

DOI: 10.7652/xjtub201405012

双定子多作用力偶液压马达的原理分析

闻德生, 周瑞彬, 高俊峰, 刘忠迅, 刘巧燕, 吕建森
(燕山大学机械工程学院, 066004, 河北秦皇岛)

摘要: 针对液压马达径向受力不平衡的问题,提出了一种多工况下双定子多作用力偶液压马达,并采用高次曲线设计了四作用力偶液压马达内、外定子的轮廓线。单作用的定子轮廓线由大、小两段圆弧和两段过渡曲线组成;多作用力偶液压马达的内、外定子轮廓线由多个等宽、相似的单作用定子轮廓线组成,该轮廓线光滑且完全封闭。通过液压马达排量的计算和分析发现:多作用力偶液压马达的排量主要取决于内、外定子轮廓线的半径,定子环的有效宽度,滚柱连杆组的数目,连杆的厚度和马达在一个工作周期内密闭容积吸油及排油的次数。在输入流量不变的情况下,通过改变液压马达的连接方式可以实现内马达单独工作,外马达单独工作,内、外马达同时工作,以及内、外马达差动工作。

关键词: 力偶液压马达;双定子;多作用;定子曲线

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)05-0067-05

Principle of Double-Stator Multi-Acting Couple Hydraulic Motor

WEN Desheng, ZHOU Ruibin, GAO Junfeng, LIU Zhongxun, LIU Qiaoyan, LÜ Jiansen
(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: Aiming at unbalanced radial force of hydraulic motor, a double-stator multi-acting couple hydraulic motor under various operating conditions is proposed, and the inner and outer stator contours of a four-acting couple hydraulic motor are designed with higher order curves. The stator contour of a single-acting contains long and short circular arcs and two transition curves, and the inner and outer stator contours of a double-stator multi-acting couple hydraulic motor are made up by several similar single-role stator contour lines, which are smooth and completely closed. It is found that the calculated displacement of the double-stator multi-acting couple hydraulic motor usually depends on the inner and outer contour radius, effective width of stator ring, number of roller group, thickness of connecting rod and times of closed volume oil suction/discharge during operating period. For unchanged input flow, the inner motor and outer motor can operate separately, simultaneously or differently by adjusting the connecting modes.

Keywords: couple hydraulic motor; double-stator; multi-acting; stator curve

液压传动系统中的液压马达是把由液压泵提供的液压能转换成机械能的转换装置,其在工作介质的作用下输出转矩和转速。现阶段的液压马达工作主要是通过高压油液区域内产生的液压力与转子中心力矩的不平衡实现的^[1]。随着液压传动逐步向高

压化发展,液压马达的径向受力不平衡将造成液压马达轴承径向受力非常大,致使轴承的实际使用寿命缩短,从而导致液压马达使用寿命受到影响。本文以转子受力主矢为0,结合等宽曲线双定子多速液压马达^[2],设计出双定子多作用力偶液压马达。

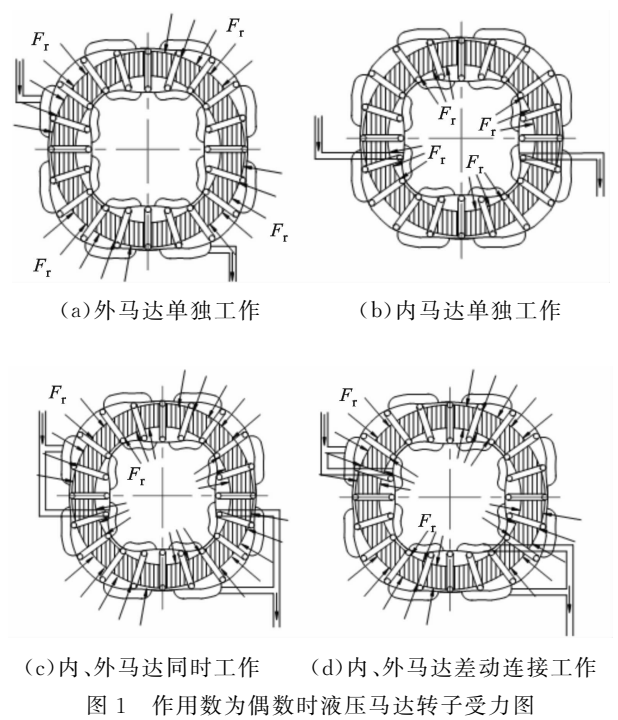
收稿日期: 2013-09-03。 作者简介: 闻德生(1954—),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975246)。

