

城市轨道交通牵引供电系统直流快速断路器开断及灭弧分析

孟军锋¹ 胡根水² 郭志奇³ 何行健⁴

(1. 中铁武汉勘察设计院有限公司, 430070, 武汉; 2. 宁波市市域铁路投资发展有限公司, 315100, 宁波;
3. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京; 4. 中铁七局集团电务工程有限公司, 450008, 郑州)

摘 要 [目的] 直流灭弧技术是城市轨道交通牵引供电系统的设计难点之一, 因此有必要对主要直流快速断路器的直流开断及灭弧原理进行分析。[方法] 介绍了直流电流开断及电弧熄灭原理; 介绍了直流电流的稳定燃烧点及熄灭条件; 分析了直流电弧的开断参数, 介绍了直流快速断路器的灭弧设计原理; 分析了地铁供电系统直流快速断路器易烧损的原因。[结果及结论] 要开断直流电弧, 需产生一个高于电源电压的电弧电压, 即加大电弧电压能够熄灭直流电弧; 直流快速断路器的开断过程要综合考虑燃弧时间和系统过电压因素; 在直流断路器设计研发时, 需重点关注非稳定弧电压和小电流开断弧电压; 在电弧熄灭时, 设置一个额外的 RC (电阻电容电路) 吹弧线圈, 同时结合灭弧室金属格栅设计, 可以稳定燃弧电压。

关键词 城市轨道交通; 牵引供电系统; 直流快速断路器

中图分类号 U231.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.07.058

Analysis of DC Fast Circuit Breaker Opening and Arc Extinction in Urban Rail Transit Traction Power Supply System

MENG Junfeng¹, HU Genshui², GUO Zhiqi³, HE Xingjian⁴

(1. China Railway Wuhan Survey and Design Co., Ltd., 430070, Wuhan, China; 2. Ningbo City Railway Investment and Development Co., Ltd., 315100, Ningbo, China; 3. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100037, Beijing, China; 4. China Railway Seventh Group Electric Engineering Co., Ltd., 450008, Zhengzhou, China)

Abstract [Objective] Arc extinction technology for DC (direct current) is one of the design challenges in urban rail transit traction power supply systems. Therefore, it is necessary to analyze the principles of DC opening and arc extinction for main DC fast circuit breakers. [Method] The principles of DC current interruption and arc extinction are introduced. The stable burning point and extinction conditions of DC current are

discussed. Parameters for DC arc interruption are analyzed with an introduction to the arc extinction design principles of DC fast circuit breakers. Causes for the easy burning damage of DC fast circuit breakers in metro power supply systems are examined. [Result & Conclusion] To interrupt a DC arc, higher arc voltage than the power supply voltage is required, because increasing the arc voltage can extinguish the DC arc. The opening process of DC fast circuit breakers needs to consider both the arc burning time and system overvoltage factors. During the design and development of DC circuit breakers, attention should be paid to non-stable arc voltage and arc voltage for small current interruptions. During arc extinction, setting an additional RC (resistor-capacitor circuit) blowout coil during arc extinction, with the design of metal grids in the arc extinction chamber, can stabilize the arc voltage.

Key words urban rail transit; traction power supply system; DC fast circuit breaker

中国城市轨道交通协会 2020 年发布的《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》中明确提出, 要加快直流保护、直流配电开关关键部件的国产化开发应用进度。近年来, 我国城市轨道交通飞速发展, 直流开关设备获得了广泛应用。作为直流开关柜的核心设备, 直流快速断路器在城市轨道交通牵引供电回路中起着故障跳闸、保护牵引供电系统其他电力设备和电客车的关键作用。直流快速断路器通常安装于整流器后端、接触网或接触轨的前端, 其本体安装的大电流脱扣装置起到了过流保护作用。同时, 结合先进的数字化微机测控保护装置, 直流快速断路器还须具备定时限过流及电流上升率、电流增量保护、过热负荷保护及其他类型的多种保护功能, 且具有自动重合闸功能。

