基于 CFD 仿真的内燃机车凸极同步发电机通风散热的分析

撰文／成都南车电机有限公司　言宏武 赵临深 王培玲

摘要：本文针对强迫通风型内燃机车配套凸极同步发电机，运用 ANSYS 软件的 CFD 模块对其通风散热进行数值仿真分析，得到电机内部的流场和温度场分布，从而评估现有的通风散热模式是否满足设计需求，为电机的设计提供可靠的依据。

关键词：内燃机，同步发电机，CFD，仿真分析，ANSYS

0 引言

电机行业是采用 CAE 仿真技术最早的行业之一。自 60 年代末期，美国电机制造业的西屋等大公司就开始了电机仿真分析计算，并成功的使得电机的生产准备时间大幅缩短。

随着数值仿真分析技术的发展，将数值仿真分析技术运用到电机设计中能有效降低设计验证周期，提高设计成功率，能有效优化电机通风的功率、提高电机运用的可靠性。

目前电机的仿真分析技术，除了较为成熟的电磁仿真分析程序的应用外，还包括电机的稳态和瞬态热分析、通风冷却计算、临界转速和轴承承载能力的计算、机械计算、电机瞬态过程分析计算以及电机耦合物理场计算、参数优化和稳健性可靠性分析、系统半物理建模分析等。其中通风散热分析是比较重要的一部分仿真工作。

同步主发电机采用较高的电磁负荷，电机的单机容量较大，因此必须改进电机的冷却系统，以提高其散热能力，满足电机设计的绝缘等级。由于电机存在铁芯损耗、绕组损耗和机械损耗等，电机冷却的根本任务就是散发掉电机内部的损耗（热量），使得电机各部分温升维持在温升限度范围内，保证电机有效运行。在通风冷却系统的设计中，需要详细考察总风量、风量分配以及通风损耗和效率等指标和条件，并尽可能的保证结构简单、风路简单、系统中的寄生涡流及风摩损耗较低，使得加工制造容易，气动噪声较低。

在同步主发电机以往的设计和研究中，由于电机传热问题的复杂性，一般采用等效热路法把温度场简化为带有集中参数的热路进行计算，等效热路法的缺陷计算温升，不但准确性较低，而且只能计算铁芯和绕组的平均温度或部分铁芯和绕组的平均温度，无法全面了解温度的分布情况以及过热点的准确位置和数值，这对电机特别是同步主发电机的安全运行过程是一个重要的限制因素，因此，通过 CFD（计算流体力学）准确地进行电机发热计算和温度分布的计算在电机设计中是十分重要的工作。

1 数值模型的建立

1.1 几何模型与网格划分

1.1.1 通风散热的分析步骤的确定

1）分析电机的工作状况，明确其通风散热的特殊性

收稿日期:2015-09-30，修回日期：2015-11-04

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

◎电机的定子部分固定，转子部分旋转，运用稳态的CFD分析针对转静区域结合问题一般采用简化的多重参考系界面模型：凝固转子模型（Frozen Rotor）或级间模型（Stage）。

◎由于电机进出风口结构不对称，这些界面模型会在转子区域产生非对称的流量分布，进而引起非对称的温度分布。但因为转子的旋转效应，转子上的任何一个磁极均没有“特殊性”，即转子任何一个磁极区域的通风散热条件均相同，因而其温度分布在所有磁极之间都是对称的。

◎由于整机进行流固共轭传热分析的计算规模非常庞大，一般需要接近或超过1亿网格规模才能得到可靠精度的计算结果，在常规的计算机软硬件条件下是难以达成。

2） 电机通风散热的分析采用两个步骤

◎“整机通风分析”：对电机整机进行几何简化处理，建立整机CFD网格模型，不考虑固体域，不考虑传热，计算获得电机所有空气域内的空气流动状态信息（速度和压力分布等），并由此导出通过规定截面的流量（主要是90个定子通风孔上的空气流量分布）。

◎“电机通风散热CFD仿真分析”：截取七分之一循环对称模型（含2个转子磁极区域和13个定子通风孔区域），对该对称模型进行几何简化处理，建立流固共轭传热CFD分析网格模型，施加第一步获取的流量条件，计算获得电机所有结构域内的温度分布，以及由此导出的通过流固分界面的热流。

