

文章编号: 1674—8247(2020)04—0021—07  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.04.005

## 中国铁路接触网数字化发展策略与实践

吴积钦<sup>1</sup> 杨佳<sup>2</sup> 关金发<sup>1</sup> 刘涛<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**借鉴欧洲铁路接触网的发展理念和数字化建设举措,提出中国铁路接触网数字化发展的努力方向与需要完成的工作。接触网从功能设计到可靠性设计发生系统性质变是实现数字化的物质条件,在推进接触网设计、施工与维修等环节的闭环质量控制与标准体系优化的过程中,可逐步将接触网的设计、施工、零部件制造与检验等数字化环节有机地融合成一个整体,实现接触网的数字化全寿命周期管理。在此基础上,推进接触网的可视化与智能化建设,并从预防性维修向预测性维修转变。

**关键词:**铁路; 接触网; 全寿命周期; 质量控制; 数字化

中图分类号: U225

文献标志码: A

## Development and Practice of Railway Catenary Digital Technology in China

WU Jiqin<sup>1</sup> YANG Jia<sup>2</sup> GUAN Jinfa<sup>1</sup> LIU Tao<sup>2</sup>

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** This paper draws lessons from the development concept and digital construction measures of European railway catenary, and proposes the direction and work to be done in the digital development of China's railway catenary. Systematic qualitative change of catenary from functional design to reliability design is the material conditions to realize digitalization. In the process of promoting closed-loop quality control and standard system optimization of catenary design, construction and maintenance, catenary design, construction, parts manufacturing and inspection digitalization can be organically integrated step by step, so as to realize digitalized whole life cycle management of catenary. On this basis, the visual and intelligent construction of catenary will be promoted to realize the shift from preventive maintenance to predictive maintenance.

**Key words:** railway; catenary; whole life cycle; quality control; digitalization

为适应日益发展的技术和服务,2017年9月,欧洲铁路行业协会(UNIEF)在其发表的关于铁路数字化的意见书中指出,铁路必须在可靠性、安全性和运营连续性等方面保持高标准,数字化技术是实现该目标的重要手段<sup>[1]</sup>。为此,欧洲铁路行业协会提出了欧洲铁路运输管理系统(ERTMS)开发和基础设施预测性维

修两大重点举措,并以此作为推动欧洲铁路数字化发展、提高铁路安全可靠水平的重要抓手。

针对接触网,意见书建议将依靠技术创新、标准强化以及新经济模式实现更进一步的资产管理<sup>[2]</sup>。具体措施为通过软件设计与开发等方式,把各自为政的多个检测、监测系统整合起来,实现信息的无缝对接,

收稿日期:2020-05-25

作者简介:吴积钦(1966-),男,教授。

基金项目:国铁集团科技开发计划(N2019G044)

引文格式:吴积钦,杨佳,关金发,等. 中国铁路接触网数字化发展策略与实践[J]. 高速铁路技术,2020,11(4): 21-27.

WU Jiqin, YANG Jia, GUAN Jinfa, et al. Development and Practice of Railway Catenary Digital Technology in China [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 21-27.

并在此基础上开展大数据分析,提高对养护维修复杂环境的模拟能力,以更准确的参数设置对接触网养修过程进行更精确的描述,从反应性维修、预防性维修逐渐转变为预测性维修,即实现基于资产状况及诊断的短时预报与预测,并据此开展风险性决策。

截止 2019 年底,中国铁路营业里程超过 13.9 万 km,其中电气化铁路里程达到 10.0 万 km(含 3.5 万 km 高速铁路)<sup>[3]</sup>。无论是发展的广度还是深度,中国铁路接触网的数字化均有着广阔的发展前景。

近年来,数字化技术不断应用于接触网的系统设计、详细设计、施工管理与运营维修。接触网专业的学者们也在数字化技术方面做了一些研究。文献[4]深入探讨和研究了在接触网设计阶段建立接触网零部件三维 BIM 族库。文献[5]分析了高速铁路接触网全寿命周期 BIM 技术的应用现状;文献[6]利用 BIM 技术研究了接触网施工应用平台;文献[7]提出一种智能化的接触网检测系统,并研究了从日常巡检到数据管理的综合解决方案;文献[8]研究了基于数字化的接触网故障定位系统;文献[9-11]在三维技术、综合参数测量和数字化平台建设实践方面均取得了有效的成果。

