

# Jmag 软件在高速电磁阀计算分析中的应用

胡猛 周望静 卜安珍 赵洪云

中国第一汽车股份有限公司无锡油泵油嘴研究所

**摘要:** 高速电磁阀广泛应用于发动机共轨喷油系统中，作为控制单元的主要执行部件之一，其性能直接影响喷油特性。高速电磁阀设计需要综合应用多领域知识，利用 Jmag 电磁计算软件可以与其他有限元软件综合进行电磁场、结构场、温度场以及控制方面的计算，为高速电磁阀系统设计提供理论基础。

**关键字:** 高速电磁阀、电磁场、结构场、温度场、控制

高速电磁阀广泛应用于发动机共轨系统中，随着排放法规的越来越严格，共轨系统对高速电磁阀的要求也越来越高。高速电磁阀的设计需要同时考虑电磁场、结构场、温度场以及驱动等方面的要求。随着有限元计算方法在电磁计算方面的日趋成熟，其在高速电磁阀设计过程中得到了广泛的应用。本文主要讨论 Jmag 软件在高速电磁阀计算分析过程中的应用。

## 1、电磁场计算

利用 Jmag 电磁软件可以对高速电磁阀的磁场分布进行分析，获得高速电磁阀工作过程中的电磁力变化曲线，同时获得电磁阀的开启和关闭响应时间。通过对电磁阀的磁场分布进行分析，可以对高速电磁阀结构进行优化，有利于更加合理地设计电磁阀结构、提高电磁阀性能。本文以某共轨喷油系统的高速电磁阀为例，讨论 Jmag 软件在高速电磁阀计算分析中的应用。图 1 为高速电磁阀结构简图。其中各零件材料如表 1 所示，各材料磁性能曲线如图 2 所示，材料磁性能曲线均由对应原材料测试得到，磁性能测试设备为德国 MAGNET-PHYSIK 公司的 B-H 测试仪，如图 3 所示。

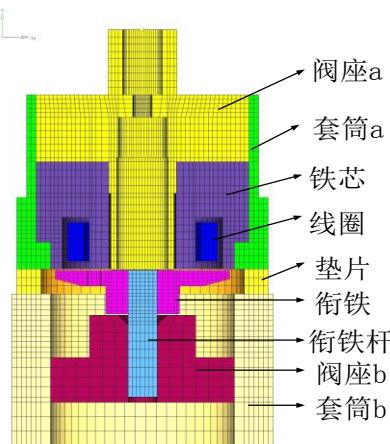


图 1 高速电磁阀结构简图

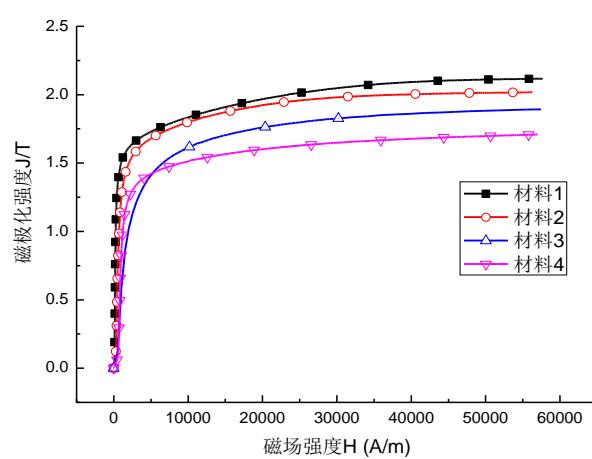


图 2 材料磁性能曲线



图 3 B-H 测试仪

表1 电磁阀零件材料列表

零件	材料	零件	材料
铁芯	材料 1	衔铁杆	材料 4
衔铁	材料 2	垫片	材料 4
阀座 a	材料 3	阀座 b	材料 4
套筒 a	材料 4	套筒 b	材料 4

为了便于后续结构场和温度场的耦合计算, 电磁阀的网格模型通过 Hypermesh 网格划分软件建立, 再导入到 Jmag 软件进行电磁边界条件设置, 并提交计算, 计算得到电磁阀内部的磁场分布及磁感应强度矢量分布如图 4 和图 5 所示。

