

# 电光源原理引论

蔡祖泉  
陈之范  
朱绍龙  
周太明  
编著

3.1 复旦大学出版社

## 内 容 提 要

本书是根据电光源专业的教学需要编写的，在编写过程中力图反映出国内外在电光源研究方面的最新成果。全书共分八章，第一～三章主要阐述与光源有关的基础知识，其余各章分别讨论一种主要类型的光源，包括在灯中所发生的各种基本的物理和化学过程及其描述的基本参量、灯的设计梗概以及灯的特性和应用。

本书可作为电光源专业及其相关专业的教学用书，以及从事电光源研究与开发、低温等离子体研究、照明技术研究等有关方面工作的科研人员和工程技术人员的参考读物。

### 电光源原理引论

蔡祖泉 陈之范 编著  
朱绍龙 周太明

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 10.875 插页 0 字数 309,000

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

印数 1—2,500

ISBN 7-309-00125-7/O.033 定价: 2.70元

# 前 言

电光源是现代社会的文明象征之一。虽然电光源的发展已有一百多年的历史，但是对它们内部发生的物理过程的研究，还是近几十年间的事情。这些研究，不仅使我们对电光源的原理有了更深入的了解，而且为不断改进现有光源的性能、开发更新型的光源提供基础。为使读者能尽快地对电光源原理有一个全面、正确的了解，我们从基本的物理原理出发，结合近年来编者在电光源研究方面的成果和经验以及国内外同行们在这方面的研究成果，编写了本书。编者曾把本书初稿作为复旦大学电光源专业的教材，实践证明，教学效果是良好的。

本书除绪论外共分八章，绪论和第一、六~八章由周太明编写，第二~五章由朱绍龙编写，最后由蔡祖泉总校，书中大量素材由陈之范提供。本书适合于从事电光源、照明技术及其他有关专业的大专院校师生、科技人员及工程技术人员参考。

本书在编写过程中，得到徐学基、方道腴、王在星和张倍华，以及复旦大学电光源研究所同志的帮助，谨此致谢。

本书在编写与出版过程中，还得到了生产稀土材料的上海跃龙化工厂的大力支持，作者在此深表谢意。

限于编者水平，书中如有谬误之处，敬请读者指正。

**编 者**

1987年12月

# 目 录

绪论	1
----	---

## 第一章 光源的特性参量

§ 1-1 光源的辐射特性	6
§ 1-2 照明光源的光学特性	11
§ 1-2-1 人眼的视觉	11
§ 1-2-2 光强度、光通量、光照度和光亮度	14
§ 1-2-3 发光效率	20
§ 1-2-4 光源的色温和显色性	21
§ 1-3 光源的电气特性和寿命	31
§ 1-3-1 光源的电气特性	31
§ 1-3-2 灯的寿命	33

## 第二章 白炽光源

§ 2-1 热辐射	35
§ 2-1-1 基尔霍夫定律	35
§ 2-1-2 黑体辐射	36
§ 2-1-3 实际表面的辐射	37
§ 2-1-4 辐射体的发光效率	39
§ 2-2 白炽辐射体 (灯丝)	40
§ 2-2-1 白炽辐射体	41
§ 2-2-2 钨的主要性质	43
§ 2-3 真空白炽灯中的基本物理现象	44
§ 2-3-1 真空白炽灯中的能量平衡	44
§ 2-3-2 真空中白炽钨丝的蒸发和寿命	46
§ 2-4 充气白炽灯中的基本物理现象	48
§ 2-4-1 充气白炽灯中的气体热损耗	48
§ 2-4-2 气体中白炽钨丝的蒸发和寿命	56

§ 2-5 卤钨灯	60
§ 2-5-1 卤钨循环原理	61
§ 2-5-2 管形卤钨灯中的最佳工作气压	63
§ 2-5-3 卤钨循环剂	65
§ 2-5-4 卤钨循环模型	68
§ 2-6 白炽灯丝的设计	73
§ 2-6-1 白炽灯丝设计的统一公式	73
§ 2-6-2 白炽灯丝设计的经验公式	78
§ 2-6-3 白炽灯丝的外推法计算	80
§ 2-7 白炽灯的运用特性	81

