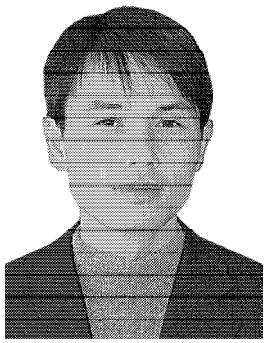
研究开发

机车轴端光电转速传感器优化设计

吴承书[1,2]，米智楠[1]，叶明盛[2]，张燕亮[2]，龚运生[2]

（1.同济大学 机械工程学院，上海 200092；
2.宁波南车时代传感技术有限公司 技术中心，浙江 宁波 315021）



作者简介：吴承书（1978-），男，硕士研究生，工程师，从事轨道交通用速度传感器的研发工作。

摘 要：针对原有基于TB/T 2760—1999标准设计生产的光电式转速传感器在机车速度提高后不断发生故障的现象，采用高速编码器等新技术、新工艺、新材料对产品整体进行有针对性的优化设计，并对优化设计后传感器的总体结构和主要技术特点进行了介绍。试验验证以及在各机务段的批量装车考核表明，新产品性能优良，各项性能指标均很好地满足了设计要求。

关键词：机车；光电转速传感器；光电模块；编码器；光栅片；优化设计

中图分类号：TP212；U260.5 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-128X(2013)03-0022-04

Optimal Design of Photoelectric Rotating-speed Sensor at Axle End of Locomotive

WU Cheng-shu[1,2], MI Zhi-nan[1], YE Ming-sheng[2], ZHANG Yan-liang[2], GONG Yun-sheng[2]

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Technical Center, Ningbo CSR Times Transducer Technique Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315021, China)

Abstract: According to the fault of photoelectric rotating-speed sensor based on TB/T 2760–1999 after locomotive speedup, new technology and material utility of high-speed encoder was adopted for product integral optimized design. Collective structure and main technical specification of the optimized sensor was introduced. Experiment and batch on-board examination proved that the new product had good performance and satisfied the design requirement of every index.

Key words: locomotive; photoelectric rotating-speed sensor; photoelectric module; encoder; grating tablets; optimal design

0 引言

机车用光电转速传感器广泛应用在国内各种型号的电力机车及内燃机车上[1-3]，它是将机械运动信号转换为电信号输出的中转站，为机车电子柜监控装置、微机防空转装置、轮喷防滑行装置等提供机车运行的速度信号，具有耐振、耐油污、抗干扰能力强等特点。

原有的光电转速传感器是基于TB/T 2760—1999标准进行设计的，随着机车速度的不断提高，原有光电转速传感器会出现无输出信号、输出信号断续、输出信号数减少等故障现象，直接影响机车的正常安全运行，甚至于引起机破。这些故障问题出现后，厂家也对该传感器进行了有针对性的改进，采取在电路上增加了电源稳定模块、提高光电模块探头合格率、改进密封环节、调整零部件加工工艺、设定合理工艺参数等措施，由于没有对该传感器进行根本性的改进，从后续的实际运行来看，原有故障现象仍然出现。

针对近年来各自厂家改进后传感器出现的故障现象，本设计在总结原有传感器改进的基础上，推翻原有设计思路，采用高速编码器，有针对性地结构优化设计，启用新技术、新工艺、新材料等，将传感器的性能提高到一个新的挡次，不仅能满足轨道交通传统机车市场的需要，同时也适用于轨道交通高速机车市场。

收稿日期：2013-01-17；**收修改稿日期：**2013-03-12

1 传感器工作原理及主要技术参数

光电转速传感器利用光电效应测量转速，将机车轮轴机械转动物理量转换为脉冲式电信号，为相关控制系统提供性能稳定、工作可靠的速度信号。

图1所示光电转速传感器工作原理：从LED（光源）发射的光，通过光缝、光栅码盘、光缝，照射到光敏元件上，使光敏元件感光，产生电信号，电信号经过放大整形，输出符合要求的脉冲信号。光栅码盘上开有一定数量的小孔，当光栅码盘转动1周，光敏元件感光的

