支持密封型高压接触器开发的仿真技术

Simulation Technology Supporting Development of Sealed High-Voltage Contactors

坂田　昌良 SAKATA, Masayoshi　　竹本　贵纪 TAKEMOTO, Takanori

富士电机开发出了可支持电池高输出、大容量化，且具备耐高过电流的车载用密封型高压接触器。高压接触器通过将触头配置在密封容器胶囊内，再封入分断性能良好的气体，以小型实现了大容量的开关性能和分断性能。通过在电磁场、导热、热等各种分析中有效运用仿真技术的分析主导型开发，不仅可预先判断是否有实现的可能性，同时还提升了产品的性能和可靠性。

Fuji Electric has developed a sealed high-voltage contactor for automotive applications that has a high overcurrent withstand capability to deal with high-output and large-capacity batteries. The high-voltage contactor achieves high-capacity switching and breaking performance despite its compactness because its contacts are arranged inside a sealed capsule container filled with a gas of good breaking performance. By conducting analysis-driven development that effectively utilizes simulation technology for various types of analysis, such as electromagnetic field, heat conduction and thermal analysis, we were able to determine feasibility in advance and implement a design that improves product performance and reliability.

1　引言

富士电机开发了支持电池高输出、大容量化，且具备耐高过电流的车载用密封型高压接触器。这种接触器通过将触头配置在密封容器胶囊内，再封入分断性能良好的气体，可以小型实现大容量的开关性能和分断性能。

开发高压接触器之际，要实现胶囊内触头的开关以及考虑到车载用途的环境性能等，除了在接触器方面积累的技术和知识经验外，还必须在新的技术领域进行开发。

现在，受配电、开关、控制设备组件利用电脑的仿真技术，可在计算机上再现性能评价的多个项目[1]。这里的仿真技术是指，根据有限元法实施的结构强度分析、热传导分析、振动分析、电磁场分析、数值流体分析，将这些分析结合起来，还能再现更复杂的现象。因此，在开发高压接触器时，富士电机通过有效运用仿真技术，提升了产品性能和可靠性。

2　技术课题与仿真技术

高压接触器的开发，存在密封容器胶囊结构导致的技术课题，以及基于接触器进一步小型化和高可靠性化要求的技术课题等。

图 1 中展示了要达成各种性能所需解决的技术课题，和这些课题相对应的仿真分析领域。高压接触器的技术课题种类众多，分析领域涉及的范围也很广，包括电磁场、热、振动等。

富士电机针对高压接触器实施了分析主导型开发，即为解决这些技术课题，预先实施仿真，判断是否具有可行性，然后针对有效的创意开展试制试验。

此外，还将试制试验中得到的结果与仿真进行比较，背离时，则创建模型或调整极限条件，从而提升了仿真的精度。

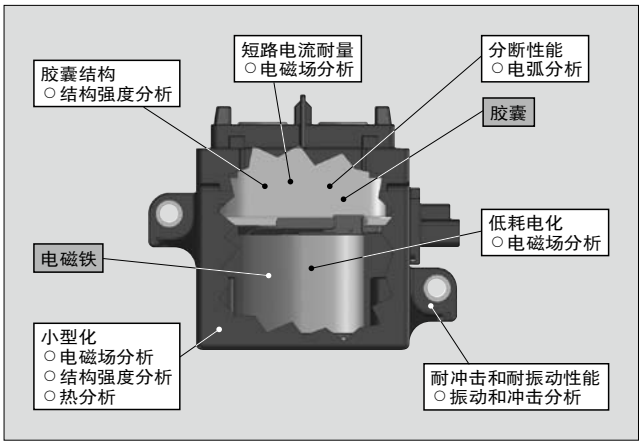

图 1　高压接触器的技术课题和相对应的仿真分析领域

3　仿真的适用事例

3.1　通过电磁场分析提升短路耐受性能

要提升短路耐受性能，必须确保即使有短路电流流过，触头也不会弹起。若触头弹起，大电流电弧可能导致胶囊爆炸。

在开发的初期阶段，富士电机通过电磁场分析，针对各种触头，就电磁斥力会增大到何种程度进行了研究讨论（**图 2**）。最终确认到コ型平面板的结构可将电磁斥力抑制在极小程度，于是，以这一结构推进了开发。

