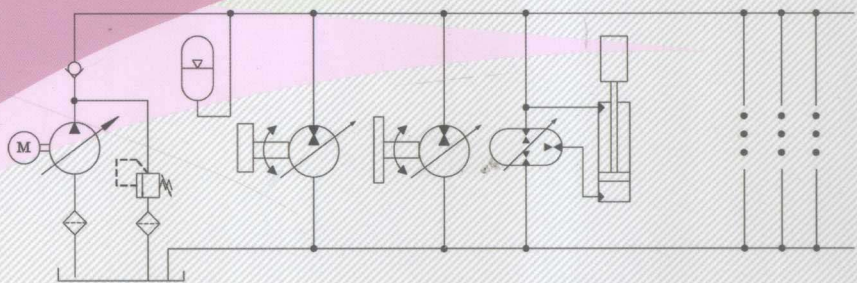


21世纪液压气动系统经典图书系列

二次调节压力 耦联静液传动技术

姜继海 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书以节能为目的,介绍了二次调节压力耦联静液传动技术的总体结构、控制特性和应用范围。主要内容有:二次调节压力耦联静液传动系统的组成和工作原理;二次调节压力耦联静液传动系统的数学模型;二次调节压力耦联静液传动系统分析;二次调节压力耦联静液传动系统控制方法及仿真研究;二次调节压力耦联静液传动系统控制特性研究;二次调节压力耦联静液传动系统试验研究;二次调节压力耦联静液传动技术的应用等。

本书可供从事液压系统设计、研究和使用的工程技术人员参考,也可作为高等学校机械与液压专业学生的选修教材。

图书在版编目(CIP)数据

二次调节压力耦联静液传动技术/姜继海编著. —北京:机械工业出版社, 2012. 10

(21世纪液压气动系统经典图书系列)

ISBN 978-7-111-39795-3

I. ①二… II. ①姜… III. ①静液压传动 IV. ①TH137

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第222418号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张秀恩 责任编辑:张秀恩 李建秀

版式设计:霍永明 责任校对:刘志文

封面设计:陈沛 责任印制:李妍

北京振兴源印务有限公司印刷

2013年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·9.5印张·125千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-39795-3

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010) 88379770

社服务中心:(010) 88361066

网络服务

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010) 88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前言

随着近年来能源短缺问题的不断出现，静液传动控制系统除了要完成人们所需要的功能外，还要考虑到对能量的有效利用，因此，静液传动控制系统的节能问题成为当前流体传动及控制技术研究的主要选题之一。在静液传动系统中采用各种有利于节能的新技术是大功率静液传动控制系统发展的总趋势。

对静液传动技术而言，节能措施主要是对静液传动元件进行结构上的优化设计和对静液传动系统进行总体上的优化设计。在静液传动系统中，二次调节静液传动系统是对二次元件进行调节来实现能量转换和传递的系统，该技术不但能够实现功率匹配，还能对工作过程中的制动能和势能进行回收和重复利用。本书主要研究的二次调节压力耦联静液传动系统是静液传动技术的一个重要分支。该类系统可以从宏观的角度对静液传动总体结构进行合理的配置，并改善其控制特性。

本书主要内容取材于作者的相关研究、博士学位论文及在国内外发表的论文，是作者多年研究工作成果的总结，全书共分八章，主要内容包括：二次调节压力耦联静液传动系统的组成和工作原理；二次调节压力耦联静液传动系统的数学模型；二次调节压力耦联静液传动系统分析；二次调节压力耦联静液传动系统控制方法及仿真研究；二次调节压力耦联静液传动系统控制特性研究；二次调节压力耦联静液传动系统试验研究；二次调节压力耦联静液传动技术的应用。

在本书的写作过程中，得到了哈尔滨工业大学机电工程学院流体

控制及自动化系静液传动技术课题组的教师和学生的帮助，特别是博士研究生沈伟和硕士研究生张翼鹏在组稿过程中付出了许多辛勤的劳动，同时也得到了许多同行和朋友的关心与帮助，在此深表感谢。同时感谢本书所引用参考文献的作者，由于本书写作时间比较长，有些引用文献可能遗忘或疏漏，恳请有关作者谅解。

