

# 流量控制式 ECHPS 系统转阀结构参数优化设计

郭晓林 季学武 陈奎元

**【摘要】** 在流量控制式电控液压助力转向系统(ECHPS)中,转阀结构参数对系统的可变助力特性有重要的影响。应用液阻网络理论对系统的等效流通面积和助力特性进行了分析。建立了转阀阀口流通面积与转阀主要结构设计参数(小坡口宽度、小坡口圆弧偏心距、阀芯键宽、小坡口轴向长度)之间的数学关系。对转阀的主要结构参数进行了优化设计,优化前为 0.9 mm、10 mm、5.76 mm 和 11 mm,优化后为 1.115 mm、4.626 mm、5.652 mm 和 4.499 mm。仿真计算结果表明优化后可变助力特性范围由 1.2 升为 3,低速转向时最大手力达到了 4 N·m。

**关键词:** 电控液压助力转向 转阀 助力特性 优化

**中图分类号:** U463.4; TH137.52<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

## Parameter Optimization of Rotary Valve in the Flow Control Type ECHPS System

Guo Xiaolin<sup>1,2</sup> Ji Xuewu<sup>2</sup> Chen Kuiyuan<sup>2</sup>

(1. Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

### Abstract

The rotary valve parameters have significant influences on the assist effort characteristics of the flow control type electronic controlled hydraulic power steering (ECHPS) system. The calculating procedures of the equivalent flow area and assist effort characteristics of a flow control type ECHPS system were analyzed using the principles of hydraulic resistance networks. The mathematical relations between the orifice area of the rotary valve and the configurable design parameters (the metering edge width, the metering edge eccentric distance, the flange width and the slot length of the input shaft) were deducted. Subsequently, the optimum parameters of the rotary valve were obtained by optimization design technique. The values of these parameters were optimized from 0.9 mm, 10 mm, 5.76 mm and 11 mm to 1.115 mm, 4.626 mm, 5.652 mm and 4.499 mm. The numerical simulation results show that the alterable assist effort range is increased from 1.2 to 3, and the maximal steering wheel force is 4 N·m in low speed.

**Key words** Electronic controlled hydraulic power steering, Rotary valve, Assist effort characteristic, Optimization

### 引言

电控液压助力转向系统(ECHPS)可以分为流量控制式、压力控制式、反力控制式及阀特性控制式<sup>[1]</sup>,其中流量控制式 ECHPS 是在传统的液助力

力转向系统的基础上,由附加电液控制装置改变通过转阀的流量,进而改变助力油缸两腔的压差来实现可变助力特性。流量控制式 ECHPS 对原有动力转向器改动较小,结构简单,技术风险小,成本较低。目前常见的流量控制式 ECHPS 有旁通流量式

收稿日期: 2007-10-22

郭晓林 装甲兵工程学院机械工程系 讲师 博士后(清华大学), 100072 北京市

季学武 清华大学汽车工程系 副教授, 100084 北京市

陈奎元 清华大学汽车工程系 教授

ECHPS 系统、电子可变量孔(EVO)助力转向系统和电动液助力转向系统(EHPS)。

液压助力转向系统转阀的结构参数是在系统流量恒定的条件下设计的,其助力特性的设计折衷考虑了低速转向轻便性和高速行驶的稳定性,且在使用过程中不能改变。按照这种传统方法所设计的转阀,并不适用于流量控制式 ECHPS 系统。

国内学者针对不同类型的转阀阀口型式,研究了转阀阀口通流面积与转阀的结构设计参数之间的函数关系。并且以此为基础,对液助力转向系统的静态和动态特性进行了分析<sup>[2~4]</sup>。但是这些研究都是以传统的 HPS 系统为研究对象,涉及 ECHPS 系统转阀结构参数设计方法的文献很少。由于技术保密的原因,国外相关的文献也较少涉及这方面的具体内容。

本文对一种典型的旁通流量式 ECHPS 系统进行分析,根据 ECHPS 系统可变助力特性的基本技术要求,研究转阀主要结构参数的优化设计方法。

## 1 旁通流量式 ECHPS 系统的助力特性

图 1 为一种典型的旁通流量式 ECHPS 系统。它在传统的商用车循环球动力转向器的基础上,附加了一个与原来的动力转向器并联的旁通支路。在旁通支路上装有一个电磁流量控制阀。系统控制器根据车速信号来调节流量控制阀的开度,从而控制通过转阀的流量,改变助力油缸两腔的压差。