另外，关于触头结构，通过电气－导热计算，除电磁斥力外，还预测了有过电流流过时，需要多少时间触头会熔融、熔焊等。通多实施这些仿真，在确保必要最低限度的触头接触压力的基础上，实现了非常高的过电流耐受性能。

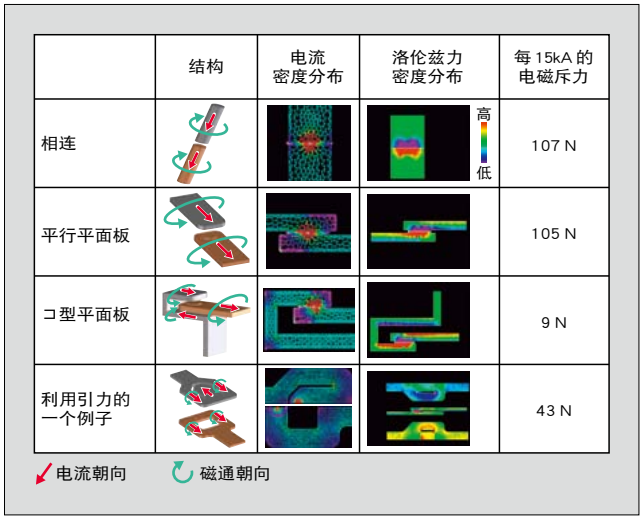

图 2　触头结构和电磁斥力

3.2　通过导热和电磁场分析实现了有极电磁铁的高效化

在车载领域，除了小型化，还要求产品具有耐冲击性和耐振动性，因此，富士电机的高压接触器采用了使用永久磁铁的有极电磁铁。永久磁铁受温度影响特性会发生显著变化，因此，必须事先确认温度与动作特性的相关性。由于车载领域的使用温度要比一般产业领域高出很多，所以相比产业用接触器，更容易出现高温问题。因此，在进行电磁铁特性的仿真时，考虑电气和磁性特性对温度的依赖性，对于提升预测精度非常重要。

此次开发时，富士电机将通过电气－导热分析求得的高压接触器的温度反馈到电磁场分析中，实现了对高温状态下电磁铁特性的评价（**图 3**）。

而关于导热分析，则提升了分析模型的预测精度。**图 4** 中展示了分析结果与实测得到的端子间电阻和温升的关系。基于这一结果，富士电机考虑了影响温度的主端子间电阻、控制线圈电压和电阻等的差异，实施了评价。

为确认即使处于最差的条件组合时也能满足性能，预测了影响电磁铁特性的控制线圈和永久磁铁的最差温度。基于这一温度结果，通过电磁场分析，设定控制线圈的电阻和永久磁铁的磁性，就能高精度地评价高温时的电磁铁特性。

