

基于 DIALux 的公路隧道典型布灯参数研究

李尚辉¹, 张成江²

(1.福州外语外贸学院 理工学院, 福建 福州 350202;

2.福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350004)

摘要: 探究灯具距高比对隧道照明质量的影响, 从而为隧道布灯的优化提供理论依据。利用 DIALux 分别在距高比为 1.5、2.0、2.5 下对 14 种不同的安装角度进行照明模拟试验, 每种距高比模拟 5 组参数, 输出各工况的照明质量参数。建立不同距高比下的路面平均照度、路面照度总均匀度、路面中线照度纵向均匀度随安装角度的关系曲线图。结果表明: 同等条件下, 三大照明质量指标均随距高比的减小而增大; 无论距高比为多少, 随着安装角度的增加, 三大照明质量指标先期变化相对缓慢, 随后急剧减小, 但是开始骤减时对应的安装角度存在显著差异; 实际工程中, 在满足规范指标的前提下, 为了节省照明成本, 应尽量减小灯具用量, 选择最优的组合方式。

关键词: 距高比; 路面平均照度; 照度总均匀度; 路面中线照度纵向均匀度

中图分类号: U491.53

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)06-0580-06

Research on typical lamp distribution parameters of highway tunnel based on DIALux

LI Shanghui¹, ZHANG Chengjiang²

(1.School of Technology, Fuzhou University of International Studies and Trade, Fuzhou 350202, China;

2.Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd, Fuzhou 350004, China)

Abstract: In order to study the influence of the spacing-to-mounting-height ratio of the luminaire on the tunnel lighting quality, the research was conducted in order to provide a theoretical basis for the optimization of the tunnel lamp distribution. DIALux was used to carry out lighting simulation tests at 14 different installation angles with the spacing-to-mounting-height ratio of 1.5, 2.0 and 2.5 respectively, and each of them includes five sets of parameters, outputting lighting quality parameters of each working condition. Graphs of the relationship between the average road surface illuminance, the overall uniformity of road surface illuminance and the longitudinal uniformity of road surface illuminance with the installation angle were established under different spacing-to-mounting-height ratios. Results show that under the same conditions, the three lighting quality indicators increase with the decrease of the spacing-to-mounting-height ratio; no matter what the spacing-to-mounting-height ratio is, with the increase of the installation angle, the three major lighting quality indicators firstly change relatively slowly and then decreases sharply, but there is a significant difference in the corresponding installation angle when starting to decrease sharply. In practice, under the premise of meeting the standard index, the number of lamps should be reduced as much as possible in order to save the lighting cost, and the optimal combination mode should be selected.

Keywords: spacing-to-mounting-height ratio; average road surface illuminance; overall uniformity of illuminance; longitudinal uniformity of road surface illuminance

收稿日期: 2019-08-19

基金项目: 福建省教育厅项目(JT180681)

第一作者简介: 李尚辉(1989-), 男, 湖北黄石人, 讲师, 博士研究生, 研究方向: 道路交通工程。

近年来,道路隧道中的“节能与安全”这对矛盾体日益受到业界人士的关注,既有隧道的照明设计往往只考虑照明指标是否满足规范要求,而忽视了灯具的最大光效,导致照明成本居高不下。据统计,我国每年公路隧道耗电量约350亿度,电费超过300亿元^[1-3],如此高额的照明成本,不符合我国贯彻落实节能减排的发展理念。在满足照明质量的要求上合理布置隧道照明灯具是降低能源消耗的有效手段,目前我国隧道照明设计规范规定了4种灯具布置形式,分别是中线、中线偏侧、两侧交错和两侧对称布置灯具^[4],但是未对相关的参数做出具体要求。

在隧道灯具参数的优化设计研究上,Pachamanov A等^[5]利用线形优化方法提高了路面光分布均匀性,并使照明系统更节能。李然等^[6]利用DIALux模拟隧道中间段灯具安装高度和安装角度的多种组合,得到灯具的最佳安装位置,对提高高速公路隧道节能水平具有一定借鉴意义。黄艳国等^[7]以照明灯具总功率最小为评价标准,建立隧道中间段灯具中线偏侧布灯方式的优化模型,利用遗传蚁群算法求解该模型,并对灯距横向角度、纵向角度、中线偏侧值、灯具间距和高度等相关参数给出建议值。范士娟等^[8]利用DIALux分别模拟了隧道对称布灯、交错布灯和中间布灯下LED灯的路面照明质量,结果表明,中间布灯的照明效果最好,可以使用较小功率的灯具达到节能的目的。Parise G等^[9]考虑交通量、气候条件、路面干湿类型及停车距离等因素设计了一种照明控制系统,该系统根据外界条件输入信号来控制隧道内光通量,可以避免过度亮度并降低成本,但是并未考虑照明灯具的布置参数。吴绍明等^[10]对三车道公路隧道的灯具布置形式、照射角进行模拟,根据路面照度、亮度、亮度均匀度评价布灯效果,认为交错布灯、发光轴线与竖直面夹角为15°时照明效果最好。

