摘要

近年来智能家居市场发展较快，智能音箱成为家庭语音交互的重要设备。市面产品尺寸偏大，便携性不足。本设计做了一款小型智能音箱的结构设计，并做了可制造性优化。产品尺寸 85mm×85mm×100mm，带交互灯光、语音对话键、音量加减键。

设计采用竞品拆解加工程实践的方法。技术路线：需求分析,竞品拆解,外观评审及堆叠,结构详细设计,可制造性改善及 CAE 分析。用 SOLIDWORKS 完成堆叠设计、ID 拆件和结构设计。壳体含上盖、外壳、主体、下盖；按键含单位按钮、四位按钮、四位方形按钮；内部件含主板隔板、隔板、电池压板；装配用止口、螺丝柱、卡扣。料厚、脱模斜度、加强筋按塑胶设计规范来。可制造性方面用了 DFA 原则，做了塑胶件和铝件工艺分析，用 CAE 校了关键件强度，做了干涉检查。

本设计为小型智能音箱开发提供了可用的技术方案。

关键词：小型智能音箱；结构设计；可制造性优化；SOLIDWORKS；DFMA

Abstract

With the rapid development of artificial intelligence technology and the continuous heating up of the smart home market, smart speakers, as the core entry device of the smart home ecosystem, are ushering in unprecedented development opportunities. In response to the market demand for smaller size and better portability of existing smart speakers, this design completes the structural design and manufacturability optimization of a small smart speaker. The product dimensions are controlled within 85mm×85mm×100mm, with human-machine interaction functions including interactive lighting, voice dialogue button, volume up button, and volume down button.

This design adopts a research method combining competitive product disassembly, theoretical analysis and engineering practice, following the technical route of "design requirement analysis , competitive product disassembly analysis , appearance review and stack design , detailed structural design , manufacturability improvement and CAE analysis". Based on SOLIDWORKS 3D design software, hardware stack design, ID disassembly and detailed structural design are completed, including shell structures such as upper cover, outer casing, main body and lower cover, button structures such as unit button, four-position button and four-position square button, internal structural parts such as main board partition, partition and battery pressure plate, as well as assembly structures such as rabbet, screw column and snap. The design process follows the plastic product structure design specifications, and completes the design of key parameters such as wall thickness, demolding angle and reinforcing ribs. In terms of manufacturability optimization, Design for Assembly, DFA principles are applied to conduct manufacturability analysis of plastic and aluminum parts. CAE analysis is used to verify the strength and stiffness of key components. Interference check and design verification ensure the rationality and reliability of the design.

This design provides a complete technical solution for the development of small smart speaker products, and has good reference value for electronic product structural

design and manufacturability optimization.

Keywords: Small Smart Speaker; Structural Design; Manufacturability Optimization; SOLIDWORKS; DFMA

目录

摘要 1
Abstract 2
第 1 章 绪论 6
1.1 研究背景及意义 6
1.2 智能家居及智能音箱发展现状 6
1.3 智能产品开发流程及结构设计的重要性 6
1.4 国内外研究现状及发展趋势 7
1.5 论文研究目标及研究内容 7
1.6 本章小结 7
第 2 章 竞品拆解分析 9
2.1 竞品功能分析 9
2.2 竞品结构整体方案分析 9
2.3 竞品安装步骤分析 10
2.4 竞品拆解流程 10
2.5 竞品结构细节分析 11
2.6 竞品关键组件规格分析 12
2.7 竞品分析总结与设计启示 13
第 3 章 外观评审及堆叠设计 15
3.1 外观方案设计及 CMF 文件 15
3.2 外观 3D 建模 16
3.3 外观可行性检讨 17
3.4 堆叠设计 17
3.5 本章小结 18
第 4 章 结构详细设计 19
4.1 设计软件 SOLIDWORKS 简介及在本设计中的应用 19
4.2 结构设计总体方案 20
4.3 塑胶件结构设计基本原则 22
4.3.1 料厚与壁厚设计 22
4.3.2 脱模斜度设计 22
4.3.3 加强筋与圆角设计 23
4.4 壳体结构设计 24
4.4.1 上盖结构设计 24
4.4.2 外壳结构设计 25
4.4.3 主体结构设计 26
4.4.4 下盖结构设计 27
4.5 声学结构设计 28
4.6 按键结构设计 29
4.6.1 单位按钮结构设计 29
4.6.2 四位按钮结构设计 30
4.6.3 四位方形按钮结构设计 30
4.7 交互灯光结构设计 31

4.8 接口结构设计 32
4.9 内部结构件设计 32
4.9.1 主板隔板结构设计 32
4.9.2 隔板结构设计 33
4.9.3 电池压板结构设计 34
4.10 装配结构设计 35
4.10.1 止口与反止口设计 35
4.10.2 螺丝柱设计 36
4.10.3 卡扣设计 37
第 5 章 可制造性改善及 CAE 分析 39
5.1 可组装性分析及改善 39
5.1.1 面向装配的设计 DFA 原则应用 39
5.1.2 装配工艺优化 39
5.2 零件可制造性分析 40
5.2.1 塑胶件可制造性分析 40
5.2.2 铝件工艺可行性分析 41
5.3 CAE 分析 41
5.4 设计验证与优化 41
5.5 结构设计检查清单 42
第 6 章 总结与展望 43
6.1 工作总结 43
6.2 创新点与应用价值 43
6.3 不足与展望 43
6.4 本章小结 44
结论 45
致谢 46
参考文献 47
附录 49

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

近年来智能家居发展快，智能音箱用得越来越多。刘峣等用 CiteSpace 分析了 2013—2023 年智能家居研究进展[1]。智能音箱能语音交互、放音乐，还能连其他智能设备。但不少产品体积大，不方便带。

结构设计连着外观和制造。设计不好，产品功能、成本、可靠性都会出问题。智能音箱里有喇叭、电路、按键，结构要兼顾声学、人机、可制造性，难度不小。市面产品有的音质差、成本高，多半是结构阶段没想周全。

本设计做小型智能音箱的结构设计，从堆叠、详细设计到可制造性优化、CAE 分析都做了。一方面总结设计方法，另一方面给产品开发提供参考,将 DFMA 理念应用于消费电子结构设计全流程；为同类产品开发提供可借鉴的技术方案。

1.2 智能家居及智能音箱发展现状

智能家居把家里的灯、空调、窗帘等设备连起来，用手机或语音控制。智能音箱是语音入口，这几年卖得不错。王全保做过无线声控系统[4]，胡同花等做了路由协议优化[19]，都给智能家居互联打了基础。刘峣等通过 CiteSpace 分析指出，智能家居研究热点集中在物联网、人工智能、用户体验等方面[1]，智能音箱作为语音交互载体，在家庭场景中应用广泛。

智能音箱分桌面式、便携式、挂墙式。桌面式音质好但占地方，适合固定摆放。便携式小，带电池，适合出门用，市场对便携式需求增长。挂墙式节省桌面空间，安装要求高。本设计做便携式，尺寸 85mm×85mm×100mm 以内，放桌上或带着都行。陈宁宁做过嵌入式音箱的结构设计[5]，可参考。市面便携式产品如天猫精灵、小爱同学等，结构紧凑，本设计借鉴其布局思路。

1.3 智能产品开发流程及结构设计的重要性

新产品开发流程：市场调研,立项,设计,模具,试产,量产。结构设计是中间一环，要做外观建模、内部结构设计和评审。设计阶段输出 3D 模型和 2D 图纸，模具阶段据此开模，试产阶段验证设计，量产阶段批量生产。结构设计若出错，后期改模成本高、周期长。

黎恢来说，结构设计核心就三件事：连接、限位、固定，还要考虑功能、材料、工艺、成本[16]。连接指螺丝、卡扣等把零件装在一起；限位指止口、定位柱等保证装配位置正确；固定指压紧、密封等保证使用中不松动。三者缺一不可。

1.4 国内外研究现状及发展趋势

可制造性设计方面，Formentini 等综述了 DFMA 在机械产品开发中的应用[2]，Naiju 做了 DFMA 综述[3]。朱乐等用 DFM 分析了铝合金箱体[7]，李杰林等研究了可制造性设计在系统工程里的应用[8]，漆中华等做了复杂电子设备的可制造性体系[9]。

注塑和模具方面，马少锋等用模拟技术分析了塑料件工艺[12]，谢海深等做了喇叭盖的模具设计[14]，陈田等用 Moldflow 做了手机壳仿真[15]。杨小勇等用 Moldflow 做了无人机上壳注塑优化[17]，杨杉研究了产品可制造性评价方法[18]。

智能音箱结构设计方面，陈宁宁做过嵌入式音箱扬声器系统结构设计[5]，葛俊等研究了穿孔板声阻抗模型[11]，为音箱穿孔出音面设计提供了理论依据。

发展趋势：设计越来越数字化，可制造性会更多融入设计流程；CAE 仿真在结构优化中应用增多；模块化、平台化设计成为消费电子主流。

1.5 论文研究目标及研究内容

研究目标：做小型智能音箱的结构设计和可制造性优化；尺寸 85×85×100mm；带交互灯光、语音键、音量加减键；完成堆叠、ID 拆件、结构设计；做可制造性分析和优化；出零件图、装配图，写说明书。

本设计完成下盖、主板隔板、单位按钮、四位按钮、四位方形按钮、电池压板、隔板等零件图，以及智能音箱装配体 A3 总图。结构设计涵盖壳体、声学、按键、内部结构件及装配结构，可制造性分析涵盖塑胶件和铝件工艺，CAE 分析验证关键件强度刚度。

1.6 本章小结

本章介绍了小型智能音箱结构设计的研究背景和意义，分析了智能家居及智能音箱发展现状，阐述了智能产品开发流程及结构设计的重要性，综述了国内外研究现状及发展趋势，明确了论文研究目标和研究内容，为后续章节奠定了基础。

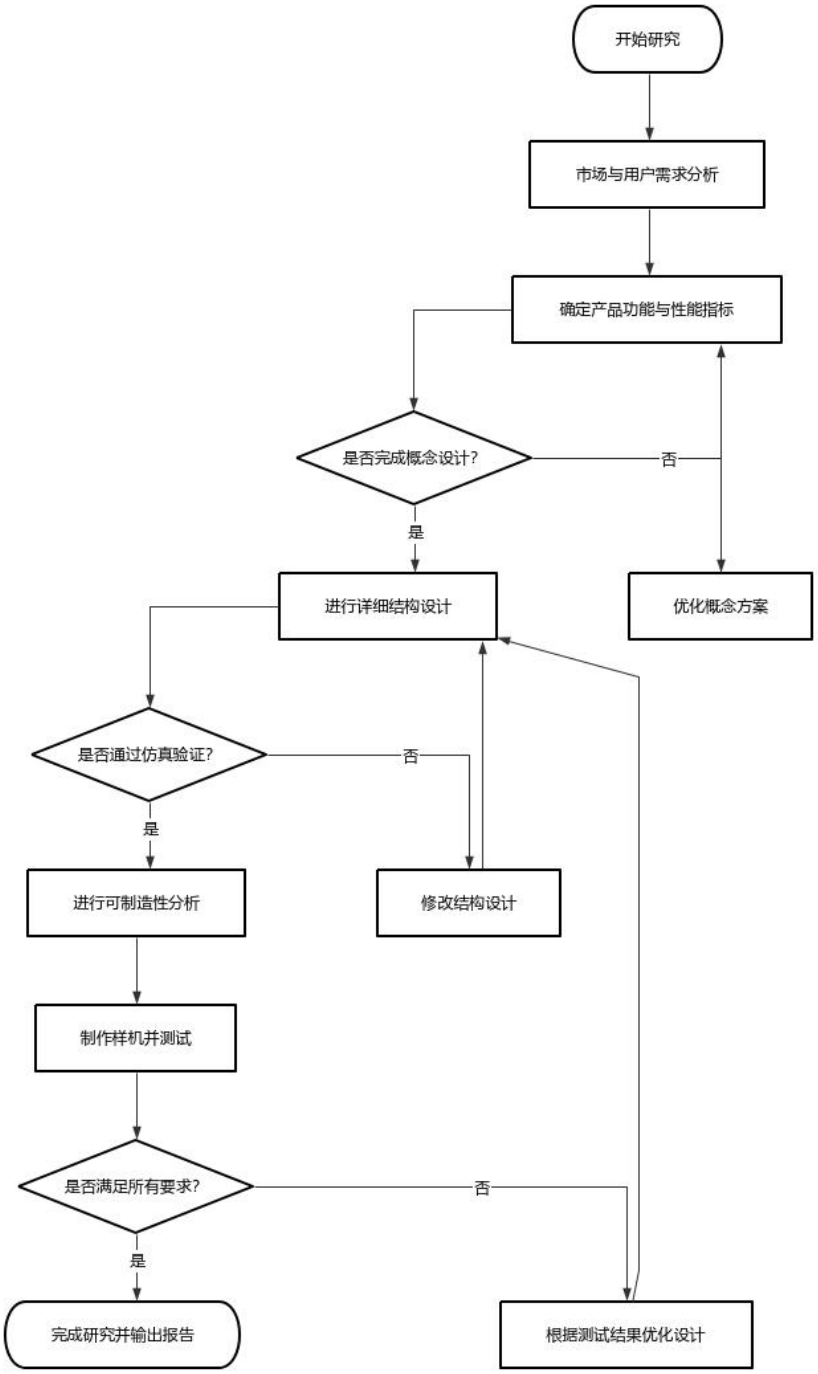

开始研究
市场与用户需求分析
确定产品功能与性能指标
是否完成概念设计?
否
是
进行详细结构设计
优化概念方案
是否通过仿真验证?
否
是
进行可制造性分析
修改结构设计
制作样机并测试
是否满足所有要求?
否
是
完成研究并输出报告
根据测试结果优化设计

图 1-1 技术路线图

第 2 章 竞品拆解分析

2.1 竞品功能分析

本设计选了天猫精灵 AI 助手做竞品拆解。拆开后看它的功能和结构。市面小型智能音箱一般有语音对话、放音乐、调音量、蓝牙、充电。有的还带灯、多按键。本设计要交互灯光、语音键、音量加、音量减各一个，和便携式产品差不多。

天猫精灵 AI 助手支持语音唤醒、音乐播放、音量调节、蓝牙连接、充电续航等核心功能。顶部设多个按键区域，包括单位按钮用于语音对话、四位圆形按钮用于音量加减等、四位方形按钮用于其他快捷功能。交互灯光通过 LED 加导光结构实现，可显示唤醒、播放、充电等状态。这些功能布局紧凑，符合便携式产品的使用习惯。

2.2 竞品结构整体方案分析

天猫精灵从上到下是：上盖带按键和灯、控制板、外壳带出音孔、主体装喇叭、隔板、电池压板、电池、下盖。外壳用穿孔板，既能出音又能装饰。葛俊等研究过穿孔板声阻抗[11]。主体里喇叭四周有骨位限位，装得比较稳。

从爆炸图可见，整机采用垂直堆叠布局。上盖为顶部盖板，含方形按钮 2×2 阵列、圆形按钮两个、单位按钮一个，是用户交互主界面。控制板为矩形 PCB，位于上盖下方，表面有引脚和连接器。外壳为侧面围板，表面密布小孔作为出音面。主体位于外壳内部，中央有圆形喇叭安装腔。隔板为薄板，四角有螺丝孔，分隔喇叭腔与电池仓。电池压板有开孔和螺丝孔，压紧电池。电池为矩形块。下盖为底部盖板，轮廓与上盖呼应。装配方向自上而下，红箭头标示装配顺序，符合 DFA 单一方向原则。



图 2-1 天猫精灵助手

2.3 竞品安装步骤分析

装配顺序影响效率和品质。天猫精灵的装法是：先装喇叭进主体；再装主板隔板，把控制板固定上去；装隔板和电池压板，把电池限好；上盖和外壳装好，按键和灯装进上盖；下盖和主体用止口、卡扣、螺丝合上。整体是从里到外、从大到小，从上往下装，方向单一，符合 DFA。

2.4 竞品拆解流程

拆解流程与装配顺序相反。以天猫精灵 X1 为例，拆解步骤为：第一步，用撬棍小心撬起并撕下底部防滑垫，露出固定螺丝；第二步，拧下三颗固定螺丝，即可分离底盖。防滑垫覆盖螺丝孔，兼顾外观整洁与维护可达性。拆解难度适中，步骤清晰，但需注意保护内部排线和塑料件，避免撬伤。本设计下盖也可采用类似结构，防滑垫位覆盖螺丝孔，便于后期维修更换电池。

