

液阻网络系统学

胡燕平 彭佑多 吴根茂 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

ISBN 7-111-11253-9/TH·1304

责任编辑: 梁福军 王 烨

ISBN 7-111-11253-9



9 787111 112532 >

定价: 18.00 元

地址: 北京市百万庄大街22号

邮政编码: 100037

联系电话: (010) 68326294

网址: <http://www.cmpbook.com>

E-mail: online@cmpbook.com

液阻网络系统学

胡燕平 彭佑多 吴根茂 编著



机械工业出版社

本书以半桥、全桥和 π 桥液阻网络为研究对象, 阐明了 3 种液阻网络系统的构成、技术特性与应用。主要内容有: 液阻网络系统概述, 半桥液阻网络特性与应用, 全桥液阻网络特性与应用, π 桥液阻网络结构与特性, 以 G 型和 F 型 π 桥液阻网络为先导的溢流阀结构、技术特性与设计方法。

本书可作为高等学校本科生和研究生的教学参考书, 也可供从事液压元件和液压系统研究、设计的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

液阻网络系统学 / 胡燕平等编著. —北京: 机械工业出版社, 2002.12

ISBN 7-111-11253-9

I. 液… II. 胡… III. 液压系统 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 104654 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 梁福军 E 烨

责任校对: 杨少晨

封面设计: 姚 毅

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 6 月第 1 版第 2 次印刷

850 mm × 1 168 mm 1/32 · 5 印张 · 133 千字

1001—2500 册

定价: 18.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本书购书热线电话 (010) 68993821、88379645

前 言

大多数液压控制阀通过改变阀口过流面积来实现对系统压力或流量的控制，这种过流面积可变的控制阀口可抽象为一个可变液阻。按照液阻的调控方式，液阻可分为固定液阻、可调液阻和可控液阻。固定液阻的过流面积不可调，如常用的固定节流孔；可调液阻的过流面积可直接调节，如节流阀阀口；可控液阻的过流面积由弹簧力、液压力和电磁力进行控制，如溢流阀的先导阀口和主阀口。可调液阻和可控液阻一般又统称为可变液阻。

固定液阻、可调液阻和可控液阻的不同组合就构成了多种形式的液阻控制网络，液压控制阀一般至少包含一个可变液阻。人们通过调节或控制液阻网络中液阻值的大小来控制液压元器件的特性。因此，液阻网络系统学是分析与设计液压控制阀的理论基础。

将各类具体的液压控制阀或回路抽象为液阻网络，从液阻和液阻网络出发，研究液压控制阀或回路的共性问题，是液阻网络系统学的基本内容。W. Backè 为液阻网络系统学的创建做出了奠基性贡献，他应用液电模拟类比法，系统地提出了液阻网络分析与综合的一般方法。以半桥和全桥液阻网络两种基本形式对各类具体的液压控制阀展开系统研究。他在 1973 年著的《液压阻力回路系统学》至今仍是该领域的经典著作。在尔后的 30 年中，液阻网络系统学理论在液阻及其网络的特性等方面得到了充实和丰富，并逐渐成为各类液压控制阀和回路分析与设计的常用方法。 π 桥液阻网络概念的提出及在液压控制阀设计中的应用，使液阻网络系统学实现了从半桥、全桥二元构架到半桥、 π 桥和全桥三元构架的突破。正是在这一背景下，作者编著本书，以期对液阻网络系统学的发展有所裨益。

本书共分 6 章。第 1 章为液阻网络系统概述, 介绍液阻的压力流量特性, 液阻串联和并联后的等效液阻, 半桥、全桥和 π 桥液阻网络的基本概念。第 2 章为半桥液阻网络特性与应用。第 3 章为全桥液阻网络特性与应用。第 4~6 章是本书的重点, 主要介绍作者对 π 桥液阻网络及其 π 桥溢流阀特性的研究成果。第 4 章介绍 π 桥液阻网络结构与特性。第 5 章分析 G 型 π 桥溢流阀的工作原理、技术特性与设计方法。第 6 章分析 F 型 π 桥溢流阀的工作原理、技术特性与设计方法。

本书可作为高等学校研究生和本科生的教学参考书, 也可供从事液压元件和液压系统教学、科研及设计领域的教师与工程技术人员参考。

浙江大学流体传动及控制国家重点实验室、邵阳液压有限责任公司对本书涉及的研究项目给予了大力支持, 湘潭工学院科研处、学科建设办公室和机械工程及自动化系对本书的写作与出版给予了大力支持, 刘德顺教授作为相关项目的主要成员, 审阅了全书, 特此致谢!

