

文章编号: 1002-1582(2026)01-0025-07

一款用于电机定子检测的工业内窥镜头设计

龙邹荣¹, 丁超¹, 刘晨希¹, 欧阳博文¹, 米建华², 金吉清², 朱泽翔², 王建旭¹, 蒋上海^{1*}

(1. 重庆理工大学, 电气与电子工程学院, 重庆 400054)

(2. 克勒伯电机(宁波)有限公司, 浙江 宁波 315400)

摘 要: 随着新能源汽车的发展, 越来越多人关注并购买。而新能源汽车在生产制造过程中会配有许多微型电机, 这些微型电机定子的检测就可能需要用到工业内窥镜。目前市面上大多工业内窥镜视场角大于 100° , 虽然视场角增大有利于提高观测范围, 但畸变也会越大, 后续的图像处理就越复杂, 对于微型电机定子而言, 内部空间狭窄且为管道结构, 所需观测范围不大, 因此不适用于对其的检测。文章设计了一种专用于微型电机定子内部检测的工业内窥镜光学系统, 其视场角为 64° , 搭配20mm的工作距离, 所具有的观测范围恰好能覆盖内部整体空间。该设计由6块球面镜组成, 制造成本低, 整个光学系统总长为60mm, 焦距为3.99mm, F数为3.3, 畸变大于 -20% , 相对照度接近1, 在奈奎斯特频率105lp/mm处, 所有视场的调制传递函数均大于0.65。经过图像模拟, 整体成像质量较好。最后由公差分析结果表明, 该系统结构合理, 满足生产要求, 同时对新能源汽车的发展具有一定意义。

关 键 词: 工业内窥镜; 电机定子; 光学设计; 球面

中图分类号: O439

Design of an industrial endoscope lens for motor stator inspection

LONG Zourong¹, DING Chao¹, LIU Chenxi¹, OUYANG Bowen¹, MI Jianhua²,
JIN Jiqing², ZHU Zexiang², WANG Jianxu¹, JIANG Shanghai^{1*}

(1. Laboratory of Machine Vision and Perception, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

(2. Kleber Motor (Ningbo) Co., Ltd., Ningbo 315400, China)

Abstract: With the development of new energy vehicles, more and more people are paying attention to and purchasing them. During the production process of new energy vehicles, many micro motors are used, and the inspection of the stators of these micro motors may require the use of industrial endoscopes. Currently, most industrial endoscopes on the market have a field of view greater than 100° , which, while increasing the observation range, also increases distortion, making subsequent image processing more complex. For micro motor stators, the internal space is narrow and has a conduit structure, so a large observation range is not required, hence it is not suitable for such inspections. This article designs an optical system for an industrial endoscope specifically for the internal inspection of micro motor stators, with a field of view of 64° and a working distance of 20mm, providing an observation range that perfectly covers the entire internal space. The design consists of 6 spherical mirrors, resulting in low manufacturing costs. The total length of the optical system is 60mm, with a focal length of 3.99mm and an F-number of 3.3. The distortion is greater than -20% , and the relative illumination is close to 1. At the Nyquist frequency of 105lp/mm, the modulation transfer function for all fields of view is greater than 0.65. Image simulation shows that the overall image quality is quite good. Finally, tolerance analysis indicates that the system structure is

收稿日期: 2025-07-31; 收到修改稿日期: 2025-09-12

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202401105)、重庆理工大学重大科研项目同步开展基础及应用基础研究项目 (2024TBZ026)、重庆理工大学校企合作技术开发项目 (2024Q366)

作者简介: 龙邹荣 (1991—), 男, 讲师, 博士, 从事光电检测、人工智能图像处理方面的研究。longzourong@cqut.edu.cn
蒋上海 (1985—), 男, 讲师, 博士, 从事XCT/XFCT/MRI成像仿真与重建的研究。

* 通讯作者: jiangshanghai@cqut.edu.cn

reasonable and meets production requirements, which is also significant for the development of new energy vehicles.