1.1.2 电机的几何模型与网格划分

1） 通风几何模型采用典型的内燃机车凸极同步发电机结构，电机的冷却风进风口在电机端盖端面上，出风从电机—柴油机连接箱引出。由于出风口位于柴油机连接箱上，电机的通风模型将包含柴油机连接箱，并且在电机端盖进风口处也将增加机车进风管道以模拟实际电机端盖进风的情况。图1为典型的内燃机车凸极同步发电机结构和简化的通风模型外形。

2） 腔体区域流体模型的建立

◎以进出口位置为界，抠除内部实体，由所有内部腔体区域形成流体分析几何模型。

◎在适当位置（例如转静气隙中间面、两端切面）切分整个流体区域，形成转子区域和静子区域，在后续分析中，转子区域采用旋转动坐标系，静子区域采用静止坐标系，二者交界面由凝固转子模型进行连接，具体切分位置并不需要

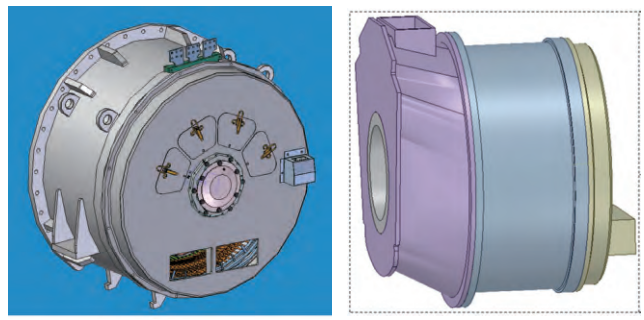

图1 内燃机车凸极同步发电机结构和简化的通风模型外形

非常严格。相关几何模型如图2所示。

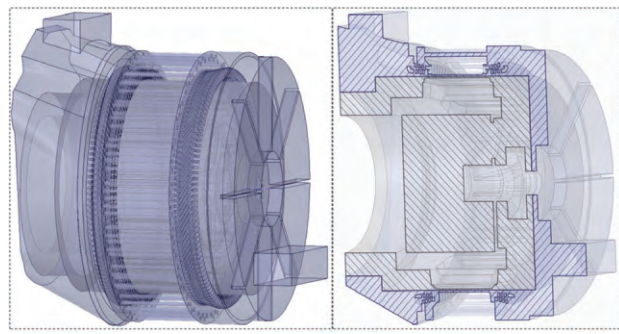

图2 划分转子区域和静子区域后的腔体区域流体模型

3） 通风模型的网格划分

在前述电机腔体内部流体区域几何模型基础上，通过适当的网格划分设置，形成CFD分析网格模型，主要的网格设置包括：

◎网格最大最小尺寸控制。

◎所有壁面边界位置的附面层网格控制。

◎局部位置（例如气隙、定子通风孔等）的网格尺寸控制。

通过不断调试各控制参数，在平衡计算精度和计算效率的考虑下，最终对整个流体区域划分了1464万网格。

4） 散热分析采用的循环对称模型

考虑到转子支架为7辐结构，转子磁极为14个，定子线圈为126个，定子通风孔为90个，确定采用七分之一循环对称模型，该简化模型含一个支架扇区、2个磁极扇区、18个定子线圈扇区，以及13个定子通风孔扇区，仅在定子通风孔部位的对称性有少许误差，其误差不会对计算结果产生影响。图3为流体和固体区域混合模型。

