

## 摘 要

综合验光仪是一种可机械化更换镜片从而实现屈光检测功能的综合性验光设备，其主要计量性能指标包括球镜度、柱镜度、柱镜轴位以及光学中心误差等。然而综合验光仪在装配、生产以及使用的过程当中，会导致其性能指标产生变化，从而使验光的准确度降低。因此，对于综合验光仪的质量检测和计量控制显得尤为重要。

本文研究了一种基于自准直清晰度法的综合验光仪检测系统，可以有效提高系统的定焦精度及测量准确度，但增加了光学系统设计和装配的难度。该系统采用折转光路实现设备整体的轻小型化，利用直线位移传感器完成对凹面反射镜移动距离的测量，使用角度编码器完成目标分划板旋转角度的测量，并由CCD完成对目标图像的采集，由计算机系统实现数据的测量及分析。然后完成了综合验光仪检测系统的结构设计，给出了相应的光电参数，分析了综合验光仪各种性能指标的测量方法。并依据动态光学理论建立了数学模型，分析了该系统实际情况下光路的变化情况，利用模块化的装调方法完成了原理样机的研制，仪器可溯源至顶焦度国家标准。

最后，为保证综合验光仪检测系统测量结果的准确性，进行了重复性实验以及测量准确性实验验证，并对该系统的不确定度进行了分析。理论分析和实验结果表明，利用该装置对综合验光仪的顶焦度进行检测时，系统扩展不确定度可以达到 $(0.03\sim 0.08)\text{m}^{-1}(k=2)$ ，满足对综合验光仪的检测要求。

**关键词：**综合验光仪；顶焦度；结构设计；动态光学；光学装调；示值误差

## Abstract

Phoropter is a comprehensive optometry instrument that can mechanically replace lenses to achieve refractive examination functions. The main measurement performance indicators of phoropter are spherical lens top focus, column lens top focus, column lens axis position and center error, etc. In the process of production, assembly and use of phoropter, its performance indicators may change, which will lead to inaccurate optometry. Therefore, it is crucial to ensure high-quality inspection and control measurements for phoropters.

This paper researches a phoropter inspection system based on the self-collimating clarity method, which can effectively improve the fixation accuracy and thus the measurement accuracy. Moreover, it increases the complexity of the task of designing and assembling optical systems. The system adopts the folding optical path to achieve the overall miniaturization of the equipment. The linear displacement sensor is used to measure the moving distance of the concave mirror, the angle encoder is used to measure the rotation angle of the target reticle, and the CCD is used to collect the target image. The computer system is used to measure and analyze the data. Then, the structural design of the phoropter testing system is completed, the corresponding photoelectric parameters are given, and the measurement methods for various performance indicators of the phoropter are analyzed. And based on the dynamic optics theory, By taking into account the actual system conditions, we studied variations in the optical path and utilized a modular assembly approach to successfully construct the initial working prototype based on these findings. and the instrument is traceable to the national standard of top focal length.

Finally, To safeguard the precision of the test results of the phoropter testing device, experimental verification of repeatability and experimental verification of measurement accuracy were conducted, and the uncertainty of the system was analyzed. The theoretical analysis and experimental results show that the extended uncertainty of the top focal length of the spherical lens can reach  $(0.03\sim 0.08)m^{-1}$  ( $k=2$ ) when the device is used to test the phoropter, which meets the requirements for the verification of the phoropter.

**Keywords:** Phoropter; Rear top focal length; Structural Design; Dynamic Optics; Optical mounting; Measurement error

# 目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 课题研究的目的及意义.....	1
1.3 综合验光仪的发展现状.....	2
1.4 综合验光仪检测工作的发展状况.....	3
1.5 本课题的研究内容.....	6
第 2 章 综合验光仪及其检测系统原理分析.....	7
2.1 综合验光仪结构及工作原理.....	7
2.2 综合验光仪性能指标.....	8
2.2.1 顶焦度.....	8
2.2.2 球镜度.....	9
2.2.3 柱镜度.....	9
2.2.4 柱镜轴位.....	9
2.2.5 中心误差.....	10
2.3 顶焦度的测量方法.....	10
2.3.1 现有测量方法.....	10
2.3.2 综合对比分析.....	12
2.4 综合验光仪检测原理.....	13
2.5 综合验光仪检测系统设计要求.....	16
2.6 本章小结.....	16
第 3 章 综合验光仪检测系统结构设计.....	17
3.1 综合验光仪检测系统组成及工作原理.....	17
3.2 综合验光仪检测系统结构设计.....	18
3.2.1 旋转光源组件.....	18
3.2.2 分光棱镜组件.....	19
3.2.3 望远准直组件.....	20
3.2.4 平面反射镜组件.....	20
3.2.5 双高斯成像物镜组件.....	21
3.2.6 小型化精密移动测试组件.....	23