Keywords: industrial endoscope; motor stator; optical design; spherical surface

0 引 言

随着科技的进步和先进生产力的高速发展,一些精密机械和仪器的检测越来越困难,要求也越来越高。比如目前备受关注的新能源汽车,新能源汽车在制造过程中会配有许多微型电机,这些电机的检测就是至关重要的。在制造,装配,维护过程中,电机定子内可能会有某些附着物,如铁屑,胶水等杂质,同时也可能对孔径内壁造成裂纹,划痕等损害,如果不能及时检测到并修改的话,可能会造成无法计量的损失和后果。工业中,常使用工业内窥镜对某些仪器设备进行检测和评估^[1]。内窥镜被发明出来最开始是作为医疗工具,用于对人体内部腔体进行检查和诊断^[2]。经过一百多年的发展,内窥镜在医学,航天,工业等领域都得到了广泛的应用^[3]。内窥镜主要分为三种:硬管内窥镜,光纤内窥镜和电子内窥镜^[4]。硬管内窥镜其整体结构是固定且不可弯曲的。光纤内窥镜是通过光纤束传导图像。电子内窥镜使用图像传感器 CCD 或者 CMOS,通过图像传感器在显示器上显示,并且还可以使用相应的图像处理算法对采集到的图像进行处理分析,是目前应用最为广泛的一种内窥镜。

目前对工业内窥镜的要求主要集中为视场大、像质高。普遍采用的光学系统是反远距结构^[5],通过前面的负光焦透镜组收集更多角度的光线,之后在通过后面的正光焦透镜组对光线进行聚焦和像差优化。黄晓园等设计了一款相对照度大于 90% 的胶囊内窥镜,其 F 数为 2.8,视场角为 150°,在 200lp/mm 的 MTF 大于 0.3,能满足一般内窥镜的成像质量要求^[6]。Han 等设计了一款广角胶囊内窥镜, F 数为 2.8,相对照度大于 0.3,视场角 140°^[7]。与此同时, Kim 等设计了一款低 F 数的一次性内窥镜,该系统 F 数为 2.2,视场角 140°,相对照度大于 0.6,畸变大于 -65%,所有视场在 180lp/mm 的 MTF 值均大于 0.2^[8]。Greisukh 等基于鱼眼镜头设计了一款微型超广角镜头的胶囊内窥镜物镜,该系统视场角 170°,外径尺寸 5mm,总长小于 10mm,具有较小的 F 数值,所有视场在 180lp/mm 的 MTF 值均在 0.5 以上,具有较好的成像质量^[9]。这些设计具有体积小、视场大,能够快速检查大面积区域等优点;但如果应用于微型电机定子,由于内部空间狭小,需要观测的面积不

大,视场则过大,且具有较大的畸变。

本文将根据实际要求旨在设计一款制造成本低、视场较大、成像质量高、具有较小体积,专用于微型电机定子缺陷检测的工业内窥镜镜头。本文设计难点在于减小视场的时候,镜头的像面也会减小,所匹配传感器的靶面尺寸也会过小,这不利于在低光照环境下作业;而选用较大靶面的传感器,镜头整体口径也会相应变大,又不利于镜头的伸入,需要全方面考虑。首先根据需求选取合适的初始结构,之后基于 ZEMAX 对其进行像差优化和像质评价,最后进行公差分析以便后续的机械加工处理。

1 参数与模型设计

1.1 镜头与芯片的匹配

本文所选用的图像传感器为 OnSemi PYTHON300 CMOS 芯片,该传感器的靶面尺寸为四分之一英寸,共 30 万像素,具有成本低、存储需求小、处理速度快、抗干扰能力强等优点,同时能减少后续的图像处理算法的复杂度,非常适用于工业内窥镜的需求。

