

垃圾破碎机控制系统设计

常明伟, 毛志伟, 江海蛟, 张刚, 李春永

(北京航天动力研究所 流体与旋转机械事业部, 北京 100076)

摘要: 基于大流量(生活垃圾可达 40 t/h)的垃圾破碎机, 能满足在常规流量和试验阶段的大流量破碎需求; 破碎机设计功率 250 kW, 设计扭矩 $2 \times 66\,000 \text{ N} \cdot \text{m}$, 最大工作压力 35 MPa; 其控制系统采用西门子 PLC1500 作为控制中心, 配备就地显示屏、ABB 变频器, 通过 Profinet 总线通信连接在一起, 经由显示屏通过 Profinet 总线实现破碎机的所有操作; 控制系统通过采集一次仪表运行数值实现破碎机的报警、连锁, 保证其正常可靠运行; 采用模块化编程, 优化核心算法, 使破碎机的在不同工况下运行更加稳定可靠; 根据上游来料量的不同, 调节变频器, 使垃圾破碎机运行在不同的速度, 达到环保节能的目的。

关键词: Profinet 总线通信; 令牌算法; 条件时间累计指令; 抗干扰; 多重背景

Design of Waste Crusher Control System

Chang Mingwei, Mao Zhiwei, Jiang Haijiao, Zhang Gang, Li Chunyong

(Liquid and Rotating Machinery Department, Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: The waste crusher based on large flow rate (up to 40 t/h of household waste) can meet the crushing demand of large flow rate in normal flow rate and test stage. The designed power of the crusher is 250 kW, the designed torque $2 \times 66\,000 \text{ N} \cdot \text{m}$, and the maximum working pressure is 35 MPa. Its control system uses Siemens PLC1500 as the control center, equipped with local display screen, ABB converter, and connected by Profinet bus communication. The control system realizes the alarm and interlock of the crusher by collecting the operation value of the primary instrument, ensuring its normal and reliable operation. Using modular programming and optimizing the core algorithm, the crusher runs more stably and reliably under different working conditions. According to the different amount of upstream incoming material, the frequency converter is adjusted to make the waste crusher run at different speeds, so as to achieve the goal of environmental protection and energy saving.

Keywords: Profinet bus communication; token algorithms; conditional time cumulative instruction; anti-interference; multiple background

0 引言

垃圾破碎机是破碎机的一种, 用途广泛, 适用于破碎电子垃圾、医疗垃圾、餐厨垃圾、工业垃圾、生活垃圾等各种固体废弃物。

随着人们生活水平逐渐提高, 人们对环境质量的要求也越来越高, 但是经济的快速发展带来了越来越多的固体垃圾, 这些垃圾对环境造成了比较大的污染。垃圾处理不论是焚烧、热解或是填埋, 均需要对垃圾进行破碎, 破碎之后垃圾的压缩体积变小, 便于运输和减少遗洒, 在最终的垃圾处理时可以大幅提高垃圾的资源利用效率。

本破碎机属于对辊式低转速粗破碎机, 带有两个液压驱动转子的旋转机械, 用于切、撕和折断物品。适用于破碎生活垃圾、大件垃圾等各类垃圾, 广泛用于焚烧厂、分选厂等垃圾破碎领域。

1 垃圾破碎机系统构成

垃圾破碎机分为三大部分: 破碎主机部分、液压动力

装置和电控柜组成。

主机部分主要由两个带刀齿的转轴组成, 每个转轴旋转与静刀之间产生挤、压、切、撕等力, 扭矩最大至 $66\,000 \text{ N} \cdot \text{m}$, 将垃圾破碎。为了防止缠绕、堵塞, 两个转轴分别以各自的运行周期正反转, 因此两个转轴形成一个大周期(两个小周期的最小公倍数), 包括两个转轴同时正转、同时反转、一正一反、一转一停等运行工况。

液压动力装置主要是一整套液压系统的集合, 包含液压泵、变频驱动电机、冷却器、过滤器、液压马达等, 其中液压马达安装在主机上, 通过胀套与转轴连接在一起。破碎机相关的一次仪表也全部安装在液压系统各个部位, 如油箱液位、温度仪表、液压泵工作、补油压力仪表、吸油球阀接近开关、排料阀、伺服阀等。液压系统最大工作压力可达 35 MPa。