### 第三章 气体放电光源基础

§ 3-1 气体放电的辐射	85
§ 3-2 谱线的轮廓和展宽	87
§ 3-2-1 谱线的自然宽度	88
§ 3-2-2 谱线的多普勒展宽	88
§ 3-2-3 谱线压力展宽的洛仑兹理论	90
§ 3-2-4 楞次-韦斯考夫(Lentz-Weisskoqf) 碰撞截面	91
§ 3-2-5 谱线压力展宽的林特霍姆(Lindholm)理论	93
§ 3-2-6 谱线压力展宽的单粒子统计理论	96
§ 3-2-7 谱线压力展宽的多粒子统计理论	98
§ 3-3 辐射的吸收和转移	100
§ 3-3-1 辐射的吸收系数	100
§ 3-3-2 辐射转移方程	102
§ 3-3-3 辐射的光子扩散理论	104
§ 3-4 低气压放电正柱	108
§ 3-4-1 带电粒子的平衡方程及浓度的径向分布	109
§ 3-4-2 激发态原子的连续性方程和浓度的径向分布	111
§ 3-4-3 低压正柱中的能量平衡和放电电流	113
§ 3-5 高气压放电正柱	115
§ 3-5-1 高气压放电正柱中的局部热力学平衡	115
§ 3-5-2 高气压圆柱形放电正柱的辐射	118
§ 3-5-3 高气压电弧正柱中的能量平衡	119

§ 3-5-4 高压正柱的相似性·····	121
§ 3-5-5 高压放电正柱的通道模型·····	123

## 第四章 低气压汞蒸气放电荧光灯

§ 4-1 低气压汞蒸气放电荧光灯的工作原理·····	125
§ 4-2 低气压汞蒸气放电荧光灯的特性·····	129
§ 4-3 低气压汞蒸气放电正柱理论·····	134
§ 4-3-1 汞激发态原子的浓度·····	134
§ 4-3-2 放电正柱中的电子温度·····	137
§ 4-3-3 放电正柱的轴向电场·····	138
§ 4-3-4 理论计算结果·····	140
§ 4-4 低气压汞蒸气放电荧光灯的寿命和使用·····	142
§ 4-4-1 电极对荧光灯寿命的影响·····	142
§ 4-4-2 荧光灯的启动及其对灯寿命的影响·····	143
§ 4-4-3 荧光灯的使用·····	145
§ 4-5 高功率低气压汞蒸气放电荧光灯·····	147
§ 4-6 紧凑型荧光灯·····	149
§ 4-7 高频激发的低气压汞蒸气放电荧光灯·····	153
§ 4-7-1 低气压汞蒸气放电的频率特性·····	153
§ 4-7-2 电子镇流器·····	156
§ 4-7-3 低气压高频无极放电荧光灯·····	158

## 第五章 高压汞蒸气放电灯

§ 5-1 高压汞蒸气放电特性·····	159
§ 5-1-1 汞蒸气放电的发光效率随蒸气压的变化·····	159
§ 5-1-2 汞蒸气的压强·····	161
§ 5-1-3 高压汞蒸气电弧的热损耗与总辐射·····	163
§ 5-1-4 高压汞蒸气电弧的辐射光谱·····	165
§ 5-1-5 高压汞蒸气电弧的轴向电场·····	166
§ 5-2 高压汞蒸气放电灯·····	168
§ 5-2-1 高压汞蒸气放电灯的结构·····	168
§ 5-2-2 高压汞蒸气放电灯的设计要点·····	170
§ 5-2-3 高压汞灯的启动与工作特性·····	172

§ 5-2-4 高压汞灯的寿命	175
§ 5-3 超高气压汞蒸气放电灯	176
§ 5-3-1 超高气压汞蒸气放电特性	176
§ 5-3-2 球形超高气压汞灯的结构和特性	179
§ 5-3-3 球形超高气压汞灯的设计要点	182
§ 5-3-4 毛细管超高气压汞灯的结构和特性	184

## 第六章 钠 灯

§ 6-1 低压钠灯	188
§ 6-1-1 低压钠灯的工作原理	188
§ 6-1-2 低压钠灯的结构和设计	194
§ 6-1-3 低压钠灯的应用和发展	200
§ 6-2 高压钠蒸气放电	206
§ 6-2-1 高压钠蒸气放电的自反 $D$ 线辐射	206
§ 6-2-2 高压钠蒸气放电的温度分布	212
§ 6-2-3 高压钠蒸气放电的净发射系数	216
§ 6-3 高压钠灯	220
§ 6-3-1 高压钠灯的结构和灯的工作气压	220
§ 6-3-2 影响高压钠灯光效因素的分析	223
§ 6-3-3 高压钠灯的设计要点	224
§ 6-3-4 高压钠灯显色性能的改善	228

