

# The Analysis of Generator Hydrogen-Cooled Piping Vibration

Wuzhuang Yao

Department of Thermolectric, Tianjin Branch, Sinopec, Tianjin  
Email: [530931606@qq.com](mailto:530931606@qq.com)

Received: Mar. 15<sup>th</sup>, 2015; accepted: Mar. 25<sup>th</sup>, 2015; published: Mar. 30<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Generator hydrogen-cooled piping vibration produces great threat to the normal and safe operation of generator and hydrogen-cooled pipeline, furthermore affecting the safety and reliability of the power plant. To ensure the normal and safe operation of the generator, it is necessary to make analysis on the mechanism of hydrogen-cooled pipe vibration. This paper has analyzed the causes of pipeline vibrations and finds that generator vibration transmission and unreasonable piping design are the main cause of hydrogen-cooled piping vibration. The suggestion and measures that are piping exciting force reduction and piping vibration characteristics improvement to control hydrogen-cooled piping vibration are given. The study of this paper can provide technical support for hydrogen-cooled piping vibration treatment work in power plant.

## Keywords

Generator Hydrogen-Cooled Pipeline, Vibration, Exciting Force, Vibration Characteristics

---

# 发电机氢冷管道振动分析研究

姚武装

中石化股份有限公司天津分公司热电部, 天津  
Email: [530931606@qq.com](mailto:530931606@qq.com)

收稿日期: 2015年3月15日; 录用日期: 2015年3月25日; 发布日期: 2015年3月30日

## 摘要

发电机氢冷管道振动对发电机及氢冷管道的正常安全运行产生极大的威胁, 进而影响整个电厂运行的安全性和可靠性。为了保证发电机的安全运行, 有必要对氢冷管道的振动机理进行分析研究。本文分析了管道振动的原因, 认为发电机振动传递和管道设计不合理是引起氢冷管道振动的主要原因, 并分别从消减管系激振力与改善管系振动特性两方面, 提出了控制氢冷管道振动的措施, 为电厂发电机氢冷管道振动治理提供了一定的技术支持。

## 关键词

发电机氢冷管道, 振动, 激振力, 振动特性

## 1. 引言

发电机氢冷系统对于发电机能否正常安全运行起到了重要的作用。发电机在运行中发生能量损耗, 包括铁芯和转子绕组的发热、转子转动时气体和转子之间的鼓风摩擦发热, 以及励磁损耗、轴承摩擦损耗等, 这些损耗最终都将转化为热量, 致使发电机发热。发电机内的氢气在发电机内部作闭式循环流动, 使发电机的铁芯和转子绕组得到冷却。其间, 氢气流经氢气冷却器, 氢冷器中循环的冷却水将带走氢气自发电机循环置换出的热量, 为发电机铁芯及转子绕组提供温度、压力符合要求的氢气, 以保证发电机的正常安全运行。

由于电厂发电机振动、氢冷管道局部设计不合理, 管道支吊架配置不当等原因, 导致了氢冷管道在运行中经常发生振动, 对发电机的正常安全运行造成了重大威胁。强烈的管道振动不仅会使管道附件发生松动失效, 而且振动产生的惯性力会使管道局部尤其是管道连接处发生疲劳破坏, 轻则引起泄露, 重则引起断裂造成停机等重大事故[1]。因此, 对发电机氢冷管道振动原因进行分析研究, 提出合理的解决方案, 将管道振动控制在一定范围内具有相当的实际意义。

## 2. 管道振动原理及常见类型

### 2.1. 振动原理

管道振动的实质就是管道及与之相连接的设备、装置及支吊架所构成的复杂结构系统在复杂空间激励力系作用下所呈现的振动响应[2], 图 1 表示管道在激振力作用下引起振动的数学模型。

管道系统是由集中的、非理想化的弹性组件构成的复杂连续系统, 在力学模型上, 可以应用多自由度线性阻尼系统的运动方程来进行管系的振动分析。根据振动理论, 多自由度系统振动微分方程为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