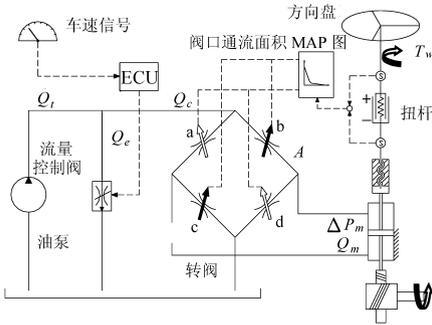


图 1 旁通流量式 ECHPS 系统原理图

Fig. 1 Principle of the ECHPS system

该系统中的转阀为常见的六槽结构,从原理上可以表示为 3 个等价的惠斯通桥组成的并联结构(为了简单起见,在图 1 中仅用 1 个惠斯通桥来表示)。转向过程中,在驾驶员施加在方向盘上的力矩  $T_w$  作用下,扭杆产生变形,使得转阀的阀芯和阀套之间产生一个相对转角  $\theta$ 。阀芯和阀套的相对转动使惠斯通桥路上各个阀口的通流面积发生变化。其中阀口 b 和 c 上标出的实心箭头表示该阀口的通流面积(以  $A$  表示)随相对转角的增加而减小,而阀口

a 和 d 上标出的空心箭头则表示该阀口的通流面积随相对转角的增加而增大。通流面积逐渐减小的阀口的节流作用使助力油缸两腔的压差  $\Delta p_m$  发生改变。这一压差作用在齿条活塞的两端,起助力作用。

如果忽略通流面积逐渐增大的阀口的节流作用,则该转阀可进一步简化为由 6 个通流面积为  $A$  的液阻并联所构成的液阻网络。根据液阻网络系统学的基本理论<sup>[5]</sup>,可以得到其等效通流面积为  $6A$ 。假设流体的体积弹性模量为常数,并且通过助力油缸的流量  $Q_m = 0$ ,则该系统的压力流量特性可以表示为

$$\Delta p_m = \frac{\rho Q_c^2}{2C_d^2(6A)^2} \quad (1)$$

式中  $Q_c$ ——通过转阀的流量

$\rho$ ——油液密度  $C_d$ ——流量系数

假设阀口通流面积  $A$  与转向盘转矩  $T_w$  之间的函数关系为  $A = f_A(T_w)$ ,按照汽车行业标准的有关规定<sup>[6]</sup>,该系统的静态助力特性计算公式为

$$\Delta p_m = \frac{\rho Q_c^2}{2C_d^2(6f_A(T_w))^2} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,  $\Delta p_m$  与通过转阀的流量  $Q_c$  有关。在旁通流量式 ECHPS 系统中,  $Q_c$  与油泵流量  $Q_t$ 、旁通流量  $Q_e$  关系为  $Q_c = Q_t - Q_e$ 。可见,通过改变旁通流量,可以改变系统的助力特性。在流量  $Q_c$  一定的情况下,系统的助力特性只与转阀阀口的通流面积函数  $f_A(T_w)$  有关。

## 2 转阀结构分析与通流面积函数的计算

转向盘转矩  $T_w$  与转阀阀芯、阀套之间的相对转角  $\theta$  成正比。而转阀阀口的通流面积与相对转角的函数关系  $A = f(\theta)$  可以根据转阀的结构参数得到。图 2 是液压动力转向器中常用的带弧形小坡口转阀的结构示意图。

这种类型的转阀阀口主要设计参数有:阀芯半径  $R_{flg}$ , 阀芯键宽  $D_t$ , 阀套槽宽  $D_c$ , 小坡口圆弧偏心距  $E_{cc}$ , 小坡口宽度  $W_{xpk}$ , 阀套槽轴向长度  $W_1$ , 小坡口轴向长度  $W_2$ 。

