

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0024

Zhang Shuliang, Gao Feng, Ning Baoying, *et al.* Analysis on the construction practices of transmission projects in permafrost regions in Canada and the United States [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(1): 201–207. [张树良, 高峰, 宁宝英, 等. 加拿大、美国多年冻土地区输电工程建设经验浅析[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(1): 201–207.]

# 加拿大、美国多年冻土地区输电工程建设经验浅析

张树良, 高峰, 宁宝英, 马瀚青

(中国科学院 国家科学图书馆兰州分馆/中国科学院 资源环境科学信息中心, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 国际上有关冻土地区输电工程建设成功经验, 对我国类似工程建设及相关问题的研究具有积极的借鉴意义. 重点以加拿大育空地区和美国阿拉斯加地区输电工程为例, 对国外冻土地区输电工程建设相关经验进行系统总结, 涵盖工程建设全过程, 即从工程前期准备到工程设计和建设直至工程建成后的运行维护. 基于此, 从完善工程评估机制、建立和执行相关工程建设规范与技术标准、工程建设环境风险控制以及确保工程运营安全等方面, 探讨了国外经验的可借鉴之处.

**关键词:** 冻土; 输电工程; 建设经验; 加拿大; 美国

**中图分类号:** TM753/P642.14 **文献标识码:** A

## 0 引言

多年冻土在我国有较为广泛的分布, 主要包括高纬度多年冻土和高海拔多年冻土, 前者集中于东北地区, 后者分布在西部高山高原及东部一些较高山地<sup>[1]</sup>. 这些地区地理位置偏远, 环境条件恶劣, 输电线路的建设对于推动当地经济发展和提高居民生活水平作用和意义重大. 尽管我国已经在冻土地区的公路、铁路及石油管线铺装等工程研究与建设(如青藏公路<sup>[2-3]</sup>、青藏铁路<sup>[4-5]</sup>建设工程以及格尔木-拉萨输油管道工程<sup>[6]</sup>)方面取得了诸多成功经验, 但由于工程性质的差异以及电力工程的特殊性, 有关冻土地区输电工程建设(特别是大型输电工程建设)过程中许多关键问题的解决及相关工程管理方法的应用, 在我国尚缺乏先例(青藏交直流联网工程将在此方面获得重要的积累).

加拿大境内和美国阿拉斯加地区多年冻土广泛分布, 其多个已建和在建输电工程项目均经过或覆盖上述地区, 这些工程在施工及作业环境条件方面同我国上述地区具有相似性. 因此, 其工程建设经验对我国冻土地区输电工程建设及类似工程有着重

要的借鉴价值.

本文旨在基于对美国、加拿大冻土地区输电线路工程建设全过程(从前期准备、工程设计到施工建设直至运营与维护)的系统调研与分析, 总结目前国外在冻土地区输电工程建设方面的成功经验, 为我国冻土地区输电工程及类似工程的设计和施工以及该领域相关问题的研究提供有益的借鉴.

## 1 工程区域整体概况

本文重点分析了加拿大育空地区和美国阿拉斯加地区已建和在建输电工程项目.

育空地区地处加拿大西北部, 有 1/10 土地面积位于北极圈内, 环境复杂, 气候严寒, 其北部为连续性多年冻土带, 南部为大面积非连续多年冻土带<sup>[7-8]</sup>.

同样跨北极圈的美国阿拉斯加地区, 由于受气候变化和人为因素的影响, 冻土退化迹象明显, 目前其冻土带分布情况大致为: 北极区域为连续性多年冻土带, 亚北极区域和南部区域均以非连续多年冻土带为主(连续性多年冻土带分布范围较之 20 世纪 80 年代以前明显缩减)<sup>[9]</sup>.

