

# 广义脉码调制控制阀流量压力特性的理论与试验研究\*

刘 荣 王宣银

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 杭州 310027)

**摘要:** 广义脉码调制(GPCM)控制阀是一种组合形式的阀,各基元通过液压集成块连接到一起。流体在液压集成块流道内的运动分布规律是研究液压阀流量控制的关键之一,它决定了 GPCM 控制阀流量控制的精确度。对 GPCM 控制阀内部的压力与流量之间的关系进行理论研究,并对它进行了流场的仿真研究,得到了阀节流口压力变化与基元流量之间的关系。研究结果有助于 GPCM 控制阀时使结构优化设计,使 GPCM 控制阀具有较好的流量控制精度。

**关键词:** GPCM 控制阀 流场 仿真

**中图分类号:** TH137.52

## 0 前言

广义脉码调制(GPCM)控制阀是一种新型实用的数字控制阀<sup>[1,2]</sup>,它由一组不同流量的阀基元组成,各基元通过液压集成块连接到一起。各基元的流量不是按照传统的脉码调制(PCM)方式确定,而是根据系统控制精度与速度要求来确定,此方法称为广义脉码调制。它可以使系统在保证一定控制精度的条件下又具有快速调节性能,实现了用普通开关阀实现液压伺服控制。GPCM 控制阀内部的流道较复杂,主流道与分支流道之间主要为直角相交连接,导致流场结构复杂,且由于流道变化时,会出现涡旋,导致能量损失和流体噪声。因此对 GPCM 控制阀内部流道流场进行计算,可指导阀的结构设计工作,有现实的意义。由于调节 GPCM 控制阀各基元的输出流量是根据公式  $q_v = C_q A \sqrt{2\Delta p / \rho}$ 。假设在各基元节流口压降相同的情况下,调节节流基元阀的节流口过流面积来实现的。GPCM 控制阀内流道复杂,流体在经过分流支路和汇流支路时压力都会受到影响,必然会导致各基元节流口两端的压降不同,降低了阀流量控制精度。因此研究多分支流道的压力分布与流量之间的关系对于设计 GPCM 控制阀具有现实的意义,可以使各流量控制基元阀的实际流量更加接近于理论设计值。

## 1 GPCM 控制阀内部压力与流量关系的理论分析

### 1.1 GPCM 控制阀结构模型

GPCM 控制阀内各基元之间是并联连接的,流道连接较复杂,要完全按照它的结构来进行分析是不现实的,也不具有通用性,因此将 GPCM 控制阀内流道之间的连接简化为如图 1 所示的结构来进行分析,图 1 中各支路中的节流单元流量不同,单元个数和各单元的流量根据具体控制要求确定。图 1 中的  $p_{pi}$ 、 $q_{vpi}$  表示在主通道中第  $i$  个分流点前的压力和流量, $p_{ti}$ 、 $q_{vti}$  表示在主通道中第  $i$  个汇流点后的压力和流量。分析过程中,假设:①油液流动为恒定流动。②忽略重力影响。③忽略流道中摩擦产生的损失。④支路垂直于主管路。⑤流体速度为流道横截面上的平均速度。

