

多物理场电路与系统仿真工具特征及其在电机及部件设计中的应用

Characteristics of multi-physical field Circuit and System Simulation Tools and their applications in Motor and component design

鲁思慧

摘要: 本文将仅对低频二维, 三维电磁场仿真软件与多物理场电路系统仿真工具应用特征与使用多物理场仿真软件于永磁电机设计等多领域作研讨。与此同时对伴随的仿真技术应用于低压伺服电机设计成效典例作重点解析。

关键词: 仿真软件, 多物理场, 二维三维, 磁场, 伺服电机

Abstract: This paper will only discuss the application characteristics of low-frequency two-dimensional and three-dimensional electromagnetic field simulation software and multi-physical field circuit system simulation tools, and the use of COMSOL multi-physical field simulation software in permanent magnet motor design and other multi-field city. At the same time, the results of the application of simulation technology to the design of low voltage motor are analyzed.

Keywords: simulation software, multi-physical field, two-dimensional three-dimensional, magnetic field, servo motor

前言

* 新挑战 现代电气仿真技术可以提供面向电子与机电设备的数字原型与设计探索。工程师利用仿真技术能够实现成本更低、更可靠的高性能产品, 在经过全面彻底的检查后, 这些产品在生产或部署过程中不会出现电气、热或结构方面的意外情况。最高级的仿真技术把实际物理场建模与电路及系统结合在一起, 这些电路及系统可用于能量转换以及机电设备及高速、高密度印刷电路板及装配体、天线及无线系统。

在享受电子产品所带来的便利与高效的同时, 我们也越来越依赖嵌入式电子系统。如果这些系统出现故障, 不但会带来不便, 而且会导致业务问题, 在某些情况下甚至造成个人安全问题。因此, 生产稳健可靠的系统的重要性日益突出。高级电子仿真可以实现设计探索, 其不但面向普通的运行功能, 而且还能针对产品整个生命周期的可靠运行能力。

* 高级电子仿真呈现 高级仿真技术是大部分开拓型企业的核心驱动力。行业领先者采用多物理场仿真技术弥补工程学科之间的差距, 同时能够从真正的系统角度设计

产品。电子设备必须能够在电气、热和机械等领域中运行。电子系统温度升高时, 它们会罢工。它们有时需要在恶劣环境中运行。多物理场仿真方法可以帮助企业解决高频、高速电子与机电系统中的上述挑战。采用多物理场系统仿真方法, 可以让平庸设计和真正的鲁棒性设计高下立判。

而多物理场电路与系统仿真工具是典型的高级电子仿真技术。它是专门用于大规模机电系统的多物理域系统仿真软件。可将电机及控制器的设计、驱动电路设计、模拟数字控制设计等各种不同的技术综合在一起, 实现多技术仿真解决方案。

应该说如今高级电子仿真技术有多种。值此本文将仅对低频二维, 三维电磁场仿真软件与多物理场电路与系统仿真工具应用特征与使用 COMSOL 多物理场仿真软件于永磁电机设计等多领域作研讨。与此同时对伴随的如何实现低压伺服电机设计为例作重点解析。

1 多物理场电路与系统仿真工具应用特征

多物理场应用特征可分以下三大问题的应用作说明。

其一是电力电子电路设计 采用电路、框图、状态机建模,可以简单地进行电力电子电路的基本设计。适用于系统设计,能够包含 PWM 斩波和死区时间控制等复杂控制算法和逻辑;同时也适用于辅助电路设计,能够考虑电流尖峰和谐波等电气特性。

其二是半导体器件模型 独特的半导体器件模型(IGBT、MOSFET、二极管等),从详细的电气特性模型到平均模型无所不包。广泛应用于从电力转换器的发热/温度循环到浪涌和传导噪声等各个方面。此外,还可以用数据表中的提取工具调整元件的特性。