针对所选的传感器,海康威视推出的两款工业相机 MV-CA003-20GC 与 MV-CA003-21UC 采用的是该型号的传感器,但 MV-CA003-20GC 的图像输出分辨率为 672×512, MV-CA003-21UC 的图像输出分辨率为 640×480。由于 MV-CA003-20GC 更侧重于机器视觉方面的应用,而 MV-CA003-21UC 更侧重于高帧率方面的应用,因此决定选择 MV-CA003-20GC 匹配本文所设计的镜头。根据其图像输出分辨率为 672×512,单个像素的大小为 4.8μm×4.8μm,计算出传感器对角线长度约为 4.0mm。

奈奎斯特频率可由下列公式得出

$$\text{Spatial_frequency}(\text{lp/mm}) = \frac{1}{2 \times \text{pixel_size}(\text{mm})} \quad (1)$$

根据上述公式,由像素大小计算出所对应的奈奎斯特频率为 105lp/mm。考虑到海康威视工业相机的尺寸较大,无法深入电机定子内部,因此在设计镜头时将注重镜头的口径大小与总长度,以此达到检测需求。

1.2 技术要求及系统参数

如图 1 所示,为本文设计的光学系统的检测对

象的结构图，微型电机定子。该电机定子由外壳和 4 片磁瓦组成，定子深度约为 80mm，内直径为 35mm，应用于许多工业场景。目前对该电机定子检测大多为人工检测或者使用市面上现有的工业内窥镜。本文将针对该检测对象，设计专用于此的光学系统。

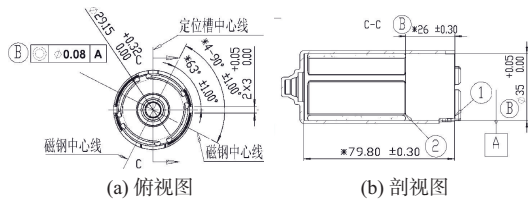


图 1 电机定子结构图

本文设计的工业内窥镜类型为电子内窥镜，电子内窥镜大致由三部分组成，光学镜头，CMOS 图像传感器，图像处理算法。工作方式是由光学镜头对检测物体进行光线的采集，之后将所采集的图像映射到图像传感器上，最后经过一系列的图像处理得到在显示器上显示的图像^[10]。

目前市面上的工业内窥镜大多具有大视场的特点，通常大于 100°。大视场能够获得更多的图像信息，然而，视场增加的同时，图像的畸变也会更加严重，因此对后续的图像处理要求也会过高。本文设计根据所需要的检测对象，虽然要求大视场，但由于内部空间不大，因此视场不需要那么大，同时考虑到图像的畸变，视场不宜过大，因此将视场角要求在 55°到 70°之间。

由于电机定子内部呈管道式狭窄空间结构，其内壁装配有精密磁瓦部件。在对定子内部进行检测时，需避免内窥镜与磁瓦发生碰撞，同时需保证镜头能贴近检测区域以获取清晰观测效果，因此需要合适的工作距离^[11]。工作距离过大，对镜头景深的设计要求则会越大；工作距离过小，则镜头视场无法覆盖定子内部所需观测的完整物面，影响检测完整性。本设计在视场角参数已大致确定的前提下，以“避免磁瓦碰撞”和“满足物面观测范围”为目标，经综合验证后将工作距离确定为 20mm。该距离既能有效规避内窥镜与定子内部磁瓦的接触风险，又能降低对光照和景深的设计难度，同时确保镜头观测面能覆盖所需检测区域。

F 数是焦距与光圈直径的比值，小的 F 数，光圈较大，能够允许更多的光线通过；而较大的 F 数，光圈较小，但景深更大，能够使更多物体保持清晰，本设计将 F 数设置为 3.3。F 数为 3.3 的光学系统能够允许相对较多的光线通过，拥有适中的景深，在光通量、像差管理和成像质量方面提

供了良好的平衡，而相对照度大于 0.9 是为了使图像亮度更加均匀。

通常大视场镜头为了引入更多角度的光线，第一个透镜的尺寸相对较大，但为了使镜头能够更方便的深入被检测设备的内部，要求透镜半径尺寸小于等于 8mm，光学系统总长确定为 60mm^[12]。

