

液压伺服理论与实践

李连升 刘绍球 著

国防工业出版社

液压伺服理论与实践

李连升 刘绍球 著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书除了简要地介绍各种液压伺服系统的分析和设计方法以外,着重论述液压伺服系统中存在的结构谐振与液压—机械综合谐振,传动链间隙引起的极限环振荡,以及为解决这些问题而采取的阻尼技术、消隙传动和内回路设计等关键技术;同时系统地介绍了近年来飞速发展的计算机控制液压伺服系统的分析、设计方法,以及现代控制理论在液压伺服系统设计方面的应用。在论述过程中,列举了军事工业和民用工业中大量的应用实例,根据各种类型被控对象的特点,阐述了它们的不同的设计思想。

本书适合于液压技术、自动控制等专业的科技人员参考,亦可作为高等学校液压专业的教学参考书。

液压伺服理论与实践

李连升 刘绍球 著

责任编辑 崔士义

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

新华书店经售

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张18¹/₂ 插页2 488千字

1990年11月第一版 1990年11月第一次印刷 印数: 0,001—3,000册

ISBN 7-118-00773-0/TH·56 定价: 16.80元

科技新书目 232-043

国防科技图书出版基金 第一届评审委员会组成人员

主任委员 邓佑生

副主任委员 金朱德 太史瑞

委 员 (按姓氏笔画排列)

尤子平 朵英贤 刘琯德

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫悟生

曾 铎

秘 书 长 刘琯德

序

近年来，在全世界范围内，掀起了新的技术革命浪潮，一场高技术的竞争正在激烈进行。在这场竞争中，我们能否利用我国有利的条件，发挥我们的优势，同西方发达国家竞争，使我国得到较大的发展，至关重要的就是大力发展科学技术和教育。

自动化是整个新技术领域的重要组成部分，是提高劳动生产率和产品质量的必由之路。液压伺服技术在自动化领域中扮演了一个重要角色，它始于第二次世界大战，经过五十余年的发展，已被广泛地应用于军事工业和民用工业的各个部门，在导弹控制和航空工业的控制中，与其他控制系统相比，液压伺服占有绝对优势，虽然液压伺服技术在发展的征途中，还有许多理论问题和实践问题需要解决，还需要开拓新的途径，但是这一学科仍将持续发展、完善，成为自动控制领域中不可缺少的部分。

《液压伺服理论与实践》的作者李连升、刘绍球同志长期从事雷达、导弹控制系统的研究和试制工作，曾获全国科学大会奖和多次国防科工委重大科技成果奖。本书就是他们科研实践的总结，主要取材于他们的研究成果。书中着重论述液压伺服系统中的结构谐振与液压—机械综合谐振、传动链间隙引起的极限环振荡，以及为解决这些问题而采取的阻尼技术、消隙传动、内回路设计等关键技术，介绍液压伺服领域中的最新技术，内容丰富、精辟，在液压—机械综合谐振、消隙传动等许多方面具有独创性，理论紧密联系实际。

尽管目前已出版了一些书，但系统地论述阻尼技术、消隙传动、内回路设计等液压伺服领域中新技术的书微乎其微，特别是结合实际加以论述的书更是无处可觅，因此，本书的出版，可以说是填补了这些方面的空白。

目 录

第一章	绪论	1
§ 1-1	液压伺服系统的工作原理及其组成	1
§ 1-2	液压伺服系统的特点分析	3
§ 1-3	电液伺服技术的发展历史与发展方向	6
第二章	液压驱动机构	9
§ 2-1	阀控系统	9
§ 2-2	泵控系统	29
第三章	液压伺服系统	40
§ 3-1	位置伺服系统	40
§ 3-2	位置伺服系统的应用	55
§ 3-3	速度伺服系统	59
§ 3-4	速度伺服系统的应用	63
§ 3-5	力和压力伺服系统	64
§ 3-6	工业电液伺服系统的简易设计	69
第四章	结构谐振与液压—机械综合谐振	87
§ 4-1	引言	87
§ 4-2	负载转化	88
§ 4-3	结构谐振与液压—机械综合谐振	90
§ 4-4	结构谐振与液压系统耦合的本质	105
§ 4-5	提高综合谐振频率和结构谐振频率的途径	109
§ 4-6	伺服系统中各参数以及反馈元件连接位置对系统 稳定性的影响	112
§ 4-7	综合谐振与结构谐振的测试	118
§ 4-8	结构谐振的模拟	123
第五章	阻尼技术	125
§ 5-1	用并联阻尼孔提高综合谐振阻尼	126
§ 5-2	并联频率敏感阻尼器提高综合谐振阻尼	128
§ 5-3	压力反馈与动压反馈	137

