

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2021.06.022

王璐, 赵建川, 马文家. 折转光管结构设计及检测方法分析 [J]. 机电工程技术, 2021, 50 (06): 83-87.

折转光管结构设计及检测方法分析*

王 璐¹, 赵建川¹, 马文家²

(1. 海军装备部驻沈阳地区军事代表局驻长春地区军事代表室, 长春 130033;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 从折转光管的光学和机械结构两个方面出发, 建立了折转光管的设计思路。首先提出了折转光管常用的5种光学结构设计方案, 并进行了优缺点以及实际工程应用分析; 其次提出了保证折转光管精度所需结构设计的4个方面, 包括材料选择、安装方向的影响、外界干扰因素以及几种光学镜的固定方法, 并针对具体光学结构设计进行了机械方案的设计; 最后详细阐述了几种常用折转光管的精度检测方法以及使用条件, 并对检测方法精度进行了比较。对折转光管从光学原理、结构原理、检测方法都进行了较详细地阐述, 对于折转光管在工程方面的设计具有一定的参考意义。

关键词: 折转光管; 光学设计; 结构设计; 精度检测

中图分类号: TJ760.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-9492(2021)06-0083-05

Analysis of Structural Design and Testing Methods of Turning Light-tube

Wang Lu¹, Zhao Jianchuan¹, Ma Wenjia²

(1. Military Representative Office of Shenyang Marine Equipment Bureau in Changchun, Changchun 130033, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The design ideas of the turning light tube were established from both the optical and mechanical structure of it. Firstly, five optical structure design solutions commonly used for turning light tube were proposed, and their advantages and disadvantages as well as practical engineering applications were analyzed. Secondly, four aspects of structural design were proposed to ensure the accuracy of the turning light tube, including the selection of materials, the influence of installation direction, external interference factors and several optical mirror fixation methods, and mechanical solutions for specific optical structure design schemes was designed. Finally, the accuracy testing methods of several commonly used turning light tube and the conditions of use were elaborated, and the accuracy of the testing methods were compared. The optical principle, structure principle and detection method of the folding light tube were described in detail, which had certain reference significance for the design of the folding light tube in engineering.

Key words: turning light-tube; optical design; structural design; accuracy testing

0 引言

折转光管作为一种光线折转装置, 可以将光线沿光管方向平移一段距离而不改变光的传播方向, 也即保持入射光与出射光平行。随着其在光学系统内越来越广泛的应用, 现已经成为一种典型的光学设备。因此, 分析与掌握折转光管的光学与机械结构设计方案及标校特性, 在光学系统设计中的重要性不言而喻。

国内外对折转光管结构和精度等方面已经做了大量研究, 例如折转光管在光电瞄准系统中的应用^[1-3]; 折转光管安装误差对于精度的影响^[4]; 折转光管的典型光学结构设计与机械结构设计^[5]; 外界环境对折转光管精度的影响^[6-8]; 折转光管的各种检测与标校方法等^[9-10]。但对于折转光管具体光学结构设计及其机械结构设计在实际环境中如何选择并没有具体阐述。

本文从实际应用出发, 首先介绍了几种常用的折转光管光学设计方案, 并对每种方案进行了具体分析。其

次从仪器精度设计角度出发, 在折转光管工作原理、形状特性、外部干扰特性3个角度对折转光管的通用结构设计进行了讨论, 并根据前述几种光学设计方案为例, 具体分析了每种方案的安装固定方法。通常在折转光管装调过程中采用检测误差与标校同时进行, 以保证最终折转光管的误差达到预设精度范围内, 因此本文最终阐述了适用于不同标校情况下的几种常用折转光管误差检验方法, 并分析了各种方法的优缺点。

1 折转光管的光学结构设计

折转光管的光学结构一般采用反射镜或一组反射镜组作为内部光学系统, 其5种常用结构如图1所示。一般折转光管长度在300 mm以下时, 可以采用如图1(a)所示的两端45°反射面的整体玻璃反射结构。这种结构的主要优点是省略了后续机械结构装配时的误差检测与调整, 误差完全由反射镜两反射面的精度决定, 但相对成本较高。图1(b)所示为由两块平面反射镜组成的反