网络出版时间: 2014-02-26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140226.1159.019.html>

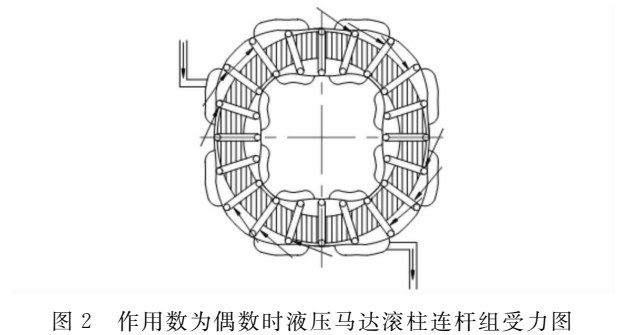
1 力偶液压马达的定义

等宽双定子液压马达在一个工作周期内密闭容积吸油及排油的次数(简称作用数)可以是多次,当作用数为偶数时,进油口中心对称布置,在内、外马达单独工作(工况 1、2),内、外马达同时工作(工况 3)和差动连接工作(工况 4)这 4 种工况下^[3],内马达或外马达的所有进油口同时输入高压油,此时液压马达转子受到的液压力如图 1 所示。外马达单独工作时,转子受到的径向力方向指向圆心,且以油口为中心对称分布,相同直径下径向力大小相等、方向相反、合力为 0(见图 1a),其他 3 种工况下,转子的径向合力为 0(见图 1b~1d)。



在液压马达的高压腔中,滚柱连杆伸出的长度不同,高压油液对滚柱连杆组的液压力有所不同。外马达单独工作时高压油液对滚柱连杆组的作用力如图 2 所示。高压油液对滚柱连杆组的液压力方向与转子直径垂直,以圆心呈中心对称分布,每一对作用力大小相等、方向相反,且不在一条直线上,从而形成力偶。在力偶的作用下,转子顺时针转动,产生转矩和转速。同理,内马达单独工作,内、外马达同时工作和差动连接工作时,也是力偶驱动转子运转。

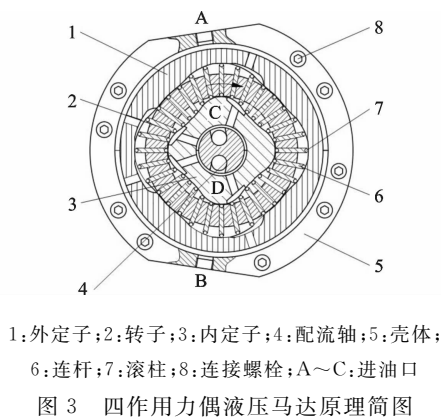
当液压马达的作用数为奇数时,虽然不会形成成对的力偶,但高压油液对转子的作用力的主矢为 0,主力矩不为 0,则转子中心可以简化为一个等效力偶。



通过以上分析,力偶液压马达可定义为:当液压马达工作时,在垂直于转子轴向方向上的任意平面内,转子受到的合力主矢为 0,主力矩不为 0,称为合力偶。由合力偶驱动液压马达运转,这样的液压马达称为力偶液压马达。

2 双定子多作用力偶液压马达的工作原理

四作用力偶液压马达的工作原理简图如图 3 所示。壳体上装配一个转子、一个外定子和一个内定子。由外定子、转子、滚柱、连杆及两边侧板组成密闭容积,高压油液由进油口 B 通入,再通过壳体内部的通道和配流窗口进入封闭容积,被分隔在高压油腔和低压油腔的滚柱连杆组的两侧,分别称高压油和低压油。由于滚柱连杆组伸出的长度不同,所以其受力面积不同,有此产生的压力差使得滚柱连杆组带动转子顺时针旋转,形成外马达。同理,由内定子环、转子、滚柱、连杆及两边侧板组成密闭容积,高压油液由进油口 C 通入,再通过配流轴上的通道进入密闭容积。这样,压力差使得转子顺时针旋转,形成内马达。



