全国高等农林院校“十一五”规划教材

大学物理学习指导

习岗 主编

中国农业出版社

全国高等农林院校“十一五”规划教材

大学物理学习指导

习　岗　主编

中 国 农 业 出 版 社

图书在版编目（CIP）数据

大学物理学习指导 / 习岗主编. —北京：中国农业出版社，2006.7
全国高等农林院校“十一五”规划教材
ISBN 7-109-11020-6

Ⅰ.大… Ⅱ.习… Ⅲ.物理学-高等学校-教学参考资料 Ⅳ.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 064268 号

中国农业出版社出版
（北京市朝阳区农展馆北路 2 号）
（邮政编码 100026）
出版人：傅玉祥
责任编辑 甘敏敏

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月北京第 1 次印刷

开本：720mm×960mm 1/16 印张：9.75
字数：169 千字
定价：14.00 元

前　　言

物理学是整个自然科学的基础，是人类认识自然、改造自然和推动社会进步的动力和源泉，物理学理论及其所创立的世界观和方法论在培养学生的科学素质等方面起着极为重要的作用。因此，《大学物理学》是高等院校必修的公共基础课。

在大学物理学的学习中，完成一定数量的思考题和练习题是非常必要的，它不仅能检查学生对教学基本内容的理解和掌握程度，还能巩固所学的知识，培养分析问题和解决问题的能力。

本教材是与习岗主编的全国高等农业院校“十五”规划教材《大学物理学》（以下简称主教材）配套的学习指导书，全书按主教材的内容顺序编排，分为连续体力学、气体动理论、热力学、静电场、恒定电流、稳恒磁场、电磁感应、振动与波动、波动光学和量子物理基础共10章。每章内容包括主教材中该章的内容提要、思考题和练习题的完整解答。考虑到高等农林院校学生的数理基础较为薄弱，在解题过程中，本教材尽量做到详尽和规范，以期能够帮助学生掌握物理学的基本知识，并提高学生分析问题和解决问题的能力。

本教材由习岗主编，湖南农业大学的杨学工老师，河南农业大学的潘建斌老师和华南农业大学的刘军、杨初平、刘慧、熊万杰、赵静、谭默言、杨晓红和徐海涛等老师参加了本教材的编写工作。

由于编者水平所限，本书不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

编　者

2006年4月

内 容 提 要

本教材是与习岗主编的全国高等农业院校“十五”规划教材《大学物理学》配套的学习指导书，全书按主教材的内容顺序编排，分为连续体力学、气体动理论、热力学、静电场、恒定电流、稳恒磁场、电磁感应、振动与波动、波动光学和量子物理基础共 10 章内容，每章包括内容提要、思考题和练习题的解答。

