

金属非金属矿山井下电气常见故障处理与预防策略研究

唐柱

海南矿业股份有限公司，海南，572700；

摘要：深入研究金属非金属矿山井下电气常见故障处理具有重要的现实意义。能够有效保障矿山生产的安全性。通过对常见故障的分析和处理，可以及时发现并消除电气系统中的安全隐患，降低事故发生的概率，为矿工创造一个安全的工作环境。有助于提高矿山生产效率。快速准确地处理电气故障，能够减少设备停机时间，保证生产的连续性，从而提高矿山的生产能力和经济效益。研究井下电气故障处理还能推动矿山电气技术的发展，促进新技术、新设备的应用，提高矿山的智能化水平。

关键词：金属非金属；生产效率；智能化

DOI:10.69979/3041-0673.25.02.089

引言

在现代工业体系中，金属非金属矿山的开采是基础且关键的环节，其为众多行业提供了不可或缺的原材料。而井下电气系统作为矿山生产的核心支撑，如同人体的神经系统，对矿山的正常运转起着决定性作用。从提升运输矿石的提升机，到通风换气保障井下空气质量的通风机，再到挖掘矿石的采掘设备，无一不是依靠稳定的电力供应才能高效运行。若井下电气系统出现故障，哪怕是短暂的供电中断，都可能导致整个生产流程的停滞，造成巨大的经济损失。电气故障还可能导致设备失控，引发机械伤害等事故。因此，保障井下电气系统的稳定运行，是确保矿山安全生产的重要前提。

1 金属非金属矿山井下电气系统概述

1.1 系统构成与特点

1.1.1 系统构成

金属非金属矿山井下电气系统是一个复杂且关键的系统，主要由以下几个部分构成：

主体设备包含：变压器、开关柜、电缆、电动机等，此外井下电气系统还包括照明设备、信号装置、通信装置等其他设备。照明设备为井下作业人员提供充足的光照，确保作业安全；信号装置用于传递各种操作信号和故障信号，方便工作人员进行操作和维护；通信装置则实现了井下各个区域之间的通信联络，保障了生产调度和应急指挥的顺利进行。

1.1.2 系统特点

金属非金属矿山井下电气系统具有以下显著特点：

环境恶劣：井下环境存在诸多不利于电气设备运行的因素。湿度大是一个突出问题，在一些矿山井下，空气湿度常常高达 90% 以上，这会导致电气设备的绝缘性能下降，增加漏电和短路的风险。例如，电缆的绝缘层在长期潮湿的环境下容易受潮损坏，从而引发电气故障。腐蚀性气体也是常见的问题，井下可能会产生如二氧化硫、硫化氢等腐蚀性气体，这些气体会对电气设备的金属部件造成腐蚀，降低设备的使用寿命。粉尘多也是井下环境的特点之一，大量的粉尘会附着在电气设备表面，影响设备的散热，导致设备过热，进而引发故障。

负荷复杂：井下电气设备的负荷具有多样性和变化性。不同类型的设备，其负荷特性差异较大。例如，提升机在启动和停止时，会产生较大的冲击电流，对电网的稳定性造成影响；通风机则属于连续运行的设备，其负荷相对较为稳定，但对供电的可靠性要求极高；采掘设备的负荷则会随着开采作业的进行而不断变化，有时会出现过载的情况。此外，井下设备的启动时间和运行时间也各不相同，这就要求电气系统能够适应这种复杂的负荷变化，确保设备的正常运行。

安全性要求高：由于井下存在易燃易爆气体和粉尘，一旦电气设备发生故障产生电火花，就可能引发爆炸和火灾事故，因此对电气系统的安全性要求极高。为了满足这一要求，井下电气设备必须具备良好的防爆性能。例如，采用防爆型电机、防爆型开关等设备，这些设备通过特殊的设计和制造工艺，能够有效防止内部火花和高温引燃外部的易燃易爆物质。电气系统还需要配备完善的保护装置，如漏电保护、短路保护、过负荷保护等，以确保在发生故障时能够及时切断电源，保障人员和设