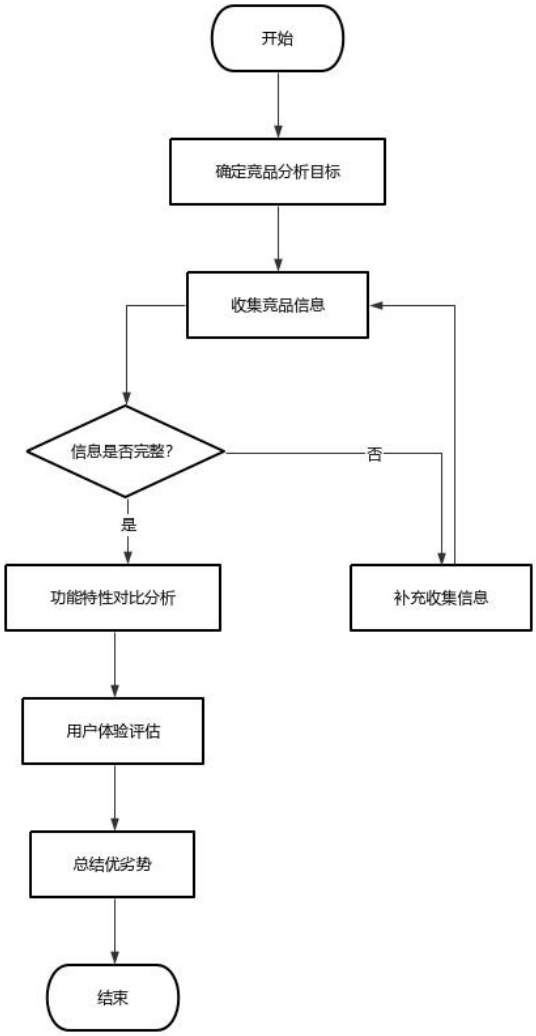


图 2-2 竞品拆解流程示意图

2.5 竞品结构细节分析

天猫精灵的细节：壳体用 PC+ABS 或 ABS，壁厚 1.2~1.5mm；止口公母配合，公的做薄壳、母的做厚壳；螺丝用自攻牙 M2 或 M2.6，四角分布；卡扣辅助，扣合量 0.35~0.6mm；按键用悬臂或导柱，留按压行程和回弹。这些对本设计有参考价值。



图 2-3 天猫精灵外观图

隔板为薄板结构，四角设螺丝孔与主体或下盖固定，厚度约 1.0mm，四周与主体配合面可加密封泡棉。电池压板一侧有凸起边缘，便于装配定位，与电池接触面设泡棉缓冲。下盖内部有电池仓凹槽、充电接口开孔、防滑脚垫位，底部可贴硅胶脚垫。这些细节体现了竞品在装配可靠性、声学隔离、电池固定等方面的设计考量。

2.6 竞品关键组件规格分析

拆解看，喇叭多用φ40~φ57 全频，阻抗 4Ω或 8Ω，功率 1~3W。本设计主体开圆腔装喇叭，四周骨位限位。按键方面，圆钮直径 8~12mm，方钮边长 10~15mm。电池多用 18650 或软包锂电，电池仓按规格做，四周留 0.2mm 间隙。



图 2-4 天猫精灵喇叭拆解

单位按钮为圆形，直径约 10mm，用于语音对话，是主要交互入口。四位圆形按钮直径约 8mm，呈"+"或"一"字形排列。四位方形按钮边长约 12mm，呈 2×2 阵列，与圆钮形成视觉区分。主板隔板用于安装控制板，设螺丝柱和定位柱，料厚约 1.0mm。电池压板料厚约 1.0mm，通过卡扣或螺丝与下盖连接。隔板料厚约 1.0mm，设加强筋，四周密封。这些规格为本设计零件图提供了尺寸参考。

表 2-1 竞品关键组件规格对比表

组件类型	天猫精灵 AI 助手	本设计
喇叭	φ40~φ57 全频，4Ω/8Ω，1~3W	圆腔装喇叭，四周骨位限位
圆钮	直径 8~12mm	直径 8~12mm
方钮	边长 10~15mm	边长 10~15mm
电池	18650 或软包锂电，四周 0.2mm 间隙	按规格设计，四周 0.2mm 间隙

2.7 竞品分析总结与设计启示

综合天猫精灵 AI 助手的拆解分析，可得出以下设计启示。结构布局方面：

垂直堆叠、自上而下装配符合 DFA 原则，本设计采用相同思路。连接方式方面：止口+螺丝+卡扣组合可靠，螺丝四角分布、卡扣辅助固定，本设计沿用。声学方面：喇叭四周骨位限位、PORON 泡棉密封、出音面积 12%~15%，本设计按此规范执行。维护性方面：防滑垫覆盖螺丝孔便于拆解，本设计下盖采用类似结构。竞品分析为第 3 章堆叠设计和第 4 章结构详细设计提供了直接参考。

第 3 章 外观评审及堆叠设计

3.1 外观方案设计及 CMF 文件

按设计要求，外观尺寸 85×85×100mm。外观做简约方体，四角圆角，顶部放按键和灯。参考天猫精灵的紧凑布局。



图 3-1 智能音箱外观效果图

CMF 文件要写清颜色、材质、表面处理。颜色可选黑、深灰、白，黑灰用哑光少留指纹，白色用高光或半哑光。材质方面，黎恢来说 PC+ABS 适合高端电子，ABS 做外壳，TPU 做按键，PMMA 做透光件[16]。本设计壳体用 PC+ABS，牌号 T85 或 T65；按键用 ABS 或 TPU，硬度 60~70°；透光用 PMMA 或 PC。表面处理：黎恢来认为喷涂流程是清洁、面漆、烘干、保护漆、固化，面漆 8~12μm、保护漆 8~15μm[16]。壳体做哑光或磨砂。穿孔板若用铝材，可阳极氧化。

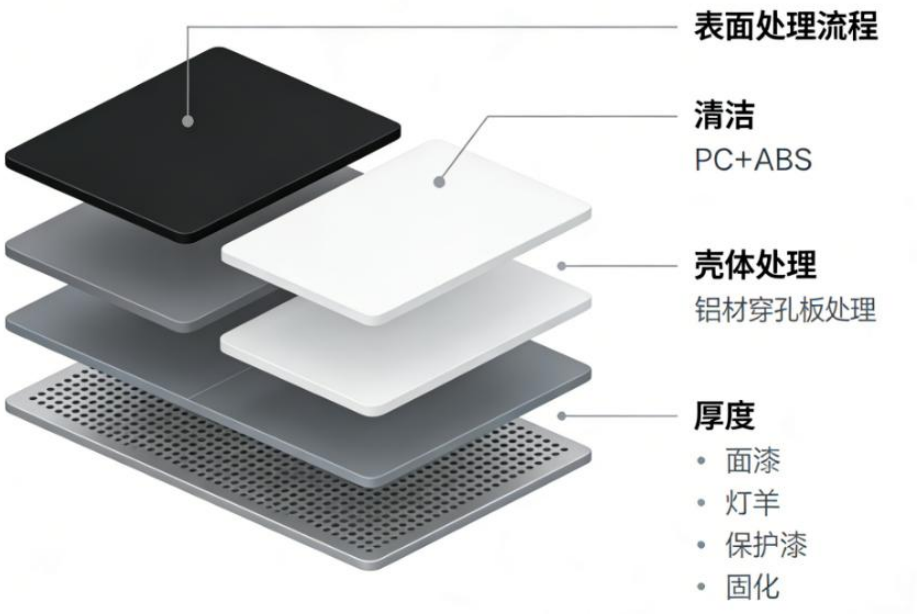


图 3-2 常用材料特性及喷涂流程

3.2 外观 3D 建模

用 SOLIDWORKS 做外观 3D，自顶向下，零件和整体关联。先建总装配 SmartSpeaker_ASM，单位 mm；再建骨架 0_SKEL，含外形曲线、基准面、分型面。外形按 ID 图画，拔模角≥3°，料厚方向 1.2~1.4mm、侧面 1.5~1.7mm。黎恢来说大型产品壳厚≥3mm，本设计小，料厚减一点[16]。从骨架复制曲面做零件，上盖、外壳、主体、下盖都参照骨架，改骨架零件会跟着变。

骨架模型构建时，外形曲线通过跟踪草绘或导入草图生成，确保与 ID 图一致。基准面用于定义分型面位置，便于后续模具设计。各零件从骨架复制曲面后，通过偏距、合并、实体化等命令生成实体。上盖需预留按键孔和透光区，外壳需预留穿孔区域，主体需预留喇叭腔和装配结构，下盖需预留电池仓和接口孔。所有零件料厚、拔模角均参照骨架设定，保证设计一致性。



图 3-3 外观 3D 骨架模型

3.3 外观可行性检讨

外观 3D 要做可行性检讨。尺寸要在 85×85×100mm 内，按键和开孔位置要对。用斑马线检查曲面是否连续，断了说明 G0 或 G1 不连续，要改。G2 是曲率连续，按键孔、圆角、分型面要检查，避免硬边。拔模分析看各面斜度够不够，外观面≥3°，内面≥1°，不够要加，否则模具会拉伤、顶白。CMF 方面看材质和表面处理能不能做，PC+ABS 喷涂前要清洁，咬花晒纹的话侧壁要加 3°~5°拔模。

3.4 堆叠设计

堆叠决定各件怎么摆，是外观和结构之间的桥梁。参考天猫精灵，本设计从上往下堆：上盖带按键—控制板—外壳—主体装喇叭—隔板—电池压板—电池—下盖。层间留 0.1~0.2mm 间隙。喇叭和主体圆口对齐，出音面积≥喇叭面积的 12%~15%。喇叭四周骨位间隙 0.1mm，高度包住 2/3，用 PORON 泡棉压紧，前音腔≥0.8mm[16]。

充电口放侧面或底部，孔比连接器大 0.5mm。LED 在控制板上，导光到上盖透光区。按键：语音键在顶中或偏上，音量键和方键在两侧或下方，间距≥10mm。

堆叠爆炸图直观展示上盖、控制板、外壳、主体、隔板、电池压板、电池、

下盖等各层组件的空间关系与装配顺序。图中红箭头标示装配方向，自上而下单一方向，利用重力辅助，符合 DFA 原则。上盖含单位按钮、四位圆形按钮、四位方形按钮的安装位；控制板位于上盖下方，与按键导柱对应；外壳围住主体，穿孔出音；主体内装喇叭；隔板四角有螺丝孔，分隔喇叭腔与电池仓；电池压板压紧电池；下盖形成底部封闭。

堆叠布局示意图标明各组件在垂直方向上的尺寸分配与层间间隙，为结构详细设计提供空间约束。上盖厚度约 3~5mm，控制板约 1mm，外壳侧面厚度约 1.5mm，主体高度约 40~50mm，隔板约 1mm，电池压板约 1mm，电池高度约 15~20mm，下盖约 1.2mm。各层间隙 0.1~0.2mm，避免装配干涉。总高度控制在 100mm 以内，满足任务书要求。

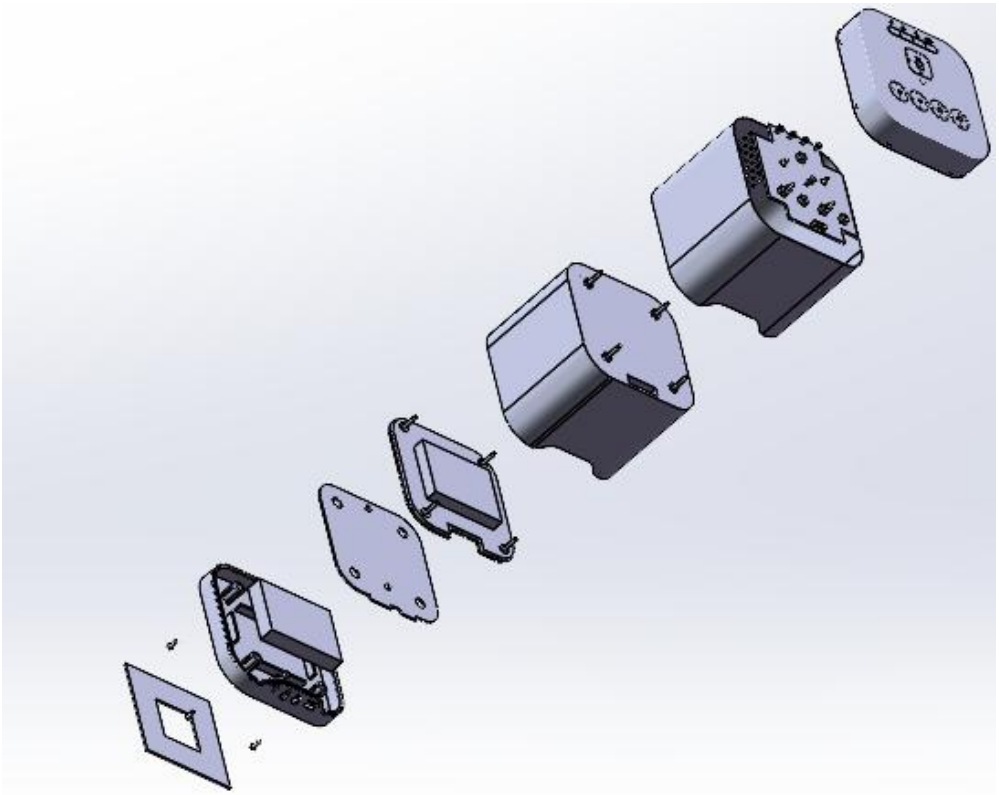


图 3-4 堆叠爆炸图

3.5 本章小结

本章完成了外观方案设计及 CMF 文件、外观 3D 建模、外观可行性检讨、堆叠设计。外观采用简约方体造型，尺寸 85×85×100mm，壳体用 PC+ABS，按键用 ABS 或 TPU。堆叠采用垂直布局，自上而下装配，符合 DFA 原则。为第 4 章结构详细设计提供了空间约束和设计依据。

第 4 章 结构详细设计

4.1 设计软件 SOLIDWORKS 简介及在本设计中的应用

SOLIDWORKS 是达索系统旗下的三维 CAD 软件，广泛应用于机械、电子、消费品等行业的机械产品设计。软件采用基于特征的参数化建模，支持零件、装配体、工程图三大模块，可与仿真、PDM 等模块集成。零件模块用于创建单个零件模型，装配体模块用于将零件组装成产品，工程图模块用于从三维模型生成符合国标的二维图纸。本设计选用 SOLIDWORKS 完成智能音箱的堆叠设计、ID 拆件和结构详细设计。

软件在本设计中的应用包括：零件建模方面，上盖、外壳、主体、下盖、各类按键、主板隔板、隔板、电池压板等均用拉伸、旋转、抽壳、圆角等特征完成；装配体方面，建立 SmartSpeaker_ASM 总装配，采用自顶向下设计，骨架 0_SKEL 定义外形和分型面，各零件参照骨架关联更新；工程图方面，从三维模型生成二维工程图，标注尺寸、公差、技术要求，输出零件图和装配图；仿真方面，用 SOLIDWORKS Simulation 对主体、下盖做静力学分析，校核强度刚度；干涉检查方面，在装配体模式下做静态干涉检查，发现并修正配合问题。软件的参数化特性便于设计迭代，改骨架或关键尺寸后相关零件自动更新，提高设计效率。

与本设计结构内容的对应关系：壳体零件 4.4 节用抽壳、拉伸、圆角等特征建模；按键零件 4.6 节用旋转、拉伸、阵列完成；装配结构 4.10 节用配合、约束定义止口、螺丝柱、卡扣关系；工程图 4.11 节从装配体生成爆炸图、总装配图。第 5 章 CAE 分析用 Simulation 模块完成。