目前, 在城市轨道交通直流牵引供电领域, 较为常用的直流电压等级为 1 000 V 和 2 000 V, 属于

低压直流和电压等级较低的中压直流配电领域。直流快速断路器灭弧一般采用增大电弧电压法,基于空气介质灭弧技术,通过拉长电弧并充分冷却,以达到提高电弧电压而熄弧的目的。与高压灭弧强迫过零方式相比,采用增大电弧电压法,系统各种器件的配合要求较低,控制难度和精度要求低,结构相对简单,更为稳定可靠,比较适用于中压直流船电、城市轨道交通的牵引供电系统。

城市轨道交通牵引供电系统中电流较大、电流突变率快,直流故障下的电流开断及直流电弧的熄灭一直是快速断路器设计的难点,主要表现为:①直流灭弧和交流灭弧的原理不同,交流供电回路中电压、电流每个交变周期有两次自然过零点,这一瞬间弧隙介质的介电强度能够得以恢复,为灭弧创造了很好的条件,而在直流回路中却无此种有利条件,故直流灭弧比交流灭弧困难许多。②直流系统中存在大量电感,且开断时的直流电流较大,因此需由直流快速断路器吸收的能量也较大。③当直流快速断路器开断时,由于直流系统储存的巨大能量将要释放,所释放出的能量又会在回路上产生过电压,引起直流快速断路器断口间的电弧不断重燃,难以熄灭^[1]。

综上所述,直流灭弧技术一直被公认为世界性难题。本文通过总结国内外直流快速断路器的灭弧性能,分析直流快速断路器开断及灭弧原理。本文研究可为城市轨道交通行业研发、生产、应用直流快速断路器提供工程经验和理论基础。

1 直流电流开断及电弧熄灭原理

电弧是一种气体放电现象,是指带电体周围介质从绝缘状态变为导通状态,使电能通过的现象。直流快速断路器在电气回路切断或电气回路关合时,动、静触头之间的电场强度大于介质强度,触头间的介质被击穿成游离状态,气体在游离状态下具有很强的导电性能,介质转变成导体,即形成了电弧。

直流电气回路开断时:动、静触头分离初期,电流聚集在少数的几个接触点处,焦耳热使接触点的动静触头处温度升高,形成熔融汽化,待动、静触头分离后,由热电子发射和场强发射的电子使汽化的金属原子碰撞电离,产生大量的电子和正离子,形成电弧。

电弧的特点为:①具有强功率的放电现象,伴

随着电弧的大量电能转化为热能的形式,电弧处的温度极高,以焦耳热形式发出的功率可达 10 MW;②一种自持放电现象,不用很高的电压和很大的电流就能维持相当长的电弧稳定燃烧而不熄灭;③电弧是等离子体,质量极轻且极易改变形状,电弧区内气体的流动,包括自然对流及外界磁场,甚至电弧电流本身产生的磁场都会使电弧受力,改变其形状^[2]。

典型直流牵引供电系统简化原理示意图如图 1 所示。当需要开断一个直流回路时,直流快速断路器从动、静触头分离开始,需要经历起弧、电弧稳定燃烧到电弧完全熄灭的过程,在整个电弧完全熄灭后才算一次完整结束的直流开断,从电弧燃烧到电弧熄灭是一个暂态过程。根据基尔霍夫定律可知,城市轨道交通牵引供电系统中,直流快速断路器开断故障电流时,起弧后的电压平衡方程式为:

$$U_e = RI_h + L \frac{dI}{dt} + U_h \quad (1)$$

式中:

U_e ——电源电压;

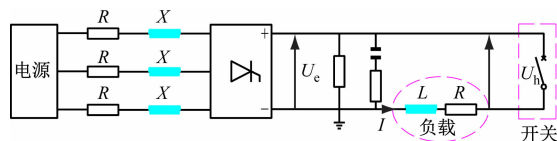
I_h ——电弧电流;

