

# 低压智能断路器技术集成与制造研究

刘雅方

(上海正泰智能科技有限公司 上海 201600)

**摘要:** 低压智能断路器的功能主要包括远程控制、定时控制、功率监测、监测设备状态、电压检测、电量监测、剩余电流保护、过欠压保护、环境监测等。本文所述的低压智能断路器采用紧凑性的结构设计,主芯片选用 BGA 封装芯片,其他元器件选型优先选用 SMD 器件,采用 SMT 自动化焊接工艺,接线座 /ZH1.5-2A/ 单排 /DIP 导入通孔回流 PIP 技术,绕线插件电阻由人工插件波峰焊焊接改为 SMT 工艺,不仅减少了人力投入,还能提高产品焊接质量和产品可靠性。

**关键词:** 智能断路器; BGA; 通孔回流 PIP 技术; 焊点

## 0 引言

低压智能断路器的开发有利于解决传统断路器不可知、不可控、功能不完善、可靠性差及智能化程度低的问题,另外,智能断路器更有利于进行科学有序的管理。本项目选用 BGA 封装芯片,研究其焊接不良原因并进行工艺优化改进;导入 THC 器件通孔回流焊工艺,实现自动化焊接,并对焊点质量做可靠性试验检查。从前期 PCB 设计、DFM 评审、物料选型、工艺路线设计等,到小批量试制,优化改善 BGA 焊接不良和晶圆电阻焊点少锡等问题,直至问题点关闭,同时优化工艺路线。此项目在时间节点内顺利完成 PCBA 的转产。

## 1 功能需求

低压智能断路器适用于交流 50Hz、额定电压 230/400V、额定电流至 100A 的线路中。微型智能断路器产品功能需求包括:

(1) 保护功能。包括剩余电流保护,过、欠压保护,缺相保护,过频、欠频保护,过载保护等。

(2) 测量功能。包括电流测量,电压测量,功率测量,电量测量(有功测量、无功测量),频率检测,谐波检测,环境温度监测、接线端子监测等。

(3) 重合闸功能。包括本地自动或手动分合闸,远程控制分合闸。

(4) 通讯功能。包括无线蓝牙通讯、RS485 通讯,事件上报,通讯对时,通信接口与外部设备实现组网。

## 2 总体设计方案

### 2.1 技术指标

设计的低压智能断路器应该符合 CQC1149-2020《具有远程控制功能的带过电流保护的剩余电流动作断路器(RC-RCBO)》<sup>[1]</sup>和 NB/T 42149-2018《具有远程控制功能的小型断路器(RC-MCB)》标准<sup>[2]</sup>,主要技术指标见表 1。

### 2.2 基本原理

基本原理框图见图 1。主电源分为两路 AC/DC,一路 BUCK 开关电源,一路反激式开关电源。两路电源同步供电,目的是提供脱扣单元和驱动单元同时分闸所需要的能量。两路 AC/DC 开关启动时间为:BUCK 电源先启动,反激式电源后启动,时差为 10ms。完成启动后电压整合在一起,输出 DC15V 电压;DC15V 同时为脱扣单元、驱动单元、DC-DC 装置供电。脱扣单元:剩余电流产生后脱扣单元执行脱扣处理;驱动单元:电动机分合闸控制;DC-DC:进行电压转换,降压型稳压电源输出 DC5V 电压。DC5V 为 RS485 通讯单元供电,同时提供 LDO 电压;RS485 通讯单元内置隔离电源,一路上行提供给外部终端、一路下行与其他产品进行通讯。LDO3.3V 稳压电源为 MCU 模块、漏电指示灯、手自动/状态指示灯、模拟漏电控制、计量检测和采样单元等提供电源电压。

