

测定光谱光效率的一些方法的比较^{1)*}

赫葆源 许宗惠

中国科学院心理研究所

摘 要

本文比较了一些有关测定光谱光效率函数的方法,概述了这些方法的各自特性及其优缺点。文章提请有关工作者注意:光谱光效率函数的各种测定方法还有从各方面继续深入探讨的必要。

前 言

对光谱光效率(即光谱相对视亮度)函数已有过许多研究。早在上一世纪初,人们即已开始探索可见光谱不同区域的视觉特性。1817年有人对日光通过棱镜形成的光谱进行过视觉比较。1887年人们业已科学地确定了光谱中绿色的视亮度最高。至本世纪初,研究者们开始使用函数表示单色光辐射与视亮度间的关系。其后有关的研究有了广泛的开展,许多研究者们运用不同方法,对人眼光谱视亮度进行了认真的测量和探索^①。1923年 K. S. Gilson 等人综合一些研究结果,绘制出一条人眼光谱光效率曲线^②,1924年经国际照明委员会(CIE)正式采纳^③,1931年又与 CIE 标准观察者色度坐标统合为一,成为 CIE $V(\lambda)$ 函数曲线。1964年 CIE 又增添了补充标准观察者及相应的 $V_{10}(\lambda)$, 即适用于大于 4° 视野的光效率函数。几十年来关于光谱光效率函数的使用和理论揭示了不少新问题^④。1957年 D. B. Judd 根据自己实验的结果,指出 CIE $V(\lambda)$ 函数值在 460nm 以下偏低,并提出了修正数据^⑤。1975年第18届 CIE 年会上 TC-1.4 视觉委员会当时的主席 J. A. S. Kinner 在她的综述报告中曾提出 CIE $V(\lambda)$ 可能的不适当的使用问题^⑥。CIE 30 年代初确定的 $V(\lambda)$ 函数,当时颇能满足实际的要求,但自现代各种照明光源长足发展以来,基于这一函数而测得的光源亮度和人眼感知到的明度之间差异很大^⑥。上述诸问题引起了有关工作者的注意,从不同方面展开了研究探索。

业经发现光谱光效率函数可因使用的测定方法不同而不同^⑦。众所周知,测定光谱光效率的方法有异色闪烁光度法、最小可觉界线法、视敏度法、增量阈限法、异色视亮度直接匹配法和逐步比较法等。幸好如此多种多样的方法所测出来的光效率函数自然而然趋

1) 本文于1984年4月7日收到。

* 胡民同志参加了部分数据的换算和绘图工作。

注 $L = Km \int L_e V(\lambda) d\lambda$

向分为两个类型⁽⁸⁾。第一类函数的曲线相当平滑, 约在 560nm 处显现出最大感受性。这类函数在用于亮度方程*时, 满足相加性的假设。产生这类型光谱光效率函数所使用的方法有闪烁光度法、最小可觉界线法和视敏度法。经 Judd 修订过的 CIE $V(\lambda)$ 是这类函数的一个典型代表。另一类型的函数, 与 CIE $V(\lambda)$ 相比, 呈现一种较为宽阔形状的曲线, 常在 540 和 600nm 左右显出大小两个峰值, 而且一般上, 尤其是在光谱红、绿两部分相加或黄、蓝两部分相加时; 不具有相加性。使用异色视亮度匹配法和阈限法产生的就是这类函数。虽然这样的视觉参数在当代日常生活实践中很重要, 但对之尚未确立标准。为此, CIE TC-1.4 视觉技术委员会的 Kinney⁽⁹⁾ 和池田光男 (Mitsuo Ikeda)⁽¹⁰⁾ 曾分别发出征求视亮度匹配的光谱光效率数据和颜色数学模型的通知, 目的在于据以确立可靠的标准光效率函数, 以及解决有关光度系统中存在的某些问题。我们同时还要问, 不同方法测得的光效率函数, 何者更适合于应用。

两组光效率函数实验的比较

70 年代后半我们曾对中国人眼光谱视亮度(光效率)函数进行过一系列的研究⁽¹¹⁻¹⁴⁾, 包括明视、暗视、视野大小、不同亮度水平、不同被试年龄等的光效率函数的测定, 其中明视函数部分使用的是闪烁光度法, 暗视使用视亮度匹配法, 在不同亮度级的实验中曾采用差别阈限和闪烁光度两法, 并进行了它们的比较。近两年来我们与计量研究院光学室协作, 响应 CIE 的号召, 采用异色视亮度直接匹配法, 以 A 光源为参照, 在 2° 视野的条件下测定了十六名观察者, 在 10° 视野的情况下测定了九名观察者的明视光效率函数⁽¹⁵⁾。今将上述两组实验结果的相应部分比较如下:

