

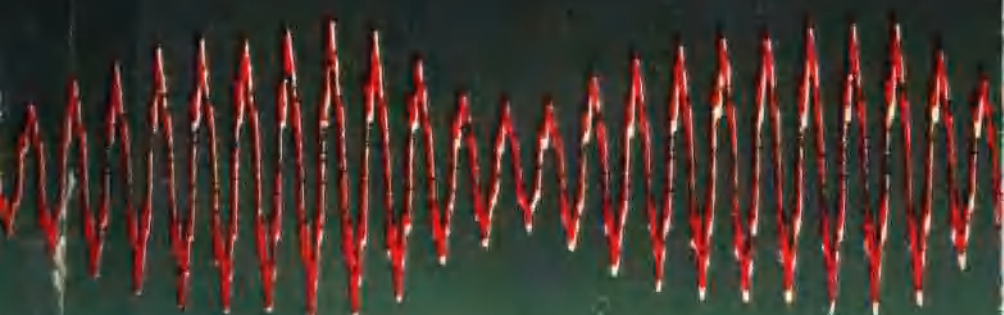
中国矿业大学青年学术丛书

国家自然科学基金资助项目

# 反振荡适应振动控制及其应用

运动控制的振动及振荡抑制

姜建国 著



中国矿业大学出版社

中国矿业大学青年学术丛书

# 反振荡适应振动控制及其应用

——运动控制的振动及振荡抑制

姜建国 著

〔国家自然科学基金资助项目〕

中国矿业大学出版社

(苏)新登字第 010 号

## 内 容 提 要

本书以直流传动提升机机械及井塔振动为研究对象,提出了直流传动系统的一种新的振动理论及新的振动控制技术,即“反振荡适应振动控制技术”。在内容安排上分为两大部分:一是直流传动提升机机械及井塔振动现象的机理分析,从理论上阐明振动的根本原因;另一部分是针对直流传动系统的振动及振荡现象,提出了消除振动的“反振荡适应振动控制技术”,此法具有花费少,不影响生产,不影响控制系统特性和振动抑制效果显著的特点。在内容安排上还介绍了“反振荡适应振动控制技术”的应用结果。

本书是作者从事直流传动系统振动和振荡抑制方面研究的科研成果,作者将此书奉献给从事于交流、直流电力传动及自动控制和振动控制等有关领域的科研工作者和工程技术人员,仅供参考。

责任编辑 陈玉和

技术设计 关湘雯

## 反振荡适应振动控制及其应用

姜建国 著

---

中国矿业大学出版社出版

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 3.625 字数 91 千字

1994 年 11 月第一版 1994 年 11 月第一印刷

印数 1—1000 册

---

ISBN 7 - 81040 - 132 - 7

---

TP·5

定价:12.00 元

**Anti-Oscillation Adaptive Vibration  
Control and Its Applications  
—Vibration and Oscillation  
Suppression for Motion Control**

**Jiang Jianguo**

The CUMT Press  
China University of Mining & Technology  
Xuzhou, Jiangsu, P. R. China

**SUMMARY**

Based on the study for the phenomena of mechanical vibration of winder driven by DC motor and winding-tower vibration occurring in practical engineering, a new vibration theory and a novel vibration control technique (i. e. "anti-oscillation adaptive vibration control technique") are suggested this book. In the arrangement of this book contents, there are two main parts; one is the analysis of causes of vibration and oscillation phenomena, other is the anti-oscillation adaptive control technique. The technique has the following characteristics; less expense, non-affecting on production process and on control system performance, and remarkable vibration suppression effects. Also, the application results of this technique are introduced this book.