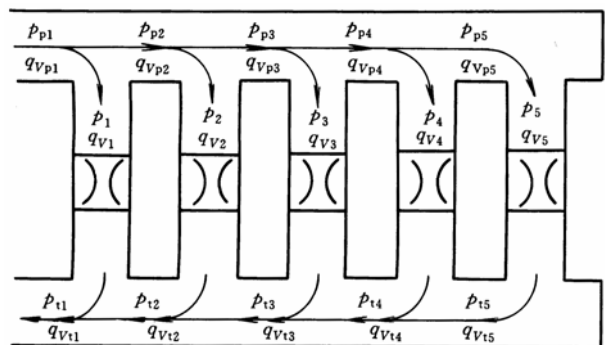


图 1 GPCM 控制阀结构图

\* 国家自然科学基金资助项目(59805016)。20031128 收到初稿, 20040425 收到修改稿

### 1.2 GPCM 控制阀内流道压力与流量理论分析

由图 1 可知, 阀内的连接流道分为分流支路与汇流支路两种, 压力油经分流支路分成几路流量各不相同的液流, 最终又经汇流支路汇聚成一体。多分支形式的流道在工程实际中应用比较广泛, 但对它的研究较少, 仅少数研究人员进行了这方面的工作<sup>[3,4]</sup>。分流支路与汇流支路模型如图 2 所示。在支路模型中取阴影部分做为控制体积, 图 2 中  $q_{V1}$ 、 $p_1$ 、 $q_{V2}$ 、 $p_2$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  分别表示控制体积在主通道上左右侧面的压力、流量和截面积, 通常  $A_1=A_2$ ;  $q_{V3}$ 、 $p_3$ 、 $A_3$  表示支路的流量、压力和截面积,  $v_x$ 、 $v_y$  表示在分支点沿  $x$ 、 $y$  方向的速度分量。

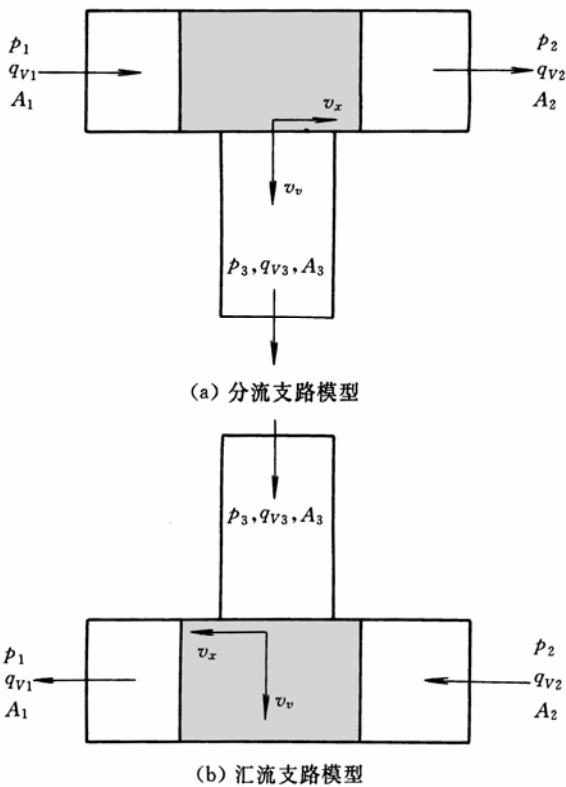


图 2 流道支路模型

在分流支路中取阴影部分做为控制体积, 对其应用动量定理, 得

$$p_1 A_1 - p_2 A_2 = \rho v_2 q_{V2} + \rho v_x v_y A_3 - \rho v_1 q_{V1} \quad (1)$$

式中  $v_1$ ——在左截面处平均速度

$v_2$ ——流体在右截面处平均速度

由流体连续性可知,  $v_y=v_3$  (流体在垂直截面处平均速度),  $q_{V3}=v_3 A_3$ ,  $q_{V2}=q_{V1}-q_{V3}$ , 且主流道为等截面积有  $A_1=A_2=A$ , 代入上式整理得

$$p_2 - p_1 = \rho \frac{q_{V1} q_{V2}}{A^2} \left( 2 - \frac{q_{V3}}{q_{V1}} - \frac{v_x}{v_1} \right) \quad (2)$$

左边截面处控制体积流体的动能

$$E_1 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{q_{V1}}{A} \right)^2 \quad (3)$$

因此式(2)可以进一步简化为

$$p_2 - p_1 = 2 \frac{q_{V3}}{q_{V1}} \left( 2 - \frac{q_{V3}}{q_{V1}} - \frac{v_x}{v_1} \right) q_{V1} \quad (4)$$

当  $q_{V3} \leq q_{V1}$ ,  $v_x \leq v_1$  时, 上式为正值, 表明经过支路分流后, 主流道中的压力增大。式中  $v_x$  表示流体在分支点离开主通道时的轴向速度, 有  $0 \leq v_x \leq v_1$ , 它的具体值理论上无法确定, McNow<sup>[5]</sup> 经试验分析, 确定出当  $0 < q_{V3}/q_{V1} \leq 0.7$ , 且分流支路的直径  $D_3$  与主流道直径  $D$  之比为  $0.25 \leq D_3/D \leq 1$  时, 取  $v_x/v_1=0.9$  计算出的理论值能够较好地与试验数据结果相符。

