



机床与液压
Machine Tool & Hydraulics
ISSN 1001-3881,CN 44-1259/TH

《机床与液压》网络首发论文

题目： 航空发动机机械液压式测扭系统理论与实验研究
作者： 陈志刚，胡耿，李莉叶，刘飞明，张梦昊，谷悦，朱玉川
网络首发日期： 2025-10-11
引用格式： 陈志刚，胡耿，李莉叶，刘飞明，张梦昊，谷悦，朱玉川. 航空发动机机械液压式测扭系统理论与实验研究[J/OL]. 机床与液压.
<https://link.cnki.net/urlid/44.1259.TH.20251011.0940.023>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

航空发动机机械液压式测扭系统理论与实验研究

陈志刚¹, 胡耿¹, 李莉叶¹, 刘飞明¹, 张梦昊², 谷悦², 朱玉川^{2*}

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南株洲 412002;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏南京 210016)

摘要: 扭矩是航空发动机控制系统中频繁涉及到的关键参数, 是衡量航空发动机性能的典型指标, 如何实现扭矩的准确测量对航空发动机控制性能至关重要。本文针对一种航空发动机用机械液压式测扭系统, 分析了其工作机理, 建立了测扭系统的数学模型并搭建了 Simulink 仿真模型, 仿真研究了节流孔, 溢流口结构参数对系统特性的影响。仿真结果表明, 节流孔内径增大以及溢流口内外径比值增大均会提高溢流口开度工作范围; 同时开展了机械液压式测扭系统实验研究, 对比模型与实验输出结果, 二者相对误差在 5%以内, 验证了数学模型的准确性。

关键词: 航空发动机; 机械液压式; 扭矩测试; 数学建模; MATLAB/Simulink

中图分类号: V233.91

Theoretical and experimental study on mechanical hydraulic torque test system of aeroengine

CHEN Zhigang¹, HU Geng¹, LI Liye¹, LIU Feiming¹, ZHANG Menghao², GU Yue², ZHU Yuchuan^{2*}

(1.China Aviation Hunan Power Machinery Research Institute, Zhuzhou 412002; 2.College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: Torque is a key parameter frequently involved in the control system of aircraft engines, and is a typical indicator for measuring the performance of aircraft engines. Accurate measurement of torque is crucial for the control performance of aircraft engines. This article focuses on a mechanical hydraulic torque measurement system for aircraft engines, analyzes its working mechanism, establishes a mathematical model of the torque measurement system, and builds a Simulink simulation model to simulate and study the influence of throttle hole and overflow port structural parameters on system characteristics. The simulation results indicate that an increase in the inner diameter of the throttle hole and an increase in the ratio of the inner and outer diameters of the overflow port will both increase the working range of the overflow port opening; At the same time, experimental research on the mechanical hydraulic torsion measurement system was carried out, and the relative error between the model and the experimental output results was within 5%, verifying the accuracy of the mathematical model.

Keywords: Aeroengine; Mechanical hydraulic type; Torque test; Mathematical modeling; MATLAB/Simulink

0 前言

旋转扭矩是航空发动机控制系统中参与航空发动机控制的主要参数之一^[1]。在配有涡桨或涡轴发动机的飞机中, 航空发动机与飞机螺旋桨不仅有功率参数的匹配关系, 还有着转速、扭矩参数的匹配关系^[2-4], 因此对于旋转扭矩参数的准确测量是非常关键的。为了有效避免飞机因旋转扭矩的突变造成无法挽回的后果, 要求航空发动机测试人员对涡桨或涡轴发动机的旋转扭矩参数的准确测量进行严格的评估。

在涡轴发动机研制发展过程中, 前期研究人员已经开发出了多种扭矩测量系统, 主要可以分外置扭矩测量系统和内置测量系统^[5]。外置扭矩测量系统需要测功机^[6,7]等外部测试设备, 只适用于研发过

作者简介: 陈志刚(1982—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为航空发动机减速器结构设计。E-mail: czg6124@163.com
通信作者: 朱玉川(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为机电控制及智能材料结构等。E-mail: meeyczhu@nuaa.edu.cn.