MCU 处理单元:对各种信号进行采集、运算和处理,是整个原理的核心。

漏电信息指示单元:正常运行指示状态和异常漏

表1 主要技术指标

项目	技术指标
电参量测量功能	电压、电流测量误差 0.5 级；有功、频率、功率因数误差 1 级
重合闸功能	接收到分合闸指令后，合闸时间 < 3s，分闸时间 < 2s
剩余电流保护功能	断路器可以实时监测线路中的剩余电流数据，当线路发生漏电情况，可在规定时间内进行脱扣，额定剩余电流可设定一般型和延时型
过欠压保护功能	过压阈值：255 ~ 275V 可调，默认 275V；欠电阈值：120 ~ 165V 可调，默认 165V；精度：±5%。断路器有过欠压保护功能，当电压持续 10s 保持正常值后断路器将自动合闸
电源	60% $U_n$ ~ 130% $U_n$ 正常工作，电源启动时间小于 15ms
远程控制功能	通过手机或 PC 端平台对线路智能断路器进行分合闸控制
定时控制功能	通过手机或 PC 端平台对线路智能断路器进行定时分合闸控制
通讯功能	支持 Modbus、DL/T645 等协议，支持在线升级。通讯速率不低于 19200bps
静电放电	严酷等级 4：接触放电 8kV，空气放电 15kV。试验时产品无误动作，试验后产品正常运行
射频电磁场辐射	严酷等级 2：3V/m
电快速瞬变脉冲群	严酷等级 4：电源端 4kV，信号端 2kV。试验时产品无误动作，试验后产品正常运行
浪涌	严酷等级 4：共模 4kV，差模 2kV。试验时产品无误动作，试验后产品正常运行
射频场感应传导骚扰	试验等级 2：3V/0.15MHz ~ 80MHz/150Ω。验收：符合 9.12.12.1d 的要求
电压暂降和短时中断	试验等级 2 类：0% 额定工作电压持续时间 0.5 周期和 1 周期，70% 额定工作电压持续时间 25 周期
高低温性能	高温：(70±2)℃；低温：(-40±2)℃。试验时产品正常运行
介电强度	主电路分闸状态进出线间：2500V/1min；辅助和控制：2000V/1min。不应发生闪络或击穿