R 、 L ——电路中的等效电阻和电感;

U_h ——电弧电压;

I ——开断电流;

t ——时间常数。



注: X 为电抗。

图1 典型直流牵引供电系统简化原理示意图

Fig. 1 Simplified principle diagram of typical DC traction power supply system

开断直流电流的理论条件必须是 $dI/dt < 0$, 降低并切断故障电流。当直流电弧稳定燃烧时,电路仍是导通的,故电弧中有电弧电流,电弧两端有电弧电压,通过求解方程可知 $U_e - U_h - RI_h < 0$ 。由此可知,要开断直流电弧就需要产生一个高于 U_e 的 U_h ,即增大电弧电压是直流电弧灭弧的基本原理。

2 直流电流稳定燃烧点及熄灭条件

根据直流电弧的伏安特性,从电路角度看,直

电弧是一种非线性电阻,其阻值随电流及其他因素而改变^[3]。直流快速断路器开断直流电流时,当电路进入稳定状态, I_h 为常数,即 $dI/dt = 0$,则 $U_e - RI_h = f(I)$ 是电阻的伏安特性, $U_h = f(I)$ 是电弧的静伏安特性。

1) 直流电弧的稳定燃烧点。在直流回路开断时,当直流快速断路器的弧触头保持在适当的距离,使电弧燃烧达到稳定状态且电流不随时间变化时,称为电弧的稳定燃烧点。

2) 直流电弧的熄灭条件。提高电弧的静伏安特性,使它与 $U_e - RI_h = f(I)$ 曲线无交点,则电弧熄灭。直流电弧的熄灭条件为: $U_e - RI_h < U_h$,这说明当电源电压不足以抵消稳态弧压及回路压降时,电弧电流会减小直至熄灭。两个曲线的切点为电弧燃烧与熄灭的临界状态。

电弧的熄灭过程为:动、静触头开距越来越远,电弧逐渐拉长, I 逐渐变小, U_h 逐渐变大,最后电弧熄灭。电弧的熄灭条件为:使电弧的伏安特性曲线与稳态电路方程无交点,即 $U_h > U_e - RI_h$ 。

3 直流电弧的开断参数

燃弧时间 t_h 可以表示为:

$$t_h = \frac{L}{R} \ln \frac{I + \frac{U_h - U_e}{R}}{\frac{U_h - U_e}{R}} \quad (2)$$

由式(2)可知:回路中电感或稳态电流越大,电弧持续时间越长; U_h 越大, t_h 越短,因此可以通过提高弧压来缩短燃弧时间。

电弧能量 A 可以表示为:

$$A = \int_0^{t_h} (U_e I - I^2 R) dt + \frac{1}{2} L I^2 \quad (3)$$

式(3)中等式右侧第 1 项表示:一部分 A 是在 t_h 内由电源给电弧提供能量,它等于电源在 t_h 内提供的总能量减去电阻上的损耗;式(3)中等式右侧第 2 项表示:直流快速断路器开断直流电流前,电感储存的能量要在燃弧过程中全部释放出来,这些能量将全部转化为电弧的能量。

4 直流快速断路器灭弧设计原理

直流回路开断过程中,为保证直流快速断路器开关过电压耐受在一定的范围内,需采取抑制过电

压的措施。在有效的过电压范围内,需缩短电弧燃烧时间,从以下两方面可以有效缩短燃弧时间:①设置吹弧装置;②提高电弧静态伏安特性。

4.1 设置吹弧装置

直流快速断路器结构示意图如图 2 所示。当主触头打开时,主回路电流开始流动,电弧在电磁力的作用下将被吹向灭弧室,而特殊设计的金属导弧跑道能够将电弧引入灭弧室内的金属格栅。开断电流耐受时间取决于电流时间常数 τ 和电流值,主回路自身磁场产生的磁吹力对于所有的故障电流来说是十分有效的。