电控柜根据相关一次仪表测量值实施报警连锁, 负责整个破碎系统的正常可靠运行, 主要包括 PLC(含通信模块、数字量输入/输出模块、模拟量输入/输出模块), 变频器(250 kW), 塑壳断路器, 隔离栅, 信号放大器等电器元件。

本垃圾破碎机有以下特点。

低扬尘: 低转速垃圾破碎机以一个较低工作速度旋转(最大转速 35 r/min), 物料破碎时产生极少的扬尘及升热。

收稿日期: 2019-09-10; 修回日期: 2019-11-01。

作者简介: 常明伟(1983-), 男, 河南人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事高速泵、破渣机、泵试验台电控系统的设计工作方向的研究。

低爆炸风险: 与其他破碎系统如高速压碎机相比, 爆炸风险可以忽略。

2 控制系统硬件配置

2.1 液压系统工作原理

垃圾破碎机控制系统通过液压系统来控制破碎机的运转, 所以液压系统的配置及使用要求决定了电控系统的构成及程序控制。液压系统采用变量泵定量马达容积调速、双向变量泵换向回路, 闭式循环油路系统^[1]。液压马达通过联轴器与破碎机转轴相连, 驱动破碎机匀速旋转。液压系统的核心装置为液压泵, 液压泵采用轴向柱塞泵形式, 可以达到很高的压力 (最大可至 45 MPa)。由于采用闭式系统且需要控制破碎机两根转轴旋转, 所以一根泵轴上串联两个主油泵、两个补油泵和一个齿轮泵。液压泵排量控制采用电气控制方式, 通过模拟量信号 14~85 mA 控制其在零和最大排量之间工作, 详见图 1。

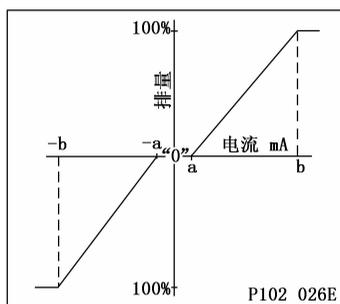


图 1 液压泵排量 vs 输入电流信号

具体控制实现, 将模块量输出模块的标准 4~20 mA 信号通过隔离放大器线性对应成 0~100 mA, 然后根据运行需要输出不同的电流值使破碎机达到不同的运行速度。

2.2 仪表配置

为了保证破碎机的稳定可靠运行, 需实时监测相关运行参数, 当不满足系统运行条件时需要给出相应的报警或提示信息甚至连锁停车。液压系统配置有压力、温度、液位、伺服阀、接近开关、电磁阀等仪表^[2]。

压力仪表主要有: 轴 1 补油压力变送器、轴 2 补油压力变送器、齿轮泵压力变送器、轴 1 正转压力变送器、轴 1 反转压力变送器、轴 2 正转压力变送器、轴 2 反转压力变送器, 泵 1 补油过滤器压力开关、泵 2 补油过滤器压力开关、回油过滤器压力开关。

温度仪表: 油箱液压油温度变送器; 液位仪表: 油箱液位开关, 含三个开关量干节点, 液位高、液位低、液位低低; 伺服阀: 伺服阀 1、伺服阀 2; 接近开关用于泵 1 吸油球阀、球 2 吸油球阀、齿轮泵吸油球阀; 电磁阀: 排料阀门 1、排料阀门 2。

由于电机功率 (250 kW) 较大, 为防止电机出现过载, 电机定子绕组配置有热敏电阻 PTC。

2.3 PLC 模块

控制核心采用西门子 PLC S7-1500 系列, 根据仪表及电气配置, 主要选用的模块有: 数字量输入/输出模块、模

拟量输入/输出模块、通信模块等。其中通信模块采用常用的 RS485 口, MODBUS-RTU 协议; 模拟量输入模块须接入 PTC 电阻等^[3]。详细配置如图 2 所示。

