

ABB

2 | 13

ABB 集团技术刊物

评论

混合式高压直流断路器 6

深度呼吸 35

保持领先的维护服务 58

电力电子器件百年发展史 64

突破性技术



用电力与效率
创造美好世界™



土耳其幼发拉底河上的阿塔图尔克水坝于 1993 年竣工。其占地 817 平方公里的水库可容纳 48.7 立方千米的水。ABB 为该项目提供了 8 台 300 MW 发电机，并于近期对该项目中的调速器和励磁系统进行了现代化改造，此外还安装一个带远程访问的全新 SCADA 系统以及 800xA 系统以实现自动化。本页图中外形庞大的发电站装有励磁系统，位于垂直安装的水轮机 / 发电机的上方（从发电站地面可以看到这些设备的机盖）。本期封面图片拍摄自意大利的 Sorghia Bertinico-Turano Lodigiano 联合循环发电厂，ABB 为该厂提供了 Symphony Plus 控制系统。



开关技术应用 范畴

- 6 **突破之举！**
ABB 混合式高压直流断路器，实现可靠高压直流输电网的创新成果
- 14 **开辟断路器领域的新天地**
同时肩负 15 所大型发电站功率转换的超级断路器
- 19 **二合一芯片**
双模绝缘栅晶体管 (BIGT)
- 24 **导纳原理**
使故障保护更简单
- 29 **清洁触头技术**
用于供电回路通断和马达控制的接触器技术

矿业资源

- 35 **深度呼吸**
优化地下矿井的空气含量
- 42 **顶级齿轮**
提高采矿行业生产率的技术
- 48 **矿山信息化**
地下开采中移动式设备的整合

监测与控制

- 52 **OCTOPUS-Onboard**
具有运动监测、响应预报和恶劣天气决策支持功能的 ABB 船用体系系统
- 54 **控制室融合**
融合工业监测控制系统与数据中心运营
- 58 **CRIM**
为生产过程复杂的工厂寻找最好的维护策略

永远的创新先锋

- 64 **从汞弧到混合断路器**
电力电子器件百年发展史

突破性技术



Prith Banerjee

亲爱的读者：

开关是每一个电气系统或电子系统的核心元件。从控制系统中集成的微处理器逻辑器件到用于电网控制的大规模断路器，开关装置支撑着 ABB 几乎所有的产品，是真正的通用型技术。ABB 一直在努力地推进开关能力发展，并由此开创新的应用——其中很多案例是通过突破现有应用的条件限制来实现的。有时，全新的或颠覆性的技术突破会“改变游戏规则”，重新定义市场。其中，混合式直流断路器就属于后一类。

几十年来，ABB 一直是高压直流 (HVDC) 输电技术领域的先行者，实现了高可控性、低损耗的远距离输电。公司并未止步于单独的输电线路，而是坚信高压直流输电网必将成为未来电网的核心力量。与交流电网相同，直流电网也离不开断路器——例如，在发生干扰时切断故障电路，保证安全运行，而无需关闭整个系统。然而，交流电和直流电的中断操作存在着巨大差别，这一问题无法通过修改或调整现有的交流输电解决方案来解决。ABB 凭借混合断路器解决了这一系列难题——之所以称之为“混合”断路器，是因为其同时采用了传统的开关技术和半导体器件。该技术最近被《麻省理工科技创业》评为 2012 年度最重要的十大科技里程碑之一。本期《ABB 评论》开篇文章便以混合断路器为主题展开讨论。

针对开关技术这一主题，本期还刊登了其他几篇有关开关技术的文章，每篇文章涉及不同的应用和功率范围——从高压交流到电机控制，甚至论及了 ABB 最新的、应用于混合断路器的半导体器件 BIGT。在继续讨论开关技术及其应用的同时，随后的一篇文章回顾了公司在电力电子器件领域的百年发展

历史，主要着重于开发装置的发展。一篇关于应用的讨论文章也计划安排在下期杂志上。

本期《ABB 评论》还涉及到了其他主题，例如专门设立了采矿专题，展示了 ABB 在该领域的杰出贡献。还有文章将目光投向公司的全线活动，包括重型起重容器、数据中心、大型厂房模拟和维护计划。

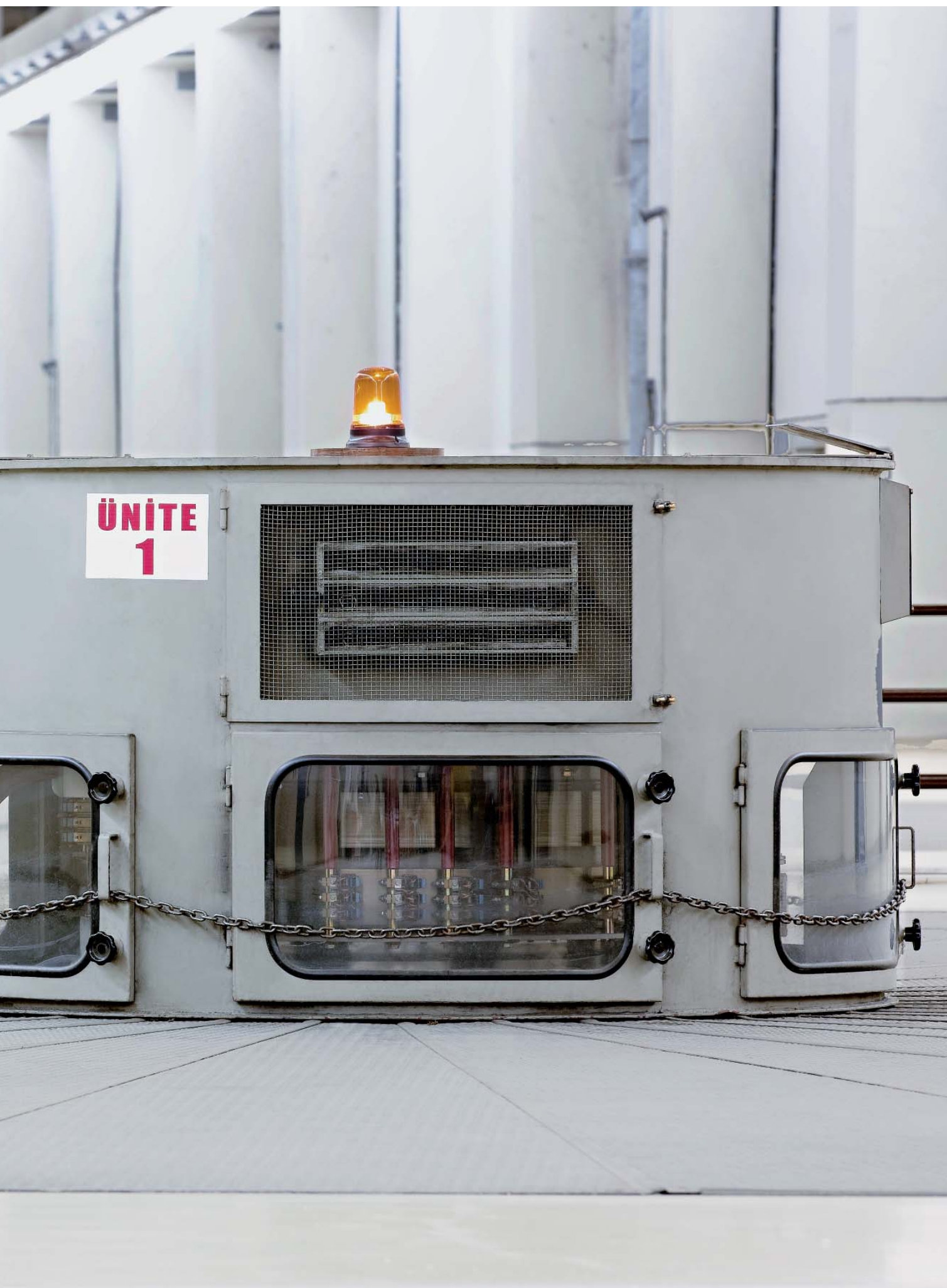
但是，电流并不是开关技术的唯一对象。从本期开始，本期刊将进行一定的调整。除了英语之外的其他语言读者可能已经发现本期刊的名称已改为《ABB 评论》，目的是统一所有语言版本的名称，提高认同度。此外，我们还为订阅电子期刊的读者推出了一款电子邮件提醒功能，确保他们获取有关本期刊的最新资讯（订购此功能的方法详见封底）。在未来几期中，您将能看到我们的进一步改变。尽管形式和表达方面有所改进，《ABB 评论》仍将一如既往地坚持为您提供高标准的内容。

最后，我在 ABB 担任首席技术官的任期将满，在这里我要跟大家说一声再见，相信《ABB 评论》一定能继续带领大家了解公司的技术进展。

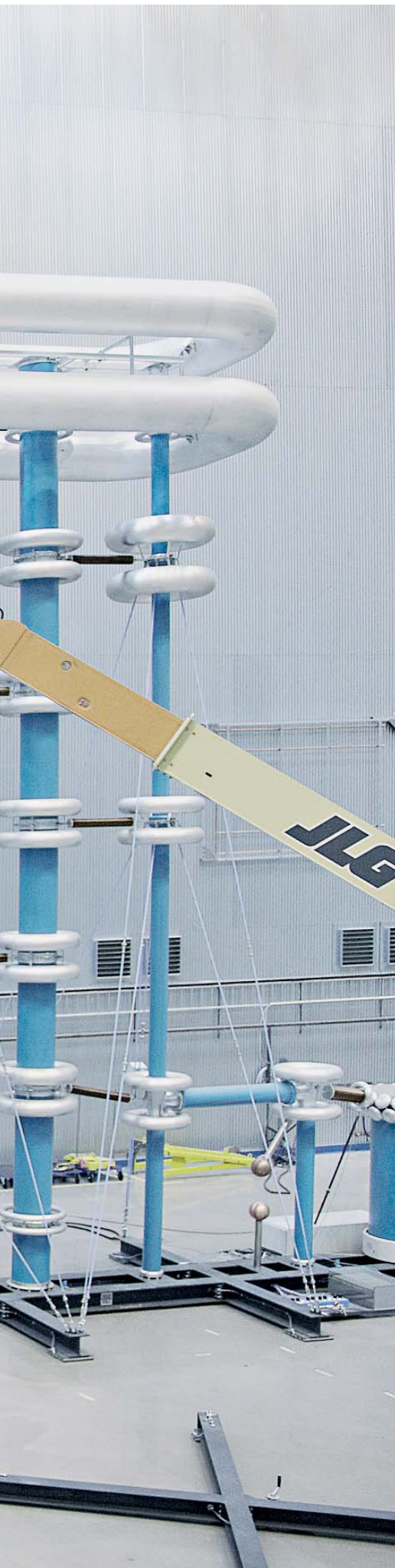
感谢您的阅读！

Prith Banerjee

ABB 集团首席技术官兼执行副总裁







突破之举！

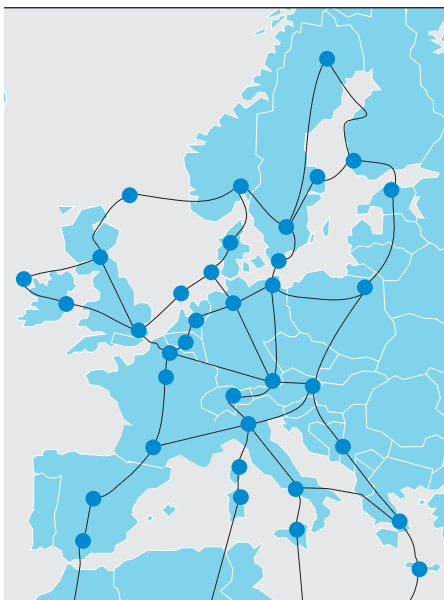
ABB 混合式高压直流断路器——实现可靠高压直流输电网络的创新成果

MAGNUS CALLAVIK、ANDERS BLOMBERG、JÜRGEN HÄFNER、
BJÖRN JACOBSON

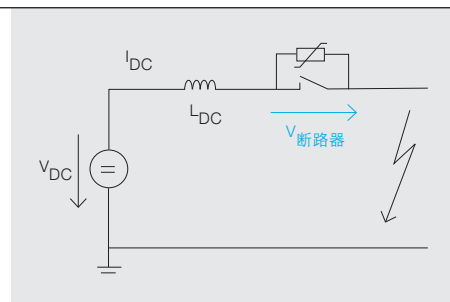
ABB 及其前身率先开发出 HVDC（高压直流输电）技术，大大降低了远距离输电的损耗。迄今为止的所有高压直流输电线路全部采用点到点连接。如果每条线路能够设置两个以上的终端，该技术的应用范围将大大拓宽，并使现有线路最终发展成为高压直流输电网。但是，业界还需要适合的断路器来满足该类输电网电压等级和所需的开关速度、并将损耗控制在允许范围内，这一类断路器的空白阻碍了高压直流输电上述拓扑的实现。这一状况在 ABB 推出全新高压直流断路器后得到全面改观。

标题图片

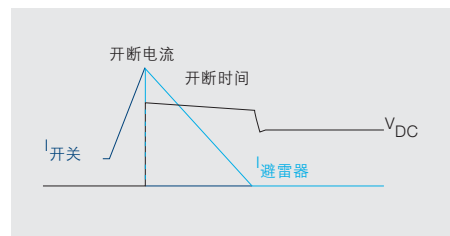
ABB 混合式断路器是 ABB 发展历程中最重要的创新成果之一。直流输电网络将不再只是构想。



1a 蓝色点代表高压直流输电网中的换流站



1b 高压直流断路器



1c 工作原理

与高压交流输电网相比，高压直流输电线路中的有功功率损耗相对较低，并且没有无功功率损耗，这使高压直流输电网成为极具吸引力的远距离输电技术 [1]——对于可再生能源发电的快速发展来说具有特殊的意义。

尽管如此，混合式断路器的发展并不需要等待高压直流输电网的全面出现。目前，大多数输电方案为 HVDC 点对点连接，混合式断路器在线仍可发挥作用。除了功率转换，高压直流换流站同时还可以通过无功功率控制来提高交流网络稳定性。发生故障时，如果换流器能够迅速地与高压直流输电线路断开，那么换流站可以直接进入独立运行状态，作为静止同步补偿装置 (STATCOM)，继续为交流网络的稳定性提供支持。

高压直流断路器的技术要求极高。由于此类线路的阻抗较低（意味着发生故障时意味着发生故障时的压降速率更快），因此开断电流所允许的时间比同等交流应用更短。短路故障通常必须在 5 毫秒内清除，否则连远在 200 公里之外的换流站都会受其影

响。在换流站中，直流电压至少要达到额定电压的 80% 才能保证其正常运行，因此故障必须在几毫秒内清除。

纯机械高压直流断路器断开一条线路只需要几十毫秒，但这对于可靠的高压直流输电网来说是远远不够的 [2]。

较短的故障排除时间意味着可以降低避雷器的耗散功率要求，但需要避雷器具备较高的电压水平。

但是，此类断路器可以用于消除故障电流等用途。机械断路器的其他弊端包括需要额外的组件来产生电流过零点，使电流停止流动。

基于半导体的高压直流断路器能够轻而易举地攻克开断速度的限制，但由于半导体始终位于电流路径中，因此

会产生传导损耗，通常占换流站损耗的 30% 左右。

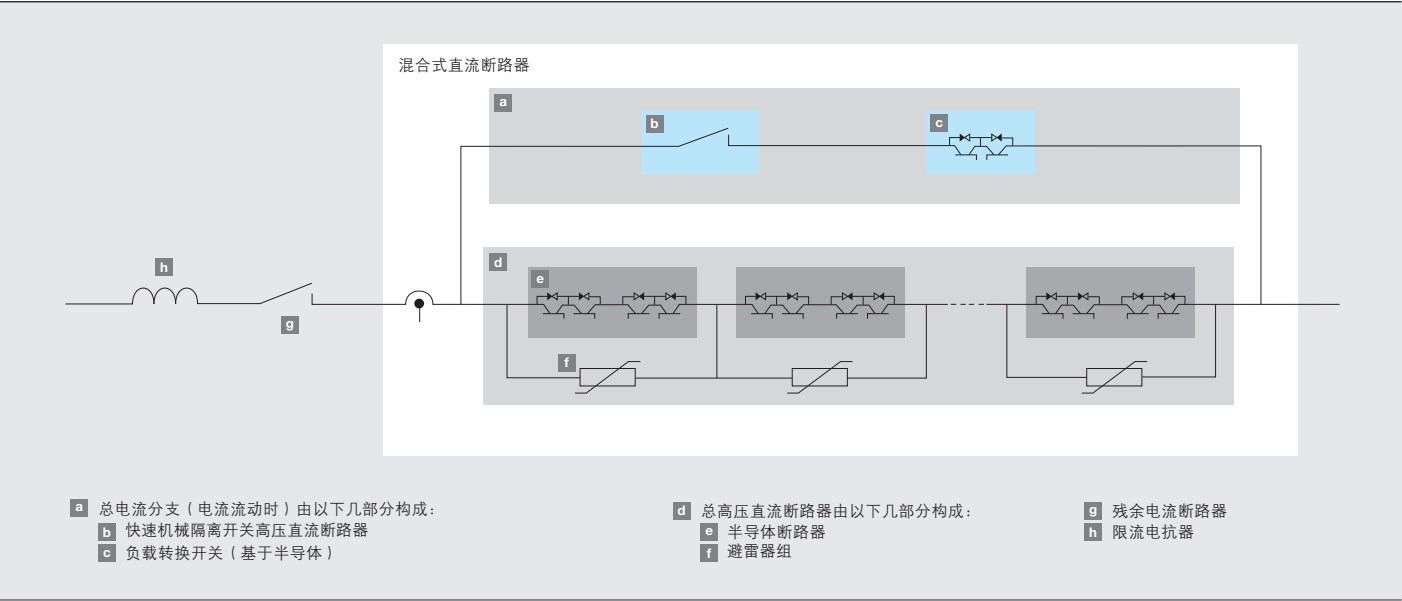
高压直流输电网如图 → 1a 所示。带有一个机械高压直流断路器和避雷器的电路如图 → 1b 所示，开断过程中的暂态响应如图 → 1c 所示。发生故障时，电流开始上升（上升速度取决于进线电抗器的电感量）。开关开断后，电流转向避雷器并开始降低。避雷器组中的故障电流形成一个反向电压，通过消耗高压直流电抗器和故障电流路径中储存的能量，降低并最终消除故障电流。

消除故障的总时长包括：

- 电流在转换前的上升时间
- 线路断开后，电流下降的持续时间。

在高压直流断路器以及进线电抗器的设计和成本计算中，这两个时间段都是较为重要的考虑因素。

分断时间受制于保护功能的响应时间以及高压直流开关的动作时间。如果开断时间较长，则要求高压直流开关具有更高的最大电流开断能力，除此之外还会增加避雷器需要吸收的能量，从而导致高压直流断路器成本增加。因此，必须尽可能地缩短开断时间。在开断时



间和最大电流开断能力既定的情况下，高压直流电抗器的电感量是唯一可调节的参数（决定着电流的上升速度）。反之，高压直流电抗器的大小也会受到高压直流输电网络系统的成本和稳定性等因素的限制。

允许故障排除时间将影响到所需的避雷器以及极电压保护装置允许的故障清除时间将影响避雷器以及极电压保护的要求电压水平。较短的故障排除时间意味着可以降低避雷器的耗散功率要求，但需要避雷器具备较高的电压水平，即要求更高的极间额定电压，由此增加了高压直流断路器的成本。

通过以下实例，我们可以对上述参数之间的关系有大致地了解。假设开断时间为 2 ms（基于半导体的高压直流开关可以实现），高压直流输电线路故障发生在高压直流开关场附近，那么在一个 320 kV 的高压直流输电网（最大过电压为 10%）中，对应于 100 mH 高压直流电抗器的故障电流最大上升率为 3.5 kA/ms。如果给定的额定线路电流为 2 kA，则高压直流断路器所需的最低开断能力为 9 kA。

混合式高压直流断路器

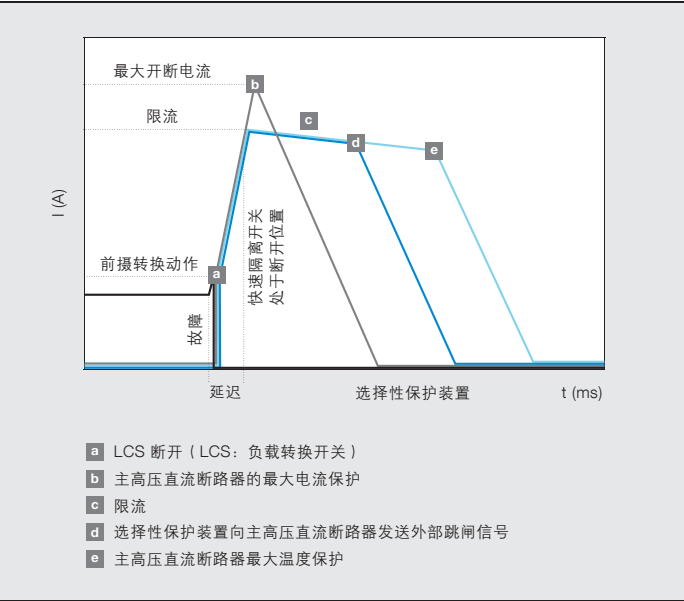
混合式高压直流断路器 → 2 基于 → 1b

的配置，但带有一个额外的分支线路 → 2a。此分支线路包括一个基于半导体的负载转换开关 → 2c，该转换开关与一个快速机械隔离开关 → 2b 相串联。

在正常运行过程中，电流只流经旁路 → 2a。发生高压直流输电故障时，负载转换开关会立即将电流转换至主高压直流断路器 → 2d。随着分支线路 → 2a 不再流过电流，隔离开关 → 2b 断开，从而保护负载转换开关 → 2c，与主高压直流断路器中建立的一次电压隔离。与整个开关周期始终处于主电流通路中的组件相比，这一配置可以大幅降低负载转换开关所需的额定电压，其额定电压只须超过主高压直流断路器的通态电压，对于 320kV 的高压直流断路器，其值通常在 kV 范围内。负载阻断电压降低后，负载转换开关的通态电压通常能够控制在几伏之内，这样便可使混合式高压直流断路器的通态损耗率降低至与纯半导体断路器相同的水平，即传输功率的 0.01%。

主半导体高压直流断路器 → 2d 由避雷器组 → 2f 分成多个部分，避雷器组的尺寸能够满足全电压和开断容量要求。故障排除后，隔离断路器 → 2g 将阻断残余电流并使故障线路与高压

除了功率转换，高压直流换流站还可以通过无功功率控制来提高交流网络稳定性。

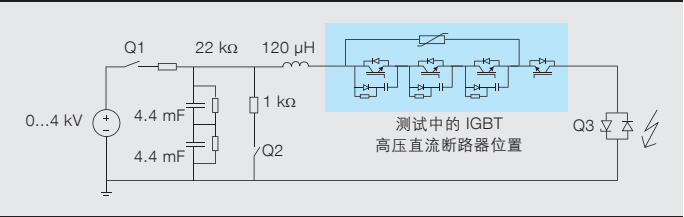
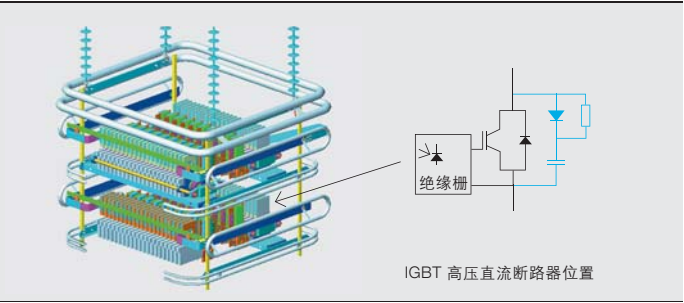


直流输电网相分离，从而防止避雷器组发生热过载。

机械开关 → 2b 在零电流条件下断开，且电压应力较低，因此可以通过带有轻量级触点系统的隔离开关实现。在达到断开位置前，快速隔离开关不需承受最大极间电压（由避雷器组保护水平决定）。Thomson 传动装置 [4] 可以加快断开速度，同时采用六氟化硫 (SF₆) 作为绝缘介质，实现紧凑的隔离开关设计。

混合式高压直流断路器采用前摄控制，因此当隔离开关的断开时间小于选择性保护所需的时间时，能够补偿快速隔离开关的时间延迟。一旦高压直流线路中的电流超过一定的过电流水平 → 3a，该类断路器的内置过流保护装置将开启前摄性的电流转换。主高压直流断路器将延迟开断操作，直至收到跳闸信号或故障线路电流接近其最大开断能力 → 3b。

如需延长主高压直流断路器的自我保护功能切断混合式高压直流断路器之前的时间，主高压直流断路器在开断前可以采用限流模式运行 → 3c。主高压直流断路器将高压直流电抗器的压降控制为零，以防线路电流进一步



上升。限流模式的最大持续时间取决于避雷器组的能量耗散能力 → 3d。

高压直流输电开关场中的混合式高压直流断路器可以采用与纯半导体断路器相似的快速备用保护装置。在收到备用保护装置的跳闸信号之前，线路

混合式高压直流断路器采用前摄控制，因此当隔离开关的断开时间小于选择性保护所需的时间时，能够补偿快速隔离开关的时间延迟。

过电流或更高水平的开关场保护可以启动电流转换从旁路至主高压直流断路器或可能的备用断路器。当断路器发生故障时，备用断路器几乎可以瞬间启动——启动时间通常小于 0.2 毫秒。这样可以避免高压直流输电网的波动，并使所需的备用断路器电流开断能力保持在合理的数值范围内。

原型机设计

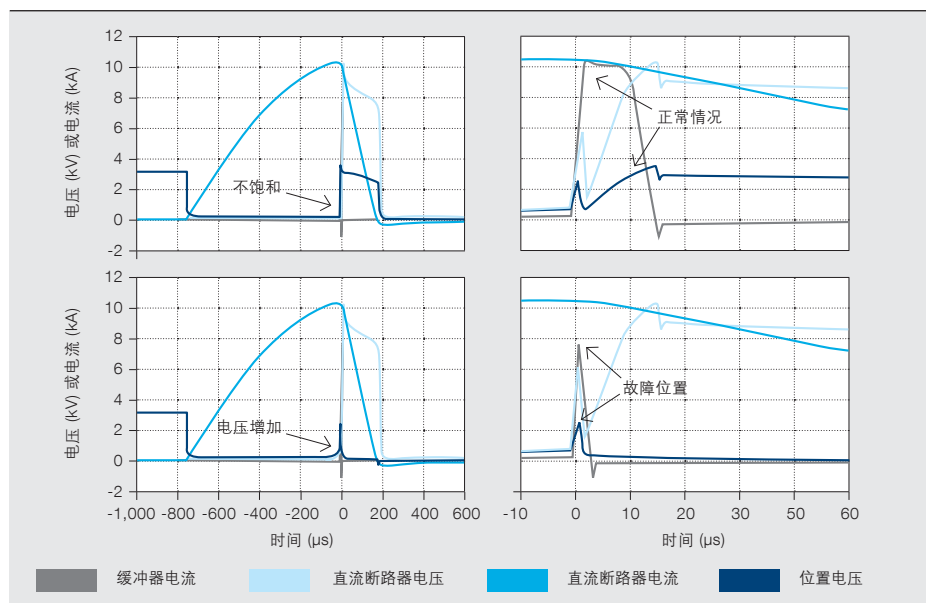
在一个额定电压 320kV，额定电流 2kA 的高压直流电网中，混合式高压

直流断路器原型机被设计为具有 9.0kA 的电流开断能力。最大电流开断能力仅取决于主高压直流断路器的设计，而与额定电流无关。考虑到开断过程中会产生快速暂态电压，因此快速隔离开关和主高压直流断路器可转换超过 1.5 p.u. 的电压。

主高压直流断路器 → 2d 由多个高压直流断路器单元组成，在开断过程中，各单元采用独立的避雷器组将其最大电压 → 2e 限制在特定水平上。

每个高压直流断路器单元包含四个高压直流断路器套件 → 4，其中两个用于切断正反方向电流。

每个套件带有高达 20 个串联的 IGBT 高压直流断路器位置。由于开断过程中会产生较大的 di/dt 应力，因此原型机采用了低杂散电感的机械设计。采用额定电压 4.5kV 的压接式 IGBTs [6] 可实现紧凑的套件设计，并能在单个组件故障时确保稳定的短路故障模式。各 IGBT 模块均带有独立的电压关断型



(RCD) 缓冲器，以便在开断过程中确保均等的电压分布。光驱动式闸单元能够避免 IGBT 高压直流断路器的运行受到高压直流输电电网中的电流和电压条件影响。由于主高压直流断路器单元在正常运行情况下不会承载线路电流，因此 IGBT 套件不需要冷却系统。

在负载转换开关 → 2c 的设计中，每个电流方向配置一个 IGBT 高压直流断路器模块便足以达到额定电压的要求。IGBT 模块之间采用并联连接，提高了混合式高压直流断路器的额定电流。此外，串联连接的冗余 IGBT 高压直流断路器还提升了负载转换开关的可靠性。目前的设计在每个电流方向上布置了一个 3×3 的 IGBT 位置

雷器组）原型机来验证 4.5 kV StakPak IGBTs [6] 的电流开断能力 → 5。随后，测试人员在相反的原始电流方向上连接第四个 IGBT 模块，用以验证其中的反并联二极管的功能性。通过晶闸管开关使电容器组放电，仅使用小型直流电抗器限流，以此模拟高压直流输电电网中的极对地故障。

IGBT 高压直流断路器单元的最大电流开断能力取决于 IGBT 模块 → 6 的饱和电流（不同于电压源换流器应用中的典型安全操作区）。IGBT 串联的高压直流断路器可以在 $2 \mu\text{s}$ 之内将线路电流转换至 RCD 缓冲器电路，将这些位置上的电压上升率限制为 $300 \text{ V}/\mu\text{s}$ 。零电压转换减少了瞬时开关损耗，并确