同理, 对图 2b 所示的汇流支路应用动量定理, 可求出与分流支路相同的压力计算公式与式(4)相同。分析该公式可知, 经过汇聚支路后, 通道前端的压力  $p_2$  将大于  $p_1$ , 即出口压力  $p_1$  减小。

在参数确定后, 用迭代的方法可以逐点地求解出 GPCM 控制阀中各分支点的压力与流量分布。分流支路从流体入口开始计算, 而汇聚支路沿流体出口开始计算。引入计算流体力学(Computational fluid dynamics, 简称 CFD)方法来分析分支管路压力与流量分布的关系。

## 2 CFD 仿真研究

计算流体力学是 20 世纪 60 年代发展起来的一门学科<sup>[6]</sup>, 以计算机为工具, 应用数值计算方法, 对流体力学的各类问题进行数值计算、模拟和分析研究。经过半个世纪的发展, CFD 技术已经相当成熟, 被广泛应用于航空航天、动力工程、力学、水利、海洋等科学和工程的领域, 已成为工程设计的重要手段<sup>[7,8]</sup>。现在出现了许多种 CFD 通用软件<sup>[9]</sup>, 为分析模拟复杂流场提供了有力工具, 将使用 FLUENT 软件进行 GPCM 控制阀的内部流场分析。

### 2.1 计算模型

阀内流道的实际流动问题是十分复杂的, 在分析 GPCM 控制阀流场之前, 有必要假设如下。

- (1) 所研究的流体是牛顿流体。
- (2) 忽略质量力。
- (3) 流体密度不变。
- (4) 忽略温度和压力对流体粘度影响。

对于湍流的 CFD 模拟计算目前主要有以下几种常用模型<sup>[10,11]</sup>:  $k-\varepsilon$ (湍流动能-耗散率)模型, 代数应力(Algebraic stress model, ASM)模型, RSM

(Reynolds stress model)模型和 RNG(ReNormalisation group)  $k-\varepsilon$  模型。RNG  $k-\varepsilon$  模型是一个更一般、更基本的模型, 具有较好的计算精度与可靠性, 因此选用它做为流体计算的模型。

## 2.2 仿真计算结果

根据实际设计的 GPCM 控制阀内部流道, 建立了仿真计算模型, 划分网格如图 3 所示, 在仿真过程中使用了 FLUENT 软件。

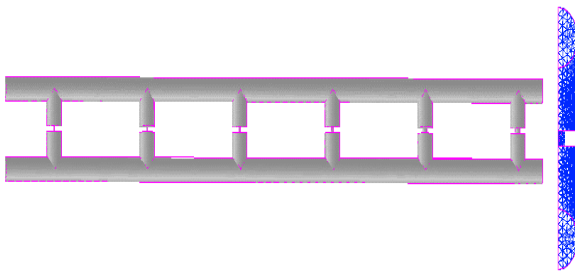


图3 仿真模型与网格划分

计算参数如下。

流道直径为 6 mm, 节流孔直径分别为 0.2 mm、0.3 mm、0.6 mm、1.0 mm、1.6 mm、2.0 mm, 按从小到大顺序由左到右排列, 出口绝对压力 0.1 MPa。

(1) 压力油入口在左侧。取进油口压力为 7 MPa, 对阀流场进行仿真。阀内流道里流体压力分布仿真结果如图 4 所示, 沿着油液流动的方向上, 压力总体上是逐渐降低的, 但在一些分支点处有不同变化, 如在第四个分流支路入口前后的压力增大。

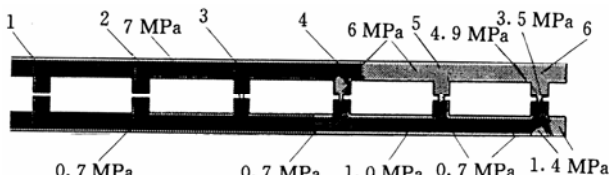
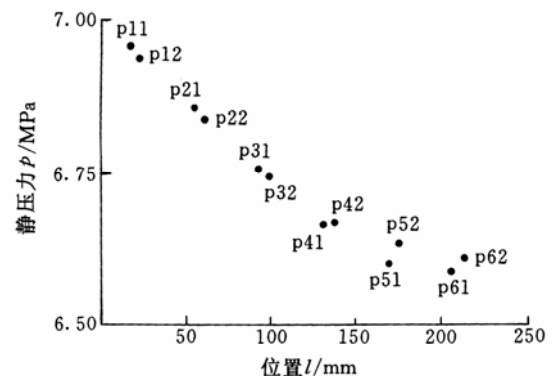