通过相关文献的调研,发现当前对灯具的布设主要涉及到布置形式、高度、安装角度等,这些因素的考虑都是独立进行的。然而,照明指标尤其是照度均匀性这一指标很大程度上取决于距高比。距高比是室内照明灯具的一个基础性光度学参数,是指相邻灯具间的最大安装距离与灯具的安装高度之比^[11],在室内照明设计中,GB/T 29294—2012《LED筒灯性能要求》对该参数做了

相关的规定,但是距高比对隧道照明质量的影响缺乏理论研究。因此,本研究以道其龙隧道为对象,利用DIALux模拟该隧道中间段对称布灯下不同灯距距高比、安装角度对照明质量的影响,揭示隧道照明指标随典型布灯参数的变化规律,以期为隧道照明节能提供新视野。

1 隧道照明模拟概述

本研究以包茂高速桂林阳朔段道其龙隧道为模拟对象,该隧道为单向行驶双车道分离式隧道,其中隧道左行线长510 m(PK81+820~PK82+330),右行线长532 m(QK81+820~QK82+352)。隧道采用单心圆曲墙式断面,半径 $R=5.60$ m,设计速度为100 km/h,隧道建筑限界净宽为10.50 m($0.75+1.0+2\times3.75+0.5+0.75=10.50$ m),净高为5 m。隧道内路面采用水泥混凝土路面,洞内进行装饰设计,在墙脚部用瓷砖贴面,其余部分喷涂隧道专用防火涂料。隧道灯具布设形式为两侧对称布置,采用70 W的LED光源,具体断面如图1所示。由于道其龙隧道断面尺寸和材质能够代表国内大多数隧道,而隧道中间段的照明受外界自然光干扰小,因此以该隧道中间段为对象开展研究代表性较强。

路面照明质量可用路面平均照度、路面照度总均匀度、路面中线照度纵向均匀度来评定,本研究以灯具距高比、灯具安装角度为典型参数,利用DIALux模拟多种不同距高比和角度的组合设计,分析照明数据来评定照明质量,在设置距高比和安装角度时,充分考虑灯具在隧道中可行的安装参数。基于此,模拟道其龙隧道选定的距高比分别为1.5、2.0、2.5,安装角度分别为10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°、50°、55°、60°、65°、70°、75°,通过距高比和安装角度的组合设计来分析该类关键参数对照明质量的影响。

2 道路长隧道照明环境仿真模拟

在DIALux中选择街道设计案,建立道其龙隧道路面的横断面模型,在外部场景中插入街道,生成户外模型加街道模型,在“对象”标签上通过一个立方体和多个水平圆柱体元件添加地面组件,利用布尔运算切出横断面如图1所示的隧道模型。由于隧道内光线会通过路面及内壁产生各种不规则的漫反射,路面最终的照度是照明灯具

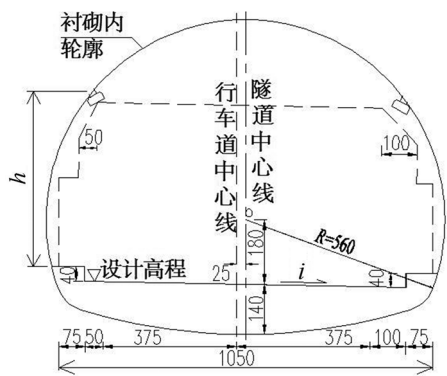


图 1 道其龙隧道断面图(单位:厘米)
Fig.1 Daoqilong tunnel section(unit: cm)

的直射光和隧道内壁反射光共同产生的,因此需要对建好的隧道路面、侧壁、拱顶表面赋予 DIALux 中已有的材质。设置路面反射率为 30%,墙脚瓷砖贴面处反射率为 75%,拱顶反射率为 20%,从而建立尽可能接近真实隧道的空间场景^[4,8,12-13]。为了提高隧道中间段仿真数据的真实性,本研究道路计算面长取 100 m,宽 7 m,并位于模型隧道中间处,由于中间段照明环境属于中间视觉状态,故选用 70 W 的 LED 灯具,导入 DIALux 软件并使之呈两侧对称布置形式。