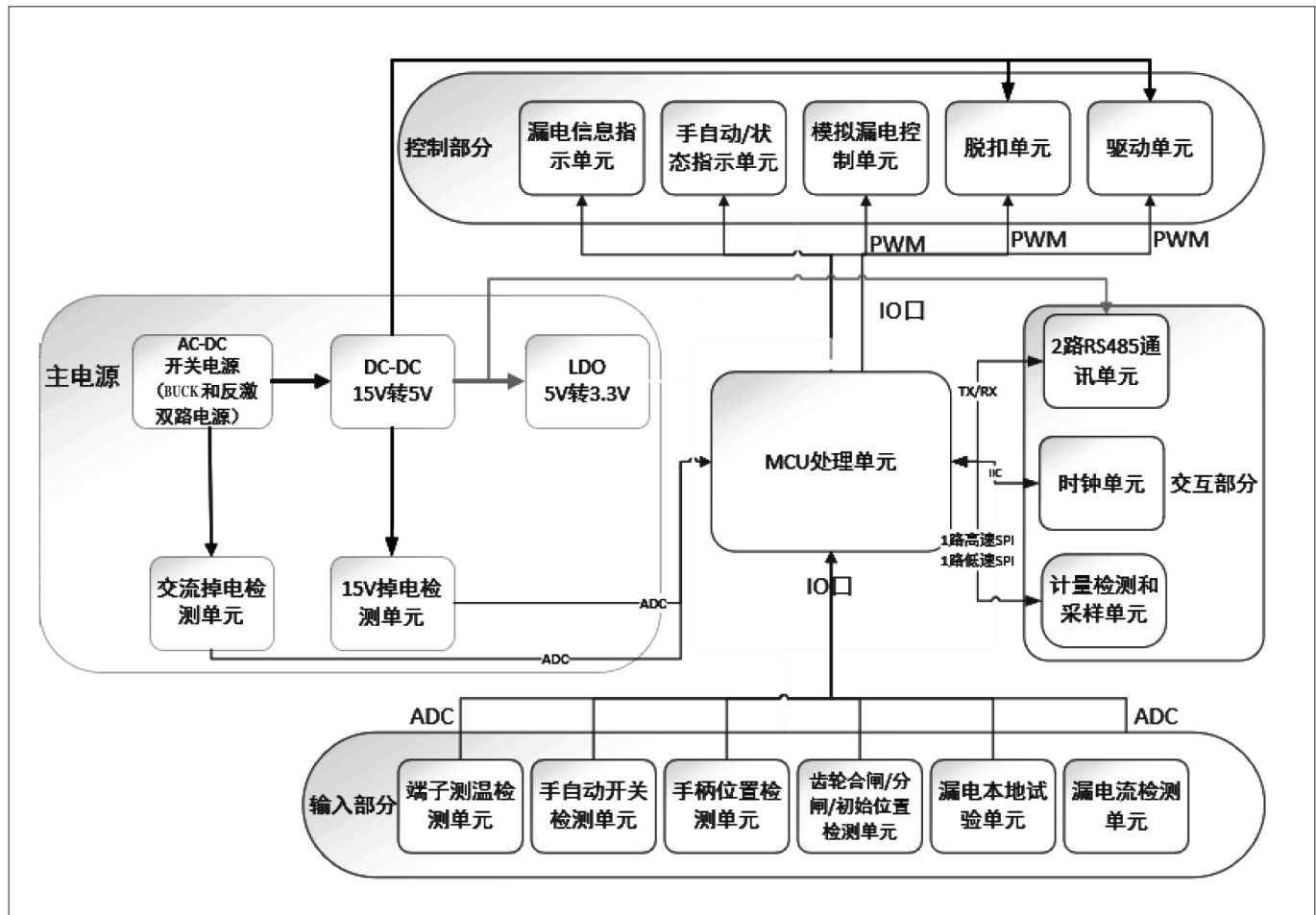


图1 原理框图

电发生时指示状态。

手自动状态指示单元：根据指示灯识别当前手/自动模式。

模拟漏电控制单元：对本地漏电信号进行控制处理，如漏电功能自检，确认漏电功能是否正常。

时钟单元：提供准确的时间供 MCU 处理事件。

端子测温检测单元：对接线端子进行温度检测。

手自动开关检测单元：判断产品处于何种模式，如自动模式下产品自动分合闸，手动模式下手动进行分合闸。

手柄位置检测单元：识别微型断路器手柄处于分闸/合闸状态。

齿轮合闸/分闸/初始位置检测单元：检测当前齿轮停止在何种位置。

漏电本地试验单元：模拟漏电功能是否正常。

漏电检测单元：判断漏电信号，以及确认漏电真实性。

### 3 零部件选型及工艺分析

#### 3.1 主芯片选型

小型断路器结构空间有限，PCB 设计空间紧凑，要求主控芯片在主板中占用的空间小，同时又需要满足功能配置要求。主芯片选择 GD32F450VGH6，核心参数如下：

(1) 电压范围为 1.8 ~ 5.5V。

(2) 断路器工作温度为 -25 ~ +85℃，故主芯片温度选择 -40 ~ +105℃。

(3) 处理器内核优选 M0 核或 M0 + 核。

(4) FLASH 存储器优选 32K 及以上，可推荐 16K；RAM 优选 8K 以上，可推荐 4K；最好有 EPPROM。

(5) 功耗低，在外设启动情况下 < 1mA，低功耗运行时 < 40μA（唤醒口）。

(6) 外设 ADC 采样数量 ≥ 4 路，位数 ≥ 12bit，ADC 要求带 ADC limit 功能（具有触发事件的功能，用于掉电检测）；PWM ≥ 2 路，UART ≥ 1 路，GPIO ≥ 13 种。

#### 3.2 元器件选型

元器件选型优先选用 SMD 封装，产品元器件选型约 85% 为 SMD 封装，但绕线电阻与接线座初期选型为 DIP 器件。因结构紧凑，PCB 布局空间受限，DIP 器件比表面贴装器件占用 PCB 的空间大，

同时绕线电阻在人工插件前需进行预成型处理，增加了人力投入，故在满足产品性能的同时推荐选用 SMD 封装电阻。因 DIP 元件在可靠性方面要比相应的 SMT 元件高很多，在强烈拉拽、挤压或热冲击条件下，其均能承受且不易脱离 PCB，故仍选用 DIP 器件。

#### 3.3 工艺分析

##### 3.3.1 封装工艺

BGA 是一种高密度表面装配封装技术。目前的主板控制芯片组多采用此类封装技术，材料多为陶瓷。BGA 封装器件的 I/O 数主要由封装体的尺寸和焊球间距决定。由于 BGA 封装的焊球以阵列形式分布在封装基片下面，因而可极大地提高器件的 I/O 数，缩小封装体尺寸，节省组装的占位空间，提高了贴装成品率，降低了成本。BGA 的阵列焊球与基板的接触面大，有利于散热；BGA 阵列焊球的引脚很短，缩短了信号的传输路径，减小了引线电感、电阻，因而可改善电路的性能。。

BGA 的钢网脱模能力与钢网开孔方式<sup>[3]</sup>有关，钢网的脱模能力主要取决于以下条件：①开孔的宽厚比 > 1.5；②开孔面积比 > 0.66；③五球定律，即开孔的最小尺寸能同时通过 5 个并排的锡球。为了提升钢网脱模效果，0.5Pitch 以下（即引脚间距小于 0.5mm）的钢网可采用特殊处理钢网，如 FG 钢网、纳米钢网。