次数与光栅码盘的开孔数相等，会产生相应数量的脉冲信号。传感器输出信号的频率与光栅码盘开孔数及光栅码盘转速的关系为：

$$f=n\times p/60$$

式中：f为传感器输出脉冲信号频率，Hz；p为每转脉冲数（光栅码盘开孔数）；n为光栅码盘转速，r/min。

由于光栅码盘通过轴与机车轮轴直接相连，光栅码盘转速与机车轮轴转速相等，传感器输出信号频率与机车轮轴转速成正比。

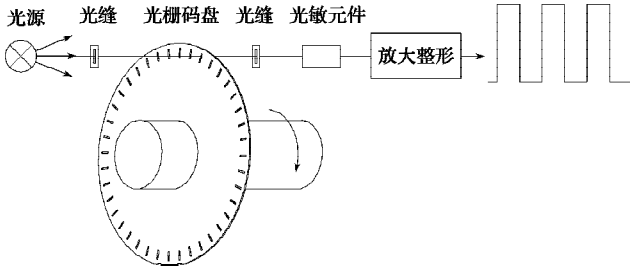


图 1　光电转速传感器工作原理图

光电转速传感器的主要技术参数如表 1 所示。

表1　光电转速传感器主要技术参数

项目	性能指标
测速范围	0~3 000 r/min
工作电源电压 V_{cc}	DC 15 V 或 DC 24 V（DC 12~30 V）
每转脉冲数	200 或 96
驱动负载能力	≥ 3 kΩ
输出波形	方波脉冲
上升沿、下降沿时间	小于脉冲周期的 5%
输出脉冲幅度	负载电阻为 3 kΩ 时，高电平大于等于 $0.8V_{cc}$，低电平小于等于 2 V
输出通道数	2、3、4、6
占空比	(50 ± 10)%
相位差	(90 ± 30)°
每通道空载功耗电流	≤ 50 mA
绝缘电阻	用 500 V 兆欧表进行绝缘测试，绝缘电阻不小于 50 MΩ
绝缘强度	各通道之间应能承受 50 Hz、500 Vrms 工频交流电压；所有通道与屏蔽层之间、所有通道（包括屏蔽层）与外壳之间应能承受 50 Hz、1 500 Vrms 工频交流电压，历时 1 min，无击穿或闪络现象

2　传感器的总体结构

如图 2 所示，光电转速传感器采用整体式结构。产品主要由器座单元、方榫组件、电缆线组件等构成。

安装部位外形尺寸为 130 mm × 130 mm，4 只螺钉（安装孔直径 9 mm）均布在直径 130 mm 的圆周上，用直径 65 mm 定位圆（高度 < 20 mm）定位；方榫组件宽度尺寸为 18 mm × 18 mm；输出通道信号数（2、3、4、6）、脉冲数（200、96）、轴伸长度 AL（78、95、110、120）和电缆长度 CL 可根据实际进行配置。

传感器零部件材料选取和相互间的设计符合相应标准，工作温度满足 −40 ~ +70℃，振动冲击满足 3 类车轴要求，防护等级满足 IP66 要求。

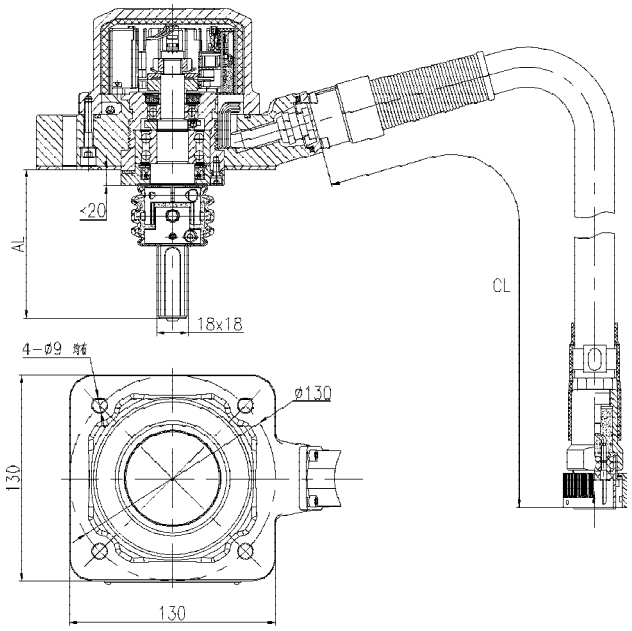


图 2　光电转速传感器结构图

3　传感器的主要技术特点

为提高传感器的整体质量，并符合现代审美观念，外形采用流线型设计。在光电转速传感器设计实现过程中，不断地将新技术、新工艺、新方法实施到零部件设计、选型、加工、组装、测试等各个环节，提高了产品的整体性能。

