

# 多物理场仿真 推动智慧城市发展

研究人员使用仿真技术设计出创新的模块化实用配电箱,以应对未来智慧城市的需求。

作者 **SARAH FIELDS**

电源箱是一种用来对邻近区域内住宅的电力供应进行控制的设备,通常安装在街道中。在美国以外的国家或地区,电源箱通常被称为馈电柱,在中国常被称为配电箱。电力在城市生活中发挥着重要作用,并且民众对市容美观的要求越来越高,迫切需要将配电箱的体积变小。

为了将长距离电力线输送过来的高压电降低为适合家庭和企业使用的低压电,传统配电箱在设计时需要保留必要的、降低电压的硬件设备,因此当前使用的配电箱体积庞大。减小配电箱的尺寸是一个值得追求的目标,却给电力布线带来了额外的挑战,那就是既要在较小的体积内完成布线任务,又要保证电阻和洛伦兹力符合要求。实现这一任务的难度非常大。

Raychem RPG 公司研发部首席研究员 Ishant Jain 利用其多年的仿真经验,设计了一款满足智慧城市和有限空间需求的配电箱。在完成这一全新设计的过程中,Jain 和公司的研发团队遇到了很多工程挑战,而借助于多物理场仿真,他们很好地应对了这些挑战。

## ⇒ 配电箱是如何工作的?

如果不是这篇文章,你可能并不会想起人行道附近那个有点突兀的金属箱。虽然很常见,但是你了解配电箱的工作原理吗?

配电箱有一层外壳,用来保护内部的配电系统。设置配电箱的目的是将电能通过低压

电源线(适合进行短距离电力传输)分配到家庭和企业中。配电箱不仅可以减少电能的物理损失,还能够根据电能的使用情况更加精准地分配电力。

“配电箱占用的空间如果能更小一些,肯定是非常有益的”Jain 说,“我们可以创建一个包含现有配电箱所有功能的模块化单元,以适应 21 世纪城市发展的需求。”

Jain 和他的团队敏锐地意识到,传统配电箱的设计有许多可以改进的方面。例如一些不合标准的连接,会导致成本偏高以及电力损失。通过升级改造可以降低成本及电能损失;当然还可以在安全性、尺寸、安装简便性、可维护性和美观等方面做出改进。

