

图 象 理 解

（第4版）

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京

第1单元 采集表达

- 第2章 摄像机成像
- 第3章 压缩感知与成像
- 第4章 深度信息采集
- 第5章 3-D景物表达
- ✓ 从图象出发，认识和理解世界
- 需要获得能反映场景内容和本质的图象
- 需要用尽少的采样精确地重构原信号
- 需要采集含有全面立体信息的图象
- 需要有对3-D空间景物的3-D表达方法

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第2页

第2章 摄像机成像

成像： 场景 \Rightarrow 图象： $f(x, y)$

- (1) 几何学：从图象中的什么地方可找到场景中物体的投影位置 (x, y)
- (2) 辐射度学：图象中物体的投影位置有多“亮”，以及亮度与物体光学性质和成像系统特性的联系，这确定了在各 (x, y) 处的 f

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第3页

第2章 摄像机成像

- 2.1 视觉过程
- 2.2 摄像机成像模型
- 2.3 摄像机标定
- 2.4 亮度成像

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第4页

2.1 视觉过程

1. 光学过程

光学过程基本确定了成像的尺寸

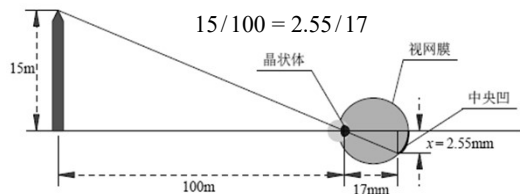


图 2.1.1 人眼水平横截面示意图

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第5页

2.1 视觉过程

2. 化学过程

化学过程基本确定了成像的亮度或颜色

视网膜上的锥细胞和柱细胞：

锥细胞：数量少，对颜色很敏感（有3种）

锥细胞视觉：明视觉或亮光视觉

柱细胞：数量多，分辨率比较低

不感受颜色但对低照度较敏感

柱细胞视觉：暗视觉或微光视觉

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第6页



2.1 视觉过程



2. 化学过程

锥细胞和柱细胞均由色素分子组成

其中可吸收光的视紫红质吸收光后通过化学反应分解成另两种物质，导致产生神经元信号

当光通量增加时，化学反应也增强，产生的神经元信号变得更强

视网膜可看作是一个化学实验室，将光学图象通过化学反应转换成其他形式的信息

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第7页



2.1 视觉过程



3. 神经处理过程

每个视网膜接收单元都与一个神经元细胞借助突触相连。每个神经元细胞借助相连的突触与其他细胞连接，从而构成光神经网络

光神经进一步与大脑中的侧区域通过视觉通道连接，并到达大脑中的纹状皮层

在大脑皮层，对光刺激产生的响应经过一系列处理最终形成关于场景的表象，从而将对光的感受转化为对景物的知觉

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

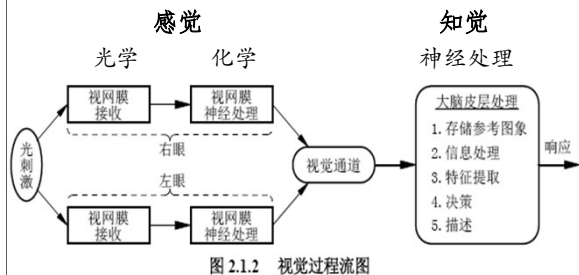
第8页



2.1 视觉过程



3. 神经处理过程



第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第9页



2.2 摄像机成像模型



图象采集：3-D场景投影转换到2-D图象
四个坐标系统：

- (1) 世界 (world) 坐标系统: XYZ
- (2) 摄像机坐标系统: xyz
- (3) 象平面坐标系统: $x'y'$
- (4) 计算机图象坐标系统: MN