## 前 言

晶闸管变流器供电绞车具有转换速度快,可靠性高,能四象限运行等良好的控制特性,因而从80年代起,我国煤炭系统的大型矿井绞车已普遍采用变流器供电方式。由于采用非线性变流器装置供电,因而在矿井电网中含有高次谐波的影响。为弄清谐波的影响程度,作者对有关含变流器供电绞车的矿井进行了谐波测试。在测试过程中,作者了解到有的矿井出现直流传动提升机机械振动和井塔振动现象,且较为严重,虽然受到生产部门、设计部门及有关振动专家的关注,但未能采取有效措施。本人在对交流电流波形进行频谱分析时,发现在交流电流中不仅存在着变流装置具有的特征谐波,还存在着低频成分,即基波和特征谐波中含有边频成分。这是交流电流中叠加了一种低频分量的结果。这种交流电流中含有低频成分的现象,几乎在所有变流器供电绞车中都存在,只是低频分量振荡幅值和振荡频率大小不同而已。这就是作者从事此项研究的基本背景。

作者在对有关这种运动控制的振动和振荡方面资料进行分析研究的过程中发现:由电力传动引起的机械振动和建筑结构振动的实例很多,例如,用于炼钢转炉除尘用大型风机引起的平台振动,旋转机械(如纺织机械)上楼引起的楼房振动,贮煤楼或运煤转载站楼房振动,提升机振动,井塔振动等,对于这种由于电力机械传动引起的振动控制措施,大都是在受振体上做文章,如设置减振梁、或减振装置等。这样做能取得一定的效果,但花费较大,而且影

响生产。而且,在本书所研究的井塔振动实例中,上述这些措施并不适用。因此,有必要采取新的措施,这就是作者提出反振荡适应控制研究的动机。

为弄清提升机振动及井塔振动的机理,以及采用有效措施消除这种振动现象,作者经过几年的研究,取得了若干研究成果。这本书的写作目的就是将此研究成果奉献给广大读者,尤其是从事交、直流电力传动、自动控制和振动控制领域的的科技工作者和工程技术人员。

由于本书准备工作仓促,在写作过程中难免存在着缺点和错误,作者恳请同行和专家给予指正和指导,使之更为完善。作者感谢此书出版过程中给予热情支持的中国矿业大学出版社领导、编辑以及排版人员。在此书写作过程中,谢维敏讲师提供了部分材料,在此深表谢意。

**姜建国**

1994年10月

# 目 录

1 问题的提出 .....	(1)
1.1 提升机及井塔振动现象及危害 .....	(1)
1.2 电力机械传动中的振动现象 .....	(4)
1.3 问题的提出 .....	(5)
2 振动控制研究综述 .....	(6)
2.1 振动控制理论及技术综述 .....	(6)
2.1.1 振动被动控制 .....	(6)
2.1.2 振动主动控制 .....	(9)
2.2 提升机及井塔振动研究综述 .....	(12)
3 提升机及井塔振动机理分析 .....	(17)
3.1 提升机及井塔振动激振源 .....	(17)
3.2 交流电流特性分析 .....	(17)
3.3 提升机及井塔振动机理分析 .....	(28)
4 直流传动系统低频振荡机理分析 .....	(29)
4.1 直流传动提升机电流振荡现象 .....	(29)
4.2 直流传动系统电流振荡的共性 .....	(30)
4.3 振荡机理理论分析 .....	(33)
4.3.1 晶闸管变流器供电电机系统仿真 .....	(34)
4.3.2 控制信号中干扰源分析 .....	(43)
4.3.3 钢丝绳弹性负载的影响 .....	(43)

4.3.4 控制系统稳定性分析 .....	(44)
4.3.5 理论分析小结 .....	(45)
4.4 振荡机理实验研究 .....	(45)
4.4.1 直流传动系统低频振荡特性 .....	(45)
4.4.2 矿井绞车不考虑负载时的实际测试 .....	(50)
4.4.3 脉冲不对称实验 .....	(51)
4.4.4 控制系统参数的影响 .....	(52)
4.4.5 直流电机本身是否存在低频振荡因素 .....	(53)
4.4.6 实验研究小结 .....	(53)
4.5 小结 .....	(57)
<b>5 反振荡适应振动控制 .....</b>	<b>(58)</b>
5.1 概述 .....	(58)
5.2 反振荡适应控制理论基础 .....	(59)
5.2.1 适应控制 .....	(59)
5.2.2 反扰力控制 .....	(63)
5.3 反振荡适应振动控制 .....	(68)
5.3.1 控制原则 .....	(68)
5.3.2 控制系统模型 .....	(68)
5.3.3 反振荡适应控制器设计 .....	(72)
<b>6 反振荡适应振动控制理论的应用 .....</b>	<b>(75)</b>
6.1 直流传动系统振荡抑制 .....	(75)
6.2 井塔振动控制 .....	(86)
6.3 提升机振动控制 .....	(90)
6.4 反振荡适应控制特点及其应用展望 .....	(93)
<b>附录 井塔振动测试结果 .....</b>	<b>(95)</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>(102)</b>



