自動配光測定装置による光束積分†

石井 弘 允・室井 徳 雄

日本大学理工学部 東京都千代田区神田駿河台 1-8

(昭和 44 年 2 月 3 日受付)

Measurement of Total Luminous Flux by Automatic Light Distribution Measuring Equipment

Hiromitsu ISHII and Norio MUROI

(College of Science and Engineering, Nihon University, Chiyoda-ku, Tokyo)

(Received February 3, 1969)

In the case of discussing the properties of light sources and luminaires, it is important to know the total luminous flux and the light distribution curve. We have studied on the automatic measurement of light distribution curve and total luminous flux for several years, and now, it is possible to measure within from a few minutes to scores seconds. In this paper, the authors described the general of the automatic light distribution measuring equipment and showed the integral method of luminous flux. In addition, we discussed the error of photometric system and made clear that the measurement by light distribution method is better than globe photometer.

1. ま え が き

光源および照明器具の性能を評価するには全光束値、配光曲線、効率などを知ることが重要であるが、配光法による光束測定はきわめて測定点が多く、しかも測定後のデータ整理に多くの時間を費やしたので、従来はほとんど実施されず、もっぱら球形光束計にたよっていた。

しかし球形光束計は内面塗料の反射むらおよび劣化¹⁾などにより初期の特性を保持することが困難であり、またしゃ光板に基因する誤差²⁾、光源の自己吸収³⁾など多くの問題を包含している。

そこでわれわれは配光法による光束積分方式について種々検討を重ね^{4)~11)}、測光器系にアナログ、デジタル機器を適宜に使用した自動配光測定装置を作成し、角度-時間変換方式により高精度でしかも短時間で光束測定を実現し、性能のすぐれていることを確認したのでその結果を報告する。

2. 角度-時間変換方式による光源の 全光束積分

自動配光測定装置を使用して配光法により全光束値を測定するには、光源をとりまく仮想球上を受光器でくまなく走査する必要がある。これを実現する走査の方法としては仮想球を横割りまたは縦割りにする2つの方法が考えられる⁶⁾。

2.1 横割り積分方式

光源を水平方向に一定速度で連続回転させつつ受光器を鉛直方向に π だけ回転させる方式をとれば、横割り積分方式となり、鉛直角 θ および水平角 φ は(1)式のようになる。

$$\theta = \frac{\pi}{T_{V1}} t \quad \varphi = \frac{2\pi}{T_{h1}} t \quad (1)$$

ただし、 T_{V1} : 受光器が鉛直方向に π だけ回転するのに要する時間

T_{h1} : 光源の水平1回転時間

周知のように、任意方向の配光光度が $I(\theta, \varphi)$ なる光源の全光束値 F は、

† 第5回計測自動制御学会学術講演会で本文の一部を発表(昭 41.9)

$$F = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} I(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (2)$$

(2) 式で示されるので, (1), (2) 式の関係からこの方式での全光速値 F は (3) 式となる.

$$F = \frac{2\pi^2}{T_{V1}} \sum_{i=1}^n \int_{(i-1)T_{h1}}^{iT_{h1}} I(t) \sin\left(\frac{\pi}{T_{V1}}t\right) dt \quad (3)$$

ただし, $n = T_{V1}/T_{h1}$

これは Fig. 1 に示したように仮想球を横割りにした

Fig. 1 Imaginary sphere

積分方法で, $n \rightarrow \infty$ とすれば受光器は仮想球全表面を走査することになり,

$$F = \frac{2\pi^2}{T_{V1}} \int_0^{T_{V1}} I(t) \sin\left(\frac{\pi}{T_{V1}}t\right) dt \quad (4)$$

となる.

2.2 縦割り積分方式

光源を中心とする仮想球上で受光器を鉛直方向に連続回転させつつ光源を水平方向に π だけ回転させると, Fig. 2 のように球を縦割りにした状態で光束積分を

Fig. 2 Imaginary sphere

行なうことになる. 受光器の鉛直 1 回転時間を T_{V2} , 光源が水平方向に π だけ回転するのに要する時間を T_{h2} とすれば, 全光束値 F は,

$$F = \frac{2\pi^2}{T_{h2}} \sum_{i=1}^m \int_{(i-1)T_{V2}}^{iT_{V2}} I(t) \left| \sin \frac{2\pi}{T_{V2}}t \right| dt \quad (5)$$

ただし, $m = T_{h2}/T_{V2}$

となる. また $m \rightarrow \infty$ では全球面を走査することになり,

$$F = \frac{2\pi^2}{T_{h2}} \int_0^{T_{h2}} I(t) \left| \sin \frac{2\pi}{T_{V2}}t \right| dt \quad (6)$$

(6) 式となる.

