。

褚学宁^[5]建立了基于模糊集理论的产品可制造性综合评价数学模型。杰弗里·布斯罗伊德等^[3]以零件对称度评价装配操作难度, 具体如下:

零件被抓取后, 分别围绕其对称轴 X 轴、Y 轴、Z 轴转动, 角度分别为: α 、 β 、 γ , 直至调整到正确的装配姿态。转动角度之和 $\theta = \alpha + \beta + \gamma$, θ 越大, 装配操作难度越高, 因此以升半梯隶属函数建立评价体系, 如图 4 所示。由企业经验得到阈值, 当 $\theta \leq 180^\circ$, 操作难度为 0; 当 $\theta \geq 540^\circ$, 操作难度为 1, 如表 5 所示。

由此可得到装配操作难度的计算公式, 如下:

$$\text{DFA 操作难度} = \frac{\alpha + \beta + \gamma - 180^\circ}{540^\circ - 180^\circ} \tag{5}$$

本文 DFM 关注点为加工复杂度评价, 张航等^[6]提出了基于零件几何特征的评价方法, 徐旭松^[7]提

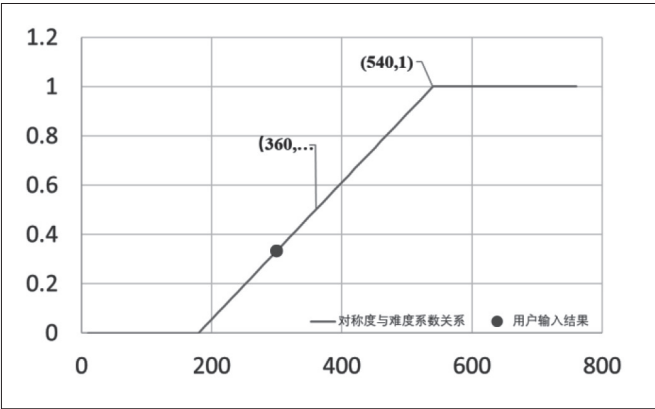


图 4 对称度之和与难度系数关系

表 5 零件对称度 - 装配操作难度

$\alpha + \beta + \gamma$	相对操作难度
$\alpha + \beta + \gamma < 180^\circ$	0
$180^\circ \leq \alpha + \beta + \gamma \leq 540^\circ$	$(\alpha + \beta + \gamma - 180^\circ) / (540^\circ - 180^\circ)$
$\alpha + \beta + \gamma > 540^\circ$	1

出使用关键尺寸和公差来评价。在策划阶段，只知晓零件长宽高和大概轮廓，缺乏零件结构设计细节（3D 结构数据、关键尺寸和公差），因此使用零件信息含量（可通过公式（4）计算）来评价。

3 DSM 矩阵和 DFX 的结合

DSM 设计参数 DP_i ，与 DFX 可制造性中的多个因子存在联系。为了在设计早期识别 DP_i 量产可行性不足的风险，本文在典型 DSM 矩阵的二维平面之外，引入第三个维度：量产可行性 DFX，在 DSM 聚类得到初步的产品总体结构布局后，立刻评价零件合并后的 DFX 复杂度。DSM-DFX 的 3D 模型如图 5 所示。

DSM-DFX 的 3D 评价体系如下：

总复杂度 = DSM 复杂度 × DFX 复杂度 (6)

DSM 复杂度 = N^2 × DSM 耦合复杂度 (7)

式中： N^2 - DSM 矩阵的维度平方。

DSM 耦合复杂度的计算见公式（1），DFX 复杂度的计算公式如下：

DFX 复杂度 = DFA 操作难度 + DFM 复杂度 +
DFA 操作难度 × DFM 复杂度 (8)

虽然 DSM 矩阵已包含装配信息（定位关系），但零件结构的对称度对装配操作的复杂度也有显著的影响^[3]。DFA 和 DFM 常常构成矛盾，总装设计师为了简化装配，倾向于合并、减少零件种类，导致零件复杂。因此本文采用 DFA 操作难度 × DFM 复