程。目前使用较多的内置扭矩测量系统有扭转法测扭系统和机械液压式测扭系统。扭转法测扭是通过测量涡轮轴的扭转变形计算扭矩大小的一种非接触测量方法, 按扭转变形的测试方法不同可以分为光电式^[8]、磁电式^[9]和电容式^[10]。扭转法测扭测量精度较高, 已应用于 T700、RTM322 和 Aneto-1K 等涡轴发动机^[11], 但其需要被测轴存在较大的扭转角度, 通常大于 4°, 对于刚度较大的短粗型涡轮的扭矩测量难以实现^[5], 并且测试过程中容易受到环境电磁干扰影响测量精度。对于机械液压式测扭系统, 其测量不受测扭轴刚度的影响, 靠测扭腔压力反映扭矩的方法也避免了无线传输中的信号干扰问题。

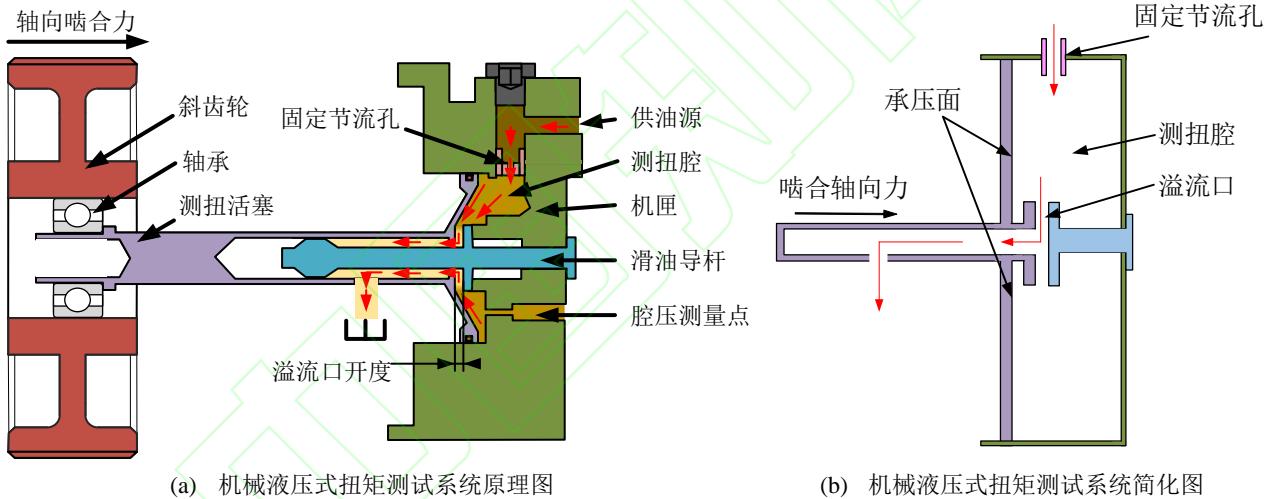
2015 年中国南方航空工业公司的席莉娅、侯宪勇^[12]对某型航空发动机扭矩曲线不合格故障进行了分析

提出了误差来源以及处理方法；2017年中国航发南方工业有限公司的陈蔚兴^[13]提出了一种活塞式测扭机构的衬套的磨合方法，目的在于通过衬套的配合面与机匣孔间的充分磨合，减小活塞的附加摩擦阻力，从而提高测扭精度。

综上所述，机械液压式扭矩测试方法使用过程中普遍存在的扭矩测试精度不高、测试结果重复性差以及缺乏液压系统设计理论问题，制约了机械液压式测扭系统在航空发动机上的实际应用。因此，为了新型飞机的研制和航空发动机的发展，提高液压测扭精度，保障扭矩参数可以参与航空发动机系统控制，有必要开展机械液压式测扭系统理论建模和实验研究。

1 结构与工作原理介绍

本文研究的机械液压式测扭系统结构包括：斜齿轮、轴承、测扭活塞、滑油导杆、固定节流孔、机匣等，其中，测扭活塞和滑油导杆构成开



(a) 机械液压式扭矩测试系统原理图

(b) 机械液压式扭矩测试系统简化图

图 1 机械液压式扭矩测试系统原理图和简化图

Figure 1 Schematic and simplified diagram of mechanical hydraulic torque testing system