§ 5-4	用带阻网络来削平谐振峰值	145
§ 5-5	用串联惯性环节来提高系统的幅值裕量	150
§ 5-6	提高结构谐振阻尼	151
第六章	伺服机械结构设计	153
§ 6-1	摩擦对系统的影响	153
§ 6-2	传动链间隙对伺服系统性能的影响	157
§ 6-3	传动链的传动误差对系统性能的影响	162
§ 6-4	减速器的设计	166
§ 6-5	齿轮链的机械消隙措施	188
第七章	液压伺服系统的内回路设计	190
§ 7-1	内回路的作用	190
§ 7-2	倾斜盘回路设计	196
§ 7-3	速度回路设计	212
§ 7-4	稳定回路设计	218
第八章	多回路系统的分析与设计	224
§ 8-1	伺服系统的输入信号	224
§ 8-2	液压伺服系统的典型希望特性	228
§ 8-3	系统的性能指标要求	230
§ 8-4	跟踪过程中的动态滞后与随机误差	238
§ 8-5	由开环波德图近似地求闭环传递函数的工程方法	253
§ 8-6	液压伺服系统研制概论	259
§ 8-7	液压伺服系统的可行性分析	269
§ 8-8	液压伺服系统的设计	273
§ 8-9	人机系统设计	316
§ 8-10	多回路系统的应用及其设计思想	320
第九章	液压伺服系统的装调维护与故障分析	355
§ 9-1	电液伺服系统的安装与清洗	355
§ 9-2	电液伺服系统的调试	360
§ 9-3	电液伺服系统常见故障分析	366
§ 9-4	电液伺服系统的维护	370
§ 9-5	故障分析实例	371
第十章	液压伺服系统的性能改善	376
§ 10-1	双增益电路	376

X

§ 10-2	消摆电路	377
§ 10-3	电液伺服系统中的限位电路和缓冲止挡装置	384
§ 10-4	电液伺服系统中的消隙传动	391
第十一章	电液伺服系统的数字化	405
§ 11-1	数字式电液伺服系统的类型	405
§ 11-2	步进电机及其驱动电源	409
§ 11-3	数字阀	414
§ 11-4	液压步进马达与液压步进缸	420
§ 11-5	检测元件和控制元件的数字化	422
§ 11-6	数模混合式液压伺服系统的综合与设计	441
§ 11-7	数字式液压伺服系统设计实例	466
第十二章	电液比例阀与比例控制	475
§ 12-1	概述	475
§ 12-2	比例电磁铁	478
§ 12-3	比例压力阀	487
§ 12-4	比例流量阀	492
§ 12-5	电液比例方向阀和电液比例复合阀	496
§ 12-6	电液比例控制系统	499
第十三章	现代控制理论与电液伺服系统	503
§ 13-1	液压伺服系统的状态空间表示	504
§ 13-2	能控性与能观测性	523
§ 13-3	综合液压伺服系统的极点配置法	528
§ 13-4	状态观测器设计	540
§ 13-5	液压系统的最优控制	553
参考文献	581

第一章 绪 论

液压伺服系统又叫液压随动系统，也叫液压控制系统，它是液压技术领域中的一个重要分支。由于它的一些突出优点，近年来被广泛地应用于航空、航天、武器控制、冶金、机械等各个工业部门。同样由于存在一些严重的缺点，在研制和使用过程中产生各种各样的问题，需要克服和解决。另外，在同其他控制系统（例如机电控制系统）的竞争，面临严峻的挑战。正因为它应用广泛，同时又存在许多急需解决的问题，所以深入研究它的分析和设计方法，研究研制及使用过程中的各种关键技术问题，开拓新的发展途径，具有十分重要的意义。