收稿日期: 2012-09-18; 修订日期: 2012-11-12

基金项目: 中国科学院国家科学图书馆兰州分馆“青藏交直流联网工程多年冻土区输电线路工程勘察、设计、施工和运营全过程情报调研”课题资助

作者简介: 张树良(1973—), 男, 河南荥阳人, 2008 年在中国科学院文献情报中心获博士学位, 现主要从事高科技信息分析、学科及战略情报研究. E-mail: zhangsl@llas.ac.cn

## 2 主要工程建设经验

对加拿大和美国相关工程建设全过程,包括工程前期工作、工程设计、工程施工与建设以及建成后的工程维护等的相关建设及管理经验进行分析和总结。

### 2.1 工程建设前期工作

出于对冻土地区特殊自然资源与人文资源的保护,美国和加拿大对于在此类地区的工程建设均有极为严格的限制和规定。作为工程建设的首要环节,工程建设前期工作主要包括工程建设的实际需求分析、工程建设咨询(或听证)和工程总体评估。

#### 2.1.1 工程建设需求分析

工程建设的实际需求分析主要是基于对当地已建输电工程现状的考察,明确工程建设的目标和实质性功能。工程建设前期的实际需求分析不但将对工程最终的设计和实施有重要影响,而且也将是工程建成之后对其实际功能目标评估的重要依据。

同时,出于冻土地区工程建设环境风险的考虑,在工程建设需求分析中必须证明工程建设是切实所需,而且必须为各界所认可,同时工程建设可能给当地造成的预期环境风险应当在可控范围之内<sup>[10-13]</sup>。

#### 2.1.2 工程建设咨询

在美国和加拿大,工程建设咨询是项目获得公众、社会认可及政府批准的必需程序。特别对于冻土带等对环境生态极为敏感的地区而言,工程建设咨询已被列为国家工程建设的法定程序。

以加拿大 Carmacks-Stewart/Minto 输电工程项目<sup>[11]</sup>为例,工程前期的咨询共进行了4轮,内容涉及工程建设方案、功能目标及工程建成后的影响等(如图1所示)。

项目前期咨询所采用的方法<sup>[10-13]</sup>主要包括:

(1) 现场交流:即通过座谈会、开放会议等正式的现场交流,展开同当地居民、政府部门、非政府组织及其他公众的咨询和商议。

(2) 电子及书面形式的交流:即以向社会发布正式电子公告、书面文件及报告的形式同社会及政府各方进行对话。

#### 2.1.3 工程总体评估<sup>[11-13]</sup>

对工程的总体评估主要关注工程建设可能产生的环境效益、预期社会效益以及工程建设风险评估。

(1) 环境效应评估。根据加拿大和美国的相关

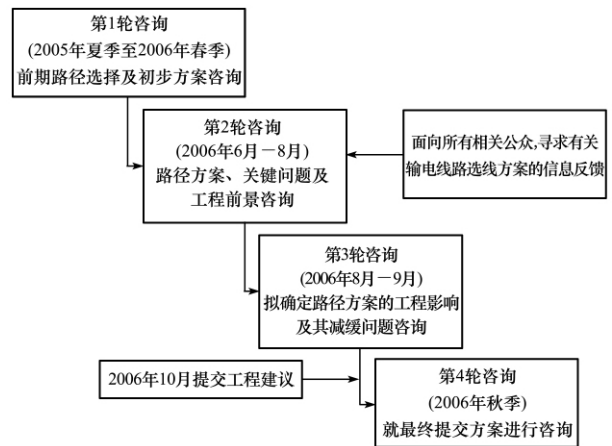


图1 加拿大 Carmacks-Stewart/Minto 输电工程项目前期咨询框架

Fig. 1 Consultation frame of Carmacks-Stewart/Minto transmission project in Canada

法律规定,对于可能对生态环境或特殊资源产生重要影响的工程,必须确保工程建设完全符合国家相关标准或将工程可能造成的不利影响降至最低才能获准建设。冻土地区对于生态环境变化极为敏感,而输电线路等大规模工程建设对冻土地区的生态环境会造成不容忽视的影响,因此对整个工程项目建设可能造成的环境影响进行预先评估十分重要。