本教材可作为高等农林院校农林、生物类等各专业的教学参考书。

目 录

第一章　连续体力学

一、本章提要

1. 固体的弹性

● 在常温常压下，固体分为晶体和非晶体。晶体在宏观上具有规则对称的外形，在微观上具有远程有序的特点，在物理性质上呈现各向异性，并且加热熔化时具有确定的熔点。

● 固体的形变包括拉伸压缩、剪切、扭转和弯曲 4 种。拉伸压缩和剪切形变为基本形变。

● 物体在外力作用下发生的相对形变称应变，拉伸应变为

$$\varepsilon=\frac{\Delta l}{l_0}$$

剪切应变通过剪切角来表示，剪切角为

$$\gamma=\frac{x}{d}$$

若在压力作用下，体积发生变化而形态不变，体应变为

$$\theta=\frac{\Delta V}{V_0}$$

● 作用在物体内部单位面积上的作用力称应力，某截面 ΔS 上的应力为

$$\sigma=\frac{\Delta f}{\Delta S}$$

在拉伸应变中

$$\sigma_{拉}=E\frac{\Delta l}{l_0}$$

在体应变中

$$\sigma_{体}=K\frac{\Delta V}{V_0}$$

在剪切应变中

$$\sigma_{剪}=G\frac{x}{d}$$

其中，E 称杨氏模量，K 称体积模量，G 称切变模量。

2. 静止液体的性质

● 液体的基本特征是易于流动而难以压缩，在物理性质上呈现各向同性。

● 液体可以分为极性液体、非极性液体、金属液体和量子液体。

● 对于液体中的任一点而言，来自任何方向的压强均相同。

● 液面下任一点的压强为

$$p_A = p_0 + \rho g h$$

● 液体表面上还存在着一种额外的切向力——表面张力，表面张力的基本规律为

$$\Delta f = \gamma \Delta l$$

其中，γ 为表面张力系数，它是表征液体表面张力大小的特征量。表面张力系数与液体的种类、温度和掺杂的某些物质（表面活性物质和表面非活性物质）有关。

● 对于弯曲液面，其液面内外的压强不相等，压强差满足拉普拉斯公式。凸形液面的拉普拉斯公式为

$$p_{内} - p_{外} = \frac{2\gamma}{R}$$

凹形液面的拉普拉斯公式为

$$p_{内} - p_{外} = -\frac{2\gamma}{R}$$

3. 液体的流动性质

● 连续性原理为

$$Sv = 常量$$

它体现了不可压缩的液体在流动过程中质量守恒。Sv 为单位时间内通过截面 S 的液体体积，称为流量。

● 伯努利方程给出了同一流线上各点的压强、高度和流速三者之间的关系，即

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

● 连续性方程和伯努利方程适用于理想流体的稳定流动。

4. 液体的黏滞性质

● 牛顿黏滞定律描述了液体的黏滞性质，其表达式为

$$f=\eta\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}\Delta S$$

其中，η 为黏滞系数，简称黏度。

● 泊肃叶公式给出了黏滞液体在圆形管道中流动的基本规律，泊肃叶公式有泊肃叶速度公式和泊肃叶流量公式。

泊肃叶速度公式给出了流速 v 随管道半径 r 变化的定量规律，即

$$v=\frac{p_1-p_2}{4\eta l}(R^2-r^2)$$

泊肃叶流量公式

$$q_V=\frac{\pi R^4}{8\eta}\left(\frac{p_1-p_2}{l}\right)$$

● 泊肃叶公式只适用于层流的情况。

5. 物体在黏滞液体中的运动

● 斯托克斯公式描述了球形物体在液体中运动速度不太大时所受黏滞阻力的基本规律

$$f=6\pi\eta rv$$

其中，f 是球体所受到的黏滞阻力，r 和 v 分别为球体的半径和运动速度。

● 小球在液体中匀速垂直沉降运动时的速度称收尾速度，用 v_{T} 表示，黏滞系数可以通过下式求出

$$\eta=\frac{2}{9}\frac{(\rho-\rho_0)}{v_{\mathrm{T}}}gr^2$$

● 无单位的纯数组合 $\rho Dv/\eta$ 称为雷诺数，其数值大小与液体的流动状态相对应。由层流向湍流过渡的雷诺数称临界雷诺数。对于一般的圆形管道流，临界雷诺数约为 2 000～2 600。

二、思 考 题

1-1　晶体的特征是什么？晶体与非晶体的主要区别是什么？

答： 晶体在物理性质上具有各向异性，而且在相变时具有确定的熔点，这些都是晶体的特征，也是晶体与非晶体的主要区别。

晶体中的分子或分子集团的重心规则地分布在一些几何点上，这些点称结点，同一平面上的结点连成面网，网构成的空间格架称为晶格，晶格中结点的总体称为空间点阵，点阵中通过任一结点所作的一簇簇直线称晶列，同一平面

上的晶列就构成晶面，晶格中最小的平行六面体称晶胞。晶体中分子呈现有序排列，从而使整个晶体处于一个能量最低的状态。完全有序的周期性排列是固体分子聚集的最稳定的状态。由于晶体中某种规则的结构周期性地重复出现，因而在微观结构上晶体的本质特征就是远程有序。