定义  $\alpha$  为线段  $OD$  和  $OE$  之间夹角,  $\beta$  为线段  $OD$  和  $OF$  之间夹角,  $\gamma$  为线段  $OD$  和  $OB$  之间夹角,  $\delta$  为线段  $OD$  和  $OC$  之间夹角,  $\epsilon$  为线段  $OD$  和  $OA$  之间夹角,  $\lambda$  为线段  $OD$  和  $OC'$  之间夹角。根据图 2 中的几何关系,可以得到计算公式

$$\alpha = \pi/n \quad (3)$$

式中  $n$ ——转阀槽数,取  $n = 6$

$$R_{xpk} = \sqrt{R_{flg}^2 + E_{cc}^2 - 2R_{flg}E_{cc}\cos(\pi + \beta - \alpha)} \quad (4)$$

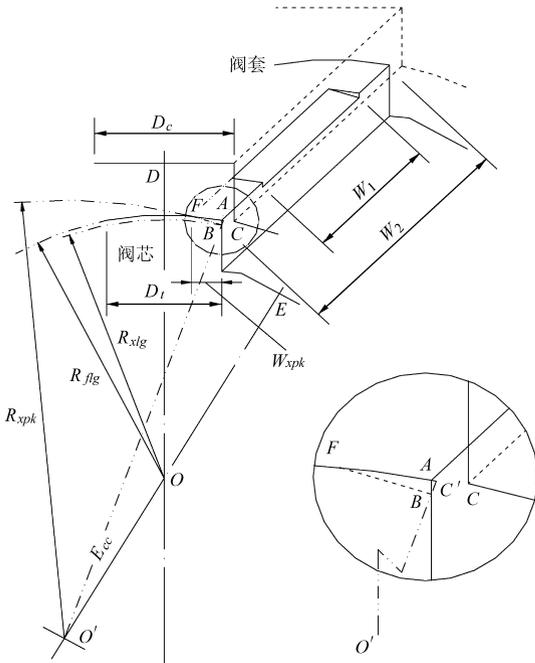


图2 转阀结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the rotary valve

式中  $R_{xpk}$ ——小坡口圆弧半径

$$R_{xlg} = \sqrt{\left(\frac{D_t}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_t}{2 \tan(\arcsin \frac{P_1}{P_2})} + P_2 \cos P_3 - \sqrt{E_{cc}^2 - P_1^2}\right)^2} \quad (5)$$

式中  $R_{xlg}$ ——小坡口棱边顶点  $B$  的轨迹圆半径  
变量  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  的定义为

$$P_1 = E_{cc} \sin \alpha \quad (6)$$

$$P_2 = \frac{E_{cc} R_{xpk} \sin \alpha}{\frac{D_t}{2} + E_{cc} \sin \alpha} \quad (7)$$

$$P_3 = \arcsin \frac{P_1}{P_2} \quad (8)$$

$$\gamma = \arcsin \frac{D_t}{2R_{xlg}} \quad (9)$$

$$\delta = \arcsin \frac{D_c}{2R_{flg}} \quad (10)$$

$$\epsilon = \arcsin \frac{D_t}{R_{flg}} \quad (11)$$

$$\lambda = \arcsin \frac{\sqrt{P_3^2 - 4P_4P_6 - P_5}}{2P_4R_{flg}} \quad (12)$$

其中  $P_4 = \left(\frac{P_2 \cos P_3}{P_1}\right)^2 + 1 \quad (13)$

$$P_5 = \frac{2(P_2 \cos P_3 - \sqrt{E_{cc}^2 - P_2^2})P_2 \cos P_3}{P_1} \quad (14)$$

$$P_6 = (P_2 \cos P_3 - \sqrt{E_{cc}^2 - P_2^2})^2 - R_{flg}^2 \quad (15)$$

根据式(3)~(15),可以计算出在某一相对转角

$\theta$  时,转阀阀口的节流宽度。

小坡口节流宽度为

$$d_1 = \begin{cases} \sqrt{R_{flg}^2 + R_{xlg}^2 - 2R_{flg}R_{xlg} \cos(\delta - \gamma - \theta)} & (0 \leq \theta < \delta - \lambda) \\ \sqrt{R_{flg}^2 + E_{cc}^2 - 2R_{flg}E_{cc} \cos(\alpha - \delta + \theta)} - R_{xpk} & (\delta - \lambda \leq \theta < \delta - \beta) \end{cases} \quad (16)$$

