

# Root Cause Analysis and Improvement Strategies for Chip Package Failure-Induced Main Pump Trip in Nuclear Power Units

Zhou Hongqing Wang Shiqing Chen Lin

China General Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

## Abstract

This study investigates the root cause of a main pump trip incident at a Chinese nuclear power plant. The analysis identified a malfunction in the time-delay relay TEC2453 within the control circuit, which failed to perform its designed delay function. This malfunction triggered the main pump protection system during normal flow fluctuations, ultimately causing reactor shutdown. Further investigation revealed that the failure originated from an internal timer chip U3 with a malfunctioning timer. Through comprehensive root cause analysis and experimental verification, it was confirmed that prolonged exposure to moisture intrusion during long-term operation had caused chip packaging failure. This resulted in corrosion of bonding pads and subsequent open circuits between interconnect metallization strips. The paper presents the comprehensive root cause analysis process and proposes improvement strategies tailored to practical engineering applications.

## Keywords

time-delay relay; chip package failure; nuclear power unit; main pump trip

# 芯片封装失效导致核电机组主泵跳闸停堆根本原因分析及改进策略

周红清 汪世清 陈林

中广核核电运营有限公司, 中国·广东深圳 518000

## 摘要

针对国内某核电机组主泵跳闸事件进行原因分析, 确认为控制回路中的延时继电器TEC2453故障, 原设计延时功能失去, 导致正常流量波动工况下触发主泵保护引起停堆; 对延时继电器进行故障原因分析, 确认为内部定时器芯片U3故障; 进一步对定时器芯片失效进行根本原因分析, 并复现了故障现象, 确认是长期使用环境下, 湿气侵入器件塑封内部导致芯片封装失效, 引起键合焊盘腐蚀, 最终造成互联金属化条之间开路。本文主要介绍了根本原因分析过程, 并结合工程应用提出了改进策略。

## 关键词

延时继电器; 芯片封装失效; 核电机组; 主泵跳闸

## 1 背景

2014年12月, 国内某大型商运核电机组满功率运行期间执行定期试验, 按程序开启试验阀门后, 3号主泵一号轴封泄漏管线压力出现正常波动, 引起主泵轴封泄露流量波动, 流量高信号动作, 触发25秒延时跳主泵逻辑, 叠加延时继电器故障失去25秒延时功能, 直接导致3号主泵跳闸, 触发反应堆紧急停堆。确认事件原因后, 更换了故障延时继电器, 机组恢复正常运行。

## 2 延时继电器设备特性分析

故障延时继电器为TEC ELECTRICAL COMPONENTS Ltd厂家生产的TEC2453型号继电器。根据产品说明手册, 该继电器为电子延时继电器, 具有3种延时方式, 分别为前延时、后延时和循环延时; 延时时间范围有3种量程, 分别为0~9.9s、0~99s、0~990s。

TEC2453型延时继电器内部主集成芯片U3型号为EFB45305PV, 内部控制示意图如图1所示<sup>[1]</sup>。

主控芯片U3共16个引脚, 但未查询到该芯片的产品信息。根据U3芯片外围电路分析, 各引脚功能如表1所示。

【作者简介】周红清(1978-), 男, 中国云南大理人, 本科, 高级工程师, 从事核电仪控系统的设备管理及研究。

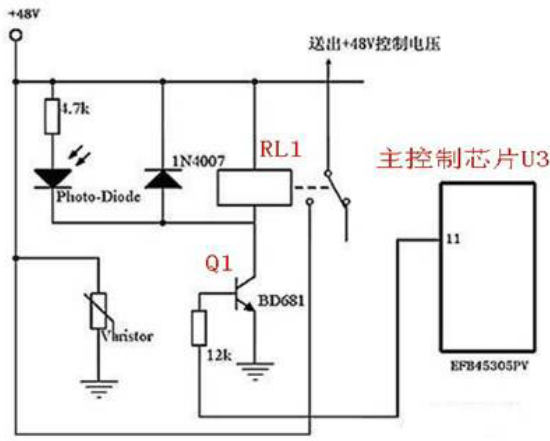


图 1 延时继电器 TEC2453 主芯片 U3 内部控制示意图

表 1 TEC2453 延时继电器 U3 控制芯片端口功能

引脚编号	说明	备注
1/16 并联	电源正端	12Vdc
8/12 并联	电源负端	
3	外接 2 个延时设定拨盘	
4		
5		
6	设定延时倍率, 即设定时间范围	6# 7# 时间倍率 时间量程
7		1 0 0.1 0 ~ 9.9s
		0 0 1 0 ~ 99s
		0 1 10 0 ~ 990s
9	设定延时方式, 即设定前延时、后延时或循环延时	9# 10# 13# 延时方式
10		0 0 0 前延时
13		0 1 1 后延时
		1 1 0 循环延时
14/15 并联	确定计时时刻, 该位状态改变时开始计时	
11	输出端	