Jain 和他的团队也在积极创造适用于智慧城市的未来配

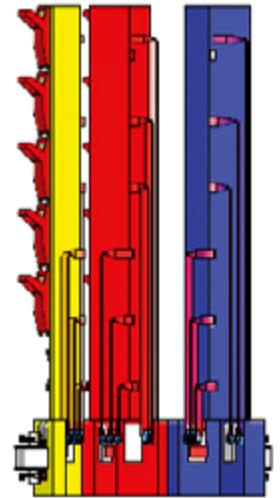


图 1. 与传统配电箱相比,新型母线系统占用的空间更小,但向外发送的电能可以保持不变。

电箱。这种全新的配电箱将具有智能功能,能够在线监测能源使用,以及监控系统和各个保险丝的安全运行状况。

## ⇒ 将电动势降到最低

要想将配电系统放进一个

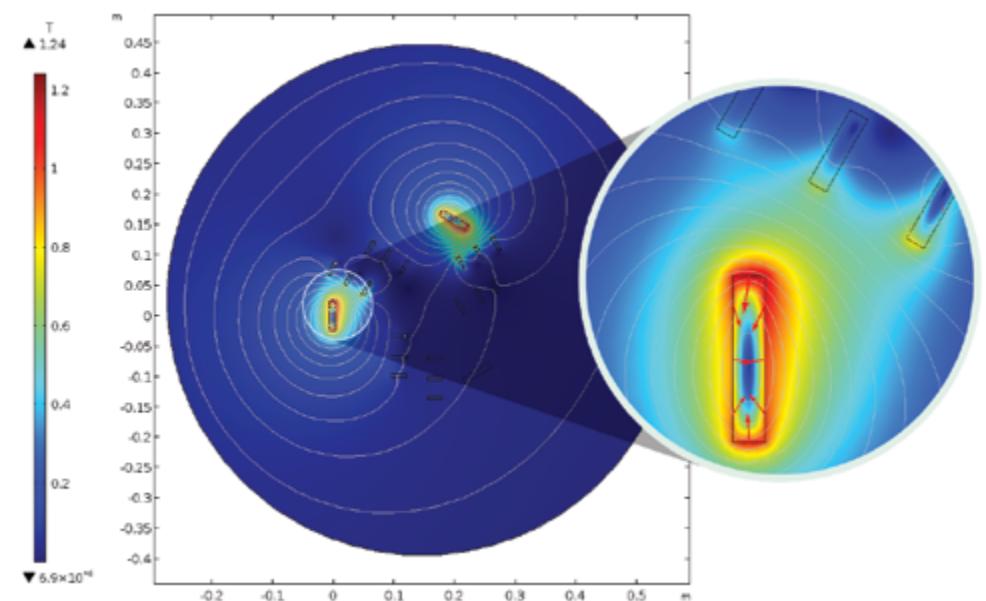


图 2. 三相配电箱的磁通密度的模值(表面图)和麦克斯韦表面应力张量(N/m<sup>2</sup>, 箭头图)。

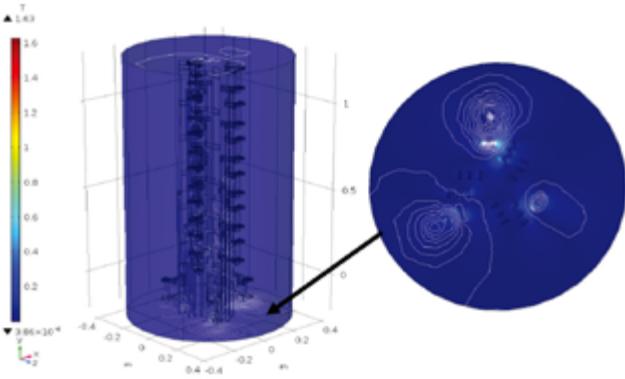


图 3. 电源箱内的磁通密度。

非常小的外壳，就需要减小配电系统的结构尺寸，但尺寸的减小会引起电磁力的增加，这是我們不想看到的。因此要减小电力系统的尺寸，需要面对的一个直接挑战就是保证电磁力不增加。

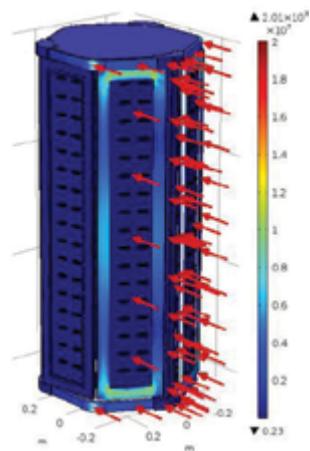


图 4. 风速为 103 m/s 时引起的 von Mises 应力。

由于物理现象的特性和复杂的几何形状，要确保设计的稳定性，工程师对多物理场仿真的需求显而易见。

为了显著减小配电箱的尺寸，工程师需要创造一种尺寸小、但分配功率不变的母线板系统（图 1）。

Jain 和他的团队创建了一个二维仿真，以确保他们的设计能够减少电磁力的累积影响（图 2 和图 3）。仿真结果显示，

当面板以  $120^\circ$  的方式排列时，可以平衡作用在母线板上的力。“仿真结果让我们相信，新设计是可行的。我们可以看出，通过  $120^\circ$  的排列方式，电动势是能够达到平衡的。”Jain 解释说。

### ⇒ 确保热和结构性能

设计过程中要考虑的另一个重要因素是配电箱整体结构的稳固性。Jain 和团队对配电箱的结构进行了仿真，以评估其耐用性。他们对结构施加了高达 103 m/s 的风力，通过研究结构随时间的变化情况，确定配电箱在结构上的合理性（图 4）。工程师们还在模型中逐渐增加边界载荷，直到机构中的次生应力达到临界值。他们最终确定设计结构可以在 570 m/s 的风速下安全运行。

研究人员还对整个面板组件进行了瞬态传热分析，用于确保系统在运行中的热性能可以满足需求。经验证的仿真模型为团队提供了设备在一些特殊运行条件下的温升情况，而这些情况几乎无法通过实验来评估。对连接器进行优化可以得到比前代产品更加安全、高效的设计结构（图 5）。最终的设计以模块化的形式呈现，并且能够进一步扩展（图 6）。

