# 预应力钢丝缠绕缸体结构轻量化关键技术

李慧丽 郎利辉 焦 伟 苏怀忠

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

**摘 要**：针对等静压设备的预应力钢丝缠绕缸体结构的缠绕方法、强度和稳定性理论，定义了一种基于等剪应力缠绕的预应力大型结构轻量化设计模型. 结合工作内压为300 MPa、缸体内径为500 mm的缸体设计实例，利用多岛遗传算法成功地得到了最优化解. 质量由传统设计的9.03 t减轻到8.53 t，减少了5.5%. 经专家系统软件和有限元软件验证，方案符合结构强度、刚度条件，预紧态结构不屈服，设计不失稳，并满足内径尺寸大于500 mm等设计要求，方案可行. 分析表明，该优化模型合理，多岛遗传算法收敛效果好. 该方法适用于大吨位、超高温超高压等静压设备的缸体缠绕结构优化问题.

**关 键 词**：遗传算法；结构设计；等静压；轻量化结构；优化；专家系统；仿真

**中图分类号**：TU 122；TP 391

**文献标识码**：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)07-0899-05

# Technology of light-weight design for wire-winding prestressed cylinder structure

Li Huili Lang Lihui Jiao Wei Su Huaizhong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract**: Based on the iso-shear stress theory a light-weight wire-winding prestressed working cylinder for isostatic pressing equipment was designed through application of the multi-island genetic algorithm. A light-weight design model was defined. The maximum inner pressure in the cylinder was 300 MPa and the minimum inner diameter was 500 mm. Within these specifications the weight of the design was minimized. The weight of the conventional design is 9.03 tons, and the weight of the optimized design is 8.53 tons, corresponding to a 5.5% reduction. It was verified by an expert system and CAE software that the optimized cylinder has the necessary strength, rigidity and stability and that the inner diameter is greater than 500 mm after prestressed. As it was proved, the design is reasonable and the muti-island genetic algorithm is an structural optimization method which gives a fast convergence. This method can also solve the weight-optimization problems of isostatic pressing equipment for extra-high pressure.

**Key words**: genetic algorithms; structural design; hot isostatic pressing; light weight structures; optimization; expert systems; simulation

等静压设备多在超高温高压下工作且承载压力大(如“双两千”设备工作温度2 000 ℃，工作内压为$2\times10^8$ Pa；而大于$5\times10^4$ t的大规格大吨位设备的工作内径一般大于2 m)，恶劣的工作环境要求等静压设备工作缸容器设计综合考虑安全可靠、承载能力、疲劳、爆炸危险、加工制造等多方面因素. 目前，国内外制造厂家多采用预应力钢丝缠绕缸体，该结构具有承载能力大[1]、疲劳强度高、安全可靠无爆炸危险等优点[2]. 20世纪70年代，清华大学颜永年教授对预应力钢丝缠绕筒体进行

**收稿日期**：2008-06-19

**基金项目**：国防科工委“11.5”技改项目

**作者简介**：李慧丽(1979—)，女，河南禹州人，博士生，xuchanglhl@tom.com.

了诸多研究，为缠绕设计奠定了理论基础[3]，并采用复形法对超高压缸体优化设计[4]做出了创新性研究. 然而随着轴向承载力和工作内压的增加，保守的传统设计过于注重安全，材料未能充分利用，成本高，设备尺寸大，吨位重且结构粗笨，造成制造、安装、运输诸多不便. 因此，对预应力钢丝缠绕缸体结构优化设计和轻量化设计进行深入研究具有重要的理论意义和工程应用价值.

遗传算法(GA，Genetic Algorithm)是一种全局搜索优化方法，具有简单通用、鲁棒性强、适合于并行处理等特点[5]，已被广泛应用于求解工程优化问题. 本文针对等静压设备预应力工作缸体，结合等剪应力缠绕方法[6]，建立了面向质量最优的等剪应力设计结构优化模型. 综合考虑了等剪应力缠绕设计的多个约束条件，采用多岛遗传算法[7](MIGA，Multi Island Genetic Algorithm)为优化策略，结合实例进行等静压设备优化设计，并用CAE仿真等方法进行验证. 该算法提供了合理可靠的设计结果，有效减轻质量，并适用于大吨位、超高温超高压等静压设备的缸体优化问题.