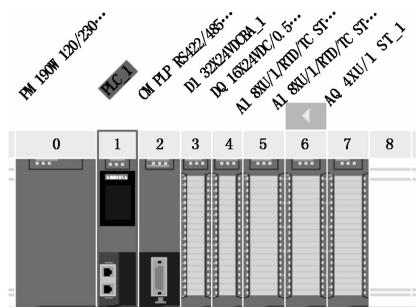


图 2 PLC 模块

2.4 网络通信系统

近些年来, 随着自动控制、计算机、通信、网络等技术的发展, 以 Profinet 为代表的网络总线通信正深入到各行各业, 各电器元件供货商也积极推出支持 Profinet 通信的产品, 使得控制系统设计的灵活性大大增加, 成本也大为降低。不同控制系统通过 Profinet 的集成不仅可以为工厂的统一信息管理 (生产、物流、销售、管理等) 奠定基础, 并且也可以无缝的接入整个互联网中实现控制系统的远程监控和管理^[4]。

本系统采用 Profinet 总线通信将就地显示屏、PLC、变频器连接一个网络, 便于组件之间的大量信息传递, 并留有富余接口, 支持将本系统接入整个工厂的企业信息管理系统之中。详见图 3 所示。

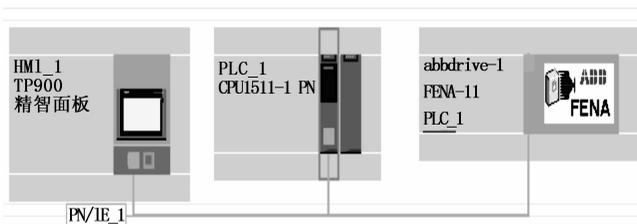


图 3 Profinet 总线通信

就地显示屏除显示垃圾破碎机的各运行参数, 还可以操作破碎机的启停和加减速等操作, 减少了实体按键, 电控柜更加整洁美观。显示屏具体组态^[5-6]如图 4 所示。

3 编程技巧处理

3.1 模块化处理

模块化编程将程序按功能进行封装之后, 可以使程序简洁, 调试简化, 移植性好, 可靠性好, 后期在修改连锁报警值或一些计时值、计数值方面也更加方便。

本项目模拟量信号比较多, 均采用 4~20 mA 进行信号传输, 输入输出 PLC 处理时与 0~27648 成线性关系, 因此将仪表量程与 PLC 设定值做成功能块。为了增加此模块的通用性, 体现完全的线性对应关系, 输入值含: 自变量、自变量对应量程上限、自变量对应量程下限、因变量对应

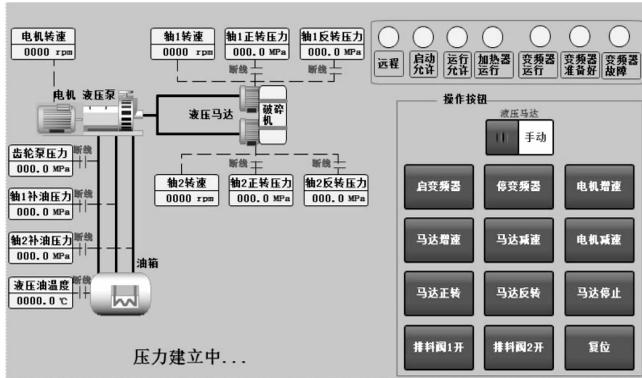


图 4 显示屏组态

量程上限、因变量对应量程下限，输出值为因变量。由于在工艺过程中，各参数的显示精度不同，且 PLC 处理实数的效率比较低，实际计算过程采用整数进行处理，最后再通过小数点移位实现小数显示，所以模块输入参数需要再增加一个小数点移位数。最终功能如图 5 所示。