2 数学模型建立

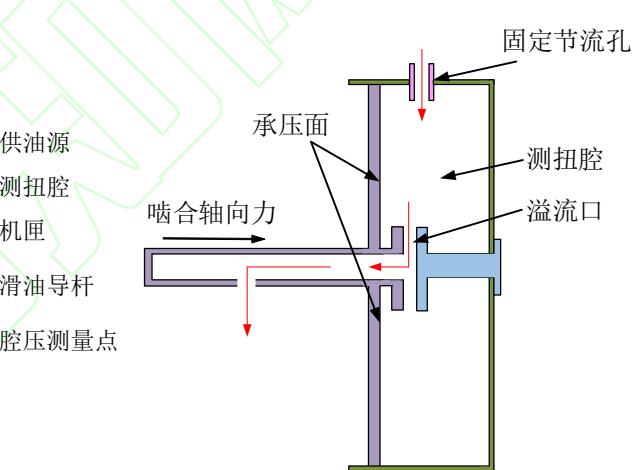
机械液压式扭矩测试系统在实际工作状态下的内部结构参数和流体运动是较为复杂的，故对其实际模型进行简化，提出如下假设：

- (1) 液压油动力粘度不随压力发生变化；
- (2) 忽略瞬态液动力的影响，忽略测扭活塞及管道连接处的泄露和液压卡紧力的影响；
- (3) 忽略气蚀、固体颗粒磨损对系统性能的影响；
- (4) 测扭系统入口压力恒定、无脉动，测扭系统出口压力为零。

机械液压式扭矩测试系统数学模型由固定

度可变的溢流口，溢流口与固定节流孔一起构成B型半桥。机械液压式扭矩测试系统的原理图和简化图如图1所示。

机械液压式扭矩测试系统工作原理：滑油泵产生的压力油，经固定节流孔流入测扭腔，通过测扭活塞与斜齿轮上的轴向啮合力平衡，测扭腔油压即反映了减速器所传递的扭矩。斜齿轮上的轴向啮合力通过轴承作用于测扭活塞上，与测扭腔油压作用于测扭活塞有效作用面积上的液压力相平衡。当斜齿轮轴向啮合力发生变化时，将引起斜齿轮轴向位移，并通过轴承带动测扭活塞轴向位移，从而改变测扭活塞溢油口开度的大小，引起滑油溢油量变化，使测扭腔压力发生改变以保持测扭活塞受力平衡。通过腔压传感器测得测扭腔油压，然后通过斜齿轮轴力-扭矩计算关系即可求得减速器传递的扭矩值。



节流孔流量模型、测扭腔压力模型、溢流口流量模型、测扭活塞动力学模型构成。

2.1 固定节流孔流量模型

液压泵站的压力油首先流经固定节流孔，固定节流孔为圆形短孔，通过固定节流孔的压力流量方程为：

$$Q_0 = C_{d0} A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - p_{ch})} \quad (1)$$

式中， Q_0 为通过固定节流孔流量； C_{d0} 为固定节流孔流量系数； A_0 为固定节流孔通流面积； ρ 为油液密度； p_s 表示供油压力； p_{ch} 表示测扭腔压力。

2.2 测扭腔压力模型

根据对测扭系统工作过程的分析，腔内的流体因腔体容积的变化不断受到压缩，流体的压缩性可用有效体积模量来表示。流体有效体积弹性模量定义为对一定体积的流体，作用压力变化时引起的体积变化，可以表示为：

$$\beta_e = -\frac{\Delta p}{\Delta V} V \quad (2)$$

式中， β_e 为测扭腔油液的有效体积弹性模量； V 表示测扭腔压力变化前油液的总体积； Δp 表示作用压力的变化量； ΔV 表示压力变化后油液体积的变化量。

则根据流量连续性方程，测扭腔压力 p_{ch} 的计算公式为：

$$\dot{p}_{ch} = \beta_e \frac{Q_{in} - Q_{out} - Q_{leak} - A_p \dot{x}_p}{V_0 - A_p x_p} \quad (3)$$

