

备案号: xxxxx-202x

中华人民共和国行业标准



HG/T 20555—202x

离心式压缩机基础设计标准

Standard for design of centrifugal compressor foundation

(征求意见稿)

202x-xx-xx 发布

202x-xx-xx 实施

中华人民共和国工业和信息化部

发布

中华人民共和国行业标准

离心式压缩机基础设计标准

Standard for design of centrifugal compressor

foundation

(征求意见稿)

HG/T 20555—202x

主编单位：中石油吉林化工工程有限公司

批准部门：中华人民共和国工业和信息化部

施行日期：202x年xx月xx日

xxxx出版社

202x 北京

前 言

本标准根据工业和信息化部办公厅“关于印发 2021 年第二批行业标准制修订和外文版项目计划的通知”（工信厅科函〔2021〕159 号）文的要求，由中国石油和化工勘察设计协会组织中石油吉林化工工程有限公司和中国寰球工程公司北京分公司等单位修订。

本标准是在原《离心式压缩机基础设计规定》（HG/T 20555-2006）的基础上，根据多年实施取得的经验进行修订。

编制过程中，修编组进行了广泛的调查研究、收集资料，开展了专题研究，总结了近年我国化工工程建设的实践经验，与国内外相关规范进行了协调，并借鉴了国际先进标准。在此基础上广泛征求有关单位的意见，经反复讨论修改，最后经审查定稿。

本标准修订的主要内容为：

1. 新增结构动力分析的相关规定。
2. 新增压缩机基础有限元动力分析相关内容。
3. 增加顶板错台式压缩机基础的相关规定。
4. 新增压缩机基础承载力计算的荷载组合公式。
5. 新增压缩机基础隔振设计相关规定。
6. 根据工程设计的发展，调整一些已不适用或极少应用的条款。
7. 与目前新颁布的相关国家标准进行协调对接。

本标准由中国石油和化工勘察设计协会提出并归口。

本标准的技术内容由中石油吉林化工工程有限公司负责解释。

本标准主编单位：中石油吉林化工工程有限公司

本标准参编单位：中国寰球工程公司北京分公司

本标准主要起草人员：略

本标准主要审查人员：略

目 次

1 总 则.....	6
2 术语和符号.....	7
2.1 术 语.....	7
2.2 符 号.....	7
3 基本规定.....	9
3.1 一般规定.....	9
3.2 设计原则.....	1 0
3.3 结构动力分析.....	1 0
4 设计原始资料.....	1 2
4.1 压缩机组技术资料.....	1 2
4.2 厂房内有关设备、平台、基础条件.....	1 2
4.3 工程地质技术资料.....	1 2
5 构造要求.....	1 3
5.1 一般要求.....	1 3
5.2 构造尺寸要求.....	1 3
5.3 配筋要求.....	1 3
6 正常使用极限状态计算.....	1 5
6.1 一般规定.....	1 5
6.2 振动响应计算.....	1 5
6.3 地基承载力计算.....	1 6
7 承载能力极限状态计算.....	1 8
7.1 一般规定.....	1 8
7.2 荷载及荷载效应组合.....	1 8
7.3 强度计算.....	2 0
附录 A 多自由度有限元动力分析模型.....	2 1
附录 B 离心式压缩机基础动力分析方法.....	2 2
B.1 稳态频域分析方法.....	2 2
B.2 振型分解时程分析方法.....	2 2
B.3 离心式压缩机基础动力分析实例.....	2 3
附录 C 压缩机基础施工要求.....	3 0
本标准用词说明.....	3 1
引用标准名录.....	3 2
附：条文说明.....	3 3

Contents

1 General Provisions.....	6
2 Terms and Symbols.....	7
2.1 Terms.....	7
2.2 Symbols.....	7
3 Basic Requirements.....	9
3.1 General.....	9
3.2 Design Principles.....	1 0
3.3 Structural Dynamic Analysis.....	1 0
4 Original Information for Design.....	1 2
4.1 Technical Information of Compressor Set.....	1 2
4.2 Information for Equipment,Platform and Foundation in Building.....	1 2
4.3 Geotechnical Information.....	1 2
5 Detailing Requirements.....	1 3
5.1 General.....	1 3
5.2 Detailing Requirements.....	1 3
5.3 Reinforcement Requirements.....	1 3
6 Checking of Serviceability Limit States.....	1 5
6.1 General.....	1 5
6.2 Calculation of Vibration Response.....	1 5
6.3 Calculation of Bearing Capacity of Subsoil	1 6
7 Ultimate Limit States Design.....	1 8
7.1 General.....	1 8
7.2 Load and Combination of Load Effects.....	1 8
7.3 Calculation of Strength.....	2 0
Appendix A Multi Degree of Freedom Model for Finite Element Dynamic Analysis.....	2 1
Appendix B Dynamic Analysis Method for Centrifugal Compressor Foundation.....	2 2
B.1 Frequency-Domain Steady-State Analysis.....	2 2
B.2 Mode-Superposition Time-History Analysis.....	2 2
B.3 Dynamic Analysis Example of Centrifugal Compressor Foundation.....	2 3
Appendix C Construction requirements for Compressor Foundation.....	3 0
Explanation of Wording in This Standard.....	3 1
List of Quoted Standards.....	3 2
Addition: Explanation of Provisions.....	3 3

1 总 则

1.0.1 为了在离心式压缩机框架式基础设计中贯彻执行国家的技术经济政策，做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量，特制定本标准。

1.0.2 本标准适用于离心式压缩机框架式基础（以下简称“压缩机基础”）的设计。工作条件及结构型式与之类似的机器基础的设计亦可参照使用。

1.0.3 压缩机基础的设计，应综合考虑工程地质条件、机器布置和动力特性以及生产和工艺对压缩机基础的技术要求，精心设计，保证结构和地基的承载力，使基础振动限制在容许范围内，同时应避免产生不允许的沉降和倾斜。

1.0.4 本标准是依据现行国家标准《建筑结构可靠性设计统一标准》（GB 50068）规定的基本原则制定的。符号、计量单位和基本术语符合现行国家标准《建筑结构设计术语和符号标准》（GB/T 50083）、《工程振动术语和符号标准》（GB/T 51306）的规定。

1.0.5 按本标准设计时，尚应遵守现行国家标准《动力机器基础设计标准》（GB 50040）、《建筑振动荷载标准》（GB/T 51228）、《建筑工程容许振动标准》（GB 50868）、《建筑结构荷载规范》（GB 50009）、《建筑地基基础设计规范》（GB 50007）、《混凝土结构设计规范》（GB 50010）和《工业建筑防腐蚀设计标准》（GB/T 50046）等与之有关的规范和标准。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 离心式压缩机 centrifugal compressor

通过转子（叶轮）高速旋转使工艺气体压力提高并输送压力的机器。多用于高流量场合，转速一般大于 3000r/min。

2.1.2 压缩机组 compressor set

驱动机（电动机、汽轮机、内燃机、蒸汽机等）、变速箱、离心式压缩机和辅助设备（润滑油系统、冷却系统等）的总称。

2.1.3 机组 foundation group

离心式压缩机基础和基础上的机器、辅助设备、管道、底板上的填土以及地基土参振部分的总称。

2.1.4 工作转速 operating speed

压缩机、驱动机等机轴正常运行时的转速。当有变速箱时，可有 2 个或 2 个以上工作转速。

2.1.5 临界转速 critical speed

压缩机、驱动机等机轴临界状态下的转速（即轴的自振频率）。

2.1.6 振动荷载 vibration load

压缩机、驱动机和齿轮箱运行时由于转子偏心（即转子的质量中心与旋转中心的偏离）产生的不平衡力。

2.1.7 振幅 amplitude

压缩机、驱动机运行时，在基础顶面控制点引起的振动线位移幅值。

2.1.8 振动速度 vibration speed

压缩机、驱动机运行时，在基础顶面控制点引起的振动线速度。

2.1.9 速度均方根值 root-mean-square value of the velocity

又称振动速度有效值，表示机器基础的振动烈度。

2.1.10 框架式基础 tabletop foundation

由厚底板、柱及厚顶板组成的基础。

2.1.11 等效静力荷载 equivalent static load

为便于分析而采用的、与作用于原振动系统的动荷载相当的静荷载。

2.1.12 阻尼比 damping ratio

在线性黏性阻尼系统中，实际阻尼系数与临界阻尼系数之比。

2.1.13 真空吸力 vacuum force

由蒸汽透平冷凝器形成真空状态，产生的静力荷载。

2.1.14 短路力矩 short circuit torque

电机因短路产生的瞬间磁力变化。

2.1.15 滞变阻尼系数 hysteretic damping coefficient

滞变阻尼力与弹性力的比值，其相位与速度相同。

2.2 符号

2.2.1 作用及作用响应：

n —— 机器的工作转速(r/min)；

ω —— 机器的转动圆频率(rad/s)；

F_v —— 机器的振动荷载(kN);
 F_{vz} —— 机器的竖向振动荷载(kN);
 F_{vx} —— 机器的横向振动荷载(kN);
 F_{vy} —— 机器的纵向振动荷载(kN);
 W_g —— 机器转子的自重(kN);
 W_s —— 机组上部参振部分的自重(kN);
 W_x —— 机组下部固定部分自重(kN);
 u —— 基础顶面控制点的振动线位移(mm);
 v —— 基础顶面控制点的振动速度(mm/s);
 v_{rms} —— 基础顶面控制点的速度均方根值(mm/s);
 N_z —— 竖向等效静力荷载(kN);
 N_x —— 横向等效静力荷载(kN);
 N_y —— 纵向等效静力荷载(kN);
 P —— 电动机的功率(kW);
 M_o —— 同步电动机的短路力矩(kN · m);
 F_o —— 同步电动机的短路力(kN);
 F_a —— 凝汽器真空吸力(kN)。

2.2.2 计算指标:

f_a —— 修正后的地基承载力特征值(kPa);
 p_k —— 相应于荷载效应标准组合时, 基础底面处平均静压力值(kPa);
 α_f —— 地基承载力的动力折减系数;
 μ —— 动力系数;
[v] —— 基础的容许振动速度(mm/s);
[v_{rms}] —— 基础的容许速度均方根值(mm/s)。

2.2.3 几何参数:

L_x —— 基础底板 X 方向边长(m);
 L_y —— 基础底板 Y 方向边长(m);
 X_o —— 机组总重心 X 方向坐标(m);
 Y_o —— 机组总重心 Y 方向坐标(m)。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 离心式压缩机基础宜设计成由底板、柱、顶板（或纵、横梁）构成的钢筋混凝土空间框架式结构。顶板应有足够的质量和刚度；在满足承载力和稳定性的前提下，宜尽量减小柱截面尺寸以提高柱的柔度；底板的尺寸应根据构造要求和地基土的性质确定，须保证具有足够的刚度。

3.1.2 压缩机基础宜采用现浇钢筋混凝土结构。混凝土强度等级不宜低于 C30，二次灌浆层的材料强度等级不得低于基础材料强度等级。钢筋应采用 HPB300、HRB400 和 HRB500 级热轧钢筋，不得使用冷加工钢筋。

3.1.3 压缩机基础宜设置在均匀的中、低压缩性地基土上。当地基下卧层有较厚的软弱土层（如淤泥、淤泥质土、人工填土及其它高压压缩性土等）或湿陷性土、膨胀土等以及有溶洞、古墓等不良地质现象时，应对地基采取有效的处理措施。

在地震区，当地基的受力层范围内存在易发生振动液化的饱和砂土或粉土时，不应采用天然地基，可采用桩基、换土夯实或其他地基加固方案。

3.1.4 基组的总重心与压缩机基础底板的形心宜位于同一条铅垂线上。当存在偏心时，其纵向和横向的偏心距不应超过相应方向底板边长的 5%；偏心距超过 5%时，应计入附加力矩作用的影响。

计算基组总重心时，仅计算永久荷载，可不考虑荷载分项系数。

3.1.5 压缩机基础上应设置永久性沉降观测点。沉降观测点的位置应便于观测，一般应在角柱的两个方向上各设一个观测点；如压缩机基础较长时，可在纵向中间柱子上增设 1~2 个观测点。

3.1.6 压缩机基础的沉降观测应在工程设计说明中明确，按以下几个阶段进行，并做观测记录。

- 1 压缩机基础施工完毕后，观测一次；
- 2 压缩机组安装完毕后，观测一次；
- 3 试运转期间，观测一次；
- 4 投产运行后，每半年观测一次；

在生产过程中，如发现问题应随时观测。

3.1.7 当厂房内设有活塞式压缩机或其它低频振动的机器与离心式压缩机同时工作时，在机器的布置上，需考虑到活塞式压缩机基础或其它低频机器基础振动对离心式压缩机基础的不利影响。

3.1.8 如压缩机基础的振动，对邻近的工作人员、精密设备、仪器仪表及工艺生产产生有害影响时，应采取合理的平面布置及有效的隔振措施。

3.1.9 与压缩机连接的管道，如其振动较大时，不应刚性固定在压缩机基础和建筑物上，应采用弹簧支座或吊架等减振措施。

3.1.10 压缩机基础底面与相邻的构筑物或建筑物基础底面宜置于同一标高上，且不宜相连。若必须将压缩机基础与构筑物或建筑物基础相连时，须经过周密设计，确认压缩机基础的振动对构筑物或建筑物无不利影响时，方可相连。

3.1.11 压缩机基础与厂房操作平台应脱开，若压缩机两侧的钢操作平台的梁或铺板必须支承在压缩机基础上时，则梁与压缩机基础的连接，沿梁的纵向应设计成可滑动的，铺板应自由地搁置在压缩机基础上。

建筑物底层地面可与压缩机基础相连。

3.1.12 建造在抗震设防烈度不大于 7 度地震区的压缩机基础，可不计算地震的作用，但应符合本标准中第 5.3.7 条的构造要求。当抗震设防烈度为 8 度及以上，且压缩机基础较高时，宜计算地震作用。

