

# 基于磁路法与等效热网络法的航天 永磁同步电机设计与仿真

安林雪<sup>1,2</sup>, 王纯一<sup>1,2</sup>, 李春宇<sup>1,2</sup>, 蒋孟龙<sup>1,2</sup>, 邓 焯<sup>1,2</sup>

(1. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076;  
2. 航天伺服驱动与传动技术实验室, 北京 100076)

**摘要:** 针对航天永磁同步电机方案初步设计耗时长、过度依赖商业软件的问题, 基于磁路法和热网络法, 提出了一套方案设计阶段航天永磁同步电机磁热性能快速预估与仿真方法。给出了定子内径、定子外径、铁芯长度、匝数等关键参数的取值准则, 建立了包含36个节点集总参数热网络模型, 并以端部绕组为例给出了热平衡方程的详细推导过程。通过与成熟商业软件对比, 其电磁计算最大误差出现在电流有效值上, 偏差值为6.07%; 与样机实测值对比, 绕组温升最大误差为7.3%, 满足方案设计阶段预示精度要求, 为方案设计阶段航天永磁同步电机快速性能预估提供有力支撑。

**关键词:** 永磁同步电机; 磁路法; 等效热网络法; 电机设计; 方案设计

**中图分类号:** TP391.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-4080 (2022) 01-0044-06

## Aerospace Permanent Magnetic Synchronous Motor Design and Simulation Based on Magnetic Circuit Method and Equivalent Thermal Network Method

AN Linxue<sup>1,2</sup>, WANG Chunyi<sup>1,2</sup>, LI Chunyu<sup>1,2</sup>, JIANG Menglong<sup>1,2</sup>, DENG Ye<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Institute of Precision Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China;  
2. Laboratory of Aerospace Servo Actuation and Transmission, Beijing 100076, China)

**Abstract:** A set of rapid prediction and simulation methods for the performance analysis of aerospace permanent magnet synchronous motor at the scheme design stage were developed based on the magnetic circuit method and equivalent thermal network method, aiming at the problem of long time-consuming and excessive dependence on commercial software. The key parameters such as stator inner diameter, stator outer diameter, core length, number of turns, etc. were introduced with emphasis. A lumped parameter thermal network model with 36 nodes was established, and the winding overhang thermal balance equation was conducted to explain the detailed derivation process. The maximum error in electromagnetic calculation was the current effective value, in which the deviation was 6.07%, compared with the mature commercial software. While the maximum error of the winding temperature deviation was 7.3%, compared with the measured value of the prototype. The proposed methods provided powerful support for the rapid performance prediction of aerospace permanent magnet synchronous motor at the scheme design stage.

收稿日期: 2021-11-03; 修订日期: 2021-12-24

作者简介: 安林雪 (1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为伺服系统多学科联合仿真技术。

E-mail: alxdyx@163.com

while the predictive accuracy satisfied the design requirements.

**Key words:** Permanent magnetic synchronous motor; Magnetic circuit method; Equivalent thermal network method; Motor design; Scheme design

## 0 引言

机电伺服系统作为伺服机构的重要一员, 越来越多地应用到航天领域中<sup>[1]</sup>。航天机电伺服系统具有短时高功率、长时低功率、制动负功率的特性, 由于永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 高效率、高功率因数和高功率密度的特点<sup>[2]</sup>受到航空航天领域研究者的广泛关注<sup>[3-7]</sup>。电机作为航天机电伺服系统的能量转换装置, 其电磁、磁力转化效率及热损耗估算的快速性和准确性是产品研制的关键。现有电机电磁设计方法包括磁路法、解析法和有限元法等; 热设计方法包括热路法、等效热网络法、有限元法和流体力学方法等。解析法<sup>[8]</sup>在工程上常无法获得精确解; 有限元法<sup>[9]</sup>依赖于详细的几何参数; 在信息较少的方案设计阶段均无法使用; 磁路法<sup>[10]</sup>和等效热网络法<sup>[11]</sup>原理清晰、便于理解, 常常用于性能的初步预估, 但在航天领域, 尚无文献给出磁路法与等效热网络法用于电磁热分析的详细流程及各关键参数的取值准则。