射式光学系统,其特点在于制造成本低、机械固定简单、装调方便,但抵抗震动能力较差。图1(c)~(d)所示为由一组五棱镜或直角棱镜作为反射镜组构成的折转光管光学系统,其相对于图1(b)的优点在于对于五棱镜或直角棱镜来说,能够保证入射光与出射光完全垂直,因此具有抗环境震动的能力,适用于在具有较大震动环境的场合。缺点在于光线的多次折射会对光能量造成较大损失,同时在光路中会混入因为平面的反射光而产生的不易消除的多重假象。因此在使用时需要注意通过折转光管减弱后的光能量是否满足整套光学系统对于光能量强弱的要求;另外还需注意对于光学系统中假象的识别以及是否采取消除假象的措施。如图1(e)所示结构为使用直角棱镜斜面外反射作为反射镜,其理论上与图1(b)相同,但由于其直角棱镜的结构特点,使得固定更加方便。通过对5种情况分析可知,通常情况下,折转光管采用以图1(b)结构设计为主的光学设计,其相对成本较低、结构简单、光能损失少、装调方便、灵敏度高。

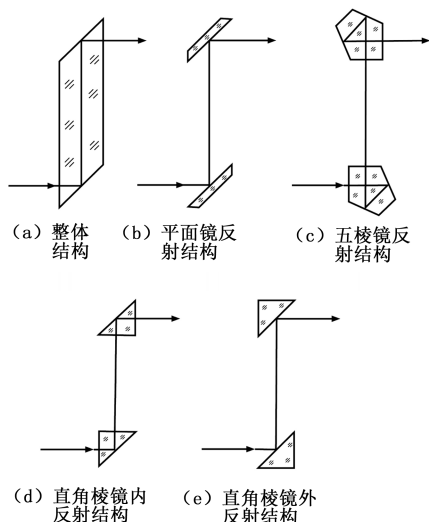


图1 光学结构
Fig.1 Optical structure

2 折转光管的机械结构设计

2.1 材料选择

K9玻璃作为一种常用的光学玻璃,其热膨胀系数为 $7.1 \times 10^{-6}/K$,具有化学性能稳定、优良的机械性能与抗划伤性以及非常低的气泡和杂质等优点被广泛使用。对于在环境温度存在变化下工作的光学元件,通常要考虑与其直接接触的结构件的热膨胀系数不能相差过大,否则在温度变化较大情况下会造成结构件对光学件的挤压,导致光学件变形,进而影响整体精度的变化。因此在光学材料使用K9玻璃时,一般采用铸铁或钢作为结构件,因为其热膨胀系数越 $11.5 \times 10^{-6}/K$,与K9热膨胀系数较接近,同时强度与研磨性能也相对铝合金要好,缺

点在于最终质量会相对较重,可以通过合理的结构轻量化设计来减轻重量。

2.2 折转光管安装方向

对于误差精度要求较高的光学系统中,折转光管由于安装摆放方式不同,在重力的作用下会产生形变,这种形变也会影响折转光管的传递精度。因此在进行结构设计时需要考虑折转光管使用时的摆放方式。通常折转光管在光路传递中的摆放方式为水平摆放或竖直摆放;若为水平摆放,在折转光管较长时,重力作用下折转光管的中间部位会下沉进而使两边反射镜产生弯曲,进而影响折转光管的整体传递精度。因此通常在光管外部增设加强筋,同时在折转光管头尾两部分位置设置固定支撑柱,以保证折转光管不会在重力作用下产生导致折转光管精度发生变化的形变。若为竖直摆放,同样应该设计至少两处有向上承托作用的支撑柱,且两处支撑柱同样应保证与光管的连接稳定牢固,在竖直方向上安装时可减小光管在沿折转方向在重力影响下的微小变形,以保证折转光管的结构稳定。图2所示为某水平放置光管的支腿设计。