由于作者的水平有限，一些新的领域涉足的时间还不长，本书难免有错误和疏漏之处，望各位读者批评、指正，将不胜感激。

本书中所涉及内容的研究是在国家自然科学基金、车辆传动国防科技重点实验室基金以及浙江大学流体传动及控制国家重点实验室开放基金的资助下完成的，在此一并表示感谢，还要感谢机械工业出版社在出版过程中给予的支持。

姜继海

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 静液传动	1
1.2 二次调节压力耦联静液传动及特点	3
1.2.1 二次调节压力耦联静液传动	3
1.2.2 二次调节压力耦联静液传动特点	6
1.2.3 二次调节压力耦联静液传动系统	7
1.3 国内外二次调节压力耦联静液传动研究	9
1.3.1 国外二次调节压力耦联静液传动研究	9
1.3.2 国内二次调节压力耦联静液传动研究	12
1.4 二次调节压力耦联静液传动系统的关键技术	16
1.4.1 二次元件的研究和发展	16
1.4.2 储能元件的选择及发展	20
1.4.3 压力耦联系统油源压力的恒定控制	21
第 2 章 二次调节压力耦联静液传动系统的组成和工作原理	24
2.1 二次调节压力耦联静液传动系统的组成	24
2.2 二次调节压力耦联静液传动系统的工作原理	25
2.3 二次调节压力耦联静液传动系统中的液压马达/泵	28
2.4 传统的静液传动系统	30
2.5 两种静液传动系统的区别	31
第 3 章 二次调节压力耦联静液传动系统的数学模型	33
3.1 恒压油源系统数学模型	33

3.1.1	恒压变量泵数学模型	33
3.1.2	液压蓄能器数学模型	38
3.2	电液伺服阀控液压马达/泵数学模型	39
3.2.1	电液伺服阀动态数学模型	39
3.2.2	液压马达/泵动态数学模型	40
3.2.3	液压马达/泵动态数学模型拉普拉斯变换	41
第4章	二次调节压力耦联静液传动系统分析	43
4.1	恒压油源系统分析	43
4.1.1	恒压变量泵的恒压特性	43
4.1.2	恒压变量泵恒压变量系统框图	44
4.1.3	恒压变量系统的稳定性	46
4.1.4	液压蓄能器的动态特性	47
4.2	二次调节压力耦联静液传动系统框图	48
4.2.1	二次调节压力耦联静液传动位置系统框图	49
4.2.2	二次调节压力耦联静液传动转速系统框图	50
4.3	二次调节压力耦联静液传动系统稳定性分析	51
4.3.1	二次调节压力耦联静液传动位置单反馈系统分析	52
4.3.2	二次调节压力耦联静液传动转速单反馈系统分析	53
4.3.3	二次调节压力耦联静液传动位置双反馈系统分析	53
4.3.4	二次调节压力耦联静液传动转速双反馈系统分析	55
4.4	二次调节压力耦联静液传动系统闭环频率特性分析	57
4.5	二次调节压力耦联静液传动系统控制特性分析	58
4.5.1	二次调节压力耦联静液传动转速单反馈系统特性分析	58
4.5.2	二次调节压力耦联静液传动转速双反馈系统特性分析	60
4.6	二次调节压力耦联静液传动系统速度刚度	61
第5章	二次调节压力耦联静液传动系统控制方法及仿真研究 ...	63
5.1	二次调节压力耦联静液传动控制策略	63
5.2	数字 PID 控制	64
5.2.1	PID 控制的描述	64
5.2.2	PID 控制的内容	65