§ 1-1 液压伺服系统的工作原理及其组成

导弹发射架、雷达、光学跟踪装置等伺服系统，都可归纳为对一个精密转台的伺服控制，如图 1-1 所示。有些转台仅要求对方位一个自由度进行控制，

有些则要求控制方位和俯仰

两个自由度，还有一些甚至

要求控制三个、四个自由度。

为了说明电液伺服控制的

原理，我们就以转台的速度

控制为例。图 1-2 示出了一个

转台的速度控制原理图。

整个系统由指令电位器、电

子放大器、电液伺服阀、液

压马达、减速器、转台（被

控对象）和测速发电机组成。

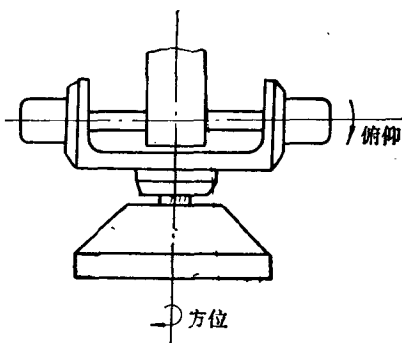


图1-1 转台示意图

移动指令电位器的滑臂，使从系统

的输入端输入一个电压 u_{in} ，这个电压同测速发电机来的反馈电压进行比较，产生误差 e ，误差电压 e 通过电子放大器放大后，加到电液伺服阀，改变电液伺服阀的输出流量，从而改变液压马达的转速。同时，通过减速器改变转台的旋转速度，使转台朝着减小误差的方向运动。测速发电机测量液压马达的转速，并将这个转速转换成与之成比例的电压 u_{out} ，并反馈到系统的输入端，同输入电压 u_{in} 比较。当反向移动指令电位器的滑臂，使输入电压 u_{in} 的极性变化，于是电液伺服阀输出流量的流向发生变化，使液压马达反转，从而使转台向着与原来相反的方向旋转。也就是说，改变输入电压 u_{in} 的大小，就可改变转台的转速；改变输入电压的极性，就可改变转台的转向。显然，由于系统中含有反馈元件——测速发电机，所以这是一个典型的闭环控制系统，它具有反馈控制系统的所有特点，例如它能自动修正因负载扰动引起的误差等等。液压伺服系统正是这样一种反馈控制系统。

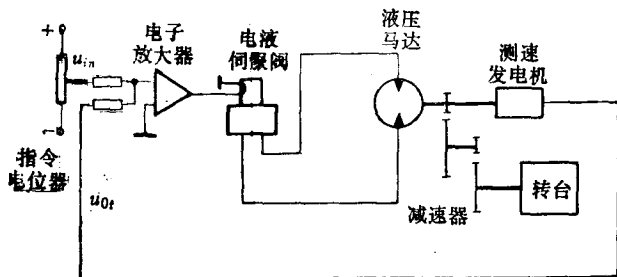


图1-2 转台液压速度伺服系统原理图

由图 1-2 可知，一个液压伺服系统，主要由三部分组成：电子线路；液压驱动机构；机械结构(包括传动链和负载)。这三部分通过自动控制理论组成满足性能要求的系统。其中电子线路部分用来实现整个系统的信号产生、检测、变换、传递和控制，它包括模拟线路、数字电路和计算机(主要是微处理机)及其接口。液压驱动机构除了主回路的各元件以外，还包括油源。随着

控制对象的不同，机械结构可能有很大的差异，但是作为伺服机械，都有它共同的规律和特点，本书从以上四个方面进行详细论述。

§1-2 液压伺服系统的特点分析

同机电伺服系统、气动伺服系统相比，液压伺服系统具有下列突出的优点，以致成为采用液压系统而不采用其它控制系统的主要原因：

① 功率—重量比大。这意味着同样功率的控制系统，液压系统体积小，重量轻。这是因为对机电元件，例如电动机来说，由于受到磁性材料饱和作用的限制，单位重量的设备所能输出的功率比较小。液压系统可以通过提高系统的压力来提高输出功率，这时仅受到机械强度和密封技术的限制。在典型情况下，发电机和电动机的功率—重量比仅为 16.8W/N ，而液压泵和液压马达的功率—重量比为 168W/N ，是机电元件的 10 倍。在航空、航天技术领域应用的液压马达是 675W/N ，而稀土电机的功率—重量比为 225W/N 。直线运动的动力装置更加悬殊。