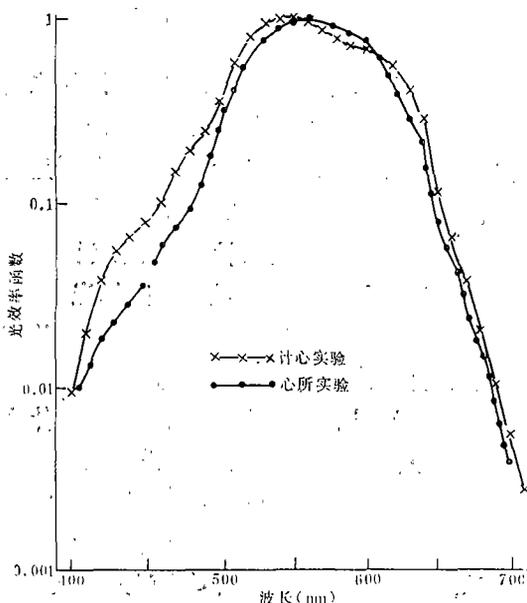


图 1 两组实验数据的比较

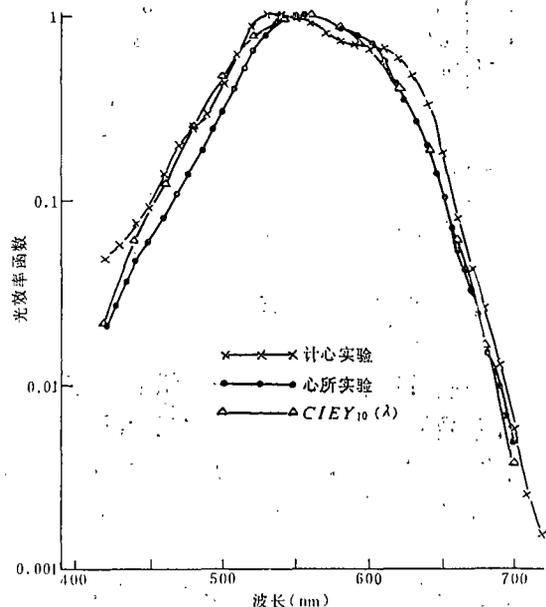


图 2 三组实验数据的比较

图1是上述两组实验2°视野部分测定结果的比较曲线。计量院与心理所协作的实验(以下简称“计心实验”)以×——×——×表示;心理所的实验(简称“心所实验”)以·——·——·表示。从图上可以清楚地看出:与心所闪烁光度法的结果^[1]相比,计心实验结果^[15]函数图比较宽阔,起伏较多,峰值在550nm,第二峰约在610—620nm之间。这一结果与国外九个实验室^[16]的有关研究结果,以及1983年9月在阿姆斯特丹召开的CIE第20届会议上TC-1.4光效率函数分支委员会初步推荐的明视2°视野标准光效率函数^[17]很接近。有关国外测量结果的图形见参考文献^[17,18]。心所闪烁法的结果则曲线形状较窄而平滑,峰值位于553nm处,数据与附有Judd修正值的 $V(\lambda)$ 相当吻合。由此可见,上两组实验的第一手资料很可以代表闪烁法和异色匹配两种典型光效率函数。

图2绘出了心所闪烁法7°40'视野、计心实验异色匹配10°视野和CIE $\bar{Y}_{10}(\lambda)$ 三条曲线的比较。由于心所系列实验中没测试10°视野,只测过7°40'视野^[19],又考虑到按照CIE的规定4°以上归入使用 $\bar{Y}_{10}(\lambda)$ 的范畴^[19],所以我们取用7°40'的结果参加比较。这部分结果,除短波部分较 $\bar{Y}_{10}(\lambda)$ 低外,其他部分曲线走向颇与 $\bar{Y}_{10}(\lambda)$ 一致,而且峰值也与 $\bar{Y}_{10}(\lambda)$ 吻合。计心实验异色匹配10°视野的结果短波部分高于心所实验,却与CIE $\bar{Y}_{10}(\lambda)$ 大致符合;长波部分则高于心理所及CIE $\bar{Y}_{10}(\lambda)$ 两条曲线,而在530和610nm附近分别显现大小两个峰值。计心实验的这部分数据与同一实验中2°视野相比较的情况与国外资料^[6]相应的2°和10°视野的比较以及与心理所闪烁法的2°和7°40'(代替10°)的比较颇相类似,都是