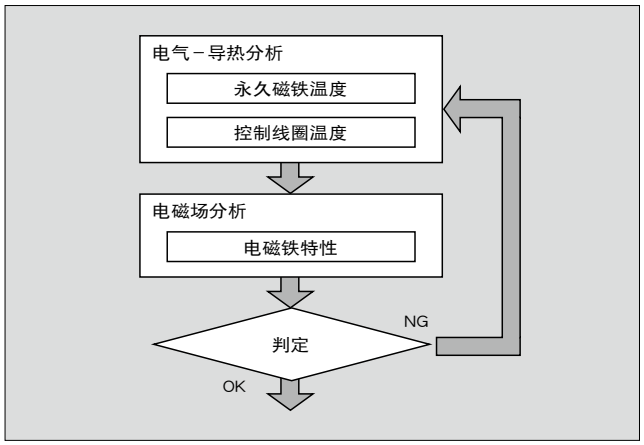

图 3　高温时电磁铁特性的评价

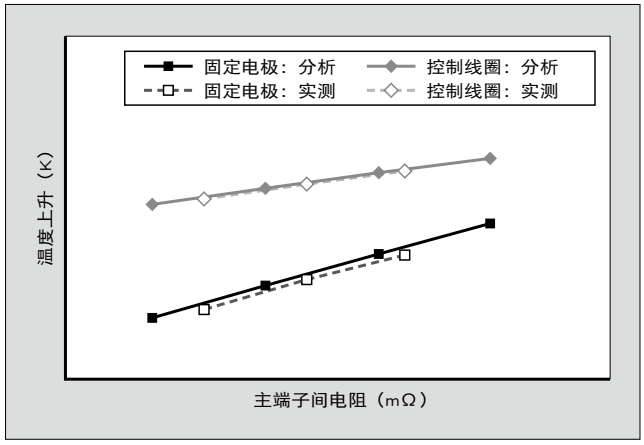

图 4　端子间电阻和温度上升的关系

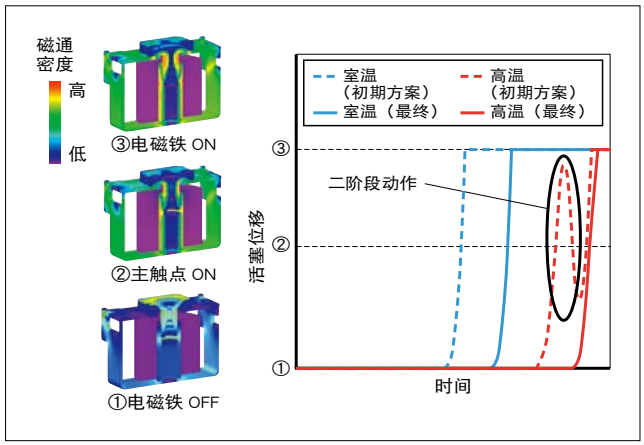

图 5　电磁铁部的磁通密度分布和动作特性

图 5 中展示了室温时和高温时电磁铁部的磁通密度分布和动作特性。富士电机在仿真过程中发现，以初期方案进行时，室温条件下电磁铁部正常动作，但高温时由于引力不足，发生了二阶段动作，无法正常动作。为找到改善对策，富士电机着眼于磁通密度分布，对处于磁饱和状态的固定柱塞的磁路截面积进行了优化。最终确立了高温时也能正常动作的高效电磁铁。

3.3　通过振动分析提升耐振动性

一般而言，产业用接触器的共振频率只需设定在 100 Hz 以上，但用于车载时，必须设计在 200 Hz 以上。通过特征值分析计算，可获得共振频率。但特征值分析原则上不能应对材料的粘弹性等非线性问题。外壳中使用的树脂材料是粘弹性材料，弹性系数会因成形时树脂的方向、振动速度和振幅、温度依赖性等而变化，因此难以预测。在此次开发中，富士电机从初期结构方案的振动试验中确认了共振频率，又反向计算了杨氏模量，使这一数值与计算值一致，从而提升了精度。

图 6 中展示了振动响应的比较。**图 6** (a)是以初期结构方案为基础，确定了材料物性、衰减值后使振动响应一致的结果。对于结构变更，通过振动模式的变动实施了对策。

