

# 永磁同步电机驱动的液压动力系统设计与实验分析

贾永峰<sup>1,2</sup> 谷立臣<sup>1</sup>

1. 西安建筑科技大学, 西安, 710054      2. 陕西交通职业技术学院, 西安, 710018

**摘要:**针对传统异步电机驱动液压动力源在实际应用中存在的效率低、响应速度慢以及低速调节性能不稳定等缺陷,将永磁同步电机节能、调速性能好与齿轮油泵不能调速但可靠性好的技术特点相结合,提出了一种节能型液压动力源,并在节能和变频调速理论指导下设计开发了实验系统,实验结果表明所研究的动力源具有可行性,而且该动力源还表现出一些特有的系统性能和技术优势。实验结果还表明:所提出的液压动力源在负载功率匹配、响应速度、调速精度等方面均优于异步电机驱动的液压动力源,在低速轻载时节能效果尤为显著。

**关键词:**永磁同步电机;液压动力源;功率匹配;节能调速

中图分类号:TH137

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.03.008

## System Design and Experimental Analysis for Hydraulic Power Unit with Permanent Magnet Synchronous Motor Drive

Jia Yongfeng<sup>1,2</sup> Gu Lichen<sup>1</sup>

1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710054

2. Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an, 710018

**Abstract:** For the traditional hydraulic power system driven by the asynchronous motor (ASM) has some defects in practical applications such as low efficiency, slow response and instability at low-speed, this paper researched a new energy-saving hydraulic power system based on the permanent magnet synchronous motor (PMSM) which had good performance in energy-saving and speed regulation and the gear pump which had good performance in reliability. And an experimental system was designed under the guidance of energy-saving and frequency control theory. The experimental results prove the feasibility of such a power source, show some unique system performance and technical advantages, and show that the hydraulic power driven by the PMSM is better than the hydraulic power driven by the ASM in power matching of the load, response time and speed regulation precision, especially in the energy-saving of the low-speed and light load.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); hydraulic power unit; power matching; energy-saving speed regulation

## 0 引言

液压设备由于其具有传动平稳、调速方便、功率体积比大等优良特性而被广泛应用于工程机械中,但液压动力系统的整体能量利用率不高,系统效率较低,因此必须采用节能设计提高能源利用

率。以往的节能设计都将重点放在了液压回路的设计和高效液压元件的选择上,并且取得了较好的节能效果,如采用负载自适应控制,尽量减少溢流损失和节流损失,采用二次元件和蓄能器回收部分能量等。但是随着设计的改进和液压回路效率的提高,想要进一步提高其效率变得越来越困难,因此有必要将驱动液压系统的电机也包括在内来考虑,使电机提供的功率和负载所需功率相匹配。

收稿日期:2011-03-07

基金项目:陕西省工业攻关项目(2008K05-04);陕西省教育厅产业化项目(08JC10)

[3] 周仕炎,肖之中. 解决刚性转子左右校正面影响问题的一个新途径[J]. 试验技术与试验机,1982(4):4-9.

[4] 刘健,潘双夏,杨克己. 动平衡机系统误差分析及标定方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2004(4):1-3.

[5] Qin P, Cai P. A Novel Vibration System Based on Instantaneous Motion Center for High Accuracy Dynamic Balancing Measurement of Outboard Rotor [J]. Proc. ImechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science, 2009, 223(2): 387-395.

[6] Cox M G. The Numerical Evaluation of B-splines

[J]. Journal of Applied Mathematics, 1972,10(2): 134-149.

[7] Prautzsch H, Boehm W, Paluszny M. Bezier and B-Spline Techniques[M]. Berlin:Springer, 2002.