但目前,我国铁路接触网的数字化发展遇到无法逾越的瓶颈:接触网系统指标、零部件载荷和零部件寿命三者之间缺少可以信赖的定量关系,既无法推进接触网由功能性设计向可靠性设计过渡,也无法推动接触网由初级预防性维修进入高级预防性维修,更遑论向预测性维修转变。

本文对欧洲铁路接触网数字化的技术基础,尤其是对 EN 50119-2013《铁路应用-固定设施-电力架空接触网》进行分析,挖掘该标准对接触网系统指标、零部件载荷、零部件寿命之间的定量规定,找出中国与欧洲铁路接触网技术差距及形成差距的原因,并在此基础上提出中国铁路接触网的数字化发展策略。

## 1 接触网数字化是大势所趋

接触网沿铁路线布置,是特殊的配电线路,其中接触悬挂兼做电气列车受电弓的机械滑道,由数量较多的零部件组成。为确保接触网在现行使用环境下保持其设计功能,维修部门需定期对接触网进行技术诊断,即在尽可能不拆卸接触网的情况下,根据接触网设备测得的和外部可辨认的特征求出并评价其状态。可测得的参数为接触网处于静止状态的结构参数或工作状态下的弓网性能参数。外部可辨认的特征主要针对组成接触网的各类零部件、装置、线材等,透过这些物项

的表面情况,评价其本质特征。掌握接触网结构状态与零部件工况的对应关系,就可依据测得的结构参数评价零部件的载荷(载流量为负荷),依据零部件的外部特征,可评价零部件的抗载荷能力。零部件承受的载荷及其抗载荷能力确定后,接触网诊断就可判断出零部件是否需要更换以及如何更换。

在接触网设计、施工、零部件制造、维修等过程中,将涉及零部件载荷与抗载荷能力等复杂多变的信息转变为可度量的数字、数据,再以这些数字、数据建立起适当的数字化模型,转变为一系列二进制代码,存入计算机内部,进行统一处理,这就是接触网数字化的基本过程。数字化是接触网实现智能化、可视化的基础。

数字化的接触网,可根据定期获取的检测监测数据、零部件的外部特征实施接触网自动诊断,及时跟踪接触网的技术状态,对接触网实行健康管理,从预防性维修逐渐过渡到预测性维修,并能确保接触网在其寿命周期内实现资产价值的最大化和运行效能的最优化。

## 2 可靠性设计是欧洲铁路接触网数字化的基础

接触网于 1889 年诞生于第二次工业革命的发源地德国,130 余年来,德国在接触网的基础研究方面取得了丰硕成果。19 世纪 50 年代,德国大规模修建电气化铁路,并同时开始接触网标准化设计工作。由 SIEMENS、AEG、ABB 等公司联合,先后开发了 Re75、Re100、Re160 和 Re200 系列接触网。70 年代中期,在总结前 4 种标准悬挂的基础上,又研制了 Re250 系列标准接触网悬挂系统。90 年代初,又开发了 Re330 系列接触网。随着欧洲一体化的推进,在欧洲和世界范围内代表着德国意向的德国标准化协会(DIN),将德国在接触网领域的丰富积淀体现在欧洲弓网系统标准体系中。从欧洲弓网系统标准体系可发现接触网从功能设计到可靠性设计的逐渐演进,这些工作既为接触网全寿命周期管理提供了技术保障,也成为了欧洲铁路推进接触网数字化发展的基础。

关于接触网的设计寿命,EN 50119-2013《铁路应用-基础设施-电力牵引架空接触网》中规定,买方可提出系统所需的设计寿命,系统包含了与基础设施相关设备的寿命、消耗性零部件(如接触线)的磨耗以及承受交变应力零部件的疲劳寿命。

接触线磨耗与承受交变应力零部件的疲劳寿命取决于弓网接触力与接触线抬升。接触网设备的设计应满足受电弓与接触线之间最大允许接触力,并应考虑

车辆最大允许速度时的空气动力影响。

接触力的值随不同受电弓和架空接触网系统的组合而变化。仿真或测量出的接触线和滑板之间接触力的值不应超过表1所给出的范围。

表1 接触力范围表			
电流制式	列车速度 (km/h)	接触力	
		最大/N	最小/N
AC	≤200	300	>0
	>200	350	>0
DC	≤200	300	>0
	>200	400	>0