5.3 模糊控制	67
5.3.1 模糊控制的描述	67
5.3.2 模糊控制的基本原理	69
5.3.3 模糊控制器的设计	72
5.4 其他常用的控制策略	75
5.4.1 自适应控制	75
5.4.2 神经网络控制	76
5.5 二次调节压力耦联静液传动系统计算机仿真	77
第6章 二次调节压力耦联静液传动系统控制特性研究	82
6.1 二次调节压力耦联静液传动系统转速控制	82
6.1.1 二次调节压力耦联静液传动转速控制系统的传递函数	83
6.1.2 二次调节压力耦联静液传动转速控制系统分析	84
6.1.3 二次调节压力耦联静液传动转速控制系统的仿真和实验研究	87
6.2 二次调节压力耦联静液传动系统位置控制	88
6.2.1 二次调节压力耦联静液传动位置控制系统的传递函数	89
6.2.2 二次调节压力耦联静液传动位置闭环控制系统分析	90
6.2.3 二次调节压力耦联静液传动位置闭环控制系统试验研究	92
6.3 二次调节压力耦联静液传动系统转矩控制	93
6.4 二次调节压力耦联静液传动系统功率控制	94
第7章 二次调节压力耦联静液传动系统试验研究	97
7.1 二次调节压力耦联静液传动试验系统的组成	97
7.1.1 恒压油源	98
7.1.2 液压马达/泵和电液伺服阀	98
7.1.3 转速和位置传感器	99
7.1.4 位置传感器的安装	100
7.1.5 加载元件	100
7.2 计算机控制系统	101
7.2.1 计算机控制系统硬件	101
7.2.2 输出检测装置设计	101
7.2.3 电液伺服阀驱动电路设计	103

7.2.4	位置传感器电路设计	104
7.2.5	计算机控制系统软件	104
7.3	二次调节压力耦联静液传动系统试验研究的目的和内容	108
7.3.1	试验的目的	108
7.3.2	试验的内容	108
7.4	二次调节压力耦联静液传动位置系统试验研究	108
7.5	二次调节压力耦联静液传动转速系统试验研究	111
7.5.1	二次调节压力耦联静液传动转速系统基本试验研究	111
7.5.2	二次调节压力耦联静液传动转速系统过零点试验研究	113
7.5.3	二次调节压力耦联静液传动转速系统最低转速试验研究	115
7.6	二次调节压力耦联静液传动负载干扰试验研究	115
7.7	二次调节压力耦联静液传动多负载试验研究	117
第8章	二次调节压力耦联静液传动技术的应用	119
8.1	二次调节静液传动技术在液压提升设备中的应用	119
8.2	二次调节静液传动在汽车驱动技术中的应用	122
8.3	二次调节静液传动在试验技术中的应用	126
8.4	二次调节压力耦联静液传动技术在工程机械上的应用	129
8.4.1	二次调节压力耦联静液传动技术在挖掘机上的应用	129
8.4.2	二次调节压力耦联静液传动技术在叉车上的应用	131
8.4.3	二次调节压力耦联静液传动技术在飞机牵引车上的应用	131
参考文献		136

第 1 章

概 论

1.1 静液传动

静液传动是液压技术的一部分，主要是利用液体的压力能来传递能量，也称为液压传动。静液传动是诸多传动技术中的一种，现在已经发展成为包括传动、控制和检测在内的一门完整的自动化技术。它具有功率密度大、控制特性好等突出优点，在国民经济中的许多方面都得到了广泛的应用，在某些领域中甚至占有压倒性的优势，例如，国外现在生产的工程机械的 95%、数控加工中心的 90%、自动线的 95% 以上都采用了静液传动，采用静液传动的程度已经成为衡量一个国家工业水平的重要标志之一。

由于静液传动具有许多特点而被广泛地应用于各行各业之中。它在各行业中的应用比例如图 1-1 所示。图 1-2 给出了柴油发动机、电动机和液压泵在同等功率时的体积比。近些年由于科学技术的不断发展，通过提高液压元件的工作压力和液压泵的工作转速，使得静液传动的重量功率比由

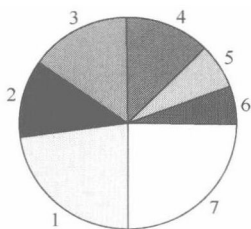


图 1-1 静液传动技术在各行各业中的应用比例

- 1—通用机械、通用设备、橡胶和塑料机械、冶金和轧钢机械、建筑材料机械、矿山机械 2—机床 3—工程机械 4—道路运输工具、公共汽车、有轨车辆 5—提升技术、采掘技术（包括堆料机） 6—农业机械、农业拖拉机 7—其他