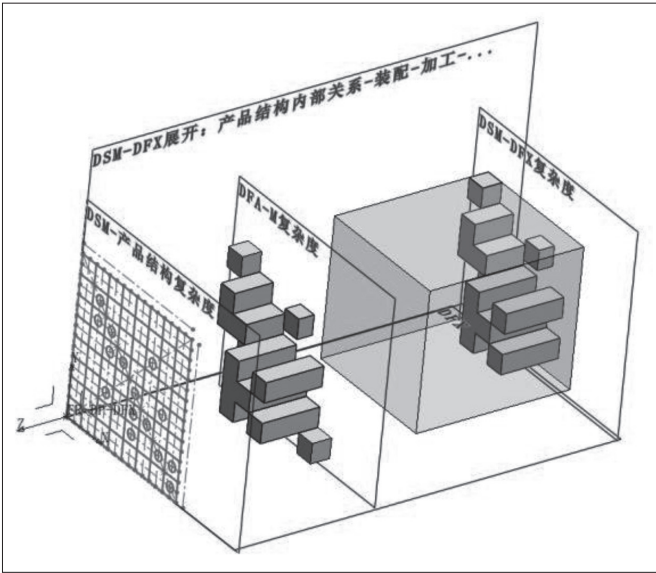


图 5 DSM-DFX 的 3D 模型图

杂度来表达二者之间的耦合。

DSM-DFX 综合分析流程如图 6 所示。

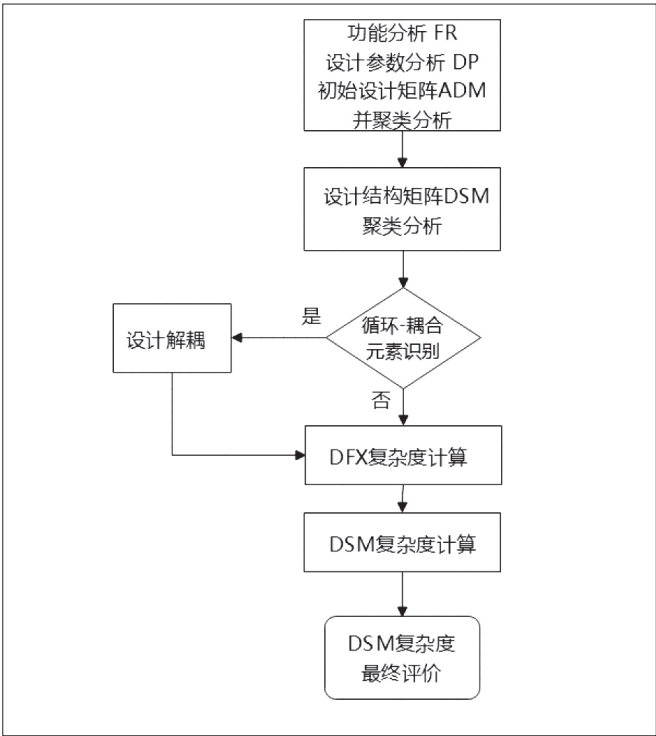


图 6 DSM-DFX 综合分析流程图

4 案例分析

4.1 功能需求和模块分解

一款充电宝，经过市场 - 用户研究（VOC）、现有供应链的调查（VOT），得到功能需求（FR）如表 6 所示。

表 6 充电宝的功能需求 FR_i

序号	功能需求	来源
1	侧面上 SB 插口耐受 10000 次插拔	产品功能策划 VOC, 来自用户、 电商、竞品
2	产品尺寸范围: 长 70mm、宽 40mm、高 20mm, 裸机跌落测试高度 1m, 水泥地	
3	用户手指按压外部开关, 触发电路导通, 外观局部常亮显示 ON 状态; 再按压断开, 外观局部灭, 显示 OFF 状态	
4	内部开关耐受 50000 次插拔按压和恢复, 行程 1mm, 按压力 < 200gf (1gf=0.0098N)	
5	外观连续光滑, 如有拼缝或间隙, 0.2mm 单边以下; 外部开关所在表面是主要外观面, 表面金属质感; 环绕表面的四个侧面是次要外观面, 剩余表面是非外观面	
6	中低端市场, 销量 20 万台 / 年, 2 年保修寿命	DFX 量 产性要求 VOT, 来自供应链
7	电池容量 2000mA, 待机长, 充电快	
8	DFA: 装配效率高、自动装配 (振动盘 + 自动工装)	
9	DFQ: 现有供应链的过程能力指数 C_{pk} 在 0.9 ~ 1.2 之间, 短期内无法提高或者引入新的供应商	
10	DFM: 现有工艺包括压铸、注塑、钣金、铝合金挤出、塑料挤出、机加工、焊接、SMT 等	
11	DFM: 现有表面处理包括阳极氧化、喷涂、喷粉、电镀、水转印等	
12	DFC: 物料成本目标是竞品的 90%	

ADM 矩阵聚类为 5 模块, 如图 7 所示。

	A	C	L	M	B	D	R	E	F	I	J	K	G	O	P	Q	H	N
USB 的本体需要外部支撑	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
USB 本体避免过定位带来内应力	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外壳材料足够强	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外壳的结构足够可靠	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
USB 焊脚与 PCB 的焊锡连接可靠	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