无论是内、外马达单独工作,还是内、外马达同时工作或差动连接工作,转子受到的液压力合力主矢为 0,主力矩不为 0。

3 四作用力偶液压马达内、外定子轮廓线的选取

多作用力偶液压马达的内、外定子轮廓线是等宽相似曲线,一个作用的定子曲线是由一段大圆弧、一段小圆弧和两段过渡曲线组成,多作用力偶液压马达的内、外定子轮廓曲线是由多个完全相同的一个作用的定子曲线组成的光滑、完全封闭的曲线。多作用力偶液压马达高压油腔和低压油腔相互隔离,形成压力差,驱动力偶液压马达运转。2个滚柱连杆组之间形成了密闭容积,为了避免该容积在液压力作用下发生急剧变化,以及由此导致压力冲击和气蚀,定子曲线应该光滑连续,径向速度和加速度、加速度变化率尽量小或不存在突变点。

在分析液压马达各种轮廓曲线^[4-9]时发现,低噪声7次轮廓曲线适用于高性能液压马达,该轮廓线方程为

$$\rho(\phi) = e_7 \phi^7 + e_6 \phi^6 + e_5 \phi^5 + e_4 \phi^4 + e_3 \phi^3 + e_2 \phi^2 + e_1 \phi^1 + e_0 \quad (1)$$

$$\rho(\phi) = \begin{cases} r, & 0 \leq \phi < \frac{\beta}{2} \\ r + (R - r) \left[-20 \left(\frac{\phi - \beta/2}{\theta} \right)^7 + 70 \left(\frac{\phi - \beta/2}{\theta} \right)^6 - 84 \left(\frac{\phi - \beta/2}{\theta} \right)^5 + 35 \left(\frac{\phi - \beta/2}{\theta} \right)^4 \right], & \frac{\beta}{2} \leq \phi < \frac{\alpha + \beta}{2} \\ R, & \frac{\alpha + \beta}{2} \leq \phi < \frac{\alpha + 3\beta}{2} \\ r + (R - r) \left[20 \left(\frac{\phi - \alpha - 3\beta/2}{\theta} \right)^7 + 70 \left(\frac{\phi - \alpha - 3\beta/2}{\theta} \right)^6 + 84 \left(\frac{\phi - \alpha - 3\beta/2}{\theta} \right)^5 + 35 \left(\frac{\phi - \alpha - 3\beta/2}{\theta} \right)^4 \right], & \frac{\alpha + 3\beta}{2} \leq \phi < \frac{2\alpha + 3\beta}{2} \\ r, & 2\frac{\alpha + 3\beta}{2} \leq \phi < 2(\alpha + \beta) \end{cases} \quad (3)$$

式中: r 为小圆弧半径,mm; R 为大圆弧半径,mm。

4 双定子多作用力偶液压马达的排量和瞬时流量

在双定子多作用力偶液压马达中实现了4种工况,根据内、外马达结构具有类似性,其各自单独工作时排量

$$V = \pi \Phi N (R^2 - r^2) - N s \Phi z (R - r) \quad (4)$$

式中: V 为液压马达的排量,mL/rad; Φ 为定子环的有效宽度,mm; N 为液压马达作用数; s 为滚柱连杆组的厚度,mm; z 为滚柱连杆组的个数。

当外马达单独工作时,排量和瞬时流量分别为

式中: ρ 为外定子曲线上任意一点到定子中心的矢径,mm; ϕ 为转子转角,rad; e_i 为待定系数。

为了缓解压力冲击,在过渡曲线和大、小圆弧接触处添加一段修正的过渡曲线幅角 $\Delta\alpha$,且满足边界条件

$$\rho(\phi) = r_1 + (R_1 - r_1) [-20(\phi/\theta)^7 + 70(\phi/\theta)^6 - 84(\phi/\theta)^5 + 35(\phi/\theta)^4] \quad (2)$$