保均等电压分布不受所用 IGBT 模块开转换特性公差的影响。

每个终端带有高达 20 个串联的 IGBT 高压直流断路器位置。

矩阵。由于开关长期承载线路电流，因此需要安装一个冷却系统。

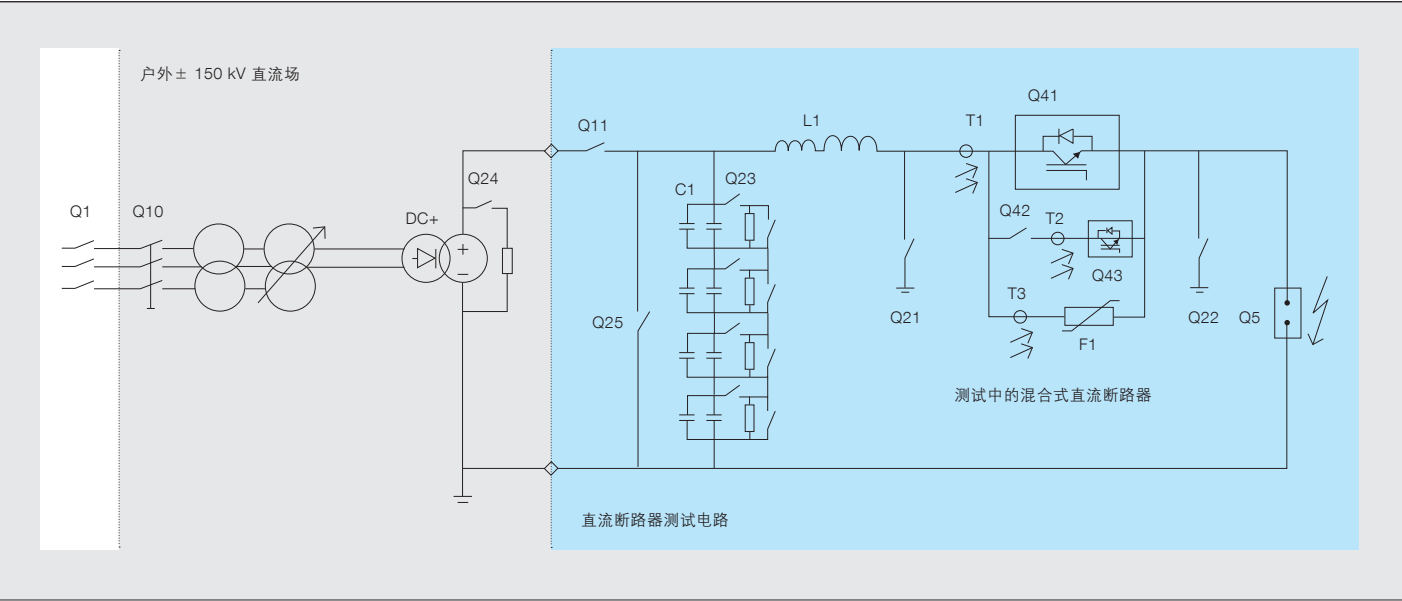
测试结果

在第一个测试电路中，测试人员采用了按比例缩小的主断路器单元（带有三个串联的 IGBT 模块和一个共用的避

雷器组）原型机来验证 4.5 kV StakPak IGBTs [6] 的电流开断能力 → 5。随后，测试人员在相反的原始电流方向上连接第四个 IGBT 模块，用以验证其中的反并联二极管的功能性。通过晶闸管开关使电容器组放电，仅使用小型直流电抗器限流，以此模拟高压直流输电电网中的极对地故障。

IGBT 高压直流断路器位置通过了低于 10 kA 的开断电流应力测试。当有更

机械开关在零电流条件下断开，且电压应力较低，因此可以通过带有轻量级触点系统的隔离开关实现。



成功的设备级和组件级试验证实了各组件的性能。完整的混合式高压直流断路器已经通过 ABB 测试中心的试验机得以验证。

高电流通过时，IGBT 的饱和电流将立即导致整个 IGBT 模块发生压降。在一次故意破坏性试验中，IGBT 模块内部的热耗散烧坏了封装的 IGBT 芯片。使用压接式 IGBT 可以形成可靠的短路，避免了故障 IGBT 模块的机械损坏。测试过程中只有一个 IGBT 模块发生故障，因此仍可使用其余的两个模块排除故障。

每个 IGBT 高压直流断路器单元的标称电压为 80 kV。由于电压水平较高，第二个测试设置需要大幅增加空间。混合式高压直流断路器概念的测试电路如图所示 → 7。通过电容器组 C1 充电，达到所需的高压直流电压水平。选用电抗器 L1，以确保在短路故障过程中达到预期的电流变化率 (di/dt)。短路故障由触发火花间隙 Q5 引发。

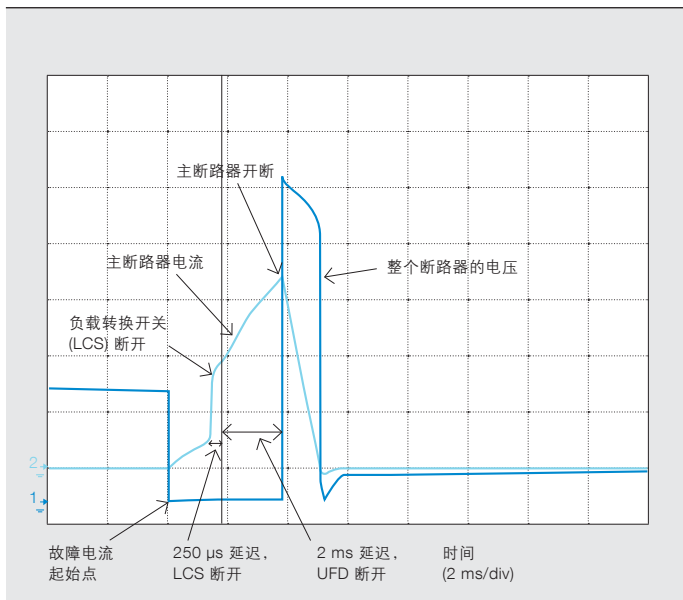
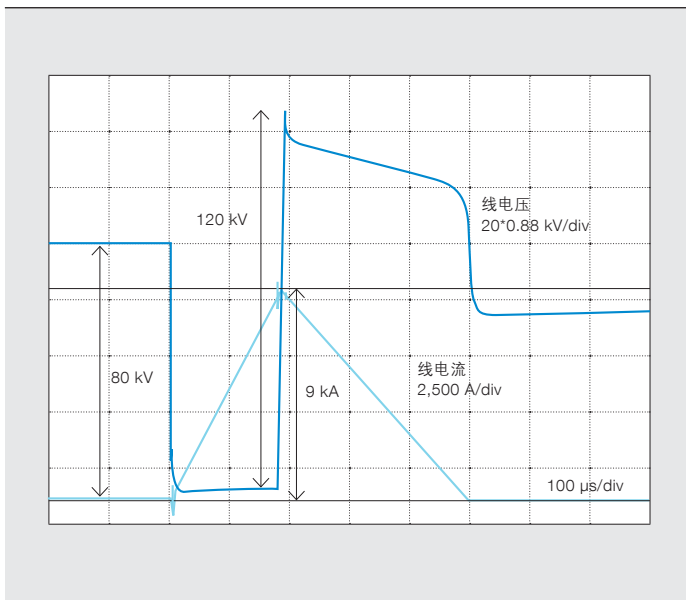
典型的测试结果如图所示 → 8。经测试验证，最大开断电流超过 9 kA。电流转换期间，整个高压直流断路器单元的电压超过 120 kV。因此，一个 80 kV 高压直流断路器单元的开断容量超过 1 GVA。此外，在高压直流断路器单元中，只有单独的 IGBT 高压直流断路器位置能观察到带有最大压降 3.3 kV 和范围小于 10% 的均压分布。

测试结果

测试人员进一步扩大了主断路器测试设置，用以验证整个混合式高压直流断路器的概念。随后安装了第二个电容器组和大型电抗器，将线路电流上升率限制为高压直流输电网的典型值，此外还在系统配置中纳入了超快速隔离开关和负载转换开关。

成功的设备级和组件级试验证实了各组件的性能。完整的混合式高压直流断路器已经通过 ABB 测试中心的试验机得以验证。与主断路器并联的分支线路超快速隔离开关开断试验（峰值电流为 9 kA 且延迟时间为 2 ms）如图所示 → 9。9 kA 最大额定故障电流是现有半导体所能达到的极限。下一代半导体器件的开断性能将高达 16 kA。这些试验旨在验证电力电子器件的转

双模式绝缘栅晶体管 (BIGT) 技术的引进将使压接式模块的开断容量增加一倍。



在实际的高压直流输电线路中测试该断路器是我们的下一步计划

换性能以及超快速机械隔离开关的断开速度。试验机包括一台 80 kV 单向主断路器单元，以及超快速隔离开关和负载转换开关。测试人员通过串联多个主断路器单元实现了更高的额定电压。测试不仅针对正常的开断情况，还包括了断路器组件故障的情形。

前景展望

双模式绝缘栅晶体管 (BiGT) 技术 [7] 的引进将反向导通二极管的功能融入到 IGBT 芯片中，这一创新结果将使现有压接式模块的开断容量增加一倍（还可参阅本期《ABB 评论》第 19 – 23 页中的“二合一芯片”）。

基于混合式高压直流断路器概念的高压直流断路器和限流器具有快速、可靠和几乎零损耗的优势，目前已经在高压直流电压高达 320 kV 且额定电流为 2 kA 的组件级和系统级测试中得到

验证，为高压直流输电网的实现扫除了一个巨大的障碍。在实际的高压直流输电线路中测试该断路器是我们的下一步计划。

Magnus Callavik

ABB 电网系统
瑞典韦斯特罗斯
magnus.callavik@se.abb.com

Anders Blomberg

ABB 电网系统前员工

Jürgen Häfner

ABB 电网系统
瑞典卢德维卡
jürgen.häfner@se.abb.com

Björn Jacobson

ABB 电网系统
中国北京
bjorn.jacobson@cn.abb.com

参考文献

- [1] E. Koldby, M. Hyttinen "Challenges on the Road to an Offshore HVDC Grid," (Nordic Wind Power Conference, Bornholm, Sept. 2009)
- [2] Å. Ekström, H. Härtel, H.P. Lips, W. Schultz, D. Kind "Design and testing of an HVDC circuit breaker," (Cigré session 1976, paper 13-06)
- [3] C.M. Franck "HVDC Circuit Breakers: A Review Identifying Future Research Needs," (IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 26, pp. 998-1007, April 2011)
- [4] J. Magnusson, O. Hammar, G. Engdahl "Modelling and Experimental Assessment of Thomson Coil Actuator System for Ultra Fast Mechanical Switches for Commutation of Load Currents," (International Conference on New Actuators and Drive Systems, Bremen, 14-16 Juni 2010)
- [5] G. Asplund "HVDC switch for current limitation in a HVDC transmission with voltage source converters," (European Patent EP0867998B1)
- [6] S. Eicher, M. Rahimo, E. Tsyplakov, D. Schneider, A. Kopta, U. Schlapbach, E. Caroll "4.5 kV Press Pack IGBT Designed for Ruggedness and Reliability," (IAS, Seattle, October 2004)
- [7] M. Rahimo, A. Kopta, U. Schlapbach, J. Vobecky, R. Schnell, S. Klaka "The Bi-mode Insulated Gate Transistor (BiGT) A potential technology for higher power applications," (Proc. ISPSD09, p. 283, 2009)
- [8] J. Häfner, B. Jacobson, "Proactive Hybrid HVDC Breakers – A key innovation for reliable HVDC grids," (Cigré Bologna, Paper 0264, 2011)

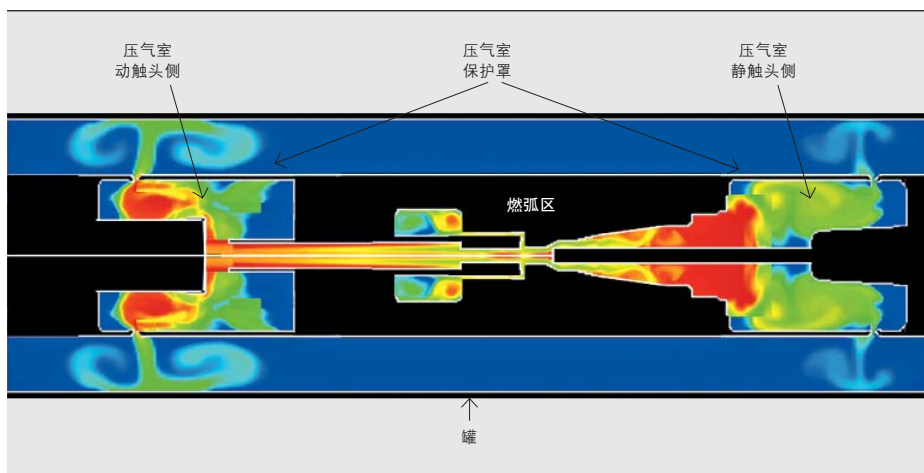


开辟断路器领域的 新天地

同时肩负 15 座大型发
电站功率转换的超级断
路器

HELMUT HEIERMEIER, RETO KARRER

在广袤的土地上，纵横交错的电力网络为城市和乡村提供了源源不断的电能。随着时代的发展，这些电网也在不断发生着演变。其中特别值得一提的是，工作电压正在逐步增加，主要目的是减少传输损耗。这一进展对于电网控制和保护的关键元件——断路器提出了更高的要求。断路器的核心是灭弧室——即进行物理开合操作的气室。不断变化的技术和市场条件以及新的国际标准将开发新一代灭弧室的需求摆上了台面。



为了最大限度减少传输损耗并降低环境影响，供电网络正在向更高电压等级前进。更高电压以及其它需求迫使供电网络保护及控制的关键元件——断路器也必须随之发展。其中，断路器的可用性是一个决定性因素，直接影响着电网本身的可靠性。

减少断路器元件数量和低操作功有效降低了意外停电的风险。此外，如果能够缩小断路器的尺寸，还可以进一步降低其成本和空间要求。

鉴于此，ABB 开始着手为 420 kV 电网研发全新的单断口断路器。这一全新灭弧室必须符合最新的 IEC 和 ANSI/IEEE 国际标准，并满足世界各地市场现有的特殊要求。在未来电网中，需要控制的标称电流和短路电流都将继续增加，有望达到 5 kA 的标称额定电流和 63 kA 的额定短路电流（基于 50 Hz 和 60 Hz 频率）。

其它要求包括：

- 缩小隔间尺寸（整个隔间应能够装进一个标准集装箱）

- 全面的近区故障开合能力，无需使用线对地电容器
- 减少六氟化硫气体用量
- 尽可能减小反作用力（对建筑物和基座的冲击力）
- 使用小型的标准操动机构
- 实现二周波开断时间

断路器

断路器是设备中的重要组成部分。断路器必须应对从 1 A 到数十 kA 的电流；要承受较大的电压波动，例如快速的电压上升和长期交流应力；要进行日常的开合操作以及紧急开断短路电流；

它有可能在相当长一段时间内处于非活动状态，一旦启动，就必须在几毫秒内紧急遮断故障。

设计一款全新的断路器

设计新开关装置以及采用一项新技术时需要考虑各种不同的因素。

容性电流开合能力

此类操作的特点是通过断路器触头的电流相对较小，但电压较大，因此对动态电压的耐受能力要求较高。电压耐受能力应高于断路器分断时电网中的上升电压。这就像是触点分离与瞬态电压上升之间展开的一场竞赛。为了保证不发生电压中断，断路器必须在这场竞赛中胜出，这一点十分重要，否则电压上升会导致变电站元件

减少断路器元件数量和低操作功将意外停电风险降至最低。此外，小型断路器还能够降低成本和空间要求。

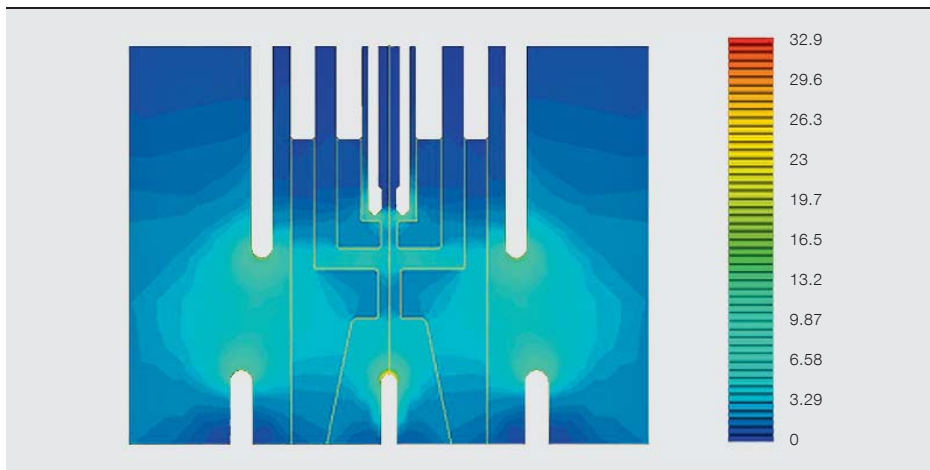
和架空线应力过高。换言之，这一全新的断路器必须具备足够高的触头分合闸速度，以便在极短时间内达到所需的介电耐受能力。

标题图片

输电线路电压的不断增加是高压技术新品研发的一大推动力。最新的断路器是如何应对新挑战的呢？

项目目标是研发一台适用于 420 kV 电网的单断口断路器，电网标称额定电流为 5 kA 且额定短路电流为 63 kA（频率 60 Hz），无需线对地电容器。

2 灭弧区电场仿真示例



国际标准为此制定了非常详细的测试步骤，并提供了广泛适用的测试程序。

全面的近区故障开断能力

实现成功开断，要求断路器触头之间

变压器故障限制要求

这一特殊要求在一些位置上必须得到满足，针对出现一小部分（7% - 30%）额定短路电流以及恢复电压

（电流开断后终端中出现的电压）上升率极高的情形。为了承受如此苛刻的应力，断路器必须在电流中断后非常迅速地建立起较高的动态电压耐受能力。这意味着必须尽可能迅速地

研发人员对新材料和新生产技术进行了评估，目的是寻找成本能够与传统产品相媲美的产品。

的空间达到较高的气体压力，提供足够的冷却能力来熄灭电弧。这一压力积聚是故障快速排除能力的一个关键值。单气室灭弧室专为高短路开断能力设计，需要较高的吹弧压力。

地将灭弧触头之间的热气体转换为冷气体。

断路器出线端故障开断能力

这一能力的要求之一是保证操作在两周波开断时间内完成，即要求达到较短的分闸时间，因此其不对称要求要高于过去的断路器。在高不对称水平下进行开断会导致较高的压力聚积，必须通过操动机构以及排气和喷嘴系统对其进行处理。对于这一新断路器来说，这便意味着必须安全处理灭弧区以及排气系统中的大量能量消耗。

开关技术的决定因素

断路器目前有多种种类，每种断路器都各有所长：

- 压气式断路器
- 高级压气式断路器
- 压气辅助自能式断路器
- 纯自能式断路器
- 带线性双动系统的自能式断路器
- 带非线性双动系统的自能式断路器

ABB 在开发新断路器时结合了以上概念中的多项优点——这一新断路器已被定义为带非线性双移动系统的高



级压气式断路器，其优点包括：

- 触头速度快且可调节
- 移动质量小，因此反作用力也较小。
- 分闸速度快（使用标准的低能耗液压弹簧操动机构）。
- 空载压力聚积和最大压力聚积比率较低（从而使短路开断期间灭弧气体的温度较低）。
- 由于降低了某些部件的速度，移动部件所承受的机械应力较低。
- 由于能够限制所产生的最大压力，

这一解决方案的反作用力极小，是其它任何解决方案所无法企及的，从而大大降低了物理基础设施的成本。

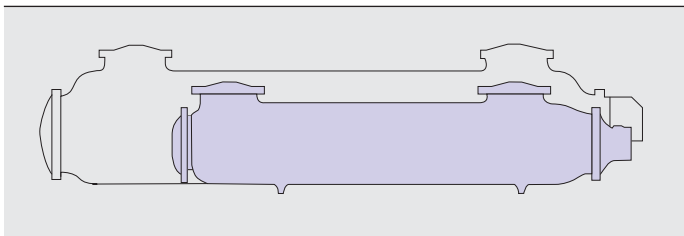
因此即使在更高的不对称性水平下，最大压力聚积也不会导致灭弧装置部件机械应力过大。

在开发过程中，研发人员主要依靠仿真软件来模拟电流分断期间的不同物理效应，如流量、压力聚积、电场 → 1-2。并采用有限元 (FEM) 工具来辅助机械分析。他们在测试对象上安装了各种测量传感器，用于获取数据，由此实现仿真工具的改进和交叉检查。除此之外，他们还进行了大量测试，以确定测试设备的极限。在开发新断路器的同时，研发人员还对新材料和先进生产技术进行了评估，目的是寻找成本能够与传统产品相媲美的产品 → 3。

项目成果

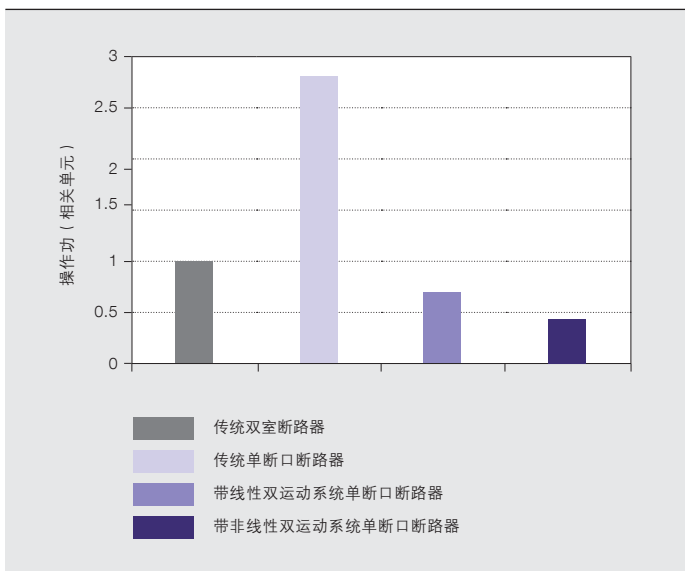
与前几代断路器相比，此次研发项目达到甚至超越了以下目标：

- 操作功降低 50%。

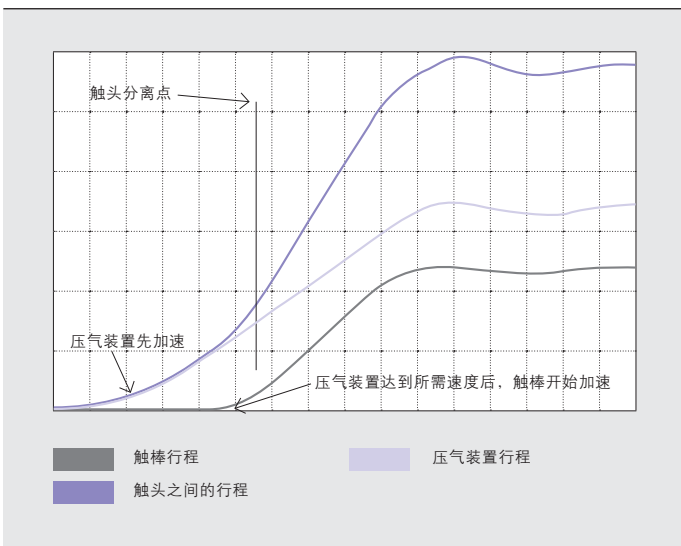


**操作功降低 50%、
隔间体积减小 50%
且六氟化硫用量减少 30%。**

6 所需操作功对比（相关单元）



7 开关方案（相关单位中的轴）。开关特性符合最新的 IEC 和 IEEE 标准。



在开发过程中，研发人员主要依靠仿真软件来模拟电流中断期间的不同物理效应，如流量、压力聚积、电场，并采用 FEM 工具来辅助机械分析。

- 六氟化硫用量减少 30% → 4。
- 气体绝缘开关装置 (GIS) 隔间体积减小 50% (301 ELK 3-2, 147 ELK 3-1) → 5。通过改造 GIS 部件还将进一步减小该隔间的体积。改进后，这一工作间将能够装入标准集装箱进行运输，在紧急情况下还可用作集装箱式变电站（曾在 2012 年汉诺威工业博览会上展示过）。

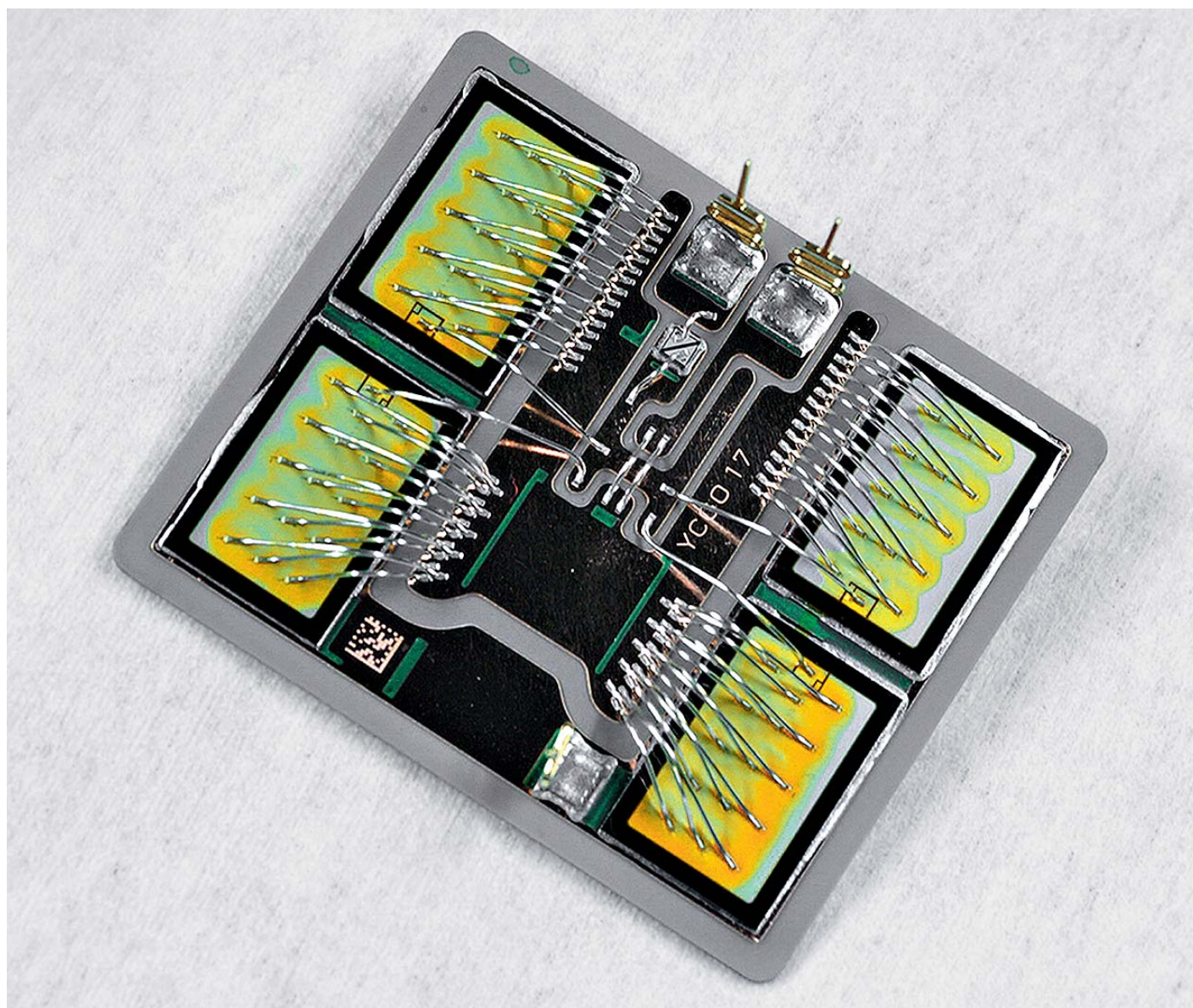
传统双压室解决方案的操作功是全新非线性双运动系统（单气室，采用单侧驱动，近五倍）的两倍 → 6。虽然

每个气室的移动质量几乎相同，但双动系统整体的移动质量会略高（触棒和杠杆）。

这一解决方案的反作用力极小，是其它任何解决方案所无法企及的，从而大大降低了物理基础设施的成本。另外，该解决方案还抑制了移动质量加速，减少了触棒运动，进一步降低了能量需求 → 7。

新断路器实现了此项目所设定的所有重要目标，可用于罐式断路器、插接式开关装置 (PASS) 应用以及 GIS。这一全新产品是现代化的断路器，达到最新的国际标准，拥有超强的竞争力。就纯粹的能力而言，特别值得一提的是，单气室所能开合的短路功率接近 23 GW，相当于约 15 个核电站的额定功率。

Helmut Heiermeier
Reto Karrer
 ABB 电力产品，高压产品
 瑞士巴登
 helmut.heiermeier@ch.abb.com
 reto.karrer@ch.abb.com