经分析, 该芯片的外围输入信号包括模拟输入和数字输入。模拟输入包括 3、4、5 管脚, 用于配合芯片内部的施密特触发器产生时基脉冲方波, 方波占空比约为 50%, 时基脉冲的频率由延时继电器面板上的前两位置数开关设定, 时基脉冲由 4 管脚送入该集成块。数字输入包括 6、7、9、10、13、14、15 管脚, 用于确定计时倍率和延时方式 (前延时或后延时), 数字输入管脚的逻辑值由延时继电器面板上最后一位开关设定。

U3 芯片根据模拟输入和数字输入计算出延时时间并确定延时方式, 然后从 11 管脚适时送出控制逻辑电平, 控制继电器 RL1 动作。

### 3 延时继电器故障根本原因分析

#### 3.1 外观检查

延时继电器失效样品外观良好, 检查无异常, 分立器

件无明显损坏痕迹。外壳表面贴有绿色标识, 记录设备检查日期是 15/08/90, 表明该延时继电器 1990 年 8 月 15 日已安装至现场, 已使用 25 年。

#### 3.2 故障点确定

使用继电器测试系统对失效样品进行测试, 测试结果延时继电器已没有延时功能。

拨动拨码盘, 验证拨码盘是否异常, 拨码盘状态改变后, 延时功能仍然丧失, 表明不是由于拨码盘异常导致的延时功能丧失。

打开继电器外壳, 直接测量 U3 芯片输出 Pin11 的输出电压。正常情况下 Pin11 输出电压应为 0V, 待延时时间过后再输出高电平。首次测试时, U3 芯片的 Pin11 输出电压为 4.98V, 共启动 3 次, 测量值均为 4.98V。放置 5 分钟后第二次检测, Pin11 输出电压为 10.60V, 共启动 3 次, 测量值均为 10.60V。以上情况表明 U3 芯片存在异常。

更换同型号 U3 芯片后, Pin11 引脚输出正常, 即在继电器延时期间其输出为 0V, 只有设定的延时时间到达后, Pin11 才输出高电平, 延时继电器功能恢复。通过测试验证可知, TEC2453 型延时继电器故障原因为内部定时器芯片 U3 故障。

#### 3.3 U3 芯片故障原因分析

##### 3.3.1 X 射线结构检查

用显微镜对失效 U3 芯片进行外观检查, 器件表面标识清晰, 未见其他明显异常。采用微焦点 X 射线检测仪对失效 U3 芯片进行 X 射线结构检查, 失效芯片内部结构完整, 无明显异常或结构缺陷。

##### 3.3.2 管脚间 I-V 曲线测试

利用 QT2 晶体管图示仪对失效 U3 芯片进行管脚间 I-V 曲线测试, 并与正常参考芯片曲线进行对比, 结果显示故障芯片的第 8 管脚与 12 管脚之间开路, 而用于参考的正常芯片的 8 管脚与 12 管脚之间为二极管特性。如图 2、图 3 所示

##### 3.3.3 破坏性物理检查

去除芯片表面封装材料, 暴露内部芯片, 并进行观察。失效芯片表面未见击穿、烧蚀等失效痕迹, 但 Pin12、Pin13 管脚对应的内引线键合焊盘存在金属腐蚀及钝化层破裂的现象。经探针测试, Pin13 键合焊盘的金属腐蚀尚未影响到电连接性能, 但 Pin12 键合焊盘的金属腐蚀已造成键合丝与焊盘之间、键合焊盘两端相连的金属化条之间出现开路。

##### 3.3.4 故障复现验证

为确认 U3 芯片的失效是否与 Pin12 键合焊盘的腐蚀开路有关, 用以下方法进行验证:

首先将 1 只良品芯片的 Pin12 管脚剪断, 在外围电路上造成 Pin8 与 Pin12 开路, 并装入继电器内部进行测试验证。继电器通电后无动作, 与原始故障现象不符。表明芯片故障不是由 Pin8 和 Pin12 外围电路引起。

再采用微探针划割方式，将另一只良品芯片 Pin12 键合焊盘与一端金属化条之间切断，造成键合焊盘两端相连的金属化条之间开路，后装入继电器内部进行测试验证。继电器通电后直接动作，无延时功能，与原始故障现象一致，故障得以复现。表明 U3 芯片故障是由于 Pin12 内部连接断开导致。

