

Discussion on Isopotential Connection Problem Based on Metal Pipeline Flanges

Yuliang Li¹ Hao Ye¹ Xiaoqian Lai² Yang Liu³

1. China Petroleum Xinjiang Oilfield Branch Company Materials and Equipment Department, Karamay, Xinjiang, 834000, China

2. China National Petroleum Corporation Xinjiang Oilfield Branch Development Company, Karamay, Xinjiang, 834000, China

3. Oil Production Plant No.1 (Hongshan Company), Xinjiang Oilfield Branch, China National Petroleum Corporation, Karamay, Xinjiang, 834000, China

Abstract

This paper challenges the scientific validity of the 0.03Ω threshold for flange connection resistance specified in the “Code for Lightning Protection Design of Buildings” (GB 50057-2010). Through theoretical analysis, testing verification, and standard comparison, it is found that this threshold lacks physical basis and data support: the transition resistance of conventional four-bolt flanges is typically far below 0.03Ω , and neither international standards (e.g., IEC) nor engineering practices contain similar provisions. The clause exhibits a disconnect between theory and practice, which may lead to engineering redundancy or safety hazards. It is recommended to conduct a systematic review and revision of this clause and related standards.

Keywords

pipeline; flange; standard; lightning; static electricity; bolt; bridging

基于金属管道法兰间等电位连接问题探讨

李昱靓¹ 叶浩¹ 赖晓倩² 刘扬³

1. 中国石油新疆油田分公司物资设备部, 中国·新疆 克拉玛依市 834000

2. 中国石油新疆油田分公司开发公司, 中国·新疆 克拉玛依市 834000

3. 中国石油新疆油田分公司采油一厂(红山公司), 中国·新疆 克拉玛依市 834000

摘要

本文质疑《建筑物防雷设计规范》(GB 50057-2010)中法兰连接电阻 0.03Ω 阈值的科学性。通过理论分析、检测验证与标准对比,发现该阈值缺乏物理依据与数据支撑:常规4根螺栓的法兰过渡电阻通常远低于 0.03Ω ,且国际标准(如IEC)及工程实践均无类似规定。该条款存在理论与实际脱节,易导致工程冗余或安全隐患,建议对其及相关标准开展系统审查与修订。

关键词

管道; 法兰; 标准; 雷电; 静电; 螺栓; 跨接

1 引言

在石油石化行业中,输送易燃易爆介质的金属管道普遍存在,法兰连接部位易成为雷电与静电积聚的风险点,其连接电阻的大小及可靠性直接关系到系统的整体防雷与静电防护效果。现行标准规定:法兰过渡电阻大于 0.03Ω 时应进行跨接,但不少于5根螺栓的法兰在非腐蚀环境下可豁免。该条款以“螺栓数量”作为判定依据,条款存在理论依据不足、可操作性不强的问题,不仅造成工程冗余,还可能

引入潜在风险。导致企业普遍对4根螺栓的法兰实施跨接,相关实践日益普遍,耗费大量人力物力,却未对安全防护带来实质提升,实属本末倒置。为此,建议对该条款及相关标准展开系统评估与修订。

2 金属管道法兰过渡电阻阈值(0.03Ω)的来源与应用探究

本文通过文献研究与标准溯源发现,我国关于金属管道法兰间需进行跨接的规定最早见于已废止的《建筑物防雷设计规范》(GB 50057-94)第3.2.2条。该条款规定:当法兰等连接处过渡电阻大于 0.03Ω 时,应采用金属线跨接;而对螺栓数量不少于5根的法兰,在非腐蚀环境下允许免于

【作者简介】李昱靓(1986-),男,中国甘肃酒泉人,本科,工程师,从事机械、设备研究。

跨接。

然而，该 $0.03\ \Omega$ 阈值在工程实践中存在显著问题。由于法兰间实际接触电阻通常处于毫欧级甚至更低，常规工程检测仪表难以准确测量，必须依赖精密电阻测试仪器等专业设备，导致现场测试可操作性差。为避免监管风险，施工单位普遍对四根螺栓法兰采取“一刀切”式跨接，不仅增加工程成本，也带来不必要的运维负担^[1]。