备的安全。同时，为了防止静电积累引发事故，井下电气设备和管道等都需要进行可靠的接地。

1.2 系统运行要求与标准

1.2.1 运行要求

电压稳定性：井下电气系统的电压稳定性至关重要。在正常运行情况下，电压偏差应控制在一定范围内，一般要求高压供电系统的电压偏差不超过额定电压的±5%，低压供电系统的电压偏差不超过额定电压的±7%。这是因为电压过高或过低都会对电气设备的正常运行产生不利影响。当电压过高时，可能会导致电气设备的绝缘损坏，缩短设备的使用寿命。例如，电动机在过高的电压下运行，其铁芯会过度饱和，导致电流增大，发热加剧，从而损坏电机绕组的绝缘。而电压过低时，电气设备的输出功率会降低，无法满足设备的正常工作需求。如提升机在电压过低时，可能无法正常提升矿石，影响生产进度。

供电可靠性：为确保矿山生产的连续性，井下电气系统必须具备高度的供电可靠性。对于井下各水平中央变电所、主排水泵房和下山开采的采区排水泵房等重要场所，供电线路不得少于两回路。这样，当任一回路停止供电时，其余回路应能担负全部负荷，从而保证这些关键设备的正常运行。主排水泵房的正常运行关系到井下的防水安全，如果供电不可靠，一旦发生涌水事故，无法及时排水，可能会导致矿井被淹，造成重大安全事故和经济损失。此外，对于一些重要的生产设备，如提升机、通风机等，还应配备备用电源，以确保在主电源故障时能够迅速切换到备用电源，保障设备的持续运行。

1.2.2 安全标准与规范

电气设备防爆要求：由于井下存在易燃易爆气体和粉尘，因此电气设备必须具备良好的防爆性能。根据《金属非金属矿山安全规程》等相关标准，井下电气设备应选用符合防爆等级要求的产品，如防爆型电机、防爆型开关等。这些设备通过特殊的设计和制造工艺，能够有效防止内部火花和高温引燃外部的易燃易爆物质。防爆型电机采用隔爆外壳，将电机内部的电气部件与外部易燃易爆环境隔离开来，即使电机内部发生火花或爆炸，也不会引发外部环境的爆炸。同时，电气设备的安装和维护也必须严格按照防爆要求进行，确保设备的防爆性能不受影响。

接地保护要求：接地保护是井下电气系统安全运行的重要保障。井下电气设备必须进行可靠的接地，以防止设备漏电时对人员造成触电伤害，同时也能降低电气设备发生故障时的损坏程度。根据相关标准，井下接地系统应包括主接地板、局部接地板和接地母线等。主接地板应设置在井下主水仓中，局部接地板应设置在电气设备附近的潮湿处。接地母线应将所有的接地板连接成一个完整的接地板网，确保接地电阻符合要求。一般要求井下总接地电阻不得超过 2Ω ，局部接地电阻不得超过 1Ω 。定期对接地系统进行检测和维护，确保接地的可靠性。

漏电保护要求：漏电保护是防止井下触电事故和电气火灾的重要措施。井下低压配电系统应装设漏电保护装置，当系统发生漏电时，漏电保护装置应能迅速切断电源，防止人员触电和事故扩大。漏电保护装置应具备选择性和快速性，能够准确地判断漏电故障的位置，并在最短的时间内切断故障线路的电源。对于1140V及以下的低压电网，漏电保护装置的动作时间一般不超过0.2s，动作电流应根据实际情况进行合理整定。同时，还应定期对漏电保护装置进行试验和校验，确保其性能可靠。

2 常见故障类型及原因分析

2.1 开关类故障

在金属非金属矿山井下电气系统中，开关电源故障是较为常见的问题之一，其表现形式多样，对生产的影响也较为严重。当合上隔离开关后，开关无显示及开关内电器元件不工作是电源故障的典型表现。

造成这种故障的原因主要有以下几个方面：

三相电源线路问题：首先，三相电源线路可能未正常供入开关内，或者存在缺相情况。由于控制变压器一般使用两相电源，若三相电源中有一相缺失，就可能导致控制变压器无法正常工作，进而使开关无显示及电器元件不工作。电源线路在井下复杂的环境中，可能会受到机械损伤、腐蚀等因素的影响，导致线路断裂或接触不良。

隔离开关损坏：隔离开关是电源线路中的重要元件，若其存在损坏情况，可能会造成电源线路经过隔离开关后断开。这种损坏有时是单向性的，即可能只有一相断开，而其他两相正常。例如，隔离开关的触头可能因长期使用而磨损、氧化，导致接触电阻增大，最终使触头

