

柴油发电机组回能型电子负载系统技术研究与应用

宁建军¹, 刘旂琦², 苑懋宇¹

(1. 陕西柴油机重工有限公司西安电站工程分公司, 陕西 西安 710077;

2. 中国矿业大学孙越崎学院, 江苏 徐州 221100)

摘要: 针对公司现有柴油机及柴油发电机组试验负载为测功器和水负载, 试验产生的机械能及电能消耗在水阻中导致能源浪费问题, 进行柴油发电机组回能型电子负载系统技术研究。根据船用柴油发电机组以及往复式内燃机驱动交流发电机组试验特性要求, 完成相应技术方案制定, 系统参数计算及设备选型。通过某型发电机组回能型电子负载测试试验, 验证了所开发的回能型电子负载系统的各性能指标满足发电机组调速特性和负载特性的测试要求; 达到了节约能源, 降低成本, 提高柴油发电机组测试效率的目的。

关键词: 柴油发电机组; 回能型电子负载; 试验

中图分类号: TK427; TM314⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)02-0036-05

Research on the Technology of Energy Feedback Type Electronic Load System for Diesel Gensets and Its Application

Ning Jianjun¹, Liu Yiqi², Yuan Maoyu¹

(1. Xi'an Power Station Engineering Company, Shaanxi Diesel Engine Heavy Industry Co., Ltd., Shaanxi Xi'an 710077;

2. Sunyueqi Honors College, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221100)

Abstract: The currently used test load of diesel engines and diesel gensets are dynamometers and water load. The mechanical energy and electrical energy are consumed by the water resistance, which lead to energy waste. Based on this situation, the technology of energy feedback type electronic load system for diesel gensets is studied. According to the test characteristics requirements of marine diesel gensets and AC gensets driven by reciprocating internal combustion engines, the technical program, system parameters and equipment modal selection are determined. Through the energy feedback type electronic load tests of a type of gensets, it is verified that the performance indexes of the developed energy feedback type electronic load system could satisfy the test requirements of speed governing and load characteristics of gensets, and could realize energy saving, cost reduction, and improve test efficiency of diesel gensets.

Key words: diesel gensets; energy feedback type electronic load; test

0 引言

公司现有的柴油机及柴油发电机组试验负载为测功器和水负载, 这种试验方式下柴油机和柴油发电机组产生的机械能及电能消耗在水阻中, 每年浪费的能量折合成电量约 1 000 万度。为了利用这些

能量, 进行柴油发电机组回能型电子负载系统研究, 将试验时产生的机械能和电能回馈到公司内部电网, 降低生产成本。

1 技术方案

柴油发电机组回能型电子负载系统主要用于机

组的负载试验，可灵活调节负载的大小和功率因数，并将柴油发电机组发出的电能回馈到厂内 10 kV 电网，替代原有消耗型的阻感负载，可大幅度节省能源和试验费用。

1.1 设计依据

1.1.1 船用柴油发电机组试验特性要求

根据 GB/T 13032 – 2010 船用柴油发电机组^[1]第 6. 1. 4 c) 条款的规定：回能型电子负载只能用于柴油发电机组的负载试验，不适用于发电机组的调速与调压特性试验。因此，对于船用柴油发电机组，回能型电子负载特性满足以下试验要求，如表 1 所示。

表 1 回能型电子负载特性试验要求

序号	检验项目	型式试验	出厂检验	要求条款	试验条款	备注
1	机组空气噪声测定	·	–	5. 14	6. 17	
2	机组扭转测量	·	–	5. 13	6. 18	
3	机组负载试验	·	·	5. 7. 1	6. 19	
4	机组燃油消耗率测定	·	–	5. 16	6. 20	
5	机组过载试验	·	·	5. 7. 2	6. 21	
6	机组并联运行试验	·	·	5. 10	6. 24	
7	机组机械振动当量烈度测定	·	–	5. 3	6. 25	
8	机组可靠工作时间考核	·	–	5. 18	6. 26	

