

摘 要

传统的工程机械实验课程《发动机液力变矩器共同工作特性实验》，进行实验时往往由于学生对实验过程不了解，对实验设备不熟悉，老师通常进行实验讲解后代学生进行实验操作，让学生记录实验数据后进行数据处理然后上交实验报告。实验课时短，时间仓促，学生没有机会亲自参与到实验中进行动手操作，也没时间进行独立思考消化理解所学理论知识，导致实验教学效果大打折扣。另外，该教学实验的成本很高，实验环境恶劣。为此，本文就《液力变矩器与发动机的共同工作特性实验》的实验课程，提出了对其进行虚拟实验研究。在本文中，根据本虚拟实验的要求建立了发动机特性模型，液力变矩器特性模型以及共同工作特性模型，论述了匹配原则，并用 Visual C++ 编写了虚拟实验程序，可以进行基本的实验过程模拟，最后给出两者匹配的效果评价，初步能使实验者理解两者的匹配原理与共同工作时的情况。本文最后对该虚拟实验的不足之处进行了分析，并提出了改进的方向。总之，这是对于底盘理论课程实验教学的一次有益探索与尝试。

关键词：虚拟实验；发动机；液力变矩器；匹配；Visual C++

ABSTRACT

The traditional laboratory course of Construction Machinery, “The Experiment of the Cooperative Work of the Engine and the Hydraulic Torque Converter”, when doing the experiment, due to the reason that the students do not know the experiment process well and they are not familiar with the experiment equipment also, usually the teacher substitute for the students to do the experiment, then give the experimental data to the students and request them to hand the experiment report on time. The experiment lesson is so short, all is in hurry. As a result, the students do not have the chance to do the experiment by self-operation, and they don’t have enough time to think independently and absorb the theory they learn. The outcome is that the efficacy of the laboratory course is greatly reduced. In addition, the cost of this laboratory course is high, and the experimental condition is harsh. Therefore, this paper has chosen the laboratory course “The Experiment of the Cooperative Work of the Engine and the Hydraulic Torque Converter”, as a study object of virtual experiment. In this paper, the author has built the mathematic models of the engine character, the hydraulic torque converter character and the cooperative character respectively according to the demand of this virtual experiment. A virtual experiment software is developed basing Visual C++ language. It can simulate the basic process of the real experiment, and at the last step the evaluation parameter is given which can help anticipants have a full understanding of the matching principle and know the cooperative working situation. By the end of the paper, the author has analyzed the disadvantages of the virtual experiment and given the possible suggestions for improvement. In conclusion, it puts up some beneficial research and practices to the laboratory course of chassis theory.

Key words: virtual experiment; engine; hydraulic torque converter; matching; Visual C++

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
目 录	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 虚拟实验概念	1
1.1.2 虚拟实验的特点	3
1.1.3 虚拟实验技术背景	4
1.1.4 虚拟实验历史进程	4
1.1.5 虚拟实验的发展现状与发展趋势	5
1.2 研究思路	6
1.2.1 发动机与液力变矩器共同工作真实实验过程分析	6
1.2.2 本虚拟实验设计开发思路	6
1.2.3 本虚拟实验评价与改进	7
1.3 本文结构	7
第二章 发动机特性建模	9
2.1 发动机建模方法介绍	9
2.2 几种常用的发动机模型	9
2.3 常用发动机建模仿真软件介绍	11
2.4 本虚拟实验发动机建模方法选择和建模过程	12
2.4.1 发动机建模方法选择	12
2.4.2 发动机特性建模过程	13
第三章 液力变矩器特性建模	16
3.1 液力变矩器简介	16
3.1.1 液力传动工作原理和特点	16
3.1.2 液力变矩器的原始特性	17
3.1.3 液力变矩器输入特性	18
	III

3.2 液力变矩器模型介绍	19
3.3 液力变矩器特性建模	20
3.3.1 液力变矩器建模方法选择	20
3.3.2 液力变矩器原始特性建模	20
3.3.2 液力变矩器输入特性建模	23
第四章 发动机与液力变矩器的匹配	24
4.1 发动机与液力变矩器的匹配原则	24
4.2 发动机与液力变矩器的匹配方法	24
4.3 发动机与液力变矩器共同工作输入特性	25
4.4 发动机与液力变矩器共同工作的输出特性	28
4.5 发动机与液力变矩器共同工作的评价方法	31
第五章 发动机与液力变矩器共同工作虚拟实验分析	33
5.1 虚拟实验目标	33
5.2 虚拟实验实现功能	33
5.3 虚拟实验设计与开发过程	33
5.3.1 虚拟实验开发平台介绍	33
5.3.2 虚拟实验的相关数学模型建立	34
5.3.3 发动机与液力变矩器共同工作特性实验虚拟实验开发思路与过程	34
5.4 虚拟实验效果评价	38
论文不足与展望	42
致 谢	43
参考文献	44
附录一 发动机与液力变矩器共同工作特性实验	46

第一章 绪论

本文的研究内容是发动机与液力变矩器共同工作特性的虚拟实验设计开发及其教学应用。本章主要讨论了本课题的研究背景与意义，本课题虚拟实验的设计开发思路，以及本论文的总体结构。本章所述内容是进行本课题研究的前提。

1.1 研究背景及意义

步入 21 世纪以来，人类已经进入信息时代。伴随着信息技术、电子科学技术的飞速发展，以多媒体计算机技术、网络技术与虚拟仪器为技术依托，虚拟实验正蓬勃发展，由于虚拟实验应用在教学活动中的优良效益，虚拟现实越来越受到人们的重视，国内外很多大学建立了自己的虚拟实验室。

众所周知，实验教学活动对于教学意义重大。哲学中对于实践与理论的论述是，实践活动获得体验，借由理性形成理论，理论指导实践活动，实践活动反过来又不断地修正理论。而实验正是一种重要实践活动，是人类认识世界的重要方法。实验一般是为了解决文化、政治、经济、自然科学的某个问题，用以检验业已存在的某一假说、假设、原理或理论，进行明确、具体、可操作、有数据、有算法、有责任的技术操作行为^[1]。通常实验要预设实验目的、实验环境、进行实验操作，最终以实现报告的新闻形式发表实验结果。实验研究和理论研究相辅相成，共同推动社会进步与科技发展。在教学中，实验不仅是理论教学的深化和补充，更是培养学生综合运用知识的能力、解决实际问题的能力的的重要手段。

虚拟实验是伴随着计算机技术与信息技术的发展而产生的，与传统的实验相比，它有自身明显的优势。虚拟实验为学生提供了一个可以提高创新能力、实践能力、解决问题能力的实验教学模式，它将会改革传统的实验教学模式，在经济性上成本更低，而教学效果显著。一些教育专家预测，在下个世纪虚拟实验将成为虚拟现实技术作重要和最热门的应用领域之一。

以下给出了虚拟实验的概念，介绍了虚拟实验的特点与技术背景，并简要了解了其发展历史与发展现状。

1.1.1 虚拟实验概念

虚拟实验是借助于多媒体、仿真和虚拟现实（又称 VR）等技术在计算机上营造可辅助、部分替代甚至全部替代传统实验各操作环节的相关软硬件操作环境，实验者可以像在真实的环境中一样完成各种实验项目，所取得的实验效果等价于甚至优于在真实环境中所取得的效果^[2]。

虚拟实验建立在一个虚拟的环境（平台仿真）之上，而注重的是实验操作的交互性和实验结果的仿真性。虚拟实验又称为电子体验和动态体验，虚拟实验的效果就在于能与现实世界结合起来，通过虚拟实验我们来预测是否在现实世界中能够实现。

虚拟实验按功能一般可以分为以下两种类型：沉浸式虚拟实验和非沉浸式虚拟实验，即桌面虚拟实验。沉浸式虚拟实验是一套非常复杂的系统，实验者必须佩带感应头盔、数据手套等传感跟踪装置，与虚拟世界进行交互，实验者体验到的是三维感受，可以完全沉浸到虚拟实验中去。但缺点是设备价格昂贵，软件开发周期长、成本高，难以普及推广。而桌面虚拟实验只需一台普通的计算机系统以及网络，计算机屏幕作为实验者与虚拟世界的交互窗口。其系统结构简单，价格低廉，容易普及推广，但缺乏真实的现实体验。

虚拟现实（Virtual Reality,简称 VR）是近些年来十分热门的技术研究领域。它是二十世纪末兴起的一门崭新的综合信息技术，它融合了计算机图形学、多媒体技术、人工智能、人机接口技术、传感器技术等多项关键技术。关于虚拟现实的定义有多种，在这里中和广义和狭义的基础上，引用一种较为贴切的定义：虚拟现实是利用计算机生成一种三维模拟环境，通过多种传感设备使用户“投入到该环境中”，实现用户与该环境进行自然交互的技术。用户通过接受和响应环境的各种感官刺激，与其中虚拟的人和对象进行思想交流和行为交互，产生身临其境的感觉。虚拟现实的本质是对人所存在的自然真实环境的空间与时间上的一种拓展。从概念上讲，虚拟现实技术有三大特点：“交互性（Interactivity）”、“沉浸性（Immersion）”、“想象性（Imagination）”。它强调人在虚拟现实中的主导作用。虚拟现实技术的应用领域与交叉领域十分广泛，目前主要应用于军事与航空、建筑、娱乐、医学、机器人等方面，其次是教育培训和艺术商业方面。而在教育培训领域的应用主要有虚拟校园、虚拟教学演示和实验、远程教育系统、特殊教育、技能培训。

虚拟实验室（Virtual Laboratory）的概念最早是由美国弗吉尼亚大学（University of Virginia）的威廉·沃尔夫（William Wolf）教授与 1989 年首先提出的，它描述了一个计算机网络化的虚拟实验环境，致力于构筑一个综合不同工具和技术的信息化、网络化的集成环境。在这个环境里，用户可以非常有效地利用世界上分布的各种数据、信息、仪器设备及人力等资源^[3]。

虚拟实验室的初衷是为了方便科学研究工作，科研人员在远程即可从事研究工作：使用仪器设备、共享数据资源、交流信息等。虚拟实验室实际上是一个分布式计算机系统，在该系统中，配置有遥控、遥测能力的网络化研究设备和数据采集平台，有支持协作活动的各种工具，建有可以支持数据共享的数字式图书馆。

1.1.2 虚拟实验的特点

虚拟实验为教学实验提供了虚拟的实验环境。对于没有条件建设真实实验室的高校，或者没有条件获取实验设备的学生打开了另一扇窗户，并且虚拟实验可以重复操作，而重复操作的成本几乎为零，大大提高了实验教学的经济性与教学效果。

随着高等教育的学科发展和教学改革的推进，传统真实实验教学的弊端日益明显。首先，在教学模式上，传统真实实验教学一般遵循着实验老师讲授、演示、指导，学生模仿实验过程、达到相近的实验效果的模式，严重限制了学生独立思维的发展，阻碍了学生创新能力的培养。第二，一些高校缺乏经费或者相应资源进行实验室建设，实验设备落后，而且传统实验室管理维护成本高，硬件损耗大，没有条件为学生提供一个良好的实验环境。第三，教学计划上对实验的培训时间非常有限，在这么短时间内学生无法掌握实验的重点，没有时间进行冷静认真的独立思考，匆匆忙忙交上实验报告，而不知其所以然，更无从谈及自由进行综合性设计性实验。这些问题使传统真实实验教学面临一系列压力，急需对现有的传统实验教学进行改革与创新。

与传统真实教学实验相比，虚拟实验则可以成为传统真实实验的一个重要补充。两者可以有机结合，相得益彰。与传统真实教学相比，实验虚拟实验有如下几个特点：

（1）成本低廉。虚拟实验基于虚拟现实技术，在可视化与交互性方面具有强大优势，几乎省去了实验的实验设备费用、材料成本费用，而且节省了场地和人力成本，减小了实验损耗，能够反复使用。此外，虚拟实验可以做到资源共享，用户可以共享信息、软件、仪器及设备等资源，避免重复投资，造成资源浪费。

（2）高效性。虚拟实验省去了传统实验的准备、维护工作。它将实验现象、实验结果重点突出，使用者可以避免收到传统真实实验中不可预知情况和无关细节的干扰，集中精力研究实验现象和实验背后蕴藏的规律。虚拟实验还能实现缓慢过程快速化和快速实验缓慢化，大大提高了学习和研究效率。

（3）开放性。开放性表现为三个方面。第一方面，教学组织的开放。表现为实验内容和实验时间的可选性，充分调动学生参加实验的主动性。第二方面，资源的开放。虚拟实验可以做到资源共享。第三方面是受教育对象的开放性。实验参与者不受空间，或者自身年龄、性别、认知程度的制约，可以享受网络教育带来的开放性。

（4）自主性。虚拟实验打破了老师教学生模仿的传统实验模式，充分发挥学生的主观能动性。使用者不仅可以随时随地进行虚拟实验，解决一些较难预习的实验问题，还可以根据自己的需求定制自己使用虚拟仪器的方式，自我探索和设计新的实验，有利于培养学生分析问题和解决问题的能力。

（5）仿真性。理想的虚拟实验环境对现实的逼真程度非常高。

（6）交互灵活。虚拟实验通过人机交互，对用户的实验过程进行及时反馈，指

导用户进行实验操作。当用户在实验过程中遇到问题，系统会提供帮助，并对实验结果做出评价，提出改进建议。

（7）互助协作。网络虚拟实验室具有强大的在线帮助和学习功能，用户之间可以相互交流信息，在协同虚拟技术环境下，还可以相互协作共同完成实验。

（8）可扩展性。现今是知识经济时代，知识更新、技术进步日新月异，虚拟实验可以做到跟随技术进步进行升级和增加新的实验内容和实验仪器。

1.1.3 虚拟实验技术背景

目前虚拟实验室的系统设计方案可以采用纯软件模拟方式来完成仿真，也可以采用在服务器端接入真实的仪器设备这种软硬件结合的方式来完成，二者在功能上是等效的。完成虚拟实验功能的核心是虚拟仪器技术，而网络虚拟实验室的主要功能由网络化的虚拟仪器来完成。构建一个网络虚拟实验室，首先要将虚拟仪器的功能分解，将这些功能依托网络技术分布到网络的不同位置。网络虚拟实验室是一个较为复杂的系统，包括多个环节，相对于 C/S(Client/Server)体系结构，目前主要采用 B/S(Browser/Server)结构，在该模式下，主要的应用程序在服务器上，有 Web 服务器处理相关的操作要求，客户机无需安装复杂的客户端软件，只要使用标准的 Internet 浏览器即可进行虚拟实验。其结构一般包括用户端的浏览器、Web 服务器、后台数据库。虚拟实验室的构建技术有很多种，目前常用的有：JAVA、VRML、QTVR、ActiveX 控件技术、FLASH、MATLAB 等，后台服务器的三种动态网络语言是：ASP/ASP.NET、JSP 和 PHP。各种虚拟实验技术室各有千秋，有各自的特点和实用场合，在实际项目开发中常常采用几种技术混合使用，发挥各自所长，开发出效果优良的虚拟实验。

1.1.4 虚拟实验历史进程

虚拟实验的历史进程可以分为以下四个发展阶段，模拟实验，仿真实验，虚拟现实，网络虚拟实验。

（1）模拟实验

模拟实验（Simulation Experiment）是用一个系统去表示目标系统某一行为特征的过程。模拟实验是根据两个物理模型的相似性原理，例如飞机的风洞试验。

（2）仿真实验

仿真实验（Emulation Experiment）是用另一数据系统，主要是用硬件来全部或部分地模仿某一数据处理系统，以至于模仿的系统能像被模仿的系统一样接受同样的数据，执行同样的程序，获得同样的结果^[4]。

（3）虚拟现实

虚拟现实起源于 20 世纪 60 年代。虚拟现实技术使用户完全沉浸在虚拟实验环境中，利用数据手套、头盔等交互设备进行与虚拟系统地交互，形象性、直观性、生动性效果佳。虚拟现实的本质是利用计算机技术和电子技术进行对现实的仿真。