# 1 问题的提出

## 1.1 提升机及井塔振动现象及危害

随着电力电子器件的发展,电力电子装置的应用越来越广泛。我国煤炭系统从 80 年代起开始广泛采用晶闸管变流器供电大型矿井绞车。绞车采用变流器供电具有转换速度快,可靠性高,能四象限运行等优点,因而这种传动方式已成为我国大中型矿井绞车的基本传动方式。

晶闸管变流器供电绞车虽然具有良好的控制特性,但又有功率因数低,谐波严重及无功冲击大的不利因素。为了了解矿井电网谐波源特性,作者对矿井绞车变流器交流电流进行了测试。

作者在对变流器供电绞车交流电流测试的同时,还了解到有些矿井出现提升机振动及井塔振动现象。如邢台矿务局东庞煤矿主井井塔的振动和淮南潘集一矿的提升机振动。

东庞煤矿是年产 2.00Mt 原煤的大型矿井,有一套主井绞车和二套副井绞车。主井绞车采用摩擦式多绳提升机,由容量为 2100kW、采用 6/12 脉动变流器供电方式(引进西德设备)的直流电动机直接驱动。绞车的提升速度为 10m/s。主井井塔设计为 47.5 m 高框架式结构,分 7 层,整套电机驱动装置放在井塔第 7 层大厅。东庞煤矿于 1983 年投产,自投产以来,主井井塔一直存在严重的振动问题。每当主井绞车运行时,井塔振动开始,在绞车运行到加速段后期(约 7m/s 速度)和减速段开始阶段,井塔振动更为严重,造成井塔大厅地板振动和井塔窗子玻璃的剧烈碰撞。根据实

测：绞车运行阶段，第7层大厅地板振动位移（平均值）在 $10\mu\text{m}$ 左右，最大位移达 $16.74\mu\text{m}$ 。人站在第7层大厅地板上有明显的振动感，井塔玻璃的碰撞声在夜间百十米以外听得仍很清楚。

东庞煤矿主井井塔的这种振动现象非常严重，任其发展，势必会损坏井塔内部结构，如造成井塔墙壁的破损和裂缝。东庞主井井塔出现的部分结构的损坏，墙壁裂缝，井塔玻璃的损坏，都是井塔振动带来的不良后果。另外，主井井塔的倾斜也可能与井塔振动有关。这种严重的振动不仅会大大缩短井塔的使用寿命，而且对矿井安全生产极为不利。

提升机振动及井塔振动对矿井生产安全和人身安全极为不利，其主要影响有以下几方面。

#### （1）造成机械设备的损坏

高振幅和高动应力的振动会给提升机机械设备造成损坏。如振动会给传动中的齿轮造成大的和经常性的损坏和疲劳损坏；振动也会对提升机中的钢丝绳极为不利，会造成钢丝绳纵向振动。有可能造成钢丝绳打滑甚至酿成事故，并且影响钢丝绳的使用寿命。

#### （2）造成井塔结构的破坏，减少井塔使用寿命

振动会产生引起井塔结构疲劳和破坏的动应力和动变形，会引起接触部件间的微振磨损腐蚀，从而大大降低井塔的使用寿命。

井塔是一个多自由度的结构，对多自由度结构受力激振的动应力分析是较为复杂的，这里只作简单分析。东庞煤矿主井井塔是多层（7层）楼板的框架式结构，如果每层楼板当作一连续结构的话，那么支承楼板的各层框架就形成了多维空间，当激振层（第7层楼板）受力作用时，各受振层之间，以及激振与受振层之间就会发生动应力的传递及相互作用，可以想象高振幅的激振力和高的动应力的相互作用必然会给井塔的内部结构带来严重的破坏和疲劳损伤。这种破坏的结果表现为井塔墙壁的裂缝和部分损坏。