式中  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为管系的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵;  $\ddot{X}$ 、 $\dot{X}$ 、 $X$  分别为管系结构点的加速度、速度和位移的  $n$  阶列向量;  $F$  为管系结构承受的激振力列向量。由式(1)可以看出管系振动的激振力、结构特性、振动响应三者之间存在确定的关系, 可以相互计算得到, 这为解决管系振动问题提供基本理论。

### 2.2. 管道振动常见类型

管道振动分析主要是研究管道的外界激励、自身响应、以及管道自身的振动特性方面。引起管道振动的主要原因是对外界激励的响应以及管道内流体流动紊乱这两个方面。常见的管道振动有以下几种类型:



Figure 1. Mathematical model of piping vibration  
图 1. 管系振动数学模型

### 2.2.1. 机械振动

旋转机械的转动部分在生产制造、安装调试、生产运行以及检修维护过程中，都可能对其造成损伤，引起设备的振动。旋转机械自身振动对与之相连接的管道产生的影响为：

- 1) 转动机械自身振动对管道产生与之频率相应的强迫激励，引起管道的振动响应[3]；
- 2) 转动机械的振动频率与管道本身固有频率相等或相近时，可能会导致管道的强烈共振。

### 2.2.2. 流体脉动

电厂管道输液通常是通过泵加压来提供动力，由于泵加压方式的不连续性，管道内流体的压力在平均值上、下波动，产生了脉动压力，此脉动压力将激励管道，引起管道的振动响应。当管道对此脉动力产生的振动响应频率与其自身的固有频率相等或相近时，管道会发生共振，破坏管道安全运行[4]。

### 2.2.3. 流体动反力

流体在流经弯头、变径管、节流元件、阀门以及三通等时，流体的流动将发生变化，流体在管道中的压力、速度是不稳定的，即流体在管道中的动量是变化的，故而产生了较大的动反力作用于管道，引起管道振动[5]。

### 2.2.4. 汽液两相流

当流体在管道中流动，尤其是流经节流元件时，流体压力由于沿程阻力或局部阻力而下降。当流体压力降至饱和压力以下，部分液体将汽化，产生气泡。两相流由于密度的不同导致流动状态的变化，对管道产生了不均匀应力，造成了管道的振动。

### 2.2.5. 水锤现象

当管道阀门突然启闭时，流体流动状态突然发生改变，使管道内水压形成压缩波或膨胀波，并在管道内周期性地传递衰减至压力稳定，这种现象称为水锤[6]。水锤现象对管道产生较大的冲击力，而且水锤波频率与管道固有频率相等或相近时，将引起管道共振。

## 3. 发电机氢冷管道振动分析

发电机氢冷管道属于常温管道，管内流体温度为 20℃~50℃。管道内流体流速较小，激振力频率较低。通过一些工程数据来看，管道振动总体特征为低频高幅，而其主要影响因素为以下两个方面。

### 3.1. 发电机振动传递

发电机在运行过程中，由于电磁方面(如转子绕组存在匝间短路、失磁等)和机械方面(如中心不正、转子转动不平衡等)的原因[7]，引起了发电机振动。发电机振动时将其振动能量传递与之相连的氢冷管道，氢冷管道便会产生与发电机振动频率一致的强迫振动。当发电机振动频率与氢冷管道自身固有频率相等或相近时，进而会引发管道的强烈共振。

### 3.2. 管道设计不合理

为了满足汽水管道的正常安全运行，在设计之时，会对其进行力学分析，以保证管道的应力水平能

满足标准规范的要求。管道的应力分析分为静力分析和动态分析。静力分析是计算持续作用在管道上静力载荷，它又分为一次应力和二次应力；一次应力为了平衡自身重量、管道内流体压力、管道外部载荷而产生的应力；二次应力是指为了克服和约束载荷产生形变而产生的应力，它不是对外部载荷的响应，而是满足管道自身的变形。动力分析主要是管道的振动分析，进行动力分析主要是保证管道在静力分析的基础上有效的控制管道振动。大量的工程实例表明，多数氢冷管道设计时只进行了静力分析，没有考虑管道的动态特性。由于氢冷管道是常温管道，管道的热膨胀几乎可以忽略。管道的布置及相关支吊架的配置仅仅是满足了管道强度需求。