（4）网络虚拟实验

网络虚拟实验是虚拟实验的网络化。这是一种基于 Web 的浏览器/服务器的虚拟实验模式。网络虚拟实验可以使用户随时随地利用网络进行试验，还能在世界范围内共享实验资源，实现远程操作和控制，网络化分工合作，使世界各地的学生一起进行科学实验和讨论。

1.1.5 虚拟实验的发展现状与发展趋势

虚拟实验的研究始于 20 世纪 80 年代末，随着计算机技术和网络技术的发展，加上政府的大力支持，各大高校和研究机构分别展开了这方面的研究与技术开发，虚拟实验得到快速发展，面向教学也日益普及。

由 Houston 和 NAS/Johnson 航天中心联合建立的 VETL(Virtual Environmental Technology Laboratory)实验室主要致力于虚拟现实技术在教育、训练和科学/工程数据可视化的研究和开发工作^[4]，到目前为止该实验室研究成果颇丰，主要有用于创建多感知的三维环境的软件工具、用于对分散在各地的军事人员进行培训的系统和宇航培训系统等。

麻省理工大学的 Web Lab 远程实验室与 1998 年投入使用。它提供了用于进行微电子学和电路设计课程的设计教学，它允许学生在自己的电脑上设计并修改电路模型，然后通过一个 Java 激活的 Web 浏览器使用在远程实验室里的昂贵的测试设备来测试数据，验证自己的设计，最后还实现了通过手机远程控制实验的功能^[38]。VLAB 是美国俄勒冈大学物理系主办的物理实验网站。该网站包含了天体物理、能量与环境、力学、热学等方面的几十种虚拟实验。该系统用 Java 语言开发，使用网络服务器进行实验。美国密歇根大学化学工程系创建的 VRCEL 实验室，用来探索和开发虚拟现实技术在化学工程领域的应用。

德国的 Ruhr 大学网络虚拟实验室是一个关于控制系统的学习系统，它拥有直观的三维场景效果，可以进行交互式操作。

在国内，中国科技大学开发了物理仿真软件、几何光学设计实验平台、大学物理实验虚拟远程教学系统。浙江大学的虚拟化学实验，是基于 Web 的，以 VRML 为基础构建虚拟实验环境，并利用 Java 技术进行交互。同济大学建成了可以对建筑景观、结构进行仿真的虚拟现实实验室。清华大学建成了“电力系统及大型发电设备安全控制仿真”国家重点实验室和利用虚拟仪器构建的汽车发动机检测系统。此外，其他高

校也开发了许多虚拟实验室用于教学和科研工作。

虚拟实验室的发展趋势有以下几个特点：加强通用性虚拟实验模型的开发与建设，多种技术融合共同开发，网络化趋势更加发展。

虚拟实验拓展和改革了传统的实验教学，随着虚拟实验的进一步发展完善，它必将会发挥它巨大的教学价值和科研价值。

1.2 研究思路

1.2.1 发动机与液力变矩器共同工作真实实验过程分析

为使虚拟实验更好的模拟真实实验过程，需要详细地了解真实实验的整个过程。发动机与液力变矩器共同工作实验在牵引动力学实验室完成。作者从相关书籍与资料中了解了发动机与液力变矩器共同工作实验，并前往实验室详细了解了实验所需仪器及设备，了解实验具体过程和步骤以及实验数据处理与分析（比如分析共同工作的动力性和经济性），就相关问题询问实验室老师。对真实实验的具体分析是下一步虚拟实验的设计开发的根据与基础。

该实验的具体介绍可以参见附录。除了实验的准备工作（比如连接油路、发动机预热、检查等工作）结束工作在实验室控制台外面进行，其余实验工作均在实验室控制台进行完成。因为该实验配备了一套电子控制系统，发动机油门开度的调节，负载大小的调节均在电控箱上进行操作，同时实验数据的显示（包括泵轮转矩、转速，涡轮转矩、转速，油温，油压等）也是在电控箱上通过 LED 显示屏显示。这给虚拟实验的开发带来了启示，虚拟实验设计是基于桌面的，即实验者对着计算机桌面完成实验操作，包括调节发动机油门、调节负载大小、记录数据等，显示实验数据也是在桌面上完成的。因此，两者在很大程度上是相似的。另外，真实实验完成以后需要对大量实验数据进行处理，作出共同工作输入输出特性曲线，分析匹配后的动力性与经济性。在虚拟实验中，这一过程是由程序自动完成的，并给出评价参数。

对发动机与液力变矩器共同工作真实实验过程的具体分析是下一步该虚拟实验的设计开发的根据与基础。

1.2.2 本虚拟实验设计开发思路

（1）虚拟实验目标

模拟真实实验的基本过程。学生在实验之前需有发动机与液力变矩器匹配的知识储备。该虚拟实验要能帮助学生消化吸收发动机与液力变矩器的匹配知识，掌握匹配原则与匹配方法，理解评价参数的意义。

（2）虚拟实验实现功能

1. 动态模拟发动机的台架试验，做出发动机外特性曲线；
2. 动态模拟液力变矩器台架试验，做出液力变矩器原始特性曲线；
3. 在不同油门开度下，调节负载大小，模拟发动机与液力变矩器共同工作情况，做出共同工作输入特性曲线和共同工作输出特性曲线；
4. 给出评价参数与评价结果；
5. 仪表显示泵轮转矩、转速，涡轮转矩、转速；
6. 实验数据记录；
7. 环境模拟，如增加发动机声音等；

（3）软件开发思路

1. 选择使用 Visual C++ 中的 MFC 编程。MFC (Microsoft Foundation Classes) 是一组功能强大的微软基础类，应用程序的编程以此为基础，可以使用已经封装好的类，而不必编写大量的繁琐的底层代码；
2. 对实验数据的处理及数学模型的建立使用 MATLAB。MATLAB 拥有一个强大的线性拟合工具，可以方便快捷的对数据进行处理，并建立数学模型；
3. 使用 PlotLab 绘制相应特性曲线；
4. 使用 InstrumentLab 进行仪表显示。

1.2.3 本虚拟实验评价与改进

发动机与液力变矩器共同工作特性虚拟实验开发完成后，对其进行试验与评价，并与真实实验进行比较。开发过程中遇到一些值得讨论的问题，将在后文中论述。

1.3 本文结构

本文共分为六章，各章主要内容如下：

第一章主要论述了本课题的研究背景（即概述虚拟实验）和本虚拟实验开发、研究思路，以及本文的结构。这一章所述为本课题研究论文撰写的前提。

第二章简要介绍介绍了发动机特性，讨论了发动机建模的一般方法，建立了发动机特性模型。

第三章简要介绍了液力变矩器特性，讨论了液力变矩器建模的一般方法，建立了液力变矩器特性模型。

第四章讨论了发动机与液力变矩器匹配的匹配方法和匹配原则，以及匹配的评价参数，并建立了共同工作输入特性模型，共同工作输出特性模型。

第五章介绍了发动机与液力变矩器共同工作虚拟实验的具体设计思路和开发过

程，并与真实实验比照，对本虚拟实验的效果进行了评价。

论文不足与展望部分对论文讨论了本虚拟实验的不足之处和需要改进的地方，以及对于该虚拟实验今后发展的展望。

装

订

线

第二章 发动机特性建模

本章主要介绍了发动机建模的一般方法与常用建模仿真软件，论述了本文虚拟实验所选择的发动机建模方法与建模过程，最后给出了发动机特性的数学模型。

2.1 发动机建模方法介绍

发动机是车辆的动力之源，它本身是一个极其复杂的气动热力系统，内部工作原理与工作过程十分复杂。建立发动机模型，就是用数学方法描述和分析发动机的工作过程和工作特性，目的是能够通过计算机进行仿真分析。我们常用数学方程、函数曲线、和图表的形式来描述发动机的特性，如负荷特性、外特性、调速特性、万有特性等。根据研究发动机的不同方面已经发展出不同的发动机模型，可以应用于不同的场合。发动机建模理论从数学来分类可以分为：线性和非线性、定参和非定参、连续和离散的、确定的和随机的、实时和非实时的^[6]。

一个完整的仿真模型建模应该包括三个步骤。第一，建立数学模型。第二，模型转换。这一步经常借用建模软件来完成，如 ADAMS、MATLAB 等。第三是模型的仿真验证试验，将模型与实物进行比较分析，这可以分为离线仿真和在线实时仿真。

常用的发动机建模方法有两种。一种是解析法，即根据物理规律直接列出发动机系统内各变量之间的相互关系的动力学方程，经过整理和变换得到所需数学模型。这一方法需要对发动机工作时系统内部的整个的物理过程有详尽的了解，比如发动机的曲轴转角、喷油量、过量空气系数、压缩过程等，然后根据物理定律或者根据假设建立微分方程和平衡方程，加上约束，经过整理得到状态方程。

第二种方法是采用试验的方法。这需要将发动机视作一个未知的系统，对该系统加入试验信号（比如发动机油门开度和发动机转速），然后得到输出的信号（即发动机的试验数据，比如发动机有效转矩、小时油耗、比油耗、功率等）。对输入信号和输出信号进行分析和处理，得到描述输入信号和输出信号相互关系的数学模型。

2.2 几种常用的发动机模型

发动机模型一般可以分为静态模型和动态模型。考虑到模型建立的难易程度和实际建模分析的要求，现在国内外对发动机分析建模一般以静态为主。一些不考虑发动机缸内复杂燃烧过程的理论建模方法，如平均值发动机动态建模和键合图发动机建模法，也在整车控制中被采用^[7]。

（一）发动机数值模型^[7]

通过发动机试验获取的特性数据，借助查表、拟合和插值方法，可以建立发动机的输入输出数学模型。大量研究表明，发动机的外特性和负荷特性可以表示为发动机节气门开度（柴油机为油门开度） α 和发动机转速 n 的函数。实际中多采用多项式拟和方法对发动机试验数据进行拟合，构造发动机稳态输出转矩、油门开度、以及发动机转速的关系，进而查表求得其油耗和排放。

（二）平均值模型^[7]

平均值模型忽略各缸在一个工作循环内出于不同曲轴转角时的差别，即对各缸的工作状态差异进行了平均处理。典型的平均值模型包括气路、油路和动力输出子模型三大部分。平均值模型重点反映了发动机的动态特性。

（1）气路子模型。气路子模型分别模拟了节气门和气缸入口处的空气流量，由速度-密度法给出进气管压力状态方程(2-2)，以及理想气体状态方程两边微分得出平衡方程（2-3）。

$$\dot{m}_{man} = \dot{m}_{at} - \dot{m}_{ao} \quad (2-1)$$

$$\dot{p}_{man} = \frac{RT_{man}}{V_{man}} \dot{m} + p_{man} \frac{\dot{T}_{man}}{T_{man}} = \frac{RT_{man}}{V_{man}} (-\dot{m}_{ac} + \dot{m}_{at}) \quad (2-2)$$

其中， R 为气体常数， T_{man} 为进气管内温度， V_{man} 为进气管容积， \dot{m}_{ac} 和 \dot{m}_{at} 分别为进气缸的空气质量流和节气门出空气质量流。

（2）油路子模型。假设所有喷入进气管的燃料都可以蒸发及在气缸内参与燃烧，油路子输出子模型可以表示为：

$$\dot{m}_{ff} = (1/\tau_f)(-\dot{m}_{ff} + X\dot{m}_{fi}) \quad (2-3)$$

$$\dot{m}_{fv} = (1 - X)\dot{m}_{fi} \quad (2-4)$$

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{ff} + \dot{m}_{fv} \quad (2-5)$$

其中， \dot{m}_f 为进气口燃油流量， \dot{m}_{fi} 为燃油喷射流量， \dot{m}_{ff} 为油膜质量变化率， \dot{m}_{fv} 为燃油蒸汽流量， τ_f 为油膜蒸发时间常数， X 为喷射的燃油中沉积于壁面的比例。

（3）动力输出子模型。根据进入气缸的燃油量和空气量，结合发动机转速和点火提前角等参数，可以计算出发动机的输出功率和转速变化率。

$$\dot{n} = \frac{H_u \eta_f \dot{m}_f (t - \tau_d) - (P_f + P_e + P_m)}{J \cdot n} \quad (2-6)$$

其中， H_u 为燃油热值， η_f 为发动机热效率， τ_d 为燃烧过程的时间延迟， P_f 为指示功率， P_e 为负载功率， P_m 为机械损失功率， J 为发动机转动惯量， n 为发动机转速。

平均值模型结构简单，不用考虑各缸复杂的燃烧过程，所以运算量小。平均值模

型有较高的整体精度，足够模拟发动机动态响应过程。

（三）发动机键合图模型^[7]

键合图采用统一的图形符号，对多能量范畴的工程系统进行动态分析，并根据系统功率流的方向建立系统动态模型。发动机的键合图模型如下图所示。

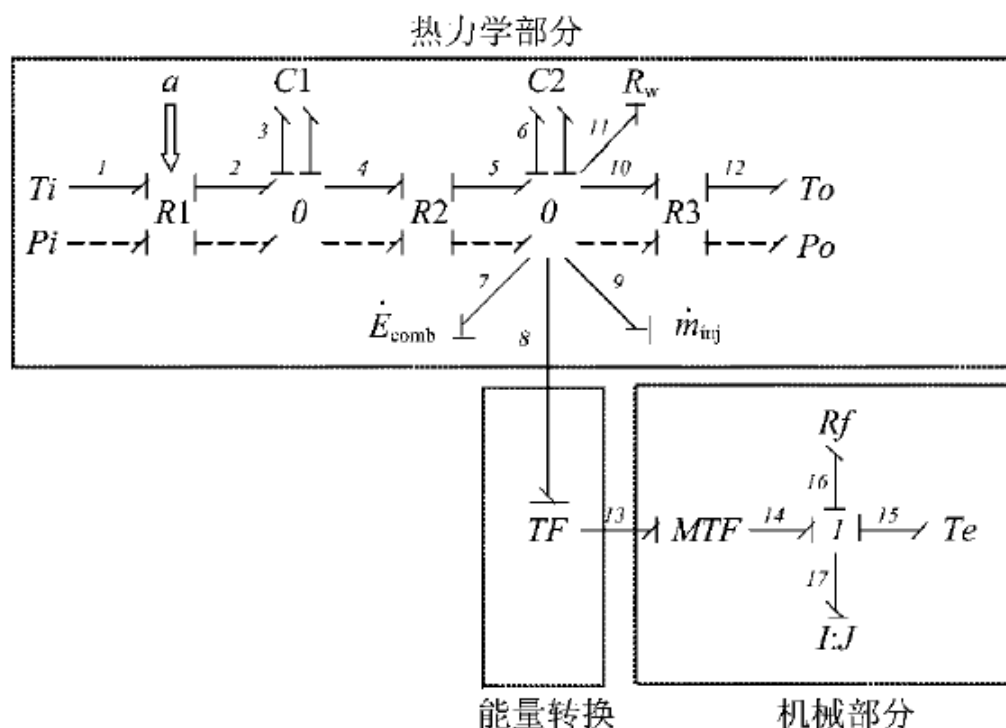


图 2- 1 发动机的键合图模型（单缸）

键合图具有直观性和统一性，能够反映不同范畴变量之间的动态关系，常应用于整车控制。

2.3 常用发动机建模仿真软件介绍

1. MATLAB/SIMULINK

目前控制系统用发动机模型大部分是由 FOTRAN 或 C 语言编写的的部件级模型，基于这些语言的发动机模型在进行控制系统研究时需要一个可以快速实现控制系统分析、诊断的图形化仿真平台，能通过图形用户界面直接了解控制参数和发动机参数，并具有将控制系统设计转化为实时代码的能力。MATLAB 就是这样一种优秀的图形仿真平台，不仅有 SIMULINK 建模仿真工具包，CONTROL SYSTEM 控制工具包和 REAL-TIME WORKSHOP 实时代码转化工具包，还提供了各种用于复杂非线性系统的仿真分析工具，发动机模型系统在其图形仿真环境中，是一种发动机控制设计和诊断的强大工具^[8]。