## 1 预应力工作缸设计及其优化方法

### 1.1 等剪应力钢丝缠绕设计

预应力结构的基本思想是在工作缸内壁预先建立切向压应力(预应力)，与工作状态产生的拉应力叠加，减小或消除缸壁上的切向拉应力，使工作缸始终处于切向压应力或压应变状态，以提高液压缸的承载能力，发挥缸壁材料的强度潜力，提高抗疲劳性能. 预紧力的大小可以用内壁上切向预应力 $\sigma_{g,t,b}$ 与工作内压引起的切向拉应力 $\sigma_{p,t,b}$ 的绝对值比值 $\eta$ 表示，即

$$\sigma_{g,t,b} = -\eta\sigma_{p,t,b} \tag{1}$$

式中 $\eta$ 为预紧系数，它是预应力设计的一个重要参数.

在等张力缠绕的基础上，文献[8]提出了等切向应力法，1975年我国科研人员提出等剪应力缠绕理论[9]. 目前等剪应力缠绕方法已被广泛采用. 等剪应力缠绕就是使各层钢丝在合成状态下的剪切应力相等. 合成状态下，任意一层均有

$$\tau = \frac{[\sigma]'}{2} = \frac{\sigma_{tr} - \sigma_{rr}}{2} \tag{2}$$

考虑从钢丝半径 $r$ 到钢丝层外径 $r_o$ 的钢丝层的平衡(如图1)，有

$$\sigma_{rr} = -\frac{1}{r}\int_r^{r_o}\sigma_{tr}\,\mathrm{d}t \tag{3}$$

代入式(2)，解得

$$\sigma_{rr} = [\sigma]'\left(1+\ln\frac{r}{r_o}\right) \tag{4}$$

最终由方程

$$A + \frac{B}{r_j^2} = \ln\frac{r_o}{r_j}$$

解得芯筒外径 $r_j$，其中

$$A = \frac{1}{2[\sigma]'}\left(p - \frac{1-\eta}{\eta}[\sigma]\right)$$

$$B = \frac{1}{2[\sigma]'}\left(p + \frac{1-\eta}{\eta}[\sigma]\right)r_b^2$$

其中，$p$ 为工作内压；$r_b$ 为芯筒内径.

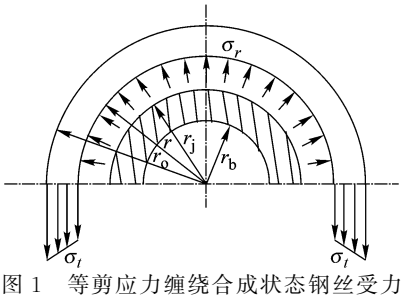


图1 等剪应力缠绕合成状态钢丝受力

### 1.2 优化方法

MIGA建立在传统GA基础上. MIGA不同于传统GA的特点是每个种群的个体被分成几个子群，这些子群称为“岛”，传统GA的所有操作分别在每个岛上进行，每个岛上选定的个体定期地迁移到另外岛上，然后继续进行传统GA操作[9]. MIGA进化流程如图2所示. 迁移过程由两个参数进行控制，分别为迁移间隔和迁移率，迁移间隔表示每次迁移的代数，迁移率决定了在一次迁移过程中每个岛上迁移的个体数量的百分比. MIGA中的迁移操作保持了优化解的多样性，提高了包含全局最优解的机会.

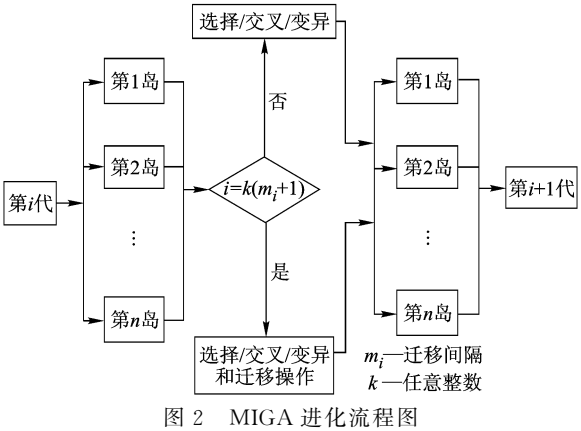


图2 MIGA进化流程图

本文中优化方法采用MIGA. 该算法以缸体径向几何设计参数为设计变量，以预应力结构总质量为目标函数. 优化的约束条件包括等剪应力缠绕、内壁收缩量、内壁预紧态不屈服、芯筒不失

稳等.

