

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.02.018

EGR 系统故障诊断研究

王科杰,周文华*,聂 飞

(浙江大学 能源工程学系,浙江 杭州 310027)

摘要:针对 EGR 系统生命周期内故障诊断的问题,对直流电机驱动的 EGR 阀工作特性进行了研究,分析归纳了 EGR 系统的故障类型,分为电气故障和功能性故障(其中电气故障包括 H 桥驱动对地短路故障、对电源短路故障、负载短路故障及开路故障,功能性故障包括 EGR 阀零点位置偏移和阀卡滞故障)。在功能性故障诊断策略中加入了 EGR 阀零点位置自学习算法。对每一种故障类型设计了相应的诊断软件和保护策略,在电控柴油机上完成了各种 EGR 阀故障诊断试验。试验结果表明,该诊断方法能在 OBDII 规定的诊断周期内有效地识别 EGR 系统的各种相关故障,相应的保护策略也能及时起到作用,达到了 OBDII 系统应用要求。

关键词:排气再循环;故障诊断;自学习

中图分类号:TK421.5;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)02-0212-05

Fault diagnosis reserch of EGR system

WANG Ke-jie, ZHOU Wen-hua, NIE Fei

(Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at falut diagnosis of EGR system during it's working period,the characteristics of EGR valve driven by DC motor were researched,fault types of EGR system were summarizd,including electric fault which includes H-Bridge short circuit to battery,short circuit to ground,short circuit overload error and open load error and functional fault which includes valve jammed error and zero drift. EGR valve zero position self-learning was carried out during functional diagnosis. The diagnostic and protection strategy was proposed and all kinds of diagnosis tests were carried out on a diesel engine. The results indicate that the diagnosis method can identify the various faults of EGR system in time. The corresponding protection strategy can work timely,which meets the demand of OBDII system application.

Key words: exhaust gas recirculation(EGR); fault diagnosis; self-learning; H-bridge

0 引 言

随着社会的发展,环境污染和能源短缺的问题越来越严重,节能环保的呼吁对内燃机的发展提出了挑战。2015 年 1 月 1 日起已经全面实施国 IV 排放标准,其中规定 NO_x 排放标准为 0.02 g/kW·h,PM 排放标准 3.5 g/kW·h^[1]。EGR 系统作为满足国四以上排放标准的主流技术路线,具有广泛的应用前景^[2]。EGR 阀作为 EGR 系统关键执行器,其工作环境恶劣^[3],为达到生命周期内的功能要求,有效且完善的 EGR 阀的故障诊断系统是不可或缺的。

现有的 EGR 故障诊断系统的缺陷在于:更多的面

向电气故障如对电源短路故障、对地短路故障等^[4-5],缺乏功能性故障诊断,如因 EGR 阀污染导致的零点位置偏移和阀卡滞故障。本研究以自主研发的高压共轨系统为平台,在提出面向电气故障诊断策略的基础上,针对上述不足,设计 EGR 阀零点位置自学习算法,在自学习过程中进行阀卡滞和控制位置偏移故障诊断,从而提高 EGR 系统的可靠性,为后续开发共轨 OBD 系统提供基础。

1 EGR 系统典型故障分析

EGR 系统由自学习模块、PID 控制模块、PWM 输出模块、传感器信号处理模块和故障诊断模块这 5 个模块组成,各模块功能与存在故障如表 1 所示。实验

收稿日期:2015-10-12

作者简介:王科杰(1990-),男,浙江绍兴人,主要从事发动机电子控制技术方面的研究. E-mail:21327078@zju.edu.cn

通信联系人:周文华,男,副教授,硕士生导师. E-mail:zhouwh999@126.com

中使用的 EGR 阀为 DF0800 系列,直流电机驱动,电机工作电压 12 V,带有位置传感器,传感器工作电压5 V。H 桥驱动芯片采用的是 ST 公司的 L9958。其中各个模块功能和潜在故障如表 1 所示。