设置合理的回流炉温曲线，制作炉温板，可以获得 BGA 焊点的准确炉温信息；避免由于 BGA 温度与测试曲线相差大引起的焊接温度差异导致的焊接不良。

焊接完成后对 BGA 焊点质量进行 X-Ray 检查，检查焊点有无空焊、连锡短路，并进行面积空洞率计算、焊盘分析等，保证 BGA 焊点的可靠性。

##### 3.3.2 通孔回流工艺

针对接线座/ZH1.5-2A/单排/DIP，设计焊盘边缘距离为 0.6mm，采用波峰焊焊接时，连锡短路风险较高；且此 DIP 器件属于有极性器件，人工插件时不易识别、有极反风险，故评估后决定使用通孔回流 PIP 技术工艺。

### 4 PCB 板结构设计

PCB 采用单板结构、双面混装的安装方式，即 THC 在 A 面，A、B 面都有 SMD 器件。为充分利用



基板,提高生产效率、方便加工,采用4拼板设计,单个PCB采用双面对开的V型槽与工艺边相连。应力敏感器件如MLCC器件、玻璃二极管、片式晶振等与V-CUT线之间的距离应满足DFM要求,DIP元器件焊点与周围SMD元器件焊盘之间的距离预留3mm以上。PCB布局设计时更需注意BGA的排布<sup>[4]</sup>,为了避免PCB板回流焊变形引起BGA焊接空焊,不宜将其排布在PCB板中间,宜靠工艺边排布。但应注意分板位置,BGA距离V-CUT线应 $\geq 10\text{mm}$ ;BGA与周边元器件应保持5.0mm的维修空间。当背面有BGA器件时,正面不应在该BGA器件5mm的投影范围内排布元器件,以免影响焊点X-Ray检查;宜排布在锡二面,并应避免二次过炉。BGA四周应有丝印框,便于AOI检查焊接偏移,极性标示点放在维修区域内;底部不宜有丝印,避免影响PCB板面的平整度。

焊盘设计要求:PCB上每个锡球的焊盘中心与BGA底部相应的锡球中心相吻合,每个锡球采用独立焊盘,焊盘间采用最短引线相连。焊盘尺寸通常比球径小15%~20%,而PCB焊盘封装设计要求尽可能与BGA本体封装焊盘保持一致,这样可以提高焊点的可靠性。导通孔、盲孔不应加工在焊盘上,以免影响PCB表面的平整度或出现渗锡问题,焊盘公差应 $\leq 10\%$ 。

为了提升BGA焊接强度,应采用NSMD设计(非防焊限定焊垫设计);同时为保证PCB板面的平整度,阻焊漆厚度不应高于焊盘0.025mm。BGA焊接要求焊盘共面性高,同时为避免失效缺陷,控制成本,优先使用OSP(有机保焊膜)表面处理的PCB,次之选经过热风整平处理的PCB。

## 5 产品试制与工艺优化

### 5.1 产品试制中不良现象分析

产品在小批量试制中出现工艺焊接不良<sup>[5]</sup>现象,经红墨水、切片、X-Ray试验检测,均发现芯片出现焊点间相似性连锡现象,不良率约17.14%。BGA焊点连锡短路的原因可能有:

- (1) PCB设计问题,如设计中焊盘之间的间距过小,其他电路设计问题也可能导致短路;
- (2) PCB焊盘或者BGA的锡球拒焊,在回焊的过程中被污染;
- (3) 焊膏印刷不良,锡量太多;

(4) 贴片偏移、设备振动或装配人员在生产过程中有重新拨正过,然后再过炉,从而使BGA连锡;

(5) 助焊剂不均匀或过多;

(6) BGA边角翘曲或拱起等原因引起,BGA的“笑脸”与印刷电路板上的“哭脸”强烈挤压BGA的焊球,以致几乎短路(一般可以降低回焊炉升温的速率,或者将BGA预热烘烤,消除其热应力,从而改善翘曲变形)。

除上述焊接不良外,还出现SMD晶圆电阻焊点宽度不符合允收标准的问题。经分析,可能由钢网开孔不合理、印刷少锡、锡膏变质等原因引起;可通过优化钢网开孔方式和设置印刷参数来改善。

试制中接线座/ZH1.5-2A/单排/DIP采用波峰焊接,出现连锡短路问题。经测量,引脚中心间距为1.5mm,单根插针直径为0.5mm;焊盘设计时单根针的孔径为0.6mm,焊盘大小为0.9mm $\times$ 1.8mm,两焊盘边缘间距为0.6mm,焊盘间距太小,引起连锡短路。可通过更改焊接工艺解决连锡短路问题。

### 5.2 工艺优化

#### 5.2.1 BGA焊接优化

解决BGA短路问题,可以从以下方面改善优化:

(1) PCB设计时,需要根据BGA规格和PCB的布局设计规则,合理设置焊盘之间的间距、接地/电源等线宽和线距等参数,避免设计缺陷导致BGA短路问题的发生;