这个特点，在许多场合下，是采用液压伺服而不采用其他伺服系统的重要原因，也是直线运动控制系统中多用液压系统的重要原因。例如在航空，特别是导弹、飞行器的控制系统中，因为每发射单位重量的有效载荷，都要耗费巨大的资金，因此对弹上设备本身的重量有严格的要求。正因为如此，几乎所有的中、远程导弹的控制系统，都采用液压系统。在冶金工业中，有许多大功率的往复运动控制系统，为了减小设备的体积和重量，为了减小设备的复杂性，也广泛地应用液压伺服控制。

② 力矩惯量比大（对直线运动马达来说，力—质量比大）。一般回转式液压马达的力矩惯量比是同容量电动机的 10 倍至 20 倍，一般液压马达为 $61 \times 10^5 \text{N} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，但是近年来发展的无槽电机有很高的力矩惯量比，约为 $61 \times 10^3 \text{N} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，同液压

马达相当。力矩惯量大，意味着液压系统能够产生大的加速度，也意味着时间常数小，响应速度快，具有优良的动态性能。因为液压马达或者电动机消耗的功率一部分用来克服负载，另一部分消耗在加速液压马达或者电动机本身的转子，所以一个执行机构能否产生所希望的加速度，能否输给负载以足够的实际功率，主要受到它的力矩惯量比的限制。这个特点也是许多场合下采用液压系统，而不采用其它控制系统的重要原因。例如在导弹武器的仿真系统中，要求平台具有极大的加速度，具有很高的响应频率，这个任务只有液压系统能够胜任。

③ 液压马达的调速范围宽。所谓调速范围是指马达的最大转速与最小平稳转速之比。液压伺服马达的调速范围一般在400左右，好的上千，通过良好的速度回路设计，闭环系统的调速范围更宽。这个指标也常常是采用液压系统的重要原因。例如跟踪导弹、卫星等飞行器的雷达、光学跟踪装置，在导弹起飞的初始段，视场半径很小，要求很大的跟踪角速度，进入预定轨道后，视场半径很大，要求跟踪的角速度很小，因此要求系统的整个跟踪速度范围很大。

④ 液压伺服系统很容易通过液压缸实现大功率的直线伺服驱动，而且结构很简单。若采用以电动机为执行元件的机电系统，则需通过齿轮、齿条等装置，将旋转运动变换为直线运动，从而结构很复杂，而且会因传动链的间隙而带来许多问题；若用直线式电机，体积重量将大大增加。从力—质量比来说，直流直线式电动机的力—质量比为 130N/kg ，而直线式液压马达（油缸）的力—质量比是 13000N/kg ，是机电元件的100倍。所以在负载要求作直线运动的伺服系统中，液压系统比机电系统明显优越。正因为如此，在冶金工业中，液压伺服系统得到了广泛应用。

还有其他许多优点，诸如系统的刚度比较大，润滑性能好等。

但是液压控制系统也存在许多严重的缺点，在研制、生产和

使用过程中,引起许多问题,影响液压系统的声誉,成为与其他控制系统竞争中丧失市场的原因。概括起来,有以下几个方面:

① 使用不方便,维护困难。在研制过程中,经常需要增添或者更换,甚至去掉一些元件,修改一些管路;在使用过程中,一旦出现故障,需检测和排除故障,不可避免地要拆卸管路,更换元件,这时需要动钳子,扳手,大动干戈,甚至弄得满地都是油污,令人讨厌。机电系统,可以方便地用三用表、示波器等电子仪器来查找故障,需要修改线路、更换元件时,只需一把电烙铁、一把镊子就能解决问题,十分方便,十分干净。

② 泄漏。液压系统常常难以保证没有漏泄,总是或多或少有些油液漏出来,严重的甚至满地都是。这是在电子设备、医疗器械、食品加工机械、工艺品加工机械中失去市场的重要原因。通常,电子设备、医疗设备安放的环境都是十分干净的,这些设备即使滴几滴油在地板上,也是令人反感的。食品加工机械、工艺品加工机械更是如此。