其三是多域仿真 不仅支持国际标准(IEC61691—6)中的 VHDL-AMS 模型描述语言和 Modelica 语言、FMI,还可支持电气、热、流体、结构等多域系统、模拟-数字混合信号系统的仿真,见图 1 所示 HEV 车辆系统的电源管理仿真。

2 低频二维, 三维电磁场仿真软件与电机多物理场耦合仿真应用特征

2.1 概况

低频二维三维(2D / 3D)电磁场仿真软件(见图 2 所示)是用于电机、作动器、电感、变压器、磁性元器件等各种机电产品开发的电磁场仿真工具。求解对象的电磁场分布可以直观地显示出来,具有自动计算电磁力、力矩、电感、电容等设计参数的功能,仿真结果可以方便地与实验结果进行对比。它具有直观易用的 GUI、自动自适应网格剖分求解器,确保稳定、高精度的求解,初学者也能与软件使用专家一样,用简单的操作得到精确的仿真结果。

2.2 功能和特点

* 求解引擎:二维求解器(XY 平面求解、轴对称平面求解)、三维求解器;磁场求解:静磁场、交流磁场(频率

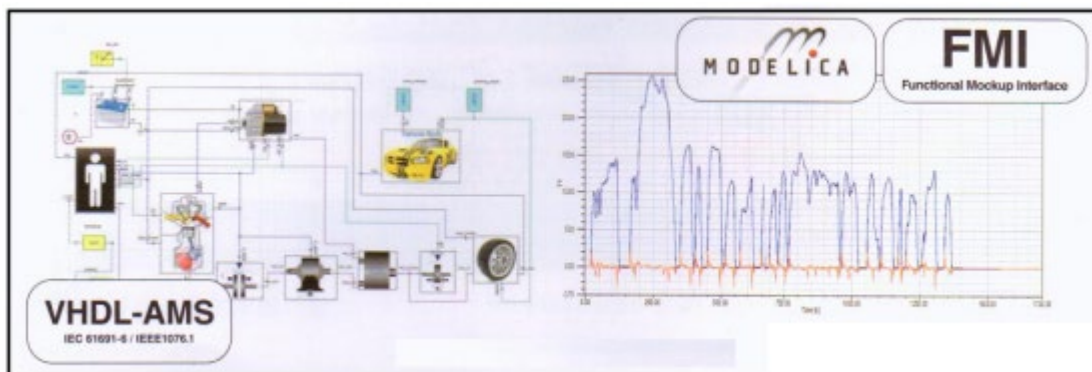


图 1 所示 HEV 车辆系统的电源管理仿真

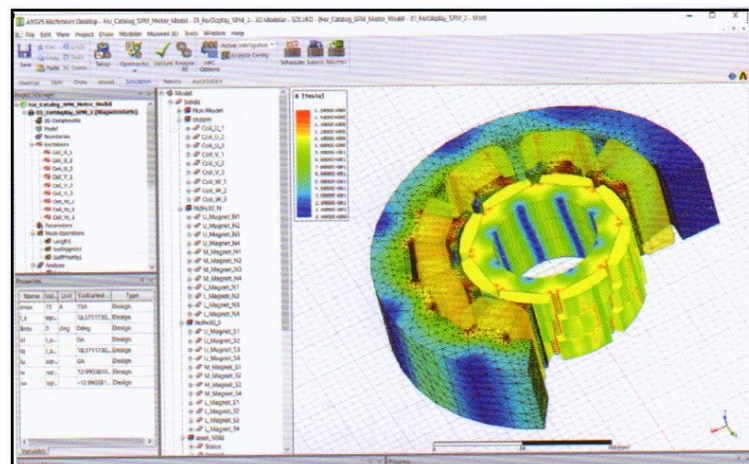


图 2 所示为低频二维三维(2D / 3D)电磁场仿真软件示意图

响应)、瞬态磁场;电场求解:静电场、直流传导场、交流传导场(2D)、瞬态电场(3D)。

*输出结果:电磁场、能量分布(标量场、矢量场);磁场、电场、电流密度、损耗、能量等通过标量/矢量运算可以得出的任意物理量;设计参数包括电磁力、力矩、电阻、电感、电容;图形、表格形式的数值输出、文本文件输出。