(编辑 苏卫国)

**作者简介:** 赵鼎鼎,男,1982年生。上海交通大学仪器科学与工程系博士研究生。研究方向为动态测试。发表论文7篇。  
蔡 萍,女,1963年生。上海交通大学仪器科学与工程系教授、博士研究生导师。

本文重点介绍稀土永磁同步电动机驱动液压动力源的节能特性和调速特性,对永磁同步电机调速液压系统和异步电机变频调速液压系统进行了对比分析。

## 1 几种常见的液压动力源

(1)普通异步电机驱动定量泵。无论系统是空载还是满载,该类电机转速基本恒定,油泵的输出流量也基本保持不变,系统流量靠溢流阀调节,多余的流量通过溢流阀流回油箱,功率利用率低,油液发热严重,系统稳定性差,油液寿命短,因此仅适用于小功率和速度变化不大的场合。

(2)普通异步电机驱动变量泵。变量泵转速不变,但输出流量可以随负载的变化动态或静态调节,无溢流损失和节流损失,功率利用率高,系统响应速度快。缺点是系统结构复杂,需要一套变排量的控制机构,故障率高,抗污染能力差,系统流量小时,电机和泵仍然高速运转,加速了机械磨损。此液压动力源适用于功率较大场合。

(3)变频异步电机驱动定量泵。将电机变频调速技术用于液压系统,油泵的输出流量可以通过电机的转速来调节,相比变量泵系统省去了复杂的变排量控制机构,简化了液压回路,提高了系统可靠性,减少了液压系统的能量损失,提高了系统效率。Helbig<sup>[1]</sup>对变频电机驱动定量泵和普通电机驱动变量泵的运行效率进行了比较,结果表明:在空载时,变频电机驱动定量泵系统电机输入功率很小,普通电机驱动变量泵电机的输入功率却为额定值的90%;在中等载荷时,变频电机驱动定量泵的效率比普通电机驱动变量泵的效率要高;在满载时,两者效率接近。异步电机最常用的是恒压频比控制,即保持电压和频率比恒定,从而使电机的磁通基本保持不变。在额定转速下,定子电压较高,可以忽略定子绕组的漏磁阻抗压降,但频率较低时,定子电压降低,此时定子绕组的漏磁阻抗压降已不能忽略,从而引起电机气隙磁通显著减小,因而在低频区电机转矩明显下降。如果采用定子压降补偿功能,会使电机低频时的效率大幅下降,从而使整个液压系统的效率大幅降低<sup>[2]</sup>,因此变频电机驱动定量泵的动力源不适合用于高压小流量液压系统。

(4)变频异步电机驱动变量泵。一般泵都有最低转速限制,否则转速过低会使泵的容积效率很低。由于变频异步电机采用了调速电机和变量泵,使泵的输出流量调节方式具有多样性,如设定电机的最低转速高于泵的最低转速,这样可以避开泵的

容积效率过低的问题,在电机设定的转速以下采用变排量控制,在电机设定的转速以上采用变转速控制或变转速与变排量复合控制,对于系统要求高动态响应的采用变排量控制。Yutaka等<sup>[3]</sup>和Azmeier等<sup>[4]</sup>对变频电机驱动变量泵系统的效率进行了试验,结果表明,变频电机驱动变量泵的效率高于变频电机驱动定量泵和普通电机驱动变量泵的效率。变频异步电机驱动变量泵的缺点是系统复杂,抗污染能力差,性价比不高,因此适用于对系统效率和响应速度要求较高的场合。

以上几种常见液压动力源都使用了应用最为广泛的异步电机作为原动机,而异步电机自身也有诸多缺点:首先,异步电机定子电流可分解为两部分,一部分是用以在转子中形成磁场的励磁电流,另一部分为用于输出转矩的负载电流,无论电机是否有实际转矩输出,励磁电流都存在,并且在低速或空载情况下励磁电流所占比例会更大,而励磁电流的存在会消耗一定的电机功率,即使使用变频驱动技术能够减小异步电机定子电流,起到一定的节能效果,也不能从根本上消除励磁电流的存在,因此使用异步电动机节能效果有限;其次,异步电机的功率因数较低,在额定载荷时约为0.7~0.9,而在轻载或空载时更低,只有0.2~0.3;再次,异步电机的转动惯量较大,影响系统的动态响应速度。

## 2 永磁同步电机驱动的液压动力源

### 2.1 永磁同步电机的节能原理

永磁同步电机和感应电机相比,由于采用了稀土永磁材料作为电机的转子磁极材料,从根本上不需要产生无功励磁电流,所以可以显著提高功率因数(功率因数可达到1),减少定子电流和定子电阻的损耗。在稳定运行期间没有转子电阻损耗,进而可以因总损耗降低而减小风扇的损耗,小功率的永磁同步电机甚至可以去掉风扇。永磁同步电机转子磁极基本恒定,所以电机无论是在低速运转还是在高速运转都可以输出较大的负载转矩,在25%~120%额定负载范围内均可保持较高的效率和功率因数,另外永磁同步电机还具有过载倍数大、响应速度快、运行平稳和体积小等优点<sup>[5]</sup>。

