

某型柴油机燃油喷射控制单元故障分析与改进设计

石磊, 景国辉

(海军驻七一一研究所军事代表室, 上海 201108)

摘要: 某型单缸柴油机在试验过程中, 喷油器控制单元发生故障。采用理论分析和试验验证相结合的方法, 对故障原因进行分析。结果表明: 驱动电路的瞬态参数设计与 MOSFET 的工作要求不匹配是导致故障的根本原因。据此提出了改进设计方案并验证了其有效性。

关键词: 柴油机; 燃油喷射; 控制单元; MOSFET

中图分类号: TP211⁺.51; TK421⁺.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2016)03-0026-04

Fault Analysis and Improved Design of Fuel Injector Controlling Unit for Certain Diesel Engine

Shi Lei, Jing Guohui

(Naval Deputy Office of Shanghai Marine Diesel Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: During the test of certain single cylinder diesel engine, the fuel injector controlling unit went in malfunction. The causes of fault were analyzed by theoretical analysis and experimental verification. The results showed the ultimate cause was the mismatch between the transient parameters of driving circuit and the working requirements of MOSFET. The improved design was introduced accordingly and proven to be effective.

Key words: diesel engine; fuel injection; controlling unit; MOSFET

0 引言

电控共轨燃油喷射系统系 20 世纪 90 年代研制出的一种全新的燃油喷射系统^[1,2], 由于其具有可独立控制喷油定时, 高的喷射压力以及喷油速率柔性可调的特性, 有助于柴油机获得良好的经济性、动力性和排放特性^[3]。

如图 1 所示, 柴油机高压共轨燃油喷射系统在工作过程中, 由于增压活塞面积比一定, 共轨油管中的柴油压力由电控单元 (ECU) 控制, 不受发动机转速影响; 而喷油量和喷油定时则由电磁阀的开启和关闭时间决定, 也由电控单元控制, 故可以实现喷油量、喷油定时、喷射压力控制以及喷油规律等的优化选用^[4]。因此, 燃油喷射控制单元的地位举足轻重。

某型中高速单缸柴油机采用了电控高压共轨系统, 但该柴油机在试验过程中燃油喷射控制单元发生故障, 本文对此进行重点分析和研究。

1 问题描述

某型中高速单缸机在试验过程中发现: 燃油喷射器喷射控制单元输出驱动电流波形异常。查询试验数据和记录后发现: 该异常早在一周前就已存在, 并且一直通电工作。试验人员更换了备件, 继续进行试验。不久, 巡检时再次发现喷油器驱动电流波形异常, 故障波形与上次相同。

对喷射控制单元初步检查发现: 图纸编号为 M7、M8 的 MOSFET 栅源极和漏源极发生短路。为防止二次损坏, 检查时未将元件拆下, 直接送交有资质的试验室, 对 MOS 管进行失效分析和检测。

检测结论为:

- (1) 喷射控制单元 M7 管内部晶片热击穿, 图 2 为 M7 内部晶片损坏情况;
- (2) 喷射控制单元 M8 管电气特性正常, 但是受热影响, 塑封料与晶片、基板、引线架的界面均出现了不同程度的分层;
- (3) 喷射控制单元备件 M7 管电气特性正常;
- (4) 喷射控制单元备件 M8 管内部晶片热击穿。

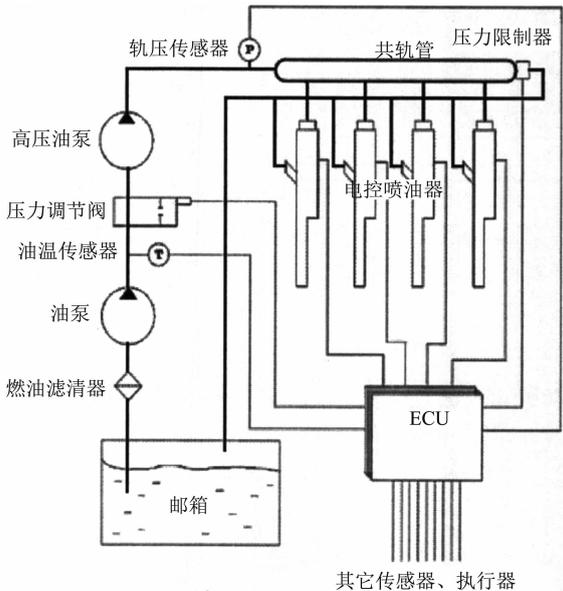


图1 高压共轨燃油喷射系统原理图

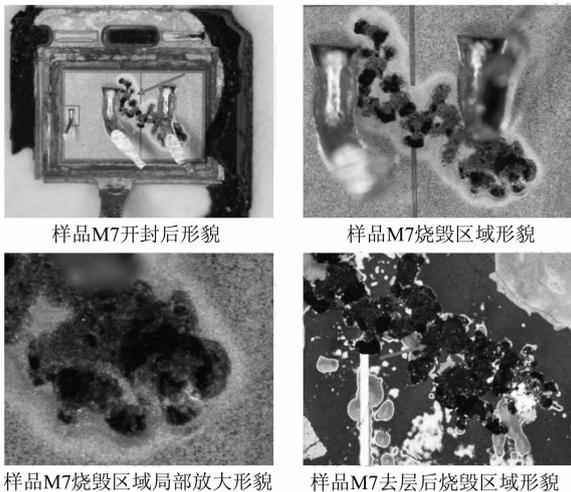


图2 M7内部晶片损坏情况(选自检测报告)

2 原因分析

2.1 电控喷油器中 MOS 管的功能

MOS 管 (MOSFET 的简称) 全称为金属氧化物半导体场效应晶体管, 以其优良的性能和快速通断能力, 在开关电源、驱动电路和中小功率的电力

电子设备中得到广泛应用^[5]。

喷射控制单元中电控喷油器驱动电路采用高低端驱动方式 (如图 3), 一组驱动电路由一个高端开关和若干个低端开关组成, 高端开关负责接通电源建立正向偏置电压, 低端开关负责依序选择导通喷油器电磁阀。每个高端开关又由一个高压开关 (电源电压 48 V) 和一个低压开关 (电源电压 24 V) 组成。工作时, 高压开关先行导通 0.8 ms, 用于电流的快速提升并确保电磁阀及时打开, 而后高压开关关断, 低压开关导通, 负责电磁阀的维持导通。

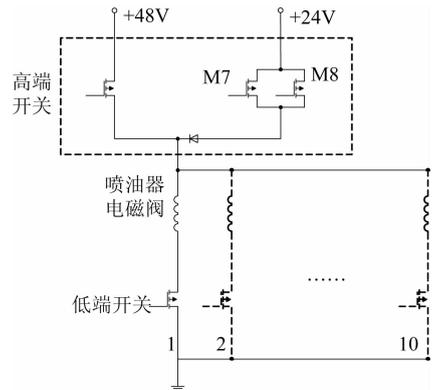


图3 喷油器驱动电路示意图

MOS 管 M7、M8 是驱动电路的高端低压开关, 为了降低单管的发热功耗, 两管并联使用。M7 和 M8 由同一个栅极驱动电路驱动, 两管同时导通或关断。正常工作时, M7、M8 受 PWM 斩波信号控制, 连续进行导通和截止状态切换。

2.2 M7、M8 故障对喷油器的影响

电控喷油器驱动电路通过 M7、M8 的导通和截止状态的切换实现电流斩波控制。图 4 中 1 通道为正常的喷油器驱动电流波形。M7、M8 漏源极短路后, 维持段驱动电流将不受斩波 PWM 信号的控制。

但是在一次喷油脉冲中, 由于驱动回路内阻的存在, 喷油器驱动电流快速上升到某一个值后维持不变, 尤其是低端开关的设计, 保证了被控电磁阀仍能正常开关, 只是在工作时的维持电流要比额定值高, 这将会缩短其使用寿命。这就是控制电流波形异常, 但喷油器仍能继续工作一周以上的原因。

2.3 MOS 管失效原因分析

根据检测结论, MOS 管失效模式为热击穿, 分析可能的失效原因如下:

- (1) 散热设计不合理。在喷射控制单元的驱动电路中, M7 和 M8 处于连续快速的开关状态, 开关功耗较大。而在进行热计算时, 主要进行导通

功耗计算，忽视了开关功耗的影响，因此散热设计可能不满足实际应用要求，导致 MOS 管热击穿。

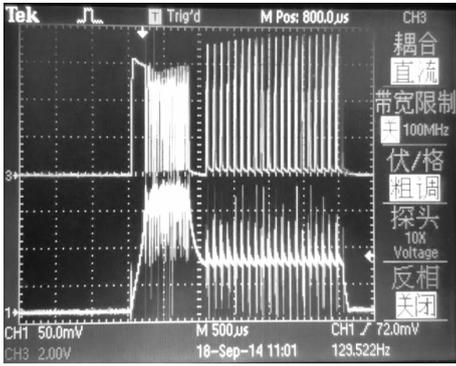


图 4 喷油器正常驱动电流波形

(2) MOS 管栅极驱动设计不合理。MOS 管为压控元件，通过控制栅源极电压控制 MOS 管的通断状态。当 MOS 管用作开关元件时，开关功耗与栅源极驱动电压有关：当 MOS 管栅源极驱动电压未达到最佳值时，可导致 MOS 管导通不充分，导通内阻增大，导通功耗增大，最终导致烧毁；当 MOS 管栅源极电压上升或下降时间过长，也可能导致 MOS 管的开关功耗增大，晶片瞬态结温过高，最终导致烧毁。