2.3 横割り, 縦割り両積分方式の比較

このように全仮想球面を受光器でくまなく走査する方式としては, 横割り, 縦割りの 2 つの方式が考えられる. 横割り方式はさきにも述べたように, 光源を水平方向に連続回転させつつ受光器を鉛直方向に π だけ回転させる方式であるから, 測定時間を短縮するためには, 光源を水平方向に高速度で回転させる必要が生じ, そのため光源に振動を与えるなどの悪影響があり, 白熱電球などにおいてはフィラメントを破損することもある. したがって測定時間の短縮を目的とする自動配光測定装置の光束積分方式としてはあまり適当な方法とはいえない.

これに対し, 縦割り方式は受光器を高速回転させ, 光源を水平方向に低速回転させる方式であるから, 光源に悪影響を与えないで, しかも“測定時間の短縮”という利点を有している.

そこでわれわれはこの縦割り方式を採用し, 光束積分を行なうため, 鏡 3 面を使用した自動配光測定装置を作成し, 受光器を回転させるかわりに, 鏡を鉛直方向に高速回転させる光束積分方式を実現した.

3. 自動配光測定装置

3.1 配光装置

試作した自動配光装置は Fig. 3 に示したように測光軸対称の構造を有し, 鉛直回転部分が高速回転にたえられるような構造になっている. 装置の大きさは高さ 3 m, 奥行 2.4 m で, 受光器側よりみた正面図の円形わくは 2.6 m である.

被測定光源はファインダ F を用いて, 鏡 M_1 の回転中心 S に設置するが, 設置方向は上向き, 下向き点灯および水平点灯が可能となっている. 光源からの光束は縦 750 mm, 横 500 mm の鏡 M_1 , M_2 , M_3 によって, 測光ベンチ上に設置した測光軸延長上の固定受光器に導入されるので, 光源の水平回転および鏡の鉛直回転によって全立体角の光束が受光器にはいり, 直径 500 mm までの光源および照明器具の全光束値を測定することができる. また光源は直流 0~150 V, 6 A, 安定度 $\pm 0.02\%$ 以内および交流 80~120 V, 20 A, 160~240 V, 10 A, 安定度 $\pm 0.2\%$ 以内の電源によりスリップリングを用いて点灯するようになっている.

3.2 駆動機構

本装置の鏡および光源の駆動機構は Fig. 4 に示したように, 1 kW の同期電動機を減速し, その出力軸よりそれぞれの伝動系を分岐している. 鏡は光源側と受光器側の並列駆動方式を採用し, 装置のねじれおよ

Fig. 3 The structure of light distribution measuring equipment

び慣性による回転むらを除去するため、受光器側をベルト結合により駆動している。鏡の鉛直回転速度は 6, 3, 1.5 rpm の 3 段階に設定でき、鏡 1 回転時間で移動する光源の水平回転角は $1^{\circ}\sim 60^{\circ}$ の範囲で 9 段階に設定できるようになっている。測定中鏡の回転数と光源の回転数は $n:1$ の比を保つことにより、2.2 で述べた縦割り積分方式を実現することができる。

Fig. 4 Driving system

3.3 測光器系概要

Fig. 5 に示したように測光器系は受光器、sin 関数発生器、V-F 変換器、パルスカウンタ、デジタルプリンタによって構成されている。受光器は 2 次電子増倍管を使用しており、暗流、リーク電流および増倍率の変動を軽減するため、電圧 700 V 以下、安定度

Fig. 5 Photometric system for luminous flux integration

$\pm 0.015\%$ 以内の電源を用いている。分光感度はガラスフィルタおよびプラスチックフィルタを組み合わせ極力規準視感度に一致するように調整し、白熱電球の色温度変化に対する補正率は Fig. 6 に示したように、色温度 $2354^{\circ}\text{K}\sim 2900^{\circ}\text{K}$ の範囲で 0.3% 以内である。

sin 関数発生器は流入電流と sin 関数抵抗の積を出力とするもので、直径 160 mm の円形を成し、温度上昇による熱起電力の影響を軽減させるためオイルを封入し冷却している。Fig. 7 はこの sin 関数発生器の精度を負荷抵抗 $3\text{M}\Omega$ で測定した結果であり誤差は $\pm 0.25\%$ 以内である。