2. Carsim

Carsim 是 MSC(Mechanical Simulation Corporation 机械仿真公司)的车辆动力学仿真软件。在给定驾驶员、路面以及空气动力学输入的情况下,仿真车辆可以用来预测整车的动力性、经济性、制动性、操纵稳定性和平顺性。Carsim 是一款特性的参数化界面的汽车动力学仿真软件,主要由四个软件模块组成:数据库、求解器、三维动画和处理绘图模块。

3.UG (交互式 CAD/CAM 系统) 和 Pro/ENGINEER

UG (Unigraphics NX) 和 Pro/ENGINEER 可以用于发动机三维造型,将三维模型导入 ADAMS 软件中可以进行发动机的动力学分析。

4. ADAMS^[42]

ADAMS, 即机械系统动力学自动分析(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems), 该软件是美国 MDI 公司(Mechanical Dynamics Inc.)开发的虚拟样机分析软件。ADAMS 已经被全世界各行各业的数百家主要制造商采用。ADAMS 可以创建完全参数化的机械系统几何模型,其求解器采用多刚体系统动力学理论中的拉格朗日方程方法,建立系统动力学方程,对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析,输出位移、速度、加速度和反作用力曲线。ADAMS 软件的仿真可用于预测机械系统的性能、运动范围、碰撞检测、峰值载荷以及计算有限元的输入载荷等。

5. Modelica/Dymola

Modelica 语言是面向对象的仿真语言,它是 Dymola 的建模基础。面向对象和非因果是 Modelica 语言的两个重要概念,面向对象时针对模型的结构而言,非因果则是对模型内部行为的描述^[11]。Modelica 语言建立的方程可以自动实现微分方程 (DAE) 到常微分方程 (ODE) 的转变,而且不需要考虑方程计算的顺序,采用了非因果关系建模。Dymola 编译器将 Modelica 编写的程序自动转变成 C 代码进行编译;该编码能被输出到 SIMULINK 和半物理仿真平台。Dymola 具有强大的仿真、二维曲线结果显示及三维动画功能,其脚本文件能控制仿真过程并执行计算,同时提供自动文本编译^[12]。

2.4 本虚拟实验发动机建模方法选择和建模过程

2.4.1 发动机建模方法选择

发动机建模方法的选择应该根据本虚拟实验的所要实现的目标和功能对所建立的发动机模型的要求而定。虚拟实验的与所要实现的目标和功能已在绪论中分析,本虚拟实验的目标是起到良好的教学辅助作用,功能是模拟发动机与液力变矩器共同工作特性实验过程,显示实验数据,处理实验数据以及给出评价结果,无需进行复杂的动力学和热力学分析,所以在这里不需要进行发动机复杂的动态建模。在本文中,只需应用到发动机的特性模型,即发动机转矩、功率、油耗和转速的数学模型。发动机

特性包括外特性、速度特性、负荷特性和万有特性，在本文中只需应用发动机的外特性和部分油门开度速度特性，建立外特性模型和部分特性模型，作为发动机与液力变矩器匹配的基础。

根据以上分析，本文采用发动机数值建模方法，从相关资料中获取发动机试验数据，采用多项式拟合方法建立发动机特性模型。

2.4.2 发动机特性建模过程

1) 获取发动机试验数据。本文选择发动机型号为 JX4391Q1 柴油机。柴油机外特性试验数据如下表所示。

表 2- 1 JX4391Q1 柴油机外特性试验数据

转速 n (r/min)	有效转矩 M_e (N · m)	有效功率 P_e (kW)	比油耗 g_e (g/(kWh))
1400	150	20	249.8
1600	159	26	243
1800	164	30	237
2000	165	33	232
2200	163	36	227
2400	160	38	224
2600	154	39.5	228
2800	146	40.5	233
3000	130	41	240

2)多项式拟合

1. 转矩拟合

装

订

线

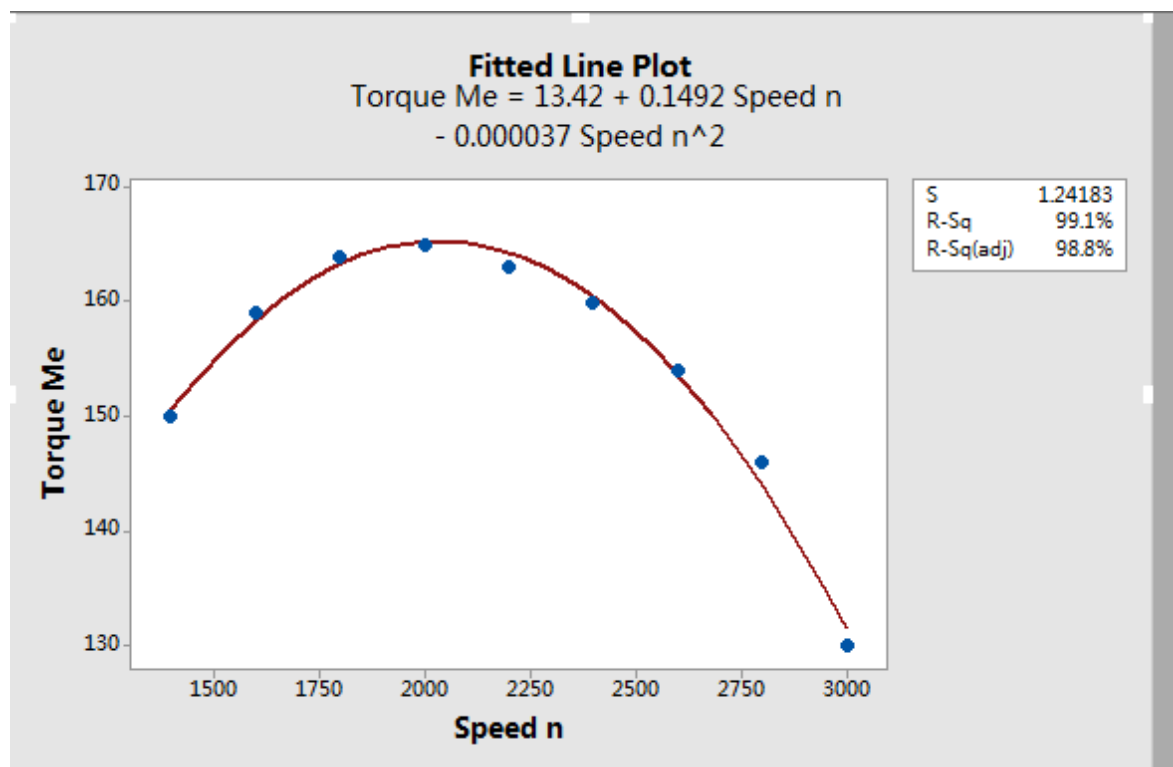


图 2- 2 发动机有效转矩拟合曲线

2. 有效功率曲线拟合

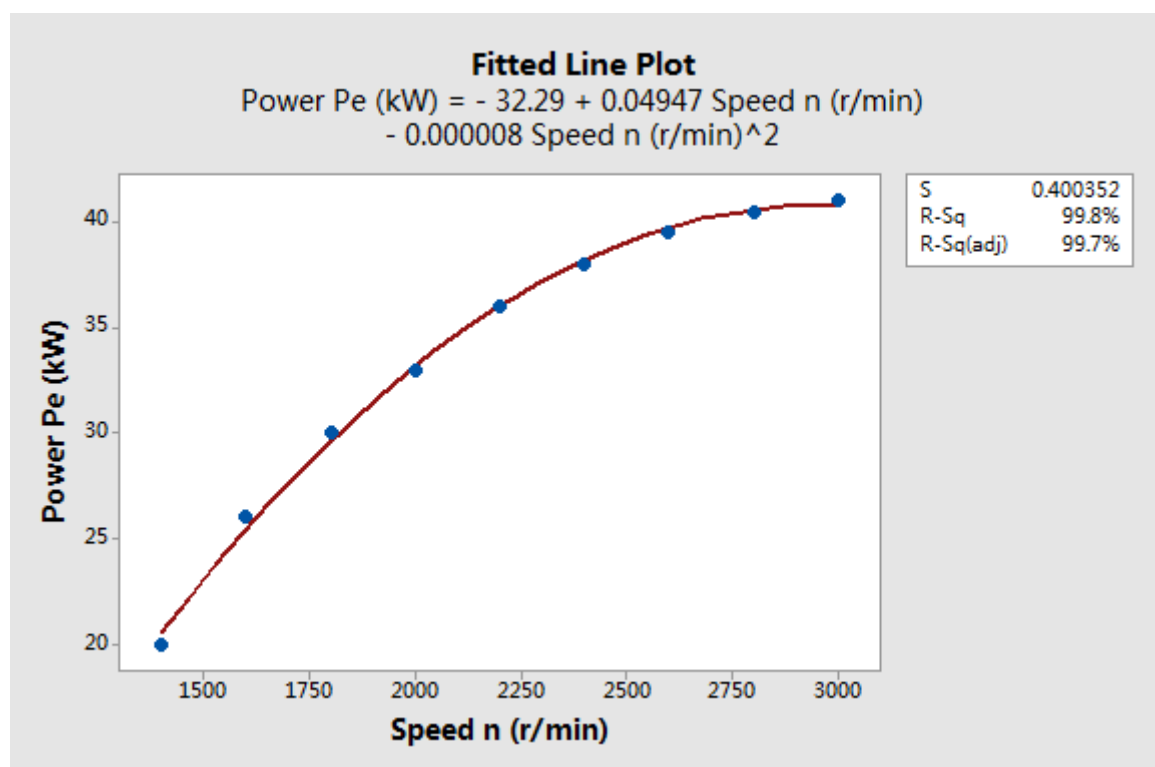


图 2- 3 发动机有效功率拟合曲线

3.比油耗曲线拟合

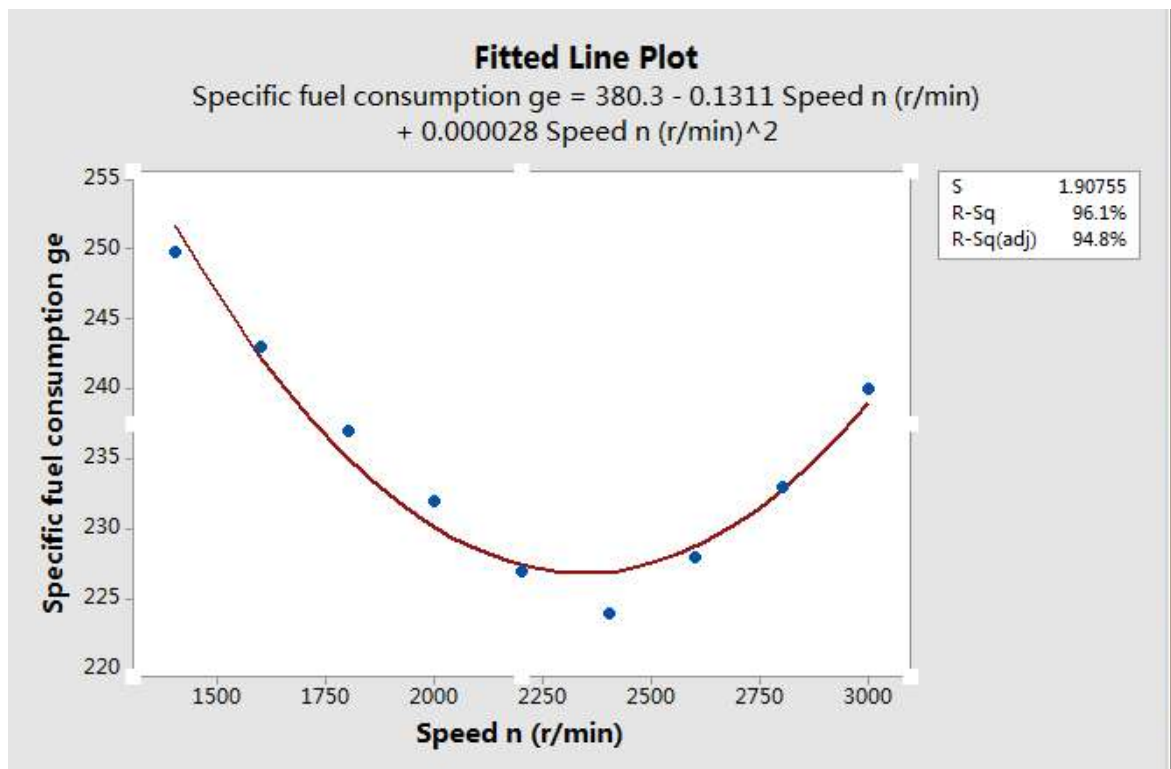


图 2- 4 发动机比油耗拟合曲线

3) 发动机特性数学模型分析

对于已知试验数据的发动机，其使用外特性可以视作发动机转速的一元函数，其建模方法一般有一元插值法和曲线拟合法。经过综合分析比较，因外特性曲线（有效转矩、有效功率、比油耗）形状接近抛物线，使用曲线拟合精度较高，固在这里选择二次曲线拟合的方法建立发动机使用外特性模型。模型建立如下：

$$\text{转矩: } M_e = A_1 n_e^2 + A_2 n_e + A_3 \quad (2-7)$$

$$\text{功率: } P_e = B_1 n_e^2 + B_2 n_e + B_3 \quad (2-8)$$

$$\text{比油耗: } g_e = C_1 n_e^2 + C_2 n_e + C_3 \quad (2-9)$$

部分油门开度速度特性模型的建立方法与发动机外特性模型相同。

发动机数学模型的建立是分析发动机动力性和燃油经济性模拟的基础，也是模拟发动机与液力变矩器共同工作的基础。数学模型建立的精确性将影响到虚拟试验中对发动机与液力变矩器共同工作情况的模拟的准确程度。经过综合分析和比较，作者认为运用线性拟合来建立发动机模型使用方便，拟合精度高，满足本虚拟实验要求，为之后的共同工作特性建模建立了基础。

第三章 液力变矩器特性建模

液力传动广泛用于工程机械以及车辆的传动系中，而液力变矩器是液力传动的本元件之一。本章主要简要介绍了液力传动的特点、液力变矩器的工作原理和特性，比较分析了液力变矩器的建模方法，讨论了在本虚拟实验中选择的建模方法，并建立了液力变矩器的特性模型。

3.1 液力变矩器简介

3.1.1 液力传动工作原理和特点

最简单的液力变矩器是由泵轮、涡轮、导轮三个元件组成的。液力变矩器工作腔内充满油液，利用油液的旋转运动的牵连运动和沿工作叶轮叶片流道的流动的相对运动组成的复合运动，实现能量传递和转换。液力变矩器结构和原理图如图 3-1 所示。液力传动的基本原理是基于流体力学的欧拉方程，通过泵轮与输入轴相连接，把发动机传过来的机械能转化成流体动能，再由液流冲击涡轮，使之转动，涡轮与输出轴相连，将流体动能转化成机械能向外输出，并使工作液体的动量矩减小。运动液体的能量以三种形式存在，即压力能、动能、和位能。在液体元件传递能量的过程中，机械能首先转化为液体能，再由液体能转化为机械能。液力传动具有如下所述特点：

1.自动适应性

液力变矩器具有自动变矩变速的特性。当外界负载增加时，变矩器涡轮输出转矩自动增加，转速自动降低；当外界负载减小时，输出转矩自动减小，转速自动提高。

2.防震隔震作用

液力传动连接为柔性连接，能减弱动力机扭震和隔离载荷振动，减缓冲击提高动力机和传动装置的寿命，提高乘坐舒适性。

3.带载启动性能

装有液力传动的设备可以带载启动。实现动力机空载起步、软启动，启动时间短，使动力机的稳定工况扩大。若动力机为柴油机则不易熄火。

4.过载保护性能

在一定的泵轮转速下，泵轮、涡轮、导轮的转矩只能在一定范围内随工况变化、如果载荷转矩达到涡轮的最大转矩，则涡轮转速减小至零、在这个过程中，各叶轮的转矩不超过其固有的变化范围，可以对设备起到过载保护的作用。

