

# 城市轨道交通装备的双向直流接触器灭弧方式比较

李 宏

(西安沙尔特宝电气有限公司, 710100, 西安//高级工程师)

**摘 要** 城市轨道交通装备的中低压双向直流接触器带负载分断性能,故对灭弧技术提出很高要求,其中对临界电流的分断是技术难点。针对双向直流工况,详细阐述了传统灭弧方式和新型灭弧方式的灭弧原理和优缺点,着重介绍了新型灭弧方式不同外加磁场布置的特殊作用。通过模拟试验比较了部分灭弧方式的燃弧时间,并评价了采用不同灭弧方式接触器的性能及适用性。模拟试验结果及评价结果均表明,新型灭弧方式具有更好的灭弧性能,是双向直流接触器的更好选择。

**关键词** 城市轨道交通;双向直流接触器;灭弧方式

**中图分类号** TM572.1

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.04.040

## Comparison of Arc-blowout Solutions on Bi-direction DC Contactor in Urban Rail Transit Equipment

LI Hong

**Abstract** The breaking capacity with load of medium-low voltage bi-directional DC contactors is putting forward high demand for arc-blowout technology, of which the critical current breaking is the technical difficulty. Targeting the working condition of bi-directional DC, the principle, merits and demerits of the conventional and new arc-blowout solutions are expounded. The difference of the new arc-blowout solution and the special function of external magnetic field are introduced emphatically. The arc burning time of some arc-blowout solutions are compared through simulation experiments. The performance and applicability of contactors adopting different arc-blowout solutions are evaluated. Simulation experiment results and evaluation results show that the new arc-blowout solution performs better, and is a better choice for bi-directional DC contactors.

**Key words** urban rail transit; bi-directional DC contactor; arc-blowout solution

**Author's address** Xi'an Schaltbau Electric Co., Ltd., 710100, Xi'an, China

## 0 引言

为满足工况转换和安全防护的需要,城市轨道交通牵引供电、能馈及电池管理等系统在变流过程中常使用 600 ~ 3 000 V 的中低压双向直流接触器。这些接触器应能较好地适用于直流工况、双向直流工况及 50 或 60 Hz 交流工况。由于双向直流电既有普通直流电的特性,又有交流电的电流变换方向特性,因此双向直流接触器设计必须能良好处理正反方向电流的灭弧,否则可造成产品重度烧蚀甚至火灾等严重后果。

出于故障安全考虑,接触器带负载分断保护的需求不可或缺,其对灭弧技术提出了很高的要求。其中对临界电流的分断是技术难点。临界电流是指接触器能够安全分断的直流电流,一般特指负载为感性、时间常数较大的一段小电流范围。临界电流很重要,又常被忽视。大容量接触器在分断小电流负载时烧损,大多是其临界电流性能较差造成的。

灭弧技术是安全分断的技术保证。电弧的产生本质是由于气体的游离作用。电弧会对电器的接通分断性能和绝缘性能造成较大的损害。快速灭弧可使电器具有更长的寿命或更大的分断容量。当气体的消游离速度超过游离速度时,可熄灭电弧。一般通过拉长或冷却电弧的方式来加强消游离作用的速度。

现有灭弧方式按照物理原理可分为自然式和强制式。自然式灭弧依靠机械力或电磁力将电弧拉长或移动,其中电磁力是由电弧电流本身所固有的电磁场所产生。强制式灭弧主要运用外加磁场对电弧产生的电磁力来进行驱动,以加强电弧的运动速度,使之移至灭弧室中被拉长(或切为短段)、冷却并最终熄灭。强制式是目前的主流灭弧方式,也是本文讨论的对象。

## 1 传统灭弧方式

传统灭弧一般有 ES(串联线圈的电磁灭弧)、EM(非串联线圈的电磁灭弧)、PM(永磁灭弧)及 EPM(永磁+电磁灭弧)等4种方式。

### 1.1 ES 方式

灭弧原理:如图1 a)所示,ES方式在主电路中固定串联线圈,并依靠流过该线圈的电流来提供外加电磁场,进而实现灭弧。

优点:串联线圈提供的磁场可随电流方向改变而改变灭弧的方向,图1 a)箭头指示为灭弧方向;电磁场强度也随电流负载大小变化在变化,过载电流分断时会以更大的灭弧功率进行灭弧。