3.2.7 成像元件的设计.....	25
3.2.8 电学传感器的集成设计.....	27
3.2.9 底座的设计.....	27
3.3 装置整体设计及软件操作界面 .....	29
3.4 综合验光仪性能指标的测量方法 .....	30
3.5 本章小结 .....	31
<b>第4章 综合验光仪检测系统装调.....</b>	<b>33</b>
4.1 设计要求及装调方法 .....	33
4.1.1 机械结构设计要求.....	33
4.1.2 系统装调方法.....	33
4.2 光学元件方位误差分析 .....	34
4.2.1 凹面反射镜方位误差分析.....	34
4.2.2 平面镜方位误差分析.....	37
4.2.3 成像物镜方位误差分析.....	40
4.3 综合验光仪检测系统的装调 .....	41
4.3.1 辅助定位装置的装调.....	42
4.3.2 光学系统的装调.....	43
4.4 原理样机 .....	47
4.5 本章小结 .....	47
<b>第5章 实验验证及不确定度分析.....</b>	<b>48</b>
5.1 实验验证 .....	48
5.1.1 重复性实验验证.....	48
5.1.2 测量准确性实验验证.....	48
5.2 不确定度分析 .....	50
5.2.1 测量模型.....	50
5.2.2 分量标准不确定度.....	51
5.3 合成标准不确定度.....	52
5.4 扩展不确定度.....	53
5.5 本章小结.....	53
<b>第6章 总结与展望 .....</b>	<b>54</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>56</b>
<b>攻读硕士学位期间取得的成果.....</b>	<b>59</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>60</b>

## 第1章 绪论

### 1.1 引言

我国是近视高发国家，近视率已经超过总人口的一半，近年来患病率呈不断上升的趋势，并且一半以上为青少年，这表明近视问题现已成为了目前我国不可忽视的重要社会现象。国家对此高度重视并做出了重要指示：全社会都要行动起来，共同保护孩子们的眼睛，让他们拥有一个光明的未来。随后教育部等多个管理部门共同发布《综合防控青少年近视实施方案》，该方案明确表明与之相关的监管部门应该对验光配镜领域进行严格管理，保证该行业当中的验光产品都应该符合使用要求<sup>[1]</sup>。因此，验光设备在验光行业所起到的重要作用不言而喻。

随着现代科学技术的不断发展，眼科仪器越来越多，生活当中无论是普通的验光检查还是医学验光检查，它们都依靠于综合验光仪及验光镜片箱这两个光学验光中最主要的计量检测设备<sup>[2]-[4]</sup>。综合验光仪又可以称之为牛眼或者验光头，它能够将各种类型的眼镜镜片经过不同的方法进行搭配组合，而且综合验光仪能够将验光镜片箱中的所有的光学镜片都放入到其内部系统之中<sup>[5]-[7]</sup>，以此来完成对患者眼睛的屈光度检查，且综合验光仪在使用时比验光镜片箱更为简单方便。由此可知，综合验光仪因其便捷、智能化的优点正在逐步的对验光镜片箱进行取代，在该行业内获得了更加普遍的应用<sup>[8]</sup>。

凭借上述这些特点，综合验光仪已然成为了现代社会当中该行业使用率最高的验光仪器之一。确定综合验光仪性能优劣的关键因素是其球镜度、柱镜度以及棱镜度等光学参数，作为对患者进行相关视力检查的光学设备，由其得出的检测结果是非常有意义的，必定会对视力矫正的实际效果造成一定程度的影响。综上所述，对于综合验光仪相关光学性能参数的计量检定已经成为了该领域内人士广泛关注的重点。

### 1.2 课题研究的目的及意义

最近几年以来，综合验光仪在视光中心以及医院当中的使用率都大幅度的提升，使用综合验光仪不但可以更清楚的了解人眼的情况，实现对患者眼睛屈光度的定量分析及检测，而且还可以使得患者从中得到更为舒适的验光配镜体验。这样就可以进一步提高工作人员的使用效率，科学合理的节省了大量进行验光检查的时间<sup>[9]-[11]</sup>。但是考虑到传统综合验光仪的内部结构系统存在设计上的缺陷，在对患者进行高度近视、散光以及眼底缺陷等病患眼检查时，容易导致测量失败或者测量数据产生一定程度的偏差。并且利用综合验光仪进行视力