项目的环境效应评估主要涉及3方面的内容:1)土地及资源使用情况评估。对工程建设的土地使用情况、当地物种资源及文化资源的影响进行评估;2)可能产生的生物物理效应评估。主要涉及工程建设可能引起的地表侵蚀、植被破坏情况以及生态环境效应等;3)当地特殊资源影响评估。就工程对当地特殊生物、人文资源(包括特色文化资源)可能造成的潜在影响进行分析。

(2) 工程的社会经济效益评估。工程建设的预期社会效益评估主要关注工程建设给当地所带来的就业及培训机会、对纳税人的受益程度、对当地社区生活的影响、对文化景观/景点及文化遗产的影响以及当地经济发展的促进作用等。

(3) 工程建设风险评估。工程建设风险评估的主要内容包括工程建设的可行性、工程建设的经济成本、工程建设的环境成本以及工程建设过程中所存在的不确定性。

## 2.2 工程设计与建设

### 2.2.1 工程设计与建设的基本原则

工程设计须遵循以下基本原则<sup>[11-13]</sup>:

(1) 工程建设应当确保当地居民、政府及其他用户受益。

(2) 保证当地能源利用成本的下降并有效防止碳排放及环境污染。

(3) 保护当地环境及传统资源。

(4) 在确保不破坏当地生态及社会系统的前提下，促进地方社会经济的繁荣。

(5) 认识并维护当地传统经济及其同自然环境之间的特殊关系。

### 2.2.2 工程路径确定方法

工程路径的确定根据具体的工程需求和特点以及实际条件而定，一般采用综合方法来确定。工程路径确定的方法和步骤如下<sup>[11-13]</sup>：

(1) 工程选址的限制性条件评估。根据预先制定的工程选址程序，在选取工程路径之前，根据工程终点位置，对工程涉及区域可能的限制条件进行初步评估，首先确定工程建设区域。工程限制条件评估的主要依据包括：1) 野外实地勘察结果；2) 美国地质调查局地形图、航拍图以及 GIS 数据分析结果；3) 同地方及联邦政府商议的结果；4) 自然资源及保护团体的相关意见和建议。

最后利用 GIS 软件将所有上述相关信息在地图上予以标注，形成工程区域的限制条件地图。

(2) 工程路径的确定。在生成区域的限制条件地图之后，随即进入路线选择确定阶段。

对可选路径方案的评估采用系统比较的方法即基于社会效益、环境效应及工程标准等对工程路径可选方案进行综合分析对比，并根据量化的评估结果最终确定具有最低总体影响的路径。工程路径的定量评估旨在作为方案确定过程的辅助，而非工程路径选择的唯一依据。

### 2.2.3 杆塔设计与安装<sup>[10-13]</sup>

(1) 杆塔位置确定。最终杆塔位置的确定将综合考虑以下 3 方面因素：1) 数字勘测结果；2) 对输电线路长度、施工沿线场地清理所需、现场具体地形以及实际的地质、技术条件的评估结果；3) 环境及社会经济因素。

根据详细的工程学分析，最终的线杆位置选择应当尽量减少对环境的不利影响并同时兼顾美学因素。工程学分析结果应当反映当地公众意见。此外，在正式进行更为详细的工程建设之前，线路路径评估还要考虑文化和考古资源、稀有及濒危植物物种资源保护等方面的问题。

(2) 杆塔材质及结构设计。根据实际条件和相关经济因素，杆塔的主体结构可选用木质线杆、金属线杆或线塔。

实际建设中，杆塔可选的结构方案主要包括以下 3 种：1) 非特殊要求的直线架设区间一般采用单独直立钢悬臂木质线杆，即单杆结构(如图 2a、b)；2) 较大跨度或在工程路径同输电线路之间存在较小角度且连接终端装置的情况下，多采用钢筋混凝土  $\pi$  型结构(如图 2c)；3) 如果遇到复杂地形、大的变向线路或经过河道，则需要采用大型钢质线杆、线塔或特殊架线结构，如 V 型拉线铁塔(如图 2d)、X 型拉线铁塔(图 3)等。具体视实际情况而定。