阀芯棱边的节流宽度为

$$d_2 = \frac{D_c}{2} - R_{flg} \sin(\epsilon + \theta) \quad (0 \leq \theta < \delta - \epsilon) \quad (17)$$

则转阀通流面积为

$$A = \begin{cases} W_2 d_1 + (W_1 - W_2) d_2 & (0 \leq \theta < \rho_1) \\ W_2 d_1 & (\rho_1 \leq \theta < \rho_2) \\ 0 & (\theta \geq \rho_2) \end{cases} \quad (18)$$

式中  $\rho_1 = \delta - \epsilon$ ,  $\rho_2 = \delta - \beta$ 。

获得了转阀阀口通流面积与主要设计参数之间的数学关系后,就可以利用式(2)计算流量控制式 ECHPS 系统的助力特性。

### 3 转阀结构参数的优化设计

在流量控制式 ECHPS 系统的设计过程中,首先必须要求系统具有较宽的可变助力特性范围,以便驾驶员能够在不同车速下获得明显的转向力感变化。流量控制式 ECHPS 系统的可变助力特性范围可以表示为

$$R_{force} = T_{Hmax} / T_{Lmax} \quad (19)$$

其中  $T_{Hmax}$  为流量  $Q_c$  最大时,助力特性曲线上的最高压力工作点  $p_{Hmax}$  所对应的方向盘转矩,该转矩是系统在最高车速时所能提供的方向盘转矩的最大值。 $T_{Lmax}$  为流量  $Q_c$  最小时,助力特性曲线上最大压力工作点  $p_{Lmax}$  所对应的方向盘转矩,该转矩是系统在最低车速时所能提供的方向盘转矩的最大值。

本文所设计的系统最高工作压力为 14 MPa,流量  $Q_c$  最大值为 16 L/min,最小值为 2 L/min。对可变助力特性的技术要求为  $T_{Hmax} = 12 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $T_{Lmax} = 4 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。由式(19)可知,该系统的可变助力特性范围  $R_{force} = 3$ 。

取  $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_d = 0.62$ ,根据式(1)可以计算出系统压力为 14 MPa 时,  $Q_c$  分别取 16 L/min 和 2 L/min 时,工作点  $p_{Hmax}$  和  $p_{Lmax}$  所对应的转阀阀口通流面积为  $0.406 \text{ mm}^2$  和  $0.051 \text{ mm}^2$ 。已知系统中的扭杆刚度  $k = 2.22 \text{ N}\cdot\text{m}/(^{\circ})$ ,则根据方向盘转矩  $T_{sw}$  与转阀相对转角  $\theta$  之间存在的线性关系(即

$T_{sw} = k\theta$ ), 可得工作点  $P_{H_{\max}}$  和  $P_{L_{\max}}$  所对应的相对转角  $\theta$  分别为  $1.802^\circ$  和  $5.405^\circ$ 。这样, 流量控制式 ECHPS 系统助力特性的技术要求就被转化为转阀阀口通流面积与相对转角函数关系曲线上的两个观测点  $P_1(1.802, 0.406)$  和  $P_2(5.405, 0.051)$ 。同时, 优化设计的任务也转变为通过搜索合适的转阀参数, 使阀口通流面积函数在给定观测点  $P_1$ 、 $P_2$  上的残差平方和达到最小。

在转阀阀口的主要结构参数中, 阀芯半径  $R_{flg}$  和阀套槽轴向长度  $W_1$  假定不变, 因为对这两个参数的修改会造成转阀结构较大的改变, 从而使 ECHPS 系统的成本提高。在其余参数中, 阀套槽宽  $D_c$  不是一个独立的参数, 它与阀芯槽肩宽  $D_t$  是相关的, 增加  $D_t$  与减小  $D_c$  对系统助力特性的影响效果是相同的, 所以该参数也暂时不考虑。这样, 考虑的可变参数就只有 4 个: 阀芯槽肩宽  $D_t$ 、小坡口圆弧偏心距  $E_{cc}$ 、小坡口宽度  $W_{xpk}$  和小坡口轴向长度  $W_2$ 。