建筑结构的破坏和倒塌也是从裂隙的扩展开始的。从近代固

体强度理论的发展中可以看到,裂缝的扩展是结构物破坏的初始阶段;同时结构物裂缝还会引起渗漏,引起持久强度的降低,如保护层剥落、钢筋腐蚀,混凝土碳化等。当然,裂缝的形成不是一二天的事,从建筑工程学角度,裂缝也是一个逐步扩展的过程,尽管这种扩展是缓慢的,但其危害是极大的。裂缝的起因不外乎三种:

① 是外载荷(如静、动载荷)的直接应力,即按常规计算的主要应力引起的裂缝;

② 是由外载荷作用,结构次应力引起的裂缝。如混凝土框架节点出现的弯矩;

③ 是由变形变化引起,如温度、收缩、膨胀等,也可能是由特殊的变形变化引起的,如振动或共振引起的建筑物地基变形而引起建筑物裂缝。

裂缝分为宏观裂缝(用肉眼可以看见的)和微观裂缝(微裂),当然宏观裂缝会给人们带来明显的恐惧感和不安全感,然而微裂也是客观存在的,由于建筑物的振动,各环节,各支节点处的动应力和次应力的相互作用,或交替作用,不可避免地出现微裂,微裂的扩展,则是材料破损的标志,微裂扩展的结果是宏观裂缝。

东庞煤矿主井井塔出现的明显裂缝,其主要原因是井塔内部结构经常受到振动或共振的动应力和次应力及动应变的作用,这将大大缩短井塔的使用寿命。同时井塔出现的倾斜也可能是井塔振动的结果。

考虑到井塔振动使井壁产生微裂和裂缝,它会带来钢筋的微振磨损和腐蚀,若按钢筋在正常情况下腐蚀时间为50~60年的话(在井下钢筋腐蚀时间为20~30年),则井塔的使用寿命至少缩短10年以上。

(3) 提升机和井塔的振动带来环境噪声

提升机和井塔的振动也给环境带来了噪声,每当绞车运行时,振动噪声开始,当绞车速度在7m/s时,振动引起的井塔窗子玻璃

噪声加剧,这种噪声在夜间百十米外都听得很清楚。同时,根据国外研究,在垂直方向振动的作用下,人类对振动的感觉很灵敏,根据有关标准,振动对人体影响有规定界线,在 20Hz 以下的垂直振动作用力下,其振动超过某一界线,人体表现出不舒适感。尽管井塔振动不会象起重机振动那样,但其振动频率和振动噪声同样也会给人带来不舒适感。

## 1.2 电力机械传动中的振动现象

作者在对有关振动和振荡方面的资料分析过程中发现,由于电力传动引起的机械振动和建筑结构振动的实例很多。

### (1) 炼钢转炉大型除尘风机振动

在冶金系统,常发生炼钢转炉大型除尘风机的严重振动现象,这种除尘风机放在转炉跨的高层平台上,风机运转时会使平台楼板产生很大振动<sup>[25]</sup>。这种振动会损害人体健康,恶化操作人员的工作条件。同时这种振动产生的噪声很大,有的噪声高达 100 分贝,振幅高达 200 多  $\mu\text{m}$ ,这会严重影响附近工人和居民的日常生活。