成象变换涉及不同空间坐标系统之间的变换

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第10页



2.2 摄像机成像模型



2.2.1 基本摄像机模型

2.2.2 近似投影模式

2.2.3 一般摄像机模型

2.2.4 通用成象模型

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第11页



2.2.1 基本摄像机模型



世界坐标系统与摄像机坐标系统重合、且摄像机坐标系统与象平面坐标系统也重合

1. 成象模型图

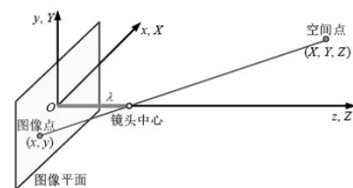


图 2.2.1 透视变换成象模型示意图

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第12页

2.2.1 基本摄像机模型

2. 透视变换

假设 $Z > \lambda$ ，即场景中感兴趣的点在镜头前

$$\begin{aligned} \frac{x}{\lambda} &= \frac{-X}{Z-\lambda} = \frac{X}{\lambda-Z} & \Rightarrow & \begin{matrix} \text{图象} \\ \text{平面} \\ \text{坐标} \end{matrix} & x = \frac{\lambda X}{\lambda-Z} \\ \frac{y}{\lambda} &= \frac{-Y}{Z-\lambda} = \frac{Y}{\lambda-Z} & & & y = \frac{\lambda Y}{\lambda-Z} \end{aligned}$$

3-D空间的矩形投影到图象平面后可能为任意四边形，由4个顶点所确定

所以透视变换也称**4点映射**

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第13页

2.2.1 基本摄像机模型

2. 透视变换

光束会聚带来的问题（尺寸随位置变化）

- 远心成像：将光圈的位置移到平行光的会聚点
- 超心成像：将光圈放得比平行光会聚点更接近图象平面

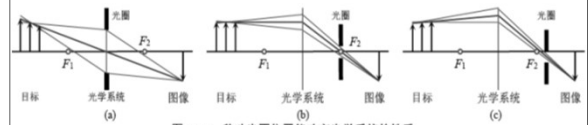


图 2.2.4 移动光圈位置能改变光学系统的性质

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第14页

2.2.1 基本摄像机模型

3. 齐次坐标

$$W' = [X \ Y \ Z]^T \Rightarrow W_h = [kX \ kY \ kZ \ k]^T$$

➤ 透视变换

$$\begin{aligned} c_h = P W_h &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/\lambda & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ -kZ/\lambda + k \end{bmatrix} \\ c = [x \ y \ z]^T &= \begin{bmatrix} \lambda X / (\lambda - Z) \\ \lambda Y / (\lambda - Z) \\ \lambda Z / (\lambda - Z) \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

摄像机坐标

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第15页

2.2.1 基本摄像机模型

4. 逆透视变换

$$\begin{aligned} \text{世界坐标} \quad W_h &= P^{-1} c_h & P^{-1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\lambda & 1 \end{bmatrix} \\ c_h &= [kx' \ ky' \ 0 \ k]^T \end{aligned}$$

$$W_h = [kx' \ ky' \ 0 \ k]^T \Rightarrow W = [X \ Y \ Z]^T = [x' \ y' \ 0]^T$$

$X = \frac{x'}{\lambda}(\lambda - Z)$ 由图象点 (x', y') 并不能唯一确定 3-D 空间点的 Z 坐标（因为它对任何一个点都给出 $Z = 0$ ）
 $Y = \frac{y'}{\lambda}(\lambda - Z)$

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第16页

2.2.2 近似投影模式

1. 正交投影

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

焦距无穷时的
透视投影，不
考虑世界点的
Z 坐标

反映了景物截面的真正尺度

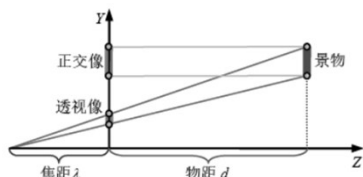


图 2.2.6 正交投影和透视投影对比示意图

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第17页

2.2.2 近似投影模式

2. 弱透视投影

不考虑世界点的 Z 坐标，采用正交投影和图象平面内的等比例缩放

缩放系数：

$$s = \frac{\lambda}{d}$$

$$P = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

当物距是景物尺度的 20 倍时，用弱透视投影去近似透视投影的效果比较好

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第18页

2.2.2 近似投影模式

3. 平行透视投影

介于正交投影和透视投影之间

- (1) 将 P 平行投影到投影平面
- (2) 将投影平面上的投影再次透视投影到象平面上

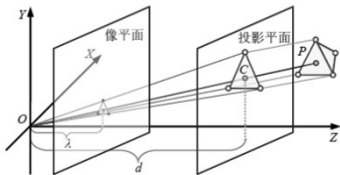


图 2.2.7 平行透视投影成像示意图

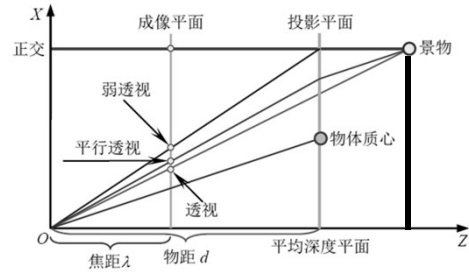
第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第19页