### 2.2 永磁同步电机驱动的液压源方案

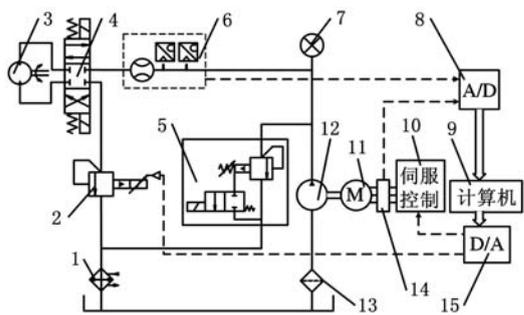
本方案采用正弦波永磁同步电动机驱动齿轮泵<sup>[6]</sup>,正弦波永磁同步电动机相对于矩形波永磁同步电动机有调速范围宽、转矩和转速平稳、动态响应快速准确、单位电流转矩大等优点。所选齿轮泵具有性价比高、抗污染能力强、噪声低和运行可靠等优点。永磁同步电机自带光电编码器,与

伺服控制器构成闭环控制系统,由伺服控制器控制电机转速进而控制齿轮泵的输出流量。

液压源的使用工况不同,对电机的控制方式也不尽相同。如负载变化较大而负载速度较为稳定的场合,适于用流量反馈信号控制电机转速,实现压力自适应控制;负载速度变化较大而负载大小较为稳定的场合,适于用压力反馈信号控制电机转速,实现流量自适应控制;而对于负载大小和速度均变化的场合,应使用压力信号、流量信号分别控制电机的转矩和转速,实现功率自适应控制。此外还应考虑其他因素对系统的影响,如油液温度、系统压力对泄漏量的影响。

### 3 永磁电机驱动的液压动力源实验原理

本实验采用 2.2kW 永磁同步电机和排量为 4.25mL/r 齿轮泵作为液压动力源,由上位计算机设定电机转速、给液压系统加载和采集相关数据,具体原理如图 1 所示。系统由上位计算机设定电机转速控制电压,并通过伺服控制器对永磁电机进行闭环转速控制,相当于控制了齿轮泵的转速,调节了齿轮泵的输出流量,改变了齿轮泵作为定量泵的特性,拓展了齿轮泵的应用范围。同时上位计算机还负责控制比例溢流阀给液压系统加载、采集分析相关数据等。为了验证永磁电机驱动液压源的各项性能指标,特地用相同功率的三相异步电机做同一实验,实验时将永磁电机和伺服控制器换成异步电机和通用变频器,此外由于异步电机是基于频率的开环控制,因此还需加装电机的转速测量装置。



1. 散热器 2. 比例溢流阀 3. 齿轮马达 4. 电磁换向阀  
5. 电磁溢流阀 6. 组合传感器 7. 压力表 8. A/D 转换器  
9. 上位计算机 10. 伺服控制器 11. 永磁电机 12. 齿轮泵  
13. 过滤器 14. 霍尔电压、电流传感器 15. D/A 转换器

图 1 实验装置原理图

为了对两种不同电机拖动下的液压动力系统进行比较分析,需要给定相同的负载工况,即系统压力相同、油泵转速相同。

永磁电机实验步骤如下:①通过电磁换向阀 4 关闭齿轮马达 3,调节电磁溢流阀 5(这里当安

全阀使用),设定系统最大压力为 10MPa,打开齿轮马达 3;②上位计算机 9 通过 D/A 转换器 15、伺服控制器 10 控制电机转速;③同理上位计算机 9 通过 D/A 转换器 15 调节比例溢流阀 2,即通过调节齿轮马达的回路压力来模拟负载压力;④重复步骤②和步骤③,由计算机 9 采集不同转速和不同负载压力时的数据。