分别在距高比为 1.5、2.0、2.5 下对 10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°、50°、55°、60°、65°、70°、75°这 14 种不同的安装角度进行照明模拟试验,其中距高比为 1.5 工况下共计模拟 6/4(纵向间距/安装高度,单位:m。下同)、6.75/4.5、7.5/5、8.25/5.5、9/6 这 5 组参数;距高比为 2.0 工况下分别模拟 8/4、9/4.5、10/5、11/5.5、12/6 这 5 组参数;距高比为 2.5 工况下分别模拟 10/4、11.25/4.5、12.5/5、13.75/5.5、15/6 这 5 组参数。软件将计算出共计 $14 \times 5 \times 3 = 210$ 种工况下的路面平均照度、路面照度总均匀度、路面中线照度纵向均匀度,不同工况对应的参数不尽相同,产生的路面照明指标也将不尽相同。通过对 210 种工况仿真模拟,输出路面平均照度、路面照度总均匀度、路面中线照度纵向均匀度,并分别建立其与安装角度的曲线关系图。

3 结果分析

3.1 路面平均照度

路面平均照度是在路面上预先设定的点上测

得的各点照度平均值,该指标是道路照明设计的关键参数,直接影响着驾驶员的可视度。本文选取的道路计算面长度 100 m,宽度 7 m,覆盖了足够数量的点,不同距高比下的路面平均照度(E_{av})随灯具安装角度(α)的曲线图如图 2 所示。

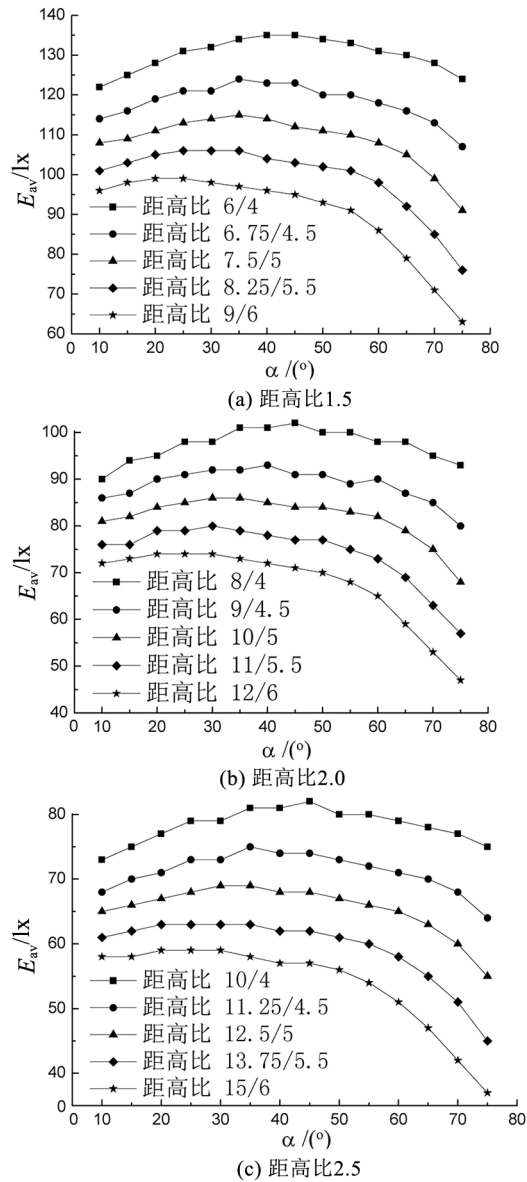


图 2 不同距高比下路面平均照度随灯具安装角度的曲线图

Fig.2 Graphs of average road surface illuminance with installation angle of lamps under different spacing-to-mounting-height ratios

从图 2 可见,同一安装角度下,距高比越小,路面平均照度越大,但前提是距高比较小者的纵向间距小于距高比较大者的纵向间距,如距高比

为 9/6 时的平均照度整体上小于距高比为 8/4 时的平均照度。通过该规律,说明路面平均照度与灯具纵向间距负相关、与灯具安装高度正相关。间距越小,安装的灯具越多,输出的光通量也就越大;高度越大,虽然距离路面远,赋予路面的光通量越小,但是覆盖面将会变大,各测点被分配的光通量反而增多,这说明在同等间距下,灯具安装高度并非越小越好,而是要保证一个适宜的高度,以确保光通量损失不致过大,同时也要保证一定的分配度。