## 2　等剪力钢丝缠绕设计结构优化

### 2.1　优化模型

以预应力钢丝筒体结构总质量 $G$ 为目标函数,取设计变量 $x=\{x_1,x_2\}$,$x_1$ 为芯筒外径,$x_2$ 为钢丝外径.考虑预应力结构的强度、刚度和稳定性以及工作条件,假设芯筒和缠绕层的弹性常数相等,建立相应的数学模型.该模型适用于等静压设备及其它机械设备中采用等剪应力法缠绕的预应力钢丝筒体结构轻量化设计,具有通用性.

数学模型定义如下:

$$\min \quad G=f(x)$$

s.t:

$$g_1(x)=r_1-x_1\leqslant 0 \tag{5}$$

$$g_2(x)=x_1-x_2\leqslant 0 \tag{6}$$

$$g_3(x)=r_1\times\sqrt{\frac{[\sigma]+\eta\times p}{[\sigma]-\eta\times p}}-x_2\leqslant 0 \tag{7}$$

$$g_4(x)=\left(\frac{p-(1-\eta)[\sigma]}{2\eta[\sigma]}\right)+\left(\frac{p+(1-\eta)[\sigma]}{2\eta[\sigma]'}\right)\frac{r_1^2}{x_1^2}-\ln\frac{x_2}{x_1}\leqslant 0 \tag{8}$$

$$g_5(x)=[\sigma]-\frac{2Ex_1^2(x_1-r_1)^2}{(1-\mu^2)(x_1+r_1)(x_1+r_1)^3}\leqslant 0 \tag{9}$$

$$g_6(x)=r_g-r_1+r_1[\sigma]'\ln\frac{x_2}{x_1}-p\frac{2r_1^2(1-x_2^2)x_1^2}{Ex_1^2(x_2^2-r_1^2)(x_1^2-r_1^2)}\leqslant 0 \tag{10}$$

$$g_7(x)=\frac{2x_1^2}{x_1^2-r_1^2}[\sigma]'\ln\frac{x_2}{x_1}-p\frac{r_1^2(x_1^2-x_2^2)}{x_1^2(x_2^2-r_1^2)}\leqslant 0 \tag{11}$$

式中,$r_g$ 为芯筒工作内径;$r_1$ 为初始内径;$E$ 为弹性模量;$p$ 为工作内压;$[\sigma]$ 为芯筒许用应力;$[\sigma]'$ 为钢丝许用应力;$\mu$ 为泊松比;$\eta$ 为预紧系数;$f(x)$ 为总的质量约束;$g_1(x)$,$g_2(x)\leqslant 0$ 为芯筒外径、钢丝外径的几何关系约束;$g_3(x)\leqslant 0$ 为在预紧系数 $\eta$ 时的强度约束.通常预紧状态内层是危险的,式(1)中 $\sigma_{g,t,b}$ 应满足 Tresca 和 Mises 准则的强度条件,即 $\sigma_{g,t,b}\leqslant[\sigma]$,利用拉美公式即可推出 $g_3(x)$;$g_4(x)\leqslant 0$ 为等剪应力缠绕约束;$g_5(x)\leqslant 0$ 为芯筒承受外压稳定性约束,芯筒不失稳的极限外压应大于预紧完芯筒的实际外压;$g_6(x)\leqslant 0$ 为芯筒内径工作条件约束,初始加工内径 $r_1$ 减去预紧完的内层单边收缩量应该大于芯筒工作内径 $r_g$;$g_7(x)\leqslant 0$ 为预紧态芯筒内壁强度约束,芯筒预紧态的内层等效应力小于 $[\sigma]$.

### 2.2　优化计算与结果分析

根据性能指标及实际情况确定已知参数:芯筒长度 2 500 mm,内径 250 mm,工作内压 300 MPa,预紧系数 1.20,芯筒许用应力 680 MPa,芯筒弹性模量 205 GPa,泊松比 0.30.