3.1.13 压缩机基础的底板、桩及柱的地下部分应按照《工业建筑防腐蚀设计标准》（GB/T 50046），根据土和地下水的腐蚀性等级采取防护措施。

3.2 设计原则

3.2.1 根据正常使用极限状态和承载能力极限状态设计的要求，压缩机基础应进行下列计算：

- 1 正常使用极限状态：包括基础的振动响应计算，地基或桩基承载力和沉降变形验算。
- 2 承载能力极限状态：基础的强度计算。

3.2.2 压缩机基础的振动响应计算按本标准第 6 章的规定，压缩机基础顶面控制点处的容许振动值应按下表确定（有特殊要求时例外）。

基础类型	容许振动速度峰值(mm/s)	容许振动速度均方根值(mm/s)
普通基础	5.0	3.5
隔振基础	10.0	7.1

3.2.3 压缩机基础的地基沉降变形按现行《建筑地基基础设计规范》（GB50007）的规定计算，沉降允许值为 60mm，压缩机轴方向的倾斜允许值为 1/1000（有特殊要求时例外）。

当地基土均匀且基础底面平均静压力标准值小于地基承载力特征值的 1/2 时，可不进行沉降计算。

3.2.4 压缩机基础强度计算按本标准第 7 章的规定，此时结构的安全等级为一级，结构构件的重要性系数 γ_0 取 1.1。

3.2.5 下列离心式压缩机基础，宜采用隔振设计：

- 1 设防烈度高于 8 度（0.20g）的框架式基础；
- 2 不能与建筑物主体结构脱开的框架式基础；
- 3 更换新设备的改扩建工程，既有压缩机基础的加固改造设计。

3.2.6 离心式压缩机基础隔振宜采用支承式。隔振器的选用和设置，应符合下列规定：

- 1 隔振器宜采用钢制圆柱螺旋弹簧隔振器。
- 2 圆柱螺旋弹簧隔振器应具有三维隔振功能。

3.3 结构动力分析

3.3.1 框架式压缩机基础动力分析应采用多自由度弹性有限元计算模型。

3.3.2 框架式压缩机基础计算模型应根据结构实际情况确定。所选取的计算模型应能较准确地反映结构的实际工作状况。

3.3.3 计算软件的计算条件应符合本标准及有关标准的规定。

3.3.4 对于顶板有错台的压缩机基础，应采用不少于两个合适的不同力学模型，并对其计算结果进行分析比较。

3.3.5 采用有限元软件进行框架式压缩机基础动力分析时，应符合下列规定：

- 1 基础自由振动分析采用振型分解法。
- 2 机器振动荷载作用下的基础强迫振动分析宜采用稳态频域分析方法，也可采用振型分解时程分析方法。
- 3 基础强迫振动分析时，应在工作转速的 0.75~1.25 倍对应的频率范围进行扫频计算。扫频计算的振动频率间隔不宜大于 1Hz，并应涵盖所有扫频范围的基础固有频率。
- 4 地震作用下基础的动力分析可采用反应谱法或时程分析法。

3.3.6 所有计算机计算结果，应分析判断确认其合理、有效后方可用于工程设计。

3.3.7 压缩机基础动力分析的计算参数取值宜符合下列规定：

- 1 根据分析方法选择合适的阻尼参数，滞变阻尼系数可取黏性阻尼比的 2 倍。
- 2 黏性阻尼比可取 0.02~0.0625，对应转子平衡品质级别：G2.5 取小值，G6.3 取大值。
- 3 动弹性模量取静弹性模量。

3.3.8 对于机器工作转速不小于 3000r/min 的基础，可不考虑地基弹性影响，地基按刚性计算；对于机器工作转速小于 3000r/min 的基础，宜考虑地基弹性的影响，地基刚度和阻尼取值应按现行国家标准《动力机器基础设计标准》（GB50040）的有关规定执行。

4 设计原始资料

4.1 压缩机组技术资料

- 4.1.1 压缩机组各机器的名称、型号、容量、功率、外轮廓尺寸、机座形状和尺寸及其固定方式等。
- 4.1.2 压缩机组各机器的工作转速及轴系的第一、第二临界转速。
- 4.1.3 压缩机组各机器自重及其重心位置。
- 4.1.4 附属设备和主要管道（包括保温层）的自重及固定方式。
- 4.1.5 压缩机组各转动部件的自重、重心位置及固定方式。
- 4.1.6 压缩机组各转动部件在正常工作状态下产生的振动荷载数值、方向、作用点以及与之相对应的振动频率和平衡品质级别 G 。
- 4.1.7 同步电机的短路力矩及其作用点。
- 4.1.8 凝汽器的真空吸力及其作用点。
- 4.1.9 压缩机基础模板图包括各部分几何尺寸：沟槽、孔洞、地脚螺栓和预埋件的尺寸和位置。
- 4.1.10 二次灌浆层的厚度、范围及材料等要求。
- 4.1.11 对压缩机基础振动、沉降及倾斜的特殊要求。

注：本节资料均应由机器制造厂提供。

4.2 厂房内有关设备、平台、基础条件

- 4.2.1 厂房内与压缩机基础设计有关的设备布置图，包括压缩机机组、附属设备及主要工艺管道的布置。
- 4.2.2 主要热力管道的布置及管道保温层表面温度。
- 4.2.3 操作平台和平台梁的布置，平台梁与压缩机基础的连接方式。
- 4.2.4 压缩机基础上各部位的安装荷载及操作荷载。
- 4.2.5 压缩机基础附近的建筑物或构筑物基础图及各种地沟（包括电缆沟、工艺管沟、给排水管沟、暖通管沟等）的布置和尺寸。
- 4.2.6 压缩机基础附近的精密设备、仪器仪表及对振动敏感的工艺设备的布置及其对振动的技术要求。
- 4.2.7 压缩机基础附近产生低频振动的机器及其基础布置和振动状态的技术资料。
- 4.2.8 压缩机组及其附属设备的安装检修对压缩机基础的要求。

4.3 工程地质技术资料

- 4.3.1 按照现行国家标准《岩土工程勘察规范》（GB50021）和《建筑地基基础设计规范》（GB50007）要求编制的工程地质勘察报告。
- 4.3.2 对建筑场地的不良工程地质构造的分析判断及处理方案。地震区还应进行地基液化判断。
- 4.3.3 地下水位和水位变化规律、水土化学分析报告及其对钢筋混凝土的腐蚀性等级。
- 4.3.4 关于地基土冻胀性、湿陷性、膨胀性的资料。
- 4.3.5 当采用桩基时，应提供建议桩型、桩端阻力、桩侧阻力和单桩承载力特征值。
- 4.3.6 考虑地基弹性的影响时，应按照现行国家标准《动力机器基础设计标准》（GB 50040）和《地基动力特性测试规范》（GB/T 50269）的要求提供天然地基或桩基的动力特性参数。

5 构造要求

5.1 一般要求

5.1.1 压缩机基础下半部的自重 W_x (包括柱自重之半、底板自重、底板上附属设备自重及填土自重等), 应大于基础上部自重 (包括柱自重之半和顶板自重) 及安装在顶板上的机组自重 (包括管道自重) 的总和 W_s 。

5.1.2 作用在顶板上的各种荷载宜布置在顶板中的暗梁 (或纵、横框架梁) 的中心线上。

5.1.3 预埋螺栓的中心线距压缩机基础构件边缘的距离不应小于螺栓直径的 5 倍, 且不应小于 150mm 和不少于锚板宽度之半加 50mm。螺栓底距顶板下表面不应小于 50mm。

预留螺栓孔边缘距压缩机基础构件边缘的距离不应小于 100mm。预留孔底距顶板下表面也不应小于 100mm。

5.1.4 压缩机基础各构件的受力钢筋其混凝土保护层厚度应符合下列要求:

顶板: $\geq 30\text{mm}$;

框架顶板纵、横梁、柱: $\geq 40\text{mm}$;

底板: $\geq 50\text{mm}$; 无垫层时底板底面 $\geq 70\text{mm}$ 。

5.1.5 压缩机基础顶面的二次灌浆层宜采用工厂提供的袋装灌浆料, 也可采用环氧树脂、无收缩细石混凝土或无收缩砂浆。关于二次灌浆层的施工要求见附录 C。

5.2 构造尺寸要求

5.2.1 压缩机基础底板宜设计成矩形平板, 其厚度不应小于柱截面的高度, 也不应小于压缩机基础顶板厚度; 可取底板长度的 $1/10 \sim 1/12$ 。

5.2.2 柱截面宜设计成方形或矩形, 其截面尺寸不宜小于柱净高度的 $1/10 \sim 1/12$, 并不得小于 $450\text{mm} \times 450\text{mm}$ 。

5.2.3 顶板厚度不宜小于其净跨度的 $1/4 \sim 1/5$, 且不得小于 800mm。

5.2.4 压缩机基础顶板由梁区和板区构成, 纵、横向框架梁与柱的连接应按刚性设计, 柱应嵌固于底板中, 其连接构造必须符合固定端的要求。

5.3 配筋要求

5.3.1 沿底板板顶、板底应配置钢筋网, 钢筋直径宜为 $16 \sim 22\text{mm}$, 间距宜为 $150 \sim 200\text{mm}$ 。上下两层钢筋网之间以直径为 $14 \sim 16\text{mm}$ 的竖向架立筋连接, 间距为 $600 \sim 750\text{mm}$ 。

5.3.2 柱纵向钢筋按计算确定, 并沿截面对称布置, 直径宜为 $18 \sim 25\text{mm}$, 间距不宜大于 200mm。箍筋直径为 $10 \sim 12\text{mm}$, 应采用复合箍。

柱纵向钢筋的总配筋率可按 $1.0\% \sim 1.4\%$ 选用。

5.3.3 顶板的板区应在板顶及板底配置钢筋网, 直径宜为 $16 \sim 22\text{mm}$, 间距宜为 $150 \sim 200\text{mm}$ 。框架梁的受力纵筋经计算确定, 应在梁截面上、下对称配置, 梁底部 (或顶部) 配筋率宜取 $0.4\% \sim 1.0\%$, 且不小于 $5\Phi 25$ 。

5.3.4 沿顶板、底板侧边应配置构造钢筋, 钢筋直径宜为 $14 \sim 18\text{mm}$, 竖向间距宜为 $200 \sim 250\text{mm}$ 。

5.3.5 在顶板或底板上开孔或沟槽时, 若孔或槽的直径或边长大于 300mm , 应沿孔或槽周边配置直径为 $18 \sim 22\text{mm}$, 间距为 $200 \sim 250\text{mm}$ 的加强筋。

5.3.6 应确保板上螺栓孔或螺栓套管位置的准确性，顶板及框架梁纵筋位置应力求避开螺栓孔或螺栓套管。

5.3.7 建造在地震区的压缩机基础，其配筋应符合下列构造要求：

1 柱纵筋与底板伸出钢筋的连接宜采用机械连接。

2 柱箍筋加密区范围：柱上端不小于柱截面高度及柱净高 $1/6$ ，柱下端不小于柱净高 $1/3$ ；当有刚性地面时，尚应取刚性地面上下各 500mm 。箍筋直径宜为 $10\sim 12\text{mm}$ ，加密区间距不宜大于 100mm ，肢距不宜大于 200mm ，加密区体积配箍筋率不宜小于 0.8% 。

3 框架梁箍筋加密范围为 1.5 倍梁高，箍筋直径不小于 10mm ，加密区间距不超过 100mm ，肢距不大于 200mm 。

6 正常使用极限状态计算

6.1 一般规定

6.1.1 压缩机基础的正常使用极限状态计算包括以下三项内容:

- 1 基础的振动响应计算;
- 2 地基或桩基承载力验算;
- 3 地基或桩基沉降变形验算。

6.1.2 正常使用极限状态的荷载效应组合应符合下列规定:

- 1 振动响应计算时, 静力荷载与振动荷载效应组合应采用标准组合。
- 2 地基或桩基承载力验算时, 采用正常操作荷载效应的标准组合。
- 3 地基或桩基沉降变形验算时, 采用准永久组合。

6.2 振动响应计算

6.2.1 当同时符合下列三个条件时, 基础可不作动力计算:

- 1 压缩机组的总振动荷载值不大于 20kN, 且基础符合本标准第 5.2 节的构造尺寸要求。
- 2 基组参振部分的总重 W_s (包括顶板上的机器、管道自重, 顶板自重及柱自重之半) 与机器转子的自重 W_g 满足下式要求:

$$2.6W_s > W_g \sqrt{n} \quad (6.2.1-1)$$

式中: n ——基组工作转速(r/min);

W_g ——机器转子的自重(kN)。

若基组各部分机器转速不同时, W_s 与 W_{gi} 应满足下式要求:

$$2.6W_s > \sum_{i=1}^m (W_{gi} \sqrt{n_i}) \quad (6.2.1-2)$$

式中: n_i ——基组某一机器转子的工作转速(r/min);