Fig. 6 Correction factor of photo-detector on the variation of color temperature

Fig. 7 Error of sin function generator

また sin 関数発生器の出力電圧をデジタル量に変換する V-F 変換器は Fig. 8 に示したように、積分回路、比較回路、パルス発生回路より構成されている積分形 A-D 変換器で、出力パルス数は入力電圧の積分値に比例し、次のような性能を有している。

V-F 変換器の性能

入力電圧: DC 0~1 V

極性: 正, 負

入力抵抗: $1\text{M}\Omega$

出力周波数: 0~100 kHz

Fig. 8 Blockdiagram of V-F convertor

出力パルス・幅 $2.5 \mu s$ 直線性: $\pm 0.002 \%$ 正確さ: $\pm 0.02 \%$ 以内温度係数: $1^\circ C$ に対し読みの $\pm 0.001 \%$ 以内

4. 測定方法

2.2 でも述べたように光源の全光束値を測定するには、受光器で仮想球の全表面をくまなく走査することが理想である。そこでわれわれは光源と受光器を結ぶ線上のほぼ中間に水平方向に幅を持たせた拡散板を設置し、等価的に受光器の水平幅を広げ、仮想球全表面をこの拡散板で走査することにより、縦割り積分方式による理想的な全球面走査法を考案した。

この全球面走査法では拡散板幅 W と水平分割角度 φ_0 との関係は次のようになる。

$$W = 2R \tan(\varphi_0/2) \quad (7)$$

ただし、 R : 光源から拡散板までの実効半径

$$\varphi_0 = \pi T_{V2} / T_{h2}$$

本装置では縦 10cm, 横 23.2cm のオパールグラスを拡散板として使用し、光源と拡散板および受光器と拡散板の間でそれぞれ逆 2 乗則が成立するように拡散板幅 (23.3cm) の張る水平角が 5° になるように設定した。

測定は鏡の回転開始によって自動的に行なわれるようになっており、鏡が始めに $\theta = 0^\circ$ を通過したときの光トリガ信号によって計数を開始させ、光源が水平方向に 180° 回転し、かつ鏡が $\theta = 0^\circ$ を通過したときの信号により停止させ、カウンタの指示をデジタルプリンタで印字させる方法である。

Fig. 9 (a), (b) はこの方式における測定状態の

Fig. 9 A locus of photo-detector

受光器中心の軌跡を示したもので (a) は仮想球の頂点からみた場合であり、(b) は側面から見たもので、Fig. 9 (c) は鏡が $0^\circ \sim 180^\circ$ まで回転したときの拡散板の軌跡を展開図上に示したものである。

Fig. 10 中水平分割角度 5° の測定結果は全球面走査法により白熱電球の全光束値を測定したときの測定値のばらつきを示したもので、その範囲は $\pm 0.2 \%$ 以内である。

Fig. 10 Variation of measurement value

しかし白熱電球のように水平配光曲線が比較的円形を成している光源では水平角を適当におろぬき走査したほうが、測定時間の短縮にも有利であり、また測定時間の長さからくる不安定要素を軽減することも考えられる。これを確かめるため、水平分割角度を 10° , 15° , 30° に設定し、積分した結果は Fig. 10 に示したようになり、 10° および 15° 分割では $\pm 0.15 \%$ 以内、 30° 分割では $\pm 0.25 \%$ 以内のばらつきとなった。

これらの結果より、縦割り積分方式で光源の全光束値を測定するには、拡散板の幅を水平方向に広げ、水平分割角度を適当におろぬき、走査したほうが測定時間の短縮もでき、全球面走査を行なうよりも時間の長さから生ずる誤差を軽減できるのであって有利である。

5. 測光器系おくれ要素による誤差の吟味

自動配光測定装置の測光器系はそれぞれ 1 次おくれ要素をもつ機器の直列接続によって構成されることが多く、受光器入射光の時間的变化のためおくれ要素による誤差を生ずる心配がある。そこでこの誤差を吟味するため、幾何学的配光曲線を有する直線光源、平面板光源および半球面光源を例にとり、配光指示誤差⁹⁾の最大値を求めると、直線光源および平面板光源では (8) 式、半球面光源では (9) 式となり、

$$\epsilon_1 = \frac{2\pi\tau T_{V2}}{4\pi\tau^2 + T_{V2}^2} \quad (8)$$

Fig. 11 Maximum errors of light distribution measurement value of linear source and circular disc source