USB 本体的插拔寿命要足够	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
USB-PCB 和外壳的定位	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
电路开关触点和复位	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
开关电路控制可靠	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外部开关的连接+强度 (VIB)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外部开关的定位精度 (V)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外部开关的复位力度	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
导光结构光线透射好	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外观遮蔽内部结构, 美观	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外壳之间的定位精度 (H)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外部开关-外壳的同轴度精度 (H)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
导光分布均匀, 不漏光	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外壳之间的连接可靠	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 7 ADM 矩阵聚类

如图 8 所示, 初步模块分解如下: 壳体 (为了安装, 至少拆分为 2 件, ①上壳和②底盖)、③电路板 PCBA 模块 (基板+USB+ 电路开关+LED 灯)、④按键、⑤弹性复位架、⑥导光柱 (灯效+ 不漏光)、⑦电池 (必需品、DSM 分析中省略), 紧固件不参与分析^[3]。

具体的关系分析如下:

(1) 外力。包括按键受到用户手指按压的力、跌落试验的冲击力、USB 接口受到的插拔力。

(2) 力的传递关系。按键→PCBA→PCBA 的支撑—定位—固定结构; USB 插拔→PCBA→PCBA 的支撑—定位—固定结构。

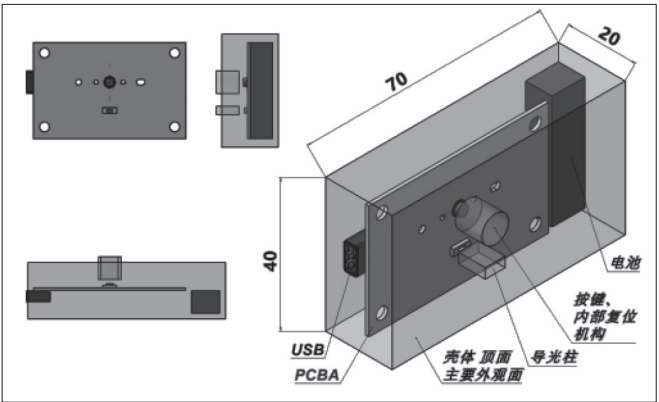


图 8 模块分解图

- (3) 能量。电池给 PCBA 供电, PCBA 给电池充电。
- (4) 信号。PCBA 的 LED 灯照射导光柱, 通知用户。
- (5) 噪声屏蔽。导光柱屏蔽 LED 灯的光向非工作方向泄露。