1.1.2 往复式内燃机驱动的交流发电机组试验特性要求

根据 GB/T 2820 – 1997 往复式内燃机驱动的交流发电机组^[2]的规定：回能型电子负载特性满足“第 6 部分：试验方法”对负载相关试验的 6. 5. 2 条款、6. 6. 3 条款、6. 6. 4 条款要求。

1.2 系统技术方案

1.2.1 技术方案

(1) 根据负载试验和过载试验的要求，在控制室通过操作控制台控制回能型电子负载从机组吸收有功功率，调节电抗器保持机组输出功率因数为 0.8（滞后）。其中回能型电子负载替代原水电阻，将吸收的三相交流电，电压为 3. 15 kV/50 Hz、3. 15 kV/60 Hz，变换成 10. 5 kV/50 Hz 的电压，回馈到 10.5kV 内部电网。

(2) 机组试验原电抗器负载保留，用于调节无功功率，各台架的无功负载，除能在原控制台上操控外，还能在回能控制台上集中操控。

(3) 保留水电阻负载，用于机组的突加突卸负载试验及电压调整率试验。另外在回能时，为切除水电阻负载，每路水电阻增加一台开关。系统结构如图 1 所示。

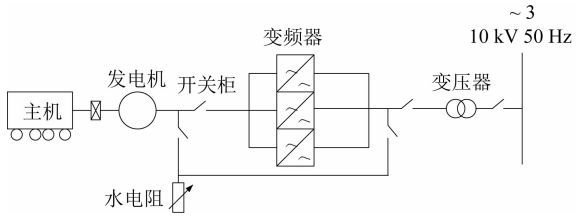


图 1 系统结构框图

1.2.2 系统组成

该回能型电子负载系统由以下部件组成：开关柜、回能变频器柜（含外循环水泵）×2、升压变压器、回能监控、功率检测箱、电能质量分析仪及线缆。

1.2.3 系统原理

(1) 主机柴油发电机组电能并入方案。主机柴油发电机组发出电能并到低压母线（400/450 V、50/60 Hz）上，通过 T1 升压变压器（400、450 V/3. 15 kV），经 U1 变频器调节，通过 T2 升压变压器（3. 15 /10. 5 kV）再升压，并入 10. 5 kV 电网。如图 2 所示。

(2) 燃气发电机组电能并入方案。燃气发电机组发出电能并到低压母线（400/450 V、50/60 Hz），通过 T1 升压变压器（400、450 V/3. 15 kV）并到 3. 15 kV 母线上；辅机柴油发电机组通过 T1 升压变压器电压升到 3. 15 kV，并到 3. 15 kV 母线上，经 U1、U2 变频器调节，通过 T2、T3 升压变压器（3. 15 /10. 5 kV）再升压，并入公司内 10. 5 kV 电网。如图 3 所示。

(3) 系统参数计算及主要设备选择。根据公司发电机组试验台的布置以及用电负荷平均在 5 000 kW 左右的情况，方案设计时将回能型电子负载分为两组，如图 2、图 3 所示。其中，发电机组回馈试验平台 1 安装在 6 台 1 200 kW 柴油发电机组的试验厂房内，选用 1 台 BPS-3300 变频器，可覆盖 4 150 kW 以下负载试验，满足单台 1 200 kW 柴油发电机组独立试验，或 3 台 1 200 kW 柴油发电机组组成一组的并车试验要求。发电机组回馈试验平台 2 安装于辅机柴油发电机组试验厂房内，考虑到全厂用电负荷平均在 5 000 kW 左右，选用 2 台 BPS-3300 变频器，通过并联可覆盖 8 300 kW 以下负载试验，满足单台 8 000 kW 柴油发电机组独立试车，或 4 台 1 700 kW 柴油发电机组组成一组的并车试验要求。2 台 BPS-3300 变频器也可独立工作，同时支持 2 路 4 150 kW 以下负载试验的需要。