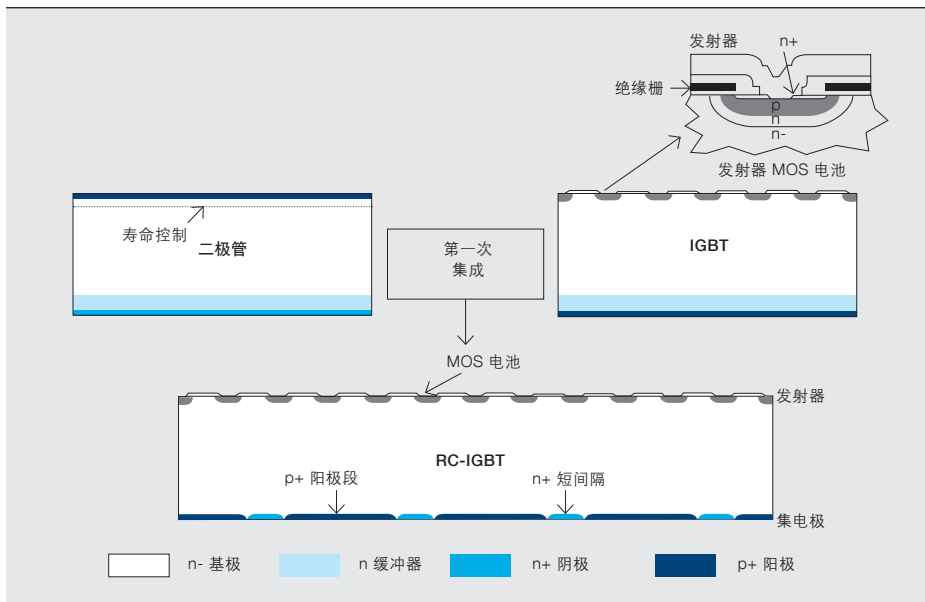
二合一芯片

双模绝缘栅晶体管 (BIGT)

MUNAF RAHIMO, LIUTAURAS STORASTA, CHIARA CORVASCE, ARNOST KOPTA

电压源型变流器 (VSC) 应用中所采用的功率半导体器件通常只导通单向电流。但是，带感性负载的 VSC 电路拓扑通常会采用单向导通的开关元件与反方向导通的（续流）二极管（反向或反并联）配对。将这两部分完全集成入单一器件、特别是单一的硅结构中，一直都是半导体制造业

的一个目标。这一集成将为实现更高功率密度、更紧凑的系统开辟道路，同时还将简化制造工艺。就 IGBT¹ 技术而言，将逆向导通开关集成到单一芯片中，通常仅限于低功率器件和特殊应用。ABB 的 BIGT（双模绝缘栅晶体管）技术已经取得了突破性进展，在开关器件中加入了一个续流二极管，并达到了先前更大尺寸封装器件才具有的工作特性。



由于整合开关器件与反并联二极管这一概念具有难以攻克的技术挑战，因此近年来这一技术仅被用于低功率组件（如 IGBT 和 MOSFET²）以及特殊应用。另外，IGCT³ 等大面积双极型器件已经采用了单片集成技术，但其中的 IGCT 和二极管需要完全分离的硅区。

过去几年，ABB 研发工作的核心目标是将大功率 IGBT 和二极管结构完全集成在单一芯片上。主要面向的应用领域是主流的硬开关逆变器⁴。新型功率半导体器件概念被称为双模绝缘栅晶体管 (BIGT)。第一个原型器件的额定电压高于 3,300 V，表现出比传统芯片更高的功率密度以及更出色的整体性能。BIGT 采用了最新的 IGBT 设计理念，同时这一结构中完全集成了一个经过优化的反并联二极管。除了功耗和尺寸的影响外，BIGT 技术使器件在两种操作模式下

提供了更好的关断软度，高温工作能力，在 IGBT 短路电流和二极管的浪涌电流⁵下具有更出色的故障状态性能，并改进了器件并联运行时的均流效果。另外，该器件在 IGBT 模式和二极管模式中利用同一硅片体积，消除了器件不工作的状态，由此提高了热利用率和可靠性。

为了实现 IGBT 与二极管的功能集成，BIGT 同时采用了多项现有技术和新技术。

BIGT 单芯片技术的真正实现将为未来的高电压应用、要求严苛且功率水平更高的紧凑型系统提供一项潜在的解决方案，尤其是那些二极管电流要求较高，并且确实超出标准双芯片方案能力的系统。

集成之挑战

在采用 IGBT 模块的现代应用中，二极管在损耗、性能和浪涌电流承受能力方面受到限制。这是由于二极管的可用面积有限造成的：IGBT 与二极

管的典型面积比为 2:1。这些限制基本上都是在现代低损耗 IGBT 设计面世后确立的。增加二极管面积并不是一项首选的解决方案，并且始终受封装设计空间的限制。因此，增加 IGBT 和二极管元件功率密度这一任务的重点转向了集成 IGBT 和二极管的解决方案，也就是我们通常所说的

逆向导通 IGBT (RC-IGBT)。

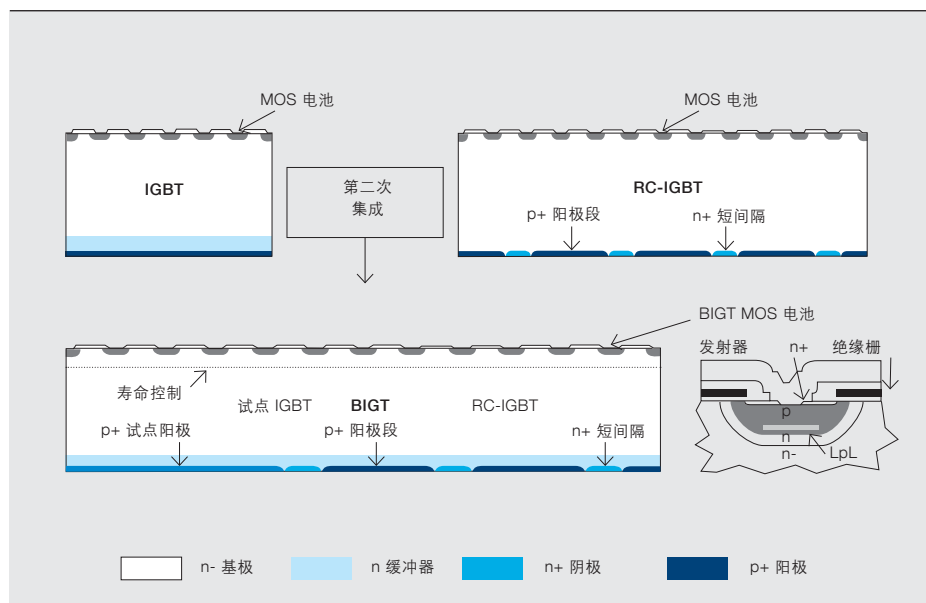
直到最近，RC-IGBT 的使用一直被限制在 1,200 V 电压等级以下用于二极管要求较低的专用软开关

应用。按照惯例来说，实现用于高电压和主流硬开关应用的器件经常受制于设计问题和工艺问题，这些问题导致一些性能缺陷和折衷问题，概括如下：

- IGBT 通态 I-V 特性中的夹断转折⁶现象——MOSFET 短路效应
- IGBT 通态与二极管反向恢复损耗的折衷——等离子体分布效应
- IGBT 与二极管软度的折衷——硅片设计效果

标题图片

ABB 全新 BIGT 将逆向导通二极管的功能集成到半导体开关结构中。



— 安全工作区 (SOA) ——电荷均匀性的影响

在过去几年中，ABB 在解决上述问题的研发工作中得出一种先进的 RC-IGBT 设计理念—— BIGT。

BIGT 概念

BIGT 概念基于两个集成步骤。第一个集成步骤如图 [n → 1](#)。IGBT 与二极管共用一个单一结构。在集电极侧，IGBT p+ 阳极层中引入了交替的 n+ 掺杂区作为阴极触点，用于内部二极管工作模式。IGBT 阳极 (p+ 区) 与二极管阴极 (n+ 区) 的面积比决定了集电极区域中 IGBT 模式和二极管模式各自可用的集电极面积。在二极管导通过程中，p+ 区处于无源状态，不直接影响二极管的导通性能。但另一方面，作为 IGBT 工作模式下的阳极短路点，n+ 区对 IGBT 导通模式有着严重影响。

如前文所述，电压的夹断转折是阳极短路的结果之一。这被视为 IGBT 模式 I-V 特性中的负阻区。当器件采用并联连接时，尤其在低温条件下，这一效应将产生负面影响。为了解决这一问题第二个集成步骤便应运而生。

经实验证明，初始转折可通过在器件中引入较宽的 p+ 区得以控制甚至消除，这一结构也被称为引导 IGBT。BIGT 概念便是从这一设计方法中延伸而来。从原理上来说，BIGT 是一种混合型的结构，在单一芯片中加入了一个 RC-IGBT 和一个标准 IGBT → 2。

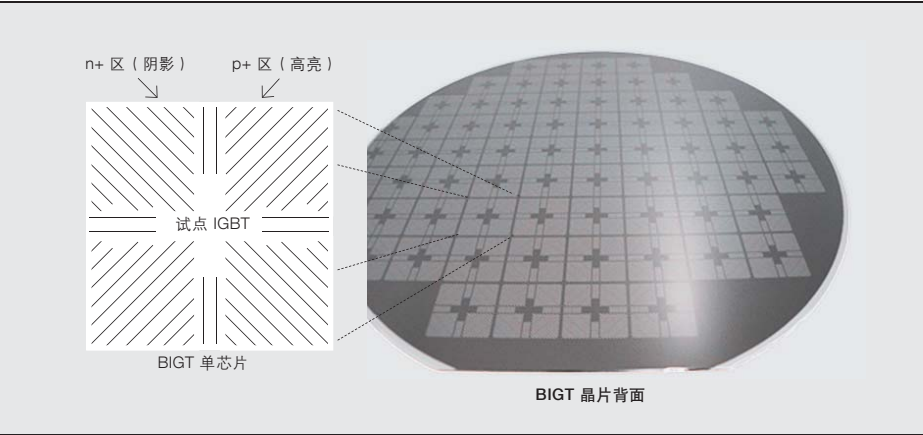
引导区位于芯片的中央是为了获得更好的热分布，并降低电流的不均匀性。此外，在确保获得较大的 RC-IGBT 区的前提下，引导区在芯片中被设计得尽可能大。p+ 区和 n+ 区以采用径向布局优化过的带状结构呈交替状分布，以确保 IGBT 导通时从引导区到芯片其余位置的快速平稳过渡 → 3。

为了实现 IGBT 与二极管的功能集成，BIGT 同时采用了多项现有技术和新技术。首先值得一提的是，ABB 已经投入使用的技术平台是实现这一集成的主要推动因素，如高压软穿通 (SPT) 缓冲层和增强型平面栅元胞概念⁷。除了众所周知的鲁棒性和低损耗特性，SPT 最佳掺杂分布有助于显著减少夹断转折现象，同时，小型化增强型平面条形元胞在降低二极管的

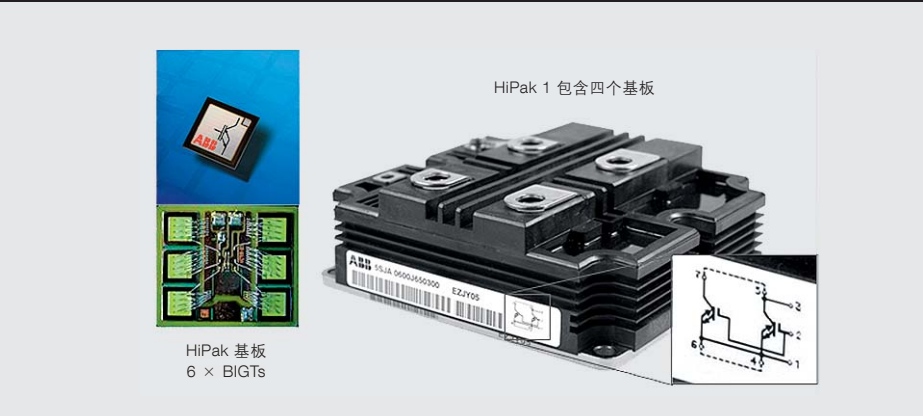
过去几年，ABB 研发工作的核心目标是将大功率 IGBT 和二极管结构完全集成在单一芯片上。

脚注

- 1 IGBT (绝缘栅双极型晶体管) 是一种电压控制型半导体开关，广泛用于电力电子领域。
- 2 MOSFET (金属氧化物半导体场效应晶体管) 是一种可以用于开关和放大应用的半导体器件。MOSFET 开关应用的功率通常低于 IGBT。
- 3 IGCT (集成门极换流晶闸管) 是一种经过优化的 GTO (门极可关断晶闸管)，这一器件中集成了一个栅极驱动，适用于硬开关。欲了解不同半导体技术的更多背景信息，请参阅本期《ABB 评论》第 64-72 页“从汞弧到混合断路器的演进之旅”。
- 4 硬开关是电流的导通 / 关断，开关过程中涉及高 dv/dt 和 di/dt 。
- 5 浪涌电流承受能力指一个器件承受突然出现的短路电流峰值 (远远超过器件本身额定电流范围) 而不损坏的能力。
- 6 夹断转折现象指 IGBT 的通态电压在导通状态下出现短暂峰值，如图 9 所示。
- 7 参见《ABB 评论》2008 年第 3 期第 19-24 页“向更高性能迈进”。



4 6.5 kV/600A BIGT HiPak 1 模块



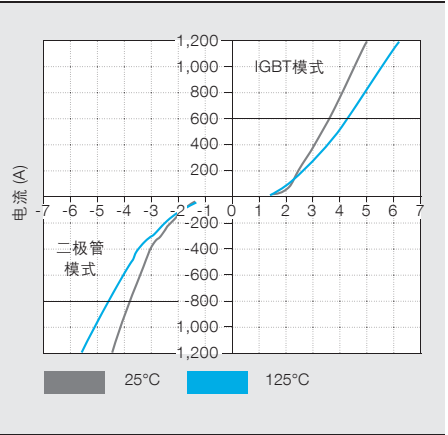
BIGT 技术初步计划用于高压器件，目前已经通过了额定电压为 3.3 kV 到 6.5 kV 的模块级验证。

导通损耗和开关损耗中发挥了重要作用，避免对 IGBT 性能产生负面影响。除了标准的轴向寿命控制外，研发人员还设计了精确的局部 p 阱寿命 (LPL) 控制工艺（如图 → 2 所示）以优化 IGBT 通态与二极管逆向恢复损耗之间的折衷性。最后，由于具有阳极短路点设计，BIGT 展现了一系列特性，这些特性使其在两种工作模式下均表现出器件性能优势，如极端条件下的软开关特性以及在更高最大结温下运行时的极低漏电流。

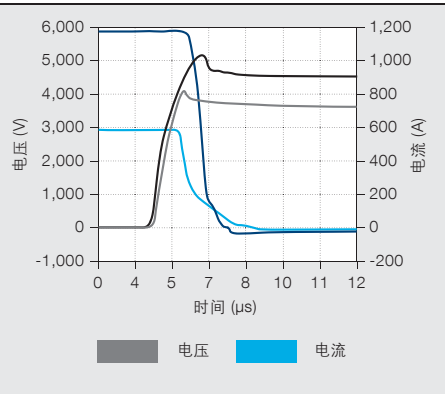
BIGT 性能

BIGT 技术初步计划用于高压器件，目前已经通过了额定电压为 3.3 kV 到 6.5 kV 模块级验证。这些模块级验证采用了近期研发的 6.5 kV 标准型 HiPak 1 模块 (140 × 130)，额定电流为 600 A → 4。

传统的 IGBT / 二极管基板通常只能



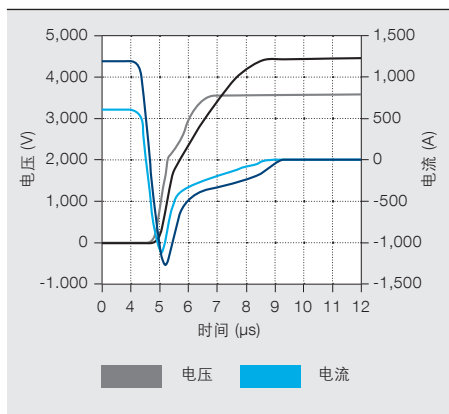
6 6.5 kV/600 A BIGT HiPak 1 模块在 IGBT 二极管模式下的关断波形



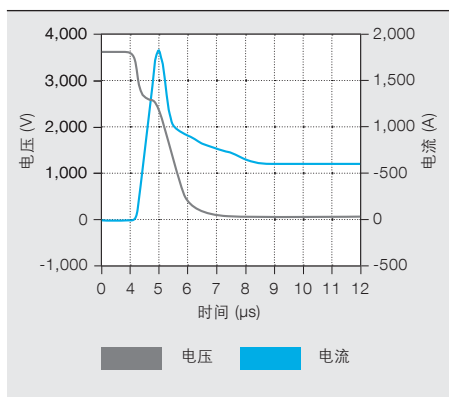
安装四个 IGBT 和两个二极管，而新的基板现在能够布置六个 BIGT 芯片，每个芯片都能够完全地运行于 IGBT 模式或二极管模式。HiPak 1 模块包含四个 BIGT 基板，共有 24 个 BIGT 芯片，能够真正取代通常包含六个基板，总共有 24 个 IGBT 和 12 个二极管的大型 HiPak 2 IGBT 模块 (140 × 190)，这明确显示了 BIGT 的优势。较大的标准 IGBT 模块还有另一缺点，那就是二极管面积较小。二极管面积通常是整流器工作模式以及浪涌电流承受能力的一个限制因素。另一方面，较大的 HiPak 2 BIGT 模块总共可以纳入 36 个 BIGT 芯片，额定电流更是可高达 900 A。

BIGT HiPak 1 模块分别在静态条件和动态条件下进行了测试，这些测试与现有工艺 IGBT 模块的测试相类似。BIGT 在 IGBT 模式和二极管模式下的通态特性如图 → 5 所示。当

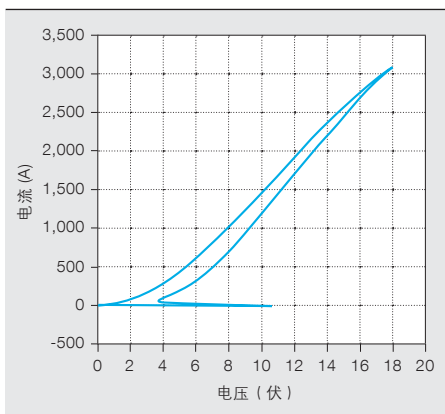
7 6.5 kV/600 A BIGT HiPak 1 模块二极管模式下的反向恢复波形



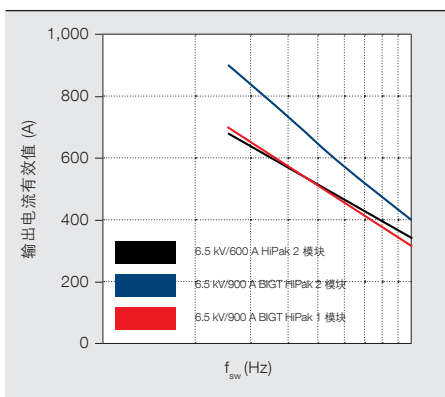
8 6.5 kV/600 A BIGT HiPak 1 模块 IGBT 二极管模式下的导通波形



9 6.5 kV BIGT 基板在二极管模式下的浪涌电流承受能力



10 106.5 kV HiPak 1 模块和 HiPak 2 模块在逆变器模式下的输出电流能力



企及的，而 BIGT HiPak 2 的性能则更胜一筹。最后，研发人员在 BIGT 模块及芯片上成功地进行了标准可靠性验证试验和频率试验。

基于这些试验结果，BIGT 器件有望在软硬开关条件下均超越现有的一流 IGBT 和二极管，同时达到当前功率器件严格的鲁棒性标准。图 → 10 显示了 6.5 kV BIGT HiPak1 模块和 HiPak 2 模块在逆变器模式下的模拟输出电流性能与当前 HiPak 2 IGBT 模块的对比（125 °C）。由于 BIGT 模块中可用的二极管面积较大，因此 BIGT 整流模式输出电流仿真将提供更高的电流承载能力。BIGT 技术将打破二极管的性能局限，为未来几代的系统设计奠定坚实的基础，为其提供更高的功率密度和出色的整体性能。

额定电流为 600 A 时，两种工作模式下，温度为 125 °C 时，通态压降均约 4.2 V。另外，在两种工作模式下，即使电流极低，曲线仍表现出较强的正温度系数，这支持芯片的安全

300 nH。图 → 6-7，分别给出了标称条件和 SOA 条件下模块级 IGBT 和二极管的关断波形。BIGT 关断波形所显示的性能始终比 IGBT / 二极管模块更平滑。在任何条件下，BIGT 都未表现

出振荡或夹断的特性。图 → 8 还显示了 BIGT 在标称条件下的导通行为。测试模块的 IGBT 和二极管总开关损耗在 10 焦耳范围

内，这一结果近似于电流标准为 6.5 kV/600 A 的 HiPak 2 IGBT 模块。

HiPak 2 BIGT 模块总共可以纳入 36 个 BIGT 芯片，额定电流高达 900 A。

并联。这是因为 BIGT 结构中采用了最优发射极注入效率和寿命控制。

在额定条件下进行动态测量时，直流母线电压设为 3,600 V，而在进行 SOA 特性表征时，此电压要增加至 4,500 V。所有测量均在 125 °C 的温度下进行，固定栅极电阻为 2.2 Ω，栅极发射极容量为 220 nF 且杂散电感为

图 → 9 显示了一块基板（额定电流 150 A）的 BIGT 二极管模式浪涌电流承受能力的最后通过测量结果，电流高达 3,000 A。从图中我们能够清楚地看到，BIGT HiPak 1 所提供的浪涌性能是同等 HiPak 2 IGBT / 二极管所无法

Munaf Rahimo
Liutauras Storasta
Chiara Corvasce
Arnost Kopta

ABB 半导体
瑞士伦茨堡
munaf.rahimo@ch.abb.com
liutauras.storasta@ch.abb.com
chiara.corvasce@ch.abb.com
arnost.kopta@ch.abb.com



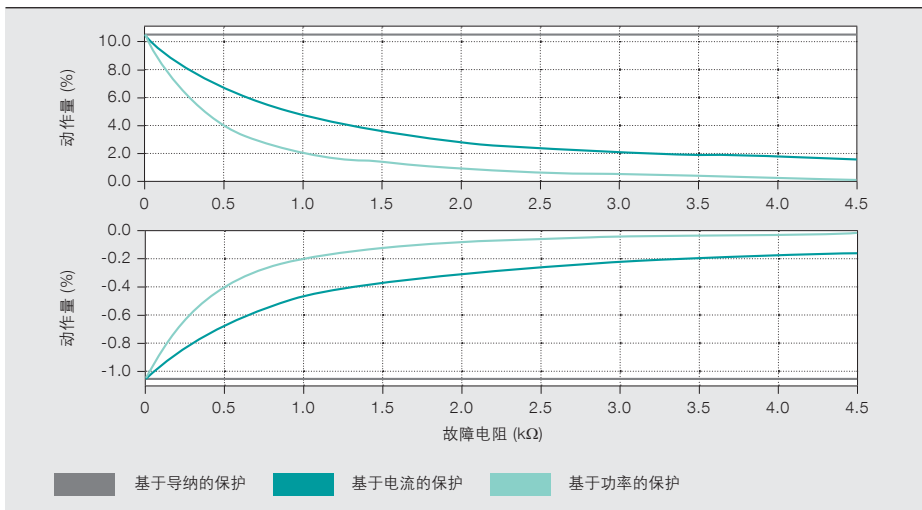
导纳原理——使故障保护更简单

补偿型网络的终极接地故障保护功能

ARI WAHLROOS, JANNE ALTONEN, PRZEMYSŁAW BALCEREK, MAREK FULCZYK

通过把电力系统的中性点经补偿线圈接地可以形成带补偿的网络。补偿线圈的补偿作用可以在发生接地故障时，将由系统产生的容性电流降低到接近于零，同时使故障减轻，以至于自行消除，从而避免了跳开断路器而导致用户停电的。正因为如此，越来越多的中压电网都在转为通过补偿线圈接地。然而，对于传统的接地保护原理来说，补

偿网络中很小的故障电流是一项极大的挑战。20 世纪 80 年代初，一种基于中性点导纳测量的接地保护替代方案在波兰诞生。与传统方法相比，这一新原理既简单却又实用，除了拥有众多优点外，还适用于所有类型的非接地网络和补偿型网络，甚至连分布式补偿的馈线也不例外。现在，中性点导纳接地故障保护功能已经在 ABB 的 RELION® 产品 REF615，REF620 和 REF630 中得以应用。



20世纪初，Waldemar Petersen 发现，通过将主变压器中性点通过电感接地，可以使得发生接地故障时由电网所产生的容性故障电流降低到接近于零，从而避免故障电流在故障点产生难以熄灭的电弧。现在，人们将这些电感元件称为彼得森线圈、补偿线圈或消弧线圈。

大部分停电事故都是由暂时性接地故障引起的。使用补偿线圈可以大大降低停电次数，从而提高电网的可靠性和供电质量。因为补偿线圈可以有效降低故障电流，只要发生持续的接地故障时产生的过电压符合相关法律法规的规定，电网就可以继续运行。

出于上述原因，补偿线圈近来在世界各地的中压 (MV) 配电系统中得到了广泛应用。

补偿线圈给继电保护带来的挑战

虽然中性点补偿可以为电网运行带来好处，但由于彼得森线圈的补偿功能

使故障电流变得极低，电网的接地保护不得不随之复杂化。一般来说，补偿性网络的故障电流会远小于正常的负荷电流，根本不足以启动传统过流保护。

传统上，带补偿网络中接地保护一直基

临时接地故障是大部分停电故障的根源所在。使用补偿线圈可以大大降低停电频率，从而提高电网的可靠性和供电质量。

于剩余电流的有功分量（例如 $I_0 \cos \phi$ 原理）或剩余功率（Wattmetric 原理）。20 世纪 80 年代初，一种基于中性点导纳-原理的替代方案在波兰诞生，现在已成为当地公共电网一项基本功能要求。

中性点导纳保护 - 概念

与其他传统接地保护功能一样，中性点导纳保护也是基于剩余电流 (I_0) 和剩余电压 (U_0) 的基波分量。但是，该保护原理不使用剩余电流或剩余功率 ($S_0 = U_0 \cdot I_0$) 作为动作量，而是基于中性点导纳的测量值 Y_0 ，其定义为剩余电流和剩余电压相量之商：

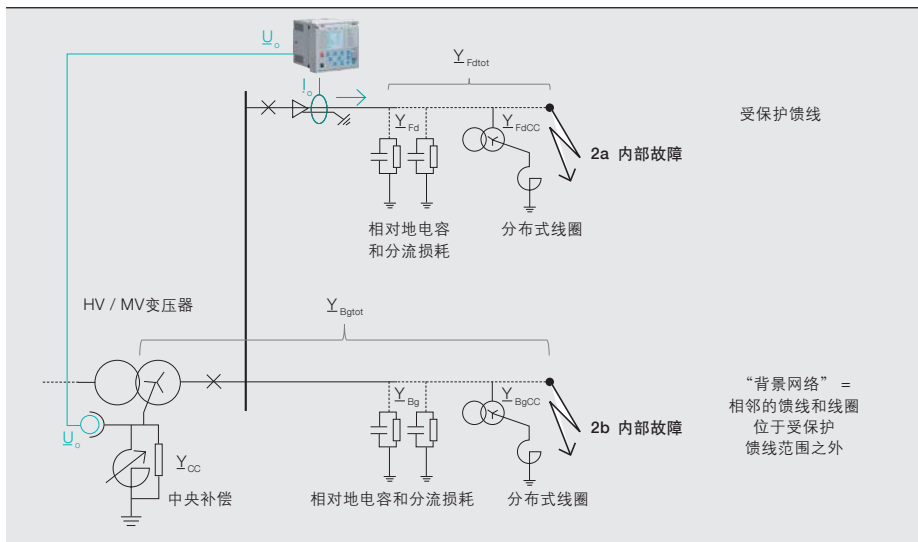
$$Y_0 = \frac{I_0}{U_0} = G + j \cdot B,$$

在以上公式中， G 为电导， B 为电纳。导纳测量值与已知的系统参数直接相关，即电网的分流电阻、电容和电感。中性点导纳的电阻部分——电导 G 与系统的分流电阻和损耗相对应，而虚数部分——电纳 B 则与系统的并联电容和并联电感相对应。上述数值是电网接地保护分析的基础，通常存储在配电管理系统 (DMSs) 中。

监测 I_0 和 U_0 比率（即中性点导纳）的主要优点在于，在理想的情况下，当 I_0 和 U_0 随着故障电阻的增加同时

标题图片

补偿网络能够提高供电的可靠性，但同时也加大了实施接地故障保护的难度。20 世纪 80 年代在波兰诞生的新方法是如何打破这一窘局的呢？



下降时，这一比率保持不变 [1]。这一点与传统的接地保护相反。传统保护的動作兩基於剩餘電流或剩餘功率，會隨故障電阻的增加而大幅減小。中性點導納的這一特點可提高接地故障保護的靈敏度，有利於區分故障狀態與非故障狀態，特別是在故障電阻值較高的情況下 → 1。

總電容和受保護饋線中分布式補償線圈的電感相加的和成正比 → 2。

如果受保護饋線內部發生故障，保護必須動作時，導納測量值等於反方向網絡的中性點導納總值 $Y_{Bg\text{tot}}$ 。這一導納值為變電站所有其他饋線各相導線的總導納 Y_{Bg} 與變電站中受保護饋

線以外的補償線圈導納 Y_{CC} 或相鄰饋線中的導納 Y_{BgCC} 相加的總和。導納實測值的實數部分始終為正數，但是虛數部分（即電納）的正負值取決於補償線圈的調節。通常情況

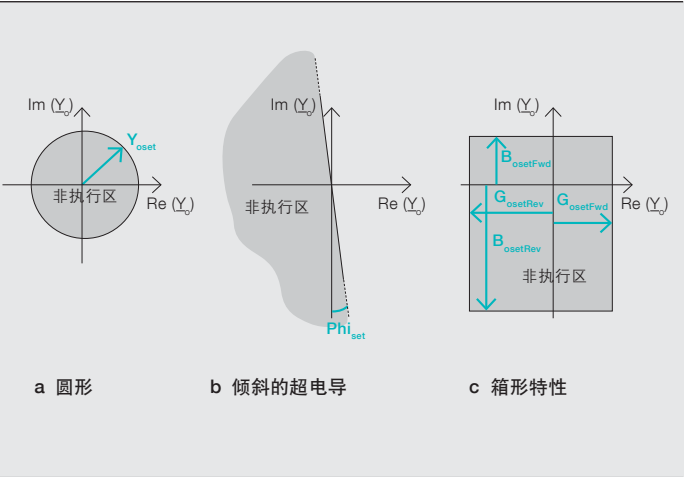
监测 I_o 和 U_o 比率（即导纳）的主要优点是，在理想的情况下，其结果不会受故障点故障电阻的影响。