## 第七章 金属卤化物灯

§ 7-1 金属卤化物灯的基本原理	230
§ 7-1-1 金属卤化物循环	230
§ 7-1-2 汞在金属卤化物灯中的作用	233
§ 7-1-3 各种组分在灯内的分压强分布	235
§ 7-2 钠-铊-铟金属卤化物灯	239
§ 7-2-1 金属卤化物灯的分类	239
§ 7-2-2 铊原子绿线辐射强度的计算	240
§ 7-2-3 钠-铊-铟金属卤化物灯的特性	244
§ 7-3 稀土金属卤化物灯和分子发光灯	252
§ 7-3-1 稀土金属卤化物灯	252

§ 7-3-2 分子发光灯	260
§ 7-4 金属卤化物灯的几个特殊问题	267
§ 7-4-1 有关金属碘化物灯中的电极问题	267
§ 7-4-2 有关金属卤化物灯的启动问题	270
§ 7-4-3 有关重复着火电压的问题	272
§ 7-4-4 金属碘化物灯内的电解现象	274
§ 7-4-5 有关金属碘化物灯中金属的损失问题	275
§ 7-4-6 添加物轴向分离问题	277
§ 7-4-7 电弧收缩问题	277

## 第八章 氙 灯

§ 8-1 氙灯的辐射特性	281
§ 8-2 长弧氙灯	286
§ 8-2-1 长弧氙灯的结构与设计	286
§ 8-2-2 长弧氙灯的性能和用途	290
§ 8-3 短弧氙灯	293
§ 8-3-1 短弧氙灯的结构和电弧的稳定问题	293
§ 8-3-2 短弧氙灯的亮度	295
§ 8-3-3 短弧氙灯的设计要点	298
§ 8-3-4 水冷电极大功率短弧氙灯	301
§ 8-3-5 短弧氙灯的应用	304

## 附录

A 自然对流	306
A-1 速度分布相似的条件	307
A-2 温度分布相似的条件	309
A-3 发热物体表面的热耗散	310
B 热扩散	311
C 超高气压放电灯泡壳的应力计算	313
C-1 泡壳上的张应力和热应力分布	314
C-2 计算实例	315
D 附表	318
表1 试验色的光谱反射率表	318
表2 基准光源照明时试验色的色坐标和明度指数表	320



## 绪 论

白天，阳光普照大地；夜晚，各种灯光又将工厂、学校、街道和商店等照得通明。光是人们生活、工作和学习中必不可少的东西。难以设想，如果没有光源——自身能发光的物体（如太阳和各种灯），人们如何在黑暗之中生存。

光源的发展是与整个人类文明的发展史密切相关的。取火方法的发明不仅给人类带来熟食和温暖，也给人类带来了光明。除去篝火和火炬外，油灯可算是最早的人造光源。最简单的油灯包括盛油的器皿和灯芯。起初，是采用动物油或植物油作为燃料。直到十九世纪六十年代随着美国油田的开发，煤油才成了满意的油灯燃料，促进了油灯的发展。蜡烛是与油灯并行发展的另一种光源。由于蜂蜡比较贵，所以在石蜡出现之前，多半采用动物脂来做蜡烛。另一种靠燃烧发光的光源是气体灯。最初的气灯就是气体管道上的一个孔洞。后来逐渐改进灯头的设计，使喷出的气体火焰产生更多的光。在以上这些火焰光源中，发光的实际上是被火焰加热到白炽的炭粒子。

电的发现给光源的发展注入了新的原动力。在摩擦起电机发明不久，人们就发现了辉光放电现象。在十九世纪初，碳弧问世。但当时不是将它当作一种有用的光源，而是将它所产生的热用于化学。在十九世纪四十到五十年代，人们尝试将电弧用于照明。但由于当时唯一的电源是电池，耗费太贵，故很难实际应用。直至十九世纪六十到七十年代，实用的发电机问世，采用电照明才真正成为可能。电弧灯在室外照明中的成功，使人们又有兴趣去研究用于室内照明的功率小的、发光稳定的白炽电灯。在1879到1883年期间，有几个人开发了碳丝灯，并付诸实际应用。当时爱迪生所用的碳丝来源于某一种竹子的纤维。碳丝灯的光效为 $2.5\sim 5.0\text{ lm/W}$ 。从现在的标准来看，碳丝灯的