基于此, 本文提出了基于磁路法和等效热网络法的电机磁热快速设计仿真方法。以表贴式永磁同步电机为例, 给出了基于磁路法进行 PMSM 电磁设计关键参数的取值标准; 同时建立了包含 36 个节点的 PMSM 集总参数热网络分析模型, 并选取其中关键节点推导了热平衡方程, 最后应用该方法对某航天电机产品进行了磁热仿真分析, 并分别与商软计算数据和实物试验数据对比。结果表明, 本文所提方法计算效率较高, 仿真精度能够满足方案阶段需求, 可用于指导电机方案的快速性能预估。

## 1 基于磁路法的永磁同步电机电磁设计

### 1.1 磁路法简介

磁路是运用“路”的观念, 通过理想化的模型, 将宏观电磁现象和电磁过程等效在一维的“磁通通路”内进行分析研究。具体是将空间中不均匀分布的磁场转化为等效的多段磁路, 并认为

磁通在每段磁路中沿界面和长度均匀分布, 将磁场的计算转化为磁路的计算<sup>[8]</sup>。磁路与电路具有很高的相似性, 如表 1 所示, 可以借鉴电路理论分析的方法。

表 1 电路与磁路理论对比

Tab. 1 Comparison of circuit theory and magnetic circuit theory

电路		磁路	
基本物理量及表达式	单位	基本物理量及表达式	单位
电流: $I$	A	磁通: $\Phi$	Wb
电动势: $E$	V	磁动势: $F = NI$	A
电压降: $U$	V	磁压降: $\Phi R_m = HI$	A
电阻: $R = I/A$	$\Omega$	磁阻: $R_m = l/\mu A$	$H^{-1}$
欧姆定律: $E = IR$		欧姆定律: $F = \Phi R_m$	
基尔霍夫第一定律: $\sum I = 0$		基尔霍夫第一定律: $\sum \Phi = 0$	
基尔霍夫第二定律: $\sum E = \sum U$		基尔霍夫第二定律: $\sum F = \sum \Phi R_m = \sum HI$	

### 1.2 航天 PMSM 电磁设计关键参数

航天 PMSM 电磁设计的基本任务是在给定边界条件下获得电机机电能量转换核心部件的尺寸和材料参数, 如定子铁芯内外径、定子槽数、转子级数、永磁体厚度和宽度、铁芯轴向叠压厚度、绕组匝数等。为此, 需首先确定输入参数 (包括空间几何包络、典型工况点的转矩、转速及运行时间等); 然后根据输入参数确定核心部件的尺寸和材料属性。其中的关键设计参数包括:

1) 基本设计点。选取原则为: 取运行时间最长时段及其所对应的转矩和转速作为一组设计点。若存在多个运行时间接近的时段, 则选取对应运行转矩中较大的一组作为设计点。

2) 定子铁芯尺寸, 主要是定子外径 ( $D_1$ ) 和铁芯长度 ( $l_1$ ) 的选择。其中定子外径的选取准则为  $D_1 = \min(h, \omega) - 2h_r$ , 即铁芯高度  $h$  和宽度  $\omega$  包络取较小者, 机壳厚度按经验可表示为

$$h_r = \begin{cases} 4 & \min(h, \tau) \leq 100 \text{ mm} \\ 5 & 100 \text{ mm} < \min(h, \tau) \leq 200 \text{ mm} \\ 6 & 200 \text{ mm} < \min(h, \tau) \leq 300 \text{ mm} \\ 7 & 300 \text{ mm} < \min(h, \tau) \end{cases} \quad (1)$$