5） 散热模型的网格划分

在前述电机七分之一循环对称结构和流体区域几何模

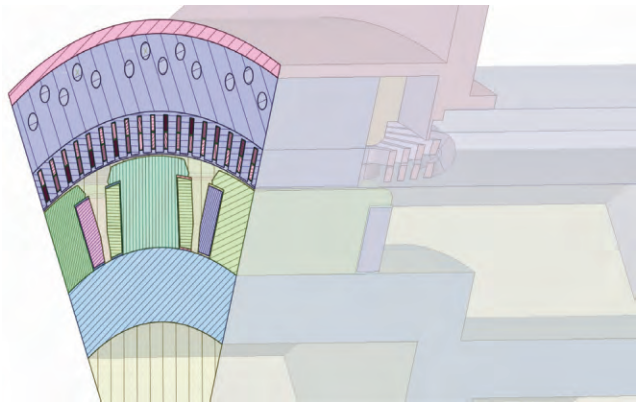

图 3 流体和固体区域混合模型

型基础上，通过适当的网格划分设置，形成流固耦合 CFD 分析网格模型，主要的网格设置包括：

◎定子线圈部位网格尺寸控制。

◎定子通风孔部位网格尺寸控制。

◎转静间隙部位网格尺寸控制。

◎转子支架部位网格尺寸控制。

◎所有壁面边界位置的附面层网格控制。

通过不断调试各控制参数，在平衡计算精度和计算效率的考虑下，最终对整个流体区域划分了 1360 万网格。

1.2 通风分析的边界条件设置

CFD 分析的物理模型和边界条件包括：

◎介质为 25℃下的标准空气。

◎采用 SST 湍流模型和自动壁面函数。

◎进口为质量流量条件。

◎出口相对压力为零。

◎转子转速。

1.3 流固共轭传热计算的边界条件设置

1.3.1 固体区域各部位材料及热性能数据（如表 1）

1.3.2 计算域的划分

根据不同的材料和转 / 静关系，本模型共设置了 12 个计算域。

其中转子域 6 个，包括：磁极绝缘固体域、磁极铁芯固体域、磁极线圈固体域、转子流体域、滑环固体域和钢质材料固体域。

定子域 6 个，包括：对地绝缘固体域、线圈固体域、定子叠片固体域、定子压圈固体域和机座固体域和定子流体域。

表 1 固体区域各部位材料及热性能数据

编号	材料名称	所用的结构部位	导热率（W/mK）
1	45# 钢	转轴	52
2	铸钢	滑环座、支架、磁轭	52
3	结构钢	电机机座	52
4	Q235 薄钢板	转子磁极铁芯	径向 57、轴向 6
5	Q235 钢板	定子前后压圈	57
6	硅钢片	定子叠片	径向 40、轴向 4
7	硅黄铜	滑环	120
8	纯铜	转子磁极线圈、定子线圈	379
9	玻璃布板 / 云母带	滑环与滑环座间、转子磁极绝缘、定子对地绝缘	0.26

1.3.3 固体区域热源及热边界条件数据

固体区域热源数据由电磁和其他计算获得，包括：滑环表面摩擦生热荷载、转子磁极线圈体积生热、转子极靴表面损耗热荷载、定子线圈体积生热、定子前后压圈体积生热和定子硅钢片叠片体积生热。

固体区域热边界条件和热界面条件主要有：电机机座外壳表面与外界空气的对流换热、采用界面方式来定义滑环与滑环座之间绝缘材料，其他固体与固体之间都认为是理想连接，相互之间是理想的热传导关系（无附加的界面热阻），而所有固体与流体之间的交界面也都认为是理想的流固共轭传热界面。

1.3.4 流体区域边界条件数据

根据前期的“整机通风分析”，确定电机进出风口的不对称性和转子旋转的影响，得知定子通风孔流量的分布是不均匀的，因而导致定子区域的温度分布在圆周方向也是不均匀的，可以预计，在定子通风孔的小流量区域温度偏高，在大流量区域温度偏低，定子的实际温度分布介于这两个温度值之间。因此，本分析中共设定两个工况：定子通风孔小流量工况，定子通风孔大流量工况。

2 通风仿真结果及分析

2.1 计算流体压力分布

计算结果表明，进出口平均压力的压差约 1979Pa，整个区域内最高相对压力约 5KPa，最低相对压力约 −5.1KPa。电机腔体内流体压力分布如图 4 所示。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