缺点:因该线圈需长时间承受主电路的工作电流,故设计体积庞大,结构和工艺复杂,耗铜多、重量重、成本高;从性能上看,线圈的连接发热点多,发热量大,散热和绝缘需特殊设计和工艺保证;在临界电流分断时,因流经线圈的电流小,无法提供足够强大的磁场,故存在分断困难的问题。因此,目前实际运用中,尤其是较大电流的接触器上很少使用此方式。

### 1.2 EM 方式

灭弧原理:如图1 b)所示,不在主回路中固定接入线圈;在灭弧过程中,利用电弧电流来短时接入线圈,进而实现灭弧。

优点:主要通过线圈灭弧;与ES方式同样,可随电流方向改变灭弧方向,并能在过载时提供更大灭弧磁场功率;由于线圈仅在分断时短时接入,避免了长时通电的发热问题。

缺点:EM灭弧方式结构和工艺较复杂,尺寸、重量、成本没有优势;从性能上看,由于需要起弧后的电弧电流来接入灭弧线圈,故分断初始时响应缓慢,触头烧蚀会较重,使临界电流的分断困难。

EM方式常用于交流灭弧系统,是传统交流灭弧系统在双向直流工况的常规应用。在实际运用中,在中等电流(400~1 000 A)规格的灭弧中有较多应用。

### 1.3 PM 方式

灭弧原理:如图1 c)所示,采用“同向布置”2个永久磁铁形成恒定的磁场对电弧进行作用,保证电弧的吹出方向正确。普通PM方式因其仅考虑单向直流分断,故不能直接用于双向直流接触器上,而需特别考虑反方向的灭弧。对此通常会为每个需要

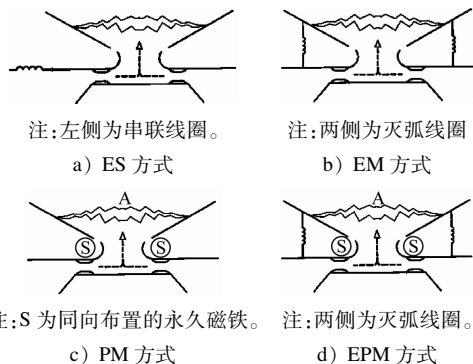


图1 传统灭弧方式灭弧原理示意图  
Fig. 1 Diagram of conventional arc-blowout solution working principle

分断的触点设置正反2个灭弧室。

优点:永磁灭弧的恒定磁场可迅速驱离电弧,减少了电弧高温造成的触头金属部分烧蚀;小电流也会被迅速驱离;对临界电流的分断性能较好;永久磁铁的结构布置简单,绝缘处置容易,不存在发热问题。

缺点:永磁恒定磁场不能随电流方向改变磁场极性;考虑高压绝缘和电气间隙的因素,布置多个灭弧室不仅会造成重量、体积及成本的大幅增加,可行性较差,其结构还可能导致双向分断能力不对等,需在设计和使用时进行平衡;制造过程中需对极性进行严格管控,一旦出现错误就会造成严重后果;由于永久磁铁的场强恒定,其过载能力弱。实际运用中,PM方式在1 500 V以下且400 A以下的小电流规格灭弧中有使用。

### 1.4 EPM 方式

EPM方式是在EM方式和PM方式上的改进。

灭弧原理:如图1 c)所示,EPM方式使用永久磁铁芯取代原电磁铁芯,在灭弧过程中永磁场和电磁场共同作用,提高了灭弧的效率。

优点:加强了电弧产生阶段的灭弧磁场强度,对临界电流的分断有改善;2种磁场的叠加作用提升了分断能力。

缺点:受永磁磁场的限制,PM方式的局限同样存在;在双向直流的电路中,反方向的电流可造成2种电磁场相互削弱,进而造成不同电流方向的灭弧性能巨大差异。

### 1.5 传统灭弧方式的特点总结

在双向直流工况下,传统灭弧方式存在诸多不足:变换电流方向适应性差、体积或重量过大、工艺性差、过载能力差或临界电流分断能力差等。

本文上述 4 种传统方式的特点总结如下:

- 1) PM 方式的体积小、结构简单;
- 2) PM 方式没有临界电流问题;
- 3) PM 方式的极性问题非常重要;
- 4) ES 方式与 EM 方式的接线无极性要求;
- 5) ES 方式与 EM 方式的响应速度较慢;
- 6) 随负载增大,ES 方式与 EM 方式可提供更大的灭弧功率。