铁芯长度的表达式为  $l_1 = l - 2(h_{\text{end}} + l_{\text{ec}} + h_{\text{wend}}) - 2 \text{ mm}$ , 其中  $l$  为长度包络,  $h_{\text{end}}$  为端盖厚度, 其计算表达式如式 (2), 爬电距离  $l_{\text{ec}}$  计算表达式如式 (3), 绕组端部高度  $h_{\text{wend}}$  计算表达式如式 (4), 其中  $i$  为定子铁芯内径与外径比

$$h_{\text{end}} = \begin{cases} 3.5 & \min(h, \tau) \leq 100 \text{ mm} \\ 5 & 100 \text{ mm} < \min(h, \tau) \leq 200 \text{ mm} \\ 6 & 200 \text{ mm} < \min(h, \tau) \leq 300 \text{ mm} \\ 8 & 300 \text{ mm} < \min(h, \tau) \end{cases} \quad (2)$$

$$l_{\text{ec}} = \begin{cases} 2 \text{ mm} & u \leq 160 \text{ V} \\ 3 \text{ mm} & 160 \text{ V} < u \leq 450 \text{ V} \\ 4 \text{ mm} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$h_{\text{wend}} = \begin{cases} \frac{\pi D_1 \times i \times 0.5}{Q_s} & p \geq 5 \\ \frac{\pi D_1 \times i \times 0.5}{p} & p < 5 \end{cases} \quad (4)$$

3) 级数与槽数, 航天 PMSM 多为 8 级 9 槽或 10 级 12 槽 (转矩波动小, 端部长度短)。

4) 相绕组串联匝数。确定准则如式 (5), 其中  $k_{w1} = 0.933$  为初始化绕组基波系数, 气隙磁通  $\phi_{g1}$  表达式如式 (6)。

$$N_{\text{total}} = \frac{E}{4.44 k_{w1} f_N \phi_{g1}} \quad (5)$$

$$\phi_{g1} = \frac{2}{\pi} B_{g1} l_1 \frac{\pi D_{i1}}{2p} \quad (6)$$

### 1.3 电磁设计仿真实例

电机磁路法进行电磁性能解算的核心是实现对定子内外径比、槽高、槽宽、永磁体厚度、极弧系数、每槽导体数的最优匹配。以表 2 给定的电机设计包络, 以效率最优为原则, 利用上述公式反复迭代, 优选出的电机关键设计参数如表 3 所示。

表 2 电机设计包络表

Tab. 2 Motor design envelopment			
旋转方向宽度/mm	83	旋转方向高度/mm	83
轴向方向长度/mm	120	直流电源电压/V	100
典型工况点 转矩/(N·m)	[10 3 8]		
典型工况点 转速/(r/min)	[1 000 4 000 2 500]		
典型工况点 运行时间/s	[5 60 180]		

表 3 电机关键设计参数

Tab. 3 Summary of motor design parameters

1. 铁芯参数							
槽数	12	极数	10	定子外径/mm	75	定子内径/mm	41.3
铁芯长度/mm	69.7	转子外径/mm	39.9	转子内径/mm	12.4	惯量/(kg·mm <sup>2</sup> )	159.7
2. 绕组参数							
槽满率/%	0.8	每槽导体数	18	并绕根数	4	线径	1.16
3. 永磁体参数							
剩磁/T	1.28	矫顽力 kA/m	970	厚度/mm	2.5	极弧系数	0.95

## 2 基于热网络法的 PMSM 热分析

### 2.1 等效热网络法实施步骤

等效热网络法即应用图论原理将电机划分成多个离散区域, 将损耗热源集中在离散的区域节点, 节点通过热阻连接, 根据热量传递原理建立二维网络拓扑, 进而对电机各部件温升情况进行解算的方法。基本实施步骤如下:

1) 分析电机结构与边界, 简化模型并确定求解区域。对求解区域进行剖分, 作离散化处理。部分单元形状、大小可以任意选取, 但为计算方便, 一般网格剖分要整齐, 根据温差大小确定某一区域网格的疏密。

2) 将分布参数转化成集总参数, 认为热源集中分布于节点中心, 热流通过相关节点进行传热, 将节点温度作为求解变量。

3) 利用图论构建等效热网络。确定网络参

数, 包括热阻、热导、损耗的计算值及其相关边界条件的处理。

4) 建立数学模型。根据能量守恒定律, 列出网络节点的热平衡方程。

## 2.2 PMSM 热网络建立及热平衡方程推导

航天 PMSM 存在热传导、热对流及热辐射 3 种方式。其基本结构包括端盖、定子轭、定子齿、绕组、永磁体、转子、轴承等。建立的热网络模型如图 1 所示。

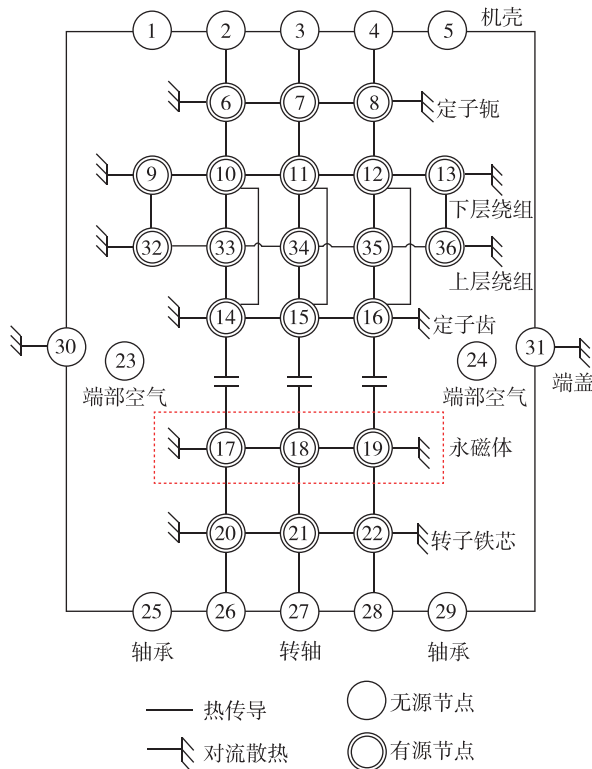


图 1 航天 PMSM 热网络模型

Fig. 1 Thermal network model of aerospace permanent magnetic synchronous motor

以端部下层绕组节点 13 为例介绍热平衡方程推导过程。节点 13 为外端部下层绕组, 与节点 24 (机内空气)、节点 12 (槽部绕组)、节点 36 (外端部上层绕组) 有热量交换。节点 13 和节点 24 之间的等效散热面积为

$$S_{1324} = \frac{\pi(D_1 + 2d + 2R_w)h_{d1} + \pi[(D_1 + 2d + 2R_w)^2 - D_1^2]/2}{2} \quad (7)$$

散热系数  $\alpha_{1324} = 15 + 6.5v_2^{0.7}$ , 则外端部绕组热导  $G_{1324} = \alpha_{1324} S_{1324}$ 。  $R_w$  为绕组外端过渡圆半径,  $h_{d1}$  为定子槽底到槽口的高度,  $v_2$  为转子表面线速度。

节点 13 与节点 12 的导热面积为  $S_{1312} = Q_1 N_s \pi (N_{t1} d_{l1}^2 + N_{t2} d_{l2}^2) / 8$ , 节点 13 与节点 12 的热导为

$$G_{1312} = \frac{\lambda_{Cu} S_{1312}}{f_{w1}/4 + h_{er}/2} \quad (8)$$

式中,  $N_{t1}$  和  $N_{t2}$  为导线并绕根数,  $d_{l1}$  和  $d_{l2}$  分别为并绕导线直径,  $N_s$  为每槽导体数,  $f_{w1}$  为绕组外端伸出长度,  $\lambda_{Cu}$  为铜绕组导热系数。