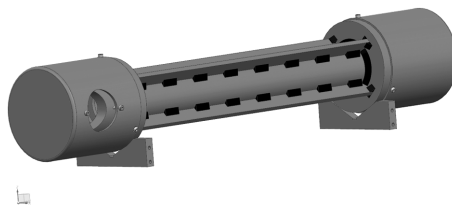


图2 水平放置光管支腿设计

Fig.2 Horizontal placement of light tube leg design

2.3 外部干扰特性影响

典型外部干扰特性因素包括温度、震动、灰尘等。为了消除外界影响因素,通常也要在结构设计上加以改进。

若折转光管所处工作环境清洁度较差,如存在灰尘、沙土等异物,通常考虑在折转光管的出光口和入光口处增加保护罩结构,折转光管工作时打开保护罩,非工作状态则关闭使其内部空间保持相对独立,避免光学系统暴露在恶劣环境中。若折转光管需要保持长时间工作状态或工作时无法避免折转光管表面沾染灰尘等杂物,则需要进一步地在出光口及入光口处增加保护玻璃,以使得折转光管内部保持相对独立环境。但是在折转光管光学系统中加入保护玻璃后,会存在表面反射现象产生的表面像,进而影响光学系统。为了减弱表面像的影响,对于保护玻璃通常会镀增透膜,同时通常会将保护玻璃处结构设计为有一小楔形角度,使得保护玻璃安装时不与光路方向完全垂直,从而避免表面像与光线平行干扰整个光学系统。图3所示为一种简易保护盖的设计方法。

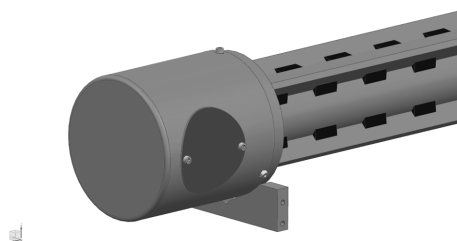


图3 一种保护盖设计方法

Fig.3 A protective cover design

若折转光管所处工作环境存在温度突变现象, 由于折转光管中各零部件的材料不同, 其热膨胀系数一般也各不相同, 会造成折转光管的精度产生波动。为了减弱由于温度变化造成的精度变化, 可以将折转光管结构分为内外双层设计。内层作为骨架, 连接折转光管的光学元件同时与外层相连, 而外层则附加出光入光口保护罩与支撑柱。在内层与外层之间加入隔热材料, 减缓由于外界环境温度突变导致折转光管内层温度突变, 从而造成其精度变化的现象。图4所示为一种采用内隔热层的典型隔热方法。

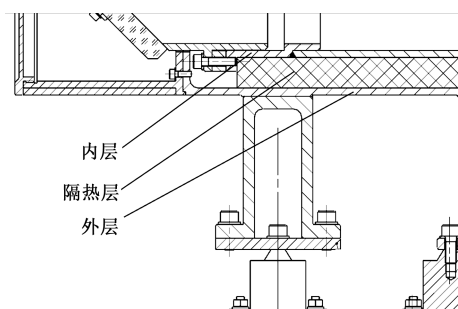


图4 典型隔热方法

Fig.4 Typical insulation methods

外界瞬时的巨大震动同样会对折转光管的精度产生巨大影响, 甚至会对整体光机结构造成永久性损害。因此结构上必须考虑设置减震装置, 以保证折转光管的精度以及对设备的保护。图5所示为一种采用减震器设计的典型减震方法。

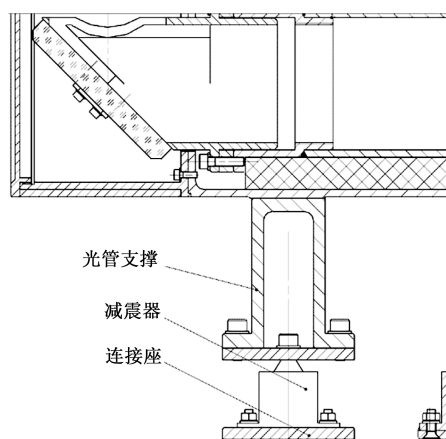


图5 典型减震方法

Fig.5 Typical vibration damping methods

2.4 光学元件安装固定

考虑折转光管中光学元件的安装, 通常需要考虑以下几点要求:

- (1) 对于光学元件安装接触位置应力较小;
- (2) 满足机构震动过程中的使用精度要求;
- (3) 装卡具备机械调整机构, 可以对光学系统进行微调。

以上为共性的设计思路, 但涉及到不同光学结构, 其固定方式同样有所差异, 具体方法包括类刚体约束方法、微过机构约束、胶接安装方法等。

如图1(a)所示, 使用整块玻璃作为折转光管, 其精度影响主要为两反射面本身的角度误差, 同时反射面为两斜面的内反射膜, 本身不暴露在外界环境, 因此对于该方案设计可以不考虑保护玻璃及机械调整机构, 仅需考虑对玻璃整体进行包裹, 以起到对其保护作用同时加入保护罩结构即可, 设计时可以在保证强度的基础上使用仿真计算等方式进行轻量化设计。