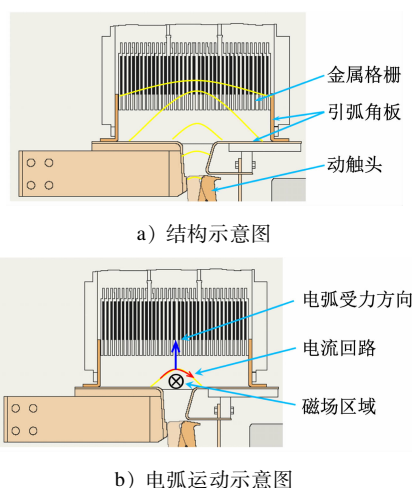


图 2 直流快速断路器结构示意图

Fig. 2 Diagram of DC fast circuit breaker structure

在常规设计时,为了加强主回路(特别是小电流回路)的吹弧效果,额外设计了吹弧装置,吹弧线圈与主触头并联。直流快速断路器吹弧装置原理及安装示意图如图 3 所示。吹弧线圈旋转转数经过精密计算,用于限流和产生最大磁场。断路器主触头的阻值小于吹弧线圈阻值,所以当主触头合闸时,几乎没有电流流经吹弧线圈。当断路器合闸时,高压接触器吸合,吹弧装置动作,回路主要电流经由主触头。

断路器收到分闸命令后,主触头断开并产生电弧阻值,使电流部分流经吹弧装置(电流约为 1 A)。流经吹弧线圈的电流产生的磁场加强了灭弧室自身的吹弧效果,并促使电弧从主触头经引弧角板进入灭弧室内部。一旦主触头断开,就切断了控制吹弧装置电源的辅助触点。辅助接点断开后,RC(电阻电容电路)线圈保持高压线圈电压的时间约 200 ms。高压接触器释放,切断流经吹弧线圈的电流。

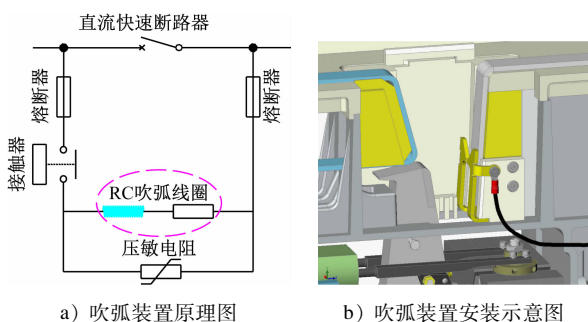


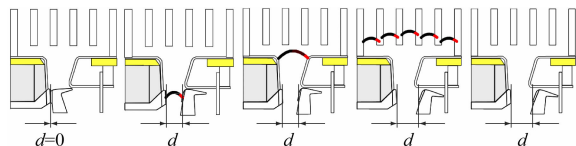
图3 直流快速断路器吹弧装置原理及安装示意图

Fig. 3 Principle and installation diagram of DC fast circuit breaker arc blowing device

4.2 提高电弧静态伏安特性

4.2.1 增大近极过电压

在直流快速断路器设计时,由于断路器体积、动静触头开距及材质等因素,动、静触头触点之间的距离不允许产生足够的电压来中断电流,因此选择将电弧引入灭弧室金属隔板表面,通过阴极冷却。电弧进入灭弧室以后,金属隔板将电弧分割成多个串联短弧,并生成一个必须的过电压用于熄灭在灭弧室的弧电压。直流快速断路器触头分断示意图如图4所示。