式中: $\theta = \alpha + \Delta\alpha$, α 为过渡曲线幅角。

为使液压马达在运转过程中闭死容积不变,大、小圆弧对应的圆心角均为两相邻连杆组的夹角 β 。如图4,在 N 个作用力偶液压马达的定子轮廓线中,从小(或大)圆弧的中点到小(或大)圆弧的中点的曲线所对应的圆心角为 γ , $\gamma = \pi/N = \alpha + \beta$ 。

如图5所示,四作用力偶液压马达中马达轮廓曲线由4段大圆弧(如 $a_1 a_2$)、4段小圆弧(如 $b_2 b_1$)和8段过渡曲线(如 $b_1 a_1$ 或 $a_2 b_2$)连接。8段过渡曲线分别对应4个高压油腔和4个低压油腔。

图5中心点 o 为极点, o 点与连杆组连线为极轴,逆时针方向角度为正。定子的轮廓曲线方程为

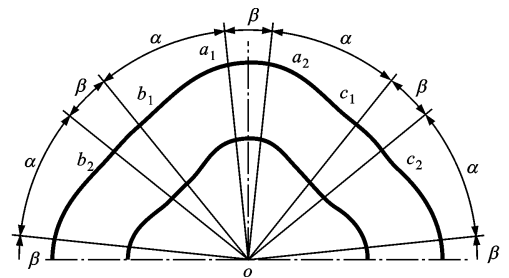


图4 液压马达轮廓线的角度分布

$$V_1 = \pi \Phi N (R_1^2 - r_1^2) - N s \Phi z (R_1 - r_1) \quad (5)$$

$$q_{sh1} = \frac{\Phi}{2} \omega N (R_1^2 - r_1^2) - N s \Phi \omega \sum_{i=1}^m \left(\frac{d\rho}{d\phi} \right)_i \quad (6)$$

式中: m 为在压油腔过渡曲线上滚柱连杆组的个数;

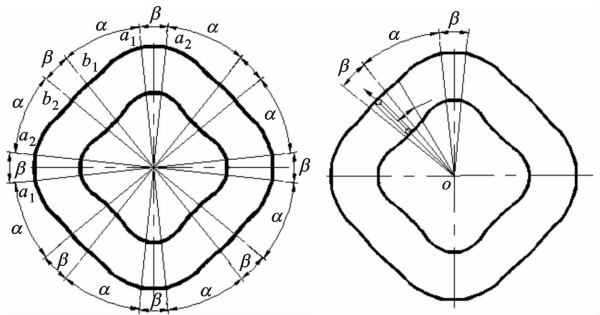


图 5 四作用力偶液压马达轮廓线的角度分布

ω 为转子的角速度,rad/s。

内马达单独工作时排量

$$V_2 = \pi \Phi N (R_2^2 - r_2^2) - N s \Phi z (R_2 - r_2) \quad (7)$$

$$Q_{sh2} = \frac{\Phi}{2} \omega N (R_2^2 - r_2^2) - N s \Phi \omega \sum_{i=1}^m \left(\frac{d\phi}{d\phi} \right)_i \quad (8)$$

内、外马达同时工作时排量

$$V_3 = V_1 + V_2 \quad (9)$$

内、外马达差动连接工作时排量

$$V_4 = V_1 - V_2 \quad (10)$$

多作用力偶液压马达的排量主要取决于内、外定子曲线半径,定子环的有效宽度,滚珠连杆组的个数、厚度和马达的作用数。同时工作方式的多样性会增加液压马达排量的输出。

内、外马达的初始相位角度和管道安装均会影响内、外马达同时工作或二者差动工作时的输出特性。

5 双定子四作用力偶液压马达实验分析

为了验证多作用力偶液压马达原理的正确性和液压马达设计的合理性,本文搭建了多作用力偶液压马达实验平台,测量了多作用力偶液压马达在 4 种工况下的空载排量。液压马达测试实验台如图 6 所示,液压马达测试实验台的液压系统原理图如图 7 所示^[10]。