导纳保护理论概述

如果在受保護饋線之外發生故障，那麼導納測量值等於受保護饋線總中性點導納的負數 $-Y_{Fdtot}$ 。這一導納值是受保護饋線各相導線的總導納 Y_{Fd} 與受保護饋線中補償線圈的導納值 Y_{FdCC} （如果有的話）的總和。導納測量值的電阻部分等於饋線的分流電阻損耗以及受保護饋線中分布式線圈的損耗。虛數部分與饋線的各相對地

下，導納保護的定值整定會考慮補償線圈中並聯電阻引起的電阻性電流分量。在導納測量中，電阻性電流的增加將直接計入導納的實數部分，即電導。

導納保護的基本原理在於根據測量導納來判斷故障是發生在區內還是區外。當發生區內故障時，保護動作，跳開斷路



阴影区域为非执行区，即当计算所得的导纳值超出界线时执行保护。

器，而当故障发生在区外时，保护不动作。导纳保护的動作范围是通过動作区边界来定义的，其边界线可以是圆形或由一条或多条线组成，线外为動作区，即当计算所得的导纳超出边界时，保护就会動作 → 3。

中性点导纳原理十分灵活，适用于所有类型的高阻抗接地、不接地和经补偿线圈接地的网络，包括带有分布式补偿的馈线。随着易受天气影响的架空电缆为地下电缆所取代，该类新型保护装置将逐渐得以普及。地下电缆会导致馈线所产生的接地故障电流增加，通常需要通

导纳原理适用于所有类型的高阻抗接地网络，甚至包括带有分布式补偿的馈线。

过分布式线圈进行就地补偿。分布式线圈的使用对于传统的接地故障保护方案来说可能存在一定难度，因为其保护特

性容易实现自适应，例如当馈线配置发生明显改变时。

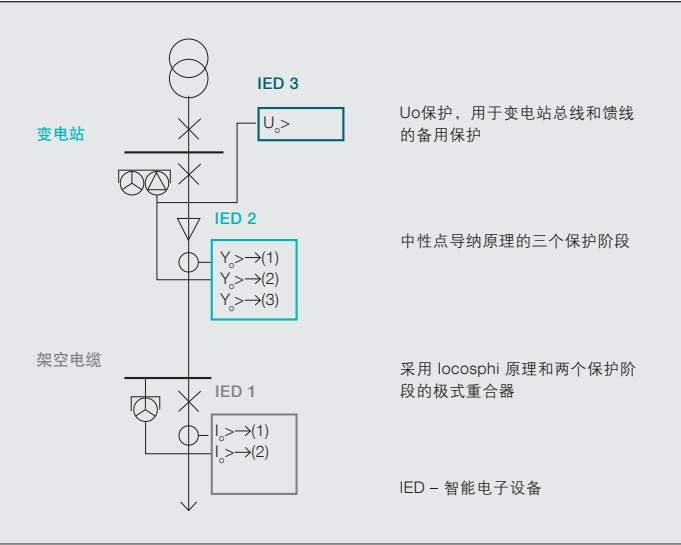
导纳保护的灵活性还在发生间歇性电弧接地故障时提供增强保护，因为该保护有较大的裕度，不易发生误动 [2]。

完全兼容传统的接地保护

与传统的接地保护相同，中性点导纳原理用零序过压作为总启动判据，该启动电压确定了基本的保护灵敏度。因此，当变电站的一个配电区可以采用多种保护原理时，中性点导纳原理可与传统保护原理配合使用 → 4。

导纳原理的进一步发展

传统接地保护基于剩余电流和剩余电压的相量，这些数值须在检测到接地故障之时立即计算得出。在主要由架空线构成的网络中，在线路无故障时，未经过换位处理的相导线可能产生幅值较大的剩余电压。网络的这种不对称性会对动作量产生影响，因此导致计算结果依赖于故障相。这种依赖性随故障电阻的增加而增加，并且可能对接地故障保护的灵敏度产生负面影响。中性点导纳原理可以避免测量结果受到网络不对称性的影响，这



中性点导纳原理可以避免测量结果受到网络不对称性的影响。

从保护角度来看，谐波所带来的问题完全可以转变为一项优势。

一作用通过使用所谓的增量算法来实现：先用故障中测得的数值减去故障前的剩余电流和剩余电压相量值，然后由此计算出中性点导纳。这种增量计算的具体算法通过当前的智能电子设备 (IEDs) 可以轻松实现 [1]。

将问题转变为机遇

随着各种非线性元件数量的增加，中压输电网中的高次谐波分量越来越多。因此，在发生单相接地故障时，故障电流中的谐波也大幅增加。

由于补偿线圈仅对接地故障容性电流的基波分量进行补偿，因此其他谐波分量保持不变。在传统理论中，这些谐波分量一直被视为干扰，需要对其进行过滤。基于中性点导纳的接地故障保护则与此不同，该保护能够充分利用这些谐波来更好地区分故障状态与非故障状态 [3]。当前的 IED 可以轻松地计算出谐波导纳，并将其加入相量形式的基频导纳中，从而使故障状态与非故障状态之间的差别更为明显。

多年积极实践累积丰富经验

自诞生以来，中性点导纳接地故障保护法已经从波兰传播到了欧洲其他国家。这种方法既可用于标准的方向接地保护，也可以用于高阻抗性和间歇性的接地故障检测。ABB 就这一课题与芬兰电力公用事业部门进行的合作于近期取得了一定进展。大量现场试验表明，导纳保护的灵敏度确实高于传统的接地保护。通过设定合适的定值以及精确的测量，该保护可以检测到故障电阻高达 10 k Ω 的接地故障 [2]。

与传统方法相比，中性点导纳保护提供了多项抓人眼球的功能，包括提高了对连续性接地故障和带间歇性电弧的接地故障的灵敏度和安全性。此

外，该方法还具有普遍适用性，可以用于带有分布式补偿的网络，因此是未来智能电网应用的一个安全选择。最后，操作人员可以根据系统基本参数轻松地进行定值设定，确保了对系统特性的优化简单有效。

Ari Wahlroos

Janne Altonen

Marek Fulczyk

ABB 集团中压产品部

芬兰瓦萨

ari.wahlroos@fi.abb.com

janne.altonen@fi.abb.com

marek.fulczyk@fi.abb.com

Przemyslaw Balcerek

ABB 研究院

波兰克拉科夫

przemyslaw.balcerek@pl.abb.com

参考文献

- [1] A. Wahlroos and J. Altonen, "Performance of novel neutral admittance criterion in MV-feeder earth-fault protection," CIRED, Prague, 2009.
- [2] A. Wahlroos, J. Altonen, "Practical application and performance of novel admittance-based earth-fault protection in compensated MV-networks," CIRED, Frankfurt, 2011.
- [3] A. Wahlroos, J. Altonen, "Compensated networks and admittance-based earth-fault protection," in seminar Methods and Techniques for Earth Fault Detection, Indication and Location, Espoo, Finland, 2011.



干净的接触

用于供电回路通断和马达控制的接触器技术。

GUNNAR JOHANSSON

集成电子技术的接触器和电子技术本身一样拥有悠久的历史——有着一百多年低压设备生产历史的 ABB 是这一事实的见证者。现在，创新思维和新的技术为接触器注入了新的活力，解决了电能切换过程中很多多年难以解决的问题，这就是 ABB 新一代 AF 系列接触器。ABB 新的接触器利用内置的软件、电子电路板和特殊设计的电磁铁部分可以快速的在动静触头之间建立高的吸合力。



ABB 在全新接触器中结合了专用软件和电子电路与专门设计的磁铁，使其能够快速产生较大的接触力。

接触器是一种工作原理非常类似继电器的电控通断转换设备，但是对于大电流，接触器不像另外一种通断设备-断路器，可以分断短路电流，尽管接触器有更长的操作寿命。通常，接触器用来启动和停止各种电气设备。最常用的是三极接触器，用于在三相电力系统中接通和断开电路。

接触器的触头系统安装在接触器内部用来连接主回路电路，触点部分周围是装有多种能提高分断性能的灭弧室，动触头的操作是通过触桥的动作来完成的，触桥上的弹簧为触头提供固定所需要的压力，而接触器的动作是通过线圈通电、电磁铁产生电磁吸合力来完成的 → 1。

标题图片

自从电气技术被引入工业生产开始，接触器就一直在扮演一个至关重要的角色，不断涌现的新技术已经克服了许多缺陷，使得新一代接触器产品即将投放市场。

简单产品概念

ABB的大电流接触器显著区别于竞争对手类似产品的地方在于我们的主回路部分位于接触器的底部，这种结构设计的产品投放市场十年之久，其优异性能已经在实践中得以证明。这种结构设计更有利于接触器和其他开关断路器设备连接，使那些粗的主回路电缆或厚的铜排不用折弯就可以很方便地连接 → 2。

后置式电路有助于和其他开关装置的组合，并且还能防止主电路电缆发生屏蔽。

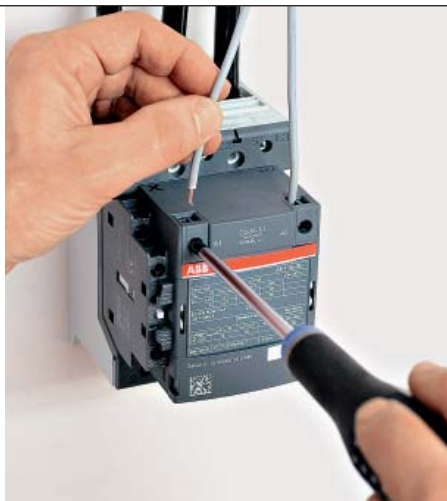
电子器件的成本大幅降低，使这些应用电子技术的接触器和普通的接触器在价格上有一定的可比性，此外，内置电子电路版可以方便的安装进接触器内，因此装配成本也比较低廉。

更少的原材料使用

当接触器接通或分断大的电流时，会产生电弧，这些电弧会对触头材料有一定的烧蚀，烧蚀的程度决定着接触器的使用寿命。触头主要成分一般为高品质的银合金，银的价格昂贵，因此通过增大触头来延长接触器寿命这种做法是不可行的，为此，ABB 做了



2a 采用前置式主电路的老式接触器



2b 采用后置式主电路的新式接触器

这些电控接触器在价格上能够与传统接触器相抗衡。

大量研究工作寻找其他途径来提高触点使用寿命。

目前已有的方式包括以下几种：

- 通过采用电子控制电路来改善接触器的通断动作。
- 采用软件的解决方案减少触头磨损。
- 设计新的电磁系统来增大触点接触力。
- 引进新的灭弧装置以便更好的灭弧。
- 调整触头材料的成分和加工工艺实现更好的耐用性。

触头闭合

当接触器吸合，在触头达到完全闭合位置前，触头有时会产生一个较小且短暂的弹跳，这种触头弹跳会对触头形成微小的电弧烧蚀。由于此电流较小，触头弹跳带来的问题不是太严重，危害性远小于触头接触不紧密。

触头接触不紧密往往发生在弹跳之后，当触头通过大电流时 → 3，触头通常应该是在正确的良好接通的位置，但由于种种因素，比如很高的变换电流往往会导致动静触头分离，从而产生电弧，对触头有较大的烧蚀。→ 4。此外，电磁铁吸合所产生的震动会与分离力产生互动，导致触头接触不紧密。因此，必须保证触头紧紧固

定在闭合位置，以抵抗可能产生的分离力。为达到这一目的，ABB 在全新系列接触器中，结合了专用软件、电子电路以及特殊设计的电磁铁技术，使其能够快速产生较大的吸合力。另外，电子电路还可以让接触器的动作有规则和可控，以便最大程度的降低通断过程中的震动，避免触头接触不紧密，并且使接通时的烧蚀最小化。

触头分断

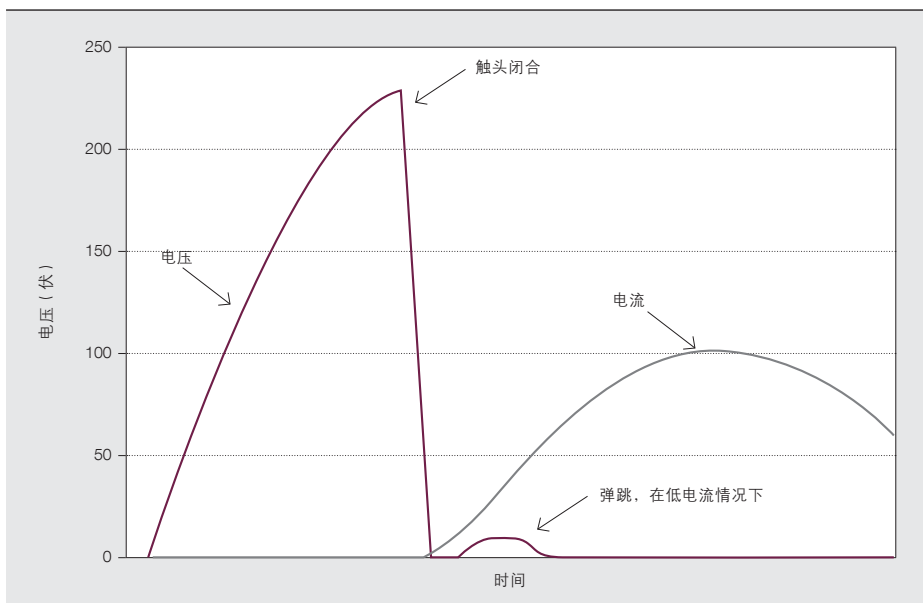
当分断大电流时（超过100A），为了降低电弧对触头的烧蚀，必须快速的熄灭银触头上的电弧，而且还应该使电弧对各相触头的烧蚀尽量均匀。

为了解决触头灭弧问题，常规的技术已经被应用，在触头周围设置钢制灭弧栅片，由其将电弧尽快吸收。现在的设计方案，都会采用仿真工具进行精确的计算，已达到灭弧效果最优化，研究人员对一些旧的理论提出质疑同时也充分发掘了其他理论的潜能。

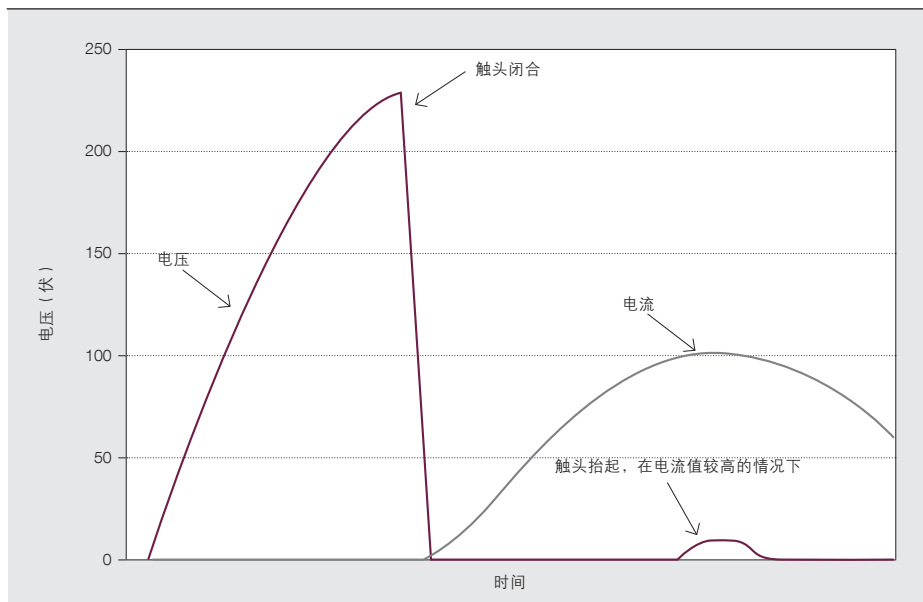
然而，接触器控制电路与线圈和电磁铁在一起，会导致接触器各相之间负载不平衡，其原因是控制电路电源通常取自于主回路，并且某一时刻的同步会发生在切换的瞬间和相电压之间，因此各触头无法获得均匀分布的

在银和氧化锡的混合物中加入掺杂剂可以得到一种良好的接触器材料。

3 触头弹跳与触头抬起



3a 触头弹跳通常发生在电流值较低的情况下，不会产生负面影响。



3b 触头抬起发生在电流较高的情况下，可能导致严重的触头侵蚀。

负载，其中最常用的相，触头磨损的最快，从而决定了整个接触器的使用寿命。在各相之间均匀的分布负载和触点磨损对延长产品使用寿命是有益的。ABB 通过内置的软件和电子技术消除这种同步是正确的选择，大大的延长了产品使用寿命，该方法已经被提交申请专利。

触头材质

接触器触头材质和加工工艺方法决定着今后使用时的耐腐蚀性能，之前的应用中发现，银钨合金有较好的性能，但钨已被禁止使用，纯银触头在

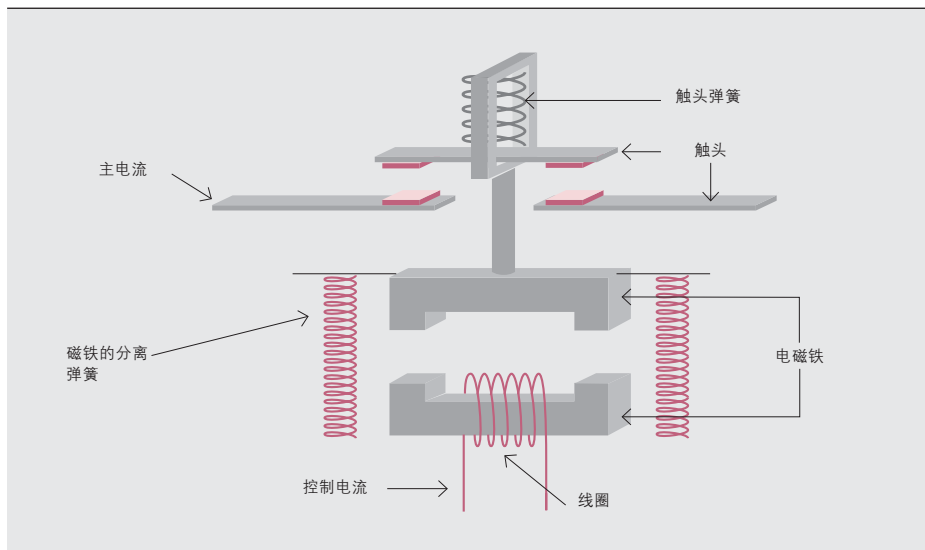
使用过程中如果不发生熔焊导致快速损坏的话，应该是性能很好的材质。银和氧化锡，添加一些其他成分后可以成为性能很好的触头材质，因为这种材质非常关键，ABB 在其生产过程中使用了定量精准的混合物以及最先进的制造工艺。

可靠性是关键

对使用者来说最重要的是接触器的可靠性，为了开发满足最高可靠性要求的接触器产品，ABB 开展了大量细致的设计工作和广泛的试验，其中，控制回路的性能质量是其中的关键。



电子电路提供了运动测量和控制，最大限度减少了振动。



控制电路

接触器的动作，是由控制电路、动静电磁铁、反力弹簧组成的电磁系统协调配合完成通断动作，流经线圈的电流产生磁场，使动静电磁铁之间产生电磁吸力，这个吸合力会克服弹簧反

这一简单成熟且可靠的解决方案，来接通、导通和分断大电流。

但是，这种方式也确实存在其自身的不足之处：

— 控制回路对电压变化敏感。控制回

路电压的变化会导致线圈中电流发生变化，最终导致触点的吸合力产生变化，有时会使触点突然打开或闭合，引起设备故障。

— 通常，大多数用户会使用交

流控制电压，例如 230VAC50HZ，此时必须有一个体积大而且复杂的电磁铁以保持交流电在过零点时的吸合力。

— 控制回路电路大、功耗高，尤其是当采用交流供电时。

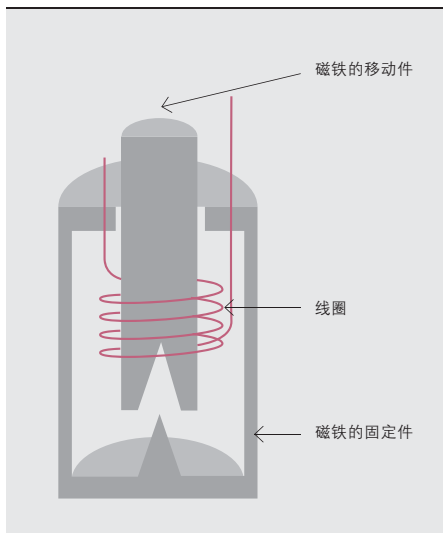
— 动静电磁铁吸合表面必须平整，对

ABB 的全新 AF 接触器采用一
由微处理器控制的专利电路，
无论是否存在电压波动都能确
保线圈电流始终是正确的。

力，是动静电磁铁吸合，同时通过和磁铁同时动作的触桥，使动静触点闭合。当线圈断电时，电磁铁之间的磁力消失，在反力弹簧的作用下，动静触头打开，实现主回路的分断 → 5。这一基本原理使用了一百多年，目前还没有人提出更有竞争力的替代方案，ABB 和其主要竞争对手都是利用

ABB 的软件和电子器件能够在各相之间均匀分配负载，并可均衡触头上的侵蚀程度。

6 圆柱形磁铁部分



平整度公差要求极高。在重载应用中，尺寸可能会发生变化，导致吸合力降低。

不过，现代技术和创新设计已经开始解决这些问题。

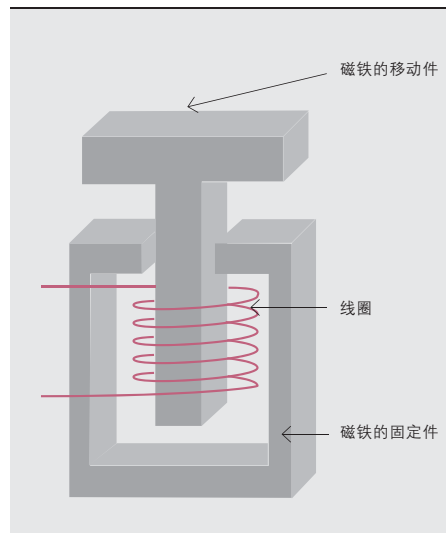
控制电路的新技术

ABB 全新 AF 系列接触器使用了由微处理器控制的电路，利用专利算法，确保无论供电电压如何波动，回路中的电流始终是合理的，因此可以保证磁通量和电磁吸力都得以优化，同时内部可以将交流供电转换成直流以降低能耗，可以提供稳定的电磁吸力和解决交流过零点的问题。AF 系列接触器同时允许使用体积更小，结构更简单、性能更可靠的电磁铁，最大限度的降低机械和电气磨损。

由于消除了交流电过零点问题，并且线圈电流得到了有效的控制，曾经广泛应用却有着严重局限性的电磁铁，可以被设计的更好，其性能将得到更充分地利用。

在较小规格的 AF 接触器中，电磁部分采用的是一个圆柱形电磁铁和一个可移动类似活塞部分，磁铁表面是圆锥形 → 6。这是一个非常紧凑且低

7 带有 T 形移动件的磁铁



功耗的机构。这种结构设计高效，只需非常低的功耗就可以正常操作接触器，例如晶体管输出就可以直接操作接触器。在较大规格 AF 接触器中，所使用的电磁铁移动部分和固定部分分别是 T 形和 U 形 → 7。这也是一种非常紧凑且低功耗的解决方案。这两种电磁铁的结构设计，都充分体现了直流线圈的优势。

有关接触器的设计，经过了上百年的历史，得益于新的技术和创新思想，已经变成了一个全新的颇具吸引力的产品开发领域。进一步增强功能，以简化设计，提高可靠性，改善物流，优化服务等工作已经全面展开。

Gunnar Johansson

ABB 低压产品

瑞典韦斯特罗斯

gunnar.c.johansson@se.abb.com



深度呼吸

优化地下矿井的空气流量

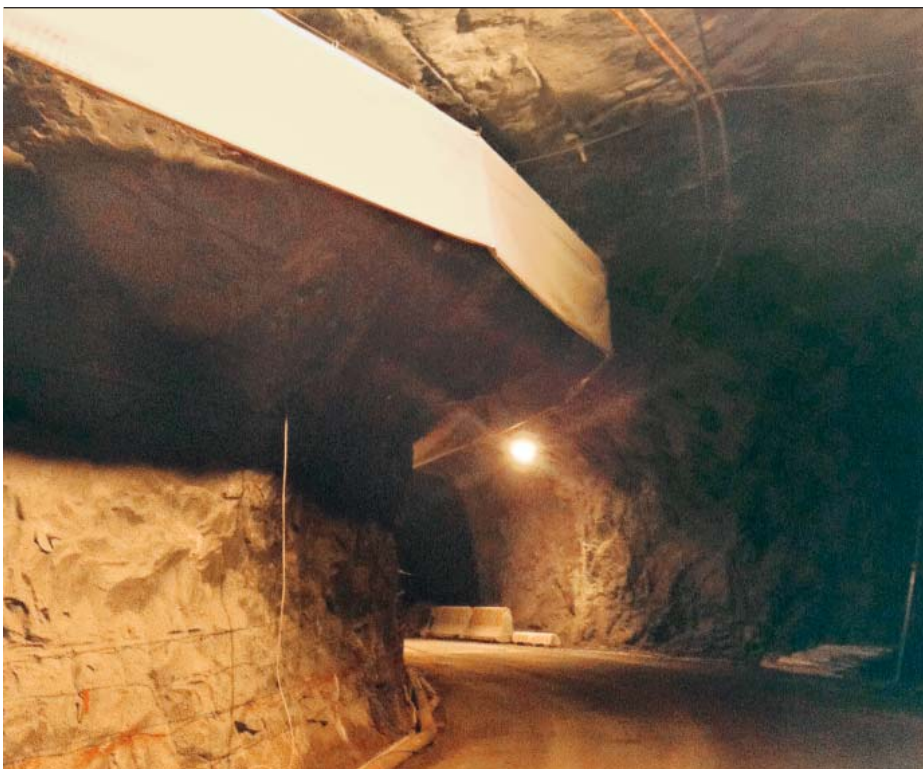
MICHAEL LUNDH, JAN NYQVIST, MATS MOLANDER

2010 年 8 月到 10 月，智利 33 名矿工被困在阿塔卡马沙漠地下 700 米深的矿井里，全世界为之震惊。他们的困境让公众开始关注人类脆弱生命的基本需求：环境温度、食物、水和空气。由于商品价格上涨，一些以前“无法得到的”资源已经变为值得投资的项目。然而，合理的市场价格和较低的投资门槛只是一方面，要获得这些遥远的资源

仍要应对身体及技术上的挑战。身体限制不仅决定了哪些资源我们能够合理地获得，更重要的是它决定了哪些资源我们能够安全地获得。随着新技术的不断涌现和演变，人们也在不断重新定义这些限制。人类已经获得了新的尖端技术，然而只有确保其生命支持系统也同步发展，这些尖端技术才真正得到应用。

通风需要消耗海量能源，基本上每年达到 10 万兆瓦时，这相当于总地下开采活动能耗的 50%。

1 地下矿井中的一条通风管道



今天，地下矿井通常会达到 2500 米深度，有些金矿甚至达到地下 3600 米。这个距离和玻利维亚拉巴斯与海平面的距离相同。未来采矿行业将向更深的地层推进。如今，采矿行业倾向于在恶劣环境下采用高度机械化作业

员所在的生产区域。通风与生产之间有密切的互动关系，对生产起到支持作用。通风需要消耗海量能源，基本上高达每年 10 万兆瓦时，这相当于总地下开采活动能耗的 50%。

新鲜空气必须分配到矿井人员所在的生产区，而进入矿井的空气可能需要加热或冷却。

在当前的矿井中，地面主风扇为矿井送入新鲜空气，而这些新鲜空气在地下通过风机和 / 或空气调节器进行分配。进入矿井的空气可能需要加热或

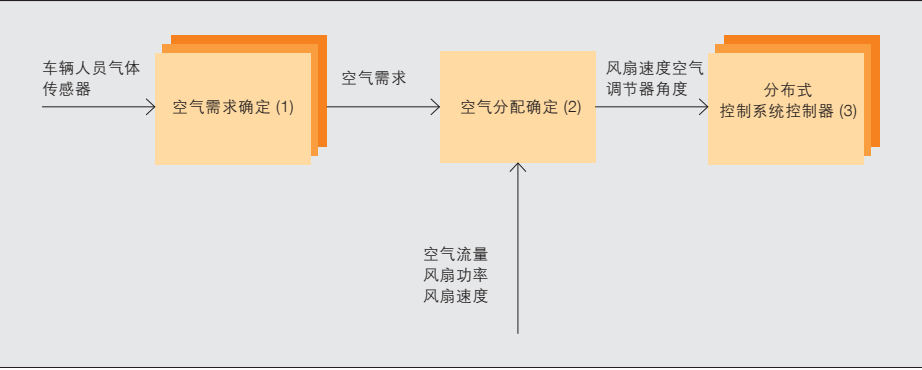
方式。采矿行业正积极寻求自动化解决方案，以满足未来需求，使运行更加安全和持久，并且产量更高。

冷却。按需通风 (VoD) 等控制技术已经投入应用，然而，很多矿井根本不进行控制，此外按需通风技术也存在弊端：按需通风技术没有反馈控制，而且使用复杂，风扇与空气调节器之间的关联较少。