检查时，由于该设备各种光学参数的不准确性，使得被检测人员实际测得的各种参数值与综合验光仪镜片的标准参数值存在误差，从而影响被检测人员视力矫正的准确性。从使用设备进行检查的过程这一方面考虑，综合验光仪整体的范围较大，那么当利用该设备对患者进行相应的检查时，被检测人员身体的位置会在小范围内发生变化，从而使得综合验光仪发出的矫正光线进入患者眼睛时会产生偏差，最终对测量结果产生影响<sup>[12]</sup>。综上所述，在使用设备前，工作人员一定要按照验光行业标准对综合验光仪的相关参数指标进行检验，判断设备是否符合使用要求。

近年来科学研究技术快速发展，光学技术也在不断提升，综合验光仪的光学性能和结构设计也越来越现代化。即便如此，对于综合验光仪的检定方法依旧存在各种各样的问题，唯有不断创新和持续探索，这样便能使得综合验光仪的检定工作不断地向前发展。且综合验光仪在进行装配、制造以及工作的过程当中，其相应的光学性能参数将会产生一定程度的变化，那么就会导致验光的准确度降低，进而影响工作人员对相关指标的分析及判断，那么在使用设备的过程当中一定会对被检测人员造成不可逆转的伤害。在现有技术当中对于综合验光仪的检测方法有多种，但是很少有光学检测系统能够完成对综合验光仪的各类性能参数的检定分析，其性能参数有球镜度、柱镜度、柱镜轴位及光学中心误差等，从而不能完成对综合验光仪各种光学性能参数以及验光结果准确度的分析。因此，研究一种综合验光仪检测系统完成对其各种性能指标的测量是十分有必要的。

### 1.3 综合验光仪的发展现状

综合验光仪是现阶段世界范围内普遍使用的主观性验光仪器，它将各种类型的光学镜片通过不同的方式完成组合，并利用各种辅助镜片配合被检测者使用，从而完成对人眼的各种检测<sup>[13]-[15]</sup>。综合验光仪的发展状况一直与检测结果的准确度以及使用时的灵敏度息息相关，主要包括下列三个发展阶段<sup>[16]-[18]</sup>：

如下图所示为综合验光仪的第一个发展阶段，该阶段当中的手动式综合验光仪主要是人为对设备进行控制。



图 1.1 手动式综合验光仪

使用时工作人员必须操控设备当中左右两侧的验光盘，并依据被检测人员的实际情况，完成对该设备中各种光学镜片的更换，从而实现对被检测人员的视力检查。这类综合验光仪的主要优势为机械结构设计较为简单，且价格相对便宜，但是实际操作较为复杂。该阶段综合验光仪的主要代表品牌为日本高木及北京中远。

综合验光仪的第二个发展阶段为遥控式，工作人员利用遥控器来完成的对综合验光仪的控制及操作。这类综合验光仪的操作更为简单，但是设备的构造繁琐，不能与其它光学设备共同配合使用，且生产的费用较高，最终成为了中间过渡产品被淘汰，以至于不能在国内外进行推广使用，很快全自动式综合验光仪将其替代。该阶段当中综合验光仪的主要代表品牌为尼德克 RT-900 以及厦门凡亚 AV-1P。

如下图所示为综合验光仪的第三个发展阶段，该阶段当中的综合验光仪主要是全自动式。



图 1.2 全自动式综合验光仪

该仪器的外观和构造都有了很大的发展，采用了时尚与实用性相结合的国际设计理念，设计了全新的系统光路，增加了更多实用的功能，且拥有功能全面、清晰可见的系统操作界面，使该系统具有先进的图像分析及处理技术，验光检测的速度和精确度都有了显著的提升。该阶段综合验光仪的主要代表品牌为拓普康 CV-5000 以及宁波天乐 CV-7000。