因作者水平有限, 书中错误在所难免, 祈望读者赐教。

作者

2002 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 液阻网络系统概述	1
1.1 结构与特性	2
1.2 串联与并联	6
1.3 全桥和半桥液阻网络	11
1.4 π 桥液阻网络	16
第 2 章 半桥液阻网络特性与应用	19
2.1 结构原理	19
2.2 流量压力特性	21
2.3 压力增益和流量增益	27
2.3.1 压力增益	27
2.3.2 流量增益	28
2.3.3 流量压力系数	29
2.4 B 型半桥先导回路溢流阀稳态特性分析	32
2.4.1 工作原理	32
2.4.2 稳态特性	33
2.4.3 直接检测式溢流阀稳态特性分析	40
第 3 章 全桥液阻网络特性与应用	48
3.1 结构原理	48
3.2 流量压力特性	53
3.3 静态特性参数	61
3.3.1 A+A 型全桥液阻网络的特性参数	61
3.3.2 其他全桥液阻网络特性参数的计算	64
3.4 实例分析	67
第 4 章 π 桥液阻网络结构与特性	73
4.1 结构	73

4.2 控制对称液压缸的特性	79
4.2.1 流量压力特性	79
4.2.2 主要特征参数	90
第5章 G型 π 桥溢流阀	105
5.1 工作原理	105
5.2 稳态特性	107
5.3 动态特性	116
5.3.1 动态数学模型	116
5.3.2 动态特性仿真	118
5.4 测试	121
5.4.1 液压试验台及测试系统	121
5.4.2 稳动态特性试验结果	122
5.4.3 测试结果分析	126
5.5 应用	127
5.5.1 在普通泵缸系统中的应用	127
5.5.2 在提升机液压控制系统中的应用	129
第6章 F型 π 桥溢流阀	133
6.1 工作原理	133
6.2 稳态特性	134
6.3 试验研究	143
6.4 DB型先导式溢流阀	147
参考文献	150

第1章 液阻网络系统概述

在各类常规液压控制阀、比例控制阀和伺服控制阀等液压元器件中,为了得到较好的控制特性,提高液压元器件的技术特性,往往使用多个液阻来构成液阻控制网络。在液压元器件或液压回路中使用的液阻网络有半桥液阻网络、全桥液阻网络、 π 桥液阻网络及其他液阻网络。

早在1936年Harry.Vickers就设计了先导式溢流阀^[29],其先导回路由B型半桥组成。1958年Blackburn、李诗颖研制了电液伺服阀^[23],这种伺服阀主阀的4个可变液阻构成了一种全桥液阻网络。1973年W.Backè出版了《液压阻力回路系统学》(中译文1980年出版,周文译)^[14]。在这本著作中,作者较系统地分析了各种半桥液阻网络和全桥液阻网络的特性及其应用。

浙江大学路甬祥、吴根茂等应用液阻网络理论分析方法研制了直接检测式比例压力控制阀和其他比例控制阀^[12, 13],显著改善了比例控制阀的技术特性。

20世纪80年代中期吴根茂在德国Rexroth公司作研究工作时,为了寻求更好的溢流阀压力流量特性,研制了一种先导回路由3个液阻构成的新型先导式溢流阀^[16],即本书将要论述的F型 π 桥溢流阀。20世纪90年代末期,胡燕平、魏建华和吴根茂等提出了 π 桥液阻网络概念^[1, 2],对其特性进行了分析和仿真,研制了G型 π 桥溢流阀,并对该阀进行了理论分析与试验研究^[3~5]。

本书在分析液阻基本特性的基础上,对半桥、全桥液阻网络的特性进行了系统的研究,并对其应用作了一般性介绍。本书重点研究了 π 桥液阻网络特性及 π 桥溢流阀的性能。

本章首先分析单个液阻的基本结构及其特性,以及液阻的串联与并联特性,最后介绍半桥、全桥和 π 桥液阻网络的基本构成。

1.1 结构与特性

在电子学中，一般的电阻网络使用的是线性电阻，线性电阻元件两端的电压 u 与电流 i 的关系服从欧姆定律，欧姆定律用语言表述就是线性电阻通过的电流与两端电压成线性关系。即