短波区有差别,长波区无区别——池田光男所引国外有关实验结果见图3。心理所结果图示见参考文献^[11,18]。

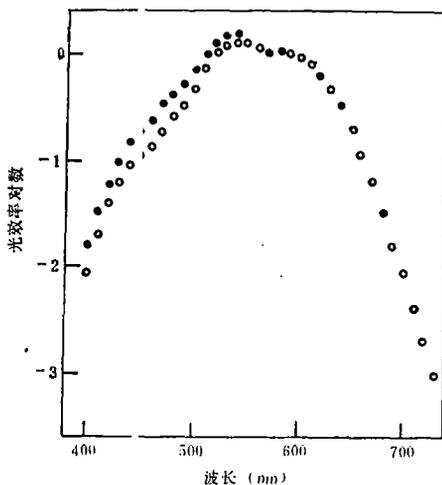


图3 2°(圆圈)和10°(圆点)光谱光效率函数

讨 论

从上述两组实验结果的比较,可以清楚地看到闪烁光度法和异色匹配法各自测得的光谱光效率函数确有很大的区别。至于为什么会有这样显著的差异,有的研究者^[6]认为异色视亮度匹配所测得的光效率函数,同时计入了无彩色通道和红对绿、黄对蓝对抗性彩色通道两者所提供的信息。间接的测定方法,如闪烁光度法,测得的结果则主要仅只依赖于无彩色通道的

信息,是故后者给出的函数一般低于来自前者的结果。另据我们的实验,以不同色(包括白光),不同频率的闪烁光作为适应光,适应后检查不同色光闪烁 CFF 与适应前相比有什么变化。结果发现,白光作为适应光时,导致色光 CFF 下降(闪烁周期延长);当适应于闪烁光时,各色光 CFF 普遍减小——对20周和60周的适应都使所测试的 CFF 周期延长,但延长程度不同,20周引起的抑制效应最大(延长最多)。如果我们把闪烁光度法中白光(标准光)轮回出现视作是一定程度的适应,则它将可能导致随之而来的色光 CFF 下降。又在使用闪烁光度法测定光效率函数时,所用闪烁频率恰好普遍都在20周左右,这也为将导致

对随后而来的各色闪烁频率的感知能力较大的下降——CFF 变小,这意味着闪烁感受性因受抑制而降低。这种抑制也很可能同时波及到对亮度的感受性,从而可能成为闪烁法光效率函数在全光谱范围内几乎普遍低于来自异色匹配法的相应结果的主要原因之一。由于异色直接匹配法所得光效率函数对色度更较敏感,它在实际度量晚近颇有广泛应用的有色照明光源时,能吻合人眼所感知的心理物理学的情况,所以具有实用的意义。

异色匹配法的严重缺点在于它不符合相加律^(8,10),而亮度方程(见前第183页脚注)唯有在光效率函数 $V(\lambda)$ 满足了积分所需要的相加性假设时,亮度 L 才有效。为了补救异色匹配法的这一不足之处,S. L. Guth⁽¹⁰⁾和池田光男⁽⁸⁾等人分别建议使用计算这类心理物理量的数学模型,企图解决有关的相加性问题。但是,这些措施毕竟都有一定的人为性。G. Wagner和R. M. Boynton⁽¹⁰⁾等人做过几种异色光度学测试光效率函数方法的比较。方法包括逐步比较、异色匹配、最小可觉界线和闪烁光度法。实验结果如图4—7所示。作者们特别检查了最小可觉界线法获致结果的相加性。方法大致如下:调整两个光谱色 λ_1 和 λ_2 ,使其混合后的辐亮度在与一个恒定为8td的参照白光并列于视野时满足最小可觉界线的指标。把每次所需要的相对辐亮度标定为100%。然后呈现具有 α 比例量的 λ_1 ,在