## 2 新型灭弧方式

迅速增长的双向直流工况需求大力推动了新型灭弧方式的发展,新型灭弧方式引入永磁技术,充分发挥了永磁场的体积小、磁场强大、绝缘方便、不发热等优势。采用新型灭弧方式的接触器通过对结构的大幅度优化和改进,获得了整体性能的提升。目前典型的新型灭弧方式为 CT(新型永磁 + 电磁灭弧)方式及 CP(新型双永磁灭弧)方式。

### 2.1 CT 方式

CT 方式的灭弧结构主要由 2 个“反向布置”的永久磁铁及其两侧的灭弧线圈构成,其灭弧过程见图 2。CT 方式充分利用了永磁及电磁的特点,针对分断过程中的 3 个阶段进行了独特设计。

1) 阶段 1——电弧产生阶段。在图 2 a) 中,触桥向下移动时触点开始分断,电弧产生。永久磁铁产生的磁场可快速使电弧驱离触头表面,保证了灭弧效果和触头寿命,比电磁灭弧效果更好。

2) 阶段 2——电弧移动阶段。在图 2 b) 中,触桥已经移动至下方的最终断开位置。此时电弧的移动是重点。依据“右手法则”,2 个反向布置永久磁铁形成的永磁场将驱使电弧都向相同方向运动。图 2 b) 中,左侧电弧移向下方的灭弧室 C,右侧电弧向中心移动。

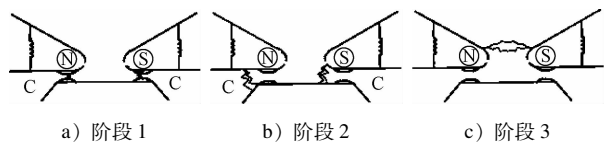


图 2 CT 方式灭弧过程示意图

Fig. 2 Diagram of arc-blowout process of CT solution

3) 阶段 3——灭弧室灭弧阶段。如图 2 c) 所示,当电弧继续移动后,右侧左向电弧接通了上部的引弧片,从而连接了布置于两侧的灭弧线圈(先接通右侧线圈,再通过中间的电弧连接左侧引弧片,进而接通左侧线圈)。此时,电弧能量转移至上

侧电弧,而下方左侧电弧自行熄灭。灭弧室 C 不需要承担实际的灭弧,是个无引弧片、灭弧栅的简易灭弧室。由于灭弧线圈仅短时工作(一般不超过 200 ms),可提供强大的灭弧功率,故不需要考虑长时间通电的发热问题。在混合永磁 + 双电磁磁场的作用下,电弧可快速移动至图 2 c) 上方的主灭弧室中熄灭。

优点:电弧产生至熄灭的各阶段均无临界电流问题,触头寿命长;双向直流的正反方向灭弧效果相同,特别适合重任务工况。

缺点:由于布置了 2 套灭弧系统,兼顾了电磁方式和永磁方式,故整体结构设计复杂,接触器的尺寸、重量及成本有一定的增加。

### 2.2 CP 方式

CP 方式是专门针对双向直流工况设计的最新灭弧方式,在传统永磁灭弧基础上进行了重要改进。如图 3 所示,CP 方式灭弧结构有如下改进:① 在触头两侧结构布置了 2 套 4 个永久磁铁,且磁铁极性两两相对,左右一致;② 在永久磁铁外侧布置了极板,与永久磁铁间的极板共同构成 4 个小永磁灭弧室(灭弧通道);③ 在最外侧上下方再各设 1 套主灭弧室。

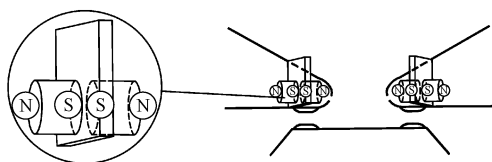


图 3 CP 方式的灭弧结构

Fig. 3 Arc-blowout structure of CP solution

如图 4 所示,采用 CP 方式的接触器在双向直流工况下的分断工作情况为:

1) 电流方向为 A 方向(左正右负,见图 4 a)): 电弧将在永磁场作用下迅速通过下方灭弧通道,并在外侧的主灭弧室中拉长、冷却直至熄灭。

2) 电流方向为 B 方向(右正左负,见图 4 b)): 电弧在永磁场作用下通过上方灭弧通道后,也在外侧的主灭弧室中熄灭。

采用 CP 方式结构的优点是:① 在电弧产生、移动及灭弧等各阶段都能提供强大的永磁场,且电弧移动迅速、无延迟,使接触器电寿命更长;② 设置了 2 套永磁灭弧系统和灭弧通道,1 套在正向电流时使用,1 套在反向电流时使用;对于直流工况、双向直流工况,以及 50 Hz 或 60 Hz 的交流工况,总能有正