柴油驱动设备及爆破所产生的一氧化碳、氮氧化物和二氧化碳等有害气体会污染地下空气，当然也可能在地下遭遇氢气和甲烷（特别是煤矿之中），因此地下矿井需要正确的通风，以确保健康的工作环境 → 1。通风的目的是将新鲜空气分散到矿井人

ABB 现在提供一种独特的方法，让整个矿井协调控制风扇和空气调节器，从而实现一种能源优化的、可靠的解决方案，为矿井自动送入所需空气。

标题图片
三分之一的铜产自地球上最干旱的沙漠 - 智利阿塔卡马沙漠。图片提供：© 2013 Michael Vogel。



基于经验模型的这个解决方案依靠的是空气传感器的反馈，空气传感器可以是气体传感器、流量传感器或温度传感器等。多变量的模型描述了风扇的速度变化如何影响空气流量和风扇上的压力。模型中的参数从运行数据中获得，因此模型易于适应新条件。

运用模型预期控制技术

高级过程控制已成功应用在多个领域，例如已应用于化学过程和精炼

型。一般来说，建模包括设备测试阶段，在此阶段将探讨引起设备输出的输入变量。输入和输出都被记录下来，然后通过数学方法使用这些记录下来的信号，从而确定一个模型。这被称为系统识别 [2]。

ABB 矿井通风新方法就是由模型预期控制方法发展而来的。矿井在不断发生变化，这就向模型预期控制技术发出了挑战。新隧道不断延伸以进行生

产，已经开采过的隧道在不断关闭。矿井在不断开发时新的风扇和通风管道也在不断增加。另外在发生爆破后，还存在始料不及

多变量模型描述了风扇的速度变化如何影响空气流量和风扇上的压力。

中。其中最普遍的方法是模型预期控制技术 (MPC) [1]，这一技术的起源可追踪到 20 世纪 70 年代。

模型预期控制器利用明确的模型来预测设备的未来响应。由此，我们能够确定影响设备的控制信号，以便让设备实现所希望的响应。由于所希望的设备响应行为通常是相互冲突的目标之间权衡的结果，因此这就形成一个寻求“最佳”解决方案的优化问题，其根本任务是构建一个能够描述设备的动态模型。完成动态模型可能比较费时：在普通过程行业的高级过程控制 (APC) 项目中，最费力的工作就是寻求一个高效优良的模

型的结构变化。通过基于运行数据或触发实验的自动化系统识别，我们可轻松地根据这些新条件来调整这个简单动态联系模型。

概述

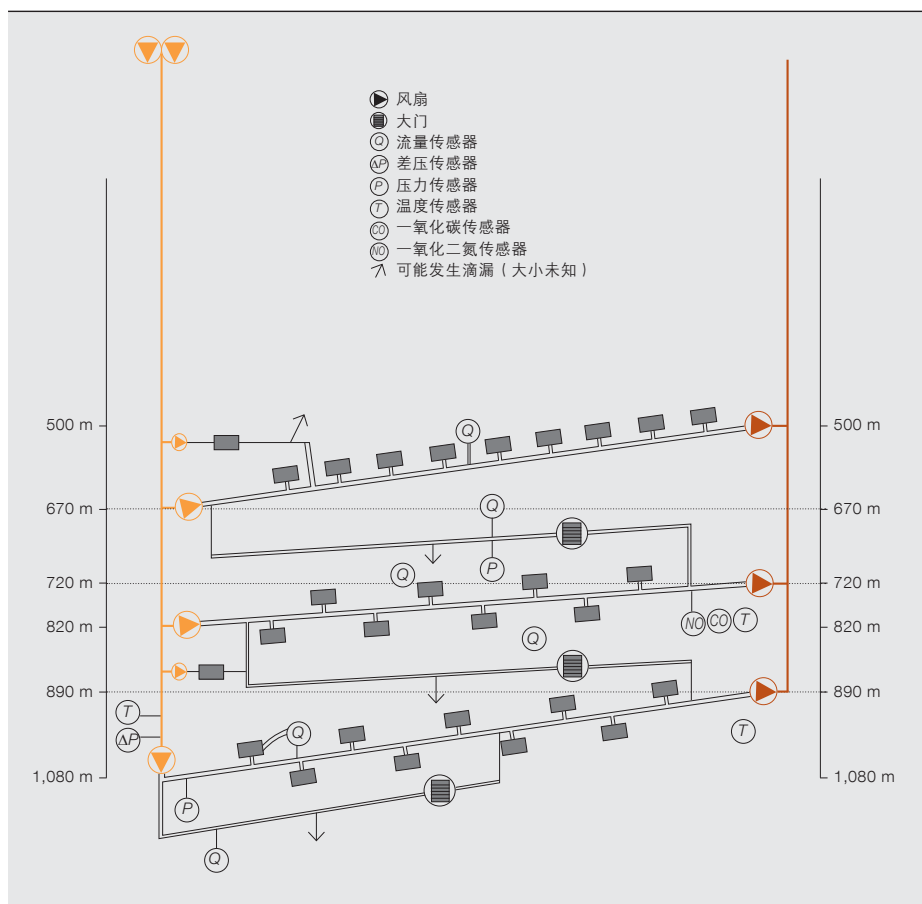
ABB 矿井通风新方法和目前使用的按需通风技术很相似。这两种类型解决方案的结构都可划分为三个等级。→ 2 为功能概述。

1) 最高等级确定的是矿井各个空气通路中的实际空气需求。这个需求的获得来自于特定场所出现的车辆和人

通过基于运行数据或触发实验的自动系统识别，可轻松地根据新条件对简单动态联系模型进行调整。

优化的风扇速度取决于各个空气通路中的空气需求，风扇性能和驱动风扇的电机的性能。

3 测试矿井的示意图



员。这个需求也可从测量矿井中不同气体浓度的传感器确定。有的空气通路需要把流量控制在尽可能低的水平，例如控制进口坡道流量。

2) 第二等级功能是通过优化风扇（即能带动矿井中空气的风扇）速度来确定空气的分配。优化的风扇速度取决于各个空气通路中的空气需求、风扇性能和驱动风扇的电机的性能。第二个等级可能还包括用于控制空气流量的空气调节器的开放角度。确定风扇速度和空气调节器角度的目的是，在满足空气需求的同时将通风的实际总功率降到最小。最小实际功率取决于一个模型，这个模型将风扇速度变化与空气流量变化和实际所用功率的变化联系起来。

3) 然后我们把最佳风扇速度和最佳空气调节器角度用作分布式控制系统 (DCS) 较低等级控制器的设置点。

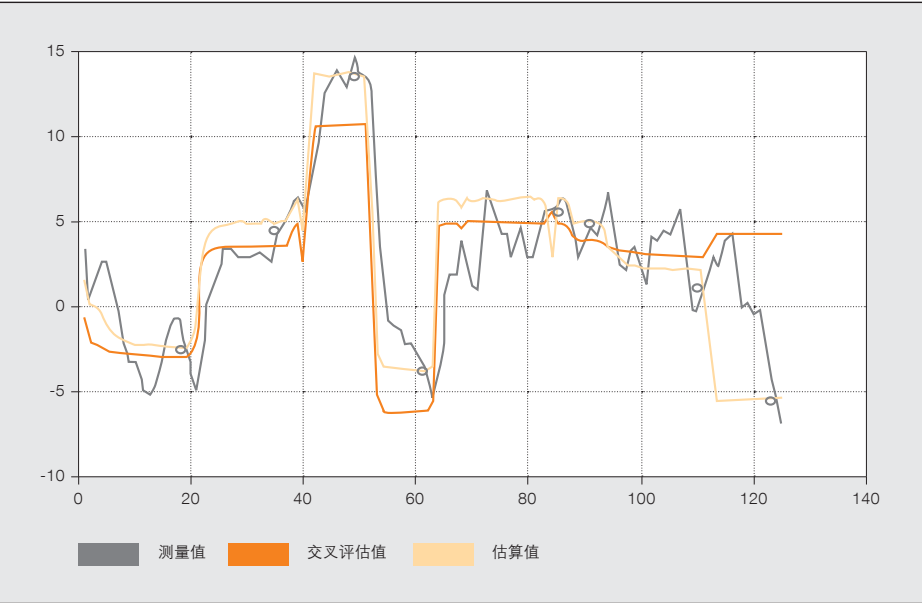
在这个新的模型预期控制解决方案中，整体空气分配优化在第二等级实施。

建模

矿井中的空气分配受到风扇速度以及气流调节器开放角度（如果存在的

确定风扇速度和空气调节器角度的目的是，在满足空气需求的同时将通风的实际总功率降到最小。

话）的影响，这些都是控制系统中的执行器。在执行器和矿井空气流量之间存在相互作用的关系。这意味着，



例如，风扇变化后的速度将不仅仅影响风扇所在空气通路中的空气流量，还影响着其它空气通路中的空气流量。这种相互作用的关系使我们难以以最佳方式控制空气流量。因此重要的是模型应反映出矿井的这一特点。

动态多变量模型可用来描述矿井。在很多应用场合中都使用这样的动态多变量模型，比如精炼行业。但这些模型有一个弊端，即每获得一个模型都需要付出相当大的努力。这并不是我们所希望的。原因是通过矿井扩张，以及因爆破意外产生的新空气通路等，矿井的形状在不断发生变化。如果矿井每次发生变化后都要花费数周时间去建立一个精确的新动态模型，将既不切实际也没有用处。

在这种情况下，我们使用了一个简单的静态多变量模型，它能够获取执行器之间相互作用的根本关系，也能受到执行器变化的影响。这个模型可用增量形式描述

$$\Delta Q = H_q \Delta \beta$$

$$\Delta p = H_p \Delta \beta$$

$$\Delta E = H_e \Delta (\beta^3)$$

这里 Q 是测量空气流量矢量， p 是风

控制目的是使各个空气通路保持所希望的空气流量，同时把风扇功率降到最低。

扇上压力矢量， β 是风扇速度矢量，而 E 是风扇功率矢量。 Δ 表示两个示例之间的变化。 H_q 、 H_p 和 H_e 矩阵中的系数是从简单试验获得的，或是从能进行自动系统识别的普通运行数据中获得的。

测量

为了识别矿井通风系统的模型并且能够用它进行控制，我们必须测量很多变量：

- 各被控场所的气体浓度和 / 或空气流量
- 被控风扇的风扇功率
- 被控风扇的风扇速度
- 风扇上的压力

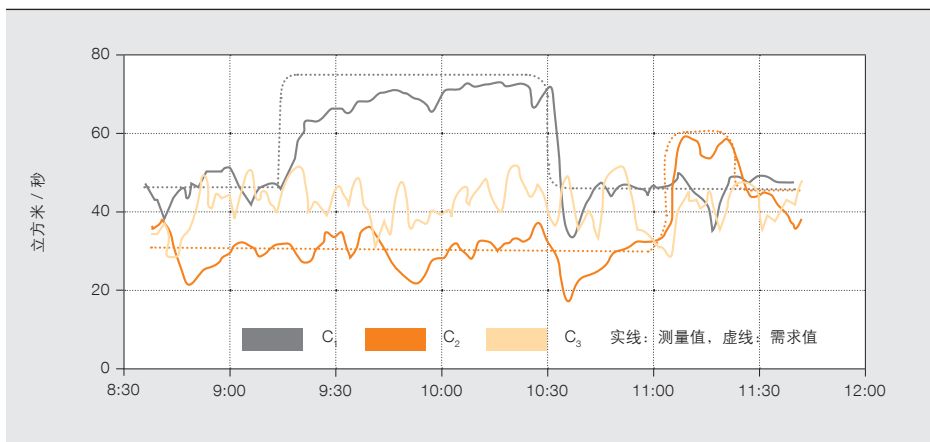
控制器根据当前需求调整实际风扇速度。

控制

控制目的是使各个空气通路保持所希望的空气流量，同时把风扇功率降到

随时都有车辆进入和离开生产区域，这意味着通向这些生产区域的空气通路中的空气需求也在发生变化。

5 系统根据需求的阶跃变化调整空气流量



最低。为生产区域送入空气的空气通路，它的空气流量必须超过所需流量。其它空气通路可能要求保持尽可能少的空气流量。

这就形成一个优化问题，即确定新的风扇速度，使实际风扇功率降到最小。

在这个功率最小化过程中，要考虑到空气流量和差压的限制：

$$Q_{lo} \leq Q(k) \leq Q_{hi}$$

$$\Delta p_{lo} \leq \Delta p(k) \leq \Delta p_{hi}$$

尽管矿井本身在不断开发、演变，矿井也能不间断地从高效生产中获益。

另外，还存在风扇速度的限制：

$$\beta_{lo} \leq \beta(k) \leq \beta_{hi}$$

这个优化问题是每次在计算新的风扇速度后需要解决的。每次优化的初始值由测量信号的过滤值提供。

现场测试

这种以优化方式控制矿井通风的新方法已经在一个运营中的地下矿井中接受测试。该矿井先前已配置了 ABB 按需通风系统，连接所有风扇和传感器。

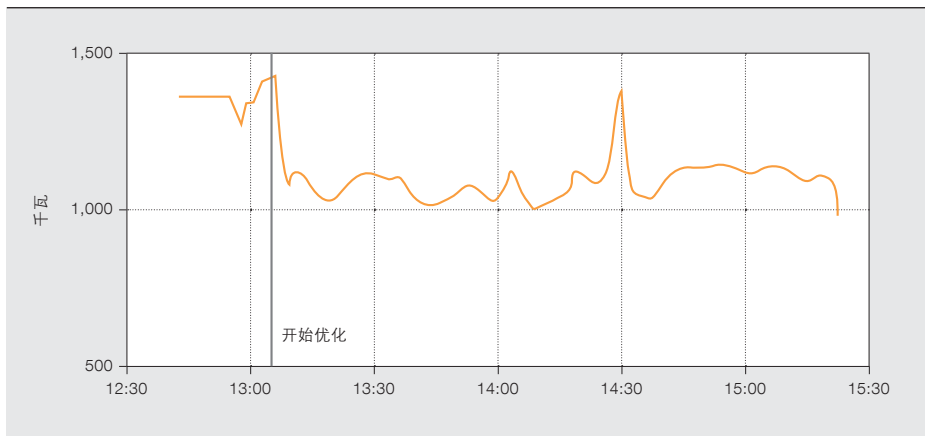
该矿井的示意图请见 → 3。矿井的被控区域包括从 500 米深到 1080 米深的三个生产等级。进气口安装了两个地面风扇，而且每个生产等级的入口和出口都各安装有一个风扇。桔黄色线代表进来的新鲜空气，棕色线代表出去的污染空气。在每个等级中以及各等级之间的进口隧道中，利用超声波流量传感器测量空气速度。传感器的位置在示意图中标注了一个 Q。此外，还测量了每个风扇的静态压力上升情况。

随时都有车辆进入和离开生产区域，这意味着通向这些生产区域的空气通路中的空气需求也在发生变化，而且当

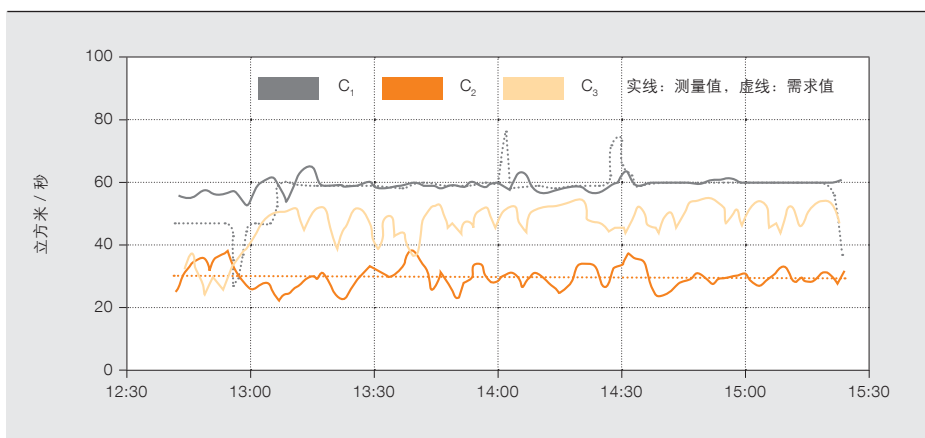
前的按需通风系统将相应地改变风扇速度。这将提供识别模型的必要激发因素。在适当过滤和去除高频变量后，矿井的静态模型，如上所述，通过简单的最小二乘安装方法得到识别。两个此类模型的评估请见 → 4。其中一个模型是使用与图形（估算）中所采用的测量数据相同的数据进行识别的，而另一个模型（交叉评估）是使用一组完全不同的数据进行识别的。

基于指定模型的风扇优化系统经过了两天的测试。在这期间，各生产等级

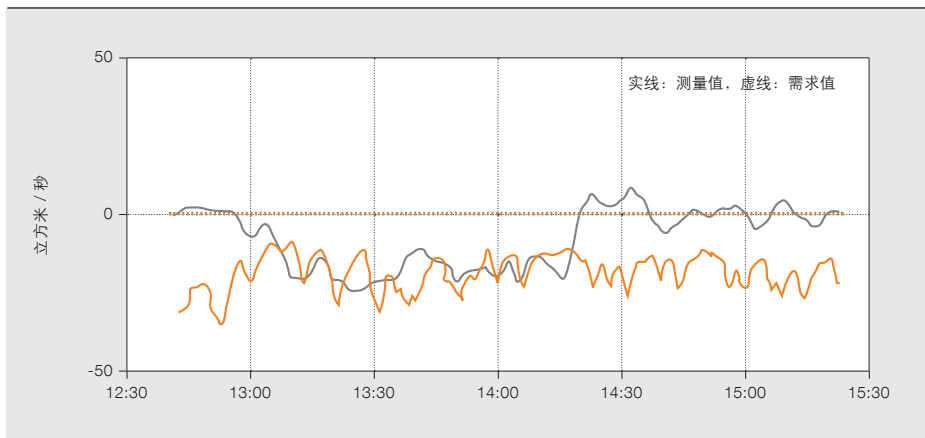
6 显示风扇功率降低的模型运行图



6a 总风扇功率



6b 单元流量



6c 进口坡道流量

的通风都由优化系统控制。测试过程中 ABB 系统 800xA 记录的结果请见 → 5。此图显示了系统如何将三等级矿井的第一等级空气流量调整到所要求的阶跃变化（灰色实线），以及如何将第二等级的空气流量调整到所要求的阶跃变化（深桔黄色实线）。

运行期间记录的另一个登记绘图请见 → 6。这些图表示在满足空气通路对

空气流量的需求同时，优化系统如何显著减少了风机功率。测试显示，与运行中的现有系统相比，优化系统在保持相同空气流量的同时，可减少 30% 至 50% 功率。

通风成果

现场测试表明，将简单经验模型应用在地下通风系统可实现如下目标：

- 根据当前空气质量需求进行调节，

对工作环境也有好处，那里获得了最符合场所需要的空气流量。

自动控制地下矿井健康的工作环境

- 可以根据矿井不断变化的工作条件进行自动调节
- 通过优化现有风扇的分配载荷，大幅减少风扇功率
- 通过反馈控制达到强劲可靠的自动通风

将这些动态经验模型运用到矿井通风系统中可以带来诸多益处。不仅矿井能够从降低的运营成本中获益，而且对工作环境也有好处，矿井获得了最符合场所需要的空气流量。尽管矿井本身在不断开发、演变，但现有模型会跟随矿井的变化步伐，确保空气和风扇也随之不断优化。这也意味着，即使在那些恶劣的、最偏远的工作环境中，矿井也能不间断地从高效生产中获益。

Michael Lundh

Jan Nyqvist

Mats Molander

ABB 企业研发部

瑞典韦斯特罗斯

michael.lundh@se.abb.com

jan.nyqvist@se.abb.com

mats.a.molander@se.abb.com

参考文献

- [1] Qin, S. J., and T. A. Badgwell, (2003), A survey of industrial model predictive control technology, Control Engineering Practice 11 (2003), p. 733–764.
- [2] Ljung, L. (1999) System Identification – Theory for the user, Prentice Hall



顶级齿轮

提高采矿行业生产率

LEN EROS, MIKE SMALE, DAVID KEECH

当今市场对基本原材料需求强烈，这给采矿行业带来了压力，让采矿作业规模变得更大，生产率变得更高。然而，在充满挑战的环境里，如何让运行成本不菲的大规模采矿作业的产量更上一层楼？与制造商合作是方法之一，只是该制造商不仅要具备工程专业知识，还要提供坚固而先进的设备，满足采矿行业独特的生产需求。ABB 在设备方面可提供大量经过现场验证的产品，这些产品可用于带式输送机、卷扬机、破碎机、移动牵引车和通风风机。很多机器都需要齿轮装置，品质卓越的齿轮减速器产品是实现成本目标、维护目标和产品目标的根本部件。



在把成本增长降低到最小的同时，技术的发展让低等级矿石开采和复杂矿石开采成为可能。

全球采矿业规模宏大，到 2012 年底，资产项目投资已经超过 4000 亿美元 [1]。激烈的竞争让采矿生产率变得格外重要。上世纪，高效的矿石加工方法和大型设备的利用使生产率得到大幅提高。在把成本增长降到最小的同时，技术的发展也让低等级矿石开采和复杂矿石开采成为可能。

今天，像 ABB 这样能够向采矿业交付完全技术解决方案的公司具有很大

优势，因为它们能够处理规模庞大的矿井以及复杂的现代加工过程，帮助客户以前所未有的速度生产原材料，而这些正是现代竞争中所必需的能力。

ABB 不仅掌握行业专业知识，还提供经过现场验证的大量产品，这些产品具备采矿作业所需的特殊性能和高效性。ABB 产品可用

在多种设备中，例如传送带、电葫芦、破碎机、通风风机，以及移动牵引机和系统等。由于采矿过程自然条件严峻、

恶劣，因此坚固和可靠性是对产品的主要要求。

能够向采矿业交付完全技术解决方案的公司具有很大优势，因为它们能够处理规模庞大的矿井以及复杂的现代加工过程，帮助客户以前所未有的高速度生产原材料，这些正是现代竞争中所必需的能力。

节省电力对采矿公司的利润底线来说也有很大影响，所以高效产品具有重要优势。普遍来讲，能提供电力与

标题图片

为了在大规模密集采矿行业保持前沿领先地位，现代采矿企业通常与工程伙伴紧密合作。这些工程伙伴不仅需要具备专业知识，还能够提供适用于挖掘作业恶劣条件的广泛产品线。

节省电力对采矿公司的利润底线来说有很大影响，所以高效产品具有重要优势。

1 组装完全的传动系统包，配置了一台 2500 K Dodge CST、一台 2500 马力 Baldor Reliance 电机、一个可选的 3150 磅飞轮和高速联轴器



机械整体解决方案的合作伙伴将使采矿公司受益非浅。

总拥有成本更低的产品

ABB 电气产品组合包括全方位的电机产品，例如防爆采矿重型电机、多种低中压变速传动装置 (VSDs) 等。ABB 机械产品组合涵盖大型传动装置、可控启动传输装置、安装轴承、联轴器和皮带轮等。ABB 产品还包括采矿设备的配电系统、电力调节系统及开关等。

ABB 提供全球最齐全的大型交流电机和矿业电机产品系列。Baldor-Reliance® 库存和定制电机功率可达 11 兆瓦 (1.5 万马力)，而感应电机和同步电

都符合特定应用标准，能够让客户感到安心。矿业电机的外部结构设计得异常坚固，可满足恶劣运行环境的需求，矿业电机还设计有能延长寿命的轴承和密封系统。

ABB 还提供最新的输送机传动技术，即无齿轮输送机传动系统。无齿轮输送机传动系统利用的是带变频器的低速同步电机，它可减少部件的整体数量，因此能增加系统可靠性，减少维护需求。

齿轮减速器

在传统的齿轮传动系统中，电机动力可通过 ABB 各种专有齿轮减速器传递给输送机系统，其中包括为采矿行业特别设计的可控启动传输装置 (CST) 和 MagnaGear XTR® 减速器。

Dodge CST 提供出色的电机负荷分配，可使输送机上所有部件的负荷和应力降到最小。

机可达 65 兆瓦 (8.7 万马力)。这些电机包括 NEMA (美国电气制造协会) 和 IEC (国际电工委员会) 配置，在框架、外壳和空占比等各方面

Dodge® CST

Dodge CST 提供出色的电机负荷分配，可使输送机上所有部件的负荷和应力降到最小。CST 实际上是一个



中国是 CST 的最大用户，共有 2000 多台 CST 在运行。

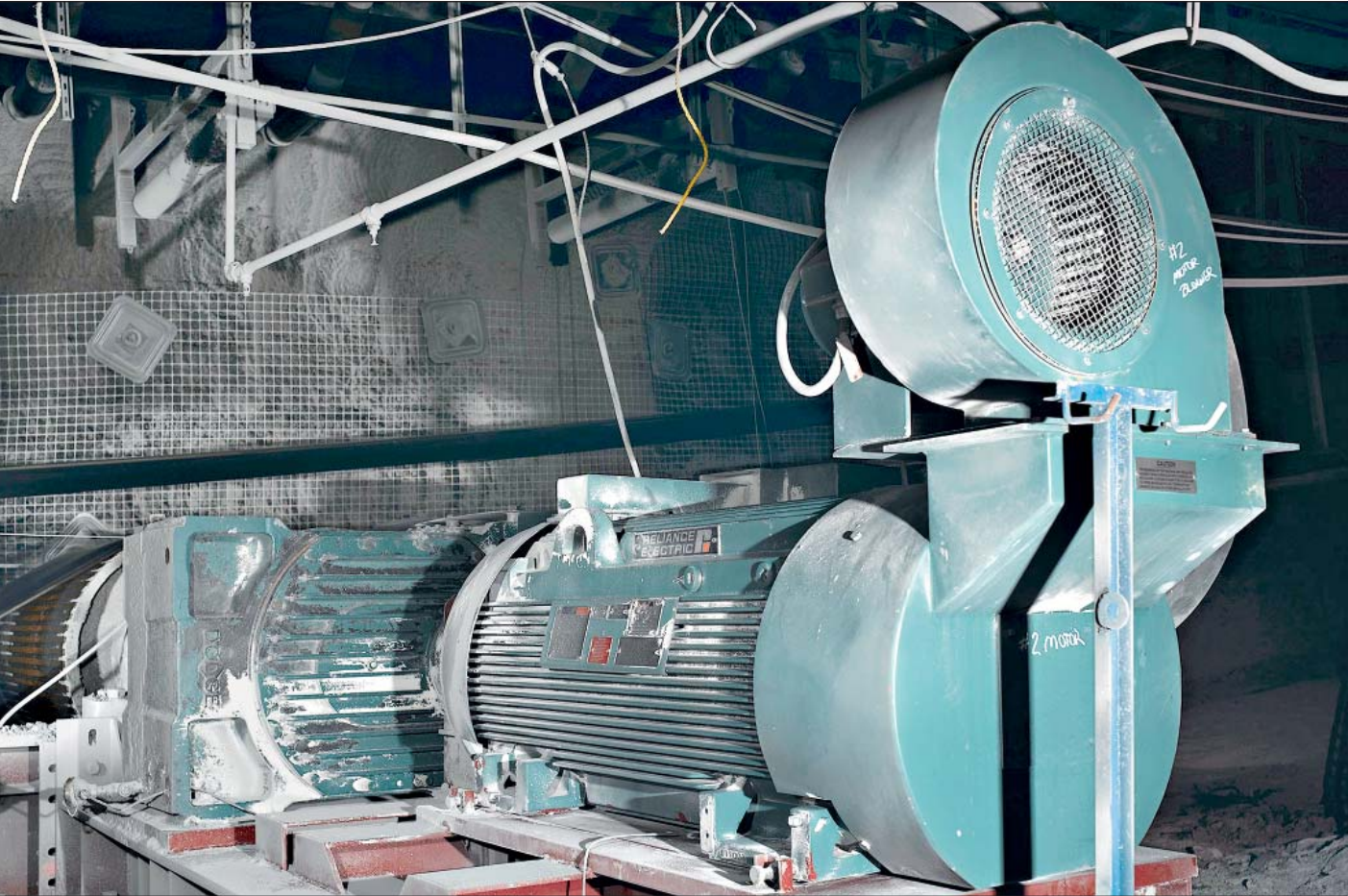
二合一齿轮箱，它把一个行星齿轮减速器和一个内置的液力离合器系统相结合。当与交流感应电机连接时，CST 齿轮箱将电机的高速低扭矩输入转换为低速高扭矩输出。额定扭矩可达 400 千牛米（350 万磅力英寸）。电机在整个运行范围内都可以输出最大功率。离合器单元吸收震动负荷，并保护电机、齿轮箱、轴承、皮带轮、传送带和接头。其坚固的设计可全面控制最复杂的大惯性负荷，例如长传送带和带有多个同步传动装置的输送机 → 1。

液力离合器系统位于齿轮箱的输出侧内部，它能让电机在无负荷条件下启动。由于 PLC 控制系统逐步接合离

其坚固的设计可全面控制最复杂的大惯性负荷，例如长传送带和带有多个同步传动装置的输送机。

合器，因此输出轴开始转动并在预定时间内平稳加速到所需传动速度。

截至 2012 年，全世界已安装 3000 多台 CST，其中有 6 台 CST 安装于南美洲的一个铜矿里，这是 CST 最复杂的



安装之一。它们位于海拔 5000 米的 千瓦（2500 马力）传动装置和将近
地方，包括四台 2250 千瓦（3000 马 3.7 千米长的负载皮带，这家煤矿每
年产煤可达 1 亿
吨。

另一种先进的减速器是 Dodge
MagnaGear XTR，它被重型应
用所广泛采用，额定扭矩可达
240 千牛米。

中国是 CST 的最
大用户，共有
2000 多台 CST
在运行。其中一
家公司拥有 400
台 CST，用在
17 个煤矿中，总

力）CST、两台 1400 千瓦（1900 马
力）CST、基座和高速制动器等。

面积达 1 万平方公里。这个系统配备
了先进的远程检测系统，其可使用率
达到 98%。

ABB 提供的设计为另一个客户不仅
节省了 20% 的传动成本，还降低了
输送机系统额外的安装成本。与指定
设计相比，它显著降低了成本，却实
现了更大的总功率。使用三台 1875

Dodge MagnaGear XTR

另一种先进的减速器是 Dodge
MagnaGear XTR，它被重型应用所
广泛采用，额定扭矩可达 240 千牛

MagnaGear XTR 减速器可与多种软启动及控制系统一起使用，例如电子软启动、变速传动装置和液力耦合器等。

米（210 万磅力英寸）→2-3。它的尺寸超过 44 千牛米（39 万磅力英寸），设计有行星齿轮，是适用于高扭矩应用场合的紧凑、耐用、经济解决方案。MagnaGear XTR 减速器可与多种软启动及控制系统一起使用，例如电子软启动、变速传动装置和液力耦合器等。

MagnaGear XTR 减速器的设计符合或超过 AGMA（美国齿轮制造商协会）的最低轴承寿命标准。事实上，MagnaGear XTR 减速器的轴承寿命要比很多竞争品牌多出一倍以上。同时设计有串联密封装置和高效冷却系统，运行中只需较少维护。MagnaGear 提供一系列为特殊应用专门设计的相关配件，包括基板、摆动基座安装件、隧道传动配置、扭矩臂、内部剥离式逆止器、联轴器和电风扇等。

Dodge 安装轴承设定了行业标准。ISAF 和公制 ISN 型提供仅需推 / 拉适配器的安装系统，可减少安装用时，而完全同心轴附件实际上起到消除摩擦腐蚀的作用。用于大型应用的 Dodge 大口径枕块轴承，特点是拥有获专利的安装及拆卸系统，即液压辅助适配器安装系统。这些轴承不仅能快速安装和拆卸，而且已经在工厂进行了组装、密封和润滑。ABB 的机械动力传输是由工程皮带轮和各种联轴器完成的。

不仅提供产品

采矿公司的工程专业知识通常比较有限，通常情况下采矿公司需要与制造商合作。因此制造商不能仅提供适当的产品，还要提供工程专业知识。ABB 采矿专家以及 Baldor 的采矿业团队，懂得这一行业面临的挑战，明

白产品和产品包的最佳应用方式，因此可交付成功的解决方案。

输送机传动系统的设计工作就是采用这种联合服务方式的很好例子。在这里，工作目标是设计一台能传输尽可能多材料同时兼具最佳性能与可靠性的输送机。这项工作所面临的艰巨挑战是：行业趋势是使用长距离大负荷输送机运输。输送机每小时需运输多达 3 万吨的材料，长度达 10 至 20 公里，24 小时运转。早在设计过程中，ABB 团队就使用行业标准程序（“皮带分析”）来配置具有正确输出功率的传动系统，并选择优化的电机、变速传动装置、齿轮装置、轴承、联轴器和皮带轮等。

通过与多所大学和全球行业组织联手，ABB 始终处于采矿技术的最前沿。研究项目包括新一代电机建模以及诸如电机热传递与冷却等问题。关于标准的开发，ABB 具有多家技术委员会成员资格，例如 NEMA（美国电气制造协会）、IEC（国际电工委员会）、IEEE（电气与电子工程师协会）和 CEMA（输送机设备制造商协会）等。

ABB 产品范围齐全，行业经验丰富，利用正确的电机、控制系统、齿轮装置、轴承、联轴器和皮带轮等为客户交付与功率相匹配的解决方案，解决客户的问题。ABB 将继续研究和开发行业特定应用的解决方案，通过延长使用寿命、改善可靠性、减少停机时间、提高运行效率和节约能源成本，降低客户总拥有成本，从而让最终用户受益。

Len Eros

ABB 电机和发电机业务
美国科罗拉多州利特顿市
len.eros@us.abb.com

David Keech

Mike Smale
Baldor –ABB 集团成员之一
美国南卡罗来纳州格林维尔
david.keech@baldor.abb.com
mike.smale@baldor.abb.com

参考文献

[1] “Trends in the Mining & Metals Industry: Mining’s Contribution to Sustainable Development,” International Council on Mining & Metals. Oct. 2012.