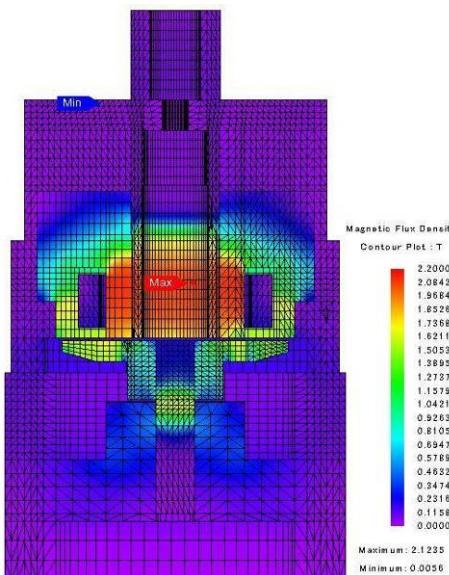


图 4 磁场分布云图

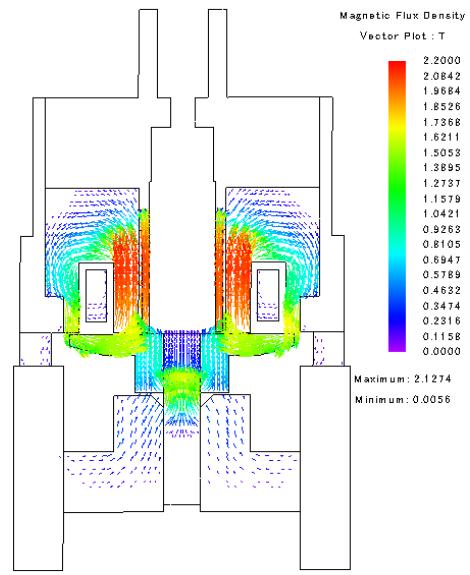


图 5 磁感应强度矢量分布图

从图 4 和图 5 可以清晰地了解磁场在电磁阀内部的分布情况, 通过分析磁场强度的分布情况可以很容易地判断磁路设计的合理性, 为合理设计电磁阀磁路提供参考。同时为了检验 Jmag 软件的电磁计算精度, 本文对电磁阀进行了静态电磁力测试, 利用 Zwick 静态电磁力测试装置(如图 6 所示)对电磁阀静态电磁力进行测试, 在固定气隙的情况下分别测试不同驱动电流时的静态电磁力, 同时利用 Jmag 软件对各不同电流情况下的电磁力进行计算, 得到静态电磁力测试结果与计算结果如图 7 所示(共进行了 4 次相同条件的静态电磁力测试)。



图 6 静态电磁力测试装置

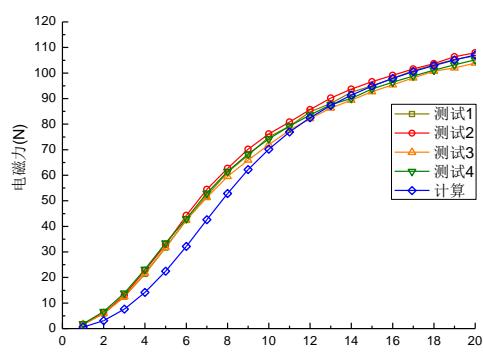


图 7 静态电磁力测试及计算结

从图 7 可以看出计算得到的电磁力与测试得到的电磁力基本一致，电流小于 10A 时计算的电磁力偏小，主要原因是被测电磁阀的材料存在剩磁，导致实际电磁力偏大。可以看出利用 Jmag 软件进行高速电磁阀的电磁场计算分析，准确度较高。

对于高速电磁阀来说，开启响应时间和保持电磁力是较关键参数，利用 Jmag 三维瞬态电磁场计算模块，可以较便捷地计算高速电磁阀的运动过程，采用的动力学方程如公式 1 所示。

$$F_1 + F_2 = M \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + K(x - x_0) + f \quad (1)$$

其中， $F_1$  是电磁力， $F_2$  是外力， $M$  是运动件质量， $C$  是阻尼系数， $K$  是回位弹簧刚度， $f$  是摩擦力， $x$  是运动件的位移， $x_0$  是运动件的初始位移。利用该模块计算得到高速电磁阀的运动件所受电磁力变化曲线及其位移变化曲线如图 8 所示。从图 8 计算结果中可以清晰地了解电磁阀的运动过程以及所受电磁力的变化过程，并可以方便地读出电磁阀的开启和关闭响应时间和电磁阀保持阶段的电磁力，明确电磁阀的基本特性，为电磁阀的动态优化设计提供方向性指导。

