

文章编号:1004-7220(2014)06-0498-06

滑车组织在眼球内旋运动时维持眼外肌力学优势的模拟研究

高志鹏, 陈维毅

(太原理工大学 应用力学与生物医学工程研究所, 太原 030024)

摘要: **目的** 研究眼外肌滑车系统在眼球大幅度内旋时的生物力学作用。**方法** 结合文献报道的眼外肌坐标参数,根据眼球运动的力学平衡原理,建立主动滑车力学模型,并以无滑车模型作为对照,模拟眼球在 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 范围内的内旋运动。**结果** 在内直肌对眼球内旋运动的贡献方面,无滑车模型的内直肌提供的作用力大于主动滑车模型,且内直肌力值明显大于生理安全极限值(约 0.5 N)。在模拟眼球内旋的最大角度 45° 处,主动滑车模型和无滑车模型模拟得到的内直肌力分别为 0.508 、 0.782 N ,后者超过生理阈值约 56% 。在控制眼球运动方面,主动滑车模型消耗的能量远小于无滑车模型。**结论** 滑车组织的存在,使得眼外肌能够以较低的耗能控制眼球运动,加强了眼外肌对眼球的牵引作用。而且,在眼球大幅度内旋运动时,主动滑车模型维持着内直肌的力学优势。

关键词: 内直肌; 滑车组织; 眼球内旋; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Pulley tissues maintain the mechanical advantage of extraocular muscles under eye adduction: A simulation study

GAO Zhi-peng, CHEN Wei-yi (*Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

Abstract: **Objective** To study the biomechanical effect from pulley tissues of extraocular muscles on super adduction of the eye. **Methods** By the coordinate parameters of extraocular muscles reported in the literature and based on the mechanical equilibrium of eye movement, two mechanical models, active pulley model and non pulley model (as control), were established to simulate eye adduction in the range of $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$. **Results** For the contribution of medial rectus muscle, the non pulley model produced more force than the active pulley model to control eye adduction, and its corresponding force value increasingly exceeded the physiologically safe threshold (0.5 N). At the maximum simulative adduction of 45° , the force of medial rectus obtained by active pulley model and non pulley model was 0.508 N and 0.782 N , respectively, and the latter was 56% greater than the safe threshold. For controlling eye adduction, the active pulley model consumed much less energy than the non pulley model. **Conclusions** Due to the existence of pulley tissues, extraocular muscles could control eye adduction by consuming less biological energy and reinforce the ocular derivation. In addition, with the active pulley, the medial rectus muscle could maintain its mechanical advantage under super adduction of the eye.

Key words: Medial rectus muscle; Pulley tissues; Eye adduction; Biomechanics

人眼有6条眼外肌,分别是外直肌(lateral rectus, LR)、内直肌(medial rectus, MR)、上直肌(su-

perior rectus, SR)、下直肌(inferior rectus, IR)、上斜肌(superior oblique, SO)和下斜肌(inferior ob-

收稿日期:2013-11-18; 修回日期:2014-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11032008,31271005)。

通信作者:陈维毅,教授,博士研究生导师, E-mail: chenweiyi211@163.com。

lique, IO),这些眼外肌控制着眼球的运动。一些眼疾的发生常与眼外肌有关,比如内斜视。滑车(pulley)组织后徙固定术可以将滑车组织缝合在眼外肌腹部,以使眼外肌产生阻力,能够部分缓解行内直肌后徙固定术后过矫患者的症状^[1]。临床报告显示,该手术与传统手术疗效相当^[2]。但是,眼外肌滑车系统控制眼球运动的力学机理鲜有报道。

在滑车组织未被发现之前,眼科界普遍认为内直肌后徙会使其丧失力学优势^[3]。这是因为在第一眼位内直肌包裹眼球的角大约是 29°,当眼球内旋超过 29°时,内直肌将不再与眼球相切,使得内直肌对眼球的作用力臂小于眼球半径,进而丧失内直肌对眼球最佳的作用力矩^[3]。

然而,核磁共振成像技术(magnetic resonance imaging, MRI)研究发现,滑车组织是眼外肌的功能性起点,且滑车的位置随眼球的运动而变化^[4-6]。在此发现的基础上,Demer等^[5]提出主动滑车假说,认为滑车位置的变化与眼球的运动有一定的规律。由