图4 阀内压力分布

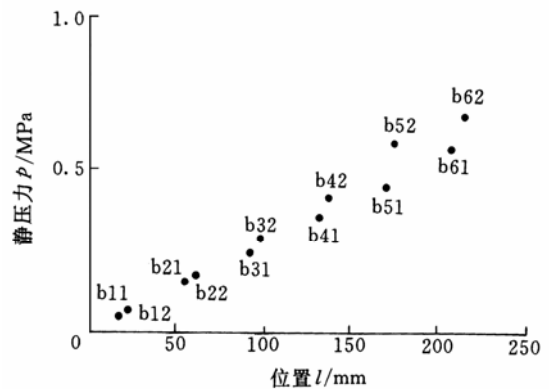
在压力油主流道上位于各分流支路前后分别取一点, 共得到六组点分别为表示 p11, p12, ..., p61、p62, 在各点处的压力如图 5a 所示。可以明显看出在第四、五和六分流处, 经过支路分流后, 主流道中的压力增大, 符合分流对压力影响理论分析的结果。由于前三个节流孔直径很小, 分流的流量较小, 因此对主流道的压力变化影响不大, 主要的影响来自沿程阻力损失, 压力呈线性规律地降低; 在流量较大的分流支路处, 主流道压力在经过分流后有明显的增加, 如图 5a 中的第五支路处点 p52 的压力值大于点 p51 的压力值。而在分流流量较小时, 由于分流引起的压力变化不明显, 此时压降主要为沿程阻力损失引起, 仿真结果表现为分流前的

压力比分流后的压力低, 如图 5a 中的点 p11 和点 p12。

同样在回流主流道上的六个汇流支路附近取六组点, 按从左到右顺序分别为 b11, b12, ..., b61, b62, 各点的压力如图 5b 所示, 此时油液流动方向为从右至左。在流量较大的汇流处, 压力降低很明显, 如图 5b 中第五个汇流支路前后的点 b52 处的压力值很明显比 b51 点处的压力值小, 而在小流量的汇流处, 由于汇流引起的压力变化不明显, 此时压降主要为沿程阻力损失引起, 仿真结果表现为汇流前的压力比汇流后的压力高, 如图 5b 中的点 b12 和 b11。



(a) 主进油流道分流前后压力变化图



(b) 主回油流道汇流点前后压力变化图

图5 压力油入口在左侧时 GPCM 控制阀内压力变化图

(2) 压力油入口在右侧。改变进油口方向, 将进油口和出油口均置于右侧靠近最大节流基元位置处, 进行计算仿真。阀内流道里流体压力分布仿真结果如图 6 所示, 与图 5 相比较, 在整个阀内流道上无论是压力油主流道还是回油主流道上的压力分布比较均匀, 变化较小, 可以使阀的节流控制性能得到改善。主进油流道在分流前后的压力变化如图 6a 所示, 主回油流道在汇流前后的压力变化如图 6b 所示。由于第一个分流的流量最大, 分流后压力有较大增加, 其他分流点处的压力变化较小, 且各点压力值基本保持一致。