(4) 负载功率调节。机组试验时,其输出电压、频率的大小由柴油机油门の開度和发电机励磁

电流的大小决定,发出的有功功率和无功功率值由其所带的实际负载决定。

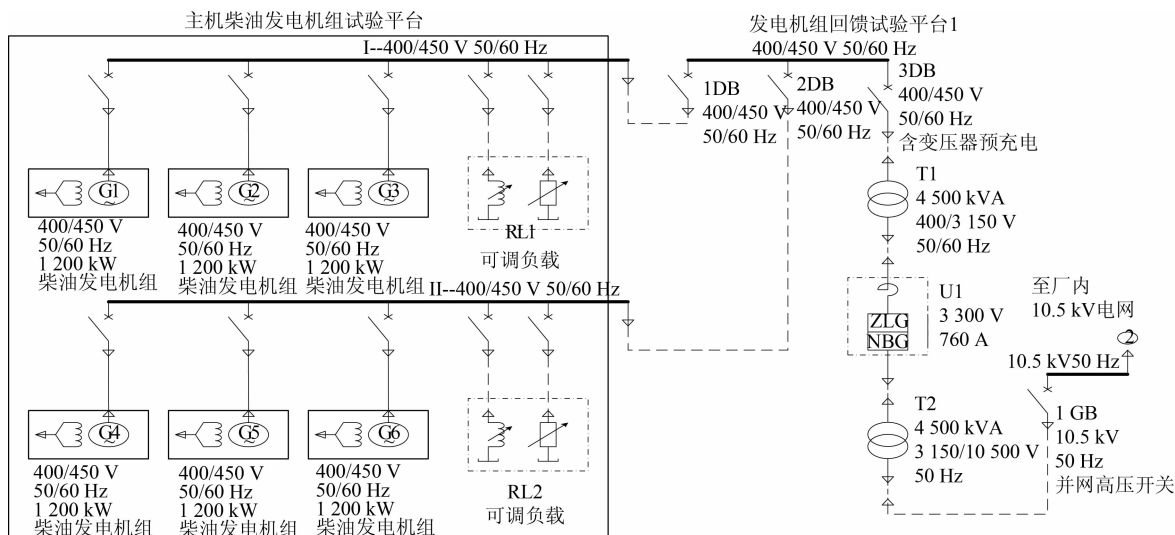


图2 发电机组回馈系统试验原理图一

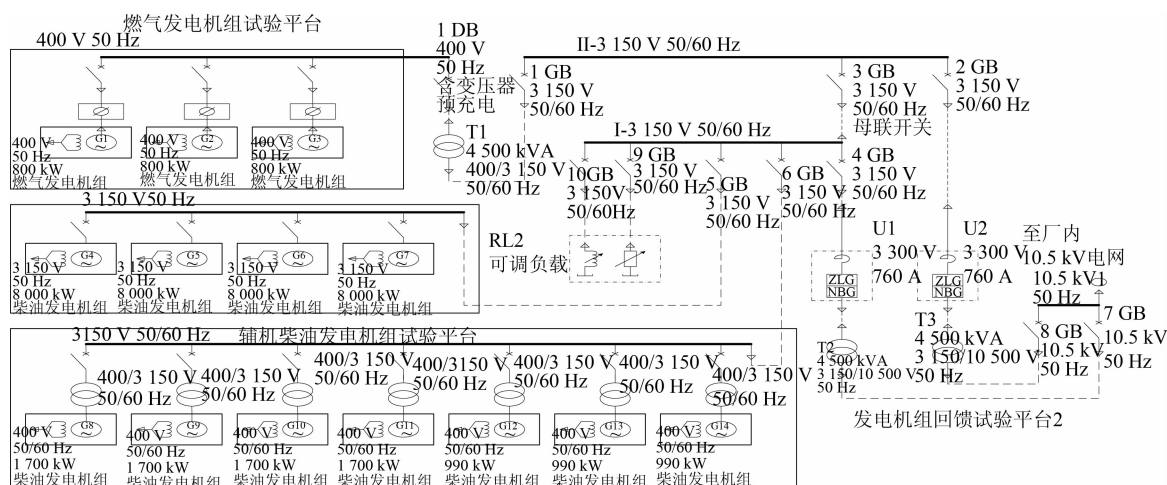


图3 发电机组回馈系统试验原理图二

回能型电子负载运行时,通过控制台调节向电网回馈的有功功率,改变机组实际负载的有功功率;机组的实际负载的无功功率由试验站的可调电感提供。根据机组试验负载的功率因数要求,可以按比例调节向电网回馈的有功功率和可调电感吸收的无功功率。