### (2) 纺织机器上楼引起的建筑结构振动<sup>[29]</sup>

在我国多层厂房在整个纺织部门厂房中所占的比重越来越大,然而纺织机器上楼后引起的楼房振动问题也是不可忽视的,有的地方已出现楼房振动过大的现象。

### (3) 电厂筛碎贮仓楼振动<sup>[22]</sup>

这种贮仓楼把传统的碎煤、贮煤两个部分合二为一,具有占地少、投资省等优点。当动力设备上楼板后,引起整个贮仓楼的振动。

### (4) 提升机减速器振动和井塔振动<sup>[33]~[38]</sup>

由于电力传动引起的提升机减速器振动,井塔振动的例子也很多,这些振动严重地影响矿井的安全生产,有的甚至造成机械设

备和建筑结构的损坏<sup>[49]~[51]</sup>。

### 1.3 问题的提出

鉴于东庞煤矿主井井塔振动的严重性,以及其它提升机振动现象,和电力机械传动系统振动现象的普遍性,研究直流传动系统振动机理,找出井塔振动的真正激振源,确定出消除振动的有效方案,这是一件十分有意义的工作。

对于井塔振动的研究,国内外的研究成果较多,但这些成果是否适用于象东庞煤矿主井井塔这种形式振动的消振处理,能否有一种更好的消振方法和手段,这也是一个值得研究的问题。

作者针对上述问题,进行了有关理论和实验研究,并取得若干成果。本书的写作目的就是将这些成果奉献给从事相关研究的广大科技工作者。

## 2 振动控制研究综述

### 2.1 振动控制理论及技术综述

随着科学技术的发展,振动控制问题日益显得重要。人们研究振动的目的就是控制振动。振动有有益和有害之分,人们有时利用振动达到预期目的,如利用共振提高效率,利用振动原理制造各种振动机械等,这些属于振动的利用;然而,在更多的情况下,振动是有害的,表现在振动会缩短产品或结构的使用寿命,导致产品或结构的损坏。另一方面,振动会产生环境噪声,使人们产生不舒适感。因此,必须把有害振动尽量减小,以至消除。这些就是振动控制要研究的内容,但通常所说的振动控制实质上是指减小或消除有害的振动。本书所述的振动控制也是指有害振动的控制。

振动控制是一门跨学科的研究领域,这个领域需要土木、机械、电气、建筑、材料、计算机方面专家,以及其它相关领域技术专家在内的多学科的通力合作。为此,美国曾制订了长期合作研究规划,力图通过研究和应用的紧密配合,加速振动控制技术的发展。

为了减少有害振动,人们在各个工程领域中已经进行了大量的研究工作,包括振源、传递途径、系统结构动力特性、减振措施等方面。在这些振动控制研究中,振动控制理论及其振动控制的实现技术占主要部分。在振动控制中又分为振动主动控制和振动被动控制。

#### 2.1.1 振动被动控制

##### (1) 吸振

传统的振动控制研究方案是,通过动力吸振装置来减少振动,这是一种无源装置,附加在建筑结构或其它结构上,其目的就是改变系统在某一激励频率下的共振点,或者说是吸收某一频率下的扰动力能量。图 2—1 所示为典型的动力吸振装置。此装置由弹簧—质量系统组成。在图 2—1(a)所示装置中,其传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{m_1 s^2 + K_1} = \frac{C_a}{s^2 + \omega_a^2} \quad (2-1)$$

式中  $\omega_a = \sqrt{\frac{K_1}{m_1}}$ ——吸振装置固有频率;

$C_a = \frac{1}{m_1}$ ——吸振装置增益。

幅频特性为:

$$|G(j\omega)| = \frac{C_a}{\omega_a^2 - \omega} \quad (2-2)$$

从式(2-2)可以看出:当结构中存在某一频率(在  $\omega_a$  附近)的激励力使结构共振(或振动)时,设计在该频率上的动力吸振装置相当于提供扰力通道,使扰力能量进入吸振装置,以减少对结构的影响。这就是经典的动力吸振器(DVA-Dynamic Vibration Absorber)。

图 2—1(a)所示的动力吸振装置是设计在某一频率上的,若在结构中存在二个或多个使结构共振的扰力频率,则可相应地增加若干这样的动力吸振装置。或采用如图 2—1(b)所示的二自由度动力吸振装置,此装置分 2 个子系统,有 2 个固有频率。

$$\left. \begin{aligned} \omega_{a1} &= \sqrt{K_2/m_2} \\ \omega_{a2} &= \sqrt{(K_1 + K_2)/m_1} \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