注: d 为灭弧栅间距。

图4 直流快速断路器触头分断示意图

Fig. 4 Diagram of DC fast circuit breaker contact separation

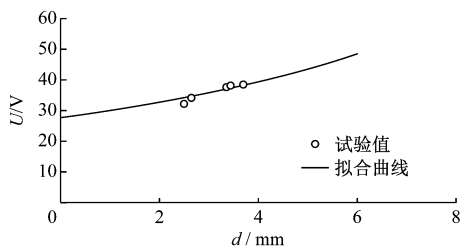
4.2.2 增大电弧长度

动、静触头分离后,电弧通过动静触头间的机械开距和金属引弧跑道将电弧导入引弧角板,在电弧电流回路磁场或外加吹弧装置磁场的磁力下,电弧横向拉长。此外,绝缘外壁的灭弧室或金属格栅板的灭弧室也会拉大电弧的长度,从而达到增加弧电压的目的。

4.2.3 冷却电弧

电弧的冷却是通过在灭弧室中的快速位移和拉伸长度进行的。电弧将一部分能量传递至灭弧室的墙壁(由绝缘材料组成)。绝缘灭弧栅不能割断电弧,只是增大了电弧的运动空间,属于拉长电弧的灭弧原理。金属灭弧栅可以将电弧隔离成一个个短电弧,属于短电弧灭弧原理。对于金属灭

弧格栅,可以根据格栅数量测算电弧的电压。金属灭弧栅的数量乘以一个常数(电压值),就得到了直流快速断路器的弧压,因此可根据需要的弧压选择金属片的数量。灭弧栅间距和电压之间的关系曲线如图5所示。



注: U 为灭弧栅间的电压。

图5 灭弧栅间距和电压之间的关系曲线

Fig. 5 Relation curve of arc extinction grid spacing and voltage

目前,我国城市轨道交通直流牵引供电系统中的直流快速断路器开关大多采用金属灭弧格栅。采用金属灭弧格栅(短弧原理),将一个长电弧隔离成一个个短电弧,在电弧稳定燃烧的状态下,弧压与电流大小无关,主要由开关本身确定,保证了电弧电压的稳定性。相对于短弧,长弧原理则采用绝缘材料灭弧格栅,使电弧进一步变长。

对于格栅间距为 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 的金属灭弧格栅,弧压和弧电流呈非线性关系,电弧电流大范围变化,其弧压在 $28 \sim 30 \text{ V}$ 范围内小范围变化。对于格栅间距为 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 的金属灭弧格栅,弧压和弧电流非线性段减少,弧压随着弧电流及负载的变化而大范围变化,单间距弧压最大可达 50 V 。鉴于此,在大格栅间距条件下,通过理论计算的短弧电压仅作为参考。

5 地铁供电系统直流快速断路器易烧损原因及相关分析

城市轨道交通列车驱动系统中的电动机是最典型的电感负载。城市轨道交通直流牵引供电系统开断过程整体为感性,且电感值非常大,其电气回路可近似为一个电阻与电感的串联等效电路。由式(3)可知,由于电弧必须在灭弧室的金属格栅中将感性电气回路所储存的能量释放完方可熄灭,因此电感越大,电弧越难以熄灭。另外,电感回路中的能量释放也需要一定时间,电弧须等电感回路中的能量完全释放后才能熄灭,此时直流快速断路器开关才能完全断开电感回路,否则将在电感回路

中产生过电压,对其电气系统内的电气设备产生过电压损害。当变电所出口处的直流母线近端出现短路等极端故障时,其短路电流极大,若城市轨道交通直流牵引供电系统中的直流快速断路器无法满足灭弧需求时,电弧将会在开关触头间反复燃烧,无法熄灭,最终导致直流快速断路器的烧损,引发直流短路点扩大,影响行车安全^[4]。

上文所描述的“烧损”是指,在故障切断过程中,由直流快速断路器开断失败导致的整体器件损坏,且在修复或处理后无法持续工作的状态,如图6所示。在正常短路电流开断过程中,直流快速断路器动、静触头烧损后,可通过打磨焊点再次使用。