表1 眼外肌几何参数

Tab.1 Geometrical parameters of the extraocular muscles

眼外肌	起点/mm ^[11]	止点/mm ^[11]	直肌滑车/mm ^[4]	横截面积/mm ² ^[10]
外直肌	(-34.00, -13.00, 0.60)	(6.50, 10.08, 0.00)	(-11.00, 10.02, -0.05)	16.73
内直肌	(-30.00, -17.00, 0.60)	(8.42, -9.65, 0.00)	(-5.00, -14.40, -0.60)	17.39
上直肌	(-31.78, -16.00, 3.60)	(7.33, 0.00, 10.48)	(-9.00, -2.00, 11.60)	11.34
下直肌	(-31.70, -16.00, -2.40)	(8.02, 0.00, -10.24)	(-8.00, -4.50, -13.00)	15.85
上斜肌	(8.24, -15.27, 12.25)	(-4.41, 2.90, 11.05)	—	19.34
下斜肌	(11.34, -11.10, -15.46)	(-7.18, 8.70, 0.00)	—	19.83

正常情况下,直肌滑车的位置会随眼球的运动而变化,故本文用主动滑车模型来模拟正常情况。定义第一眼位为参考构形 $\mathbf{x}(x, y, z)$,眼球内旋 θ 角度时的形态为当前构形 $\mathbf{u}(u, v, w)$ (见图1)。

它们之间的坐标转换关系为

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}_0(\theta)\mathbf{u} \quad (1)$$

式中,转换矩阵

$$\mathbf{R}_0(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

主动滑车假说认为,水平滑车随眼球水平运动的后倾角度为眼球水平转动角度的 1/2^[5]。因此,当眼球内旋 θ 角度时,水平直肌(内直肌和外直肌)

于内直肌滑车位置随眼球运动而改变,在眼球运动的正常生理范围内,内直肌不会失去与眼球间的切点,因而主动滑车的存在使得内直肌在眼球大幅度(超过 29°)内旋运动时维持着自身的力学优势。

本文对眼外肌滑车系统在眼球大幅度内旋运动时的力学作用进行量化分析,参考前人在生物力学建模与仿真方面的研究成果^[7],尤其是骨骼肌建模方面的工作^[8-9],结合现有的眼外肌滑车组织的解剖学生理知识^[5-6],建立主动滑车模型,用于模拟眼球的大幅度内旋运动。

1 力学建模

建立主动滑车和无滑车两类数学模型,分别模拟 30°~45°范围内的眼球水平内旋运动。模型中涉及到的几何参数见表 1^[4,10-11],眼球用半径为 12.43 mm 的中心固定的刚性球体代替^[11],眼外肌用弹性细绳表示^[12],眼球周围限制组织的刚度为 1.245 mN/(°)^[13-14]。

会绕竖向直肌(本文指上直肌)旋转 $\theta/2$ 角度。它们之间的矩阵转换关系为

$$\mathbf{R}_p(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta/2 & -\sin \theta/2 & 0 \\ \sin \theta/2 & \cos \theta/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

这样,参考构形内的水平滑车的位置在眼球内旋 θ 角度后的当前构形位置为

$$\mathbf{x}(\mathbf{P}_h - \mathbf{P}_v) = \mathbf{R}_p(\theta) \cdot \mathbf{u}(\mathbf{P}_h - \mathbf{P}_v) \quad (3)$$

式中: \mathbf{P}_h 和 \mathbf{P}_v 分别表示水平滑车点位和竖向滑车点位。另外,采用无滑车模型即眼外直肌没有滑车组织存在的情形(见图2)作为正常情况的对照,该模型下眼外肌关键点随眼球内旋的位置变化仅用式(1)就可表示。