### ⇒ 多功能建模促进设计优化

Jain 和他的团队创建的新设计结构（图 6）要比以前的设计小得多，但仍然能够像传统电源箱一样传递相同大小的功率和电流。最终设计出的配电箱小于市场上所有配电箱，并且具有良好的热性能和传输效率。

“使用多物理场仿真，我们能够确保新型设计的结构完整性”Jain 总结道，“随着它在世界范围内的广泛应用，其效益和影响都将是深远的。”

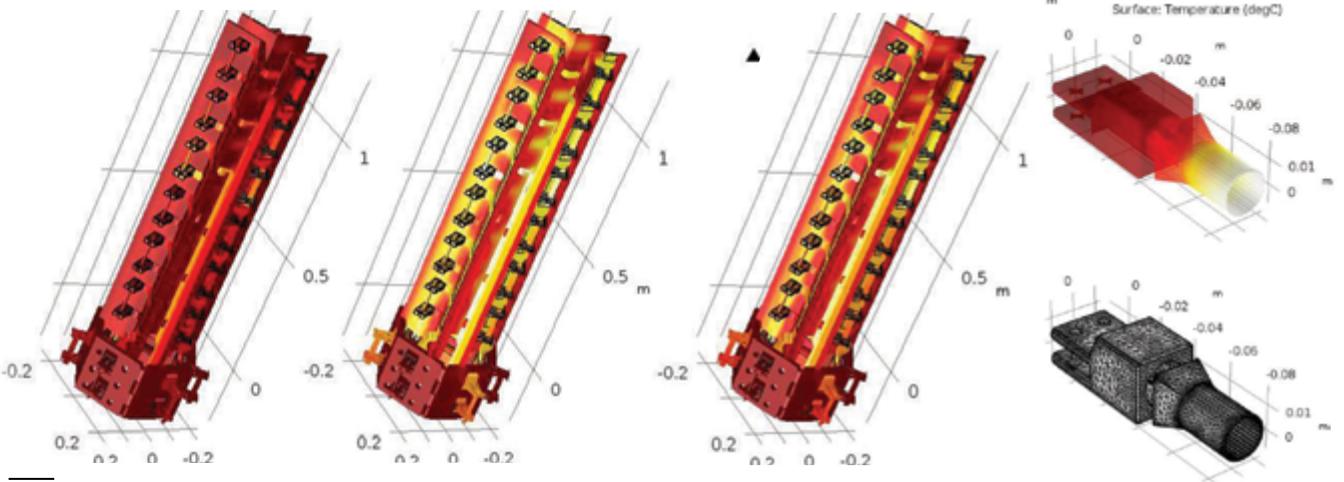


图 5. 配电箱热分布的仿真结果（左）；配电箱和连接器热分布的瞬态分析仿真结果（右）。

最终的配电箱设计还包含智能功能,如安全和防盗系统远程监控能量,保险丝健康状况和热量曲线的功能。这种新设计中的连接器电阻损耗更低,并且由于其中含有保险丝绝缘外壳,所以在系统运行时更加安全。

在设计一款体积比行业标准尺寸小几倍的配电箱过程中,Jain和他的团队将多物理场仿真应用到设计过程的每一步,并凭借新的设计和高效的母线系统,最终成功地改造了传统配电箱的结构。❖

本研究项目是在 Raychem RPG 有限公司的支持下完成的,对 Raychem 公司创新中心 of D Sudhakar Reddy 在项目期间的指导,表示衷心感谢。感谢