4.2 方案设计和 SDM 矩阵分析

基于上述分析, 结合充电宝的设计经验, 产生了若干概念设计, 如图 9、图 10 所示。

对于方案 3, 难装配难加工, 而且外观面上多了 3 ~ 6 条拼缝, 不美观、放弃此方案 (除非有非常强烈的消费者外观感性倾向)。对于方案 2, 4 个次要外观面上多出了 4 条拼缝, 不美观、放弃此方案。现在方案 1 初步确定为设计方向, 但内部的结构有 3 个分支悬而未决: ① B PCBA 究竟被 D 顶壳定位还是被 E 底盖定位; ② A 按键复位架究竟被 D 顶壳支

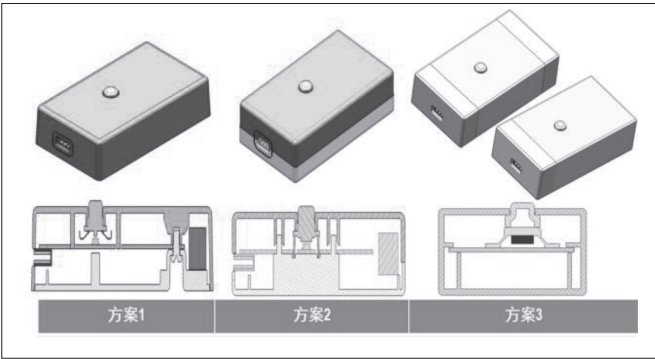


图 9 概念设计图方案 1、2、3

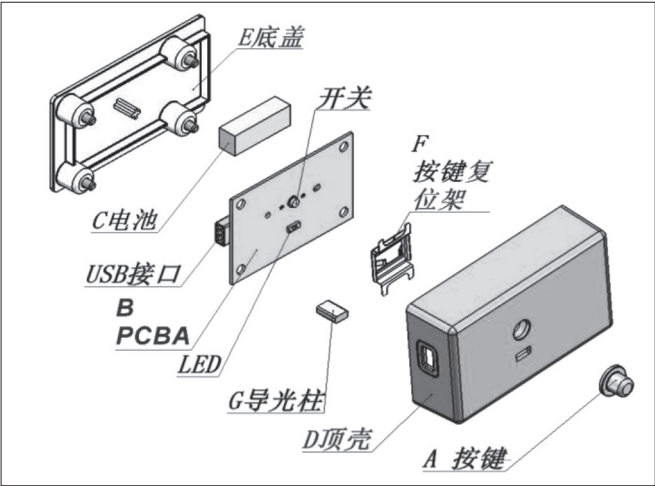


图 10 方案 1 的概念设计爆炸图

撑得以弹性复位;还是被 B PCBA 支撑得以弹性复位;
③ C 电池位于 D 顶壳还是 E 底盖,还是集成到 B 电路板上。保留上述选择项,进行 DSM 矩阵分析,如图 11 所示。

经过 DSM 聚类分析,并消除疑问项,得到 2 种

	A	B	C	D	E	F	G
A 圆形按键	A	0	0	1 被顶壳定位	0	1 受到复位架的复位力	1 联动与导光柱熄灭
B PCBA	1 接受按键按压力	B	接受电池供电	1? 被顶壳定位	1? 被底盖壳定位	1? 受到复位架的反力	0
C 电池	0	1 接受 PCBA 充电	C	1? 被顶壳定位	1? 被底盖壳定位	0	0
D 顶壳	1 接受按键运动摩擦力	1 接受 PCBA 的 USB 插拔反力	0	D	0	0	0
E 底盖	0	1? 接受 PCBA 的 USB 插拔反力	0	1 被顶壳定位	E	0	0
F 按键复位架	1 接受按键按压力	1? 接受 PCBA 的支持力	0	1? 接受顶壳支持力	0	F	0
G 导光柱	1 联动与按键运动	1 接受 PCBA 的 LED 照射光	0	1 被顶壳定位和遮蔽	0	0	G