2.2.2 近似投影模式

4. 各种近似模式与透视投影的对比



第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第20页

2.2.3 一般摄像机模型

摄像机坐标系统与世界坐标系统分开，但摄像机坐标系统与象平面坐标系统重合时的情况

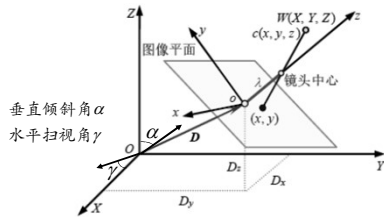


图 2.2.9 世界坐标系统与摄像机坐标系统不重合时的投影成像示意图

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第21页

2.2.3 一般摄像机模型

用以下步骤从世界坐标系统与摄像机坐标系统重合时的摄像机模型转换来：

- ① 将象平面原点按 D 移出世界坐标系统的原点
- ② 以某个 γ 角（绕 z 轴）水平扫视 x 轴
- ③ 以某个 α 角将 z 轴垂直倾斜（绕 x 轴旋转）

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -D_x \\ 0 & 1 & 0 & -D_y \\ 0 & 0 & 1 & -D_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_\gamma = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第22页

2.2.3 一般摄像机模型

• 一系列变换级连

$$c_h = PRTW_h \quad (2.2.25)$$

(2.2.9) (2.2.22) 齐次坐标

用 c_h 的第四项去除它的第一和第二项

$$x = \lambda \frac{(X - D_x) \cos \gamma + (Y - D_y) \sin \gamma}{-(X - D_x) \sin \alpha \sin \gamma + (Y - D_y) \sin \alpha \cos \gamma - (Z - D_z) \cos \alpha + \lambda}$$

$$y = \lambda \frac{-(X - D_x) \sin \gamma \cos \alpha + (Y - D_y) \cos \alpha \cos \gamma + (Z - D_z) \sin \alpha}{-(X - D_x) \sin \alpha \sin \gamma + (Y - D_y) \sin \alpha \cos \gamma - (Z - D_z) \cos \alpha + \lambda}$$

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第23页

2.2.4 通用成像模型

四个系统全分开（+ 镜头失真，+ 坐标取整）

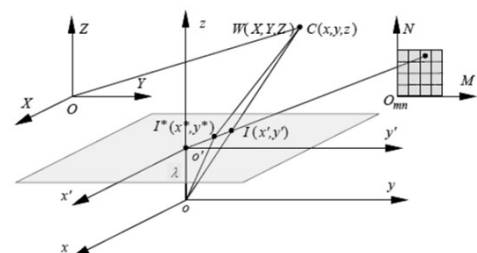


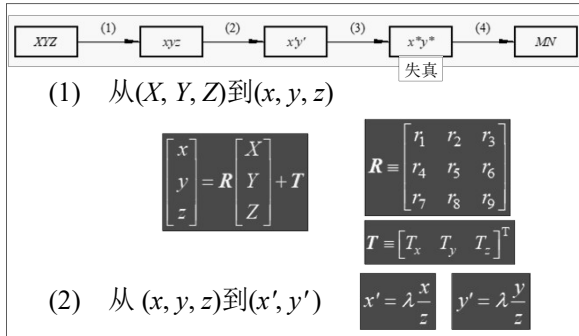
图 2.2.12 通用成像模型

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第24页

2.2.4 通用成像模型



第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第25页

2.2.4 通用成像模型

(3) 从 (x', y') 到 (x^*, y^*)