非晶体没有规则对称的外形，没有确定的熔点。非晶体的微观结构呈现出远程无序的结构状态。

1-2 在固体的形变中，弹性模量是一个重要的参数，杨氏模量的意义是什么？

答：对于一般的固体材料，若形变不超过一定的限度，应力与相关的应变成正比。在拉伸应变中

$$\sigma_{拉}=E\frac{\Delta l}{l_0}$$

其中，比例系数 E 称为杨氏模量。

弹性模量实际上反映了材料对形变的抵抗能力。在拉伸应变中，杨氏模量反映了材料对拉伸形变的抵抗能力。

1-3 生物材料的应力—应变关系与一般固体的应力—应变关系有什么不同？

答：晶体材料的原子排列很有规则，原子间的键合比较紧密，可以产生较大的应力，杨氏模量一般较高；而生物材料绝大多数是由非均匀材料组成的聚合物，这些聚合物的长链大分子互相纠缠在一起，彼此之间相互作用较弱。当受到外力拉伸时，不仅生物材料的分子本身可以伸长，而且分子之间也容易发生滑动，杨氏模量相对较小。

1-4 在微观结构上固体与液体的异同点是什么？

答：在固体中，分子排列紧密而稳定，因此，固体的微观结构是稳定的。特别是，固体中的晶体在微观结构上分子呈现有序排列的特点，这种有序排列是不随时间变化的。而液体分子的排列比晶体稍微松散些。在微小的范围内，液体分子之间可以通过微弱的吸引力而保持规则的排列，具有近程有序的特点。整个液体是由许多彼此之间方位完全无序的微区构成，这些微区处于动态的变化之中，因而，液体在微观结构上是不稳定的，在宏观上是远程无序的。

1-5 液体的表面张力与橡胶弹性膜的收缩力有什么不同？

答：前者来源于分子间的吸引力，后者来源于分子的形变；前者只存在于液体表面，后者存在于发生应变的弹性膜的整个横截面上。

1-6 一个半径为 R 的厚度很薄的圆形肥皂泡，假定泡内外均为空气。泡内外的压强差为多少？

答： 根据拉普拉斯公式易推出，泡内外的压强差为

$$p_{内}-p_{外}=\frac{4\gamma}{R}$$

1-7　在自然界中经常会发现这样一种现象，在傍晚时地面是干燥的，而在清晨时地面却变得湿润了。试解释这种现象的成因。

答： 根据对毛细现象的物理分析可知，由于水的表面张力系数与温度有关，毛细水上升的高度会随着温度的变化而变化，温度越低，毛细水上升的高度越高。在白天，由于日照的原因，土壤表面的温度较高，土壤表面的水分一方面蒸发加快，另一方面土壤颗粒之间的毛细水会因温度升高而下降，这两方面的原因使土壤表层变得干燥。相反，在夜间，土壤表面的温度较低，而土壤深层的温度变化不大，使得土壤颗粒间的毛细水上升；另一方面，空气中的水汽也会因为温度下降而凝结，从而使得清晨时土壤表层变得较为湿润。

1-8　连续性原理和伯努利方程是根据什么原理推导的？它们的使用条件是什么？如果液体有黏滞性，伯努利方程还能使用吗？

答： 连续性原理是根据质量守恒原理推导的，伯努利方程是根据功能原理推导的。它们使用的条件是只考虑液体的流动性，而忽略液体的黏滞性和可压缩性，同时，还要求流动是稳定流动。如果液体具有黏滞性，伯努利方程不能使用，需要加以修正。

1-9　用伯努利方程可以测量液体的流量，也可以测量液体的流速。请查阅一种测量流速的方法。

答： 参见主教材例题 1-3。

1-10　用泊肃叶公式可以测定液体的黏度。请说明测量原理和测量方案。

答： 可以通过泊肃叶流量公式

$$q_V=\frac{\pi R^4}{8\eta}\left(\frac{p_1-p_2}{l}\right)$$

来测量液体的黏度。测量时可设计如图 1-1 所示的实验装置，容器中的待测液体通过毛细管流入烧杯。设法测出毛细管两侧的压强差（p_1-p_2）、图中所示的毛细管长度 l、毛细管的半径 R 和流出毛细管的流量 q_V，即可由泊肃叶流量公式得到液体的黏度。