$$u=ri \quad (1-1)$$

如果电阻元件两端的电压 u 与电流 i 的关系不服从欧姆定律，而遵循某种特定的非线性函数关系，则称该电阻元件为非线性电阻元件。

对于液阻来说，通过液阻的流量 q_v 与液阻两端的压差 Δp 往往为非线性关系，通过液阻的流量 q_v 与压差 Δp 的关系一般情况下可用下式表示

$$q_v = kA\Delta p^m \quad (1-2)$$

式中 k ——系数，与液阻的过流通道形状和液体性质有关；

A ——液阻过流截面积；

m ——指数，与液阻结构形式有关。

图 1-1 显示指数 $m=0.5$ 时液阻的流量压力特性。借鉴电子学对非线性电阻的定义^[24]，可以引出静态液阻 R 和动态液阻 R_d 的概念，其定义如下

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} \quad (1-3)$$

$$R_d = \frac{d\Delta p}{dq_v} \quad (1-4)$$

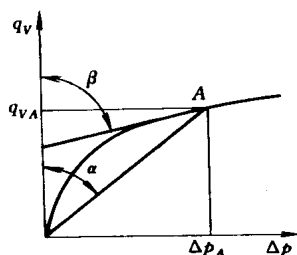


图 1-1 液阻特性

静态液阻 R 是液阻两端压差对流量的比值，它是液阻对稳态流体阻碍作用的一种度量；而动态液阻 R_d 是液阻两端压差微小增量与流量微小增量的比值，它是液阻对动态流体阻碍作用的一种

度量。在图 1-1 中, A 点的静态液阻正比于 $\tan\alpha$, 而 A 点的动态液阻正比于 $\tan\beta$, $\tan\beta$ 是流量压力特性曲线在 A 点斜率的倒数。

静态液阻和动态液阻一般都是压差 Δp 或流量 q_v 的函数。由式 (1-2) 可得, 静态液阻值 R 为

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} = \frac{\Delta p^{1-m}}{kA} \quad (1-5)$$

动态液阻值 R_d 为

$$R_d = \frac{d\Delta p}{dq_v} = \frac{\Delta p^{1-m}}{kAm} \quad (1-6)$$

在式 (1-5) 和式 (1-6) 中, 若 $m=1$, $R = R_d = 1/(kA)$, 液阻与流量无关, 这样的液阻是线性液阻; 若 $m < 1$, 液阻值与液阻两端的压差或流量有关, 这样的液阻为非线性液阻。非线性液阻的静态液阻 R 值和动态液阻 R_d 值是不同的, 如, 常用的薄刃型非线性液阻的压力流量特性为

$$q_v = c_d A \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta p} \quad (1-7)$$

式中 q_v ——通过液阻的流量;

c_d ——液阻流量系数;

A ——液阻过流面积;

ρ ——液体密度;

Δp ——液阻上的压降。

静态液阻值 R 为

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} = \frac{\sqrt{\Delta p}}{c_d A \sqrt{2/\rho}}$$

动态液阻值 R_d 为

$$R_d = \frac{d\Delta p}{dq} = \frac{2\sqrt{\Delta p}}{c_d A \sqrt{2/\rho}}$$

显然, 对于薄刃型非线性液阻来说, 其动态液阻值 R_d 是静态液阻

值 R 的 2 倍。

当研究液阻回路的稳态特性时, 例如计算分压回路各点的压力值、分析先导式溢流阀的稳态特性, 使用静态液阻。本书除特别注明以外, 所研究的液阻均指静态液阻。当研究液阻回路的动态特性时, 如分析先导式溢流阀液阻对其动态特性的影响, 则需要使用动态液阻。

需要指出的是, 在液压阀的先导控制液阻网络中, 有些液阻是专门为改善液压阀动态特性而设计的, 故有时也称之为动态液阻或动态阻尼 (参见文献[13]中图 6-12)。显然, 该动态液阻或动态阻尼的概念是按液阻功能定义的。而分析这种液阻网络的动态特性时, 同样要应用式 (1-4) 定义的动态液阻概念。

在液压元器件中, 液阻的结构形式主要有三种, 即薄刃型、细长孔型以及介于薄刃型和细长孔型之间的混合型结构。这三种液阻的结构分别示于图 1-2 中, 其技术特性示于表 1-1 中。