Fig. 12 Maximum errors of light distribution measurement value of half spherical surface source

Fig. 13 Integral errors of total luminous flux in case of linear light source

Fig. 14 Integral errors of total luminous flux in case of circular disc light source

$$\varepsilon_2 = \frac{\pi\tau}{\sqrt{4\pi^2\tau^2 + T_{V2}^2}} \quad (9)$$

ただし、 τ : 測光器系の定数

図示すると Fig. 11, Fig. 12 となる。

また、直線光源および平面板光源の全光束測定誤差⁹⁾はそれぞれ (10) 式および (11) 式によって計算され、

$$\varepsilon_{F1} = \frac{4\pi^2\tau^2(8\tau T_{V2} - 4\pi^2\tau^2 - T_{V2}^2)}{(4\pi^2\tau^2 + T_{V2}^2)^2} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{F2} = \frac{4(\pi^2\tau^2 T_{V2}^2 - 4\pi^4\tau^4)}{(4\pi^2\tau^2 + T_{V2}^2)^2} \quad (11)$$

Fig. 13, Fig. 14 のような結果になる。

よって本装置の測光器系時定数は 0.6ms であり、鏡を 12rps で回転させ使用しても十分さしつかえないことがわかる。

6. 白熱電球の全光束値測定例

白熱電球の全光束値を角度-時間変換方式によって測定した結果を Table 1 に示す。

Table 1 は A 社より光束標準電球として、測定値付きで販売されている白熱電球を縦割り積分方式で測定した結果と他の機関で測定した値を比較したもので、拡散板を使用した例は、拡散板の水平幅を水平角 5° に設定して測定した結果で、測定所要時間は 2 分である。

そしてこの結果から各光束比のばらつきを求めると ±0.3% 以内であり、自動配光測定装置のみによる測定値のばらつきでは ±0.2% 以内であることが明らかである。これは自動配光測定装置による光束比の測定が ±0.3% 以内の精度で十分行ない得ることを示

light source	Nihon University			A (company)	B (laboratory)	average
(A) 60 W	$6.83_7 \times 10^2$ lm	$6.82_1 \times 10^2$ lm	$6.82_6 \times 10^2$ lm	$7.0_6 \times 10^2$ lm	$7.0_7 \times 10^2$ lm	$6.92_3 \times 10^2$ lm
(B) 60 W	$7.17_8 \times 10^2$ lm	$7.15_2 \times 10^2$ lm	$7.15_7 \times 10^2$ lm	$7.4_4 \times 10^2$ lm	$7.4_2 \times 10^2$ lm	$7.21_9 \times 10^2$ lm
flux ratio, B/A	1.050	1.049	1.048	1.054	1.050	1.050
(C) 100 W		$1.27_8 \times 10^3$ lm	$1.27_6 \times 10^3$ lm	$1.3_4 \times 10^3$ lm	$1.3_5 \times 10^3$ lm	$1.31_1 \times 10^3$ lm
(D) 100 W	$1.41_0 \times 10^3$ lm	$1.40_5 \times 10^3$ lm	$1.40_7 \times 10^3$ lm	$1.4_7 \times 10^3$ lm	$1.4_8 \times 10^3$ lm	$1.43_4 \times 10^3$ lm
(E) 100 W	$1.48_1 \times 10^3$ lm	$1.48_0 \times 10^3$ lm	$1.47_9 \times 10^3$ lm	$1.5_4 \times 10^3$ lm	$1.5_5 \times 10^3$ lm	$1.50_6 \times 10^3$ lm
flux ratio, C/D		0.909 6	0.906 7	0.911 6	0.912 2	0.914 2
flux ratio, E/D	1.050	1.053	1.051	1.048	1.047	1.050
measuring equipment	light distribution method			unknown	globe photometer	
	use of opal glass					
time required	2 min		(min			
date	1966, 7~8	1966, 3	1965, 10	60W 1964, 12 100W 1965, 3	1965, 8	