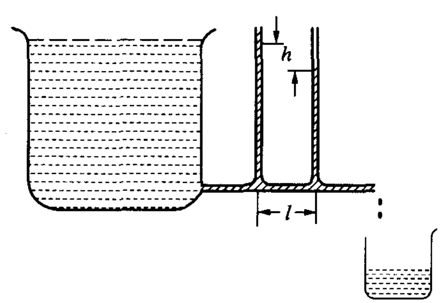

图 1-1

1-11　泊肃叶公式和斯托克斯公式的使用条件是什么？

答： 泊肃叶公式适用于圆形管道中的稳定流动，并且液体具有黏滞性。斯托克斯公式适用于球形物体在黏滞流体中运动速度不太大的情况。

三、练 习 题

1-1 要设计一个最大起重量为 8.9×10^4 N 的起重机，所用钢丝绳的最小直径应该是多少？（钢的弹性极限为 3×10^8 Pa）

解： 若钢丝绳的半径为 r，绳内部某截面上的应力 σ 为

$$\sigma=\frac{\Delta f}{\Delta S}=\frac{\Delta f}{\pi r^2}$$

设钢的弹性极限为 σ_e，则达到拉伸极限时

$$\frac{\Delta f}{\pi r^2}=\sigma_e$$

由此解出

$$r=\sqrt{\frac{\Delta f}{\pi\sigma_e}}$$

钢丝绳的最小直径为

$$D=2r=\sqrt{\frac{4\Delta f}{\pi\sigma_e}}=\sqrt{\frac{4\times8.9\times10^4}{3.14\times3\times10^8}}=1.94\ \text{(cm)}$$

1-2 某人的一条腿骨长为 0.4 m，横截面积平均为 $5\times10^{-4}\ \text{m}^2$。用此骨支承整个体重（相当 500 N 的力），其长度缩短多少？占原长的百分之几？（骨的杨氏模量按 $1\times10^{10}\ \text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ 计算）

解： 物体内部某截面上的应力 σ 可以表示为

$$\sigma=\frac{\Delta f}{\Delta S}$$

在拉伸应变中，应力与相关的应变成正比，即

$$\sigma_{拉}=E\frac{\Delta l}{l_0}$$

则

$$\Delta l=\frac{\Delta f}{E\Delta S}l_0=\frac{500\times0.4}{1\times10^{10}\times5\times10^{-4}}=4\times10^{-5}\ \text{(m)}$$

$$\frac{\Delta l}{l_0}=\frac{\Delta f}{E\Delta S}=\frac{500}{1\times10^{10}\times5\times10^{-4}}=10^{-4}=0.01\%$$

1-3 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弹性

蛋白，其杨氏模量接近于橡皮。假定有一个截面积为 30 cm^2 的弹跳蛋白，施加 270 N 的力后其长度为原长的 1.5 倍，求弹跳蛋白的杨氏模量。

解： 物体内部某截面上的应力 σ 可以表示为

$$\sigma=\frac{\Delta f}{\Delta S}$$

设弹跳蛋白的原长为 l_0 在拉伸应变中，应力有如下关系

$$\sigma_{拉}=E\frac{\Delta l}{l_0}$$

由上两式可得

$$E=\frac{\Delta f l_0}{\Delta S \Delta l}=\frac{270\times l_0}{30\times10^{-4}\times\ (1.5l_0-l_0)}=1.8\times10^5\ (\mathrm{N\cdot m^{-2}})$$

1－4　水坝长 1.0 km，水深 5.0 m，坡度角 60°，求水对坝身的总压力。

解: 设以水坝底部作为高度起点，水坝任一点至底部的距离为 h。在 h 基础上取微元 $\mathrm{d}h$，与之对应的水坝侧面面积元 $\mathrm{d}S$（图 1－2 中阴影面积）应为坡长 $\mathrm{d}m$ 与坝长 l 的乘积。

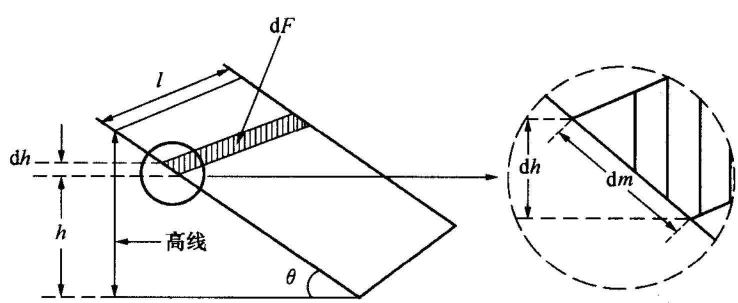

图 1－2

由图 1－2 可知

$$\mathrm{d}m=\frac{\mathrm{d}h}{\sin\theta}=\frac{\mathrm{d}h}{\sin 60^\circ}$$

水坝侧面的面积元 $\mathrm{d}S$ 为

$$\mathrm{d}S=l\mathrm{d}m=l\frac{\mathrm{d}h}{\sin60^\circ}$$

该面积元上所受的水压力为

$$\mathrm{d}F=p\mathrm{d}S=\ [p_0+\rho g\ (5-h)]\ l\frac{\mathrm{d}h}{\sin60^\circ}$$