最终结构方案的结果如**图 6** (b)所示。可以看出，相对于初期结构方案，通过追加塑壳边缘等，使固有频率增至

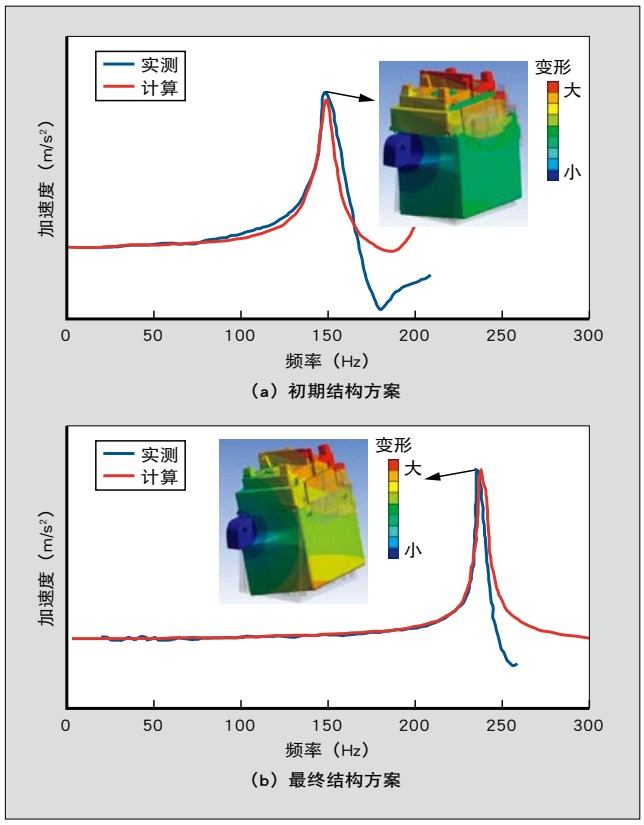

图 6　振动响应的比较

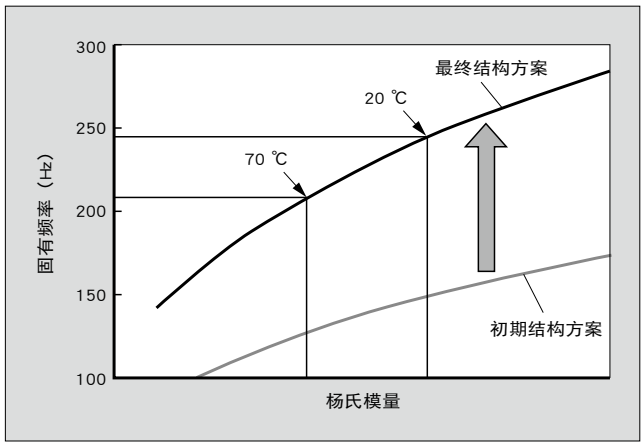

图 7　杨氏模量与固有频率的关系

240 Hz，增加了耐振动性。这一结果是室温状态下的特性，如**图 7** 所示，富士电机考虑了环境温度变化情况，确认在 200 Hz 以上可避开共振频率，从而确定了最终结构。

像这样，根据振动振幅、频率切实确定树脂材料的物性值，可更加精确地预测振动响应。

3．4　通过热应力分析提高胶囊结构品质

高压接触器如何确保胶囊结构的气密性是重要的技术课题。

图 8 中展示了胶囊结构中的电极接合部。这一胶囊结构是由陶瓷以及铜、铁等不同材料构成的，并通过钎焊或激光焊接等接合。因此，必须预先对接合时发生的残余应力导致的强度下降或破损、热循环的热应力作用下的疲劳强度进行评价。

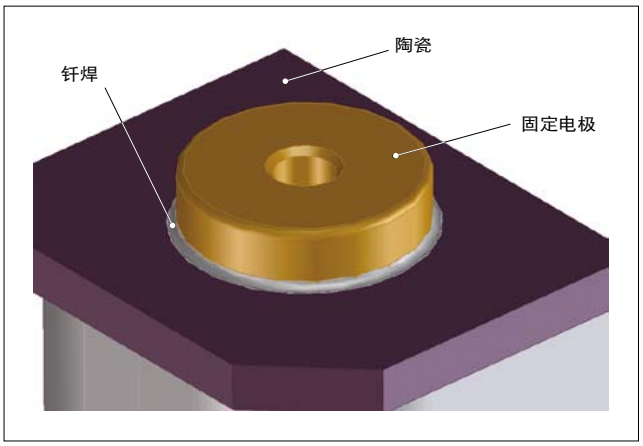

图 8　胶囊结构中的电极接合部

关于接合部的强度评价，富士电机通过热应力分析，计算接合部发生的残余应力以及热循环的应力振幅，从而推测了疲劳寿命。

在热应力分析中，分 2 个阶段对分析模型进行了计算。在最初步骤，模拟钎焊接合的情况，对从焊料固化的 780 ℃到 25 ℃进行计算。之后，维持这一应力状态，将胶囊下部顶轭和法兰盖的模型接合，在这一状态下，对胶囊内部施加压力，考虑了达到热循环时的温度反复情况，进行了热应力分析。连续实施这一过程并进行计算，从而得到有残余应力作用状态下的正确应力振幅。**图 9** 中展示了计算步骤和当时钎焊部发生应力的计算例。

要预测寿命，就必须通过比较分析得到残余应力、应力振幅与 S-N 曲线。关于焊料的 S-N 曲线，我们考虑残余应力制作了测试片，通过疲劳试验获得了数据（**图 10**）。