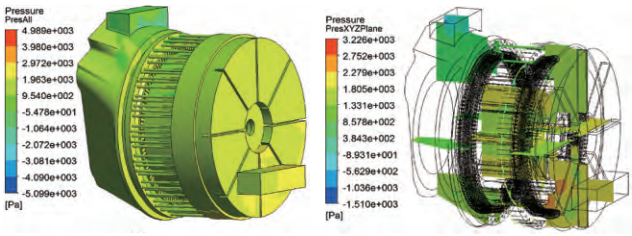

图 4 电机腔体内流体压力分布

2.2 气流速度矢量分布

计算结果表明，整个电机腔体内的空气最高流速约为 103.4m/s，各截面位置处的气流速度矢量图如图 5 所示。

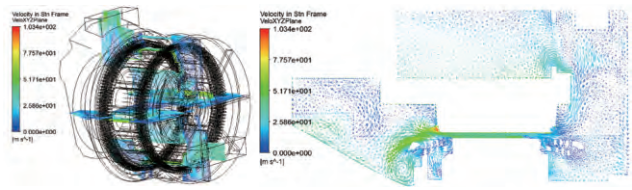

图 5 截面位置处的气流速度矢量图

2.3 流体流量分布

计算结果表明，进口给定流量 5.1Kg/s，出口计算流量 5.091Kg/s，误差不足 0.2%，可忽略不计。电机中截面上的流量分布如图 6 所示。

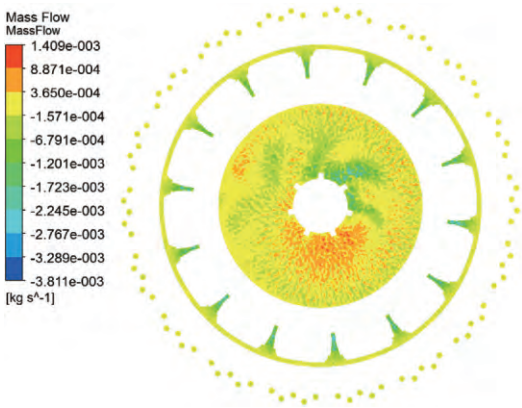

图 6 电机中截面流量分布

电机内部流道主要分两部分：一是位于定子上的 90 个通风孔，二是转子与定子之间的气隙（包括转子磁极之间的空隙）。计算结果表明，通过气隙的空气流量为 4.24Kg/s，约为 5.1Kg/s 总流量的 83%，余下的 17% 的流量（约 0.86Kg/s），是通过定子上的 90 个通风孔输送的。在定子通风孔中，最大流量为 12.18 克 / 秒（约 0.608m^3/ 分钟），最小流量为 3.43 克 / 秒（约 0.171m^3/ 分钟）。如图 7 所示。

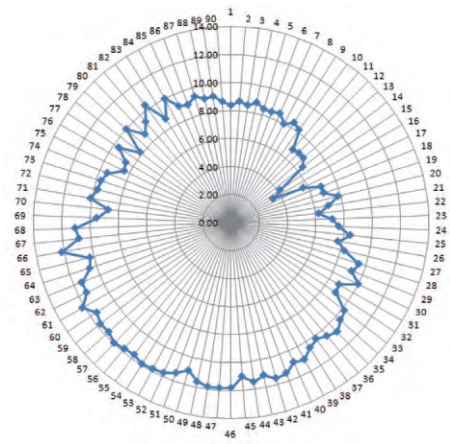

图 7 定子通风孔的流量分布

3 散热仿真结果及分析

3.1 小流量工况计算结果分析

3.1.1 流体域温度分布

计算结果表明，流体域最高温度为 151.77℃，出口截面质量平均温度约 80.9℃（气体平均温升约 15.9℃）。流体域整体及各截面上的温度分布如图 8 所示。

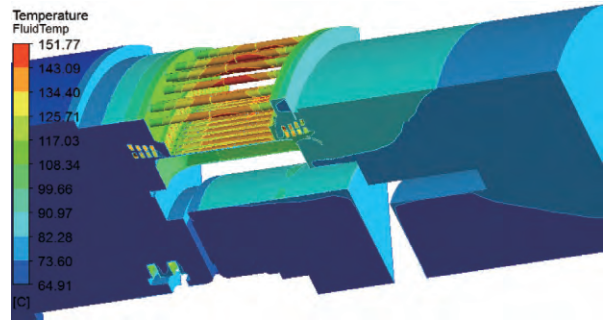

图 8 流体域整体及各截面上的温度分布

3.1.2 固体域温度分布

计算结果表明，固体域最高温度为 161℃，固体域整体及各截面上的温度分布如图 9 所示。

3.2 大流量工况计算结果分析

3.2.1 流体域温度分布

计算结果表明，流体域最高温度为 137.72℃，出口截面质量平均温度约 79.7℃（气体平均温升约 14.7℃）。流体域整体及各截面上的温度分布如图 10 所示。