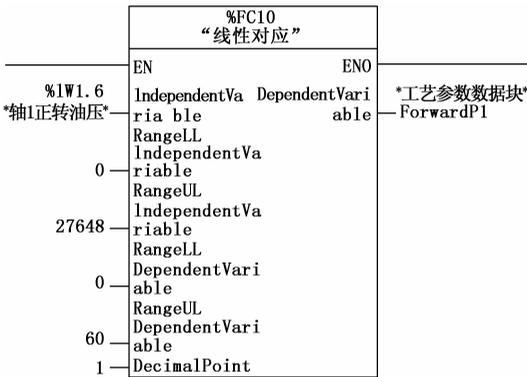


图 5 线性对应模块

垃圾破碎机有两个转轴，每个转轴上按一定规律分布用于破碎垃圾的刀齿。正常运转时，由于转轴及刀具可能会缠绕一些不易碎物品，所以转轴采用周期性正反转（中间有停止状态）运动，不过两根轴分别采用不同的正反转周期，因此两根轴之间形成同时正转、同时反转、一正一反、一停一转等状态，可有效停止缠绕、堵塞等情况。

由于两根轴的控制逻辑比较复杂（有正转、反转、停止，又需要调整转速等），中间变量使用较多，将其封装成功能块后，程序更加简洁，调用也更加方便。轴独立控制功能块如图 6 所示。

3.2 自定义指令

破碎机运行过程中，由于待破碎物品种类及特性各异，所以破碎过程中极易产生堵塞，同时由于破碎机是周期性正反转运行，大概率情况下堵塞是间歇性的。为了更准确的描述堵塞现象以便提示操作人员进行及时处理，编程采用条件时间累计计时方式，即在计时时长 m 范围内系统压力超过设定值就开始计时，低于设定值就停止计时，如果累计堵塞时长超过设定时长 n ($m > n$) 就认为破碎机堵塞，给出报警信号。



图 6 轴独立控制功能块

PLC 指令集里计时相关的指令有: 脉冲定时器, 扩展的脉冲定时器, 接通延时定时器, 保持型的接通延时定时器, 断电延时, 脉冲计时及 IEC 定时器^[3]。但众多定时器里并没有条件时间累计定时器, 为了项目需要设计一个“指令”: 条件时间累计定时器。

它以 IEC TON 定时器 (时序图见图 7) 为基础, 在计时时长内将每次满足条件的时长进行累计, 待下次再满足条件时, 在每次条件时长基础上进行累计, 如果超过计时时长则复位各中间变量, 含计时时长定时器、TON 定时器及每次条件时长、条件累计时长等信息, 其余需要复位中间变量的情况为: 每次 PLC 上电, 堵塞过程中变为正常时, 发出堵塞报警信号后。最终条件时间累计定时器功能块如图 8 所示。

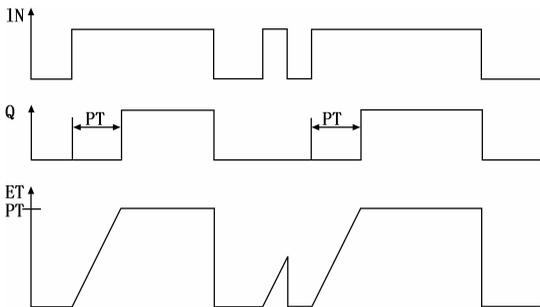


图 7 IEC TON 时序图

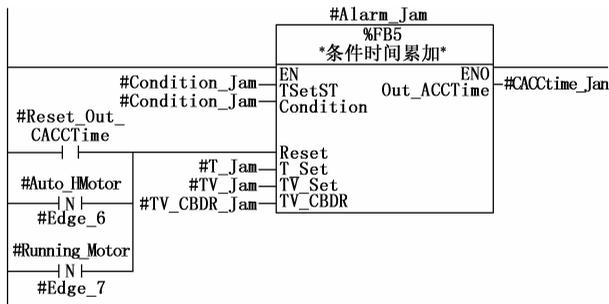


图 8 条件时间累计定时器功能块

3.3 多重背景

模块化处理带来了极大的便利, 但有时需要多次调用同一个功能块, 不过每次调用都需要生成一个背景数据块, 如果这些背景数据块中的变量又很少, 就会在项目中出现大量的背景数据块“碎片”。此时如果采用多重背景^[7]就可以减少背景数据块的数量。另外, 多重背景还可以保证模块的完整性、增加模块的可移植性。例如: 在“独立堵转”功能块中采用了“条件时间累加”功能块, 而其中又包含 IEC TON 标准时间记时器模块。“独立堵转”功能块的形式参数列表如图 9 所示。