水坝所受的总压力为

$$F=\int \mathrm{d}F=\int_0^5 \frac{[p_0+\rho g(5-h)]l\mathrm{d}h}{\sin 60^\circ}=\left.\frac{p_0 lh+5\rho glh-\frac{1}{2}\rho glh^2}{\sin 60^\circ}\right|_0^5$$

$$=7.3\times 10^8\ (\mathrm{N})$$

注：若以水坝的上顶点作为高度起点亦可，则新定义的高度 $h'=5-h$，高度微元取法不变，即 $\mathrm{d}h'=\mathrm{d}h$，将 h' 与 $\mathrm{d}h'$ 代入水坝压力积分公式，同样可解出水坝所受压力大小。

1-5 把一个半径为 5 cm 的金属细圆环从液体中拉出，圆环环绕的平面与液体表面平行。已知，刚拉出圆环时需用力 2.83×10^{-2} N。若忽略圆环的重力，该液体的表面张力系数为多少？

解： 根据表面张力的定义可知，在长为 $2\pi R$ 的液面上作用的表面张力为

$$f=\gamma\cdot 2\pi R$$

当将金属细圆环从液面缓慢拉出时，将沿圆环拉出一个环形的液膜。由于液膜有两个与空气接触的表面，因此，金属细圆环内外均受到液体表面张力的作用。拉出圆环时，外力与表面张力相平衡，即

$$F=2f$$

由上述关系可得

$$\gamma=\frac{F}{4\pi R}=\frac{2.83\times 10^{-2}}{4\times 3.14\times 5\times 10^{-2}}=4.51\times 10^{-2}\ (\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^{-1})$$

1-6 用液滴法测量农药的表面张力系数时，已知移液管管口内半径为 0.35 mm，滴出的 318 个药滴的重力为 4.9×10^{-2} N，求该农药的表面张力系数。

解： 根据表面张力的定义可知，作用在一个液滴上的表面张力为

$$f=\gamma\cdot 2\pi R$$

设药液的总重力为 G，药滴数为 n，则每个液滴的重力为

$$W=\frac{G}{n}$$

在药滴将要落下时

$$f=W$$

代入已知数据，解得

$$\gamma=\frac{G}{2\pi Rn}=\frac{4.9\times 10^{-2}}{2\times 3.14\times 3.5\times 10^{-4}\times 318}=7.01\times 10^{-2}\ (\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^{-1})$$

1-7 假定树木的本质部导管为均匀的圆柱形导管，树液完全依靠毛细现象而上升，接触角为 45°，树液的表面张力系数 $\gamma=5.0\times 10^{-2}\ \mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^{-1}$。问要使树液达到树木的顶部，高为 20 m 的树木所需本质部导管的最大半径为多少？

解： 由毛细现象的分析可知

$$h=\frac{2\gamma\cos\theta}{\rho g r}$$

其中 θ 为接触角。将已知数据代入，解得

$$r=\frac{2\gamma\cos\theta}{\rho g h}=\frac{2\times 5.0\times 10^{-2}\times\frac{\sqrt{2}}{2}}{1.0\times 10^{3}\times 9.8\times 20}=3.6\times 10^{-7}\ (\mathrm{m})$$

1-8 一个大水池水深 $H=10\ \mathrm{m}$，在水面下 $h=3\ \mathrm{m}$ 处的侧壁开一个小孔，问：(1) 从小孔射出的水流在池底的水平射程 R 是多少？(2) h 为多少时射程最远？最远射程为多少？