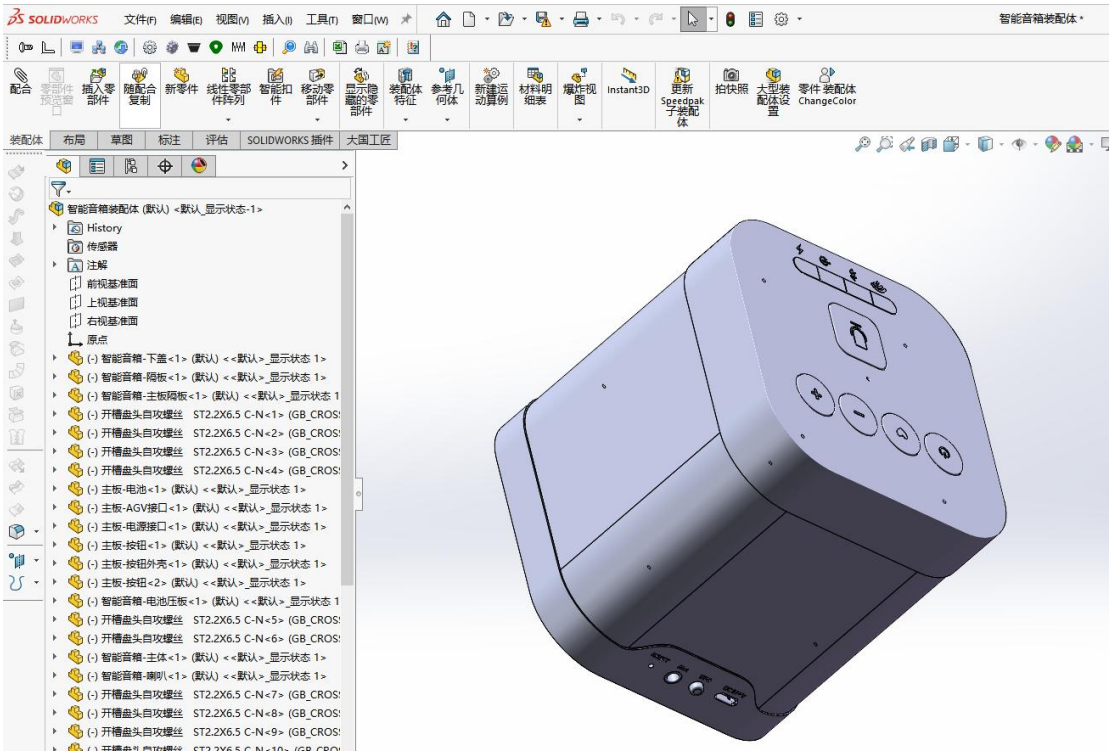


图 4-1 设计界面及智能音箱装配体示意

4.2 结构设计总体方案

本设计用模块化思路，分成壳体、声学、按键、内部结构件、装配连接五块。各块相对独立又互相配合，便于后期维护和系列化扩展。设计时遵循"先整体后局部、先主件后附件"的顺序，先确定主体和外壳的空间关系，再细化各模块内部结构。

壳体包括上盖、外壳、主体、下盖，材料统一 PC+ABS。上盖为交互面，外壳为出音面，主体为结构骨架，下盖为电池仓盖。声学含喇叭腔和穿孔出音，泡棉压紧，加防尘网。按键有语音键、四位圆钮、四位方钮，和上盖孔配合。内部结构件有主板隔板、隔板、电池压板。装配用止口、螺丝柱、卡扣，螺丝 PB2.6×4，卡扣 8~10 个。各模块之间通过止口定位、螺丝主固定、卡扣辅助固定，形成可靠的装配体系。

设计约束来自第 3 章堆叠：尺寸 85×85×100mm；喇叭与出音孔对齐；按键与 PCB 微动开关对应；电池仓与电池规格匹配。结构设计时需在满足这些约束的前提下，兼顾可制造性、装配性和成本。

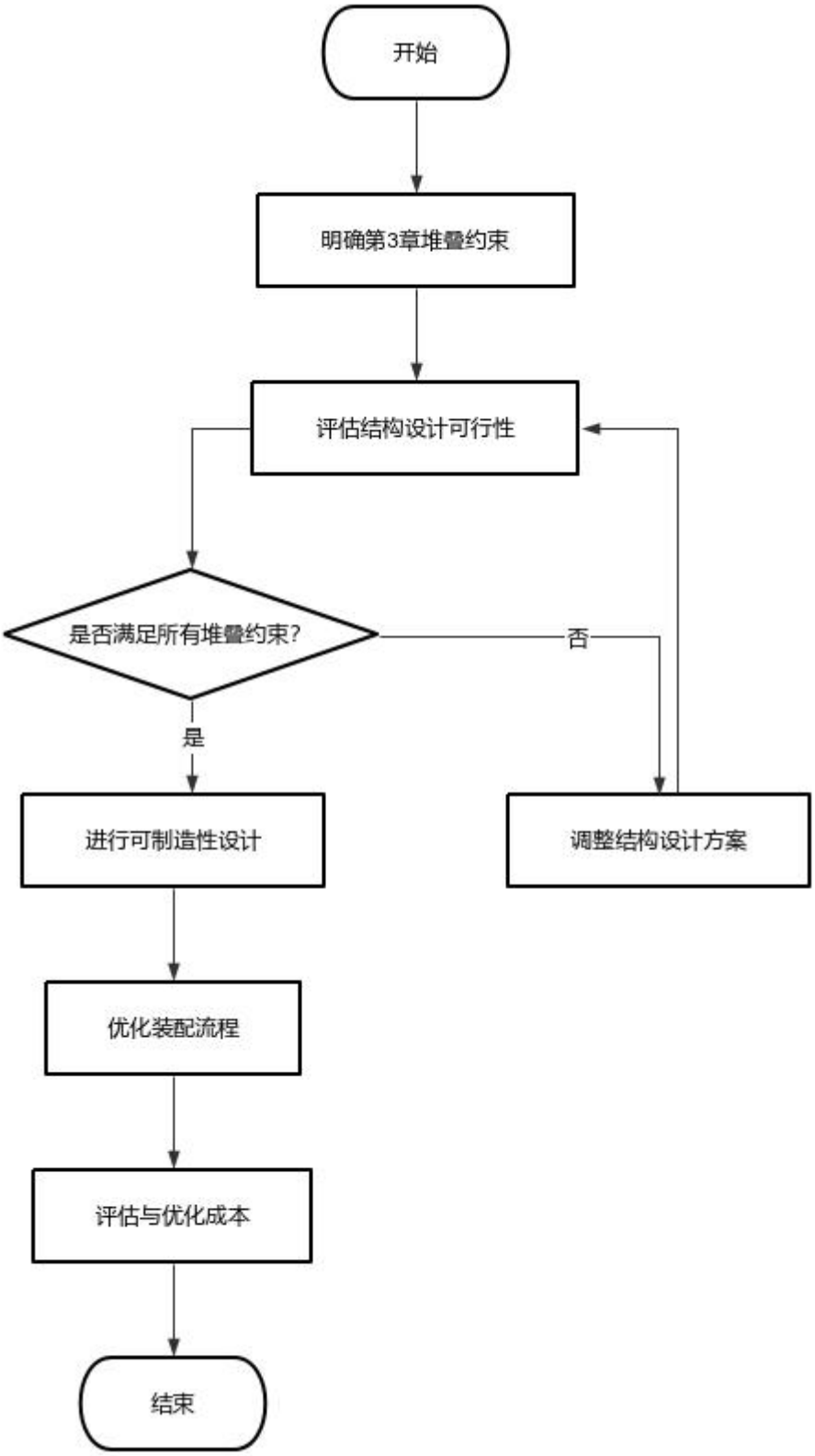


图 4-2 结构设计总体方案流程图

4.3 塑胶件结构设计基本原则

4.3.1 料厚与壁厚设计

根据《塑胶产品结构设计基础规范》，壳体壁厚需均匀过渡，避免缩水与变形。壁厚不均会导致成型冷却时收缩不均，引发气泡、凹陷、翘曲及内应力；过厚易产生缩孔，过薄则流动阻力大、成型困难。PC+ABS 流动性中等，料厚 1.0~2.0mm 均可成型，过薄易欠注，过厚易缩水。

黎恢来指出，塑料件料厚设计范围 0.6~6.0mm，常用 1.5~3.0mm，需均匀过渡，厚薄变化不超过 2.0 倍，避免缩水与变形[16]。本设计壳体材料选用 PC+ABS，取厚度方向壳体壁厚 1.2~1.4mm，侧面壁厚 1.5~1.7mm。厚度方向指垂直于分型面的方向，侧面指平行于出模方向的壁。最小壁厚不小于 0.4mm，壁厚变化不超过 2 倍，过渡平缓，沿塑料流动方向逐渐减小，避免锐角。厚薄交界处做斜面过渡，过渡长度≥3 倍厚度差。电池盖壁厚 0.8~1.0mm，满足强度与成型要求。螺丝柱、骨位等凸起结构根部壁厚需控制，避免局部过厚缩水。

表 4-1　主要壳体壁厚设计参数

零件名称	壁厚 /mm	备注	材料
上盖	1.2	外观面	PC+ABS
外壳	1.2~1.7	厚度 1.2~1.4，侧面 1.5~1.7	PC+ABS
主体	1.5	结构骨架	PC+ABS
下盖	1.2	外观面	PC+ABS
电池盖	0.8~1.0	满足强度	PC+ABS
最小壁厚	≥0.4	壁厚变化≤2 倍	—

4.3.2 脱模斜度设计

脱模斜度影响出模。斜度太小会拉伤、顶白，太大影响外观和装配。黎恢来说外观面≥3°，PC、PMMA 等 40′~1°50′[16]。脱模斜度指型腔侧壁相对出模方向的倾斜角，便于塑件从模具中脱出。斜度不足时，脱模力大，易拉伤表面、顶白、甚至拉裂。

塑料名称	脱模斜度	
	型芯	型腔
ABS	35'~1°	40'~1°20'
PS	30'~1°	35'~1°30'
PC	30'~50'	35'~1°
PP	25'~50'	30'~1°
PE	20'~45'	25'~45'
PMMA	30'~1°	35'~1°30'
POM	30'~1°	35'~1°30'
PA	20'~40'	25'~40'
HPVC	50'~1°45'	50'~2°
SPVC	25'~50'	30'~1°
CP	20'~45'	25'~45'
筋位	一般0.5°，最小0.25°	
网格	4°～5°	
晒纹	根据客户样件再参照晒纹样板确定，一般4°～6°，最小2°	
外形常用脱模	1°～3°	

图 4-3 脱模斜度与材料对应表

本设计具体取值：外壳面斜度≥3°，满足外观面要求；插穿面斜度 1°~3°；标准斜度取 1°，无特殊要求时默认。插穿面指前后模碰穿或插穿形成的面，斜度可略小。加强筋脱模斜度：高度低于 3mm 取 0.5°，3~5mm 取 1°，高于 5mm 取 1.5°。筋越高斜度需越大，否则脱模困难。腔体脱模斜度与加强筋一致，电池仓、喇叭腔等内腔均需拔模。材料专属要求：ABS 及 PC 料脱模斜度应大于 2°。若表面采用咬花、晒纹等处理，侧壁需增加 3°~5°斜度，因纹理会增大脱模阻力。本设计各结构件均满足上述要求。按键孔、透光孔、螺丝柱孔等孔类结构，孔壁也需拔模，通常 1°~2°。

4.3.3 加强筋与圆角设计

加强筋在不加壁厚的前提下提高强度、防变形。黎恢来说筋厚为料厚 0.4~0.6 倍，高≤3t，间距≥4t；拐角 R≥0.30mm[16]。规范要求(A-B)/B×100%<8%才不缩水，如壁厚 1.5mm、筋厚 1.4mm 则 7.1%<8%。宁可多加筋，不加壁厚。其中 A 为筋与壁交汇处总厚度，B 为壁厚。筋过厚会导致交汇处缩水，表面凹陷。

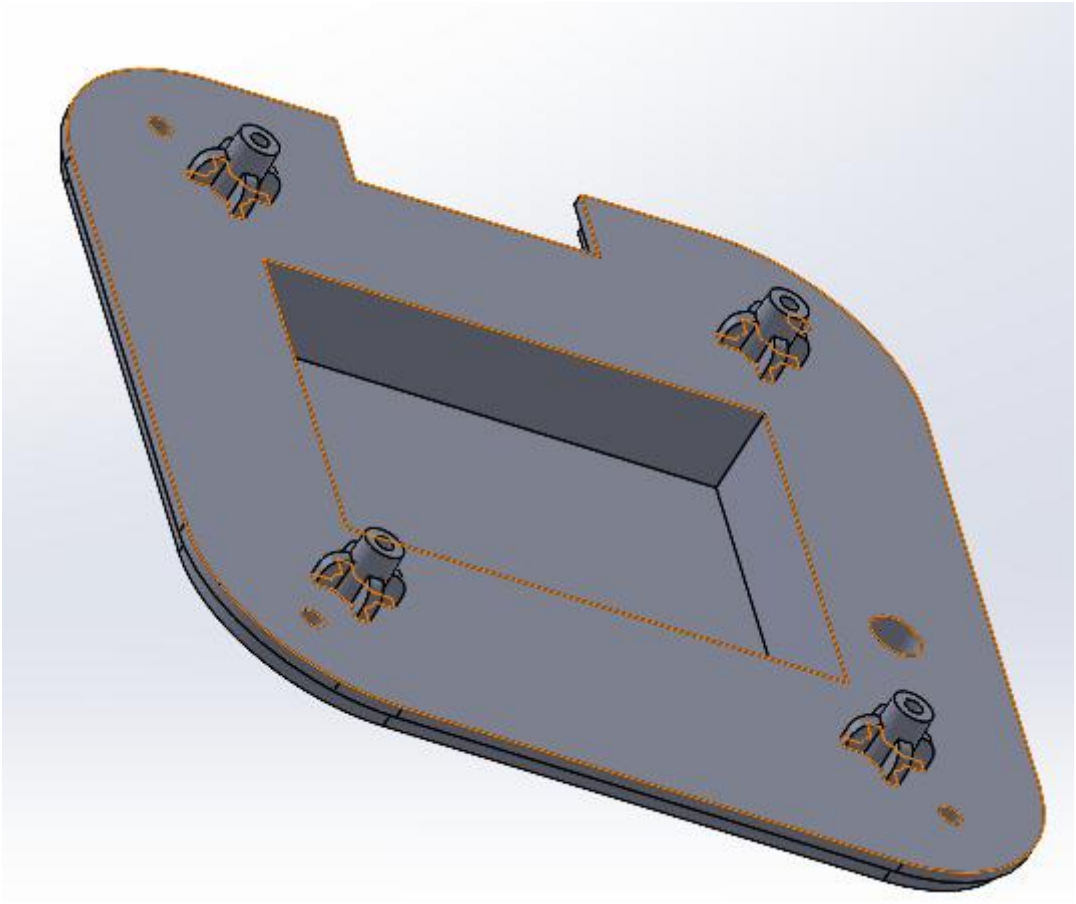


图 4-4 加强筋和圆角设计

筋的布置：沿受力方向或对角线布置，交叉筋可提高刚度。筋间距过密影响脱模，过疏加强效果差。筋根部与壁面连接处设圆角 R≥0.3mm，避免应力集中。筋顶可做平顶或圆顶，脱模斜度 0.5°~1.5°。圆角设计：内外拐角设过渡圆角 R≥0.30mm。外圆角 R 可略大，内圆角 R=0.3~0.5mm 即可。螺丝柱根部、骨位与壁面连接处均设圆角过渡。柱体根部壁厚需符合加强筋与壁厚关系，避免柱体根部过厚导致缩水。螺丝柱根部可设十字筋或井字筋加强，筋厚 0.6mm、高≤3mm。

4.4 壳体结构设计

壳体是整机的外壳与骨架，承担外观、装配、声学、接口等多重功能。设计时需考虑分型面位置、模具结构、装配顺序。上盖与下盖为外观件，料厚、脱模斜度、表面质量要求高；外壳与主体为结构件，需兼顾强度与声学。

4.4.1 上盖结构设计

上盖为顶部盖板，是用户交互的主要界面，含按键孔、交互灯光透光区。按键孔尺寸与按钮匹配，单边间隙 0.1~0.2mm，避免卡滞、装配顺畅。间隙过小易卡键，过大易晃动、进灰。单位按钮孔直径约 10.2~10.4mm，即按钮直径 10mm

加间隙；四位圆形按钮孔直径约 8.2~8.4mm；四位方形按钮孔边长约 12.2~12.4mm，四角倒圆角 R≥0.5mm，避免应力集中和刮手。孔边倒角 0.3~0.5mm，便于按键导柱插入。

透光区设导光柱或透光窗口，与 LED 灯珠位置对应，导光柱直径与 LED 匹配，高度约 2~3mm。导光柱侧面需磨砂或蚀纹，减少漏光。透光区周围可做遮光处理，避免光晕扩散。上盖四周设公止口，与外壳或主体配合，公止口高度 0.6~1.0mm，根部宽度 0.6~0.8mm，拔模角 2°~3°。公止口做在上盖便于模具出模，母止口做在主体或外壳。上盖内壁设加强筋，筋厚约 0.6mm，沿按键孔四周分布，增强局部刚度。料厚 1.2mm，脱模斜度 3°，满足外观面要求。分型面可选在顶部或四周边缘，需避开透光区。