*各种功能:支持多种 CAD 格式导入;模型修复功能,自动修复导入的 CAD 模型;各种边界条件:对称边界条件、周期边界条件、绝缘边界条件、阻抗边界条件等;各种非线性材料(各向异性材料、永磁体、层叠材料等);铁芯损耗(铁损)计算、矢量磁滞计算;永磁体充磁分析、退磁分析;运动分析、基于运动方程的动态响应分析;与外电路编辑器之间的直接瞬态耦合仿真;丰富的材料库:约几千种;与电路仿真器之间的电路和系统耦合仿真;作为偏置磁场和邻近磁场源与高频电磁场进行耦合仿真(HFSS);电机、变压器、电感设计支持工具集成 RMxpert / PExpert 标准功能;集成多域系统仿真器 Iwin Builder 标准功能。

2.3 应用领域

机电产品:电机(旋转电机、直线电机)、发电机、作动器、延时开关等;线圈:电感、变压器、电抗器、电磁阀、感应加热器、无线充电、RFID、智能无钥匙启动等;传感器:磁性传感器、磁性屏蔽、磁头、静电触屏等;永磁体:充磁、退磁等;其他:电容器、电缆、绝缘设备。

2.4 电机多物理场耦合仿真耦合仿真

电磁场、电路、系统仿真产品还有热流体仿真产品进行耦合仿真。可以使仿真软件在集成的环境下使用,并将多个物理场相结合,从而实现多物理场解决方案。具体应用于下图涡流损耗计算与铁芯损耗计算所示。

其电机多物理耦合仿真能将计算出的涡流损耗或者铁芯损耗数据输入流体仿真软件 Ansys CFD (computational fluid dynamics, 计算流体力学),从而计算温度的分布以及映射的损耗。例见图 3 所示涡流损耗计算与铁芯损耗计算所示。

应该说,典型的低频二维,三维电磁场仿真软件有多种,其中 Ansys Maxwell 是一典例并获得广泛应用。其 ANSYS 是一个大综合软件,它包括了可以计算模拟固体、流体等力学、热量、质量、磁场等等传递守恒计算,其用途最多的还是固体力学计算(应力、应变、位移等等);而

Ansys 中 min max inc 一般是在选择的时候用的,节点或面或体的编号知道时候就可以通过编号来选取相应的目标。即最小,最大,增量。比如选择 1、3、5、7、9 号 ...。