光效是相当低的。但在当时来说，与气体灯相比它已是相当好了。气灯工业为了竞争，发明了气灯灯罩，大大改善了灯的效率。当时已知某些材料，尤其是钍和稀土元素的氧化物，加热时产生选择辐射，发出很亮的光。气灯灯罩就是利用了这一现象。具体说来，它是含有约99%氧化钍和1%氧化铈的丝或棉纤维织成的网罩。显然，和气体火焰本身发光不同，这时希望气体火焰发出尽量多的热以加热灯罩。在本世纪初，有罩的气灯获得了成功的应用。但后来，随着电灯的发展，它逐渐被淘汰了。

与其他领域的情况相似，材料和工艺的发展在电光源的发展中扮演着十分重要的角色。白炽灯的发展过程就是一个生动的例子。十九世纪九十年代中期，碳丝灯的发展已达到其顶峰。其他高熔点的金属材料，如钨、钽和钨，提供了能制造工作于更高温度下的白炽灯的可能性。实践证明，钨是很好的灯丝材料。但是由于钨易碎，所以很难拉制成丝。直到二十世纪初，才解决了拉制钨丝的问题。后来，真空的钨丝灯让位于充气灯，单螺旋、进而双螺旋结构的灯丝取代了原来鼠笼式的灯丝。到1934年时，充气的双螺旋钨丝灯的光效已达13lm/W。在其后的30年间，白炽灯的光效增加很少，但在白炽灯的其他技术领域内仍有实质性的进展。例如，灯的寿命的延长，多种规格的灯的开发，尤其重要的是白炽灯制造技术的改进得以使灯的成本和售价大大降低。在本世纪五十年代末，由于将卤素引入钨丝灯内，使白炽灯又有了新的重大发展。在碳丝灯中添加氯的想法早在十九世纪八十年代就有了。后来在本世纪三十年代又有人提出在钨丝灯中充碘的设想。这一设想虽然是正确的，但由于技术上的困难，直到1959年才得到实际应用。卤钨灯诞生后，由于其杰出的性能，很快地在泛光照明、照相和汽车照明等领域中得到了广泛的应用。

另一方面，气体放电灯也在迅速发展。在二十世纪初，霓虹灯问世，到二十年代这种灯得到广泛应用。在差不多同时，低压汞弧灯试验成功，但并未广泛应用，因为它的颜色很差，光效又不比钨丝灯高。但通过研究，发现在更高的蒸气压下汞气放电可以得到高光效，从而导致了三十年代初高压汞灯的出现。在三十年代末期，耐高温的

放电管材料——石英玻璃被成功地应用于高压汞灯的制造。这对高压汞灯及以后其他高温光源的发展有着十分重大的影响。几乎与高压汞灯同时，钠蒸气放电灯也发展起来了。低压钠灯有很高的光效，但发出的是单色的黄光，所以当时在欧洲被广泛地应用于道路照明。经过长期的研究，现在低压钠灯的光效已达 $200\text{lm/W}$ ，成为光效最高的人造光源。

荧光灯可算是放电现象最成功的应用之一。它出现在1940年左右，现已被广泛应用于世界各地，产生60%以上的人造光。早在十九世纪五十年代，人们已观察到某些材料在紫外线作用下能产生荧光现象。到本世纪三十年代末，多种能将低压汞灯的紫外线变成可见光的荧光粉研制成功。但是，早期的荧光粉并不能有效地将紫外光转换成可见光。1940年，荧光灯的光效约 $23\text{lm/W}$ 。1942年，卤磷酸盐荧光粉问世，使荧光灯的光效提高了2~3倍。这是灯发展史上的一个重要里程碑。后来，随着对灯中发光机理研究的深入、电极材料的改进和制灯技术的提高，荧光灯的性能也不断提高。但是长期以来，荧光灯存在着光效和显色指数不能同时做得很高的问题。到了七十年代，随着色觉研究的发展，人们发现如果光源所产生的辐射集中在分别以 $450\text{nm}$ 、 $540\text{nm}$ 和 $610\text{nm}$ 为中心的三个狭窄波段内，就能具有高光效，同时具有良好的显色性能。在此研究的基础上，在所要求的光谱区域内产生窄带辐射的荧光粉（俗称“三基色荧光粉”）和新一代的荧光灯应运而生。这种荧光灯的光效可达 $80\text{lm/W}$ 以上，而一般显色指数也可达80以上。紧凑型的荧光灯也随之登上照明舞台。