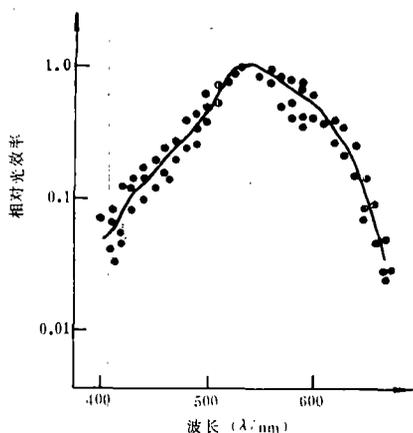


图4 逐步比较法相对光谱光效率函数,不同几何形数据点来自不同观察者,下同。

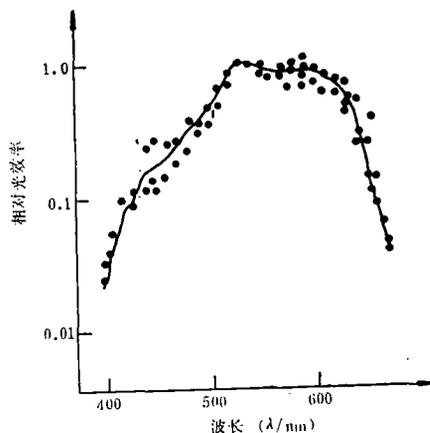


图5 异色明度直接匹配法相对光谱光效率函数

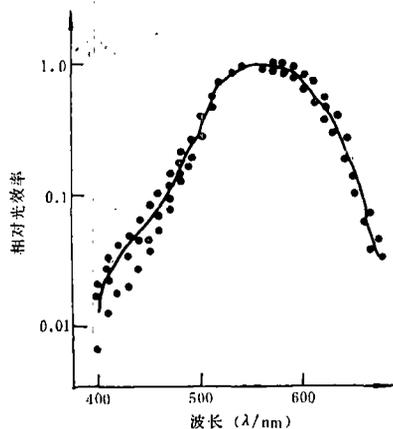


图6 最小可觉界线法相对光谱光效率函数

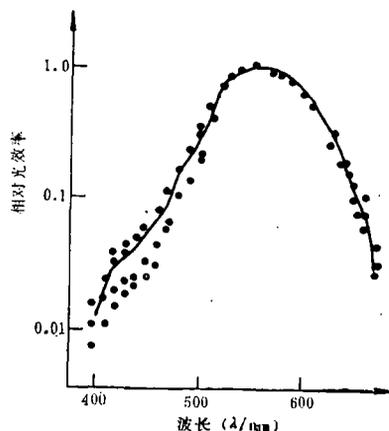


图7 闪烁光度法相对光谱光效率函数

其上再加上 λ_2 ,使观察者调整 λ_2 的相对量 β ,从而使 $\alpha+\beta$ 产生一个与参照白光产生最小可觉界线。相对值从10到90每10为一级地变更 α ,每次测定相应的 β 值。再以各不同的值固定 β ,测定相应的 α 。这样每两个光谱色的组合提供出18对 α,β 值。将 α 相对于 β 画在座标线上,如果每对 α,β 值合乎相加律,即 $\alpha+\beta=100$,则理想的各点应该位于连接 $\alpha=0,\beta=$

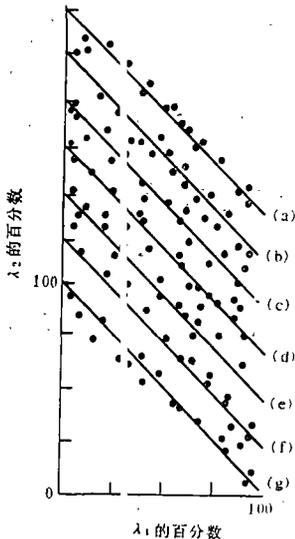


图 8 7对光谱色刺激,用最小可觉界线为标,两色混合的相加性。圆点:调整 λ_1 ;三角:调整 λ_2 。

- (a) $\lambda_1=48\text{nm}, \lambda_2=520\text{nm};$
 (b) $\lambda_1=48\text{nm}, \lambda_2=620\text{nm};$
 (c) $\lambda_1=50\text{nm}, \lambda_2=600\text{nm};$
 (d) $\lambda_1=51\text{nm}, \lambda_2=580\text{nm};$
 (e) $\lambda_1=48\text{nm}, \lambda_2=570\text{nm};$
 (f) $\lambda_1=50\text{nm}, \lambda_2=540\text{nm};$
 (g) $\lambda_1=49\text{nm}, \lambda_2=540\text{nm}.$