3.4 算法设计

由于显示屏显示面积有限, 为了显示更多破碎机运行的相关状态及报警故障信息, 本设计采用在同一文本区域分时显示需要出现的运行或报警故障信息。

为了分时, 设计了两种算法实现: 跳转法和令牌法。

独立堵转		
名称	数据类型	默认值
93	堵转退出条件时间...	'条件时间累加'
94	Input	
95	TSetST	Bool false
96	Condition	Bool false
97	Reset	Bool false
98	T_Set	Timer 0
99	TV_Set	55Time 55Time0ms
100	TV_CBDJR	Time 100ms
101	Output	
102	Out_ACCTime	Dint 0
103	InOut	
104	Static	
105	Each_CNDTNT...	Time 100ms
106	ACC_CNDTNT...	Dint 0
107	Each_CNDTNT...	Dint 0
108	SetTSetST	Bool false
109	STAT1_N	Bool false
110	STAT1_P	Bool false
111	STAT2_Temp	Bool false
112	STAT3_P	Bool false
113	OverT_Set	Bool false
114	TSet_Bi	Word 16#0
115	TSet_BIFMT	Int 0
116	IECTON	IEC_TIMER
117	PT	Time 100ms
118	ET	Time 100ms
119	IN	Bool false
120	Q	Bool false

图 9 轴独立控制功能块形式参数

1) 跳转法

采用条件跳转指令操作, 每个需要显示的信息对应一个唯一的标志, 正常情况下每个扫描周期扫描一个标志, 然后 (下一个周期) 循环至下个标志, 如果有信息需要显示则一直保持某个标志, 直至设定时间, 然后转向下一个标志, 周而复始。具体流程如图 10 所示。

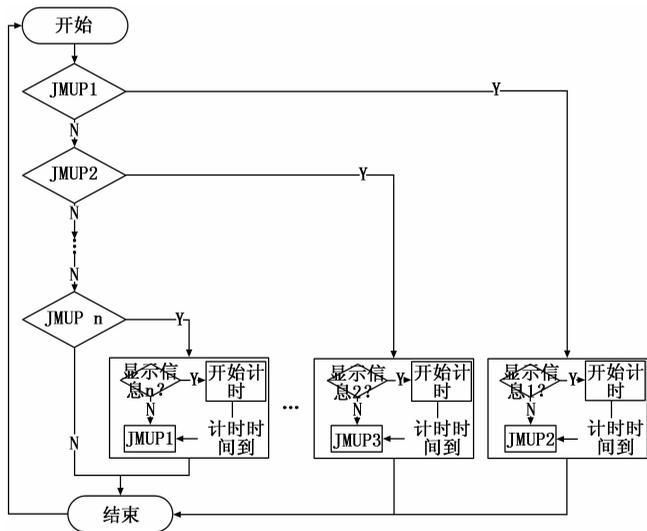


图 10 跳转法流程

2) 令牌法

采用令牌独占循环方式。正常情况下令牌在所有信息里流转 (每个 PLC 扫描周期结束后流转至下一个信息), 当有需要显示的信息占用令牌时, 令牌的“是否占用”位标志为“已占用” (此时令牌不再流转), 并开始计时显示时间, 计时完成后结束令牌占用并接着流转。具体流程如图 11 所示。

跳转法需要 n 个跳转条件, 并且在每一个“显示信息”判定后再直接跳转至“结束” (因为 PLC 扫描为自上而下、自左向右顺序方式), n 个计时器, 当 n 数值较大时, 占用系统资源太多, 编程工作量也大大增加。当然采用 n 个计时器, 可以对每个“显示信息”显示时间进行定制, 不过