管道设计的不合理是引起管道振动的重要因素，这种不合理主要体现在以下两点：

1) 由于管道自身结构设计参数不当以及管道的约束条件不合理，使得管道本身的固有频率过低，管道的柔性过大，一旦外部激振力频率或者管道内流体脉动频率与管道固有频率相等或相近，将产生强烈的共振。即使激振力很小，也会引发管道强烈的振动。

氢冷管道是一个复杂的连续弹性体，其振动问题可以视为有限多个质点多自由度的振动系统。对于一定质量的无阻尼系统，其频率方程如式(2)所示：

$$|K - \omega^2 \cdot M| = 0 \quad (2)$$

式中  $K$ 、 $M$ 、 $\omega$  分别为管道的刚度矩阵、质量矩阵、各阶固有频率。

由式(2)可以看出，管道的固有频率与其质量矩阵和刚度矩阵有关。管道的质量矩阵与其结构参数及布置有关，即管道结构参数选择不当或管系布置不合理都会引起管道的固有频率过低，故而在设计之初，对管道合理选型及合理布置都对管道的固有频率有重要影响。但管道布置一旦确定，其质量矩阵将无法改变。那么管道的刚度是影响管道固有频率的主要因素，也是提高管道固有频率的突破口。由式(2)可以看出管道刚度越小，管道的固有频率也会随之变小。发电机氢冷管道大多采用了限位支吊架或刚性吊架的约束方式。此方式限制住了管道在垂直方向上的位移，但管道水平方向的约束几乎没有。而且由于约束少导致整个管道的刚度较小，进而导致其固有频率过低，较容易与激振力产生共振。

2) 出于对管道的柔性设计，管道布置了许多弯头来改变管道的走向，以确保管道满足其应力需求。管道内流体流经弯头时，一方面由于流体脉动引起作用在管壁的流体动量成周期性脉动状态，引发管道振动，另一方面流体的流动状态在弯头处发生变化，流体的流场发生改变，产生了复杂的激振力作用于管道，引起了管道振动。

图2表示流体脉动对弯头的作用。如图所示流体脉动压力为  $P$ ，管道的通流面积为  $S$ ，弯头的角为  $\beta$ ，则作用在管道上的脉动力沿弯头分量的合力  $R$  为：

$$R = 2PS \sin \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

由式(3)可以看出  $R$  随  $\beta$  增大而增大。 $P$  是周期性变化的，所以  $R$  也随时间周期性变化。流体脉动对弯头的作用可以用脉动压力分析方法计算得到。

## 4. 氢冷管道振动对策

由式(1)可以看出，对氢冷管道振动的控制可以从以下两个方面来着手：消减管系的激振力和改善管系的振动特性。

### 4.1. 消减管系的激振力

消减管系的激振力，也就是从激振源着手。对于发电机振动，一方面可以从发电机设计制造、安装、运行、维护等方面采取措施，控制发电机的振动；另一方面可以在管道与设备接头处增加柔性接头，减

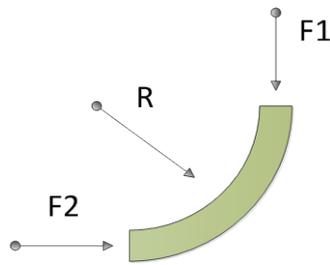


Figure 2. Mathematical model of piping vibration  
图 2. 管系振动数学模型

小发电机振动对氢冷管道的影响。对于流体流动，它的激振力主要产生于弯头处，因此可以尽量减少弯头或采用大曲率半径、小弯角的弯头，少用变径管，尽量让管道走向平直，使管内流体流动平稳，减少流体在管内流动所产生的复杂激振力，以此来消减振动强度。

#### 4.2. 改善管系的振动特性

实际生产中，激振源往往不能彻底根除，振动难以避免。因此在应力条件允许的情况下，改善管系的振动特性，提高管道的固有频率是控制振动的有效手段。根据文献[8]中管道设计规定，管道设计不仅要满足强度要求，同时刚度也要满足要求，并要求管道的固有频率大于 3.5 Hz。

