

# 基于 Isight-Matlab 的齿轮泵容积效率计算程序设计

李侃,司国雷,陈君辉,何毅,兰三东

(四川航天烽火伺服控制技术有限公司,四川 成都 610000)

**摘要:**容积效率作为衡量齿轮泵性能的关键指标之一,在其设计中具有举足轻重的位置,而设计过程中容积效率的计算速度与准确度决定着设计的效率与参数设计是否合理。详细介绍了基于 Isight-Matlab 容积效率自动计算的设计流程,为容积效率快速、准确计算提供了方法。

**关键词:**容积效率;Isight-Matlab;自动计算

**中图分类号:**TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)02-0113-04

## Program Design of Volumetric Efficiency Calculation of Gear Pump Based on Isight-Matlab

LI Kan, SI Guolei, CHEN Junhui, HE Yi, LAN Sandong

(Sichuan Aerospace Fenghuo Servo Control Technology Corporation, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** As one of the key indicators for measuring the performance of gear pumps, volumetric efficiency plays an important role in its design. The calculation speed and accuracy of volumetric efficiency during the design process determine whether the design efficiency and parameter design are reasonable. The article, based on Isight-Matlab, introduces the design flow of automatic calculation of volumetric efficiency in detail and presents a reference direction for rapid and accurate calculation of volumetric efficiency.

**Keywords:** volumetric efficiency; Isight-Matlab; automatic calculation

## 0 引言

现代齿轮泵采用工程设计理论即运用经验公式或者后期试验验证并修改和优化原型来进行研制的方式较为普遍,研制出的产品大多只适用于民用等中低端行业,无法满足日益严苛的航空航天对齿轮泵的工况要求<sup>[1]</sup>。同时,由于设计复杂,人工计算量大,传统的设计方法效率较低,且容易出错。因此,设计一种齿轮泵理论计算程序进行完整、准确、快速地计算便成为研制高端齿轮泵的关键,既可以提升齿轮泵的设计效率,又能在设计阶段及时发现问题并确定影响因素同时对其加以修正。运用齿轮泵容积效率自动计算程序将会在一定程度上提高齿轮泵的设计效率。

## 1 程序搭建流程

计算程序的基本搭建流程大致如下:在 Matlab 中建立黏度计算及换算的 simulink 模型—Matlab 中建立用于在 Isight 中对黏度计算的 simulink 模型调用的 M 文件—Isight 中搭建容积效率基础模型—在 Isight 各 calculator 中输入相应的泄漏流量计算公式及容积效率计算公式—在 Isight 的 Matlab 组件中对调用 simulink 模型的各种命令要求进行配置—仿真运算。

### 1.1 黏度计算

油液黏度值的大小对齿轮泵的泄漏影响很大,黏度过低将会导致泄漏加剧,容积效率下降。因此准确获取在一定温度范围内油液的黏度值尤为重要。黏度值一般由厂家给出,本文采用 RP3 航空三号煤油作为齿轮泵的工作介质,其运动黏度随温度的升高呈指数下降趋势,如图 1 所示。

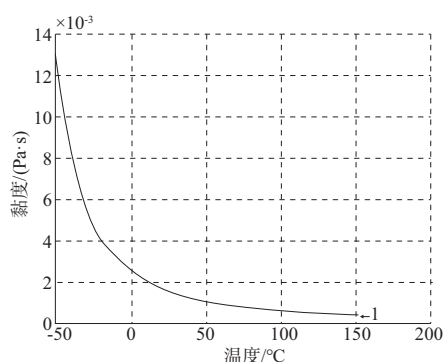


图 1 RP3 运动黏度

流量计算公式中一般采用动力黏度,因此需要将运动黏度转换为动力黏度。运用 Matlab/simulink 程序通过查表的形式对其进行换算,如图 2 所示。

基金项目:四川省科技计划项目(2019YFG0059);四川省重大科技专项(2019YFG0385)