关于接触网的结构,EN 50119 - 2013《铁路应用 - 基础设施 - 电力牵引架空接触网》,在其预期使用寿命内,架空接触网结构应以这种方式进行设计和施工:在一个确定的条件下,以可接受的可靠性水平和一个经济的方式实现规定的的能力,这涉及可靠性要求的各个方面;如果在确定的零部件中发生故障,则不会发生渐进崩溃,这涉及安全性要求的各个方面;在施工和维修过程中,不容易造成人身伤害或生命损失,这涉及人身安全性要求的各个方面。

架空接触网的设计、施工和维修应充分考虑公共安全、耐久性、鲁棒性、可维修性和环境因素等。接触网系统的设备、装置(零部件)的设计使用寿命应至少与招标说明书中所要求的整个接触网的使用寿命相同。

关于系统指标与零部件疲劳寿命的定量关系,以吊弦为例进行说明。接触悬挂的结构形状应遵循弓网相互作用性能要求,接触悬挂的结构形状很大程度上取决于吊弦的长度与间距。吊弦吊着接触线,采用心形环和各种形式的吊弦线夹固定在承力索或弹性吊索上。吊弦设计是导电型的,特别适用于短路电流大的系统,因而吊弦线的两端也用耳形导线接头与吊弦线夹相连接,并用螺栓固定。吊弦采用截面为10 mm<sup>2</sup>的铜镁合金绞线整体吊弦,带鸡心环结构,以承力索吊弦线夹和接触线吊弦线夹带制动垫片。静止状态下的吊弦承受其两侧各1/2吊弦间距的接触线自重。

受电弓沿接触悬挂高速滑行过程中,接触悬挂的结构形状会发生改变,吊弦承受的静态力载荷变小,甚至为0,直至吊弦主线挠曲。受电弓离开后,吊弦会遭受接触线下落带来的冲击载荷,经过一段时间的自由振动,吊弦受力恢复到仅承受静态力。

在这一系列过程中,吊弦应力与应变均出现变化。吊弦主线的工程应力为最大载荷与主线标称截面积之商。多次载荷作用导致吊弦失效的情况称为疲劳。导

致疲劳断裂的载荷作用次数称为疲劳寿命,疲劳寿命对应的载荷值称为吊弦的疲劳强度。材料的S - N曲线如图1所示。

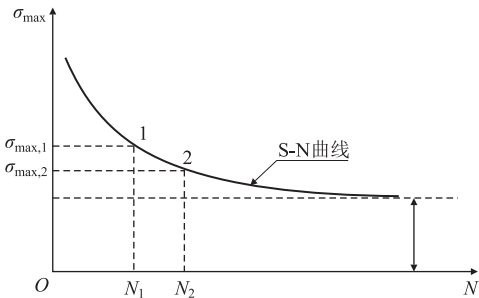


图1 材料的S - N曲线图

吊弦的疲劳寿命受制于承受的交变应力和疲劳强度两个方面的因素。接触网振动导致吊弦产生交变应力,接触网的振动规律由系统设计方案、施工质量、受电弓运行状况所赋予。吊弦的疲劳强度则由吊弦的材料、制作工艺等因素决定。吊弦的疲劳强度应与振动规律相符。疲劳强度一定的整体吊弦,可通过优化接触网的振动规律延长其疲劳寿命。贯穿于接触网质量控制过程的吊弦交变应力与疲劳强度维持过程如图2所示。