图 11 充电宝初始 DSM 矩阵

结构。第一种, BCE 为一个模块, ADFG 为一个模块,即电路板 B 定位在底盖、独立电池 C 定位在底盖,如图 12 所示。第二种, E 单独成为一个模块, ADFGBC 为一个模块,即电路板 B 定位在顶壳,电池 C 集成到电路板 B 上,如图 13 所示。

	A	D	F	G	B	C	E
A 圆形按键	A	1	1	1	0	0	0
D 顶壳	1	D	0	0	1	0	0
F 按键复位架	1	1	F	0	0	0	0
G 导光柱	1	1	0	G	1	0	0
B PCBA	1	0	0	0	B	1	1
C 电池	0	0	0	0	1	C	1
E 底盖	0	1	0	0	1	0	E

图 12 ADFG-BCE 聚类结果

	A	D	F	G	B	C	E
A 圆形按键	A	1	1	1	0	0	0
D 顶壳	1	D	0	0	1	0	0
F 按键复位架	1	1	F	0	0	0	0
G 导光柱	1	1	0	G	1	0	0
B PCBA	1	1	0	0	B	1	0
C 电池	0	0	0	0	1	C	0
E 底盖	0	1	0	0	1	0	E

图 13 ADFGBC-E 聚类结果

下一步,分析模块内的零件是否能合并(DFM 可行性和难度),消除装配定位关系,再次简化产品设计。由多条互关线搜索到耦合的零件组合共 6 组: A+D、A+F、A+G、B+C、B+E、D+B。另外,由聚类块得到的 3 个零件及以上的组合有 4 组: B+C+E、A+F+G、A+D+F+G、A+D+F+G+B+C。另外,由推理得到的组合有 1 组: A+D+G。