1950 年的 3kg/kW 下降到 1990 年的 0.5kg/kW 。目前进一步的研究使液压泵的重量功率比已经又降到了 0.25kg/kW 。它的工作压力和转速已分别提高到了原来的四倍和两倍。目前国外大多数液压元件的额定压力已达到 35MPa ，甚至到 42MPa ，还有继续增大的趋势。正是因为这种高功率密度的特点才使得静液传动在各类机械和设备中都得到了广泛的应用，特别在行走机械中，由于其工作环境和工作特点等因素，使得多数都采用静液传动技术，甚至是全液压驱动和传动技术。此外，静液传动还易于实现工作过程的自动化。因此，近几十年里它在机械工程领域中的应用得以较快的速度增长，也正是由于用静液传动作为肌体，用电子元器件和计算机作为神经和大脑来组成的液压控制系统能达到其他元件所不能达到或难以达到的目的，而使机电液一体化技术得到了飞速的发展。

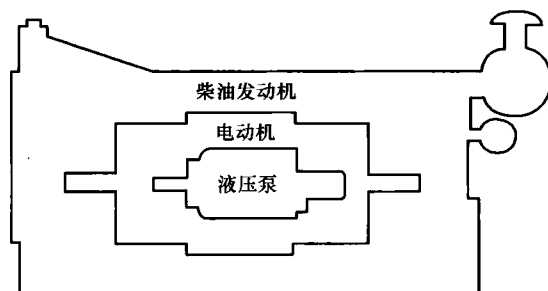


图 1-2 柴油发动机、电动机和液压泵在
同等功率时的体积比

但是，目前静液传动也正面临着对它有更高要求的挑战，特别是进入 21 世纪以来，来自于电气传动、电控伺服元件（伺服电动机和电动缸）、机械传动和交流伺服技术的高度发展所带来的竞争，使得静液传动的增长速度减慢并使得有关专家对此给予高度重视。为了克服静液传动的缺点，发挥其长处，从而进一步地使静液传动长足地发展，从事静液传动技术研究的专家和学者一直都在努力改进液压元件和液压系统的设计，以提高液压元件和液压系统的性能和效率。同

时,随着人类可利用的能源越来越少,环境污染越来越严重,基于对节约能源和环境保护的要求,能量回收和能量重新利用等问题也正在被进一步地提到议事日程上来。

1.2 二次调节压力耦联静液传动及特点

静液传动系统是一次能量和工作机构之间的传输环节,在静液传动系统中,能量传递和转换关系如图 1-3 所示。

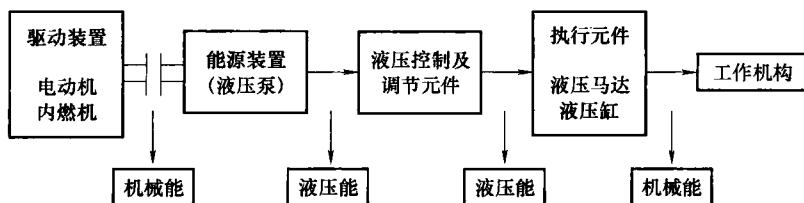


图 1-3 静液传动系统中的能量传递和转换关系

静液传动系统的节能措施主要有两个:它们分别是对静液传动元件进行结构上的优化设计和对静液传动系统进行总体上的优化设计。由图 1-3 可知,为使静液传动系统的总效率得到提高,就必须减少中间环节传输的次数和减小中间传输环节的功率损失。事实上,提高静液传动系统效率最有效的手段是采用新的系统设计。目前,在静液传动中采用功率适应(Power Adapting)控制和功率匹配(Power Matching)控制是大功率静液传动系统发展的总趋势。其中,除了众所周知的功率匹配控制系统(Power Matching Control System)之外,新发展起来的二次调节或被称为次级调节(Secondary Regulation)的静液传动对改善液压系统的效率非常有效。