表 1 各模块对应功能及潜在故障

模块名称	功能	存在故障
自学习模块	检测开始自学习的条件是否满足并且管理自学习的过程。	阀卡滞,因污染带来的零点偏移。
PID 控制模块	根据实际值与目标值之间的差值计算整个 PID 闭环控制输出结果。	暂时性的控制偏差、永久性的控制偏差。
PWM 输出模块	根据 PID 的值计算出直流电机 H 桥驱动芯片 L9958 输出 PWM 波的占空比并进行方向控制。	对地短路、对电源短路、负载短路、开路故障。
传感器信号处理模块	对采样的电压值进行有效值范围的检查并转化成物理值。	传感器信号对电源短路、开路以及传感器供电故障。
故障诊断模块	对 EGR 系统进行故障诊断。	无

2 EGR 系统电气故障诊断

2.1 H 桥驱动电路分析及诊断设计

H 桥驱动工作原理如图 1 所示。

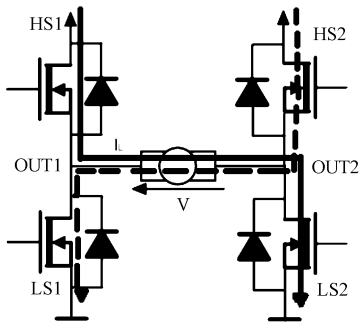


图 1 H 桥驱动工作原理

电机运动状态由两个高边 MOS 管 HS1、HS2 和两个低边 MOS 管 LS1、LS2 共同决定。不同 MOS 管状态对应的电机状态如表 2 所示。

表 2 不同 MOS 管状态对应的电机状态

HS1	HS2	LS1	LS2	电机状态
H	L	L	H	正转
L	L	H	H	低边续流
L	H	H	L	反转

H 表示对应的 MOS 管打开,L 表示对应的 MOS 管关断。当 HS1 和 LS2 打开时,电机正转;HS2 和 LS1 打开时电机反转。

H 桥驱动电气故障包括对地短路、对电源短路、负

载短路和开路故障。由于是 H 桥,每个 MOS 管都可能存在这些故障,故障诊断状态机如图 2 所示。

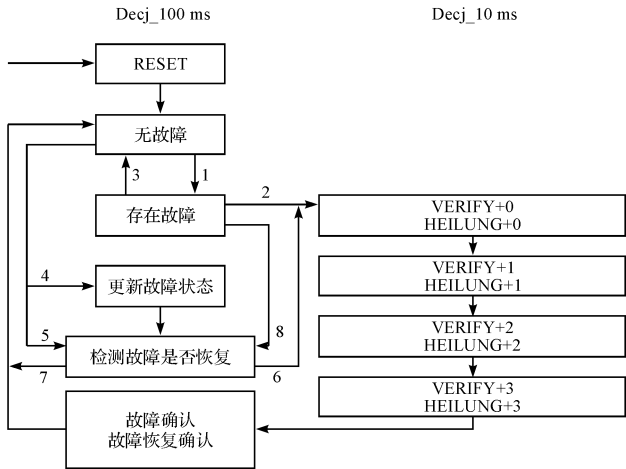


图 2 H 桥驱动故障诊断状态转移图

诊断策略是故障信息的获取、确认、清除过程。

获取过程。当芯片已经发现通道的电气错误后,软件必须快速读取该信息并处理。当前 OBDII 要求所有电器诊断诊断周期为 0.5 s,诊断策略中状态机的状态转移在 100 ms 任务中执行,确认和恢复过程的 SPI 口操作是在 10 ms 任务中进行的,因此一次典型的故障发生—确认过程耗时约 300 ms,满足 OBDII 故障诊断周期的要求。

确认过程 VERIFY。由于某些干扰因素的存在,芯片反馈的通道故障信息并不能立即被信任,经过故障的去抖机制确认故障的存在。整个动作过程为:VERIFY0 关闭驱动输出,然后 VERIFY1 打开,VERIFY2 中再关闭,然后 VERIFY3 中再次恢复,再次读取故障诊断信息,与原始故障信息比较确定是否是真实故障。

故障恢复过程 HEILUNG。电气故障不再存在时,为了使软件恢复正常的控制状态,诊断模块要求可以识别错误的恢复并做出相应处理。整个动作过程为:HILUNG0 关闭驱动输出,然后 HILUNG1 打开,HILUNG2 中再关闭,然后 HILUNG 3 中再次恢复,再次读取故障诊断信息,确认故障是否恢复。