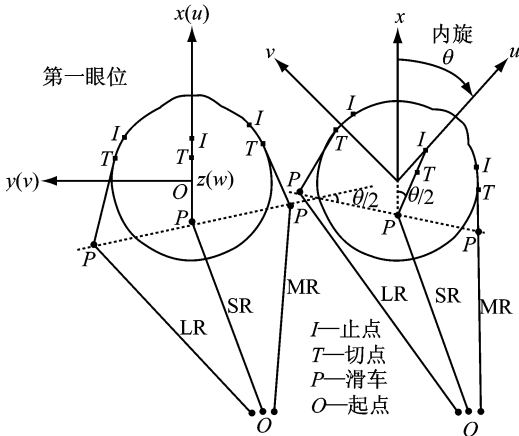


图1 主动滑轮模型示意图 (修改自文献[5])
Fig.1 Schematic diagram of the active pulley model

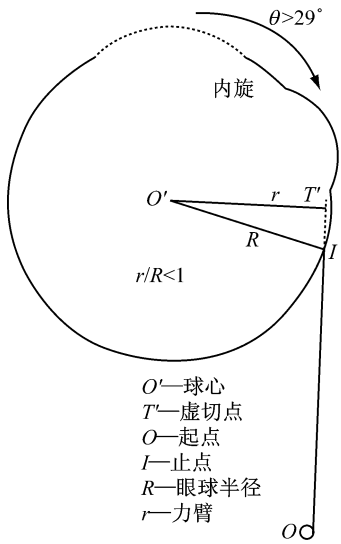


图2 无滑轮模型丧失力学优势的情形
Fig.2 Loss of mechanical advantage in non pulley model

理论上,眼外肌的协同-拮抗作用控制着眼球的平衡。对于被动肌,被动力 F_p 可以用与变形量 ΔL 有关的指数函数表示^[10]。本文中,眼外肌的初始长度用其在第一眼位时4个关键的几何点位(起点、止点、切点、滑轮)计算得到,并用变形量来描述眼外肌长度的变化量。Quaia等^[15]报道了对人眼外肌临床实验数据^[13]拟合得到的经验公式为

$$F(\Delta L) = c(1.02e^{\Delta L^{3.15}}) \quad (4)$$

式中: c 为与眼外肌横截面积有关的系数。本文采用这一公式计算眼外肌的被动力。

对于主动肌,主动力 F_a 可由描述眼眶组织与眼外肌力学行为的平衡方程计算得到。需要注意的是,眼球周围其他组织的限制作用不能用简单的力来表示,而应用一个合力偶矩 M_l 来表示。因此,平衡方程为

$$\sum_{i=1}^6 M_i + M_l = 0 \quad (5)$$

式中: $M_i = F_i \times r_i$ ($i = 1, 2, \dots, 6$)依次表示外、内、上、下直肌和上、下斜肌;且 $F_i = F_a + F_p$ 表示力臂为 r_i 的第 i 条眼外肌的合力^[16]。限制力矩 $M_l = -\theta K_l R^2 (0i + 0j + k)$,其中限制刚度 $K_l = 1.245 \text{ mN}/(\text{°})$ ^[13-14],眼球半径 $R = 12.43 \text{ mm}$ ^[11]。

从连续介质力学的角度,应变能与应力的平方成正相关。出于简化考虑,本文中采用所有眼外肌应力的平方和来量化表示眼球内旋时眼外肌系统所消耗的能量:

$$\Phi = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{F_i}{A_i} \right)^2 \quad (6)$$

式中: A_i 表示眼外肌的横截面积。两类模型的计算采用 Matlab 软件进行。

2 模拟结果

主动滑轮和无滑轮模型模拟的结果均表明在眼球内旋运动方面,内直肌的贡献远超其他眼外肌(见图3(a)、(b))。解剖学研究认为,两水平直肌互相之间是一对拮抗肌,即内直肌收缩使眼球内旋的同时外直肌被拉伸^[17]。文中模拟结果与解剖学研究结果相符,两类模型模拟下的内、外直肌伸缩量恰好反映了两者之间的拮抗作用,图中伸长量为正,收缩量为负(见图3(c))。

对于主动滑轮模型,内直肌力随眼球内旋的程度呈线性增长(见图3(a))。而对于无滑轮模型,内直肌力的变化趋势呈非线性增长(见图3(b))。正常情况下,眼外肌控制眼球运动的力不超过 0.5 N ^[18-19]。在眼球内旋到模拟计算的最大角度 45° 时,主动滑轮模型计算得到的内直肌力为 0.508 N ,无滑轮模型计算得到的内直肌力为 0.782 N 。与生理安全极限值 0.5 N 相比,主动滑轮模型模拟得到了较为合理的眼球大幅度内旋运动下的内直肌力;而无滑轮模型模拟得到的内直肌力的值远超安全极限值(见图4)。