异步电机实验步骤与永磁电机基本相同。由于异步电机存在转差率,其转速随着负载的增大略有下降。为了保证工况相同,异步电机加载时要同时缓慢增大电机转速,也就是进行转差频率补偿,直至与永磁电机实验时的转速相同、压力相同时再采集相关数据。

由霍尔电压、电流传感器 14 采集的数据可计算出电机的输入功率  $P_1$  和功率因数  $\cos\varphi$ 。由组合传感器 6 测得的压力、流量信号可计算出泵的输出功率  $P_3$ 。泵的输入功率(电机的输出功率)  $P_2 = nD_p p_p$ ,其中,  $n$  为泵的转速,  $D_p$  为泵的排量,  $p_p$  为泵的出口压力。电机的效率  $\eta_1 = P_1/P_2$ ; 泵的效率  $\eta_2 = P_2/P_3$ ; 液压动力源的总效率  $\eta_3 = P_1/P_3 = \eta_1 \eta_2$ 。

### 4 不同电机驱动的液压源对比分析

#### 4.1 效率

##### 4.1.1 电机的效率及空载时的输入功率

图 2 所示为同步电机和异步电机分别在齿轮泵出口压力为 1MPa 和 6MPa 时效率随转速变化的曲线。需要说明的是:本文计算异步电机的功率和效率时均未考虑异步电机散热风扇的功率和效率,而永磁同步电机依靠电机壳体散热,无散热

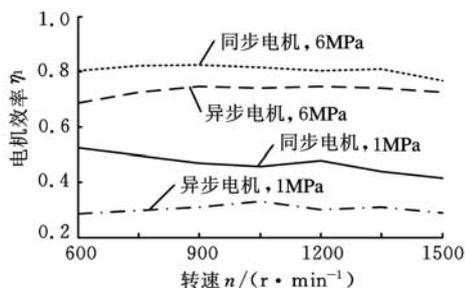


图 2 同步电机和异步电机的效率曲线

风扇。从图 2 中可以看出,永磁同步电机在不同转速和不同负载时的效率都高于异步电机的效率。从负载大小来看,系统压力为 1MPa 时,两者效率差距较大,当系统压力增大到 6MPa 时,两者差距减小,这说明同步电机比异步电机在轻载时更加节能;从电机转速来看,低速时两者效率相差较大,高速时则越来越接近,这说明同步电机在低速时比异步电机更加节能。异步电机效率低的主

要原因是在低速轻载时输入的功率较小,而此时转子消耗功率所占比重增大,从而导致效率较低,而随着转速和负载的增大,电机输入功率增大,转子消耗功率所占比重减小,效率与同步电机的效率逐步接近。

在空载(系统压力为 0)时,电机效率几乎为零,此时异步电机的输入功率为同步电机输入功率的 1.5 倍以上,如图 3 所示,这说明同步电机空载时更为节能。

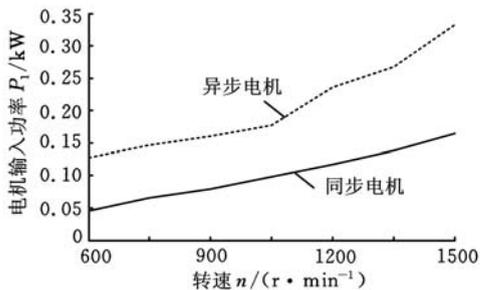


图 3 空载时电机输入功率

#### 4.1.2 液压泵的效率

从图 4 可以看出,不同电机驱动的齿轮泵的效率在相同的工况下几乎一致;随着压力的升高,泵的泄漏量增加,泵的效率降低,而低速时泵的泄漏量所占其理论输出流量的比重较大,因此效率下降更为明显;随着转速的增大,泵的效率增大,在低速时增大较快,高速时较为平缓,如果进一步增加泵的转速,其效率反而会降低,这主要是由于常压下供油不足。