W_{gi} ——基组某一机器的转子自重(kN)。

- 3 设备及生产对基础振动限值无特殊要求。

6.2.2 当不符合本标准第 6.2.1 条的要求时, 宜采用多自由度弹性有限元计算模型进行基础动力分析。

多自由度有限元计算模型见附录 A。

6.2.3 机器振动荷载值、方向及其作用位置应由机器制造厂提供。若制造厂不能提供振动荷载数据, 在机器正常工作转速状态时, 竖向和横向振动荷载值 F_{vz} 、 F_{vx} (kN) 可按下式确定:

$$F_{vz} = F_{vx} = F_v = W_g n^{1.5} / 644000 \quad (6.2.3-1)$$

式中: W_g ——机器转子的自重(kN)。

纵向振动荷载 F_{vy} 为 (6.2.3-1) 式计算值之半。

当压缩机由电动机驱动时, 电动机产生的竖向及横向振动荷载值可按下式确定:

$$F_{vz} = F_{vx} = F_v = W_g e \omega^2 / g \quad (6.2.3-2)$$

$$e = G / \omega \quad (6.2.3-3)$$

式中: G ——衡量转子平衡品质级别的参数(m/s)。

纵向振动荷载 F_{vy} 为 (6.2.3-2) 和 (6.2.3-3) 式计算值之半。

当离心式压缩机与驱动机之间有变速箱时，计算 W_g 应计入与变速机内相同转速的齿轮自重。

6.2.4 当基础承受不同转速的 m 组振动荷载作用时，应分别计算各组振动荷载作用下的振动速度峰值 $v_{i,max}$ 或振动速度均方根值 $v_{i,rms}$ ，并按下式求出振动速度峰值 v 的组合值和振动速度均方根的组合值 v_{rms} ：

$$v = \sqrt{\sum_{i=1}^m v_{i,max}^2} \quad (6.2.4-1)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^m v_{i,rms}^2} \quad (6.2.4-2)$$

$$v_{i,rms} = \frac{v_{i,max}}{\sqrt{2}} \quad (6.2.4-3)$$

式中： $v_{i,max}$ ——转速为 n_i 的振动荷载作用下的振动速度峰值 (mm/s)；

$v_{i,rms}$ ——转速为 n_i 的振动荷载作用下的振动速度均方根值 (mm/s)。

6.2.5 基础的振动计算可只进行机器正常工作转速状态下的稳态响应分析，开、停车过程中采用分段加速（或减速）时，需进行相应的瞬态响应分析。

6.2.6 基础顶面控制点处振动速度峰值的组合值 v ，或振动速度均方根的组合值 v_{rms} 不应大于本标准第 3.2.2 条规定的容许振动值。

普通基础容许振动速度峰值参见图 6.2.6。

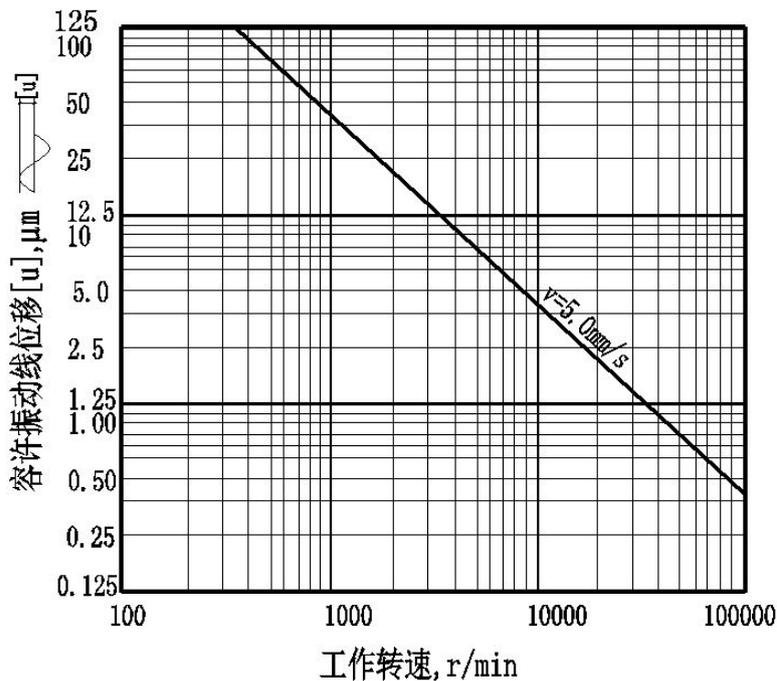


图 6.2.6 普通基础振动限值

6.3 地基承载力计算

6.3.1 压缩机基础的地基承载力应符合下式要求：

$$p_k \leq \alpha_f f_a \quad (6.3.1)$$

式中： f_a ——修正后的地基承载力特征值(kPa)；

p_k ——相应于荷载效应标准组合时，基础底面处平均静压力值(kPa)；

α_f ——地基承载力的动力折减系数，取 $\alpha_f=0.8$ 。

7 承载能力极限状态计算

7.1 一般规定

7.1.1 除满足本标准第 7.1.2 条要求外, 压缩机基础应进行承载能力极限状态下的构件强度计算。

7.1.2 压缩机基础满足本标准第 5 章要求且同时符合下列条件时, 可不进行框架强度计算:

- 1 顶板或框架梁的净跨不大于 4.0m;
- 2 作用在每榀横向框架上的机器自重不超过 150kN;
- 3 柱截面尺寸等于或大于 600mm×600mm;
- 4 柱纵向钢筋总配筋率不小于 1.2%;

7.1.3 框架强度计算时, 框架内力分析按弹性阶段进行, 并按现行《混凝土结构设计规范》(GB50010) 进行强度计算。

7.1.4 框架强度计算时, 宜分别按使用阶段及安装阶段进行。

7.2 荷载及荷载效应组合

7.2.1 框架强度应根据下列荷载计算:

- 1 永久荷载: 压缩机基础自重、底板上填土自重、支承在顶板上的操作平台自重、安装在基础上的机组、辅助设备及管道自重、管道推力、凝汽器真空吸力。
- 2 可变荷载: 操作活荷载或安装活荷载。
- 3 振动荷载 (或等效静力荷载)。
- 4 偶然荷载: 同步电机的短路力矩。
- 5 地震作用 (8 度 0.20g 及以上)。

7.2.2 在 7.2.1 条所列荷载中, 除压缩机基础自重、回填土自重、操作平台自重及地震作用外, 均应由机器制造厂家提供。如无上述资料时, 荷载标准值及分项系数按下列规定计算和选用:

- 1 永久荷载按实际情况计算, 荷载分项系数取 1.3。
- 2 凝汽器真空吸力 F_a (kN) 由式(7.2.2-1)求得:

$$F_a = 100A \quad (7.2.2-1)$$

式中: A —凝汽器与汽轮机接口处的截面面积(m^2)。

荷载分项系数取 1.3。若凝汽器与汽轮机为刚性连接时, 真空吸力为零。

- 3 安装活荷载宜取 $10kN/m^2$, 荷载分项系数取 1.4; 操作活荷载宜取 $4kN/m^2$, 荷载分项系数取 1.5。

- 4 振动荷载 (或等效静力荷载), 按第 7.2.3 条计算, 荷载分项系数取 1.5。
- 5 同步电动机的短路力矩 M_o ($kN \cdot m$) 由式(7.2.2-2)求得:

$$M_o = \frac{70P}{n} \quad (7.2.2-2)$$

式中: P —电动机的功率(kW);

n —电动机的工作转速(r/min)。

作用在基础上的短路力 F_o (kN) 由式(7.2.2-3)求得:

$$F_o = \pm \frac{M_o}{B} \mu \quad (7.2.2-3)$$

式中: B —电动机短路力作用点之间的距离, 见图 7.2.3;

μ ——动力系数，取 2.0。
荷载分项系数取 1.0。

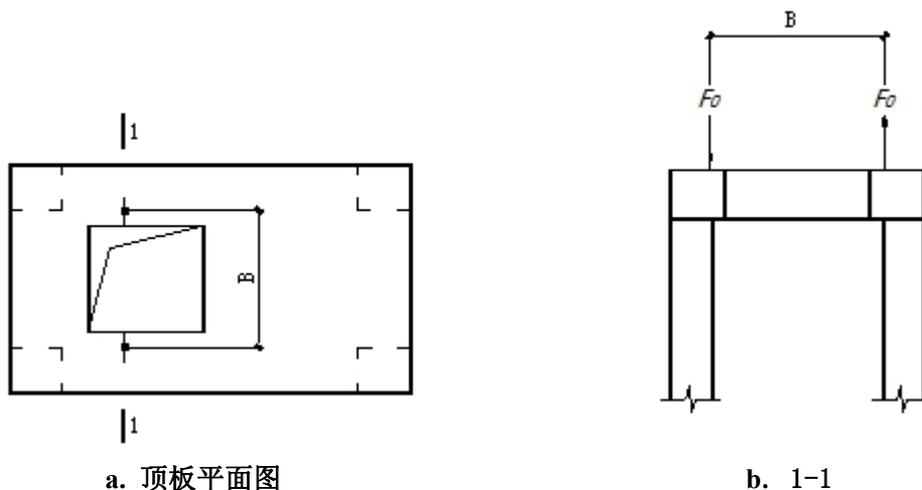


图 7.2.2 短路力示意图

7.2.3 压缩机基础的强度计算可采用振动荷载或等效静力荷载。

1 采用振动荷载，按空间多自由度体系直接计算构件的动内力时，振动荷载可取正常使用极限状态振动响应计算所取振动荷载标准值的 4 倍，并考虑材料疲劳的影响（钢筋混凝土构件的疲劳影响系数取 2.0）。振动荷载的作用方向考虑正、负两个方向。

2 采用等效静力荷载时，按简化计算模型计算时，等效静力荷载按正负方向的集中荷载作用于基础上，其分配与其转子的自重成正比。

竖向等效静力荷载 N_z (kN)：

$$N_z = W_g n / 600 \quad (7.2.3)$$

当按公式 (7.2.3) 求得的 N_z 值大于该处机器自重时，则按此处的机器自重取值。

横向、纵向等效静力荷载 N_x 、 N_y 分别取竖向等效静力荷载值的 1/4、1/8，按集中荷载作用在横梁、纵梁轴线上。

基础构件不承受机器转子自重者，其竖向和横向等效静力荷载取构件自重的 50%，纵向等效静力荷载值取构件自重的 25%。

3 若机器的转速不同时，应按不同转速分别计算动内力。

7.2.4 承载能力极限状态计算时，静力荷载与振动荷载（等效静力荷载）效应组合应采用基本组合。当多个工作转速的振动荷载组合时，动内力可取各工作转速工况平方和的平方根效应的组合值。其荷载效应组合应符合下列规定：

1 正常操作荷载效应基本组合应包括永久荷载、可变荷载及振动荷载（或等效静力荷载），可变荷载及振动荷载的组合值系数取 1.0。基本组合的效应值按下式进行计算：

$$S_d = \sum \gamma_{Gj} S_{Gjk} + \sum \gamma_{Qi} S_{Qik} + \sum \gamma_{vi} \beta_{fi} S_{vik} \quad (7.2.4-1)$$

$$\text{或 } S_d = \sum \gamma_{Gj} S_{Gjk} + \sum \gamma_{Qi} S_{Qik} + \sum \gamma_{vi} S_{Nik} \quad (7.2.4-2)$$

式中： γ_{Gj} ——第 j 个永久荷载分项系数；

S_{Gjk} ——第 j 个永久荷载标准值的荷载效应值；

γ_{Qi} ——第 i 个可变荷载分项系数；

S_{Qik} ——第 i 个可变荷载标准值的荷载效应值；

γ_{vi} ——第 i 个振动荷载（等效静力荷载）分项系数；

β_{fi} ——第 i 个振动荷载系数，即第 7.2.3 条第 1 款规定的动内力系数，钢筋混凝土构件一般取 $4 \times 2 = 8.0$ ；

S_{vik} ——第 i 个振动荷载标准值的荷载效应值；

S_{Nik} ——第 i 个等效静力荷载的荷载效应值。

2 偶然作用组合应包括永久荷载、振动荷载（或等效静力荷载）及短路力矩，振动荷载的组合值系数可取 0.25，短路力矩的组合系数取 1.0。偶然作用组合的效应值按下式进行计算：

$$S_d = \Sigma S_{Gjk} + \Sigma S_{AST} + \Sigma \psi_{di} S_{vik} \quad (7.2.4-3)$$

式中： S_{AST} —偶然荷载标准值(短路力矩)的效应值；

ψ_{di} —振动荷载的组合值系数。

3 地震作用组合应包括永久荷载、振动荷载（或等效静力荷载）及地震作用，振动荷载的组合值系数可取 0.25，地震作用的组合值系数取 1.0。地震作用组合的效应设计值按下式进行计算：

$$S_d = \gamma_G S_{EG} + \gamma_E S_{Ek} + \Sigma \psi_{di} S_{vik} \quad (7.2.4-4)$$

式中： S_{EG} —重力荷载代表值的效应值；

γ_E —地震作用分项系数；

S_{Ek} —地震作用标准值的效应值。

7.3 强度计算

7.3.1 采用二维计算模型进行压缩机基础的框架强度计算时，其平面框架模型可按下列规定确定：

- 1 柱和顶板横梁按横向平面框架进行计算，等效静力荷载应考虑竖向和横向的作用。
- 2 柱和顶板纵梁按纵向平面框架进行计算，等效静力荷载应考虑竖向和纵向的作用。

附录 A 多自由度有限元动力分析模型

A.0.1 压缩机基础多自由度有限元模型应真实反映结构的受力状态, 结构构件应根据其几何形状和受力特点选择合适的单元类型。

A.0.2 结构构件的物理特性、边界条件应满足下列要求:

- 1 框架柱考虑弯曲、剪切、轴向和扭转变形;
- 2 顶板考虑平面内和平面外的弯曲、剪切、轴向和扭转变形;
- 3 框架柱和顶板连接节点宜按刚域处理;
- 4 底板平面内和平面外均按刚性考虑。

A.0.3 压缩机基础的框架柱可采用梁单元, 压缩机基础顶板可采用板壳单元或实体单元。

A.0.4 地基和压缩机基础底板的建模, 应采用下列方法:

- 1 不考虑地基弹性时, 直接将基础框架柱底端与底板的连接简化为固定刚性支座;
- 2 考虑地基弹性, 基础底板采用板壳单元或实体单元, 地基土或桩采用弹簧单元和阻尼单元。

A.0.5 多自由度有限元动力分析计算软件

推荐使用 SAP2000。

附录 B 离心式压缩机基础动力分析方法

B.1 稳态频域分析方法

B.1.1 稳态分析采用的谐振荷载作用下基础强迫振动方程为：

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + (1 + ir)[K]\{u(t)\} = \{F_v\}e^{i\omega t} \quad (\text{B.1.1})$$