(5) 发电机对电流谐波的要求。采用回能型电子负载将产生其它次谐波电流,如高次谐波电流。谐波电流均产生铜损,高次谐波电流还产生涡流和磁滞损耗,即铁损。为保证机组试验的正常进行,回能型电子负载在发电机输出接变压器后,增加高性能 LCL 滤波器,经滤波将谐波电流控制在额定值的 5% 以下,满足发电机输出电流的谐波含量要求。

(6) 回馈并网控制及电能质量控制。机组回能型电子负载与公司电网的并网必须满足以下四个条件:

- ①回能型电子负载输出电压的频率和电网频率相同;
- ②回能型电子负载输出电压和电网的电压波形相同;
- ③回能型电子负载输出电压和电网电压大小、相位相近;
- ④回能型电子负载输出电压和电网的相序相同。

回能型电子负载通过实时检测 10.5 kV 电网的电压信号,闭环控制其输出电压,使其满足并网要求。

2 主要技术指标

2.1 主要设备技术指标

(1) 变频器主要技术指标

输入电源电压与频率 3 相 3 150 VAC $\pm 5\%$, 48 ~ 63 Hz; 额定输入电流 ≤ 760 A; 额定输出电压与频率 3 相 3 150 VAC, 50 Hz; 输出电流 ≤ 760 A; 输出电压谐波总畸变 $THD_v \leq 5\%$; 额定输出电流谐波总畸变 $THD_i \leq 5\%$; 额定工况效率 $\geq 97\%$; 冷却方式: 水冷; 通信接口: Profibus-DP/ Ethernet。

(2) 3.15/10 kV 升压变压器主要技术指标

额定容量 4 500 kVA; 额定输入线电压 3.15 kV, 副边电压 10 kV, 误差小于 $\pm 1\%$, 在此电压下, 通过调整原边分接抽头, 副边电压可调整 $\pm 5\%$ 、 $\pm 8\%$; 原副边连接方式: DY11; 频率 50 ± 1.5 Hz; 三相电压不平衡度 $< 1\%$; 短路阻抗: 15%; 工作效率 $\geq 98\%$; 额定温升 < 125 K; 冷却方式: 风冷。

(3) 0.4/3.15 kV 升压变压器主要技术指标

额定容量 4 500 kVA; 额定输入线电压 0.4 kV, 副边电压 3.15 kV, 误差小于 $\pm 1\%$, 在此电压下, 通过调整原边分接抽头, 副边电压可调整 $\pm 5\%$ 、 $\pm 8\%$; 原副边连接方式: DY11; 频率 50/60 Hz; 三相电压不平衡度 $< 1\%$; 短路阻抗 15%; 工作效率 $\geq 98\%$; 额定温升 < 125 K。

2.2 环境条件

周围空气温度 0 ~ +45 $^{\circ}\text{C}$; 冷却水温度 32 $^{\circ}\text{C}$; 周围空气相对湿度 $\leq 95\%$, 无凝露。

2.3 引用标准

GB/T 2820-1997 《往复式内燃机驱动的交流发电机组》; IEEE 387-1995 《核电厂备用电源柴油发电机组标准》^[3]; GB/T 13032-2010 《船用柴油发电机组》; GB/T 14549 《电能质量 公用电网谐波》^[4]; GB/T 12325 《电能质量 供电电压允许偏差》; GB/T 15945 《电能质量 电力系统频率允许偏差》; GB/T 15543 《电能质量 三相电压允许不平衡度》。