100和 $\beta=0,\alpha=100$ 这两个点的直线上。共检测过7对不同的光谱色,其结果绘如图8。图形清楚地表明,使用最小可觉界线指标所获得的结果完全合乎相加律,因为如图所示,各数据点随机地分布在靠近各条理想直线的两侧。各组合光谱色得数的离差程度与另一类似实验⁽²³⁾结果相同(都不显大),而且并不因所调整的是 λ_1 抑或是 λ_2 而有差别,表明这实验具有很好的重复性。

在心所实验的系列中,我们还曾研究过用差别阈限为指标,测定光谱视亮度的情况⁽¹⁴⁾。具体作法是以所选波长的特定亮度作标准,快速给出亮度的增量或减量,直到被试者刚好觉察出它们的亮度差(即增或减的 j,n,d)为止,测出每个 j,n,d 的能量,作为亮度差别阈限的尺度。用同样方法测其他各波长的相对亮度差别阈限函数,即可据以与其他方法的结果相互比较了。实验表明,所得数据与来自同一系列工作中闪烁法的资料基本相同,其峰值向短波方面略有位移,这符合于将阈限法和异色匹配法归入同一类型方法范畴的论断。

在1983年9月在荷兰阿姆斯特丹召开的CIE第20届会议上,池田光男作为TC-1.4光效率函数分支委员会主席所作的报告⁽¹⁷⁾,建议在确定更可靠的函数之前,暂考虑将基于TC-1.4第41号报告的第二次修正案作为代表青年成人明视水平 2° 视野视亮度的光效率函数标准。报告

基于一些研究⁽²⁰⁾还对点光源光效率函数作了一定的建议,认为这函数可以用Judd修订过的CIE $V(\lambda)$ 代表,无需新的数据,并附图说明几乎现在所有的数据都与附有Judd修正值的 $V(\lambda)$ 很近似,涉及的资料包括闪烁光度法、绝对阈限法和异色视亮度匹配法所获得的结果。报告的第三项建议是关于 10° 视野光效率函数是否需要另订新标准这一问题。池田光男举出一实验研究⁽²²⁾,它探索了相同观察者们所作 2° 和 10° 视野光效率的差别情况。其结果揭示了高于 520nm 时 10° 与 2° 视野基本无区别,区别只产生在短波范围,表明原因在于黄斑色素密度的差异,并引用了Wyszecki-Stiles书中⁽⁶⁾关于黄斑色素光学密度的材料,作为旁证。报告最后建议了一个能将 2° 视野光效率函数转换为 10° 光效率函数的公式,即 $\log V_{2,10}(\lambda) = \log V_2(\lambda) + \Delta_m(\lambda)$,并给出了其中 $\Delta_m(\lambda)$,即黄斑色素密度导致所需的修正值,自 $440-520\text{nm}$,每 10nm 为一级的数值(520nm 以上皆为零),而认为没有必要再测定 10° 视野的光效率函数。

在CIE 1号(TC-1.4)报告出版很久以后,1982年5月Wyszecki来华在计量院讲学

的报告中曾表示, 现有资料还不足以建立使人满意的标准异色匹配亮度函数; 还缺乏实验数据, 也难于确定一个满意的异色匹配视觉模型, 虽然有人作过一些尝试。CIETC-1.4 视觉委员会主席 P. K. Kaiser 在1983年初上交CIE总部的未来四年计划纲要^[24]里关于光谱光效率函数问题, 也曾论及虽然这方面已做出许多成绩, 但这毕竟是一项巨大的, 需要继续的工作, 有必要取得来自更多观察者的函数资料。

后 语

前面概述了用以测定光谱光效率函数的一些方法各自的特性及其某些优缺点, 同时介绍了第20届CIE会议上光效率分支委员会建议的情况, 兼及测定光效率函数的最优方案还有许多科学事实和理论依据有待于更深入地钻研、探讨。可见本届CIE会议可能采纳的关于光效率函数的建议仍然是一个暂行的、初步方案, 不论从系统性还是从理论上、实践上都还不是完整的、最后的方案。例如在点光源的函数上仍旧保留着主要是来自闪烁法的CIE $V(\lambda)$, 在 2° 和 2° 以上的函数则依赖于异色明度匹配法; 又在解决异色匹配不符合相加性和 10° 视野函数的换算等问题上, 不得不求助于一定的数学模型。池田光男也承认在将 2° 数据处理成 10° 函数时, 的确存在着光效率之间的区别和黄斑色素密度之间的量的差异, 虽然整体看来数据点的分布有些相似。考虑到当初CIE $V(\lambda)$ 使用了若干年之后, Judd还提出了修订值, Kinney还提出了它的合理使用问题。本文与其说拟解决什么有关问题, 勿宁说目的在于提请有关工作者的注意, 可以认为光谱光效率函数的各种测定方法还有从各个方面继续深入研究的必要。