3.1　光电模块单元

作为此传感器的一个重要改进标志：将光电编码器运用到光电转速传感器上作为光电传感器件，光电编码器采用面光源技术（见图 3），与传统的光电对管相比，模块无需光缝，有效杜绝了因模块光缝堵塞而发生失效的现象；同时，光电编码器具有对光栅片同轴度要求低、输出信号占空比无需调节等优点。

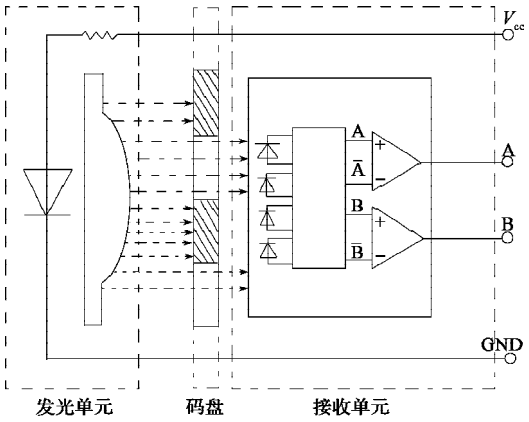


图 3　编码器工作原理示意图

该光电模块单元提高信号处理电路的抗电磁干扰能力，完全满足标准 TB/T 2760.1—2010《机车转速传感器第 1 部分：光电转速传感器》最新修改后的要求，能够完全适应轨道交通恶劣的电磁环境。

光电模块输出接口采用小型电连接器冷压连接，方便生产及售后维护。内部进行灌胶处理，提高了模块密封、防潮、绝缘、耐压的性能和抗振能力。

3.2　轴系结构设计

此传感器内部采用旋转稳定性较强、产品密封性和吸湿性较高的轴系结构。

由于高速旋转时轴承产生热量，轴系部件会受热膨胀。转动轴承装置设计时采用单支点双向固定结构，用双列角接触球轴承作为固定支点，单列深沟球轴承作为游动的支承，这种结构抗冲击能力强，轴系零件旋转平稳，轴承滚珠受力均匀，噪声小；同时因为游动支点存在，可补偿轴的热膨胀，使产品在高转速下的温升降至最低，有效防止轴承因热膨胀而卡死，延长轴承寿命。

单支点双向固定结构不需调整轴承预紧力，避免原设计轴承在安装过程中可能受到损伤。2 只轴承改用双面密封圈类型，无需人工额外加润滑脂，能防止人为操作不当而带入污染物，同时带双面密封圈结构的轴承本身也具有密封作用，提高了整个轴系部件的密封性。

光栅片加工工艺改进，由原来的线切割工艺改为激光切割或化学腐蚀工艺加工，提高光栅片切口的光滑性，提高光缝质量，使光电编码器感应后输出的占空比更加稳定。光栅片在实际使用中，易受污染物的影响，在传感器设计时，要保证高密封性能。为防止外部污染物通过轴系进入器座腔体内，在器座底部端盖内设置橡胶密封垫，在轴系上使用温度性能好、耐磨性良好的氢化丁腈橡胶旋转油封，油封装配设计为法兰结构，配合同轴度能得到保证，可有效降低因旋转油封与旋转轴偏心而造成的磨损，最大限度地提高旋转油封的使用寿命。在器座腔体内设置污物吸湿套件，可吸收进入腔体内部的少量污物。

简化光栅片与轴的配合结构，由于编码器对光栅片同轴度要求不高，在以轮芯定位的情况下，将光栅片直接装配到轴上，消除原设计采用螺纹配合对同轴度带来的不利影响。

3.3　机械传动装置

器座是机械传动功能单元的载体，轴通过轴承固定在器座上，轴的一端通过联轴器与方榫组件连接，另一端通过带防松止动垫圈结构将光栅片固定。当车辆轮轴转动时，带动方孔套中的方榫组件转动，并依次传递给联轴器、轴，进而实现安装在轴上的光栅片转动，为电气传输单元提供了必要的旋转动作。