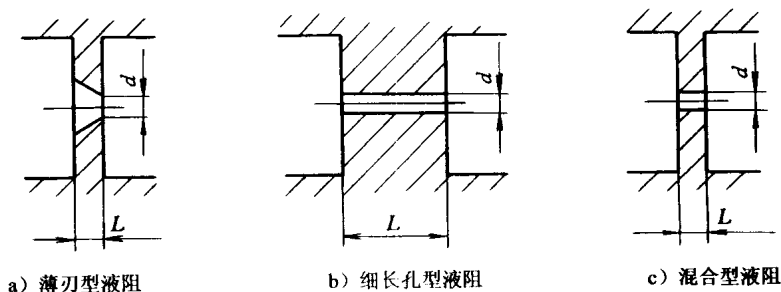


图 1-2 三种液阻结构形式

薄刃型液阻 ($L/d \ll 1$) 的压力损失主要是局部阻力损失, 其流量与压差的关系为非线性, 薄刃型液阻的阻值与流量或压差有关。

细长孔型液阻 ($L/d \geq 4$) 的压力损失主要是沿程阻力损失, 这种阻力损失主要由油液粘性摩擦所引起, 细长孔内的流动状态通常为层流, 流量与压差成线性关系, 其液阻值与压差无关, 为

常值。

表 1-1 三种典型液阻的流量压力特性与液阻公式

液阻结构	薄刃型液阻	细长孔型液阻	混合型液阻
流量压力特性	$q_v = c_d A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$	$q_v = \frac{\pi d^4}{128 \mu L} \Delta p$	$q_v = c \sqrt[3]{\Delta p^2}$
静态液阻	$R = \frac{\sqrt{\Delta p}}{c_d A \sqrt{2/\rho}}$	$R = \frac{128 \mu L}{\pi d^4}$	$R = \frac{\sqrt[3]{\Delta p}}{c}$
动态液阻	$R_d = \frac{2\sqrt{\Delta p}}{c_d A \sqrt{2/\rho}}$	$R_d = \frac{128 \mu L}{\pi d^4}$	$R_d = \frac{3\sqrt[3]{\Delta p}}{2c}$

混合型液阻的流量与压差的关系难以从流体力学的基本原理导出。对于溢流阀中使用的圆孔型固定液阻, Shin 建议使用式

$$R = \frac{\sqrt[3]{\Delta p}}{c} \text{ 来表述混合型液阻值}^{[20]}. \text{ 式中 } c = \left[\frac{\pi^2 d^4}{224 \rho} \sqrt{\frac{4}{\pi L \nu}} \right]^{2/3}, d$$

为液阻直径, ρ 为流体密度, L 为液阻通流孔长度, ν 为流体运动粘度, 显然混合型液阻值 R 与压差 Δp 有关。

国内的液压传动与控制教材中, 对于混合型液阻, 其流量压力特性大多数也推荐使用 Shin 公式^[30]。

日本 S.Washio 等在研究先导式溢流阀中液阻的特性时建议采用下式表示流量与压差间的关系^[20]

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{1}{A} (\alpha q_v^2 + \nu L q_v \beta) \quad (1-8)$$

对式 (1-8) 两边微分得

$$R_d = \frac{d \Delta p}{d q_v} = \frac{\rho}{A} (2 \alpha q_v + \nu L \beta) \quad (1-9)$$

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} = \frac{\rho}{A} (\alpha q_v + \nu L \beta) \quad (1-10)$$

式中 A ——液阻过流孔断面积;

α, β ——与液阻结构尺寸有关的系数;

L ——液阻通流孔长度；

ν ——流体运动粘度。

Washio 公式实际上是薄刃型液阻和细长孔型液阻的线性叠加，比较符合混合型液阻的实际。但公式相对复杂， α 、 β 需通过试验确定，因此该式的应用受到局限。

虽然细长孔型液阻的阻值为常数，通过细长孔型液阻的流量与压差之间成线性关系，但因细长孔型液阻的阻值与粘度有关，在压差一定的情况下，流量与液体粘度成反比，不利于流量的精确控制。另外，细长孔易堵塞，因此在液压元器件中较少采用细长孔型液阻。

薄刃型液阻虽然其流量压力特性为非线性关系，但流量与液体粘度无关，且流量压力特性公式比较简单，因而在多数情况下，人们往往将液阻设计成薄刃型结构，有时虽然液阻并不是薄刃型结构，但当过流孔的长度相对其直径较小时，为计算简化起见，仍然使用薄刃型液阻的流量压力公式，除特别说明外，本书中的液阻也都假设为薄刃型液阻。