Table 1 Measuring example of total luminous flux on tungsten lamps

しており、今後光度標準電球の取り扱いなどに留意すれば、光度から光束値の値付けも十分可能になる。

7. 球形光束計法との比較

球形光束計により $I(\theta, \varphi)$ の配光をもつ光源の全光束値を測定する場合は (12) 式で表わすことができる。

$$F = \int_{\varphi} \int_{\theta} K(\theta, \varphi) \cdot I(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (12)$$

そして積分能力は光束計内面塗料の反射率、しゃ光板の大きさおよびしゃ光板の位置によって定まる係数 $K(\theta, \varphi)$ 曲線^{2), 4)} によって決定される。

いっぽう、自動配光測定装置を使用した縦割り積分方式による全光束値は、

$$F = \frac{2\pi^2}{T_{h2}} \int_0^{T_{h2}} I(t) \cdot \varepsilon(t) \left| \sin \frac{2\pi}{T_{v2}} t \right| dt \quad (13)$$

となり、 $\varepsilon(t)$ の大きさが積分能力が決定される。

Fig. 15 はこの $K(\theta, \varphi)$ 曲線と角度-時間変換方式の誤差基因量 $\varepsilon(t)$ を比較したもので、この図より明らかに自動配光測定装置による誤差のほうが小さい。また球形光束計の $K(\theta, \varphi)$ 曲線は時間的に静止しているため、ただちにこれが光束測定値の精密さになるとは限らないので、一見精密測定に適するかと思われがちであるが、 $\varepsilon(t)$ は積分能力からみた精密さと正確さを含めた精度を示すものであるから、積分能力よりみた正確さという点では自動配光測定装置を使用した角度-時間変換方式のほうがすぐれているといえよう。

Fig. 16 は角度時間変換方式の積分能力を調査する

Fig. 15 Comparison of accuracy

Fig. 16 Integral error

ため、受光器光電流を一定に保ち、均等点光源と等価な状態で動作させ、計算値に対する誤差を示したもので、この結果からも積分能力は $\pm 0.2\%$ 以内であることが確かめ得た。

8. む す び

以上述べたように、自動配光測定装置を使用し、縦割り積分方式で全光束値を測定する方法は、その積分能力の点からみれば球形光束計よりすぐれており、測

定時間も光源と受光器の間に適当な幅の拡散板をそう入し、水平角のおろぬき走査を行なえば、鏡の回転数 6 rpm では 60 s 程度で、さらに本装置では鏡の回転数を 12 rpm まであげられるように設計されているので 30 s に短縮することもでき、球形光束計にくらべてそんな色なくなる。また測定精度も $\pm 0.3\%$ 以内で、測定後のデータ処理もきわめて簡単であるから、今後光源および照明器具の開発にあたり、十分その成果を活用できるものと確信している。

参 考 文 献

- 1) 横地：正立方形光束計内面の汚れに就て，照明学会雑誌，20-5，p.222 (1936)
- 2) 室井：遮光板に基因する光束計の誤差，照明学会雑誌，42-10，450/455 (1958)
- 3) 室井・松村：球形光束計における吸収について，昭和 32 年 4 月電気四学会連合大会論文集，531 (1957)
- 4) 室井・石井：球帯係数の追尾演算方式による全光束の自動測定について，昭和 38 年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集，S 16-4，p.366 (1963)
- 5) 室井・石井・島野：配光測定装置の自動化機構とその測光器系の一例について，昭和 40 年照明学会東京支部大会講演論文集，8，p.37 (1965)
- 6) 室井・石井：自動配光法による光源の全光束測定について，昭和 40 年照明学会東京支部大会講演論文集，7，p.31 (1965)
- 7) 室井・石井・吹野：自動配光装置の受光系時定数による配光指示誤差について，昭和 39 年電気四学会連合大会論文集，984 (1964)
- 8) 室井・石井：配光法（光源，鏡の同時回転方式）による全光束値と受光系時定数との関係，昭和 39 年電気四学会連合大会論文集，985 (1964)
- 9) 石井・佐々木・室井：自動配光測定装置の測光器系時定数による誤差，照明学会雑誌，50-1，4/11 (1966)
- 10) 室井・石井・肥後：自動配光測定装置の測光系総合時定数について，昭和 41 年電気四学会連合大会論文集，614 (1966)
- 11) 室井・石井・島野：全球面走査法による光源の全光束測定，昭和 41 年電気四学会連合大会論文集，617 (1966)