基于设计经验,选择上述组合中的 5 组合并机会,逐一分析。

(1) 合并机会①:如图 14 所示, A 圆形按键、F 按键复位架这 2 个零件合并成一个零件 AF, 装配到顶壳。

(2) 合并机会②:如图 15 所示, B 电路板、C 电池、E 底盖被聚类到另一个模块。

(3) 合并机会③:如图 16 所示, A 圆形按键、F 按键复位架、G 导光柱这三个零件合并成一个零件 AFG, 装配到顶壳。

(4) 合并机会④、⑤:如图 17 所示, A 圆形按键、

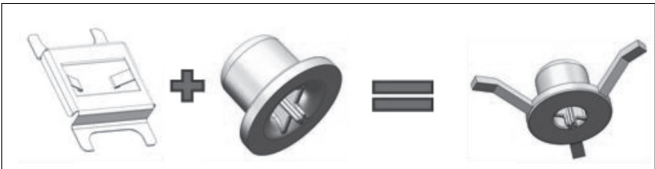


图 14 概念设计图 AF

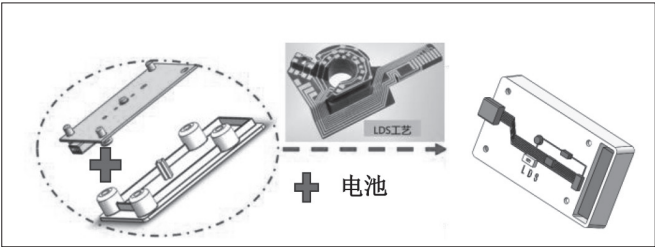


图 15 概念设计图 BCE

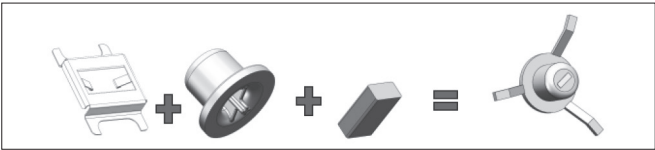


图 16 概念设计图 AFG

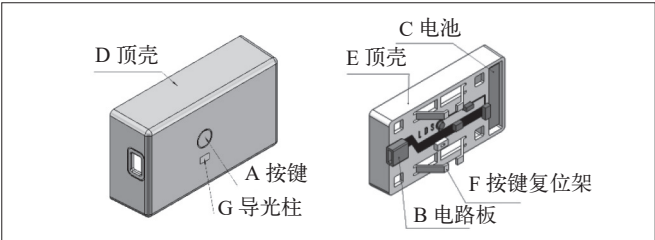


图 17 概念设计图 ADG + BCEF

D 顶壳、G 导光柱这三个零件合并成一个零件 ADG，其余零件被聚类到另一个模块。

(5) 合并机会⑥：超级顶壳 ADBGFC + 简单底盖 E。导光柱需要透光，而顶壳整体不透光，需要双色注塑；顶壳有外观，不能开工艺孔，F 按键复位架的模具结构复杂。B PCBA 需要 LDS 工艺，顶壳外观面需要进行电镀处理，和 LDS 加工工艺有冲突，必须遮蔽其中一个工艺的最终表面。

上述合并机会，组合成四种完整方案：“四”“三”“二”和“超级顶壳”，如图 18 所示。

限于篇幅、本文仅分析 DFX 汇总值较低的方案“四”“二”。方案“四”中四个零件及总复杂度的三维图示见图 19，其 DSM 矩阵分析见表 7。

由公式 (7) 可得方案四的 DSM 复杂度为：
 $4^2 \times [2 \times (1+1) + 2 \times (2+2) + 1 \times 1 + 0.5 \times (1+2)] = 16 \times 14.5 = 232$
方案“二”中二个零件及总复杂度的三维图示见

方案名称	合并机会	模具加工	工装加工	连续加工	组合其他加工	表面处理	加工工艺	合并后DFM复杂度	合并后的装配操作	合并后零件DFA复杂度	合并后零件
四	①	4	5	5	5	3	注塑+外观面电镀	0.212	翻转180，旋转120、竖直装入顶盖	0.33	AF
	②	2	2	3	2	5	注塑+LDS	0.941	旋转2次、倾斜30° 边旋转边装入顶壳	0.17	BCE
		2	5	5	5	3	注塑+外观电镀	0.412	旋转2次、装入产线夹具	0.50	D
		5	5	5	5	4	注塑+透光面抛光+外观面硬化涂层	0.064	装配到顶壳	0.50	G
	DFM\DFA分别汇总							1.629	1.50		
	DFX汇总							3.129			
三	③	4	5	5	5	2	注塑+外观面电镀+局部遮蔽	0.329	翻转180，旋转120、竖直装入顶盖	0.33	AFG
	②	2	2	3	2	5	注塑+LDS	0.941	旋转2次、倾斜30° 边旋转边装入顶壳	0.17	BCE
		2	5	5	5	3	注塑+外观电镀	0.412	旋转2次、装入产线夹具	0.50	D
	DFM\DFA分别汇总							1.682	1.00		
	DFX汇总							4.364			
二	④	2	5	3	5	3	双色注塑+外观面电镀	0.559	旋转2次、装入产线夹具	0.50	ADG
	⑤	2	2	3	2	5	注塑+LDS	0.941	旋转2次、倾斜30° 边旋转边装入顶壳	0.17	BCEF
	DFM\DFA分别汇总							1.5	0.67		
	DFX汇总							3.18			
超级顶壳	⑥	1	1	2	1	1	双色注塑+外观面电镀+LDS+遮蔽外观面	2.122	旋转2次、装入产线夹具	0.50	ADBGFC
		2	5	5	5	3	注塑+外观电镀	0.412	旋转2次、竖直装入顶盖	0.50	E
	DFM\DFA分别汇总							2.534	1.00		
	DFX汇总							6.068			