上述杆塔结构中，单线杆形式主要用于低压配网线路，其他形式主要用于高压输电线路。

(3) 杆塔安装布局设计。实际架设时，杆塔的高度一般在 20~40 m 左右，跨度一般为 50~80 m 左右(仅作为参考，具体布局取决于工程规模及实际条件)。杆塔总数则主要取决于工程路径总长及实际的跨度选择。

(4) 杆塔地基及安装形式。杆塔的地基选择主要根据现场的实际条件确定。根据施工现场的冻土条件、基岩深度和覆盖土壤类型可选择的基础类型主要包括简单钻孔岩锚地基和强化桩基或岩石充填的筒基。

杆塔安装形式则主要取决于现场实际情况及作业条件。通常在复杂地形或失稳地带需要重点考虑杆塔的安装形式。

(5) 杆塔设计及安装实例。以美国阿拉斯加 230 kV 北部输电线路<sup>[14]</sup>工程建设为例，受地质条件和可到达性的影响，155 km 的输电线路建设工程被分成了 4 个区段。工程沿线大部分为不连续冻土，输电线路使用期内，该区域的冻土可能变成融化状态，从而导致土壤承载力的根本改变。边缘冻土的地面温度通常高于  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且向下延伸一定深度。因此，在架线设计中充分考虑了在输电线路使用期内边缘冻土发生变化的潜在影响。同时在基础设计时，根据基底冻土的工程特征，特别考虑了当基底冻土性状发生变化时其载荷能力和设施的维护。所有塔基(包括钻孔的和钢管的)的直径 254~1 676 mm 不等，深度 7~24 m。

该工程的 Tanana 平滩段位于阿拉斯加山脉山麓的北坡，输电线路穿越 Tanana 河平滩低地 96 km。该段位使用的杆塔结构为 X 型拉线塔。塔基和锚定处包含单钢管桩。塔基和锚定的设计考虑了 Tanana 平滩土壤的冻结与不冻结两种情况。该设计借鉴了在此前的类似工程建设中因植被破坏而导致冻土退化的教训。

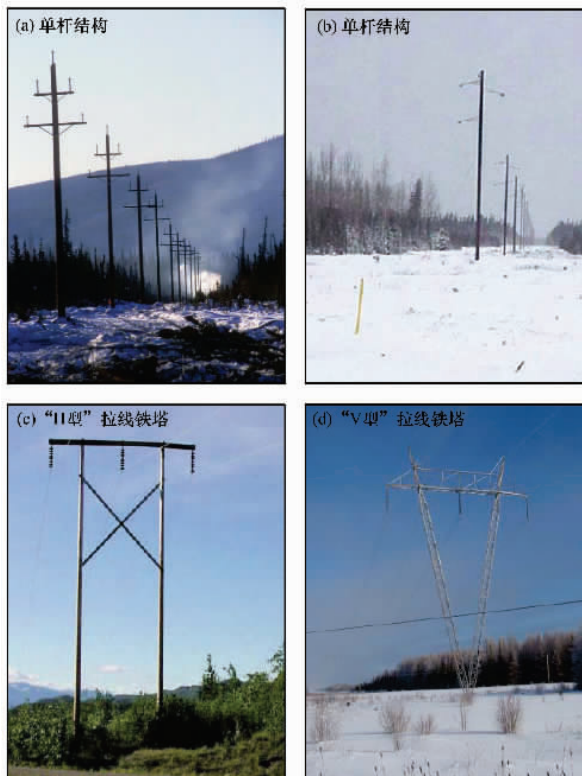


图 2 国外冻土地区输电工程主要架线形式  
 Fig. 2 Main types of pole structure designed in overseas transmission projects

Tanana 平滩的活动层在 0.6~2.4 m 之间. 活动层厚度和黏附力是决定该区域冻胀力较高的最主要因素. 活动层中冻土产生的黏附表面摩擦力引起管桩周围的土壤上隆, 产生作用于管桩的向上的载荷. 在设计之初, 在活动层内的深度是 1.2~1.5

m, 黏附力是  $2.8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Tanana 平滩的不稳定冻土的深度估计为 24 m, 为应对因冻土冻胀变化所产生的影响, 设计中专门开发了评估输电线路沿线冻土冻胀变率的风险评估模型.