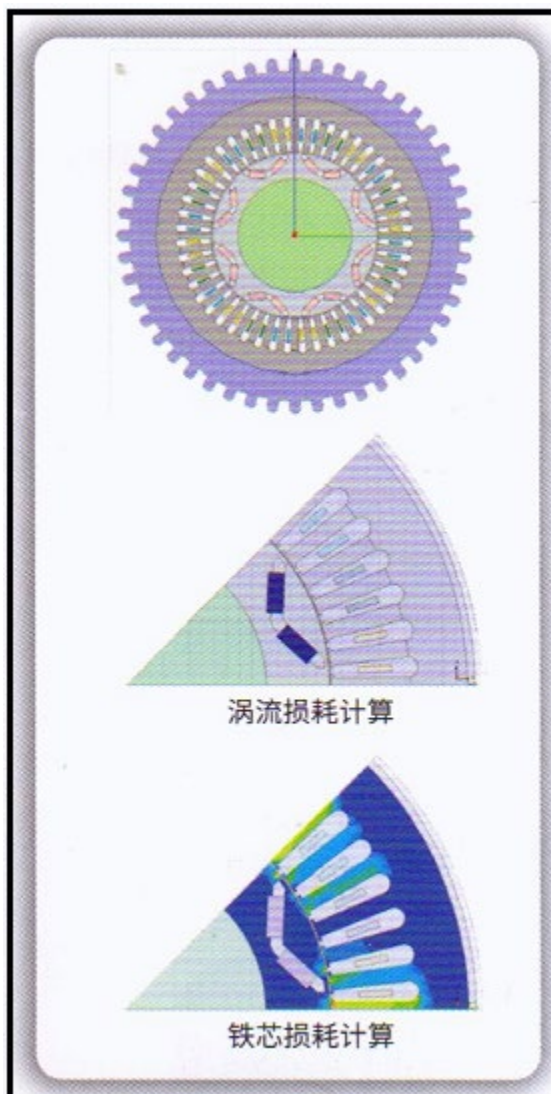


图 3 电机多物理场耦合仿真应用于涡流损耗计算与铁芯损耗计算

3 使用 COMSOL Multiphysics 仿真软件于永磁(PM)电机的设计

主要使用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件的建模和后处理功能来深入了解旋转机械的设计。在此使用 COMSOL Multiphysics 软件及其附加的 AC/DC 模块建立的一个 12 槽 10 极永磁(PM)电机模型示例。该示例中的机器是一个具有代表性的旋转装置,外径为 35mm,轴向长度为 80mm。对该模型的输入条件稍加修

改, 就可以生成一个电动机或发电机模型。

为此解析 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真应用于电动机和发电机的设计。

值此以模型设置为例的解析。在永磁电动机中, 来自转子的磁场与由定子电流产生的磁场同步旋转 (见图 4 的永磁电机模型示意图)。转子和定子磁场的相互作用产生净转矩, 净转矩使电动机能够将绕组的电流转换为机永磁电机模型示意图机械功率。由于励磁的同步特性, 在永磁电动机中瞬时转矩受转子角位置的影响很大, 因为该位置与定子电流同步。在异步电机中则是不同的, 在异步电机中, 定子绕组感应出的转子磁场是转子和定子之间的速度滞后的函数 (因此俗称感应电机)。

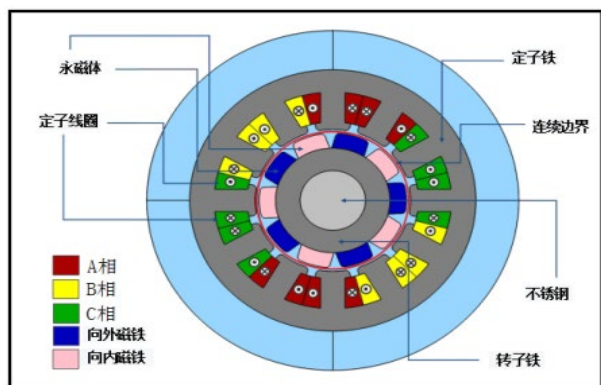


图 4 为永磁电机模型示意图

线圈励磁将具有以下形式: $I = I_m \cos(ka + \varphi)$, 其中 I_m 是峰值电流, k 是取决于极数的比例因子, α 是转子角, φ 是相位角。在此示例中, 三相的激励分别由下式给出:

$$I_a = I_m \cos(ka), I_b = I_m \cos(ka - 120^\circ), \text{ 和 } I_c = I_m \cos(ka - 240^\circ)$$

为了确保定子和转子磁极之间的吸引力和斥力产生单向转矩, 比例系数必须是这样的: 当转子以一个转子磁体的角度跨度移动时 (磁体具有交替的极性), 定子线圈的磁场是反向的。其值由下式给出 $\kappa = \frac{180^\circ}{360^\circ/N_p}$ 其中, N_p 是转子极数, 分母给出了单个转子磁极的角跨度。

