医学基础系列教材

YIXUE JICHU XILIE JIAOCAI

医学物理学

学习指南

YIXUEWULIXUE XUEXI ZHINAN

主编　李宾中　曾林泽

四川大学出版社

医学基础系列教材

（供基础、临床、预防、口腔、法医、检验、护理等医学类专业用）

医学物理学学习指南

主　编　李宾中　曾林泽

副主编　李宜贵　张益珍

四川大学出版社

责任编辑:胡兴戎
责任校对:王　炜
封面设计:罗　光
责任印制:杨丽贤

图书在版编目(CIP)数据

医学物理学学习指南／李宾中，曾林泽主编.—成都：四川大学出版社，2004.8
(医学基础系列丛书)
ISBN 7-5614-2896-0

Ⅰ.医...　Ⅱ.①李...　②曾...　Ⅲ.医用物理学-医学院校-教学参考资料　Ⅳ.R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 085138 号

书名　**医学物理学学习指南**

主　编	李宾中　曾林泽
出　版	四川大学出版社
地　址	成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发　行	四川大学出版社
印　刷	郫县犀浦印刷厂
成品尺寸	185mm×260 mm
印　张	12.25
字　数	277 千字
版　次	2004 年 8 月第 1 版
印　次	2005 年 6 月第 2 次印刷
印　数	4 001～8 000 册
定　价	18.00 元

◆读者邮购本书，请与本社发行科联系。电话：85408408/85401670/85408023　邮政编码：610065
◆本社图书如有印装质量问题，请寄回出版社调换。
◆网址：www.scupress.com.cn

前　言

医学物理学是生命科学的基础学科，是高等医药专业的学生必须学习的一门重要基础课程。为了适应医学教育改革和发展的需要，面对教学课时数一再减少的现实情况，让学生能用较少的时间掌握较多的现代医学所需的物理学知识，提高学生的自学能力和分析问题、解决问题的能力，我们根据医学物理学课程的基本要求和高等医药院校的实际，编写了这本《医学物理学学习指南》。

本学习指南可作为李宜贵、张益珍主编的高等医学教材《医学物理学》的参考书。但它既不能代替教材，也不能代替学生自己的努力。

本书分章编写，每章基本上由五部分组成：学习目的和要求、内容提要、解题指导、习题解答、自我评估题。“学习目的和要求”部分，让学生明白学习该章的目的和要求。“内容提要”部分，引导学生复习并掌握该章的基本内容。“解题指导”部分，则通过典型例题的分析和解答，总结解题的方法，讨论解题技巧。“习题解答”部分，对李宜贵、张益珍主编的《医学物理学》各章的习题给出详细的参考解答，供学生检查所做习题时使用。“自我评估题”部分，只给出答案，未给出解算过程，供学生自我评估时使用。

学习物理学有一个方法问题，哪些概念、观点和公式是应该牢记的？哪些是应该阅读以求“通晓”，但不必牢记的？事实上，只有两类东西，即定义和基本原理必须记住。

本学习指南是复习《医学物理学》内容的十分有用的工具，可以使学生掌握教材重点。希望同学们勤于动手、动脑，精心地演算每一道例题、习题，学有所获。

本书由李宾中（川北医学院）、曾林泽（川北医学院）任主编，李宜贵（四川大学）、张益珍（四川大学）任副主编。参加本书编写的还有薛晋惠（川北医学院）、幸浩洋（四川大学）等老师。

由于编者的知识和能力有限，加之编写时间较仓促，教材中难免存在缺点和错误，恳切希望读者给予批评指正。

编　者

2004 年 5 月

目　录

第一章　刚体的转动

一、学习目的和要求

本章的目的是通过学习有关刚体转动的基本概念和主要定律，更好地了解人体在运动中的力学规律，以及掌握一些医疗器械的使用原理。具体要求为：

1．掌握转动动能、转动惯量、力矩、角动量、冲量矩等基本概念及其计算。

2．掌握定轴转动定律、动能定理的物理意义及其应用。

3．掌握角动量定理和角动量守恒定理的物理意义及其应用。

4．了解角量和线量之间的关系。

5．了解旋进的物理意义及其应用。

二、内容提要

刚体的转动：
- 描述刚体转动的物理量
- 刚体做匀速和匀变速转动时的运动方程
- 转动动能和转动惯量
- 力矩、力矩的功、转动定律
- 冲量矩、角动量、角动量定理和角动量守恒定理
- 旋进