1.2.1 二次调节压力耦联静液传动

若把液压系统中机械能转化成液压能的元件(液压泵)称为一次元件或初级元件,则把液压能和机械能可以互相转换的元件(液

压马达/泵)称为二次元件或次级元件。二次调节静液系统是对二次元件进行调节来实现能量转换和传递的系统。

二次调节静液传动的最初发展和实现是以压力耦联系统为基础的,通常压力耦联系统也被称为恒压网络或准恒压网络。该系统是在1977年由德国汉堡国防科技大学(Hochschule der Bundeswehr, Hamburg)的H. W. Nikolaus教授在专利中提出来的,由于其固有的特点在人们逐渐认识之后得到了迅速的发展。随后又出现了以流量耦联系统为基础的二次调节静液传动,由于其各有不同特点,从而使它们在不同的领域正在迅速发展。本书着重介绍基于恒压网络的二次调节静液传动——二次调节压力耦联静液传动。

二次调节压力耦联静液传动可理解为在恒压网络中对液压能转换成机械能的液压执行元件所进行的调节。通常工作机构对液压执行元件有输出力(转矩)和速度(转速)的要求,而对静液传动系统来说是输出压力和流量的要求。在静液传动系统中可以将液压能转换成机械能的液压元件是液压缸和液压马达,但由于液压缸的有效作用面积一般来讲是不可调节的(即液压缸的有效作用面积是不可变化的),在这里所介绍的是二次调节压力耦联静液传动,因此系统的压力是一定的,那么对系统的调节仅是对液压执行元件速度(转速)的调节。通常在不考虑泄漏的情况下,液压缸的运动速度 v 由进入(或流出)液压缸的流量 q 及其有效作用面积 A 决定,即

$$v = \frac{q}{A} \quad (1-1)$$

同样,液压马达的转速 n 由进入液压马达的流量 q 和液压马达的单转排量 V 决定,即

$$n = \frac{q}{V} \quad (1-2)$$

由上述两式可知,改变流入(或流出)液压执行元件的流量 q ,改变液压缸的有效作用面积 A 或液压马达的排量 V ,均可调节液压执

行元件的运动速度。一般来说,改变液压缸有效作用面积是困难的,所以常常通过改变流量 q 或排量 V 来调节液压执行元件速度,并且以此为基点可构成不同方式的调速方式。改变流量 q 有两种方法,其一是用流量控制阀调节,其二是用变量泵或变量马达调节。按改变流量或排量的方法不同,可将这类对液压执行元件速度(转速)的调节方式分为三类:即节流调速、容积调速和容积节流调速。

因此这里所说的液压执行元件主要是指液压马达。为了使二次调节压力耦联静液传动能够实现能量回收的功能,这种液压元件应该是可逆的静液传动液压元件,它既可以作为液压马达,也可以作为液压泵使用。所以,这类静液压传动元件可称为液压马达/泵。如果需要将液压缸也使用在二次调节压力耦联静液传动系统中,并能够实现能量回收的功能,则必须借助于其他手段和方法,如采用控制阀或液压变压器和液压缸结合使用。

二次调节压力耦联静液传动系统在恒压网络中传递能量时,液压马达/泵不经任何能引起节流损失的液压元件直接与恒压网络连接,因此它能无损耗地从恒压网络中取得能量,同时,在恒压网络上可以连接多个互不相关的负载,在驱动负载的液压马达/泵上直接控制其转角(位置)、转速、转矩和功率,或通过液压变压器来控制其位移、速度、输出力和功率。

H. W. Nikolaus 教授提出,二次调节静液传动的初步设想是减少静液传动系统的能量损耗以及降低车辆静液传动系统的发热,减小静液传动设备的体积,以利于提高车辆的机动性。但自从它被发展起来后,人们发现它有许多可利用的优点。它可以解决静液传动系统中的能量回收和重新利用问题,提高系统的效率,扩大系统的工作区域,改善系统的控制特性,减少设备的总投资,尤其是减少冷却费用,同时,由于二次调节压力耦联静液传动系统工作在恒压网络中,多用户可以并行工作而互不影响(见图1-4)。这种能量传递方式类似于电力供给系统,由动力中心供给液压能,执行元件和工作设备按自身需