式中的  $\omega_{a1}$  相当于将  $m_1$  固定,子结构  $K_2-m_2$  的固有频率; $\omega_{a2}$  相当于将  $m_2$  固定,子结构  $K_1-m_1-K_2$  的固有频率。

现在有关动力吸振装置振动控制方面的研究仍在进行,研究

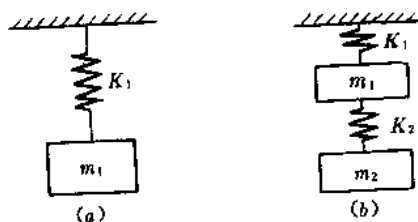


图 2-1 结构振动的动力吸振装置  
(a) 单自由度振动系统 (b) 二自由度振动系统

的内容涉及到动力吸振族减振, 自适应能动型 DVA 等。

## (2) 隔振

隔振就是隔离(断)振动的意思, 即采用附加子系统(隔振器)将振源与需减振的结构或系统隔开, 以减轻结构或系统的振动。这种隔振实质上是在振源与基础之间附加了隔振装置, 以减少振源对基础的激振力。隔振是工程中用得较为广泛的一种减振技术, 图 2-2 为实际应用的风机隔振方案<sup>(25)</sup>。该大型风机设置在钢厂转炉跨标高 27.8m 平台上, 由于风机运转产生的振动和噪声, 对厂房结构, 工人的身体健康, 精密仪器设备的正常运行均带来影响, 为解决这一问题, 文中采用了加阻尼隔振器的方案, 即在风机基础下部加 16 只隔振器。

现有的隔振器除线性隔振器外, 还有非线性隔振器; 隔振的研究除被动隔振外, 还有主动隔振以及主动和被动相结合的隔振。

## (3) 阻振

阻振是阻尼减振的简称, 即通过附加子系统连接于需减振的系统或结构上以消耗振动能量, 从而达到控制振动水平的目的。这种阻尼减振技术能降低系统或结构在共振频率附近的动响应和宽带随机激励下响应的均方根值, 以及消除由于自激振动而出现的



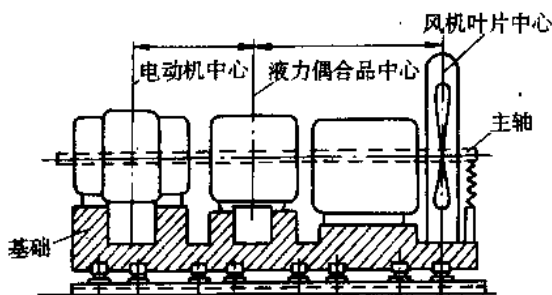


图 2—2 风机与隔振器安装示意图

动不稳定现象。

### 2.1.2 振动主动控制

振动的被动控制在工程应用中有它自己的特点和优点,随着科学技术的发展,人们对振动的控制水平要求越来越高,这样常规的被动振动控制难以奏效,如被动式动力吸振器的反共振效应只能在一个较窄的频带内起作用,对抗力频率变化较大的场合,它就不太合适。因此,人们一方面进一步研究被动控制方法,另一方面又开始寻求新的振动控制途径。近 30 年发展起来的振动主动控制技术正是振动控制的热门课题,也是当前工程结构抗灾减灾的重要内容。

振动的主动控制就是通过对扰力信号的检测和分析,产生控制信号,通过作动器来控制结构或系统的动态响应,使之满足一定的动态性能指标。这种主动控制又称有源控制,需要消耗能量的作动机构,而能量要靠能源来补充。它通常包括两类控制:开环控制和闭环控制。其控制原理如图 2—3 所示。

当测量仅涉及到系统或结构响应变量时,控制方式为闭环控制(如图 2—3(b)所示),通过检测系统或结构的响应对系统或结构施加控制力。当只考虑外界扰力的测量而产生控制力时,为开环