(2) 检查并确保焊料、焊盘均匀和适量,避免过量使用焊料;

(3) 制作专用炉温板,正确设置合理的温度和时间;

(4) 确保回流焊过程中无外来干扰,避免振动和其他环境变化干扰主芯片BGA焊接;

(5) 在回流焊过程中加入氮气,可以改善焊接质量,提高焊接强度,提高焊接效率,减少焊接损耗,提高焊接熔池的稳定性,减少焊接温度的变化。

此外,结合SPI锡膏印刷数据、PCB制板、钢网开孔方式及焊点形态,可做如下改善<sup>[6]</sup>:

- (1) 优化钢网开孔方案,焊盘由方形开孔改为圆形开孔,改善锡膏脱模质量;
- (2) 锡膏印刷工序中,增加钢网擦拭频率;
- (3) 印刷刮刀前后各1次,解决个别点位少锡、脱模困难的问题;
- (4) 加强SPI检测参数管控,制作专用炉温板(此

问题跟进两次批量试制,焊接不良问题关闭)。

### 5.2.2 优化钢网开孔方式

插件电阻改 SMD 晶圆电阻后,对焊点质量进行切片检查,依据圆柱体帽形端子焊接要求<sup>[7]</sup>,检查结果如下:

(1) 最小侧面连接长度  $D=1.02\text{mm}$ ,大于端子长度  $R(1.68\text{mm})$  的 50%,焊接质量符合允收标准;

(2) 最小末端连接宽度  $C=1.27\text{mm}$ ,略小于端子直径  $W(2.79\text{mm})$  的一半,不满足允收标准。

焊盘尺寸为  $3.2\text{mm} \times 2.3\text{mm}$ ,原钢网外扩  $0.1\text{mm}$ ,内切  $0.1\text{mm}$ ,内侧  $45^\circ$  切角,钢网厚度  $0.12\text{mm}$ 。优化钢网开孔方式后:外扩  $0.25\text{mm}$ ,内切  $0.1\text{mm}$ ,内侧  $45^\circ$  切角,焊盘两侧单边外扩  $0.15\text{mm}$ ,钢网厚度  $0.13\text{mm}$ 。锡量在原来基础上增加 26.2%,焊接长度增加  $0.22\text{mm}$ ,远大于端子长度  $R(1.68\text{mm})$  的 50%,焊接质量符合允收标准;最小末端连接宽度  $C=1.6\text{mm}$ ,比改善前焊接宽度多  $0.33\text{mm}$ ,大于端子直径  $W(2.79\text{mm})$  的一半,满足焊接质量的允收标准。

### 5.2.3 PIP 技术导入

THC 器件采用通孔回流工艺,对 DFM 要求高,器件选型方面封装和引脚需满足 PIP 技术要求。通过反复的验证,钢网开孔方式达到以下要求:锡量充足,插件时不过度干扰锡膏,润湿回收,引脚长度刚伸出  $1 \sim 1.5\text{mm}$ 。接线座 /ZH1.5-2A/ 单排 /DIP 经过反复的试制验证,最终成功导入 PIP 技术。

## 6 结语

本文研究制造的低压智能断路器改善了传统断路

器的功能和性能不完善的缺点。本文从试制过程中出现的问题入手,研究 THC 器件导入 PIP 技术,确定工艺变更后的焊点检查标准,并推广应用到其他产品。针对 BGA 焊接不良问题,本文分析了连锡短路的原因及改善对策,对其他产品上 BGA 的焊接工艺可提供参考依据。后续可在多个项目及不同类型的 BGA 上继续深入探究,如 BGA 枕头效应、气泡、焊点开裂等问题。

### 参考文献:

- [1] 具有远程控制功能的带过电流保护的剩余电流动作断路器(RC-RCBO):CQC1149-2020[S].
- [2] 国家能源局.具有远程控制功能的小型断路器(RC-MCB):NB/T 42149-2018[S].北京:中国电力出版社,2019.
- [3] 薛广辉.电子产品制造工艺解析之印刷制程[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2022:72-148.
- [4] 美国电子电路和电子互连行业协会.BGA设计与组装工艺的实施:IPC 7095D-WAMI CHINESE-2018[S].
- [5] 贾忠中.SMT工艺不良与组装可靠性[M].北京:电子工业出版社,2019:130-166.
- [6] 美国电子电路和电子互连行业协会.锡膏印刷要求:IPC-7527-2012[S].
- [7] 美国电子电路和电子互连行业协会.电子组件的可接受性:IPC-A-610H[S].

作者简介:刘雅方(1986.10-),女,汉族,河南周口人,本科,工程师,研究方向:仪表电器。