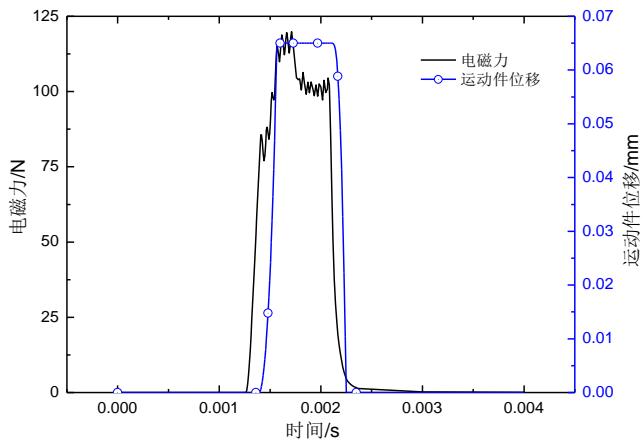


图 8 电磁力和位移变化曲线

## 2、电磁场与结构场的耦合计算

利用 Jmag 软件可以计算出高速电磁阀各零部件的电磁力分布情况，可以将该分布电磁力传递给结构有限元分析软件(本文采用 Abaqus 结构有限元分析软件)，以此作为其中的受力边界，从而实现高速电磁阀的结构有限元分析，由于该方式的受力边界更接近实际情况，有助于提高电磁阀零部件结构有限元分析精度，给高速电磁阀的结构设计提供较可靠的参考。本文以衔铁为例，介绍电磁场和结构场的耦合计算过程。从本文第一节的高速电磁阀电磁场的计算结果中，得到高速电磁阀衔铁完全吸合阶段的电磁力分布情况如图 9 所示。

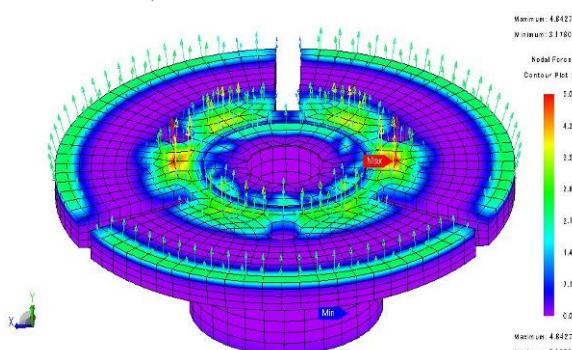


图 9 Jmag 软件计算得到的电磁力分布情况

图 9 为利用 Jmag 软件计算得到衔铁上的节点电磁力分布情况，利用 Jmag 软件中的“Force Mapping for Abaqus”功能，可方便地将分布电磁力传递给 Abaqus 结构有限元分析软件，作为受力边界条件，进行结构有限元计算，计算得到衔铁的受力分布情况如图 10 所示。对比图 9 和图 10 可以看出 Jmag 软件计算的电磁力精确地传递至 Abaqus 结构有限元软件，Abaqus 软件计算结果与 Jmag 软件的计算结果一致。同时计算得到衔铁的变形情况如图 11 所示。从图 11 可以看出衔铁的直径最

大处变形最大，变形为  $1.885e-4\text{mm}$ ，在控制变形范围内，符合设计要求。利用电磁场与结构场的耦合计算，可以较方便地验证高速电磁阀的结构可靠性，指导电磁阀结构设计。