气体放电光源的另一个重要方面是高强度放电(HID)灯。为了部分改善高压汞灯的颜色，人们用能发红光的荧光粉涂敷在灯外壳的内壁上。为了适应这种需要，硫化镉和氟锆酸镁这两种荧光粉分别在三十年代和五十年代问世了。但即使采用氟锆酸镁的高压汞灯，光色仍不足以好到可以用于商业区的室内照明，而只能用于室外或重工业工厂的室内照明。直到1967年，新的钒磷酸钪荧光粉投入应用，才较好地解决了这一问题。第二次世界大战后，为了开发新的高气压放电灯，对很多元素都已进行过研究。其中获得成功的是氙灯。然而，总

体说来，在相当长的一段时间内进展不大，仍是高压汞灯占据统治地位。但是自六十年代初以来，两种新的高强度放电灯——金属卤化物灯和高压钠灯出现于照明舞台之上。金属卤化物放电很早就有人研究过，但是由于一些技术上的困难，迟迟没有得到应用。同样，只有出现了新的放电管材料——半透明的多晶氧化铝陶瓷管，并且解决了它与金属的封接问题之后，高压钠气放电的应用才成为可能。虽然金属卤化物灯和高压钠灯的历史还很短，但因为它们有很高的辐射效率和长达上万小时的寿命，所以已经在街道照明、室内照明和其他很多领域中得到了非常广泛的应用。这使不少人认为，它们的出现标志着光源发展史上新纪元的开始。

伴随着各种新光源的开发和光源性能的提高——效率的提高、光色的改进以及寿命的延长，光源的应用越益广泛。高压汞灯和高压钠灯被大量应用于马路照明，白炽灯和荧光灯则被普遍用于室内照明。除一般的照明光源外，还有多种多样适应特殊照明要求的光源，如矿工用的轻便的矿灯，汽车上很亮的头灯，……现在，卤钨灯等在这些场合得到很好的运用。光源在商业上的作用也为愈来愈多的人所认识到，五颜六色的霓虹灯和五彩缤纷的装饰照明光源帮助招徕大批的顾客。光源在尖端科技领域和国防事业中也有着重要的应用。例如，在空间科学中应用氙灯模拟太阳，在夜视仪中使用轻巧的红外光源。即使在人们的娱乐活动中，光源也是必不可少的。电影、电视的拍摄、转播，采用光色很好的高光效光源，如金属卤化物灯和卤钨灯。在体育场、馆内也需要有很好的照明，以使人们能欣赏精彩的比赛和表演。由此可见，光源在人类活动中是多么重要。可以说，凡有人类活动的地方，都需要有光源的存在。

人类对光源的迫切需求必将促进光源的进一步发展，而人类在其他领域中的新成就又为光源的进一步发展提供了新的条件。显然，发展方向依然是在保证寿命的条件下提高电-光转换效率。若干年来，人们一直在试验减少白炽灯的红外辐射损失。近年来，通过在泡壳上采用红外反射膜，已在这方面取得了明显的效果。当然，新的耐更高温度的能产生选择辐射的灯丝材料仍是人们努力的方向之一。人们另

一个重要的研究目标是新型的气体放电灯，它兼有高压钠灯的高光效和金属卤化物灯的良好光色，而且可以做成小功率以便能应用于室内照明。这种新型的气体放电灯可能是采用分子络化物的新的金属卤化物灯，也可能是采用某些特殊放电管材料和某些新放电介质的放电灯。为了减少电极和镇流器的损耗，高频无极放电灯、电子镇流器以及具有正的伏安特性的放电灯也是人们感兴趣的研究课题。此外，能将2个红外光子变成1个可见光子以及能将1个紫外光子变成2个可见光子的新型荧光粉也是人们努力的目标。对白光光源人们能获得的最高光效约为250lm/W。虽然我们现在离这一指标还很遥远，但相信随着人们对发光机理研究的深入，随着新材料和新系统的出现，我们一定会一天比一天更接近它。