5.变矩器效率

变矩器的效率随工况而变，最高效率为 85%~90%。

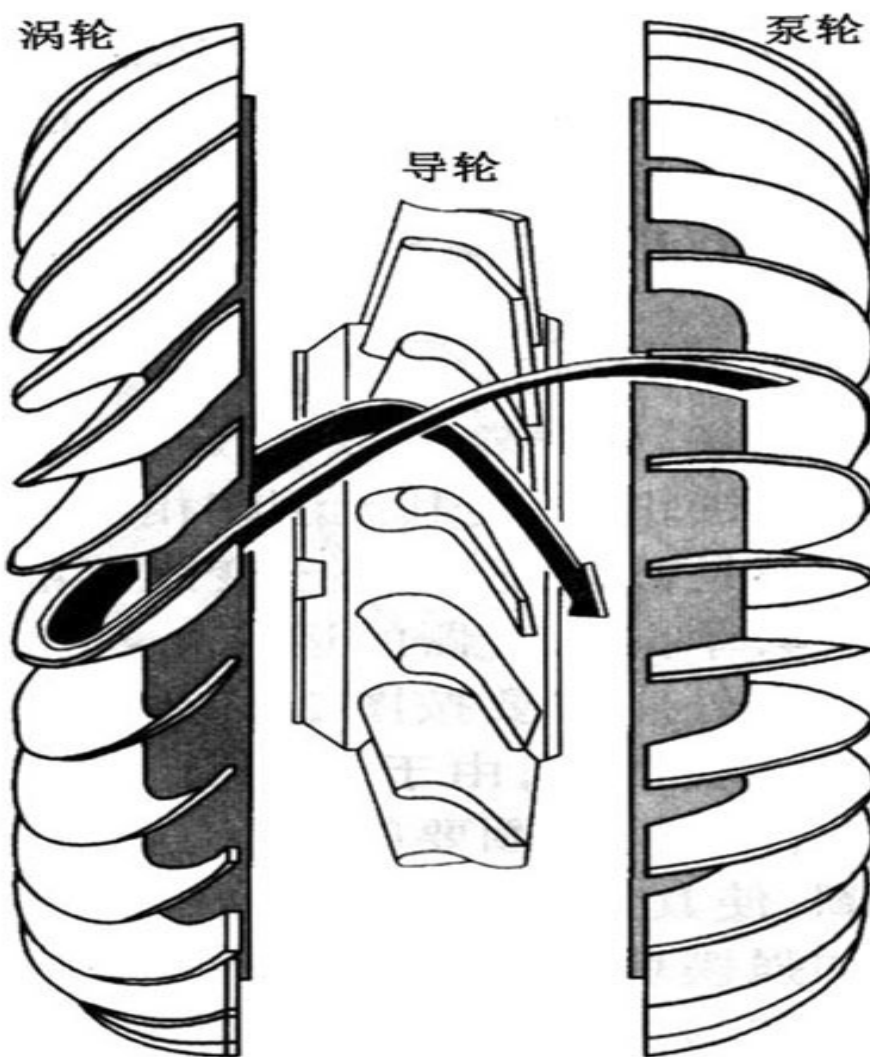


图 3-1 液力变矩器结构与工作原理图

3.1.2 液力变矩器的原始特性

原始特性是表示在循环圆内具有完全相似稳定的流动现象的若干液力变矩器之间共同特性的函数曲线。这里完全相似流动现象指两个液力变矩器中液体稳定流动的几何相似、运动相似和动力相似（雷诺数 R_e 相等）。根据相似理论，可以建立以变矩器传动比 i 为自变量，泵轮转矩系数 λ_1 、变矩系数 K 、液力变矩器效率 η 随 i 值变化而变化的函数关系式，即：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_1(i) \\ K &= K(i) \\ \eta &= \eta(i) \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

以上三式就是液力变矩器的原始特性（也叫无因次特性）。

实际的液力变矩器的原始特性是在台架实验上测得的。其方法是保持泵轮转速 n_1 不变，改变负载大小，选取某一涡轮转速 n_2 值，由传感器测得泵轮转矩 M_1 ，涡轮转矩 M_2 ，再应用无因次计算公式进行计算。

$$\begin{cases} i = \frac{n_2}{n_1} \\ \lambda_1 = \frac{M_1}{\gamma D^5} \\ K = \frac{M_2}{M_1} \\ \eta = Ki \end{cases} \quad (3-6)$$

式中 γ 为液力变矩器工作液体的重度（单位 N/m^3 ）， D 为液力变矩器循环圆直径。液力变矩器的原始特性如图 3-2 所示。（图中 λ_b 与 λ_1 一样，表示泵轮转矩系数。）

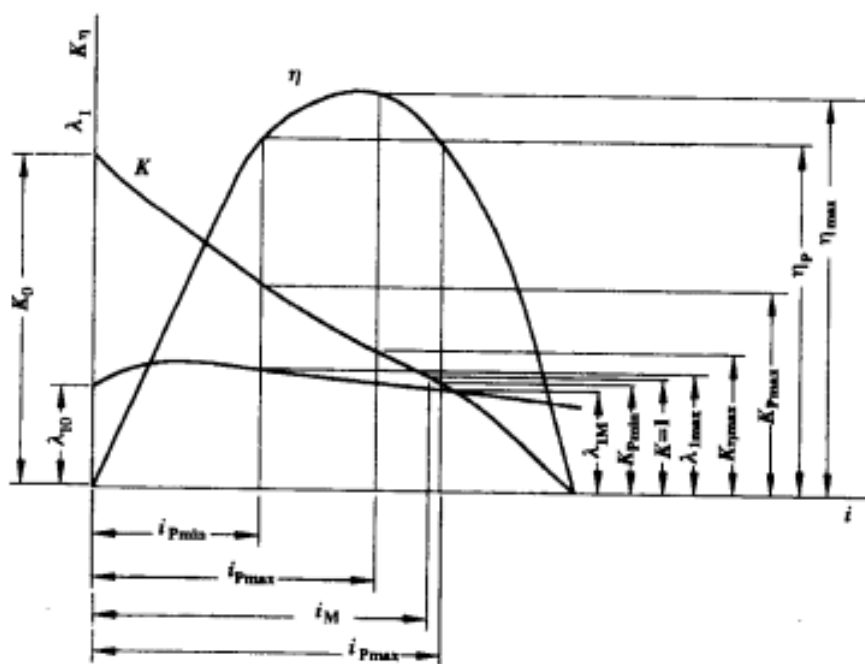


图 3- 2 液力变矩器原始特性曲线

3.1.3 液力变矩器输入特性

液力变矩器的输入特性是以泵轮转矩系数 λ_1 作为参数而绘制的泵轮轴转速和转矩之间函数关系的曲线。如，前述 $M_1 = \lambda_1 \gamma D^5$ 中 λ_1 并非一常数，而是一相似不变量。

对于不具有透穿性的液力变矩器而言， λ_1 是一常数。对于具有透穿性的变矩器，每一个 λ_1 对应一条抛物线，如图 3-3 所示。负透性的变矩器的输入特性的抛物线随 $i=0$ 到 $i=1$ 是从上到下，正透性的变矩器的输入特性的抛物线是随 $i=0$ 到 $i=1$ 是从下到上。图示为负透性变矩器。一般工程机械上采用负透性变矩器。

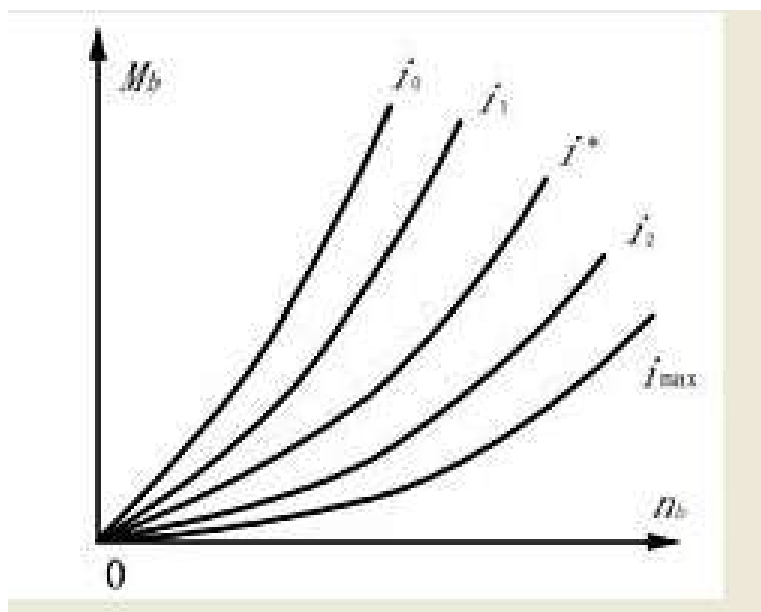


图 3- 3 液力变矩器输入特性曲线

对于透穿性的变矩器而言，一般以 0.1 的间隔来绘制输入特性。这是求取发动机与液力变矩器共同工作的基础。

3.2 液力变矩器模型介绍

液力变矩器的工作过程是一个复杂的流体动力学过程，工作液体在流道内做复杂的三维粘性非定常紊流流动，能量流状态多样。想要建立完全能够描述其工作原理和工作过程的液力变矩器模型并非易事。物理模型的建模方法是根据具有物理意义的参数和方程建立模型，用以描述系统的组成和工作过程。物理模型的一大好处是可以追踪一些物理参数对系统工作的影响^[13]。模型的复杂程度越高，所需要的物理参数和方程也就越多。如下图所示，液力变矩器模型的复杂程度从左至右增加，需要更多的物理参数进行描述。最复杂的模型建立是应用计算流体动力学（computational fluid dynamics CFD）建模。通常在建立液力变矩器模型时，会针对模型的用途而确定液力变矩器模型的复杂程度。

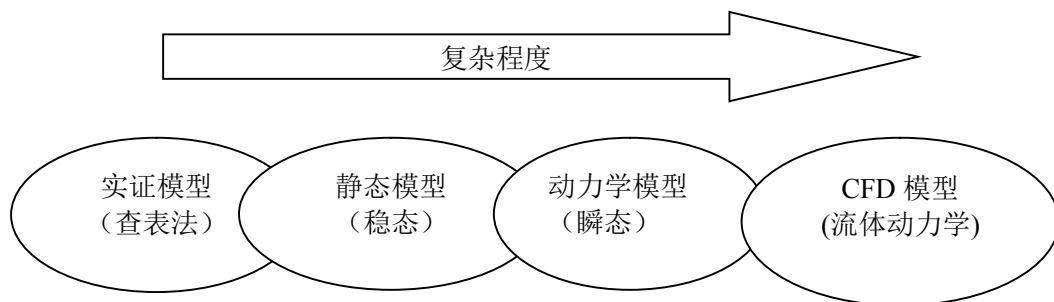


图 3- 4 液力变矩器模型复杂程度

液力变矩器实证模型是根据液力变矩器的试验数据建立的。它在分析液力变矩器的工作特性时非常有用，如分析最大输出转矩、效率、输出功率、传动比、转矩系数等。然而实证模型过于简单，无法捕捉瞬态变量和设计参数对液力变矩器工作的影响。

动力学模型是利用物理公式和方程（包括牛顿定律、欧拉方程、伯努利方程、三维流动基本方程等）建立的液力变矩器模型，可以进行动态特性分析仿真研究。计算流体动力学(CFD)是近些年来迅速发展起来的。CFD 模型可以用于分析二维及三维流场，可以处理层流或湍流、传热或绝热、可压缩或不可压缩、牛顿流或非牛顿流、多组分传输等问题。

现在可以用于液力变矩器建模的软件非常多，各有其侧重点与适用的范围。UG 或者 proe 可以用来进行液力变矩器的三维造型，ADAMS 可以用来进行液力变矩器的动力学分析和仿真，MATLLAB/SIMULINK 可以进行系统建模和实时仿真，Carsim 可以用于整车的控制和仿真分析，CFD 软件可以用于流场分析和数值模拟。

3. 3 液力变矩器特性建模

3. 3. 1 液力变矩器建模方法选择

考虑到本虚拟实验的对液力变矩器模型的要求，不需要对液力变矩器建立复杂的动力学模型，本文只需根据液力变矩器试验数据，建立液力变矩器原始特性模型和输入特性模型，作为发动机与液力变矩器共同工作的基础。本文采用曲线拟合的方式建立原始特性数学模型，并在后续过程中利用该拟合曲线插值得到当前传动比 i 工况下泵轮转矩系数 λ_1 和变矩系数 K ，可以进行泵轮、涡轮的转矩计算。

3. 3. 2 液力变矩器原始特性建模

液力变矩器的原始特性包括稳定工况下获得的原始特性和非稳定工况下获得的

动态原始特性。静态特性试验是指稳定工况下的特性试验，动态特性试验则是模拟工作机在实际工作情况而进行的试验。由过去实践经验知，首先在非稳定工况下，泵轮转速变化很小；其次泵轮转矩系数在动态条件下与在静态条件下相差不超过 3%；再者，传动比在动态条件与在静态条件下相差不超过 3%。所以在建立原始特性模型时，只需考虑静态原始特性，动态原始特性影响甚微。

原始特性在台架试验上测得，工程机械用液力变矩器是定转速试验在试验过程中，保持泵轮转速不变，主要调节平衡电机，改变负载，同时改变涡轮转速，由传感器测得泵轮转矩、涡轮转矩、泵轮转速、涡轮转速，做出外特性曲线，再式 $\lambda_1 = \frac{M_1}{m_1^2 D^5}$ 求出 λ_1 ，以 i 为横坐标， K 、 η 、 λ_1 为纵坐标，做出原始特性曲线。

查表得 YJH375A 的原始特性试验数据，如下表所示，试验条件为泵轮转速保持 2000r/min，工作液体为 6 号油。

表 3- 1 YJH375A 液力变矩器原始特性试验数据

传动比 i	变矩系数 K	效率 η (%)	泵轮名义转矩 T_{Bg} ($N \cdot m$)
0	3.19	0	165.1
0.1	2.83	28.3	166.8
0.2	2.55	52	167
0.3	2.24	66.8	167.5
0.4	1.93	76.7	167.8
0.45	1.78	79.8	167.5
0.5	1.65	82.3	167
0.6	1.43	85.5	164
0.7	1.25	86.8	157.5
0.725	1.2	86.9	155.25
0.8	1.05	84.2	146
0.82	1.05	82	141
0.9	0.8	71.6	113
0.95	0.63	58.7	84.5