式中， Q_{in} 、 Q_{out} 分别为流入和流出测扭腔的流量； Q_{leak} 为测扭腔的泄露流量，建模时忽略油液泄露，则取 $Q_{leak}=0$ ； A_p 为测扭活塞有效面积； x_p 为溢流口开度； V_0 为测扭腔初始体积。

2.3 溢流口流量模型

根据液压测扭装置的结构，对溢流口进行适当的模型简化，以便于推导出合适的理论流量公式来清晰的描述溢流口的流量。考虑溢流口的形状为两环状平行平板形成的盘型溢流口，图 2 为溢流口的模型示意图。

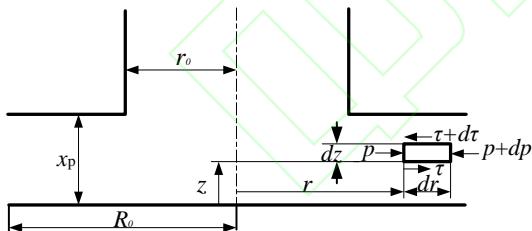


图 2 溢流口模型示意图

Figure 2 Schematic diagram of overflow outlet model

采用柱坐标系，在盘型溢流口的流场中，距离轴线 r 处切出长度为 dr ，厚度为 dz 的流体薄层，采用圆柱坐标系，列出此液体薄层 r 轴方向的受力平衡方程，可得：

$$pdz - (p + dp)dz + \tau dr - (\tau + d\tau)dr = 0 \quad (4)$$

整理后可得：

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{d\tau}{dz} \quad (5)$$

正常工作状态下，溢流口流动状态为层流，故有：

$$\tau = \mu \frac{dv_r}{dz} \quad (6)$$

式中， v_r 为流体沿平行平板方向上的流速； μ 为油液动力粘度。

将式（6）代入式（5）中，得：

$$\frac{dp}{dr} = -\mu \frac{d^2 v_r}{dz^2} \quad (7)$$

将上式对 z 求两次积分可得：

$$v_r = -\frac{1}{2\mu} z^2 \frac{dp}{dr} + C_1 z + C_2 \quad (8)$$

式中， C_1 、 C_2 为两个需要由边界条件来确定的积分常数。

当系统处于稳定状态，盘型溢流口上下两平板均固定不动，液体由间隙两端的压差作用在间隙中流动，在这种压差流动的情况下，边界条件为：当 $z=0$ 时， $v_r=0$ ；当 $z=x_p$ 时， $v_r=0$ 。

将上述边界条件代入（8）中，可得：

$$v_r = \frac{z}{2\mu} (x_p - z) \frac{dp}{dr} \quad (9)$$

则：

$$Q_1 = \int_0^{x_p} \int_0^{2\pi} v_r r d\theta dz = \frac{2\pi r x_p^3}{12\mu} \frac{dp}{dr} \quad (10)$$

式中 Q_1 为通过溢流口流量。

对式（10）进行积分，可得：

$$p = \frac{6\mu Q_1}{\pi x_p^3} \ln r + C \quad (11)$$

当 $r=R_0$ 时， $p=p_0$ ，代入式（11）得沿径向压力分布规律为：

$$p = \frac{6\mu Q_1}{\pi x_p^3} \ln R_0 / r + p_0 \quad (12)$$

当 $r=r_0$ 时， $p=p_{ch}$ ，则上式变为：

$$p_{ch} - p_0 = \frac{6\mu Q_1}{\pi x_p^3} \ln R_0 / r_0 \quad (13)$$

式中， p_0 为出口压力，出口与大气相通，则取 $p_0=0$ 。

求得溢流口流量与测扭腔压力关系：

$$Q_1 = \frac{\pi x_p^3 p_{ch}}{6\mu \ln(R_0 / r_0)} \quad (14)$$

式中, Q_1 为通过溢流口流量; p_{ch} 为测扭腔压力; μ 为油液动力粘度; R_0 为溢流口外圆半径; r_0 为溢流口内圆半径; x_p 为溢流口开度。