综合验光仪在国外的使用已经经历了很长时间，产品的性能和质量都有了巨大的改进和提升，技术发展相对完善，建立起了一套完整的验光配镜流程，被广泛应用于该领域<sup>[19]-[21]</sup>。然而相对于综合验光仪在国外的使用情况而言，该设备在我国发展的时间相对较少，上述三个发展阶段当中的各类综合验光仪在我国则同时出现<sup>[22]</sup>。且从综合验光仪完成视力检测的效率以及测量结果的准确性可以看出，全自动式综合验光仪将会成为未来发展的重要趋势。

### 1.4 综合验光仪检测工作的发展状况

国际标准化组织（International Organization for Standardization）于 1997 年

第一次发布了国际标准 ISO10341，其中规定了对综合验光仪的检测要求，包括测量的范围以及各种光学性能参数<sup>[23]</sup>。2005年和2013年该组织分别发布了新的国际标准 ISO9342-1 和 10341-2012，这两次颁布的都是修订版本，该标准对综合验光仪的各种光学性能的检测要求做出了调整和改进<sup>[24],[25]</sup>。

尽管我国对综合验光仪的使用非常广泛，但是在2008年之前，我国尚未施行一切关于对综合验光进行计量检定的标准法规，从而导致相关管理部门没有办法完成对综合验光仪的光学计量指标和使用质量进行相关控制和管理，使得综合验光仪在行业内的质量无法进行监测。因此，2008年发布了眼科仪器的相关行业标准 YY0674-2008，提出了适用于检测患者双眼视觉功能以及屈光不正的验光头的具体要求和光学检测方法，其关键设计内容以及技术指标参考了国际标准化组织发布的国际标准 ISO10341<sup>[26]</sup>，然而满足该标准条件的系统装置并未给出，导致实现对综合验光仪的检定工作较为困难。2014年6月15日国家质检总局发布了综合验光仪的相关检定规程 JJG1097-2014，该规程适用于综合验光仪的首次检定，后续检定以及使用当中的检定<sup>[27]</sup>。明确说明了对综合验光仪进行检测的光学指标有：球镜度示值误差、柱镜度示值误差、柱镜轴位示值误差以及光学中心误差，且对综合验光仪检定系统的相关参数都规定了参考数值及测量范围，其相关参数包括中心波长、读数分辨率、扩展不确定度以及各种测量误差的范围。该检定规程对综合验光仪的检测方法和指标范围都进行了完整详细的说明，为相关管理部门对综合验光仪的质量管理带来了重要依据，确保了患者可以利用综合验光仪安全放心的进行视力检验。2020年为了持续性改善营商环境，全面贯彻落实放管服的政策措施，市场监管总局对发布的《实施强制管理的计量器具目录》进行了相应的调整，其中规定了依据应完成强检的工作计量器具的结构类型以及使用状况，强检采取只做首次强检和周期检定，强制检定的工作计量器具中就包括综合验光仪<sup>[28]</sup>。

考虑到综合验光仪的特殊结构和目前的测试技术，由以下四种方法可以完成对综合验光仪的检测，详细介绍如下：

### 1) 间接法<sup>[29]</sup>

这种方法通过在组装为综合验光仪之前用焦度计对每个镜片进行测量，以此来实现对综合验光仪的检定。目前这种测试方法在工厂中被广泛使用，这种方法的优点是更容易操作，且由于焦度计是标准化的验光检查仪器，这些镜片的量值可以用 ISO9342-1 中规定的标准测试透镜精确的完成校准。因此，每个综合验光仪镜片的光学性能可以得到保证，并可溯源至顶焦度的国家标准。

然而缺点也是显而易见的，用其镜片的光学性能来评价综合验光仪整体的性能指标，得出的测量结果误差较大。且这种测试方法不能直接完成对综合验光仪的检测，当多种不同类型的镜片组合在一起时，无法测量定向误差，导致该方法的使用非常有限。

2) 利用辅助元件实现对综合验光仪的检测<sup>[30]</sup>

这种方法在光学领域应用广泛，其测量原理是通过使用辅助光学元件，实现系统光路的改进，从而完成综合验光仪镜片的对焦，间接的测量得出综合验光仪的顶焦度。然而，这种方法的使用范围和测量精度受限于辅助光学元件的性能以及测量人员的操作水平，并且利用该方法测量不同镜片的光学性能参数时，必须使用和调整不同的辅助元件。因此，这种方法测量时不方便，且很难用于实时测量。