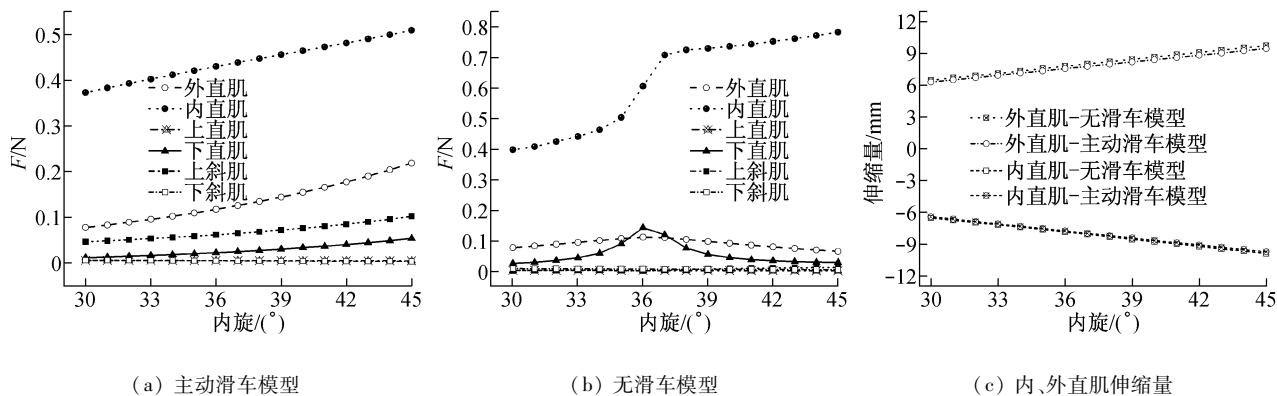


图3 两类模型的模拟结果

Fig.3 Simulation results for the two mechanical models (a) Force of extraocular muscles for active pulley model, (b) Force of extraocular muscles for non pulley model, (c) The shortening or stretching lengths of medial and lateral rectus for the two mechanical models

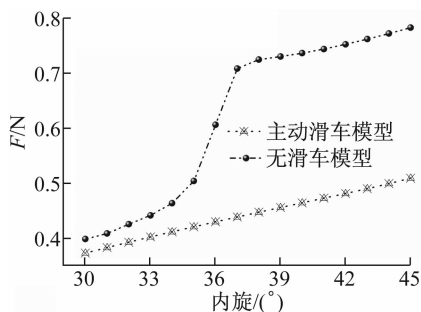


图4 用两类模型模拟眼球内旋运动得到的内直肌力结果

Fig.4 Force of the medial rectus muscle under eye adduction for the two mechanical models

眼球大幅度内旋运动时,眼外肌系统消耗的能量用两类模型模拟得到的结果如图5所示。

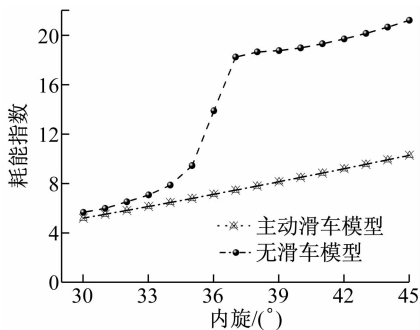


图5 两类模型模拟眼球内旋的眼外肌系统的耗能

Fig.5 Consumption energy of the extraocular muscle for the two mechanical models

与内直肌力相似,用主动滑轮模型模拟得到的眼外肌系统的耗能随眼球的内旋程度呈线性增长;

而用无滑轮模型模拟得到的耗能呈非线性增长。特别是两类模型模拟得到的眼外肌系统耗能的曲线与内直肌力的曲线极其相似,提示在眼球内旋运动时,内直肌力的贡献起决定性的作用。因此,在眼球大幅度内旋运动时,无滑轮模型的耗能远超主动滑轮模型。

3 讨论

本文旨在采用力学建模方法对控制眼球内旋运动的各眼外肌力(尤其是内直肌力)进行量化分析,以此揭示近年来眼外科中行眼外肌滑轮后徙固定术^[1-2]治疗内斜视的力学机理。另外,眼球运动与前庭活动密切相关(例如,前庭眼动反射和视眼动反射^[20]),故建立符合生理结构的眼球运动模型对厘清两者的关系有重要意义。本文认为,眼外肌滑轮这一结缔组织是眼球运动建模中的不可忽视要素之一。

本文根据主动滑轮假说建立正常情况下主动滑轮眼外肌系统模型,同时建立无滑轮的的眼外肌系统模型作为对照。本文的主要局限在于对眼外肌的建模较为简单,将单个的眼外肌简化为弹性绳,在模拟计算时用4个关键点位来计算眼外肌的伸缩量,进而得到眼外肌力;而且因为技术手段上的限制,这个简化处理与真实的眼外肌系统之间的误差目前还不清楚。