图6 直流快速断路器烧损照片

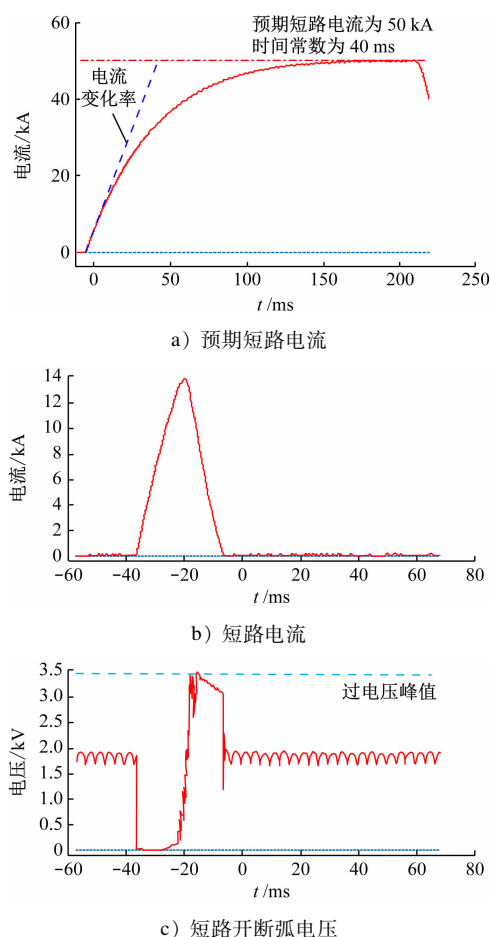
Fig. 6 Photo of DC fast circuit breaker burnout

直流快速断路器必须产生一个高于电源电压的 U_b ,这是因为在开断短路电流后,直流快速断路器开关已经不具备熄灭电弧、消除能量的能力,必须借助弧电压来转移能量。目前,我国城市轨道交通牵引供电系统中使用的是空气绝缘系列的直流快速断路器,其弧压与电流大小无关,是一个非典型的短弧原理参数。当电流较小时,弧压较小;而电流较大时,弧压也较大。

对于典型的短弧弧压参数,金属灭弧片间距只有2~3 mm,而我国应用的空气绝缘系列直流快速断路器的金属灭弧片间距为5~6 mm,且其灭弧格栅最上端是绝缘隔板,小电流电弧在金属片之间穿越,呈现短弧特性,大电流电弧在绝缘片之间被拉长,呈现长弧特性。我国应用的空气绝缘系列直流快速断路器是一个非典型短弧原理开断,在大电流下更多的是呈现长弧原理开断。在开断大电流情况下,该种直流快速断路器具有绝对的优势,但在小电流短弧情况下,则具备一定的风险。

在电感回路中开断直流快速断路器开关,由于电流不能突变,于是在开关两端产生过电压,其最大值即弧压最大值。直流快速断路器短路开断波形示意图如图7所示。弧电压波形顶部出现了平坦

部分,表明电弧在开关灭弧室进入稳定燃烧状态,只有电弧稳定燃烧状态下,弧电压与电流大小无关,弧电压的非线性和稳压特性非常显著。



注:时间负值所对应的波形为直流快速断路器短路开断保护装置在该试验之前的录波记录。

图7 直流快速断路器短路开断波形示意图

Fig. 7 Diagram of DC fast circuit breaker short circuit opening waveform

在我国城市轨道交通运行和开通初期的短路试验中,均出现过直流快速断路器开关非正常开断的烧损故障,而我国城市轨道交通牵引供电系统所使用的直流快速断路器灭弧格栅最上端大多是绝缘隔板,底部为金属灭弧格栅。因此,技术人员给出的电弧冷却的结论为:①电弧通过绝缘壁冷却(即采用绝缘材料灭弧格栅)的特点为,结构材料加工简单、尺寸比较大、灭弧过程易于磨损、使用寿命较短,可以产生一个较大的过电压使电弧长度进一步拉长,即长弧原理。②电弧在灭弧室金属隔板的表面通过阴极冷却的特点为,结构紧凑、尺寸小、开断效率高,可以产生一个稳定电压,但代价成本是