* 优化磁场分布研究

磁场分布是电机设计中非常重要的因素。在同步旋转电机中, 研究感应电压的关键参数是气隙磁通 (即转子和

定子之间交换的磁通) 的空间分布。仅当径向磁通沿转子外围具有正弦分布时, 定子相电压才为正弦。该空间波形也称为气隙磁动势 (MMF) 波。如果磁动势波不是正弦波, 那么在感应电压中会引入高次谐波。在这个模型示例中, 为了获得气隙磁动势波, 评估沿连续性边界的磁通密度的径向分量。随着转子旋转, 我们可以观察到磁动势波如何随时间演化。仅仅通过观察, 就可以了解到感应电压不会是完美的正弦波。为此可通过气隙磁动量的时空傅立叶变换并与串联磁通及电压谐波失真获得相关联的技术应用。

* 关于优化机械转矩的设计

对于永磁电动机的特定槽 / 极组合, 有多种激励定子绕组的方法。永磁电机模型示意图中显示的模式是可以驱动 12 槽 10 极永磁电动机的一种方法。需要调整定子线圈的励磁 (或初始转子位置), 以便将最大扭矩施加到转子上。为此, 给转子一个初始角位移、转子角度 α 在一个转子磁极的角度跨度上变化, 并会计算出平均转矩。选择与最大平均转矩相对应的初始角位移值作为转子的初始位置。按照这种方式, 定子和转子的相对位置产生最大转矩将变得更容易可视化。在下面列出的几种情况下, 可以观察到两个最大值: 其一是, 一旦施加了适当的相序列, 正最大值对应于逆时针方向的旋转; 其二是, 负最大值将导致顺时针旋转 (在微调相序之后)。据此将给出的转子转矩波形对应于平均转子转矩曲线的正最大值。在此将更加深入研究出扭矩检查和扭矩计算的各种方法, 例如 Arkkio 方法和虚功原理。其图 5 为在两个转子磁极范围内, 平均转子转矩随初始转子角 ($2 \times \frac{360^\circ}{NP} = 72^\circ$) 的变化曲线示意。

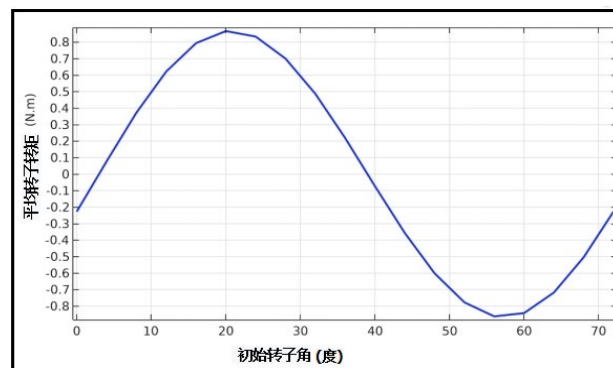


图 5 为在两个转子磁极范围内, 平均转子转矩随初始转子角

$$(2 \times \frac{360^\circ}{NP} = 72^\circ) \text{ 变曲线示意图}$$

*** 关于优化铁用量和损耗**

通过使用磁通密度图,可以研究铁芯中的磁通密度分布。在模型几何的某些部分,磁轭可能会形成瓶颈区域,并可能会将磁通量密度值推入B-H曲线的饱和区域。在另一些情况下,它的宽度足以引起低场强区域。当磁轭的某个部分始终显示出弱磁场时,这部分就未充分利用来产生扭矩。当某个部分形成一致的瓶颈时,这部分可能应该扩大。

在该示例中,转子和定子中铁的厚度发生了改变,我们检查了其对于转子转矩的影响。为了产生最大扭矩,初始转子角设置为 20° ,这是从上一节中的平均扭矩曲线获得的。从下面的曲线图和扭矩曲线(见图6所示)中可以看出,当铁的厚度约为2mm时,铁的利用率最佳:小于2mm会对扭矩产生负面影响,而大于2mm则会增加不必要的材料——从而增加重量和成本。不同厚度铁的磁通密度分布,见图左:1mm、中心:2mm、右:3mm。