3 方案设计

机组回能型电子负载选定的技术方案包括系统方案、系统回能变频器柜方案、回能监控台方案、通信网络方案、功率检测箱以及结构设计方案。

3.1 系统方案

3.1.1 系统保护设计

系统电气装置设计有完善的硬件保护及软件保

护, 电流设计按照额定电流的 1.2 倍进行参数设计, $I_e = P_e / 0.8 U_e / 1.732$ (0.8 为功率因数), 主要包括过流保护、过压保护、驱动故障保护、IGBT 故障保护、过温保护、熔断器保护、水路保护、辅助供电系统保护等保护措施。

3.1.2 系统控制技术

能量回馈型变流器最关键的技术在于前级的 PWM 整流技术。三相电压型脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation-PWM) 整流器具有输出电压可调、抑制谐波, 解决变频器整流单元对电网的污染问题等功能, 同时可以实现电能回馈电网, 进行理想的四象限能量流动, 是励磁电源和可调直流电源的理想方案。变流装置本体由多变换单元通过变压器磁场并联运行, 变流单元之间无电气连接, 可容错运行, 可靠性高。变换单元之间采用基于高速通信的同步控制技术, 实现变换单元的同步控制、有功功率及无功功率的均衡控制。

3.1.3 系统应用性

四象限回能变流器的设计及其控制运行技术已通过多个项目的实施而成为成熟技术。图 4 为给某电力系统公司提供的 10 kV/10 MVA 四象限高压变频器试验系统。

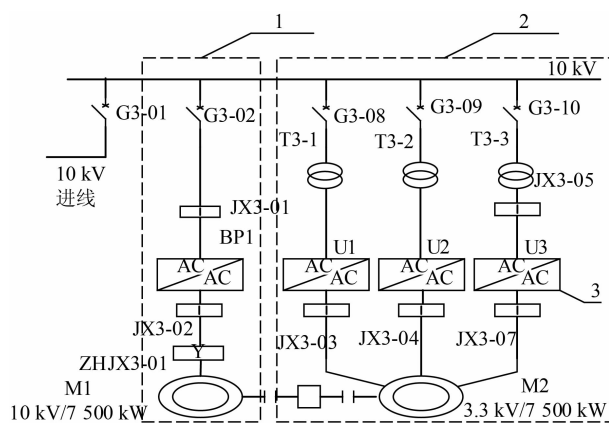


图 4 四象限高压变频器试验系统图

被试变频器 BP1 驱动 M1 电机旋转, 电动运行拖动同轴连接 M2 电机异步发电, 通过 3 台参试变频器 (U1、U2、U3) 并机协同回馈发电运行, 通过 3 台变压器 (T3-1、T3-2、T3-3) 将能量回馈到公共 10 kV 交流电网。该系统自投入使用以来, 运行效果良好。

3.2 回能变频器柜方案

变频器主要由整流变压器、交直交变流器 (简称变流器) 组成。变流器由控制柜、输入滤波柜、整流柜、直流电容柜、逆变柜、输出滤波柜及水冷柜组成。

3.3 回能型电子负载控制方案

(1) 控制器

控制器的作用是进行模拟信号采集与处理, IGBT 反馈信号判断, 确定 IGBT 器件是否工作正常, 与 PLC 进行 RS485 通信; 控制器根据通信信号与输入信号, 调节输出驱动信号。

(2) PLC 逻辑单元

PLC 逻辑单元主要包括 PLC 主运算单元、AI 扩展模块、DI 扩展模块、AO 扩展模块、DO 扩展模块、通讯扩展模块和 OP 操作面板。

(3) 控制软件设计

本系统采用功率双闭环的 AFE 技术和回网双闭环的 AFE 技术。功率外环为回能监控台设置的有功功率, 其内环为输入电流环, 实现输出功率的闭环控制; 回网外环为变频器的母线外环, 回网内环为输出电流环, 实现功率向电网回馈。