为了避免使用本设计所检测出的图像四周出现黑边的情况，半像高设计要求需略微大于传感器对角线的一半长度，本设计要求半像高在 2.02mm 到 2.10mm 之间，以便后续工业内窥镜的组装与调试。

本文设计的工业内窥镜具体的系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

项目	目标
F 数	3.3
有效焦距/mm	4
工作距离/mm	20
工作波长/nm	486~656
视场角/(°)	$55^{\circ} < 2\omega < 70^{\circ}$
透镜半径/mm	≤ 8
总长度/mm	60
相对照度	> 0.9
半像高/mm	$2.02 < y < 2.10$

根据上述参数指标，和下列公式

$$y' = f' \times \tan \omega \quad (2)$$

式中， y' 为半像高， f' 为整体镜头的有效焦距， ω 为半视场角。通过有效焦距和半像高计算出理论的全视场角约为 53°。

物面高度 2Y 可表示为

$$\tan \omega = \frac{Y}{L} \quad (3)$$

式中，Y 为物面高度的一半，L 为光学系统的工作距离。故计算出理论物面高度 2Y 约为 40mm。

光学畸变 Distortion 可表示为

$$\text{Distortion} = \frac{y - y'}{y} \times 100\% \quad (4)$$

式中 y' 为真实半像高， y 为理想半像高。

电视畸变 TV_Distortion 可表示为

$$\text{TV_Distortion} = \frac{h' - h}{h} \times 100\% \quad (5)$$

式中 h' 真实像面宽度， h 为理想像面宽度。

对于视场较大的镜头而言，一般存在很大的畸变，即光学畸变和电视畸变。光学畸变可以理解为真实像高与理想像高之差的百分比变化，即

式 (4)；电视畸变则是真实像面宽度与理想像面宽度之差的百分比变化，即式 (5)。因此，在设计过程中，为了满足所选择的图像传感器，在焦距和F数确定的情况下，需要适当修改视场角。

除此之外，工业内窥镜对分辨率也有很高的要求，其理论中心分辨率公式为

$$r(d)=\frac{D}{1.22\lambda f^t} \tag{6}$$

式中D为系统入瞳直径，λ为光学系统工作波长。

系统入瞳直径D可由下列公式表示

$$F=\frac{f^t}{D} \tag{7}$$

式中F为光学系统的F数。

本设计将根据以上参数指标和理论对工业内窥镜的光学系统进行设计，同时尽可能的减少制造成本和像差。

2 初始结构

本设计采用的是反远距结构，该透镜结构为负透镜组在前，正透镜组在后，其中负透镜组用于吸收更多角度的光线，正透镜组用于对所吸收光线的聚焦和像差优化。在光学设计中，设计的成败与所选择的初始结构密切相关。初始结构的获取有两种方法^[13]，一是PW法，利用初级像差理论，计算出透镜距离，曲率半径等一系列参数；二是缩放法，通过查阅相关资料，找一个与本文设计要求较为接近的镜头。对于较为复杂的光学系统，通常缩放法比较实用且成功率较高，所以本设计采用缩放法取得初始结构，镜头的初始结构数据如表2所示。

表2 镜头的初始结构

表面	曲率半径/mm	厚度/mm	Nd	Vd
1	∞	0.4	1.88	42
2	1.3	0.9	—	—
3	-1.3	0.8	1.5	86
4	-3.0	0.2	—	—
5	1.4	0.8	1.76	40
6	2.0	0.5	—	—
Stop	∞	0.3	—	—
8	2.0	0.8	1.59	58
9	-2.0	0.4	—	—
10	-17.7	0.8	1.64	60
11	-1.0	0.6	1.85	24
12	-3.0	—	—	—

将上表中初始结构数据输入ZEMAX中，同时输入初始结构对应的F数，波长，视场角等。需要注意的是，在对视场确定采样点时，每个视场区

域面积需相等，即当取三个采样点时，视场角度为0、0.7、1的比例；当取四个采样点时，视场角度0、0.58、0.82、1的比例。本设计采用的是四个采样点。得到的初始结构2D图如图2所示。