Miller等^[21]发现,眼外肌滑轮的位置随眼球的运动而变化。基于MRI技术的发现成果,Demer

等^[5]提出主动滑车假说来描述正常的眼外肌滑车运动系统。近年来,临床上用滑车后徙固定术来调节内斜视手术过矫的患者^[1-2]。本文采用力学建模手段研究滑车系统在眼球内旋运动时的力学机理,发现在眼球大幅度(30°~45°)内旋运动时,主动滑车模型模拟得到的各眼外肌力符合生理要求,而无滑车模型模拟得到的内直肌力在眼球内旋超过35°后开始超出生理安全极限值(约0.5 N)。例如,在模拟的最大内旋角度(45°)处,主动滑车模型模拟得到的内直肌力为0.508 N,而无滑车模型模拟得到的内直肌力达0.782 N,超过生理阈值约56%;说明眼球运动时眼外肌滑车组织有调节眼外肌系统施力大小的能力,确保眼外肌为特定的眼球运动提供不超过生理安全阈值的力。

进一步研究发现,无滑车模型的内直肌需要提供更多的力来控制眼球的运动,是由于没有滑车的内直肌在眼球内旋超过30°时会丧失其力学优势^[3]。在眼球内旋运动超过30°以后,无滑车模型的内直肌与眼球之间不再有切点(见图2),使内直肌提供给眼球的作用力臂小于眼球半径,进而使得内直肌力增大,因为在某一特定方向上控制眼球旋转的扭矩可以认为是一定的。然而,这一现象在主动滑车模型中不存在,因为主动滑车的位置随眼球运动变化,使内直肌与眼球之间在眼球大幅度内旋下仍然有切点存在,维持着内直肌对眼球的作用力臂保持在眼球半径大小的水平,进而使内直肌控制眼球内旋时不丧失力学优势。

此外,与无滑车模型相比,主动滑车模型模拟得到的眼外肌系统在控制眼球大幅度内旋运动时消耗的能量明显小于无滑车模型,在眼球内旋运动超过35°后,无滑车模型的眼外肌系统消耗的能量达到主动滑车模型的2倍(见图5),该现象再次验证了滑车组织是眼外肌功能性起点的观点^[4-6]。由于滑车的存在,眼外肌系统在控制眼球内旋运动时,各眼外肌可以群策群力地发挥作用,使各眼外肌均在生理范围内提供眼球内旋所需的力,尤其是分担了内直肌力的贡献,以保护内直肌的受力不超过生理安全极限。

4 结语

本研究从眼球大幅内旋时眼外肌系统的施力机

制方面,说明了随眼球运动而位置发生变化的眼外肌滑车结缔组织是眼球运动建模研究中不可忽视的要素之一。眼外肌滑车结缔组织的存在使得眼外肌系统在控制眼球大幅内旋时提供不超过生理安全阈值的力,并使眼外肌系统以较小的耗能来维持眼球的运动。该模拟结果在一定程度上支持了现代的眼球运动理论,同时也揭示了临床上行眼外肌滑车后徙固定术治疗内斜视的力学机理。

参考文献:

- [1] Mitchell L, Kowal L. Medial rectus muscle pulley posterior fixation sutures in accommodative and partially accommodative esotropia with convergence excess [J]. J AAPOS, 2012, 16(2): 125-130.
- [2] Ludwig I, Clark R, Stager D. New strabismus surgical techniques [J]. J AAPOS, 2013, 17(1): 79-88.
- [3] Beisner D. Reduction of ocular torque by medial rectus recession [J]. Arch Ophthalmol, 1971, 85(1): 13-17.
- [4] Clark R, Miller J, Demer J. Three-dimensional location of human rectus pulleys by path inflections in secondary gaze positions [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2000, 41(12): 3787-3797.
- [5] Demer J, Oh S, Clark R, et al. Evidence for active control of rectus extraocular muscle pulleys [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2000, 41(6): 1280-1290.
- [6] Demer J. More respect for connective tissues [J]. J AAPOS, 2008, 12(1): 5-6.
- [7] 郝卫亚. 人体运动的生物力学建模与计算机仿真进展 [J]. 医用生物力学, 2011, 26(2): 97-104.
Hao WY. Advances in biomechanical modeling and computer simulation of human movement [J]. J Med Biomech, 2011, 26(2): 97-104.
- [8] 李永胜, 陈维毅. 单羽状骨骼肌平面模型的修正 [J]. 医用生物力学, 2007, 22(3): 227-281.
Li YS, Chen WY. Revision on the planimetric model of unipennate skeletal muscle [J]. J Med Biomech, 2007, 22(3): 277-281.
- [9] 唐刚, 季文婷, 李元超, 等. 基于关节坐标系的肌肉骨骼间附着点坐标转换方法 [J]. 医用生物力学, 2010, 25(1): 40-44.
Tang G, Ji WT, Li YC, et al. JCS-based method on coordinate transformation of attachment points between muscle and bone [J]. J Med Biomech, 2010, 25(1): 40-44.
- [10] Pascolo P, Carniel R. From time series analysis to a biomechanical multibody model of the human eye [J]. Chaos Solitons Fractals, 2009, 40(2): 966-974.