2.2 传感器故障诊断

传感器可能发生的故障包括供电故障、对地短路、对电源短路,这些故障都是通过检测有效值范围来判断,利用时间去抖的方式界定偶发故障还是永久故障,当 ECU 监测到传感器信号超过一定的阈值后,启动故障定时器,定时时长为该故障的去抖时长,如若在定时器未溢出前该故障就消失,则该故障为偶发性故障,可自愈,ECU 不必处理该故障,定时器清零等待下次故障再次出现时,重新启动定时器^[6]。如果故障定时器

溢出时该故障仍存在,则该故障为永久故障,不可自愈,ECU 启动相应的故障处理策略,故障定时器清零。同理,当故障消失时,故障消失的时间超过一定的阈值,ECU 才认为故障已经完全恢复。

3 阀卡滞故障诊断

3.1 EGR 阀零点位置自学习

EGR 阀自学习能消除由于 EGR 位置传感器的安装误差、工作磨损、挤压变形等原因导致的位置传感器的零点偏移^[7],使 EGR 阀的控制更精确。进入自学习的逻辑条件为:发动机处于 AfterRun 状态、发动机至少一次进入过 Running 状态、蓄电池电压和发动机温度在合理范围内,这 3 个条件同时满足才会进入自学习状态。发动机 AfterRun 状态是指车辆钥匙熄火后主继电器并不立即断电,延迟一定的时间后再断电,在这段时间内 ECU 完成一些数据保存,故障诊断的工作。发动机至少一次进入 Running 状态的目的是记录 EGR 阀工作的位置信息用作自学习的参考值。蓄电池电压和发动机温度在合理范围内是为了保证自学习过程中数值的准确性。

零点自学习是阀不断 Open—Store—PullDown—Close 的过程。零点自学习状态转移图如图 3 所示。数字标号代表转移条件的优先级。整个自学习过程为:

存储过程 Store。储存阀 Open—Close 学习循环中 Open 状态和 Close 状态的位置值。储存 Open 状态位置值目的是作为阀向 Close 方向移动时的位置参考。

下拉过程 PullDown。延迟一定时间确保阀已经完全关闭。

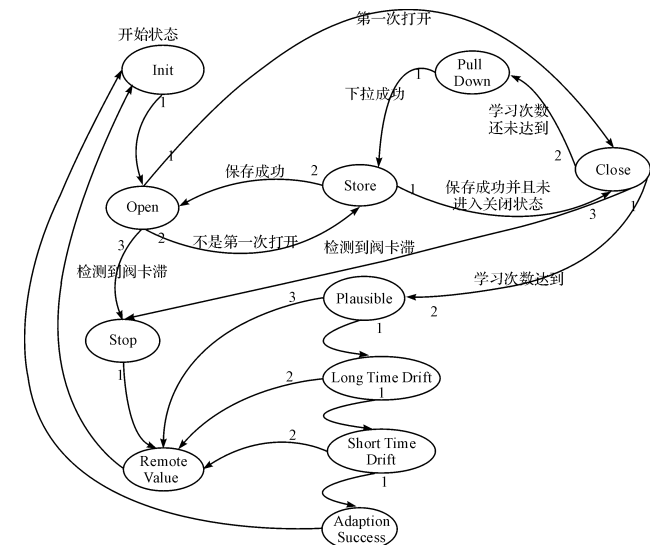


图 3 自学习状态转移图

合理性检验 Plausible。检验每一次的学习值是否合

理。评判标准是位置值的最大、最小值之间差值是否大于一个阈值,如果大于一个阈值,那么本次自学习过程无效。

长期偏移检查 Long Time Drift。目的是判断 EGR 阀在整个 Open—Close 学习过程中是否恶化。评判标准是整个学习过程中最大值与最小值之间的差值是否小于一个阈值。

短期偏移检查 Short Time Drift。目的是判断 EGR 阀在当前 Open—Close 循环中是否恶化。评判标准是当前循环学习值与上一循环学习值之间的差值是否小于一个阈值。