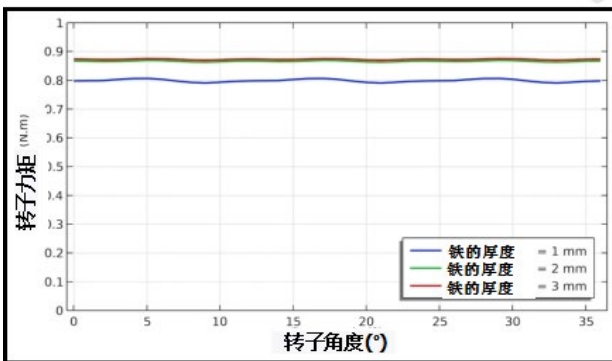


图6所示为转子转矩的影响的曲线图和扭矩曲线

*** 随铁厚度变化的转子转矩波**

但是,这还不是全部内容:确定铁的厚度时还需要考虑其他因素,例如机械强度以及电阻和磁损耗。在研究磁通密度和转矩时,也可以评估铁厚度变化对铁损耗的影响。从COMSOL Multiphysics 5.6版本开始,软件内置了损耗计算特征,可使用Steinmetz方程、Bertotti公式或用户定义的损耗模型轻松评估铜损耗和铁损耗。据此可进一步讨论旋转机械的多物理场建模,例如效率计算、温升评估、振动分析和噪声检查。其图7为不同铁厚度值的铁损分布,即所示为左:1mm、中心:2mm、右:3mm。

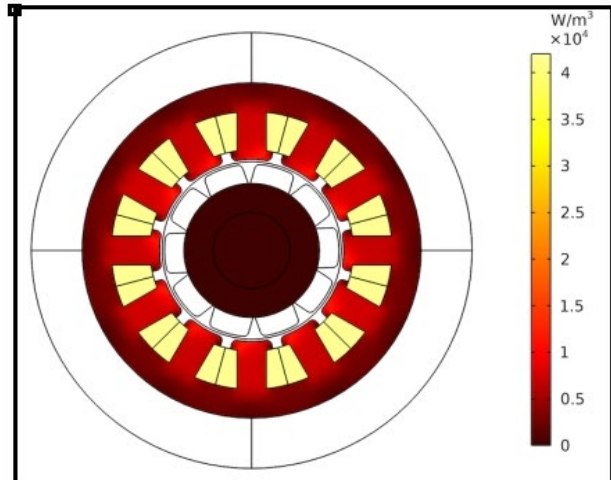


图7为不同铁厚度值的铁损分布所示左:1mm、中心:2mm、右:3mm

4 仿真技术应用于低压伺服电机设计成效典例

为混合动力汽车和电动汽车设计最佳定制发动机时,需要将多个电子和机械组件作为一个完整系统进行设计和测试。确定和选择权衡因素并非易事,整合大综合软件仿真的多域工作流程,从而解决了这个难题。据此以低压伺服电机设计作为仿真技术应用于电机设计(见图8(a)示意形象图)典例说明。



图8(a)仿真技术应用于电机设计的形象图

4.1 由仿真的低压伺服电机设计

* 低压电机的理念 低压电机由《低电压指令》根据为电气系统供电的电源电压以及与 IEC 在电击及电弧风险和安全方面的具体规定, 将介于 50-1000Vac 或 120-1500Vdc 之间的电压定义为低电压。然而, 如果要在伺服电机背景下讨论低压电机, 低压主要集中在以电池驱动的应用。标准工业无刷电机通常在 120-480Vac 的电压下运行, 而低压伺服电机则在 24-96Vdc 的电压范围内进行了优化。根据定义, IEC 认为这一范围内的电压应属于超低电压 (ELV) 的范畴。

