

一种多谱段红外成像光学系统设计

彭晴晴,杜晓宇

(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:为提高红外远程目标探测识别能力,除了增加焦距和有效口径等传统措施,还需要进一步获取目标的多谱段信息,从而将具备不同辐射特性的目标和背景区别开。本文提出了一种采用多谱段分区红外探测器和棱镜旋转像移成像光学系统,将同一目标的红外辐射能量会聚到探测器不同谱段区域进行成像,从而获取同一目标的多谱段成像信息。该系统采用同轴反射式光学系统,具备8个不同谱段分区的两支红外探测器,通过棱镜旋转实现同一目标的8个谱段信息获取。系统焦距520 mm,有效口径200 mm,F数为2.6。光学系统结构紧凑,棱镜旋转与探测器成像实时对应,不存在成像延迟和像旋,具有口径大、焦距长、谱段多等特点,满足系统高分辨率、长作用距离、多谱段信息获取等要求。

关键词:多谱段;像移;红外探测

中图分类号:TN216;O436 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.020

Design of a multispectral infrared imaging optical system

PENG Qing-qing, DU Xiao-yu

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In order to improve long-range infrared target detection and recognition, besides the traditional measures such as increasing the focal length and effective aperture, it is necessary to further obtain the multi-spectral information of the target, so as to distinguish the target with different radiation characteristics from the background. In this paper, a multispectral infrared detector and prism rotating image shift imaging optical system is proposed. The infrared radiation energy of the same target is converged to different spectral regions of the detector for imaging, thus obtain multispectral imaging information of the same target. The system adopts coaxial reflective optics, which has two infrared detectors with 8 different spectral sections. The information of 8 spectral sections of the same target can be obtained by prism rotation. The focal length of the system is 520 mm, the effective aperture is 200 mm, and the F number is 2.6. The optical structure of the system is compact, the prism rotation corresponds to the detector imaging in real time, there is no imaging delay and image rotation, and it has the characteristics of large aperture, long focal length, multiple spectral segments, etc., which meets the system requirements of high resolution, long operating distance and multi-spectral information acquisition.

Keywords: multispectral; imagine shift; infrared detection

1 引言

随着红外光电设备的快速发展,光电系统对红外光学成像的要求越来越高,尤其是对分辨率和作用距离的要求越来越高。传统的增加焦距和口径等措施,可以提高光学成像系统的分辨率和识别概率,但却使系统的体积和重量大大增加了。因此,需要

采用新的技术手段,在同等焦距或者口径情况下,提高成像系统的探测识别概率^[1-2]。

由于目标的辐射特性各不相同,采用多谱段探测可以将具备不同辐射特性的目标和背景区别开来,从而提高探测识别概率。采用多个不同谱段的传感器,将不同谱段的红外辐射能量分别成像然后进行融合

的方式,可以在实现多谱段成像的同时提升探测识别概率;然而多个传感器进行融合的方案,一方面仍然造成了系统的复杂和体积重量增加,另一方面,由于红外器件的成本较高,多传感器也直接导致系统成本大幅提升。因此多传感器融合的方式并不适用于需要对系统有小型化紧凑化要求的应用环境,比如机载、星载平台等。因此需要通过其他方式来实现多谱段的分段探测,提高探测识别概率,同时满足系统的小型化轻量化设计要求。随着多谱段红外探测器的发展^[3-4],多谱段光学系统也有更多实现方式。

针对以上问题,本文提出了一种新型大口径多谱段红外成像光学系统,该系统通过采用谱段分区红外探测器、棱镜旋转像移成像光学系统,实现同一目标的红外辐射能量会聚到探测器不同谱段区域进行成像的目的,从而获取同一目标的不同红外谱段信息。该系统采用卡塞格林折反式光学系统,可缩短系统长度;采用两个宽谱段范围红外探测器,其中中波红外探测器 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,长波红外探测器 $8 \sim 12 \mu\text{m}$;中长波探测器焦面各分为 4 个窄带区域,共可获得 8 个谱段信息。下面介绍这种基于谱段分区红外探测器的多谱段成像方案,以及基于这种方案所设计的多谱段光学系统。