Tanana 平滩区安装管桩的最小埋深为 11 m. 对载荷较大的铁塔, 例如大角度拉索塔, 埋深为 25 m. X 型塔在阿拉斯加地区使用历史较长(图 3), 部分原因是由于它能经受相对较高的差分位移. 为了适应基桩的任何差分位移并提供可调节的连接, 同时便于在后来的维护过程中缓解塔腿的升降, 设计了桩夹.

为防止塔架受到巨大压应力产生大的变形, 进而导致塔基开裂且相对于锚桩发生位移, 在输电线路塔架结构中特别采用了剪应力释放机制(图 3). 剪切应力释放机制产生的位置是在双向剪应力的 7 个剪切销处及单剪应力的一个剪切销处. 必要时, 一个剪应销的定位器将销钉处于一个位置且允许相应的小幅度位移. 通过改变使用销钉的数量, 发现释放荷载值处于 3 742~7 484 kg 之间, 对于工程应用是可行的.

2.2.4 工程配套设施建设<sup>[10-13]</sup>

工程配套设施建设主要包括工程道路、设备及材料存放区以及施工营地等的建设.

(1) 工程道路建设. 工程建设所需通道及交通系统设计取决于最终的工程设计方案. 通往输电工程路径的首选通道为当地已有道路. 如果没有适宜的已有通道可选, 则可以选择天然通道如河道和山谷, 或者并行于天然通道设计建造.

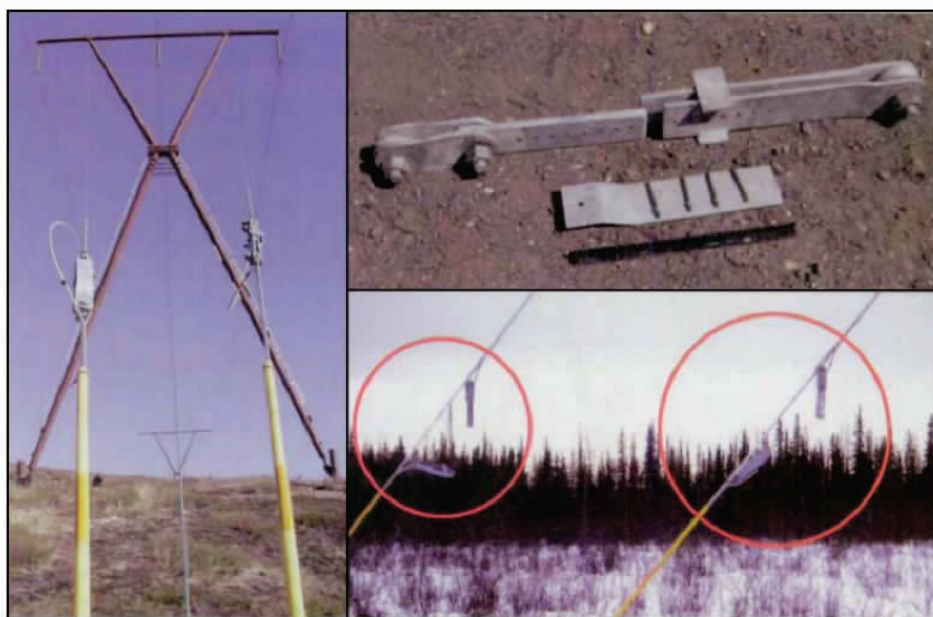


图 3 杆塔的不同剪应力释放机制

Fig. 3 Different shear stress release mechanisms of pole in transmission project

交通道路是整个工程建设、运营和维护所必需的基础设施条件，是整个项目关键的前期建设工程之一。该道路不仅将是工程建设阶段的交通运输所必需，而且在工程建成后，也将成为通往电站的最终通道。