4.2 由仿真技术实现的效果

* 实测与设计相符 伺服电机由驱动器驱动, 驱动器通过交流或直流电源获得动力。两个具体的电机参数决定了电机的转速和扭矩特征, 即以 Volts/krpm 为单位的反电动势 (Kb) 和以 Nm/A 为单位的扭矩敏感性 (Kt)。电机转速与施加的电压直接相关, 而电机扭矩则与施加的电流直接相关。这两个特征还直接受到电机线圈匝数的影响, 电机绕组通常会根据应用的预期电压进行优化。电机可以在最高额定电压下运行, 该电压由电机结构中使用的绝缘系统决定。举个例子, 一个额定转速为 2000rpm、额定扭矩为 5Nm 的电机要使用每个线圈 10 匝的绕组, 其额定电压为 170Vdc, 额定电流为 10A。如果用 85Vdc 的电压给该电机供电, 并且不对绕组做出调整, 则该电机在 5Nm 的扭矩下只能达到 1000rpm 的转速 (假设在较低电压下也可以获得相同的电流)。如果要在较低电压下实现相同的功率, 电机绕组需做出减少匝数 (每个线圈 5 匝) 的调整, 以便在 85Vdc 电压下也能获得 2000rpm 的转速。然而, 这样会改变电机的扭矩敏感性特征, 要想在 85Vdc 电压下实现 2000rpm 的转速和 5Nm 的扭矩, 电流要达到 20A。

典型的电池驱动应用有远程控制车 (ROV)、机器人等, 所用电压介于 24-96Vdc 之间。伺服电机需要使用经过优化的绕组才能达到特定应用电压和可用电流下的负载点。它们非常适合电池驱动应用, 如移动机器人、便携仪医疗设备、AGV 等。

* 低压电机特点

其特点为: 低压系列的供电为 24 - 96Vdc: 三种设计尺寸, 堵转转矩范围为 0.640 至 8.59Nm, 且电机转速高达 8000rpm。AKM 低压系列的供电为 24 - 48Vdc: 三种设计尺寸, 堵转转矩范围为 0.18 至 1.25Nm, 且电机转速高达 4500rpm。符合 CE 要求 / 获得 UL 认证具有与基础伺服电机系列完全相同的电机结构、设计特性和优势。协作机器人 (cobot)、制造业机器人和机械臂旨在根据需要学习和适应新任务, 就像它们是人类同事那样。这需要由机器人关节内的高质量伺服电机来实现受控的安全运动控制, 以便在人类同事旁边安全运作。人类 / 机器人协作的多功能性有望为包装、工厂自动化、食品和饮料加工、生命科学、医疗自动化等行业带来新的能力和效率。

低压伺服电机具有与我们标准电机相同的动态性能, 但其绕组经过优化可实现 24 - 96Vdc 母线输出。它们非常适合电池驱动应用, 如移动机器人、便携仪医疗设备、AGV 等。图 8(b) 所示为典型 AKM2G 和 AKM 低压伺服电机。



图 8(b) 所示为典型 AKM2G 和 AKM 低压伺服电机

5 后话

(1) 上述讨论了 COMSOL Multiphysics 和 AC/DC 模块中一些功能的使用, 轻松了解了电机的一些设计。可以通过气隙中径向磁通密度的线图了解到感应电压是否为正弦波; 可以使用 COMSOL Multiphysics 中的参数扫

描功能确定将产生最大转子转矩的初始转子角;可以通过机械磁通密度的表面图直观地确定铁的利用率是否对于有效产生扭矩而言是最佳的。使用 COMSOL Multiphysics 提供的内置损耗模型,也可以观察铁厚度对铁损耗的影响。

从中可知如何使用 COMSOL Multiphysics 强大的建模和后处理功能获得对旋转机械设计的一些宝贵的见解。还讨论转矩计算方法、效率计算、铁损耗和热性能分析,以及电机振动和噪声检查作广泛讨论。