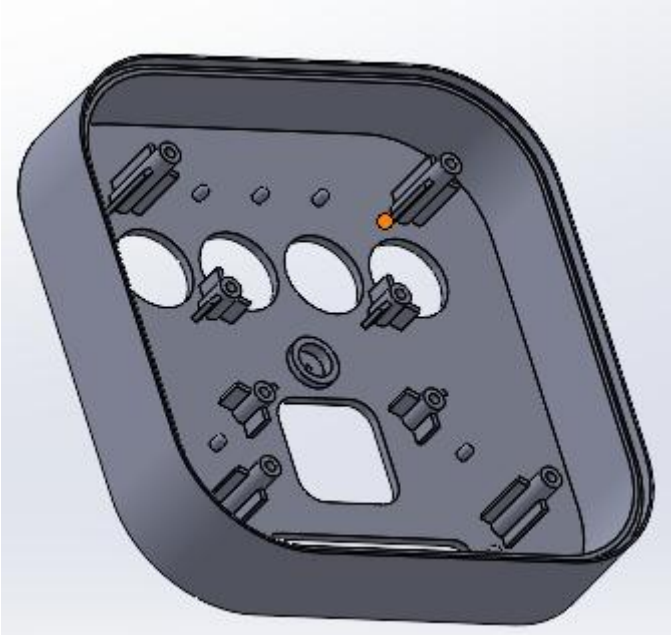


图 4-5 上盖结构三维图

4.4.2 外壳结构设计

外壳为侧面围板，表面设穿孔阵列作为声学出音面。穿孔直径通常 1.5~2.5mm，孔距 2~4mm，开孔率根据声学要求设计。葛俊等对穿孔板声阻抗模型进行了研究，为穿孔板参数设计提供了理论依据[11]。开孔面积不低于喇叭面积的 12%~15%，若喇叭有效振动面积约 15cm²，则出音孔总面积需≥1.8~2.25cm²。穿孔过密会削弱结构强度，过疏则出音面积不足。孔距建议≥2 倍孔径，保证孔间壁厚。穿孔区域可覆盖外壳四侧或三侧，视喇叭朝向和声学设计而定。

外壳内壁设骨位与主体配合，骨位间隙 0.1mm，顶部与上盖配合。骨位高度

约 3~5mm，沿四周均匀分布，每侧≥3 个骨位。骨位根部设圆角 R≥0.3mm。外壳顶部设止口或卡扣配合位，与上盖连接；底部与主体配合。外壳料厚：厚度方向 1.2~1.4mm，侧面 1.5~1.7mm。穿孔区域若料厚过薄易变形，可适当加厚至 1.5mm。若采用铝材，需考虑冲压即冷挤或落料、抛光、氧化等铝件工艺流程，孔距、孔径需满足冲压模具要求；若采用塑胶，则按注塑工艺设计，穿孔可采用模具蚀纹或二次加工实现。塑胶穿孔可用模具一次成型，孔数多时需考虑模具寿命和脱模



图 4-6 外壳穿孔板结构图

4.4.3 主体结构设计

主体为中央结构件，是整机的结构骨架，设喇叭安装腔、主板隔板安装位及装配连接结构。主体承重最大，料厚取 1.5mm，比上盖、下盖略厚。喇叭安装腔为圆形，直径与喇叭外径匹配，如φ40 喇叭取腔体约 40.2mm；四周骨位限位，间隙 0.1mm，高度包住喇叭 2/3 以上，喇叭高约 15mm 时骨位≥10mm。骨位避开喇叭磁路和焊点，四周≥0.5mm。骨位根部设圆角 R≥0.5mm，避免应力集中。前音腔高度≥0.8mm，密封音腔用 PORON 泡棉压紧，厚度 0.5~1.2mm、宽度≥1.2mm，达到前音腔密封。泡棉贴于喇叭盆架四周，压缩率 30%~50%。

主体顶部设主板隔板安装位，通过卡扣或螺丝固定。安装位可设定位柱或限位槽，保证主板隔板装配方向正确。主体底部与下盖通过止口、卡扣、螺丝连接。

主体四周设螺丝柱安装位，与下盖配合，螺丝柱 4 个分布于四角。主体内壁设加强筋，筋厚约 1.0mm，高≤4.5mm，沿喇叭腔四周或对角线分布，筋厚与料厚比符合(A-B)/B<8%。主体与外壳配合处设骨位或止口，配合间隙 0.1~0.2mm。主体外形与外壳内腔匹配，装配时自上而下装入外壳，再与下盖合壳。

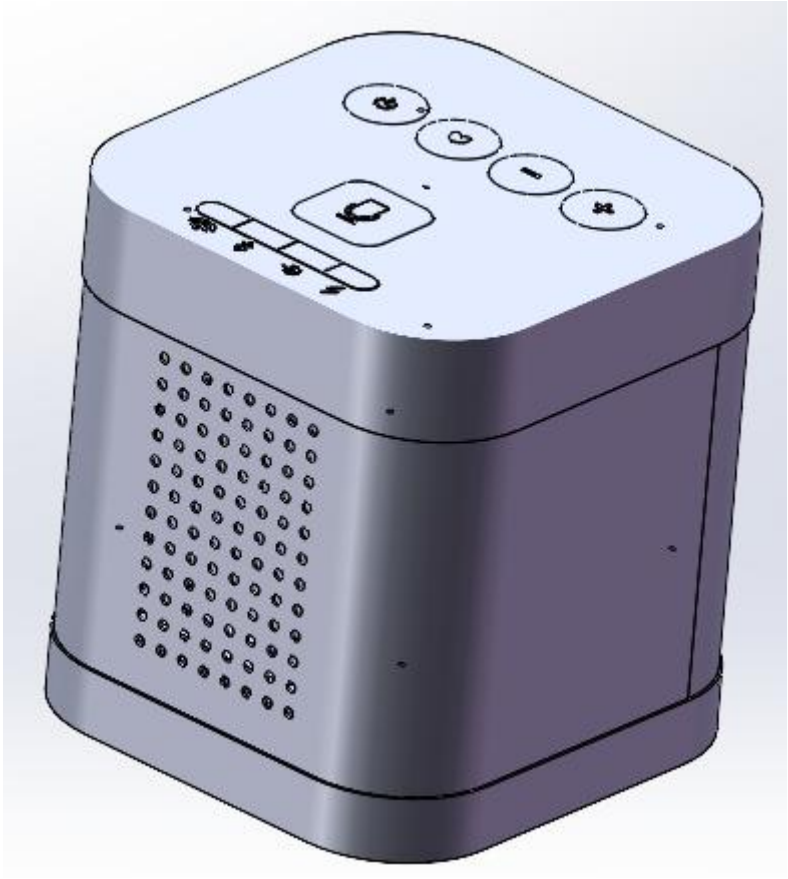


图 4-7 主体结构三维图

4.4.4 下盖结构设计

下盖为底部盖板，设电池仓、充电接口孔、防滑脚垫位。黎恢来在底壳组件结构设计中指出，电池固定结构需满足：四周间隙 0.2mm，骨位限位，间隙 0.1mm，每个面≥3 个骨位，Z 向间隙 0.1mm，壳体胶厚≥0.8mm；电池仓拔模 1°~2°，便于模具出模[16]。

本设计电池仓尺寸与电池规格匹配，若采用 18650 电池，直径 18mm、长度 65mm，仓体尺寸约 18.4mm×65.4mm；若采用软包电池，按实际尺寸设计。充电接口孔尺寸与 Micro USB 约 7.5mm×2.5mm 或 Type-C 约 8.8mm×2.5mm 匹配，四周预留 0.5mm 间隙，便于插拔。下盖与主体配合处设母止口，嵌合面有效配合长度 3~5mm；四周设卡扣配合孔，与主体公扣配合。料厚 1.2mm，脱模斜度 3°。

底部设防滑脚垫位，可采用硅胶脚垫或软胶贴附。

根据下盖零件图，下盖外形与上盖轮廓呼应，四角圆角过渡。电池仓为矩形凹槽，四周骨位限位电池，底部设走线槽供电池连接线穿过。充电接口孔位于侧面或底部边缘，孔边倒圆角 R≥0.3mm。四周设螺丝柱安装位，与主体螺丝孔对应，用于主固定。卡扣配合孔与主体公扣一一对应，扣合量 0.35~0.6mm。防滑脚垫位为四个圆形凹槽，直径约 8~10mm，深度约 0.5mm，贴附硅胶脚垫后略高于底面，增加摩擦力。下盖内部加强筋沿电池仓四周分布，筋厚约 0.6mm，符合料厚规范。

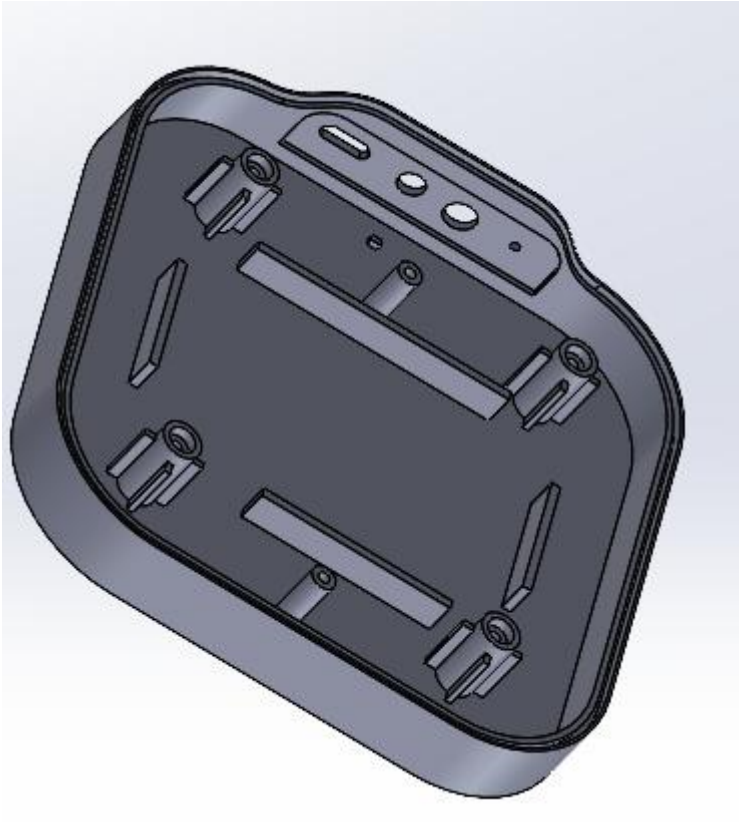


图 4-8 下盖结构三维图

4.5 声学结构设计

声学结构影响音质，要兼顾喇叭限位、密封和出音面积。黎恢来说喇叭四周骨位间隙 0.1mm，高包 2/3，用 PORON 泡棉压紧，前音腔≥0.8mm，出音面积 12%~15%，加防尘网[16]。本设计骨位避开磁路和焊点，四周≥0.5mm。前音腔要密封防声短路，泡棉压缩率 30%~50%。穿孔板开孔面积≥喇叭面积的 12%~15%，按葛俊等研究优化[11]。

前音腔指喇叭振膜与出音孔之间的空间，需密封防声短路。密封不严会导致

前后声波抵消，低频变差。泡棉贴于喇叭盆架与壳体之间，密封前音腔。后音腔指喇叭背面空间，可与主体内腔连通，形成背腔。背腔体积影响低频响应，体积过小低频不足。本设计主体内喇叭腔即为喇叭前音腔，喇叭背面与隔板之间形成后音腔。隔板将喇叭腔与电池仓完全分隔，避免电池仓空气参与声学振动。

防尘网置于穿孔板内侧或外侧，防止灰尘进入喇叭。防尘网需透气、不挡声，常用网布或无纺布，目数 80~120。防尘网可贴于外壳内壁穿孔区域，或做独立框架固定。出音孔与喇叭轴线对齐，喇叭正对穿孔板，声波经穿孔板辐射出去。穿孔板若用铝材，孔边需去毛刺，避免划伤防尘网。

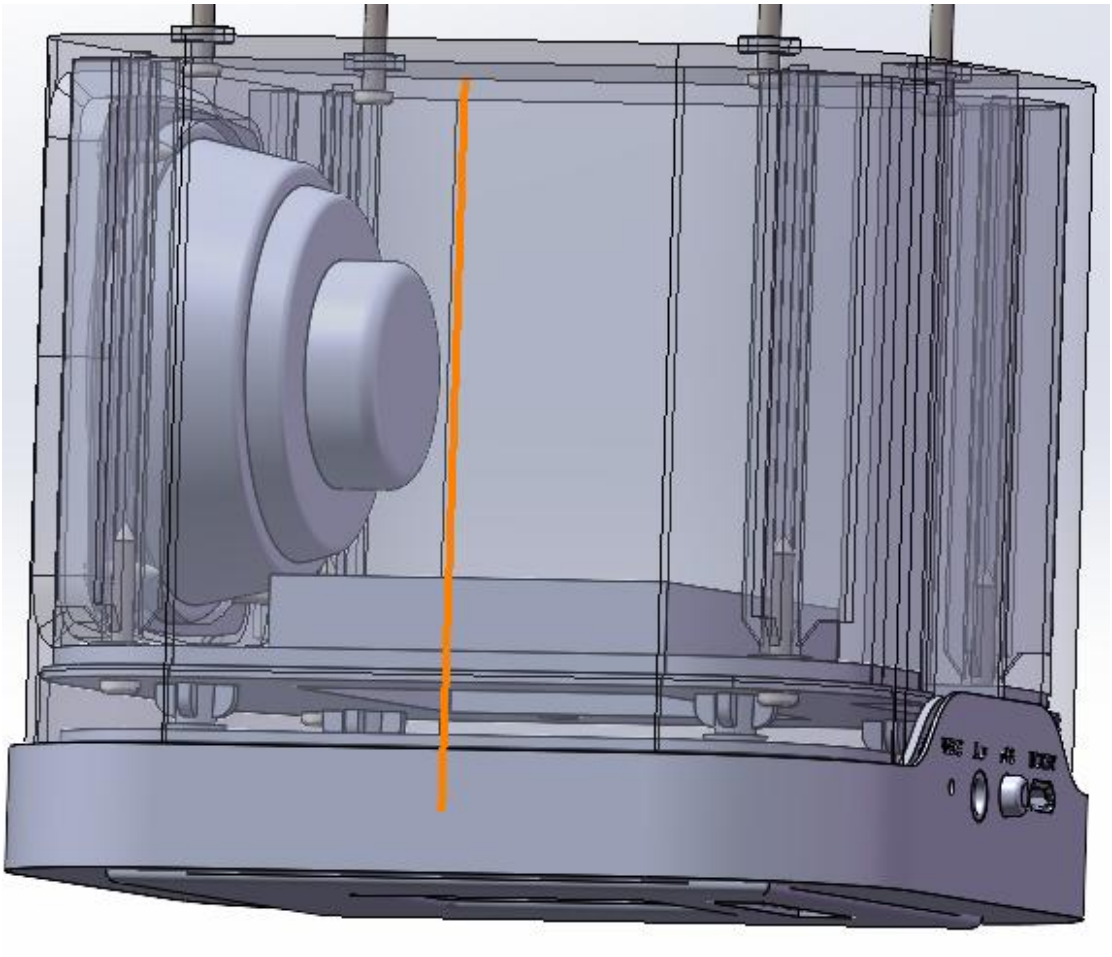


图 4-9 喇叭限位与密封音腔结构示意图

4.6 按键结构设计

4.6.1 单位按钮结构设计

单位按钮是圆钮，直径约 10mm，做语音对话。悬臂式便宜、靠塑料弹性回弹；导柱式导向好、按压稳。行程 1~2mm，和微动开关 0.25~0.55mm 匹配。回弹用硅胶垫或弹簧，硅胶厚 0.5~1.0mm。按钮和孔单边间隙 0.1mm。黎恢来说侧

键可用 ABS 键帽，顶面≥0.8mm，四周 0.15mm[16]。本设计用 ABS 或 TPU，硬度 60~70°。表面可做细纹增摩。

根据单位按钮零件图，按钮为圆柱形键帽，顶部为按压面，底部设导柱。导柱直径约 1.5~2mm，与上盖按键孔及 PCB 微动开关对齐。键帽裙边宽≥0.4mm、厚≥0.4mm，高出上盖表面≥0.5mm，便于按压。若采用导柱式，导柱中心与按钮圆心重合，长度约 2~3mm。材料 ABS 时顶面料厚≥0.8mm；若用 TPU 软胶，硬度 60~70°可兼顾手感和回弹。表面可做细微纹理增加摩擦力，避免滑手。

微动开关选型：常用 4×4mm 或 6×6mm tact switch，触发行程 0.25~0.55mm，按键行程需大于触发行程，保证可靠触发。导柱末端与微动开关接触面可做圆形或平顶，避免偏载。硅胶垫置于按键与 PCB 之间，厚度 0.5~1.0mm，压缩后提供回弹力。硅胶垫可开孔避让导柱，或导柱穿过硅胶垫。按键手感由硅胶软硬和行程决定，硅胶越硬按键越硬、回弹越快。按键需做跌落测试，防止按键脱落或卡死。