道路规划的基本原则是：应当适宜全天候使用；方便为各主要建设工地进行人员和材料运送。路面宽度一般不超过 12 m。

(2) 设备及材料存放区建设。设备及材料存放区是整个输电工程建设的重要功能区，服务于整个工程建设的设备调配及材料供给，是整个工程建设的基础性配套设施之一。设备及材料存放区建设必须尽可能地集中且布局合理，以最大限度地减少对施工沿线冻土环境的影响。

设备及材料存放区一般建在水道附近的平坦开阔区域，用于工程建设所需混凝土预制件制造、设备装配以及钢管等相关组件的存放。设备及材料存放区的规模视整个工程规模及所需设备及用材规模而定，并根据工程建设需求分段规划布置。

(3) 施工营地建设。施工营地是整个工程建设期施工作业人员集中及临时安置设施。施工营地应当是位于水道上游的平整并铺有沙砾层的开阔区域，邻近已有便道和相关配套设施。施工营地应当满足施工高峰时期人员居住需要，并应配备有与相应人员容纳规模相适应的交通工具以方便工程施工沿线人员的调配。

施工营地建设也必须考虑对冻土的扰动和环境影响，营地饮用水源选择及污水排放等必须获得许可并符合特定的限制性标准。

### 2.2.5 工程建设进度及周期安排

冻土地区输电工程建设进度及周期受自然条件影响显著，在工程建设进度及周期设计中必须重视和考虑季节、天气等因素。同时，出于对工程区域生态系统的保护，还应当考虑工程建设期安排的科学性以将对生态系统的扰动降至最低。例如，加拿大 Carmacks-Stewart/Minto 输电工程在设计和安排工程建设周期和进度时专门考虑了工程区的自然条件及生物物理敏感性，整个施工过程避开了 5 月和 6 月鸟类繁殖季节和雨季<sup>[11]</sup>。

## 2.3 工程维护

工程建成后的维护对保证整个输电线路的正常运行与设计功能的实现至关重要，通常而言，工程维护工作主要包括设施检查与维护、危险品管理以及运行过程中的紧急事件及故障响应。

### 2.3.1 工程设施维护<sup>[10-13]</sup>

(1) 工程路径维护。对输电线路路径的维护主要是在设施运行期间保持沿线路径的通畅，主要取决于线路附近树木的生长高度和危险林木与线路的接近程度。一般对沿线林木的清理每 7~10 a 进行一次。

(2) 输电线路维护。输电线路的维护包括日常维护和定期维护。日常维护主要是对输电线路部件进行保养和对工程区域进行清理。定期维护主要是线路巡查和维修，由操作人员和工程人员对线路至少每年进行一次全面的检查。巡查主要包括对设施结构位移、绝缘器损坏情况、线路的人为破坏情况以及其他危害输电线路正常运行情况的检查。

对整个输电线路的维护手段主要包括利用直升飞机和地面巡逻车对线路进行常规巡查和维护。直升飞机主要用于春季、初秋和冬季的维护作业；冬季则主要以越野车辆为主。冬季封冻期及冻土条件下的大规模维护需要专门的维护设备；在紧急情况下还必须采用紧急维护措施，避免电力输送中断。

### 2.3.2 燃料及危险品管理<sup>[10-13]</sup>

建立配套的燃料及危险品管理制度是维护工程沿线冻土地区环境及生态系统健康以及确保整个工程运行及工作人员生命安全的基本保障，具体包括对工程沿线危险物品及时清理，确保工程附近水源和交通设施安全，建立工程建设过程中燃料及危险品的登记管理体系（如加拿大的“工程地点危险物品信息系统（WHMIS）”）以及工程施工剩余物资回收制度等。

以加拿大 Mayo B 发电项目输电工程<sup>[12]</sup>为例，在正常运行阶段，所有燃料必须按规定在专门指定的存放点安置，全部采用二次容器标准并同时配备渗漏监测和恢复系统。同时为确保安全，工程办公室建立了渗漏响应预案并配备专门设备及紧急响应小组。