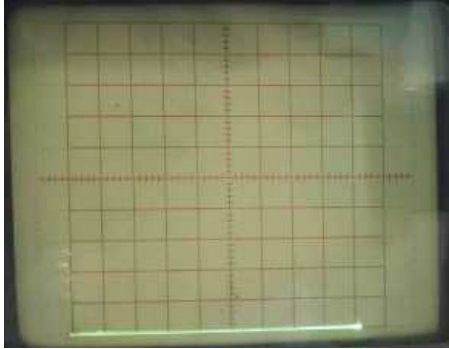


图2 故障芯片管脚 8/12 间 I-V 曲线

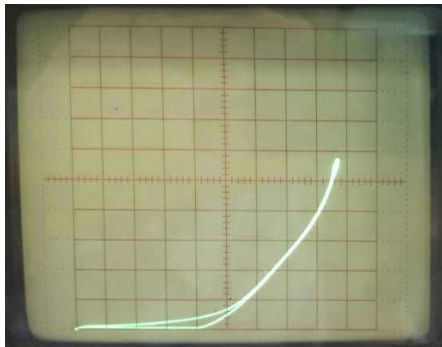


图3 正常芯片管脚 8/12 间 I-V 曲线

### 3.4 U3 芯片封装失效原因分析

故障 U3 芯片采用塑料封装结构，包括芯片、金属支撑底座或框架、连接芯片到框架的焊线以及保护芯片及内部连线的环氧塑料。

由于封装材料、芯片钝化及制造工艺的改进，特别是现代塑封材料的杂质离子含量低，对其它封装材料有很好的粘附性、玻璃转化温度较高、热导率高、与框架的热膨胀系数能较好地匹配，塑封器件的可靠性有了极大提高<sup>[2]</sup>。塑封的主要失效机理是由于潮湿对金属化层造成损伤；根据诱发应力类型，塑封芯片的失效机理进一步分为：机械的、热学的、电学的、辐射的或化学的应力失效。

机械应力包括物理冲击、振动，应力通过填充粒子作用在硅芯片上。应力对结构和材料的影响包括弹性形变、塑性形变、脆化或塑性断裂、界面分离、疲劳裂缝萌生、疲劳裂缝扩展、蠕变及蠕变断裂。

热应力包括管芯粘接固化放热、金丝键合前预热、模塑后热固化、邻近元器件加热返工等。外部热应力因热膨胀会导致尺寸变化和物理特性变化。热膨胀系数的不匹配常产生局部应力导致器件封装结构失效。

电应力包括突然的电流冲击、不良供电系统造成的线电流波动或输电的突然冲击、静电放电、电过载等。这些应力会导致绝缘击穿、表面电压击穿、电功率热能损耗、电迁移。也可能增加电化学腐蚀、树状结晶组织漏电、热退化等。

化学应力包括恶劣的环境引起的化学腐蚀、氧化、离子表面枝状结晶生长。由于环境中湿气对封装塑料的渗透性，湿气是施加于塑封电路的主要应力。塑料吸附的潮气能从封装塑料中浸出催化剂残存物和聚合副产品，然后进入到管芯的金属化压焊区、硅片和各种界面，导致器件退化失效。

根据前述试验结果和塑料封装芯片失效机理分析，该 EFB45305PV 型定时器芯片出现失效，是由于芯片内部局部键合焊盘金属腐蚀，造成互联金属化条之间开路所致；键合焊盘的腐蚀为长期使用环境下湿气侵入器件塑封内部所致。

## 4 结论及改进

### 4.1 根本原因分析结论

(1) 本案例中，控制回路中 TEC2453 型延时继电器故障，失去延时功能，导致正常流量波动工况下触发主泵停泵保护，引起反应堆紧急停堆。(2) TEC2453 型延时继电器内部主集成芯片 EFB45305PV 损坏，其输出端 Pin11 在芯片正常供电后立即输出 4.9-10.6VDC 电压，直接驱动下游继电器动作，导致失去延时功能。(3) 该延时继电器内部使用的 EFB45305PV 型定时器芯片为塑封芯片，现场安装后使用超过 20 年，长期使用环境下湿气侵入器件塑封内部，导致 Pin12 引脚键合焊盘金属腐蚀，出现开路，芯片失去延时功能。

### 4.2 改进策略

(1) 核实该核电机组 TEC2453 型延时继电器的应用情况，制定定期校验、更换的预防性维修策略；结合工程应用经验，建议校验周期为 3 个燃料循环、定期更换周期为 9 个燃料循环。(2) 梳理该核电机组现场带有集成芯片的继电器设备，参考确定定期校验、更换的预防性维修策略。

## 5 结语

集成电路故障根本原因分析相对比较困难，相关课题值得广泛、深入研究。国内核电发展前景广阔，仪控设备将普遍使用集成电路，也将给核电厂设备可靠性管理带来极大挑战<sup>[3]</sup>。本文以案例的形式介绍了根本原因的分析过程，并结合工程应用提出了可靠性提升策略，可供核电厂仪控领域设备维修及可靠性管理人员参考借鉴。

### 参考文献

- [1] 朱猛.基于数据驱动的模拟电路芯片故障诊断研究[D].中国民航大学,2024.
- [2] 王晨.芯片封装界面接触热性能设计[J].电子与封装,2024,24(04):100.
- [3] 陈永伟,仪控老化及可靠性技术 中国原子能出版社2020.4 ISBN 978-7-5221-0520-8.