针对该阈值的来源，咨询相关标准起草者及行业专家均未能提供明确依据。进一步对比国际标准，如 IEC TS 60079-32-1:2013《爆炸性环境 第 32-1 部分：静电危害指南》与 IEC 62305-3:2010《雷电防护 第 3 部分：建筑物的实体损害与生命危险》，其中均未设定类似 $0.03\ \Omega$ 的电阻阈值，也未提出对金属管道法兰进行跨接的要求。

当前，关于金属管道法兰是否必须跨接、 $0.03\ \Omega$ 阈值是否科学、以及“五根螺栓免跨接”规定的合理性，已在石油化工等行业引发广泛讨论。该问题本质上已超越单纯的技术实施层面，触及规范本身的科学性与适用性，亟需开展系统性的研究与论证，以推动相关标准的科学修订与工程实践的合理优化。

3 金属管道法兰跨接规范条款解读与标准差异性分析

自 GB 50057-94 发布至今近三十年来，其关于法兰跨接的规定已广泛渗透于石油石化行业相关标准体系。据不完全统计，包括 GB 15599-2009《石油与石油设施雷电安全规范》在内的 6 项国家标准，以及 SY/T 0060-2017《油气田防静电接地设计规范》等 5 项行业或企业规范，均涉及管道法兰跨接要求^[2]。

绝大多数标准延续或引用了 GB 50057-94 第 3.2.2 条的内容，部分标准虽进行了一定修改，但其技术源头仍基本一致。值得注意的是，金属管道法兰跨接的初始设置目的是一类防雷建筑物的防闪电感应措施，而非防静电。然而在上述 11 项相关条款中，仅 GB 50057-2010 第 4.2.2 条与 GB 15599-2009 第 4.7.1 条明确基于雷电防护目的设立，其余条款多将适用范围扩展至静电防护，反映出当前标准体系中存在雷电防护与静电防护概念交叉、目的模糊的问题。

关于跨接判定条件，现行条款存在逻辑不一致现象：前半部分以过渡电阻是否大于 $0.03\ \Omega$ 作为跨接依据，后半部分却以螺栓数量 (≥ 5 根) 及非腐蚀环境作为豁免条件，

二者未能形成统一的技术逻辑。从工程本质而言，跨接的核心判断应为过渡电阻值：只要过渡电阻 $\leq 0.03\ \Omega$ ，无论螺栓数量多少均可免于跨接；反之若过渡电阻 $> 0.03\ \Omega$ ，则即便螺栓数量 ≥ 5 也应进行跨接。现行以螺栓数量作为豁免依据的做法，与跨接措施的真实防护目的存在偏差。

与此同时，不同标准之间也存在显著差异。例如：GB 50257-2014 规定采用金属螺栓紧固的法兰，可不另设跨接线；SH/T 3097-2017 指出通常可不设静电跨接线；SY/T 6885-2020 说明在保证电气导通的前提下可不跨接。

国内外标准在管道法兰跨接规定上存在较大差异，这一现象已给油气田工程设计、施工、运行及监管带来显著困惑^[3]。当前亟需开展系统研究，厘清跨接措施的技术本质与适用范围，推动相关标准的协调统一，以提升工程实践的科学性与可操作性。

4 螺栓与跨接线电阻值对比分析

理论计算结果表明，法兰连接所使用的螺栓自身电阻远低于常规跨接导线的电阻。以典型规格为例：

- (1) 4 根 M12 螺栓的并联电阻值，仅为 4mm^2 、 300mm 长 BVR 铜跨接导线电阻的 $1/150$ ；
- (2) 4 根 M16 螺栓的并联电阻值，约为 6mm^2 、 300mm 长 BVR 铜跨接导线电阻的 $1/142$ ；
- (3) 4 根 M18 螺栓的并联电阻值，仅为 8mm^2 、 300mm 长 TZX 编织铜导线电阻的 $1/115$ 。

由此可见，4 根螺栓连接的法兰过渡电阻，显著低于常用规格铜跨接导线的电阻，其实际值也远低于现行标准中 $0.03\ \Omega$ 的阈值。相关规范中“当法兰连接处过渡电阻大于 $0.03\ \Omega$ 时需进行跨接”的要求，在电工学理论上缺乏支持依据。