2 多谱段成像方案

要实现红外多谱段成像,基于所采用的探测器不同,可大致分为两大类系统。一类是基于技术相对成熟的单波段红外探测器,采用多个不同响应波段的器件,实现多谱段信息获取。这类系统一般采用前端共光路,后端分光路的光学系统。然而此类系统,需要加入多个分光器件实现多谱段分光,由于光路复杂、透镜数量多,导致系统透过率低、光路尺寸长、系统难以实现轻量化等问题;另一方面,采用多个探测器,其成本、体积尺寸等都不具有优势。另一类是基于宽光谱响应的探测器,比如中长波双色制冷探测器,通过在光路中加入分光器件实现对多个不同谱段的信息获取,例如分光光栅、分光棱镜、系列滤光片等,但此类器件一般也位于光路中,需要分级设计光学系统,导致光路复杂、透过率低等问题,同时宽波段红外探测器制作工艺难,成本高,技术成熟度低。因此要实现超过三个谱段以上的多谱段成像系统,传统的系统会有探测器数量较多或分光器件较多、较复杂的问题。

本文提出的方案结合了两类系统的特点,在常规技术成熟的单波段红外探测器基础上,通过改变制冷探测器内部滤光片设计,实现探测器的谱段分区,在光路中只需要一次分光,无需额外加入谱段细分分光器件,简化了光学系统,提高了光学系统透过率和可靠性。同时,本文提出的方案仅利用一片旋转棱镜实现像移,并采用新型的四角度扫描方法,实现分区成像。

通过谱段分区探测器与像移成像光学系统,本文提出的方案以较低的技术成本、较简化的系统设计、较高的系统透过率等,实现了八个谱段的多谱段光学系统方案。

2.1 谱段分区红外探测器方案

在红外远程目标探测识别系统中,由于距离远、目标能量弱,因此需要采用高灵敏度的制冷型红外探测器。制冷型红外探测器一般由真空杜瓦瓶、光学窗口、光学滤光片、冷屏、探测器焦平面和冷指、以及制冷机等组成,如图 1 所示是光学系统与制冷红外探测器杜瓦瓶内部结构示意图。传统制冷型红外焦平面探测器,中波响应谱段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,长波响应谱段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,为了进一步获取更细分的谱段信息,需要采取一些分光措施。

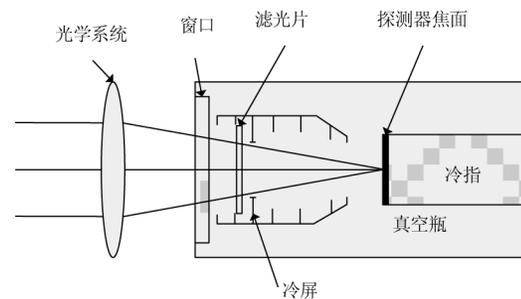


图 1 制冷探测器杜瓦示意图

Fig. 1 The dewar plot of the cooled infrared detector

采用多个不同响应谱段的传感器以获取更多细分谱段信息,对于体积大、成本高的制冷型红外探测器来说,显然不是合理的方案。本文所设计的红外探测系统,需要获取包括 4 个中波谱段以及 4 个长波谱段共 8 个谱段信息。为实现系统的轻量化设计,采用探测器焦平面分光方案来实现。

传统探测器内部滤光片位置一般放置在冷屏与窗口之间,如图 1 所示,只能实现对整个焦平面像面的滤光,而为了实现对像面不同区域的光谱滤光,需要将低温滤光片设置在探测器焦平面附近。探测器

窗片是宽波段响应,通过探测器焦平面前的低温滤光片实现不同波段区域划分。

如图2所示,将中波探测器焦平面划分为4个窄带区域,其中响应波段分别为波段1(3.0~3.5 μm)、波段2(3.5~4.0 μm)、波段3(4.0~4.5 μm)、波段4(4.5~5.0 μm);长波探测器的焦平面也划分为4个窄带区域,其响应波段分别为波段1(8~9 μm)、波段2(9~10 μm)、波段3(10~11 μm)、波段4(11~12 μm)。