- [11] Miller J, Robinson D. A model of the mechanics of binocular alignment [J]. *Comput Biomed Res*, 1984, 17(5): 436-470.
- [12] Jampel R. The function of the extraocular muscles, the theory of the coplanarity of the fixation planes [J]. *J Neurol Sci*, 2009, 280(1-2): 1-9.
- [13] Collins C, Carlson M, Scott A, *et al.* Extraocular muscle forces in normal human subjects [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1981, 20(5): 652-664.
- [14] Schutte S, Van den Bedem S, Keulen F, *et al.* A finite-element analysis model of orbital biomechanics [J]. *Vision Res*, 2006, 46(11): 1724-1731.
- [15] Quايا C, Ying H, Nichols A, *et al.* The viscoelastic properties of passive eye muscle in primates. I: Static forces and step responses [J]. *PLoS One*, 2009, 4(4): e4850.
- [16] Ferrier A, Larrea X, Camine V, *et al.* Importance of the subscapularis muscle after total shoulder arthroplasty [J]. *Clin Biomech*, 2013, 28(2): 146-150.
- [17] McLoon L, Christiansen S. Extraocular muscle: Extraocular muscle anatomy [M]//Dartt DA ed. *Encyclopedia of the eye*. Oxford: Academic press, 2010: 89-98.
- [18] Miller J, Bockisch C, Pavolvski D. Missing lateral rectus force and absence of medial rectus co-contraction in ocular convergence [J]. *J Neurophysiol*, 2002, 87(5): 2421-2433.
- [19] Kennedy E, Duma S. The effects of the extraocular muscles on eye impact force-deflection and globe rupture response [J]. *J Biomech*, 2008, 41(16): 3297-3302.
- [20] 沈双, 赵扬, 孙秀珍. 数值模拟前庭系统膜迷路生物力学响应[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(3): 169-174.
Shen S, Zhao Y, Sun XZ. Numerically simulating the biomechanical response to membranous labyrinth in the vestibular system [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(3): 169-174.
- [21] Miller J, Demer J, Rosenbaum A. Effect of transposition surgery on rectus muscle paths by magnetic resonance imaging [J]. *Ophthalmology*, 1993, 100(4): 475-487.

祝贺我刊主编戴尅戎院士荣获 2014 年吴阶平医学奖

2014 年吴阶平医学奖颁奖大会于 11 月 29 日在广东省中山市举行。骨外科专家、教授、中国工程院院士戴尅戎,高原医学专家、研究员、中国工程院院士吴天一获新一届吴阶平医学奖。“吴阶平医学奖”是 2007 年由吴阶平医学基金会设立,经国家卫计委和科技部批准的我国医药卫生领域个人奖项,主要奖励在医学临床、科研、教育、公共卫生和卫生事业管理工作中作出突出贡献的个人;被誉为中国医学界“诺贝尔奖”,是目前中国医学界最高规格的个人奖项。

戴尅戎院士是我国著名的骨外科和骨科生物力学专家、形状记忆合金医学应用的奠基人、我国人工关节领域的开拓者之一,同时也担任《医用生物力学》杂志的主编,一直积极倡导和推动骨科的转化医学研究,在个性化人工关节、细胞治疗等领域的临床应用方面作出了突出成就,其治学精神和为人修养均堪称后辈的楷模!谨此向戴院士的获奖表示衷心的祝贺!

本刊编辑部