在稳态情况下, 根据热平衡原理, 节点 6 产生的热量加上其他节点传入节点 6 的热量等于从节点 6 流出的热量, 可得节点 6 的热平衡方程

$$W_6 - (G_{1313} T_{13} - G_{1312} T_{12} - G_{1324} T_{24} - G_{1336} T_{36}) = \rho_6 c_6 V_6 \frac{dT_6}{dt} \quad (9)$$

其中

$$G_{1313} = G_{1312} + G_{1324} + G_{636} \quad (10)$$

## 2.3 热网络法仿真实例

利用第 2 节确定的电机参数, 结合本节搭建的热网络模型, 在表 2 中的典型工况下, 假设初始环境温度为  $25^\circ\text{C}$ , 散热条件为自然风冷, 仿真获得的电机绕组端部及壳体的温升曲线如图 2 所示。从图中可以看出, 第 2 节电磁设计得到的电机方案, 经过 245 s 热仿真, 电机绕组端部温度最高达到了  $115.2^\circ\text{C}$ , 壳体温度达到  $97.74^\circ\text{C}$  (受漆包线最高承温限制, 通常要求不超过  $200^\circ\text{C}$ )。因此, 表 3 电机方案满足初步阶段热设计需求。

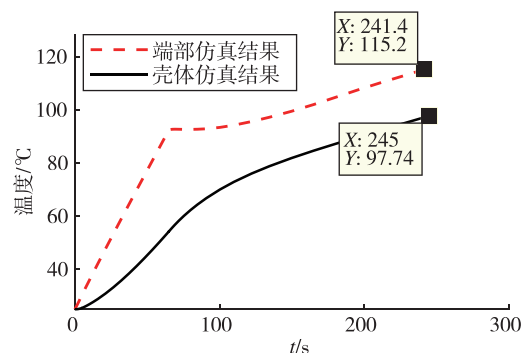


图 2 基于热网络法得到的绕组端部与壳体温升曲线  
Fig. 2 Temperature rise curve of winding and case obtained based on thermal network method

## 3 电机磁热快速设计仿真方法校验

为验证所提方法的正确性及计算结果的准确度, 将本文所提方法获得的仿真结果分别与成熟商业软件的仿真结果、实物试验结果进行比对。

其中电磁分析选用 ANSYS/Rmxprt 电机快速设计软件,表 4 给出了商软仿真结果、磁路法计算结果和样机实测结果及其相对误差。可以看出,磁路法与商软的误差最大为 6.07%,最小为 1.66%;而与实物样机之间的最大误差低于 10%。

表 4 电机电磁性能对比汇总  
Tab. 4 Comparison of electromagnetic performance of motor

性能指标	磁路法	商软 (与磁路法 相对误差)	样机 (与磁路法 相对误差)
空载反 电动势/V	41.6	39.5 (5.32%)	38 (9.5%)
电流/A	26.3	28 (6.07%)	27 (2.6%)
电压/V	85.7	84.3 (1.66%)	90 (4.8%)

为与实物样机温升数据做对比,将温升试验工况(表 5 所示)赋予热网络模型中,其中初始温度为 38.1 °C,得到绕组端部温升仿真与试验对比曲线,如图 3 所示,具体数据及误差如表 6 所示。由表 6 可以看出,利用热网络法得到的电机绕组端部温升与试验数据趋势基本一致,最大误差为 7.3%,满足方案设计阶段对电机热性能快速预估的需求。

表 5 电机温升仿真与试验工况点  
Tab. 5 The simulation and test working condition of temperature rise

参数	单位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
电机端 负载力矩	N·m	1.5	3	6.4	8
电机端转速	r/min	1 200	500	500	300