烧蚀、断开。在一些情况下，隔离开关的操作机构也可能出现故障，无法正常合闸或分闸，影响电源的正常输送。

控制变压器故障：控制变压器的电源线路断开或虚连，以及熔断器烧毁也是常见的故障原因。当控制变压器的电源线路出现问题时，变压器无法获得正常的输入电压，自然无法工作。而熔断器烧毁可能是由于控制变压器本身损坏或短路，导致电流过大，熔断器熔断以保护电路。如果强行短接或随意更改熔断器的容量，当变压器内部或线路短路发热时，熔断器无法及时切断电源，强大的短路电流产生的高温可能会引起开关内部线路起火和爆炸，引发更严重的故障。控制变压器的二次电源线路也可能出现断开或虚连，以及熔断器损坏的情况。同时，变压器本身也可能损坏，内部导线断开或烧毁，这些都会导致开关电源故障。

针对以上故障原因，可采用以下排查方法：

电源线路检查：使用万用表等工具，对三相电源线路进行测量，检查是否有电压输入到开关内，以及三相电压是否平衡。若发现某相电压异常或无电压，应沿着线路逐步排查，检查线路是否有破损、断裂、接触不良等情况。

隔离开关检查：将隔离开关向反方向试验，观察故障是否依然存在，以确定隔离开关是否存在单向性损坏。同时，检查隔离开关的触头是否有磨损、氧化、烧蚀等情况，操作机构是否灵活可靠。

控制变压器检查：检查控制变压器的电源线路和二次电源线路，查看是否有断开、虚连的地方。对于熔断器，应检查其是否烧毁，并查明烧毁原因。若怀疑控制变压器损坏，可使用专业的检测设备对其进行检测，如测量绕组的电阻值、绝缘电阻等，以判断变压器是否正常。

2.2 电动机类故障

2.2.1 机械故障

机械故障是影响电动机正常运行的重要因素之一，主要包括轴承损坏和机械卡阻两种情况。

轴承损坏是电动机常见的机械故障之一，其原因主要有以下几点：一是长时间运行导致轴承磨损，在矿山井下，电动机通常需要长时间连续运行，轴承承受着较大的负荷和摩擦力，容易出现磨损。二是润滑不良，若轴承的润滑脂不足或变质，无法起到良好的润滑作用，

会加剧轴承的磨损。三是安装不当，如轴承安装时未达到规定的精度要求，会导致轴承在运行过程中受力不均，从而加速损坏。

机械卡阻也是常见的机械故障，主要是由于风叶叶轮或电动机轴变形和损坏造成的。在井下工作环境中，电动机可能会受到外力撞击，导致风叶叶轮或电动机轴变形。长时间的运行和振动也可能使这些部件出现损坏。当出现机械卡阻时，电动机无法正常工作，其转速会明显下降甚至停止转动。由于电动机堵转，电流会急剧增大，同样会引起开关跳闸。

为预防机械故障的发生，应采取以下措施：定期对电动机进行维护保养，检查轴承的磨损情况，及时更换磨损严重的轴承，并补充或更换润滑脂。在安装电动机时，要严格按照操作规程进行，确保轴承安装精度符合要求。同时，要加强对电动机的日常检查，避免电动机受到外力撞击，及时发现并处理风叶叶轮或电动机轴的变形和损坏问题。

2.2.2 过热故障

电动机过热故障是井下电气系统中需要重点关注的问题，其主要由过负荷、散热系统不良等原因导致。

过负荷是导致电动机过热的常见原因之一。在采掘工作面，由于工作进度较快，机械设备的运行强度大，使得电动机经常处于超负荷状态，因此电动机的温度会迅速上升。为了维持设备的正常运行，工作电流会进一步升高，形成恶性循环，最终导致电动机过热，甚至可能引发开关跳闸，影响生产的正常进行。

散热系统不良也是导致电动机过热的重要原因。对于风冷式电动机，风叶损坏或风道堵塞是常见的问题。风叶损坏后，无法有效地将电动机产生的热量散发出去，导致热量在电动机内部积聚。风道堵塞则会阻碍空气的流通，使散热效果大打折扣。在井下环境中，粉尘较多，风道容易被粉尘堵塞，影响散热。电动机被煤或粉尘覆盖，也会影响其散热性能，因为煤和粉尘会阻碍热量的传递，使电动机的温度升高。