选取设计变量为

$$\mathbf{X} = [W_{xpk}, E_{cc}, D_t, W_2]^T$$

目标函数为

$$F = \min_{\mathbf{X}} \sum (\text{FUN}(\mathbf{X}, \mathbf{X}_{\text{data}}) - \mathbf{Y}_{\text{data}})^2$$

其中, 观测点自变量向量  $\mathbf{X}_{\text{data}} = [1.802, 5.405]^T$ , 观测点因变量向量  $\mathbf{Y}_{\text{data}} = [0.406, 0.051]^T$ , FUN 为转阀阀口通流面积计算函数。

根据转阀的几何结构特点和加工工艺, 确定设计变量的下界约束为  $\mathbf{L} = [0, 0, 0, 0]^T$ , 上界约束为  $\mathbf{U} = [3.15, 14.25, 6.3, 20]^T$ 。

应用 Matlab 优化工具箱中的最小二乘曲线拟合函数 lsqcurvefit 求解优化数学模型。该函数调用的命令格式为  $\mathbf{X} = \text{lsqcurvefit}(@\text{FUN}, \mathbf{X}_0, \mathbf{X}_{\text{data}}, \mathbf{Y}_{\text{data}}, \mathbf{L}, \mathbf{U}, \text{options})$ 。计算过程中采用 Levenberg-Marquardt 算法, 设计变量和函数值的终止容限均设置为  $1 \times 10^{-4}$ 。转阀的其他设计参数取值为:  $R_{flg} = 14.25 \text{ mm}$ ,  $D_c = 6.3 \text{ mm}$ ,  $W_1 = 20 \text{ mm}$ 。优化计算的结果如表 1 所示。

表 1 转阀主要参数优化结果

Tab.1 Results of parameter optimization of rotary valve

参数	初始值	优化值
$W_{xpk}/\text{mm}$	0.9	1.115
$E_{cc}/\text{mm}$	10	4.626
$D_t/\text{mm}$	5.76	5.652
$W_2/\text{mm}$	11	4.499

## 4 可变助力特性的仿真分析

得到转阀的优化设计参数后, 即可计算阀口的通流面积曲线。再利用式(2)计算系统的助力特性。图 3 为优化前后的转阀阀口通流面积曲线。从图中可以看出, 转阀的通流面积曲线达到了优化设计的目标。

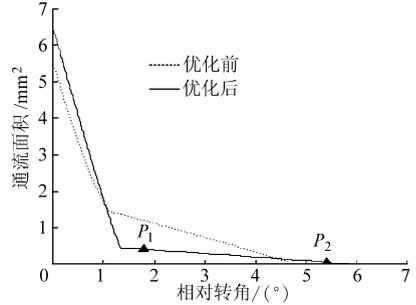


图 3 优化前后转阀阀口通流面积曲线

Fig.3 Orifice flow area curves of rotary valve

图 4 所示为转阀参数优化前后, 流量控制式 ECHPS 系统的可变助力特性。从图中可以看出, 优化前系统的可变助力特性范围很小,  $R_{\text{force}} = 1.2$ 。而且助力特性的分布范围也不合理, 主要反映在低速转向时的手力过大, 转向不轻便。优化后系统的助力特性完全达到了设计指标的要求, 可变助力特性范围  $R_{\text{force}} = 3$ , 即转向手力扩大了 3 倍。而且低速转向时的最大手力也达到了所要求的  $4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

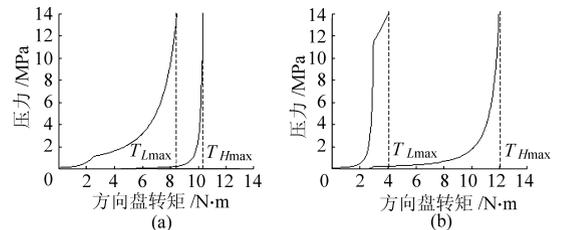


图 4 流量控制式 ECHPS 系统助力特性

Fig.4 Assist effort characteristics of the ECHPS system

(a) 优化前 (b) 优化后

## 5 结束语

在传统液压助力转向系统的基础上设计流量控制式 ECHPS 系统时, 为了获得理想的可变助力特性, 必须对原有转阀的结构参数进行重新设计。转阀结构参数主要影响转阀阀口通流面积曲线的形状。分析表明, 在优化模型建立的过程中, 助力特性的技术要求可以转化为转阀阀口通流面积函数与观测点之间的曲线拟合问题, 从而使优化问题得到简化。仿真计算结果说明, 用此方法计算所得到的转阀优化参数可以满足系统助力特性的技术要求。