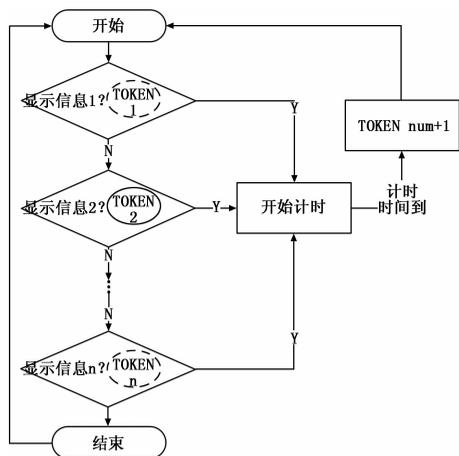


图 11 令牌法流程

对于本项目来说，每个信息有相同的显示时间即可。

令牌法仅需要 1 个令牌计数，1 个定时器即可，大大减少了系统资源占用量，程序编制也简洁可靠。

经比较，本项目采用令牌法。

3.5 通信控制变频器

Profinet 通信可以通过组态相应 ABB 变频器的 GSD 文件实现。

对变频器的控制一般通过发现报文实现，最常用的两个字为控制字 CW 和给定字 Ref1^[8]。控制字实现对电机的初始化、启动、停止等操作。控制字每一位的具体定义详见图 12。

操作电机时须向控制字写入以下设定值（16 进制）：

- 初始化 476 并延时至少 100 ms
- 启动 47F
- 停止 477

改变变频电机运行速度须通过通信向给定字写入速度给定，-20000…20000，分别对应反转的最大速度和正转的最大速度值。给定字实现对变频电机的速度控制。

如果需要从变频器获得运行状态信息，就需要读取状态字 SW 和速度实际值 ACT1，其余如电机转矩、输出频率、电机位置等信息亦可根据需要读取。现场总线状态字详细内容如图 13 所示。

4 抗干扰设计

电气控制系统采用了一个 250 kW 变频器，由于变频器功率较大、干扰也较强烈，所以需要专门对其干扰做处理。

为了控制成本及电气控制系统更加集中，本设计将控制系统和变频器集成在一个柜子中。为了防止变频器干扰控制系统，将控制系统放置在一个金属的摇门内，相当于把整个控制系统放置在一个理想的法拉第笼中^[9]，可有效屏蔽来自变频器和外部的干扰。

首先，变频器动力电缆采用带有铜带屏蔽层的电缆，在电机端子盒将电缆屏蔽层进行 360 度接地（如图 14 所示），屏蔽层另一端在配电柜内接地，可以有效的抑制电磁波的辐射和传导。

其次，控制电缆采用屏蔽型双绞线电缆。屏蔽层双端接地，由于两端地电势不同可能会在屏蔽层中形成电流造成干扰，所以一般采用屏蔽层在控制柜端单端接地措施^[10]。另外采用双绞线，可使干扰电流在每个小环内成反方向，其干扰电势相互抵消，可有效抑制共模干扰。

另外为了防止不同电压等级电缆之间形成干扰，将 24 V 电缆和 220 V 电缆分开敷设，即走不同的电缆槽盒。

经实际运行测试，各采样数据值准确、稳定，无跳变，为后续数值计算处理及报警或连锁控制奠定基础。

5 控制系统应用

系统上电运行后，各项操作如电机的启动、停止、加速、减速，液压马达的正转、反转、停止、加速、减速等经反复测试，反应迅速可靠。采集到的电机、液压系统各参数值准确、稳定，无跳变。控制系统的油温高、高高、液位低、低低，电机过载、定子温度高高，补油压力低、变频器故障，电加热器启动、停止等报警或连锁，经实际测试，均符合设计预期，可有效提醒操作者破碎机运行中黑体字是指在状态图中所示的状态（495 页）。