通过检测变压器和 10.5 kV 电网的线电压、三相电流以及电压矢量旋转角度, 采用有功功率外环、电流内环的双环串级控制结构, 控制输入电流矢量旋转角及跟踪电压矢量, 从而达到控制功率因数的目的; 同时通过调节电流大小, 实现有功功率的调节。

3.4 系统通信网络方案

回能监控台与回能变频器柜之间采用 Profibus-DP 接口, 协议为 DP 协议; 回能监控台与功率检测箱之间采用 Ethernet 接口, 协议为 TCP/IP 协议。

通过回能监控台, 试验人员能设置机组负载试验的回能型电子负载功率大小; 回能监控台经 Profibus-DP 将设置数据和控制指令下载到回能柜控制器, 以控制回能型电子负载输出有功功率的大小以及并网和解列; 回能监控台检测并显示回能柜上传的负载功率、及电压和电流数据。

3.5 回能监控台方案

3.5.1 回能监控台功能

通过控制室回能监控台操纵回能柜运行。主要包括回能柜的启动、停机控制和回能型电子负载的有功功率设置。

回能监控台监控回能型电子负载的运行状态: 主断路器状态、机组输出电压、机组输出电流、机组输出的有功功率、回能柜的数据及故障报警等信息。

3.5.2 回能监控台方案设计

回能监控台采用西门子 300 系列 PLC, 其功能是接收操作指令并发送指令到各回能柜 PLC 逻辑单元, 同时接收各回能柜 PLC 逻辑单元发回的状态数据, 实现控制功能。

3.6 功率检测箱

功率检测电路主要由传感器、采样处理电路、数字处理器、通信电路组成, 采用处理电路处理电压电流互感器输出的信号, 并将数据通过 Ethernet 接口通信电路传输给回能监控台。

3.7 结构设计方案

回能电柜由开关、功率单元、滤波单元和水冷单元组成。整流、输入母线排及逆变安装在功率单元中, 输出滤波及输出母线排安装在滤波单元中, 水冷系统安装在水冷柜中, 各个柜体之间可通过有效的机械连接使之成为组合柜, 安装快速方便, 维修方式为正面维修。

3.8 电磁兼容设计

主要采用隔离、接地、屏蔽、滤波等措施进行回能柜的电磁兼容 (EMC) 设计, 具体如下:

(1) 回能柜输入侧采用多绕组变压器多脉波整流;

(2) 输出侧设计 LCL 型滤波单元, 使输入电流谐波大大减小;

(3) 逆变功率单元采用光纤进行隔离驱动;

(4) 辅助电源采用隔离变压器, 并在输入端装有电源滤波器;

(5) 控制电路的 PCB 电路板按照电路板 EMC 设计方法设计, 合理进行布局、布线;

(6) 变频器结构设计充分考虑电磁兼容性要求;

(7) 做好接地措施, 采用导电性较好的镀锌接地板;

(8) 主电缆、信号电缆分开布置, 主回路电缆采用带屏蔽层的电缆, 较敏感的信号线也采用屏蔽线, 所有屏蔽层要求可靠接地。

4 结束语

本文研究的柴油发电机组回能型电子负载系统技术经过多次论证和反复试验, 并通过某型发电机组回能型电子负载测试试验, 各性能指标得到有效验证, 可满足各型发电机组调速特性和负载特性的测试要求, 符合国标和行业标准, 适用于不同电压、不同功率的发电机组电特性测试试验。加载“快、稳、准”, 尤其适用于船用发电机组、海洋工程用发电机组、应急发电机组等电特性测试及作电负载。通过柴油发电机组回能型电子负载系统技术研究与应用, 节约了能源, 降低了生产成本, 提高了柴油发电机组的测试效率。

(下转第 52 页)

其效率高, 适合于类似细长光杆外圆部位的高效去除磨削余量的粗、半精磨加工。

(3) 根据试验确认与之匹配的顶紧压力, 以及工件床身轴线与砂轮纵向走刀调整一致的前提下, 采用纵向走刀法精磨杆身外圆, 按照磨削余量 $0.02 \sim 0.03 \text{ mm}$ 进行纵向走刀磨削加工, 中心托架调整跟进, 打表监测各档外圆跳动允差 $\leq 0.01 \text{ mm}$, 同时监控顶尖顶紧压力变化情况的磨削工艺方法, 能满足该类细长轴工件超高精度磨削加工的要求, 并在实际零件的加工中得到验证。