三、解题指导

例 1-1　一根均匀的轻质细绳，一端拴一质量为 m 的小球，在竖直平面内绕定点 O 做半径为 R 的圆周运动。在 $t=0$ 时，小球在最低点以速度 v_0 运动。试求小球速率 v 与小球在任一点所受绳子的张力 T。

解：小球在任一点 B 的受力如图 1-1 所示，

切向力为
$$-mg\sin\theta = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

法向力为
$$T - mg\cos\theta = m\frac{v^2}{R} \tag{2}$$

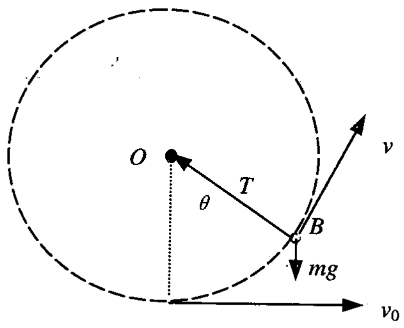

图 1-1　例 1-1 图

由式（1）得

$$-g\sin\theta = \frac{v}{R}\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}\theta}$$

对上式积分，并由已知条件 $\theta = 0$ 时，$v = v_0$

得
$$v^2 = v_0^2 - 2gR(1-\cos\theta) \tag{3}$$

由式（3）得

$$g\cos\theta = g + \frac{v^2 - v_0^2}{2R}$$

代入式（2）得
$$T = mg + \frac{m(3v^2 - v_0^2)}{2R}$$

答：小球速率为 $v_0^2 - 2gR(1-\cos\theta)$，小球在任一点所受绳子的张力为 $T = mg + \dfrac{m(3v^2 - v_0^2)}{2R}$。

例 1-2　质量为 500 g、直径为 40 cm 的圆盘，绕通过盘心的垂直轴转动，转速为 1500 r·min^{-1}。要使圆盘在 20 s 内停止转动，求制动力矩的大小以及圆盘原来的转动动能和该力矩的功。

解：制动力矩 M 为

$$M = J\beta = \frac{1}{2}mr^2\frac{\omega}{t} = \frac{1}{2}\times 0.2\times 0.5^2\times\left(\frac{2\pi\times 1500}{60}\right)^2 = 7.85\times 10^{-2}\ \mathrm{N\cdot m}$$

圆盘原来的转动动能为

$$E_\mathrm{k} = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{4}mr^2\omega^2 = \frac{1}{4}\times 0.5\times 0.2^2\times\left(\frac{2\pi\times 1500}{60}\right)^2 = 123\ \mathrm{J}$$

制动力矩的功为

$$W = M\theta = M\frac{\omega}{2}t = 7.85\times 10^{-2}\times\frac{2\pi\times 1500}{2\times 60}\times 20 = 123\ \mathrm{J}$$

答：制动力矩为 7.85×10^{-2} N·m，圆盘原来的转动动能为 123 J，该力矩的功亦是 123 J。

例 1-3　将三个质量都为 m 的小球，放在一根三等分的硬细杆的等分点上，每段杆

长 l。在一个端点上不放小球，轴通过此端点并与杆垂直（图 1-2）。若使这一系统以角速度ω 绕轴旋转，求：

（1）这一系统绕轴转动的转动惯量；

（2）中间小球的角动量；

（3）三个小球的总角动量。

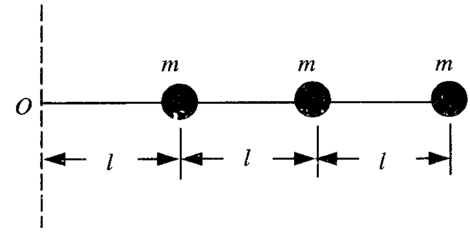

图 1-2 例 1-3 图

解：（1） $J = ml^2 + m(2l)^2 + m(3l)^2 = 14ml^2$

（2） $L = J_2\omega = m(2l)^2\omega = 4m\omega l^2$

（3） $L_{总} = J\omega = 14m\omega l^2$

答：这一系统绕轴转动的转动惯量为 $14ml^2$，中间小球的角动量为 $4m\omega l^2$，三个小球的总角动量为 $14m\omega l^2$。

四、习题解答

1-1（略）

1-2 一人手握哑铃置于胸前，并坐在可忽略摩擦的转台上，转台以一定的角速度 ω_0 转动。当此人将两手平伸，使人和转台的转动惯量增加为原来的两倍时，求人和转台的角速度及转动动能。