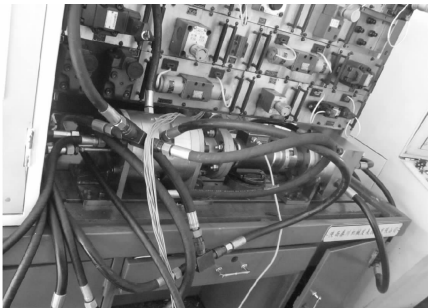
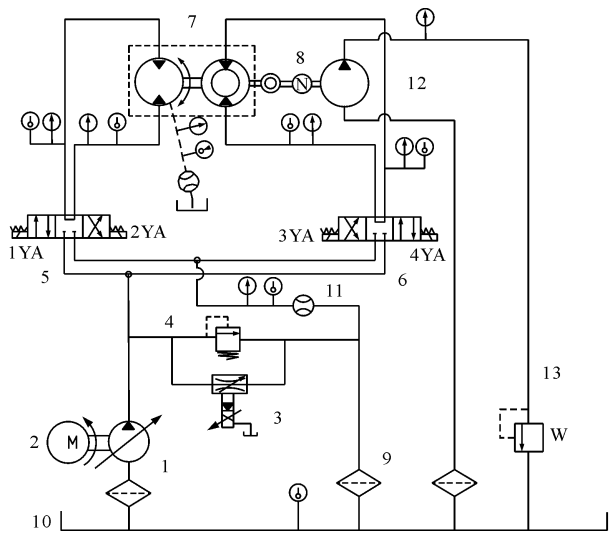


图 6 液压马达测试实验平台

根据中国国家标准关于液压泵、液压马达空载排量的测定方法中规定,测量参数显示值的稳态条件应满足表 1 条件,不同工况下空载流量测定结果如表 2~5 所示,空载排量计算值如表 6 所示。



1:变量泵;2:电动机;3:比例调速阀;4:安全阀;5、6:电磁换向阀;7:被测液压马达;8:转矩、转速测试仪;9:滤油器;10:油箱;11:流量计;12:负载泵;13:溢流阀

图 7 液压马达测试实验台的液压系统原理图

表 1 测量参数显示值的稳定条件

测量内容		测量精度/%		
转速		0.5	1.0	2.0
流量		0.5	1.0	2.5
压力	表压小于 0.2 MPa	1.0	3.0	5.0
	表压大于或等于 20 MPa	0.5	1.5	2.5

表 2 工况 1 下液压马达空载流量测定结果

进口压力/ MPa	出口压力/ MPa	压差/ MPa	转速/ r·min ⁻¹	输出流量/ L·min ⁻¹	泄漏流量/ L·min ⁻¹	输入流量/ L·min ⁻¹	转矩/ N·m
1.1	0.3	0.8	57	4.4	0.2	4.6	6.1
1.2	0.4	0.8	89	6.9	0.3	7.2	6.1
1.3	0.2	1.1	117	9.0	0.4	9.4	6.3
1.1	0.2	0.9	159	12.3	0.5	12.8	6.2
1.2	0.3	0.9	185	14.3	0.6	14.9	6.2

受加工精度和人工操作的影响,实验测得的空载排量与多作用力偶液压马达的设计结果略有误差,误差率在 5% 以内,从而验证了本文液压马达的原理是正确的。外马达的排量大于力偶液压内马达的排量,内、外马达的排量比与定子曲线有关。当内、外马达同时工作时,力偶液压马达可以输出大扭

矩和低转速,力偶液压马达差动连接工作时又可以输出相对较高的转速。

表 3 工况 2 下液压马达空载流量测定结果

进口 压力/ MPa	出口 压力/ MPa	压差/ MPa	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	输出 流量/ $L \cdot \min^{-1}$	泄漏 流量/ $L \cdot \min^{-1}$	输入 流量/ $L \cdot \min^{-1}$	转矩/ $N \cdot m$
1.2	0.3	0.9	107	3.1	0.1	3.2	2.2
1.2	0.4	0.8	186	5.3	0.2	5.5	2.1
1.1	0.2	1.0	270	7.8	0.3	8.1	2.2
1.3	0.3	1.0	379	10.8	0.4	11.2	2.2
1.1	0.2	0.9	475	13.3	0.6	13.9	2.2