3) ISO 10341 推荐的自准直原理<sup>[31]</sup>

这种方法的测量精度高于前面两种方法，能够使系统整体的调焦灵敏度提高一倍，可以完成对综合验光仪的球镜度、柱镜度以及棱镜度等光学参数的测量。但是该方法的系统光路更为复杂，且当测量的范围变大时，这种仪器的结构也会相应的变大。而测量精度更多地取决于操作者，因为它需要操作者去找到最佳的焦点，所以这是一种主观的测试方法。

4) 利用无透镜成像技术完成对综合验光仪的检测<sup>[32]</sup>

考虑到综合验光仪的结构特征，该方法对系统光路做出了相应的改变。它主要由四部分组成：光源、检测系统、数据处理系统和显示系统。当被测综合验光仪的顶焦度为零时，平行光线会直接穿过带有四个小孔的圆形孔板，然后由 CCD 接收目标图像，将此时目标像的位置作为参考位置。当被测综合验光仪的顶焦度不为零时，平行光线经过圆形孔板后将发生变化，然后 CCD 将会检测到四束光线的位置会与参考位置不同，那么综合验光仪的顶焦度就可以通过四束光线的位置与参考位置之间的变化值来计算。

为了减少系统误差，该方法采用了无透镜成像技术，并利用二维 CCD 位置图像传感器以及带有四个小孔的圆形孔板来完成综合验光仪顶焦度的测量。该光学系统不仅结构紧凑，测量范围广，而且可以测量多种镜片组合时的性能参数，从而完成了对综合验光仪实时、高效的检测。

对于这几种综合验光仪的检测方法，间接法通过组装成综合验光仪之前用焦度计完成对每个镜片的检测分析，虽然这种方法比较容易实行但测量误差较大，且使用具有局限性。利用辅助光学元件来实现对综合验光仪的检测方法不仅受到使用范围和测量精度的影响，而且在测量过程当中主要依赖于辅助光学元件，难以实现系统的实时测量。这两种方法都是利用现有的仪器对综合验光仪进行分析检测，不可避免的导致测量误差变大，且操作不方便，适用范围较小。利用自准直原理完成对综合验光仪光学参数测量的方法能够提高系统的定焦灵敏度及测量精度，对于该系统整体的结构可以通过结构设计来完成设备的轻小型化。利用带有四个小孔的圆形孔板及图像传感器的无透镜成像技术所设计的综合验光仪检测系统由于生产和装配误差，测量结果误差较大，在光学设计方面存在不足之处，尤其是对于具有更高顶焦度的球面镜片和柱面镜片的组

合，无法对其进行准确的测量，且该检测系统没有满足ISO标准中规定的光学要求，因此无法实现大规模的生产以及应用。

## 1.5 本课题的研究内容

JJG1097-2014以及ISO10341之中明确规定了顶焦度的测量方法，从而可以实现对综合验光仪性能指标的检测，但目前并没有依据该方法研制而成的综合验光仪检测系统。因此，本文通过对现有测量方法的对比分析，研究了基于自准直清晰度法的综合验光仪检测系统，并且给出了该综合验光仪检测系统的设计要求。然后完成了该系统的光学结构设计，分析了综合验光仪性能指标的测量方法。并利用动态光学理论建立了数学模型，对该系统中的光学元件进行了方位误差分析，根据设计要求和装调方法完成了原理样机的研制，最后完成了重复性实验、测量准确性实验以及系统不确定的计算分析。

本文每章的研究内容如下：

第一章为绪论部分。说明了课题研究的目的及意义，并介绍了综合验光仪及综合验光仪检测工作的发展状况，最后提出了本课题的主要研究内容。

第二章为综合验光仪及其检测系统的原理分析。首先说明了综合验光仪的结构和工作原理，介绍了其性能指标及顶焦度的现有测量方法，最后给出了综合验光仪检测系统的测量原理及系统设计要求。

第三章完成了综合验光仪检测系统的结构设计，其中包括旋转光源组件、分光棱镜组件、望远准直组件、平面反射镜组件、双高斯成像物镜组件、小型化精密移动测试组件、电学传感器以及底座的设计，然后给出了综合验光仪相关参数的测量方法。

第四章首先给出了机械设计要求和装调方法，然后利用动态光学理论建立数学模型，分析其光学元件的方位误差对系统产生的影响，最后完成综合验光仪检测系统原理样机的装调。

第五章完成了综合验光仪检测系统的重复性实验验证及测量准确性实验验证，并对测量结果进行不确定度分析。

第六章对全文进行总结及展望。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/435322111341012000>