基于这一结果，就分析得到的残余应力、应力振幅是否满足规格所要求的重复断裂次数进行了判断。

3．5　通过电弧分析实现无极性分断

富士电机通过研究触头开关时发生的电弧动作，开发了将电磁场与热流体结合起来的电弧仿真技术[2]，且一直将这一技术用于多种产品。

高压接触器为胶囊结构，因此，相比其他开关设备，观察内部电弧非常困难。而测定可获得的信息只有电弧电压和电弧电流等，难以判断电弧是如何动作的。

在电弧分析中，可进行包括永久磁铁外部磁场的计算，也可同时对触头材料、内部气体特性以及内壁材料产生的气体的影响等进行探讨。并且，可目测判断电弧动作，因此，在开发的初期阶段采用这一技术，对于确定分断结构的方向性发挥了重要的作用。

高压接触器凭借永久磁铁的磁场拉伸电弧，从而提高电弧电压、实现分断。

图 11 中展示了磁铁配置和电弧的伸长方向。为**图 11** (a) 时，永久磁铁的磁通呈并行状态，因此，根据弗莱明的左手定则，从左电极进入的电流将延伸到胶囊的左侧端部。但如果电流反向流过，电弧将延伸到中央，无法获得充分的电弧长度。

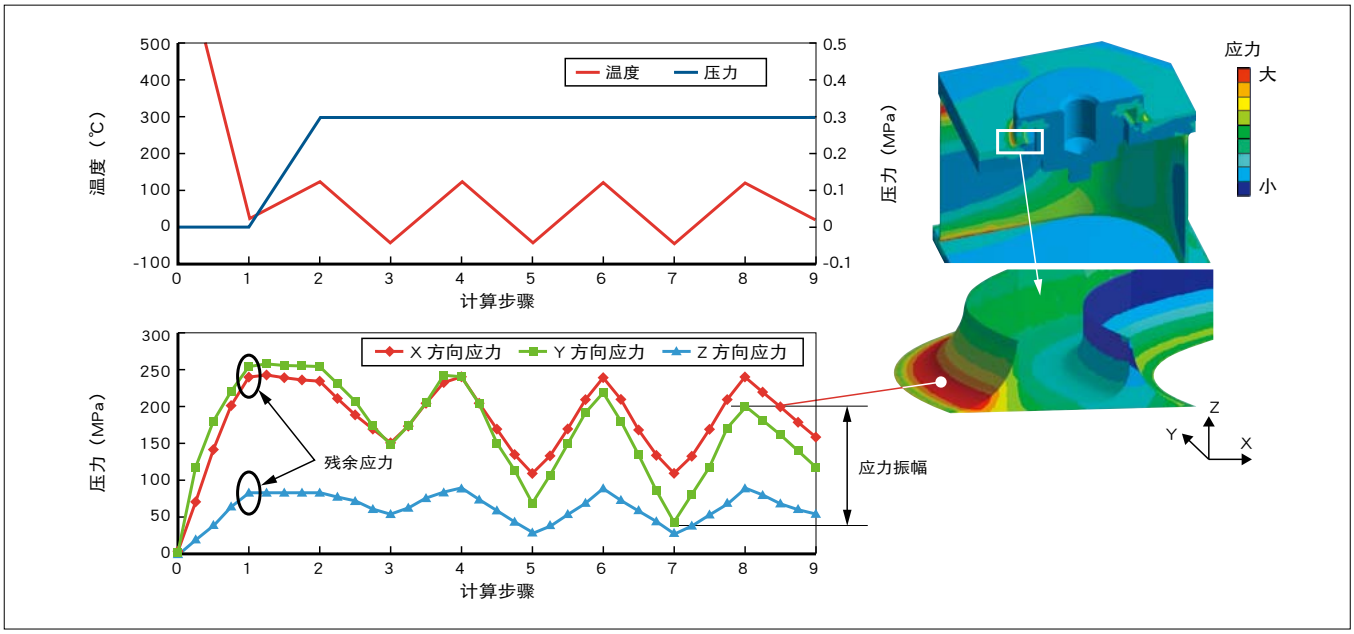

图 9　热应力分析结果例

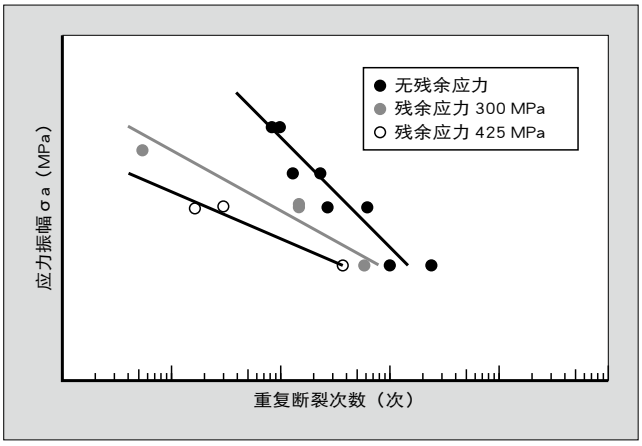