解：当转台的角速度为 ω_0 时，转台和人的转动惯量为 J。当人和转台的角速度为 ω_1 时，根据角动量守恒定律

$$J_1\omega_1 = J_2\omega_2 \qquad J_2 = 2J_1$$

则

$$J\omega_0 = J_1\omega_1$$

$$\omega_1 = \frac{J\omega_0}{J_1} = \frac{J\omega_0}{2J} = \frac{1}{2}\omega_0$$

转动动能为

$$E_k = \frac{1}{2}J_1\omega^2 = \frac{1}{2}\times 2J\times(\frac{1}{2}\omega_0)^2 = \frac{1}{4}J\omega_0{}^2$$

答：人和转台的角速度及转动动能分别为 $\frac{1}{2}\omega_0$ 和 $\frac{1}{4}J\omega_0{}^2$。

1-3 直径为 0.3 m、质量为 5 kg 的一个飞轮，边缘绕有绳子，现用恒力 F 拉绳子的一端，使其由静止均匀地加速，经 0.5 s 后转速达到 10 r·min^{-1}。假定将飞轮看作圆盘。求：

（1）飞轮的角加速度及 0.5 s 内转动的角度；

（2）拉力和拉力做的功；

（3）拉动后 10 s 时，飞轮的角速度及边缘上一点的速度和加速度。

解：可将飞轮看作薄圆盘，它的转动惯量为

$$J=\frac{1}{2}mr^2=\frac{1}{2}\times 5\times(\frac{0.3}{2})^2=0.05625\ \ \mathrm{kg{\cdot}m^2}$$

（1）加速 0.5 s 时，角速度 $\omega=10\times 2\pi$

$$\beta=\frac{\omega}{t}=\frac{10\times 2\pi}{0.5}=40\pi\ \ \mathrm{rad{\cdot}s^{-2}}$$

0.5 s 内转动的角度 θ 为

$$\theta=\frac{1}{2}\beta t^2=\frac{1}{2}\times 40\pi\times 0.5^2=5\pi\ \ \mathrm{rad}$$

5π rad 等于 2.5 圈。

（2）根据转动定律，可知转动力矩为

$$M=J\beta=F\,r$$

则
$$F=\frac{M}{r}=\frac{J\beta}{r}=\frac{0.05625\times 40\pi}{\frac{0.3}{2}}=\frac{0.05625\times 40\times 3.14\times 2}{0.3}=47.1\ \ \mathrm{N}$$

$$W=FS=F\theta\,r=47.1\times 5\pi\times\frac{0.3}{2}=110.9\ \ \mathrm{J}$$

或
$$W=\frac{1}{2}J{\omega_2}^2-\frac{1}{2}J{\omega_1}^2=\frac{1}{2}J\omega^2=\frac{1}{2}\times 0.05625\times(10\times 2\pi)^2=110.9\ \ \mathrm{J}$$

（3）拉动后 10 s 时的角速度为

$$\omega=\beta\,t=40\pi\times 10=400\pi\ \ \mathrm{rad{\cdot}s^{-1}}$$

飞轮边缘的速度为

$$v=\omega r=400\,\pi\times\frac{0.3}{2}=60\,\pi\ \ \mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$$

切向加速度为
$$a_{\mathrm{t}}=r\beta=\frac{0.3}{2}\times 40\pi=6\pi\ \ \mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$$

法向加速度为
$$a_{\mathrm{n}}=r\omega^2=\frac{0.3}{2}\times(400\pi)^2=2.37\times 10^5\ \ \mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$$

加速度为
$$a=\sqrt{a_{\mathrm{t}}^2+a_{\mathrm{n}}^2}=\sqrt{(6\pi)^2+(2.37\times 10^5)^2}=2.4\times 10^5\ \ \mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$$

答：(1)飞轮的角加速度为 40π $\mathrm{rad{\cdot}s^{-1}}$，0.5 s 内转动了 2.5 转，转动的角度为 5π rad；

（2）拉力为 47.1 N，拉力做的功为 110.9 J；（3）拉动后 10 s 时，飞轮的角速度及边缘上一点的速度和加速度分别为 $400\pi\ \mathrm{rad\cdot s^{-1}}$，$60\pi\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$，$2.4\times10^5\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$。