要从恒压网络中获取能量，这样可以充分地利用液压马达/泵的输出功率，这也正是它区别于其他静液传动系统之处。

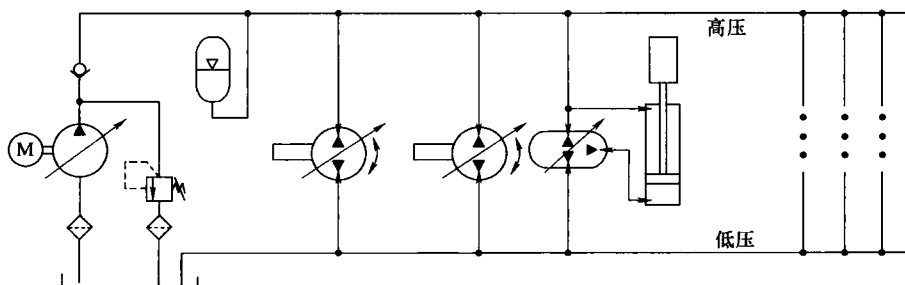


图 1-4 多用户并行二次调节压力耦联静液传动系统

虽然二次调节压力耦联静液传动有许多优点，但还不能完全取代传统的静液传动，而只能进一步地扩大静液传动的应用范围。但是，对于应用在位置（转角）、转速、转矩和功率闭环控制有较高动态性能要求以及负载做周期性工作的场合，二次调节压力耦联静液传动有着独特的优点。尤其是随着液压变压器的出现，使得在压力耦联系统中无节流损失地控制液压缸成为现实，扩大了二次调节压力耦联系统的应用范围。但是，由于现今液压变压器技术还不成熟，因此在概述了液压变压器的发展历程以及现状后，主要以采用液压马达/泵作为执行元件的压力耦联系统进行分析。

1.2.2 二次调节压力耦联静液传动特点

二次调节压力耦联静液传动之所以能飞速发展并逐渐为人们所认识，其主要原因是由于它具有以下一些优点。

1. 与传统静液压传动系统的比较

1) 具有较高的控制性能。

2) 能在四个象限中工作，可以回收能量。

3) 可不改变能量形式，或改变能量形式来进行能量的存储和重新利用。

4) 恒压油源部分和液压马达/泵可以分开相当大的距离安装, 可以用一个泵站给数个液压执行元件提供动力。

5) 可用液压蓄能器给液压执行元件提供压力油, 其功率可以是装机功率的几倍, 且系统中无压力峰值。

6) 可减少冷却费用。

7) 由于系统设计功率的减小, 可以大大地降低设备的制造成本。

8) 大大地提高了系统效率。

2. 与电传动系统的比较

1) 闭环控制动态响应快。

2) 高功率密度、重量轻、安装空间小。

3) 安装功率小。

当然, 它还有一些缺点, 如:

1) 系统的开环可能是不稳定的临界状态, 必须注意闭环控制系统的稳定性。

2) 在系统发生故障时, 需要专门的应急装置。

3) 由于使用液压马达/泵(需要时还要求其双向转动)和液压蓄能器, 使系统的装机成本有所增加。

1.2.3 二次调节压力耦联静液传动系统

在二次调节压力耦联静液传动系统中, 当负载发生变化时, 系统的压力基本保持不变, 流量随负载需要发生变化。液压马达/泵连接在恒压油源上, 通过液压马达/泵排量的调节, 实现对系统的控制。压力耦联系统可以并联多个互不相关的负载, 用互不相关的控制规律来实现控制, 驱动旋转负载时可以通过变量液压马达和伺服控制调节机构来实现, 驱动直线负载可以通过液压变压器连接液压缸来实现。多个液压执行元件的输入端和输出端可分别并联到恒压油源上。为了提高这种恒压系统的传动效率, 在负载端的液压执行元件