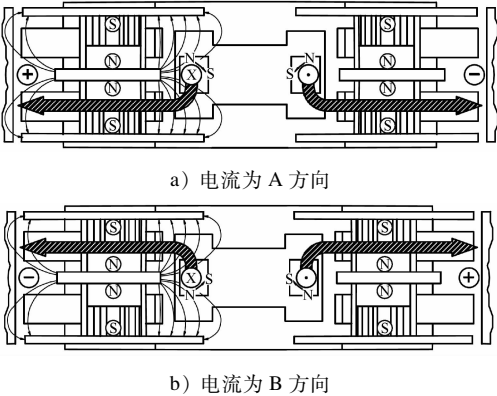


图4 采用 CP 方式的接触器在双向直流工况下的分断工作示意图

Fig. 4 Diagram of breaking operation of CP solution contactor under bi-directional DC working condition

确的灭弧极性;③ 恒定的永磁场一直在起作用,在小电流时也有效,无临界电流问题;④ 彻底取消了电磁线圈,充分发挥了永久磁铁体积小、绝缘方便的特点;4 个灭弧通道不承担主要的灭弧工作,相应不需要更多的大体积主灭弧室,故该灭弧结构在外形尺寸、重量和成本上都有优势。

缺点:双套强力永磁场的系统原理和结构复杂,工艺要求高;由于永久磁铁的磁场恒定,过载分断能力不强。

3 灭弧效能的评价

选择 EM、CT 及 CP 等方式,分别进行 3 kV 临界电流分断模拟试验。模拟试验的负载时间常数  $\tau$  为 30.0 ms 和 6.7 ms,双向直流模拟电流  $I$  的方向为 A 向和 B 方向,通过测定燃弧时间来判断分断效果。模拟试验结果如表 1 所示。

由表 1 可见:从燃弧时间来看,EM 方式最差,CT 方式较优,CP 方式最优。由此可知,采用 CP 方式时,灭弧效能最好,接触器的电寿命最长。

对采用不同灭弧方式的低压双向直流接触器性能进行评价,结果见表 2。

4 结语

在城市轨道交通变流系统低压双向直流电路的应用中,出于对故障和安全的考虑,对接触器的带负载分断要求很高。传统的灭弧方式很难解决双向直流的分断难题,其结构与性能的需求难以平衡,其对临界电流的处理为难点。

表 1 3 kV 临界电流分断模拟试验结果  
Tab.1 Simulation test results of 3 kV critical current breaking

分断负载			燃弧时间/ms		
$I/A$	$\tau/ms$	电流方向	EM 方式	CT 方式	CP 方式
10	30.0	A	* *	45	25
10	30.0	B	* *	65	25
5	30.0	A	225	65	30
5	30.0	B	* *	65	40
1	6.7	A	* *	80	25
1	6.7	B	* *	>160	30

注: \* \* 表示持续燃弧或燃弧时间 >400 ms,可判断为分断失败。

表 2 不同灭弧方式的低压双向直流接触器性能评价  
Tab.2 Performance evaluation of low-voltage bi-directional DC contactors with different arc-blowout solutions

灭弧方式	外形尺寸	发热限制	电寿命	临界电流分断性能	大电流分断性能	过载分断性能	双向直流适用性
ES	大	一般	一般	一般	良	好	一般
EM	中	好	一般	一般	良	好	良
PM	大	好	良	良	一般	一般	一般
EPM	中	好	良	良	良	好	良
CT	中	好	好	好	好	优	好
CP	小	好	好	优	好	一般	优

以永久磁铁技术为核心的新型灭弧方式创新地组合使用了永磁技术,利用永磁场的特点,极大地提高了灭弧效率,革命性地解决了双向直流分断的问题,适用于直流工况、双向直流工况及 50 Hz 或 60 Hz 交流工况。新型灭弧方式的灭弧性能明显优于传统灭弧方式。随着制造工艺的优化,制造成本进一步降低,新型灭弧方式将成为低压双向直流接触器的最佳选择。

参考文献

[1] 周茂祥. 低压电器设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社,1992.  
ZHOU Maoxiang. Low voltage apparatus design manual[M]. Beijing: China Machine Press, 1992.

[2] R·克拉利克. 具有永磁体灭弧的开关装置:CN 109036908 A [P]. 2018-12-18.  
CLARICK R. Switchgear with permanent magnet arc-blowout: CN 109036908 A [P]. 2018-12-18.

(收稿日期:2021-08-10)