对这些数据进行多项式拟合即可，建立液力变矩器的原始特性模型，拟合的曲线应尽量通过所有离散点，以保证拟合精度。

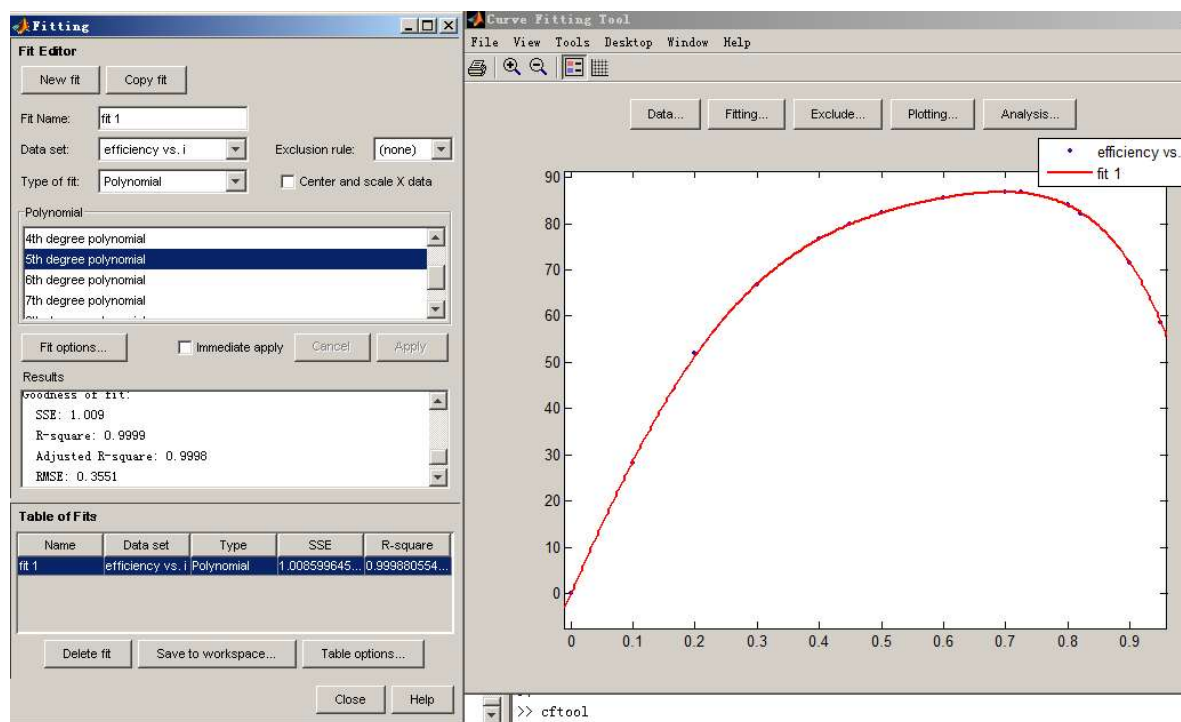


图 3- 5 液力变矩器效率拟合曲线

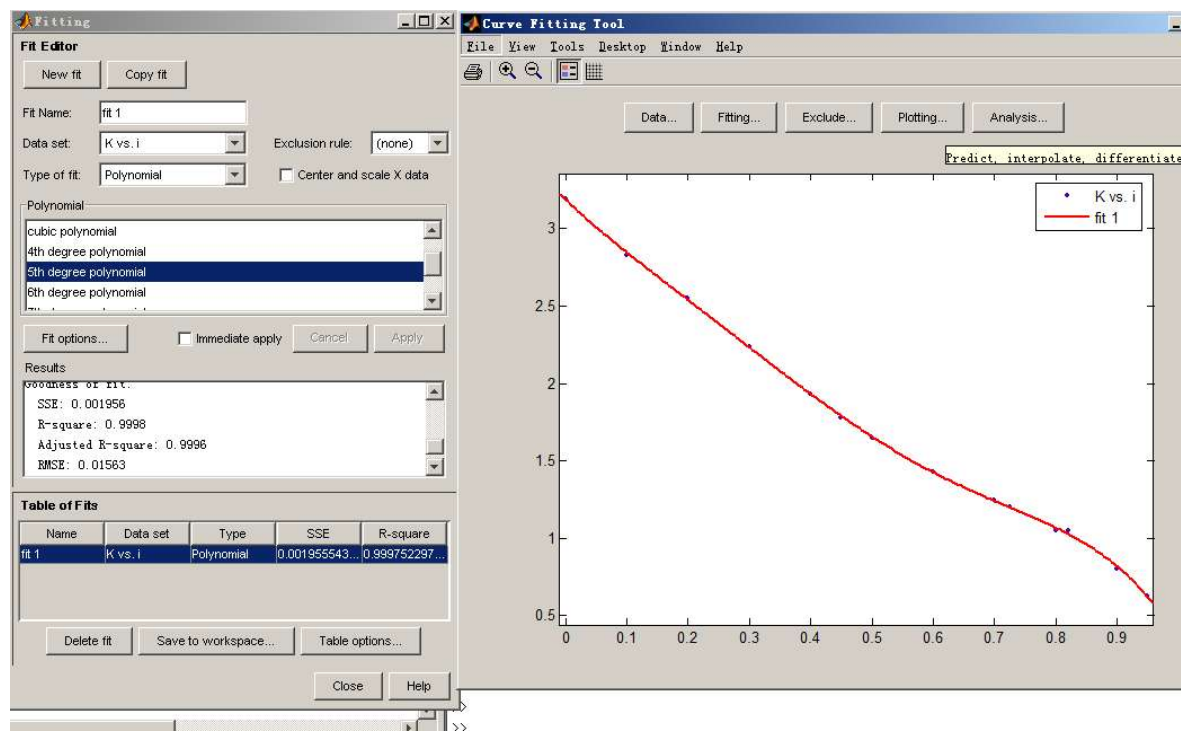


图 3- 6 液力变矩器变矩系数拟合曲线

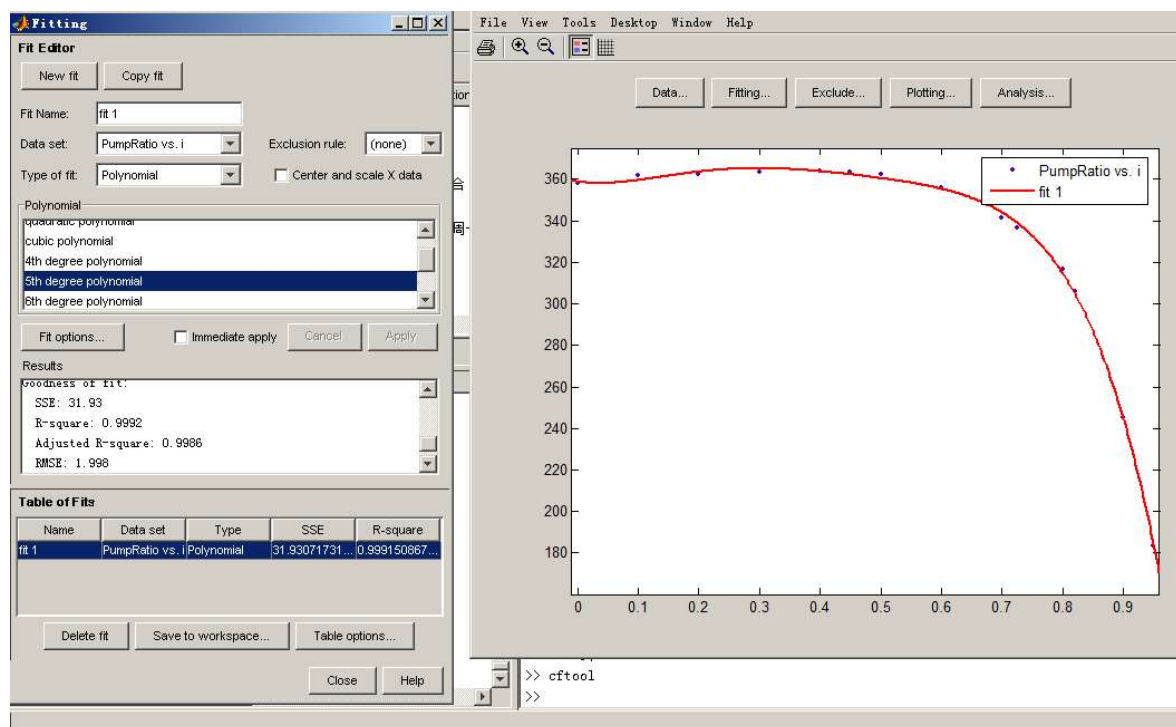


图 3- 7 液力变矩器泵轮转矩系数拟合曲线

原始特性数学模型建立如下：

$$\eta = \eta(i) = D_1 i^5 + D_2 i^4 + D_3 i^3 + D_4 i^2 + D_5 i + D_6 \quad (3-7)$$

$$K = K(i) = E_1 i^5 + E_2 i^4 + E_3 i^3 + E_4 i^2 + E_5 i + E_6 \quad (3-8)$$

$$\lambda_1 = \lambda_1(i) = F_1 i^5 + F_2 i^4 + F_3 i^3 + F_4 i^2 + F_5 i + F_6 \quad (3-9)$$

3.3.2 液力变矩器输入特性建模

液力变矩器的输入特性是以泵轮转矩系数 λ_1 作为参数而绘制的泵轮轴转速和转矩之间函数关系的曲线。所以 i 从 0 到 1 每隔 0.1 取一个工况点，在该工况下对应一个泵轮转矩系数 λ_i ，根据式 $M_1 = \lambda_1 m_1 D^5$ ，即可做出每个工况点下的 M_1 与 n_1 的函数关系曲线，即得抛物线族，即可建立液力变矩器输入特性数学模型。

$$\left. \begin{array}{l} i=0: M_1 = G_1 n_1 \\ i=0.1: M_1 = G_2 n_1 \\ i=0.2: M_1 = G_3 n_1 \\ \vdots \\ i=i^*: M_1 = G_n n_1 \end{array} \right\} \quad (3-10)$$

第四章 发动机与液力变矩器的匹配

发动机与液力变矩器的合理匹配对于液力传动车辆的性能至关重要，特别是车辆的牵引性能和燃油经济性，在很大程度上取决于两者是否得到良好匹配。本章主要介绍了发动机的匹配原则，提出了工程实际中的匹配方法，研究了发动机与液力变矩器共同工作的过程，讨论了两种求解发动机与液力变矩器共同工作输出特性的方法，根据发动机与液力变矩器共同工作原理建立了共同工作输入特性模型和共同工作输出特性模型，最后给出了发动机与液力变矩器共同工作的评价方法。

4.1 发动机与液力变矩器的匹配原则

发动机与液力变矩器 的共同工作的工况是由发动机外特性（转矩曲线）和液力变矩器的输入特性（即抛物线族）所共同包围的区域决定的。所谓合理匹配就是指如何选择变矩器与发动机共同工作的工况（亦即确定发动机转矩特性和变矩器输入特性在共同工作输入特性图上的相对位置），以保证两者的共同工作能获得最佳的效果^[15]。下面讨论发动机与液力变矩器合理匹配应遵循的原则。

（1）充分发挥发动机有效功率。为使发动机发挥最大有效功率，应使液力变矩器具有最高效率的那条输入特性曲线通过发动机最大净功率点处的转矩点。因工程机械中一般选择负透性变矩器，应使液力变矩器高效范围内的输入特性曲线在最大功率点附近，以充分发挥发动机有效功率。

（2）低的燃油消耗率，实现燃油经济性。液力变矩器与发动机的共同工作范围应在发动机的低油耗区，以实现燃油经济性。即在变矩器在高效范围内工作时，发动机工作在油耗较低的区域。

（3）满足车辆起步于作业要求。为使液力传动车辆有较好的起步性能，应在起步时输出大转矩，以及满足车辆在作业时要求输出大最大牵引力，因此传动比 $i=0$ 的输入特性曲线曲线应经过发动机最大净转矩点。

（4）为防止发动机熄火，液力变矩器输入特性曲线的每一条抛物线与发动机的净转矩曲线的交点应在发动机最大净转矩点右侧，即先让液力变矩器打滑，后发动机熄火。

在实际的液力传动设计时，很难满足所有匹配原则，一般应综合考虑，结合实际需求有所侧重。

4.2 发动机与液力变矩器的匹配方法

在确定匹配原则后，如何实现这些原则，即要使变矩器输入特性曲线与发动机外特性曲线相交于预定工作点上，主要有下面四种方法：

（1）改变液力变矩器的有效直径。这种方法用于发动机给定，液力变矩器形式已定，根据相似原则来设计液力变矩器的情况。改变有效直径可以使输入特性曲线在坐标系上绕原点移动，有效直径 D 增大曲线左移，有效直径 D 减小曲线右移。有效直径 D 由下式确定：

$$D = \sqrt[5]{\frac{M_{eH}}{\lambda_1 m_{eH}}} \quad (4-1)$$

式中： M_{eH} — 发动机净额定转矩；

λ_1 — 泵轮转矩系数；

γ — 液力变矩器工作液体重度，即 $\gamma = \rho \cdot g$ 。 ρ 为工作液体密度， g 为重速度；

n_{eH} — 发动机额定转速；

（2）在发动机和液力变矩器之间增设一个中间传动装置，靠改变中间传动比来移动发动机外特性曲线位置。若中间传动装置为增速机构，则发动机外特性曲线下移；若中间传动装置为减速机构，则发动机外特性曲线上移。

（3）改变泵轮转矩系数 λ_1 。车削泵轮或导轮出口处叶片可以改变 λ_1 。泵轮出口处叶片角度通常变化平缓，经车削后，泵轮出口半径减小，故 λ_1 减小，输入特性曲线右移；车削导轮出口处叶片，可使 λ_1 增大，输入特性曲线左移。因这种方法车削量与 λ_1 的定量关系须由试验确定，车削工作量大，所以这种方法很少采用。

（4）尽量选用系列化产品液力变矩器。在发动机给定和液力变矩器形式已经确定的情况下，如果这种液力变矩器有系列化产品，那么应尽量选用这个系列的液力变矩器。

4.3 发动机与液力变矩器共同工作输入特性

发动机与液力变矩器的共同工作范围是由发动机速度特性（转矩曲线）和液力变矩器的输入特性（即抛物线族）所共同包围的区域决定的。输入特性如图 4-1 所示。

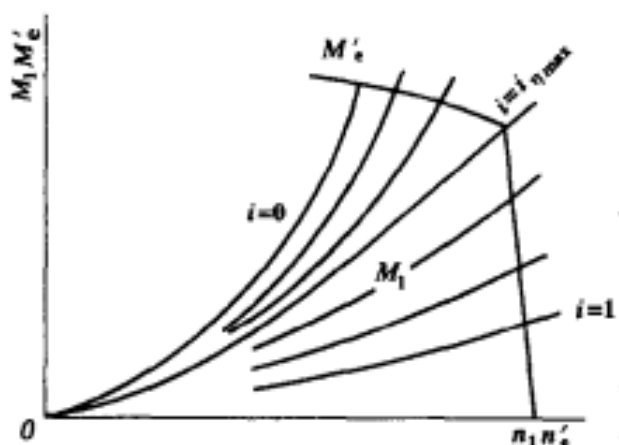


图 4-13 按变矩器最高效率工况匹配的变矩器与发动机共同工作的输入特性

图 4- 1 共同工作输入特性

发动机与液力变矩器共同工作的性能与两者的传动连接方式有关。传动连接方式从原则上一般分为串联功率流式和并联功率流式。

（一）串联功率流式

在串联功率流式中可以分为四种情况进行讨论。

1.发动机与变矩器直接相连，且发动机全部功率通过液力变矩器。在这种情况下，转换至泵轮轴上发动机特性即为发动机特性。此时，两者共同工作的必要条件为：

$$M_e = M_1, n_e = n_1 \quad (4-2)$$

式中： M_e ， n_e —发动机有效转矩和转速；

M_1 ， n_1 —液力变矩器泵轮轴上的转矩和转速。

2.发动机与变矩器直接相连，但有一部分功率分流来驱动机器的辅助装置和功率输出轴。在这种情况下，在换算发动机特性到泵轮轴上发动机特性时，要从发动机转矩中扣除相应的辅助装置和功率输出轴的消耗。可按下式换算：

$$\left. \begin{aligned} n_e' &= n_e \\ M_e' &= M_{ec} \\ P_e' &= P_{ec} \\ G_e' &= G_e \\ g_e' &= g_e \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{ec} &= M_e - M_{Ba} - M_{PTO} \\ P_{ec} &= P_e - P_{Ba} - P_{PTO} \end{aligned} \right\} \quad (4-4)$$

式中: n_e' , M_e' , P_e' , G_e' , g_e' —换算到泵轮轴上的发动机转速、有效转矩、有效功率、小时油耗和比油耗;

M_{ec} —发动机的自由转矩, 即扣除辅助装置和功率输出轴的消耗剩余的发动机转矩;

P_{ec} —发动机的自由功率, 即扣除辅助装置和功率输出轴的消耗剩余的发动机功率;

M_{Ba} , P_{Ba} —辅助装置消耗的转矩和功率;