(下转第 47 页)

## 参 考 文 献

- 1 李娜, 马晓茜, 赵增立, 等. 生物质气化与废弃物焚烧联合发电技术环境效益分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 121~124, 142.  
Li Na, Ma Xiaolian, Zhao Zengli, et al. Benefits of biomass gasification and waste incineration combined power technology on CO<sub>2</sub> reduction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 121~124, 142. (in Chinese)
- 2 Drift A, Boerrigter H. Entrained flow gasification of biomass, ash behaviour, feeding issues, and system analyses, ECN-C-04-039[R]. ECN, Petten, the Netherlands, 2004.
- 3 Brown A L, Dayton D C, Nimlos M R, et al. Design and characterization of an entrained flow reactor for the study of biomass pyrolysis chemistry at high heating rates[J]. Energy & Fuels, 2001, 15(5): 1 276~1 285.
- 4 Biagini E, Cioni M, Tognotti L. Development and characterization of a lab-scale entrained flow reactor for testing biomass fuels[J]. Fuel, 2005, 84(12~13): 1 524~1 534.
- 5 GB/T212—2001 煤的工艺分析方法[S].
- 6 孙亦祿. 煤中矿物杂质对锅炉的危害[M]. 北京: 水利水电出版社, 1994: 237.
- 7 Frank E Huggins, Deborah A Kosmack, et al. Correlation between ash-fusion temperatures and ternary equilibrium phase diagrams[J]. Fuel, 1981, 60(7): 577~584.
- 8 李宝霞, 张济宇. 煤灰渣熔融特性的研究进展[J]. 现代化工, 2005, 25(5): 22~26.  
Li Baoxia, Zhang Jiyu. Research progress of coal ash fusibility[J]. Modern Chemical Industry, 2005, 25(5): 22~26. (in Chinese)
- 9 Anthony H Clements, Leonard F Damiano, et al. The affect of calcium on the rate and products of steam gasification of char from low rank coal[J]. Fuel, 1998, 77(9~10): 1 017~1 020.

~~~~~  
(上接第 29 页)

## 参 考 文 献

- 1 王绍 ■, 夏群生, 李建秋. 汽车电子学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 2 蒋军, 王若平, 高翔, 等. 短切口旋转控制转阀特性的仿真研究[J]. 机床与液压, 2005(11): 68~69.  
Jiang Jun, Wang Ruoping, Gao Xiang, et al. The simulation research for the rotary valve of short cutting edge[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005(11): 68~69. (in Chinese)
- 3 张锋, 毕大宁. 转阀式动力转向器转阀刃口的计算与分析[J]. 汽车研究与开发, 1994(1): 40~45.
- 4 曾迺立, 刘嵘. 汽车动力转向器任意曲线切边矩形阀口压力静特性的计算分析[J]. 汽车技术, 2003(12): 14~16.  
Zeng Jiongli, Liu Rong. Calculation and analysis of static pressure characteristics at the arbitrary-curve-trimmed rectangular valve port of automotive power steering gear[J]. Automobile Technology, 2003(12): 14~16. (in Chinese)
- 5 胡燕平, 彭佑平, 吴根茂. 液阻网络系统学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- 6 QC/T306—1999 汽车动力转向控制阀总成台架试验方法[S].
- 7 毕大宁. 汽车转阀式动力转向器的设计与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- 8 高峰, 刘亚辉, 季学武, 等. 电控液压助力转向系统的初步匹配计算[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(5): 605~607.  
Gao Feng, Liu Yahui, Ji Xuewu, et al. Primary calculation of electronically controlled hydraulic power steering[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(5): 605~607. (in Chinese)
- 9 王其东, 姜武华, 陈无畏. 电动助力转向系统机械与控制参数集成优化[J]. 农业机械学报, 2006, 37(9): 1~4.  
Wang Qidong, Jiang Wuhua, Chen Wuwei. Study on integrated optimization for mechanical and control parameters of electric power steering system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 1~4. (in Chinese)