3.3 光整加工技术研究及验证

活塞杆杆身外圆表面质量要求很高, 为了进一步提高杆身外圆表面质量, 采用工件与抛光带双旋转的抛光形式, 即通过车床带动工件低速旋转, 选用宽度 30 mm , 圆周长 $1\,800 \text{ mm}$ 的 $240 \sim 280$ 目抛光带, 设计并采用如图 6 所示的气动外圆抛光工具, 经实物抛光验证, 操作简便, 满足光整加工要求。

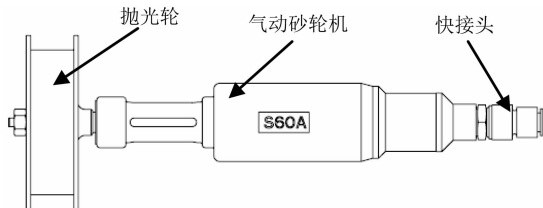


图 6 气动外圆抛光工具示意图

活塞杆深油孔孔壁表面粗糙度要求 $Ra6.3$, 由于孔径较小, 深度约达 $2\,000 \text{ mm}$, 深孔钻削过程时间较长, 受刀具磨损、铁屑排除不畅等不利因素

的影响, 孔壁表面质量不是很理想, 须通过抛光提高深孔内壁表面质量。对此设计了如图 7 所示的深孔抛光工具, 效果良好。

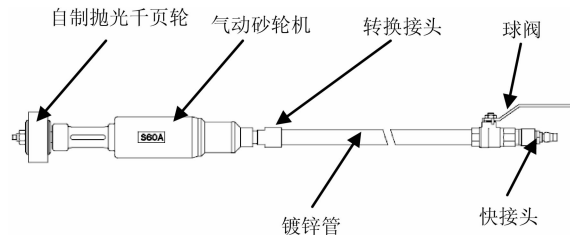


图 7 深孔抛光工具示意图

4 结 论

通过开展低速柴油机活塞杆细长轴超高精度磨削工艺研究及验证工作, 较好地解决了活塞杆杆身外圆直径尺寸公差 $h6$, 有效圆柱长度近 2 m , 且整体圆度 0.01 mm , 圆柱度 0.02 mm , 表面粗糙度 $Ra0.4$ 高精度加工要求的技术难题; 同时解决了深孔抛光问题。该方法对同类产品的工艺开发具有一定的借鉴和指导价值。

参考文献

- [1] 浦艳敏. 金属切削刀具 - 几何参数设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [2] 黄健求. 机械制造技术基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [3] 王先逵. 机械加工工艺手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

(上接第 40 页)

参考文献

- [1] 中国国家标准化管理委员会. 船用柴油发电机组: GB/T 13032-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. 强复式内燃机驱动的交流发电机组: GB/T 2820-1997 [S]. 中国标准出版社, 1997.
- [3] Nuclear power engine committee of the IEEE power engineering society. IEEE standard criteria for diesel-generator icnits applied as standby power supplies for unclear power generating stations; IEEE 387-1995 [S]. USA: The In-

- stitute of electrical and electronics engineers, Inc, 1995.
- [4] 国家技术监督局. 电能质量 公用电网谐波: GB/T 14549-1993 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [5] 孙斌, 张全成, 陈苏生, 等. 能量自循环电力电子负载在低压开关测试中的应用研究 [J]. 机械制造, 2013 (3): 82-84.
- [6] 付青, 陈淑华, 李湘峰, 等. 新型电池检测馈电节能系统的研究与设计 [J]. 电力电子技术, 2011, 45 (4): 103-105.
- [7] 姚远. 船舶发电机组电子模拟负载的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014.