为解决电动机过热故障，可采取以下措施：合理安排生产任务，避免电动机长时间过负荷运行。根据设备的实际工作情况，选择合适功率的电动机，确保其能够满足生产需求，同时又不会出现过负荷现象。定期检查和维护电动机的散热系统，对于风冷式电动机，要及时更换损坏的风叶，清理风道内的粉尘和杂物，确保风道

畅通。对于水冷式电动机，要保证冷却水的供应充足，定期检查冷却水道，防止堵塞，确保冷却水能够正常循环。还可以采取一些辅助散热措施，如在电动机周围增加散热风扇等，提高散热效果。

2.3 电缆故障

电缆短路和断线故障也是井下电气系统中常见的问题，对矿山生产的正常进行造成严重影响。

电缆短路故障的原因主要有以下几点：

绝缘击穿：长时间的过电压、过电流运行，或者电缆受到机械损伤、受潮等，都可能导致电缆的绝缘层被击穿，使导体之间直接接触，形成短路。在井下，当电网电压波动较大时，可能会对电缆绝缘造成冲击，导致绝缘击穿。电缆被重物挤压或被尖锐物体划伤，也会破坏绝缘层，引发短路故障。

施工质量问题：在电缆敷设和接头制作过程中，如果施工不规范，如导体连接不牢固、绝缘处理不当等，可能会导致短路故障的发生。在接头制作时，如果导体连接不紧密，接触电阻过大，会产生热量，使绝缘材料受热老化，最终导致短路。绝缘包扎不严密，水分或杂质侵入接头内部，也会降低绝缘性能，引发短路。

电缆断线故障通常是由以下原因引起：

机械拉断：在电缆敷设或使用过程中，受到过度的拉力作用，可能会导致电缆内部的导体拉断。例如，在电缆拖动过程中，如果用力过猛，或者电缆被卡住后仍继续拖动，就容易使电缆拉断。在矿山开采过程中，由于设备的移动和振动，也可能对电缆造成拉扯，导致断线。

腐蚀损坏：井下的腐蚀性气体和液体对电缆的金属导体具有腐蚀作用，长期受到腐蚀，电缆导体的截面积会逐渐减小，最终导致断线。在一些含有酸性或碱性气体的矿井中，电缆的腐蚀问题更为严重。电缆的金属护套也可能会受到腐蚀，失去对内部导体的保护作用，进而引发断线故障。

对于电缆短路和断线故障，可采用以下检测方法：

电阻测量法：使用万用表测量电缆导体的电阻值。对于短路故障，若电阻值趋近于零，则说明存在短路；对于断线故障，若电阻值无穷大，则说明导体断开。在测量时，要确保测量方法正确，避免因接触不良等原因导致测量结果不准确。

电缆故障测试仪检测：利用电缆故障测试仪可以准

确地检测出短路和断线故障的位置。该测试仪通过向电缆发送信号，根据信号的反射情况来判断故障点的位置。对于短路故障，测试仪会接收到明显的反射信号，根据反射信号的时间和电缆的波速，可以计算出短路点的距离；对于断线故障，测试仪同样会根据反射信号来确定断线点的位置。这种方法具有检测速度快、精度高的优点。

当检测到电缆短路或断线故障后，应采取相应的处理措施：

短路故障处理：如果是绝缘击穿导致的短路，需要更换受损的电缆段或修复绝缘层。在修复绝缘层时，要选择合适的绝缘材料，并按照规范的工艺进行操作，确保绝缘性能恢复到正常水平。如果是施工质量问题引起的短路，要重新制作接头，确保导体连接牢固，绝缘处理得当。

断线故障处理：对于机械拉断的电缆，可将断口处的导体进行重新连接，并做好绝缘处理。在连接时，要采用合适的连接方法，如焊接、压接等，确保连接的可靠性。对于因腐蚀损坏导致的断线，除了重新连接导体外，还需要对电缆进行防腐处理，如涂抹防腐漆、更换防腐护套等，以防止再次发生腐蚀断线故障。