由式(2)可以看出，要改变管道的固有频率，可以从以下三个方面采取方案：

##### 4.2.1. 改变管系自身结构

在对管道进行配管设计的时候，应该控制管道的固有频率在一定数值范围内。管道的设计走向过长且管径过小，即管道的径长比越小时，管道的固有频率越小。管道的管壁较薄时，管道的刚度较小且固有频率较低，管系抗振能力差。除此之外，管道的固有频率还与管系容积大小、支管长度、支管位置等相关。当管道一旦布置完成，管系的结构参数将难以改变，故而机组运行后，通过改变管道自身结构来提高管道固有频率不能如愿以偿。

##### 4.2.2. 提高管系结构刚性

提高管系结构的刚度，一方面提高管系的固有频率，使之多倍于激振频率，减小管道的振动响应，另一方面可以减小管系的振幅值。缩短管线长度、减少弯头等方法都可以直接有效地提高管系刚度，但如前面所说，管系结构难以改变，无法如愿实施。提高管系结构的刚度的另一有效途径便是合理布置管道支吊架，这也是常用的方法。

管道支吊架是管系中的重要组成部分，不仅影响管道应力、热伸缩大小和生产运行，对管道振动也有重要影响。改变管道支吊架的布置形式，不仅会改变管道的应力状态，如增加支吊架会使管道二次应力增加，而且会改变管道刚度，影响管系振动状态。因此管道上各支吊架的布置，需要综合考虑，合理布置管道支吊架。管道支吊架布置具体方案有：

- 1) 管道支吊架的布置应该有固支、多支少吊[9]。由于管道吊架实质上只是限制垂直方向上的位移，其灵活性大，所以在振动大的管道上应少用吊架。而支架可设置成限制多方向上位移，其对管道的约束较强。
- 2) 在管道振动强烈的位置，设置固定支架，可提高刚度从而减小振动。

##### 4.2.3. 增加管系结构阻尼

在管道合适位置增设阻尼器，为管系增加结构阻尼，能够提高管道固有频率，有效防止共振，控制

管道振动。

## 5. 结论

氢冷系统是关系到发电机能否正常安全运行的重要系统，氢冷管道振动将对整个系统造成重大的影响甚至引发事故。本文针对氢冷管道振动进行了分析研究，认为发电机的振动传递与管道设计不合理是引起管道振动的主要因素，并提出了控制管道振动的一些建议与措施。通过改变管道自身结构参数与布置，如增大管径比、管壁厚度，减少弯头、变径管，令管道走向平直等方案均可有效控制管道振动，但在管道布置完成后，这些措施均难以实施了。此时可以增设管道附件，如支吊架、阻尼器、减振器等，一方面提高管道刚度，使管道固有频率数倍于激振频率，防止共振，减少管道振动响应，另一方面控制管道摆动、振动或冲击，减小管道的振幅。该方案在实际治理氢冷管道振动问题中是简便、有效且便于实现的。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘炳全 (2006) 汽水管道振动诊断与评价研究. *内蒙古科技与经济*, **19**, 62-64.
- [2] 赵子琴, 李树勋, 徐登伟, 吴寿敬 (2011) 管道振动的减振方案及工程应用. *管道技术与设备*, **3**, 54-56.
- [3] 陈敬东 (1995) 振动分析. *抗恶劣环境计算机*, **17**, 78-79.
- [4] Stangl, M. (2008) An alternative approach for the analysis of nonlinear vibrations of pipes conveying fluid. *Journal of Sound and Vibration*, **310**, 493-422.
- [5] 潘军光, 刘宾, 马志强, 安付立, 吴晓俊 (2011) 330 MW 机组主蒸汽管道振动分析与治理. *理化检验(物理分册)*, **4**, 232-235
- [6] 唐永进 (2003) 压力管道应力分析. 中国石化出版社, 北京.
- [7] 李育清 (2002) 汽轮发电机振动原因分析. *河北煤炭*, **4**, 9-10.
- [8] 东北电力设计院 (1996) DL/T 5054-1996 火力发电厂汽水管道设计技术规定. 中国电力出版社, 北京.
- [9] 黄树山 (2007) 定子水补水管线管系振动分析. 全国发电机组技术协作会. 全国火电大机组(600MW 级)竞赛第 11 届年会论文集(上册), 全国发电机组技术协作会, 广州, 11.