设置群体大小为 20,交叉概率为 0.7,岛个数为 30,迁移代数为 40,迁移概率为 0.5,变异概率为 0.05.$x_1$ 范围为 250～500 mm,$x_2$ 范围为 250～800 mm.采用 MIGA 进行优化计算,总共耗时 30 min,循环迭代 24 000 次.优化设计得到的最优解为:$x_1=323$ mm,$x_2=452$ mm,$G=8\,530.16$ kg.优化算法的部分结果见图 3～图 6.图 3～图 5 为24 000次迭代过程中的预应力钢丝筒体结构总质量变化曲线图、芯筒外径变化曲线和钢丝外径变化曲线.图 6 为优化变量 $x_1$,$x_2$ 与目标函数质量 $G$ 的三维拓扑关系图,$x_1$ 和 $x_2$ 越小,质量值越小.取固定的 $x_1$ 值,$x_2$ 越大质量越大,变化趋势与实际设计相符.优化设计结果与传统设计比较,芯筒外径从 330 mm 减少到 323 mm,钢丝外径由 460 mm 减少到452 mm,质量从9 031.19 kg优化到了8 530.16 kg,减轻了 5.5%,具体数据见表 1.

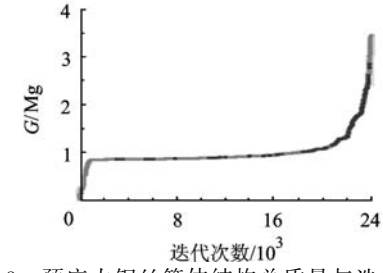

图 3　预应力钢丝筒体结构总质量与迭代次数

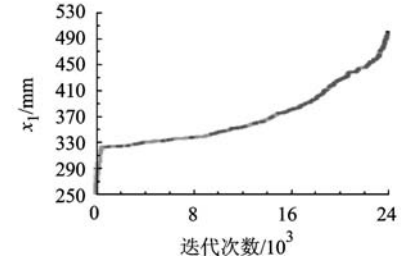

图 4　芯筒外径与迭代次数

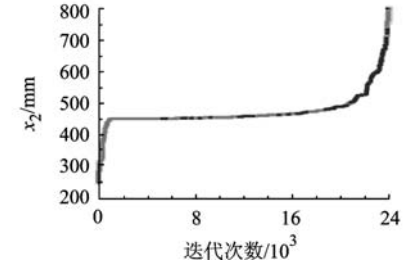

图 5　钢丝外径与迭代次数

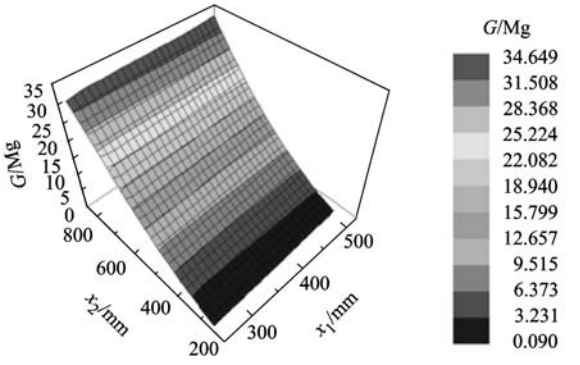


图 6 芯筒外径、钢丝外径与缸体质量的拓扑关系三维图

MIGA 优化设计和传统实际设计变量代入质量优化目标函数和各约束函数，相应的函数值见表 2. 对于 MIGA 优化设计，约束函数 $g(x)$ 均小于 0，满足约束条件，设计方案可行，且质量减小. 而迭代过程中的质量小于 8530.2 kg 的方案 3，其质量值为 8457.3 kg，但不可行，因为 $g_7(x)>0$ 表明芯筒的内层预紧态等效应力已经超过了芯筒的许用应力，不满足约束条件. 结果表明：MIGA 方案是可行方案中的质量最小解，证明了优化结果的有效性.