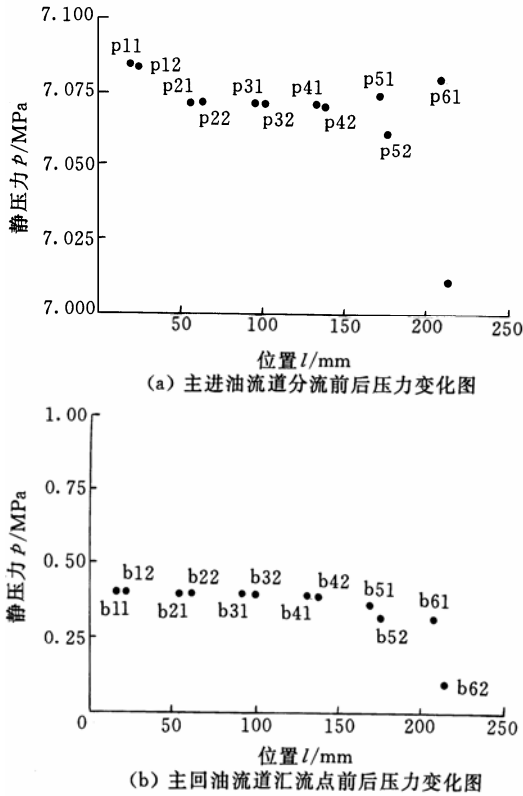


图 6 压力油入口在右侧时 GPCM 控制阀内压力变化图

由仿真结果可以看出，比较阀的压力油口两种放置方案，可看出将压力油的进油口设计靠近最大流量控制基元一侧，可以使各流量控制基元的节流口的两端压降较一致，为流量的准确控制提供了保证。

### 3 GPCM 阀性能试验

#### 3.1 GPCM 控制阀设计

GPCM 控制阀构成的液压伺服系统采用计算机进行实时控制，计算机的每一路数字输出接口一般为八位，因此充分利用输出接口位数，设计出 GPCM 控制阀试验模型，它由一个三位四通电磁换向阀基元与六个流量控制阀基元组成，它们集成到了一个阀体内，通过内部通道连接，可以有效地减小体积，简化连接结构。实际控制流量的基元为六个，可以得到 $(2^6-1)$ 种流量组合。当然 GPCM 控制阀的位数也可以根据需要大于或小于数字输出接口的位数。

#### 3.2 阀性能试验

在浙江大学流体传动及控制国家重点实验室电液比例控制液压元件测试平台上进行了试验研究。试验台简化液压系统原理图如图 7 所示，它可以提供压力为 35 MPa，流量为 100 L/min 稳定的压力油源。

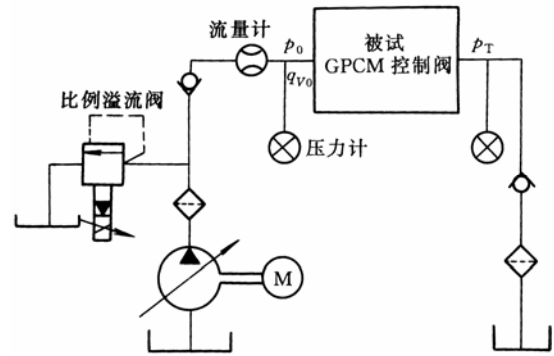


图 7 测试液压系统原理图

对阀进行了稳态控制特性的试验，控制输入电压信号经编码变换后，转换为脉冲输出值，控制 GPCM 控制阀相应的个基元阀动作，得到不同的组合控制流量。进行 PCM 控制阀性能试验时，各节流孔的面积大致按二进制比例选取，各节流孔的直径参数： $d_0=0.2\text{ mm}$ ， $d_1=0.3\text{ mm}$ ， $d_2=0.4\text{ mm}$ ， $d_3=0.6\text{ mm}$ ， $d_4=0.8\text{ mm}$ ， $d_5=1.1\text{ mm}$ 。

改变编码规律，采用广义脉码调制时，取各节流孔的直径参数： $d_0=0.2\text{ mm}$ ， $d_1=0.3\text{ mm}$ ， $d_2=0.6\text{ mm}$ ， $d_3=1.0\text{ mm}$ ， $d_4=1.6\text{ mm}$ ， $d_5=2.0\text{ mm}$ 。分别调整系统压力为 3 MPa、7 MPa 进行试验，试验时油温为 18 °C，试验结果如图 8 所示。