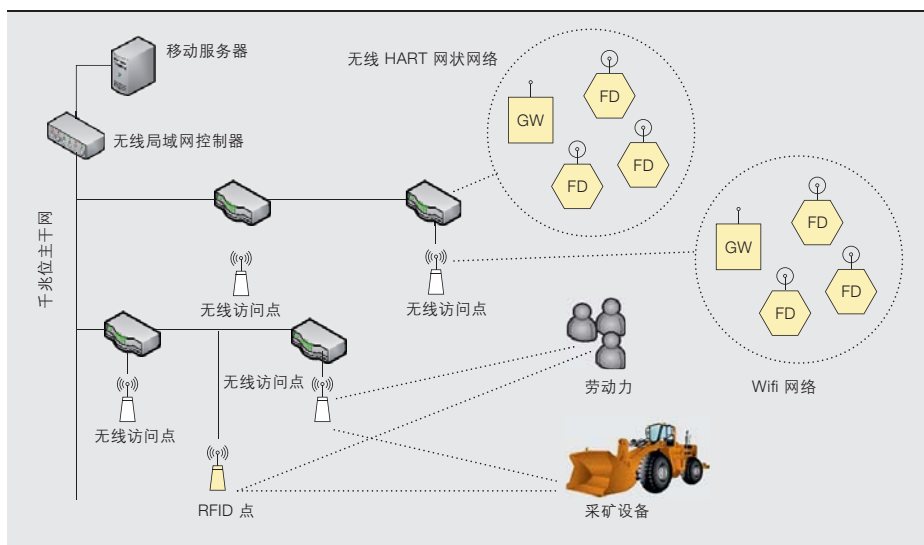


矿山信息化

地下开采中移动式设备的整合

STEFAN L. SJOSTROM, KJELL G. CARLSTEN, KRISTER LANDERNAS, JONAS NEANDER

地球上最容易发现的高品质金属矿石已经被人类开采殆尽，这一点不足为奇。采矿公司必须更加艰辛地开采那些剩下的资源。然而，采矿业中有一个领域的技术发展仍然落后于其它行业，运行效率和盈利能力拥有巨大的增长空间。这就是地下采矿环境中的自动化和数据集成技术。这项先进技术在其它行业中已经随处可见，如果采矿业一直在这方面欠缺，那么实现从矿山到车间整个价值链的优化就是一句空话。ABB 推出了先进的自动化系统，它能够让采矿企业优化地下采矿设备的利用情况，提高矿山生产率并减少能耗。



系统 800xA 平台和相关产品，正是为矿山自动化和数据集成提供了便利。

ABB 的地下采矿自动化系统使所有地下设备（包括不同类型和不同制造商的设备）的实时数据都能整合到 800xA 开放过程控制系统中 → 2。通过机器定位跟踪、机器状态报告和转发地下实际运行环境等手段能提高所有设备的可视性和利用情况。自动化系统的设计和应用方法，包括如何选择信息、管理信息从而带动产量的提高，是采矿企业拥有竞争优势的关键所在。

矿山自动化

大体上看，矿山中的很多操作本身自动化程度相当高，但是通常未能很好地整合到主系统中或者根本就没有整合到主系统中。这就形成了次优化和过程的不均匀性。

导致这一缺陷的主要原因在于，地下矿井环境中缺乏多功能的通讯基础设施，即无线或有线网络。这使操作者很难全面观察或全面控制矿山的不同操作。此外还导致另一结果，即无法

优化从矿山表面到车间的整个价值链。导致这一缺陷的另一个原因可能是，采矿业过去所面临的降低成本和产量优化的压力并不像其它行业那样大。

然而，市场形势正在急剧变化。当前改进采矿业技术的最好方法是将一个灵活而多功能的通讯系统引进到地下采矿环境中。

通信

多年来，传统的 UHF/VHF 无线电被广泛用于地下矿井的语音通讯，但这种

由于矿石和其它所需储藏资源越来越难以开采，如今提高采矿自动化和数据集成水平对于成功开采来说显得尤为重要。

通讯方式缺乏适应性和功能性。无线局域网 (WLAN) 是非常好的解决方案。事实上，多家采矿公司（例如瑞典的 LKAB 和 Boliden）已经在地下安装了无线局域网。虽然无线局域网最

标题图片

采矿业已有相当大的变化，但还需加强自动化和数据集成方面的建设。

采矿业是人类最早发展的行业之一。事实上，最古老的矿山是斯威士兰的“狮子洞”，那里曾开采出颜料成分，经放射性碳检测显示该矿已具有约 4.3 万年历史 [1]。年代相仿的其它矿山曾为模具制造者开采出原料。采矿业早在上世纪就已高度机械化，但现在的矿山技术仍落后于石油天然气或纸浆造纸等行业。由于矿石和其它所需储藏资源越来越难以开采，如今提高采矿自动化和数据集成水平对于成功开采来说显得尤为重要。

与此同时，必须提高员工技能水平以适应技术的发展。采矿业需要合格的操作者来实施产品与过程优化、进行维护规划和环境控制等。总之将需要更少、更熟练的员工，这些员工将管理整个价值链。传感器和自动系统通过一个通讯主干网发送实时信息，而这些实时信息是控制各个产品和过程所必需的，在这种方式下，一部分操作者就能控制多个矿井 → 1。这样的整合能够让采矿企业优化地下采矿设备的利用情况，提高矿山生产率，同时降低能耗。ABB 推出的扩展自动化



当地下通讯基础设施建立后，所有移动式设备都由电脑控制，一个可进行数字交换的全新世界便建立起来了。

普遍的应用是在 IP 语音 (VoIP) 电话和数据转换等，但也能跟踪移动式设备以及与移动式设备进行通信。

跟踪

跟踪能力使系统能够对智能电话、便携式电脑、射频识别 (RFID) 标签或嵌入式设备等进行定位，能利用任一无线局域网客户端进行跟踪。一般来说，获得位置的方法是利用已知坐标（通常是无线局域网访问点），来计算相对于一些固定位置或锚定点的客户位置。然后，这个相关位置变换为全球和绝对坐标系。一般来说，锚定点的数量越多，定位的精确度就越高。

为了让网络功能，例如跟踪功能可靠运行，在规划和采用地下无线网络时必须十分小心。所面临的一个最大挑战是地下矿井中的无线电环境要求苛刻，例如矿井拓扑、可变地质情况、岩石和施工材料中的信号衰减、瓦数与本质安全、电磁干扰等。ABB 进行了多次现场试验演示相关技术，而且进行了试点安装，论证地下采矿设备的跟踪情况。

移动式设备的整合

当地下通讯基础设施建立后，所有移动式设备都由电脑控制，一个可进行数字交换的全新世界便建立起来了。例如，系统可将生产设备的钻孔计划和装载顺序发送给它们，而这些设备

的执行结果又能在线汇报给系统。将移动式设备整合到生产控制系统中还有其它用处，例如：

- 将采矿过程初始阶段的结果（地质情况、矿石计算、矿山调查、矿山设计和生产规划）以有用格式的形式发送给移动式设备系统。
- 取回移动式设备汇报的结果，如在线生产状况和生产报告、生产分析、生产统计等，并将它们转发给相关用户。
- 从车载系统中取回任务执行统计和维护数据。一部分信息由过程控制系统使用，还有一部分信息（主要是维护数据）将传递给其它系统，或由其它系统（例如维护系统）收集。
- 监控移动式设备的在线状态，包括本地信息。

生产控制系统的接口是依据行业标准设置的。移动式设备和开放的 ABB 过程控制系统之间的接口是 OPC，特别是处理实时数据的 OPC 数据访问 (OPC DA)、OPC 警报和事件 (OPC AE) 以及 OPC 历史数据访问 (OPC HDA)。

数据设定和命名符合 IREDES，即国际岩石采掘数据交换标准。IREDES 管理采矿设备和办公计算机系统之间的数据交换，并为矿山自动化系统定义一种通用的电子语言。

ABB 与 Atlas Copco 公司的合作对双方来说都是绝佳机遇。ABB 和 Atlas Copco 公司都非常关注核心竞争力，我们的合作开发将为地下矿井创造更多增加值。

“未来的矿山操作者需要一个所有功能集于一身的信息中心，优化地下设备的利用情况。我相信这个项目将使地下采矿优化工作实现质的飞跃。”

David Shellhammer
Atlas Copco 地下岩石采掘公司总裁

虽然一些采矿公司已经安装无线局域网用于 IP 语音 (VoIP) 电话和数据转换，但无线局域网也能跟踪移动式设备以及与移动式设备进行通信。

矿山联网：移动整合

移动式设备的定位信息和其它数据是通过无线局域网基础设施获得的。合并后，这些信息可从开放的 ABB 过程控制系统中看到。依据这些合并后的信息，系统能精确、实时地分析联网机器的运行情况和开采进度。分析后的输出数据有助于各个方面进行进一步优化：

- 根据移动式设备状态推断出实际条件和实际需求，并以此来控制通风，而不是遵循预定程序。
- 由于系统监控着来自机器以及来自过程环境的所有数据，因此能精确安排维修，提高移动式设备的可使用性。
- 能够在线监控移动式设备是否遵循运行规划，在重新计算运行情况时，异常行为将用作输入数据。

山环境中遇到的情形，机器操作者将会制定出更明智的决策。

试点安装

ABB 和瑞典的 Atlas Copco 地下岩石采掘公司 (Atlas Copco) 开发了一个先进的移动整合系统，该系统包含 ABB 的 800xA 自动化平台系统和 Atlas Copco 公司的矿山机器。2012 年 6 月，成功地进行了试点安装。此解决方案目前安装在瑞典 Kvarntorp 的 Atlas Copco 公司测试矿山中 → 3。这一技术将为矿山操作者提供无与伦比的过程控制机会和信息。

该项目将 Atlas Copco 公司地下钻机、装载机和卡车的重要数据，与 ABB 的 800xA 平台系统整合在一起，能提高所有机器的可视性和利用情况。

通过跟踪机器位置、机器状态和地下实际运行条件，该解决方案将提供所需信息，帮助矿山操作者在正确的时间制定出正确

决策，让生产尽可能顺利地进行。Atlas Copco 公司和 ABB 将继续发展这一理念并为之增加更多功能，满足客户以及未来采矿的需求。

这一解决方案将为矿山操作者提供无与伦比的过程控制机会和信息。

将来控制环路也可闭合，必要时可自动重新引导或重新规划移动式设备。机器操作者可编辑和利用这些周围信息（交通情况、生产设备状态等），仅这个现实就能提高机器操作者的能力。当计划与现实发生分歧时，面对这个经常在矿

Stefan L. Sjoström

ABB 过程自动化
瑞典于默奥
stefan.l.sjoström@se.abb.com

Kjell G. Carlsten

ABB 过程自动化
瑞典韦斯特罗斯
kjell.g.carlsten@se.abb.com

Krister Landernas

Jonas Neander
ABB 研究院
瑞典韦斯特罗斯
krister.landernas@se.abb.com
jonas.neander@se.abb.com

参考文献

[1] Mining. 2012 年 9 月 26 日摘自
<http://en.wikipedia.org/wiki/Mining>



OCTOPUS-Onboard

具有运动监测、响应预报和恶劣天气决策支持功能的 ABB 船用系统

LEON ADEGEEST

如今，海上石油和天然气等行业所用的浮动生产设备越发庞大和沉重，需要使用起重能力极高的船舶才能将它们运抵作业现场。因而，重达数千吨的巨型货物通常由重吊船进行长途运输，这就要求重吊船配备技术先进的

动态监测、响应预测、恶劣天气决策支持和天气评估系统来保护其昂贵的货物。ABB 的，OCTOPUS-Onboard 船载监测和预报系统，已安装在迄今为止世界上规模最大、技术最先进的 Dockwise Vanguard 号重吊船上。



Dockwise Vanguard 重吊船载重能力为 11.7 万吨，长 275 米，宽 70 米，能安全运送钻机或海上平台等规模超大的重型货物，在海上重件运输领域享有无与伦比的地位 → 1。像 Dockwise Vanguard 这样的重吊船能

OCTOPUS 系统提高船舶的安全和效率，为客户大幅降低成本。

运输全部组装结构，降低完成任务用时，还可为其它大型船舶，例如海上钻井船等提供干坞能力。

安装在 Dockwise Vanguard 重吊船上的模块化 OCTOPUS-Onboard 系统是由 ABB 集团旗下的 Amarcon 公司开发，具有动态监测、响应预报和恶劣天气决策支持等功能。船上还安装了

ABB 的三传感器运动测量系统，可在轮船驾驶室显示和监控一些关键的区域（如货物区）。OCTOPUS 系统提高船舶的安全和效率，为客户大幅降低成本。OCTOPUS 系统是 ABB 船舶信息及控制 (VICO) 系统套件的一个组成部分。凭借经现场验证的 ABB 过程自动化技术，ABB 船舶信息与控制系统套件专门为海运提供全方位的自动化和咨询解决方案。

OCTOPUS 系统已安装在全球约 200 艘不同类型的船舶上，它可对船舶的运动、状态、位置、燃料使用、燃料性能、船舶流体力

学和船舶定位等进行持续监控与测量并提供建议，从而为海上决策提供实用信息。

该系统利用重要的天气信息及预报，使船舶以最高效率运行，帮助船员在运送和安排货物时做出最佳决策。OCTOPUS 是 ABB 智能船舶 (Smart Marine) 行动的一部分。基于 ABB 在船舶推进系统、电气系统、自动化系统和咨询系统领域的专业知识，ABB 智能船舶行动可为海运行业提供一系列解决方案。

模块化的 OCTOPUS-Onboard 船载系统具有动态监测、响应预报和恶劣天气决策支持等功能。

标题图片
已安装 ABB OCTOPUS 船载监控和预报系统的 Dockwise Vanguard 号重吊船

Leon Adegeest
ABB 集团旗下 Amarcon 公司
荷兰达尔夫森
leon.adegeest@nl.abb.com



控制室融合

融合工业监测控制与数据中心运营

MARINA THIRY、ERIC OLSON、BOB FESMIRE

数据中心业务的发展速度之快是其他工业部门所难以企及的。从 20 年前简陋的“计算机机房”到现在，数据中心已经演变为极为复杂、高度专业化的独立设施。这一增长的推动力来自于社会对数据生产的不断追求，并且使数据中心成为了“用电大户”。新一代数据中心采用了高度工程化设计，十分节能高效，但是每个控制中心平均有成百上千个数据中心有时还要跨越多个站点。满足现有需求。数据中心需要统一的监控和管理系统，这一点已是不争的事实。ABB 的数据中心基础设施管理解决方案——Decathlon 正是为此而诞生的。



在过去二十年，数据中心的规模、数量和复杂程度以惊人的速度增长，并且还拥有了专门的服务业。

——十年前，数据中心的概念还仅仅局限于“计算机机房”。在过去二十年，数据中心的规模、数量和复杂程度以惊人的速度增长，并且还拥有了专门的服务业 →1。谷歌、苹果和 Facebook 等行业巨头投入了数亿美元的资金用于建设高度工程化的专用设施，因而备受关注。然而，这些旗舰设施中平均有成百上千个数据中心面临着严峻的挑战，如降低运营成本、管理不断扩大的设备库存以及监控多站点。

数据中心的演进

在互联网发展初期，数据中心并不具备统一的监测能力或能力较低。人们

根本无从获知设施的整体能耗，更不用说其中某一设备的单独能耗，服务器利用率亦是如此。事实上由于当时低廉的能源成本，是否具备这样的监控能力对于数据中心的运营影响不大。

随后，IT 技术掀起热潮，网络数量大幅增长，这一切都使得数据存储以及能耗要求大幅提高。五年前，每机架的标准服务器只消耗约 2.5 kW 的功率，而现在已经达到了每机架 8 kW - 30 kW，这对于制冷技术提出了巨大的挑战。

为应对这一挑战，许多数据中心实施了冷/热通道方案等一系列措施。这些通道用于控制气流，避免冷热空气混合。然而，该类解决方案较为被动。一旦涉及主动监测和控制，现有系统往往表现欠佳。目前的解决方案可以

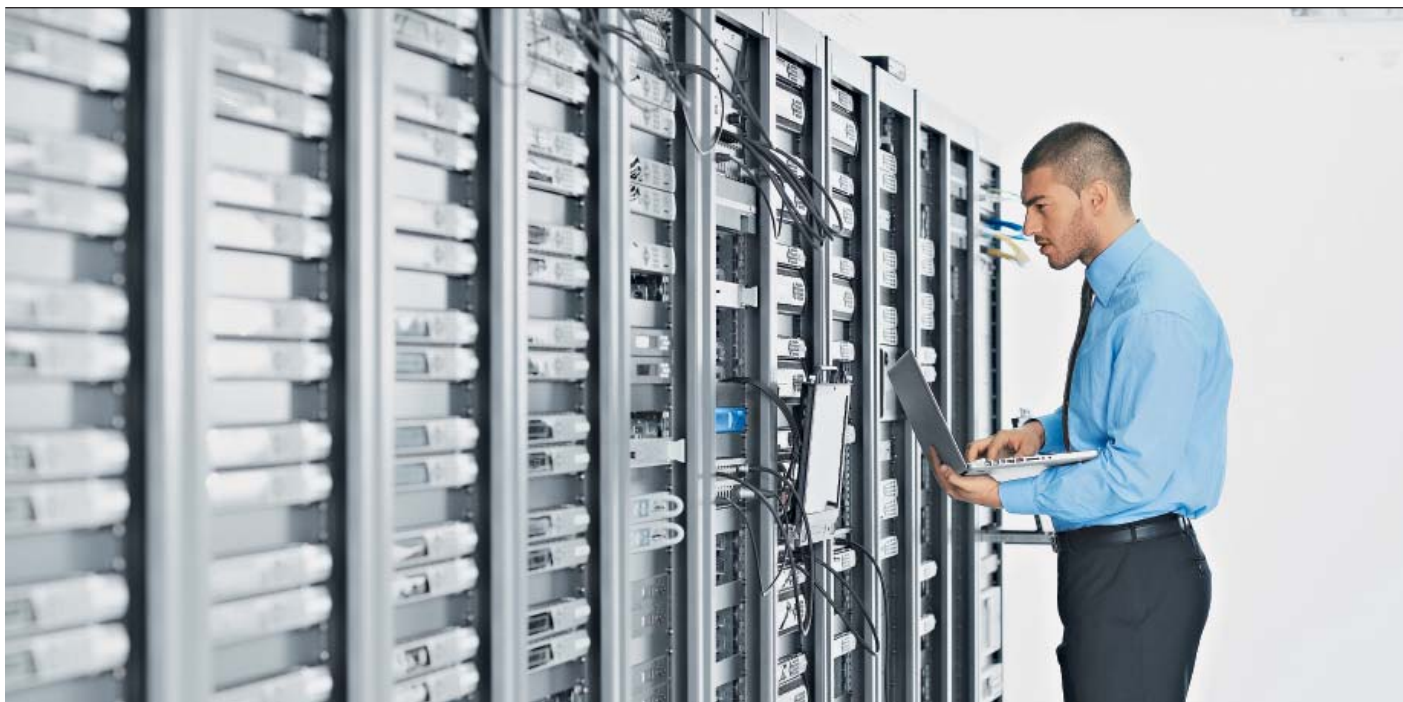
用管理服务器的虚拟化或监控整体基础设施的能源使用情况等，但是这些系统间的相互孤立增加了复杂性和信息鸿沟。

在其他方面，数据中心仍然远远落后于其他行业。以资产管理为例，通常被视为是对设备状态和性能的系统监控，目的是更好地管理维护，并优化整个设备机群的运营及维护预算。但在数据中心领域，资产管理历来都是只涉及简单的购买日期以及设备物理位置跟踪。

据 ABB 估计，只有约 5-10% 的数据中心配有监测控制系统，主要用于服务器操作、能源消耗和环境控制。另外 20-40% 的数据中心具备一定的监测控制能力——通常针对服务器操作，而其余的 40-65% 则几乎完全没有此类设备。这是因为许多老式设施

标题图片

许多数据中心采用了最先进的数据存储技术，但却被其管理和监控系统所累。ABB 的 Decathlon 数据中心基础设施管理解决方案将如何解决这一难题呢？



DCIM 系统必须非常可靠，并且还要具备远远超出简单服务器跟踪的资产管理能力。

仅被视为商业办公的一部分，虽然有一些特殊的电力要求，但也只能勉强使用已安装的传统楼宇管理系统来控制温度和湿度。

进军数据中心基础设施管理

出于上述原因，数据中心需要统一的监控和管理系统。为了简化新兴的独立解决方案界面，数据中心需要采用统一用户界面。此外，服务器操作以及冷却、环境控制和能源使用等管理功能也是必不可少的。值得欣慰的是，过程工业已经攻克了许多相同的问题，所以数据中心行业可以充分利用这些关键任务系统搭建自己的技术平台。这一技术开发领域已经归入数据中心基础设施管理 (DCIM)。

从战略角度来看，DCIM通过以下方式实现数据中心和业务目标的匹配来产生更多的价值：

- 提供能源和性能信息
- 提供支撑业务计划的经营决策
- 以最可靠和最行之有效的方式提供新的应用程序和网络服务

DCIM 的特点

有几点对于 DCIM 至关重要。首先，数

据中心行业最关键的参数是正常运行时间，因此 DCIM 系统必须具有高度可靠性。另外，DCIM 系统还必须具备远远超出简单服务器跟踪的资产管理能力：基于状态的维护和诊断工具（例如识别环路中的服务器）将使该行业的资产管理能力迎头赶上其他设备密集型企业。由于越来越多的操作人员需要同时管理多个数据中心、计算机机房和服务器机柜，多站点可视化将成为 DCIM 系统的另一必然趋势。

最后，DCIM 将能够通过集成机械设备、电气系统和 IT 系统的统一视角提供可视化、决策支持和控制技术，在整个企业范围内实现更好的数据中心运营管理。DCIM 系统的承诺是为数据中心运营商提供可付诸行动的信息，使他们能够最大限度地提高能力、优化运营并降低成本和风险。ABB 的 DCIM 解决方案 Decathlon 直面这一挑战，在现有 DCIM 的基础上还实现极大的突破：

设施管理

实现覆盖数据中心 IT 关键设备（服务器、存储、网络、虚拟机）和基础设

DCIM 令数据中心能够通过瞬间转移“生产”位置充分利用能源价格的差异。

施（配电、制冷、布线、机柜）等所有关联系统的对象（安全、管理、环境）的集中控制及监测。

维护管理

基于模型的自动化的事件应对与处置，实现故障预判和处理。

电能管理

实时跟踪基础设施及设备的运营状况，包括变电站、微电网和现场发电，确保电力的可靠、安全使用及分配。

能源管理

能源的实时测量、能力模型与优化配置，综合降低能源消耗和运维成本。

资源预测和能源规划

采用 Power Assure：PAR4 服务订阅、IT 能耗分析和预测、全球能源市场信息集成、能源报警和预测，以及能源采购/销售交易汇总订阅服务。

资产容量规划

采用 Nlyte：具有建模和管理功能，以便进行长期的容量规划，动态优化空间、电力和制冷等关键系统的性能和效率，并提高资产利用率。

报警管理

根部故障报警分析，保障数据中心可用性及风险控制。

控制和自动化

全面地、实时地采集监测真实数据中心运行状态数据，实时自动提供管理决策信息。

远程监控

远程监测来自IT关键设备，基础设施及所有关联系统数据。

DCIM 的发展状况

数据中心快速应对可视化、决策支持和控制技术的需求已经十分明确，DCIM 改进了目前许多数据中心基础设施监控所依靠的独立解决方案。虽然 DCIM 的发展尚浅，但已经诞生了几个能够引导这些系统发展走向的总体概念：

可视化与更佳控制

DCIM 业务的核心是通过全面实时监控为数据中心建立一个实际的能源使用基准，使运营商获知能源消耗的时间、位置以及比率。凭借这些信息，他们便能采取有效的战略措施来优化资源和预测能源需求。

资源整合

DCIM 系统可以利用增加的可视化以及强大的分析方法来整合资源并杜绝浪费，从而最大限度地发挥现有能力。如此可以降低硬件（例如减少服务器数量）和数据中心（例如电能、制冷和空间）的成本，并减少对环境的影响。

性能优化

DCIM 能够揭示数据中心运营的真实状态，凭借更佳的可视化和控制提高可用性；最大限度地提高电能、制冷和空间的容量；简化操作；并降低企业整体风险。

设施和 IT 自动化

DCIM 系统可以协助完成负荷转移以及温度和湿度控制等任务，还可以跟踪其他参数，如空调机组的振动，实现故障预判和处理。

下一步的发展方向？

对于绝大多数未享受到尖端系统和设计优势的设施来说，采用逐步发展的方法来改进数据中心的运营不失为一种明智之举。

现场评估是实现这一目标的良好开端，可以由此找出最容易得到收效的地方（例如节约能源）作为切入点。而且，如果运营商可以由此确定其改善的目标，那么最终引进 DCIM 系统也会更加简单。

改造应该从能够快速获取回报（即一年之内）的简单计划入手，如提高室温或在制冷系统中安装变速风扇。

DCIM 的一个领先之处是令是数据中心能够通过转移工作负载的位置来利用能源价格的差异。这种“生产”的瞬间转移是“旧经济”企业可望而不可即的。这些极具新意的构想将进一步推动 DCIM 系统的细化，并且在这些产品充分发挥其潜力的过程中起到决定性作用，成为行业中每一个数据中心不可分割的一部分。

Marina Thiry

ABB Inc
美国加利福尼亚州门洛帕克
marina.thiry@us.abb.com

Eric Olson

ABB Inc
美国宾夕法尼亚州沃明斯特
eric.olson@us.abb.com

Bob Fesmire

ABB Inc
美国北卡罗来纳州卡里
bob.fesmire@us.abb.com

参考文献

[1] Datacenter Dynamics Inc (2012, July). Data-center Dynamics Global Industry Census 2012 [Online]. Available: <http://www.datacenterdynamics.com/focus/archive/2012/07/datacenterdynamics-industry-census-data-center-industry-robust>