5 法兰间过渡电阻检测分析

5.1 法兰过渡电阻现场检测背景

鉴于国内外标准在管道法兰跨接要求上存在差异与争议，中国石油新疆油田以及塔里木等油田多种工况下的管道法兰连接处过渡电阻进行了系统性检测验证，检测数据汇总表 1。

5.2 实测数据统计

对运行 1 ~ 5 年、6 ~ 10 年、11 ~ 15 年、16 ~ 20 年及 20 年以上的 792 组金属管道法兰进行随机抽样检测。实测电阻最大为 $1.8\text{m}\Omega$ ，最小为 $0.8\text{m}\Omega$ ，平均为 $1.3\text{m}\Omega$ 。

金属导体在 20°C 时的电阻率表

材质	电阻率 / $\Omega \cdot \text{m}$	备注
铜	$\rho = 1.75 \times 10^{-8}$	在 20°C 时环境下
铁	$\rho = 9.78 \times 10^{-8}$	

铜质跨接线与铁质螺栓电阻值比对分析表

跨接材质	理论计算值	备注
螺栓电阻 (4根)	M12(螺栓) = $9.78 \times 10^{-8} \times 30 \div 84 \div 4 = 8.7\mu\Omega$	M12螺栓有效面积按 84mm ² 计算
	M16(螺栓) = $9.78 \times 10^{-8} \times 40 \div 157 \div 4 = 6.2\mu\Omega$	M16螺栓有效面积按 157mm ² 计算
	M18(螺栓) = $9.78 \times 10^{-8} \times 45 \div 192 \div 4 = 5.7\mu\Omega$	M18螺栓有效面积按 192mm ² 计算
铜跨接导线 电阻	S4 (mm ²) = $1.75 \times 10^{-8} \times 300 \div 4 = 1312\mu\Omega$	跨接线长度按 300mm 计算
	S6 (mm ²) = $1.75 \times 10^{-8} \times 300 \div 6 = 880\mu\Omega$	
	S8 (mm ²) = $1.75 \times 10^{-8} \times 300 \div 8 = 660\mu\Omega$	

四根螺栓电阻与跨接线电阻的比值

螺栓型号(直径 × 长度)	M12 × 30 (mm)	M16 × 40 (mm)	M18 × 45 (mm)
4根螺栓的电阻值(uΩ)	8.7	6.2	5.7
铜跨接导线规格型号	BVR 铜跨接导线 4mm ²	BVR 铜跨接导线 6mm ²	TZX 编织铜导线 8mm ²
铜跨接导线电阻(uΩ)	1312	880	660
R 铜电阻 /R 铁电阻	150	142	115

表 1 金属法兰过渡电阻检测汇总表

企业	运行时限(年)	测试法兰(对)	平均电阻值(mΩ)	法兰垫片材料	输送介质
新疆油田公司	1-10	58	1.6<<30mΩ	金属缠绕和聚四氟乙烯垫	含水原油、天然气、甲醇、轻烃
	11-15	98	1.8<<30mΩ	金属缠绕和聚四氟乙烯垫	含水原油、天然气、甲醇、轻烃
	16-20	165	0.9<<30mΩ	金属缠绕和聚四氟乙烯垫	含水原油、天然气、污水、清水
	20 以上	261	0.8<<30mΩ	金属缠绕垫片和聚四氟乙烯片和非石棉纤维橡胶垫	含水原油、净化原油、乙二醇管线、天然气、导热油
克拉玛依石化公司	11-15	126	1.1<<30mΩ	石墨金属缠绕垫	清水
塔里木油田	11-15	56	1.7<<30mΩ	石墨金属缠绕垫	原油、天然气、污油、含油污水
吐哈油田	16-20	28	1.2<<30mΩ	石墨金属缠绕垫	天然气
	合计	792	1.3<<30mΩ		

5.3 检测结果分析

表 1 数据表明：无论是否设置跨接线、螺栓数量多少、垫片材质类型、运行年限长短或输送介质种类，均未对法兰过渡电阻产生实质性影响。所有实测电阻均远低于标准规定的 0.03Ω 阈值。金属螺栓连接本身已具备可靠且充分的电气导通能力，额外增设跨接导线在实际防护中并无显著作用。

5.4 过渡电阻关键影响因素

法兰间过渡电阻主要取决于连接紧密性，而非螺栓数量^[4]。理论计算与实测数据均表明，4根螺栓的总导电截面积远大于常用铜跨接导线，其电阻仅为跨接线的约 1/115 至 1/150。只要法兰连接紧固、密封良好，无论螺栓数量多少，均可持续保障静电与雷电流的可靠泄放。因此，对螺栓数量少于 5 根的法兰强制要求跨接缺乏必要性。