③ 过载能力低。若液压系统的额定工作压力为 $140 \times 10^5 \text{Pa}$,则允许的最大工作压力不超过 $210 \times 10^5 \text{Pa}$,而电动机,例如无槽电机允许的瞬时(比如说 1s)过载功率是额定工作功率的 $7 \sim 8$ 倍。这个缺点在某些场合下限制了液压伺服系统的使用,例如在舰载武器系统中,为了对付掠海飞行器,要求雷达、发射架、火炮以及各种跟踪装置迅速调转 180° ,其加速度达 15rad/s^2 ,需要消耗很大的功率,但是在正常跟踪状态下,负载消耗的功率是很小的,由于液压系统的瞬时过载能力差,不得不选用大容量的系统。

④ 对油污比较敏感。有人统计,液压伺服系统中大部分故障与油污有关。

⑤ 噪声比较大,这是液压系统的又一个较大的缺点,在许多场合,是妨碍选用液压系统的重要原因,例如机床。

⑥ 不宜作远距离传输,因为一方面由于铺设管道带来诸多不便,另一方面,控制点远离油源还会降低系统的动态性能。

在控制系统设计中，除了一般地了解液压系统的以上优缺点外，还需根据具体对象，作更深入的分析、比较，这对于正确地选择何种类型的控制系统是至关重要的。

§ 1-3 电液伺服技术的发展历史与发展方向

一、发展历史

第二次世界大战期间，由于军事上的需求，对先进的武器和飞机的控制系统，提出了诸如大功率、高精度、快速响应等一系列高性能要求。当时单纯地用电磁元件已很难、甚至不可能满足这些要求，而液压系统具有的一些特点，正好适合于这种场合，从而促使人们更深入地研究液压技术。在这个背景下，液压伺服技术迅速发展起来。到 50 年代末期和 60 年代初，有关液压伺服技术的基本理论日趋完善，从而使液压伺服系统广泛地应用于武器、舰船、航空、航天等军事工业部门，后来又迅速地推广到冶金、机械等民用工业中。液压伺服系统以其优良的动态性能著称，但同时因为它要求很高的加工精度，成本高昂，对维护使用要求苛刻，这对于一般工业控制来说，是难以承受的。因为大多数工业控制系统，并不需要很高的动态性能，一般伺服带宽 $3\sim 5\text{Hz}$ ，甚至 $1\sim 2\text{Hz}$ 就可以了，但希望价钱便宜，对污染不敏感，以致不需要特殊的维护措施。在这个背景下，于 60 年代末开始发展了一种廉价液压伺服技术——电液比例控制。这种介于液压伺服与液压开关控制之间的一种液压技术，为液压控制开拓了新的途径。

尽管液压伺服技术在不断开拓、发展，但是始终存在噪声、漏油、维护修理不方便、成本较高，对油液中的污染物比较敏感而经常发生故障等缺点。另一方面，机电伺服系统在一些重要元件的性能上有新的突破，尤其是 60 年代可控硅元件问世，60 年代末到 70 年代初相继研制出了力矩电机、印刷电机、无槽电机等性能优良的执行元件，其中无槽电机的力矩惯量比同液压马达

相当，调速范围比液压马达还大得多。近年来又出现了大功率的脉冲调宽（PWM）功率放大元件，大大改善了伺服系统的性能，形成对液压系统的有力挑战。目前除了航天领域中的中、大型火箭、导弹控制系统，液压伺服具有绝对优势外，大多数中小型地面设备，已逐渐被机电伺服系统所取代，即使在许多高性能要求的领域里，例如雷达伺服系统，由于结构谐振的限制，液压系统的高响应性能得不到充分发挥，也逐渐很少采用液压系统了。但是在直线运动的控制对象，尤其是大功率的直线运动对象，仍广泛使用液压伺服系统。例如冶金工业中，液压伺服被认为是60年代以来的一种新技术，是衡量一个企业设备是否先进的一个重要标志。