3.2.2 固体域温度分布

计算结果表明，固体域最高温度为 149.7℃，固体域整体及各截面上的温度分布如图 11 所示。

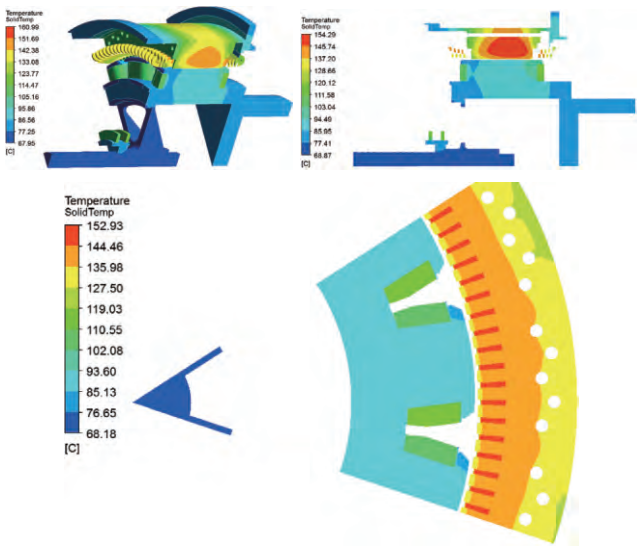

图 9 固体域整体及各截面上的温度分布

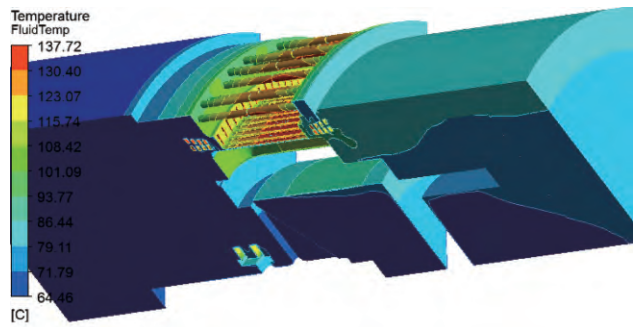

图 10 流体域整体及各截面上的温度分布

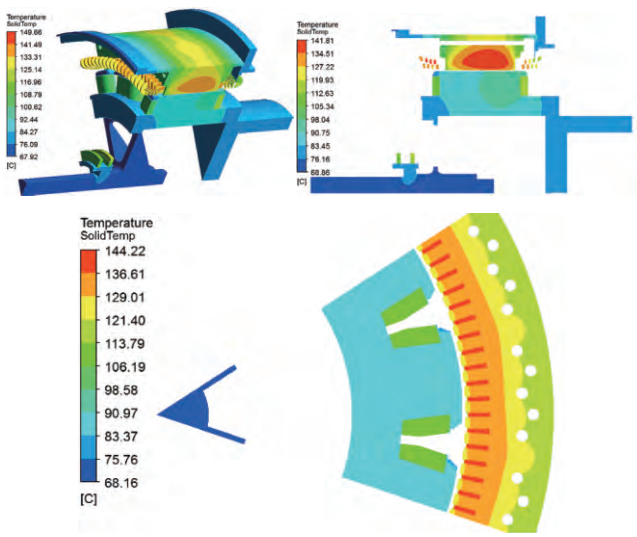

图 11 固体域整体及各截面上的温度分布

3.2.3 各零部件流固分界面热流

通过对计算结果进行数据处理，可得各个零部件流固分界面的热流数据如表 2 所示。

表 2 各零部件流固分界面热流

零部件名称	热流（W）
滑环	74.36
滑环座 / 轴 / 支架 / 磁轭	397.86
磁极铁芯	612.96
磁极绝缘	47.56
磁极线圈	2112.82
定子线圈	3176.59
对地绝缘	302.74
硅钢片叠片	3464.29
前后压圈	562.08
机座	129.81
合计	10881.07

表 2 中流固分界面上的热流总和，加上机座外壳的对流换热值 718.769W，固体域总的散热功率为 11600W，而施加的总热源为 11572.88W，二者之间差别为 0.23%，这也从另外一个侧面证明了计算精度是可靠的。

4 结论

经过以上分析和计算，得到了电机通风量为 255m^3/min 时，电机进出风口平均压力差约为 1979Pa，为通风机的选型提供了有力支撑。

同时，在该条件下电机各部分温度如表 3。

表 3 电机各部分温度

计算流量 Kg/s	流体域平均温度℃		固体域各部位最高温度℃					
	进口（设定）	出口	滑环	转子磁极铁芯	转子磁极线圈	定子线圈	定子铁芯	机座
0.6891	65	80.9	118	102	119	161	154.45	143.84
0.7577	65	79.7	118	101	118.5	149.7	142.5	129.9

从以上数据可以得知，当电机采用 H 级绝缘时，电机的通风是完全满足电机散热的要求的。

通过对电机通风散热的分析，可以更精确地确定电机的通风需求，为进一步的优化电机通风效率提供数据。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn