DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2014.06.041

水电站厂房屋顶结构型式研究

马 涛, 曾 旭, 蔡 波
(中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘 要: 用 Ansys 软件对地处伊朗的某引水式半地面水电站厂房屋顶结构进行数值模拟分析。通过对厂房屋顶预应力梁或网架结构型式进行静动力计算分析比较,优选厂房屋顶结构型式,为本工程厂房屋顶设计提供科学依据。

关键词: Ansys 软件; 屋顶结构; 网架结构; 水电站厂房
中图分类号:TV731.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2014)06-0197-06

Study on type of roof structure for powerhouse of hydropower station

MA Tao, ZENG Xu, CAI Bo
(*Powerchina Zhongnan Enginering Coporation Limited, Changsha* 410014, *China*)

Abstract: This paper used Ansys software to simulate and analyze the roof structure of semi-ground powerhouse for a diversion hydropower station located in Iran. After analyzing and comparing the static and seismic results of prestressed beam structure and grid structure for the powerhouse roof, it selected an eligible roof structure which can provide a scientific basis for the design of powerhouse roof.

Key words: ansys software; roof structure; grid structure; powerhouse of hydropowe station

水电站厂房上部结构尺寸空间较大,结构相对单薄,所以比较不同的厂房屋顶构型式来确保厂房的安全运行是必要的。本文通过 Ansys 软件对地处伊朗的某引水式半地面水电站厂房屋顶结构进行数值模拟分析,通过对厂房屋顶预应力梁或网架结构型式进行静动力计算分析比较,优选厂房屋顶结构型式,为本工程厂房屋顶设计提供科学依据。

1 结构分析基本方法和理论

1.1 线弹性静力有限元基本理论[1-2]

线弹性静力有限元分析通常采用基于位移元的线弹性有限元法,以离散单元结点位移为基本变量,初始假定单元内的位移与结点位移存在插值函数关系,通过弹性力学的几何方程,物理方程以及最小位能原理建立单元刚度方程,按单元结点编号在整体坐标下进行坐标转换和刚度集成,得到整个结构的刚度矩阵,再根据单元等效结点荷载,位移边界条件,形成一系列线性方程。按直接解法或迭代法求得结点位移,再由几何方程和物理方程进一步得到各单元相应的应变和应力。

1.2 线弹性动力有限元基本理论方法[1-2]

线弹性动力有限元通过弹性力学变分原理建立动力问题有限单元表达格式——运动方程:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [P(t)] \quad (1)$$

式中:$[M]$ 为结构质量矩阵; $[C]$ 为结构阻尼矩阵; $[K]$ 为结构刚度矩阵; $\{u\}$ 为结点位移向量; $\{\dot{u}\}$ 为结点速度向量; $\{\ddot{u}\}$ 为结点加速度向量。

式(1)右项取地震载荷时,经过对上式变形整理可得类似方程:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{a\} \quad (2)$$

式中: $\{u\}$ 为结点相对地面位移向量; $\{\dot{u}\}$ 为结点相对地面速度向量; $\{\ddot{u}\}$ 为结点相对地面加速度向量; $\{a\}$ 为地面加速度向量。

关于上式的求解,由于地震分析的偶然性和地域性特点,荷载随时间变化很难确定。因此,在通常的振型叠加法基础上,引入多因素决定的具统计性的地震荷载——地震作用反应谱,按各固有频率在对应反应谱荷载下的作用效应叠加,得到结构的总作用效应,这种分析方法在工程上应用广泛。本文也采用地震作用反应谱法[3-4]。

2 结构计算模型

2.1 工程简介

水电站位于伊朗 Lorestan 省 Zagros 山区的 Rud-

收稿日期:2014-03-25; **修回日期**:2014-05-22
作者简介:马 涛(1983-),男,湖南长沙人,硕士,工程师,主要从事水工结构设计工作。

bar 河上,距首都德黑兰约 454 km。厂房处地面高程约 1 300 m。电站安装两台单 225 MW 立轴混流式水轮发电机组,电站额定流量 115.6 m^3/s,设计毛水头 422.3 m,总装机容量 450 MW。本工程为高地震区。厂房设计基准地震(DBE)采用重现期为 500 年的地震荷载,设计基准地震(DBE)水平 PGA 为 0.36 g,竖直 PGA 为 0.31 g[5]。

2.2 结算模型

本计算以 2#机组段为对象,沿厂房纵轴线方向总长为 27.0 m,沿厂房上下游方向宽度为 36.83 m,高度从高程 1 296.00 m 到 1 338.00 m,共 42.0 m。计算模型采用笛卡尔直角座标系,其 X 轴为水平方向,沿厂房纵轴指向左端为正(面向下游),Y 轴为铅垂方向,向上为正;Z 轴为水平方向,指向下游为正;坐标系原点取在水轮机机组中心线高程 1 300.00 m 处。整个计算模型共分成 21 953 个结点,15 086 个单元,网格见图 1(用梁单元模拟的柱子,用弹性杆模拟轻型网架作用)。

2.3 计算方案

为比较不同屋顶结构型式对上下游排架柱位移的影响,分别对屋顶采用预应力混凝土梁、网架屋盖结构两种情况下的排架结构进行了计算,具体计算方案及计算荷载见表 1。各计算方案中,运行层、发电机和水轮机层楼板厚度分别假定为 80、80 和 100 cm,相应的楼面均布活荷载分别为 10、5 和 5 kN/m^2。根据网架屋盖制造厂家的意见,网架屋盖结构采用弹性杆来模拟,弹性杆与排架柱顶部连接为铰接。

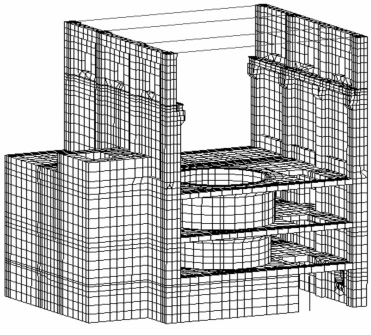

图 1 运行期厂房整体模型网格(轻型屋架方案)

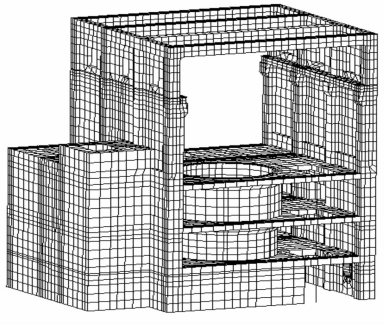

图 2 运行期厂房整体模型网格(预应力屋面梁方案)

表 1 屋顶结构计算方案和计算荷载[6-7]

计算方案	屋顶结构型式	桥机位置	计算情况	屋面折算荷载/(kN·m^{-2})	垂直轮压/ kN				水平制动力/ kN	
					小车偏上游侧		小车偏下游侧		横向	横向
					$P_{上}$	$P_{下}$	$P_{上}$	$P_{下}$	$T_{上}$	$T_{下}$
A-11	无屋顶支撑	机组中间	吊车满载(1)	5.5	750	150			14(→)	14(→)
A-12	无屋顶支撑	机组左侧								
A-13	预应力混凝土梁									
A-14	轻型网架									
A-21	无屋顶支撑	机组中间	吊车满载(2)	5.5			150	750	14(←)	14(←)
A-22	无屋顶支撑									
A-23	预应力混凝土梁	机组左侧								
A-24	轻型网架									

3 有限元计算成果及分析

3.1 静力分析

根据计算结果,整理了 2 号机组段上下游排架柱顶端(▽ 1338 m)、吊车轨道(▽ 1330 m)、运行层(▽ 1316 m)3 个高程部位在不同计算方案下的最大变位,详见表 2。其中 A-11、A-21 方案最大变位位于上游中间排架柱,其他计算方案最大变位均位于左侧排架柱。各计算方案的顺河向变位云图如图 3~10 所示。

比较方案 A-11 和 A-12、A-21 和 A-22 可以发现,桥机位于机组中间位置时,上下游排架柱最大变位要小于桥机位于机组左侧时的最大变位,因此后面其他方案计算时,均以桥机位于机组段左侧(面向进行下游)作为控制方案。

表 2　排架柱发电机层、轨顶和屋顶高程最大位移　　mm

高程	位移	A－11	A－12	A－13	A－14	A－21	A－22	A－23	A－24
▽ 1338	Δx	－0.39	0.74	0.50	0.53	－0.55	－0.36	－0.18	－0.23
	Δy	－1.42	－1.73	－2.23	－1.28	－1.22	－1.23	－1.97	－1.31
	Δz	13.30	18.48	2.96	7.36	－9.80	－13.21	－7.07	－7.53
▽ 1330	Δx	－0.58	－0.58	0.55	0.45	－0.73	－0.87	－0.56	－0.70
	Δy	－5.62	－5.29	－3.88	－4.56	－5.26	－4.57	－3.73	－4.20
	Δz	7.26	10.22	4.48	5.01	－5.07	－6.99	－7.85	－4.67
▽ 1316	Δx	－0.16	－0.14	－0.16	－0.14	－0.17	－0.12	－0.12	－0.12
	Δy	－0.81	－0.94	－0.90	－0.84	－0.69	－0.61	－0.76	－0.64
	Δz	0.17	0.23	－0.27	－0.14	－0.17	－0.15	－0.37	－0.17

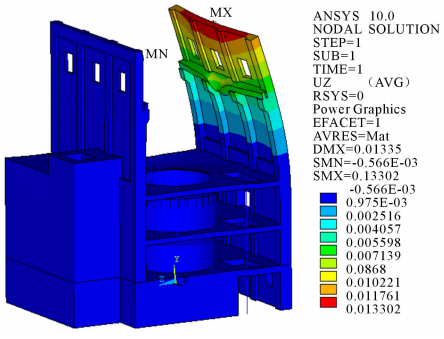

图 3　A－11 方案上下游方向变位云图(m)

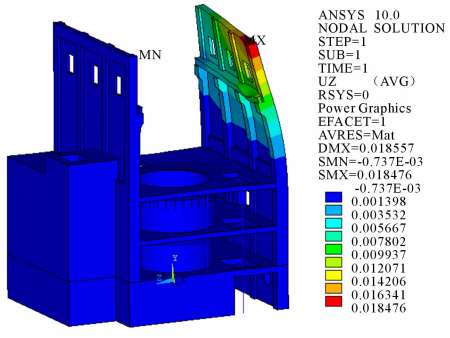

图 4　A－12 方案上下游方向变位云图(m)

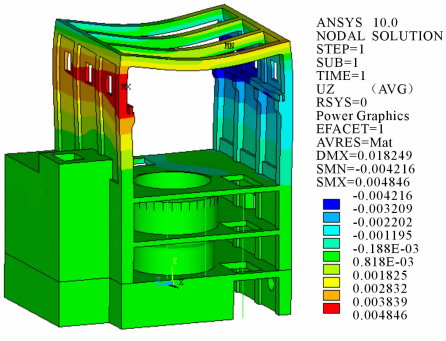

图 5　A－13 方案上下游方向变位云图(m)

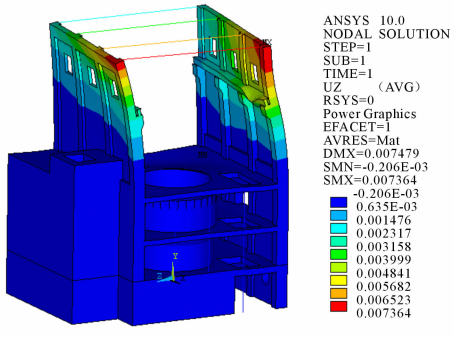

图 6　A－14 方案上下游方向变位云图(m)

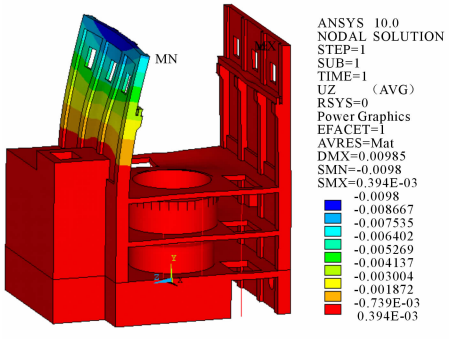

图 7　A－21 方案上下游方向变位云图(m)

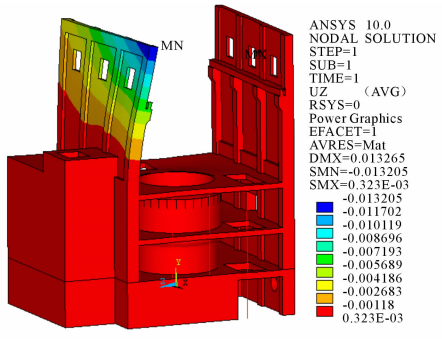

图 8　A－22 方案上下游方向变位云图(m)

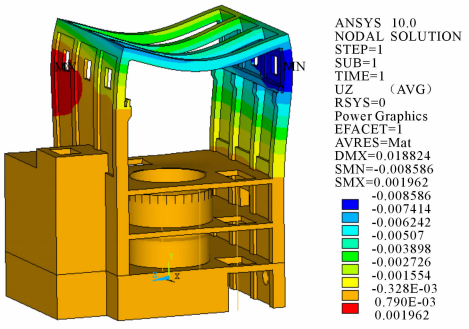

图 9 A－23 方案上下游方向变位云图(m)

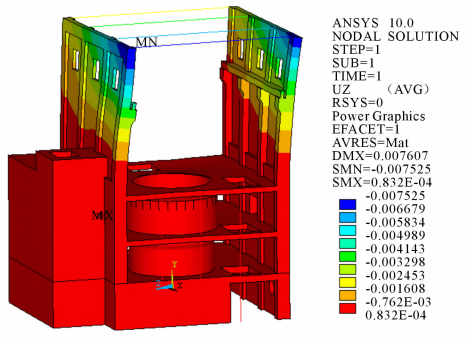

图 10 A－24 方案上下游方向变位云图(m)

从方案 A－13、A－14、A－23 和 A－24 可以看出,无论屋顶结构型式是采用预应力混凝土梁还是轻型网架结构,上下游排架柱顶部的最大变位均小于 11 mm,轨顶处的最大变位除 A－23 方案外均小于 7 mm,满足规范规定的要求。

但从变形云图 9 可以看出,预应力混凝土梁本身结构自重较大,其变形会对上下游排架柱结构变形产生不利的影响,比如 A－23 方案,因此推荐采用轻型网架的屋顶结构型式。

3.2 动力分析

为充分了解地震作用下厂房上部结构反应情况,本节分别针对轻型网架和混凝土预应力梁两种屋顶结构型式,考虑顺河向和竖直向地震作用,对 2#机组厂房上部结构进行分析,计算方法采用振型分解反应谱法,计算边界条件为模型底部施加全约束,荷载仅考虑结构地震惯性力的作用。

3.2.1 *厂房上部结构自振特性分析* 由于本工程为引水式地面厂房,上游不承受水压力,而下游侧水位较低,上下游动水压力对厂房自振特性的影响较小,故在模态计算中未予考虑。计算采用子空间迭代法提取 20 阶模态,详见表 3。

从表 3 可以看出:

(1)厂房上部结构上下游墙刚度较低,两种屋顶结构型式下,前 20 阶振型大都发生在这两个部位,以顺河向振动为主,且上下游墙顺河向振动第 1 阶自振频率较低,因此该处是厂房上部结构中抗振的重点关注部位。

(2)采用轻型网架屋顶时,绝大部分振型为上下游墙的顺河向振动,仅在第 7 阶发生横河向振动,在第 14、16、17、20 阶出现楼板的竖直向振动;采用预应力梁屋顶时,同样有较多的振型为上下游墙的顺河向振动,仅在第 14 阶发生横河向振动,从第 3 阶开始,频繁出现屋面梁的振动。

(3)总体来看,采用预应力混凝土梁屋顶结构型式时,厂房上部结构第 1、2 阶自振频率略高于屋顶结构型式为轻型网架时的自振频率,但从第 3 阶频率开始,轻型网架屋顶时的自振频率明显高于预应力混凝土梁屋顶结构型式。

(4)预应力梁结构能够更好地连接上下游墙,一定程度上增加了厂房上部结构的顺河向刚度,但由于预应力梁本身的自重较大,其本身的振动大大削弱了整体结构的刚度,频率分布比较密集,于厂房结构抗震产生不利的影响。

3.2.2 *厂房上部结构变形分析* 为直观地了解地震作用下厂房上部结构变形情况,整理了两种屋顶结构型式厂房上部结构在顺河向地震作用、竖直向地震作用以及两方向地震组合作用下的整体位移峰值、轨顶高程位移峰值,详见表 4。

由表 4 可以看出:

(1)两种屋顶结构型式下,运行层楼板以上部分的变位较大,运行层楼板以下变位较小。

(2)无论是轻型网架屋顶结构型式,还是预应力混凝土梁屋顶结构型式,厂房上部结构变位均以顺河向地震作用下为主,而竖直向地震作用下厂房上部结构整体变位相对较小。

顺河向地震作用下,两种屋顶结构型式各方向变位均以顺河向位移为主,竖直向位移其次,横河向位移相对较小;竖直向地震作用下,两种屋顶结构型式中竖直向位移均大于水平向位移。

(3)比较两种屋顶结构型式,预应力混凝土梁屋顶横河向位移和竖直向位移均要大于轻型网架屋顶时的厂房顶部的位移,可以看出预应力混凝土梁自身的振动会给整体结构带来不利影响。但采用预应力混凝土梁时,整体结构的顺河向位移及上下游墙的横河向位移和竖直向位移均有所减小。

表 3　厂房结构自振频率与振型　　Hz

阶次	频率	轻型网架屋顶结构型式模态	频率	预应力梁屋顶结构型式模态
1	1.42	上下游墙顺河向振动	1.57	上下游墙顺河向振动
2	2.26	上下游墙顺河向扭振	2.59	上下游墙顺河向扭振
3	5.02	上下游墙顺河向扭振	4.97	上下游墙顺河向扭振、屋面梁振动
4	5.94	上下游墙顺河向扭振	5.13	屋面梁竖直向振动
5	7.07	上下游墙顺河向扭振	5.23	上下游墙顺河向扭振
6	7.31	上下游墙顺河向扭振	5.34	屋面梁横河向振动
7	7.82	上游墙横河向振动、下游墙顺河向扭振	5.44	屋面梁横河向振动
8	8.56	上下游墙顺河向扭振	5.99	屋面梁横河向振动
9	9.17	上游墙顺河向扭振、下游墙横河向振动	6.05	屋面梁横河向振动
10	9.49	上下游墙顺河向扭振	6.38	屋面梁横河向振动
11	10.37	上下游墙顺河向扭振	6.78	屋面梁竖直向振动
12	11.02	上部整体结构顺河向扭振	7.59	上部整体结构顺河向扭振
13	12.51	上下游墙顺河向扭振	7.89	上下游墙顺河向扭振
14	15.13	楼板竖直向振动	7.93	上部整体结构横河向扭振
15	15.54	上下游墙顺河向扭振	9.29	上下游墙顺河向扭振
16	16.23	上下游墙顺河向扭振、楼板竖直向振动	9.33	上下游墙顺河向扭振
17	16.75	楼板竖直向振动	9.70	上下游墙顺河向扭振、屋面梁振动
18	17.03	上部整体结构顺河向扭振	10.71	上下游墙顺河向扭振
19	17.49	上下游墙顺河向扭振	11.28	上部结构整体顺河向扭振
20	18.13	上部结构顺河向扭振、楼板竖直向扭振	11.87	上游墙顺河向扭振、屋面梁振动

表 4　不同屋顶结构型式厂房上部整体位移峰值和轨顶高程位移峰值　　mm

位移峰值		轻型网架			预应力混凝土梁		
		顺河向地震作用	竖直向地震作用	组合作用	顺河向地震作用	竖直向地震作用	组合作用
厂房上部整体位移峰值	Δx	2.20	0.33	2.21	4.28	0.96	4.34
	峰值位置	上游墙最左侧顶部	下游墙中间排架柱顶部	上游墙最左侧顶部	中间混凝土梁中部	机组右侧混凝土梁中部	中间混凝土梁中部
	Δy	4.10	1.66	4.10	6.39	7.74	8.18
	峰值位置	下游中间排架柱牛腿处	母线层楼板右侧孔口处	下游中间排架柱牛腿处	中间混凝土梁靠下游侧	机组右侧混凝土梁中部	机组右侧混凝土梁中部
	Δz	47.14	0.36	47.14	37.70	2.83	37.71
	峰值位置	上游墙最右侧顶部	上游墙中间窗口附近	下游墙最右侧顶部	下游墙最右侧顶部	下游墙右侧靠近轨顶处	下游墙最右侧顶部
轨顶高程位移峰值	Δx	1.73	0.22	1.73	2.61	0.35	2.63
	Δy	3.78	0.12	3.78	3.82	0.28	3.83
	Δz	24.55	0.32	24.56	24.56	2.79	24.69

3.2.3　*预应力混凝土梁的位移和应力分析*　鉴于采用预应力混凝土梁屋顶结构型式时,预应力梁结构本身的变形较大,于厂房上部整体结构的安全不利,因此对预应力混凝土梁的位移和应力予以分析,整理了预应力在地震作用下的位移与应力峰值,详见表 5。

从表 5 可以看出,采用预应力混凝土梁屋顶结构型式时,预应力梁的顺河向变位和竖直向变位均较大,而其较大的竖直向应力和顺河向应力给预应力梁本身的配筋带来相当的难度。因此,从预应力

表 5　预应力混凝土梁在地震作用下的位移与应力峰值

地震作用	位移峰值/mm			应力峰值/MPa		
	Δx	Δy	Δz	X 向	Y 向	Z 向
顺河向地震作用	4.28	6.39	37.62	1.02	3.34	9.70
竖直向地震作用	0.96	7.74	1.39	0.17	1.18	3.22
地震组合作用	4.34	8.18	37.62	1.03	3.48	9.79

梁本身的结构安全角度,并不推荐采用混凝土预应力梁的屋顶结构型式。

4 结 语

预应力混凝土梁本身结构自重较大,其变形会对上下游排架柱结构变形产生不利影响。特别在地震情况下,预应力梁本身较大的自重振动大大削弱了整体结构的刚度,频率分布比较密集,于厂房结构抗震产生不利影响。再者,其较大的竖直向应力和顺河向应力给预应力梁本身的配筋带来相当大的难度。所以,对于大跨度的水电站厂房结构,仅从受力方面考虑,推荐使用轻质网架结构屋顶型式。

参考文献:

[1] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,1979.
[2] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
[3] 李 围,叶裕明,刘春山,等. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 第二版,北京:中国水利水电出版社,2007.
[4] 李 权. ANSYS 在土木工程中的应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2005.
[5] The Islamic Republic of Iran Ministry of Energy. Employer's requirements of rudbar lorestan dam and power project (VOLUME 2)[R]. Teheran: The Islamic Republic of Iran Ministry of Engergy,2005.
[6] 水利部天津水利水电勘测设计研究院. SL 266 - 2001,水电站厂房设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
[7] 电力工业部西北勘测设计研究院. DL/T 5057 - 2009,水工混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

(上接第 196 页)

平年中,灌溉次数均为:地面灌 < 喷灌 < 滴灌。

伊吾、青河虽都处于新疆东北部,但两地海拔相差较大,受温度、风速等气象因素影响,导致两地作物需水量存在较大差异。伊吾地区 1961 - 2012 年作物灌溉需水量为 480 ~ 850 mm,而青河地区为 150 ~ 650 mm。因此相同水平年同一灌溉方式条件下,伊吾地区的灌溉次数、灌溉定额均大于青河地区。

5 结 语

作物的灌溉制度与作物的产量有着密切的联系,制定北疆高海拔地区合理的苜蓿灌溉制度是牧草种植业的关键。通过本次北疆苜蓿灌溉制度的计算分析,得出以下结论:

(1)相同水平年内研究地区均为滴灌灌溉定额最小、灌水次数最多。

(2)由于受温度、风速等气象因素影响,伊吾、青河两地的灌溉制度差别较大。相同水平年同一灌溉方式条件下,伊吾地区的灌溉次数、灌溉定额均大于青河地区。

(3)各水平年内,研究地区 7、8 月份的灌水次数所占全生育期的比例均较大,其中喷灌、滴灌均超过 50%。

参考文献:

[1] 郭克贞. 草原节水灌溉理论与实践[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社,2003.
[2] 杰恩斯·马坦,张展羽,吾提库尔·胡斯曼,等. 新疆草原生态问题及其保护措施探讨[J]. 水利经济,2007,25(6): 73 - 75.
[3] 刘 虎,苏佩凤,郭克贞,等. 北疆干旱荒漠地区春小麦与苜蓿灌溉制度研究[J]. 中国农学通报,2012,28(3): 187 - 190.
[4] 范文波,刘换芳,朱保荣,等. 弃耕地苜蓿耗水规律及灌溉制度研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3): 165 - 166 + 173.
[5] Dandy G C,Hassanli A M. Optimum design and operation of multiple subunit drip irrigation systems[J]. Journal of irrigation and drainage engineering,1996,122(5): 265 - 275.
[6] 程冬玲,李富先,林性粹. 苜蓿田间地下滴灌效应试验研究[J]. 中国农村水利水电,2004(5): 1 - 3.
[7] 宋 博,夏 婷. 作物需水量确定方法及适用条件浅谈[J]. 科技情报开发与经济,2009,19(19): 134 - 135 + 138.
[8] 陈玉民,郭国双,王广兴,等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
[9] 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京: 水利电力出版社,1986.
[10] 王云宝, 周国兴. 牧草灌溉适宜土壤水分指标综述[J]. 黑龙江水利科技,2006,34(3): 57 - 58.