2.4 测扭活塞动力学模型

测扭系统通过测扭活塞实现最终的压力输出, 因此测扭活塞的数学模型在很大程度上影响测扭系统的输出特性。测扭活塞在负载力的作用下, 克服摩擦阻力和液压力, 实现活塞杆运动, 输出连续位移。如图 3 所示, 为测扭活塞受力示意图。

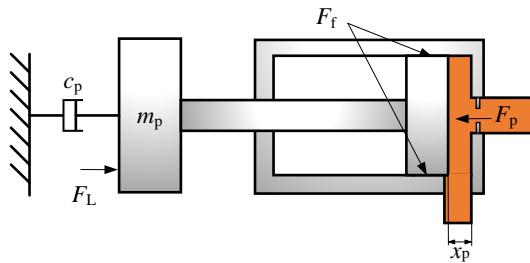


图 3 测扭活塞受力示意图

Figure 3 Schematic diagram of force on torque test piston

在不考虑测扭活塞泄漏的情况下, 其动力学微分方程如下:

$$F_p - F_L - F_f = m_p \ddot{x} + c_p \dot{x} \quad (15)$$

式中, F_p 表示测扭腔液压力; F_f 为测扭活塞与机匣孔内壁的摩擦力; F_L 为外负载力; x 为测扭活塞杆位移, 位移大小与溢流口开度 x_p 相等, 方向与测扭腔液压力 F_p 相同; m_p 为测扭活塞运动的有效质量; c_p 为测扭活塞运动阻尼。

$$F_p = p_{ch} A_p \quad (16)$$

式中 p_{ch} 为测扭腔压力, A_p 为测扭活塞有效面积。

联立式(1)、式(13)、式(14)可以测扭系统得到静态溢流口开度表达式:

$$x_p = \sqrt[3]{\frac{6\mu C_{d0} A_0 \ln(R_0 / r_0)}{\pi p_{ch}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - p_{ch})}} \quad (17)$$

3 仿真模型搭建与仿真分析

3.1 仿真建模与参数设置

根据机械液压式扭矩测试系统数学模型建立其 Simulink 仿真模型, 如图 4 所示。

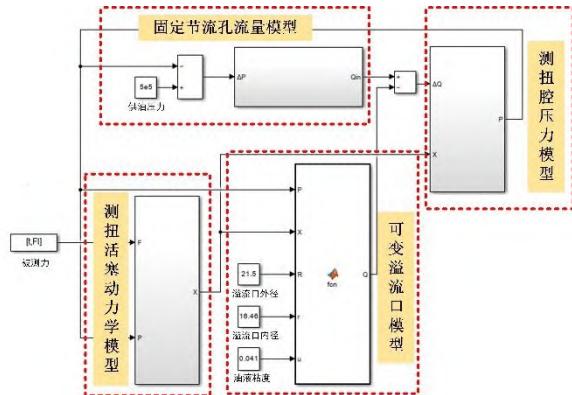


图 4 机械液压式测扭系统 Simulink 仿真模型

Figure 4 Simulink simulation model of mechanical hydraulic torque testing system

机械液压式扭矩测试 Simulink 仿真模型主要参数如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数汇总

Table 1 Summary of Main Simulation Parameters

名称	符号	单位	数值
测扭活塞等效质量	m_p	kg	1.2
测扭活塞等效阻尼	c_p	N·s·m ⁻¹	1280
供油压力	P_s	MPa	0.5
固定节流孔直径	d_0	m	1.2×10^{-3}
测扭活塞最大静摩擦力	F_{max}	N	15
测扭腔初始体积	V_0	m ³	1.5×10^{-5}
油液密度	ρ	kg·m ⁻³	970
油液有效体积弹性模量	β_e	Pa	1.5×10^9
油液动力粘度 (25°C)	μ	N·s·m ⁻²	0.041

3.2 仿真分析

开度-压力特性是指单腔测扭系统负载信号由从最小调至最大时, 不同溢流口开度下对应的测扭腔有效调定压力范围, 其中负载是指被测扭矩所等效的齿轮啮合轴向力。考虑实际被测扭矩范围, 本文给单腔测扭系统仿真模型输入负载力幅值范围为 150N~1200N。通过控制 Simulink 模型负载输入力的大小可以得到系统的压力开度特性。