比较图 2 的 15 条曲线可知,路面平均照度随灯具安装角度的增大均呈现出先增大后减小的变化规律,且在 $35^{\circ}\sim40^{\circ}$ 时平均照度达到最大值,但是平均照度的变化速率存在显著差异,当安装角度小于 60° 时,曲线较为平缓,而当安装角度大于 60° 时,平均照度降低得愈加显著。此外,对于同一距高比,5 条曲线从上往下平均照度达到峰值时对应的安装角度越来越小,安装高度越小时,平均照度对大角度的灯具偏移角越不敏感,随着高度的增加,当安装角度达到 60° 时,路面平均照度急剧减小,这与参考文献 6 所得结果是一致的。

3.2 路面照度总均匀度

保证路面照度均匀度是为了给机动车驾驶员提供良好的视功能和视舒性,若均匀度不佳,驾驶员在行进过程中会经历明暗变化带来的斑马效应和闪烁效应,使视力工作发生困难而导致视觉疲劳,因此该指标亦是路面照明质量的关键参数。照度均匀度包括路面照度总均匀度 (E_{ou}) 和路面中线照度纵向均匀度 (E_{lu})。

路面照度总均匀度是道路计算面上最小照度与平均照度的比值,通过图 3 可知,同一安装角度下,路面照度总均匀度与距高比负相关,距高比越小,意味着纵向间距小而安装高度大,则光照分布越均匀,因此均匀度高。纵观图 3 中的 15 条曲线,随着安装角度的增大,照度总均匀度大体上呈现出先缓慢增大后急剧减小的变化规律,通常在 $40^{\circ}\sim50^{\circ}$ 时达到峰值。但是对于同一距高比,达到峰值时对应的角度略有差异,主要受到灯具纵向间距和安装高度的影响,纵向间距和安装高度越小,照度总均匀度达到峰值时对应的角度就越大,反之则越小。此外,当角度增大到某一数值时,照度总均匀度骤然下降,骤降时对应的安装角度随灯具纵向间距和高度的增大而减小,例如距

高比为 6/4 时照度总均匀度骤降时安装角度为 70° ,而距高比为 9/6 时则为 50° 。

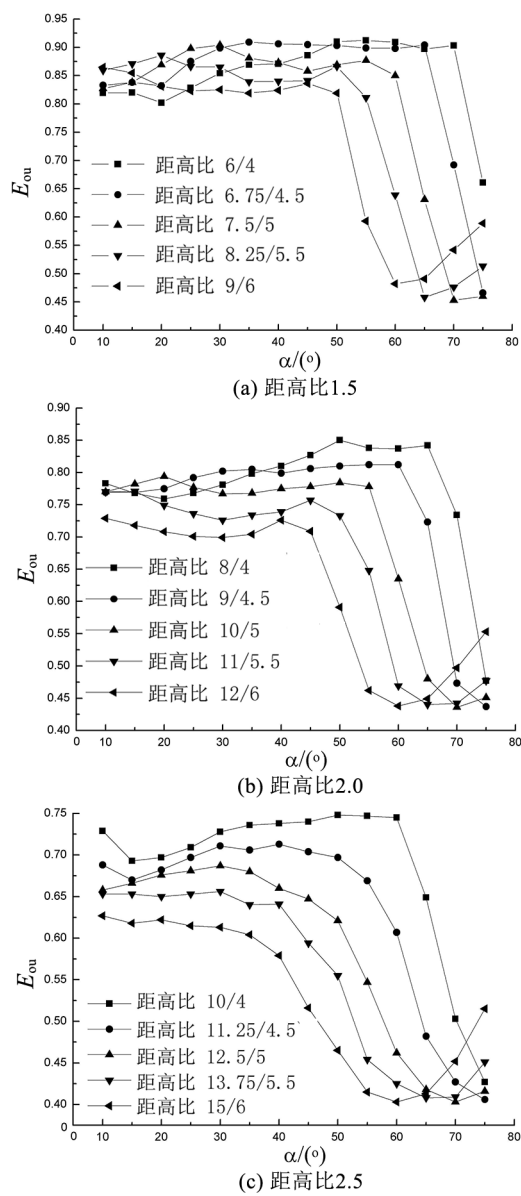


图 3 不同距高比下路面照度总均匀度随灯具安装角度的曲线图

Fig.3 Graphs of overall uniformity of illuminance with installation angle of lamps under different spacing-to-mounting-height ratios