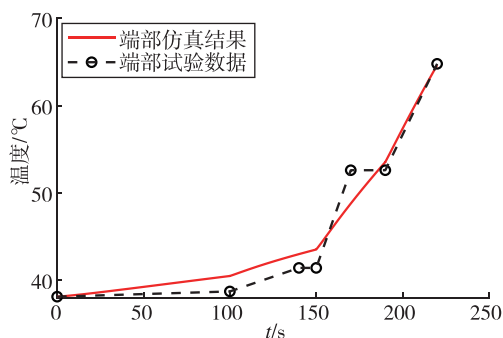


图 3 电机绕组端部温升曲线对比图  
Fig. 3 Comparison of temperature rise of winding

表 6 电机绕组端部温升数据

Tab. 6 Data of temperature rise of winding

时间/s	100	140	150	170	190	220
仿真	40.47	42.98	43.51	48.77	53.54	64.65
试验	38.7	41.4	41.4	52.6	52.6	64.8
相对误差/%	4.6	3.8	5.1	7.3	1.8	0.2

## 4 结论

通过对基于磁路法和等效热网络法的航天 PMSM 电磁热仿真方法的建立得出以下结论:

1) 在电磁性能计算方面,提出的基于磁路法的计算结果与商业软件仿真计算结果偏差较小,在进一步完善关键参数取值准则与约束后,可应用于航天 PMSM 电磁性能的快速方案设计;

2) 基于热网络法建立的电机热分析模型可用于电机方案中热源部分(绕组、永磁体等)的定量温升分析,但因涉及的热容、热阻参数较多,要实现全机的定量热分析,还有待进一步精细化;

3) 相比于商业软件的繁琐设定、输出结果提取,本文建立的方法只需要输入几何包络、典型工况点、初始环境温度等信息即可快速获取一套满足出力要求且效率最高、温升可量化预估的初步电机方案,有效缩短了航天 PMSM 设计周期,提升设计效率。

## 参考文献

- [1] 卢二宝,闫丽媛,于志远,等. 航空航天机电伺服系统可靠性设计综述[J]. 导航定位与授时,2016,3(4):53-57.
- [2] 刘文娟,潘超,米俭. 永磁同步电机热分析研究综述[J]. 东北电力大学学报,2017,37(2):93-99.
- [3] 陈礼洋,赵文祥,吉敬华. 基于等效热网络法的容错永磁电机的温度分析和计算[J]. 电机与控制应用,2016,43(4):45-50.
- [4] 孙桂林,赵勇,蒋佳楠,等. 航空电动反推力装置用永磁同步电机热分析[J]. 微特电机,2020,48(9):13-17.
- [5] 郭庆波. 飞行器用永磁同步电机控制系统效率提升关键技术[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [6] 张江鹏. 高空飞行器用高效率高功率密度永磁同步电机研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [7] 孙沛亮. 全电飞机驱动用永磁同步电机高功率密度设计方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [8] 刘阳. 微型混合动力汽车用永磁同步电机的设计[D]. 锦州:辽宁工业大学,2018.

- [9] 邱瑞林, 华青松, 张洪信, 等. 基于田口法的永磁同步电机转子优化设计[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2020, 35(2):57-61.
- [10] 栾庆伟. 电动汽车用永磁同步电机设计与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2019.
- [11] 兰志勇, 魏雪环, 李虎如, 等. 基于集总参数热网络法的永磁同步电机温度场分析[J]. 电气工程学报, 2017, 12(1): 17-21.
- [12] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

**引用格式:** 安林雪, 王纯一, 李春宇, 等. 基于磁路法与等效热网络法的航天永磁同步电机设计与仿真[J]. 宇航总体技术, 2022, 6(1):44-49.

**Citation:** An L X, Wang C Y, Li C Y, et al. Aerospace permanent magnetic synchronous motor design and simulation based on magnetic circuit method and equivalent thermal network method[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2022, 6(1): 44-49.