# 第一章 光源的特性参量

## § 1-1 光源的辐射特性

光是一种电磁波，它包括的波长区间约从几个 nm ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ) 到 1mm 左右。这些光并不是都能看得见的，人眼所能看见的只是其中的一部分，我们把这一部分称为可见光。在可见光中，波长最短的是紫光，稍长的是蓝光，以后的顺序是青光、绿光、黄光、橙光和红光，红光的波长最长。而在不可见光中，把波长比紫光短的光称为紫外线，比红光长的叫做红外线。表 1-1 列出紫外、可见和红外光区的大致的波长范围。波长小于 200nm 的光之所以称为真空紫外，是因为

表 1-1 光的各个波长区域

波长区域 (单位: nm)	区域名称
1~200	真空紫外区
200~300	远紫外区
300~380	近紫外区
380~420	紫光
420~450	蓝光
450~490	青光
490~560	绿光
560~590	黄光
590~620	橙光
620~780	红光
780~1500	近红外区
1500~10000	中红外区
10000~1000000	远红外区

这部分光在空气中很快被吸收，因此只能在真空中传播。

现在常用的光波波长单位是  $\mu\text{m}$ 、nm 和  $\text{\AA}$  (埃)，它们之间的关系

是： $1\mu\text{m} = 10^3\text{nm} = 10^4\text{\AA}$ 。

光除具有波动性之外，还具有粒子性。量子论认为，光是由许多光子组成的，这些光子具有的能量为  $h\nu$ ，其中  $h (= 6.626 \times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s})$  是普朗克常数， $\nu$  是光的频率。量子电动力学较好地反映了光的这种波动和粒子的二象性。

为了研究光辐射现象的规律，测定供给光源的能量（比如说电能）转换成光能效率的高低，通常以下面的一些基本参量来描述光源的辐射特性。

### (1) 辐射能量 $Q_e$

光源辐射出来的光（包括红外线、可见光和紫外线）的能量称为光源的辐射能量。当这些能量被物质吸收时，可以转换成其他形式的能量，如热能、电能等。

辐射能的单位是：cal、erg、J，它们之间的关系是：

$$1\text{cal} = 4.18\text{J}, 1\text{J} = 10^7\text{erg}。$$

### (2) 辐射通量 $\Phi_e$

在单位时间内通过某一面积的辐射能量称为经过该面积的辐射通量，而光源在单位时间内辐射出的总能量就叫做光源的辐射通量。辐射通量也可称为辐射功率或辐射能流。辐射通量的单位是  $\text{W} (= \text{J/s})$ 、 $\text{erg/s}$ 、 $\text{cal/s}$  等。

### (3) 辐射强度 $I_e$

光源在某一方向的辐射强度  $I_e$  是指光源在包含该方向的立体角  $\Omega$  内发射的辐射通量  $\Phi_e$  与该立体角  $\Omega$  之比：

$$I_e = \Phi_e / \Omega \quad (1-1a)$$

由于光源在各方向的辐射强度一般是不均匀的，所以(1-1a)式表示的辐射强度是在立体角  $\Omega$  内的平均辐射强度。要表明在某一方向的辐射强度，必须将立体角取得很微小，在包含该方向的微小立体角  $d\Omega$  内发射的辐射通量  $d\Phi_e$  与该微小的立体角  $d\Omega$  之比值就定义为光源在该方向的辐射强度  $I_e$ ：

$$I_e = d\Phi_e / d\Omega \quad (1-1b)$$

如果光源近似为点光源，可以它为球心，以单位长度为半径，作

一球面（图 1-1）。在球面上取一微小面积，它对球心所张的微小立体角为  $d\Omega$ ，通过它的辐射通量为  $d\Phi_e(\varphi, \theta)$ 。在这个方向的辐射强度为：

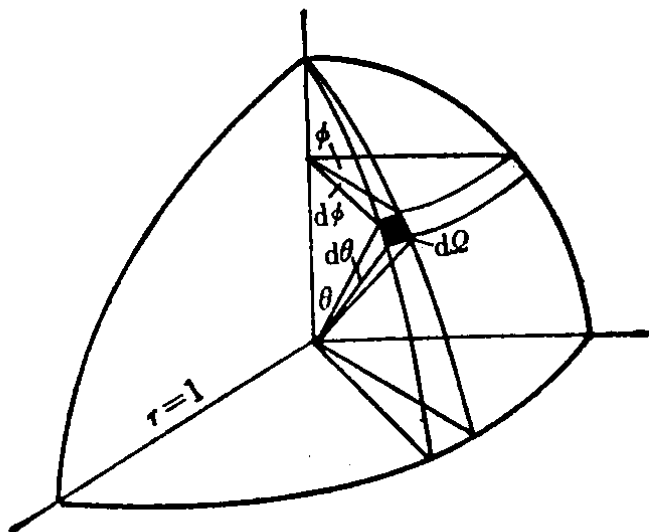


图 1-1 微小立体角的表示

$$I_e(\varphi, \theta) = d\Phi_e(\varphi, \theta) / d\Omega \quad (1-1c)$$

可以算出  $d\Omega = \sin\theta \, d\theta d\varphi$ ，因而

$$d\Phi_e(\varphi, \theta) = I_e(\varphi, \theta) \sin\theta \, d\theta d\varphi \quad (1-2)$$