3.2.1 固定节流孔孔径对压力-开度特性的影响

分别选取固定节流孔孔径为 1.0mm、1.1mm、1.2mm、1.3mm 和 1.4mm, 可以得到通过 Simulink 仿真得到不同直径固定节流孔下的单腔测扭系统的开度-压力特性曲线仿真结果, 如图 5 所示。

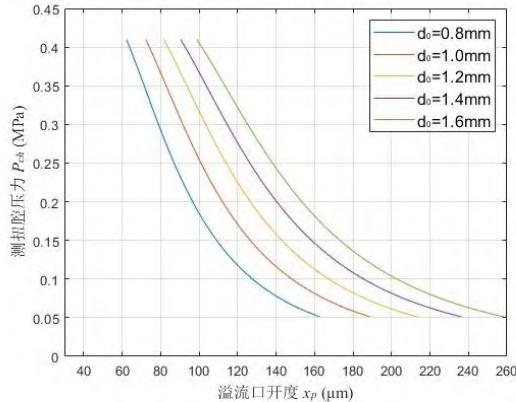


图 5 不同固定节流孔直径下开度-压力特性曲线
Figure 5 Opening pressure characteristic curves under different fixed orifice diameters

表 2 不同固定节流孔孔径对应的溢流口开度范围
Table 2 Range of overflow port opening for different fixed throttle hole sizes

孔径 (mm)	开度范围 (μm)	开度范围大小 (μm)
0.8	62-163	101
1.0	72-189	117
1.2	82-213	131
1.4	90-236	146
1.6	99-258	159

观察仿真结果可以发现，随着固定节流孔孔径的增大，相同测扭腔压力对应的开度值增大，并且溢流口开度范围增大。

3.2.2 溢流口内外径比值对压力-开度特性的影响
分别选取可变溢流口内外径比值为 1.1、1.2、1.3、1.4 和 1.5，可以得到通过 Simulink 仿真得到不同直径固定节流孔下的单腔测扭系统的开度-压力特性曲线，仿真结果如图 6 所示。

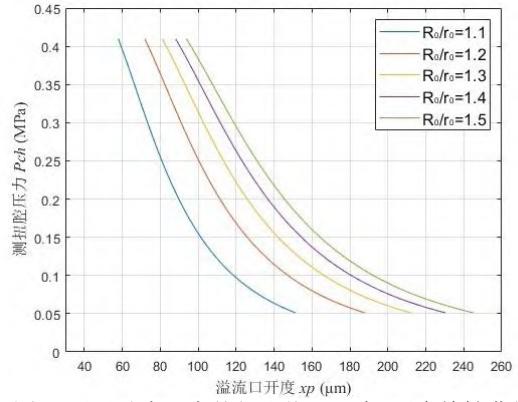


图 6 不同溢流口内外径比值下开度-压力特性曲线
Figure 6 Opening pressure characteristic curves under different ratios of inner and outer diameters of overflow outlet

表 3 不同溢流口内外径比值对应的溢流口开度范围
Table 3: Range of overflow port opening corresponding to different ratios of inner and outer diameters of overflow ports

可变溢流口内外 径比值	开度范围 (μm)	开度范围大小 (μm)
1.1	58-151	93
1.2	72-188	116
1.3	81-212	131
1.4	88-230	142
1.5	94-245	151