4.6.2 四位按钮结构设计

四位按钮为圆形按钮组，含音量加、音量减等四个功能。每个按钮直径约 8mm，四个按钮呈"+"字形或"一"字形排列，间距≥10mm 满足手指操作需求，避免误触。结构设计与单位按钮类似，每个按钮独立导柱，与 PCB 上对应的微动开关 tact switch 对齐。导柱直径约 1.5~2mm，长度与按键孔深度匹配。按压时导柱下压触发微动开关，回弹依靠硅胶垫。四个按钮可采用一体式键帽或分体式，一体式模具简单，但要各键能独立触发。

根据四位按钮零件图，四个圆钮可为一体式键帽，通过悬臂梁连接，各键独立导柱。悬臂梁厚度≤0.9mm，保证各键能独立下压。若为分体式，每个按钮单独注塑，装配时分别装入上盖。导柱与微动开关触发行程匹配，避免按键卡死或触发失效。四个按钮呈"+"字形时，中心留空位可布置透光区或装饰；呈"一"字形时，沿顶部一侧排列，节省空间。

4.6.3 四位方形按钮结构设计

四位方形按钮为方形按钮组，边长约 12mm，与圆形按钮形成视觉差异化，便于用户区分功能。方形按钮四角需倒圆角 R≥0.5mm，避免应力集中与刮手，同时满足模具脱模要求。四个方形按钮可呈 2×2 阵列排列，间距≥8mm。结构上

可采用导柱式，导柱位于按钮中心或四角，与 PCB 微动开关对应。装配时与上盖方形孔配合，单边间隙 0.1mm。材料选用 ABS，与圆形按钮材料可一致，便于统一采购与表面处理。

根据四位方形按钮零件图，方钮为 2×2 阵列，每个方钮边长约 12mm，四角倒圆角 R≥0.5mm。导柱可位于中心或四角，与上盖方孔及 PCB 对应。一体式键帽时，四键通过筋条连接，各键独立导柱；分体式时每键单独装配。方钮与圆钮在视觉上形成对比，用户可快速区分音量键与功能键。材料 ABS，表面可做磨砂或高光处理，与壳体风格协调。

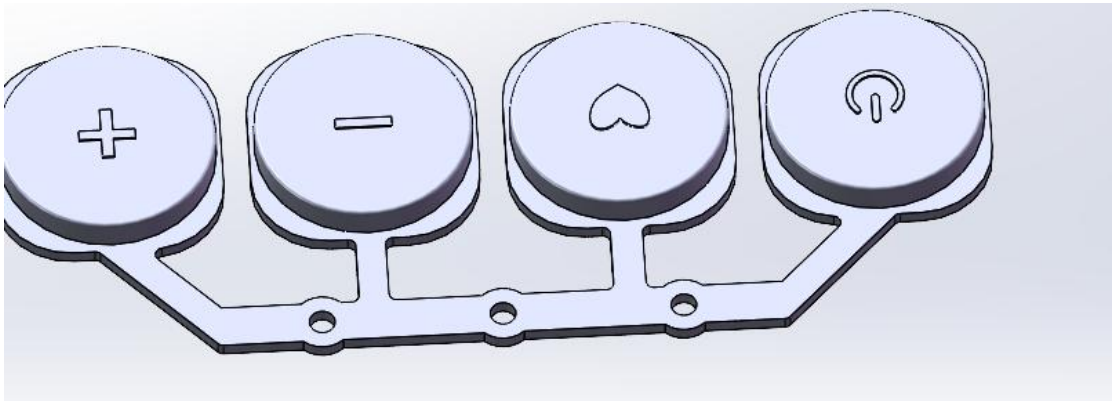


图 4-10 按键结构示意图

4.7 交互灯光结构设计

交互灯光显示工作状态，用 LED 加导光。LED 贴片在控制板上，0603 或 0805 规格，单色或 RGB，1~4 颗，距透光窗 2~5mm。导光柱或导光片把光传到上盖，柱高 2~4mm，侧面磨砂减漏光。透光材料用 PMMA 或 PC，PMMA 透光好但脆，PC 更牢。可丝印遮光，只留发光图案。

导光柱设计要点：导光柱直径与 LED 匹配，0603 LED 约 1.6mm×0.8mm，导光柱直径可取 2~3mm；导光柱高度 2~4mm，过高光损大，过低光扩散不足。导光柱底部设凹槽或凸台与 LED 贴合，减少光漏。侧面可做蚀纹或磨砂，使光均匀扩散。导光柱与上盖透光孔配合，单边间隙 0.1mm。若透光区为图案形状，需丝印遮光层，只留发光区域，避免光晕。LED 可贴于 PCB 背面，导光柱穿过 PCB 孔与 LED 正对，节省空间。导光柱材料 PMMA 透光率约 92%，PC 约 88%，本设计选用 PMMA。

4.8 接口结构设计

接口要满足连接器尺寸和插拔空间。充电用 Micro USB 或 Type-C，黎恢来说底壳开孔避让 0.25mm，骨位限位≥0.2mm，避开焊盘≥0.8mm[16]。本设计孔四周留 0.5mm，孔边 R≥0.3mm，焊盘避让≥0.8mm。3.5mm 音频孔约 6mm，周围骨位限位。TF 卡槽、复位孔等按需预留，位置要考虑装配后能插到。

Micro USB 接口：插口尺寸约 7.5mm×2.5mm，孔开 8.5mm×3.5mm，四周留 0.5mm。Type-C 接口：插口尺寸约 8.8mm×2.5mm，孔开 9.8mm×3.5mm。孔开在下盖侧面或底部，孔边倒圆角 R≥0.3mm。孔周设骨位限位连接器，骨位与连接器边缘间隙 0.2mm，防止插拔时晃动。孔内壁避开 PCB 焊盘≥0.8mm，避免短路。充电接口若在底部，需考虑放置时桌面高度，避免插头顶到桌面。

3.5mm 音频孔：插孔直径约 6mm，孔开 6.5~7mm。孔周设骨位限位插头。复位孔若采用小孔，直径约 1~2mm，用探针或卡针触发。TF 卡槽、USB 接口等按实际连接器尺寸设计，孔比连接器开口大 0.5mm，装配后用户可正常插拔。



图 4-11 接口结构设计图

4.9 内部结构件设计

4.9.1 主板隔板结构设计

主板隔板用于安装控制板即 PCB，是电子元器件的支撑结构。黎恢来指出，PCB 设计要求预留螺丝柱位置孔径≥4.0mm、无尖角 R≥0.5mm、定位孔≥1.8mm；

自攻牙螺丝 PB2.6mm 对应柱内径 2.2mm[16]。PCB 孔径比螺丝柱外径大 0.2~0.3mm，便于装配。定位孔用于装配时定位，防止 PCB 错位。

本设计设螺丝柱 4 个分布于 PCB 四角，内径与自攻螺丝 PB2.6 匹配，ABS 材料内径为螺丝外径减 0.40mm 即 2.2mm，外径为螺丝外径 2 倍。定位柱 2 个，直径约 2mm，与 PCB 定位孔配合。主 PCB 限位采用对角 2 个定位柱，间隙 0.1mm，伸入 PCB 限位孔[16]。主板隔板与主体通过卡扣或螺丝连接，料厚 1.0mm。

根据主板隔板零件图，隔板为矩形板件，四周与主体配合。螺丝柱分布于四角，柱内径 2.2mm、外径 5.2mm，与 PB2.6 自攻螺丝匹配。定位柱 2 个位于对角，直径约 2mm，伸入 PCB 定位孔实现限位。隔板中央可开孔避让 PCB 元器件，如芯片、电容等凸起元件，孔边倒圆角 R≥0.5mm，避免应力集中。避让孔尺寸比元器件大 0.5~1.0mm。隔板与主体通过卡扣或螺丝固定，卡扣数量 4~6 个，均匀分布。料厚 1.0mm，加强筋厚约 0.6mm，符合(A-B)/B<8%要求。隔板安装后，控制板位于上盖与外壳之间，按键导柱可穿过隔板孔与 PCB 微动开关对应。隔板孔需与按键导柱位置一一对应，孔直径比导柱大 0.2~0.3mm。隔板可设限位凸台，防止 PCB 与壳体接触短路。

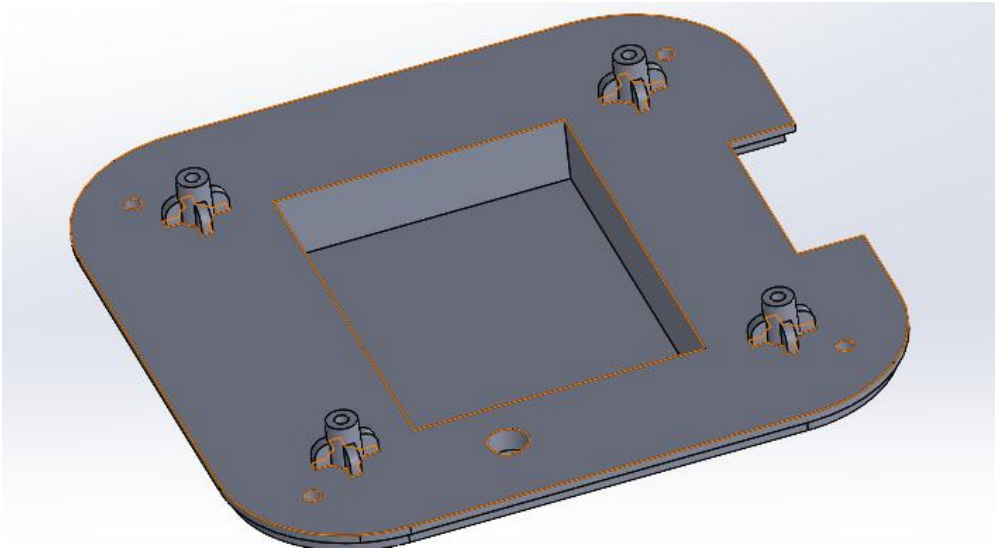


图 4-12 主板隔板结构设计图

4.9.2 隔板结构设计

隔板把喇叭腔和电池仓分开，防声短路和热传导。四周和主体配合，配合面加密封泡棉 0.5mm。料厚 1.0mm，筋厚 0.6mm、高≤3mm。可开走线孔，孔周密封。用 4~6 个卡扣固定。

根据隔板零件图，隔板为薄板结构，四角设螺丝孔与主体或下盖固定。螺丝孔直径约 2.5mm，与 M2 自攻螺丝匹配。隔板四周与主体内壁配合，配合面贴密封泡棉，厚度约 0.5mm，防止喇叭腔与电池仓串气。中央可开走线孔，供电池连接线穿过，孔周做密封处理，避免漏气。走线孔尺寸约 5mm×3mm 或φ4mm，孔边倒圆角 R≥0.5mm。线缆穿过孔后可用泡棉或胶带封堵，减少漏气。加强筋沿四周或对角线分布，筋厚约 0.6mm，高度≤3mm。隔板将喇叭腔与电池仓完全分隔，避免声短路，同时防止电池热量传导至喇叭影响音质。料厚 1.0mm，脱模斜度 1°。隔板与主体装配时，先装密封泡棉，再装隔板，螺丝从下盖或主体侧拧入。隔板平面度要求较高，翘曲会影响密封效果。

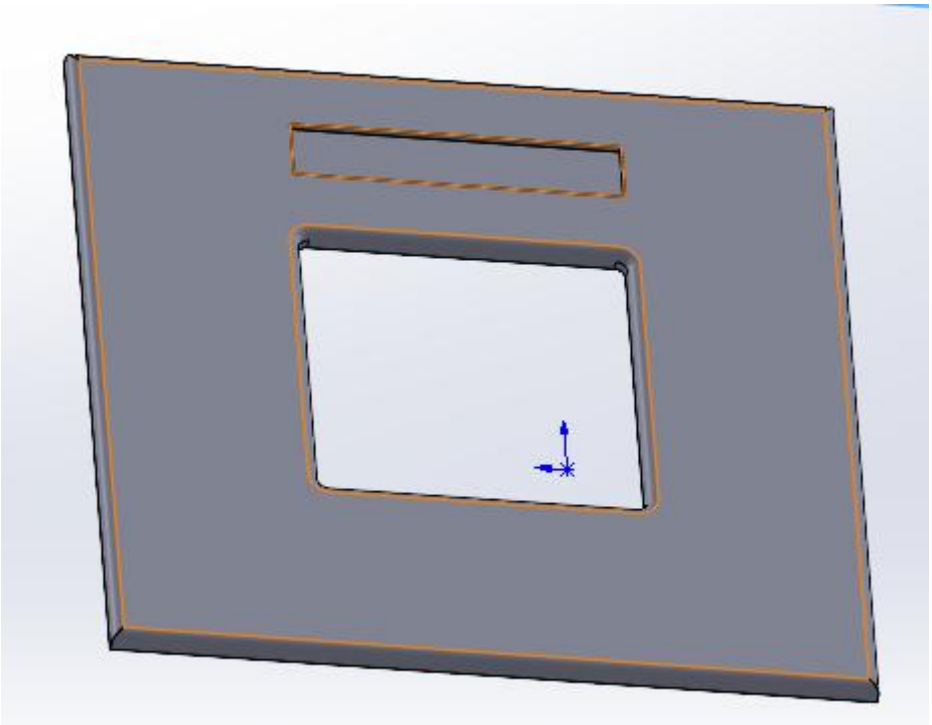


图 4-13 隔板结构设计图

4.9.3 电池压板结构设计

电池压板用于压紧电池，防止运输或使用过程中晃动导致接触不良或损坏。压板与电池接触面设泡棉缓冲，厚度 2~3mm，避免压坏电池。压板四周与下盖或主体配合，配合间隙 0.1~0.2mm。料厚 1.0mm，通过卡扣或螺丝固定。若采用卡扣，扣合量 0.3~0.5mm；若采用螺丝，与下盖螺丝柱配合。压板需预留电池连接线走线空间，避免压到线缆。压板可设拆卸抠手位，便于更换电池。

根据电池压板零件图，压板为矩形板件，一侧有凸起边缘便于装配定位。与

电池接触面贴泡棉，厚度 2~3mm，压缩率约 30%~50%，既压紧电池又避免压坏。压板四角设螺丝孔或卡扣配合位，与下盖螺丝柱或卡扣对应。中央可开走线槽，供电池正负极连接线穿过，槽宽约 3~5mm，避免压到线缆。若需更换电池，压板可设抠手位或拆卸口，便于工具操作。料厚 1.0mm，加强筋厚约 0.6mm。压板安装后，电池被限位在下盖电池仓与压板之间，运输和使用中不会晃动。

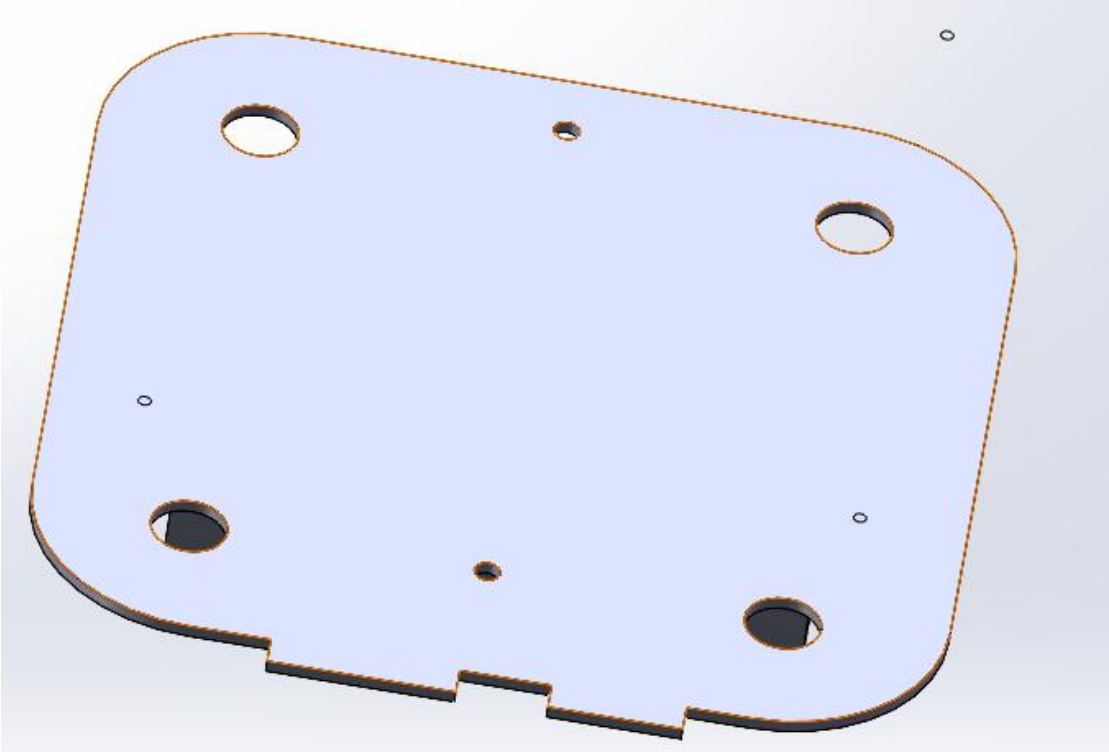


图 4-14 电池压板结构设计图

4.10 装配结构设计

4.10.1 止口与反止口设计

止口是上下壳体配合的核心结构，用于限位、防错位、防 ESD。黎恢来在产品结构布局设计中指出，止口即公止口加母止口，用于限位防错位、防 ESD，公止口做在薄壳即前壳，母止口做在厚壳即底壳；尺寸要求：公止口高度 0.6~1.0mm，根部宽度 0.6~0.8mm，拔模角 2°~3°，配合间隙 0.05mm，纵向避让 0.1~0.2mm[16]。本设计按此规范执行，嵌合面有效配合长度 3~5mm。止口边缘做 0.5×0.5mm 圆角，避免锐角。面壳与底壳断差要求：面刮<0.15mm，底刮<0.10mm。