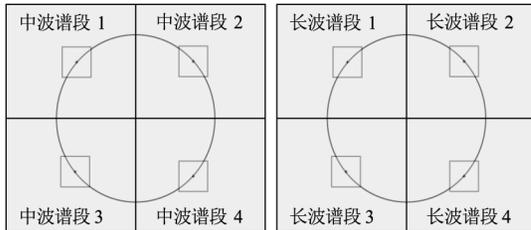


图2 探测器波段分区示意图

Fig. 2 The spectral band distribution diagram of the cooled infrared detector

目标的红外辐射能量通过光学系统会聚到探测器焦平面上成像,通过光学系统内特定的扫描像移机构实现目标图像在探测器像面上不同光谱区域的移动,从而实现多波段信息获取。

2.2 像移成像光学系统实现方式

为实现像移成像光学系统,使目标在多光谱区域之间进行切换成像,需要在成像光路中加入像移组件,同时还要保证像移过程中成像质量良好。能实现像面移动的方式有以下几种:

- (1) 快速反射镜扫描;
- (2) 旋转光楔;
- (3) 旋转折射棱镜;

传统的扫描方案是通过快速扫描反射镜沿光轴方向的一维扫描实现成像在像面上的一维扫描,如图3所示。该方案所存在的问题是,单一扫描反射镜只能实现一维扫描,无法实现图像在像面上的二维扫描;如果通过单一扫描反射镜进行二维扫描,那么除了图像位置移动之外,还会引入不期望的像旋问题。如果采用2个扫描反射镜进行二维扫描,会大大增加系统复杂度,同时扫描反射镜需要放置在平行光路中,为减小扫描镜尺寸,在大口径光学系统中,需要增加一级望远扩束系统来压缩扫描反射镜尺寸,从而导致系统的复杂度上升,以及透过率和性能下降。

第二种扫描方案是在会聚光路中放置光楔,

实现光轴偏移,通过光楔绕光轴的旋转,实现成像在像面上的旋转移动。如图4所示是光楔旋转实现成像位置旋转的原理示意图。然而在会聚光路中引入光楔,除了会产生像面位置变化,还会引入较大的非对称像差,导致成像质量下降。因此该方案也不适用。

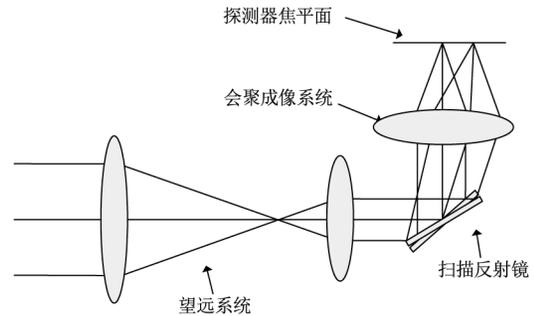


图3 扫描反射镜方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of scan mirror

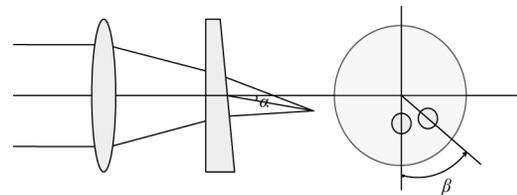


图4 光楔方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optical wedge

第三种扫描方案是旋转折射棱镜,当折射棱镜绕其质心倾斜旋转,则折射棱镜在光路中形成一个倾斜平行平板。当折射棱镜在会聚光路中旋转时,由于折射和旋转共同作用,将使光束焦点产生横向和纵向位移^[5]。为实现在探测器上不同分区的移动,以及减小在像移过程中成像质量的变化,我们改变旋转轴,将折射棱镜即平行平板,以一个固定倾斜角度放置在像面附近的会聚光路中,通过平板绕光轴的旋转,实现成像在焦平面上的旋转移动。

如图5所示是倾斜平板绕光轴旋转实现成像位置旋转的原理示意图。在会聚光路中,平板倾斜也会引入一定像差,但只要控制好角度范围,同时通过焦面位置补偿,可将像差对成像质量的影响控制在