观察仿真结果可以发现，随着溢流口内外径比值的增大，相同测扭腔压力对应的开度值增大，并且溢流口开度范围增大。

4 实验研究

4.1 实验设备与实验原理

为验证建立数学模型的准确性，搭建了机械液压式扭矩测试系统实验平台，如图 7 所示。

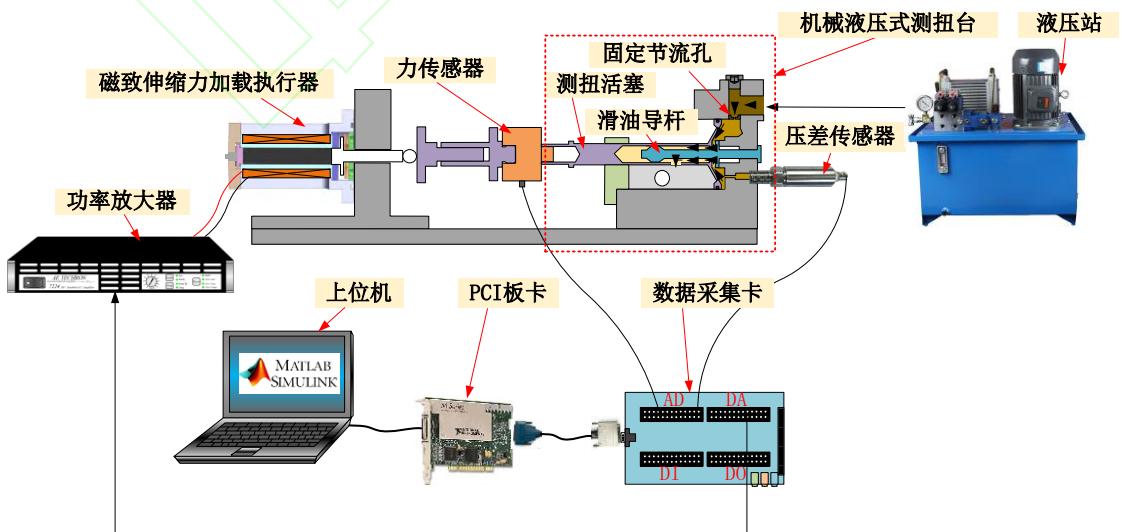


图 7 机械液压式扭矩测试系统实验平台原理图

Figure 7 Schematic diagram of the experimental platform for the mechanical hydraulic torque testing system

由于实验室环境下无法采用航空发动机减速器作为负载输入，因此考虑使用力加载执行器模拟真实航空发动机斜齿轮啮合轴向力，在实验室环境中完成实验。对于本文研究的测扭系统，为了使测扭活塞承受的轴力与位移激励能够更好的等效航空发动机轴力的变化，需要微米级的定位精度与较大输出力的执行机构。该实验平台采用的主要实验设备有功率放大器、磁致伸缩力加载执行器、力传感器、机械液压式测扭台、压差传感器、液压站、上位机、PCI 板卡、数据采集卡等组成。功率放大器通过放大控制信号得到大电流用以驱动磁致伸缩执行器，磁致伸缩力加载执行器与力传感器之间通过小球传递轴向力，避免由于力加载执行器输出杆偏心产生的径向力影响测量结果。液压站为机械液压式测扭台提供供油压力，压差传感器和力传感器分别用于测量测扭腔压力与输入轴向力。

实验过程中首先通过磁致伸缩力加载执行器后端的粗调螺钉调节初始轴力的大小，之后通入电流驱动磁致伸缩力加载执行器，记录变化的轴力与测扭腔压力大小。

4.2 实验结果

实验过程中通过调节粗调螺钉，调整机械液压式测扭装置的初始轴力为 300N，为磁致伸缩力加载执行器提供幅值为 5A 的正弦偏置电流，测得输入轴力与测扭腔压力，其中测得输入轴力大小如图 8 所示。

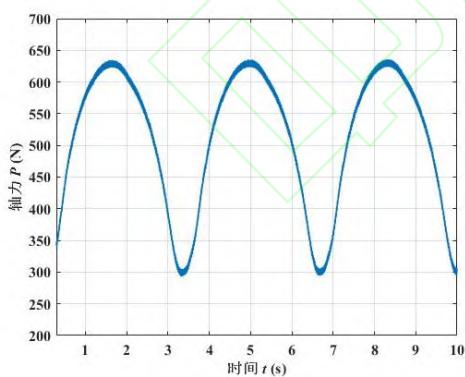


图 8 输入轴力大小

Figure 8 Input Force Size

为验证本文所建的数学模型的准确性，将该实验测得输入力作为 Simulink 模型输入条件，仿真得到测扭腔压力，将实验测得测扭腔压力与 Simulink 仿真模型计算测扭腔压力结果进行对比见图 9。