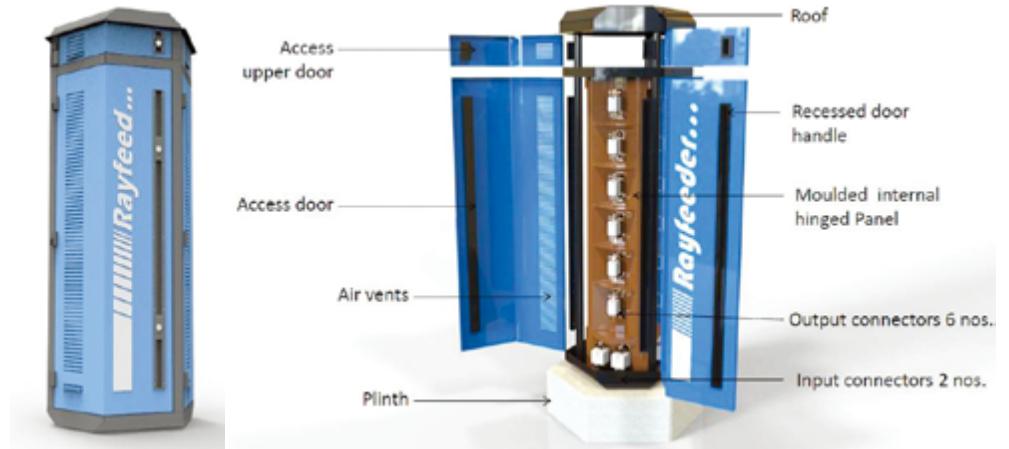


图6. Raychem RPG公司的工程师设计了一种全新的智慧城市电源箱。图注:Access upper door - 上部检修门; Access door - 检修门; Air vents - 通风口; Plinth - 柱基; Roof - 顶板; Recessed door handle - 内嵌式门把手; Moulded internal hinged Panel - 铸造内部铰链板; Output connectors 6 nos - 6号输出连接器; Input connectors 2 nos - 2号输入连接器

Sumit Zanje, Nitin Pandey, Sanjay Mhapralkar 和 Jayesh Tandlekar 在工作中的坚持不懈和奉献精神。同时还要感谢 COMSOL 团队,他们的洞察力和专业知识为研究工作提供了极大的帮助。

“使用多物理场仿真,我们能够确保新型设计的结构完整性。随着它在世界范围内的广泛应用,其效益和影响都将是深远的。”

—— ISHANT JAIN, RAYCHEM RPG 公司研发部首席研究员

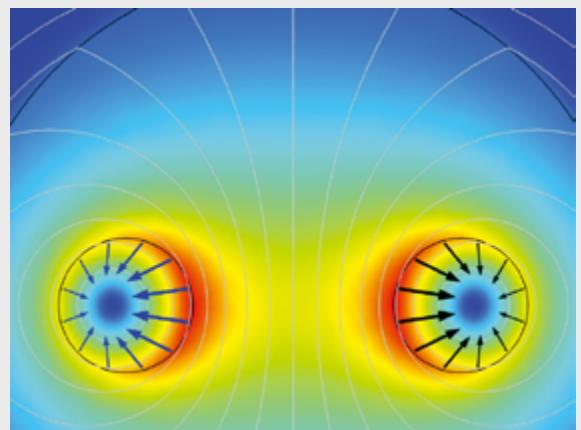
## 在 COMSOL® 软件中计算洛伦兹力

作者 Durk de Vries

当电流通过磁场时,产生的电磁力被称为洛伦兹力(不同于静电力或磁铁之间的力)。配电箱中的母线受到的电磁力就是洛伦兹力。洛伦兹力的存在会产生两个问题,一是洛伦兹力如果太大,会破坏母线系统。电磁炮这一武器充分说明了洛伦兹力能的强大性。当电流足够大时,洛伦兹力可以将母线系统撕开。另一个问题是系统负载不断变化,从而出现疲劳问题。

在 COMSOL® 软件中,可以通过不同的方式计算洛伦兹力的大小。一种方法是利用麦克斯韦表面应力张量,该张量的投影仅在母线的外部边界上有效,投影值即为电磁压力。在 AC/DC 模块的“磁场”物理场接口中,“力计算”域功能可以计算此压力的积分得到集总量,例如母线受到的总力和扭矩,或者可以将该电磁力作为局部压力分布作用到结构力学计算中。

确定洛伦兹力的另一种方法是计算电流密度  $\mathbf{J}$  和磁通密度  $\mathbf{B}$  之间的叉积。这种计算方法得到的值被预定义为洛伦兹力。将全部体积上的



平行载流导线上的电磁力。

矢量场进行积分,就得到了母线受到的总力。一般而言,体积分法比表面应力张量边界积分法得到的数值更加准确,但边界积分法更通用。研发人员利用平行载流导线,对这两种方法的计算过程进行了演示,可在 COMSOL 官网的“案例下载”页面中找到该教程模型。