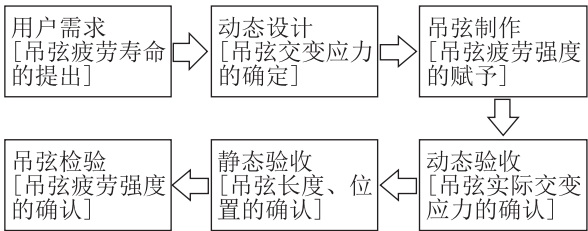


图2 贯穿于接触网质量控制过程的吊弦交变应力与疲劳强度维持图

由图2可以看出,吊弦的疲劳寿命由用户指定,因为每通过1架受电弓,吊弦承受1次交变应力,所以吊弦的寿命用弓架次表示,通常为不少于200万弓架次。在受电弓运行性能一定的前提下,吊弦承受的交变应力由接触网的系统参数所决定,而系统参数是接触网工程师在一定的经济、技术条件下综合选取的结果。制作工艺符合规定要求是吊弦满足疲劳强度的必要条件。交变应力谱用于在专用试验装置上,对拟使用的吊弦进行加速疲劳检验,符合规定寿命次数后的吊弦才能应用于接触网。接触网的预期结构形状由吊弦长度和安装位置所决定,偏离预期的结构形状会使吊弦的交变应力变大,增加的程度反映在动态验收结果上,符合预期的接触网施工质量才能使动态特性与动态设计保持一致。归根结底,只有将吊弦的实际交

变应力维持在设计范围内,吊弦的疲劳强度才能满足规定的使用寿命要求。

吊弦必须进行机械疲劳试验,根据 EN 50119 - 2013《铁路应用 - 基础设施 - 电力牵引架空接触网》规定,此试验由1个交变载荷和压缩循环组成,如图3所示。吊弦应与其专用线夹一起进行试验,对其正常应用的最低要求进行试验。

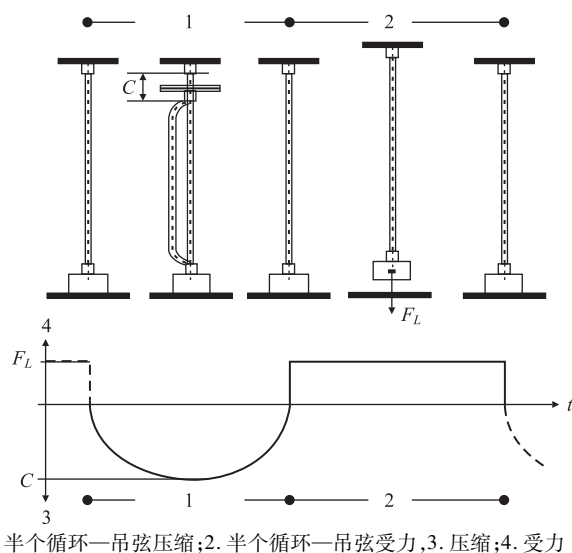


图3 吊弦机械疲劳试验循环示例

压缩振幅  $C$  应在 20 ~ 200 mm 之间指定,吊弦中的力  $F_L$  应在 100 ~ 400 N 之间指定。循环频率应在 0.5 ~ 10 Hz 之间,应执行最少 2 000 000 个循环。吊弦不应在指定循环次数之前断裂。吊弦疲劳试验的具体参数,应由接触网系统设计依据具体设计方案在规定的范围内指定。满足此要求的吊弦,按照要求安装且通过静态、动态验收后,可认为寿命能够满足设计要求,不需定期维护。若定期检测中诊断出某吊弦工况超出规定,应及时干预。

### 3 中国铁路接触网数字化发展瓶颈

中国电气化铁路建设起步于宝成铁路宝凤段,宝凤段接触网系统设计采用当时世界上最先进的供电制式,是在前苏联专家帮助下完成的<sup>[12]</sup>。1958年3月完成初步设计,同年5月通过前苏联交通部鉴定,1959年1月完成施工设计,1961年8月15日交付运营。

宝凤段电气化建成后的60年来,中国的电气化铁路发生了翻天覆地的变化,时至今日,伴随电气化铁路设计水平演进的 TB 10009 - 2016《铁路电力牵引供电设计规范》发布修订4版,但未曾出现涉及接触网寿命的约束性条款。

现行 TB 10621 - 2014《高速铁路设计规范》规定

接触网系统设计使用年限不宜小于 30 a。各零部件使用年限与外界环境和工况引起的疲劳或腐蚀有关,接触线使用年限应根据磨耗确定,均不应少于 200 万弓架次。

2001 年建成通车的哈尔滨 - 大连电气化铁路是系统引进德国牵引供电技术及设备的第一条电气化铁路。哈大铁路接触网的建造以建立在国际及德国标准基础上的德联邦铁路专业标准和西门子公司的标准图为准。接触网设备的使用寿命应达到 70 a,承受动态变化应力荷载的零部件使用寿命不少于 150 万弓架次,接触线磨耗不应超过标称截面积的 20%。