距高比相同时,不同的安装间距和高度对照度总均匀度影响较大,当距高比为 1.5 且灯具安装角度小于 45° 时,照度总均匀度随安装间距和高度的增大先增大后减小,但是当灯具安装角度大于 45° 时,照度总均匀度随安装间距和高度的增大而减小;而当距高比为 2.0 时,临界角变为

35°;距高比为 2.5 时,照度总均匀度随安装间距和高度的增大而减小。说明当距高比和安装角度较小时,照度总均匀度对灯具安装高度更为敏感,而随着距高比和安装角度的增大,照度总均匀度趋于对灯具纵向安装间距更为敏感。

3.3 路面中线照度纵向均匀度

路面中线照度纵向均匀度是路面中线上的最小照度与最大照度的比值,对比图 4 中各条曲线可得,对于同一安装角度,图 4(a)显示的路面中线照度纵向均匀度大于图 4(b),图 4(b)显示的路面中线照度纵向均匀度大于图 4(c),说明同等条件下,路面中线照度纵向均匀度与距高比负相关,距高比越小,意味着纵向间距小而安装高度大,则光照分布越均匀,因此均匀度高。纵观图 4 中的 15 条曲线,随着安装角度的增大,路面中线照度纵向均匀度具有先增大后减小的变化规律,且在 45°~50°达到峰值,而安装高度为 6 m 的灯具不具备该规律,而是随角度增大呈单调递减的变化规律。此外,当角度增大到某一数值时,路面中线照度纵向均匀度骤然下降,骤降时对应的安装角度随灯具纵向间距和高度的增大而减小,例如距高比为 6/4 骤降时对应的安装角度为 70°,而距高比为 9/6 时则为 50°。

4 结论

1)路面平均照度与灯具纵向间距负相关、与灯具安装高度正相关,在一定范围内,该指标随着距高比的减小而增大,因此,小距高比的灯具布设有利于提高路面平均照度。路面平均照度随灯具安装角度的增大均呈现出先增大后减小的变化规律,且在 35°~40°时平均照度达到最大值。

2)一定范围内,路面照度总均匀度与距高比负相关。而随着安装角度的增大,照度总均匀度大体上呈现出先缓慢增大后急剧减小的变化规律,通常在 40°~50°时达到峰值,开始急剧减小时对应的临界角却不尽相同,若灯具纵向间距和高度越大,则该角度越小。

参考文献:

- [1] 史玲娜,涂耘,王小军. 新旧规范对比下的隧道照明节能设计研究[J]. 照明工程学报, 2015, 26(1): 50-54.
- [2] 沙欣. LED 光源在黄延高速公路隧道照明中的节能技术研究[J]. 公路工程, 2018, 43(6): 299-303.
- [3] 王少飞,涂耘,邓欣,等. 论公路隧道照明节能[J]. 照明工程学报, 2012, 23(3): 106-112.
- [4] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路隧道照明设计细则: JTG/T D70/2-01-2014 [S]. 北京: 人民交通出版