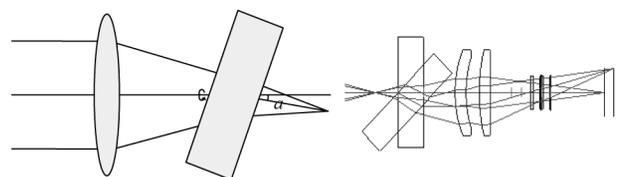


图5 旋转折射棱镜方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of rotating refracting prism

允许范围内。同时由于该方案不会引入像旋,因此本文选择该方案实现成像位置在焦面的移动,通过四个特定的棱镜角度对应探测器四个谱段分区,利用该四角度扫描方案对目标场景进行扫描时,每个扫描角度与探测分区的成像是实时对应的,旋转一周后可实现像面在探测器四个分区的成像,从而实现目标在探测器的不同响应谱段的成像信息获取。

3 光学系统设计

3.1 设计参数及原理

由于本系统采用的是两个制冷型探测器,包括含 4 个谱段分区的中波制冷探测器和 4 个谱段分区的长波制冷型探测器,因此光学系统采用中长波共孔径光学系统,后端中长波分光后分别进入中长波探测器。光学系统设计参数如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

Tab. 1 Parameters of optical system

参数 Item	数值 Value
波长 Spectral band / μm	3 ~ 5, 8 ~ 12
焦距 Focal length /mm	520
F number	F/2.6
Effective aperture/mm	200
温度范围 Temperature range/ $^{\circ}\text{C}$	-40 ~ +60

共光路部分采用卡塞格林反射式共孔径光学系统,中长波分光后,通过棱镜绕轴旋转实现成像位置绕轴旋转,中长波分别在各自四个光谱区域进行切换成像。如图 6 所示是光学系统示意图。光学系统焦距 520 mm,有效口径 200 mm,相对孔径 F 数 2.6。系统采用二次成像方式,为缩小旋转棱镜的尺寸,棱镜放置在中心像面附近。中长波均采用制冷型探测器,满足 100% 冷光阑效率设计^[6]。

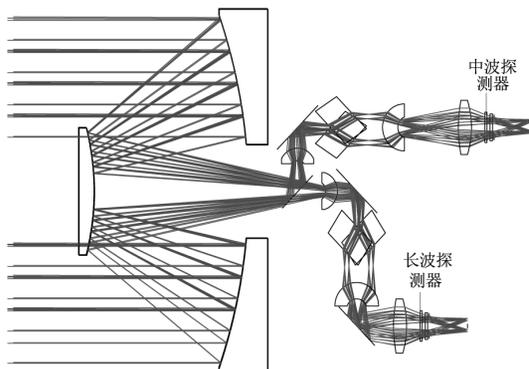


图 6 光学系统示意图

Fig. 6 The layout of the optical system

如图 7 为棱镜在零位和旋转 180° 两种状态时的光路,棱镜与光轴成 45°,棱镜在零位和旋转 180° 时分别对应像面上轴对称的两个区域。根据实际需要,确定了棱镜绕轴旋转角度分别在 38.64°、141.36°、218.64°、321.36° 时,分别对应探测器像面上四个谱段的成像区域。旋转棱镜绕光轴转动,成像位置也绕光轴旋转,成像位置移动的距离与平板厚度有关。在每个谱段成像区域内确定一个 36 × 36 像元的跟踪区域,当疑似目标进入该区域时,转动棱镜一周,可实现目标成像在四个谱段上的信息获取,系统可以根据中长波共八个谱段的目标信息分辨目标更多详细信息、判断是否为虚警等。

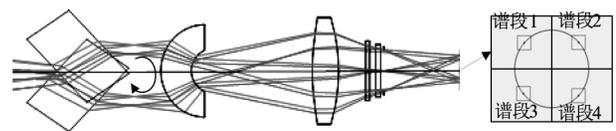


图 7 旋转棱镜示意图

Fig. 7 Schematic diagram of rotating refracting prism

棱镜旋转一周的时间需要与探测器输出一帧多谱段图像的时间 T 进行匹配控制,进行实时对应。如下图所示,控制棱镜在 4 个位置进行切换,在成像位置的停留时间 t_2 应与探测器像元的积分时间匹配,满足以下关系:

$$4(t_1 + t_2 + t_3) = T = \frac{1}{f}$$

$$t_2 \geq t_0$$

其中, t_2 为棱镜在成像位置的停留时间, t_0 为探测器像元的积分时间, t_1 和 t_3 为控制棱镜的伺服系统的起停时间, f 为探测器输出多谱段图像的帧频, T 为输出一帧多谱段图像的时间(如图 8 所示)。