5.5 防雷与静电接地电阻标准对比

现行《防静电安全技术规程》(SY/T 7385-2017)与《石油管道防雷防静电与接地技术规范》(Q/SY 05268-2017)分别规定：静电接地电阻一般不超过 100Ω，山区不超过 1000Ω；一类防雷建筑物共用接地电阻不超过 10Ω。这些要求均远高于 0.03Ω 的法兰过渡电阻阈值，进一步说明该

阈值的设定与实际防护需求脱节。该矛盾也反映出相关标准在制定过程中存在不严谨、不协调的问题，给工程设计、施工、运维及监管带来困扰。

5.6 强制跨接引发的工程风险

法兰密封依赖螺栓的均匀弹性压紧。若在螺栓上安装跨接线端子，可能因铜质端子的塑性变形导致压紧力分布不均，进而引起法兰密封面泄漏。此外，铜与钢法兰之间的电偶腐蚀风险也可能影响连接长期可靠性。

5.7 防腐涂层对导通性的影响

部分专家观点担忧法兰防腐涂层可能导致绝缘。工程实际中，螺栓紧固所产生的压力足以破坏涂层并建立有效电气连接，且法兰通常在安装前并不进行整体涂装。因此，螺栓连接处因涂层而完全绝缘的可能性极低。

6 IEC 防雷标准中的跨接规定

IEC 62305-3:2010《雷电保护 第 3 部分：建筑物的物理损坏和生命危险》第 6.2.2 条指出，金属装置的防雷电等电位连接应满足以下要求：在需要保护的建筑物内部，若气体或水管线因工艺设计原因采用了绝缘部件，方可使用导线进行跨接。该条款明确了跨接措施仅适用于存在绝缘隔离的特

殊情况,并非普遍性要求^[5]。

IEC 防静电标准中的连接要求

IEC TS 60079-32-1:2013《爆炸性环境 第32-1部分:静电危害指南》第13.3.1.3条对管道连接作出规定:金属管道上的所有接头通常不需要设置等电位连接件,仅在没有形成金属与金属直接接触时,才建议采用跨接措施。

7 国际标准与工程实践对比

综合比较 IEC 相关雷电与静电防护标准,均未对金属管道法兰设定强制跨接或等电位连接的普遍条款。在欧美国家石油石化行业的工程实践中,也未将金属线跨接作为常规技术要求。这进一步表明,我国现行规范中基于螺栓数量与固定电阻阈值的跨接规定,缺乏国际标准支持,与通行工程实践存在显著差异。

8 结语

金属管道法兰跨接条款在我国规范体系中存在时间跨度长、影响范围广,已持续被多项国家标准与行业规范所引用,对石油石化等行业的工程设计、施工及运维管理造成了深远影响,其合理性与必要性亟待重新审视。

本研究表明,通过理论计算与检测数据分析,在确保

法兰连接紧密、密封可靠的前提下,无论采用几根螺栓连接,其过渡电阻均远低于 0.03Ω 的规定阈值。同时,国际主流标准(如 IEC)及欧美等国家的工程实践中,均未对金属管道法兰连接设置作出要求,进一步反映出我国现行条款缺乏充分的国际依据与实际工程支撑。

因此,当前关于金属管道法兰强制采用金属线跨接的规定,在技术逻辑与工程实效上均存在显著缺陷。建议相关标准化机构组织系统论证,尽快推动该条款的废止或实质性修订,以促进我国防雷防静电规范体系更加科学、协调,并与国际通行实践接轨。

参考文献

- [1] GB 50057-2010《建筑物防雷设计规范》[S],第15页第4.2.2条.
- [2] GB 50257-2014《电气装置安装工程爆炸火灾危险环境电气装置施工及验收规范》[S],第23页第7.2.1条第4款.
- [3] SY/T 6885-2020《油气田及管道工程雷电防护设计规范》[S],条文说明第44-45页第6.2.2条.
- [4] SH/T 3097-2017《石油化工静电接地设计规范》[S],第7页第5.3.4条.
- [5] IEC TS 60079-32-1: 2013《爆炸危险环境第32-1部分:静电危险指南》[S],第79页第13.3.1.3条.