2008 年 8 月 1 日建成通车的京津城际铁路是中国大陆第一条高标准、设计时速 350 km 的高速铁路。京津城际铁路接触网系统由 Siemens 按照 EN 50119 - 2001 标准要求提供设计方案。

按照欧洲标准设计的接触网,遵循可靠性设计原则。按照中国标准设计的接触网,实现功能不是问题,但如何定量分配零部件的工龄,从设计部门到维修部门,均无法给出肯定的答复。形成这一困局的根源在于,宝凤段电气化铁路建设初期,中国的干线铁路接触网设计和施工几乎完全依赖于前苏联的技术援助,关键时期苏方撤走专家,中国的工程技术人员只能依据设计图纸进行逆向仿制,虽然解决了接触网的“有无”问题,但对于众多技术细节,知其然而不知其所以然。尽管经历了哈大铁路、京津城际铁路等接触网先进技术的熏陶,可受制于既有的思维惯性,在中国铁路大量的工程实践中,接触网设计始终没能蜕变为量化的可靠性设计层面。

接触网系统指标与零部件寿命缺少对应关系,利用外观检查与参数实测诊断接触网零部件的技术状态就没了依据,实现接触网的定量状态修、建立接触网的数字化模型更无从谈起。

### 4 夯实中国铁路接触网数字化发展基础

重复欧洲铁路接触网发展之路已无必要,但吸收欧洲铁路接触网系统先进的发展理念,有利于促进中国铁路接触网在人才培养、基础理论、关键技术、装备制造等方面的持续进步,关键在于:

#### 4.1 树立全寿命周期理念

接触网作为铁路庞大基础设施的一部分,建成并投入运营是阶段目标,在寿命周期内可靠运行才是终极目的。接触网全寿命周期设计意味着设计接触网(器材)不仅要设计接触网(器材)的功能和结构,而且要设计接触网(器材)的施工、运行、维修,直到回收再



利用的全过程。

为实现全寿命周期管理要求,接触网需遵循可靠性设计原则,即在规定的条件和时间内(正常设计、正常施工和正常维修条件下),完成预定功能(包含安全性、适用性、耐久性、抗连续倒塌等)的能力、使用可靠度量即完成“预定功能”的概率度量。可参照欧洲接触网标准体系要求,对接触网的安全性、适用性和耐久性等量化,并在设计、施工、维修等阶段实施可靠度分配,建立接触网系统指标与零部件寿命的定量关系。

设计阶段建立的定量关系,零部件制造和检验服务于这种定量关系,施工阶段维持这种定量关系,也就赋予了接触网的固有能力。到了维修阶段,通过定期

查看零部件外观判断零部件的抗载荷能力,通过检测接触网系统指标评估零部件的载荷。获取了零部件的载荷与抗载荷能力,就可实现接触网的预防性维修,直至预测性维修。

基于全寿命周期理念进行设计、施工、维修的接触网,也就具备了数字化的前提条件。

4.2 完善质量控制措施

接触网从系统规划,再到详细设计,直到投入运营后的维修,涉及环节众多。为实现接触网的全寿命周期管理目标,需对每个环节的工作质量要求采取规定的技术和管理措施。借鉴欧洲经验,遵循可靠性设计原则,完成接触网的设计、施工与维修工作。接触网质量控制过程如图 4 所示。