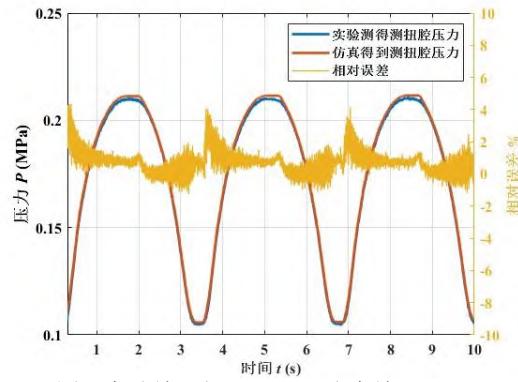


图 9 实验结果与 Simulink 仿真结果对比

Figure 9 Comparison between experimental results and Simulink simulation results

由图 9 可知，Simulink 仿真模型得到的测扭腔压力与实验测得的测扭腔压力相对误差不超过 5%。

5 结 论

(1)通过流体微元法推导了机械液压式测扭系统盘型溢流口流量模型，发现其流量与盘型溢流口开度的三次方成正比。

(2)建立了机械液压式扭矩测试系统数学模型并搭建了其 Simulink 模型，搭建机械液压式扭矩测试实验台并进行试验，对比试验于仿真结果，两者最大误差在 5% 以内，验证了数学模型的准确性。

(3)利用 Simulink 仿真模型分析了结构参数对系统特性的影响，研究发现固定节流口孔径和可变溢流口内外径比值的增加会使系统溢流口工作开度、开度范围增加。

参 考 文 献

- [1] 孙丰诚.航空发动机性能寻优控制技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2007.
SUN F C. Research on Aero-engine Performance Seeking Control[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [2] 方昌德,马春燕.航空发动机的发展历程[M].航空工业出版社,2007.
- [3] 陈名杨, 张海波, 汪勇.多发配置下涡轮轴发动机扭矩匹配控制方法研究[J].推进技术, 2020, 41(03): 685-692.
CHEN M Y, ZHANG H B, WANG Y. Torque matching control method of turboshaft engine with multiengine state[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(03): 685-692. (in Chinese).
- [4] BODIN R M. Speed or torque probe for gas turbine engines:US8549931[P]. 2013.
- [5] 李立新, 廖明夫, 余索远, 等. 涡轴发动机测扭装置发展现状及趋势[J]. 航空动力学报, 2024, 39(X): 20220982.
LI L X, LIAO M F, YU S Y, et al. Current situation and development trend of torque measuring device for

- turboshaft engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39 (X) : 20220982.
- [6] 李宗帅,董春,刘颜.国内外电力测功机发展现状[J].电机与控制应用,2007,34(5).
LI Z S,DONG C,LIU Y. Development and Application Actuality on Electric Power Dynamometer [J]. Electric Machines & Control Application,2007,34(5).
- [7] 周腊吾,郭浩,赵晗,等.测功机系统的研究综述[J].电机与控制应用,2020,47(12).
ZHOUL W, GUO H, ZHAO H, et al. A Review of Research on Dynamometer System [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47 (12).
- [8] 祝睿,蒋锦涛,袁以宁,等.一种基于无线传输的光电式扭矩传感装置:CN113390545B[P].2021-12-10.
- [9] 李志鹏,王博男,孟旭,等.电磁式扭矩传感器原理、研究现状及发展趋势[J].仪器仪表学报,2021,42(1): 114.
LI Z P, WANG B N, MENG X, et al. Principle, study status and development trend of the electromagnetic torque sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 114.
- [10] 戴志萍.电容式旋转轴动态扭矩传感器设计与优化[D].太原:中北大学,2022.
DAI Z P. Design and Optimization of Capacitive Rotary Shaft Dynamic Torque Sensor[D].Taiyuan:North University of China,2022.
- [11] KEREM K. The analysis of the reference shaft under torque measurement unit for turboshaft engines [M]. Istanbul: Sabanci University. 2020.
- [12] 席莉娅,侯宪勇.某型航空发动机扭矩曲线不合格故障分析[J].现代工业经济和信息化,2015 (14):53-54.
XI L Y, HOU X Y. Failure Analysis of a Certain Aeroengine' Torque Curve [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2015 (14): 53-54.
- [13] 陈蔚兴.活塞式测扭机构的衬套的磨合方法:CN201710508692.4[P].2017-12-01.