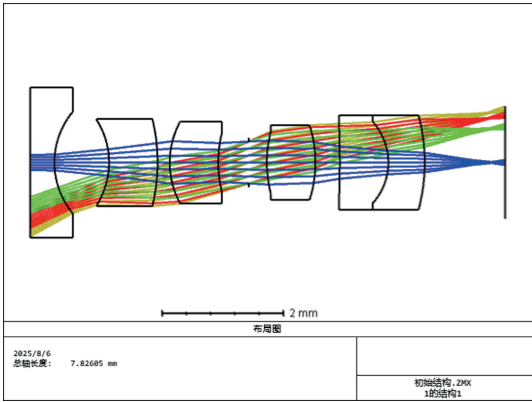


图2 初始结构2D图

3 优化结果与像质评价

3.1 优化后的结构

如图3所示，为优化后的光学系统，本设计在优化过程中会尽可能的将透镜替换成市面上可直接购买的，同时会对某些透镜半径尺寸做出相应调整，以便后续透镜的制作和镜头的搭建。因此，镜片的尺寸大小相比较理论大小而言会比较大，但考虑到光阑的作用和传感器尺寸，对最终实验结果几乎无影响，同时总体镜头口径大小是严格遵循设计要求的。

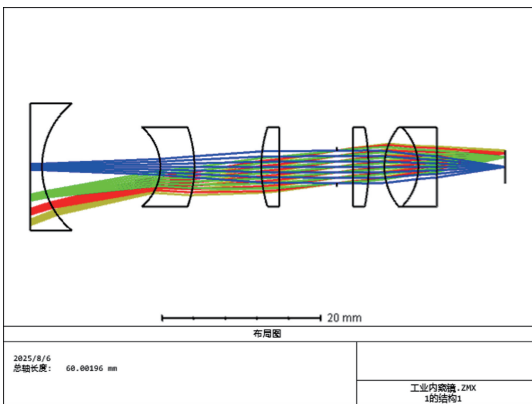


图3 优化后的镜头结构

而由于工业相机MV-CA003-20GC镜头接口是C-Mount接口，因此在进行镜头安装时会设计相应的机械结构，使镜头最后一块透镜靠近图像传感器，满足光学系统的后截距。这会使镜头伸入一部分在工业相机镜头接口内，但MV-CA003-20GC的镜头接口处的外直径为29mm，是小于微型电机定子内直径的，能够伸入定子内部，同时定子外侧为铁制材料，不用担心其碰撞问题，因此能够实现检测的目的。

具体的镜头数据如表 3 所示，由表可知，前四块透镜玻璃材料为 K9，该光学玻璃是一种宽光谱透过优异的光学材料，具有较高的硬度，能承受多种物理和化学刺激，气泡和杂质含量较低。所有透镜均采用球面镜，且六块透镜中，有四块透镜含有平面，仅使用一块胶合透镜，这在保证成像质量的同时，减少了该镜头的制造成本。

表 3 光学镜头数据

表面	类型	曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃
物面	标准面	∞	20	—
1	标准面	∞	1.5	H-K9L
2	标准面	10.330	14.942	—
3	标准面	-6.501	4.307	H-K9L
4	标准面	-14.91	8.452	—
5	标准面	16.270	2.300	H-K9L
6	标准面	∞	7.246	—
光阑	标准面	∞	2.000	—
8	标准面	∞	2.000	H-K9L
9	标准面	-25.84	2.000	—
10	标准面	7.823	4.279	H-ZK10L
11	标准面	-7.034	2.362	H-ZF7LA
12	标准面	∞	8.614	—
像面	标准面	∞	—	—

整体镜头口径为 1.6cm，视场角确定为 64°，具体最终镜头系统参数如表 4 所示。

表 4 优化后的系统参数

项目	目标	结果
F 数	3.3	3.3
有效焦距/mm	4	3.99
工作距离/mm	20	20
工作波长/nm	486~656	486~656
视场角(°)	$55^{\circ}<\omega<70^{\circ}$	64°
透镜半直径/mm	≤ 8	8
总长度/mm	60	60
相对照度	>0.9	>0.98
半像高/mm	$2.02<y<2.10$	2.089