式中：[M]——质量矩阵；

[K]——刚度矩阵；

i——虚数单位；

r——滞变阻尼系数；

$\{\ddot{u}(t)\}$ ——加速度向量；

$\{u(t)\}$ ——位移向量；

$\{F_v\}e^{i\omega t}$ ——机器振动荷载向量；

ω ——机器振动荷载圆频率。

B.1.2 稳态分析的荷载工况应包括恒荷载工况、模态工况和稳态工况。

B.1.3 稳态工况应满足下列要求：

- 1 荷载类型应包含竖向振动荷载 F_{vz} 和水平振动荷载 F_{vx} 、 F_{vy} 。取 F_{vx} 与 F_{vy} 的相位角相同，它们与 F_{vz} 相位角相差取 90° ；
- 2 频率范围宜取 0~1.25 倍振动荷载频率，也可取 $\pm 25\%$ 振动荷载频率，并将结构的固有频率和振动荷载频率作为附加频率点，振动荷载频率间隔取 1Hz；
- 3 阻尼参数采用滞变阻尼系数；
- 4 根据输出的结构振动速度频响曲线确定控制点的最大振动速度。

B.2 振型分解时程分析方法

B.2.1 时程分析采用的谐振荷载作用下基础强迫振动方程为：

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F_v\}\sin(\omega t) \quad (\text{B.2.1})$$

式中：[M]——质量矩阵；

[K]——刚度矩阵；

[C]——阻尼矩阵；

$\{\ddot{u}(t)\}$ ——加速度向量；

$\{\dot{u}(t)\}$ ——速度向量；

$\{u(t)\}$ ——位移向量；

$\{F_v\}\sin(\omega t)$ ——机器振动荷载向量；

ω ——机器振动荷载圆频率。

B.2.2 时程分析的荷载工况应包括恒荷载工况、模态工况和模态时程工况。

B.2.3 确定模态工况的模态数量时，应满足结构的最高固有频率不低于 1.25 倍振动频率。

B.2.4 时程工况应满足下列要求：

- 1 荷载类型应包含竖向振动荷载 F_{vz} 和水平振动荷载 F_{vx} 、 F_{vy} 。取 F_{vx} 与 F_{vy} 的到达时间相同，它们的到达时间与 F_{vz} 相差 T/4（T 为振动荷载的周期）；
- 2 扫频计算时，应取 $\pm 25\%$ 振动荷载频率范围内的结构固有频率对应的自振周期为时程荷载的周期，定义多个时程工况；
- 3 时间类型采用周期荷载；

- 4 阻尼参数采用模态阻尼比;
- 5 根据输出的结构振动速度时程曲线确定控制点的最大振动速度。

B.3 离心式压缩机基础动力分析实例

B.3.1 设计原始资料。

- 1 压缩机组技术参数见表 B.3.1-1。

表 B.3.1-1 机组技术参数表

项目	汽轮机	压缩机		变速机
		低压段	高压段	
机器型号	EK 1100	ZMCL 607	ABCL 306/a	—
设备总重 (包括共用底座)	180.00	234.00	104.00 (包括共用底座)	6.00
转子重 (kN)	22.00	13.50	1.40	4.00
功率 (kW)	10630	8360		—
工作转速 (r/min)	7050	7050	13600	7050 13600
最大连续转速 (r/min)	7650	7650	14600	7650 14600
第一临界转速 (r/min)	9500	4200	8000	—
第二临界转速 (r/min)	—	9200	17500	—

注: 为简化, 未考虑管线荷载及平台荷载。

压缩机气体容量 28200m³/h, 排出压力 1440kN/cm², 最大排出压力 1610kN/cm²。

- 2 设备荷载分布分别见图 B.3.1-1 及表 B.3.1-2。

表 B.3.1-2 中设备重量系摘自机器制造厂提供的设计条件, 振动荷载按式 (6.2.3-1) 计算, 并根据转子自重的分布情况近似地分配到每个荷载作用点上。

表 B.3.1-2 荷载表

作用点	荷载值 (kN)		作用点	荷载值 (kN)	
	设备重量	振动荷载 F_v		设备重量	振动荷载 F_v
P1	75.00	8.20	P10	26.00	0.85
P2	52.50	5.80	P11	26.00	0.85
P3	52.50	5.80	P12	3.00	2.40 *
P4	58.50	3.10	P13	3.00	2.40 *
P5	58.50	3.10	P14	400.00 (空重 200.00)	—
P6	58.50	3.10+0.90 *	P15	400.00 (空重 200.00)	—
P7	58.50	3.10+0.90 *	P16	9.00	—
P8	26.00	0.85	P17	9.00	—
P9	26.00	0.85	—		

注: 1 表 B.3.1-2 中 P1~P7 为 $n=7050\text{r/min}$ 产生的振动荷载 $1F_v$, P8~P13 为 $n=13600\text{r/min}$ 产生的振动荷载 $2F_v$;

2 表中*振动荷载 0.9kN 及 2.40kN 系分别由变速机的低转速齿轮和高转速齿轮产生。

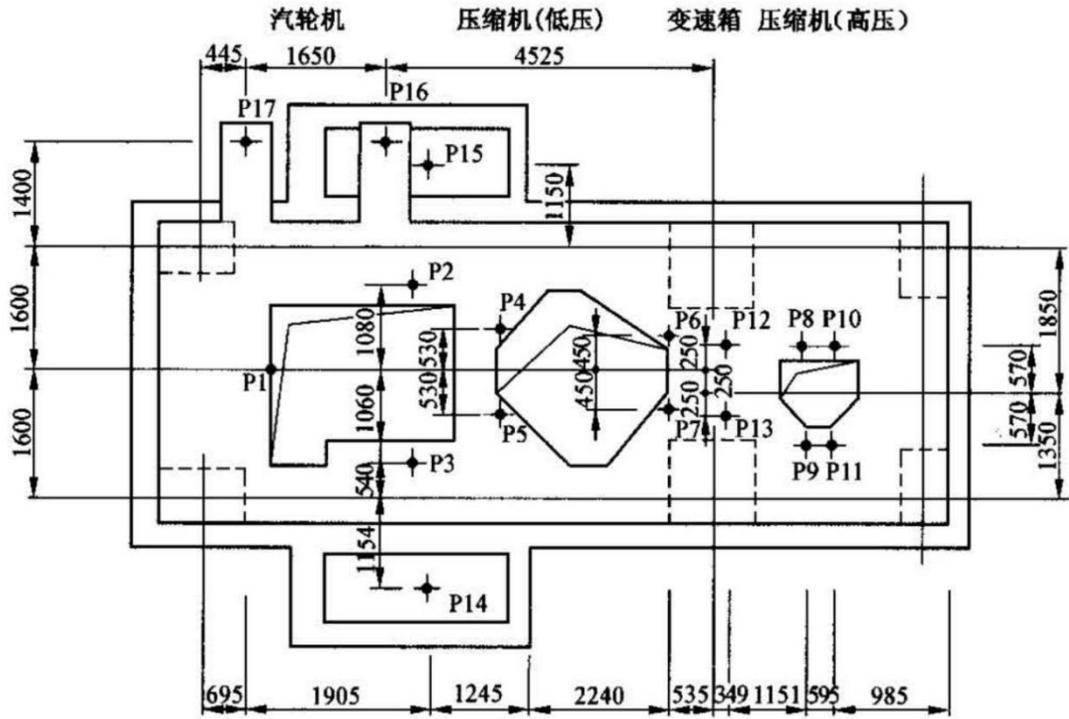


图 B.3.1-1 荷载分布图

3 基础形式及截面尺寸。

采用框架式基础，按本标准构造要求取顶板厚 1000mm（偏小），底板厚 1200mm；柱截面 700mmx900mm、900mmx900mm 及 700mmx500mm，见图 B.3.1-2~图 B.3.1-5。

4 材料：混凝土强度等级为 C30，钢筋为 HRB400；钢筋混凝土弹性模量 $E_c=3.0 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ 。