参 考 文 献

- [1] 陈永明, 赫葆源等, 中国人眼光谱相对视亮度函数研究 I, 明视函数, 心理学报, 第 2 期, 1979.
- [2] Gibson, K. S. Spectral Luminosity Factors, J. O. S. A. Vol. 30 (51), 1940.
- [3] Le Grand, Y. Light, Colour and Vision, Chapman and Hall, London, 1957.
- [4] Wyszecki, G. and Stiles, W. S. Color Science. Wiley, 1982.
- [5] Kinney, J. A. S. CIE TC-1.4 Vision, 转引自中山俊夫, 照明学会杂志, 第60卷, 11期, 1975.
- [6] Alman, D. H. J. of IES, Oct. 1977, 255.
- [7] CIE, Publication, no. 41 (TC-1.4), 1978.
- [8] Ikeda, M. et al. Brightness luminous-efficiency functions for 2° and 10° fields, J. O. S. A. Vol. 72, No. 12, 1982.
- [9] Kinney, J. A. S. Request for brightness matching data and mathematical color vision model, J. O. S. A. 68, 1155, 1978.
- [10] 池田光男(Ikeda, M), 照明学会志, Vol. 10, 1978.
- [11] 赫葆源, 马谋超等, 中国人眼光谱相对视亮度函数的研究, 心理学报, 第 1 期, 1979.
- [12] 许宗惠, 赫葆源等, 中国人眼光谱相对视亮度函数的研究 II, 暗视函数, 心理学报, 第 1 期, 1980.
- [13] 纪桂萍, 赫葆源等, 中国人眼光谱相对视亮度函数的研究 III, 不同大小视野对 $V(\lambda)$ 的影响, 心理学报, 第 3 期, 1980.
- [14] 马谋超, 赫葆源等, 中国人眼光谱相对视亮度函数的研究 IV, 亮度级对光谱相对视亮度的影响, 心理学报, 第 2 期, 1981.
- [15] 吴辛甲, 赫葆源等, 采用异色视亮度匹配法测量明视觉光效率函数, 计量学报, 5 卷, 4 期, 1984.
- [16] Ikeda, M. and Sagawa, K. J. O. S. A. 72, 12, 1660, 1982.
- [17] Ikeda, M. Report of the Luminous Efficiency Functions Sub-committee (TC-1.4) to CIE 20th Session, 1983.
- [18] Wagner, G. and Boynton, R. M. Comparison of Four Methods of Heterochromatic Photometry,

- J. O. S. A. Vol. 62, 12, 1972.
- [19] Guth, S. L. Luminance addition: general considerations and some results at foveal threshold. J. O. S. A. 55, 718—722, 1965.
- [20] Ikeda, M. et al. Luminous efficiency function for small stimulus size. J. Light and Vis. Env. Vol. 5, 1, 1981.
- [21] Ikeda, M. et al. Luminous-efficiency functions for point sources. J. O. S. A. Vol. 72, №1, 1982.
- [22] Kator, K. and Fuwa, M. Relative luminous efficiency functions of 2° and 10° fields determined by flicker photometry and heterochromatic brightness [matching. Bul. ETL 45, 139—165, 1981.
- [23] Boynton, R. M. & Kaiser, P. K. Science 161, 366, 1968.
- [24] Kaiser, P. K. Synopsis of the TC-1·4 Vision. Quadrennial report to central bureau CIE, 1983.

A COMPARISON OF SOME METHODS FOR DETERMINING PHOTOPIC SPECTRAL LUMINOUS EFFICIENCY FUNCTIONS

He Baoyuan Xu Zonghui

(*Institute of Psychology, Academia Sinica*)

Abstract

The paper compares some of the methods used for determining photopic spectral luminous efficiency functions, and discusses the respective characteristics and strong and weak points of these methods. The authors point out the need for further study of these and other methods for the determination of the functions.