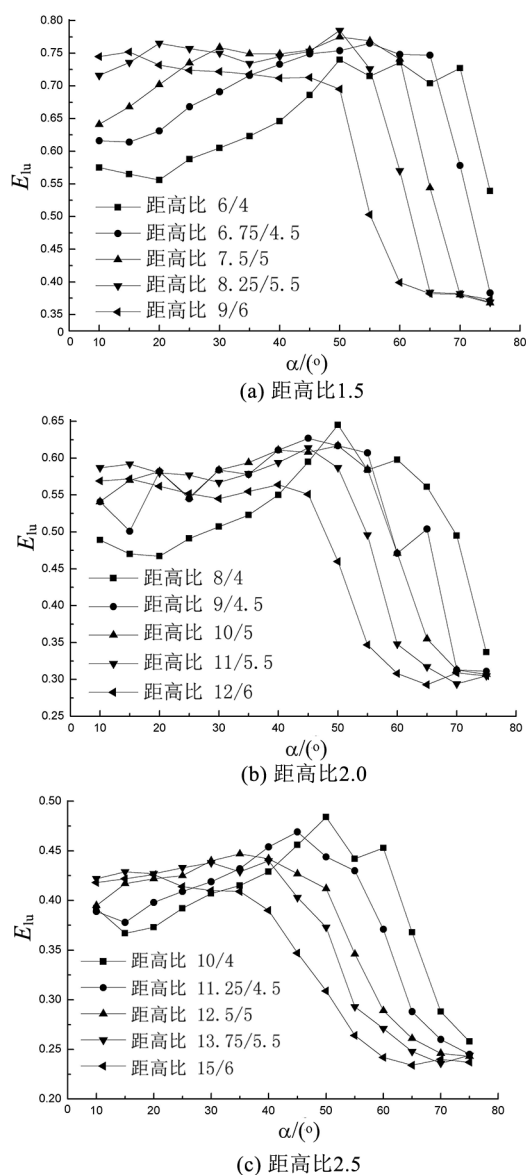


图 4 不同距高比下路面中线照度纵向均匀度随灯具安装角度的曲线图

Fig.4 Graphs of longitudinal uniformity of road surface illuminance with installation angle of lamps under different spacing-to-mounting-height ratios

3)同等条件下,路面中线照度纵向均匀度与距高比负相关。一定范围内,随着安装角度的增大,路面中线照度纵向均匀度呈现出先增大后减小的变化规律,且在 45°~50°达到峰值。

社, 2014.

[5] PACHAMANOV A, PACHAMANOVA D. Optimization of the light distribution of luminaries for tunnel and street lighting [J]. Engineering Optimization, 2008, 40(1): 47-65.

[6] 李然, 申瑞君, 吴关. 公路隧道照明灯具最佳安装位置研究[J]. 公路, 2015, 60(10): 268-272.

[7] 黄艳国, 宋峰华. 遗传蚁群算法在公路隧道照明设计中的应用[J]. 公路工程, 2018, 43(4): 39-43, 91.

[8] 范士娟, 杨超. 布灯方式对隧道照明的影响[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 50-53.

[9] PARISE G, MARTIRANO L, PARISE L. The energetic impact of the lighting system in the road tunnels[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1175-1183.

[10] 吴绍明, 吴梦军, 马非, 等. 三车道公路隧道照明灯具布置参数研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 471-475.

[11] 严桂钟, 陈学新, 王金芳. 室内照明用 LED 平板灯距高比的研究[J]. 机电技术, 2014, 37(6): 135-137.

[12] 季佳俊. 三车道大断面公路隧道照明节能参数优化研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.

[13] 潘国兵, 梁波, 皮宇航, 等. 隧道侧壁内装材料的照明节能[J]. 公路交通科技, 2012, 29(9): 103-109.

(责任编辑: 方素华)

(上接第 568 页)

根据上述所得结论,随机误差不是废品的原因,系统常值误差才是罪魁祸首,很可能是由于调整不当造成的误差,可通过调整砂轮回转中心远离工件回转中心 $3.26\mu\text{m}$ 即可消除废品率。且界面显示工序能力足够,可以允许有一定的波动。最后点击菜单栏的生成报告,将界面内容自动生成图文并茂的 Word 检测报告,直观明了。

3 结论

使用电涡流位移传感器,利用 MATLAB 数据采集工具箱实现实时数据采集,完成工序管理中误差统计分析的繁杂算法,实现测量数据以及结

果的可视化。设计出检测平台的机械结构验证了系统的正确性、可靠性,结论如下:

- 1)该平台操作方便,工序管理简单,检测结果精确。
- 2)该检测方法不仅适合于分布图分析法,还可以推广至点图分析法,将现场按顺序加工的工件依次推入检测部位完成 $\bar{X}-R$ 图,实现过程控制。
- 3)该平台可推广使用于生产线的在线检测,对于机械产品的快速检测、加工误差统计分析和提升全面质量管理都是有效的。

参考文献:

[1] 饶雄, 李俭, 唐茂, 等. 发动机关键零部件加工精度数值化分析系统的研究与实现[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 80-83.

[2] 郭德伟, 江洁, 闵洁, 等. 基于 Flash ActionScript 机械加工误差统计分析实验的设计与开发[J]. 制造业自动化, 2012, 34(13): 125-129.

[3] 周林, 殷侠. 数据采集与分析技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 292-315.

[4] 江泽林, 刘维. 实战 MATLAB 之文件与数据接口技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014: 397-412.

[5] 周宏圃. 机械制造技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 373-379.

[6] 何瑛, 欧阳八生. 机械制造工艺学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2015: 102-119.

[7] 孙剑. 一种基于 MATLAB 的 Word 报告自动生成方法[J]. 科技广场, 2017(1): 32-35.

[8] 杨叔子. 机械加工工艺师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 7, 74-75.

[9] 李益民. 机械制造工艺设计简明手册[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2014: 177-178.

(责任编辑: 方素华)