本设计上盖与主体、下盖与主体之间均采用止口配合。上盖四周设公止口，与主体顶部母止口配合；下盖四周设母止口，与主体底部公止口配合。止口配合

时先嵌合定位，再锁螺丝、扣卡扣。纵向避让 0.1~0.2mm 指公止口与母止口底部留间隙，避免顶死。反止口用于防止壳体向内变形，可设于止口内侧。止口周圈需连续，避免缺口导致错位。若壳体为不规则形状，止口可分段设计，每段有效配合长度≥3mm。

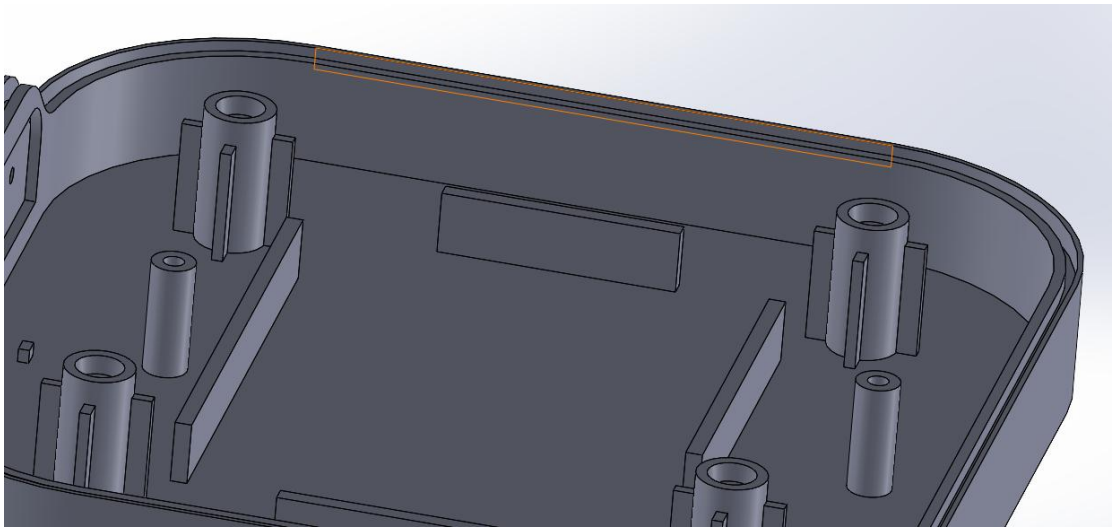


图 4-15 止口设计图

4.10.2 螺丝柱设计

黎恢来在产品结构布局设计中指出，固定用自攻牙螺丝 PB2.6×5.0mm，4 个在四角；PB2.6 对应柱内径 2.2mm[16]。本设计外径 5.2mm，内径 2.2mm，公差 +0.05/-0。四周 4~6 条加强肋，厚 0.6mm，根部圆角。柱高=装配厚度+2~3mm，达到有效锁紧。标准扭力：M2.6 螺丝约 3~4kg·cm，设计时螺丝柱需能承受该扭力不滑牙、不破裂。

螺丝柱布置：主体底部四角各设 1 个螺丝柱，与下盖配合。螺丝柱中心距边缘≥5mm，避免边角应力集中。螺丝柱根部与壁面连接处设圆角 R≥0.5mm，避免应力集中开裂。柱顶可设沉孔或平面，便于螺丝头贴合。自攻螺丝 PB2.6 旋入时，塑料会形成内螺纹，柱内径 2.2mm、孔深≥5mm 可保证有效锁紧。若柱高不足，螺丝旋入深度不够，锁紧力不足；若柱高过高，浪费材料且增加模具成本。螺丝柱与 PCB 孔配合时，孔直径比螺丝外径大 0.2~0.3mm，便于装配。

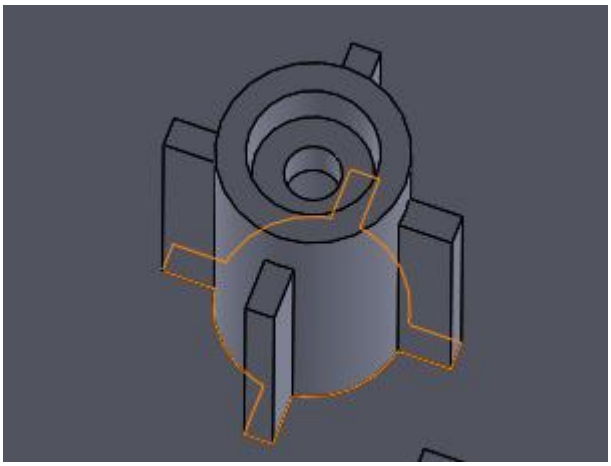


图 4-16 螺丝柱设计图

4.10.3 卡扣设计

卡扣辅助螺丝固定，通过塑料弹性变形实现装配与拆卸。黎恢来指出，产品结构设计核心特点包括连接如卡扣、螺丝等，限位如止口、反止口，固定；卡扣设计要满足强度、扣合量 0.35~0.6mm、变形空间大于扣合量 0.2mm，均匀分布；分公扣即底壳与母扣即前壳，横向配合间隙 0.2mm，纵向扣合量 0.5mm；4 个螺丝对应 8~10 个卡扣，间距约 30mm[16]。本设计按此规范执行，卡扣根部设圆角 R≥0.5mm，避免应力集中断裂。卡扣可采用直臂、L 形或 U 形结构，根据空间与受力选择。防错设计：卡扣采用非对称分布或唯一装配位置，避免装反。

本设计主体设公扣，下盖设母扣孔。公扣做在主体四周，每侧 2~3 个，共 8~10 个。公扣扣合量 0.35~0.6mm，装配时公扣扣头滑入母扣孔，卡住后配合止口和螺丝形成固定。扣合量过小易松脱，过大装配困难、易断。公扣变形空间需大于扣合量 0.2mm，即公扣可变形量≥0.55~0.8mm。卡扣臂根部厚度约 0.8~1.0mm，保证弹性。扣头斜面设计便于装配时滑入，角度约 30°~45°。拆卸时用撬棒或专用工具从卡扣处撬开，需注意卡扣数量多时拆卸力较大。主体与外壳之间也可设卡扣，辅助固定。上盖与主体之间若用卡扣，需考虑拆卸维修时能否打开。

智能音箱整机装配体爆炸图清晰展示上盖、外壳、主体、下盖及各内部结构件的装配关系与分解顺序，便于理解产品结构层次。装配体爆炸图按装配顺序自上而下分解：上盖含单位按钮、四位圆形按钮、四位方形按钮；控制板固定于主板隔板；外壳围住主体；主体内装喇叭；隔板分隔喇叭腔与电池仓；电池压板压紧电池；下盖形成底部封闭。各零件之间的止口、螺丝柱、卡扣配合关系在爆炸图中可清晰辨识。

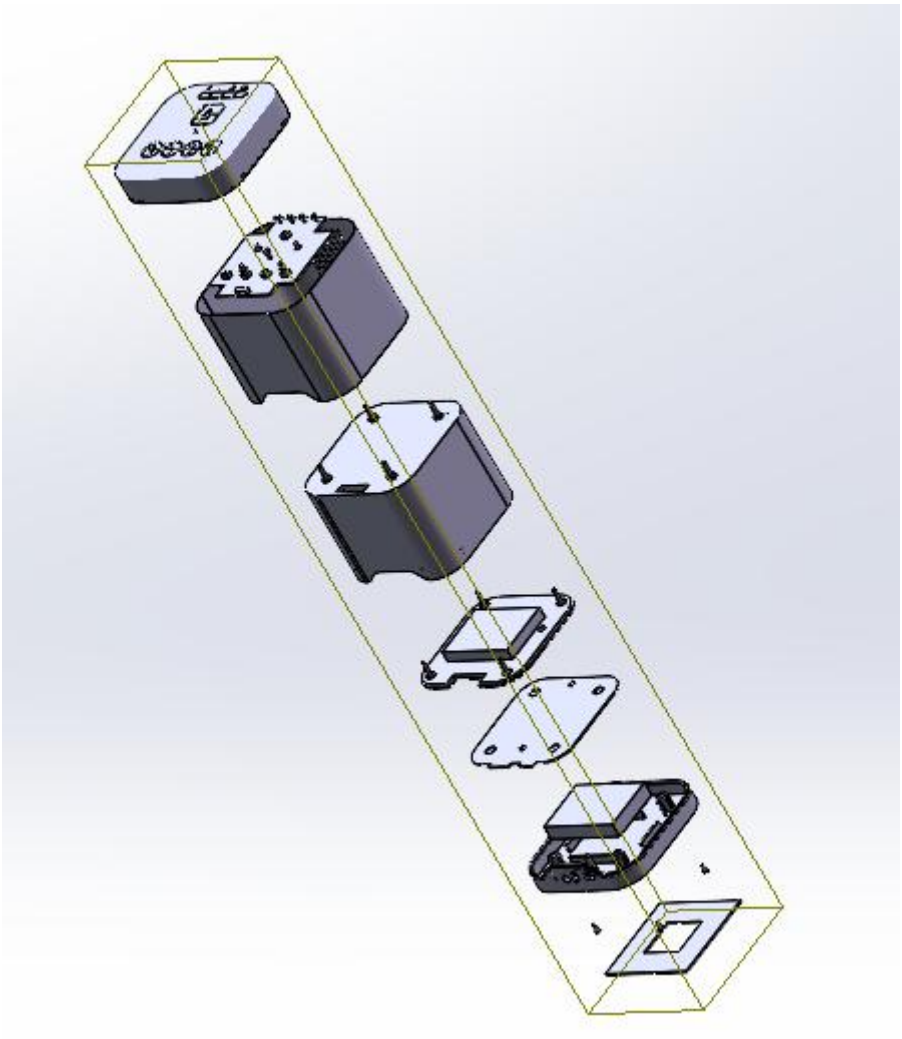


图 4-17　智能音箱装配体爆炸图

第 5 章 可制造性改善及 CAE 分析

5.1 可组装性分析及改善

5.1.1 面向装配的设计 DFA 原则应用

按钟元 DFA 指南做可组装性优化[10]。能合并的零件尽量合并。多用卡扣，螺丝只用在关键点，统一 PB2.6。装配从上往下单一方向，靠重力。止口、定位柱做导向，先定位再固定。止口、卡扣非对称或唯一位置，防装反。

5.1.2 装配工艺优化

装配顺序优化为：喇叭装入主体,主板隔板安装,控制板固定,隔板安装,电池压板与电池安装,上盖与外壳装配,下盖与主体合壳，止口、卡扣、螺丝固定。为辅助工具预留空间，螺丝刀操作范围无干涉。重要零部件如 PCB 设装配止位，防止压坏。装配公差通过合理间隙与定位特征放宽，降低制造成本。

具体装配步骤：第一步，将喇叭放入主体喇叭腔，四周骨位限位，PORON 泡棉压紧；第二步，主板隔板装入主体或外壳，通过卡扣或螺丝固定；第三步，控制板对准 PCB 定位柱，用 PB2.6 螺丝固定于主板隔板；第四步，隔板装入主体，四角螺丝固定，四周密封泡棉；第五步，电池放入下盖电池仓，电池压板压紧，卡扣或螺丝固定；第六步，上盖与外壳装配，按键导柱装入上盖孔；第七步，下盖与主体通过止口、卡扣、螺丝合壳。每步装配后检查无干涉，螺丝扭力按标准执行。

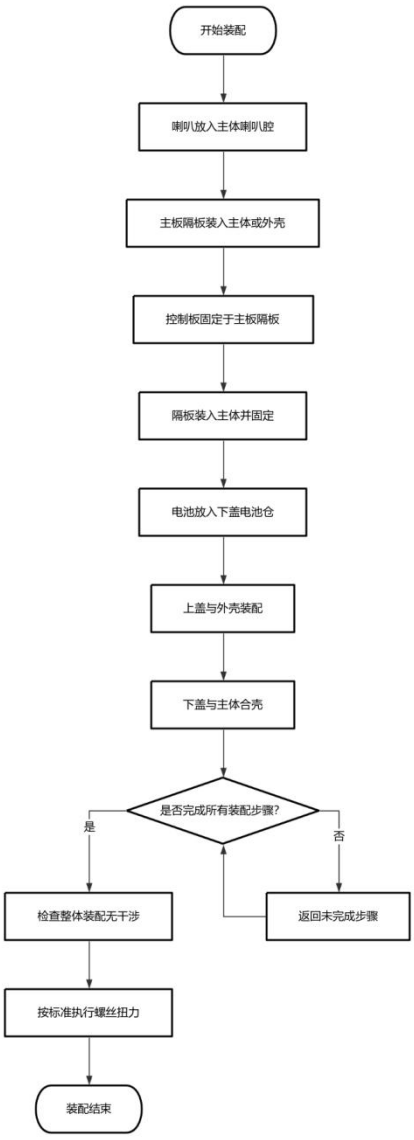


图 5-1 装配顺序示意图

5.2 零件可制造性分析

5.2.1 塑胶件可制造性分析

模具方面看有没有倒扣，有的话要行位或斜顶。本设计尽量少倒扣。注塑方面壁厚要匀、脱模斜度够、筋厚符合规范。唐波做过工艺检查系统研究[6]，马少锋等做过注塑模拟[12]，可再用 Moldflow 做模流验证。

上盖、外壳、主体、下盖、单位按钮、四位按钮、四位方形按钮、主板隔板、隔板、电池压板等均为塑胶件，可采用注塑成型。模具结构需检查：上盖按键孔、透光区需插穿或碰穿；外壳穿孔板可采用蚀纹或二次加工；主体喇叭腔、螺丝柱需脱模斜度；下盖电池仓、卡扣孔需斜顶或行位。浇口位置建议设在非外观面，

如壳体内侧或加强筋处。顶针布置避开外观面，避免顶白。谢海深等做过喇叭盖的模具设计[14]，陈田等用 Moldflow 做了手机壳仿真[15]，方法可借鉴。本设计各零件壁厚均匀、脱模斜度满足要求、加强筋符合规范，可制造性良好。

5.2.2 铝件工艺可行性分析

外壳若用铝材，流程是冲压、抛光、氧化。冲压要满足孔径、孔边距、折弯半径。穿孔板孔距孔径要和模具匹配。戴志杰等做过钣金机箱可制造性分析[20]，可参考。

铝件外壳穿孔板需考虑冲压工艺：圆孔直径≥1.3t，t 为料厚，孔边距≥2t，孔距≥2 倍孔径。穿孔阵列若采用冲压模，需一次或多次冲压完成，模具成本较高。若采用冲压+蚀刻组合工艺，可降低成本。抛光工序影响表面质量，氧化可着色并提高硬度。铝件与塑胶件装配时，需注意热膨胀系数差异，预留适当间隙。本设计主体为塑胶，外壳可选塑胶或铝材，塑胶外壳成本更低、模具周期更短，铝材外壳质感更好、散热更佳，可根据产品定位选择。

5.3 CAE 分析

用 SOLIDWORKS Simulation 做静力学分析，对象是主体、下盖、螺丝柱。加载荷和约束，算应力位移。应力集中处加圆角或筋，刚度不够就加料厚或筋。樊玲等做过 CAE 辅助成型研究[13]。

分析步骤：建立简化几何模型，赋予材料属性，PC+ABS 弹性模量约 2.4GPa、泊松比 0.38；施加约束，如主体底部固定、下盖与主体连接处约束；施加载荷，喇叭腔承受喇叭重量及振动载荷，电池仓承受电池重量，螺丝柱承受扭力；运行求解，得到应力云图和位移云图。应力集中区域通常在喇叭腔骨位根部、螺丝柱根部、电池仓拐角处，可通过增加圆角 R≥0.5mm、加强筋或优化料厚改善。刚度不足时，最大位移超过允许值，需增加加强筋或料厚。