CRIM

为生产过程复杂的工厂
寻找最好的维护策略

KARI SAARINEN、SHIVA SANDER TAVALLAEY、PATRIK M. WESTERLUND

从被动维护转变为预防性维护策略可以为许多工业部门节省大量成本。然而，在过程工业中，一台设备中可能有数千个需要维护的元素，因此仅仅依靠预防性维护策略是不切实际，甚至是完全不可能的。那么，在这种情况下如何选择最佳的组合维护策略呢？基于危害性分析的维护 (CRIM) 优化为识别关键设备和适当的预防性维护计划引进了一种系统化的维护计划方法，兼顾了环境和过程条件。该方法在生命周期成本分析前首先要进行快速危害性评估。



CRIM 方法可以通过危害性分析 (CA)、寿命周期成本分析 (LCCA) 和寿命估计，为整体工厂设备提供高成本效益的维护策略。

“维护优化”一词涉及众多方法，从单纯依靠经验的方法到复杂的系统化方法不一而足。简单方法的范例包括事后维修——适用于冗余设备和故障率极低的设备；基于时间的维护 (TBM) ——在设备的定期检修 / 更换成本低于故障检修以及单个已知的故障模式占主导地位时最为有效；基于状态的维护 (CBM) ——最适用于关键设备。

较为复杂的方式包括可靠性维护 (RCM) ——用于确定适当的主动维护方法以实现系统高可靠性的最彻底的方法；以及全面生产性维护 (TPM) ——结合全面质量管理和主动维护策略以实现最大生产效率。其中，RCM 是一种相对较权威的方法，TPM 则侧重于机器生产能力的最大化，因此都不适合本文所讨论的范畴。ABB 的 CRIM 方法与之不同，可以通过危害性分析 (CA)、寿命周期成本分析 (LCCA) 和寿命估计，为整体工厂设备提供高成

本效益的维护策略，满足我们的要求。

维护专家和过程专家就危害性因素达成共识。

CRIM

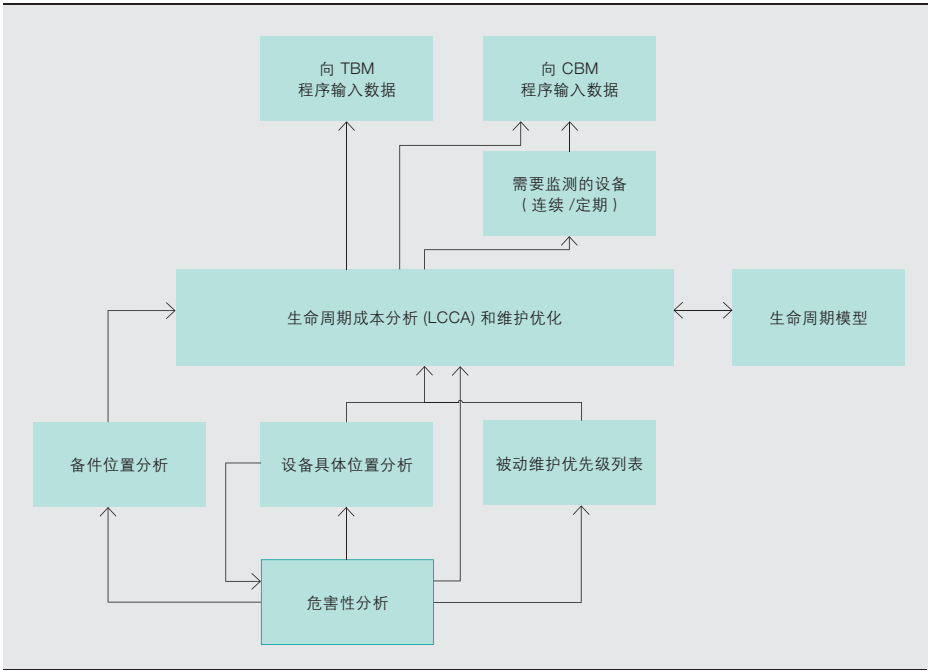
CRIM 过程以危害性分析为起点——这是所有维护方法以及可靠性方法的关键过程 → 1。CA 为确定特定设备的价值及其对人员安全、环境以及生产过程的影响奠定了基础，还可用于确定设备在维护策略手段方面所要求的关注水平。

标题图片

为装有数千台设备的工厂确定适当的维护策略是一件十分棘手的事情（如文中所述的铁矿石球团厂）。CRIM 将帮助业主找到适当的维护计划。

危害性评估包括事件和故障的定量分析及评级，旨在确定故障后果的严重性。

1 CRIM 过程流程图



LCCA 是 CRIM 过程的第二个步骤，用于呈现特定维护方案对关键对象的益处 → 1。

危害性分析

危害性是一项用于衡量故障后果的标

会议上，负责人会针对每一个设备位置提出一系列精心选择的问题，并为所列的每一个危害性因素择取适当的标准危害性水平。在此之前，负责人先要与维护专家和过程专家进行讨论，确定这些危害因素。各项资产的

随后在 CA 小组会议上，负责人会提出一系列精心选择的问题，并为每一个危害性因素择取危害性水平。

准。因此，危害性评估包括事件和故障的定量分析及评级，旨在确定故障后果的严重性。换言之，这种方法只评估故障的后果；有关故障概率的评估则归入随后的 LCCA 过程。

有了完善的过程和适当的工具，才能以高成本效益的方法对成千上万台设备进行评估。

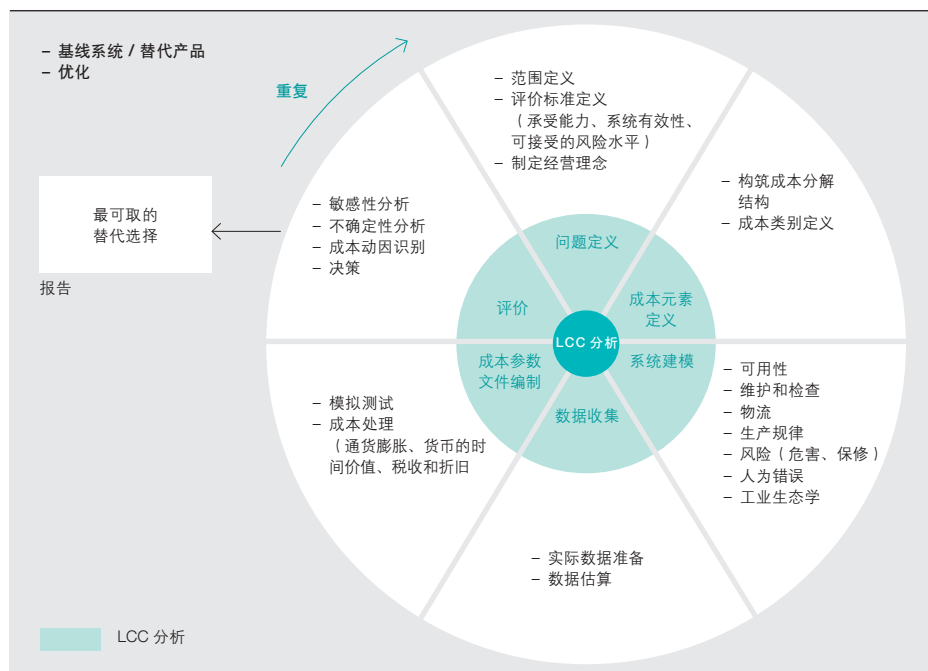
在开始危害性分析前，ABB 的负责人会要求客户把需要分析的所有设备位置输入 CA 工具。随后在 CA 小组

最终危害性水平为自动生成，涉及停机时间、生产的响应时间、容量、质量、环境、安全性和设备故障所导致的能源损失及其最终的二次效应等诸多方面。最后，基于上述所有内容生成 CA 报告。

生命周期成本分析

LCCA 是一种综合性分析方法，涵盖了多种针对系统或特定设备的生命周期成本和收益性计算分析，包括研发、建造、运行、维护和处理 → 2。

LCCA 以问题定义过程为起点（如图所示），按顺时针方向以迭代方式进行，直到第一过程中定义的所有条件得到满足。



设备故障所造成的
生产损失与预防性
维护所造成的生产
损失之差是分析的
关键因素。

LCCA 是一种综合性分析方法，涵盖了多种针对系统或特定设备的生命周期成本和收益性计算分析。

设备故障所造成的生产损失与预防性维护所造成的生产损失之差是分析的关键因素。

主动维护或预防性维护建立在维护需求预测的基础上，其定义不包含诊断阶段。如果过程经过精心设计和预先计划，实施过程中的生产停机时间应该远远小于被动维护。同样，所有必要的材料也可以在故障发生前订购，以便随时取用。

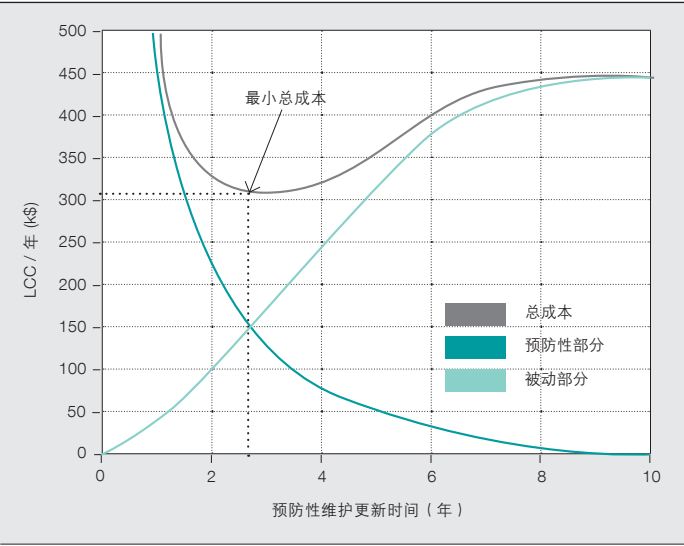
对于 CRIM 来说, 为被动维护、基于时间的维护和基于状态的维护等策略确定单位时间内的最低长期平均维护成本是关键所在。

本文所述的 LCCA 概念只涉及与特定设备所选维护策略相关的成本，因此 CBM 所需的特定设备成本是其中唯一的资本成本，也就是说不存在任何与被动维护策略相关的资本成本。运行成本分为年均固定成本和被动维护或预防性维护活动所产生的成本。年均固定成本只包含状态监测所产生的成本。

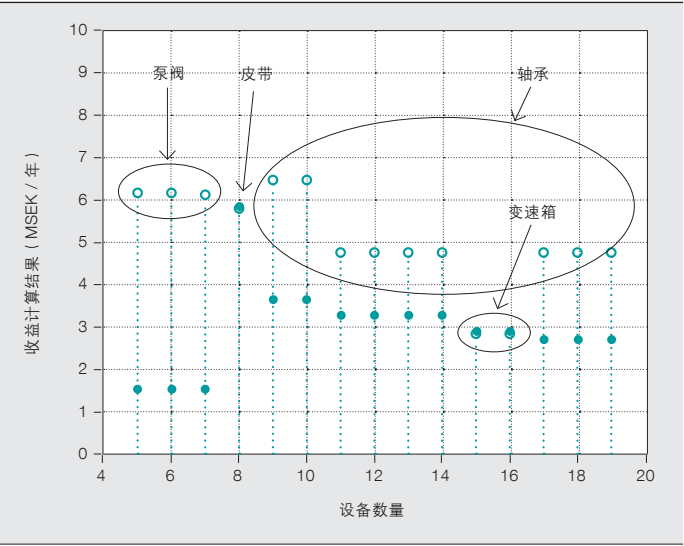
综上所述，一段时期内的平均维护成本等于各类维护成本之和，而每项成本则根据各维护类型的发生频率来衡量。维护活动的频率和总次数取决于所选的维护策略。这些频率可以通过包含维护对象运行状态的生命周期模型进行估计。维护对象的运行状态包括温度、脏污程度、装载等，在上述关键设备的具体位置分析过程中进行评估。

生命成本分析的第二步是利用生命周期模型和成本模型来构筑各项维护策略的生命周期成本 (LCC) 模型。我们可以通过一个真实的 TBM 案例来理解这一步骤：一家工厂计划在达到

3 维护对象的 LCC 在特定年数或发生故障后更新



4 过程危害性为 4-5 的设备使用 TBM (实心圆) 或状态监测 (空心圆) 的收益



对于 CRIM 来说，为被动维护、基于时间的维护和基于状态的维护等策略确定单位时间内的最低长期平均维护成本是关键所在。

预防性更换时间或发生故障时更换组件，以先到者为准，根据观察，最佳更换时间为 2.8 年，则每年的 LCC 为 310,000 美元 → 3。

LCCA 还可以用于备件位置优化，即通过计算一组备件位置的 LCC 来决定最佳位置。

可以通过敏感性分析和不确定性分析来确定输入参数变化对结果的影响。在特定范围内改变输入参数可以显示出主要因素和权衡因素对成本的影响。

CRIM 分析图

在一家客户的试点生产现场中，我们

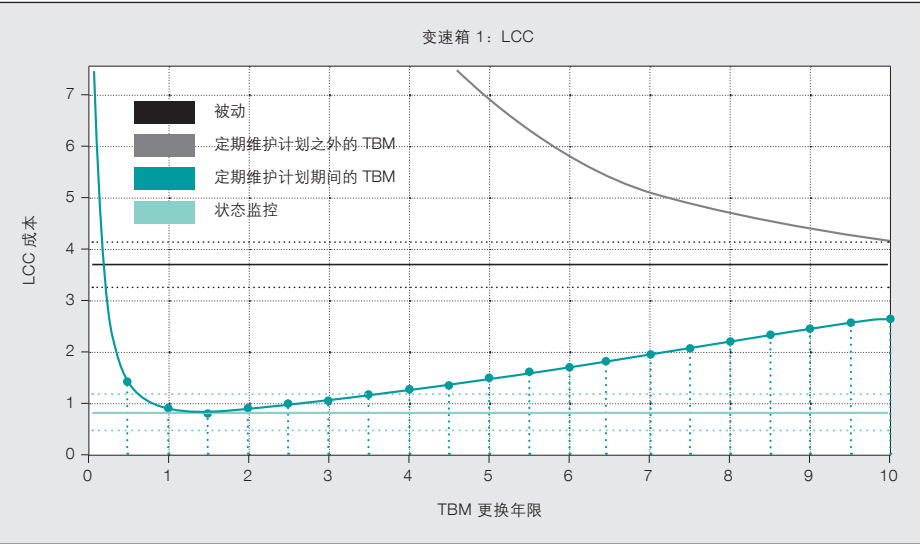
对两条生产线的 698 台设备进行了为期两天 CA。我们在第一天上午进行了校准和介绍，并在剩余的半天时间内完成了前 100 台设备的评估。随后的评估速度始终保持在每小时 50-100 台。CA 为 LCCA 提供了基础数据，然后 LCCA 据此计算出各关键组件的最终成本 → 4。

同一对象（如变速箱）的所有 LCC 结果可以汇总处理 → 5。图中的虚线指示各项 LCCA 估算结果中的不确定性因素。在该例中，TBM 策略需要选择一个最佳的时间间隔才能与对应的 CBM 策略相提并论。另一方面我们还能看到，在定期维护计划之外的 TBM 没有最低限制，而且成本远远高于被动维护。敏感性分析通常用于计算每一个参数值小幅增减时对 LCC 结果的影响。

CA 工具生成的备件清单用于通过 LCCA 对备件位置进行进一步优化。

对比所列对象的 LCC 计算结果，这些对象的备件位置有两种不同的假设——物流延迟分别为超过一天和一小时——这表示在某些情况下，只需将备件移近设备或提高备件可用性便可以大幅降低 LCC。

5 “变速箱 1”实例的 LCC 作为更换年限的函数。假设生命周期模型参数中有 10% 的不确定性因素（虚线）。



6 改变备件位置导致危害性数值减小对 LCC 的影响

组名	危害性变化	LCC 变化 (k\$ / 年)	备件成本 (k\$)
开关	5 → 2	350	31
泵阀	5 → 3	512	15
冷却风扇	3 → 1	113	3
传感器	3 → 1	77	3

此外，改变备件的位置还可能直接影响到 CA 工具中的危害性数值计算结果——在所示实例中，危害性数值从最高值 5 下降至无危害的数值 2 → 6。危害性数值下降所带来的后果在 LCC 的变化中可见一斑 → 6。计算中所使用的相应备件成本仅为 LCC 成本的一小部分。

CRIM 解决方案

要彻底解决工厂业主的难题，为工厂中成千上万台设备找到预测性维护、预防性维护以及事后维修策略的最佳组合，CRIM 还有很长一段路要走。在试点生产现场，通过为关键泵阀和轴承选择适当的 CBM 策略，并采用良好的状态监测方法，每年可以节省 620,000 美元的 LCC 成本。试点研究的主要发现之一是，CRIM 分析适用于工厂设计阶段，或者作为工厂验收测试的一部分。另外，此过

程还涉及来自各个领域的专业知识，这一点也极为重要。客户对此评价道：“如果没有 CRIM 分析方法，我们的工厂该怎么办？”，这也许是 CRIM 方法最有力的说明。

Kari Saarinen
Shiva Sander Tavallaey
ABB 研究院
瑞典韦斯特罗斯
kari.saarinen@se.abb.com
shiva.sander-tavallaey@se.abb.com

Patrik M. Westerlund
ABB AB，过程自动化业务部，采矿
瑞典于默奥
patrik.m.westerlund@se.abb.com

参考文献
[1] Y. Kawauchi and M. Rausand. (1999).
Life cycle cost analysis in oil and chemical
process industries.
Available: <http://www.ntnu.no/ross/reports/lcc.pdf>



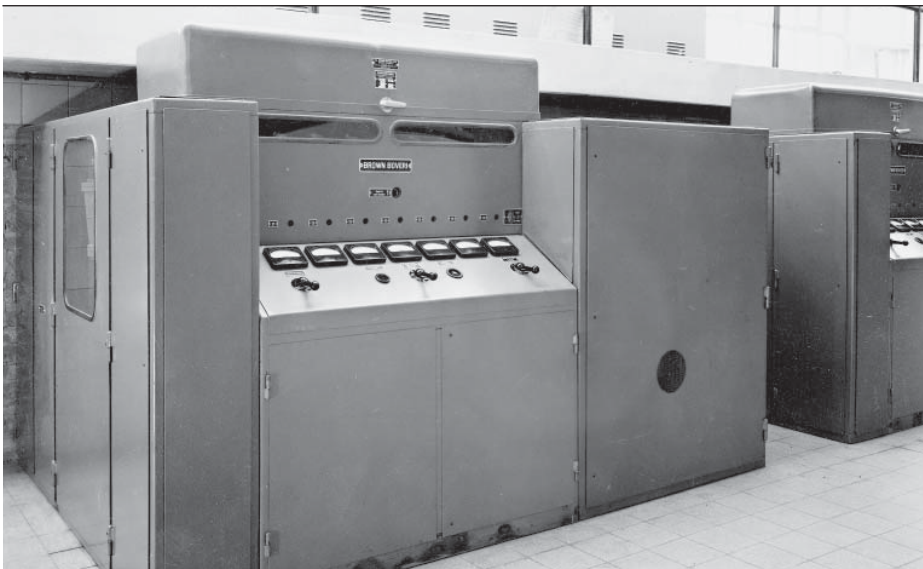
从汞弧到混合 断路器

电力电子器件百年发展史

ANDREAS MOGLESTUE

2013 年是 ABB（及其前身）在电力电子器件领域驰骋百年的一个里程碑。从跨越数千公里进行高压输电的大型 HVDC（高压直流）设备到日常的家用电器，电力电子器件的身影几乎无处不在。电力电子器件的诞生源自于不同

频率或电压等级之间转换的需求，这种转换无需借助于（需要大量维护的）移动机械部件。转换器最早采用的是汞弧整流器。该类整流器自 20 世纪 50 - 60 年代起为半导体所取代。在这 100 年中，ABB 始终站在技术本身及其应用发展的最前沿。



可以用于交流电不同频率之间的转换（有几个欧洲国家的铁路采用 $16\frac{2}{3}$ Hz 频率，因为该数值恰好为 50 Hz 的三分之一）。电动发电机甚至可以延伸到可变输出

应用领域：例如，沃德-伦纳德控制装置便是利用直流发电机的励磁来改变其输出电压（如实现变速驱动），而谢尔比斯驱动

则通过一定程度的转差功率控制实现了非完全同步的交流电网连接。

出色的灾难恢复能力是电动-发电机系统的一个宝贵属性，旋转质量所产生的动能可以弥补短暂的电力中断。有趣的是，这一能量缓冲作用与现代电力电子转换器的直流母线电容器建立了对应关系。

电动-发电机系统等机械转换器的缺点包括移动部件的维护，如碳刷的润滑和更换，以及会对结构和锚固产生显著影响的机械力。

转换

电动-发电机系统的输入和输出采用完全电隔离，而电力电子器件则需要

通过外部触发的开关动作在以离散方式改变电流路径，从而实现换流。在直流电机中，我们可以看到这一路径转换原理的最简单形式——由一个换

电力电子器件将脱离移动部件的限制，实现与其相似的结果。

向器逆转相应转子绕组中的电流方向（简单的直流-交流转换）。另一种更常见的交流转换方法是接触式换流器 → 1。这种换流器带有快速移动的机械触头（一种有效的 H 桥，但使用的是机械开关，而非阀门）。与电动发电机相比，接触式换流器存在一个显著的缺点，即交流输出的波形不是正弦波，而是矩形波。许多电力电子电路也存在相同的缺点。如本文随后将要讨论的，攻克这一难题将成为现代电力电子器件领域的一个重大转折点。

依靠机械开关的转换器仍然离不开适当的维护，这一点与与电动-发电机

标题图片
牵引应用中的二极管（1980 年前后）

早年的电力商业使用以不同配电技术之间的竞争为标志，其中最有代表性的是爱迪生的直流电与特斯拉的交流电之争——这场争论以后者的胜利而告终。虽然有大量的应用都适合采用交流电，但在有些情况下直流电仍然是不可或缺的，此时便需要一种将交流电转换成直流电的方法。该类应用包括电解（如用于铝的生产）、电池充电、无线通信以及电车、地铁和部分铁路的电气化，至今仍然是 ABB 业务的重要组成部分。数据中心和高压直流输电等新应用的加入进一步扩大了这一应用范畴。

从电气系统发展的早期开始，发明家们便在为交流电变直流电（整流），直流电变交流电（逆变）以及从固定输入产生可变输出（如变速驱动）寻找可用的方法。现在大部分的电力电子应用仍然可以归入这三大类。

交流-直流转换技术的前身是电动-发电机对拖系统（即固定在同一传动轴上的电动机和发电机）。这一原理逆向（直流-交流转换）仍然成立，还

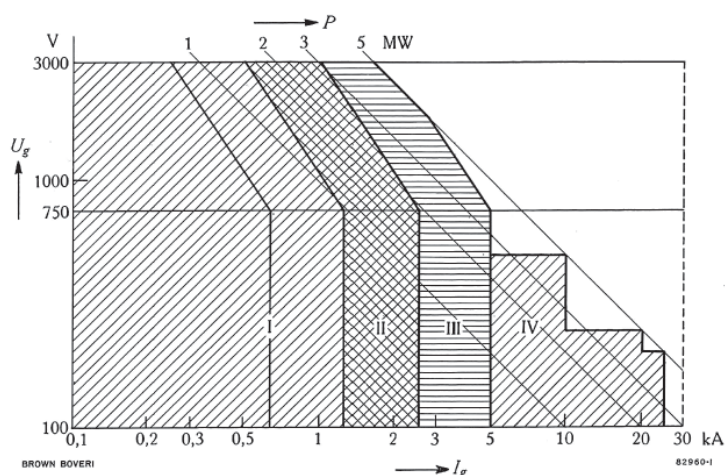
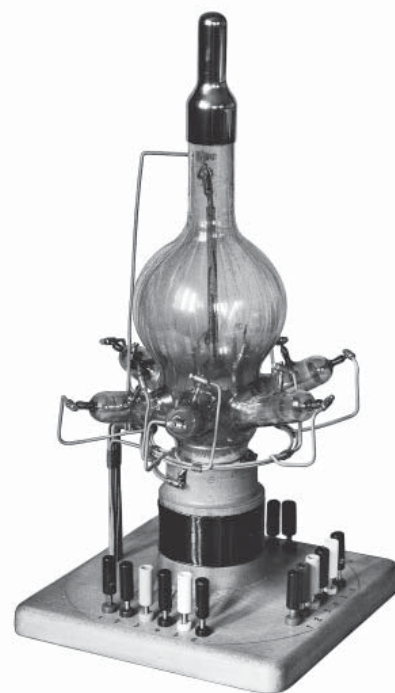


Fig. 10 — Graphical representation of load capacity of new Brown Boveri mutator range

U_g = D. C. voltage
 I_g = Direct current
 P = Output

I = Air-cooled, pumpless multi-anode mutators
 II = Air-cooled, pumped multi-anode mutators
 III = Water-cooled single-anode mutators
 IV = Contact converters

来源：T. Wasserrab，1955 年在巴登举行的换向器会议，入门讲座（BBC 曾公布会议文集）



全球第一条永久性商用高压直流输电线路是 ASEA 在 1954 年建立的，用于瑞典哥特兰岛与大陆之间的输电。

相同。而电力电子器件将脱离机械开关的限制，实现与其相似的结果。

尽管存在这些明显的缺点，接触式换流器的额定电流范围仍然超越了汞弧阀 → 2，而且其生产一直持续到可控硅换流器得到普及。

汞弧阀

19 世纪初，英国化学家和发明家 Humphry Davy 证明，当两个相互接触的通有电流的电极分开时会产生电弧，而电极之间的间隙中会有导电的等离子体（电离粒子气体）形成。等

离子体中的电离粒子重新组合时会发光，而电流所产生的热则会分解出新的离子（激发），并保持电弧。有趣的是，现代半导体开关的基础物理同样关注电荷载体的激发、运动和重组。

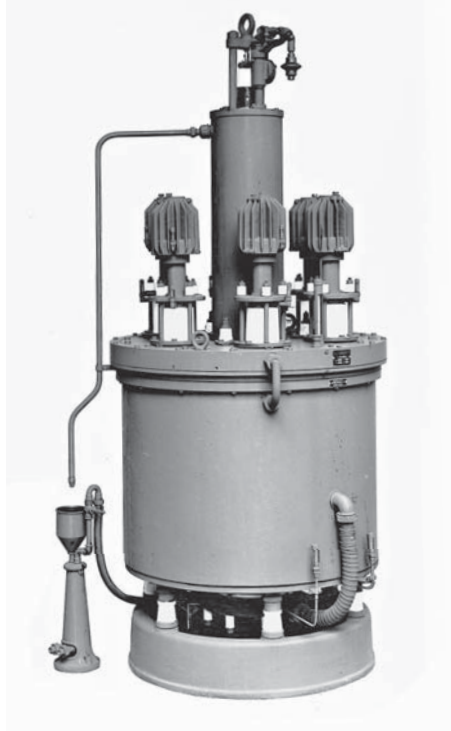
1902 年，美国发明家 Peter Cooper Hewitt 展示了一个含有汞蒸气的玻璃泡装置，玻璃泡内有一个汞电极和一个钢电极（随后改为碳电极）。这个装置的一个有趣的属性是电流可以从碳电极传导至汞电极，但不能反向传导。电弧一旦被点燃，汞池极易发射电子，但碳阳极不会发生任何明显的反应（在工作温度范围内）。汞蒸气被电弧点燃，汞阴极上发生的汞离子轰击产生了足够的热量继续维持其电子发射。汞弧阀和电力电子器件在此基础上诞生。1902 年，美国发明家 Peter Cooper Hewitt 展示了一个含有汞蒸气的玻璃泡装置，玻璃泡内有一个汞电极和一个钢电极（随后改为碳电极）。这个装置的一个有趣的属性是电流可以从碳电极传导至汞电极，但不能反向传导。电弧一旦被点

燃，汞池极易发射电子，但碳阳极不会发生任何明显的反应（在工作温度范围内）。汞蒸气被电弧点燃，汞阴极上发生的汞离子轰击产生了足够的热量继续维持其电子发射。汞弧阀和电力电子器件在此基础上诞生。

在随后数年里，许多发明家和公司都在努力改进这一整流原理，并实现其商业化。

汞弧整流器的制造

1908 年，匈牙利工程师 Béla B. Schäfer 开始着手为一家法兰克福公司 H & B (Hartmann & Braun) 研究汞弧阀，并于次年注册了专利——这是他众多专利中的第一个（他的首项专利旨在解决“在不影响气密性的前提下嵌入金属丝以穿透玻璃墙”这一难题）。H & B 是第一家供应整流器的德国公司（1911 年开始由法兰克福的一家制造厂代工）。由于 H & B 主要从事科学仪器的制造，对工业高电流应用知之甚少，为此，H & B 与瑞士的 BBC (Brown, Boveri & Cie) 在 1913 年联手成立了一家合资公司。



4a Zweiütschinen 电气化所使用的 HG 5/6 型阀门（1923 年）（420 A, 650 kW, 1,550 V, 重 1,700 kg）→5。



4b 采用钢制阀罐的大型汞弧阀。这一 2,500 A、2,000 kW 的汞弧阀产于 20 世纪 50 年代，重达 1,235 kg，高度超过 3 m。

1833 年，Michael Faraday 率先在硫化银中发现了半导体，但这种现象直到 20 世纪 30 年代初才得到完全解释。

新公司名为 GELAG (Gleichrichter AG)，位于瑞士的格拉鲁斯，主要负责研发工作，由 BBC 在瑞士巴登负责阀的制造。1916 年，BBC 将业务扩大到德国，在曼海姆开设了生产厂。1921 年，BBC 将该生产厂搬到位于德国 Lampertheim 的一个更大的厂房，并于同年收购了柏林的 Gleichrichter GmbH（成立于 1919 年），由此获得了第二家生产厂。