而光源的全部辐射通量为：

$$\Phi_e = \int d\Phi_e(\varphi, \theta) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_e(\varphi, \theta) \sin\theta \, d\theta \quad (1-3)$$

如果光源在各个方向的辐射是均匀的，即辐射强度  $I_e(\varphi, \theta)$  是一个常数 ( $= I_e$ )，则 (1-3) 式就变成：

$$\Phi_e = I_e \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin\theta \, d\theta = 4\pi I_e \quad (1-4)$$

这就是说，当光源在空间各个方向发出的辐射通量分布均匀时， $I_e = \Phi_e / 4\pi$  是沿任何方向的真正的辐射强度。而在辐射通量分布不均匀时，辐射强度随方向而变， $\Phi_e / 4\pi$  只代表平均的球面辐射强度。对于辐射强度  $I_e(\varphi, \theta)$  随方向而变的各向异性光源，常可用图解的方法来描述。从某一原点起，向各个方向引矢径，取矢径长度之比与相应方向上的辐射强度成比例。将各矢径的端点联接起来，就得到光源辐射强度的分布曲面。辐射强度的单位是  $W/sr$ 。



#### (4) 辐射出(射)度 $M_e$

一个有一定面积的光源，如果它表面上的一个发光面积  $S$  在各个方向（在半个空间内）的总辐射通量为  $\Phi_e$ ，则该发光面  $S$  的辐射出(射)度为：

$$M_e = \Phi_e / S$$

$M_e$  相当于单位面积的辐射通量，常以  $W/m^2$  表示。

和讨论辐射强度的情况相似，一般光源发光面上各处的辐射出度是不均匀的，所以严格地讲，在发光面某一微小的面积  $dS$  上的辐射出度应该是该发光面向所有方向（在半个空间内）发出的辐射通量  $d\Phi_e$  与该面积  $dS$  之比：

$$M_e = d\Phi_e / dS \quad (1-5)$$

#### (5) 辐射亮度 $L_e$

光源在给定方向上的辐射亮度  $L_e(\varphi, \theta)$  是光源在该方向上的单位投影面积、在单位立体角中的辐射通量，即

$$L_e(\varphi, \theta) = \Phi_e(\varphi, \theta) / S \cos\theta \cdot \Omega \quad (1-6a)$$

其中  $L_e$  的单位是  $W/(m^2 \cdot sr)$ ， $S$  代表发光面的面积， $\theta$  是给定方向和发光面法线之间的夹角， $\Omega$  是给定方向的立体角， $\Phi_e(\varphi, \theta)$  是在该立体角内的辐射通量。

和讨论辐射强度的情况相似，一般光源发光面上各处的辐射亮度以及同一发光面向各方向的辐射亮度都是不均匀的，因此必须规定辐射亮度  $L_e$  为某一微小的发光面积  $dS$  向某一特定方向  $(\varphi, \theta)$  在一微小的立体角  $d\Omega$  内辐射的通量  $d^2\Phi_e$  和在该方向上的投影面积  $dS \cos\theta$  以及立体角  $d\Omega$  之比（图 1-2）：

$$L_e(\varphi, \theta) = d^2\Phi_e(\varphi, \theta) / dS \cos\theta \cdot d\Omega \quad (1-6b)$$

比较(1-1c)和(1-6b)两式，可得：

$$L_e(\varphi, \theta) = dI_e(\varphi, \theta) / dS \cos\theta \quad (1-7)$$

此式说明给定方向上的辐射亮度也就是在该方向上的单位投影面积内的辐射强度。

$L_e(\varphi, \theta)$  通常与方向有关。若  $L_e(\varphi, \theta)$  不随方向而变，则  $I_e(\varphi, \theta)$  正比于  $\cos\theta$ ，即