3.2 像质评价

系统的点列图如图 4 所示，在中心视场处，RMS 半径为 0.783 μm ；在边缘视场处，RMS 半径为 1.97 μm ，均小于所匹配图像传感器的像元尺寸^[14]，可见该内窥镜镜头的像差得到较好的校正，满足本设计的基本技术要求。

图 5 反映了光学系统的场曲和畸变，系统的场曲在 0.03mm 以内，场曲较小，边缘视场畸变大于一 20%，系统的成像效果较好，为后期的图像处理减小了复杂性^[15]。

调制传递函数（MTF）是系统对不同空间频率的响应能力，通常用于评估图像的清晰度和分

辨率^[16]。图 6 和图 7 表示整体的 MTF 曲线图和在奈奎斯特频率下的 MTF 曲线图，通常 MTF 曲线越接近 1 且越平缓，则成像质量越好。由图 7 可知，在奈奎斯特频率 105lp/mm 处所有视场均大于 0.65，成像质量较好。

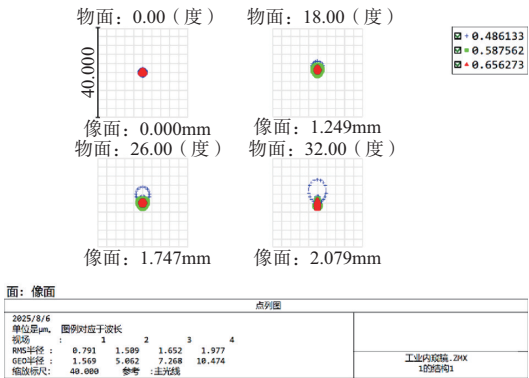


图 4 点列图

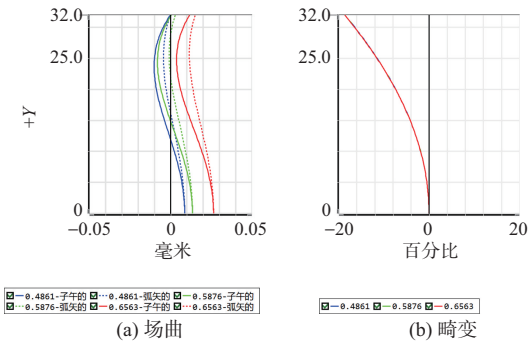


图 5 场曲和畸变

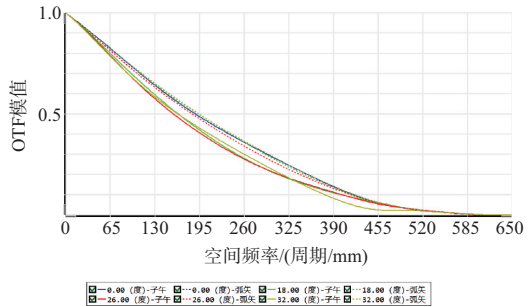


图 6 整体 MTF 曲线图

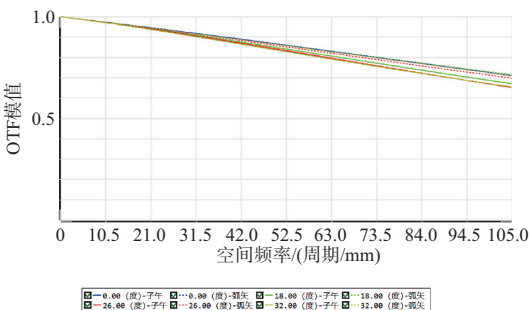


图 7 在奈奎斯特频率下的 MTF 曲线图

图 8 表示的是该系统的相对照度，相对照度为边缘视场照度与中心视场照度的比值，该系统相对照度接近 1，整体成像照度均匀。至于边缘视场

的相对照度略高于中心视场，其根本原因是光瞳像差导致的入瞳效率变化。由于光瞳像差（如光瞳球差），从边缘视场看回光圈时，其有效通光孔径的形状和位置发生变化，导致其投影面积大于理想情况下的面积，因此边缘照度在数值上就会超过中心。这是一个好的特征，用以实现极致照度均匀性。