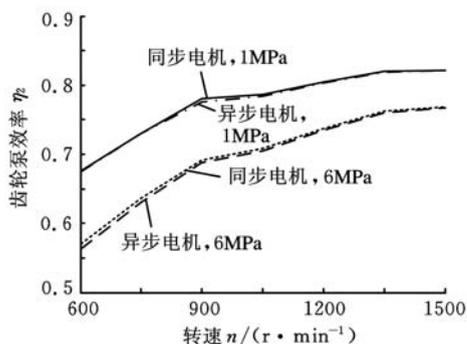


图 4 不同电机驱动时泵的效率

#### 4.1.3 液动力源的总效率

液动力源的总效率为电机效率和泵效率的乘积,虽然不同电机驱动时泵效率基本相同,但由于永磁同步电机的效率明显高于异步电机,因此永磁同步电机驱动的液动力源的总效率也明显高于异步电机的总效率(图 5),其变化规律由电机和泵共同决定。

#### 4.2 功率因数

永磁同步电机的功率因数在不同转速和不同压力工况下始终接近于 1,而异步电机的功率因

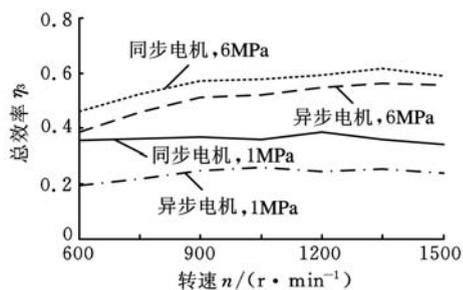


图 5 液压系统的效率

数受负载影响较大,如图 6 所示,在空载时还不到 0.2,在 6MPa(中等载荷)时为 0.5 左右。功率因数低会增加变频器的装机容量,增大无功功率,而无功功率在传输过程中会消耗大量的有功功率,因此异步电机不适合较长时间空载或轻载运行。

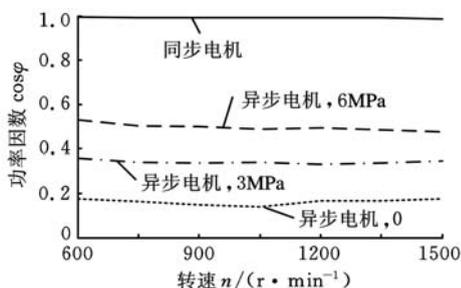


图 6 电机的功率因数

#### 4.3 液压源的流量刚度

图 7 所示为两种电机驱动的液压源流量—压力特性曲线(未进行转差频率补偿)。当系统压力升高时,泵的泄漏量增加,油液的压缩量也增加,因此泵的实际输出流量  $Q$  会减小,而流量减小会影响液压缸和液压马达的速度刚度。异步电机设定的是定子磁场的同步转速,由于转差率的存在,异步电机驱动的液压源除了泄漏和压缩量损失外还存在转差流量损失,随着负载增加,转差率增大,转差流量损失增大,实际输出流量减小,流量刚度降低;而同步电机的转速与设定转速一致,没有转差流量损失,因此同步电机驱动的液压源流量刚度要大于异步电机的流量刚度。

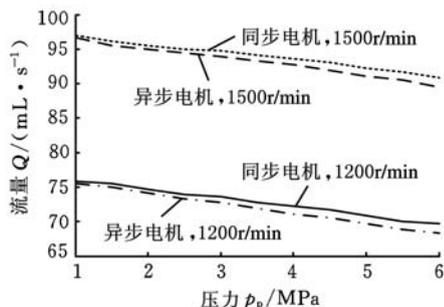


图 7 流量—压力特性曲线

#### 4.4 负载功率匹配特性

如图 8 所示,随着负载功率的增加,电机的输

入功率也增加,两种电机驱动的液压源都能够与负载所需功率相匹配。输入功率与负载功率曲线之间为液压源自身损耗的功率,主要包括电机、泵和联轴器的功率损失,这种损失越小,负载匹配特性越好、越节能。由图 8 可以看出,永磁同步电机的负载匹配特性优于异步电机的负载匹配特性,轻载时的节能性更好。