1-4 求地球自转时绕自身轴转动的角动量和转动动能。设地球是均匀球体，已知地球的质量 $m=6\times10^{24}\,\mathrm{kg}$，半径 $R=6.4\times10^6\,\mathrm{m}$，转动角速度 $\omega=7.27\times10^{-5}\,\mathrm{rad\cdot s^{-1}}$。

解：地球的转动惯量为

$$J=\frac{2}{5}mR^2$$

地球的角动量为

$$\begin{aligned}L&=J\omega\\&=\frac{2}{5}mR^2\omega\\&=\frac{2}{5}\times6\times10^{24}\times(6.4\times10^6)^2\times7.27\times10^{-5}\\&=7.15\times10^{33}\ \mathrm{kg\cdot m^2\cdot s^{-1}}\end{aligned}$$

地球的转动动能为

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{k}}&=\frac{1}{2}J\omega^2\\&=\frac{1}{2}\cdot\frac{2}{5}mR^2\omega^2\\&=\frac{1}{2}\times\frac{2}{5}\times6\times10^{24}\times(6.4\times10^6)^2\times(7.27\times10^{-5})^2\\&=2.6\times10^{29}\ \mathrm{J}\end{aligned}$$

答：地球自转时绕自身轴转动的角动量和转动动能分别为 $7.15\times10^{33}\ \mathrm{kg\cdot m^2\cdot s^{-1}}$ 和 $2.6\times10^{29}\,\mathrm{J}$。

1-5 一质量为 m 的均质方形薄板 $ABCD$，BC 边的长为 l（图 1-3）。求以 AB 边为轴的转动惯量。

解：将方形薄板 $ABCD$ 沿 AD 方向（x 方向）取微元 $\mathrm{d}x$，$\mathrm{d}x$ 上的质量为 $\mathrm{d}m$，离 AB 边的距离为 x，$\mathrm{d}m$ 的转动惯量为 $\mathrm{d}J$，则

$$\mathrm{d}J=x^2\mathrm{d}m$$

方形薄板的转动惯量 J 为

$$J=\int x^2\,\mathrm{d}\,m=\int x^2\,\frac{m}{l}\,\mathrm{d}\,x=\frac{1}{3}ml^2$$

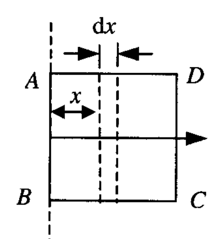

图 1-3 习题 1-5 图

答：方形薄板的转动惯量为 $\frac{1}{3}ml^2$。

1-6 一氧化碳分子绕其中心转动的角动量为 $1.05\times10^{-34}\ \mathrm{kg\cdot m^2\cdot s^{-1}}$，两原子间的距离为 1.1×10^{-10} m，求它的转动动能。设碳原子的质量为 2.0×10^{-26} kg，氧原子的质量为 2.7×10^{-26} kg。

解：设碳原子和氧原子的质量分别为 m_1 和 m_2，两原子的间距为 d，则一氧化碳分子的转动惯量 J 为

$$J=(\frac{d}{2})^2m_1+(\frac{d}{2})^2m_2=\frac{d^2}{4}(m_1+m_2)$$

一氧化碳分子的角速度为

$$\omega=\frac{L}{J}=\frac{4L}{d^2(m_1+m_2)}$$

一氧化碳分子的转动动能为

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{k}}&=\frac{1}{2}J\omega^2\\&=\frac{1}{2}\cdot\frac{d^2}{4}(m_1+m_2)\,[\frac{4L}{d^2(m_1+m_2)}]^2\\&=\frac{2L^2}{d^2(m_1+m_2)}\\&=\frac{2\times(1.05\times10^{-34})^2}{(1.1\times10^{-10})^2\times(2.0\times10^{-26}+2.7\times10^{-26})}\\&=3.88\times10^{-23}\ \mathrm{J}\end{aligned}$$

答：一氧化碳分子的转动动能为 3.88×10^{-23} J。

1-7 一人坐在可以自由旋转的平台的中心，双手各持一哑铃且平展双臂于身体两侧。设每个哑铃的质量 $m=2$ kg，两哑铃相距 $2l_1=1.5$ m，平台转速 $\omega_1=2\pi\ \mathrm{rad\cdot s^{-1}}$。当此人收回双臂使两哑铃间距离 $2l_2=0.8$ m 时，平台转速增加为 $\omega_2=3\pi\ \mathrm{rad\cdot s^{-1}}$。设人与平台对转轴的转动惯量不变，求人做的功。