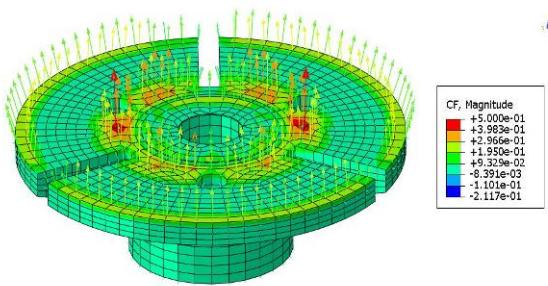


图 10 Abaqus 软件结构计算结果

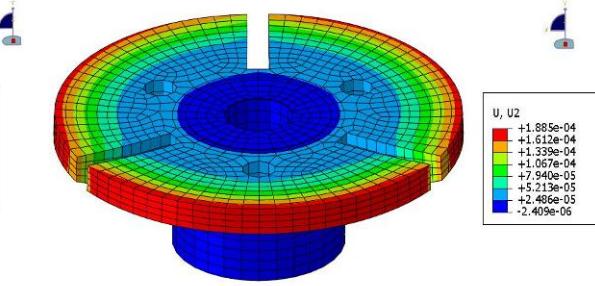


图 11 衔铁变形情况

### 3、电磁场与温度场的耦合计算

高速电磁阀设计过程中，需要考虑功耗，功耗会引起高速电磁阀零部件的发热，发热会影响线圈的绝缘性能及寿命，对电磁阀综合性能也有一定的影响。高速电磁阀的功耗主要包括线圈发热（铜耗）、涡流、磁滞损耗和机械损失等。高速电磁阀的主要材料为软磁材料，控制电流波形为直流脉冲保持形状，因此磁滞损耗较小。高速电磁阀的润滑系统较好，由机械损失产生的热量也很小。通常情况下，高速电磁阀的发热问题从线圈发热和涡流两方面进行考虑。本文仅以铁芯为例，介绍一下电磁阀工作过程中由于涡流损耗引起的铁芯温度变化。由第一节高速电磁阀电磁场的瞬态计算结果中，得到高速电磁阀铁芯某一时刻的焦耳热功率密度分布如图 12 所示。利用 Jmag 软件的“Heat Generation Mapping For Abaqus”功能，将瞬态计算得到的平均焦耳热功率密度分布传递给 Abaqus 热分析模型，并计算得到铁芯上因涡流而产生的温度分布如图 13 所示。利用电磁场与温度场的耦合计算方法，可较方便地了解因涡流在高速电磁阀零部件上产生的温度分布情况，对电磁阀线圈绝缘等级选择及散热结构设计具有重要参考意义。