此次设计中抛弃原设计中的万向联轴器总成，取而代之的是轴、联轴器和方榫组件 3 个部件，联轴器两端分别与轴、方榫组件连接。拆分后的 3 个部件在降低外协厂加工难度的同时，也为后续该传感器模块化结构分类的实现奠定了基础。原设计中的万向联轴器实际运转速度不得超过 2 000 r/min，联轴器是此次设计的另一重大改进和应用，将传感器转速提高到一个新的等级，可满足目前高速动车组的使用要求。

为提高联轴器的密封及润滑，在联轴器外部使用橡胶护套组件进行密封，护套内部填充润滑脂，有效延长联轴器使用寿命。

3.4　电缆保护单元

电缆是信号传递的重要通道，胶管是保护电缆不受损坏的直接“外衣”，为防止胶管出现破裂对电缆造成损坏，采取了以下措施：首先，使用的胶管材料是三元乙丙橡胶，温度适应范围 -55~+125 ℃；阻燃性能符合 UL94 V-0 要求，耐油、耐天候老化性能良好，符合机车使用要求；其次，在胶管靠近器座部位设计防折弹簧，防折弹簧在实际使用中对胶管起到缓冲作用，同时增大胶管弯曲半径，分散胶管的应力集中，避免胶管因安装不当过度弯曲而破裂；最后，电缆线使用符合机车使用环境的低烟无卤阻燃高等级材料要求。

在电缆保护单元两端均采用密封设计，靠近器座端的管接头内部设计电缆防水接头，另外一端电连接器内部灌封电器密封胶。电缆防水接头的使用，完全切断外界污物从电缆线处侵入产品内部的路径，提高了产品密封性能。电连接器内部灌胶不但解决了插针受潮生锈的问题，也提高了此处的绝缘耐压性能，并进一步稳固了插针及绝缘体在电连接器中的位置。

电缆保护单元通过管接头用 4 个螺钉与器座一次性进行锁紧固定，方便电缆保护单元整体制作后进行安装操作，避免原设计使用管接头直接拧在器座上导致电缆线旋转变形或整体安装后需对电缆保护单元局部再装配的问题。

3.5　其他改进部分

此产品的光栅片在实际使用中，易受污染物的影响，所以在对产品设计时，要保证产品的高密封性能。除了轴体使用旋转油封、端盖处使用密封垫圈、电缆出口处使用电缆防水接头和 O 型圈外，也需要保证器座、外罩本身的致密性，两零件均需要做气密性试验；另外，2 个部件之间端面使用 O 型圈做为密封件。上述密封结构可达到并超过产品要求的 IP66 防护功能等级。

为保证产品的绝缘耐压等级，对于器座内部的电缆线，需要套黄蜡管和热缩套管，并在外罩内部设置保护套，有效提高内部元器件与外罩之间的绝缘耐压等级。

在此次光电转速传感器设计改进的同时，充分利用通用件、标准件，采用系统化、模块化、组合化等设计理念，产品可无限拓展，满足各类机车的实际需求。这一思路对机车车辆用其他传感器[4]的改进有启示作用。

4　传感器试验验证

为验证新产品是否达到设计要求，对新产品进行了相关项目的试验。设计提升后的新产品与传统产品的性能对比如表 2。

表2　传感器试验验证参数对比

试验项目	传统产品	设计提升后产品
工作温度 / ℃	−25~+70	−40~+70
绝缘强度	500 Vrms/50 Hz/60 s	1 500 Vrms/50 Hz/60 s
测速范围 / r·min^{-1}	0~1 500	0~3 000
占空比	50 % ± 20%	50 % ± 10%
相位差	90° ± 45°	90° ± 30°
射频场感应的传导骚扰抗扰度	3 Vrms 1 kHz 80% AM	10 Vrms 1 kHz 80% AM
射频电磁场辐射抗扰度	10 V/m 1 kHz 80% AM	20 V/m 1 kHz 80% AM
电快速瞬变脉冲群抗扰度	信号端口等级	电源端口等级
长距离抗干扰试验（负载3 kΩ，芯线截面0.5 mm^2）	未验证	可达到：30 V/1 800 m，15 V/600 m，12 V/200 m
动态密封性	未验证	在75 ℃热水中以转速100 r/min运转1 h，无异常
电缆进线口密封性	有进水隐患	胶管灌水试验，水深1 m状态下保持24 h，电缆防水接头无泄漏
机械寿命试验	未验证	通过第三方机械寿命试验及内部长寿命试验并通过批量装车考核