上接163页

电感 1 采用多层绕线方式,电感 2 采用单层绕线方式。则电感 2 的阻抗特性越高,最低谐振频率点值越大(蓝颜色);因此;改变电感的绕线方式。则可以改善电感的阻抗特性,进而在源头上消除电感本体的 EMI 干扰源。

上接169页

筑物内消防系统的线路宜按楼层或防火分区分别设置配电箱。当同一系统不同类别或不同电压的线路在同一配电箱内时,应将不同电流类别和不同电压等级的导线分别接于不同的端子上,且各种端子板应作明确的标志和隔离。从接线盒、线槽等处引至探测器底座盒、控制设备盒、扬声器箱等的线路应加金属软管保护。管内导线的根数不作具体规定,暗敷时以管径的大小不影响混凝土楼板的强度为准。穿管绝缘导线或电缆的总绝缘面积,不应超过管内截面的 40%。敷设于封闭式线槽内的绝缘导线或电缆的总截面积,不应大于线槽的净截面积的 50%。布线使用的非金属材料、线槽及其附件,应采用不燃或非延燃性材料制成,并取得市场准入证明。消防系统的传输网络不应与其他系统的传输网络合用。

火灾自动报警系统属于楼宇自动控制系统(BAS)的一个子项,但由于行业管理的特殊需要,其传输线自成网络,并未将其纳入智能建筑中的综合布线系统。但在选配火灾自动报警系统时,必须考虑它与其它系统在连接界面上的适配性,使其具有网络化数据通信功能,具备与智能建筑其它控制系统的通信界面,为系统的集成准备好条件,使它们在安装使用和运行管理上有机地结合在一起。火灾报警控制器是火灾自动报警系统的中枢,它接受信号并作出分析判断,一旦发生火灾,它立即发出火警信号并启动相应的消防设备。计算机技术的发展,使传统的开关量多

(2) 未来的机电产品创新所需要的平台,必须使工程师能够仿真和设计完整的机电及电子产品,同时还能够包含所有必需的物理场与系统效应。这可能包括小到复杂集成电路的简单细节,大到诸如汽车这样的完整产品。行业领先的企业依赖仿真技术,而其中大部分企业更多工程师能够发挥实际物理场的优势。利用统一的平台,电气工程师能够真实展现电气、热与结构性能,同时与机械工程师共享模型,以便进行更严格的测试。

另外,灌封电感的阻抗特性与灌封胶的特性(如密度、材料、导热系数)有关;这是因为灌封胶影响电感本体寄生电容的介电常数的因素所致。

线制火灾自动报警系统已被模拟量总线制火灾自动报警系统所替代,目前智能火灾自动报警系统也广泛应用。模拟量总线制火灾自动报警系统和智能火灾自动报警系统都是在计算机技术基础上发展起来的,都可以作为智能建筑的选用产品。

6 结束语

总之,随着人们对火灾防范意识的增强,消防电气设备和消防电气系统的应用就备受关注。在消防电气系统的设备组成中,消防电气控制设备和消防联动控制设备是两个相对较为重要的组成部分。消防电气设备对于现代建筑消防工作的开展所具有的重大意义。随着社会经济的发展,建筑越来越成为人类生活环境的一个组成部分,从工业社会现代化建筑的概念转向面向信息社会的需求,智能建筑正在世界范围内蓬勃发展。火灾猛于虎,火过人财空。火灾不断光顾居民住宅,给人们敲响了住宅防火的警钟,也让人们对创造良好的居住环境、营造安全温馨生活的渴望加深。火灾不可避免,但防范可以在先,让我们每个人、每个家庭都绷紧防火这根弦,共同构筑防火墙,把火灾拒之门外,让火灾远离我们的家园。我们只有不断强化推进消防工作社会化,建立健全更为适合居民住宅消防安全管理的新体制,人民群众才能安居乐业,整个社会才能创造更好的安全环境。