镜头径向失真系数

$$\begin{aligned} x^* &= x' - R_x & R_x &= x^* (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \approx x^* k r^2 \\ y^* &= y' - R_y & R_y &= y^* (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \approx y^* k r^2 \end{aligned}$$

(4) 从 (x^*, y^*) 到 (M, N)

$$\begin{aligned} M &= \mu \frac{x^* M_x}{S_x L_x} + O_m & M &= \lambda \frac{r_1 X + r_2 Y + r_3 Z + T_x}{r_7 X + r_8 Y + r_9 Z + T_z} \frac{\mu M_x}{(1 + k r^2) S_x L_x} + O_m \\ N &= \frac{y^*}{S_y} + O_n & N &= \lambda \frac{r_4 X + r_5 Y + r_6 Z + T_y}{r_7 X + r_8 Y + r_9 Z + T_z} \frac{1}{(1 + k r^2) S_x} + O_n \end{aligned}$$

不确定性图像尺度因子

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第26页

2.3 摄像机标定

{也称为摄像机定标、校准或校正，
目的是确定摄像机（内外）参数
需要先知道一组基准点}

2.3.1 标定程序和参数

2.3.2 两级标定法

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第27页

2.3.1 标定程序和参数

考虑通用成像模型

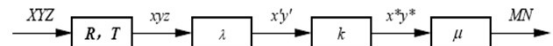


图 2.3.1 从 3-D 世界坐标到计算机图像坐标的 4 步变换和需标定的参数

- 外部 1: 旋转矩阵 R 和平移矢量 T 共 6 个独立参数
- 内部 2: 镜头焦距 λ
- 3: 镜头径向失真系数 k
- 4: 不确定性图像尺度因子 μ
- (还包括图像平面原点的计算机坐标 O_m 和 O_n)

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第28页

2.4 亮度成像

{场景亮度与图像亮度}

2.4.1 光度学和光源

2.4.2 从亮度到照度

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第29页

2.4.1 光度学和光源

辐射度量学

研究各种电磁辐射强弱的学科
光是一种电磁辐射

光度学

研究光的强弱的学科
光通量: 光辐射的功率/光辐射量
光通量的单位: lm (流明)

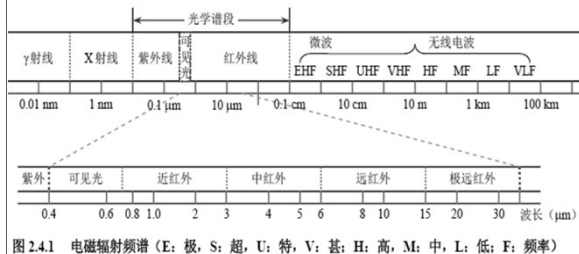
第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第30页

2.4.1 光度学和光源

1. 电磁辐射频谱



第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第31页

2.4.1 光度学和光源

2. 点光源和扩展光源

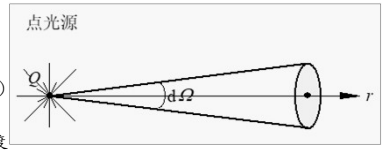
点光源: 线度足够小, 或距离观察者足够远

发光强度 I : 点光源沿某个方向上单位立体角 $d\Omega$ 内发出的光通量 $d\Phi$

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

单位: cd (坎)
1 cd = 1 lm/sr

球面度



第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

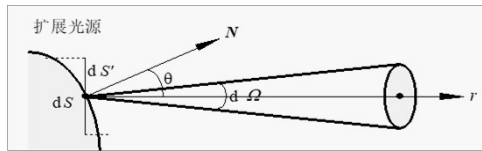
第32页

2.4.1 光度学和光源

2. 点光源和扩展光源

扩展光源: 有一定发光面积的光源

扩展光源在沿 r 方向的总发光强度为各个面元沿 r 方向的发光强度之和



第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

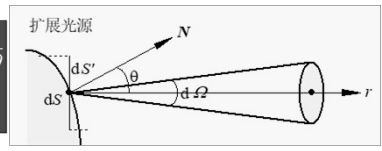
第33页

2.4.2 从亮度到照度

1. 亮度和照度

亮度 B : 给定方向上单位投影面积的发光强度, 或给定方向上的单位投影面积在单位立体角内发出的光通量 (单位: cd/m²)

$$B \equiv \frac{dI}{dS'} = \frac{dI}{dS \cos \theta} = \frac{d\Phi}{d\Omega dS \cos \theta}$$