### 2.3.3 紧急事件、事故及故障响应<sup>[10-13]</sup>

由于冻土地区输电工程的特殊性，加拿大和美国对此方面的要求十分严格，紧急事件、事故及故障响应方案设计为工程设计的必需要素，并成为工程评估的重要环节。

相应预案包括：通信、配备专业紧急响应人员、地下水溢流应对措施、空中及地面支持措施、急需物资储备等。如果遇到自然灾害等紧急情况，还需要地方和政府紧急响应措施的援助。

紧急情况下，必须对工程沿线的电信设施予以

保护,无线电通信系统将确保对故障点的实时监控。直升飞机将被用于跟踪线路损坏情况以及迅速重建和替换受损输电线杆。

此外,为防止输电系统的突发故障,将与工程同步配套建设备用发电设施。

### 3 对于我国冻土地区输电工程建设的有益借鉴

目前,我国在冻土地区输电工程建设方面尚处于探索阶段。在工程前期评估、工程施工、生态环境保护以及输电工程运营等工程建设及运营的诸多环节均缺乏相应的制度化的管理体系和执行机制,积极借鉴国际上相关成功经验可以有效加快我国相关管理体系与执行机制的建设进程。基于对加拿大和美国相关工程建设案例的分析,总结得出以下可资借鉴之处:

(1) 建立制度化的工程评估机制。有必要借鉴加拿大和美国的相关做法,建立专门针对冻土地区输电工程建设的评估机制。评估的重点应集中在工程建设的生态系统影响及环境风险评估。冻土地区生态系统十分脆弱,同时可能蕴含着独特的自然及人文资源。评估的最终目标是确定工程建设所带来的生态系统影响及环境风险的程度,以及这种影响和风险是否可控;在工程建设的环境成本低于其预期社会经济效益的前提下,寻求确保环境成本最小化与社会经济效益最大化的可行方案。

(2) 完善并严格执行工程设计及建设的相关技术规范及国家标准。尽快建立完善的冻土地区输电工程相关设计规范、工程建设施工及技术标准并予以严格执行,对于维护冻土地区环境及生态系统健康和确保工程质量至关重要。特别对于环境及安全风险较高的建设环节,有必要借鉴国外做法,建立工程设计及方案论证的法定程序以及相关规范和标准的执行监督机制。

(3) 建立工程建设过程环境危险源管理制度。为尽可能避免工程建设对冻土地区环境所造成的不利影响,在加拿大和美国,冻土地区工程建设过程中的燃料及危险品管理已经被列为约束性的国家法定程序,是工程设计及建设的必需环节。建立燃料及危险品管理体系不仅是降低工程环境风险的有效措施,而且是工程建设与运营安全以及公众健康的基本保证。冻土地区输电工程燃料及危险品管理制度应当贯穿工程建设的整个过程,其主要内容包括:工程建设所需燃料及危险品使用及流通制度、

燃料及危险品存放标准及管理制度、燃料及危险品回收制度以及燃料及危险品泄漏处置及应急响应制度。

(4) 建立有效的事故及故障响应机制。为确保工程建设及运行安全,最大限度降低事故及故障所造成的危害或不利影响,应当预先建立完善事故及故障响应机制。事故及故障响应机制的具体制定应当针对不同事故和故障类型、不同事件级别,涉及内容包括事故及故障响应与处理程序、事故及故障响应与处理责任人员的组成、事故及故障影响评估、事故及故障责任追究以及事故损失与故障恢复等。