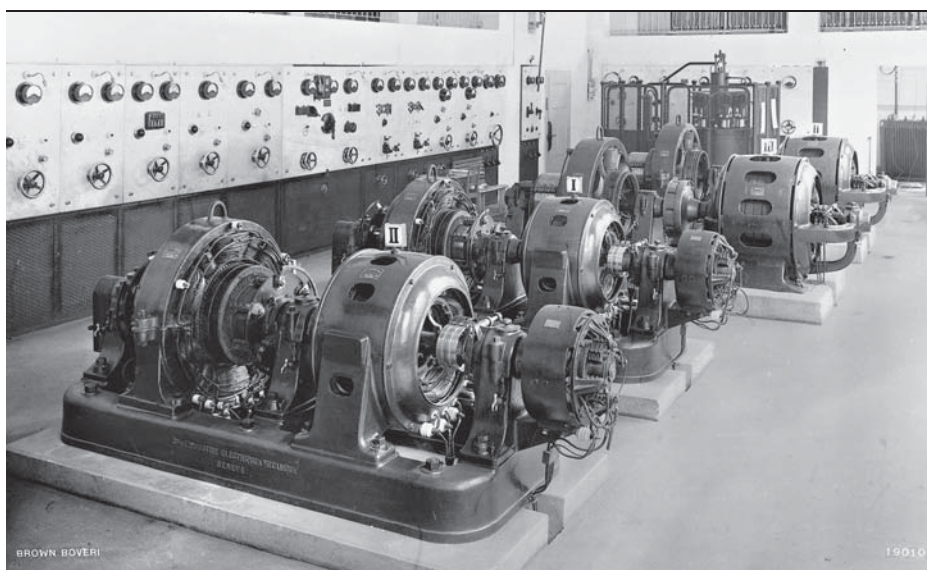
BBC 于 20 世纪 20 年代接手 H&B 在 GELAG 中的股权，并最终于 1939 年解散了 GELAG，将其经营活动纳入母公司。随后，H&B 加入 ABB 集团，成为 ABB 辉煌历史中的一份子：H&B 于 1995 年被 Elsig Bailey 收购，1999 年，Elsig Bailey 成为 ABB 旗下一员。

1921 年，Schäfer 离开 GELAG，开始了自己的顾问生涯。1927 年，他将阀的设计卖给了 ASEA (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget)，由该公司在瑞典路德维卡进行生产。构成 ABB 公司前身的三大公司由此获得了 Schäfer 在该领域的专业知识，并将其应用到旗下的产品中。

阀设计与应用

由于玻璃的导热性较差，阀的功率输出能力会受其表面面积的限制 → 3。随着额定功率的增加，钢制阀罐（带绝缘电

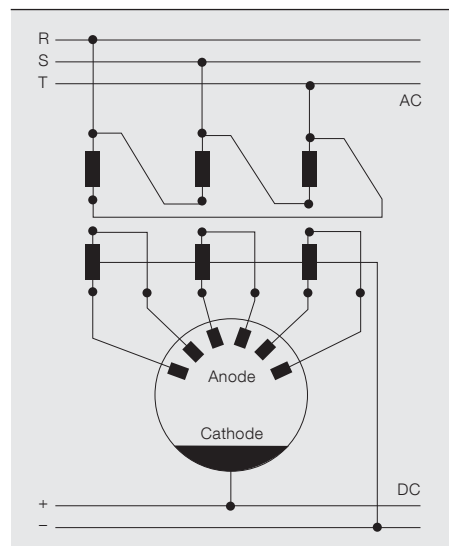
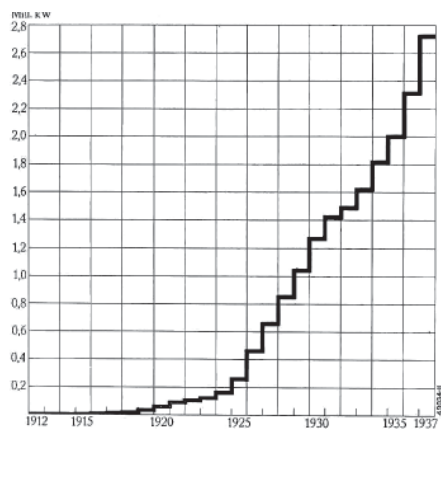
5 伯尔尼高原铁路电气化



伯尔尼高原铁路位于瑞士阿尔卑斯山的少女峰地区。1913 年，BBC 采用 1,550 V 的直流电对其进行了电气化改造，由电动机进行整流，并通过电池为直流电源供电。1920 年，BBC 建立了一台示范装置，用于展示其汞弧整流器技术，其中整流器与电动机并联运行。该示范装置使这条铁路获得了极高的效率和可靠性，在运行了两年零三个月后，于 1923 年被永久性的装置所取代。

这张照片拍摄自 1924 年的换流站，最近处为两台 220 kW 主电动机，其后为两台带有可控励磁的 48 kW 辅助发电机，最后方是一台独立的 650 kW 汞弧整流器。从照片中能够看出，这些设备大大降低了空间要求。

来源：伯尔尼高原铁路 Zweiütschinen 变电站的汞弧整流器机房。Brown Boveri Review, 1925 年 10 月刊第 214 页。



极) 逐渐取代了玻璃阀罐 → 4。汞弧阀市场的迅速发展带动了 BBC 生产的蓬勃壮大 → 5 – 6，确立了该公司在技术发展领域的领先地位。

简单的整流器电路如图所示 → 7。该电路相当于一个 H 桥，由带有 6 个阳极的一个机箱执行 6 个分立二极管的功能。

当工作温度保持在限制范围内，并且电弧未完全扑灭时，该类阀门可以持续运行。但是在没有等离子体的情况下，该类阀门不能独立启动，这便需要通过一个启动电极（需要向其施加高电压脉冲）来生成启动所需的电弧。对于实现选择性切换来说，在任意点及时触发传导的能力有明显潜力（到目前为止本文中所描述的阀门均为二极管）。这种可开关阀的开发始于 1930 年，是燃烧相位控制得以实现的重要因素（这些阀门的功能与现在的晶闸管相同——可以随意切换，但必须等到电流达到零时才能熄灭）。把它们连接到一个 H 桥中，就可以得到一个电网换相逆变器。由于“整流器”这一概念在该类新应用中越来越不适用，1934 年 BBC 将其阀门名称统一改为“水银整流器”。

实现了整流器和换流器的功能后，

BBC 为 1939 年的瑞士国家展览及贸易展览会建立了一条临时的示范线路。这一 500 kW、50 kV 的直流线路两端各设有一个换流站，使用单极电缆从 Wettingen 向位于苏黎世的公司展区传输电力，全长 25 km → 8（返回路径通过地面传导）。这条线路便是现今高压直流输电技术的雏形。

然而，真正意义上的第一条永久性商用高压直流输电线路是 ASEA 在 1954 年建立的，用于瑞典哥特兰岛与大陆之间的输电。

汞弧整流器的生产一直延续到 20 世纪 60 年代中期 → 9。汞阀最终被电力电子器件领域的另一革命性产品取代：半导体。半导体的优点包括功率密度和速度更高、重量更小且损耗更低，同时还避免了汞毒性方面的问题。

半导体

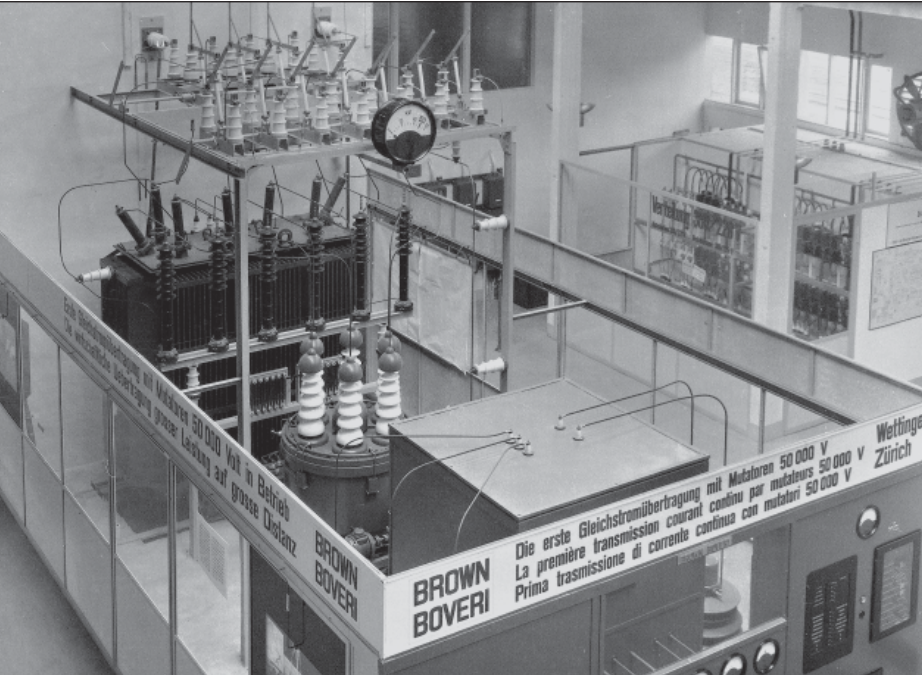
元素周期表中的元素一般分为金属和非金属两大类。在纯粹的形态下，金属导电，而非金属（大多数）不导电。有趣的是，非金属物质中有一组物质的导电性介于金属和非金属之间，这就是半导体材料，其中特性最突出的两种材料是锗和硅。此外，有些混合晶体也具有半导体特性，如碳化锑和碳化硅。

半导体最早发现于硫化银中。1833 年，Michael Faraday 在硫化银中发现了半导体，但这种现象直到 20 世纪 30 年代初传导能带理论出现后才得到完全解释。

为了提高半导体材料的导电性，需要有选择性地在晶体中掺入一些杂质。这些杂质的原子会占据晶格中原本由基底材料的原子所占据的位置。如果掺入原子的外层能带电子数量超过主体材料（n 型），那么“备用”电子便可以在晶体中自由运动，从而提高其导电性。如果掺入原子的外层能带电子数量较少（p 型），便会形成所谓的空穴。相邻原子的电子将占据这些位置，使空穴本身获得活动性，从而具备正电荷载流子的特性，也能够提高导电性。

以半导体器件中的二极管为例。在二极管中，同一晶体上的 p 区与 n 区相邻。电流可以从 p 区流向 n 区（即 p 区空穴中的电子向 p-n 结流动，n 区的电子流向 p-n 结流动，两种载流子在结处重新组合）。如果向其施加一个反向电压，结区的电荷载流子将耗尽，从而停止传导。

为了创建切换阀，研发人员亟需一种外部触发传导的方法。贝尔实验室于



1947 年研发出了史上第一个晶体管。这一晶体管通过一个电场来控制锗晶体中电荷载流子的可用性，即通过晶体管的电流由一个控制电压来主导。

晶体管的发明拉开了通信和数据处理领域快速发展的序幕，掀起了一场重大革命，这场革命的成果（及其持续发展）时至今日仍然发挥着重要作用。与此同时，电力电子器件领域也发生了一场半导体技术革命，虽然规模相比较小，但具有同样重大的意义。现今我们所采用的电力转化、控制和转换方法是几十年前所无法想象的。例如现在无处不在的数据和通信设备及其高度集成的微处理器芯片，如果没有电力电子电路传输动力、为电池充电并保持数据中心和通信链路正常运行（否则社交网络和其他在线服务可能无法正常工作），它们将无用武之地。同样，如果没有电力电子转换器来确保可靠和适当成本的电网连接，当下可再生能源的蓬勃发展以及随之而来的减排浪潮也将是无法实现的。

这一技术的成功是数十载发展的结

果。BBC 和 ASEA 开始半导体研发的时间都是在 1954 年前后，BBC 的首个整流二极管（额定电压 100 V，额定电流 100 A）于 1956 年面市。这些整流二极管和其他早期的半导体使用锗制成¹，但是随后人们发现由于阻断电压和温度方面的限制，该材料并不适合用于电力应用。因此，这一材料很快被硅所取代。

晶闸管

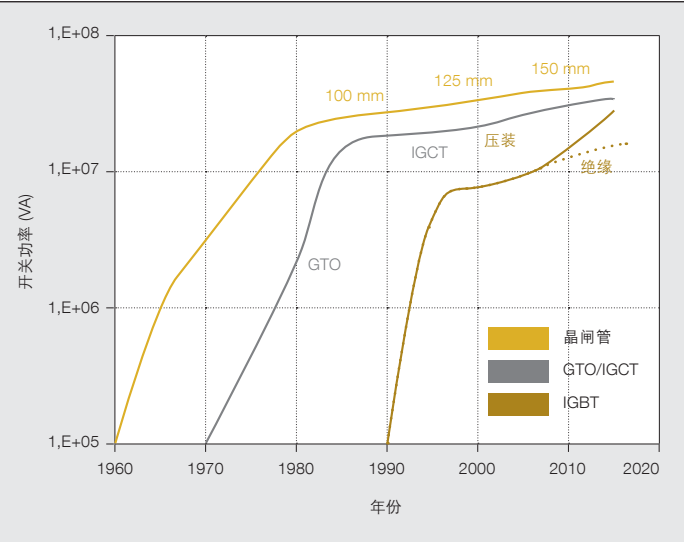
模拟放大器中的晶体管应用（如无线电设备和电信设备中）已经为人所熟知，但电力电子器件的需求是与众不同的：在理想条件下，开关最好是非开即关，并且应尽可能缩短切换时的过渡阶段。这是因为器件中的损耗以及由此所产生的热是电流和电压的乘积，因此电压或电流其中之一越趋近零越好——一方面可以节能增效，另一方面还可以防止设备热损坏。

模拟放大器中的晶体管应用（如无线电设备和电信设备中）已经为人所熟知，但电力电子器件的需求是与众不同的。

脚注
1 有些制造商使用硒。

1913	BBC 在巴登拉开了汞弧整流器生产的帷幕
1915	BBC 为 Limmattal Strassenbahn（苏黎世地区的缆车）提供静止整流器
1921	德国 Lampertheim (BBC) 工厂开始投产
1924	Dällenbach 和 Gerecke (BBC) 提出了开关理论
1928	ASEA 在瑞典路德维卡的汞弧整流器生产拉开帷幕
1938	BBC (Mannheim) 为机车安装了整流器（在德国进行 50 Hz 电气化试验运行）
1939	BBC 在韦廷根 – 苏黎世试验线路上证实了直流输电的可行性 →8
1954	BBC 首个锗二极管诞生
1954	首条商业化的高压直流输电线路——哥特兰岛输电线路建成 (ASEA)
1960	BBC 的首个晶闸管问世
1961	英法两国之间穿越英吉利海峡的高压直流输电线路建成 (ASEA)
1964	BBC 首次为机车安装硅二极管整流器（Re 4/4，用于 BLS）（瑞士）
1967	首列安装 ASEA 晶闸管整流器的机车问世（Rc 用于瑞典铁路）
1970	太平洋联络线完工，这条连接 Celilo（俄勒冈州）和 Sylmar（南加州）的高压直流输电线路是使用汞弧阀的最后一个重大项目
1971	Lampertheim 工厂开始制造半导体 (BBC)
1973	BBC 在瑞士 Dättwil 的研发中心开幕
1979	Cabora Bassa – Johannesburg 高压直流输电线路建成（BBC 与 AEG 和西门子合作建设）
1981	瑞士伦茨堡工厂开始制造半导体 (BBC)
1984	伊泰普 – 圣保罗高压直流输电线路建成 (ASEA)
1987	BBC 首列使用 GTO 转换器的机车问世（为瑞士 BT 和 SZU 开发）
1988	BBC 与 ASEA 合并成立 ABB
1993	BIMOS 的开发工作拉开序幕
1996	IGCT 生产启动
1998	BIMOS 生产线在伦茨堡投产
2004	中国的三峡高压直流输电项目建成
2010	收购捷克共和国的 Polovodice
2010	伦茨堡的新半导体工厂开幕
2012	BIGT 平台问世
2012	ABB 推出混合断路器
2013	位于 Dättwil 的全新半导体研究设施开工
2013	ABB 迎来电力电子器件业务百年纪念

10 三种主要类型的功率半导体器件开关功率的发展趋势



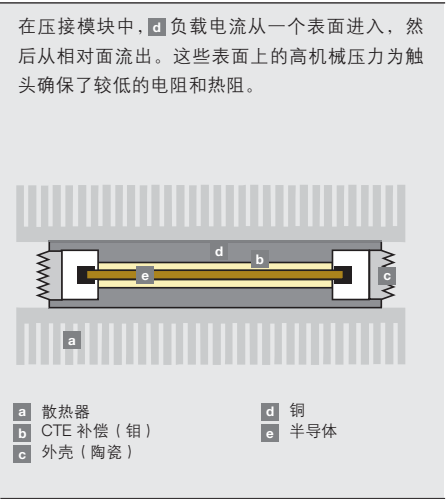
11 伦茨堡是 ABB 半导体经营活动的核心。右侧为全新的 BiMOS 厂房



12 伦茨堡的半导体制造



13 压接装置截面图



同的：在理想条件下，开关最好是非开即关，并且应尽可能缩短切换时的过渡阶段。这是因为器件中的损耗以及由此所产生的热是电流和电压的乘积，因此电压或电流其中之一越趋近零越好——一方面可以节能增效，另一方面还可以防止设备热损坏。

从 1960 年到 1980 年，单件器件的最大阻断电压和功率处理能力大致以线性方式增加，从 1960 年的几乎为零一路增长至 1980 年的 6,000 V 和 600 kW → 10。

门极可关断晶闸管 (GTO)

GTO 的生产始于 20 世纪 80 年代中

期。GTO（门极可关断晶闸管）是一种可以通过向栅极施加一个与接通电流方向相反的电流进行关断操作的晶闸管。无需人为电压过零进行关断的器件生产能力帮助扩大了功率半导体的应用范围，并由此衍生出 DC-DC 转换器和自换相逆变器先进器件。此外，AC 半波中的多个开关周期还可以减少 AC 输出中的矩形波。GTO 会通过改变电流脉冲宽度来调节所需波形，从而减少谐波。

半导体的生产

BBC 早期的半导体生产由瑞士 Ennetbaden 工厂负责。20 世纪 60 年代后期，BBC 在 Lampertheim 建立

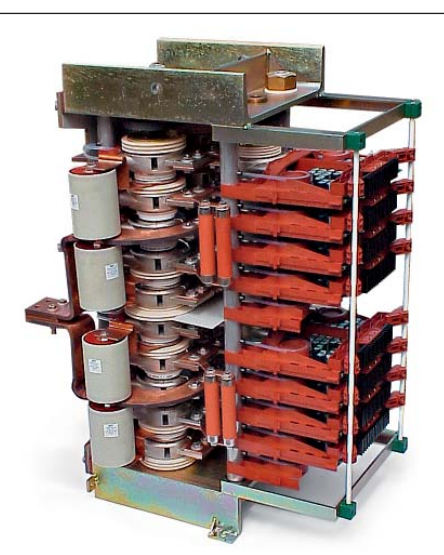
了一家现代化的半导体工厂，期望将所有的半导体生产集中到此地。但事与愿违，Ennetbaden 工厂的一部分生产（大多为开发活动和试生产，但也有一小部分的生活动）迁到了瑞士比尔工厂，并最终于 1981 年转移到了瑞士伦茨堡的新工厂。

1988 年，ASEA 与 BBC 合并成立了 ABB，随后将 Lampertheim 工厂转手给 IXYS，并关闭了 ASEA 位于瑞典韦斯特罗斯的工厂，将所有生产活动都集中到了伦茨堡。ASEA 的强项是生产带有负斜角设计的晶闸管和整流器元件，而 BBC 则以二极管、GTO 和晶闸管技术见长。两者的业

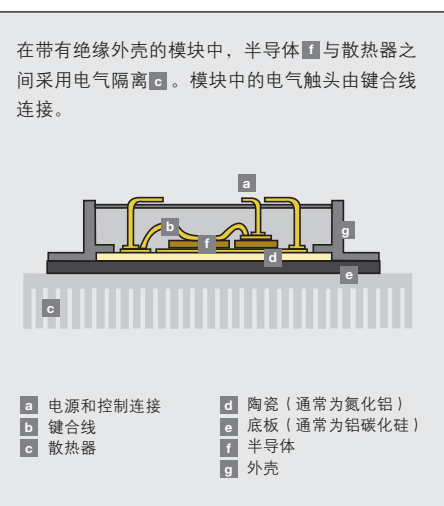
14 不同直径的 GTO



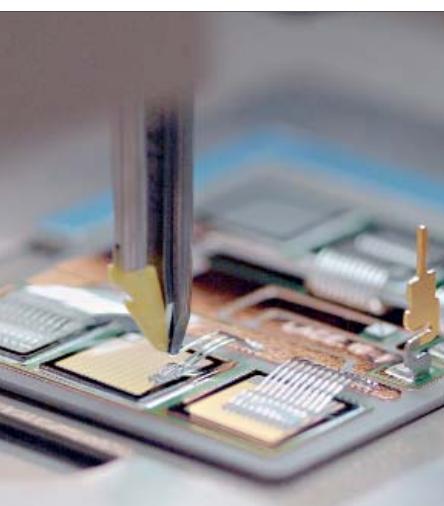
15 采用堆叠安装并带有门极单元和冷却元件的 GTO



16 Hi-Pak IGBT 模块的截面图



17 IGBT 芯片连线的焊接



务虽然存在一定的重复，但不同的应用范畴形成了强势互补。

当时，ABB 并未将半导体的生产作为一项独立业务，而是将其用作传动或高压直流输电等其他产品领域的辅助技术。因此，产品开发及投资的驱动力主要来自于 ABB 的其他业务需求。在 Anders Nilarp 受命领导 ABB 半导体业务后，这一形势很快得到扭转。他成功实现这一业务的转型，以独立的企业形式与外部市场中的其他半导体厂商直接竞争。除此之外，他还不断鼓励员工，赋予员工充分的决定权，以充满魅力的领导方式改变了伦茨堡工厂的运作。1995 年，伦茨

堡工厂入围欧洲质量奖，并于 1996 年被通用电气授予“年度最佳供应商”大奖。

绝缘栅极型功率管 (IGBT)

Nilarp 最伟大的成就是建立了新的 BiMOS 工厂。该厂于 1998 年在伦茨堡成立，专门从事绝缘栅极型功率管 (IGBT) 的制造。IGBT 的引进不仅标志着制造工艺复杂性和相关技术方面实现了质的飞跃，还意味着器件性能和能力从此迈上了一个新台阶。IGBT 这一功率半导体器件采用电压控制取代了电流控制——由此还降低了门极单元（通过门极进行开关操作的外部驱动装置）的功率和空间要

求，为开发更小巧轻便的转换器创造了条件。此外，IGBT 的内部性能比 GTO 更稳定，减少了对保护电路的依赖，并且运行速度更快，能够达到更高的开关频率。

集成门极换流晶闸管 (IGCT)

为了使硬开关能力达到更高的功率等级，ABB 于 20 世纪 90 年代中期率先推出了 IGCT（集成门极换流晶闸管）。这一全新器件是在 GTO 技术的基础上发展而来，开关速度远远超越了传统的 GTO。其中，一个集成式低电感门极单元为该器件提供了有力支撑。当时，其他制造商认为 GTO 已经没有发展潜力，相继放弃了 GTO



研发，因此这一研发成果一经问世便获得了举世瞩目。

2010 年，ABB 收购了捷克的半导体公司 Polovodiče，进一步扩大了市场占有率。该公司随后成为 ABB 的第二个生产基地（位于布拉格）。与此同时，伦茨堡工厂通过增建厂房进一步扩充了产能 → 11。

制造与设计

半导体的制造是一个高度敏感的过程，必须采用杂质含量极低的超高品质硅基材料。添加必要的 p 型或 n 型材料（掺杂）是一个极为精细的过程，需要正确的时间和温度。因此，制造过程必须在洁净间内进行，同时要对空气进行严密控制，以将污染限制在最低水平 → 12。

大多数尺寸较大的半导体器件（包括晶闸管、GTO、IGCT）都采用一种所谓的“自由浮动式”外壳。其中，硅片密封在一个带有铜触头的陶瓷外壳中 → 13 - 14。这些触头必须通过施加外力将其压在硅片上，以保证最佳的导电和导热性能。为确保外力起作用，器件采用堆叠装配 → 15，每个堆叠中散布多个冷却单元。当发生故障时，器件将形成短路——这也是它们的一大设计特点。由串联器件构成的标准堆叠将由此获得一部分冗余，在下次定期维护之前保持正常运行。

IGBT 的引进背离了这种传统方法。IGBT 模块使用大量的小芯片取代了大面积晶片。触头连接线直接焊接在芯片上 → 16 - 18，消除了堆叠内的压装需求，从而简化了转换器的组装过程，同时减轻了器件重量并降低了空间要求，在维护期间更换单个模块更为便捷。不过，在必要时 IGBT 也可采用压装外壳，如用于高压直流输电等应用 (StakPaks) 时 → 19。

双模式绝缘栅晶体管 (BIGT)

双模式绝缘栅晶体管 (BIGT) 是 IGBT 家族的最新成员，以高度节省空间的方式实现了逆向导通二极管的集成（有关 BIGT 的详细内容参见本期《ABB 评论》第 19 - 23 页）。BIGT 是 ABB 近几十年来最重大的成果——混合电路断路器中的重要元件之一（详见第 6 - 13 页）。

混合电路断路器是为半导体器件探索全新出路的又一范例。电力电子器件的应用范围将以几年之前难以想象的速度迅速扩大。

特此鸣谢：Björn Backlund、Jürgen Bernauer、Christoph Holtmann、Norbert Lang、Munaf Rahimo、Marco Rossinelli 和 Adriaan Welleman。

Andreas Moglestue

《ABB 评论》

瑞士苏黎世

andreas.moglestue@ch.abb.com

其他阅读材料

H. R. Zeller, “赢得大奖的芯片：ABB 功率半导体发展历史”，《ABB 评论》2008 年第三期第 72-78 页

S. Linder, “功率半导体：第一部分，基础与应用”，《ABB 评论》2006 年第四期第 34-39 页

S. Linder, “功率半导体：第二部分，外壳技术与未来发展”，《ABB 评论》2007 年第一期第 62-66 页

E. Anwand, A. Kloss, 75 Jahre BBC-Leistungselektronik, Elektroniker Nr. 11/1988

R. Wetzel, Die Geschichte des Quecksilberdampfgleichrichters bei BBC Deutschland 1913-1963,

PhD thesis University of Stuttgart, 2001

L. Haglöf, P. Danfors, HVDC Veterans Presentation, Visby Gotland, 2004.

Schiesser, 25 Jahre Brown Boveri Mutator, Brown Boveri Mitteilungen 5/6 1938

《ABB 评论》编委会

Prith Banerjee

首席技术官兼执行副总裁

Clarissa Haller

ABB 集团企业传播负责人

Ron Popper

ABB 集团可持续发展事务负责人

Eero Jaaskela

ABB 集团战略客户负责人

Andreas Moglestue

《ABB 评论》主编

出版人

《ABB 评论》由 ABB 集团研发和技术部门出版。

ABB 技术有限公司

《ABB 评论》

Affolternstrasse 44

瑞士苏黎世 CH-8050

abb.review@ch.abb.com

《ABB 评论》每年出版四期，以英文、法文、德文、西班牙文、中文和俄文出版，免费提供给对 ABB 技术及其目标感兴趣的人士。欲免费订阅《ABB 评论》，请与您最近的 ABB 办事处联系，或者上网订阅：

www.abb.com/abbrevreview

部分印刷或复印需经认可。再版需经出版人书面同意。

出版人和版权 ©2012

ABB 技术有限公司

瑞士苏黎世

《ABB 评论》中文版

主编

毛旭之

本期责任编辑

康科、余明

审校（按姓名笔画排列）

谷帅、陈刚、王浩、叶莺、王文勇、杨宝春、杨晓波、冯海清、项英桐、侯攀科、曾硕巍

联系方式

editorial.cnabb@cn.abb.com

声明

所载资料只反映了作者的看法，仅供参考。读者不应该在未征得专业意见的前提下照搬行事。在此我们声明，作者不提供任何技术方面的咨询和建议，也不就具体的事实或问题承担任何责任。对文中有关内容的准确性以及所表达的观点，ABB 公司不做任何担保、保证以及承诺。本刊已翻译成中文，如有疑问，所有表述以英文版本为准。

ISSN: 1013-3119

www.abb.com/abbrevreview



下期预览 3|13

仿真

随着技术向更高精密度推进，系统的复杂性不断增加，组件之间的交互范围不断扩大，测试工作所面临的挑战也将急剧增长。虽然仿真不能完全取代测试，但在很多情况下，仿真可以节省时间和成本（以及避免潜在的危险情况）。通过仿真，我们还能够更好的了解生产过程，从而实现更高级别的优化。计算机能力的提高和算法的进步意味着我们可以对越来越多的系统进行仿真。除了为设计和工程提供支持外，仿真还可用于操作人员培训以及假设情况分析。

《ABB 评论》2013 年第三期将以仿真为主题，向读者们展示 ABB 如何通过使用和发展这项技术，向客户更及时地提供高质量的系统和解决方案。

了解最新资讯...

您是否曾因故错过最新的《ABB 评论》？为了避免这种情况，我们现在为您提供了一种简便的方法，使您在每期《ABB 评论》（或专题报告）出版时都能收到提醒通知。您可以通过 <http://www.abb.com/abbrevreview> 网站注册使用《ABB 评论》提醒功能





有效利用风能？

当然能实现。

如何将风能转化为电能，有效并入电网，并保证网络可靠运行是我们面临的重要挑战。应对这一挑战需要更加灵活和智能的电力系统，以平衡用电需求和发电的不可预见性及间歇性。ABB 轻型高压直流技术在该领域扮演着重要角色，使电力的长距离传输、跨境联网、陆地和海底输电成为可能，在提供可靠优质电能的同时将损耗降到最低。了解更多信息，请登录 www.abb.com/hvdc

用电力与效率
创造美好世界™