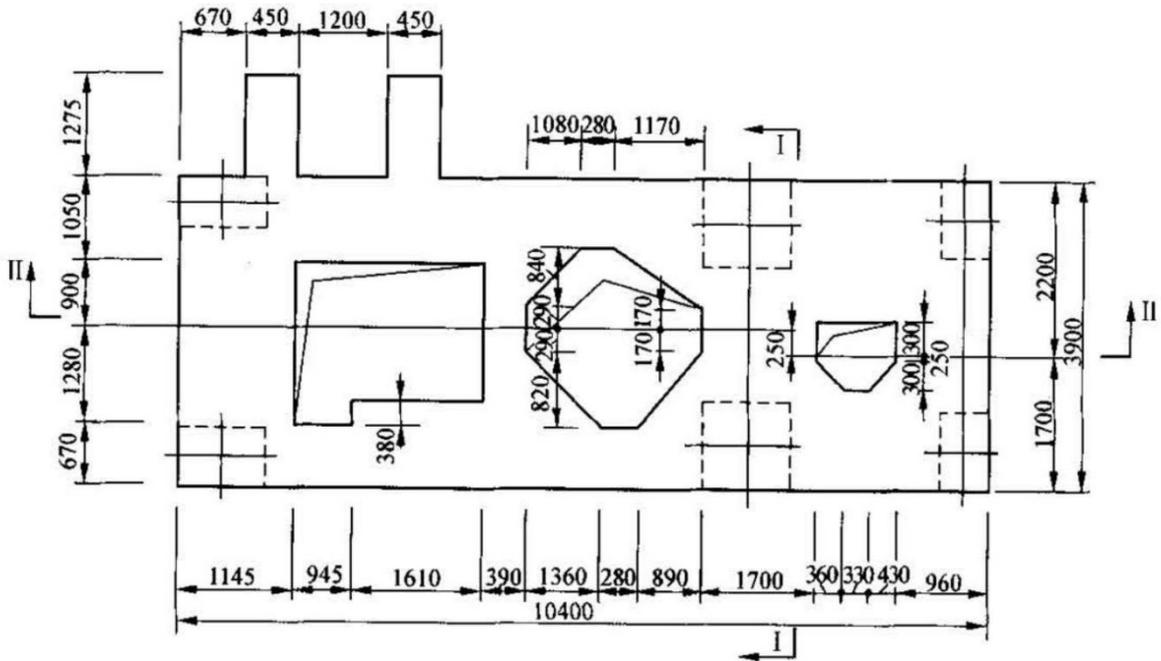


图 B.3.1-2 顶板平面图

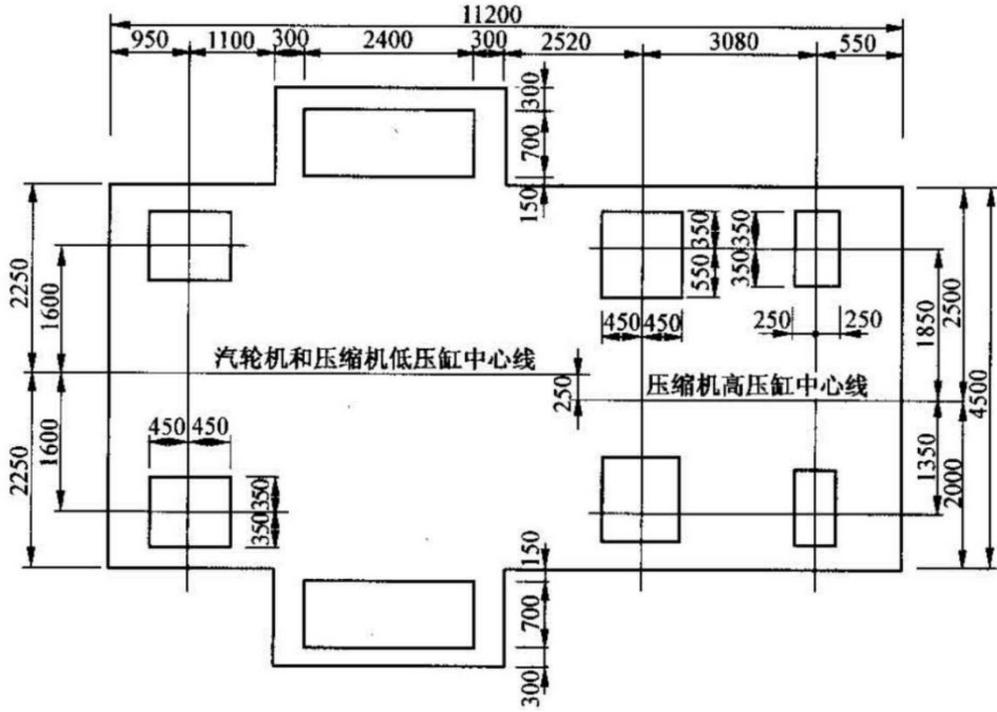


图 B.3.1-3 底板平面图

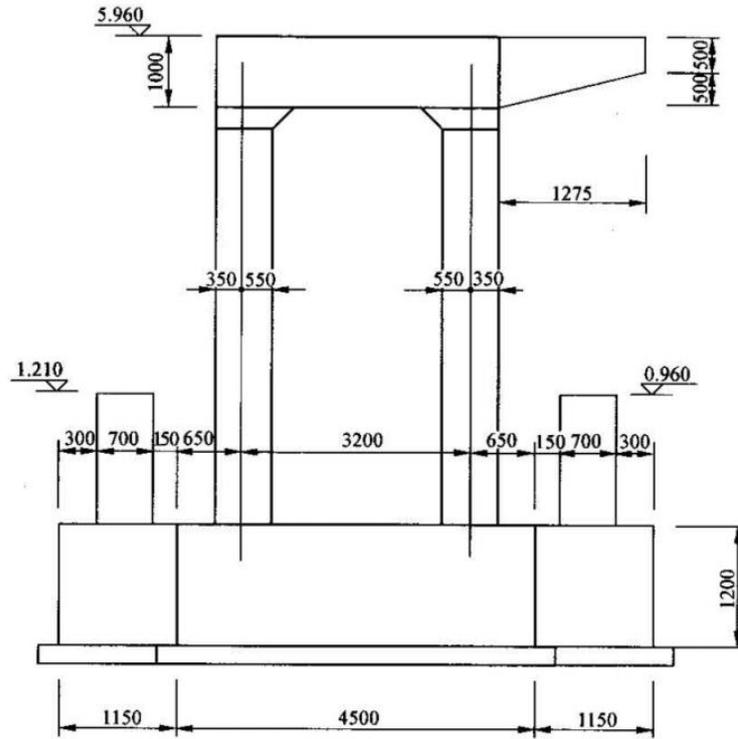


图 B.3.1-4 I - I

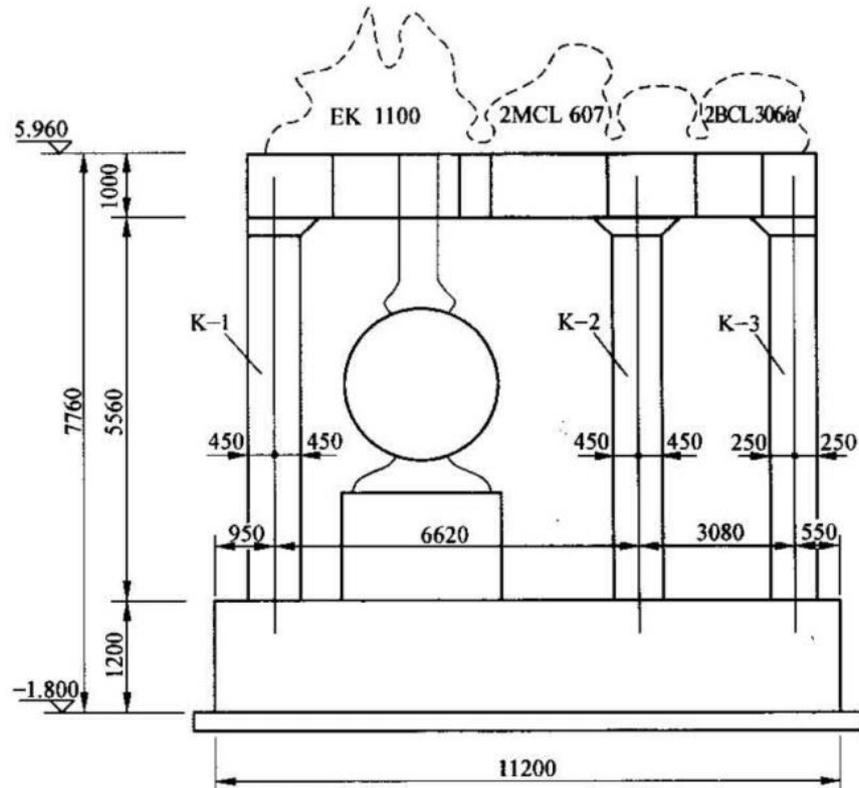


图 B.3.1-5 II-II

B.3.2 按本标准第 6.2.1 条判断是否需要进行动力分析。

总振动荷载（见表 B.3.1-2）：

$$F_v = 8.2 + 5.8 \times 2 + 3.1 \times 4 + 0.9 \times 2 + 0.85 \times 4 + 2.4 \times 2 = 42.2 > 20 \text{ (kN)}$$

不满足本标准第 6.2.1 条的要求，需要进行基础的动力分析。

B.3.3 建立有限元计算几何模型。

顶板采用考虑剪切变形的壳单元（面截面），柱采用梁单元（框架截面），框架柱和顶板连接节点按刚域处理，将基础框架柱底端与底板的连接简化为固定刚性支座；根据洞口尺寸及荷载点位置进行有限元划分，有限元计算几何模型见图 B.3.3-1。

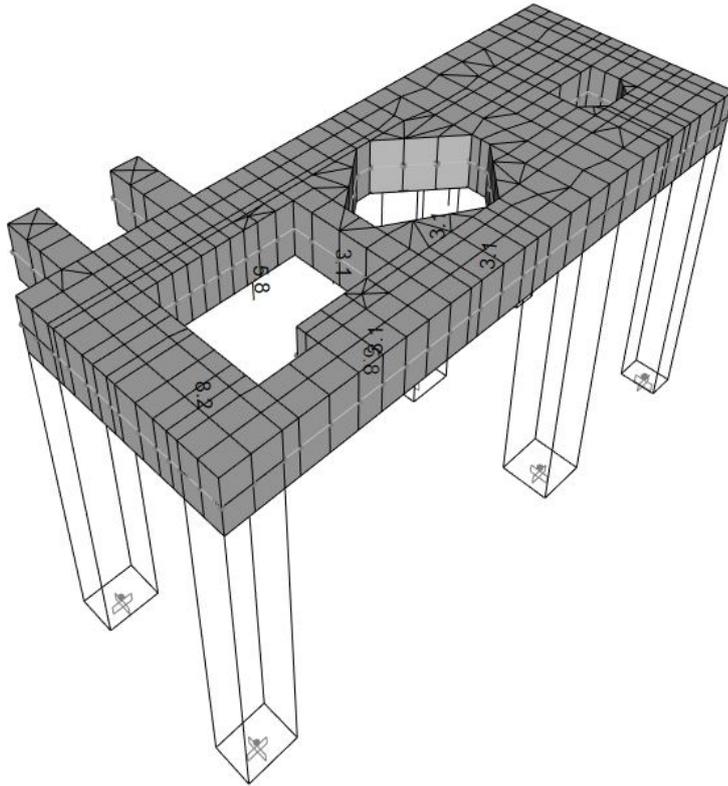


图 B.3.3-1 有限元几何模型

B.3.4 采用稳态频域分析方法（以 SAP2000 为例）。

1 定义稳态函数： $SQ(f)=f^2$ ， $f=0-300\text{Hz}$ 。

2 定义荷载模式：

恒荷载 DL，取设备重量，基础自重等。

机器振动荷载按其工作转速和作用方向分别定义如下：

$n=7050\text{r/min}$ ，对应 x,y,z 方向的振动荷载分别定义为 $1F_{vx}$ ， $1F_{vy}$ ， $1F_{vz}$ ；

$n=13600\text{r/min}$ ，对应 x,y,z 方向的振动荷载分别定义为 $2F_{vx}$ ， $2F_{vy}$ ， $2F_{vz}$ 。

3 定义荷载工况。

恒载工况：采用线性静力工况；

模态工况：最大模态数量取 60，模态类型采用特征向量；

稳态工况按机器工作转速定义两个稳态工况，分别为：

稳态工况 SS1，荷载取 $1F_{vx}$ ， $1F_{vy}$ ， $1F_{vz}$ ，比例系数取 $1/117.5^2$ ，最低、最高频率取 0Hz 、 147Hz ；

稳态工况 SS2，荷载取 $2F_{vx}$ ， $2F_{vy}$ ， $2F_{vz}$ ，比例系数取 $1/226.7^2$ ，最低、最高频率取 0Hz 、 283Hz ；

滞变阻尼采用 0.125。

4 荷载组合。

计算振动响应指标时，不同工作转速振动荷载的效应组合采用“SRSS”组合。

5 运行分析及结果查看。

工况 SS1，荷载作用点 P1 振动速度的频响曲线见图 B.3.4-1，其它工况各节点的频响曲线可同样查看。

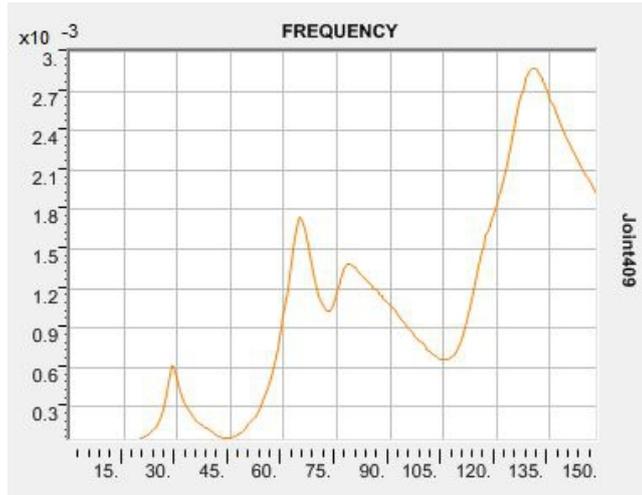


图 B.3.4-1 荷载点 P1 振动速度频响曲线

按本标准 3.2.2 条判断控制点有效振动速度是否满足振动速度控制要求。

B.3.5 采用振型分解时程分析方法（以 SAP2000 为例）。

1 定义时程函数按机器工作转速定义两个时程函数：

Sine1(7050r/min)：周期取 1/117.5，时间步数/周期取 8，周期数取 20，幅值取 1；

Sine2(13600r/min)：周期取 1/226.7，时间步数/周期取 8，周期数取 20，幅值取 1；

本例采用时程分析法未进行扫频计算，若进行扫频计算还需按扫频频率定义相应的时程函数。

2 定义荷载模式，同稳态分析法。

3 定义荷载工况。

恒载工况：同稳态分析法；

模态工况：同稳态分析法；

时程工况采用模态法，按机器工作转速定义两个时程工况，分别为：

时程工况 TH1，荷载取 $1F_{vx}$ ， $1F_{vy}$ ， $1F_{vz}$ ，时程函数取 Sine1，时间步数取 160，时间步长取 0.001064；

时程工况 TH2，荷载取 $2F_{vx}$ ， $2F_{vy}$ ， $2F_{vz}$ ，时程函数取 Sine2，时间步数取 160，时间步长取 0.0005515；

模态阻尼采用 0.0625。

4 荷载组合。

计算振动响应指标时，不同工作转速振动荷载的效应组合采用“SRSS”组合。

5 运行分析及结果查看。

工况 TH1，荷载作用点 P1 的振动速度时程曲线见图 B.3.5-1。工况 TH2、TH1 和 TH2 的 SRSS 组合工况各节点的振动速度时程曲线可同样查看。

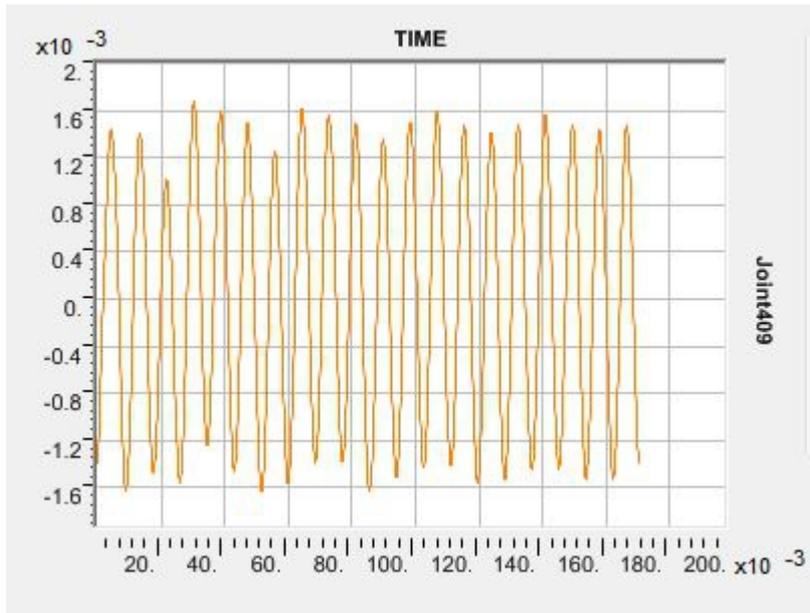


图 B. 3. 5-1 荷载点 P1 振动速度时程曲线

按本标准 3.2.2 条判断控制点有效振动速度是否满足振动速度控制要求。

附录 C 压缩机基础施工要求

C.0.1 基础施工前，应核对到货机器与设计图纸相符合时，方可施工。

C.0.2 压缩机基础应避免冬季施工，若必须冬季施工时，应采取有效措施，防止混凝土表面骤冷。混凝土的强度等级应提高一级，且不得掺加氯盐。

C.0.3 压缩机基础施工时不宜留施工缝。若不可避免时，应设置在底板与柱子交接处。

C.0.4 压缩机基础底板上的附属设备基础，如与底板两次浇灌时应预留锚固钢筋。

C.0.5 在施工过程中应采取有效的固定措施以保证所有预埋件、地脚螺栓（或套管）的准确位置并无损坏腐蚀。

C.0.6 浇捣混凝土时，应注意预埋件及梁柱节点附近混凝土必须振捣密实，基础混凝土不得有裂缝、蜂窝及露筋等缺陷。

C.0.7 在施工过程中必须认真填写施工记录，并按规定留混凝土试块。

C.0.8 压缩机基础的施工缝及二次灌浆施工要求：

1 若基础底板较厚，施工缝留在底板内时，施工缝构造处理应预留插筋：直径 8~12mm，长度 600~700mm，埋入施工缝两面混凝土内各 300~350mm，间距 400~600mm。

2 二次灌浆层的无收缩细石混凝土或快硬水泥砂浆必须与压缩机基础粘结牢固。宜采用工厂提供的袋装灌浆料。

3 灌浆前必须将混凝土表面凿毛，并将其松动的混凝土及其附着物铲除，冲刷干净。

4 灌浆前两天及灌浆前对灌浆部位洒水，灌浆时应排除灌浆部位的积水。

5 灌浆前先浇一层水泥浆（水泥强度等级不低于 42.5），浇灌混凝土宜自一端开始逐浇逐震捣密实，以免形成气泡。

6 浇水自然养护保持湿润，温度以 20℃为宜。

C.0.9 压缩机基础的施工，须遵守有关国家现行的施工验收规范。

C.0.10 所有外露铁件表面，设备安装之后均应进行防腐表面防护。

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”或“可”；反面词采用“不宜”。

2 本标准中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《建筑地基基础设计规范》 GB 50007
- 《建筑结构荷载规范》 GB 50009
- 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 《岩土工程勘察规范》 GB50021
- 《动力机器基础设计标准》 GB 50040
- 《工业建筑防腐蚀设计标准》 GB/T 50046
- 《建筑结构可靠性设计统一标准》 GB 50068
- 《建筑结构设计术语和符号标准》 GB/T 50083
- 《地基动力特性测试规范》 GB/T 50269
- 《建筑工程容许振动标准》 GB 50868
- 《建筑振动荷载标准》 GB/T 51228
- 《工程振动术语和符号标准》 GB/T 51306