M_{PTO} , P_{PTO} —功率输出轴消耗的转矩和功率。

此时两者共同工作的必要条件仍为 $M_e = M_1$, $n_e = n_1$ 。

4. 发动机通过中间增速器（或减速器）与变矩器相连, 且在变矩器之前无功率分流。设中间传动比为 i_g , 效率为 η_g , 则换算公式为:

$$\left. \begin{aligned} n_e' &= \frac{n_e}{i_g} \\ M_e' &= M_e i_g \eta_g \\ P_e' &= P_e \eta_g \\ G_e' &= G_e \\ g_e' &= \frac{g_e}{\eta_g} \end{aligned} \right\} \quad (4-5)$$

此时两者共同工作的必要条件仍为 $M_e = M_1$, $n_e = n_1$ 。

3. 发动机通过中间增速器（或减速器）与变矩器相连, 且在变矩器之前有功率分流。设中间传动比为 i_g , 效率为 η_g , 则换算公式为:

$$\left. \begin{aligned} n_e' &= \frac{n_e}{i_g} \\ M_e' &= M_{ec} i_g \eta_g \\ P_e' &= P_{ec} \eta_g \\ G_e' &= G_e \frac{P_{ec}}{P_e} \\ g_e' &= \frac{g_e}{\eta_g} \end{aligned} \right\} \quad (4-6)$$

此时两者共同工作的必要条件仍为 $M_e = M_1$, $n_e = n_1$ 。

（二）并联功率流式

采用并联功率流式液力机械传动是为了改进液力传动效率低的缺点。在并联复合传动中，发动机功率只有一部分流经效率较低的液力变矩器，另一部分通过效率高的机械传动系，所以具有较高的效率。因并联功率流式换算较为复杂，且其内容与本文研究内容关系不大，故在此不详细论述。

本虚拟实验中的情况是发动机与变矩器直接相连，且无功率分流。

将发动机特性换算到泵轮轴上之后，只需将换算到泵轮轴上的发动机特性与液力变矩器输入特性放到同一坐标系中，既得两者共同工作输入特性。变矩器输入特性的抛物线族与发动机特性共同区域就是两者的共同工作范围。

4.4 发动机与液力变矩器共同工作的输出特性

液力变矩器与发动机共同工作的输入特性反映了两者特性参数之间的相互制约关系，而这种联合工作的结果，则使得液力变矩器输出轴上的功率、转矩、转速以及发动机在共同工作下的燃料经济性等参数之间存在着完全确定的函数关系式。此种函数关系用液力变矩器发动机与共同工作的输出特性来表示^[15]。输出特性曲线如图 5-2 所示。

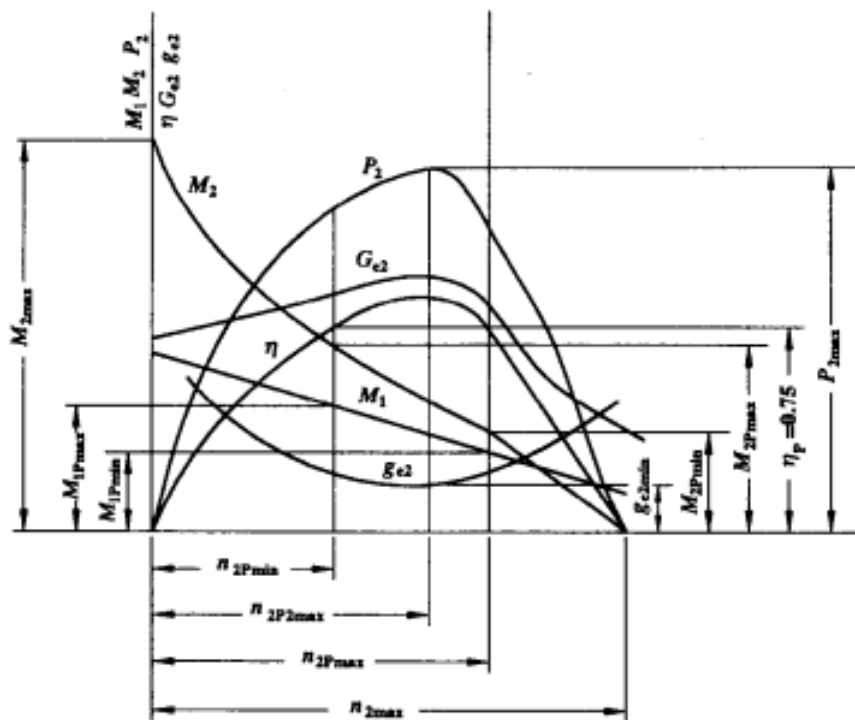


图 4- 2 共同工作输出特性

通常共同工作输出特性包括下列参数间的函数关系的曲线图像：

$$\left. \begin{aligned} M_2 &= M_2(n_2) \\ P_2 &= P_2(n_2) \\ \eta_2 &= \eta_2(n_2) \\ G_{e2} &= G_{e2}(n_2) \\ g_{e2} &= g_{e2}(n_2) \end{aligned} \right\} \quad (4-7)$$

有时为使用方便，还画出泵轮轴转矩随涡轮转速变化的函数图像， $M_1 = M_1(n_2)$ 。

发动机与变矩器共同工作的输出特性，全面地反映了这种复合动力装置的动力性和燃料经济性。

绘制发动机与液力变矩器共同工作的输出特性一般有两种方法，一种是根据共同工作输出特性，另一种是根据液力变矩器原始特性与发动机净外特性的联系来绘制，分别将在下面详细阐述，并通过实际例子的实践来比较两种方法的优劣。

（一）根据共同工作的输入特性绘制共同工作输出曲线

1. 液力变矩器传动比 i 从 0 到 1 每隔 0.1 选择一个工作点，此时每个 i 值对应一条液力变矩器输入特性的抛物线，将此抛物线与转换到泵轮轴上的发动机特性方程联立，求其交点，获得一个工作点数据，即泵轮转速 n_1 和泵轮转矩 M_1 。

2. 由 $n_2 = in_1$ 求得涡轮转速 n_2 ；

3. 根据原始特性即可求得这个工作点下的转矩系数 K ，效率 η ，泵轮转矩系数 λ_1 ；
4. 由式 $M_2 = KM_1$ ，求得涡轮转矩 M_2 ；
5. 在发动机净外特性的比油耗曲线方程中代入泵轮转速 n_1 （也是发动机转速），即可获得该工况下发动机的比油耗 g_{e2} ；
6. 输出功率 P_2 按照 $P_2 = M_2 n_2 \times 1.0467 \times 10^{-4}$ （单位 kW）计算
7. 重复上述步骤，即可获得在其他工作点下的工作数据。将这些数据整理成一个多维数组，如表 4-1 所示。

表 4-1 共同工作输出特性实验数据

i	K	η	n_1	n_2	M_1	M_2	P_2	g_{e2}

8. 根据上述数据建立共同工作特性数学模型。这里仍然使用线性拟合来建立数学模型，得到的数学模型如下：

$$\left. \begin{aligned}
 M_2 &= M_2(n_2) = H_1 n_2^5 + H_2 n_2^4 + H_3 n_2^3 + H_4 n_2^2 + H_5 n_2 + H_6 \\
 P_2 &= P_2(n_2) = I_1 n_2^2 + I_2 n_2 + I_3 \\
 \eta_2 &= \eta_2(n_2) = J_1 n_2^5 + J_2 n_2^4 + J_3 n_2^3 + J_4 n_2^2 + J_5 n_2 + J_6 \\
 g_{e2} &= g_{e2}(n_2) = L_1 n_2^5 + L_2 n_2^4 + L_3 n_2^3 + L_4 n_2^2 + L_5 n_2 + L_6 \\
 M_1 &= M_1(n_2) = R_1 n_2^5 + R_2 n_2^4 + R_3 n_2^3 + R_4 n_2^2 + R_5 n_2 + R_6
 \end{aligned} \right\} \quad (4-8)$$

(二)根据发动机特性和液力变矩器原始特性绘制共同工作输出特性

根据这一方法绘制输出特性，首先要明确发动机特性与液力变矩器的参数之间的关系。在此本文引入一个新的参数—发动机转矩系数 λ_e 。

定义为： $\lambda_e = \frac{M'_e}{\gamma D^5 n_e'^2}$

式中： D —液力变矩器有效直径；

γ —液力变矩器工作液体重度，即 $\gamma = \rho \cdot g$ 。 ρ 为工作液体密度， g 为重速度；

n_e' ， M_e' —换算到泵轮轴上的发动机转速、有效转矩。

由于两者共同工作的必要条件仍为 $M_e = M_1$ ， $n_e = n_1$ ，

$$\text{且 } \lambda_1 = \frac{M_1}{m_1^2 D^5}$$

所以

$$\lambda_1 = \lambda_e$$

可以根据这个条件来获得绘制输出特性所需数据。

1.因为在第三章中已建立发动机特性模型，且在本文中发动机与变矩器直接连接无功率分流，所以可以根据 $M_1 = M_1(n_1)$ ，建立 $\lambda_1 = \lambda_1(n_1)$ 函数；

2.在液力变矩器原始特性上选择一工况点如 $i=i^*$ ，可以根据第四章原始特性数学模型求出此工况下的 λ^* ， η^* ， K^* ；

3.根据式 $\lambda_1 = \lambda_1(n_1)$ 的反函数 $n_1 = \lambda_1^{-1}(\lambda)$ ，求此次工况下的泵轮转速 n_1^* ，再由式 $M_1 = M_1(n_1)$ 求出泵轮转矩 M_1^* ；

4.由 $n_2 = in_1$ 求得涡轮转速 n_2^* ；

5.由式 $M_2 = KM_1$ ，求得该工况下涡轮转矩 M_2^* ；

6.在发动机净外特性的比油耗曲线方程中代入泵轮转速 n_1^* （也是发动机转速），即可获得该工况下发动机的比油耗 g_{e2}^* ；

7.输出功率仍按照 $P_2 = M_2 n_2 \times 1.0467 \times 10^{-4}$ （单位 kW）计算；

8.利用同样方法求解其他工况点，直至完成从 0 到 1 的间隔 0.1 的所有工况点；将数据整理成表，据此建立输出特性数学模型，与方法一相同。

下面讨论两种方法的优劣与特点。两种方法的本质是一样的，所以获得最终结果也是基本一样的，由于曲线拟合得到的数学方程使数据有微小差异。方法一是获得离散点数据，计算量大，需要求解方程组，即发动机净转矩曲线与输入特性每条抛物线的交点，获得离散的数据；而方法二直接根据定量的函数关系式，得出数据，工作更为省力方便，但需建立 $\lambda_1 = \lambda_1(n_1)$ 函数，并得出反函数（或者可以使用曲线拟合直接建立 $n_1 = n_1(\lambda_1)$ 函数关系式）。

在工程实践中，显然方法二具有优势，使用和计算更加方便准确，得到普遍使用。

4.5 发动机与液力变矩器共同工作的评价方法

根据发动机与液力变矩器共同工作的输出特性，并分析特定的参数，我们可以得到两者匹配的评价参数，用来评价两者匹配后性能的好坏。匹配的评价参数有：

（1）最大涡轮输出转矩 $M_{T \max}$ 。 $M_{T \max}$ 越大，车辆启动转矩越大，承受重负荷的能力越强。

(2) 液力变矩器与发动机匹配的高效范围内涡轮转速范围: $d_n = \frac{n_{T1}}{n_{T2}}$ 。

(3) 高效力矩范围: $d_M = \frac{M_{T1}}{M_{T2}}$ 。 d_M 反映了发动机与液力变矩器共同工作在液力变矩器高效区间的动力性能。

(4) 全工况范围内平均输出功率: $P_{T1} = \frac{\int_0^{n_{T \max}} P_{n_T} dn_T}{n_{T \max}}$ 。 P_{T1} 综合反映了液力传动车辆的动力性能。

式中: P_{n_T} ——共同工作特性涡轮输出功率;

$n_{T \max}$ ——空载时涡轮转速。

(5) 高效范围内平均输出功率: $P_{T2} = \frac{\int_{n_{T1}}^{n_{T2}} P_{n_T} dn_T}{n_{T2} - n_{T1}}$ 。 P_{T2} 综合反映了车辆正常工作时的动力性能。

将匹配结果评价参数列成表, 如表 4-2 所示。

表 4- 2 匹配评价参数

参数	$M_{T \max}$	d_n	d_M	P_{T1}	P_{T2}
值					

从评价参数中我们可以看到发动机与液力变矩器匹配的性能表现, 并可以与其他型号的发动机与液力变矩器匹配的结果进行比较, 最终确定最佳匹配方案。

第五章 发动机与液力变矩器共同工作虚拟实验分析

5.1 虚拟实验目标

本虚拟实验的目标是达到良好的教学效果，使老师可以在讲解发动机与液力变矩器匹配的知识内容时进行课堂实验演示，以及学生在课后可以自己进行该内容的虚拟实验，帮助消化理解所学理论知识。

该虚拟实验应当能模拟发动机与液力变矩器共同工作特性实验的基本过程，有关该实验具体步骤参见附录《发动机与液力变矩器共同工作特性实验》。学生在实验之前需有发动机与液力变矩器匹配的知识储备。该虚拟实验要旨在学生消化吸收发动机与液力变矩器的匹配知识，掌握匹配原则与匹配方法，理解评价参数的工程意义。

5.2 虚拟实验实现功能

- 1.动态模拟发动机的台架试验，做出发动机外特性曲线；
- 2.动态模拟液力变矩器台架试验，做出液力变矩器原始特性曲线；
- 3.在不同油门开度下，调节负载大小，模拟发动机与液力变矩器共同工作情况，做出共同工作输入特性曲线和共同工作输出特性曲线；
- 4.给出评价参数与评价结果；
- 5.仪表显示；
- 6.数据记录；
- 7.环境模拟，如增加发动机声音；

5.3 虚拟实验设计与开发过程

5.3.1 虚拟实验开发平台介绍

本虚拟实验采用的软件平台是 Visual C++，Visual C++是在 Windows 平台上开发应用程序的强大工具，面向对象的技术是程序开发更具效率，更加贴近事物的本质，更易理解。Visual C++提供了丰富的集成开发环境，可以方便地构建图形用户界面，同时可以使用 MFC（微软基础类）丰富的类库来方便的构建复杂的程序框架，MFC 编程程序框架清晰，代码开发效率高。

另外还有 Mitov Software 公司开发的编程工具 PlotLab 和 InstrumentLab 可以应用到 MFC 编程中。PlotLab 可以用于曲线的绘制，InstrumentLab 可以用来进行仪表的显示。

5.3.2 虚拟实验的相关数学模型建立

从相关手册中获取发动机与液力变矩器的基本数据，使用统计工具软件 Minitab 进行基本数据的计算与处理，然后使用 MATLAB 进行曲线拟合建立相关数学模型。MATLAB 拥有功能强大的曲线拟合工具，因此用于数学建模再合适不过。相关的数学模型的建立过程已在前面章节中陈述，此处不再赘述。