最好是可变量的，这种系统可适用于多负载，其传动效率高、控制性能好。

图 1-5 所示为二次调节压力耦合静液传动系统工作原理图。

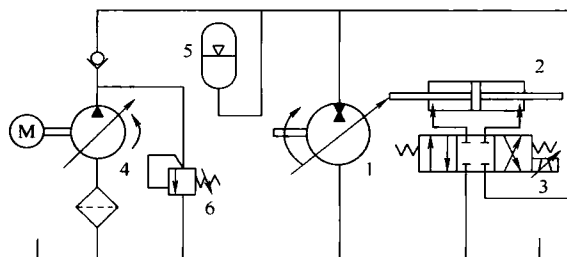


图 1-5 二次调节压力耦合静液传动系统工作原理图

- 1—液压马达/泵 2—变量液压缸 3—电液伺服（比例）阀
4—恒压变量泵 5—液压蓄能器 6—安全阀

该系统一般由恒压油源、液压马达/泵、工作机构和控制调节机构等组成。其工作原理是：在恒压网络中，通过调节液压马达/泵的斜盘倾角来改变液压马达/泵的排量，以适应负载（工作机构）转速的变化，从而使负载按设定的规律变化。在图 1-5 中，液压马达/泵 1 的排量由变量液压缸 2 控制，变量液压缸 2 的流量通过电液伺服（比例）阀 3 调节。液压马达/泵 1 转速的变化，通过与其同轴相连的转速测量元件测出并送给控制器，控制器再根据一定的控制方法产生控制信号送给电液伺服（比例）阀 3，再控制变量液压缸向左或向右移动以改变液压马达/泵 1 斜盘倾角的大小和方向，进而改变液压马达/泵 1 的排量和旋转方向，使系统稳定地工作在某一工作状态。这个平衡状态可产生于任何的设定转速，通过改变电液伺服（比例）阀的控制信号，可以使液压马达/泵 1 的转速无级变化。二次调节压力耦合静液传动系统中的液压马达/泵对负载变化的反应，最终通过改变液压马达/泵的排量来实现。这种调节在输出区的液压马达/泵上进行，调节功能通过液压马达/泵自身闭环反馈控制来实现，不改变系统的工作压力。通过改变液压马达/泵斜盘摆动方向（过零点），

液压马达/泵能在四个象限内工作,既有“液压马达”工况,也有“液压泵”工况,从而提供了能量回收的可能性。当液压马达/泵工作于液压泵工况时,向系统回馈能量,回收的能量由液压蓄能器储存或供给其他液压执行元件使用,通过适当的控制策略对储存在液压蓄能器中的能量进行释放,可提高整个液压系统的效率。

1.3 国内外二次调节压力耦联静液传动研究

自从 H. W. Nikolaus 教授在 1977 年提出二次调节压力耦联静液传动后,使其得到了迅速的发展,在德国已进入实用化阶段。目前其他国家也开始进行研究,我国对此也进行了一些探讨和研究,但距离在生产实际中应用还有一定的差距。

1.3.1 国外二次调节压力耦联静液传动研究

1980 年, W. Backé 教授和 H. Murrenhoff 教授开始从事液压直接转速控制的二次调节静液传动系统研究,其中液压马达/泵的变量液压缸是单出杆活塞缸。

1981 年, H. W. Nikolaus 教授研究液压马达/泵采用双出杆活塞变量液压缸来对液压马达/泵转速进行控制的二次调节静液传动系统。在液压直接转速控制二次调节静液传动系统中,用测速泵来作为液压马达/泵输出转速的检测和反馈元件。但是,由于测速泵的最小感知转速较高,当所要求的转速低于最小感知转速时,不能真实地检测转速值,因此,这种系统的调速范围比较小,最低工作转速也比较高。

1981 年研究液压先导控制二次调节静液传动系统,其中有机液位移反馈调速系统和机液力反馈调速系统两种调节形式。

1983 年研究电液转速二次调节静液传动系统和电液转角二次调节静液传动系统,在电液控制系统中,用测速电动机作为液压马达/泵输出转速的检测和反馈元件。由于测速电动机的最小感知转速比测