3 故障处理方法与技术

3.1 常规检测与诊断方法

在金属非金属矿山井下电气故障处理中，常规检测与诊断方法是快速准确判断故障的基础，熟练掌握这些方法对于保障井下电气系统的稳定运行至关重要。

万用表是一种多功能、多量程的便携式电子测量仪器，在井下电气故障检测中应用广泛。其主要功能包括测量电压、电流和电阻。在检测开关类故障时，可使用万用表测量控制变压器的输入、输出电压，判断其是否正常工作。若控制变压器输入电压正常，输出电压异常，则可能是变压器内部故障。在检测电动机类故障时，可通过测量电动机绕组的电阻值，判断绕组是否存在短路、断路等问题。正常情况下，电动机三相绕组的电阻值应基本相等，若某相电阻值与其他两相相差较大，则可能存在故障。

通过合理运用万用表、兆欧表、钳形电表等检测工具，结合外观检查和电气参数测量等方法，能够快速、准确地检测和诊断金属非金属矿山井下电气故障，为后续的故障处理提供有力依据。通过常规检测从发现故

障到确定故障原因的整个检测流程，首先进行外观检查，初步判断故障可能出现的部位，然后根据具体情况选择合适的检测工具进行电气参数测量，最终确定故障原因。

3.2 先进诊断技术应用

3.2.1 红外测温技术

红外测温技术在井下电气故障诊断中具有诸多优势。它能够实现非接触式检测，避免了传统接触式测温方法可能带来的安全风险，如在检测高压设备时，无需直接接触设备，降低了触电的危险。在实际应用中，红外测温技术适用于多种场景。对于电缆的检测，由于井下环境潮湿，电缆受潮或受损时，电流通过这些部位会产生热量，使得故障点的温度偏高。对于电动机的检测，红外测温技术可以检测电动机外壳、轴承等部位的温度，判断电动机是否存在过载、轴承损坏等问题。通过观察红外热像图，能够清晰地发现开关柜中温度异常的部位，从而快速定位故障点。

3.2.2 在线监测系统

在线监测系统是一种实时监测井下电气设备运行状态的技术，它通过传感器采集设备的各种运行参数，并将这些参数传输到监测中心进行分析处理。该系统主要由传感器、数据传输网络和监测中心组成。

在线监测系统适用于各种井下电气设备的监测，如变压器、开关柜、电动机、电缆等。在变压器的监测中，通过在线监测系统可以实时监测变压器的油温、绕组温度、油位等参数，当这些参数超出正常范围时，及时发出预警，防止变压器因过热等问题导致故障。在电缆的监测中，在线监测系统可以监测电缆的温度、电流等参数，判断电缆是否存在过载、漏电等问题。在线监测系统的架构可以清晰地展示在线监测系统的各个组成部分，包括传感器、数据传输网络和监测中心，以及它们之间的连接关系。通过这样的架构，实现了对井下电气设备的实时监测和故障诊断。

4 预防措施与管理策略

4.1 设备选型与安装

在金属非金属矿山井下电气系统中，设备选型与安装是确保系统安全稳定运行的关键环节。选择质量可靠的电气设备至关重要，它直接关系到设备的使用寿命、运行稳定性以及矿山生产的安全性。

在设备选型时，应充分考虑井下恶劣的工作环境。

由于井下存在潮湿、腐蚀性气体、粉尘等不利因素，因此需选择具有良好防潮、防腐、防尘性能的电气设备。根据矿山的实际负荷需求合理选择设备容量也不容忽视。在选型前，需对矿山的用电设备进行详细的负荷计算，根据计算结果选择合适容量的设备。设备的防爆性能也是选型时需要重点考虑的因素。由于井下存在易燃易爆气体和粉尘，一旦电气设备发生故障产生电火花，就可能引发爆炸和火灾事故，因此必须选择符合防爆标准的电气设备。合理布局电气设备也十分重要，在井下变电所中，开关柜、变压器等设备应合理布置，保证操作人员有足够的操作空间，同时便于设备的散热和通风。还需考虑设备之间的电磁干扰问题，避免不同设备之间的电磁干扰影响设备的正常运行。

在安装过程中，要注意保护设备的防护层和绝缘层。避免在安装过程中对设备造成机械损伤，如碰撞、划伤等，以免破坏设备的防护层和绝缘层，降低设备的性能和安全性。在搬运和安装电气设备时，应使用合适的工具和设备，轻拿轻放，避免对设备造成损坏。