3.2 自学习过程阀卡滞的诊断

EGR 在自学习过程中由于积碳或其它原因可能会出现阀卡滞^[8]。一个阀卡滞基本的检测方法是:阀在一个设定的时间周期内不能满足目标位置的要求,即阀的实际值和和控制值之间存在一个永久的偏差^[9-11]。阀卡滞的诊断策略如图 4 所示。

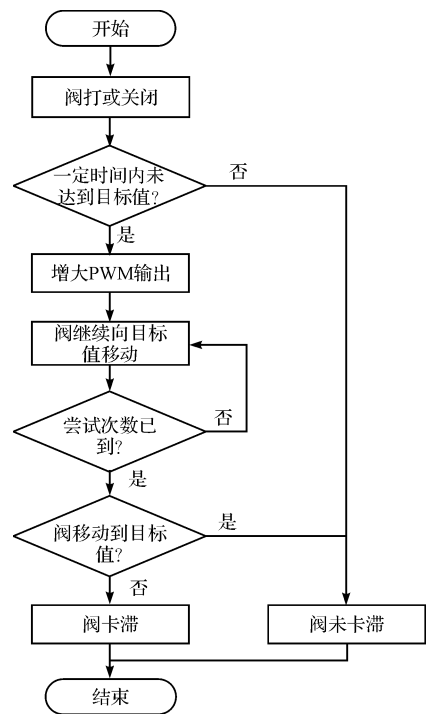


图 4 阀卡滞诊断流程

在阀的打开或关闭的过程中,如果 ECU 检测到阀在一定的时间内未达到目标位置,ECU 将在平均电流保护限制下输出一个较高的占空比提供给直流电机^[12],并保持一段时间,并随后降低到一个较低的水平,EGR 阀的位置移动方向和失败的尝试次数会被记录,多个连续失败的尝试次数(例如,3 次连续的尝试)应在或接近相同的位置并朝相同的方向移动,如果阀位移越过了上次失败尝试的记录位置,失败尝试计数器的数值被复位。如果多次尝试后 EGR 阀还是未能达到目标位置,那么阀卡滞的故障标志位将被置位。

4 试验及结果分析

在完成以上工作的基础上,本研究对 EGR 控制系统相关故障进行了测试。

EGR 位置传感器发生故障时的电压信号变化如图 5 所示。

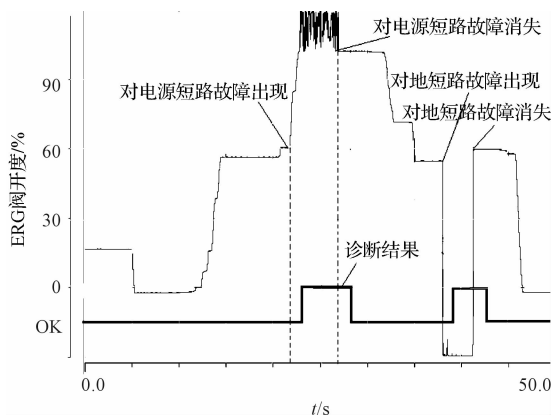


图5 EGR位置传感器故障诊断过程

EGR 位置传感器正常工作时信号值在 $0.9\text{ V} \sim 4.4\text{ V}$ 之间。当 EGR 位置传感器对电源短路故障发生时,传感器电压信号急剧增大到电源电压 5 V 左右,但诊断结果并不立即确认该故障发生,经过 100 ms 的去抖之后,该故障仍存在,则确认该故障发生;当对电源短路故障消失时,诊断结果并不立即确认该故障消失,经 100 ms 去抖之后,传感器信号仍正常,则确认该故障恢复。当传感器发生对地短路故障时,其处理过程与对电源短路故障处理过程相同。

当 EGR 阀正常工作时,单片机与 H 桥驱动正常输出幅值为 5 V ,H 桥驱动输出幅值为 12 V ,PWM 波周期为 1 ms ,占空比的变化范围 $-10\% \sim 17\%$ 。