第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第34页

2.4.2 从亮度到照度

1. 亮度和照度

照度 E : 一个被光线照射的表面上的照度定义为照射在单位面积上的光通量。设面元 dS 上的光通量为 $d\Phi$, 则此面元上的照度 E 为:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad \text{单位: lx (勒[克斯])}, 1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$$

- 亮度: 观察者对物体表面光强的量度 {表2.4.1}
- 照度: 是光源对物体辐射的一种量度 {表2.4.2}

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第35页

2.4.2 从亮度到照度

2. 对亮度和照度的讨论

照度是对具有一定强度的光源照射场景的辐射量的量度 (对实际景物讨论它所受到的照度)

亮度则是在有照度基础上对观察者所感受到的光强的量度 (对光源讨论其发出的亮度)

在真空中, 沿辐射直线方向的亮度是常数

照度值会受到从光源到物体表面的距离的影响, 而亮度则与从物体表面到观察者的距离无关

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第36页

2.4.2 从亮度到照度

2. 对亮度和照度的讨论

象亮度：与发光体上各个面元发出的总光通量中有多少进入观察器有关

$$L' = k \left(\frac{n'}{n} \right)^2 L$$

k 为透射率， n' 和 n 分别是象空间和物空间的折射率， L 是物亮度

在 $n' = n$ 、 $k \approx 1$ 时，象亮度近似等于物亮度，并与物象之间的相对位置和成像系统的放大率无关

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第37页

2.4.2 从亮度到照度

2. 对亮度和照度的讨论

象照度：决定了使（接受到光的）成象物感光
的总光通量

$$E = \frac{k\pi L u_0^2}{V^2} \quad \begin{array}{l} u_0 \text{ 为入射孔径角} \\ V \text{ 是横向放大率} \end{array}$$

在象距远大于焦距的情况下，象照度与横向放大率平方成反比，例如投影仪会使象在放大的同时变暗

在物距远大于焦距的情况下，象照度基本保持不变，如用摄像机拍摄远近不同的目标时，只要物亮度相同，感光面的感光程度是一样的

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第38页

2.4.2 从亮度到照度

3. 均匀照度

实际景物都是有一定尺寸的，不同位置得到的照度有可能不同

使用单个点光源

辐射随距离平方衰减

$$E = k \frac{\cos i}{d^2} = \frac{kh}{d^3}$$

图 2.4.3 单个点光源照明的几何

景物表面产生非均匀的照度区域

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第39页

2.4.2 从亮度到照度

3. 均匀照度

使用两个（对称安置的）点光源

有可能在连线上获得比较均匀的照度

光源产生的强度值

联合的强度值

把光源间距离适当加大，以使可用的（比较均匀的）照度范围尽可能大

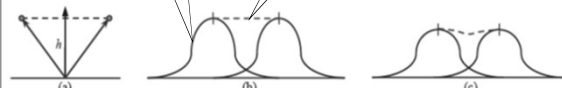


图 2.4.4 对称布置两个点光源照明的几何

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第40页

2.4.2 从亮度到照度

3. 均匀照度

点光源换成条状光源

细长矩形

正方形

圆形

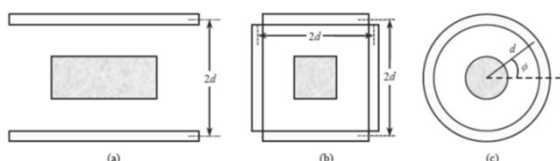


图 2.4.5 为获得均匀照度区域的几种光源分布

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第41页

联系信息



- ✉ 通信地址：北京清华大学电子工程系
- ✉ 邮政编码：100084
- ✉ 办公地址：清华大学，罗姆楼，6层305室
- ✉ 办公电话：(010) 62798540
- ✉ 传真号码：(010) 62770317
- ✉ 电子邮件：zhang-yj@tsinghua.edu.cn
- ✉ 个人主页：oa.ee.tsinghua.edu.cn/~zhangyujin/

第2讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第42页