昂贵的,即短弧原理。

由此可知,目前所设计使用的空气绝缘直流快速断路器在某些不确定的电弧电压情况下,当未将一个长电弧隔离成一个个短电弧使其弧压稳定时,电弧的燃烧时间变长,这是一个非稳定的弧电压,此时就有可能烧毁直流快速断路器。因此在国产化设计、生产过程中,需重点关注非稳定弧电压和小电流开断弧电压的验证和处理措施。

6 结语

直流电路的开断,其本质是一个将不存在过零点的恒定电流强迫熄灭的过程。在缩短燃弧时间过程中,储存在开断回路中的电感能量需要通过断口燃弧释放,巨大的能量会在电弧回路产生过电压,同时叠加电源电动势,使得电弧反复重燃,过电压对系统设备造成损害的同时,直流快速断路器灭弧也存在失败的风险。

虽然直流电弧的熄灭条件与电感无关,但电感对燃弧时间、电弧能量有较大的影响。若电气回路中的电弧能量大、燃弧时间长,会使触头温度升高、热电离加剧,导致触头和灭弧室严重烧损,介质绝缘性能下降,最终导致直流快速断路器开断的失败。因此,直流快速断路器的开断过程要综合考虑燃弧时间和系统过电压因素。

由于我国城市轨道交通牵引供电系统所使用的直流快速断路器开关在小电流开断和非稳定弧压时,存在开断失败的风险,因此在国产化生产过程中需对其重点研究。在电弧熄灭时,设置一个额

外的 RC 吹弧线圈,同时结合灭弧室金属格栅设计,来达到稳定燃弧电压的目的。

参考文献

- [1] 郭志奇. 基于电弧电流判据的直流断路器失灵保护[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(4): 116.
GUO Zhiqi. Failure protection for DC circuit breakers based on arc current criterion [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(4): 116.
- [2] 朱立春, 张跃火, 张显立. 基于光伏直流电弧故障的研究与保护技术[J]. 电器与能效管理技术, 2018(10): 35.
ZHU Lichun, ZHANG Yuehuo, ZHANG Xianli. DC arc fault research and protection technology of photovoltaic system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(10): 35.
- [3] 杨乃琪. 无轨电车牵引供电系统及试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
YANG Naiqi. Traction power supply system of trolleybus and its testing research [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [4] 周宏宇. 新型地铁用直流断路器研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
ZHOU Hongyu. The research on new DC breaker for metro system [D]. Changsha: Hunan University, 2010.

· 收稿日期:2022-02-14 修回日期:2022-03-14 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-14 Revised:2022-03-14 Published:2024-07-10
· 第一作者:孟军锋,高级工程师,86082630@qq.com
通信作者:胡根水,工程师,269252310@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

2024 年 5 月份城市轨道交通运营数据

2024 年 5 月,我国 31 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团共有 54 个城市开通运营城市轨道交通线路 310 条,运营里程 10 286.2 km,实际开行列车 349 万列次,完成客运量 27.9 亿人次,进站量 16.7 亿人次。5 月份,客运量环比增加 0.3 亿人次,增长 1.1%;同比增加 2.9 亿人次,增长 11.7%。5 月份全国总运营里程的平均客运强度为 0.874 万人次/(km·d),环比降低 2.5%,同比增长 4.9%。其中:地铁、轻轨、市域快速轨道等大运量线路共 270 条,运营里程 9 588.9 km,完成客运量 27.4 亿人次,进站量 16.3 亿人次;单轨、磁浮等中运量线路共 7 条,运营里程 202.5 km,完成客运量 3 857 万人次,进站量 2 796 万人次;有轨电车、自动导向轨道等低运量线路共 33 条,运营里程 494.8 km,完成客运量 1 112 万人次,进站量 1 057 万人次。本月新增运营里程 12.5 km,新增运营区段 1 个,为合肥地铁 4 号线延长线。

(来源:“轨行致远”公众号)