表 4 工况 3 下液压马达空载流量测定结果

进口 压力/ MPa	出口 压力/ MPa	压差/ MPa	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	输出 流量/ $L \cdot \min^{-1}$	泄漏 流量/ $L \cdot \min^{-1}$	输入 流量/ $L \cdot \min^{-1}$	转矩/ $N \cdot m$
1.1	0.3	0.8	50	5.3	0.2	5.5	8.7
1.2	0.2	1.0	65	6.8	0.3	7.1	8.8
1.2	0.2	1.0	85	8.9	0.4	9.3	8.7
1.3	0.3	1.0	113	11.9	0.5	12.4	8.7
1.2	0.4	0.8	138	14.5	0.6	15.1	8.7

表 5 工况 4 下液压马达空载流量测定结果

进口 压力/ MPa	出口 压力/ MPa	压差/ MPa	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	输出 流量/ $L \cdot \min^{-1}$	泄漏 流量/ $L \cdot \min^{-1}$	输入 流量/ $L \cdot \min^{-1}$	转矩/ $N \cdot m$
1.2	0.2	1.0	75	3.6	0.2	3.8	3.9
1.2	0.3	0.9	103	5.1	0.2	5.3	3.8
1.3	0.2	1.1	166	8.1	0.3	8.4	3.9
1.1	0.4	0.7	226	11.1	0.5	11.6	3.7
1.0	0.3	0.7	295	14.2	0.6	14.8	3.7

表 6 液压马达空载排量

工 况	空载排量/ $mL \cdot rad^{-1}$		误差/ $mL \cdot rad^{-1}$	误差率/ %
	测定值	计算值		
1	77.3	80.5	3.2	4.0
2	28.6	29.5	0.9	3.1
3	105.1	110.0	4.9	4.5
4	48.6	51.0	2.4	4.7

6 结 论

- (1)在双定子多作用力偶液压马达工作过程中,转子所受合力主矢为 0,主矩不为 0。
- (2)双定子多作用力偶液压马达存在内马达单独工作,外马达单独工作,内、外马达同时工作或差动连接工作这 4 种工作方式。
- (3)内、外定子曲线半径,定子环的有效宽度,滚

珠连杆组的个数、厚度和马达的作用数决定着马达的排量,工作方式的多样性可增加液压马达的排量。

参考文献:

[1] 闻德生. 液压元件的创新与发展 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.

[2] 闻德生, 吕世君, 刘晓晨, 等. 等宽双定子泵和马达的原理研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(11): 1840-1844.
WEN Desheng, LÜ Shijun, LIU Xiaochen, et al. Theoretic research on variable displacement of equal width double-stators pump and motor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(11): 1840-1844.

[3] 闻德生, 吕世君, 杜孝杰, 等. 双定子液压马达差动连接理论分析 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 219-224.
WEN Desheng, LÜ Shijun, DU Xiaojie, et al. Theoretical analysis of differential connection of double-stator hydraulic motor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 219-224.

[4] 郭利, 丁守宝. 双作用叶片泵定子曲线参数化设计 [J]. 攀枝花学院学报, 2011(6): 33-35.
GUO Li, DING Shoubao. The double action vane pump stator curve parameter design [J]. Journal of Panzhihua University, 2011(6): 33-35.

[5] 牛祎洁, 那焱青, 刘相波, 等. 关于叶片泵定子过渡曲线辨识问题研究 [J]. 液压气动与密封, 2006(4): 48-50.
NIU Yijie, NA Yanqing, LIU Xiangbo, et al. On the stator vane pump identification problem of the transition curve [J]. Hydraulic and Pneumatic Seals, 2006(4): 48-50.

[6] 林立强, 鲁阳. 转子式叶片泵的低噪声定子内轮廓过渡曲线研究 [J]. 机床与液压, 2010, 38(19): 21-24.
LIN Liqiang, LU Yang. Rotor vane pump for low noise stator contour of the transition curve [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(19): 21-24.

[7] 高殿荣, 王志强, 赵一楠. 径向低速大转矩水液压马达定子曲线特性分析 [J]. 机械设计, 2012, 29(9): 29-40.
GAO Dianrong, WANG Zhiqiang, ZHAO Yinan. Radial low speed high torque hydraulic motor stator water characteristic curve analysis [J]. Mechanical Design, 2012, 29(9): 29-40.

(下转第 106 页)