中华人民共和国行业标准

离心式压缩机基础设计标准

HG/T 20555—202×

条文说明

目 次

1 总 则.....	35
2 术语和符号.....	35
2.1 术 语.....	35
2.2 符 号.....	36
3 基本规定.....	37
3.1 一般规定.....	37
3.2 设计原则.....	38
3.3 结构动力分析.....	39
4 设计原始资料.....	41
4.1 压缩机组技术资料.....	41
4.2 厂房内有关设备、平台、基础条件.....	41
4.3 工程地质技术资料.....	42
5 构造要求.....	43
5.1 一般要求.....	43
5.2 构造尺寸要求.....	43
5.3 配筋要求.....	44
6 正常使用极限状态计算.....	45
6.1 一般规定.....	45
6.2 振动响应计算.....	45
7 承载能力极限状态计算.....	48
7.1 一般规定.....	48
7.2 荷载及荷载效应组合.....	48
7.3 强度计算.....	49
附录 A 多自由度有限元动力分析模型.....	50
附录 B 离心式压缩机基础动力分析方法.....	51
B.1 稳态频域分析方法.....	51
B.2 振型分解时程分析方法.....	51

1 总 则

离心式压缩机广泛应用于化工、石化、冶金、纺织等工业部门。

本章阐述了制定离心式压缩机基础（以下简称压缩机基础）设计标准的目的、适用范围、基本原则和依据。

本标准主要是通过总结分析化工行业和部分石化行业几十年以来，对上百台高转速压缩机基础的测振分析结果，以及对浙江镇海炼油厂化肥装置的压缩机厂房多台压缩机基础进行全过程（从基础、机器安装、管道连接的自振测试和开、停车的振动反应）的测振分析，尤其是国内引进大型合成氨和乙烯等装置的设计、施工和稳定运行成功经验，同时吸取了国内外成熟的理论编制的。

本标准制订了基础结构选型原则、各项构造措施的具体规定，对于需要作动力分析的压缩机基础，本标准给出了采用空间多自由度有限元分析的计算模型和分析方法，以供设计使用。

本标准主要针对离心式压缩机框架式基础的设计，对于与此类似的鼓风机也可参照应用，但本标准不适用于下列基础的设计：

高转速离心式压缩机的块体式或墙式基础；

活塞式压缩机等容积式压缩机（包括螺杆式压缩机及滑片式）的块式或墙式基础；

钢结构基础，国外已有应用，国内尚无实践经验。

当高转速离心式压缩机基础为块体式或墙式基础时，机器振动荷载按本标准确定，基础构造及动力计算应遵照《动力机器基础设计标准》（GB50040）的规定。

原规定的适用范围为工作转速大于 3000r/min 的离心式压缩机基础。这个适用范围主要源自两个因素：振动荷载的适用范围和地基刚度的影响。根据《建筑振动荷载标准》GB/T 51228-2017 第 4.2 节，旋转式压缩机振动荷载的适用范围已经不再限于大于 3000r/min 的机器。关于地基刚度的影响，机器转速低于 3000r/min 时，不能忽略地基的弹性对框架式压缩机基础振动的影响。采用有限元分析可以建立相应的地基模型，考虑地基弹性的影响。因此，本次修订取消了这个限制并增加了考虑地基刚度的条款，扩大了标准的适用范围。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 透平式压缩机根据转子叶片型式分为离心式和轴流式。离心式压缩机根据气体出口压力分为压缩机、鼓风机、通风机。离心式压缩机根据结构型式分为单缸（又分单级、多级）和多缸。

2.1.2 压缩机组主要由驱动器（又称原动机）带动压缩机旋转构成。当原动机和压缩机转速不同或压缩机各缸转子转速不同时，需要在它们之间设置变速器（箱）。近来工程设计中压缩机组还带有发电机、膨胀机或鼓风机。

上述机器均设置在厂房二层平台（即操作层）。其他辅助设备如进出管线、润滑油系统、冷却系统一般布置在底层或底层与操作层之间。

2.1.9 速度均方根值的引入有利于与仪器实测值进行比较。有些压缩机厂家提供速度均方根值即“速度有效值”的容许值 $[v_{rms}]$ 的要求。

2.1.15 简谐振动荷载作用下复刚度形式的强迫振动微分方程为： $[M]\{\ddot{u}\} + (1+ir)[K]\{u\} = \{F\}e^{i\omega t}$ 。方程中复数项的实部 $[K]\{u\}$ 表示弹性力，虚部 $ir[K]\{u\}$ 表示滞变阻尼力， r 为滞变阻尼系数，虚数单位 i 表示阻尼力与速度相位相同。

2.2 符号

与《工程振动术语和符号标准》GB/T51306-2018 协调，修改有关符号。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 由于辅助设备安放于楼层与底层之间，故离心式压缩机基础一般设计成独立的空间框架结构，它占地面积少，构件尺寸经济、安全，利于设备管道的安装、操作和检修。

在计算时可简化为嵌固于底板上的框架；由顶板（横梁、纵梁）及柱子、底板组成空间结构体系，基础各构件受力简单明确，故目前大多数设计采用空间框架的动力计算程序。这种结构形式可通过改变构件的截面尺寸，主要是柱子尺寸，调整基础的自频来得到良好的动力特性。

3.1.2 根据工程实践，压缩机框架式基础均采用现浇钢筋混凝土结构，具有整体性、耐久性好的优点，施工速度快、质量好。

本条结合国家现行规范，提高结构安全可靠度及耐久性，将压缩机基础混凝土强度等级提高，同时与《混凝土结构设计规范》(GB 50010)协调，增加了钢筋HRB500的使用。

3.1.3 本条强调压缩机基础的设计应根据地基土的物理特性，确定地基方案和基础形式，力求避免基础产生有害的沉降和倾斜。因机器的主轴为多点支承在轴承上，对基础的沉降和偏沉比较敏感，与机器连接的高压管件由此将产生附加应力。基础的沉降和偏沉值一般不易得到精确的计算结果，因此在设计时应认真研究确定地基处理方案。

3.1.4 本条要求机组总重心与压缩机基础底板的形心或桩的重心位于同一竖直线上，并给出了相应的偏心距限值。虽然偏心距限制是防止基础偏沉的一项有效措施，但更主要的目的是简化振动计算模型。把偏心距限制在5%以内，可以忽略偏心距对振动的影响，近似地认为质心与刚心重合，这样减少了耦合振型。对于采用传统解析法进行动力分析的块式刚体基础模型，可以忽略竖向平动与绕水平轴转动的耦合，水平平动与绕竖向轴扭转的耦合，将其转变为竖向振动和扭转振动两个独立振型，从而避免了求解更多的耦合振动方程，使得计算变得简单、方便。由于框架式动力基础的动力分析采用多自由度有限元方法，可以在计算模型中考虑偏心影响。

3.1.5 基础设置观测点将为生产过程中基础的工作状况提供原始记录，并能及早发现压缩机基础的沉降和倾斜，有效地减少由于压缩机基础的沉降和倾斜造成的次生灾害。

3.1.7 当厂房内同时布置有活塞式压缩机和离心式压缩机时，据实测表明，活塞式压缩机的振动对离心式压缩机的影响较大，可使其振动幅值增大（此处以振动速度叠加较为合理）。因此在设备布置时宜相互远离，使振动的相互影响最小。

根据已有实测资料，在离心式压缩机基础4倍边长范围内，尤其在软弱地基上，该类相邻机器的影响要予以酌情考虑。

3.1.9 本条明确了与压缩机连接而产生较大振动的管道支座设置问题。因为离心式压缩机基础的沉降和倾斜、振动，都将对与其连接的管道产生不利影响。

3.1.10 压缩机基础一般应与建筑物基础分离，其原因之一是考虑到动力基础的振动能量经常不断地影响厂房基础及厂房结构，使厂房结构产生附加应力，降低厂房结构的安全储备。其二是压缩机基础与厂房基础的荷载相差悬殊，从而产生不均匀沉降而相互影响。其三是为使压缩机基础受力明确。为此，一般情况下应使机器基础与建筑物基础及地坪分开，国外有关规范及我国《动力机器基础设计标准》(GB 50040)都是如此规定的。但我国浙江镇海炼油厂的化肥厂，压缩机厂房因地基承载力过低，将多台构架式机器基础与厂房的基础设计在共同的底板上，自1978年投产以来使用情况良好。

3.1.11 本条旨在减少压缩机振动对厂房结构和仪表的影响。

因压缩机基础底板可视为不动点，且厂房自频与压缩机扰频相差很大，故建筑物底层地面可与基础相连。

3.1.12 本条结合近年来离心式压缩机基础尺寸和高度越来越大，横向单跨跨度及高度均超过10m，甚至在基础顶板上支承厂房。通过计算，8度时地震组合大于基本组合。地震作用不可忽视，故建造在大于7度区的离心式压缩机基础，当高度较大时，宜考虑地震作用。

下面介绍一个工程实例：

中石化北京建设工程公司前几年承接的上海赛科 90 万吨/年乙烯装置中，有 2 个压缩机厂房均采用压缩机基础顶板上支承厂房框架的整体组合方法。

1. 结构型式：

1) 基础采用预制桩（周边为斜桩）

2) 钢筋混凝土框架式压缩机机基础，基础平面尺寸为 13.41m×22.86m，顶面标高为 11.00m，顶板厚度 1.2m，底板厚度 1.5m。

基础柱网：横向二柱，纵向五柱，柱断面尺寸为 920mm×2440mm；

3) 标高 11.0m 以上为门式钢框架，框架跨度为 12m，檐口标高为 23.0m，框架下端支承于压缩机顶板上。吊车起重量 60t，屋盖为轻型钢结构。

柱子断面：吊车梁以下为 HA800×400×16×25；吊车梁以上为 HW400×400×13×21。

2. 压缩机设计参数：

1) 多级离心式压缩机，额定功率为 44033kW，工作转速 $n=4636\text{r}/\text{min}$ ；

2) 压缩机组总净重 338.4t，机器总扰力 20.52t。

3. 结构计算：

静力计算考虑 7 度地震组合，但为风荷载控制。

4. 振动计算值：

1). 中国成达工程公司软件《空间构架式动力机器基础结构动静力计算与施工图绘制应用系统》计算最大振幅值： 横向为 $4.688\ \mu\text{m}$ ；纵向为 $1.127\ \mu\text{m}$ ；竖向为 $2.181\ \mu\text{m}$ 。

2). 美国计算软件《GT-strudl》

计算最大振幅值： 横向为 $4.88\ \mu\text{m}$ ；纵向为 $1.54\ \mu\text{m}$ ；竖向为 $5.23\ \mu\text{m}$ 。

5. 实测结果：

工作转速 $n=4370\text{r}/\text{min}$ 时实测值，横向为 $4.47\ \mu\text{m}$ ；纵向有两个点分别为 $6.22\ \mu\text{m}$ 和 $5.77\ \mu\text{m}$ 。

工程于 2005 年 9 月 30 日试车投产，厂房及两台机组运转正常。

实测纵向振幅有两个点超过容许值，可能是由于开车阶段管线物料流动不正常所致，不是机器扰力原因，对生产无不利影响。

在编制本标准过程中，按照构造尺寸规定，将柱断面改小为 $1.0\text{m}\times 1.2\text{m}$ （横向），对该单跨横向框架进行 8 度地震下的结构分析，结果表明：8 度地震作用起控制作用，柱的计算配筋率为 0.6%。该基础上支承厂房和吊车，故地震力较大。

3.2 设计原则

3.2.2 根据《建筑工程容许振动标准》GB50868-2013，增加了基础容许振动速度均方根值，并补充隔振基础的容许振动值。

3.2.5 因离心式压缩机的振动控制要求较严格，框架式压缩机基础设计一般由刚度控制，构件截面尺寸过大，与普通框架结构相比侧向刚度更大，这类质量重、刚度大的重型结构在地震中必然会产生更大的地震作用，抗震十分不利，在高烈度区尤为显著。采用隔振设计即可以控制结构的振动响应，也可以减小构件截面尺寸，改善结构的抗震性能，起到隔振和减震的双重作用。

传统的离心式压缩机一般布置在 6-9 米标高，近年来，压缩机设备的标高有增高的趋势，框架式压缩机基础的高度已经超过 10 米。随着高度的增加，框架式压缩机基础的构件尺寸及占用的空间也增加，导致基础与厂房结构冲突的增加，传统的压缩机基础与厂房结构脱开的做法面临着挑战，可能不得不将两个结构联合处理。这种情况下，隔振设计是一个切实可行的解决方案，电力行业已有高位汽轮发电机基础与厂房结构相连的隔振设计先例。

改扩建工程需要更换新型设备，既有的框架式压缩机基础不能满足新设备的动力要求时，隔振改造

是一项经济有效的技术措施。

3.2.6 与针对水平地震动的建筑隔震不同，压缩机基础在竖向和水平方向同时作用着振动荷载，钢制圆柱螺旋弹簧隔振器在水平和竖向都有很好的隔振效果。

3.3 结构动力分析

以前，框架式压缩机基础动力分析习惯采用专门的计算软件如 TLJCAD, FMCAD 等。近年来，随着通用有限元软件在各设计单位的普及和应用，越来越多的设计单位采用 SAP2000、STAADPro 等有限元软件进行动力基础分析，有限元软件与专门的动力基础计算软件相比，具有适用范围广，功能强，升级维护及时等优点。为适应这种趋势，更好地指导动力基础计算分析。调整了原规定部分动力分析相关内容，增设了“结构动力分析”一节，增加若干动力基础计算模型和分析方法条款。

3.3.1 框架式压缩机基础本身属于空间多自由度结构体系。过去，受计算手段的限制，框架式压缩机基础不得不采用简化的杆系单元计算模型。现今，结构有限元软件已经相当普及，故规定框架式压缩机基础采用多自由度弹性有限元计算模型。

3.3.5 基础自由振动分析一般采用振型分解法求解振动微分方程，来获得结构的振型和自振频率。振型数量取决于两个因素。一是计算精度的要求，有效参与质量通常需要达到 95%左右；二是计算敏感性的要求，振型应覆盖足够的频率范围，使得结构的最高固有频率不低于机器频率的 1.25 倍。