### 参考文献(References):

- [1] Zhou Youwu. Encyclopedia of China [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1993: 636. [周幼吾. 中国大百科全书 [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1993: 636.]
- [2] Wu Qingbai, Tong Changjiang. Permafrost change and stability of Qinghai-Tibet Highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(4): 350-355. [吴青柏, 童长江. 冻土变化与青藏公路的稳定性问题 [J]. 冰川冻土, 1995, 17(4): 350-355.]
- [3] Li Dongqing, Chang Fa, Zhang Kun, et al. Preliminary analysis of engineering effect of crushed rocks mat embankment in Heimache section of Qinghai-Tibet Highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1081-1087. [李东庆, 常法, 张坤, 等. 青藏公路黑马河试验段碎石垫层路基工程效果初步分析 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1081-1087.]
- [4] Sun Yongfu. Permafrost engineering in the Qinghai-Tibet Railway: Research and practice [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 153-162. [孙永福. 青藏铁路多年冻土工程的研究与实践 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 153-162.]
- [5] Li Yong, Han Longwu, Xu Guoqi. Research on stability of embankment in permafrost regions along Qinghai-Tibet Railway and its control [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 880-883. [李勇, 韩龙武, 许国琪. 青藏铁路多年冻土路基稳定性及防治措施研究 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 880-883.]
- [6] He Ruixia, Jin Huijun, Lü Lanzhi, et al. Permafrost and environmental problems along the Golmud-Lhasa oil product pipeline and their mitigation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 18-27. [何瑞霞, 金会军, 吕兰芝, 等. 格尔木-拉萨成品油管道沿线冻土工程和环境问题及其防治对策 [J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 18-27.]
- [7] Bonnaventure P P, Lewkowicz A G, Kremer M, et al. A permafrost probability model for the southern Yukon and northern British Columbia, Canada [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2012, 23(1): 52-68.
- [8] Lewkowicz A G, Etzelmüller B, Smith S L. Characteristics of discontinuous permafrost based on ground temperature meas-

- urements and electrical resistivity tomography, southern Yukon, Canada [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2011, **22**(4): 320–342.
- [9] Jorgenson M T, Shur Y L, Pullman E R. Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(2), DOI: 10.1029/2005GL024960.
- [10] SNC-Lavalin Engineers and Constructors. Victor Mine Power Supply Environmental Study Report [R]. Toronto, Ontario: SNC-Lavalin, 2005. [http://www.debeerscanada.com/files\\_2/pdf\\_documents/victorea\\_2004/Victor\\_Mine\\_Power\\_Supply/08\\_section-4-project-description.pdf](http://www.debeerscanada.com/files_2/pdf_documents/victorea_2004/Victor_Mine_Power_Supply/08_section-4-project-description.pdf).
- [11] Yukon Energy Corporation. Carmacks-Stewart/Minto Transmission Project [EB/OL]. [http://www.yukonenergy.ca/downloads/db/650CS\\_proposal\\_YECAB.pdf](http://www.yukonenergy.ca/downloads/db/650CS_proposal_YECAB.pdf).
- [12] Yukon Energy Corporation. Mayo Hydro Enhancement Project [EB/OL]. [http://www.yukonenergy.ca/downloads/db/894chapter\\_6\\_final.pdf](http://www.yukonenergy.ca/downloads/db/894chapter_6_final.pdf).
- [13] Northern Pass Transmission LLC. Special Use Permit Application Northern Pass Project [EB/OL]. [http://www.northernpass.us/home/uploaded\\_file/Tom\\_Wagner\\_Letter\\_WM-NF\\_June\\_28.pdf](http://www.northernpass.us/home/uploaded_file/Tom_Wagner_Letter_WM-NF_June_28.pdf).
- [14] Wyman G E. Building Transmission in Subarctic Alaska [EB/OL]. [http://tdworld.com/overhead\\_transmission/transmission-subarctic-alaska-20100301/index1.html](http://tdworld.com/overhead_transmission/transmission-subarctic-alaska-20100301/index1.html).

## Analysis on the Construction Practices of Transmission Projects in Permafrost Regions in Canada and the United States

ZHANG Shu-liang, GAO Feng, NING Bao-ying, MA Han-qing

*(The Lanzhou Branch of the National Science Library/The Scientific Information Center for Resources and Environment, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)*

**Abstract:** International practices of transmission projects in permafrost regions have significance to similar projects or relative research in China.

Take the transmission projects in Yukon Territory of Canada and Alaska as examples, relative practice and successful experiences are systematically analyzed and summarized covering the whole process from pre-project program, project design

and construction to maintenance during operation.

Then, the important lessons which can be learned from international practices are discussed from the following respects: improvement of project evaluation system, establishment of construction criteria and technical standards, environmental risk control and maintaining safety of project operation and management.

**Key words:** permafrost; transmission project; construction practice; Canada; United States