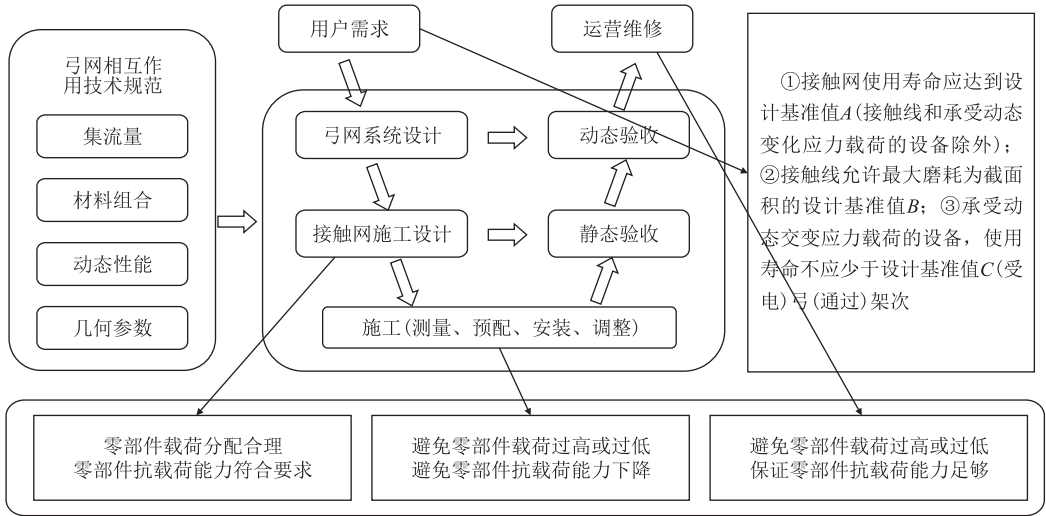


图 4 接触网的质量控制过程图

从图 4 可以看出,按照用户需求以及采用的标准,确定接触网在规定时间、规定条件下应该完成的预定能力。这个能力包含了安全性、适用性、耐久性、鲁棒性等定量可靠性指标。

使用可信赖的受电弓-接触网动态仿真系统,而不是依靠过去的经验,获取拟采用的接触网系统方案的可靠性指标与用户需求相符。该环节的质量控制依据为用户合同和设计标准。

满足用户需求与设计标准后,根据系统方案完成接触网的详细设计。本环节需要解决接触网各零部件的载荷(电气为负荷)、交变载荷以及零部件抗载荷能力的确定问题。在规定寿命期内,零部件抗载荷能力的衰减规律也应确定。因为不确定因素的存在,按概率论确定有关数值。详细设计资料不仅为施工安装提供依据,也是接触网静态验收的依据。

接触网施工的主要任务是将经过质量认证的零部件按设计要求进行精密装配。安装过程中,零部件承

受载荷与设计目标值的偏差应保持在设计范围内,零部件抗载荷能力也不应受到过多影响。

对全部接触网工程进行检查,并使用专用设备对静止状态下的接触网进行测量,以证实竣工后的接触网结构尺寸符合施工设计文件要求,这一环节称为静态验收。静态验收的目的是确认零部件的载荷与抗载荷能力符合设计要求。

通过静态验收的接触网,送电可确认其电气完整性。利用专用设备对弓网动态性能参数进行测量评估,以证实弓网动态性能满足技术标准要求,这一环节称为动态验收。动态验收是对弓网仿真系统可信赖程度的检验。动态验收符合要求的接触网,可认为承受交变载荷的零部件寿命处于设计规定的时间内。