有限元软件进行强迫振动分析的方法有两种：频域法和时域法。

稳态分析是一种常用频域分析。框架式基础具有较多的振型和自振频率，稳态分析可以计算指定频率范围内多个频率振动荷载的响应，易于获得振动频率与结构固有频率产生共振时的振动响应，更适合框架式离心式压缩机基础的振动分析，因此，框架式压缩机基础动力分析建议优先采用稳态频域分析方法。稳态分析的特点是可指定频率范围及频率数量，进行多频率响应计算，帮助设计人员分析和避免共振、疲劳等不利影响。为最大程度地找出结构与机器共振的可能性，确保结构安全，通常在机器振动频率附近范围内进行扫频计算，扫频计算采用频域分析会较为方便。如果频率范围取 0-1.25 倍工作转速，并取基础的振型频率和工作转速作为附加频率点，这样不仅涵盖扫频范围，还可以模拟机器从开车到工作转速的加速过程，捕捉在加速过程中结构频率与机器频率的共振行为。

采用振型分解时程分析（时域法）进行强迫振动分析时，受初始条件的影响，时程分析结果将会包含结构的瞬态响应。有的软件在时程分析方法中提供了处理周期性荷载的功能，程序可以自动调节振动初始阶段的响应，使之等于结束时的数值，得到一个稳态响应结果。如果软件没有这样的功能，为了获得结构的稳态响应，不仅需要计算足够的振型数并设置足够长的时域范围和足够短的时间步长，还需用户人工判断确定稳态振动峰值。对于扫频计算，因需要定义大量的时程工况，时域法不如频域法方便。

由于结构动力计算模型和计算参数很难和实际结构完全相符，结构实际的固有频率与计算结果存在偏差。为最大程度地找出结构共振的可能性，确保结构安全，应在机器振动频率附近范围内进行扫频计算。关于共振区的范围，国内外各部规范的取值有所差别。总体范围在机器频率的 0.7-1.3 倍之间，本标准取值综合考虑了框架式基础结构形式的特点、振型分析所需的精度要求和有限元模型单元精度较高等因素。

3.3.7 针对不同的动力分析方法，应选取相应的阻尼形式和阻尼参数。采用频域分析一般采用滞变阻尼。根据滞变阻尼理论， $r=2\zeta\omega/\omega_n$ ，共振状态下频率比 ω/ω_n 等于 1 时，滞变阻尼系数 r 为黏性阻尼比 ζ 的 2 倍。

影响阻尼比的因素很多，包括结构的材料、频率以及应力水平等。关于混凝土材料阻尼比取值的问题，国内外标准有很大的差异。德国 DIN4024（1988）和 美国 ACI351.3R-18 均取 0.02；ASCE Task Committee(1987) “Design of Large Steam Turbine Generator Foundations” 中建议操作荷载工况取 0.02，事故荷载工况或构件的应力水平超过 50%的极限承载力时取 0.07；《建筑抗震设计规范》GB50010-2010 规定一般钢筋混凝土结构取 0.05。国内一些资料显示，混凝土汽轮机基础阻尼比的实测结果为 0.02；《动力机器基础设计标准》GB50040-2020 附录 B 规定：“结构阻尼比可根据振动扰力取 0.02-0.0625，当振动扰力值小于转子平衡等级 G6.3（即 $e_m\omega_0=6.3\text{mm/s}$ ）对应荷载时，阻尼比宜取小值。” 在一些结构动力学文献中也提供了结构阻尼比的测量数据和建议：从定性分析判断，结构的振型阻尼比随振幅的不同而变化，随着振动强度的增大，自振频率变小，振型阻尼比变大。微振时，阻尼比较小，为 1%-2%；微、小振（震）时，阻尼比达 3%；小、中振（震）时，阻尼比可达 2-7%。以定量结果建议，对于工

作应力小于 1/2 屈服点，且质量好的钢筋混凝土结构，阻尼比推荐值为 2-3%。离心式压缩机基础机器产生的振动响应幅度处于微、小振动量级，其受力状态一般处于低应力水平。综合考虑提出本条黏性阻尼比的取值建议。关于平衡品质级别，根据《机械振动 恒态（刚性）转子平衡品质要求 第一部分：规范与平衡允差的检验》（GB/T 9239.1-2006）压缩机、蒸汽轮机以及高转速电机为 G2.5，透平增压机、变速齿轮为 G6.3。

混凝土的弹性模量在动力计算时不考虑动态的影响，按混凝土强度等级查有关钢筋混凝土的规定确定，因弹性模量对结构自频影响较小。

3.3.8 针对取消机器工作转速大于 3000r/min 的限制，相应地增加考虑地基弹性的规定。地基的弹性对框架式基础的振动有一定的影响，其影响是降低了基础的固有频率。对低频机器基础（例如转速在 1000r/min 及以下）影响较大，对高频机器基础影响较小。有些文献指出：机器转速高于 1500r/min 时，基础的固有频率计算可不考虑地基弹性的影响；机器转速低于 500r/min 时，基础的固有频率只需考虑地基弹性而不必考虑结构的弹性；机器转速在 500- 1500r/min 之间时，需要同时考虑结构和地基的弹性。

4 设计原始资料

4.1 压缩机组技术资料

本节中条文的核心是明确设计压缩机基础时，需要由压缩机制造厂提供有关压缩机性能的技术数据和资料（包括基础图纸），这是设计压缩机基础的基本依据。

设计人员得到压缩机组条件时，首先要判断条件的完整性和正确性，并与制造厂或工艺专业密切配合解决有关问题。

(1) 机器的名称和转速：压缩机组由数台机器组成，一般布置在一根轴线上。分析原动机是电机还是蒸汽机、汽轮机。若是电机，则转速一般为 1500r/min 或 3000r/min，带动高转速的压缩机时，一定要在两者之间配置变速箱，此时变速箱两侧的机器分别布置在两根轴线上。

(2) 厂家一般会提供各台机器的总重（包括底座），还会提供基础平面上相关作用点的静载值。设计人要校核相应各作用点静载之和与该台机器自重是否一致。

(3) 厂家应提供各台机器的总振动荷载（或振动荷载公式）和基础平台上相关作用点的振动荷载值。设计人要校核相应各作用点振动荷载之和与该台机器总振动荷载是否一致。也可用本标准 6.2.3 条校核外商所提的振动荷载数值、方向、作用点是否合理。

(4) 厂家提出容许振动要求可能是“容许振动速度”，也可能是“容许振幅”，国际通行对该类频率的振动以“振动速度”控制。我国标准采用 5 mm/s，相应的容许振幅见图 6.2.6。

若厂家提出的容许振幅或容许速度过严（与图 6.2.6 比较），设计难以达到时（应事先通过试算判断制造厂提供数据可否满足容许振动要求），可与厂家协商，并以国际上较严格的德国标准 DIN([v]=4 mm/s) 进行讨论。

振幅与速度的换算公式为：

$$[u] = \frac{[v]}{\omega} = \frac{[v]}{0.105 \times n} = \frac{5 \times 10^3}{0.105 \times n} (\mu\text{m})$$

由上式可见，容许振幅 [u] 与转速 n 成反比，（见图 6.2.6）当转速越高时，容许振幅越小（容许速度不变）。若压缩机组有两个以上转速， n 应以“当量转速”（在两个转速之间）代入，在设计计算前可酌情以两种转速进行分析。

4.2 厂房内有关设备、平台、基础条件

本节中的条文列出了应由工艺专业提供的设计资料。当确定压缩机基础尺寸及埋深时，需要考虑临近厂房及构筑物的基础尺寸和埋深，尽可能将压缩机基础和厂房基础放置于同一标高上，以方便施工，并可使压缩机基础的振动尽可能少地传递给厂房基础。否则，必须考虑施工顺序，如挖较深的基槽时，放坡不至于影响浅基础的地基。

设计压缩机基础时还要考虑附近各种地沟的布置和尺寸、热力管道、操作平台的布置、二次灌浆层的要求等。

在设计压缩机基础时，需要考虑由于压缩机基础振动向周围传递，对临近的设备、仪器造成危及生产的影响。因此需要从总图布置、设备布置及基础设计方面考虑，采取相应措施，力求最大限度地减少或消除这种潜在的有害振动影响。同时还应查明该压缩机基础附近有无其它振动设备的情况，以便综合考虑对该基础的振动影响，尤其注意活塞式压缩机对该基础的振动影响。

4.3 工程地质技术资料

增加考虑地基弹性时，有关地基动力参数的规定。

5 构造要求

大量的设计实践表明，压缩机基础结构的各部件的合理尺寸、构造是设计成功的基本前提，是保证压缩机基础正常工作的必要条件。

5.1 一般要求

5.1.1 本条根据国内外大量成功的设计经验总结，要求基组下部固定部分（柱高 1/2 以下）的总重，应大于基组上部参振部分（即柱高 1/2 以上）的总重。这既可降低顶板的振动，是结构稳定性的需要，也是动力计算前提的要求，因此基础底板的厚度应大于顶板的厚度。

5.1.2 本条要求在设计中尽量减少构件承受较大的偏心荷载，以改善构件在动力作用下的工作条件，并使计算模型的假定条件接近实际情况。

5.1.4 本条提出的钢筋混凝土保护层厚度，是结合混凝土耐久性及一般化工大气腐蚀情况考虑的。

当顶板和梁同高时，施工图中宜注明各层、各类钢筋保护层的厚度，以利于施工。

5.1.5 压缩机基础顶面的二次灌浆层是指在压缩机就位并经垫片找平、校准地脚螺栓固定后，将基础顶面与压缩机底盘之间空隙用无收缩材料浇灌。此空隙一般由制造厂给出，均大于 50mm。无收缩材料可采用无收缩细石混凝土、无收缩砂浆等。有些外商要求采用环氧树脂灌浆料，虽然贵一些，但它可保证不会开裂。

本标准推荐二次灌浆层采用工厂配制好的袋装灌浆料。这种灌浆料科学配方，便于施工，可确保质量。它避免了现场灌浆料配制不当造成的事故。

5.2 构造尺寸要求

5.2.1 为使结构简单施工方便，基础底板宜采用矩形平板，但不排除为支承其附属设备而使底板局部突出的情况。但根据基础的具体情况，设计者经方案比较，认为采用梁板式或井式板具有明显优越性时仍可采用，所以标准中没有对这两种形式加以排除的限制。

关于底板厚度问题，德国规范 DIN4024 对透平压缩机框架式基础底板厚度规定不小于底板长度的 1/10。

近年来，化工、石化装置生产能力的不断增大，离心式压缩机的体量、重量、各部件质量大为增加；另外目前压缩机组有趋向于一台原动机既带动压缩机又带动发电机、膨胀机等多台机器，这样基础长向尺寸由原先 8~12m 激增至 24m 左右。

本标准为适应上述形势，对底板厚度做了调整，取底板长度的 1/10~1/15。若底板长度为 24m，厚度取 1/15 即为 1.6m，也达到足够刚度的要求。规定底板最小厚度的目的是保证底板具有一定的刚度以减小基础的不均匀沉降和降低基础顶板的振动。

5.2.2 根据多年设计资料，国外厂家提供柱截面参考尺寸有两类，一类是刚性方案，柱子尺寸大至 1.0~1.8m（如日本厂商）还有一类是柔性方案，柱子截面为 0.5~0.8m（欧美厂商）这与各国设计理论不同有关。

近年来压缩机基础由十多年前的 5~7m 高（二层厂房标高），增至 10~12m 高，故柱截面尺寸下限也相应调整为 1/10~1/12。

条文中没有规定柱子截面的上限，主要考虑此类机组的机器自重、转子重、转速的变化范围较大，故没有规定柱子尺寸上限。从基础的动力特性来看，加大柱子断面不一定有利，柱子柔一些对减小上部振动有利，所以对基础设计者来说应当明确的：即在满足强度、稳定性要求的前提下，宜适当减少刚度、设计成柔性柱。

5.2.3 基础顶板应有足够的刚度和质量，目前国内、外均无具体规定，本条根据收集到的工程实例进

行统计和分析后定为顶板厚度不宜小于净高跨度的 $1/4\sim 1/6$ ，并不宜小于 800 mm。

总之，对于此类压缩机基础设计的底板、顶板厚度，柱的截面尺寸的确定，其要点是使压缩机基础的动力特性适应压缩机较高的工作转速（即扰频）。

5.3 配筋要求

5.3.1 本条中不规定含钢量的限制，而是从工程实际全面考虑，规定出底板周边配置钢筋网的直径和间距，并应满足最小配筋率的要求。架立钢筋的直径取决于板的厚度，间距取决于钢筋网的间距（一般为钢筋网间距的 3 倍）。

5.3.2 通过大量工程实例分析，根据多年工程实践统计，按照《混凝土结构设计规范》（GB 50010）和《建筑抗震设计规范》（GB 50011）的构造要求，本条文给出了纵向钢筋总配筋率的范围。

从方便和保证施工质量考虑，应避免钢筋密度过大，尤其在柱与纵、横向框架梁交汇处，否则易造成施工困难，形成蜂窝孔洞。

5.3.3 顶板中的暗梁或明梁与柱子构成纵、横向框架，由于振动荷载值及其方向是变化的，因此纵、横向框架梁截面上下应对称配纵筋，并需具有可靠的锚固长度。

5.3.4 根据国家现行的规范、标准和国外资料以及大量的工程实践，基础的表面温度均低于 80°C ，压缩机基础无需计算温度应力。本条是从构造要求给出的配筋量。

5.3.6 采取各种措施，固定顶板上的螺栓或螺栓套管，使其位置准确，不致施工时因振捣混凝土造成移位，是压缩机安装的必要条件。国内曾发生预埋套管位置不准确，无法安装，致使整台基础炸毁的事故。

6 正常使用极限状态计算

本章重点说明压缩机基础动力计算的基本观点。动力计算的指导思想是在满足本标准各项构造要求的前提下, 给出不做动力计算的界限; 同时提供了多自由度有限元结构的计算模型。其结果可使工程设计中部分压缩机基础省略动力计算, 或进行动力分析得到满意的设计。