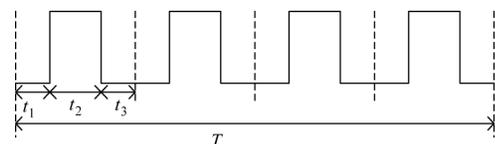


图 8 棱镜转动控制频率示意图

Fig. 8 Schematic diagram of prism rotation control frequency

对于中波制冷探测器来说, F 数 2.6 的典型积分时间为 5 ms 左右,四谱段图像积分时间需要 20 ms,伺服控制转动及起停时间约 10 ms,则系统输出一帧中波四谱段图像的时间约为 30 ms,帧频可达 30 Hz 以上。对于长波制冷探测器, F 数 2.6 的

典型积分时间为 500 μs 左右,四谱段积分时间约 2 ms,伺服控制转动及起停时间约 10 ms,则系统输出一帧长波四谱段图像的时间约为 12 ms,帧频可达 80 Hz 以上。

3.2 设计结果

最终的光学系统设计结果如图 9 所示,图 9(a)为中波光路图,图 9(b)为长波光路图。

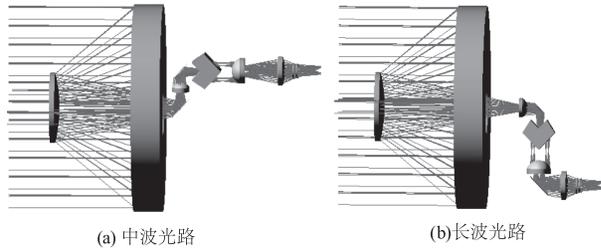


图 9 光学系统图

Fig. 9 The 3D layout of the optical system

目标在多谱段成像区域的光学传递函数如图 10 和图 11 所示,棱镜旋转前和旋转后的中波 MTF、长波 MTF 都满足成像质量要求。

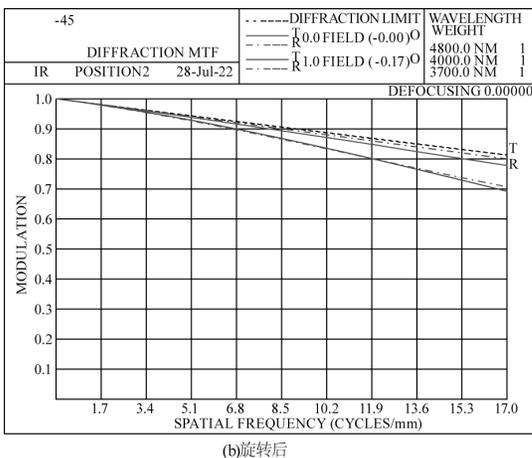
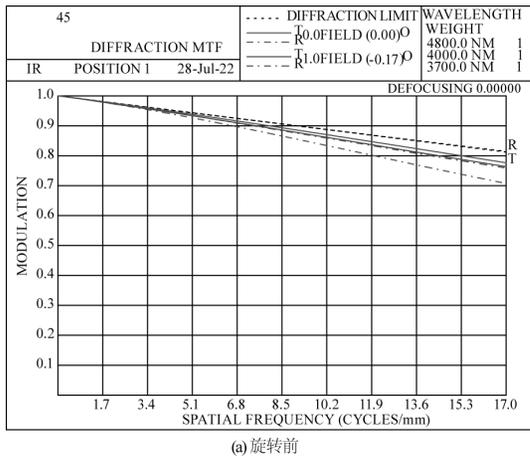