投入运营的接触网,可定期查看零部件外观确认抗载荷能力,通过检测监测参数,评价零部件承受的载荷,掌握抗载荷能力与荷载演变规律后,即可判断接触网设备的服役状态。

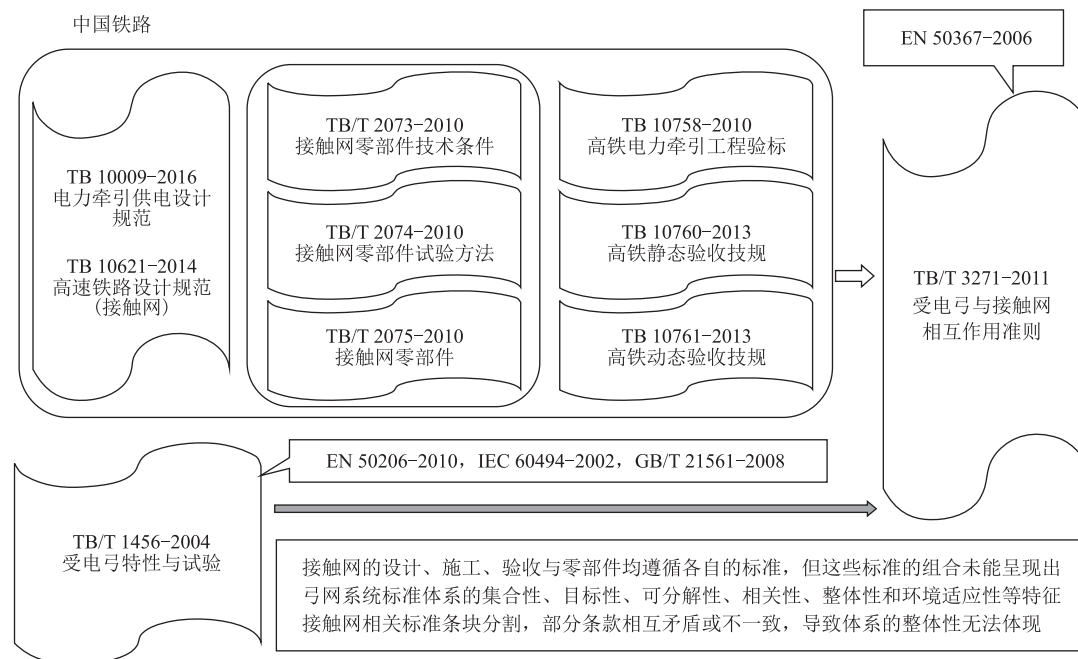
形成闭环的质量反馈控制,即设计对用户合同和系列标准负责,施工对设计文件负责,静态验收确认施工质量,动态验收确认设计质量,才能确保接触网建设、维修中的各环节相互制约、相互促进。

以可靠性为中心设计、施工的接触网,才能实施以

可靠性为中心的维修,接触网数字化的物质条件也就完全具备了。

#### 4.3 建立健全标准体系

伴随着长期的工程实践,中国铁路接触网标准体系逐步得到建立健全,如图5所示。



现有标准体系中,TB/T 1456-2004《受电弓特性与试验》采用了欧洲标准 EN 50206-1998,欧洲版本为 EN 50206-2010。TB/T 3271-2011《受电弓与接触网相互作用准则》采用了欧洲标准 EN 50367-2006,欧洲现行版本为 EN 50206-2016。中国干线铁路涉及接触网的设计规范有3个,分别是TB 10009-2016《牵引供电设计规范》、TB 10621-2014《高速铁路设计规范》和 GB/T 32578-2016《轨道交通-地面装置-电力牵引架空接触网》,其中GB/T 32578-2016 采用的 IEC 60913-2013,由欧洲标准 EN 50119-2009 转化而来。

涉及到接触网零部件的标准有3个,分别是TB/T 2073-2010《接触网零部件技术条件》、TB/T 2074-2010《接触网零部件试验方法》和TB/T 2075-2010《接触网零部件》,这3个标准存在的主要问题是有关规定与实际接触网设计指标无关,即满足了这3个标准要求的零部件,不一定能满足实际接触网的运行要求。

接触网施工与验收的3个标准为TB 10758-2018《高速铁路电力牵引工程验收标准》、TB 10760-2013《高速铁路静态验收技术规范》和TB 10761-2013《高

速铁路动态验收技术规范》,与接触网设计标准无法形成有机整体,动态验收关键参数(如弓网接触力)的评估与设计标准不一致,有些验收参数(如硬点)在设计标准内没有出处。

综上所述,中国铁路接触网的设计、施工、工程验收、零部件制造和检验等标准,虽然解决了各环节标准的“有无”问题,但作为整体的接触网,其设计、施工和零部件等标准却条块分割,相互间缺乏逻辑,联系整体性完全无法体现。

建立健全中国铁路接触网的标准体系,确保各标准按其内在联系形成科学的有机整体,既是实现全寿命周期管理和完善质量控制的需要,更是接触网数字化发展的关键所在。

## 5 结束语

中国铁路接触网经过60年的发展,已经初步具备了从功能设计到可靠性设计发生系统性质变的物质条件。借鉴欧洲铁路接触网发展的先进经验,可在推进接触网设计、施工与维修等环节的闭环质量控制与标准体系优化的过程中,逐步实现接触网的设计数字化、施工数字化、零部件制造与检验数字化,各环节有机地

融合成一个整体,能够有力地促进接触网的数字化建设,全寿命周期管理的目标就有了实现的可能。接触网数字化为可视化与智能化打下夯实的基础,从而实现预测性维修。

参考文献:

[1] Kevin Smith, 黄震. 德国联邦铁路公司积极适应铁路数字化未来的战略[J]. 国外铁道车辆, 2019, 56(6): 13-15.  
Kevin Smith, HUANG Zhen. Strategies of Embrocing Railway Digitalization Future of DB[J]. Foreign Ralling Stock,2019,56(6): 13-15.