基于上述观点, 结合几十年来的测振经验, 与各科研单位在动力计算的理论方面的深入分析和研究, 制定出不需要动力计算的界限。

建国以来, 对这类基础的设计大致经历三个阶段: 上世纪 50 年代~70 年代不作动力计算, 比较盲目强调构造; 70 年代~90 年代由于计算机的发展, 使得精确的空间多自由度分析成为可能, 通过大量实测分析, 推出了简化计算方法。90 年代以来, 由于掌握这类机器基础的客观规律趋于成熟, 对空间多自由度分析形成了比较完整的体系。

几十年来对这类基础的计算经历了一个“从粗浅认识到理论基础比较完善”的过程。

然而实践表明, 目前无论何种计算方法, 均未能真实充分地反映出压缩机基础实际的工作状态。作为科研和学术的一个课题, 这方面有待深入研究。

6.1 一般规定

6.1.2 将原规定“振动计算”修改为“正常使用极限状态计算”, 并调整增加相关内容。

6.2 振动响应计算

6.2.1 本条为不做动力计算界限。

- 1 压缩机基组的总振动荷载 $\leq 20\text{kN}$ 的划定, 是通过大量运行良好机器的基础, 进行振动实测数据, 统计分析得出的。
- 2 公式(6.2.1-1)是振动速度 $v=u\omega\leq 5\text{mm/s}$ 限值的转化。其中 v 是振动速度幅值, 按原规定第 6.0.4 条简化公式取值, 振动荷载按公式(6.2.3-1)代入:

$$v = u\omega = 1.3 \times 10^6 \frac{F_v}{W_s n} \quad (1)$$

$$= 1.3 \times 10^6 \times 0.25 W_g \left(\frac{n}{3000} \right)^{\frac{3}{2}} \times \frac{1}{W_s n} \leq 5$$

$$\text{得出: } 2.6 W_s > W_g \sqrt{n}$$

- 3 原规定提供了一种简化的动力分析方法。该方法由五环科技股份有限公司冯文龙首先提出的, 是建立在空间多自由度的理论分析上, 进行数理统计, 通过二十余个工程实例进行系数调整后建立的。该式深入浅出, 具有空间多自由度理论分析的内涵又具有单自由度简明的表达形式, 经过几十年来的实践结果, 表明该公式是可靠的。但在计算软件广泛应用的今天, 简化方法已经很少使用, 故在正文删除简化法条款, 仅在条文说明中保留简化法内容。

采用简化法作基础的动力计算时, 基础顶面的振动线位移幅值和速度幅值可按下式计算:

$$u_i = 1.2 \times 10^7 \frac{F_{vi}}{W_s n_i^2} \quad (1)$$

$$v_i = u_i \omega = 1.3 \times 10^6 \frac{F_{vi}}{W_s n_i} \quad (2)$$

式中: u_i ——在 F_{vi} 作用下基础顶面的振动线位移幅值(mm);

F_{vi} ——工作转速为 n_i 的机器的计算振动荷载 (kN)；

v_i —— F_{vi} 作用下基础顶面的振动速度幅值 (mm/s)；

n_i ——机器的工作转速 (r/min)；

W_s ——基组上部参振部分的自重 (kN)；

ω_i ——机器的转动圆频率 (rad/s)， $\omega_i=0.105n_i$ 。

6.2.2 从理论上分析，框架式压缩机基础是一个无限自由度的空间结构，采用多自由度体系分析，从计算简图和理论研究观察比较接近基础的理想振动状态。但是由于存在着参数的不准确性、假设的差异性，使得理想的数学模型和精确运算结果最终仍未能反映实际。具体表现在振动荷载的取值、荷载分布的任意性；忽略了机座、机壳和管道的刚度（实际上它们与基础共同整体工作）；机器的主轴并非刚性；混凝土的动弹性模量与静弹性模量的差异；以及阻尼变化等因素。同简化计算相比较，空间多自由度计算在理论方面能够比较逻辑地分析基础振动模式。一般计算值均大于实测值，可满足工程要求。

6.2.3 本条提出的振动荷载计算公式与原规定仅形式上有差别，并没有实质上的变化。原规定公式引用了 0.25 和 3000 两个系数，考虑到该公式是根据 API 相关标准推导出来的，与转速 $n=3000\text{rpm}$ 并无必然联系，故本次修订改为单一系数公式。

由于本标准动力计算采用振幅法，计算振动位移和振动速度时需要作用在基础上的振动荷载数据，而振动荷载值取决于压缩机制造的加工精度、动平衡水平、安装精度和初始偏心距等多种因素。因此确定准确的振动荷载值是非常困难的。

本条提出的振动荷载计算公式，只能根据转子的工作情况求出它的近似值。按可能产生的最大振动荷载值作为设计振动荷载值。在确定振动荷载计算公式时，仍从绕定点作圆周运动的质点的惯性力公式入手，

$$F = mr\omega^2 \quad (1)$$

力求通过机械制造行业的有关标准找出 r 值后，再用上式计算出振动荷载。如美国石油学会标准 API STANDARD 617 “Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressor for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services” 7th Edition 第 2.6.8.8 条规定：“机器在工厂试验期间，组装并平衡过的转子以最高连续转速或规定的运行转速范围内的任何其他转速下运行，在邻近和相对于每个径向轴承的转轴上所测的任一平面上未滤波振动的峰值-峰值振幅不得超过下列值或 $25\mu\text{m}$ (1 mil)”。两者取较小值：

$$u = 25.4 \sqrt{\frac{12000}{n}} \quad (2)$$

式中 u —峰值-峰值振幅，(μm)

n —最大连续转速，(r/min)

近似地认为式(2)中的峰值-峰值振幅的一半为 r 值，即

$$r = 12.7 \sqrt{\frac{12000}{n}} \quad (\mu\text{m}) \quad (3)$$

则

$$r = 1.39 \times 10^{-3} n^{-1/2} \quad (\text{m}) \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi n / 60 \quad (5)$$

$$m = W_g / 9.81 \quad (6)$$

将其式(4)、(5)、(6)代入式(1)，即得本标准振动荷载计算公式。

6.2.4 本条规定对基础承受多个不同频率的振动荷载时，计算总振动速度的组合原则。

透平压缩机组一般有多个不同频率的振动荷载同时作用在基础上，这些不同频率的振动荷载值和相位都是随机量。所计算的这些振动荷载值均为压缩机在正常运行状态时最大的振动荷载值。从几率分析，各振动荷载同时均达到最大值的几率是极小的。而且，振动荷载的相位是随机的，各振动荷载的方向完全相同的几率也是极少的。假定振动荷载值在 $0 \sim F_v$ 之间变化，相位在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化，根据概率理论分析，比较可能出现的最大动位移（即这些振动荷载产生的动位移幅值）是平方和的平方根。

6.2.5 通过对压缩机基础的大量实测可观察到，在压缩机开车、停车的过程中都会出现若干不同的共振峰值。这是因为当机器转速通过某一临界转速或通过基础的自振频率时，都将出现并发生共振峰。由于压缩机转速升、降变化很快，只是短暂的一瞬间就掠过，且共振振幅值很小，实际上对基础的振动影响甚微。因此，可按压缩机在正常工作状态下进行振动计算。有些机器开车过程采用多台阶分段升速的方法，升速台阶转速持续时间约 30-60 分钟，在工程中曾出现过异常振动问题，因此建议扩大扫频范围进行瞬态振动响应分析。

6.2.6 确定容许振动值的原则是，振动不影响压缩机和附近仪表设备正常工作，不妨碍工作人员的操作和健康；不产生对相邻建、构筑物结构的有害振动。

本标准基于我国几十年来的实践结果，考虑到实际应用和习惯，并与国家《动力机器基础设计标准》协调一致，采用容许振动速度峰值 $[v]=5\text{mm/s}$ 。这与实测结果是吻合的。1984~1985 年化工部建筑中心站组织国标《动规》第 6 章编制组对 88 台机组进行了普测分析，证明其中仅 2 台实测值大于 5mm/s ，占 2.2%，使用情况良好，因此将振动限值定为 5mm/s 是合适的。

本条还提出容许速度均方根值的概念，数值上它是与容许振动速度对应的。

7 承载能力极限状态计算

7.1 一般规定

动力计算、承载力计算和构造要求是压缩机基础合理设计的三项主要内容，结合几十年对运行良好的压缩机基础设计实例进行分析比较，对基础的承载力计算提出了实用性的要求。

7.1.2 本条规定了压缩机基础可不作承载力计算的五项条件。若实际工程设计中，能同时满足不做承载力计算的4项条件，将有助于设计效率的提高。

7.2 荷载及荷载效应组合

7.2.1 与《动力机器基础设计标准》GB5004-2020协调，调整了部分荷载分类：将管道推力、凝汽器真空吸力由可变荷载调整为永久荷载，增加地震作用。

7.2.2 本条给出钢筋混凝土框架计算应考虑的四项荷载及荷载效应组合。

安装活荷载和操作活荷载应由工艺专业提出，否则可按本标准给出的数值或参照《石油化工建（构）筑物荷载设计规范》（GB 51006）确定。

凝汽器的真空吸力是由于凝汽器内蒸汽的冷凝形成真空，与大气间产生压差所致。当凝汽器与汽轮机为柔性连接时（用波纹管或其它形式的补偿器），该力以拉力作用于压缩机基础上。若为刚性连接时，真空吸力则形成为系统的内力，不作用于基础上。真空吸力仅存在于冷凝式汽轮机或中间抽汽式汽轮机作驱动机，且凝汽器与汽轮机为柔性连接时。

真空吸力仅用于计算压缩机基础构件承载力，由压缩机制造厂提供，仅当制造厂不能提供时，可参照本标准给出的公式计算。

$$F_a = \Delta p \cdot A = 100A$$

当凝汽器内形成完全真空时， Δp 等于大气压，即 $\Delta p=100\text{kPa}$ ，故当制造厂未提供真空吸力时，可采用条文中公式。

同步电动机的短路力矩：若离心式压缩机由同步电动机驱动，当电机突然短路时，由于定子与转子之间的相互作用而产生短路力矩 M_o 。该力为偶然荷载，其动力系数 $\mu=2.0$ ，将短路力矩乘以动力系数，即简化成静力荷载。

短路力矩应由制造厂提供，若提不出时，可参照本标准公式计算。目前短路力矩计算公式较多，本标准选用的是机电制造部门提出的计算公式。

根据机电制造部门提出的计算公式乘以动力系数 $\mu=2$ ，即化为等效静力荷载作构件强度计算用。

7.2.3 为方便应用有限元软件进行承载力复核，给出了振动荷载动力系数和疲劳系数规定。当验算压缩机基础的承载力时，除考虑作用在基础上的静力荷载外，尚应考虑动力荷载的作用。该力是由转子不平衡所产生的振动荷载引起的，又被称为“等效静力荷载”。

现有的一些资料中，等效静力荷载的计算公式的表达形式大致相同，一般是将转子的振动荷载乘以疲劳系数和动力系数，将它转化为一个等效静力荷载，但其中系数的取值差异较大，其表达式为：

$$N = \eta r F_v$$

式中 N ——等效静力荷载；

η ——动力放大系数；

r ——疲劳系数；

F_v ——振动荷载。

这些公式的概念是建立在单自由度理论基础上的。式（7.2.3）中，疲劳系数取2，动力放大系数为10，并简化了表达形式。

7.2.4 为方便应用有限元软件进行承载力复核，给出了承载力极限状态荷载效应组合的原则和动内力、振动速度的组合方式。根据现行规范，增加地震组合和各类荷载效应组合的表达式。

等效静力荷载在竖向和横向不同时组合，因为竖向和横向实际上是同一振动荷载，为计算方便将

其分解为两个方向，即 $F_z = F \sin \varphi$ 及 $F_x = F \cos \theta$ ，因为都是取最大值作为两个方向计算动内力的荷载，但其相位差为 $\pi/2$ ，所以竖向与横向不应同时出现。

水平纵向与竖向、横向无直接关系，可能会同时出现，本应进行组合，但考虑到最大动内力出现的频率不同，而不应同时取峰值叠加。

按空间多自由度体系计算时，当其一方向的主振型出现时，其它两个方向的分量一般都很小，而其动荷载已将正常运行时的振动荷载增大了，已有较大的安全储备。因此当一个方向取最大动荷载时，其它方向的分量可以略去，所以无论竖向、横向、纵向都可以不进行叠加组合，即各项的等效静力荷载只考虑单向作用。

偶然组合时，短路力矩或地震作用出现是以正常运行为标准的，而动力荷载是以压缩机极限不平衡为标准计算出来的，较正常运行不平衡增大了，故将等效静力荷载乘以 0.25 的荷载组合值系数。

7.3 强度计算

7.3.1 由于纵向的等效静力荷载比横向小 1 倍，而柱子又是周边对称配筋，所以一般可不进行纵向框架计算，柱子配筋已经能满足承载力要求。纵向可按竖向荷载作用下的连续梁计算。按现行规范，本标准取可能出现的最不利的荷载组合进行承载力计算。

附录 A 多自由度有限元动力分析模型

对于高转速压缩机，地基对框架式基础振动的影响较小，可忽略底板和地基对振动的影响，直接将柱和底板的连接简化为固定支座。框架式压缩机基础动力分析一般采用梁单元和板壳单元模型，也可采用三维实体单元，但实体单元模型的计算量和复杂性会大大增加。

附录 B 离心式压缩机基础动力分析方法

针对动力分析的频域法和时域法，编写组在修编过程中采用 SAP2000 软件对多个实例进行大量的动力分析。为便于说明两种分析方法的实际应用，为设计人员在压缩机基础动力分析方面提供指导，在本附录中提供了一个压缩机基础有限元动力分析算例。另外，出于动力分析校验的目的，编写组还采用 STAADPro 软件对该算例进行了稳态动力分析，但是限于篇幅，这里仅给出了 SAP2000 软件的算例。

B.1 稳态频域分析方法

本节的稳态分析工况的参数选用参照 SAP2000 V23 版。扫频范围扩大到 0-1.25 倍振动荷载频率，可以获得完整的振动速度响应谱，以便模拟机器开车过程的振动形态。

B.2 振型分解时程分析方法

本节的时程分析工况的参数选用参照 SAP2000 V23 版。