图 10 中波光学系统传递函数曲线

Fig. 10 MTF curves of MW optical system

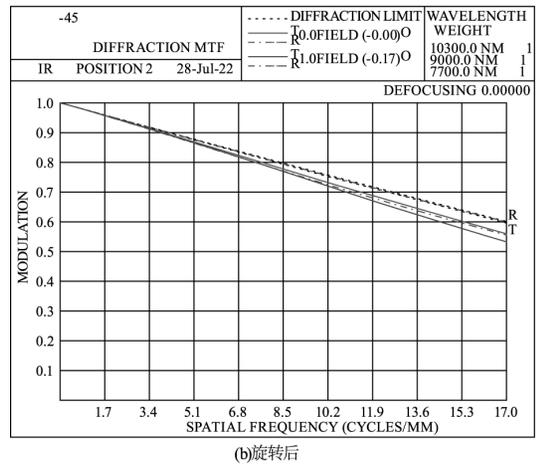
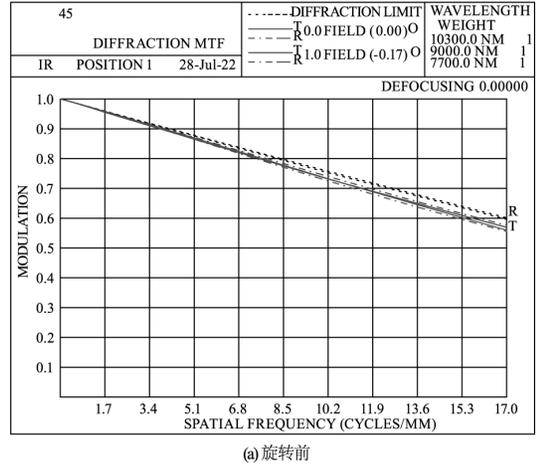


图 11 长波光学系统传递函数曲线

Fig. 11 MTF curves of LW optical system

4 结论

针对红外远程目标多谱段探测识别需求,本文提出了一种基于谱段分区红外探测器的多谱段红外成像光学系统,通过折射棱镜绕轴旋转,实现目标在像面上绕轴像移,从而将同一目标在探测器不同谱段区域进行成像。该多谱段光学系统,焦距 520 mm,有效口径 200 mm,F 数为 2.6,前段光路采用卡式共光路设计,中波、长波分光后通过各自像移组件和会聚光路进入到具有四谱段分区的中、长波红外探测器进行成像。系统工作谱段涵盖中长波红外大气窗口谱段,并包含 4 个中波和 4 个长波共 8 个谱段信息。光学系统结构紧凑,棱镜旋转与探测器成像实时对应,不存在成像延迟和像旋,具有口径大、焦距长、谱段多等特点,满足系统高分辨率、长作用距离、多谱段信息获取等要求,为后续多谱段光学系统设计提供一种新的设计思路。

参考文献:

[1] Fu Qiang. Research on airborne mid-wave/long-wave dual

- color infrared optical systems[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- 付强. 机载中波/长波双色红外光学系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- [2] Zhang Xingde, Li Ronggang, Liu Lin, et al. Research and development of dual-band infrared camera system. *Laser & Infrared*, 2010, 40(8): 801 – 804. (in Chinese)
- 张兴德, 李荣刚, 刘琳, 等. 红外双波段成像系统的研究与发展[J]. *激光与红外*, 2010, 40(8): 801 – 804.
- [3] Meng Lingwei, Dong Haijie, Zhang Yi. Research progress of multispectral long linear infrared detector[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(6): 697 – 702. (in Chinese)
- 孟令伟, 东海杰, 张懿. 多谱段集成长线列红外探测器研究进展[J]. *激光与红外*, 2020, 50(6): 697 – 702.
- [4] Wang Chenggang, Dong Haijie, Liu Zewei, et al. Development of multispectral TDI linear infrared detector for GF-5 satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*. 2018, 39(3): 80 – 84. (in Chinese)
- 王成刚, 东海杰, 刘泽巍, 等. 高分五号卫星多谱段集成 TDI 线列红外探测器[J]. *航天返回与遥感*. 2018, 39(3): 80 – 84.
- [5] 杨应槐. 扫描镜鼓和棱镜对红外成像系统性能的影响[J]. *红外研究*. 1985, 4(6): 446 – 451.
- [6] 彭晴晴, 杜晓宇. 一种多波段红外成像光学系统. 中国: CN202010263888[P]. 2020 – 3.