图 10　焊料的 S-N 曲线

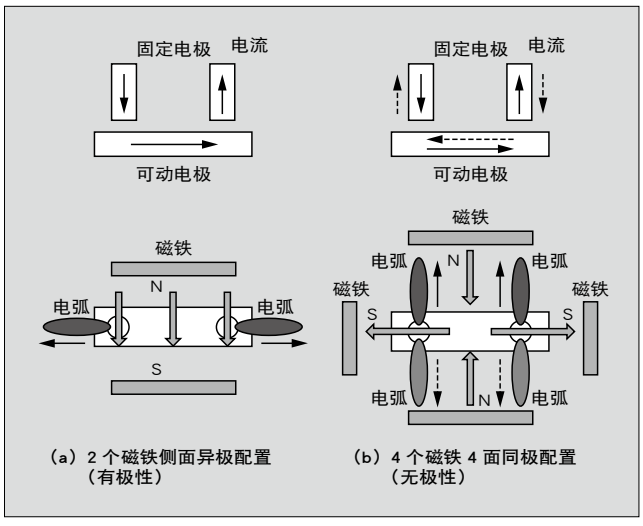

图 11　磁铁配置和电弧伸长

富士电机为应对车载急速充电电路，开发了如**图 11**(b)所示的磁铁配置，以确保无论电流流向哪个方向都能进行分断。在开发的初期阶段，确认了能否以仿真再现这一磁铁配置和电弧延伸。**图 12** 是对**图 11**(a)的磁铁配置下分断所做的分析结果。与实验测量到的电弧电压、电弧电流基本一致，确认了仿真可再现电弧动作。

图 13 是根据消除极性的**图 11**(b)的原理创建的模型。关于磁铁配置，通过电磁场分析，根据磁通分布和矢量探讨了最佳配置。

图 14 中展示了无极性模型的电弧分析结果。从计算结果预测到电弧长度、电弧电压将和目标一致，在对试制品进行的实验中，得到了几乎相同的特性。

通过电弧分析可把握电弧动作，因此，如**图 15** 所示，电极形状不同会使电弧的停滞出现差异等。并且，通过观察蒸发气体的动作，还发现电弧再点燃是受到金属蒸汽滞留的影响，扩大胶囊内部的空间可扩散触头附近的金属蒸汽，另外，外部磁场的强度和触头材料的不同会使初期的电弧速度出现差异等。富士电机基于上述仿真结果，确定了分断结构