5　结语

全新设计的光电转速传感器，彻底解决了老产品密封可靠性低、轴系质量不稳定等问题，产品性能参数、转速能力、运行可靠性等大幅提升。在通过充分的试验验证以及在各机务段的批量装车考核，产品各项性能指标均超过国内外同类产品水平。此次机车轴端光电转速传感器的优化设计，将是一次技术性创新。

参考文献：

[1] 卢长根，厉航锋，周友佳. 机车轴端光电转速传感器故障分析[J]. 机车电传动，2006(4)：23-26.

[2] 李陆新. 机车轴端光电式转速传感器的改进设计[J]. 机车电传动，2003(1)：56，58.

[3] 谢　斌，李国宁，等. 神经网络在机车测速传感器故障诊断中的应用[J]. 机车电传动，2012(6)：84-87.

[4] 米哲涛，曹　雷. 霍尔元件在电流传感器中的应用[J]. 机车电传动，2011(1)：32-35.

（上接第21页）

4　低频下玻璃的隔声性能

有关文献[1]对电力机车司机室噪声频谱特性进行了研究，研究结果表明司机室内部噪声主要集中在低频，通过上述的仿真结果可知玻璃在高频下隔声性能较好，所以对其低频下的隔声性能的研究较为重要。

图9为1/3倍频率50~2 000 Hz频段下不同玻璃的隔声性能，3种玻璃的厚度均为15 mm，可以看出在低频下夹层玻璃的隔声性能要远远好于单层玻璃和多层玻璃。所以夹层玻璃可以作为电力机车司机室侧窗玻璃的首选。

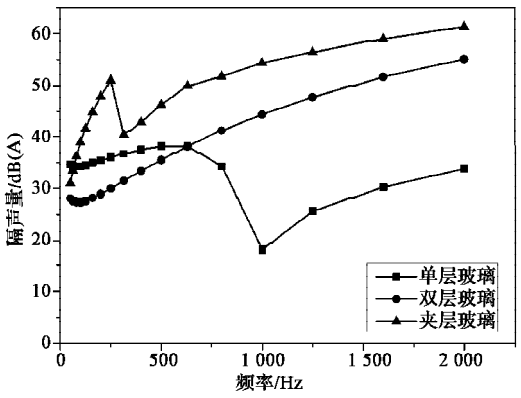


图9　低频下不同玻璃的隔声性能

4　结语

除了外部噪声透过侧窗玻璃传到司机室内部之外，还有一部分是由于司机室钢结构的振动引起玻璃的振动而产生的噪声，所以侧窗玻璃的选择除了在材料和结构的选择外，在安装方式上要选择嵌在弹性衬垫中，以减少司机室振动辐射噪声。同时侧窗玻璃密封的好坏直接关系到侧窗的隔声性能。从上述仿真试验结果以及对试验结果分析，可以得到以下几点结论：

①从表2与表1的对比分析可知，多层玻璃的隔声性能要远远好于单层玻璃。

②15 mm的夹层玻璃和双层玻璃在1/3倍频率50~8 000 Hz频段下的平均隔声量分别为52.24 dB、47.31 dB，说明夹层玻璃的隔声性能比双层玻璃好。

③对于玻璃中间空腔填充氩气与空气对玻璃隔声性能的影响，其具体原因有待进一步地分析。

参考文献：

[1] 田新浩. 电力机车司机室的噪声特性研究[J]. 环境工程，2000，18(3)：36-39.

[2] 岳　岩，刘继生. 铁路客车车窗玻璃结构型式对隔声效果的影响[J]. 铁道车辆，2000(10)：18-20.

[3] 杜功焕，朱哲民，龚秀芳. 声学基础[M]. 南京：南京大学出版社，2001.

[4] 陈克安，曾向阳，李海英. 声学测量[M]. 北京：科学出版社，2004.

[5] 叶武平，易　明，等.运用统计能量分析法进行轿车室内噪声的仿真[J]. 同济大学学报，2001，9(29)：1066-1071.

[6] 丁建洛，王新春. 玻璃的隔声性能及降噪设计[J]. 玻璃，2006(6)：49-53.