解：(1) 设水池表面压强为 p_1、流速为 v_1、高度为 h_1，小孔处压强为 p_2、流速为 v_2、高度为 h_2，由伯努利方程可写出

$$p_1+\frac{1}{2}\rho v_1^2+\rho g h_1=p_2+\frac{1}{2}\rho v_2^2+\rho g h_2$$

根据题中条件可知 $p_1=p_2=p_0$、$v_1=0$、$h=h_1-h_2$，于是，由上式可得

$$v_2=\sqrt{2gh}$$

又由运动学方程

$$H-h=\frac{1}{2}gt^2$$

可解出

$$t=\sqrt{\frac{2(H-h)}{g}}$$

则水平射程为

$$R=v_2 t=\sqrt{2gh}\cdot\sqrt{\frac{2(H-h)}{g}}=\sqrt{4h(H-h)}$$

代入数据解得

$$R=\sqrt{4h(H-h)}=\sqrt{4\times 3\times(10-3)}=9.17\ (\mathrm{m})$$

(2) 根据极值条件，在 $\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}h}=0$ 时，R 出现最大值，即

$$\frac{H-2h}{\sqrt{Hh-h^2}}=0$$

R 出现最大值。由此解出 $h=5\ \mathrm{m}$ 时，R 出现极大值，此时 $R=10\ \mathrm{m}$。

1-9 欲用内径为 1 cm 的细水管将地面上内径为 2 cm 的粗水管中的水引到 5 m 高的楼上。已知粗水管中的水压为 $4\times 10^5\ \mathrm{Pa}$，流速为 $4\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$。若忽略水的黏滞性，问楼上细水管出口处的流速和压强分别为多少？

解：设粗水管处的流速为 v_1，截面积为 S_1，内径为 d_1；细水管处的流速

为 v_2，截面积为 S_2，内径为 d_2。由连续性原理

$$v_1S_1=v_2S_2$$

解出细水管出口处的流速为

$$v_2=\frac{v_1S_1}{S_2}=\frac{4\times\pi\times(1\times10^{-2})^2}{\pi\times(0.5\times10^{-2})^2}=16\ (\mathrm{m\cdot s^{-1}})$$

再根据伯努利方程

$$p_1+\frac{1}{2}\rho v_1^2+\rho gh_1=p_2+\frac{1}{2}\rho v_2^2+\rho gh_2$$

可知细水管出口处的压强 p_2 为

$$p_2=p_1+\frac{1}{2}\rho v_1^2+\rho gh_1-\frac{1}{2}\rho v_2^2-\rho gh_2$$

代入已知数据，解得

$$p_2=2.3\times10^5\ (\mathrm{Pa})$$

1-10 下面是一个测定农药、叶肥等液体黏滞系数的简易方法。在一个宽大玻璃容器底部连接一根水平的细玻璃管，测定单位时间内由细管流出的液体质量即可知 η。若已知细管内直径 $d=0.1$ cm，细管长 $l=10$ cm，容器内液面高 $h=5$ cm，液体密度为 $1.9\times10^3\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$，测得 1 min 内自细管流出的液体质量 $\mathrm{m}=6.6\times10^{-4}$ kg，问该液体的 η 为多少？

解： 由泊肃叶流量公式可知

$$q_V=\frac{\pi R^4}{8\eta}\left(\frac{p_1-p_2}{l}\right)=\frac{\pi R^4\rho gh}{8\eta l}$$

又由

$$q_V=\frac{V}{t}=\frac{m}{\rho t}$$

由上两式可得

$$\eta=\frac{\rho^2t\pi R^4gh}{8lm}$$

代入已知数据，可解出

$$\eta=\frac{(1.9\times10^3)^2\times60\times3.14\times\left(\frac{0.1\times10^{-2}}{2}\right)^4\times9.8\times5\times10^{-2}}{8\times10\times10^{-2}\times6.6\times10^{-4}}$$

$$=0.04\ (\mathrm{Pa\cdot s})$$

1-11 狗的一根大动脉的内半径 $R=4\times10^{-3}$ m，流过它的血液流量 $q_V=10^{-6}\ \mathrm{m^3\cdot s^{-1}}$。问：(1) 血液流动的平均速率为多少？(2) 动脉中心血流的最大流速为多少？(3) 如果动脉长度为 0.1 m，$\eta=3.5\times10^{-3}$ Pa·s，维持这段血管中的血液流动需要的功率为多大？