对主体喇叭安装腔进行静力学分析，施加喇叭安装载荷，得到应力分布云图，用于识别应力集中区域并指导结构优化。

对下盖电池仓进行静力学分析，施加电池重量及装配载荷，验证下盖在承载工况下的强度与刚度是否满足要求。

5.4 设计验证与优化

用 SOLIDWORKS 做干涉检查，有干涉就调间隙或改形状。模具方面确认能

脱模，浇口顶针位置合理。装配方面模拟一遍，顺序和工具要能到。根据结果迭代优化。

干涉检查在装配体模式下进行，检查静态干涉和碰撞。常见干涉点：按键导柱与上盖孔、螺丝柱与 PCB 孔、止口与卡扣配合处。发现干涉后，调整配合间隙或修改零件形状，例如导柱与孔单边间隙 0.1mm、螺丝柱与 PCB 孔间隙 0.2mm。模具可行性验证：对各零件做拔模分析，确认无负拔模；检查浇口、顶针位置合理；倒扣结构确认有行位或斜顶。装配可行性验证：模拟装配过程，确认装配顺序可行、螺丝刀操作空间足够、工具可达。根据验证结果迭代优化，直至设计合理可靠。杨杉研究了产品可制造性评价方法[18]，可进一步建立量化评价体系。

5.5 结构设计检查清单

设计定稿前需按检查清单逐项核对，避免遗漏。塑胶件检查：壁厚均匀、过渡平缓、脱模斜度满足要求、加强筋符合(A-B)/B<8%、圆角 R≥0.3mm、螺丝柱孔径与自攻螺丝匹配、无负拔模。装配检查：止口公母配合正确、卡扣扣合量 0.35~0.6mm、螺丝四角分布、装配方向单一、防错设计到位。声学检查：喇叭骨位限位、泡棉密封、出音面积 12%~15%、隔板分隔喇叭腔与电池仓。接口检查：充电孔、音频孔尺寸与连接器匹配、避让焊盘≥0.8mm。可制造性检查：无倒扣或已设计行位斜顶、浇口顶针位置合理、铝件孔距孔径满足冲压要求。CAE 检查：关键件应力位移在许用范围内。按清单逐项确认后，设计可进入模具开发阶段。

第 6 章 总结与展望

6.1 工作总结

本设计完成了小型智能音箱的结构设计与可制造性优化。尺寸85×85×100mm，有交互灯光、语音键、音量加减键。通过竞品拆解做参考，完成外观评审和堆叠，用 SOLIDWORKS 做了上盖、外壳、主体、下盖、各类按键、主板隔板、隔板、电池压板及止口、螺丝柱、卡扣等。按 DFMA 做了可制造性优化，做了塑胶和铝件工艺分析，用 CAE 验证了强度刚度。主要工作包括：第 2 章对天猫精灵 AI 助手进行拆解分析，总结结构布局、连接方式、声学设计、维护性设计等启示；第 3 章完成外观方案、3D 建模、堆叠设计；第 4 章完成壳体、声学、按键、内部结构件、装配结构详细设计，输出零件图和装配图；第 5 章完成 DFA 优化、塑胶铝件可制造性分析、CAE 静力学分析、干涉检查及设计验证。设计输出满足任务书要求，可为小型智能音箱开发提供完整技术方案。

6.2 创新点与应用价值

创新点：把 DFMA 贯穿到小型智能音箱结构设计全流程，从竞品拆解到结构设计、可制造性分析均按 DFMA 原则执行；结合塑胶规范和铝件工艺做多材料可制造性分析，壳体可选塑胶或铝材，分别给出工艺约束；用模块化思路做系统化、标准化设计，壳体、声学、按键、内部结构件、装配结构分块设计，便于维护和系列化扩展。应用价值：可为小型智能音箱开发提供技术方案，对消费电子结构设计有参考价值；设计检查清单和图纸清单可直接用于项目评审；CAE 分析方法和可制造性分析流程可推广至同类产品。

6.3 不足与展望

声学仿真、模具详细设计还有提升空间。本设计未做声学仿真，穿孔板参数主要参考文献和竞品；模具方面未做 Moldflow 模流分析，浇口和冷却系统可进一步优化。后续可做：用声学软件如 COMSOL、LMS Virtual.Lab 优化穿孔板参数，提升音质；用 Moldflow 做模流分析，验证浇口位置、缩水、翘曲；做样机试制和测试，验证装配可行性和可靠性；做系列化、平台化开发，在现有结构基础上衍生不同尺寸和功能的产品。

6.4 本章小结

本章对论文工作进行了总结，归纳了主要完成内容、创新点与应用价值，指出了声学仿真与模具详细设计方面的不足，并提出了后续改进方向。设计成果可为小型智能音箱开发提供技术参考。

结论

本设计完成了小型智能音箱的结构设计与可制造性优化。产品尺寸85×85×100mm，功能有交互灯光、语音对话、音量调节。设计采用竞品拆解加工程实践的方法，以天猫精灵 AI 助手为参考，完成外观评审、堆叠设计、结构详细设计。壳体、声学、按键、内部结构件及装配结构均按塑胶设计规范执行，料厚、脱模斜度、加强筋、止口、螺丝柱、卡扣等关键参数有据可依。可制造性方面应用 DFA 原则，做了塑胶件和铝件工艺分析，用 CAE 验证了主体和下盖的强度刚度，做了干涉检查和设计验证。设计输出包括零件图、装配图及设计检查清单，可为小型智能音箱开发提供完整技术方案，对电子产品结构设计有参考价值。

致谢

时光荏苒，大学的学习生涯即将画上圆满的句号。在本毕业设计的完成过程中，我首先要向我的指导老师致以最诚挚的谢意。从课题选题、方案设计到结构建模、性能测试与论文撰写，老师都给予了我悉心的指导和耐心的点拨，使我能够顺利攻克设计过程中的诸多难题，严谨务实的治学态度也让我受益匪浅。同时，感谢学院各位任课老师多年来的谆谆教诲，为我打下了坚实的专业理论基础。

感谢同窗好友在学习和生活中给予我的陪伴与帮助，在课题讨论和实验测试中相互鼓励、共同进步。感谢家人一直以来的理解、支持与默默付出，为我完成学业提供了最坚实的后盾。这段宝贵的求学经历将成为我人生中珍贵的财富，在今后的工作和学习中，我将带着所学知识与这份感恩之心不断前行，努力实现自身价值。

参考文献

[1] 刘峣,李妍,叶森.国内外智能家居研究进展与趋势——基于 2013—2023 年核心期刊文献的 CiteSpace 可视化分析[J].木材科学与技术,2024,38(03):78-87.

[2] Giovanni Formentini CA,Núria Boix Rodríguez,Claudio Favi.Design for manufacturing and assembly methods in the product development process of mechanical products: a systematic literature review[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2022,120:4307-4334.

[3] Naiju C.D. DFMA for product designers: A review[J].Materials Today: Proceedings,2021,46(17):7473-7478.

[4] 王全保.面向智能家居的无线声控系统的设计与实现[D].东南大学,2015.

[5] 陈宁宁.一种嵌入式音箱扬声器系统结构设计与实现[J].电声技术,2024,48(02):52-54+94.

[6] 唐波.基于可制造性设计规范的工艺检查系统研发分析[J].科技创新与生产力,2020,(11):55-57.

[7] 朱乐,王佳,杨莲莲.基于 DFM 的铝合金箱体类零件可制造性分析[J].光电技术应用,2025,40(02):61-66.

[8] 李杰林,马玉林,王大伟,等.可制造性设计在系统工程过程中的应用研究[J].航空电子技术,2022,53(02):11-18.

[9] 漆中华,金涛,陈威,等.面向复杂电子设备的产品可制造性体系构建方法[J].电子机械工程,2024,40(06):1-7+14.

[10] 钟元.面向制造和装配的产品设计指南[M].第 2 版.北京:机械工业出版社,2016.

[11] 葛俊,邱小军.穿孔板声阻抗模型研究[J].南京大学学报(自然科学版),2010,46(4):379-386.

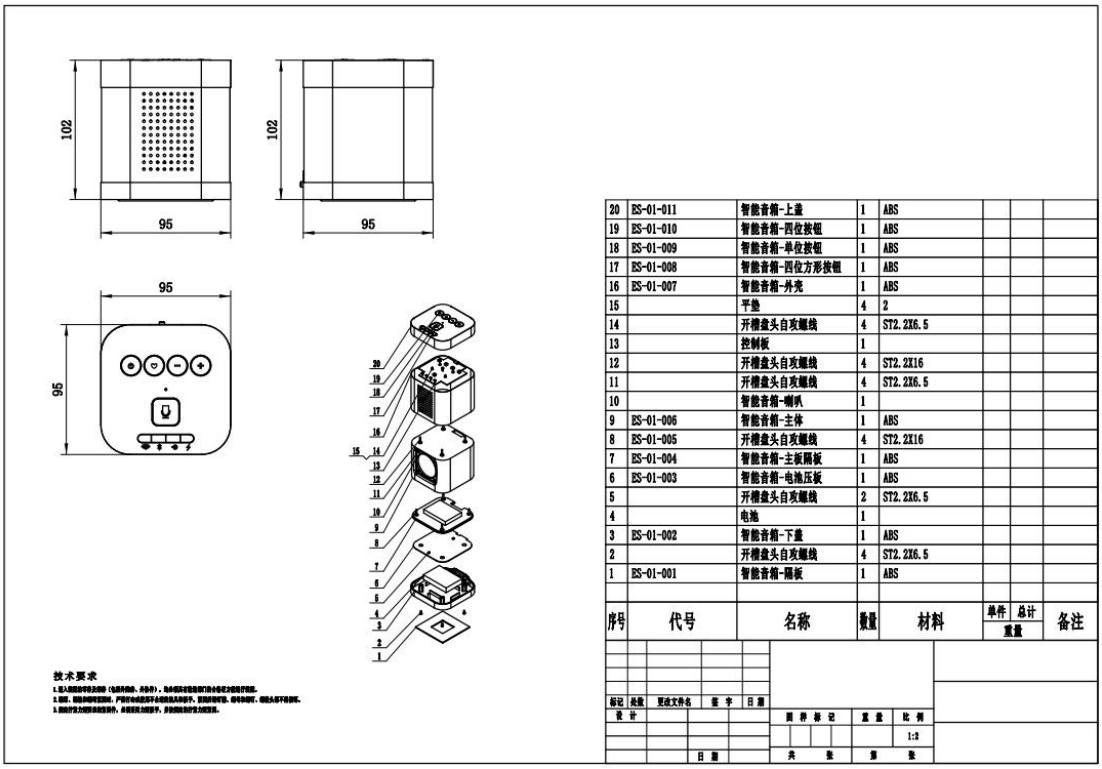
[12] 马少锋,姚磊.注塑模拟技术的塑料件结构及工艺分析[J].模具制造,2025,25(11):144-146.

[13] 樊玲,谢治军.基于 CAE 辅助成型技术的车用刹车仪表灯罩成型工艺优化[J].塑料科技,2025,53(05):152-157.

[14] 谢海深,陆玉宝,李睿,等.喇叭盖的成型工艺分析与注射模具设计[J].塑

料,2025,54(02):166-172+183.
[15] 陈田,任龙军,业红玲.基于 Moldflow 的手机外壳注塑成型仿真与优化[J].安阳工学院学报,2024,23(06):35-40.
[16] 黎恢来.产品结构设计实例教程——入门、提高、精通、求职[M].北京:电子工业出版社,2013.
[17] 杨小勇,孟祥旭,曹新鑫,等.基于 Moldflow 的无人机上壳注塑成型优化分析[J].塑料,2023,52(02):156-160.
[18] 杨杉.ZC 公司产品可制造性评价方法的研究与应用[D].西安工业大学,2019.
[19] 胡同花,吕满金.面向智能家居的无线传感器网络路由协议优化研究[J].电子技术与软件工程,2021(04):33-34.
[20] 戴志杰,王宇昊,杨涛,等.基于 3DDFM 二次开发的钣金机箱可制造性分析[J].机械设计与制造工程,2023,52(7):26-30.

附录

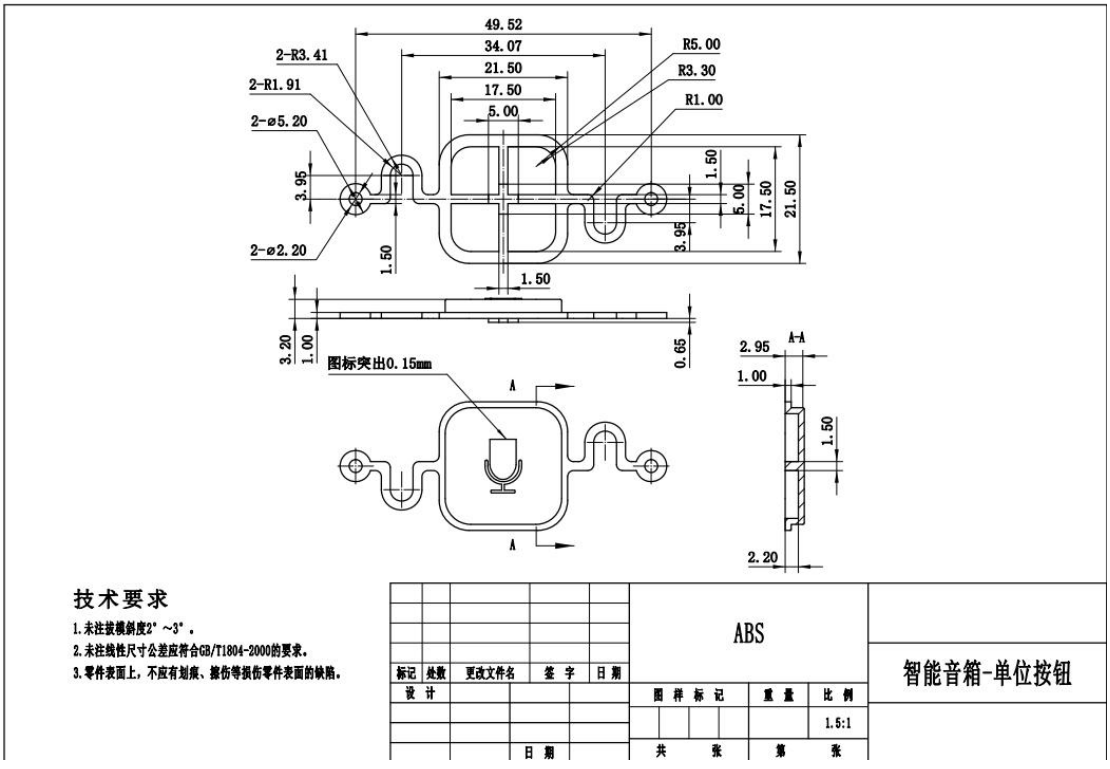


序号	代号	名称	数量	材料	单件	总计	备注
20	ES-01-011	智能音箱-上盖	1	ABS			
19	ES-01-010	智能音箱-四位按钮	1	ABS			
18	ES-01-009	智能音箱-单位按钮	1	ABS			
17	ES-01-008	智能音箱-四位方形按钮	1	ABS			
16	ES-01-007	智能音箱-外壳	1	ABS			
15		平垫	4	2			
14		开槽盘头自攻螺钉	4	ST2.2X6.5			
13		控制板	1				
12		开槽盘头自攻螺钉	4	ST2.2X16			
11		开槽盘头自攻螺钉	4	ST2.2X6.5			
10		智能音箱-喇叭	1				
9	ES-01-006	智能音箱-主体	1	ABS			
8	ES-01-005	开槽盘头自攻螺钉	4	ST2.2X16			
7	ES-01-004	智能音箱-主板隔板	1	ABS			
6	ES-01-003	智能音箱-电池压板	1	ABS			
5		开槽盘头自攻螺钉	2	ST2.2X6.5			
4		电池	1				
3	ES-01-002	智能音箱-下盖	1	ABS			
2		开槽盘头自攻螺钉	4	ST2.2X6.5			
1	ES-01-001	智能音箱-隔板	1	ABS			