5.3.3 发动机与液力变矩器共同工作特性实验虚拟实验开发思路与过程

（一）本虚拟实验的软件模块示意图：

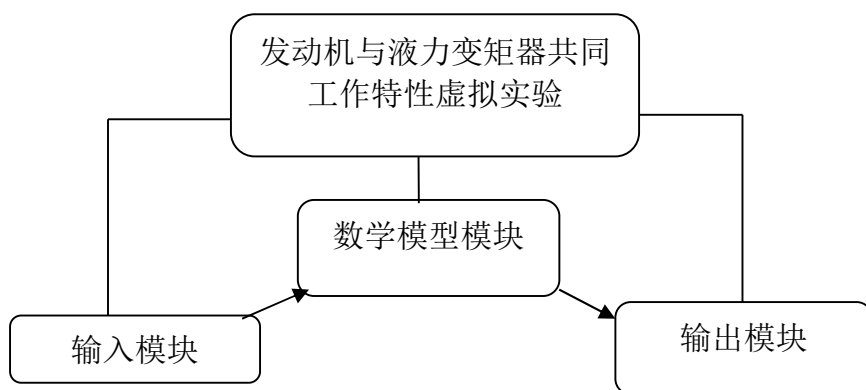


图 5-1 软件模块示意图

本虚拟实验软件流程图：

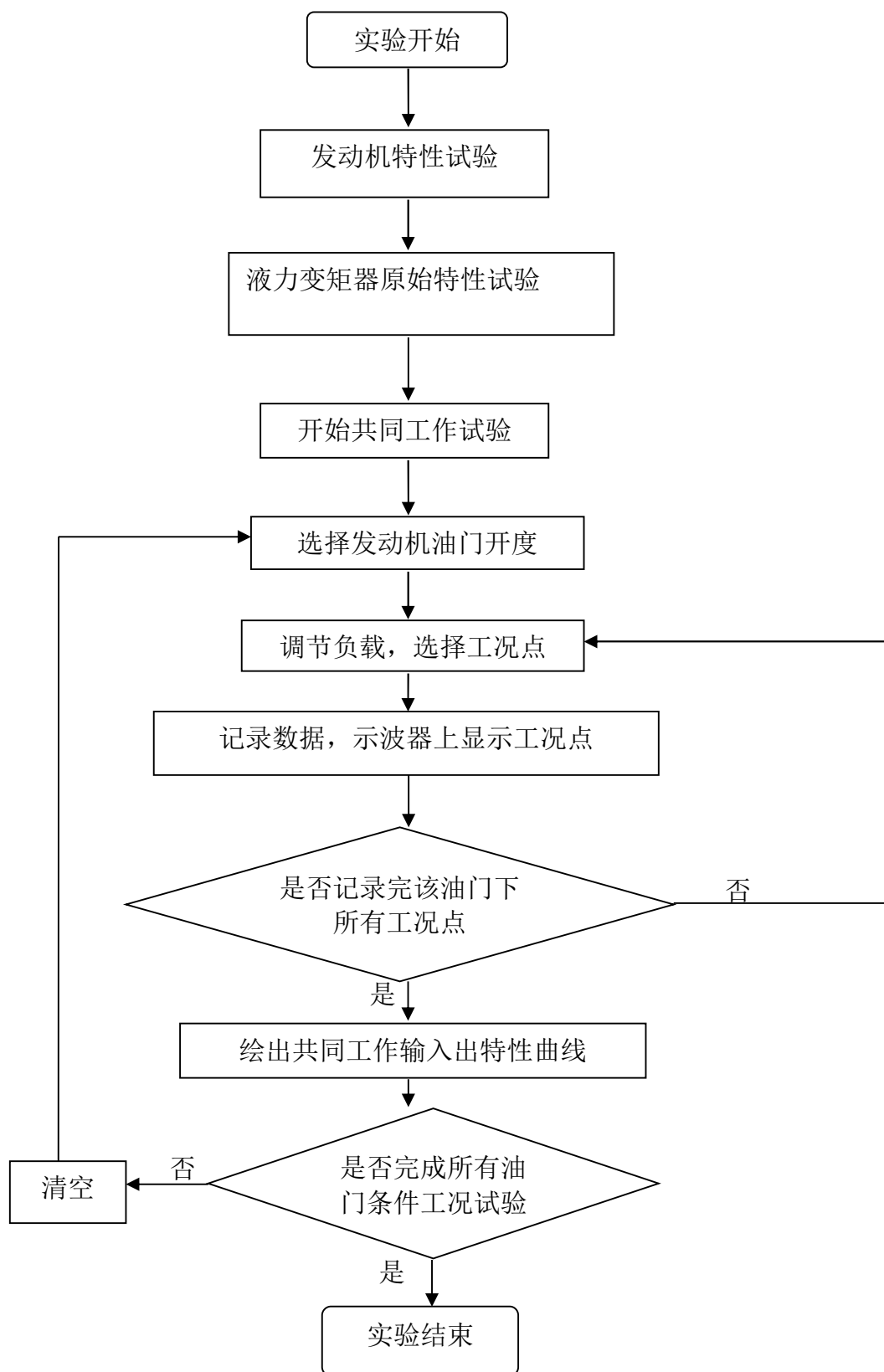


图 5- 2 虚拟实验软件流程图

（二）发动机外特性试验

发动机的外特性是在发动机台架上测得的，它表示在最大油门开度条件下，有效转矩、有效功率和比油耗随发动机转速变化而连续变化的表现。在测试时，油门开到最大，调整负荷，是发动机稳定在某一转速，测取这一工况下的功率、比油耗等，然后调整负载（即发动机转矩），使发动机转速改变，再测得另一转速下的功率、比油耗等。按照一定速度间隔依次进行上述步骤，获取试验数据，即可绘制外特性曲线。

在本虚拟实验中，设计了一个发动机外特性的示波器和一个启动发动机外特性试验的按钮，点击发动机外特性试验按钮后，示波器开始工作，随着发动机转速的增加在转矩曲线、功率曲线、比油耗曲线逐个加点，直至到达最大转速，同时仪表显示发动机转矩和转速。最后，呈现出完整的发动机外特性曲线。

（三）液力变矩器原始特性试验

液力变矩器原始特性试验，一般指牵引工况下的基本性能试验。需要测定的参数有泵轮转矩、转速，涡轮转矩、转速，进口油温、油压，出口油温油压^[16]。工程机械上的液力元件采用定转速试验方法。在试验过程中，液力变矩器的泵轮转速保持不变，主要调节平衡电机，改变负载，同时改变涡轮转速。

本虚拟实验中的液力变矩器的原始特性试验设计与发动机试验设计类似。因为本虚拟实验重点是两者共同工作的过程，所以对发动机试验和液力变矩器试验的模拟适当简化，只是最后给出发动机外特性与液力变矩器原始特性，作为两者匹配的依据。

在这部分中设计了原始特性示波器和启动液力变矩器原始特性试验的按钮，点击开始试验后，示波器随着传动比 i 增加（因为泵轮转速不变，所以是随着涡轮转速增加），在变矩系数曲线、效率曲线、泵轮转矩系数曲线上逐个加点，直到传动比 $i=0$ 。同时，仪表盘显示泵轮转矩、转速，涡轮转矩、转速。另外，在原始特性曲线上标出效率大于等于75%的高效区间。最后呈现出完整的液力变矩器原始特性曲线。

（四）发动机与液力变矩器共同工作特性试验

这个试验过程在附录《发动机与液力变矩器共同工作特性实验》中有详细介绍，在此不再重复介绍。

虚拟实验对这个试验过程的实现稍显复杂，因为该实验过程涉及到两个输入变量，发动机油门开度和外负载大小。如果把本虚拟实验系统比作一个黑箱，我们暂且不必去管这个黑箱的内部构造如何，发动机油门开度和外负载大小则是这个黑箱的输入，最后我们得到这个工况下的实验数据（泵轮转矩、效率、比油耗等），即该黑箱的输出，可以这样认为，泵轮转矩、效率、比油耗等实验数据是发动机油门开度和外负载大小的二元函数。

因为在实验中油门开度分别为100%，90%，80%，70%等有限个值，所以作者考虑在程序中用switch语句来实现，即在每一个油门开度下建立相关的数学模型，这样

在某一开度下，泵轮转矩、效率、比油耗等实验数据就是外负载大小的一元函数，二元函数简化成一元函数。

输入输出模型的建立方法是：

1.在每一个油门开度条件下，根据第五章中 5.4 小节所述方法计算出共同工作时的不同工况的数据，建立共同工作输出模型。

2.首先对外界负载大小（即涡轮输出转矩） M_2 和泵轮转速 n_1 进行曲线拟合，获得泵轮转速 n_1 关于外界负载大小 M_2 的函数， $n_1 = n_1(M_2)$ ；

3.再对对外界负载大小（即涡轮输出转矩） M_2 和传动比 i 进行曲线拟合，获得传动比 i 关于负载大小 M_2 的函数， $i = i(M_2)$ ；

4.然后根据式 $n_2 = in_1$ 计算出涡轮转速 n_2 ；

5.根据液力变矩器原始特性方程可以计算出液力变矩器效率 η 、变矩系数 K 、泵轮转矩系数 λ_1 ，据式 $M_1 = \lambda_1 m_1 D^5$ 或者 $M_1 = \frac{M_2}{K}$ 可以计算出泵轮转矩 M_1 ，（或者可以使用共同工作输出特性模型进行变矩器效率 η 、泵轮转矩 M_1 的计算）。

6.根据共同工作输出模型计算输出功率 P_2 和比油耗 g_{e2} 。此时已获得所需全部实验变量数据。

7.为了不至于使每次实验数据相同，失去实验的意义，在每个函数之后添加一个随机数，作为随机的扰动。

油门开度和负载大小的输入是通过设置两个滑动条控件来实现的。滑动油门开度可以设置油门开度，滑动外负载滑动条可以调节负载大小。

实验的过程是从小到大调节负载，而传动比从 $i = 0.95$ （因为实际实验中 $i = 1$ 不可到达）变化到 $i = 0$ ，同时在虚拟实验桌面上显示传动比大小。

共同工作输入示波器的工作方法是在先显示发动机外特性或者部分速度特性曲线，然后随着传动比 i 值的变化，每隔 0.1 显示一条输入特性的抛物线，直至显示完抛物线族。

共同工作输出特性示波器的工作方法是每选择一个工况点后，点击记录数据按钮后，在示波器上增加一个工作点，在记录表上增添一行数据记录，在记录下一个工作点时，示波器自动用折线连接下一个数据点，重复调节负载、记录数据的步骤，最后绘制出共同工作输出特性曲线。

在这个过程中，仪表显示泵轮转矩、转速，涡轮转矩、转速。

在实验的最后将给出发动机与液力变矩器的评价参数，用来评价两者匹配的好坏。

在点击清空共同工作按钮后，将清空共同工作输出示波器的发动机速度特性曲线和共同工作输出示波器，之后可以重新选择油门开度进行下一步实验。

为了增加本虚拟实验的趣味性，不致过分枯燥，也更加逼真，本虚拟实验增加了一部分环境模拟，即在程序中加入了发动机声音的伴奏，在点击发动机外特性试验之后开始播放，按停止按钮停止播放。

5.4 虚拟实验效果评价

以下是本虚拟实验效果示意图。



图 5- 3 虚拟实验效果图 1

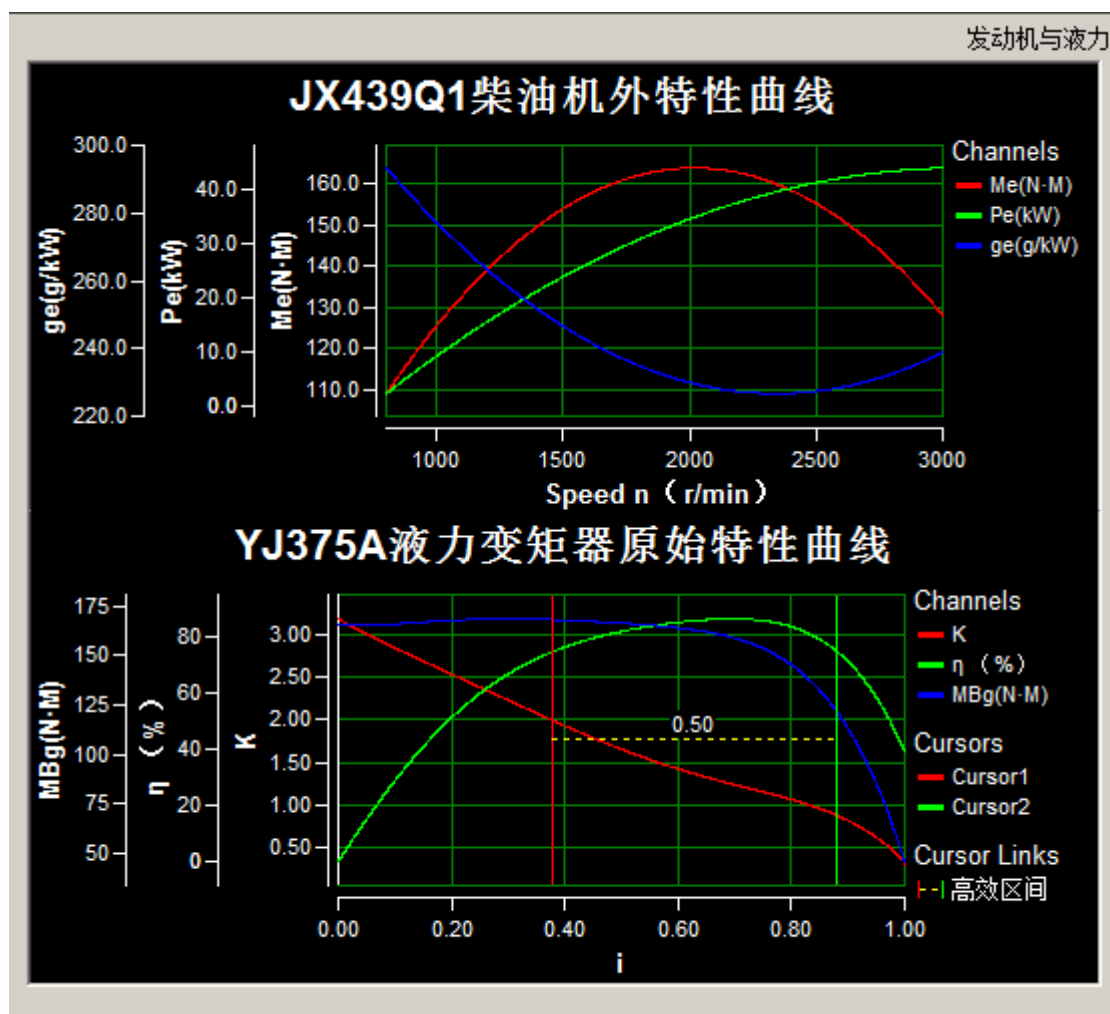


图 5- 4 虚拟实验效果图 2

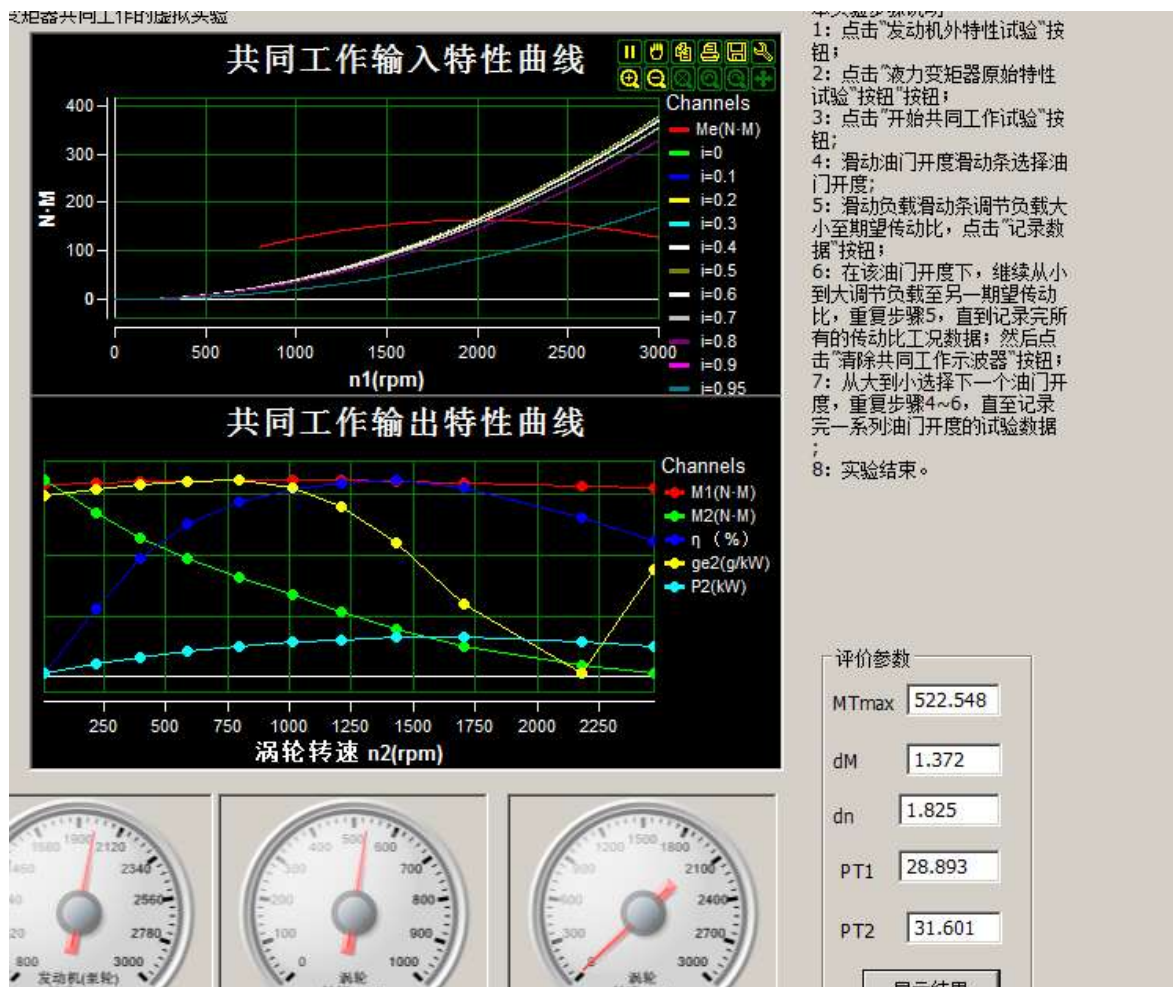


图 5- 5 虚拟实验效果图 3



图 5- 6 虚拟实验效果图 4

从本虚拟实验效果看，基本实现了发动机与液力变矩器共同工作特性虚拟实验的所需实现的功能。下面就发动机与液力变矩器共同工作特性实验真实实验与本文开发的虚拟实验进行比对，说明本虚拟实验的优点与不足。