对于图1(b), 通常结构为将折转光管在光路转折方向连接为一个整体的筒型结构, 在其两端固定平面镜。固定时采用三点或四角压片的方法将反射镜施加较小预紧力固定在底座上后, 使用热膨胀系数与反射镜较接近, 同时变形系数较小的胶水(如706)在压块与反射镜之间进行填充黏接。使用胶水填充黏接的好处在于保证了反射镜固定的同时, 减小了压块对反射镜预紧力产生的变形, 这种变形会影响反射镜相面的成像。图6所示为一种典型固定方法。

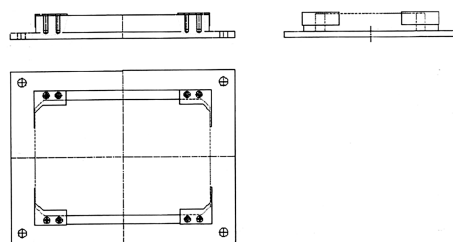


图6 典型四角固定方法

Fig.6 Typical fixing method

对于光学结构图1(c)中五棱镜的固定方法较复杂, 因为五棱镜本身形状体积相对较大, 同时为保证光管的精度, 还需要设置其具有微量调节功能。五棱镜固定方法如图7所示。由于五棱镜入射面和反射面均需要考虑不被遮挡, 因此可以先在五棱镜顶面使用悬挂弹簧压片, 先将五棱镜以三点形式压紧在底座基面上, 约束其6个自由度中的1个位移与2个旋转。在五棱镜2个透光面放置3个定位销, 其他3个非透光面方向设置用跨式弹簧片, 使用弹簧片将五棱镜压靠固定在定位销上即可约束其他3个自由度。固定时五棱镜与结构件之间可加入衬垫, 以保证五棱镜与结构件之间不是以点接触方式压靠。

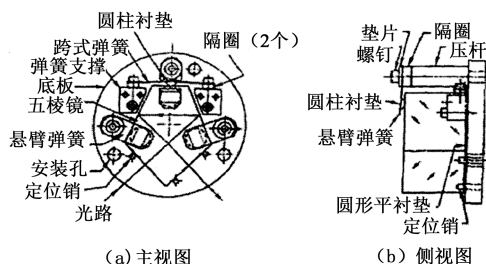


图7 五棱镜固定方法

Fig.7 Pentaprism fixation method

对于结构图1(d)~(e)中直角棱镜的固定,通常需要考虑到棱镜的大小、位置、调节方法的因素以及固定件对于棱镜的压力、大小、位置等因素。因此,通常棱镜的安装主要使用机械压紧方法进行固定,如图8所示为使用机械压紧的半固定方法进行固定的示意图。利用一个粗磨过直角棱镜顶面作为基准面,利用具有弹性的衬垫和螺钉在棱镜三点施加预紧力。

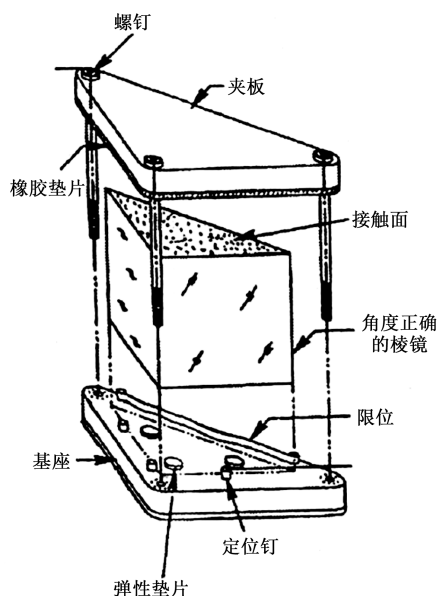


图8 半固定方法的固定

Fig.8 Schematic diagram of semi-fixed method of fixation

另外在棱镜尺寸较小且使用环境基本无振动情况下,还可以考虑使用光学黏接胶将棱镜直接黏接在表面处理过的调整座基面上。在对折转光管进行调整时,仅需对调整座进行调整。

3 典型误差检测方法

折转光管的光学与机械结构设计都结束后,需要考虑折转光管安装后的调整过程。通常折转光管的误差检测与调整同时进行。对于折转光管的误差检测,最重要的步骤为准直光路的构建,通常根据折转光管尺寸、操作环境、检测设备以及所需检测精度不同,构建不同的准直光路及测量方法。