4.2 日常维护与保养

定期巡检是确保井下电气设备正常运行的重要措施。巡检周期应根据设备的重要性和运行环境确定，一般来说，对于关键设备，如变压器、开关柜等，应每天进行一次巡检；对于其他设备，如电动机、电缆等，可每周进行一次巡检。在巡检过程中，应重点检查设备的运行状态、温度、声音、气味等。使用红外测温仪检测变压器的油温、绕组温度，确保其在正常范围内。监听电动机的运行声音，判断是否存在异常噪声，如轴承损坏时会发出尖锐的摩擦声。检查设备表面是否有异味，若有烧焦味，可能是设备过热或绝缘损坏。

清洁工作对于保持电气设备的性能和寿命至关重要。由于井下环境粉尘多，设备表面容易积聚大量粉尘，影响设备的散热和绝缘性能。因此，应定期对电气设备进行清洁，一般每月至少进行一次全面清洁。对于电动机的轴承、传动部件等，应定期进行润滑。润滑周期根据设备的使用情况和润滑要求确定。选择合适的润滑剂至关重要，应根据设备的工作条件和要求选择相应的润滑剂，如在高温环境下，应选择耐高温的润滑剂；在潮湿环境下，应选择具有良好防水性能的润滑剂。在润滑过程中，要注意润滑剂的用量，过多或过少都会影响设备的正常运行。

通过加强日常维护与保养，可及时发现并处理设备的潜在问题，降低设备故障的发生率，提高设备的运行可靠性，为金属非金属矿山井下电气系统的稳定运行提供有力保障。

4.3 应急预案与演练

制定完善的井下电气故障应急预案是保障矿山安全生产的重要举措。定期进行应急演练对于提高矿山应对电气故障的能力具有重要意义。应急演练可以检验应急预案的可行性和有效性，发现其中存在的问题和不足，及时进行修订和完善。通过应急演练，还可以提高各部门和人员之间的协同配合能力，使他们在实际故障发生时能够迅速、有效地进行应对。

在应急演练中，应模拟各种可能出现的电气故障场景，如电缆短路、电动机故障、开关柜故障等，让参与演练的人员熟悉故障处理流程和各自的职责。演练结束后，应对演练过程进行总结和评估，针对演练中发现的问题，制定改进措施，不断提高应急演练的质量和效果。

5 结论与展望

在金属非金属矿山井下电气常见故障类型及原因分析方面，全面梳理了开关类、电动机类和电缆类故障。通过对这些故障的细致分析，明确了各类故障的产生机制和影响因素。

在故障处理方法与技术方面，系统介绍了常规检测与诊断方法，如使用万用表、兆欧表、钳形电表等工具进行电气参数测量，结合外观检查判断故障。同时，深入探讨了先进诊断技术的应用，包括红外测温技术，利用物体红外辐射特性实现非接触式温度测量，及时发现设备潜在故障；在线监测系统，通过传感器实时采集设

备运行参数，实现对设备的实时监测和故障预警。还明确了故障处理流程与规范，包括故障报告、现场勘查、故障诊断、故障处理和恢复供电等环节，以及各环节的安全注意事项和应急处理措施。

在预防措施与管理策略方面，提出了一系列有效措施。在设备选型与安装上，要选择质量可靠、适应井下环境、防爆性能良好的设备，并严格按照标准规范进行安装。在日常维护与保养方面，应定期巡检、清洁、润滑设备，及时更换易损件，确保设备正常运行。在人员培训与管理方面，要提高操作人员和维修人员的技术水平，通过多样化的培训方式和健全的管理制度，提升人员的专业能力和工作积极性，进而推动金属非金属矿山井下电气故障处理技术的发展。

参考文献

- [1] 张明远, 李光华. 非煤矿山井下电气系统故障诊断与处理 [M]. 北京: 矿业出版社, 2018.
- [2] 王立新, 陈学文. 矿山电气设备智能化维护技术研究 [J]. 矿业工程, 2019, 37(4): 78-85.
- [3] 刘志强, 赵红梅. 井下电缆故障检测与定位方法综述 [J]. 电气技术, 2020, 21(3): 1-8.
- [4] 孙伟东, 周明华. 非煤矿山供电系统谐波治理技术应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 142-149.
- [5] 林晓峰, 郑雅文. 基于物联网的矿山电气设备状态监测系统设计 [J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 56-63.

作者简介：唐柱（1987年9月），男，汉，本科，海南矿业股份有限公司，电气工程师，研究方向：电气类。