第一作者简介:李侃(1989—),男,四川成都人,工程师,硕士研究生,研究方向为机电一体化。

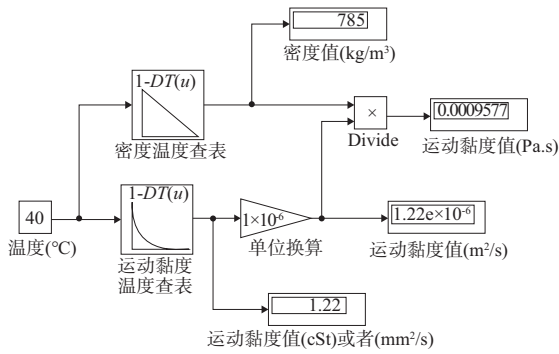


图 2 RP3 动力黏度

### 1.2 编写调用 Matlab/simulink 程序的 M 文件

Isight 中的“Matlab 组件”只支持调用 Matlab 软件中的 M 文件,因此,为了获取 Matlab/simulink 程序中的动力黏度值,必须编写相应的调用程序。

程序如下:

```
%定义 simulink 的输入变量
assignin('base','Temperature',Temperature);
opt = simset('solver','ode3','SrcWorkspace','Current');
%调用程序
RP3_viscosity_versus_temperature.mdl
[tout,xout,yout] = sim('RP3_viscosity_versus_temperature.mdl',[0 10],opt);
```

$$\begin{cases} \text{inv}\alpha' = \tan\alpha' - \alpha' = \frac{2(x_1 + x_2)\tan\alpha}{Z_1 + Z_2} + \text{inv}\alpha \\ \alpha' = 0.285\ 714\ 285\ 7 + 0.000\ 001\ 428\ 571\ 429 \sqrt{-9.911\ 400\ 002 \cdot 10^9 + 7 \cdot 10^{11} \cdot \text{inv}\alpha'} \end{cases}$$

### 1.4 Isight 程序搭建

Isight 作为优秀的优化仿真软件平台,在其中可以方便集成结构、流体、有限元等软件并对其中需要优化的参数进行多目标优化分析、稳健性设计、田口设计、DOE 分析等。Isight 将四大数学算法(实验设计、近似建模、探索优化和质量设计)融为有机整体,能够让计算自动化、智能化地驱动数学样机的设计过程,更快、更好、更省地实现产品设计<sup>[5-10]</sup>。

齿轮泵容积效率自动计算程序只需 Isight 中的 Task 组件、Matlab 组件以及 calculator 组件以及 Matlab 软件的 M 文件和 simulink 模型即可完成其所有功能,如图 4 所示。

效率是衡量齿轮泵工作经济性的重要指标之一。齿轮泵的容积效率为实际流量  $Q$  与其理论流量  $Q_1$  之比,即

$$\eta_v = \frac{Q}{Q_1} = \frac{Q_1 - \Delta Q}{Q_1}$$

式中  $\Delta Q$  是其容积损失,主要包括径向泄漏、端面泄漏、啮合泄漏及液体的弹性压缩损失等,其中端面损失占比达到 80%,径向泄漏占比达到 15%。

%定义输出变量  
viscosity = yout(10,1)  
同时将 Matlab/simulink 中的温度参数设置为参数  $T_{\text{temperature}}$  以供软件之间相互调用使用,如图 3 所示。

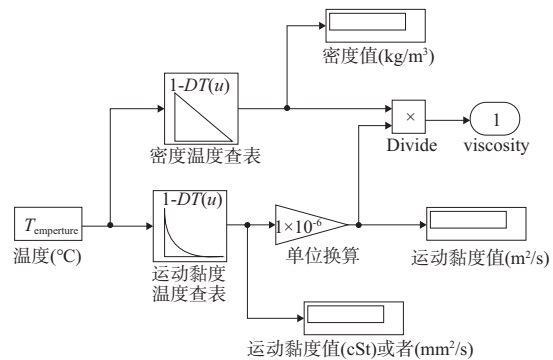


图 3 M 文件调用 simulink 设置

### 1.3 渐开线计算

齿轮泵流量的计算依赖于齿轮参数的设计和计算。齿轮轮齿的参数计算均始于对渐开线函数的计算,渐开线函数的形式为  $\text{inv}\alpha = \tan\alpha - \alpha$ ,压力角一般选定固定值,因此计算较为简单。但是由于其具有代数环的性质,因此在 Isight 中无法对角变位齿轮中啮合角  $\text{inv}\alpha$  进行直接求解,由于啮合角求解的代数环相对比较简单,可以采用泰勒级数展开的形式来进行求解<sup>[2-4]</sup>。展开后得近似形式为:

径向泄漏主要是齿轮齿顶圆与泵壳体内圆之间产生的泄漏,包括齿顶与泵壳体内圆之间的牵连运动以及高低压腔压差引起的泄漏两部分<sup>[11]</sup>,如图 5 所示。

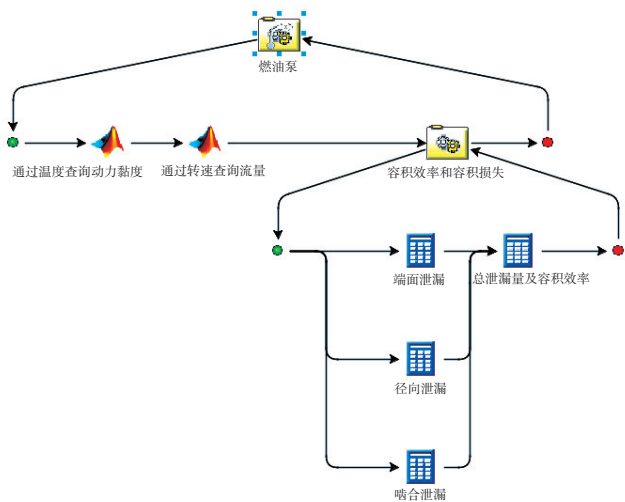


图 4 Isight 自动仿真程序

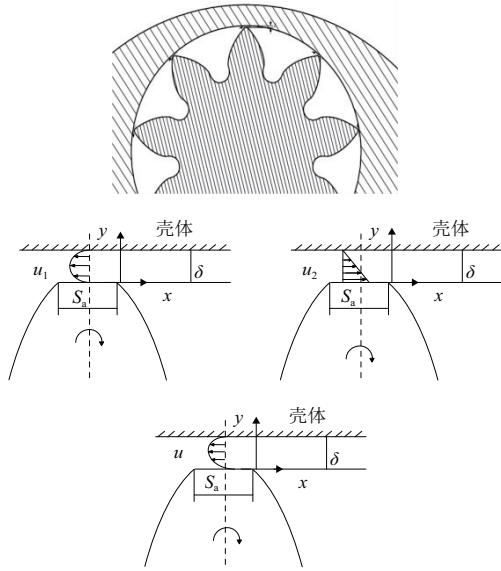


图 5 径向泄漏示意图

$$q_{\text{径向泄漏}} = \left( \frac{b\delta^3}{\mu S_a Z_0} \Delta p - \frac{b\pi n R_a \delta}{5} \right) \times 10^4 \quad (\text{L/min})$$

齿轮端面间隙泄漏包括齿轮泵的旋转导致的齿轮端面与浮动侧板之间的牵引运动泄漏量和齿轮泵高压区及过渡区沿轴向两侧流向轴承腔的泄漏量<sup>[11]</sup>,如图 6 所示。

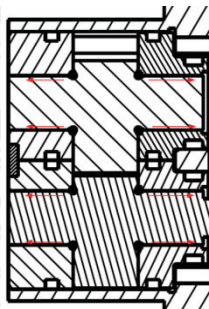


图 6 端面泄漏示意图

$$q_{\text{端面泄漏}} = \left\{ 2 \left[ \frac{(R_a - R_f) s^3}{\mu S} \cdot \frac{\Delta p}{Z_0} + 2 \cdot \frac{s^3 \Delta p}{\mu \cdot \ln \left( \frac{R_f}{R_z} \right)} \left( \theta_2 + \pi \frac{Z_0 - 1}{Z} \right) \right] \right\} \times 10^4 \quad (\text{L/min})$$