1.真实实验的操作系统是电控的，实验的基本操作是在电控箱上完成的，实验参

数也在电控箱上进行电子显示。本虚拟实验操作与显示是在本地计算机桌面上完成的，实验过程与真实实验基本相同。

2.真实实验能量损耗大，维修保养管理成本大，而本虚拟实验可省去这方面成本，可以几乎无成本重复进行实验操作。

3.真实实验环境较为恶劣，存在刺激性油气味和巨大的噪音，而虚拟实验无环境污染，对实验者友好。

4.因为现实世界中诸多变量的影响与扰动，真实实验的实验数据每一次实验都是不同的。而虚拟实验的模型因为是固定不变的，所以每一次实验数据都是相同的。

5.真实实验需要实验者完成实验后对大量的实验数据进行处理，绘制共同工作输入输出特性曲线，这一过程较为复杂繁琐。在本虚拟实验中，直接根据实验数据利用建立好的数学模型在示波器上显示出共同工作输入输出特性曲线，便于直观地分析两者匹配的动力性和经济性。

6.由于本虚拟实验仅仅停留在计算机桌面操作，对现实的仿真度不够，所以难以使实验者获得现实的实验体验。所以作者建议可以将本虚拟实验作为课堂上讲解发动机与液力变矩器匹配知识的教学演示，以及发动机与液力变矩器共同工作特性实验真实实验的一个补充。

论文不足与展望

1. 发动机与液力变矩器数据库

在本虚拟实验中，发动机型号与液力变矩器型号已经固定，不能选择，如此的虚拟匹配就没有对比性。之后的改进工作可以再增加一个数据库，存储更多型号的发动机与液力变矩器模型，是使用者可以自由选择发动机型号与液力变矩器型号，可以进行相互比较，以确定哪种匹配方案较优。

2. 增加发动机与液力变矩器匹配动力性与经济性分析内容

在本虚拟实验中由于设置成一个窗口界面，只是简单给出了评价参数，未对动力性与经济性进行具体分析，仍然需要实验者掌握相关知识对输出特性曲线进行分析。

3. 增加发动机特性试验和液力变矩器原始特性试验内容

由于时间仓促，外加本实验重点是发动机与液力变矩器共同工作，所以对发动机特性试验和液力变矩器原始特性试验有所简化，若未对试验做出说明，可能导致实验者不清楚发动机特性的试验过程和液力变矩器原始特性试验过程。改进工作应该包括较全面地模拟发动机特性试验和液力变矩器原始特性试验的内容。

4. 教学反馈

由于时间原因未在教学上应用，所以未获得教学反馈。之后应将本虚拟实验试用于课堂或课后，获得老师与学生的反馈信息，再做出改进，以期获得良好的教学效果。

5. 三维虚拟实验展望

本虚拟实验是桌面虚拟实验，缺乏真实的现实体验。在未来可以建设发动机与液力变矩器共同工作特性实验的三维虚拟实验室，实验者需佩带感应头盔、数据手套等传感跟踪装置与虚拟世界交互，可以在虚拟世界中完成本实验内容。实验者体验到的是三维感，可以完全沉浸在虚拟实验中，达到可与现实真实实验媲美的效果。当然这需要一大笔资金，需要很长的开发周期，需要科研人员为此付出大量艰辛的劳动与心血。

致 谢

本文是在尊敬的导师褚彦军的悉心指导下完成的。褚老师认真的工作态度、严于要求学生的作风以及对工作的热情让我印象深刻，收益匪浅。从论文的选题到课题的学习，再到虚拟实验室程序的编写以及论文的撰写，中间的过程都承蒙导师的指点与教诲，使我能够学习新知，完成本课题的研究工作。在此谨向我的导师表示诚挚的谢意！

我要感谢我的父母，感谢他们的关爱与经济支持，使我能够完成大学学业，追求理想。

同时，也要感谢支持与帮助我的大学同学，是你们的友谊伴随我度过了大学四年中的快乐时光。

最后，向评审本文的专家老师表示感谢！

参考文献

- [1] <http://baike.baidu.com/view/57942.htm?fr=aladdin> .
- [2] <http://baike.baidu.com/view/1668896.htm?fr=aladdin> .
- [3] 李亚禄, 郝应光. 远程教育与虚拟实验室[J]. 自然杂志. 2001(3): 157.
- [4] 单美贤, 李艺. 虚拟实验原理与教学应用[M]. 北京: 教育科学出版社, 2005.
- [5] 陈小红. 虚拟实验室的研究现状及其发展趋势. 中国现代教育装备, 2010, (17) .
- [6] 卓刚. 航空发动机智能建模和故障诊断研究[D]. 南京航空航天大学硕士学位论文, 2004.
- [7] 朱阳, 赵治国. 混合动力汽车发动机建模方法研究[J]. 新能源汽车, 2009 (06).
- [8] Parker KI;Guo T H . Development of a turbofan engine simulation in a graphical simulation environment [J]. NASA/TM-2003-212543, 2003.
- [9] <http://baike.baidu.com/subview/13696/10732713.htm?fr=aladdin> .
- [10] http://baike.baidu.com/view/934933.htm?from_id=10972850&type=syn&fromtitle=proe&fr=aladdin
- [11] Aleandro A, Pérez G. Modeling of a Gas Turbine with Modelica [D]. Sweden:Department of Automatic Control Lund Institute of Techonology, 2001.
- [12] 任志彬, 孟光, 李防战等. 基于 Modelica 和 Dymola 的航空发动机建模和性能仿真[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2005, 18 (4).
- [13] Had Adibi Asl, Nasser Lashgarian Azard,, John McPhee. Modeling Torque Converter Characteristics in Automatic Driveline Lock-up Clutch and Engine Braking Simulation[J]. SAE, 2012 .
- [14] WU Huirong, FENG Li, ZHANG Haisong. Computer Aided Calculation of Matching Between Emgine and HudraulicTorque Converter[J]. International Conference on Futere Computer and Commication. , 2010(2).
- [15] 姚怀新, 陈波. 工程机械底盘理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [16] 秦大同, 谢里阳. 液力传动设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [17] 杨彦明. 网上虚拟实验室建模方法与构建技术研究及系统实现[D]. 中国海洋大学, 2005.
- [18] 童慧骅. 浅谈构建虚拟实验教学的技术与原则[J]. 大众科技. 2006, (08).
- [19] 胡小强. 虚拟现实技术基础与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2009.
- [20] 单美贤. 虚拟实验室的的发展方向[J]. 开放教育研究, 2002, (2).
- [21] 李凌云, 王佳, 王海军. 我国虚拟实验研究现状的实证分析[J]. 现代教育技术, 2009(12).
- [22] 白娟. 虚拟实验教学及其设计研究[D]. 陕西师范大学, 2005.
- [23] 瞿矍. 网上虚拟实验的研究与教学[J]. 开放教育研究, 2004, (04).
- [24] 张惠林, 李武幸等. 柴油机与液力变矩器的参数匹配计算软件开发[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(5).
- [25] 毛熹, 何天明. 发动机与液力变矩器的合理匹配分析[J]. 北京汽车, 2008, (02).
- [26] 祝龙林. 发动机与液力变矩器的匹配分析[J]. 汽车实用技术, 2012, (06).
- [27] 蔡遂生. 液力变矩器及其发动机的匹配. [J]. 柴油机设计与制造. 1998, (03).
- [28] 孙跃东, 周萍, 邹敏. 重型车辆发动机与液力变矩器共同工作性能分析. [J]. 起重运输机械, 2004(8).
- [29] 钱纪富, 张压西. 浅析国内外液力传动装置发展现状[J], 2011(9).
- [30] 洪清泉, 程颖. 发动机与液力变矩器共同工作虚拟样机仿真[J]. 2004, 24 (01) .
- [31] 常绿. 装载发动机与液力变矩器功率匹配优化[J], 2010, 41(07).
- [32] 徐漫琳, 齐振峰等. 汽车驾驶仿真器中发动机仿真模型的实现[J]. 成都大学学报 (自然科学

版), 2011, 30(03).

[33]何仁. 汽车动力性燃料经济性模拟计算方法及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

[34]郑莉, 董渊, 张瑞丰. C++语言程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[35]Ivor Horton. Visual C++ 2010 入门经典[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

[36]孙德臣. 工程机械发动机与液力变矩器匹配方法研究[D]. 西南交通大学研究生学位论文, 2011.

[37]王硕寒. CVT 车辆中发动机与液力变矩器共同工作性能的研究[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2005.

[38]陈小红. 基于仿真软件的虚拟实验设计与应用——以《网络基础》课程为例[D]. 上海师范大学, 2010 .

[39]方杰, 齐迎春, 马文星等. 液力变矩器流场的数值模拟与分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(5) .

[40]徐亮. 用于车辆动力学仿真的全工况发动机建模[D]. 吉林大学硕士学位论文. 2011.

[41]熊常亮, 项昌乐, 刘辉. 基于虚拟样机技术的发动机建模与扭震分析[J]. 计算机仿真, 2007, 24(3).

[42]<http://baike.baidu.com/view/109193.htm?fr=aladdin>

[43]刘仕平. 液力变矩器的数学模型、新型设计方法及内部流场研究[D]. 太原理工大学博士学位文, 2010.

装

订

线

附录一 发动机与液力变矩器共同工作特性实验

实验一 发动机与液力变矩器共同工作特性实验

一、 内容与要求

1. 内容

- 1) 测定发动机与液力变矩器共同工作输入特性。
- 2) 测定发动机与液力变矩器共同工作输出特性。

2. 要求

- 1) 熟悉实验内容和操作程序，正确记录测试数据。
- 2) 绘制发动机与液力变矩器共同工作的输入特性曲线和输出特性曲线。

二、 目的和意义

在作发动机外特性和液力变矩器原始特性实验的基础上作共同工作特性实验。根据实验结果和特性曲线，对二者进行匹配分析，并提出最佳匹配方案。

三、 仪器设备

1. 水力测功机一台。
2. 6135 型柴油发动机一台。
3. ZL40 型装载机用液力变矩器一套。
4. ZJ 型 100KG·M 转矩传感器一台。
5. ZJ 型 200KG·M 转矩传感器一台。
6. PY1A 型转矩转速仪二台。
7. 液压油源一套。
8. 压力、温度传感器等一套。

四、 实验准备工作

1. 将发动机与液力变矩器装于试验台上，连接好电路、油路。
2. 实验前应对所用仪器设备进行标定。
3. 工作油应预热至 80℃ 左右。
4. 空载运行，检查所用仪器、仪表工作情况。

五、 实验步骤

1. 启动液力变矩器供油系统，使其正常地循环。
2. 启动柴油发动机，使其预热至 70℃ 左右。
3. 根据液力变矩器的原始特性曲线，设定液力变矩器的工况（即转速比），一般常选用代表性的工况点：

起动工况 $i = 0$

最高效区转速比 i_1 、 i_2

最高效率工况 i^*

偶合工况 i_M

最大转速比工况 i_{\max} （空载工况）（从空载开始逐步加载还是，从启动工况开始逐步卸载）

4. 将发动机油门操纵杆分别定位在油门开度 100%、90%、80%、70%……的位置，测定每一种油门开度时的 i 、 i_1 、 i_2 、 i^* 、 i_M 和 i_{\max} 工况点的泵轮扭矩 M_B 和泵轮转速 n_B 。当油门操纵杆定置在 100% 开度位置时，除了测定 M_B 和 n_B 外，还必须测定上述工况点涡轮的输出扭矩 M_T 和转速 n_T 。

5. 实验结束，关闭发送机。

6. 停止供油系统运转。

六、 注意事项

1. 起动发动机时，所有参加实验人员应避开转动件的切线方向，以防机件脱出伤人。
2. 实验过程中，所有人员不得靠近转动部件，以防发生事故。
3. 实验中如发现有不正常的现象或听到异常响声时，应及时通知发动机操作者停机。
4. 参加实验人员应遵守实验规程，集中精力，及时准确地测取读数并记录。
5. 实验结束后，及时检查、核对测试数据，保证实验的精度。

七、 结果整理与分析

1. 绘制共同工作输入特性曲线

发动机与液力变矩器共同工作的输入特性是指不同的液力变矩器转速比时，液力变矩器与发动机共同工作的扭矩和转速的变化特性。

首先根据测试数据作出变矩器负荷抛物线，然后将发动机的净扭矩外特性与液力变矩器的抛物线，以相同的坐标比例绘制在一起，即得发动机与液力变矩器共同工作的输入特性曲线。

2. 绘制共同工作输出特性曲线

发动机与液力变矩器共同工作输出特性是指共同工作时，输出扭矩 M_T 、输出功率 N_T 、每小时燃油消耗量 G_T 、耗油率 g_{eT} 和发动机（泵轮）转速 n_e 等与涡轮轴转速 n_T 之间的函数关系。

首先计算出上述各工况点的功率 N_T 值、再根据上述各工况的 n_B 值，在发动机外特性曲线上确定对应的 G_T 和 g_{eT} 值，然后将上述测取和计算的数据填入附表 1—1 中，并以 n_T 为横坐标，其余参数为纵坐标进行绘图，即得发动机与液力变矩器共同工作

的输出特性曲线。

八、实验报告

1. 实验内容；
2. 目的要求；
3. 实验方案
4. 仪器设备；
5. 测试数据的采集与处理结果（附数据表如表 1—1）；
6. 对实验结果进行分析。

表 1—1 发动机与液力变矩器共同工作测试数据总表

工况点	变矩器测试数据				计算数据			试件型号
	泵轮转速 n_B	泵轮扭矩 M_B	涡轮转速 n_T	涡轮扭矩 M_T	变矩器输出功 率 N_T	柴油机 小时耗 油量 G_T	柴油机 耗油率 g_{eT}	
i								实现项目
i_1								
i_2								油门开度
i^*								
i_M								备注
i_{\max}								

装
订
线