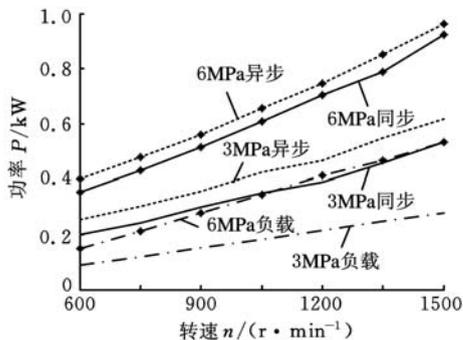


图 8 负载匹配特性曲线

#### 4.5 响应快速性

与传统变量泵控制流量方式不同,变频液压调速通过改变泵的转速控制流量,因此液压源的动特性完全取决于电机的响应速度。一般电机的转动惯量远大于齿轮泵的转动惯量,异步电机的转动惯量又远大于永磁同步电机的转动惯量(表 1)。异步电机功率因数低,与其匹配的变频器容量较大,这就限制了变频器的过载能力,也进一步影响电机的响应速度。永磁同步电机转动惯量小,与其匹配的伺服控制器过载能力强,并且采用了矢量控制技术,所以具有良好的动态特性,能够满足电机短时需要大功率的要求。

表 1 电机、泵、联轴器的转动惯量

设备名称	转动惯量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )
异步电机	$2.0 \times 10^{-2}$
永磁同步电机	$1.7 \times 10^{-3}$
齿轮泵	$4.2 \times 10^{-5}$
弹性联轴器	$3.7 \times 10^{-3}$

图 9 所示为液压源在空载时电机由静止加速到 1500r/min 时的阶跃响应曲线,同步电机液压源阶跃响应时间为 90ms,明显优于异步电机的 370ms,若能永永磁电机与泵加工成一个整体,省略掉联轴器,则电机的响应会更快。同步电机液

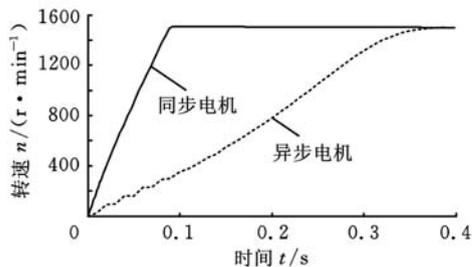


图 9 液压源阶跃响应曲线

压源响应的快速性不但能够改善整个液压系统的动态性能,还能够空载时降速运行或停机以节约能源、减少机械磨损,并且在下次有载运行时能很快恢复到系统所需的转速,提供足够动力。

#### 5 结语

本文将永磁同步电机体积小、节能、调速性好的拖拽性能与齿轮油泵简单、可靠、易维护的使用性能相结合,设计了一种节能型液压动力源,旨在研究齿轮泵的调速性能并拓展其应用范围。实验结果表明:永磁同步电机驱动的液压动力源与异步电机变频调速驱动的液压动力源相比,无论是负载大小、转速高低都具有更好的负载匹配特性,并且转速越低、负载越小,节能效果越显著,转速越高、负载越大两者节能效果越接近。此外永磁电机驱动的液压动力源还具有响应速度快、调速精度高、低速稳定性好、功率因数高等优点。

#### 参考文献:

- [1] Helbig A. Injection Moulding Machine with Electric - hydrostatic Drives [C]//3rd International Fluid Power Conference. Aachen: Shaker Verlag, 2002: 67-82.
- [2] 彭天好,杨华勇,徐兵. 变频泵控马达调速系统节能实验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 109-114.
- [3] Yutaka T, Tetsuji M, Kazuo N. Speed and Displacement Control of Pump System for Energy Saving [C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Fluid Power Transmission and Control. Shanghai: Shanghai Science & Technology Literature Publishing House, 1995: 12-16.
- [4] Azmeier B K, Feldman D G, Arbeitsbereich Konstruktionstechnik I. Electro-hydrostatic Low Power Linear Driver - system Performance and Controls to Minimize Power Consumption [C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Fluid Power Transmission and Control. Beijing: the International Academic, 1997: 113-119.
- [5] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [6] 谷立臣, 贾永峰. 永磁伺服电机驱动的节能型液压动力源: 中国, 201010259684. 9 [P]. 2010-10-25.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 贾永峰, 男, 1972 年生。西安建筑科技大学机电工程学院博士研究生, 陕西交通职业技术学院汽车工程系副教授。主要研究方向为机电液一体化设计。获中国专利 1 项。发表论文 10 余篇。谷立臣, 男, 1956 年生。西安建筑科技大学机电工程学院教授、博士研究生导师。