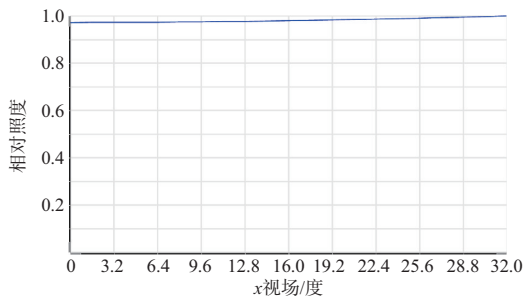


图 8 相对照度

图 9 和图 10 表示的是该镜头的图像模拟情况，由图 10 可知，该系统对物体中心处成像清晰，照度均匀。虽然边缘存在少量畸变，但可以通过后续计算机进行矫正，满足设计要求。



图 9 原图



图 10 模拟图

除此之外，通过以上数据，得出相应的理论中心分辨率。其中入瞳直径为 1.2mm，选取的波长为可见光波长的中心波长 587nm。通过理论中心分辨率公式计算得出中心分辨率约为 420lp/mm。

4 公差分析

光学系统设计出来后，还要考虑后续的加工和装配^[17]，需要对其进行公差分析，光学系统的公

差指的是通过对某个参数在小范围进行一定的修改后，对整个光学系统的性能会有怎样的影响，如果影响较小，则该光学系统能被加工生产。本设计通过询问相关生产厂家，设置的公差如表 5 所示。

表 5 系统的制作公差

项目	公差
表面公差	—
曲率半径/mm	±0.05
厚度/mm	±0.0375
X 倾斜/(°)	±0.0167
Y 倾斜/(°)	±0.0167
S + A 不规则度//fringe	±0.5
元件公差	—
X 偏心/mm	±0.01
Y 偏心/mm	±0.01
倾斜 X 轴/(°)	±0.0167
倾斜 Y 轴/(°)	±0.0167
折射率公差	—
折射率	±0.001
阿贝数	±0.1

本设计以毫米中的 RMS 光斑半径为指标。经过采样其名义标准值为 0.00121971，对系统进行 2000 次蒙特卡洛分析，结果见表 6。由表可知，80% 的 RMS 光斑半径是在 1.37μm 以内，整体效果较好，结构合理，满足生产要求。

表 6 蒙特卡洛公差分析结果

百分比/%	值
98	0.00157990
90	0.00143103
80	0.00137183
50	0.00129961
20	0.00125338
10	0.00123208
2	0.00120394

5 结 论

本设计针对目前市面上工业内窥镜视场过大，进而畸变大，不适用微型电机定子的检测的问题，提出了一款视场较大，畸变小的工业内窥镜镜头。该工业内窥镜口径大小为 16mm，光学系统总长为 60mm，易于探入所检测物件的内部。整个光学系统体积较小，同时靶面尺寸较大，成像质量好，所有视场 MTF 在 105lp/mm 处均大于 0.65，采用的材料均为常用玻璃，同时系统多个透镜含有平面，这在一定程度减少了制作成本。经过公差分析后，整个光学系统满足现代工艺加工与装配要求。

参考文献:

- [1] Xu T X, Chen Z P, Jiang Z H, et al. A real-time 3D measurement system for the blast furnace burden surface using high-temperature industrial endoscope[J]. *Sensors*, 2020, 20(3):869.
- [2] 黄锦媛, 贺艳芳, 林峰. 基于Zemax的双视场胶囊内窥镜设计[J]. *激光与光电子学进展* 2025, 57(18):376—381.
Huang Jinxuan, He Yanfang, Lin Feng. Dual-field capsule endoscope design based on zemax software[J]. *Laser & Optoelectronics Progress* 2020, 57(18):376—381.
- [3] Yang L, Chen M, Zhu Q, et al. Development of a small-diameter and high-resolution industrial endoscope with CMOS image sensor[J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2019, 296: 17—23.
- [4] 史天翼, 杨磊, 刘泽武, 等. 小口径大视场工业内窥镜光学系统设计[J]. *应用光学*, 2023, 44(1):17—23.
Shi Tianyi, Yang Lei, Liu Zewu, et al. Optical system design of small-caliber and large-field industrial endoscope[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(1):17—23.
- [5] 宋菲君, 陈笑, 刘畅. 近代光学设计系统概论[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
Song Feijun, Chen Xiao, Liu Chang. Introduction to modern optical design system[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [6] 黄晓园, 张玉良, 麻永青, 等. 基于ZEMAX的大视场胶囊内窥镜镜头设计[J]. *光学与光电技术*, 2023, 21(02):107—113.
Huang Xiaoyuan, Zhang Yuliang, Ma Yongqing, et al. Design of a Wide-field capsule endoscope lens based on ZEMAX[J]. *Optics and Photonics Technology*, 2023, 21(02):107—113.
- [7] Han P, Tseng Y C, Tsai C M. Wide field of view lens design with uniform image illumination in capsule endoscope system[J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27:1115—1122.
- [8] Kim D, Chang S, Kwon H S. Wide Field-of-View, High-Resolution endoscopic lens design with low F-number for disposable endoscopy[J]. *Photonics*. MDPI, 2021, 8(4):89.
- [9] Greisukh G I, Levin I A, Kazin S V. Designing an ultra-wide-angle microlens for a capsule medical endoscope[J]. *Computer Optics*, 2022, 46(2):219—223.
- [10] 上官佳伟, 李永亮, 冯海龙, 等. 大视场医用电子内窥镜光学成像系统研究综述[J]. *激光杂志*, 2024, 45(08):1—5.
ShanGuan Jiawei, Li Yongliang, Feng Hailong, et al. A Review of large Field-of-View optical imaging systems for medical electronic endoscopes[J]. *Laser Journal*, 2024, 45(08):1—5.
- [11] 袁晓涵, 向阳, 向铮, 等. 高分辨率多光谱工业炉膛内窥镜设计[J]. *应用光学*, 2025, 46(04):912—921.
Yuan Xiaohan, Xiang Yang, Xiang Zheng, et al. Design of High-resolution multispectral industrial furnace endoscope[J]. *Applied Optics*, 2025, 46(04):912—921.
- [12] 姜伯文, 向阳, 于邀洋, 等. 长工作距小口径双目测量内窥镜光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2025, 62(09):350—358.
Jiang Bowen, Xiang Yang, Yu Aoyang, et al. Design of long working distance Small-aperture binocular measurement endoscope optical system[J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2025, 62(09):350—358.
- [13] 刘钧, 高明. 光学设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
Liu Jun, Gao Ming. Optical design[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006.
- [14] 何旭舟, 林峰, 谢忠鑫, 等. 一种2k分辨率内窥镜光学系统设计[J]. *应用光学*, 2024, 45(2):276—281.
He Xuzhou, Lin Feng, Xie Zongxin, et al. Design of endoscopic optical system with 2k resolution[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2):276—281.
- [15] 王金沙, 巩岩, 高志山, 等. 双波段长后工作距连续变焦光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(21):309—318.
Wang Jinsha, Gong Yan, Gao Zhishan, et al. Design of dual-band optical system with long backworking distance and continuous zoom[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(21):309—318.
- [16] 付艳丽. 高清内窥镜光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
Fu Yanli. Design of high definition endoscope optical system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [17] 杨凯明, 向阳, 王鑫, 等. 大靶面、长工作距高清工业内窥镜设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(22):150—157.
Yang Kaiming, Xiang Yang, Wang Xin, et al. Design of large field of view, long working distance high-definition industrial endoscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(22):150—157.