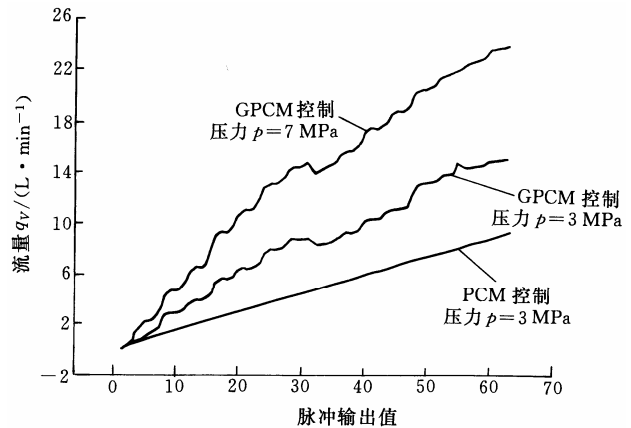


图 8 GPCM 控制阀压力—流量曲线

由试验结果可以看出，脉码调制方式下，阀的流量与脉冲编码值近似为比例关系，但阀总输出流量较小。采用了广义脉码调制方式后，与脉码调制控制相比，阀的输出流量得到了极大的提高，流量增大约 2 倍，表明广义脉码调制在保持阀最小输出流量不变的前提下，具有比脉码调制更大的调速范围，GPCM 控制阀的输出流量与脉冲编码输入控制信号表现出一种近似的变比例增益关系。由于所设计的 GPCM 控制阀流量较小，受到传感器的检测精度限制，特别是在小流量输出时，流量变化极小的情况下读数相对误差就很大了，出现了在增大节流面积时传感器仪表显示的输出流量值反而有所降低

的情况,但从试验曲线可以看出,在压力一定的条件下,流量的总体趋势是上升的。

## 4 结 论

(1) 在不考虑沿程阻力损失时,GPCM 控制阀内部流道上的压力在经过分流支路时会增大,而在经过汇流支路时压力会降低,增大与减少的数值与分流流量有关。

(2) 仿真结果表明,设计 GPCM 控制阀时,将压力油入口安排靠近最大流量控制基元一侧时,可以使各流量控制基元的节流口的两端压降较一致,为流量的准确控制提供了保证。

(3) 样阀试验结果较符合理论分析所得的结论,在系统压力一定的条件下,阀的流量增益为变增益,当小流量时增益较小,大流量时增益变大。

### 参 考 文 献

- 1 Liu R, Wang X Y, Tao G L, et al. Theoretical and experimental study on hydraulic servo position control system with generalization pulse code modulation control. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Fluid Power Transmission and Control, Hangzhou, China, 2001: 176~179
- 2 刘荣.广义脉码调制液压伺服控制的理论和应用研究:[博士学位论文].杭州:浙江大学,2003
- 3 高殿荣,王益群.液压集成块内流道流场数值计算与分析.机床与液压,2001(6): 35~35
- 4 Kubo T, Ueda T. On the characterization of divided flow and confluent flow in headers. Bulletin of JSME, 1969, 12 (52): 802~809
- 5 McNown J S. Mechanics of manifold flow. Transaction of the ASCE, 1954, 119: 1 103~1 142
- 6 Scott T J. Analysis of manifold fluid flow networks for air and liquid flow-through modular electronics. In: Seventeenth IEEE SEMI-THERM Symposium, 2001: 233~243
- 7 John D, Anderson, J R. Computational Fluid Dynamics: the Basics with Applications. McGraw-Hill Companies, Inc, 2003
- 8 Tayfun E T. CFD methods for three-dimensional computation of complex flow problem. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999 (81): 97~116
- 9 姚征,陈康民. CFD 通用软件综述. 上海理工大学学报, 2002, 24(2): 137~144
- 10 蒋莉,王少平,沈孟育. 应用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模式数值模拟 900 弯曲槽道内的湍流流动. 水动力学研究与进展 (A 辑), 1998, 13(1): 8~13
- 11 彭维民,应纯同,曾实. 涡管分离器流场的数值模拟及试验研究. 机械工程学报, 2002, 38(2): 141~144

## SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY ON FLOW FIELD OF GALLERY OF GPCM CONTROL VALVE

Liu Rong Wang Xuanyin

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** The generalized pulse code module (GPCM) control valve is a type of combination valve, and each flow control unit is connected together by mono-block. To precisely control output flow rate of GPCM valve, it is essential to study the characteristic of fluid in flow path of integral block. The relation between pressure and flow rate in GPCM control valve is studied, and the numerical simulation is carried out. The regularity about pressure distribution and unit flow rate of GPCM valve is achieved. It is useful to optimize the structure of GPCM valve, and make the GPCM valve has precision for flow control.

**Key words:** GPCM control valve Flow path Simulation

作者简介: 刘荣,男,1972 年出生,博士后。主要从事电液伺服控制系统的研究。

E-mail: liur@zju.edu.cn