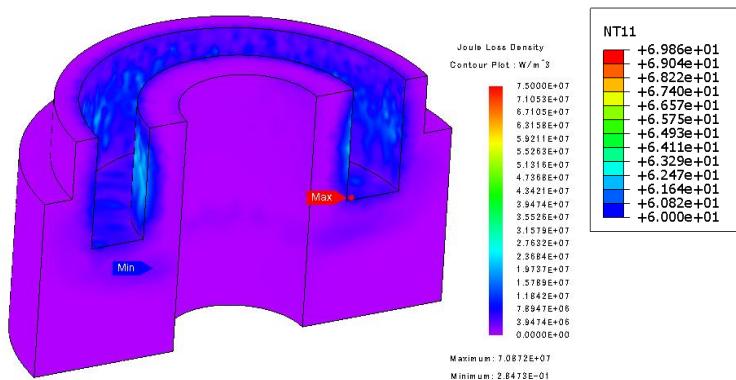


图 12 焦耳热功率密度分布

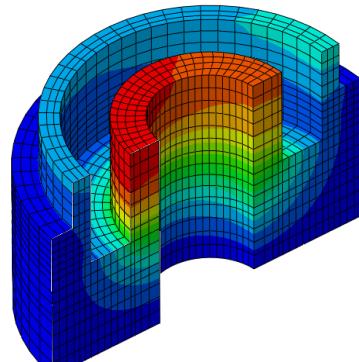


图 13 铁芯温度分布

### 4、Jmag-RT 与 Simulink 的耦合计算

高速电磁阀在电路中等效为一个含铁芯的电感元件，若忽略驱动电路中的等效电阻，电磁阀线圈的电压平衡方程如式 2 所示：

$$U = Ri(t) + L(x)(di / dt) + idL(x) / dt \quad (2)$$

其中,  $U$  为电磁阀线圈两端电压,  $R$  为线圈电阻值,  $i$  为电流,  $L$  为电感,  $x$  为衔铁的位移。由于电磁阀线圈的电感随着其等效铁芯的磁导率变化而变化, 而软磁材料的相对磁导率随着磁场强度的变化而呈非线性变化, 变化趋势如图 14 所示, 同时随着衔铁位移的变化, 电感的等效铁芯对应的磁导率也在变化, 因此, 准确描述电磁阀工作过程中线圈的电感值是非常困难的, 而线圈电感直接影响线圈电流的暂态响应, 也影响高速电磁阀的开启响应时间, 这给合理设计高速电磁阀驱动电流波形带来了很大困难。利用 Jmag-RT 与 Simulink 软件的耦合计算功能可以较方便地为电流波形设计提供参考。利用 Jmag-RT 的“Linear Solenoid”功能模块可以较快捷地计算出不同驱动电流和不同衔铁位移时对应的电磁力和电感值, 并生成 Simulink 软件可以识别的 S-Function 模块, 利用 Simulink 软件的电路库模型搭建控制电流, 可以较方便地控制驱动电压波形或驱动电流波形来计算高速电磁阀的开启响应时间和电磁力, 为合理设计驱动电流或电压波形提供指导。图 15 为利用 Simulink 软件耦合 Jmag-RT 模块形成的驱动电路简图及计算结果。

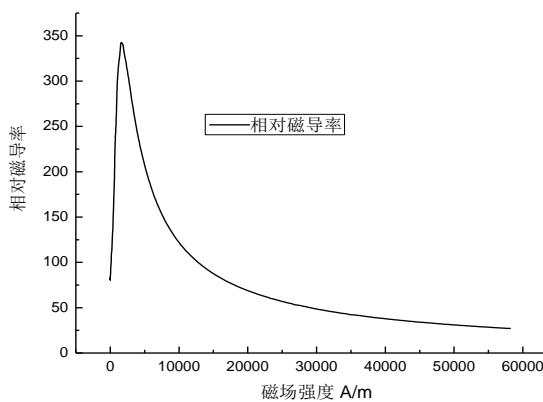


图 14 相对磁导率随磁场强度变化趋势

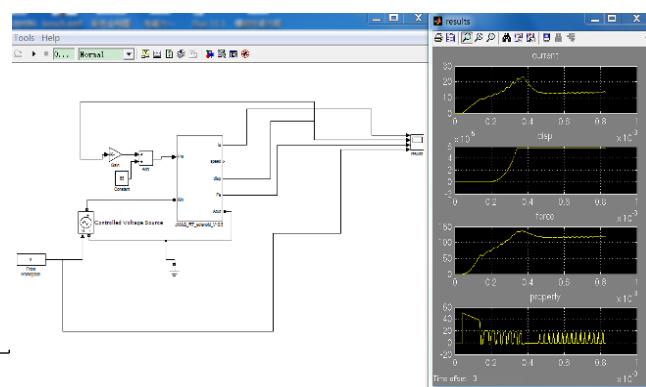


图 15 Simulink 软件控制电流简图及计算结果

## 5、结束语

Jmag 电磁分析软件, 具有较强的电磁场计算能力, 且计算精度高。利用 Jmag 软件可较方便地计算高速电磁阀的静、动态电磁性能, 为高速电磁阀的磁路设计提供指导, 同时利用 Jmag 软件与 Abaqus 有限元软件的强大接口功能, 可以实现电磁场与结构场、温度场等的耦合计算, 对电磁阀零部件的结构设计具有重要指导意义, 同时利用 Jmag-RT 与 Simulink 软件的耦合功能, 为优化驱动电流波形奠定了基础。

## 6、参考文献

- [1]. B. D. Cullity, C. D. Graham. INTRODUCTION TO MAGNETIC MATERIALS [M]. Piscataway: IEEE Press, 2009
- [2]. 近角聰信 (著) 葛世慧 (译). 铁磁性物理 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2002. 7
- [3]. 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- [4]. 汪志刚. 电控柴油机用电磁阀电磁场三维有限元分析 [J]. 现代车用动力, 2006 (1): 7-9
- [5]. 卢启龙, 欧阳明高, 杜传进. 电控柴油喷射系统用高速强力电磁阀的性能研究 [J]. 内燃机工程, 1997, 18 (3)
- [6]. 邹开凤, 李育学, 欧阳光耀, 李珩. 共轨喷油器高速电磁阀驱动电路设计与仿真研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2004 (3): 376-379