为有效确定故障原因，将喷射控制单元放置在电控箱中（如图 5），驱动参数与单缸机试验时的参数相同，电控箱分别放置在室温环境和电热箱中，以模拟实际环境温度和工作温度两种工况；待喷射控制单元运行稳定后，测量 MOS 管壳、散热铝板等组件的温度和 MOS 管的驱动电信号。

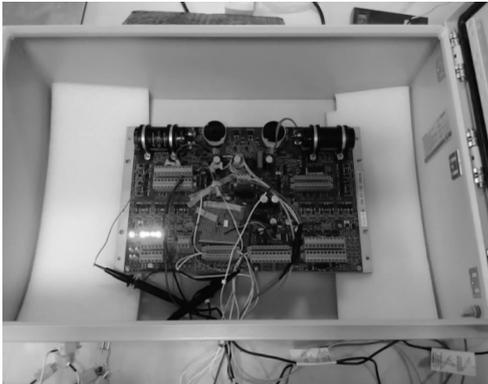


图 5 试验实物图

针对可能原因 (1)：根据试验数据对散热设计进行分析。图 6 是 MOS 管安装结构示意图，从图中可以看出：MOS 晶片的散热途径主要有两个，一个是通过 MOS 散热壳、PCB 板、铝板到达环境空气；另一个是通过 MOS 塑料封壳到达环境温度。其中 MOS 塑料封壳为绝热材料，热阻非常大，因

此绝大部分热量是通过第一条途径传导的。

试验测量了 MOS 散热壳与铝板底部的温度 T_c 和 T_m ，而 MOS 晶片到散热壳的热阻 R_{th1} 、PCB 的热阻 R_{th2} 及导热硅片的热阻 R_{th3} 均已知，根据公式 (1) 和 (2) 可以推算出稳定状态时 MOS 管的晶片温度（结温）。

$$T_f - T_c = R_{th1} \times R_f \tag{1}$$

$$T_f - T_{AL} = (R_{th2} + R_{th3}) \times P_j \tag{2}$$

根据室温环境下试验数据计算出 MOS 管稳态结温为 35.1 °C；根据电加热箱环境下试验数据计算出 MOS 管稳态结温为 82.4 °C。

电控箱在单缸机试验中环境温度在 45 °C 左右，MOS 管稳态结温不会超过电加热箱环境（75 °C）下的试验结果。所选 MOS 管的最高允许工作结温为 175 °C，远大于试验结果，因此电路的散热设计能够满足使用要求，不是导致 MOS 管热击穿的直接原因。

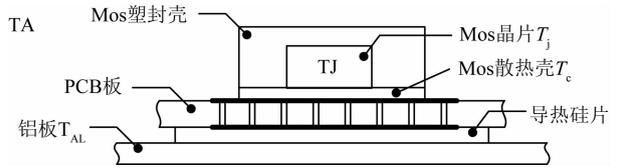


图 6 MOS 管安装结构示意图

针对原因 (2)：试验过程中对 MOS 管的栅源极电压 V_{gs} 、漏源极电压 V_{ds} 、M7 和 M8 源极电流分别进行了测量，测量波形如图 7、8 所示。

从图 7 中可以看出：MOS 管栅源极电压上升到 5.6 V 用时为 4.5 μ s，稳定电压为 6 V。驱动电路的设计栅源极驱动电压 V_{gs} 为 9 V，上升时间为 2 μ s，实测值与设计值有较大差距。

图 8 中 MOS 管漏源极电压 V_{ds} 可达到 0.9 V，此时 MOS 管的漏极电流为 8 A，导通内阻达到 112.5 m Ω ，根据元器件手册可知，MOS 管工作时并未完全导通。