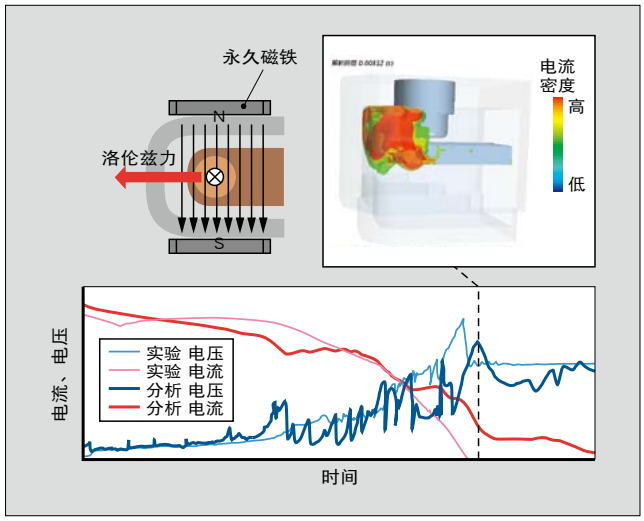

图 12　平行磁场、有极性时的电弧分析结果例

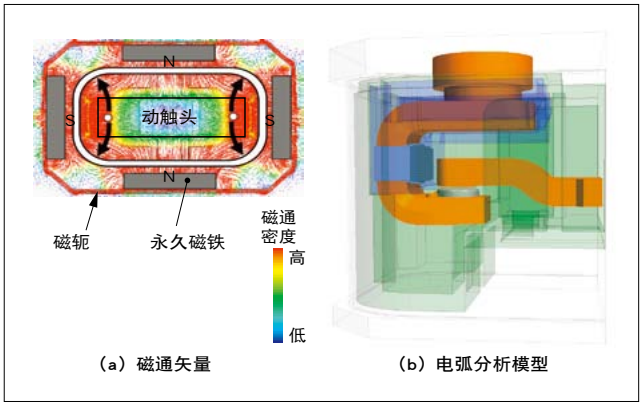

图 13　无极性模型的电弧分析模型

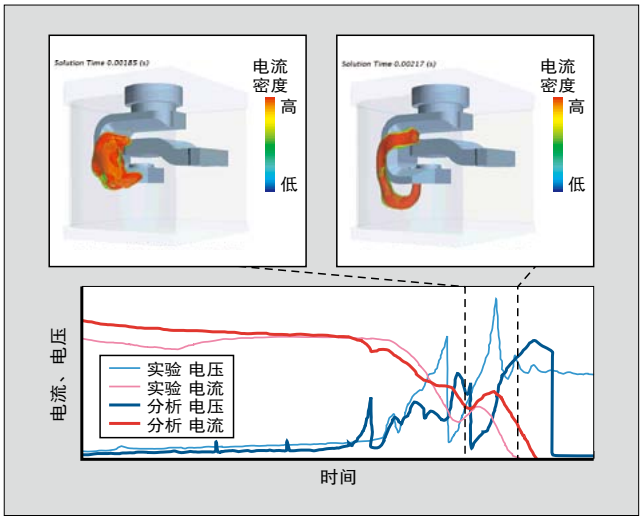

图 14　无极性模型的电弧分析结果例

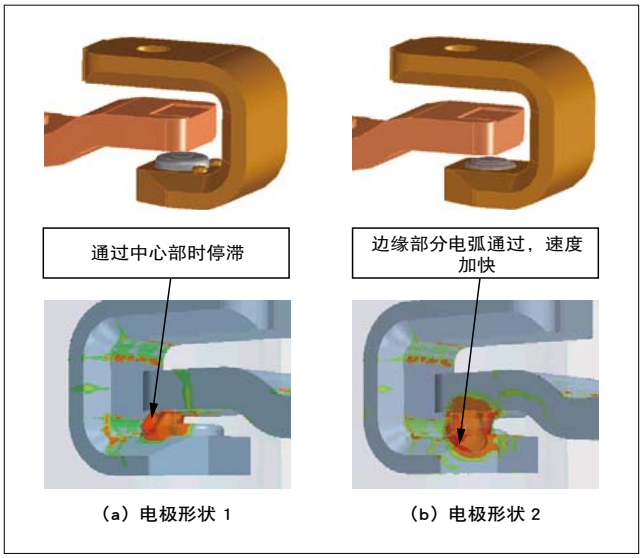

图 15　电极形状不同导致的电弧动作

的方向性，从而实现了无极性分断。

4　后记

本文对支持密封型高压接触器开发的仿真技术进行了介绍。虽然只介绍了具代表性事例的一部分，但在实际开发现场，富士电机以分析为主导，几乎对所有的技术项目都预先实施了仿真，从而判断了是否存在实现的可能性。这一手法不仅限于设计开发，还被用于制造技术领域。计算机和软件性能的提高，使其可以应对众多技术领域，但即便如此，通过仿真再现整件产品也是不现实的。只能抽取某一特定部分的现象进行计算，在充分理解这一点的基础上使用仿真技术是十分重要的。

今后，富士电机也将致力于开发能获得更真实结果的仿真技术，努力提升产品性能和可靠性。

参考文献

⑴　坂田昌良. 支撑受配电和控制设备组件设计的模拟技术. 富士时报. 2012, vol.C4, no.2, p.80-84.
⑵　坂田昌良，榎並义晶. 电弧仿真技术. 富士电机技报. 2014, vol.C6, no.4, p.206-210.

坂田　昌良
从事机械类仿真技术的开发和应用于产品的工作。现为富士电机机器制御株式会社开发本部技术开发部课长。日本机械学会会员。

竹本　贵纪
从事机械类仿真技术的开发和应用于产品的工作。现就职于富士电机机器制御株式会社开发本部技术开发部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。