1.2 串联与并联

与电路中电阻相类似，多个液阻可以串联或并联使用，多个液阻串联或并联以后可用一个等效液阻来代替。本节以常用的薄刃型液阻为例，分析静态液阻的串、并联特性^[18]。

由式 (1-7) 知，通过薄刃型液阻的流量与液阻上的压降存在如下关系

$$q_V = c_d A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (1-11)$$

若过流孔为圆孔，则上式可写为

$$q_V = k d^2 \sqrt{\Delta p} \quad (1-12)$$

式中 d ——液阻过流孔直径;

k ——系数, $k = c_d \frac{\pi}{4} \sqrt{2/\rho}$ 。

静态液阻的阻值 R 为

$$R = \frac{\Delta p}{q_V} = \frac{\sqrt{\Delta p}}{k d^2} \quad (1-13)$$

或

$$R = \frac{\Delta p}{q_V} = \frac{q_V}{k^2 d^4} \quad (1-14)$$

图 1-3 所示为两液阻串联, 设等效液阻为 R_{1+2} , 因

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2$$

且通过 R_1 、 R_2 和等效液阻 R_{1+2} 的流量相等, 将式 (1-13) 代入上式得

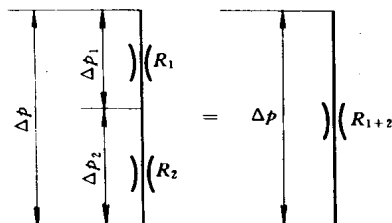


图 1-3 液阻的串联

$$R_{1+2} = R_1 + R_2 \quad (1-15)$$

将式 (1-14) 代入式 (1-15) 中, 则有

$$\frac{q_V}{k^2 d_{1+2}^4} = \frac{q_V}{k^2 d_1^4} + \frac{q_V}{k^2 d_2^4} = \frac{q_V}{k^2} \left(\frac{1}{d_1^4} + \frac{1}{d_2^4} \right) \quad (1-16)$$

或

$$\frac{1}{d_{1+2}^4} = \frac{1}{d_1^4} + \frac{1}{d_2^4} \quad (1-17)$$

即

$$d_{1+2} = \left[\frac{(d_1 d_2)^4}{d_1^4 + d_2^4} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4} \right]^{\frac{1}{4}} d_2 = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4} \right]^{\frac{1}{4}} d_1 \quad (1-18)$$

式中 d_{1+2} ——液阻 R_1 和 R_2 串联后的等效液阻孔径。

设

$$\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4} \quad (1-19)$$

$$\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4} \quad (1-20)$$

将式 (1-19)、式 (1-20) 代入式 (1-18) 中, 得

$$d_{1+2} = \left[\phi\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \right]^{\frac{1}{4}} d_2 = \left[\phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right) \right]^{\frac{1}{4}} d_1 \quad (1-21)$$

用串联液阻进行分压时, 通过两液阻的流量是相等的, 如图 1-3 所示, 则有

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \frac{R_1 q_V}{R_2 q_V} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1-22)$$

将式 (1-14) 代入式 (1-22), 得

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \frac{d_2^4}{d_1^4} \quad (1-23)$$

又

$$\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} + 1 = \frac{d_2^4}{d_1^4} + 1 \quad (1-24)$$

整理后可得分压公式如下

$$\Delta p_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4} \Delta p = \phi\left(\frac{d_1}{d_2}\right) \Delta p \quad (1-25)$$

$$\Delta p_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4} \Delta p = \phi \left(\frac{d_2}{d_1}\right) \Delta p \quad (1-26)$$

从式(1-25)和式(1-26)可知,用两个液阻串联分压时,两个液阻的内孔直径相差不会太大,否则起不到分压的作用。例如,设 $d_1=0.5\text{ mm}$, $d_2=1.0\text{ mm}$,由式(1-25)和式(1-26)可得

$$\Delta p_1 = 0.94 \Delta p$$

$$\Delta p_2 = 0.06 \Delta p$$

虽然 d_2 只是 d_1 的 2 倍,但 Δp_1 却是 Δp_2 的 15.7 倍。

图 1-4 所示为两个液阻 R_1 和 R_2 并联。

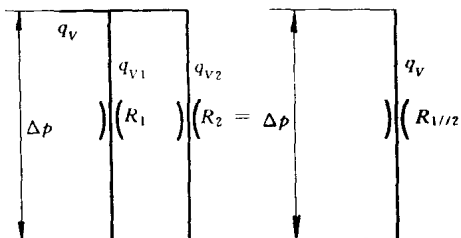


图 1-4 液阻的并联

设其等效液阻为 $R_{1/2}$, 因

$$q_v = q_{v1} + q_{v2}$$

将式(1-3)代入上式得

$$\frac{\Delta p}{R_{1/2}} = \frac{\Delta p}{R_1} + \frac{\Delta p}{R_2}$$

则有

$$\frac{1}{R_{1/2}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1-27)$$

将式(1-13)代入式(1-27)中,得