[2] 李平, 邵赛, 薛蕊, 等. 国外铁路数字化与智能化发展趋势研究[J]. 中国铁路, 2019(2): 25-31.  
LI Ping, SHAO Sai, XUE Rui, et al. Railway Digitalization and Intelligent Railway Development in other Countries [J]. Chinese Railways, 2019(2): 25-31.

[3] 王京保. 一种柱顶新型高速铁路牵引供电附加线悬挂系统[J]. 高速铁路技术,2019,10(5):52-55.  
WANG Jingbao. A New Type of Additional Wire Suspension System for the Top of the Poleon High-speed Railway Electric Traction Feeding[J]. High Speed Railway Technology,2019,10(5):52-55.

[4] 刘红良, 王万齐, 王辉麟, 等. BIM 技术在高速铁路接触网工程中的应用研究[J]. 铁路计算机应用, 2019, 28(6): 54-58.  
LIU Hongliang, WANG Wanqi, WANG Huilin, et al. BIM Technology Applied to Catenary Engineering of High Speed Railway [J]. Railway Computer Application, 2019, 28(6): 54-58.

[5] 关金发, 田志军, 乔锦新. 高速铁路接触网全寿命周期 BIM 技术现状与展望[J]. 电气化铁道, 2018, 29(S1): 1-5.  
GUAN Jinfa, TIAN Zhijun, QIAO Jinxin. Current Status and Expectation of BIM Technology for Full Service Life Cycle of Overhead Contact Line for High Speed Railways[J]. Electric Railway, 2018, 29(S1): 1-5.

[6] 王海明, 万连录. 基于城市轨道交通建筑信息模型施工应用平台

的接触网深化设计技术要点[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(11): 120-123.  
WANG Haiming, WAN Lianlu. Key Points in Detailed Design of Overhead Catenary System for Construction Application Platform Based on Urban Rail Transit BIM[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(11): 120-123.

[7] 于志刚, 吴东波, 赵少鹏, 等. 接触网几何参数检测仪的原理及应用[J]. 山东科学, 2009, 22(3): 77-79.  
YU Zhigang, WU Dongbo, ZHAO Shaopeng, et al. Principle and Application of Catenary Geometric Parameter Detector[J]. Shandong Science, 2009, 22(3): 77-79.

[8] 梁艳明, 郎兵, 贾彦军. 接触网数字化故障定位系统研究[J]. 电气化铁道, 2009, 20(5): 35-39.  
LIANG Yanming, LANG Bing, JIA Yanjun. Research on Overhead Contact Line Digitized Fault Location System[J]. Electric Railway, 2009, 20(5): 35-39.

[9] 潘英, 宋桃东. 三维技术在接触网设计中的运用探讨[J]. 电气化铁道, 2012, 23(6): 1-4.  
PAN Ying, SONG Taodong. Discussion on the Application of Three-dimensional Technology in Catenary Design [J]. Electric Railway, 2012, 23(6): 1-4.

[10] 杨庆和. 数字化接触网综合参数测量仪的改进[J]. 铁道技术监督, 2010, 38(9): 26-28.  
YANG Qinghe. Improvement of Digital Catenary Comprehensive Parameter Measuring Instrument[J]. Railway Technical Supervision, 2010, 38(9): 26-28.

[11] 马明正. 郑万铁路数字化平台建设实践[J]. 铁路技术创新, 2018(5): 13-17.  
MA Mingzheng. Digital Platform Construction Practice of Zhengzhou-Wanzhou Railway [J]. Railway Technical Innovation, 2018(5): 13-17.

[12] 许振帆, 诸均安. 我国电气化铁路建设概况[J]. 铁道学报, 1980, 2(4): 8.  
XU Zhenfan, ZHU Jun'an. Overview of Electrified Railway Construction in China[J]. China Railway Society,1980, 2(4):8.