ECU 开路故障诊断过程如图 6 所示。

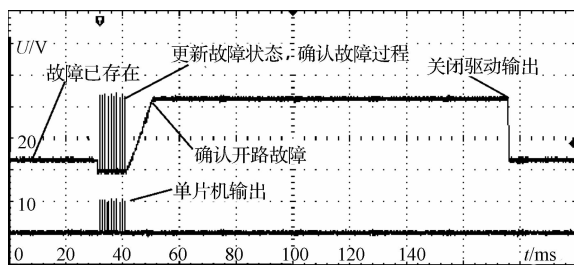


图6 EGR阀开路故障诊断过程

当 ECU 检测到 EGR 阀开路故障时,H 桥驱动芯片为了确认故障状态,不断地打开通断驱动输出更新故障状态,整个过程持续 10 ms , 10 ms 后开路故障被确认,故障确认后并不立即关闭驱动输出,等待一定时间用以检测故障是否可以恢复,图 6 中显示的实验结果说明故障超过时间阈值 300 ms 后并未恢复,驱动输出关闭。

ECU 过流故障诊断过程如图 7 所示。实验过程中电流钳打在 100 mV/A 档。

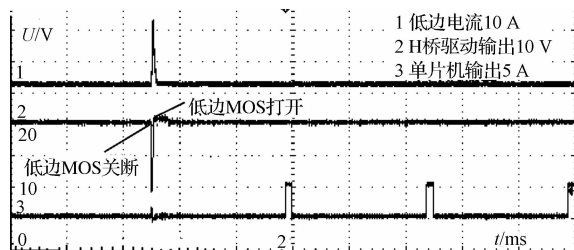


图7 过流故障诊断过程

当发生过流故障时,ECU 通过控制 H 桥高低边 MOS 管的打开/关闭确认是低边对电源短路故障还是高边对地短路故障。图 7 中显示 ECU 关断低边 MOS 之后电流瞬间上升到 12 A 左右,说明故障类型为低边对电源短路故障,ECU 检测到大电流后立刻采取保护措施,单片机关闭输出。

EGR 阀发生卡滞故障诊断过程如图 8 所示。

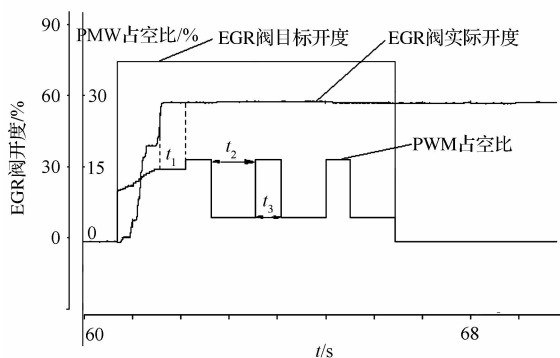


图8 EGR阀卡滞诊断过程

EGR 阀位置由前馈加 PID 控制,实验中设置 EGR 阀目标开度为 75% ,PWM 占空比在前馈的作用下立即升高到 12% ,然后由积分调节逐渐接近目标值。由于阀卡滞,积分饱和之后 PWM 占空比不再改变,延时 t_1 时间后阀的位置值仍未改变,ECU 确认出现阀卡滞故障,此时 H 桥驱动输出一个较高的占空比 16% ,并保持 500 ms ,此后降低到一个较低的水平,此时输出的占空比为前馈值的 30% ,如此循环诊断 3 次,3 次以后仍未检测到阀移动,确认阀卡滞故障,H 桥关闭驱动输出。

5 结束语

本研究根据直流电机驱动的 EGR 阀的工作特点,分析归纳了 EGR 系统可能会出现的故障类型,并设计了相应的诊断策略。试验证明,相应的诊断策略能在 500 ms 内可靠地识别一系列故障,包括 H 桥驱动对地短路故障、对电源短路故障、负载短路故障、开路故障和阀卡滞故障,并采取相应的保护措施,符合柴油机 OBD II 法规的要求。

该研究较为全面地给出了直流电机驱动的 EGR 阀故障类型与相应的诊断策略,为电控柴油机 EGR 阀的诊断策略提供了参考依据。

参考文献 (References):

- [1] 田永海. EGR 对共轨柴油机燃烧和排放的影响[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2006.
- [2] 何勇灵,徐 斌. BOSH 柴油机管理系统[M]. 北京:北京理工大学出版社,2010.
- [3] NISHIO Y, HASEGAWA M, TSUTSUMI K. Model based control for dual EGR system with intake throttle in new generation 1.6 L diesel engine[R]. SAE,2013-24-133.
- [4] 胡明江. 柴油机 EGR 阀位移传感器的设计与实现[J]. 仪表技术与传感器,2011(10):103-106.
- [5] AGARWAL D, SINGH S K, AGARWAL A K. Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression igni-

tion engine[J]. **Applied Energy**,2011(8):2900-2907.