啮合泄漏主要是指齿轮啮合线处的泄漏。主要包括齿轮间由高压部分流向低压部分的流量以及齿轮相互啮合的卷吸速度引起的泄漏量<sup>[12]</sup>。

$$Q_m = \frac{bh_m^3 \Delta p}{12\mu l_m} \mp bU h_m$$

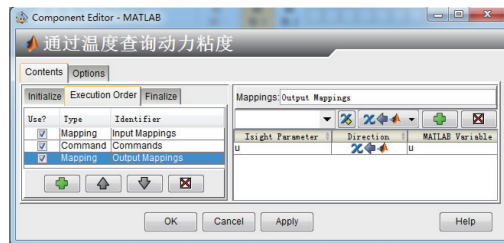
上述式中:  $b$  为齿宽,  $m$ ;  $\delta$  为径向间隙,  $m$ ;  $\mu$  为动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $S_a$  为齿顶圆齿厚,  $m$ ;  $Z_0$  为过渡区齿数;  $\Delta p$  为高低压腔压差,  $\text{Pa}$ ;  $n$  为齿轮转速,  $\text{r/min}$ ;  $R_a$  为齿顶圆半径,  $m$ ;  $R_f$  为齿根圆半径,  $m$ ;  $s$  为端面间隙厚度,  $m$ ;  $S$  为分度圆齿厚,  $m$ ;  $R_z$  为齿轮轴半径,  $m$ ;  $\theta_2$  为高压区包角,  $\text{rad}$ ;  $Z$  为齿轮齿数;  $h_m$  为节点啮合处的油膜厚度,  $m$ ;  $l_m$  为油膜接触宽度,  $m$ ;  $U$  为啮合点处的卷吸速度,  $\text{m/s}$ 。

## 1.5 Isight 调用 Matlab 设置

Isight 与 Matlab 之间的数据交互和调用通过下面的设置完成;数据交互是通过 Isight 中的 Input Mappings 和 Output Mappings 参数来实现的;Isight 调用 Matlab,同时使 Matlab 运行 simulink 计算,相应的参数值是通过在 Isight 的 Matlab 组件中设置 Commands 实现,如图 7 所示。



(a)



(b)



(c)

图 7 Isight 中 Matlab 组件参数及调用命令配置

## 2 仿真实例

以某齿轮泵作为设计计算原型,其主要参数为:油液温度  $40^\circ\text{C}$ , 泵高低压腔压差  $3.5\text{ MPa}$ , 齿轮转速  $4\ 000\ \text{r/min}$ , 分度圆压力角  $\alpha = 18^\circ$ , 变位系数  $x = 0.6$ , 中心距  $a = 18\ \text{mm}$ , 齿宽  $b = 10\ \text{mm}$ , 齿数  $Z = 9$ , 过渡区齿数  $Z_0 = 4$ , 齿轮轴轴径  $R_z = 5\ \text{mm}$ , 其计算结果为, 径向泄漏流量  $0.4\ \text{L/min}$ , 端面泄漏量  $0.78\ \text{L/min}$ , 啮合泄漏量  $1.36 \times 10^{-15}\ \text{L/min}$ , 容积效率为  $82.4\%$ , 与台架实测数据一致。

## 3 结语

通过搭建 Isight-Matlab 齿轮泵容积效率计算程序,可以在早期快速针对设计原型进行数据迭代,加快理论设计。其具有以下优点:

- 1) 计算方便、速度快、精确度高;
- 2) 可方便地分析影响容积效率的主要参数,快速修改原型设计;
- 3) 后期可通过 Isight 运用多目标优化针对参数进行

进一步优化,使得设计更加完善、可靠。

#### 参考文献:

- [1] 赖宇阳,姜欣,方立桥. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012.
- [2] 马晓虹. Matlab 中的代数环问题及其消除方法[J]. 科技广场,2010(7):159-161.
- [3] 耿华,杨耕. 控制系统仿真的代数环问题及其消除方法[J]. 电机与控制学报,2006,10(6):632-635.
- [4] 邱杰,原渭兰. 数字计算机仿真中消除代数环问题的研究[J]. 计算机仿真,2003,20(7):33-35,40.
- [5] 杨敬江,何松,李先军. 基于 Isight 平台的蜗壳式混流泵多目标优化设计[J]. 中国农村水利水电,2019(12):176-180.
- [6] 王成锋,周昌迅. 基于 MATLAB 的外啮合齿轮泵优化设计[J]. 机械工程师,2011(7):119-120.