**表 1 优化设计方案与传统设计结果比较表**

| 方法类型 | 优化变量 | | | | 实际预紧系数 | 半径单边收缩量/mm | $G$/kg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 芯筒内径 $r_1$/mm | 芯筒外径 $x_1$/mm | 钢丝外径 $x_2$/mm | 钢丝层数 | | | |
| MIGA | 251 | 323 | 452 | 130 | 1.19 | 0.84 | 8518.16 |
| 传统设计 | 251 | 330 | 460 | 130 | 1.21 | 0.91 | 9031.19 |

**表 2 面向质量优化的各方案的目标函数与约束函数值**

| 方 案 | $x_1$/mm | $x_2$/mm | $G$/kg | $g_1(x)$/mm | $g_2(x)$/mm | $g_3(x)$/mm | $g_4(x)$ | $g_5(x)$/MPa | $g_6(x)$/mm | $g_7(x)$/MPa | 可行性 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MIGA | 323 | 452 | 8530.2 | −72.36 | −129.52 | −0.4834 | −3.35 | −1587.2 | −0.07 | −0.08 | 可行 |
| 传统设计 | 330 | 462 | 9029.2 | −79 | −132 | −9.5 | −0.002 | −2007.32 | −0.85 | −6.9 | 可行 |
| 方案 3 | 313 | 452 | 8457.3 | −62 | −139 | 0.49 | −0.03 | −996.9 | 0.06 | 112.6 | 不可行 |

## 2.3 方案验证分析

为验证 MIGA 方案的可行性和模型的可靠性，本文还对其进行了等剪力缠绕计算和 CAE 仿真分析. 利用等静压装备设计专家系统软件计算可得，实际预紧系数为 1.19，缸体预紧后内径大于 250 mm，满足设计要求，并且系统设计不失稳，方案可行. 计算出的预紧态芯筒与钢丝表层的等效应力值见表 3. 可见，传统设计的内层等效压应力为 663.83 MPa，小于许用应力，方案可行；MIGA 优化方案的内层等效压应力为 676.18 MPa，方案可行；而方案 3 的内层等效应力 726.91 MPa，已经超过了许用应力值 680 MPa，质量小于最优方案但不可行.

**表 3 面向质量优化的各方案结构表面等效应力** MPa

| 方 案 | 芯筒内层等效应力 | 芯筒外层等效应力 | 钢丝内层等效应力 | 钢丝外层等效应力 |
|---|---|---|---|---|
| MIGA | 676.18 | 408.32 | 256.14 | 512.49 |
| 传统设计 | 663.83 | 381.05 | 291.79 | 529.50 |
| 方案 3 | 726.91 | 450.04 | 243.97 | 514.19 |

取芯筒的 1/4 单元建立有限元分析模型，利用 Marc 软件进行仿真，得到预紧态芯筒等效应力分布见图 7. 取中间截面的节点处的等效应力分布数值如图 8，可以看到芯筒的内层等效应力值为 659～673 MPa 之间，设计满足强度条件. 同时变形分布和内层最大变形量也满足设计要求，设计方案可行.