- [6] 黄 啸,周文华,郭修其,等. 基于共轨 OBD 系统的轨压传感器故障诊断研究[J]. 车用发动机,2012(4):90-92.
- [7] 联创汽车电子有限公司. EGR 阀初始位置自学习方法:中国,201110078147.9[P]. 2011-03-30.
- [8] 陈 洪. 发动机 EGR 阀卡滞问题分析研究[J]. 机电工程技术,2013,42(6):199-201.
- [9] 陈江华. TRT 机组旁通快开阀液压控制系统设计[J]. 液化气动与密封,2014,34(7):18-20.
- [10] 李 军. 直流电机驱动 EGR 阀控制系统的研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2011.
- [11] 李沛文. 燃气液压伺服总成测试系统干扰抑制技术[J]. 流体机械,2014,42(7):65-68.
- [12] ZHENG Ming, READER G T, HAWLEY J G. Diesel engine exhaust gas recirculation a review on advanced and novel concepts [J]. **Energy Conversion and Management**,2002(43):1027-1042.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

王科杰,周文华,聂 飞. EGR 系统故障诊断研究[J]. 机电工程,2016,33(2):212-216.

WANG Ke-jie, ZHOU Wen-hua, NIE Fei. Fault diagnosis research of EGR system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(2):212-216.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 168 页)

塌的原因。开发了基于半导体制冷的散热装置,全功率制冷时,冷端温度最低可达 3.1℃,热端温度控制在 65℃以下。

(2)通过无冷却、风扇冷却和半导体冷却实验对比,结果表明,使用该制冷系统后,发生层错位和坍塌的角度范围比无散热时减小了 50.27%,比普通风扇冷却时减小了 25.73%,同时,减弱了成型件对热床的反向加热,减少了出现该类问题的总层数。

(3)该系统还不能完全解决背风口的层错位和坍塌问题,下一步可研究利用有限元法分析温度场和散热条件,求解出避免坍塌现象所需理论冷风温度和出风量,或者通过喷嘴环形供风的方法实现均匀冷却。

参考文献 (References):

- [1] 李涤尘,田小永,王永信,等. 增材制造技术的发展[J]. 电加工与模具,2012(S1):20-22.
- [2] 卢秉恒,李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化,2013(4):1-4.
- [3] IVANOVA O S, CAMPBELL T A. Additive Manufacturing as a Disruptive Technology: Implications of Three-Dimensional Printing [J]. **Technology & Innovation**,2013,15(1):67-79.

- [4] 倪荣华. 熔融沉积快速成型精度研究及其成型过程数值模拟[D]. 济南:山东大学材料科学与工程学院,2013.
- [5] 杨柏森. 散热条件对 FDM 丝材粘结质量的影响研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2014.
- [6] LIU Xin-hua, LI Sheng-peng, LIU Zhou, et al. An investigation on distortion of PLA thin-plate part in the FDM process [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2015,79(5):1117-1126.
- [7] 王柏通. 3D 打印喷头的温度分析及控制策略研究[D]. 长沙:湖南师范大学物理与信息科学学院,2014.
- [8] JIA Yan-ting, XV Chang-gui, YAN Xian-guo, et al. Semiconductor Refrigeration Review [J]. **Refrigeration**,2012,31(1):49-55.
- [9] ZHANG Hui, Fan Kuang-chao, WANG Jun. System design and simulation of constant temperature box using semiconductor refrigeration device [J]. **International Journal of Computer Applications in Technology**,2010,37(1):146-152.
- [10] 杨建敏. 风冷散热半导体制冷系统性能分析及实验研究[D]. 南昌:南昌大学机电工程学院,2009.
- [11] 肖苏华,巫小珍. 聚乳酸材料在桌面型 3D 打印中的应用研究[J]. 机电工程,2015,32(10):1344-1347.

[编辑:李 辉]