图 18 合并机会① - ⑥汇总及 DFM-DFA 评价

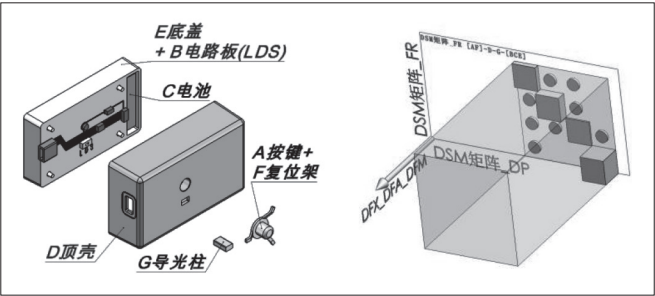


图 19 零件三维图示

图 20，其 DSM 矩阵分析见表 8。

由公式 (7) 可得方案二的 DSM 复杂度为：
 $2^2 \times [2 \times (1+1)] = 4 \times 4 = 16$ 。

方案“四”和方案“二”的总复杂度见表 8。通过上述案例分析可知，方案“二”要比方案“四”的 DSM 复杂度更低，虽然 DFX 装配操作复杂度几乎相同。

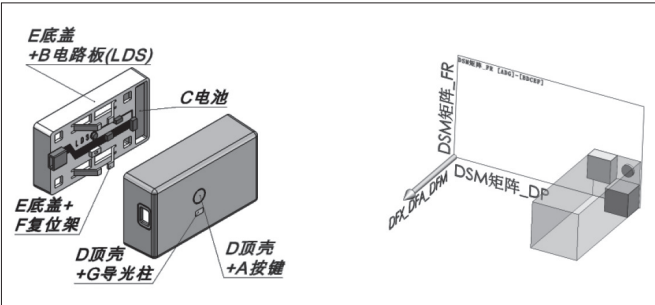


图 20 零件三维图示

表 7 方案四的 DSM 矩阵

AF- 圆形按键 + 按键复位架	AF	1	1	0
D 顶壳	1	D	0	0
G 导光柱	1	1	G	1
BCE- 电路板 PCBA + 电池 + 底盖	1	0	0	BCE

表 8 方案二的 DSM 矩阵

ADG	ADG	1 受 LED 照射
BCEF-PCBA +	1 受按键按压	BCEF

表 9 方案四、二的 DSM-DFX 和总复杂度

方案	方案图片	总复杂度 图片	总复 杂度	DSM 复杂度	DFX 装配 操作难度
四			725	232	3.129
二			50.88	16	3.18

5 结语

在新品策划阶段融合 DSM-DFX 两种工具，有利于提前发现产品方向中隐含的可制造性风险，减少新产品导入（NPI）中的迭代，提效降本。

未来，本文提出的设计方法还可以融合更多的设计质量评价工具，例如：可靠性设计 DFR、潜在失效风险 FMEA、四新技术风险 NUDD 等。此外，DSM 矩阵还可以采用遗传算法寻找更优解。

参考文献：

[1]N. P. SUH. 公理设计 [M]. 谢友柏，袁小阳，徐华，等译．北京：机械工业出版社，2004.

[2]唐敦兵，钱晓明，王晓勇，等．公理化设计矩阵与设计结构矩阵同步演化机制研究 [J]．计算机集成制造系统，2007(08):1465-1469+1475.

[3]杰弗里·布斯罗伊德，彼得·杜赫斯特，温斯顿·奈特．面向制造及装配的产品设计 [M]．林宋，译．北京：机械工业出版社，2015:81-82.

[4]肖人彬，蔡池兰，刘勇．公理设计的研究现状与问题分析 [J]．机械工程学报，2008, 44(12):1-11.

[5]褚学宁．基于模糊集理论的产品可制造性综合评价 [J]．计算机集成制造系统，1998(02):27-31.

[6]张航，张树生，杨磊．基于深度学习的孔特征可制造性分析方法 [J]．图学学报，2021, 42(01):117-123.

[7]徐旭松．公理设计在公差设计中的应用初探 [J]．机械科学与技术，2019, 38(02):237-243.

作者简介: 沈靖 (1972.11-)，男，汉族，浙江湖州人，本科，工程师，研究方向：机械设计。