位	名称	值	状态 / 描述
0	Off1 控制	1	进入 READY TO OPERATE 。
		0	沿当前激活减速斜坡停止。进入 OFF1 ACTIVE ；进入 READY TO SWITCH ON 除非其它互锁（OFF2, OFF3）被激活。
1	Off2 控制	1	继续运行（OFF2 停止）。
		0	紧急停止，惯性停止。进入 OFF2 ACTIVE 。进入 SWITCH-ON INHIBITED 。
2	Off3 控制	1	继续运行（OFF3 停止）。
		0	急停，在传动参数定义的时间内停止。进入 OFF3 ACTIVE ；进入 SWITCH-ON INHIBITED 。 警告： 确保电机和传动机械可以通过这种停机模式停止。
3	运行	1	进入 OPERATION ENABLED 。 注意： 运行允许信号必须有效。如果传动设置为从现场总线接收运行允许信号，该位激活信号。
		0	禁止运行。进入 OPERATION INHIBITED 。
4	斜坡输出为零	1	正常运行。进入 RAMP FUNCTION GENERATOR: OUTPUT ENABLED 。
		0	强制斜坡函数发生器输出为零。传动将立即减速至零速（观察转矩限幅）。
5	斜坡保持	1	激活斜坡函数。进入 RAMP FUNCTION GENERATOR: ACCELERATOR ENABLED 。
		0	中断斜坡（强制斜坡函数发生器输出保持）。
6	斜坡输入为零	1	正常运行。进入 OPERATING 。 注意： 只有通过传动参数设置现场总线接口为该信号的源时，该位有效。
		0	强制斜坡函数发生器输入为零。
7	复位	0=>1	如果故障存在，故障复位。进入 SWITCH-ON INHIBITED 。 注意： 只有通过传动参数设置现场总线接口为复位信号的源时，该位有效。
		0	继续正常运行。
8	点动 1	1	加速到点动设定点 1。 注意： - 位 4...6 必须为 0。 - 参见 点动功能 （53 页）部分。
		0	滑行（点动）1 失效。
9	点动 2	1	加速到点动设定点 2。 参见位 8 的提示。
		0	滑行（点动）2 失效。
10	远程控制	1	现场总线控制生效。
		0	除了第 0...2 位，控制字和给定值没有接到传动。
11	外部控制地	1	选择外部控制地外部 2。如果控制地设置为通过现场总线选择，该控制字有效。
		0	选择外部控制地外部 1。如果控制地设置为通过现场总线选择，该控制字有效。
12 至 15	待定。		

图 12 ABB 变频器现场总线控制字内容（ABB 传动协议）

黑体字是指在状态图中所示的状态 (495 页)。

位	名称	值	状态 / 描述
0	准备合闸	1	READY TO SWITCH ON.
		0	NOT READY TO SWITCH ON.
1	准备运行	1	READY TO OPERATE.
		0	OFF1 ACTIVE.
2	准备给定值	1	OPERATION ENABLED.
		0	OPERATION INHIBITED.
3	跳闸	1	FAULT.
		0	无故障。
4	Off 2 失效	1	OFF2 失效。
		0	OFF2 ACTIVE.
5	Off 3 失效	1	OFF3 失效。
		0	OFF3 ACTIVE.
6	合闸禁止	1	SWITCH-ON INHIBITED.
		0	-
7	警告	1	警告激活。
		0	无警告激活。
8	设定点	1	OPERATING. 实际值等于给定值 = 在允许误差范围之内 (见参数 46.21、46.23)。
		0	实际值与给定值不同 = 超出允许误差范围。
9	远程控制	1	传动控制地: REMOTE (外部 1 或 外部 2)。
		0	传动控制地: LOCAL 。
10	超出限值	-	参见参数 06.29 主状态字位 10 选择。
11	用户位 0	-	参见参数 06.30 主状态字位 11 选择。
12	用户位 1	-	参见参数 06.31 主状态字位 12 选择。
13	用户位 2	-	参见参数 06.32 主状态字位 13 选择。
14	用户位 3	-	参见参数 06.33 主状态字位 14 选择。
15	保留	-	-

图 13 ABB 变频器现场总线状态字内容 (ABB 传动协议)