根据测试结果：MOS 管的栅极驱动电压 V_{gs} 和电压上升时间未达设计指标，导致 MOS 管开关功耗、导通功耗增大，并引起瞬态结温过高，最终导致元件失效。

2.4 试验验证

调整 M7 和 M8 的栅极驱动电路参数，搭建模拟平台进行验证试验，试验内容和结果如表 1 所示。

从表 1 中的试验结果可以得出以下结论：设计时未考虑瞬态结温，MOS 管驱动电路实际工作参数不符合设计要求，是造成 MOS 管热击穿的原因。

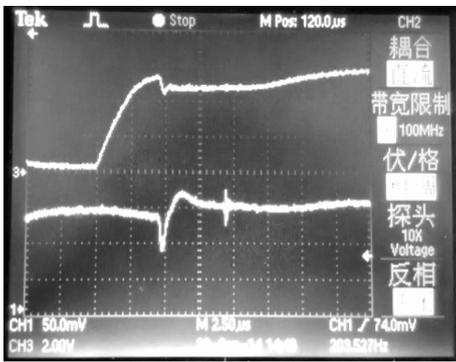
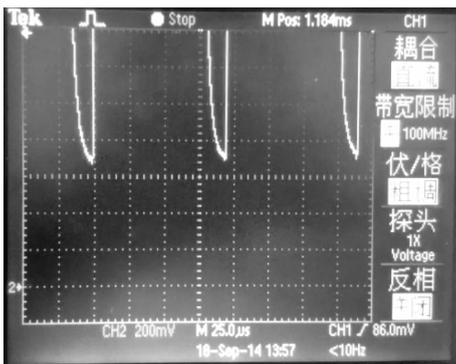
图7 MOS管 V_{gs} 波形 (3通道)图8 MOS管 V_{ds} 波形 (2通道)

表1 M7、M8故障原因验证试验

序号	项目	内容
1	试验地点	智能化试验室
2	模拟工作环境	根据电控系统环境试验大纲要求, 将电加热箱的加热温度设置为 75 °C, 电控箱放置在电加热箱中。
3	考核时间	35 h (该时间根据喷射控制单元故障前连续工作时间内 MOS 管工作次数计算得出)。
4	试验结果	环境温度稳定后, 喷射控制单元连续工作 35 h, 试验过程中喷油器驱动电流波形正常。

3 问题拓展

故障原因验证后, 本着举一反三的原则, 对喷油器控制单元的整体设计进行了重新考量和评估。在对设计图纸认真分析后发现: M7、M8 管并联工作方式存在设计问题。

项目组为保证控制单元工作的可靠性和降低单管功耗, 采用 M7、M8 并联工作方式。但是, 对

于半导体管这类非线性元器件而言, 其瞬态电气工作特性不可能时时保持一致, 因此仅仅简单并联是无法达到正常工作要求的。这种方法一般只在工作电流过大, 市场选型困难时才不得不采用, 并且要配置相应的感抗进行瞬态电流缓冲, 配置相应的辅助电路进行功率均分。本例中, 由于 M7 管 (M8 管) 短路, M8 管 (M7 管) 也无法正常工作, 反而没有达到当初冗余设计的目的, 可靠性也没有提高。

因此, 建议重新对 MOS 管进行选型搭配, 并且对 M7、M8 管的栅极控制信号进行移相, 采用双管推挽式工作机制, 在提高可靠性, 降低单管功耗的同时, 又简化了电路改造工程。该改进方案得到认可。

4 结论

半导体管的热击穿故障很常见, 大部分表现为由于散热不合理导致的累加热击穿, 和开通电流过大引起的瞬间热击穿。而本文实例表明: 驱动电路与管子间的瞬态参数设计不匹配也会导致短期内的累加热击穿。

开关管采用双管并联工作方式的初衷为冗余设计, 但由于缺少必要的保护电路, 反而成了设计缺陷。但由于总体上采用高、低端驱动模式, 在高端出现一定容许故障情况下, 低端开关仍然保证了燃油控制器的正常工作, 该“双保险”设计达到了保证和提高产品可靠性的目的, 值得参考和借鉴。

参考文献

- [1] 石磊, 邓康耀, 崔毅, 等. 基于 VxD-PC 技术的高压共轨控制系统开发 [J]. 内燃机工程, 2006, 27 (4): 22-25.
- [2] 龚元明, 徐涛, 于世涛, 等. 电控喷油器智能驱动模块的设计 [J]. 内燃机工程, 2006, 27 (3): 18-21.
- [3] 何建辉, 王波涛, 张阿庆, 等. 单缸柴油机高压共轨燃油喷射控制系统的研究 [J]. 内燃机工程, 2009, 30 (2): 61-64.
- [4] 张艳. 高压共轨柴油机电控系统的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [5] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术 (第 5 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.