- [7] 杨国来,张晓丽,李文祺,等. 基于 MATLAB 的渐开线外啮合斜齿轮泵流量脉动特性的仿真[J]. 液压与气动,2015(2):57-58,73.
- [8] 冯开林,张冠,王飞,等. 基于 Matlab 的齿轮泵脉动性的分析与优化[J]. 机床与液压,2013,41(18):7-10.
- [9] 王成锋,周昌迅. 基于 MATLAB 的外啮合齿轮泵优化设计[J]. 机械工程师,2011(7):119-120.
- [10] 董新华,李爱玲. 基于 Matlab 的外啮合齿轮泵结构优化[J]. 机械,2010,37(增刊1):29-31.
- [11] 何存兴. 液压元件[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [12] 李玉龙. 外啮合齿轮泵困油机理、模型及试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2009.

收稿日期:2020-03-09

#### (上接第 105 页)

上述仿真结果说明斜铰旋翼能够快速响应转速的变化,且无论处于何种工作状态,对于相同的输入,斜铰旋翼的响应总是相似的。

## 4 结语

本文研究了斜铰旋翼的应用可行性,特别是其对于旋翼飞行器机体姿态操纵的能力。首先通过建立斜铰旋翼数学模型,结合对于斜铰旋翼工作原理的分析,得出基于转角反馈的转速调节规律,并通过系统仿真,计算出在此调节规律下斜铰旋翼能够形成有效的操纵力矩。其次,在已有转角反馈的情况下,人为加入滞后角,达到了控制斜铰旋翼有效操纵力矩方向的目的。考虑到斜铰旋翼特殊的操纵方式,其工作状态可能对后续工作状态产生影响,因此考虑实际操纵需要,给出相应的转速输入进行仿真分析。仿真结果表明斜铰旋翼在不同状态下对于相同转速输入的桨距角响应总是相似的,且能很快达成同步。

#### 参考文献:

- [1] GEORGE S, SAMUEL P. On the design and development of

a coaxial nano rotorcraft [C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Nashville, Tennessee. Reston, Virginia: AIAA, 2012.

- [2] 吕俊刚,汪家道,陈大融. 微型无人直升机旋翼操纵机构设计及分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002,42(11):1484-1487.
- [3] PAULOS J, YIM M. An underactuated propeller for attitude control in micro air vehicles [C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo: 2013: 1374-1379.
- [4] PAULOS J, YIM M. Flight performance of a swashplateless micro air vehicle [C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA: IEEE, 2015:5284-5289.
- [5] 尹欣繁. 无斜盘微型无人直升机设计与飞行控制研究[D]. 长沙:国防科技大学,2017.
- [6] 徐家梁. 电动旋翼飞行器动力/推进操纵新技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.

收稿日期:2020-02-14

#### (上接第 112 页)

## 4 结语

本文对磨料气射流预处理的流场进行仿真模拟,并通过实验进行论证,得出了如下结论:

1) 当喷射压力在 0.3 MPa 以下时,由于气流在混合室内形成的流速较小,产生的负压较低,对磨粒的引射和加速作用较弱,使得磨粒到达工件表面的入射速度和数量较小,预处理能力较弱;

2) 当喷射压力为 0.3 MPa 和 0.4 MPa 时,射流束发散程度较低,完整性保持较好。而当喷射压力继续增大时,射流束发散程度较为剧烈,使得预处理效果变差;

3) 采用 0.3 MPa 的喷射压力对 CFRP 进行首次涂装表面预处理满足涂装要求。当喷射压力 > 0.3 MPa 时,由于磨料获得了较大的入射速度,导致 CFRP 表面碳纤维产生断裂现象。

#### 参考文献:

- [1] 吴键,刘秀梅,陈亮,等. 铝合金与复合材料组合构件的涂装工艺[J]. 表面技术,2017,46(8):61-66.
- [2] 贾光政,曹玮,聂志亮,等. 气动喷砂喷嘴内颗粒运动特性分析[J]. 大庆石油学院学报,2006,30(1):63-66,129.
- [3] 王金东,吕志利,刘树林,等. 基于 FLUENT 的气动喷砂两相流场分析[J]. 科学技术与工程,2009,9(17):5113-5115,5119.
- [4] 赵建平,李新梅,王欣欣,等. 气固两相流冲击薄板的数值模拟[J]. 工业建筑,2017(47):237-240.
- [5] 李红文,张涛. 文丘里管内气固两相流离散相仿真模型优化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(1):42-47.
- [6] 陆文明,李建霞,赵宝华,等. 飞机蒙皮表面的预处理及涂装[J]. 上海涂料,2016,54(4):13-18.

收稿日期:2020-01-20