解：对于人、哑铃和平台系统，在哑铃之间的距离减小的过程中，合外力矩为零，系统角动量守恒。设人与平台对转轴的转动惯量为 J，则

$$(J+2ml_1^{\ 2})\omega_1=(J+2ml_2^{\ 2})\omega_2$$

$$J(\omega_2-\omega_1)=2m(l_1{}^2\omega_1-l_2{}^2\omega_2)$$

在哑铃间距减小的过程中，人所做的功等于系统转动动能的增量，即

$$\begin{aligned}W&=\Delta E_k\\&=\frac{1}{2}(J+2ml_2{}^2)\omega_2{}^2-\frac{1}{2}(J+2ml_1{}^2)\omega_1{}^2\\&=\frac{1}{2}J(\omega_2-\omega_1)(\omega_1+\omega_2)+(ml_2{}^2\omega_2{}^2-ml_1{}^2\omega_1{}^2)\\&=m\omega_1\omega_2(l_1{}^2-l_2{}^2)\\&=2\times2\pi\times3\pi\times[(\frac{1.5}{2})^2-(\frac{0.8}{2})^2]\\&=47.7\ \ \mathrm{J}\end{aligned}$$

答：在哑铃间距减小的过程中，人做的功为 47.7 J。

1-8　一个陀螺的质量为 m，它的质心到支点 O 的距离为 l（见图 1-4）。设陀螺绕其对称轴的转动惯量为 J，转动角速度为 ω。试求证当陀螺旋进时，旋进角速度为 $\omega_P=\dfrac{mgl}{J\omega}$。

证明：因陀螺转动的角动量 L 为 $J\omega$，在重力矩作用下旋进，

$$M\mathrm{d}t=\mathrm{d}L=L\sin\varphi\mathrm{d}\theta$$

$$\omega_P=\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\frac{M}{L\sin\varphi}=\frac{mgl\sin\varphi}{J\omega\sin\varphi}$$

所以　$$\omega_P=\frac{mgl}{J\omega}$$

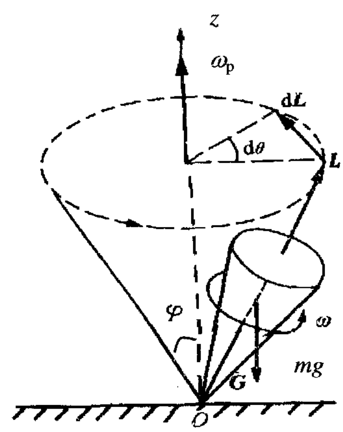

图 1-4　习题 1-8 图

五．自我评估题

（一）选择题

1．一个力 F 施于可绕固定轴转动的物体上，此物体的表现为：

A．一定转动　　　　B．一定不转动

C．不一定转动　　　　D．力与转轴平行时一定转动

2．一个花样滑冰运动员由张开双臂转动到收拢双臂转动时，他的：

A．转动惯量增大，角速度减小　　　　B．转动惯量增大，角速度增大
C．转动惯量减小，角速度增大　　　　D．转动惯量减小，角速度减小

3．质量和半径都相同的球体和球壳，转轴通过球心，球体的转动惯量 J_1 和球壳的转动惯量 J_2 间的关系为：

A．$J_1 > J_2$　　　　B．$J_1 < J_2$
C．$J_1 = J_2$　　　　D．条件不足，无法确定

4．两物体的转动惯量 $J_1 = J_2$，当其角速度之比 $\omega_1 : \omega_2 = 2:1$ 时，两物体的转动动能之比（$E_1 : E_2$）为：

A．4∶1　　B．2∶1　　C．1∶2　　D．1∶3

（答案：1．C；2．C；3．B；4．A）

（二）计算题

1．有一棒的直径为 4 cm，长为 2 m，质量为 8 kg。试求以下列轴线转动时的转动惯量：

（1）轴线通过棒的中心且与棒垂直；

（2）轴线通过棒的一端且与棒垂直。

[（1）2.67 kg·m^2；（2）10.71kg·m^2]