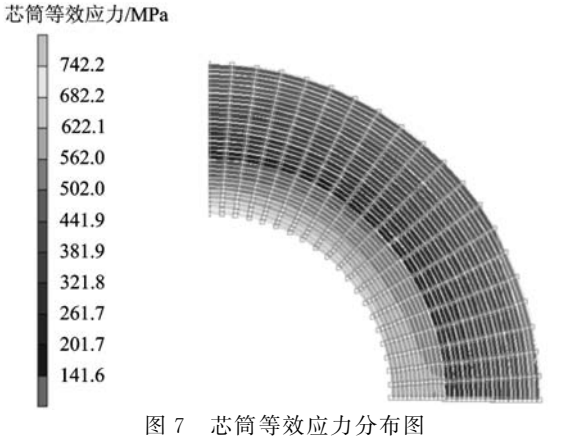


图 7 芯筒等效应力分布图

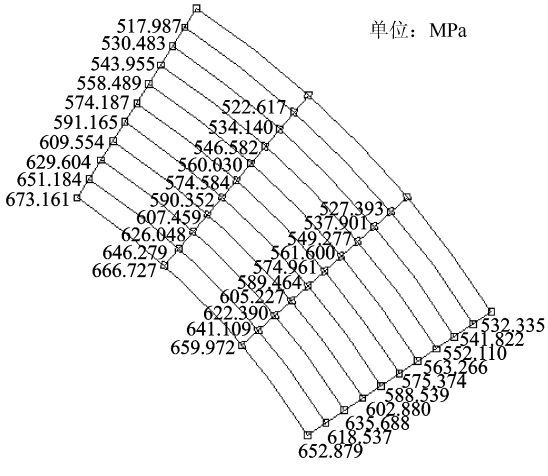


图 8 局部等效应力分布数值

## 3 结　论

1) 假设芯筒和缠绕层的弹性常数相等,提出了采用等剪应力法缠绕的预应力钢丝缠绕缸体结构轻量化设计数学模型,具有通用性.尤其对研究缸径大于 2 m,质量大于 5 万吨的大吨位等静压设备工作缸轻量化设计具有重要的参考价值.

2) 结合预应力钢丝缠绕缸体结构优化设计,研究了 MIGA 及其关键技术,成功地求解了以轻量化为目标的优化问题的最优解集合.分析表明:MIGA 是一种高效的结构优化方法.

3) 得出了一组能满足多性能较优要求尺寸优化参数,与传统的设计信息相比,有效减轻质量,同时不降低结构强度、刚度和稳定性,尺寸逐步达到最优.以缸径 250 mm,内压 300 MPa 的缸体为例,利用该优化算法,质量由 9.03 t 减轻到 8.53 t,减轻了 5.5%.验证结果表明:模型合理有效,设计结果安全可靠.

### 参考文献(References)


[1] 林峰,颜永年.吴任东,等. 现代重型模锻液压机的关键技术[J]. 机械工程学报,2006,42(3):9－13
Lin Feng, Yan Yongnian, Wu Rendong, et al. Key technologies of modern heavy die forging press [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(3):9－13 (in Chinese)

[2] 颜永年,俞新陆. 机械设计中的预应力结构[M]. 北京:机械工业出版社,1989:10－11
Yan Yongnian, Yu Xinlu. The prestressed structure in the mechanical design [M]. Beijing: China Machine Press, 1989:10－11 (in Chinese)

[3] 颜永年.预应力钢丝缠绕超高压筒体的应力及变形分析[J].清华大学学报:自然科学版,1978(2):105－118
Yan Yongnian. An analysis of stresses and deformations in a wire-winding prestressed cylinder under high internal pressure [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1978(2):105－118(in Chinese)

[4] 颜永年,俞新陆,郭和德.采用复形法的超高压筒体的优化设计[J].清华大学学报:自然科学版,1982,22(3): 102－119
Yan Yongnian, Yu Xinlu, Guo Hede. The optimum design of cylinder under superhigh pressure by utilizing the complex method [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,1982,22(3):102－119(in Chinese)

[5] Kwon Y, Kwon S, Jin S, et al. Convergence enhanced genetic algorithm with successive zooming method for solving continuous optimization problems [J]. Computers and Structures,2003,81(17):1715－ 1725

[6] 马福康. 等静压技术[M]. 北京:冶金工业出版社,1992:367－380
Ma Fukang. Isostatic pressing technology[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,1992:367－380(in Chinese)

[7] 玄光男,程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:北京大学出版社,2006: 150－155
Xuan Guangnan, Cheng Runwei. Genetic algorithm & engineering optimization[M]. Beijing:Peking University Press, 2006:150－155 (in Chinese)

[8] Comstock C W. Some considerations in the design of thick_wall pressure cylinder [J]. Trans Am Inst Chem Engrs, 1943(39):299

[9] 颜永年.预应力钢丝缠绕筒体的设计计算[J].清华大学学报:自然科学版,1978(4): 86－108
Yongnian Yan. Design of wire-winding prestressed cylinder under high internal pressure[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,1978(4): 86－108 (in Chinese)

[10] 孟祥众,石秀华,杜向党,等. 基于遗传算法的振动主动控制优化方法研究[J].计算机测量与控制,2008,16(1):75
Meng Xiangzhong, Shi Xiuhua, Du Xiangdang, et al. Research of active vibration control optimization basedon genetic algorithm [J]. Computer Measurement & Control, 2008,16(1):75 (in Chinese)


(责任编辑:文丽芳)