二、发展方向

当前液压伺服系统的发展方向，可以归纳为以下几个方面：

（1）机电一体化。这是将微电子技术和液压技术结合成一体，出现了将比例控制系统、伺服系统所需的放大器、传感器、信息显示装置等与液压泵、阀和液压缸等紧凑地组合在一起，组成新颖的一体化元件。这是当前液压技术的一个重要发展方向。近年来由于微电子技术的飞速发展，中规模和大规模集成电路可靠性很高，价格下降，使之得到迅速普及，为机电一体化创造了条件。机电一体化组件，一方面由于结构紧凑，减小了空间尺寸，成本也有所下降；另一方面由于减少了中间传递和连接件，进一步提高了可靠性。此外还可以扩展元件的功能。例如在模拟式传感器上附加A/D变换器，在电液伺服阀等模拟式阀上附加D/A变换器，可以直接同计算机连接。目前国外已逐步对这种元件进行标准化和系列化。可以预计，不久将进一步发展成带微电脑的智能型机电一体化组件。

（2）计算机在液压伺服系统中的普遍应用。计算机的应用已深入到各个领域，无疑也将在液压伺服技术领域发挥巨大作用。

计算机在液压伺服技术领域中的应用包括计算机直接控制

(CDC)、计算机辅助设计 (CAD) 和计算机辅助测试 (CAT) 等三个方面。

计算机直接控制，就是将计算机（主要是微处理机）作为整个伺服系统的一个环节来进行系统的控制。由于它的软件功能很强，可以方便地完成大量的环外处理和智能控制，构成所谓智能型电液控制系统。

计算机辅助设计主要指对液压伺服元件和伺服系统进行计算机仿真。这是一种十分有效的设计和研究方法，它不仅可以对复杂的系统（例如多变量控制系统）和各种因素（例如非线性因素等）对系统的影响进行定量研究，而且可以进行元件和系统的优化设计。计算机仿真可以在模拟机上进行，也可以在数字机上进行。由于液压伺服元件存在多种非线性因素，单纯地用模拟计算机仿真，可能因为模拟电路的零飘等带来较大误差，甚至出现不稳定的现象，而数字计算机通过通用或者专用的程序包能够得到更满意的结果。对于大型、高精密的伺服系统来说，更接近实际的还是模拟—数字联合仿真。

通过计算机辅助测试系统对液压伺服元件、伺服系统的静态、动态特性进行测试、辨识和数据处理，通过屏幕显示出来或者通过打印机将相应的数据和曲线打印出来。更进一步将这种测试系统扩展成故障监测和预报系统，它不断巡回地采集系统的实际参数，并将其同拟定参数进行比较，作出判断，而后通过报警装置，给出报警信号，同时在屏幕上显示出故障的原因和处理措施。这也是计算机在液压伺服系统中应用的一个新的重要的方向。

(3) 污染控制。液压伺服系统的大部分故障都同油液和元件的污染有关。对污染的研究包括对污染的检测和控制，也包括开发新的廉价的抗污染元件，例如比例阀与比例技术，射流元件等等。

此外，还有一些有待研究的重要课题。诸如：对系统进行可靠性分析，根据整个系统各元件的失效率找出薄弱环节，采用冗余技术提高系统的可靠性；对液压元件和系统的噪声进行研究。

第二章 液压驱动机构

液压驱动机构是液压伺服系统中将微功率电能或者机械能转换成强功率液压能和机械能的装置。它由液压功率放大元件、液压执行元件和负载组成,是液压伺服系统中进行动态分析的核心。

根据液压驱动机构中所取功率放大元件的不同分为阀控系统 和泵控系统。阀控系统又称节流式系统,它是以液压伺服阀为功率放大元件的系统。泵控系统又称容积式系统,它是以液压伺服泵为功率放大元件的系统。另外根据执行元件的不同,液压驱动机构又分为阀控缸、阀控马达、泵控缸和泵控马达等几种类型。下面我们分别进行讨论。

§ 2-1 阀控系统

2.1.1 阀控缸系统

一、阀控缸系统的静态特性

阀控缸的静态特性包括速度特性和机械特性。

1. 速度特性

所谓阀控缸系统的速度特性是指空载情况下,液压缸输出速度同滑阀输入位移之间的关系。

图 2-1 是一个阀控系统的原理图,滑阀输出的流量

$$Q = aWx\sqrt{\frac{2g}{\gamma} \cdot \frac{1}{2}(p_s - p_t)} \quad (2-1)$$

式中 x ——滑阀的开启

$$x = x_v - \Delta x \quad (2-2)$$

其中 x_v ——滑阀位移;

Δx ——滑阀的重叠量。