2．把一根米尺竖直立在地板上，然后让它自由倒下。假设接触地板的一端不因倾倒而滑动，求米尺着地时顶端的速度。

（5.4 m·s^{-1}）

3．自行车的车轮半径为 0.36 m，车轮质量为 2.0 kg，若车轮以速率 6 m·s^{-1} 运动。试求：

（1）车轮的角速度；

（2）车轮的质量完全分布在它的边缘时的转动动能；

（3）车轮的角动量。

[（1）16.7 rad·s^{-1}；（2）36.1 J；（3）4.33 kg·s^{-1}]

4．一均匀细棒的长为 l，质量为 m。假设转轴垂直通过棒上离中心点为 h 远的一点，求棒对此轴的转动惯量。

$$[\frac{m}{3}(3h^2+\frac{l^2}{4})]$$

（张益珍）

第二章　物体的弹性

一、学习目的和要求

本章的目的是通过研究物体在外力作用下形状和大小发生改变时的力学问题，了解物体弹性的一些基本知识，为学习后继课程打下基础。具体要求为：

1．掌握描述物体弹性的基本概念（形变、应变、应力、弹性模量），为学习生物力学打下必要的基础。

2．了解弯曲这种现象对于骨折的影响。

3．了解拉普拉斯公式在医学上的应用。

二、内容提要

1．形变。

在弹性力学中，将物体受到外力作用时发生形状和大小的改变称为形变。形变又分为弹性形变和塑性形变。

2．应变。

应变表示形变的程度，即物体长度、体积和形状方面的变化。应变又分为线应变、体应变和切应变。

3．应力。

应力是指物体内部单位面积上受到的内力。应力有正应力、体应力和切应力三种。

4．弹性模量。

（1）弹性和塑性。

（2）弹性模量。

① 杨氏模量。

② 体变模量

③ 切变模量。

5．弹性势能。

6．弹性腔的力学问题。

（1）球形弹性腔的力学问题。

（2）管形弹性腔的力学问题。

三、解题指导

例 2-1 设某人的一条腿骨长为 0.4 m，横截面积平均为 5 cm^2，试求用此骨承受整个体重（相当于 500 N 的力）时，其长度缩短多少？占原长的百分之几？（骨的杨氏模量可按 1×10^{10} Pa 计算）

解：根据杨氏模量的定义

$$E=\frac{FL_0}{\Delta LS}$$

得
$$\Delta L=\frac{FL_0}{ES}=\frac{500\times0.4}{1\times10^{10}\times5\times10^{-4}}=4.0\times10^{-5}\ \text{m}$$

$$\frac{\Delta L}{L_0}=\frac{4.0\times10^{-5}}{0.4}=1.0\times10^{-4}$$

答：此骨承受整个体重时，其长度缩短了 4.0×10^{-5} m，占原长的 0.01%。

例 2-2 假设股骨为一空心圆管，已知其最细处的内半径与外半径之比为 0.5，可在 5×10^4 N 的压力作用下发生骨折。试求此股骨最细处的外直径是多少？（抗压强度按 1.68×10^8 Pa 计算）

解：因为
$$S=\pi(R^2-r^2)=\pi[R^2-(0.5R^2)]=0.75\pi R^2$$

$$\sigma_c=\frac{F}{S}=\frac{F}{0.75\pi R^2}$$

所以
$$R=\sqrt{\frac{F}{0.75\pi\sigma_c}}=\sqrt{\frac{5\times10^4}{0.75\times3.14\times1.68\times10^8}}=0.01124\ \text{m}$$

$$2R=0.01124\times2=0.02248\ \text{m}（2.25\ \text{cm}）$$

答：股骨最细处的外直径为 2.25 cm。

例 2-3 弹跳蛋白是一种存在于跳蚤的弹跳机构和昆虫的飞翔机构中的蛋白质，其杨氏模量接近于橡皮。今有一截面积为 30 cm^2 的弹跳蛋白，加 270 N 的力后，其长度变为原长的 1.5 倍，求其杨氏模量。

解：
$$E=\frac{FL_0}{\Delta LS}=\frac{270L_0}{0.5L_0\times30\times10^{-4}}=1.8\times10^5\ \text{Pa}$$

答：该弹跳蛋白的杨氏模量为 1.8×10^5 Pa。

例 2-4 松弛的二头肌，伸长 5 cm 时所需要的力为 25 N，而当这条肌肉处于紧张