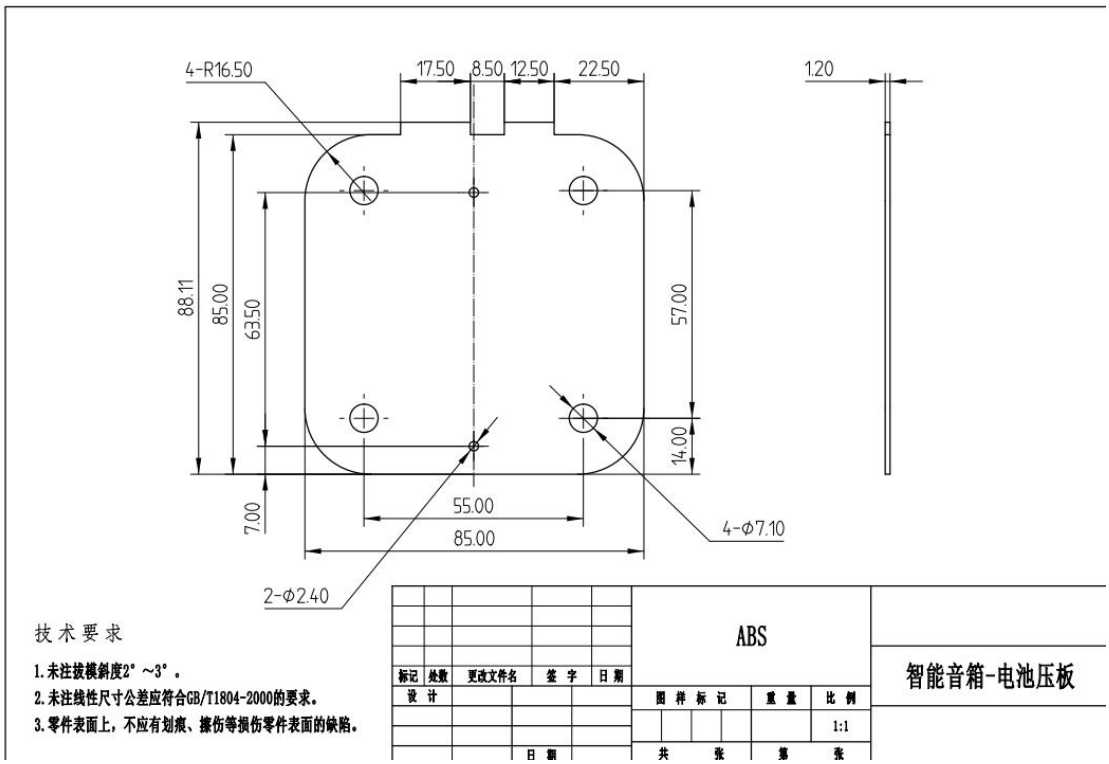
标记	处数	更改文件名	签字	日期
设计				
			日期	

图样标记	重量	比例
		1:3
共 张	第 张	

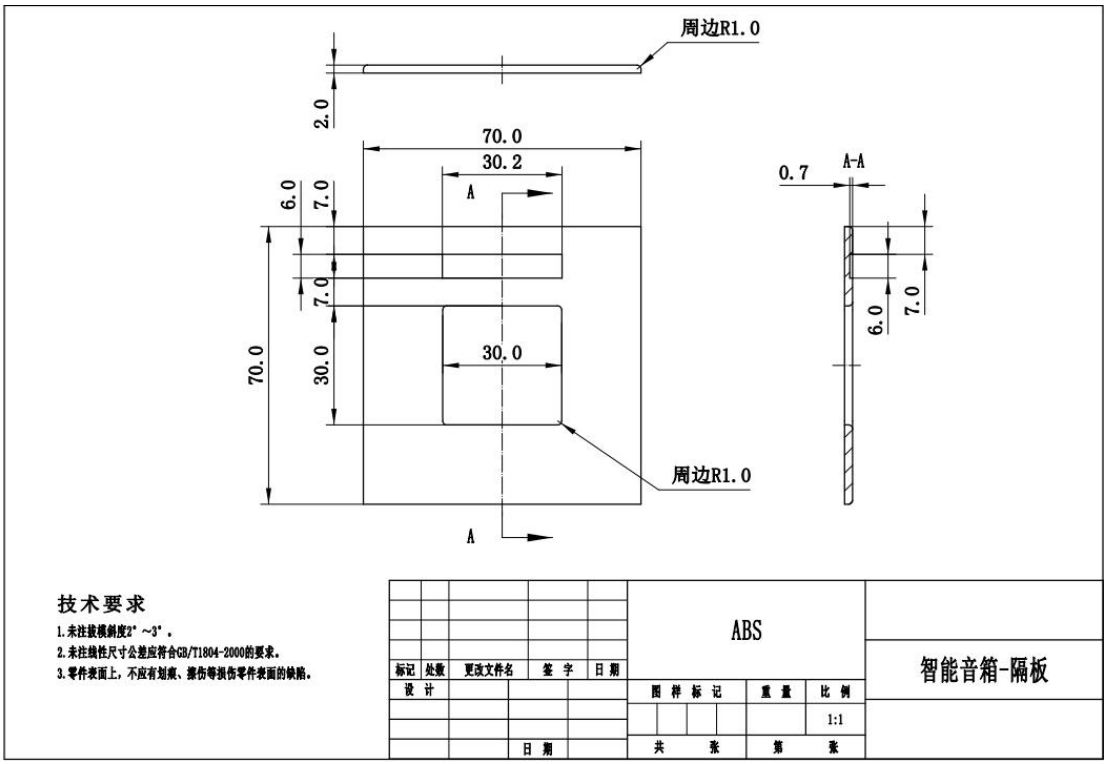
附录图 1 智能音箱装配 2D 图



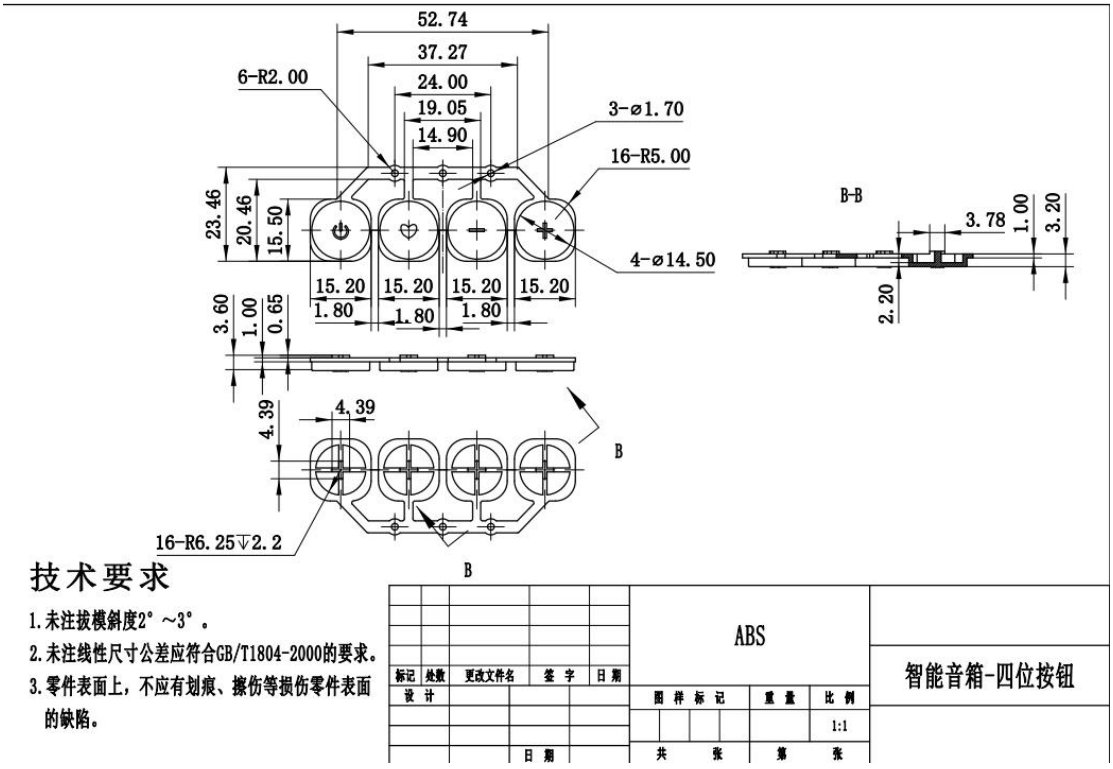
附录图 2 智能音箱单位按钮 2D 图



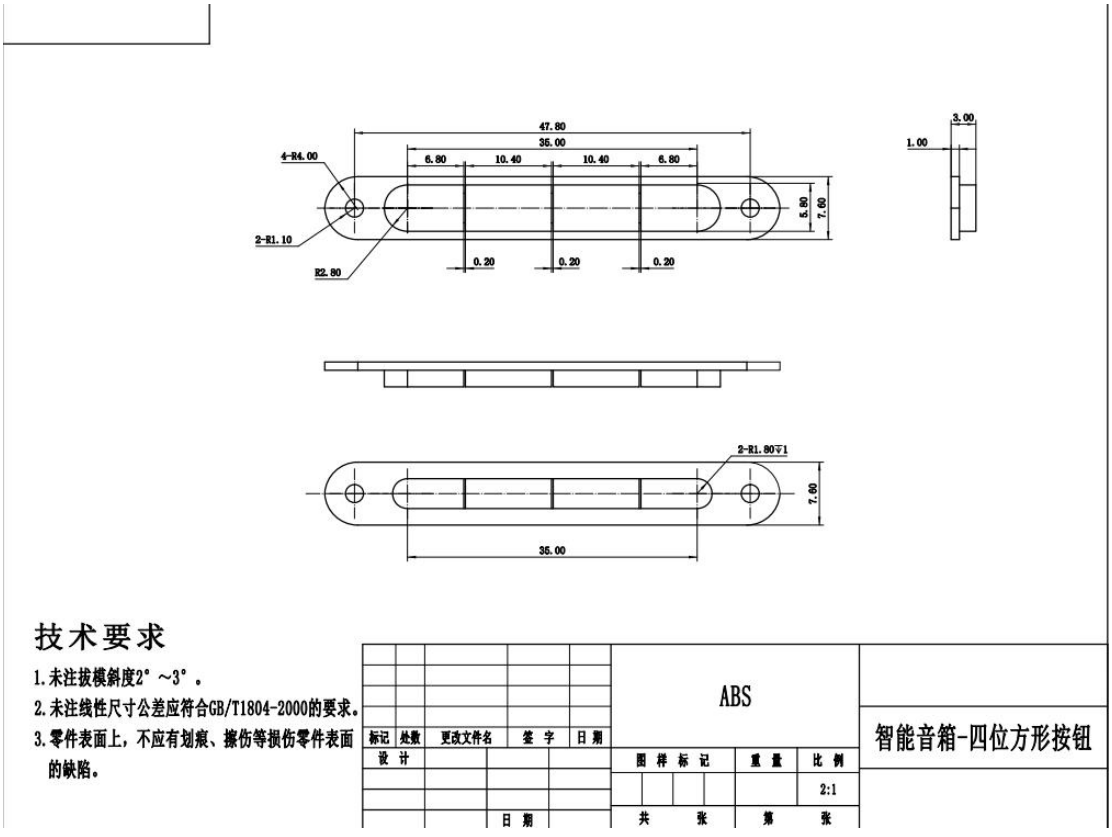
附录图 3 智能音箱-电池压板 2D 图



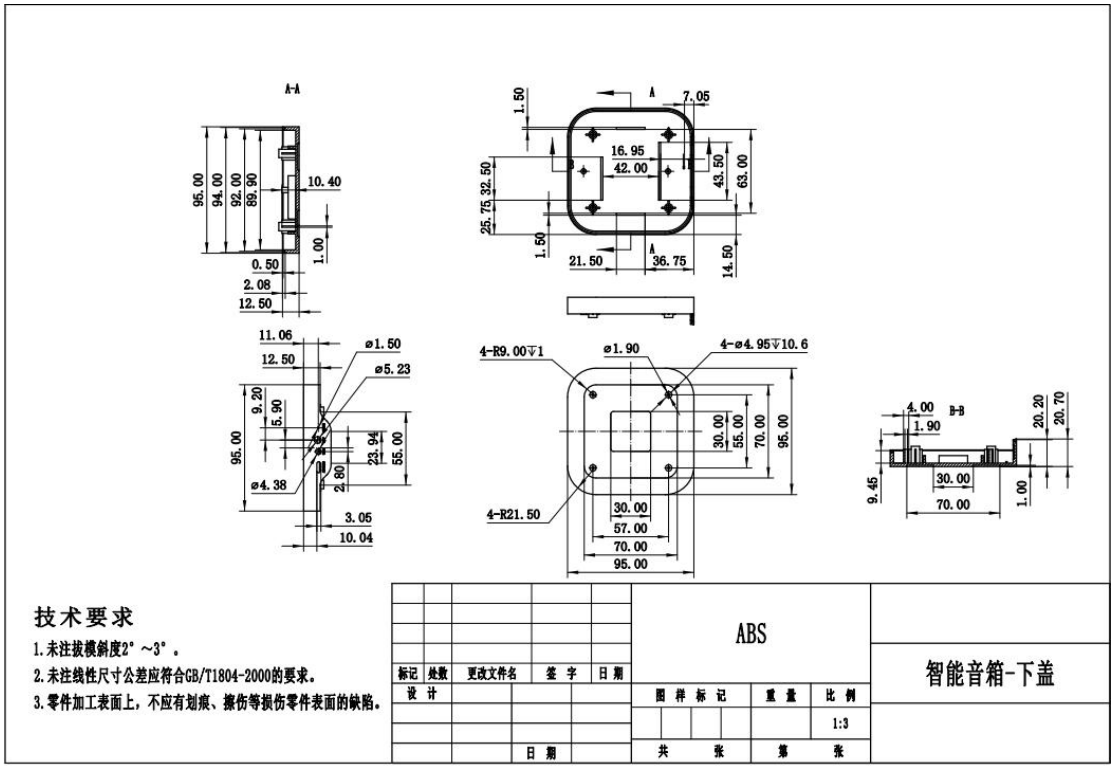
附录图 4 智能音箱-隔板 2D 图



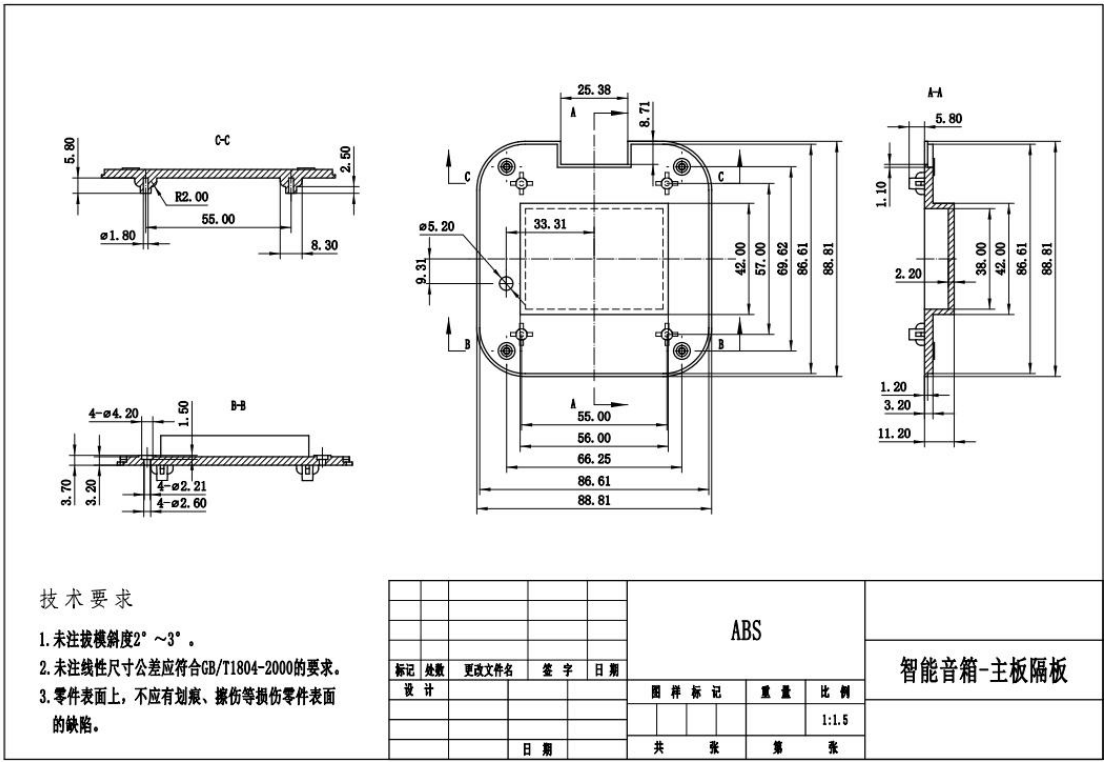
附录图 5 智能音箱-四位按钮 2D 图



附录图 6 智能音箱-四位方形按钮图



附录图 7 智能音箱-下盖



附录图 8 智能音箱主板隔板 2D 图