3.1 平面镜检测法

平面镜检测法如图9所示。在折转光管尺寸不是很

长的情况下,可使用直径大于折转光管长度的平面镜作为测量基准,先将自准直仪与平面镜准直后,在两者之间摆放折转光管并调整到适当位置,自准直仪发射的准直光通过折转光管折射到平面镜后又接收到返回像,即可通过返回像的误差测得折转光管的误差。这种方法误差较小、但受平面镜的大小及折转光管长度限制。

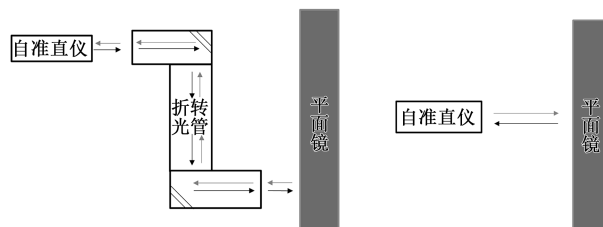


图9 平面镜检测法

Fig.9 Plane mirror inspection method

3.2 水银盘检测法

水银盘检测法如图10所示。在地基较稳定且外界震动较小情况下,可以使用水银盘代替方法图1(a)中的平面镜。先将自准直仪竖直放置对准放置在地面呈稳定状态的水银盘并准直后,将折转光管对准自准直仪口径,并移动水银盘至折转光管另一端,待水银盘稳定后自准直仪发射的准直光通过折转光管折射到水银盘后又接收到返回像,即可通过返回像的误差测得折转光管的误差。这种方法的优点在于不受折转光管长度的限制,缺点在于水银盘返回像较模糊且水银有毒,使用时应注意安全。

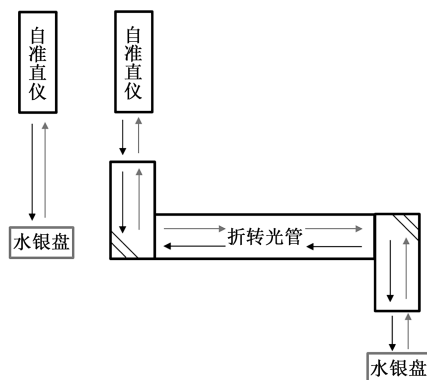


图10 水银盘检测法

Fig.10 Mercury plate test method

3.3 五棱镜检测法

五棱镜检测法如图11所示。若平面镜尺寸较小,可以通过2个五棱镜代替折转光管的方法进行误差测量。使用2个五棱镜建立从自准直仪到平面镜的准直光路,将自准直仪与平面镜准直。准直后用折转光管替代五棱镜连接从自准直仪到平面镜的光路,通过此时的返回像误差可以计算出折转光管的折转误差。这种方法的优点同样不受折转光管长度的限制,但缺点在于五棱镜本身存在制造误差与放置姿态引起的误差,因此在最终的误差计算时需考虑。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

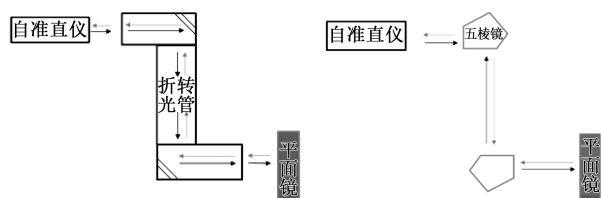


图 11 五棱镜检测法

Fig.11 Pentaprism detection method

4 结束语

本文从实际工程应用角度出发,首先阐述了折转光管常用的几种光学结构设计方案,并对每种方案进行了精度、优缺点分析以及针对实际使用情况的具体选择。其次从仪器精度理论出发,阐述了保证折转光管精度所需结构设计的几个方面,包括材料选择、安装方向的影响、外界干扰因素以及几种光学镜的固定方法,并对前述几种光学结构设计方案的具体分析与设计。最后详细阐述了几种常用折转光管的精度检测方法以及使用条件,并对检测方法精度进行了比较。本文对于折转光管在工程方面的设计具有一定的参考意义。

参考文献:

[1] 张强.方位瞄准系统中折转光管的应用研究[J].应用光学,

(上接第42页)

(4) 将完全固化模型补缺处在砂纸上打磨抛光,使其与周围表面融为一体。

将图8打印出的模型经过以上工艺进行修复,修复后如图9所示,由图可以观察出此前的缺陷消失,并且修复后变得很光滑,与周围表面融为一体。

3.3 存在的其他问题

(1) 组装图学模型尺寸公差。打印出的模型要进行组装,而光固化3D打印机受限于目前现有光固化树脂的本身性能(热固性)以及打印机对材料粘度的要求(低粘度意味着的相对高收缩),使得打印出的模型会出现尺寸收缩,这就要求建模时注意工艺匹配问题。

(2) 打印速度。打印过程中的快速提拉吸附力,树脂回流填充,树脂散热等工艺问题也是制约进一步提高打印速度的重要因素。随着3D打印技术普及,对可铸造树脂材料深入研究,树脂性能不断提高,打印速度也会随之增加,打印模型的时间会大大缩短,温度会容易控制,打印出模型的缺陷也会减少。

4 结束语

(1) 基于磁学原理的网格组合式图学模型,模块化设计特点,利用磁学原理可实现灵活拆装,自由组合,携带方便;由于具有可拆分特点,因此,内外结构全方位可观察,立体表面的截交线、相贯线的形成过程也可通过模型组合进行观察解析;各种基本单元体采用薄壁中空结构,采用3D打印技术制作,实现轻量化要求。

2008,29(4):512-517.

- [2] 王旻,余毅,王春霞.折转光管在光电瞄准系统中的应用[J].中国光学,2012,5(6):618-624.
- [3] 王家琪.光学仪器总体设计[R].中科院长春光学精密机械与物理研究所,1998.
- [4] 张俊杰,李政阳.直角棱镜用作自准直反光镜的光学特性[J].宇航计测技术,2009,29(4):1-3.
- [5] 周海宪,程云芳.光机系统设计[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [6] 孙振江.五棱镜的测量及精度分析[J].宇航计测技术,1985(4):21-24.
- [7] 李永刚,商秋芳,赵功伟,等.折转光管误差检测方法的研究[J].宇航计测技术,2012,32(4):1-5.
- [8] 王家骥,金光,颜昌翔.机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J].光学精密工程,2005,13(2):105-116.
- [9] 张晖,渠婉婉,何佳融,等.折转光管装校方法研究与误差分析[J].长春理工大学学报(自然科学版),2014,37(2):6-9.
- [10] 王之江.光学设计手册[M].北京:机械工业出版社,1987.

第一作者简介:王 璐(1980-),男,大学本科,工程师,研究领域为航空装备、航空机载设备、光学装备。

(编辑:刘诗寒)

(2) 对于光固化3D打印技术在制作图学模型中遇到的问题,通过工艺试验不断探究解决办法,如对缺陷少的模型和模型表面支撑留下凹凸点问题进行修复,提出了自己的方法,有效地解决了打印出模型的利用率,节约了材料,改善了3D打印技术在制作图学模型中存在的问题。

参考文献:

- [1] C W Hull.Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography[P].US Patent 4575330,1986.
- [2] C W Hull.Method and apparatus for production of high resolution three-dimensional objects by stereolithography[P].US Patent 5184307,1993.
- [3] Wohlers Associates.Wohlers Report 2020[Z].2020.
- [4] 丰洪微,范哲超.光固化3D打印成型树脂改性与性能研究[J].铸造技术,2018(1):166-169.
- [5] 李振,张云波,张鑫鑫.光敏树脂和光固化3D打印技术的发展及应用[J].理化检验-物理分册,2016,52(10):686-689.
- [6] 杨铎,刘菲菲.基于单目视觉的叶轮零件三维重构方法研究[J].机电工程,2020,37(1):73-77.
- [7] 施健,张慧,范育帅.光固化3D打印技术在首饰蜡模制作中的应用[J].机械设计与研究,2020,36(1):158-160.

第一作者简介:冯志徽(1996-),男,安徽六安人,硕士研究生,研究领域为新能源机械与装备。

※通讯作者简介:黄伟莉(1968-),女,江西南昌人,硕士,副教授,研究领域为机械设计,已发表论文30篇。

(编辑:王智圣)