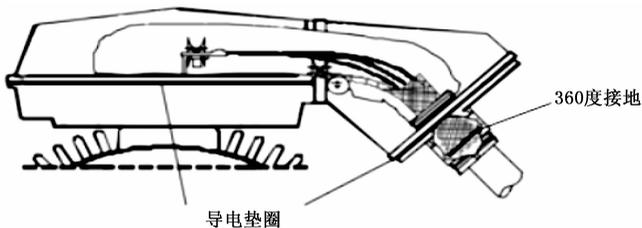


图 14 360 度接地

出现的各种问题, 以及当出现危害破碎机运行的情况时, 及时停车保护整个液压系统和破碎机主机。

4 结语

高精度的短波发射机功率校准方法获得的衰减表格和基准电压 AD 值表格, 在实际发射时输出功率有更高的精度, 精度提升约 35%。同时, 工作自动化省时省力, 解决了校准过程中操作繁琐、发射机频响差、电子器件差异及检测头精度不足等问题。但是受外场仪表配置所限, 目前该方法只应用于车间发射机校试、返修, 同时, 若能够提高数控衰减器控制精度, 则发射机能够获得更高精度的功率输出。

参考文献:

[1] 安琳. 无线电短波通信在信息化时代的应用 [J]. 珠江水运, 2007 (6): 40-42.

[2] 朱玉辉, 姜淋尹. 浅析短波通信的现状与发展趋势 [J]. 数字通信世界, 2017, 126: 62-64.

[3] 郭红利. 短波电台发射控制系统设计与应用分析 [J]. 黑龙江科技信息, 2016, 52: 77-81.

6 结束语

文中介绍了垃圾破碎机的基本构成, 重点阐述了其控制系统的设计理念, 通过 Profinet 总线通信、模块化处理、多重背景、优化核心算法及抗干扰处理, 提高了程序的运行效率及可靠性。针对上游垃圾来量不同, 可通过变频调速系统选择不同的处理速度, 达到经济节能的目的。经调试运行, 控制系统各采样参数稳定、操作方便、运行可靠。

参考文献:

[1] 张利平. 液压传动系统及设计 [M]. 北京: 化工工业出版社, 2005.

[2] 陆德民. 石油化工自动控制设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

[3] S7-1500/ET200MP 自动化系统产品手册 [Z]. 北京: 西门子 (中国) 有限公司, 2017 (8)

[4] 崔坚, 李 佳. 西门子工业网络通信指南 [M]. 北京, 机械工业出版社, 2004.

[5] 崔坚. SIMATIC S7-1500 与 TIA 博途软件使用指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.

[6] 深入浅出西门子人机界面 [Z]. 北京: 西门子 (中国) 有限公司, 2012.

[7] 廖长初. S7-300/400PLC 应用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[8] ABB 工业传动固件手册, ACS880 基本控制程序 [Z]. 北京 ABB 电气传动有限公司, 2016.

[9] 江海蛟, 常明伟, 袁志林. 多工段多工位泵试验台控制方案设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 69-70.

[10] 吴薛红, 濮天伟, 廖德利. 防雷与接地技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

[4] 南敬昌, 方 杨, 李厚儒. 高效率高线性度功率放大器的设计与实现 [J]. 固体电子学研究与进展, 2013, 33 (3): 244-253.

[5] 许高明. 功率放大器非线性特性及矫正技术研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2015.

[6] 张涛涛. 高功率放大器预失真技术的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.

[7] 彭 麟, 苏 畅, 袁凤国. 宽带高速电台发射机系统的保护设计应用 [J]. 通信技术, 2013, 46 (5): 16-18.

[8] 李宏哲, 霍青松, 李 政. 短波发射机的输出功率及其控制实现 [J]. 中国设备工程, 2017: 136-138.

[9] 谈江海. 短波电台发射控制系统设计与应用 [J]. 通信技术, 2014, 47 (5): 566-569.

[10] 陈 新, 陈双双, 林晓煊. 改进的高精度功率放大器校准方法 [J]. 国外电子测量技术, 2016, 35 (4): 46-54.

[11] 吴广富, 易 燕, 林 峰. 改进的功率校准算法 [J]. 数字通信, 2014, 41 (6): 32-35.

[12] 王振动, 王 勇. 基于 LH79520 的射频功率自动校准系统设计 [J]. 自动化技术与应用, 2009, 23 (6): 124-126.